

「次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発 (超低電力デバイスプロジェクト)」

事業原簿【公開】

担当部	国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 IoT推進部
-----	-------------------------------------

目次

概要 プロジェクト用語集

I. 事業の位置付け・必要性について

- 1. NEDOの関与の必要性・制度への適合性I-1
 - 1.1 NEDOが関与することの意義I-1
 - 1.2 実施の効果(費用対効果)I-4
- 2. 事業の背景・目的・位置づけI-6

II. 研究開発マネジメントについて

- 1. 事業の目標II-1
- 2. 事業の計画内容II-3
 - 2.1 研究開発の内容II-4
 - 2.2 研究開発の実施体制II-12
 - 2.3 研究の運営管理II-16
 - 2.4 研究開発成果の実用化、事業化に向けたマネジメントの妥当性II-18
- 3. 情勢変化への対応II-19
- 4. 中間評価結果への対応II-22
- 5. 評価に関する事項II-27

III. 研究開発成果について

- 1. 事業全体の成果III-1
(最終目標の達成状況 III-17 特許出願件数 III-28 学会・論文発表件数 III-34)
- 2. 研究開発項目毎の成果III-105
 - 2.1 研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発
 - (1)-(i) ABI装置高度化III-115
 - (1)-(ii) ABI装置仕様検討III-130
 - (1)-(iii) CSMの開発III-196
 - (1)-(iv) EUV明視野顕微鏡観察技術の開発III-217
 - (2)-(i) PI装置仕様検討III-229
 - (2)-(ii) EUVマスクパターン欠陥検査装置コア技術開発III-312
 - (3)-(i) EUVレジスト材料技術開発III-331
 - (3)-(ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立III-365
 - (3)-(iii) DSA技術開発III-417
 - (3)-(iv) アウトガスデータベースの構築III-474
 - (3)-(v) 材料設計III-482
 - (3)-(vi) DSA材料技術開発III-487
 - (3)-(vii) DSA欠陥解析評価機構解明III-491
 - (3)-(viii) DSAプロセスシミュレーション技術開発III-499
 - (3)-(ix) DSA材料合成技術開発III-501
 - 2.2 研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発
 - (4)-(i) 高感度化に係わるレジスト材料設計指針の開発III-504
 - (4)-(ii) 高感度化の為に酸増殖材の開発III-511

(4)-(iii) EUVレジスト高感度化の検証	III-519
(4)-(iv) 高解像度微小面積露光機の研究開発	III-540

IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて

1. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	IV-1
------------------------------	------

(添付資料)

- ・プロジェクト基本計画
- ・事前評価関連資料(事前評価書)
- ・新成長戦略(2010年6月閣議決定)

概要

		最終更新日	平成 28 年 6 月 6 日
プログラム名	IT イノベーションプログラム		
プロジェクト名	次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発（超低電力デバイスプロジェクト）	プロジェクト番号	P10025
担当推進部/担当者	電子・材料・ナノテクノロジー部 小野英輝（2011年 3月～2011年 10月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 青山敬幸（2011年 10月～2013年 8月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 明日徹（2013年 6月～2013年 8月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 井上博文（2013年 8月～2015年 10月） 電子・材料・ナノテクノロジー部 片岡茂（2015年 10月～2016年 3月）		
0. 事業の概要	次世代の半導体露光方式として最有力視されている極端紫外線（Extreme Ultra Violet、以下、「EUV」という。）リソグラフィにおいて、hp11nm以細に対応可能な EUVマスク検査関連技術並びにレジスト材料基盤技術開発として、EUVマスクブランクやマスクパターンの欠陥検査・評価・同定技術、およびレジスト材料の露光性能やアウトガスを含めた材料開発や評価技術など、hp11nm以細に対応可能な技術の基盤を確立する。		
I. 事業の位置付け必要性について	我が国経済を支える先端産業である、情報家電、コンピュータ、通信装置、自動車、医療機器などの競争力強化に不可欠な基盤技術は、半導体 LSI の微細化技術である。これまで、微細化技術の進展による半導体 LSI の集積度は、3 年で 4 倍という急速な速度で推移してきており、2010 年には、技術世代 hp45nm の製品が量産され始めている。今後も情報家電やロボットなどのシステムに求められる高集積化・低コスト化および低電力化を同時に実現するためには、更なる微細化が必要であり、引き続き重要な技術課題である。 海外では産学官連携の下で、これらの技術課題の解決に向け、欧州の imec や米国の SEMATECH といった様々なコンソーシアムやアライアンスを中心に、精力的な取り組みがなされ、世界の関連企業を取り込んだグローバルな開発が行われている。一方、日本では世界的な半導体ビジネス・技術開発のパラダイム変化に伴い、最先端プロセスを指向するデバイス企業は減少しているものの、装置・材料等の関連産業においては未だ強みを維持しており、日本の強みを活かすことにより世界に先駆けて半導体 LSI のさらなる更なる微細化という重要な技術課題を克服できると期待される。 以上のように、本プロジェクトは、我が国の半導体関連産業（デバイス、マスク、装置及び材料）の国際競争力強化に貢献すると期待されるため、本プロジェクト推進の必要性は高い。		
II. 研究開発マネジメントについて			
事業の目標	EUV マスクブランク（多層膜を積層したマスク基板）やマスクパターン（ブランク表面上の EUV 光の吸収層パターン）の欠陥検査・評価・同定技術、およびレジスト材料の露光性能やアウトガスを含めた材料開発や評価技術など、hp11nm 以細に対応可能な技術の基盤を確立する。NEDO ロードマップ上の半導体 LSI 微細化に資する。本プロジェクトでは、波長 13.5nm の EUV を用いる EUV リソグラフィにかかるマスク技術と関連検査技術、レジスト材料等の課題に取り組む。EUV リソグラフィはマスクパターンの光学的縮小投影方式であり、露光波長がエキシマレーザーの 1/10 以下であるため hp22nm 以細の技術領域に適用可能であること等から、次世代リソグラフィの最有力候補と位置づけられている。 【共同研究】研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」 EUV マスク検査・レジスト材料技術開発では、EUV マスクブランク欠陥検査技術、EUV マスクパターン欠陥検査技術、レジスト材料評価技術に関する基盤技術開発目標として以下を提示する。 【中間目標】 2013 度末までに以下の目標を達成する。 （1）EUV マスクブランク欠陥検査技術開発 hp16nm 微細加工技術に対応する EUV マスクブランクの許容欠陥の指標、および、EUV マスクブランク欠陥検査装置において 6 インチブランク全域にわたり位相欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能な EUV マスクブランク欠陥検査基盤技術を確立する。また、hp11nm に対応するマスクブランク欠陥検査技術における課題を明確にする。		

(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

hp16nm 微細加工技術に対応する EUV マスクパターンの許容欠陥の指標、および、EUV マスクパターン欠陥検査装置において 6 インチブランク全域にわたりパターン欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能な EUV マスクパターン欠陥検査基盤技術を確立する。また、hp11nm に対応するマスクパターン欠陥検査技術における課題を明確にする。

(3) EUV レジスト材料技術開発

解像度 hp16nm のレジストについて、LWR (Line Width Roughness)、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。また、hp11nm に対応するレジスト材料における課題を明確にする。

【最終目標】

2015 年度末までに以下の目標を達成する。

(1) EUV マスクブランク欠陥検査技術開発

hp11nm 以細の微細加工技術に対応する EUV マスクブランクの許容欠陥の指標、および、EUV マスクブランク欠陥検査装置において 6 インチブランク全域にわたり位相欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能な EUV マスクブランク欠陥検査装置基盤技術を確立する。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

hp11nm 以細の微細加工技術に対応する EUV マスクパターンの許容欠陥の指標、および、EUV マスクパターン欠陥検査装置において 6 インチブランク全域にわたりパターン欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能な EUV マスクパターン欠陥検査装置基盤技術を確立する。

(3) EUV レジスト材料技術開発

解像度 hp11nm 以細のレジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。

NAND フラッシュメモリの微細化に関する国内企業の開発動向に合わせるため、「(3)EUV レジスト材料技術開発」の最終目標を下記のように変更した。(基本計画の変更(2013 年 2 月))

解像度 hp11nm 以細のレジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。また、開発した EUV レジストをベースに他のレジスト材料を組み合わせることで、hp11nm 以細のレジスト技術を実現する。

【委託】 研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」

EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発では、EUV マスクブランク欠陥検査装置開発、EUV マスクパターン欠陥検査装置開発、EUV レジスト材料基礎研究に関する目標として以下を提示する。

【最終目標】

(1) EUV マスクブランク欠陥検査装置開発

hp11nm 以細に対応する BI 装置の設計を完了させると共に、装置構成において核となる要素技術の有効性を明確化する。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査装置開発

hp11nm 以細に対応する PI 装置の設計を完了させると共に、装置構成において核となる要素技術の有効性を明確化する。

(3) EUV レジスト材料基礎研究

得られた知見や新規技術に関する研究成果が、hp11nm 以細へのレジスト材料開発にとって有効であることを示す。

(4) EUV レジスト材料設計及び評価基盤技術開発

高解像度微小面積露光機を活用すること等により、hp11nm 以細対応 EUV レジスト材料における材料設計手法及び評価の基盤技術を開発する。

事業の計画内容	主な実施事項	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	H27fy	
	NEDO 技術開発 研究開発項目① [共同研究]		→					
	NEDO 技術開発 研究開発項目② [委託]		→			→		
開発予算 (単位：百万円) 契約種類： 委託 共同研究(負担率 1/2)	会計・勘定	H22fy	H23fy	H24fy	H25fy	H26fy	H27fy	総額
	一般会計	0	2,999	1,432	0	0	0	4,431
	特別会計 (需給)	0	0	0	1,643	2,307	1,642	5,592
	総予算額	0	2,999	1,432	1,643	2,307	1,642	10,023
	(共同研究) 負担率 1/2	0	864	1,432	1,643	1,602	1,000	6,541
	(委託)	0	2,135	0	0	705	642	3,482
開発体制	経産省担当原課	商務情報政策局 情報通信機器課						
	プロジェクト リーダー	渡邊久恒 株式会社 EUVL 基盤開発センター 代表取締役社長 (2011年3月～2014年3月) 森一朗 株式会社 EUVL 基盤開発センター 代表取締役社長 (2014年4月～)						
	委託先	<p>[共同研究] 研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」</p> <ul style="list-style-type: none"> ・共同研究先： 株式会社 EUVL 基盤開発センター (EIDEC) ※EIDEC 参加企業： 旭硝子株式会社 大日本印刷株式会社 富士フイルム株式会社 HOYA 株式会社 JSR 株式会社 株式会社ニコン 日産化学工業株式会社 ルネサスエレクトロニクス株式会社 信越化学工業株式会社 東京エレクトロン株式会社 東京応化工業株式会社 凸版印刷株式会社 株式会社東芝 国立大学法人北海道大学 ・共同実施先： レーザーテック株式会社 株式会社荏原製作所 東京エレクトロン株式会社 国立研究開発法人産業技術総合研究所 ・再委託先： 国立大学法人大阪大学 公立大学法人兵庫県立大学 国立大学法人東北大学 国立大学法人東京工業大学 国立大学法人京都大学 						

		<ul style="list-style-type: none"> • 共同開発（民間PJ） <ul style="list-style-type: none"> インテルコーポレーション（米国） サムスン電子（韓国） サンディスクコーポレーション（米国） SKハイニックス（韓国） 台湾セミコンダクター・マニュファクチャリング・カンパニー（台湾） [委託] 研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」 • 委託先： <ul style="list-style-type: none"> 株式会社 EUVL 基盤開発センター（EIDEC） ※EIDEC 参加企業： <ul style="list-style-type: none"> 旭硝子株式会社 大日本印刷株式会社 富士フイルム株式会社 HOYA 株式会社 JSR 株式会社 日産化学工業株式会社 ルネサスエレクトロニクス株式会社 信越化学工業株式会社 東京応化工業株式会社 凸版印刷株式会社 株式会社東芝 • 共同実施先： <ul style="list-style-type: none"> レーザーテック株式会社 株式会社荏原製作所 • 再委託先： <ul style="list-style-type: none"> 公立大学法人兵庫県立大学 国立大学法人大阪大学 学校法人東京理科大学 国立研究開発法人産業技術総合研究所 • 共同開発（民間PJ） <ul style="list-style-type: none"> インテルコーポレーション（米国） サムスン電子（韓国） サンディスクコーポレーション（米国） SKハイニックス（韓国） 台湾セミコンダクター・マニュファクチャリング・カンパニー（台湾）
--	--	--

<p>情勢変化への対応</p>	<p>(1) 東日本大震災 2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災により損傷した産業技術総合研究所のスーパークリーンルームにある機器の修理のため、研究開発項目②の委託費用を2011年6月に2.2億円増額した。</p> <p>(2) 他のレジスト開発 NANDフラッシュメモリの微細化に関する国内企業の開発動向に合わせるため、開発したEUVレジストをベースに他のレジスト材料を組み合わせるによりhp11nm以細のレジスト技術を実現する開発を2013年度から開始した。</p> <p>(3) フルフィールド露光評価 2012年度までのEUVレジスト材料技術開発において、中間目標であるhp16nmを上回る解像度hp15nmのEUVレジスト材料の開発に成功した。これらの成果を受けて、実用化を見据え基本性能が実証されたEUVレジスト材料のフルフィールド露光機による評価を実施する。</p> <p>(4) レジストhp11nm対応露光装置 hp11nmのレジスト材料開発に対しては、新たにNA=0.5のHSFETを製作する。</p> <p>(5) 技術推進委員会 (5)-1 第1回技術推進委員会(2012年2月8日実施) 2012年2月8日に、研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」の評価を兼ねて第1回技術推進委員会を実施した。 事業の必要性、重要性を認めて頂き、達成された成果も妥当との意見を頂いた。これを基に、研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」は研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」と統合して共同研究事業を実施することが了承された。 (5)-2 第2回技術推進委員会(2012年11月13日実施) 設定目標に対する進捗の達成度を確認したうえで、委員の専門性を活かした中間目標達成のためのコメントを頂いた。</p> <p>(6) 中間評価(2013年8月実施)における評価コメント/提言に対する対応 ※詳細は「中間評価結果への対応」欄に記載。</p> <p>(7) EUV光源の高出力化、高信頼性化の遅れへの対応 EUV光源の高性能化に頼る開発を改め、現在の低出力(~100W)のEUV光源でも事業目標であるhp11nm以細に対応したEUV露光技術の基盤技術を確立するため、高感度/高解像度EUVレジスト開発を加速することとした。 ・平成26年度基本計画を改定し、研究開発項目②(4)EUVレジスト設計及び評価基盤技術開発」を追加。その計画に基づいて新たに委託事業を公募。 ・上記、委託事業に対して、hp11nm以細対応レジストの評価環境の整備の前倒しを図るため、さらに加速資金を投入して、新レジスト材料の研究開発を促進 ・高感度化と低LWR化を両立する設計手法を確立し、hp11nm以細に対応する、高解像、低LWR(Line Width Roughness)、高感度なレジスト材料の開発、及び、低アウトガスを満たすレジスト材料を開発した。 ・高NA化(NA=0.3 → 0.5)したHSFETの開発により、国内設備のみでhp11nm以細レジストの実験・評価を実施することが可能になり開発を加速した。 投影光学系の総合収差0.29nm RMSを達成した。EUV光源、照明光学系、投影光学系および機構系の総合調整を行い、従来の10倍以上のウェハ面上照度、ならびにhp11nmL&Sパターンおよびhp15nmの1:1ホールパターンの解像を確認し、hp11nm以細対応のレジスト材料評価基盤技術を確立させた。 ・フルフィールド露光評価により、EUVレジストの基盤的評価に続けて実用化評価をいち早く行う体制を構築し、国際競争上の優位性を確立した。 ・EUVマスクブランク欠陥検査装置向けの高輝度光源の仕様明確化、性能評価、及びインターフェイスの構想設計を実施し、EUVマスクブランク欠陥検査の安定性、メンテナンス性を大幅に向上させ、欠陥検査装置実用化への基盤技術を確立させた。</p>
-----------------	---

<p>中間評価結果への対応</p>	<p>中間評価（2013年8月27日実施）における評価コメント／提言に対して以下の対応を行った。</p> <p>（１） 情報収集とベンチマークの実施</p> <ul style="list-style-type: none"> ・調査事業（公募）を実施し、EUV その他の微細化露光技術に関する情報収集をしてロードマップ（2015年～2020年）を作成。 ・製品品種によって微細化露光技術の取り込み方と時期が異なることを踏まえ、製品品種毎にEUV 露光技術の具体的な実用化／事業化の方向性を再確認した。 ・EUV 露光技術を単独で使用するだけでなく、他の露光技術（ArF 液浸露光やダブルパターニングなど）や新規技術（DSA 技術など）との組み合わせなどの可能性があることを確認した。 ・平成26年度の基本計画を変更し、新規の委託事業として研究開発テーマを追加。hp11nm 以細対応への基盤技術を確立した。 <p>（２） マスクパターン欠陥検査技術開発の再検討</p> <ul style="list-style-type: none"> ・他方式と比較した電子線写像投影（PEM）方式による欠陥検査の利点を明確化した。 <p>＜差別化ポイント＞</p> <ol style="list-style-type: none"> ① 面照射によるTDIセンサーでの2D化 ② 高スループット化 ③ DUV欠陥検査技術との親和性大 <p>この点をマスクパターン欠陥検査技術を実用化する上での差別化ポイントとして優位性ある製品仕様を再設定し、重点的に研究開発を進めた。</p> <p>これにより EUV マスクパターン欠陥検査装置の実用化・事業化が明確になった。</p> <p>（３） レジスト開発の加速</p> <p>EUV 光源の高出力化だけに頼らず、hp11nm 以細に対応するためレジスト材料の高感度化・高解像度化やプロセス最適化、そのための実験環境・体制の拡充を図った。</p> <p>＜具体的な対応内容＞</p> <ol style="list-style-type: none"> ①新規レジスト材料及び新規プロセス手法に関する研究開発テーマ（下記）を追加 <ul style="list-style-type: none"> ・ポリマー型酸増殖型レジスト ・メタル系レジスト ②加速資金投入によるレジスト材料の評価環境の整備の前倒し <ul style="list-style-type: none"> ・高NA（0.3→0.5）化したHSFETの製作 ③研究体制の拡充化 <ul style="list-style-type: none"> ・研究開発体制の強化を図り、リンス液のプロセス最適化等、プロセス技術に係る基盤技術を構築した。 <p>以上の対応により、hp11nm 以細対応のレジスト材料開発の基盤を確立した。</p> <p>（４） 実用化に向けた取り組み明確化</p> <ul style="list-style-type: none"> ・調査事業（公募）による情報収集の結果や、状況変化等を踏まえ、マスクブランク／マスクパターン欠陥検査装置及びレジスト材料の実用化・事業化について、本プロジェクトに参画する企業16社各社と「実用化推進会議」の開催し検討した。 ・EUV マスクブランク欠陥検査装置について、量産装置に不可欠な稼働率及びメンテナンス性を向上させるべく、EUV 光源の運転条件の最適化、及び光源インターフェースの改良を行い、実用化への基盤技術を確立させた。 	
<p>評価に関する事項</p>	<p>事前評価</p> <p>研究開発項目②の評価</p> <p>中間評価</p> <p>事後評価</p>	<p>2010年度実施 担当部 電子・材料・ナノテクノロジー部</p> <p>2011年度（2012年2月8日）技術推進委員会において研究開発項目②の評価を実施</p> <p>2013年度 中間評価実施（2013年8月27日）</p> <p>2016年度 事後評価実施（2016年6月21日）</p>

<p>Ⅲ. 研究開発成果について</p>	<p>本研究開発の成果は、世界最高水準の EUV マスク BI 装置、EUV マスク PI 装置、EUV レジスト材料の実現にあたりるとともに、最先端半導体デバイスプロセス市場における日本企業の競争力強化が可能となる。つまり、EUV リソグラフィに関する技術開発においては、製造装置開発・材料開発・プロセス開発など広い範囲の連携が必要と想定される。それぞれが幅広く、かつ有機的に関係するため、製造装置開発に直接かかわる事業者だけでなく、材料メーカー、デバイスメーカーをはじめとする種々の関連産業においても、技術の底上げと雇用の促進が期待され、同時に、EUV リソグラフィの専門性を備えた人材の育成が期待できる。</p>
	<p>[共同研究] 研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」</p> <p>(1) EUV マスクブランク欠陥検査技術開発 BI 装置を組上げて完成させ、プログラム欠陥を用いた画像データから、基本機能が達成されていることを確認した。BI 装置の欠陥検出効率向上のための基本検討を行って基本仕様をまとめ、マスクブランク欠陥のウェハへの転写性を高精度で評価して欠陥検出感度の要求値を明確にした。</p> <p>(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発 PI 装置を高感度化、及び高スループット化するためのコア技術を開発する。EUV マスクの電子線像の確認と、照明光学系と結像光学系の電子透過率に注目しその性能を精密に評価する手法を確立した。</p> <p>(3) EUV レジスト材料技術開発 EUV レジスト材料開発を進め、解像度、LWR、感度、アウトガスの観点で優れた特性を持つレジスト材料・プロセスを開発する。さらに、hp11nm に対する開発目標とマイルストーンを設定する。EB 照射方式によるレジストアウト評価手法を確立し、EUV 光照射方式（兵庫県立大学への再委託）との相関を取得した。そのレジストアウトガス評価手法の妥当性の検証をする。EUV レジスト技術をベースに他のレジスト材料を用いて、EUV による転写パターンのサイズの縮小を可能にするレジストプロセス技術を開発し、hp11nm 以細のパターンが形成できる材料・プロセス技術を実現した。</p>
	<p>[委託] 研究開発項目②「EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」</p> <p>(1) EUV ブランク欠陥検査装置開発 EUV 光を用いた量産のための BI 装置を実現するための装置の基本設計をおこない、より高効率化を目指し、光源、光学系等の最適設計を実施した。照明強度を高輝度化させることにより、45 分程度で欠陥検査できることを達成した。</p> <p>(2) EUV マスクパターン欠陥検査装置開発 電子ビームを用いた写像投影方式による欠陥検査技術を確認する為の高分解能写像投影光学系を開発した。hp11nm に対応した高分解能写像投影方式電子ビーム光学系に対する要求仕様を明確にした。上記にて明確化される高分解能写像投影方式電子ビーム光学系の要求仕様に基づいて、EUV マスク欠陥検査装置の核となる新たに開発する高分解能写像投影方式電子ビーム光学系を製作した。</p> <p>(3) EUV レジスト材料基礎研究 これまでのレジストモデルの拡張を行うとともに逆解析アルゴリズムの高精度化を行い、HSFET (High NA Small Field Exposure Tool) によるレジスト露光に適用し、hp11nm に向けたレジスト設計指針を得た。hp11nm レジストパターン作成に重要な工程である現像・リンス工程に対して行い、該パターン形成に向けての材料、現像（液）プロセス、リンス（液）プロセス方針を明確にした。 ・アウトガスとコンタミ膜厚評価の基礎手法を習得したうえで、レジスト材料の量産プロセスの使用条件を考慮したアウトガスとコンタミ膜厚評価用サンプル作成技術を構築し評価技術の標準化に向けた提案を行った。</p> <p>(4) EUV レジスト材料設計及び評価基盤技術開発 HSFET の総合収差を 0.6nmRMS 以内を実現し、hp11nm 以細対応の EUV レジスト材料における材料設計手法及び評価の基盤技術を確立した。</p>

	投稿論文	「査読付き」219件、「その他」189件
	特許	「出願済」81件（うち国際出願21件）、「登録」9件、「実施」0件 特記事項：なし
	その他の外部発表（プレス発表等）	<ul style="list-style-type: none"> ・「ルネサス、共同開発に参加，次世代半導体の企業連合始動材料含め競争力を確保」 （日本経済新聞 9面2011年6月10日） ・「超低電力デバイス実現へ開発着手，次世代半導体微細加工・評価基盤技術 NEDO など」 （化学工業日報朝刊 5面 2011年6月13日） ・「EUV露光」実用化へ光」 （日経産業新聞 朝刊 1面 2015年6月13日） ・シンポジウム/成果報告会開催 EIDEC シンポジウム 2011 （2011年6月17日 品川プリンスホテル 170名） EIDEC シンポジウム 2012 （2012年5月11日 コクヨホール（品川） 200名） EIDEC シンポジウム 2013 （2013年5月21日 コクヨホール（品川） 230名） EIDEC シンポジウム 2014 （2014年5月20日 コクヨホール（品川） 243名） EIDEC シンポジウム 2015 （2015年6月3日 コクヨホール（品川） 246名） EIDEC 成果報告会 （2016年3月24日 つくば国際会議場 126名）
IV. 実用化・事業化に向けての見通し及び取り組みについて	<p>本プロジェクトは2015年度で終了するが、その後、マスク検査装置開発、EUVレジスト材料開発を企業において本格化し、hp16nm 対応は2015年から、hp11nm 以細対応は2017年からプロトタイプの検証を開始し、2~3年の量産化開発を経て量産製品出荷を見込む。これによりITRS^(*)ロードマップに対応するので、検査装置市場、材料市場の広がりが予想できる。これらより、成果の実用化可能性、波及効果および事業化までのシナリオは十分に見込まれると考える。(*)最新のITRSは2009年版</p> <p>調査事業（公募）による情報収集の結果や、状況変化等を踏まえ、マスクブランク/マスクパターン欠陥検査装置及びレジスト材料の実用化・事業化について、本プロジェクトに参画する企業16社各社と「実用化推進会議」の開催し具体的に検討した。</p> <p>マスクブランク/マスクパターン欠陥検査装置については、実用化・事業化の可能性が高いと判断したが、本研究開発事業が終了する2015年度以降も、デバイスメーカー、部材メーカー等との協力体制を維持して、製品化するための実証研究を行うため継続研究（1年間）を行うこととし、2018年~2019年に向けて確実な実用化・事業化を目指した。</p> <p>レジスト材料については、hp11nm 以細に対応するためにはナノディフェクトマネジメント的な考え方が必要であり、次期プロジェクト等でさらに研究開発を進めていくことを検討する。</p>	
V. 基本計画に関する事項	作成時期	2010年12月 作成
	変更履歴	2013年3月 改訂（レジスト材料技術開発における最終目標の追加修正） 2014年4月 改訂（研究開発項目②(4)の追加修正） 2015年3月 改訂（研究開発項目②(4)の追加修正）

プロジェクト用語集

用語	説明	分類
ABI	Actinic Blank Inspection の略。ここでは、EUV光を検査光としてマスクやマスクブランクに存在する欠陥を検出すること。	(1)
EUV	Extreme Ultraviolet の略で、極端紫外線と呼ばれる。リソグラフィで使用される EUV 光の波長はほぼ 13.5 nm である。	(1)
照明光学系	光源から発する光を物体面の所望の領域に照射するように、光の進行方向を制御する光学手段。EUV 光用は、複数の多層膜反射ミラーの組み合わせで構成される。	(1)
対物光学系	物体面の像をセンサー面などに結像するレンズ光学系のうち、物体面に近いレンズのこと。EUV 光用の光学系は、複数の多層膜反射ミラーの組み合わせで構成される。	(1)
マスク	半導体集積回路や液晶ディスプレイなどの製造工程で、シリコン基板上にパターンを焼き込む際に使用する、パターンの原画が描かれた原板。	(1)
ブランク	ガラス基板や低熱膨張率基板上に、異なる2種類の材料を、1層あたり 1/4 波長の厚さで交互に数10層積層した基板。所定の波長の光を反射させる機能を有する。	(1)
TDI センサー	Time Delay Integration の略で時間差積分のこと。時間をズラしながら光量を積算していく受光素子。	(1)
CCD	Charge-Coupled Device の略で、画像を電気信号に変換する際に、受光素子が光から発生した電荷を読み出す電荷結合素子と呼ばれる回路素子。	(1)
読み出しタップ	TDI センサーに蓄積されたデータを外部に読み出すチャネルのこと。	(1)
Camera Link	産業用デジタルカメラのデータ伝送方式を定めた規格の名称。カメラメーカーとボードメーカーがコネクタやピンアサイン、使用するケーブル等を標準化している。	(1)
フレームトランスファ	CCD センサーの構造の一つ。受光用 CCD と転送用 CCD を有し、垂直帰線期間に受光用 CCD から転送用 CCD に転送を行う。	(1)

ブルーミング	CCD センサー上に、非常に強い光が入射したとき、画素から電荷があふれ出して、周囲に光がにじみ出たような画像になってしまうこと。(blooming)	(1)
リニアガイド	直線駆動ベアリングユニット。ステージ等の機械の直線運動部を駆動体を用いてガイドする。	(1)
レーザ干渉計	可干渉性に優れたレーザー光を分割して被測定物に照射し、反射光や透過光の微小な光路差により生じる干渉縞を解析することで変位などを測定する装置。	(1)
ピッチング	平面内を一方向に移動するステージにおいて、移動面内にあつて進行方向と直交する軸の廻りの回転運動。	(1)
ヨーイング	平面内を一方向に移動するステージにおいて、移動面と直交する軸の廻りの回転運動。	(1)
LVDS	低電圧作動信号方式のこと。高データレート、高ノイズ耐性、低消費電力の高速デジタルインタフェース。	(1)
MIRAI-Selete	株式会社半導体先端テクノロジーズ (Selete) が、MIRAI 第3期 (2006/4~2011/3) の期間中に NEDO の支援を受けて実施した次世代マスクプロジェクト	(1)
プログラム位相欠陥	EUV ブランクを構成する多層膜中の所定位置に、所望の大きさを有して意図的に作り込まれた位相欠陥のこと。基板に凹凸を付けることにより作成する。	(1)
照射ゲイン	入射した光と、放出(反射)される光のエネルギー比のこと。	(1)
シェーディング補正	画像全体が平均的に一様な明るさとなるように補正すること。	(1)
PositionPossessor	エンコーダ等によって検出した位置信号を処理する機能を持つユニット。本装置では XY ステージの位置を検出してサーボドライバや検査回路に位置を転送する役割を持つ。	(1)
MotionController	ステージの位置、速度、加速度等を定めてサーボドライバへの指令を行い、ステージを制御する機能を持つユニット。	(1)
INSENA 信号	ABI 装置で定義した信号で Inspection enable 信号の省略。検査の有効範囲を示し、On の範囲でのみ検査回路が欠陥を取得する。	(1)
PEEK	ポリエーテルエーテルケトン, polyetheretherketone。射出成形可能な熱可塑性樹脂として最高の耐熱性を持つ。芳	(1)

	香族系。ガラス繊維で強化可能。耐薬品性も優れる。	
FKM	フッ素系合成ゴム。耐油性、耐化学薬品性、耐熱性、耐炎性、耐候性、耐オゾン性など他の合成ゴムの追従を許さない高度の性質を有する。	(1)
SCP5000	デュポン株式会社製の耐熱樹脂。吸水率が低く、引張強度や寸法安定性に優れる。また発塵や高温劣化も少ない。	(1)
EMO	Emergency off 。SEMI 規格で「緊急遮断」と規定される。 EMO 機能としては人や設備に対して新たな危険を生じずに安全シャットダウン状態に移行すべきと規定される。	(1)
通倍処理	入力したクロック信号の整数倍の周波数を持つクロック信号を生成する処理。	(1)
ディファレンシャル干渉計	ユーザーが準備する2つのミラーの相対距離差を光の干渉により測定する干渉計システムを指す。	(1)
バーミラー	主に露光装置のXYステージの測長に使用される棒状基準ミラー。高純度合成石英、低熱膨張ガラスを使用。	(1)
スーパーインバー	鉄、ニッケル、コバルトの合金。常温域での熱膨張率がごく小さい金属材料。「超不変鉄」「超不変鋼」「スーパーアンバー」とも呼ぶ。	(1)
白色干渉計	可干渉性の少ない白色光源と等光路干渉計を利用し測定面に対応する CCD 各画素の等光路位置（干渉強度が最大になる位置）を干渉計対物レンズを垂直走査して求める手法。	(1)
弾性ヒンジ	elastic hinge 。片方の要素のガタや振動などを他方に伝えないために弾性変形によって吸収させる結合部分。	(1)
Shading 補正	光学系や撮像系特性による輝度ムラに対して一様な明るさの画像になる様に補正する処理。全体が一様な輝度分布を有す画像に対する画像処理系への入力データを用い全画素に対する変換特性を事前に求め輝度補正する。	(1)
FPGA	field-programmable gate array 。製造後に購入者や設計者が構成を設定できる集積回路。広義には PLD（プログラマブルロジックデバイス）の一種。現場でプログラム可能なゲートアレイ。	(1)
フレームグラバ	Frame grabber 。動画像取り込み装置。フレームバッファを内蔵し PCI バスなどに準拠したボード。カメラの同期を	(1)

	取り複数のカメラ映像を取り込む。	
先鋭化フィルタ	鮮鋭化フィルタ。画像の濃度値が本来は急変しているべき輪郭部などで濃度値変化が緩やかになる場合、濃度値変化を強調（その部分を微分）することで鮮明画像を得る。	(1)
平滑化フィルタ	画像の輝度値を平らに滑らかにするための手法。画像中のノイズを除去するために用いる。移動平均フィルタ（別名：平均化フィルタ、単に平滑化フィルタともいう）は注目画素のその周辺の輝度値を用いて輝度値を平均し処理後画像の輝度値とする手法。	(1)
Convolution	畳み込み。関数 f を平行移動しながら関数 g を重ね足し合わせる。	(1)
アンティチャンバ	Antechamber。控えの間、副室。ロードロックチャンバと検査チャンバとの中間に位置し、検査サンプルの一時的な真空保管機能を有す。	(1)
ナビエストークス方程式	Navier-Stokes equations、流体運動を記述する2階非線型偏微分方程式。流体力学で用いられる。ニュートン力学の運動の第2法則に相当、運動量の流れの保存則を表す。	(1)
ペリクルレス	マスク上への異物付着を防ぐペリクルを使用しない環境を指す。現状、EUV露光技術に適したペリクル作成が困難なため、ペリクルレスがEUV露光の前提とされている。	(1)
Dual Pod	EUV露光用マスクの付着異物発生を抑制するため、搬送用Podを2重構造とし、主にアウターは大気側で、インナーは真空側で開閉する構造を持つ。	(1)
PSL	Polystyrene Latex(ポリスチレンラテックス)の略。粒径の均一性及び真球度に優れているため粒径の標準微粒子として使用される。	(1)
擬似欠陥	マスク欠陥検査を実施する際に、主に検出器のノイズ信号など、実際には欠陥でないにも拘らず欠陥として認識された検出物を指す。	(1)
近接場	マスクなど構造物近傍の電場分布(Near field)を指す。通常マスク立体構造を考慮したウェハ転写像計算では、マスク近接場がウェハ上に結像されるモデルを用いている。	(1)
CSM	Coherent EUV Scatterometry Microscope の略。EUVマ	(1)

	スクにコヒーレント光を入射し、発生した回折像を取得してマスク像を再生する顕微鏡。	
AFM	Atomic Force Microscope(原子間力顕微鏡)の略。試料と探針との原子間に働く力を検出して像を取得する。EUVマスクの位相欠陥の観察や、表面粗さ測定に用いられる。	(1)
SEM	Scanning Electron Microscope(走査型電子顕微鏡)の略。電子線を絞ってマスクなどの観察物に照射し、主に発生する二次電子を検出して像を取得する。	(1)
HVM	High Volume Manufacturing の略。製造装置や製造プロセスなどが量産を目的として開発されたもの、およびその技術を指す。	(1)
シュバルツシルト光学系	中心部の空いた凹面鏡と凸面鏡から構成される結像光学系。比較的開口数が大きくでき、構造的に安定である利点を持ち、EUV光学系で多く用いられる。	(1)
NA	Numerical Aperture(開口数)の略。光学系の光軸と最外光線のなす角の正弦に媒質の屈折率を乗じたものを指す。投影光学系ではNAが大きいほど高い分解能が得られる。	(1)
ダイポール照明	二重極照明と呼ばれる露光装置の照明条件のひとつであり、投影レンズの瞳面での光強度分布が2極に分離している。ラインアンドスペースパタンの形成に適している。	(1)
EDX分析	Energy Dispersive X-ray spectrometry の略。電子線照射により発生する特性X線を検出し、エネルギーで分光することによって、元素分析や組成分析を行う手法のこと。	(1)
Bore (プラズマ絞り)	放電型EUV光源において、所定のターゲットガス内での放電により生成されるプラズマを絞る管状の部材。	(1)
Zr フィルター	ジルコニウムを材料としたフィルタのこと。EUV光源から発する光の内、長波長領域の光を遮断するフィルターとして使用される。	(1)
ラマン分光分析	ラマン分光法は物質に単色光を照射し、散乱される光を分光器によって観測する分析法。得られたスペクトルより物質の評価を行う。	(1)
2流体ノズル	液体と気体を混合させ噴霧することが可能なノズル。マス	(1)

	クの洗浄法の一つである 2 流体ジェット法に用いるノズル。	
フィデュシャルマーク	マスク基板の基準点を示すマークであり、アライメントや位置特定のために使用される基準マークのこと。	(1)
収束イオンビーム	空間的に収束させたイオンビームのこと。マスク材料の除去加工にも使用される。	(1)
SEMI	Semiconductor Equipment and Materials International の略。米国の半導体製造装置材料協会。	(1)
フェナントレン	炭素が 14 個、水素が 10 個からなる多環芳香族炭化水素。	(1)
CD 誤差	CD は半導体、フォトマスク等のパターン寸法精度のひとつである(Critical Dimension)の略であり、CD 誤差は設計線幅と実際の線幅の差を表す指標。	(1)
LER	半導体、フォトマスク等のパターンエッジの凹凸(Line Edge Roughness)の略称。LER 精度は半導体性能、歩留まり等に影響することから、リソグラフィー精度を顕わす指標のひとつとして用いられる。	(1)
TEM	透過電子顕微鏡(Transmission Electron Microscopy)の略称。高速の電子線を薄膜試料に照射し、電子線の試料内での回折・散乱による回折像を得ることにより微細構造の観察を行う分析装置。	(1)
伝搬角度	EUV 光フォトマスク用ブランクの多層膜に発生する位相欠陥において、ガラス基板表面に存在し位相欠陥の原因となる種欠陥と、種欠陥に起因して多層膜最表面に生じる凹凸形状を結んだ仮想線と基板表面からの垂線の成す角度。	(1)
コンフォーマルモデル	EUV 光フォトマスク用ブランクの多層膜の積層モデルを表し、ガラス基板表面の形状と多層膜表面の形状が同一となる積層モデルを指す。	(1)
円形照明	半導体露光装置の照明形状のひとつであり、最も基本的な形状とされ、投影レンズの瞳面での光強度分布が円形となる照明形状。	(1)
PSD	パワースペクトル密度(Power Spectral Density)の略称。原子間力顕微鏡により得られた表面形状の解析等、広く用い	(1)

	られる解析指標で、表面形状分等を周波数毎に分離してその特性を顕わす。	
FFT 処理	FFT とは高速フーリエ変換(Fast Fourier Transform)の略称で、フーリエ変換を高速に計算するアルゴリズムを指す。FFT 処理はそれを利用したフーリエ変換処理を指す。	(1)
rms	自乗平均粗さ(roughness of Root Mean Square)の略称。表面粗さの指標のひとつで、平均線から測定曲線までの偏差の二乗を平均した値の平方根をとった値。	(1)
CD トレランス	リソグラフィーにおけるパターン線幅の設計線幅からのズレ量の許容値を指す。	(1)
EL	露光裕度(Exposure Latitude)の略称。フォトリソグラフィにおける露光量の変動に対する裕度を示し、レジストパターンの線幅寸法の変動量が許容範囲内に入る露光量の範囲を指す。	(1)
ニュースバル	ニュースバル放射光施設は、大型放射光施設 SPring-8 (世界最高性能の放射光施設) の敷地内に兵庫県が設置し、兵庫県立大学高度産業科学技術研究所が運営を行っている。	(1)
フレネルゾーンプレート	回折光学素子の一種で、規則的に間隔の変化する同心円帯をつくり、各輪帯からの光が同位相で 1 点に集まるようにしたもの。	(1)
スペckルノイズ	マイクロ CSM では、コヒーレントな光源を利用するので照射された 2 点間の粗さによる散乱が、撮像面で干渉して作る明暗によるノイズ。	(1)
SR	Synchrotron Radiation 放射光とは、相対論的な荷電粒子 (電子や陽電子) が磁場で曲げられるとき、その進行方向に放射される電磁波。	(1)
X 線反射ロックインスキュン	X 線反射率測定において、ロックインスキュンは、入射 X 線も検出器も固定して、照射されるサンプルのみを回転させて測定する方法。	(1)
ブラグピーク	多層膜反射鏡を X 線回折で見た場合、各界面で散乱した X 線が、膜構造に依存する干渉条件により強めあうピーク。	(1)
次数制限遮光部品	フレネルゾーンプレートで発生する、0 次光と 2 次以上の回折光を遮光する部品。フレネルゾーンプレート下部に装	(1)

	着される。	
X線ズーム管	結像した軟X線を光電面に照射して電子を発生させ、その光電子を電子光学系で拡大して撮像する装置。	(1)
軸外収差	ザイデルの5収差の中で、非点収差やコマ収差は光軸外からの光線に特有に発生するので軸外収差と呼ばれている	(1)
ケーラー照明	光源内部の強度ムラを解消する照明方法のひとつ。光源を投影レンズに結像させる集光レンズと照射面を集光レンズに結像させる投影レンズで構成される。	(1)
波面収差	収差のない理想結像(ガウス結像)における波面と実際の光学系によって結像の場合の波面とのずれを波面収差という。	(1)
Annular Zernike 多項式	光学系の収差の量を、単位円の中で互いに直交する関数の多項式で表したものの。円内を極座標表示 (r, θ) すると、直交する関数は、 r のみの関数と $\cos(m\theta)$ または $\sin(m\theta)$ との積で表される。	(1)
ザイデル収差	幾何光学においてレンズや鏡で像をつくる時に生じるボケやゆがみなどの収差のうち、色収差以外の単色収差を分類し説明したもの。球面収差、コマ収差、非点収差、像面湾曲、歪曲収差の5収差を示す。	(1)
Petzvar 項	ザイデル収差の第4項で定義される像面湾曲のこと。結像光学系で形成される像面形状は平面が理想的であるが、実光学系では一般に湾曲する。	(1)
Airy disk	円形開口を通過した光は、回折して開口部から遠く離れた観察平面上に同心円状の明暗のパターンをつくる。この回折パターンの中心部の明るい領域を Airy disk という。	(1)
2 光速干渉	周期パターンや回折格子で回折された回折成分の内、-1次と0次、あるいは0次と+1次というように2成分だけが結像光学系を通過してパターン像を形成すること。	(1)
MRP (MRSP)	Multiple Reticle SMIF Pod の略。複数のマスクを収納できるマスクポッドのこと。	(1)
ZEMAX	米国 Radiant Zemax, LLC 社が提供する光学シミュレータの名称。光線追跡計算や様々な収差解析、光学系設計を行うことができる。	(1)

Out of Band 光	着目する光の波長と十分に異なる波長を有する光。EUV 光（波長 13.5 nm）を取り扱う分野では、波長が 50 nm 以上の光を指し、可視光も含む。	(1)
PD	Photodiode(フォトダイオード)であり、光を受けて電気信号に変えて光量を検出する素子のこと。	(1)
エタンデュ Ω_s	光束の面積と拡がり立体角との積の値。光学系の中ではエタンデュは一定。光源側のエタンデュ（光源面積と発散立体角の積）は照明領域のエタンデュにより制限される。	(1)
写像投影光学系	試料面から放出される電子線分布を結像光学系により拡大して検出器に投影する光学系。	(2)
PI	Patterned mask Inspection の略。マスク上に形成された回路パターンが設計通りに形成されているかを検査すること。	(2)
ビーム分離ユニット	電子照明系と電子像投影系の電子ビームを分離するユニット。照明ビームを曲げて試料表面に照射し、試料表面からの電子を検出器方向に直進させる。	(2)
Cathode レンズ	O レンズと同義。	(2)
LSF	Line Spread Function の略。物体が直線物体であるとき、光学系によるその像の分布をいう。1 次元的に変化する物体の光学系による像は、物体関数と LSF の畳み込み積分として求められる。	(2)
PEM	Projection Electron Microscope の略。電子線を生成する電子源と、試料への電子ビーム照射を面状で行う照明光学系と、試料面から出てくる電子像を拡大投影して検出器に結像する。	(2)
ITRS	International Technology Roadmap for Semiconductors の略。半導体製造に関わるヨーロッパ・日本・韓国・台湾・米国の工業団体の資金により運営されている。	(2)
スキャナ	マスク上に形成された微細回路パターンを、ウェハ上に転写する露光装置。転写に当ってスリット状の露光光に対してマスクを走査(スキャン)し、これと同期してウェハを移動する。	(2)
CRAO	Chief Ray Angle at Object の略。EUV 露光においてはマ	(2)

	スクに対して照明光が斜め(6度程度)に入射するため、ウェーハ上へ転写されるパターンの忠実性に影響を及ぼす。	
輪帯照明	マスクパターンをウェーハ上に転写する際、パターンピッチが小さい場合に効率よく集光し像形成するための照明方法。任意方向に回転したパターンに有効。	(2)
二極照明	マスクパターンをウェーハ上に転写する際、パターンピッチが小さい場合に効率よく集光し像形成するための照明方法。特に、一次元方向の L/S パターンに有効。	(2)
EB-GAE 技術	Electron Beam Gas Assisted Etching の略。加工促進ガスを導入しながら電子線を照射し、高速かつ選択的に対象物をエッチングする技術。	(2)
SFET	Small Field Exposure Tool の略。マスク上の微小領域の EUV 転写評価装置。	(2)
EM-Suite	リソグラフィシミュレータ。Panoramic Technology 社の商品名。	(2)
TaBN、TaBO	吸収層を構成する物質。TaBN はタンタルとボロンと窒素を含む。TaBO はタンタルとボロンと酸素を含む。	(2)
Mo/Si 多層膜	EUV 光を反射させる層。Mo と Si の膜厚はそれぞれ 2.8nm と 4.2nm で、40 ペアで構成される。	(2)
ミラー電子	一次電子が試料に衝突することなく、試料直前で反射する電子。試料に電子ビームの持つエネルギーよりわずかに大きい負の電位を与えることによって得られる。	(2)
ダイ比較方式	マスク上の複数置かれた同一レイアウトのパターンプロック(ダイ)に注目し、お互いのパターンを比較することで、差異を見つけて欠陥を同定する方式。	(2)
ローパスフィルター	画像に含まれるパルス状のノイズ(高周波成分)を除去するフィルター。	(2)
バンドパスフィルター	検出ターゲット欠陥の画像の強度変化が、その大きさに応じて空間周波数が変わることを利用して、その空間周波数成分を強調するフィルター。	(2)
PSF	Point Spread Function の略。物体が点物体であるとき、光学系によるその像の分布をいう。2 次元的広がりを持つ物体の光学系による像は、物体関数と PSF の畳み込み積分	(2)

	として求められる。	
PPEM	Photoelectron Pattern Evaluation Method の略。パターン状に形成された光電子を結像光学系の試料面に発生させ、得られた電子線像のパターンにより性能を評価する。	(2)
PEF	Photoelectron Emittable Film の略。レーザー光を照射すると、膜から光電子が放出される。	(2)
SPF	Shading Pattern Film の略。PEF 上にパターン状に形成し、裏面からレーザーを照射すると、SPF からは光電子が発生しないのでパターン状の光電子が形成される。	(2)
O レンズ R レンズ P レンズ	O レンズ(オブジェクトレンズ)、R レンズ(リレーレンズ)、P レンズ(拡大投影レンズ)を組み合わせてマスクの電子像を規定倍率にて検出器に拡大投影する。	(2)
MTF	Modulation Transfer Function の略。被写体の持つコントラストをどの程度忠実に再現できるかを、空間周波数特性として表現したもの。	(2)
ベルシュ効果	電子銃から放出される電子の電流量が増すと、電子同士のクーロン相互作用によってエネルギー分布の幅が増大する現象。色収差を大きくする。	(2)
ウィーン条件	ビーム分離ユニットに対し、斜め上から入射する電子がマスクに垂直方向に入射し、下から入射する電子は直進するような、電界と磁界による偏向が打ち消しあう条件。	(2)
ロードロックチャンバ	マスクを大気中から搬送し、ゲートバルブを設けることで真空ポンプによりトランスファーチャンバに移載できる真空度まで到達させ、マスクを検査位置へ送り出す。	(2)
MPPS	Mega Pixel Per Second の略。画素(Pixel)単位で 2 次元的に分割された画像に対して演算処理をするスピードの単位。一秒当たり 100 万画素の処理をする速度。	(2)
DUV	Deep UltraViolet の略。半導体製造工程で、マスクパターンをウェーハ上に転写するのに用いられる光源の波長。	(2)
高圧基準管	電子ビーム光学系において、高エネルギー電子を用いた軌道形成を行う際、基準電圧場を設定するための主要部品。	(2)
ガラス転移温度 Tg	高分子の物性を表すパラメーターの一つ。 高分子が軟化する温度。分子量、側鎖の高さなどが寄与	(3) -(i)

	する。	
光酸発生剤 (PAG)	Photo Acid Generator : 光や電子を受けて分解し、酸を発生させる加工物。	(3)-(i)
液中 AFM	液中 Atomic Force Microscope (原子間力顕微鏡) : 試料及びカンチレバー (片持ち梁) が液中にあって分析を行う AFM。	(3)-(i)
IMEC	Interuniversity MicroElectronics Center : ベルギーにある、半導体関係の研究開発を行うコンソーシアム。	(3)-(i)
SEMATECH	Semiconductor Manufacturing Technology : アメリカにある、半導体関係の研究開発を行うコンソーシアム。	(3)-(i)
MET	Micro Exposure Tool : 小フィールド EUV 露光機の一つ。	(3)-(i)
LWR	Line Width Roughness : ラインパターンの線幅のばらつきを表す指標。	(3)-(i)
クエンチャー	露光中及び露光後の熱処理の際に、露光によって発生した酸が拡散するのを抑制するために添加されるレジスト組成物。	(3)-(i)
化学増幅型レジスト	露光によって発生した酸が触媒となって、レジストベース樹脂の保護基を脱保護する事をコンセプトにしたレジストの事。	(3)-(i)
ASML	オランダに本社を構える、露光機メーカー。	(3)-(i)
LBNL	Lawrence Berkeley National Laboratory : アメリカにある米国エネルギー省の研究所。カリフォルニア大学が代行運営を行っている。	(3)-(i)
Albany	SEMATECH が University at Albany キャンパス内にある Albany Nanotech に保有するレジストテストセンター。	(3)-(i)
ArF 液浸リソグラフィ	ArF 光源 ($\lambda=193\text{nm}$) を使用したリソグラフィのうち、投影レンズとレジストの間を純水で満たして露光する技術。	(3)-(i)
保護基ユニット	レジストのベースとなる樹脂のモノマーのうち、酸によって分解し、現像液に対する溶解コントラストを発現する置	(3)-(i)

	換基が導入されているモノマー単位（ユニット）のこと。	
RLS	R: Resolution (解像度)、L: LWR (Line width Roughness)、 S : Sensitivity (感度)	(3) -(i)
PHS ベース	ポリヒドロキシシチレンベース： レジストのベースとなる樹脂の骨格が、ヒドロキシシチレンであること。	(3) -(i)
メタクリルベース	レジストのベースとなる樹脂の骨格が、メタクリル酸であること。	(3) -(i)
Dill's C パラメーター	米国研究者 Dill らがレジスト中の感光剤濃度を計算するために見出した感光パラメーターの一つ。光の吸収に寄与するパラメーター。	(3) -(i)
コンタクトホール C/H	半導体素子が形成された層と配線のための層をつなぐために、絶縁膜に開けられる穴。	(3) -(i)
TMAH	Tetramethylammonium hydroxide (水酸化テトラメチルアンモニウム)：現像液は、TMAH の 2.38%水溶液が用いられるのが一般的。	(3) -(i)
PTD	Positive Tone Development ： 露光された部分を、現像液に溶解させる現像プロセス。	(3) -(i)
NTD	Negative Tone Development ： 露光されていない部分を、現像液に溶解させる現像プロセス。	(3) -(i)
HMDS 処理	Hexamethyldisilazane 処理：レジストの密着性を向上させるために、ウエハに HMDS (ヘキサメチルジシラザン) を散布し、ウエハ表面を疎水性にする処理のこと。	(3) -(i)
PEB	Post Exposure Bake ： 露光後に行う熱処理。	(3) -(i)
フラーレン	多数の炭素原子のみで構成される、中空な球状のクラスターの総称。サッカーボール状の構造を持ったフラーレンを特に C ₆₀ フラーレンという。	(3) -(i)
HSQ	Hydrogen Silsesquioxane (水素シルセスキオキサン)	(3) -(i)
X-dipole	光学コントラストを向上させるための照明形状の一つ。 X-dipole は、特にラインアンドスペースパターンの光学コントラストが向上する。	(3) -(i)

フラッシュランプ PB	フラッシュランプポストバーク： 現像後に、ミリ秒オーダーで光を当ててレジスト膜を加熱するプロセス。	(3)-(i)
CNF	C arbon N ano F ibers： AFM (原子間力顕微鏡) のカンチレバーに用いられる材料。既成品に比べ、細い部分が長いのが特徴。	(3)-(i)
PID 制御	P roportional I ntegral D erivative 制御： フィードバック制御の一つ。入力値を出力値と目標値の偏差、積分、微分の3つの要素によって行うこと	(3)-(i)
力場	原子に作用する力を決めるポテンシャルのこと。分子動力学計算はこの力場を用いて分子シミュレーションする。	(3)-(i)
ダブルパターンニング技術	物理的に解像不可能な線幅のパターンを、2回に分割してパターン形成する技術。プロセス違いで数種類ある。	(3)-(i)
WS WF	W itness S ample (WS)：レジストアウトガス評価に用いる、表面にコンタミ膜を形成させる 1 インチのシリコンウエハ。ウイットネスサンプル。 W afer (WF)：シリコンウエハ。	(3)-(ii)
ECC	E mission C urrent C ontrol：電子銃から放出される電流量を、電流量の増減をモニターしながら制御する方法。	(3)-(ii)
XPS	X -ray P hotoelectron S pectroscopy：サンプル表面に X 線を照射し、放出される光電子のエネルギーを測定することで、サンプルの構成元素とその組成比を測定することができる。	(3)-(ii)
極性依存性	分子内に存在する電気的な偏りの大きさに依存した特性をもつこと。	(3)-(ii)
TOF-SIMS	T ime of F light S econdary I on M ass S pectroscopy：質量分析計の一種。2 次イオンが検出器に到達するまでの時間（飛行時間）が質量の関数（軽いイオンは高速、重いイオンは低速）であることを利用し、飛行時間の分布を精密に計測することができる。	(3)-(ii)
DSMC 法	D irect S imulation M onte C arlo 法：希薄気体の挙動を解析するシミュレーション手法。粒子の衝突、輸送過程を確率的に求める。	(3)-(ii)

V.W.V.	Van der Waals Volume : 原子および分子の体積を示す指標	(3)-(ii)
NIST	National Institute of Standards and Technology : 米国の国立標準技術研究所	(3)-(ii)
四重極質量分析計 QMS	質量分析計の一種。検出器に4本の平行なロッド状電極を用い、四重極電場を形成する。作動真空度が低い、小型化、高速走査が可能、操作、保守が容易などの利点を持つ。	(3)-(ii)
in-situ 分光エリプソ	その場測定が可能なエリプソメーター。エリプソメーターは薄膜や表面の微細構造の解析に偏光光を用いた測定手法で、表面で反射した偏光ビームの相対的な位相変化を解析し膜厚を求める。	(3)-(ii)
ミューラーマトリックス	分光エリプソ測定における特定のサンプルによる光の偏光状態の変化を完全に記述する行列。全偏光、部分偏光および非偏光の光を記述することができる4×4の行列で、反射や透過での偏光状態の変化を記述したもの。	(3)-(ii)
アンジュレータ光	電子を周期的に小さく何度も蛇行させ、蛇行のたびに発生する放射光を干渉させることにより得られる、高輝度の特定波長領域における光。	(3)-(ii)
イオンカウント方式	質量分析の検出方法の一種。検出器に到達したイオン数をカウントする方式。	(3)-(ii)
溶解しきい値	レジストが現像液に溶解する時の組成変化の閾値。	(3)-(ii)
DSA	Directed Self-Assembly。日本語では誘導型自己組織化。人工的に作製したガイドに沿ってポリマーなどに自己組織化を発現させること。	(3)-(iii)
マイクロ相分離	水と油のように相反する性質の成分が混在するとき、同じ性質の成分同士が集合して局所的な相分離を生じる現象。	(3)-(iii)
オーバレイ	半導体デバイスの製造工程において、複数層の構造を互いに重ね合わせる。上下層間で回路パターン位置がどの程度位置ずれているかを示す指標としても使われる。	(3)-(iii)
中性化膜	水と油のように相反する性質の成分が混在する物質に対して、両方にほぼ同程度の親和性(接触角など)を有する物質からなる膜。	(3)-(iii)
ガイドパターン	DSA で用いる人工的に作製したガイド構造のこと。物理的な凹凸を利用する物理ガイド、化学的性質の異なる表面を	(3)-(iii)

	利用する化学ガイドがある。	
pinning パターン	DSA で用いる化学ガイドのこと。DSA 構成成分の特定の成分をピン止めするように固定することができる。	(3)-(iii)
GI-SAXS	Grazing-Incidence Small-Angle X-ray Scattering。日本語では微小角入射 X 線小角散乱。試料であるパターン表面に対して微小な角度から X 線を入射し、散乱光を解析することによりパターン表面近傍の内部構造を評価する方法。	(3)-(iii)
CFM	Chemical Force Microscopy。日本語では化学力顕微鏡。原子間力顕微鏡の針の先端を化学修飾し、物質の表面をなぞることで被測定表面の化学的な性質を測定する方法。	(3)-(iii)
OCTA	NEDO プロジェクトで開発されたソフトマテリアルに対する統合シミュレータ。 http://www.octa.jp/	(3)-(iii)
ソルバー	シミュレーションにおいて計算を行うプログラムのこと。	(3)-(iii)
SCF	Self-Consistent Field。日本語では自己無撞着場理論。複雑な高分子を離散化したメッシュ単位でセグメント密度とポテンシャルを循環論で計算することにより、平衡・安定な状態までを高精度にシミュレーションする方法。	(3)-(iii)
DPD	Dissipative Particle Dynamics。日本語では散逸粒子動力学。複雑な高分子を複数の粒子で近似し、粒子間のニュートン運動方程式を計算することにより、平衡・安定な状態までを高速かつ適切にシミュレーションする方法。	(3)-(iii)

I. 事業の位置付け・必要性について

NEDOの関与の必要性・制度への適合性

1.1 NEDOが関与することの意義

ネットなどに流れる情報量は年々爆発的に増加し、それを取り扱う情報技術もめざましい発展を見せている今日の社会では、情報・知識を、時間や場所の制約を受けず誰もが自由自在かつ安全に活用できる情報通信環境の実現が望まれている。また、2006年3月に閣議決定された「第3期科学技術基本計画」、および2010年6月に閣議決定された「新成長戦略」においても、世界をリードする「グリーンイノベーション」を実現し、我が国の強みを活かし国際競争力強化のために注力すべき分野として、情報通信機器（IT 機器）・関連デバイス等の情報通信技術分野が挙げられている。そして、その「第3期科学技術基本計画」および「新成長戦略（基本方針）」に基づき、「IT イノベーションプログラム」として「半導体の微細化に係る革新的基盤技術の開発」等が具体的に展開された。

さらに、2011年8月に閣議決定された「第4期科学技術基本計画」でも「グリーンイノベーション」の継続が示され、直近では、「日本再興戦略」（2013年6月の閣議決定）で提示された「世界最高水準のIT 社会の実現」に向けて、「科学技術イノベーション総合戦略」（2013年6月の閣議決定）において、第4期科学技術基本計画と整合をとる形で、長期ビジョンと短期プログラムが設定された。これらの政策内容を支える基幹デバイスとなる半導体集積回路には、一層の高機能化、低消費電力化が求められている。（図1-1）

その中で、我が国経済を支える情報通信技術分野の先端産業である、情報家電、コンピュータ、通信装置、自動車、医療機器などの競争力強化に不可欠な基盤技術は、半導体集積回路の微細化技術である。これまで、微細化技術の進展による半導体集積回路の集積度は、3年で4倍という急速な速度で推移してきており、2010年には、技術世代hp 45 nmの製品が量産され始めている。今後も情報家電やロボットなどのシステムに求められる高集積化・低コスト化および低電力化を同時に実現するためには、更なる微細化が必要であり、微細化技術は引き続き重要な技術課題である。

以上のことから、本プロジェクトは、我が国の半導体関連産業（デバイス、マスク、装置及び材料）の国際競争力強化のため、極低電力半導体集積回路の実現に不可欠な半導体構造の微細化に対応できる半導体デバイスプロセス技術を確立することを目的として実施する。

また、NEDOの第2期中期計画（2008年度から2012年度）が示すように、我が国の「高度な情報通信社会の実現」、「IT 産業の国際競争力の強化」のため、半導体分野を注力すべき基盤技術分野として捉えており、NEDOの目標にも合致する開発プロジェクトである（図1-2）。

2013年3月に策定された第3期中期計画においても、電子デバイス分野で「我が国の電子

関連企業の競争力向上と新市場開拓のために、低消費電力、高速処理、高信頼性、設計期間の短縮化等のデバイス技術開発を推進する。」とされ、引き続き電子デバイスの半導体分野は注力すべき基盤技術分野として捉えている。

我が国の半導体関連産業の国際競争力強化のため、極低電力LSIの実現に不可欠な半導体構造の微細化に対応できる半導体デバイスプロセス基盤技術を確立することを目的として「ITイノベーションプログラム」の一環として実施する。

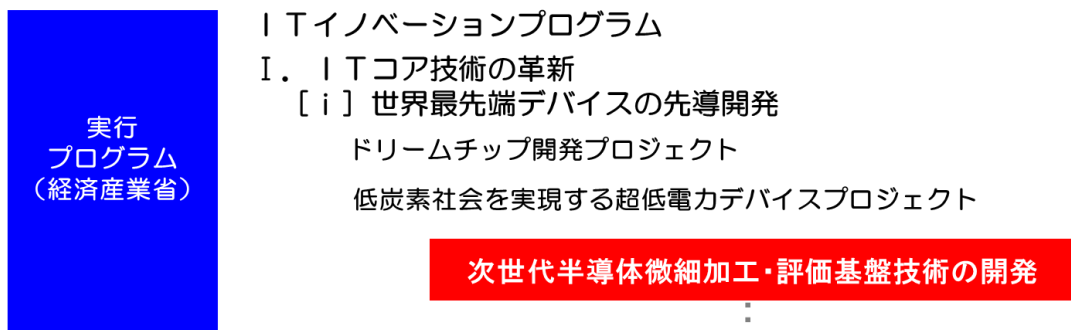
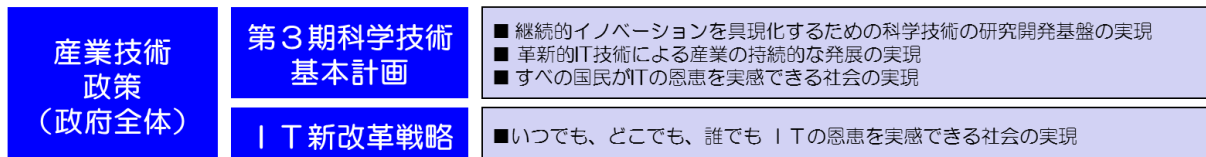


図1-1 政策上の位置づけ

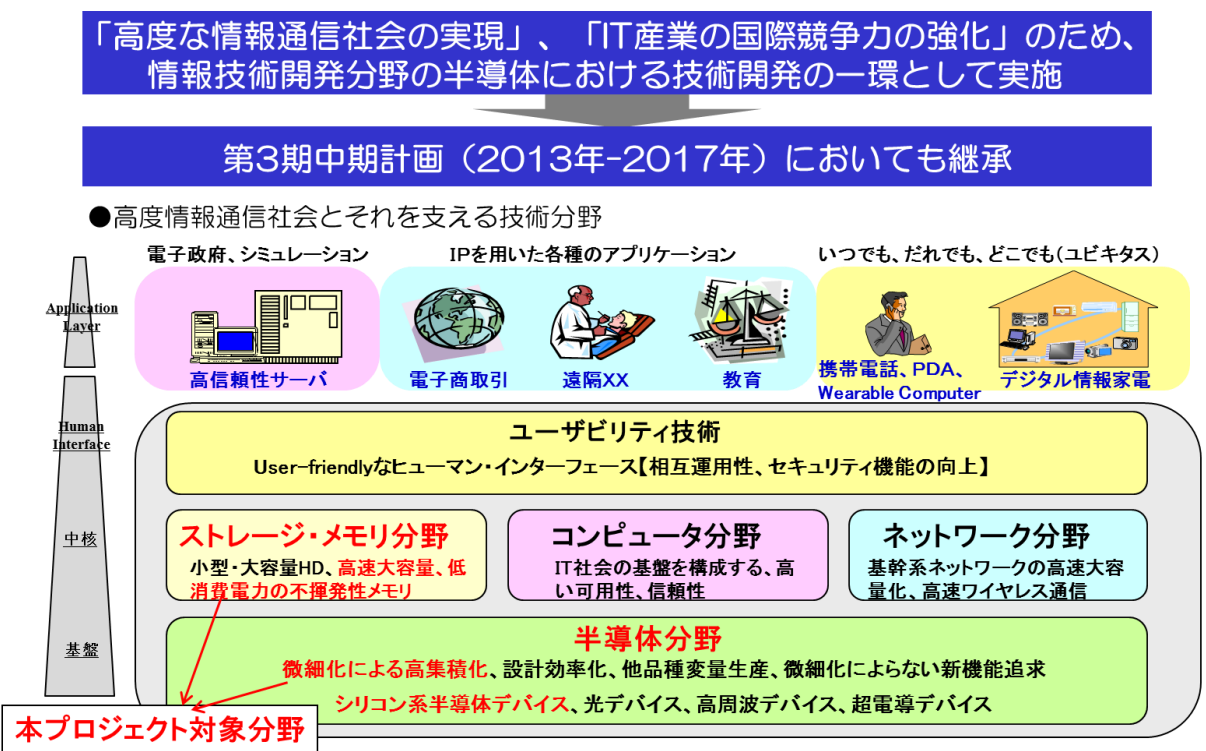


図1-2 NEDO 第2期中期計画（2008年度から2012年度）における位置づけ

電子デバイスは、これまで継続的な微細化により、低消費電力、高速処理、高信頼性を実現してきた。また、今後もこの傾向は継続すると予想される。この微細化を推進してきた光リソグラフィについては、hp 22 nm以細の技術領域では、波長193 nmのエキシマレーザー光源による液浸露光やダブルパターンングといった従来の微細化手法が技術的にもコスト的にも限界に達すると予測されており、これに代わる新たなリソグラフィ技術の開発が求められている。

波長13.5 nmの極端紫外光（Extreme Ultra Violet、以下、「EUV」という。）を用いるEUVリソグラフィは、マスクパターンの光学的縮小投影方式であり、露光波長がエキシマレーザーの1/10以下であるためhp 22 nm以細の技術領域に適用可能であること等から、次世代リソグラフィの最有力候補と位置づけられている。NEDOロードマップ上ではEUVリソグラフィは半導体集積回路の微細化に資し、本プロジェクトの開発技術であるEUVリソグラフィにかかるマスク技術と関連検査技術、レジスト材料等が課題とされている。

近年、hp 22 nm以細に向けた次世代半導体開発のために、海外では産学官連携の下で、ITRS（The International Technology Roadmap for Semiconductors）で示されている技術課題の解決に向け、欧州のimecや米国のSEMATECHといった様々なコンソーシアムやアライアンスを中心に、各々年間平均研究予算50～70億円規模で精力的な取り組みがなされ、世界の関連企業を取り込んだグローバルな開発が行われている。一方、日本では世界的な半導体ビジネス・技術開発のパラダイム変化に伴い、最先端プロセスを指向するデバイス企業は減少しているものの、装置・材料等の関連産業においては未だ強みを維持しており、日本の強みを活かすことにより世界に先駆けて半導体集積回路のさらなる更なる微細化という重要な技術課題を克服できると期待される。

このように、これまでEUV関連の開発は国内外でコンソーシアム、企業、大学等の連携による強力な取り組みが進められており、その結果、EUV光源や光学系等の要素技術の開発は大きく進展し、2010年には量産前のプロセス評価用露光機（ASML社製NXE3100）が出荷された。しかしながら、マスク技術と関連検査技術、レジスト材料等においては、まだ解決すべき課題が多く残されている。特に、高精度・低欠陥マスクの実現には、マスク基板、マスクパターン等での欠陥低減がhp 22 nm以細ではさらに技術的難易度の高い開発となるとともに、高解像、低LWR（Line Width Roughness）、高感度、および低アウトガスを満たすレジスト材料の実現には、材料開発のみならず評価技術開発においても解決すべき大きな技術的障壁がある。このため、本プロジェクトでは、上記技術的障壁を解決できる半導体デバイスプロセス技術を確立することを目的としている。

以上のように、本プロジェクトは、次世代リソグラフィの最有力候補と位置づけられているEUVリソグラフィにおいて、EUVマスクブランク検査技術、EUVマスクパターン検査技術を開発するとともに、レジスト材料とレジスト材料評価技術を同時に開発するという、挑戦的・野心的な研究開発であり、かつ、異なる企業体間、ないし産学官の連携が最も奏功すると期待できる。

異なる事業体の連携推進というNEDO機能が貢献できる内容であることに加え、我が国半導体とその関連産業の国際競争力強化、および国家的重点目標である高度情報化社会の実現に寄与するものであり、産業政策・情報政策の面からも極めて重要な課題であることから、国家プロジェクトとしてNEDOが関与すべきものと考えられる。

1.2 実施の効果(費用対効果)

事業規模は、研究開発項目①について初年度の2011年度は864百万円、研究開発項目②については2010年度から2011年度までの2年間で1,915百万円(東日本大震災による装置被害を修復するため増額して2,135百万円となった)を予定して開始した。その後の本プロジェクトの実際の予算は、以下の表の通りである。

表1-1 本プロジェクトの開発予算

※ NEDO負担額表示 (単位:百万円)

研究開発テーマ	2010	2011	2012	2013	2014	2015	合計
[共同研究] 研究開発項目① EUVマスク検査・レジスト材料技術開発 (1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発 (2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発 (3) EUVレジスト材料技術開発		864	1,432	1,643	1,602	1,000	6,541
		(一般会計)		第1回 加速 +128	第2回 加速 +162		
				(特別会計)			
[委託] 研究開発項目② EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (1) EUVマスクブランク欠陥検査装置開発 (2) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発 (3) EUVレジスト材料基礎研究 (4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発		2,135			705	642	3,482
		(1)~(3)の開発 (一般会計)			(4)の開発 (特別会計)	第3回 加速 +180 第4回 加速 +40	
合計	0	2,999	1,432	1,643	2,307	1,642	10,023

(1) 経済効果

これらの取り組みにより、国内マスクメーカー、レジストメーカー、検査装置メーカーにおけるEUV関連の新製品が、現行の従来露光関連製品の世界シェアを超えることを目指す。同様に国内デバイスメーカーにおけるメモリなどのデバイスの世界シェアが現状を超えることを目指す。

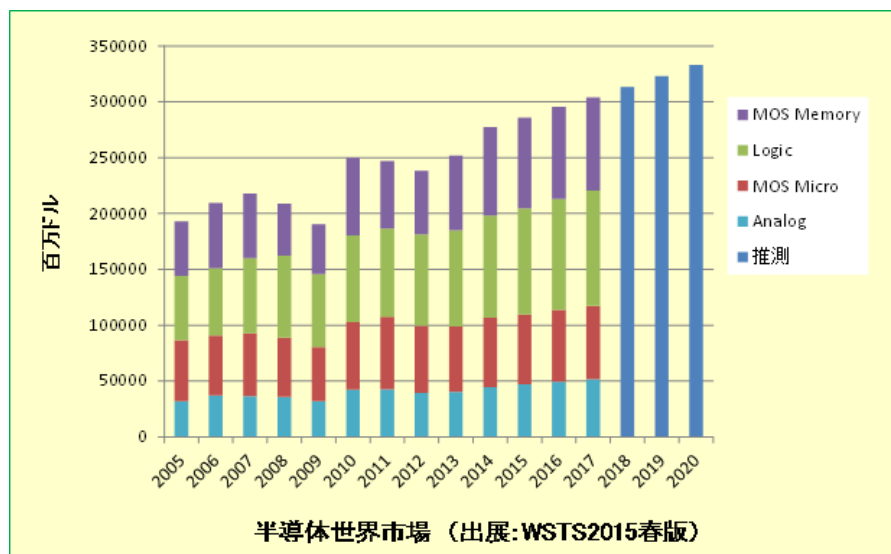
本プロジェクトの企画段階での関連事業の国内企業のシェア、2020年での市場規模(予想)は下記の表1-2の通りである。半導体全体の世界市場は、図1-3の世界半導体市場統計(WSTS)のデータから、320,000百万米国ドルである。

表I-2 関連事業の国内メーカーのシェア、2020年での市場規模

事業分野	2011年		2020年（推測）	
	世界市場規模 [億円]	日本メーカシェア [%]	世界市場規模 [億円]	日本メーカ売上見込 [億円]*
マスク	3,100	43.0	4,650	2,000
レジスト	400	76.9	710	546
マスク検査装置	430	15.2	650	99
NAND フラッシュメモリ	14,400	35.4	45,800	16,213
合計	18,330		51,810	18,858

*世界市場における日本メーカのシェアを維持した場合の売上見込額

*資料「2013 有望電子部品材料」「2015半導体関連プレーヤーの最新動向調査」<NANDフラッシュメモリ-世界市場>富士キメラ総研、「世界半導体製造装置・試験/検査装置市場年鑑2011」グローバルネット、SEMI Market data 2012よりNEDO推計)



図I-3 半導体世界市場

(2) 省エネルギー効果

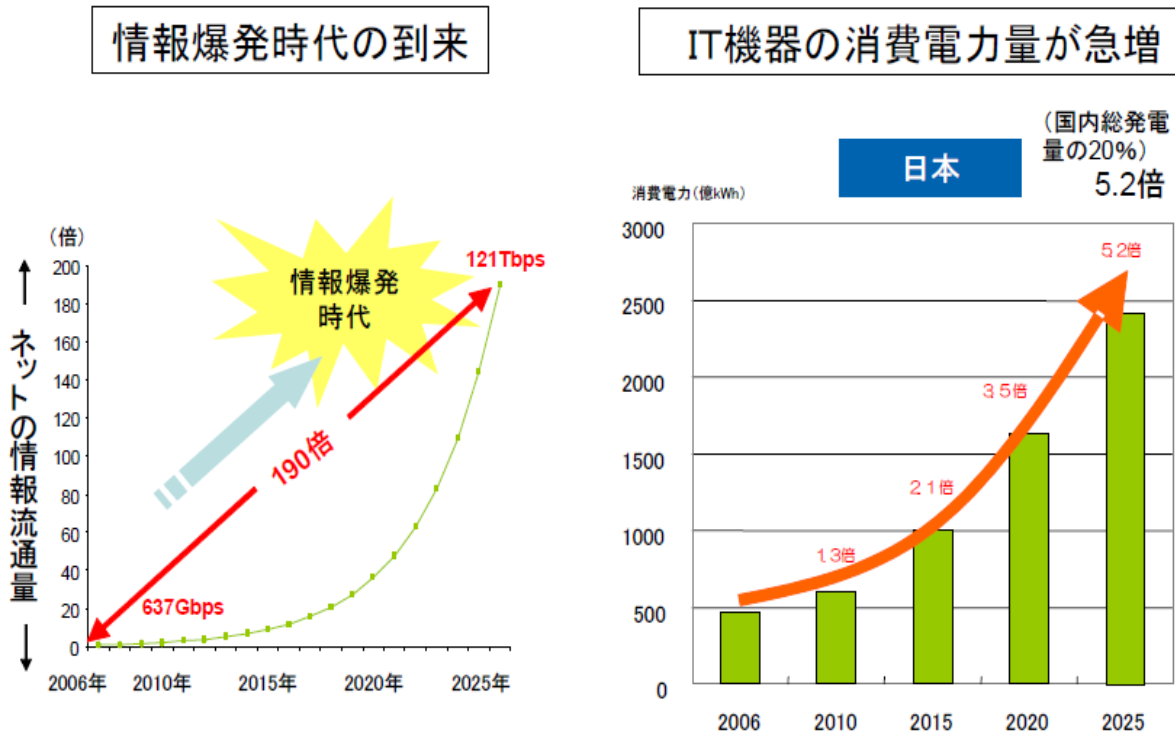
省エネルギー効果については、半導体集積回路の微細化に伴う省電力化が進むことにより、2020年において炭酸ガス削減量への換算で272万トン/年(49.04億kWh/年)とプロジェクト立ち上げ当初に見積もった。

平成24年度、本プロジェクトの微細化の効果に加えて、将来のデバイスの低電圧動作、及び待機電力ゼロを、テレビ等の民生機器やサーバー、ルーター等のIT機器、データセンタ等に使用されるMPU、ロジック、メモリに適用することにより、再度、省エネルギー効果を見積もった。それによると、2020年に189億kWh/年の電力削減が期待できる。これは、2020年にIT機器が使用すると予想される1600億kWhの約1割強に相当する。また、炭酸ガス削減量に換算すると、1049万トン/年である。

2. 事業の背景・目的・位置づけ

(1) 事業の背景

我が国経済を支える先端産業である、情報家電、コンピュータ、通信装置、自動車、医療機器などの競争力強化に不可欠な基盤技術は、半導体集積回路の微細化技術である。これまで、微細化技術の進展による半導体集積回路の集積度は、3年で4倍という急速な速度で推移してきており、2010年には、技術世代h p 45 nmの製品が量産され始めた。今後も情報家電やロボットなどのシステムに求められる高集積化・低コスト化および低電力化を同時に実現するためには、更なる微細化が必要であり、引き続き重要な技術課題である。特に、今日予測されているネットに流れる情報量の爆発的な増加、それに伴うIT機器の待機電力を含む消費電力の急激な増加（図I-4）に対応するためには、更なるデバイスの微細化技術を開発する必要がある。



グリーンITイニシアティブの推進 平成20年10月 経済産業省商務情報政策局 発表資料より

図I-4 ネット情報量、IT機器消費電力の予測

(2) 事業の目的

これまで微細化を推進してきた光リソグラフィについては、h p 22 nm以細の技術領域では、波長193 nmのエキシマレーザー光源による液浸露光やダブルパターニングといった従来の微細化手法が技術的にもコスト的にも限界に達すると予測されており、これに代わる新たなリソグラフィ技術の開発が求められている。

波長13.5nmの極端紫外光（EUV）を用いるEUVリソグラフィは、マスクパターンの光学的縮小投影方式であり、露光波長がエキシマレーザーの1/10以下であるためhp22nm以細の技術領域に適用可能であること等から、次世代リソグラフィの最有力候補と位置づけられている。これまで、国内外でコンソーシアム、企業、大学等の連携による強力な取り組みが進められており、その結果、EUV光源や光学系等の要素技術の開発は大きく進展し、2010年には量産前のプロセス評価用露光機が出荷される予定となっている。しかしながら、マスク技術と関連検査技術、レジスト材料等においては、まだ解決すべき課題が多く残されている。特に、高精度・低欠陥マスクの実現には、マスク基板、マスクパターン等での欠陥低減がhp22nm以細ではさらに技術的難易度の高い開発となるとともに、高解像、低LWR（Line Width Roughness）、高感度、および低アウトガスを満たすレジスト材料の実現には、材料開発のみならず評価技術開発においても解決すべき大きな技術的障壁がある。そこで、本プロジェクトでは、上記技術的障壁を解決できる半導体デバイスプロセス技術を確立することを目的としている。

(3) 事業の位置づけ

海外では産学官連携の下で、これらの技術課題の解決に向け、欧州のimecや米国のSEMATECHといった様々なコンソーシアムやアライアンスを中心に、精力的な取り組みがなされ、世界の関連企業を取り込んだグローバルな開発が行われている。一方、日本では世界的な半導体ビジネス・技術開発のパラダイム変化に伴い、最先端プロセスを指向するデバイス企業は減少しているものの、装置・材料等の関連産業においては未だ強みを維持しており、日本の強みを活かすことにより世界に先駆けて半導体集積回路のさらなる更なる微細化という重要な技術課題を克服できると期待される。

以上のように、本プロジェクトは、我が国の半導体関連産業（デバイス、マスク、装置及び材料）の国際競争力強化に貢献すると期待されるため、本プロジェクト推進の必要性は高い。

Ⅱ. 研究開発マネジメントについて

1. 事業の目標

研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」

具体的な研究開発目標としては、研究開発項目①EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」では、EUV マスクブランク欠陥検査（Blank Inspection、以下、「BI」という。）、EUV マスクパターン欠陥検査（Pattern Inspection、以下、「PI」という。）、レジスト材料評価に関する技術開発目標として以下を提示する。

【中間目標】

平成25年度末までに以下の目標を達成する。

（1）EUV マスクブランク欠陥検査技術開発

hp16nm微細加工技術に対応するEUVマスクブランクの許容欠陥の指標、および、EUV マスク BI 装置において6インチブランク全域にわたり位相欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能なEUV マスク BI 技術を確立する。また、hp11nmに対応するBI技術における課題を明確にする。

（2）EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

hp16nm微細加工技術に対応するEUV マスクパターンの許容欠陥の指標、および、EUV マスク PI 装置において6インチブランク全域にわたりパターン欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能なEUV マスク PI 技術を確立する。また、hp11nmに対応するPI技術における課題を明確にする。

（3）EUV レジスト材料技術開発

解像度hp16nmのレジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。また、hp11nmに対応するレジスト材料における課題を明確にする。

【最終目標】

平成27年度末までに以下の目標を達成する。

（1）EUV マスクブランク欠陥検査技術開発

hp11nm以細の微細加工技術に対応するEUV マスクブランクの許容欠陥の指標、および、EUV マスク BI 装置において6インチブランク全域にわたり位相欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能なEUV マスク BI 装置技術を確立する。

（2）EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

hp11nm以細の微細加工技術に対応するEUV マスクパターンの許容欠陥の指標、および、EUV マスク PI 装置において6インチブランク全域にわたりパターン欠陥を検出する

際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能な EUV マスク PI 装置技術を確立する。

(3) EUV レジスト材料技術開発

解像度 hp 11 nm 以細のレジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。また、開発した EUV レジストをベースに他のレジスト材料を組み合わせることにより、hp 11 nm 以細のレジスト技術を実現する。

研究開発項目②「EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」

具体的な研究開発目標としては、研究開発項目② EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発では、EUV マスク BI 装置開発、EUV マスク PI 装置開発、EUV レジスト材料基礎研究に関する目標として以下を提示する。

【最終目標】

(1) EUV マスクブランク欠陥検査装置開発

hp 11 nm 以細に対応する BI 装置の設計を完了させると共に、装置構成において核となる要素技術の有効性を明確化する。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査装置開発

hp 16 nm 以細に対応する PI 装置の設計を完了させると共に、装置構成において核となる要素技術の有効性を明確化する。

(3) EUV レジスト材料基礎研究

得られた知見や新規技術に関する研究成果が、hp 16 nm 以細へのレジスト材料開発にとって有効であることを示す。

(4) EUV レジスト材料設計及び評価基盤技術開発

高解像度微小面積露光機 (HSFET : High NA Small Exposure Tool) の総合収差を、0.6nmRMS (Root Mean Square) 以内 (現在 : 0.7nmRMS) とすることを目標とし、hp11nm 以細対応の EUV レジスト材料における材料設計手法及び評価の基盤技術を開発する。

研究開発項目②「EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」における(1)～(3)については、研究開発期間終了(2011 年度末)時に外部有識者からなる委員会を開催して達成度を評価し、将来の市場化へ向けた評価基盤プラットフォーム構築のため、研究開発の実施体制を見直した上で研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」と統合して共同研究事業を実施する。

研究開発項目②「EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」における(4)を除く、その他の目標は、2010 年 11 月 22 日「次世代半導体微細加工・評価基盤技術開発」基本計画検討委員会で承認されたものである。

研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」における（４）については、中間評価（2013年8月27日）における指摘事項への対応の一つとして、基本計画を改定（2014年度）し、新規に委託事業として公募した研究開発項目であり、採択審査委員会において承認されたものである。

2. 事業の計画内容

上記目標を達成するために、本研究開発においては、新規かつ重要な課題への挑戦を促進し、早期に将来性を見極める観点から、下記に示す通り研究開発項目を分け研究開発を実施する。（図II-1）

研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」

[共同研究事業（NEDO負担率：1／2）]

研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」

[委託事業]

本研究開発項目は、実用化まで長期間を要するハイリスクな「基盤的技術」に対して、産学官の複数事業者が互いのノウハウ等を持ちより協調して実施する事業であり、委託事業として実施する。

本研究開発の期間は、2010年度から2015年度までの6年間とする。ただし、この期間内において、研究開発項目毎に研究開発期間を設定する。研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」については、2011年度から2015年度までの5年間とする。研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」（1）～（3）については、2010年度から2011年度までの2年間とし、研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」（4）については、2014年度から2015年度までの2年間とする。

以上の本プロジェクトの事業の目標、研究開発項目、期間等の研究開発計画の概要を図II-1にまとめた。

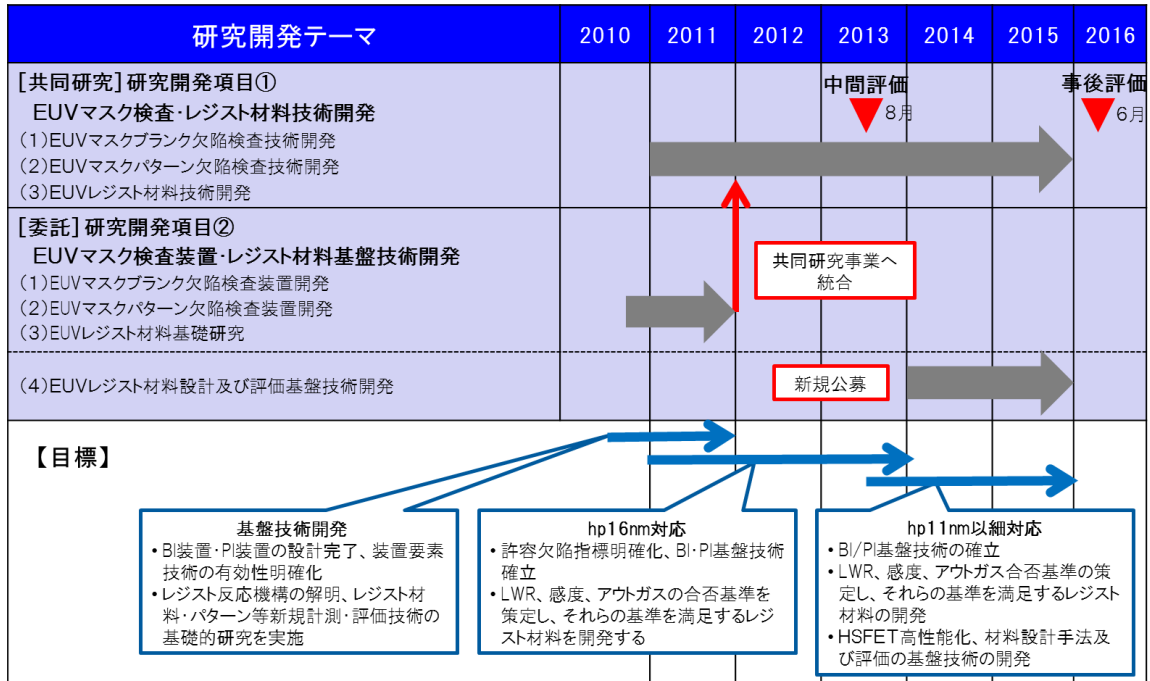


図 II-1 プロジェクトの研究開発計画概要

2.1 研究開発の内容

(1) 研究開発項目の概要

研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

EUVマスクブランク欠陥検査(BI)装置の高感度化・高度化開発による欠陥検出効率と、スループットの向上を進める。また、ブランク欠陥のウェハへの転写性を高精度で評価し、欠陥サイズ等を精度良く評価する手法を開発する。

(1) - (i) ABI 装置高度化(レーザーテックとの共同研究)

- ・研究内容: ABI 装置を組上げて完成させ、プログラム欠陥を用いた画像データから、基本機能が達成されていることを確認する。

(1) - (ii) ABI 装置仕様検討

- ・研究内容: ABI 装置の欠陥検出効率向上のための基本検討を行って基本仕様をまとめ、マスクブランク欠陥のウェハへの転写性を高精度で評価して欠陥検出感度の要求値を明確にする。

(1) - (iii) マイクロCSMの開発(兵庫県立大学への再委託)

- ・研究内容: マイクロCSMシステムを構築して位相欠陥のデータベースを作成し、パ

ターン形成に影響を与える欠陥の識別に役立て、A B I 装置による検査に反映する。

(1) - (iv) EUV 明視野顕微鏡観察技術の開発 (東北大学への再委託)

- 研究内容: hp16nm~hp11nm 世代対応のEUVブランク及びマスクの欠陥観察を目的とする明視野EUV顕微鏡観察技術を開発し、マスクパターンの欠陥検査・評価・同定技術および技術の基盤を確立する。

(2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発

EUVマスクパターン欠陥検査(P I)装置の低ノイズ化・高感度化、及び高スループット化開発を進める。また、パターン欠陥のウェハ転写性を高速、高精度に評価可能な手法を開発する。

(2) - (i) PI 装置仕様検討

- 研究内容:PI装置の高感度化、及び高スループット化のための理論検討を行い、PI装置の検出感度に関する基本仕様をまとめる。また、パターン欠陥のウェハ転写性を高速、高感度に評価可能な手法を開発する。

(2) - (ii) EUV マスクパターン欠陥検査装置コア技術開発

(荏原製作所との共同実施)

- 研究内容:PI装置を高感度化、及び高スループット化するためのコア技術を開発する。EUVマスクの電子線像の確認と、照明光学系と結像光学系の電子透過率に注目しその性能を精密に評価する手法を確立する。

(3) EUVレジスト材料技術開発

EUVレジスト材料開発を進め、解像度、LWR、感度、アウトガスの観点で優れた特性を持つレジスト材料を開発する。またEUV露光時にEUVレジスト材料から発生するアウトガスの材質や量等について高精度測定方法を確立する。

(3) - (i) EUVレジスト材料開発

- 研究内容: EUVレジスト材料開発を進め、解像度、LWR、感度、アウトガスの観点で優れた特性を持つレジスト材料・プロセスを開発する。さらに、hp11nmに対する開発目標とマイルストーンを設定する。

(3) - (ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立

- 研究内容:EB照射方式によるレジストアウト評価手法を確立し、EUV照射方式(兵庫県立大学への再委託)との相関を取得する。そのレジストアウトガス評価手法の妥当性の検証をすることを目標とする。

(3) - (iii) パターンサイズ縮小レジストプロセス技術開発

- ・研究内容：他のレジストを用いて、EUVL による転写パターンのサイズの縮小を可能にするレジストプロセス技術を開発し、hp11nm以細のパターンが形成できる材料・プロセス技術を実現する。

(3) - (iv) アウトガスデータベースの構築（兵庫県立大学への再委託）

- ・研究内容：兵庫県立大学の EUV 光を用いて、アウトガスとコンタミ付着との関係を明らかにする。EUV 光照射方式によるアウトガス評価装置を用いて種々のレジストのアウトガスデータを蓄積し、EB による評価との相関を調べる。

(3) - (v) 材料設計（大阪大学への再委託）

- ・研究内容：ブリッジおよびラインブレイク、パターン倒壊等の関係をシミュレーション解析することにより、潜像とこれらの欠陥の関係を明らかにする。また、これらより分子レベルでの設計指針を得る。

研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」

(1) EUVマスクブランク欠陥検査装置開発

EUVマスクBI装置において、高感度、低ノイズ化、高スループットを実現するための要素技

術を開発する。

(1) - (i) ABI装置基本設計

- ・研究内容：EUV光を用いた量産のためのABI装置を実現するための装置の基本設計をおこなう。より高効率化を目指し、光源、光学系等の最適設計を実施する。

(1) - (ii) EUV光源・照明光学系基礎検討（レーザーテックとの共同実施）

- ・研究内容：照明強度を高輝度化させることにより、45分程度で欠陥検査できることを目標とする。

(2) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発

EUVマスクPI装置において、高感度、低ノイズ化、高スループットを実現するための要素技

術を開発する。

(2) - (i) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発

- 研究内容：電子ビームを用いた写像投影方式による欠陥検査技術を確立する為の高分解能写像投影光学系を開発する。hp16nmに対応した高分解能写像投影方式電子ビーム光学系に対する要求仕様を明確にする。

(2) - (ii) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発（荏原製作所との共同実施）

- 研究内容：(2) - (i) にて明確化される高分解能写像投影方式電子ビーム光学系の要求仕様に基づいて、EUVマスク欠陥検査装置の核となる新たに開発する高分解能写像投影方式電子ビーム光学系を製作する。

(3) EUVレジスト材料基礎研究

EUVレジスト材料の反応機構の解明、レジスト材料やレジストパターン等に関する新規計測・評価技術などについての基礎的研究を実施する。

(3) - (i) レジストパフォーマンスシミュレーション技術開発

(NEDOから大阪大学への委託研究)

- 研究内容：これまでのレジストモデルの拡張を行うとともに逆解析アルゴリズムの高精度化を行い、SFE T (Small Field Exposure Tool) によるレジスト露光に適用し、hp16nm、hp11nmに向けたレジスト設計指針を得る。

(3) - (ii) レジスト基本特性仕様明確化

- 研究内容：hp16nmレジストパターン作成に重要な工程である現像・リンス工程に対して行い、該パターン形成に向けての材料、現像（液）プロセス、リンス（液）プロセス方針を明確にする。

(3) - (iii) アウトガス検出手法開発

- 研究内容：アウトガスとコンタミ膜厚評価の基礎手法を習得したうえで、レジスト材料の量産プロセスの使用条件を考慮したアウトガスとコンタミ膜厚評価用サンプル作成技術を構築し評価技術の標準化に向けた提案を行う。

(2)研究開発スケジュール

研究開発項目①「EUV マスク検査・レジスト材料技術開発」

開発線表 (平成23年度から平成25年度)

研究開発項目	23年度				24年度				25年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① EUVマスク プログラムの開発 技術開発	TC開発 光露開発(空転)φ1 ステージ開発φ1 搬送システム開発				TDI-ステージ モジュール単体完成 真空搬送モジュール開発 総合システム開発φ1 総合システム開発φ2				搬送システム開発φ2 コア技術集積・改善 装置コア技術開発共同実施(生産性向上)			
	プログラムの欠陥ブランク作成 プリンタビリティ評価 MRJ(φ1)を主とした、プログラムの検査				プログラムの欠陥マスク作成 プリンタビリティ評価 欠陥の電磁シミュレーション プログラムの欠陥検査 プログラムの欠陥評価 物理解析、EUV光学特性、分析、等				プログラムの欠陥マスク作成 プリンタビリティ評価によるφ18nm世代仕様提示 16nm対応欠陥検査モジュールの完成 hol1nm世代光学系設計 hol1nm世代装置仕様提示			
	マイク(CS)装置の構築 紫外光照射評価φ100 nm露光				プログラムの欠陥評価 欠陥データベース構築 欠陥データベース構築 16 nm対応データベース構築				紫外光照射評価 欠陥データベース構築 欠陥データベース構築 16 nm対応データベース構築			
	EUV明視野 装置開発技術 の開発(東北大学への委託)				装置設計 装置設計・調整 装置設計・調整				装置設計・調整 装置設計・調整 装置設計・調整			
	EUV明視野 装置開発技術 の開発(東北大学への委託)				装置設計 装置設計・調整 装置設計・調整				装置設計・調整 装置設計・調整 装置設計・調整			
② EUVマスク パターン欠陥検査 技術開発	欠陥検出率 シミュレーション 設計欠陥 マスク製作				欠陥検出率 シミュレーション 欠陥検出率評価 設計欠陥マスク製作				欠陥検出率 シミュレーション 欠陥検出率評価 欠陥検出率評価			
	PI装置 基本仕様 電子ビーム露光装置光学系設計製作				電子のエネルギーの最適化 電子のエネルギー分布最適化 光学系最適化 電子軌道計算による電子光学系の最適化・運用のための光学条件の最適化 取得要件と検出性能向上による高感度の高スループット化検討				16nm対応欠陥検査モジュールの完成			
③ EUVレジスト 材料技術開発	要求検討 レジスト材料露光評価 標準レジスト材料選定①				組成構築 レジスト材料露光評価 標準レジスト材料選定②				最適化 レジスト材料露光評価 標準レジスト材料選定③ hol16nm用 レジスト仕様構築			
	EUV光評価プロセス構築 EUV光による標準レジスト および開発レジストの評価 電子線評価プロセス構築				hol16nm用レジスト材料の材料技術確立 標準レジストおよび開発レジストの評価 アクトガス・モニターとのEUV光と電子線との相関評価 プロセス評価の構築				hol16nm用レジスト材料の材料技術確立 標準レジストおよび開発レジストの評価 アクトガス・モニターとのEUV光と電子線との相関評価 プロセス評価の構築			
	プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価			
	プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価			
	プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価			
プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				プロセス評価 プロセス評価 プロセス評価				

開発線表（平成26年度から平成27年度）

研究開発項目		26年度				27年度			
		第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
① EUVマスク ブランク欠陥検査 技術開発	(i) ABI装置高度化(EIDECとレーザーテック株式会社との共同実施)	欠陥検出感度・安定性向上（照明光学系改善）				実証評価			
		欠陥識別機能高度化				高精度観察光学系設計・製作・基盤技術開発（基盤技術評価）			
		ABI装置生産性向上開発（安定化・低CoO化）				hp11nm用生産性技術（高輝度EUV光源検討）			
		欠陥転写性評価（含 imacとの共同評価）によるABI性能の実証				計算機シミュレーション（hp11nm ブランク仕様高精度化）			
② EUVマスク パターン欠陥検査 技術開発	(ii) ABI装置仕様検討（EIDEC）	高出力EUV照射装置によるブランク特性評価				hp11nmブランク仕様提示			
		マイクロCSM画像解析によるhp11nmABI装置光学系改善検討				マイクログラフ解析によるhp11nmABI装置光学系改善検討			
		光学系改善による像質向上				像観察による微小欠陥の露光影響の調査			
		欠陥検出性能評価（画像解析、欠陥観察）				電子軌道シミュレーションによる電子光学系特性改善			
③ EUVレジスト 材料技術開発	(i) PI装置仕様検討（EIDEC）	欠陥転写性評価（シミュレーション）				欠陥仕様提示			
		高速撮像技術開発（電子線カメラ）				提示仕様の精度向上			
		高速電子線照明光学系開発				総合評価・実証			
		画像処理回路				画像低歪化技術検討（シミュレーション、実験検証）			
④ EUVレジスト 材料技術開発	(i) EUVレジスト材料技術開発（EIDECと東京エレクトロンとの共同実施）	hp11nm用レジスト要素検討				レジスト材料・プロセス最適化			
		レジスト材料露光評価（標準レジスト材料測定6）				（レジスト材料露光評価 標準レジスト材料測定7）			
		HSFET組立及び最適化				hp11nm用レジスト仕様構築			
	(ii) EUVレジスト材料のアウトガス測定方法の確立	hp11nm対応レジストのEUV-EB間コンタミ乖離要因のEB評価手法確立				hp11nm対応レジストのEUV-EB間コンタミ乖離要因のEB評価手法による説明			
		レジストファミリー概念の拡張検討				非化学増幅型レジストのコンタミ評価可能性検討			
		コンタミのEUV光パワー依存性評価				コンタミの水素環境下におけるEUV光パワー依存性評価			
	(iii) DSA技術開発（EIDEC）	hp14~12nm対応スループロセス改良、歩留り検証				hp7nm対応スループロセス改良、歩留り検証			
		hp7nm対応スループロセス構築				シミュレータ開発（高精度化、高速化）			
		シミュレータ開発（高精度化、高速化）				シミュレータ開発（高精度化）			
	(iv) アウトガスデータベースの構築（兵庫県立大学への再委託）	hp11nm対応レジストのEUV-EB間コンタミ乖離要因のEB評価手法確立				27年度継続可否判断			
		EUVアウトガス測定手法の高精度化				27年度継続可否判断			
		hp11nm対応レジストのEUV-EB間コンタミ乖離要因のEUV評価手法による説明				非化学増幅型レジストアウトガスの知見アウトガステスト必要性有無検討			
(v) 材料設計（大阪大学、古澤孝弘教授への再委託）	RLS及び欠陥と露光との関係の解析手法高度化				RLS及び欠陥発生確率の予想を可能とするアルゴリズム開発				
	hp7nm向け候補材料および周辺材料製作・評価				hp7nm向け材料および周辺材料測定				
	DSA欠陥およびLWR発生機構説明（GI-SAXS、3D-TEM）				DSA欠陥およびLWR制御技術の確立				
(vi) DSA欠陥解析評価機構説明（京都大学への再委託）	シミュレータ開発（モデル式決定）				hp7nm向け材料および周辺材料測定				
	シミュレータ開発（モデル式決定）				DSA欠陥およびLWR制御技術の確立				
	hp7nm向け材料および周辺材料測定				hp7nm向け材料および周辺材料測定				
(vii) DSA材料合成技術開発（北海道大学への再委託）	hp7nm向け材料および周辺材料測定				hp7nm向け材料および周辺材料測定				
	hp7nm向け材料および周辺材料測定				hp7nm向け材料および周辺材料測定				
	hp7nm向け材料および周辺材料測定				hp7nm向け材料および周辺材料測定				

研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」

- (1) EUVマスクブランク欠陥検査装置開発
- (2) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発
- (3) EUVレジスト材料基礎研究

開発線表 (平成23年度)

研究開発項目	23年度				
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期	
①EUVマスクブランク欠陥検査装置開発	(i)装置基本設計	①次design 基本仕様に基づくconcept design 高位置精度化検討(実験, simulation) 高感度技術検討(実験, simulation)	②次design 機械, 電気系 改善仕様に基づくdesign improvement 電気系	concept design complete	
	(ii)EUV光源・照明光学系基礎検討	評価用テストベンチ製作/評価準備 光源仕様検討・調査	テストベンチ完成 検討・調査継続	光源選定・fix	
②EUVマスクパターン欠陥検査装置開発	(i)仕様検討	電子ビーム写像投影光学系要求仕様検討	設計仕様検証	設計仕様検証	
	(ii)EUVマスクパターン欠陥検査装置開発(株式会社登原製作所との共同実施)	高解像電子ビーム写像投影光学系・照明光学系設計	高解像電子ビーム写像投影光学系・結像光学系設計	高解像電子ビーム写像投影光学系・結像光学系製作	
③EUVレジスト材料基礎研究	(i)レジストフォーメーション技術開発「EUVレジスト材料の反応機構解明」(大阪大学産業科学研究所)	レジストモデル拡張・アルゴリズム高精度化	解像度ボケの波長依存性の解明	露光結果への適用	設計指針
	(ii)レジスト基本特性仕様明確化(株式会社EUVL基礎開発センター)	現像プロセスにおける樹脂種、像質⇔現像液、pH、濃度、方式の依存性調査	リンプロセスにおける樹脂種、像質⇔リン液、リン材濃度、温度、方式の依存性調査		方針・課題整理
	(iii)アウトガス検出手法開発(株式会社EUVL基礎開発センター)	電子線照射アウトガス評価装置導入	アウトガス・コンタミ評価のための材料成膜技術の構築(EUV照射で構築)	EUV光照射検討(アウトガス)	電子線照射による検証
		witness基板仕様検討			EB照射検討(コンタミ膜)
		コンタミ評価用分光エリプソ導入	コンタミ設計測技術構築		

(4) EUVレジスト材料基礎研究

開発線表 (平成26年度から平成27年度)

研究開発項目	26年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①「高感度化に係るレジスト材料設計指針の開発」(国立大学法人大阪大学への再委託)	シミュレーション研究	設計指針一次案▼	設計指針二次案▼	高感度化設計指針確立▼
③「EUVレジスト高感度化の検証」(株式会社EUVL基盤開発センター)	(評価・検証)	シミュレーションパラメータ取得▲	設計指針に基づく処方検討▲	露光検証▲
②「高感度化のための酸増殖剤の開発」(東京理科大学への再委託)	化合物設計・合成	一次サンプル▼ 新規合成	二次サンプル▼ 新規合成	三次サンプル▼ 新規合成+スケールアップ再合成
③「EUVレジスト高感度化の検証」(株式会社EUVL基盤開発センター)	レジスト処方設計、処方化	酸増殖剤提供	酸増殖剤提供	酸増殖剤提供
	評価・検証	レジスト提供	レジスト提供	レジスト提供
④「高解像度微小面積露光機の研究開発」(株式会社EUVL基盤開発センター)	本体	SFET本体分解	HSFET本体組立調整	
	光学系	照明光学系(10)製作	総合調整	
		投影光学系(PO)製作	総合調整	
	知的財産	知的財産取得	ブレンストーミング	

研究開発項目	27年度			
	第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①「高感度化に係るレジスト材料設計指針の開発」(国立大学法人大阪大学への再委託)	露光結果反映	設計指針改一次案▼	設計指針改二次案▼	高感度化設計指針確立▼
③「EUVレジスト高感度化の検証」(株式会社EUVL基盤開発センター)	(評価・検証)	シミュレーションパラメータ取得▲	設計指針に基づく処方検討▲	露光検証▲
②「高感度化のための酸増殖剤の開発」(東京理科大学への再委託)	化合物設計・合成	一次サンプル▼ 新規合成	二次サンプル▼ 新規合成	三次サンプル▼ 新規合成+スケールアップ再合成
③「EUVレジスト高感度化の検証」(株式会社EUVL基盤開発センターと産業技術総合研究所との共同実施)	レジスト処方設計、処方化	酸増殖剤提供	酸増殖剤提供	酸増殖剤提供
	評価・検証	レジスト提供	レジスト提供	レジスト提供
	新高感度化施策	新規レジスト評価用レジスト	新規レジスト評価用レジスト	新規レジスト評価用レジスト
	メタルレジスト分析、解析	露光評価分析・解析	露光評価分析・解析	露光評価分析・解析
④「高解像度微小面積露光機の研究開発」(株式会社EUVL基盤開発センター)	本体		HSFET本体組立調整	
	光学系	投影光学系(PO)製作	総合調整	
	知的財産	知的財産取得	ブレンストーミング	

(3)開発予算

共同研究及び委託に関わる総事業費は約100億円（NEDO 負担額）となり、その内訳を以下に示す。

※ NEDO負担額表示 (単位：百万円)

研究開発テーマ	2010	2011	2012	2013	2014	2015	合計
[共同研究] 研究開発項目① EUVマスク検査・ レジスト材料技術開発 (1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発 (2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発 (3) EUVレジスト材料技術開発		864	1,432	1,643	1,602	1,000	6,541
		(一般会計)		第1回 加速 +128	第2回 加速 +162		
				(特別会計)			
[委託] 研究開発項目② EUVマスク検査装置・ レジスト材料基盤技術開発 (1) EUVマスクブランク欠陥検査装置開発 (2) EUVマスクパターン欠陥検査装置開発 (3) EUVレジスト材料基礎研究 (4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術 開発		2,135			705	642	3,482
		(1)～(3)の開発 (一般会計)		(4)の開発 (特別会計)		第3回 加速 +180	第4回 加速 +40
合計	0	2,999	1,432	1,643	2,307	1,642	10,023

2.2 研究開発の実施体制

本研究開発は、NEDOが、単独ないし複数の企業、大学等の研究機関（原則、本邦の企業等で日本国内に研究開発拠点を有していること。なお、国外の企業等（大学、研究機関を含む）の特別の研究開発能力、研究施設等の活用または国際標準獲得の観点から国外企業等との連携が必要な部分を、国外企業等との連携により実施することができる。）から公募によって研究開発実施者を選定後、共同研究契約等を締結する研究体を構築し、委託または共同研究により実施する。

共同研究開発に参加する各研究開発グループの有する研究開発ポテンシャルの最大限の活用により効率的な研究開発の推進を図る観点から、研究体にはNEDOが委託先決定後に委嘱する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その下に研究者を可能な限り結集して効果的な研究開発を実施する。

上記に基づき、株式会社EUVL基盤開発センター 代表取締役社長 渡邊久恆（委嘱期間：2011年3月～2014年3月）をプロジェクトリーダーとし委嘱した。2014年4月以降は、株式会社EUVL基盤開発センター 代表取締役社長 森一朗（委嘱期間：2014年3月～）をプロジェクトリーダーとし委嘱した。

再委託先、共同実施先を含めた本プロジェクトの実施体制は以下の通りである。

本プロジェクトの実施体制（研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」）

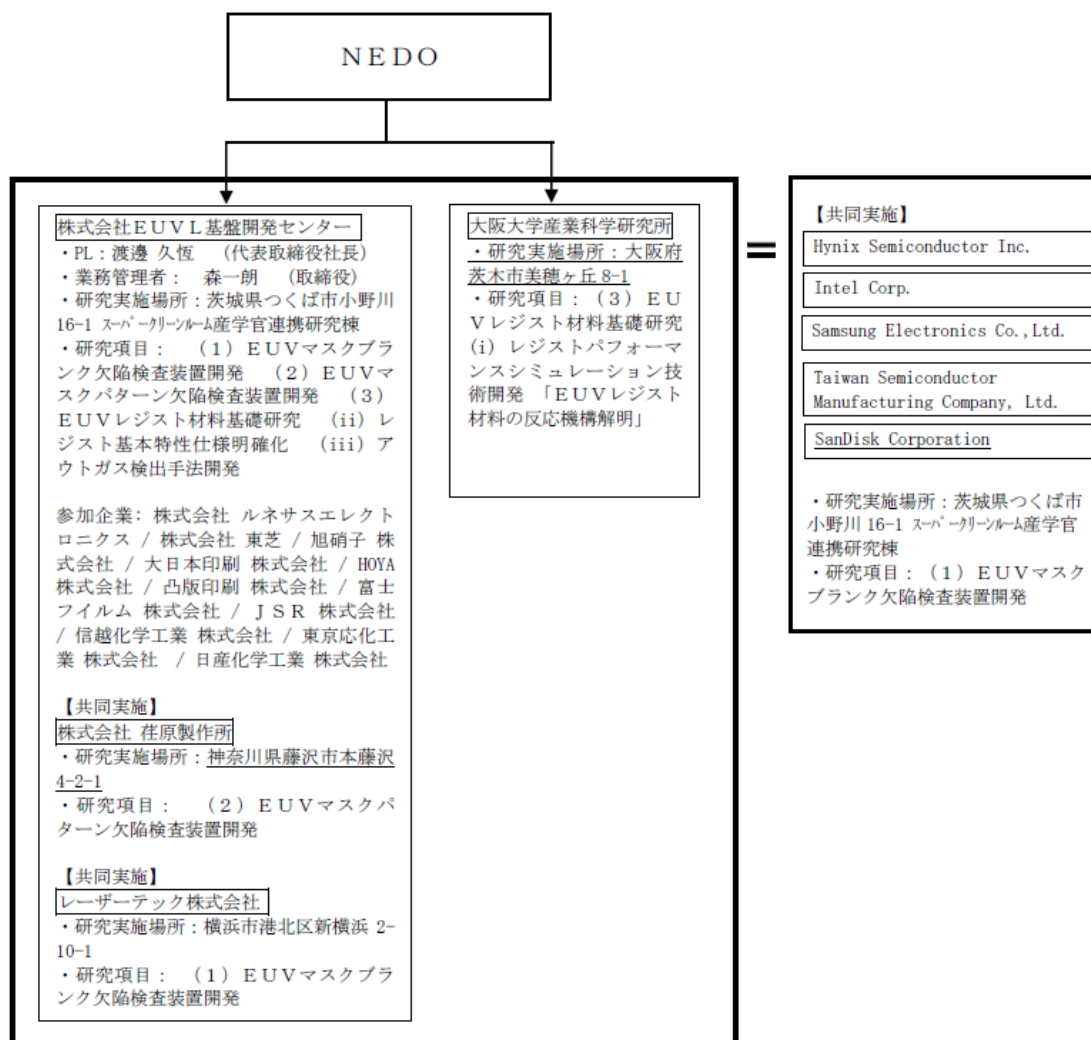


実施体制変更履歴 [共同研究]

変更日付	変更事由
2011年8月26日	サンディスク コーポレーションを共同実施先に追加
2012年5月9日	国立大学法人東北大学多元物質科学研究所を再委託先に追加
2012年11月26日	東京エレクトロン株式会社を共同実施に追加
2013年3月26日	株式会社ニコンおよび東京エレクトロン株式会社が株式会社EUVL 基盤開発センターの参加企業（株主）となる
2013年10月18日	AZ Electronic Materials S.A.（現 Merck）、独立行政法人産業技術総合研究所を共同実施先に追加。国立大学法人東京工業大学、国立大学法人京都大学を再委託先に追加
2014年3月31日	SK Hynix が共同実施先から脱退
2014年9月22日	ルネサスエレクトロニクス株式会社、日産化学工業株式会社が株式会社EUVL 基盤開発センターの参加企業（株主）から脱退
2015年3月31日	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd.、国立研究開発法人産業技術総合研究所が共同実施先から脱退
2016年2月1日	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd.を共同実施先に追加

本プロジェクトの実施体制

(研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」(1)～(3))

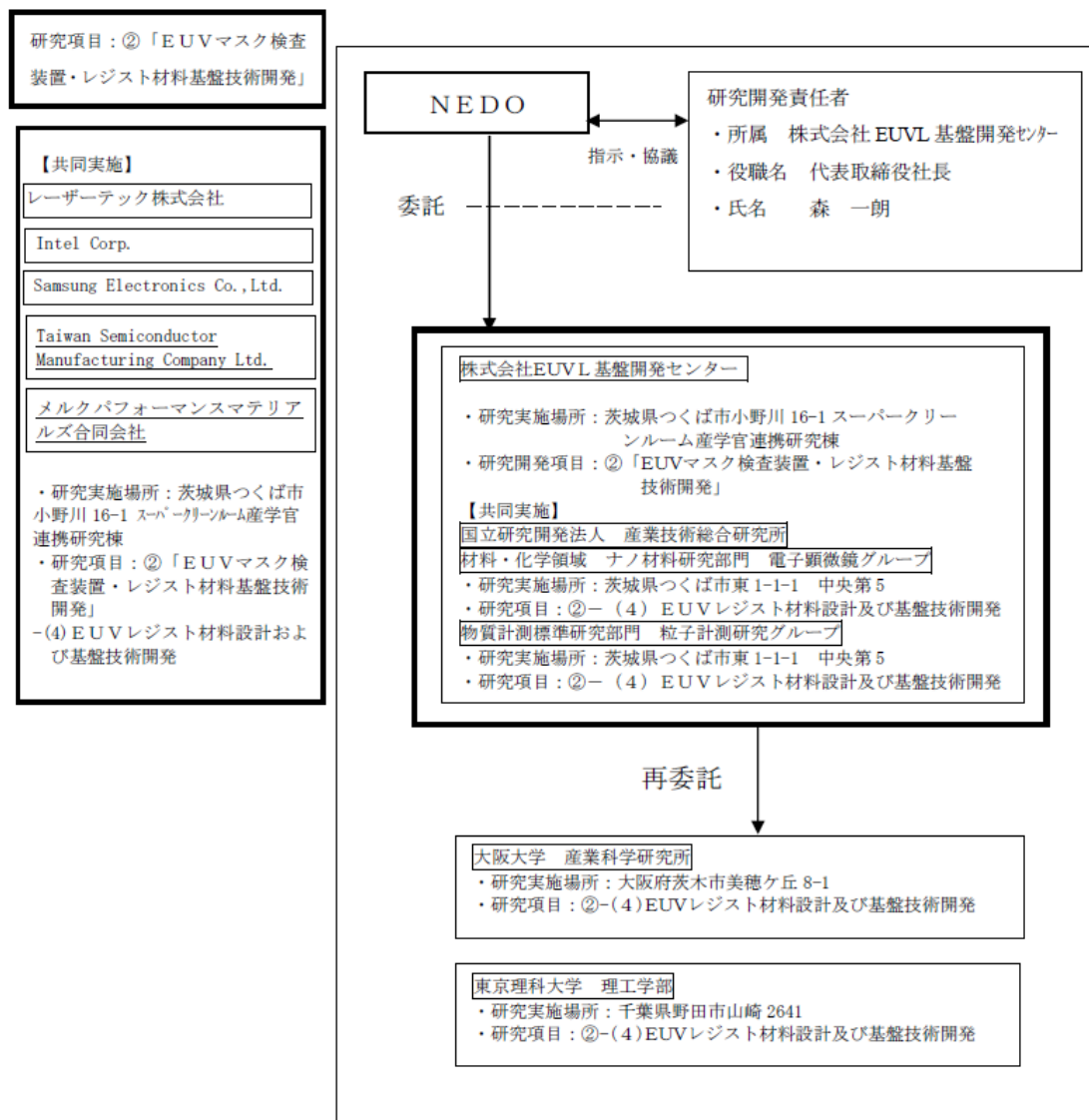


実施体制変更履歴 [委託]

変更日付	変更事由
2011年8月26日	サンディスク コーポレーションを共同実施先に追加

本プロジェクトの実施体制

(研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」(4))



実施体制変更履歴 [委託]

変更日付	変更事由
2015年3月20日	レーザーテック株式会社、IntelCorp.、Samsung Electronics Co.,Ltd を共同実施先に追加
2015年12月21日	国立研究開発法人産業技術総合研究所を共同実施先に追加
2016年2月15日	Taiwan Semiconductor Manufacturing Company Ltd.、メルクパフォーマンスマテリアルズ合同会社を共同実施先に追加

2.3 研究の運営管理

(1) 委託元実施(NEDO)

(1) - 1 予算所要額ヒアリング

次年度計画およびその予算に関して、実施者、NEDO、経済産業省担当課間で共通認識を持つために年1回予算所要額ヒアリングを実施

2011年度 2011年5月18日

2012年度 2012年4月26日

2013年度 2013年5月7日

(1) - 2 技術推進委員会を2回開催

定期的な進捗把握および今後の開発の方向性について、第三者の委員に意見を伺うことを目的に開催した。特に、2011年度(2012年2月8日)実施の技術推進委員会は、基本計画にある「研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」については、2011年度末に外部有識者からなる委員会を開催し、研究開発計画の達成目標に照らして達成度を評価し、将来の市場化へ向けた評価基盤プラットフォーム構築のため、2012年度以降は研究開発の実施体制を見直した上で研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」と統合して共同研究事業を実施する。」を実施するための「外部有識者からなる委員会」を兼ねる。開催日および委員名を以下に示す。

2011年度 2012年2月8日

2012年度 2012年11月13日

委員	東京工業大学大学院理工学研究科	教授	上田 充
	ギガフォトン株式会社	部長付	岡崎 信次*
	日本半導体製造装置協会(SEAJ)	部長	亀山 雅臣
	東京工芸大学大学院工学研究科	教授	渋谷 真人
	半導体産業研究所	所長	福間 雅夫
	東京電機大学 工学部	教授	堀内 敏行

*2011年度のみ

(1) - 3 進捗報告会

定期的な進捗把握を目的に、進捗ヒアリングを実施。これと技術推進委員会等によ

り、おおよそ四半期毎にプロジェクトの進捗把握を実施。

2011年度 2011年11月24日

2012年度 2012年7月26日

(1) -4 知的財産プロデューサー活用の推薦

独立行政法人工業所有権情報・研修館は、公的資金が投入された革新的な成果が期待される研究開発プロジェクトを推進する研究開発機関等に対し、知的財産マネジメントの専門家である知的財産プロデューサー（以下「知財PD」という。）を派遣し、当該研究開発プロジェクトの研究の初期段階より知財の視点から成果の活用を見据えた戦略の策定や研究開発プロジェクトの知的財産マネジメント等を支援することにより、我が国のイノベーションの促進に寄与することを目的として知財PD派遣事業を行っている。この知財PD派遣事業が本プロジェクトにおいて有用と考え、実施者にこの事業の活用を検討を提案した（2012年8月）。2013年度より本制度を活用し、知財PDによる知的財産権の強化活動を開始している。

(2) 実施者実施(EIDEC)

(2) -1 プロジェクトの成果報告会を兼ねて、EIDEC シンポジウムを年1回開催。

2011年度 2011年6月17日

2012年度 2012年5月11日

2013年度 2013年5月21日

2014年度 2014年5月20日

2015年度 2015年6月 3日

2016年度 2016年3月24日 *

*2016年度のみ「成果報告会」として開催

(2) -2 知的財産プロデューサー活用

本プロジェクトの研究開発を進めるにあたり、関係する全ての技術に注力することは困難であり、他のコンソーシアムや企業が先行している分野を認識した上で、競争力向上につながる技術に注力していかなければならないとの課題がある。そこで、2013年度より、工業所有権情報・研修館より知的財産プロデューサーを招き、本プロジ

エクトの重要テーマに関する競合特許の出願動向の調査を行い、より活用しやすい成果を目指した研究開発の方向性の検討を進めるとともに、国プロにおける知財マネジメントのあり方に関する社内レクチャーを行い（2013年5月29日）、研究者の知財意識の向上と特許提案の良質化を推進している。

2.4 研究開発成果の実用化・事業化に向けたマネジメントの妥当性

本プロジェクトは2015年度で終了するが、その後、マスク検査装置開発、EUVレジスト材料開発を企業において本格化し、hp16nm対応は2015年から、hp11nm対応は2017年からプロトタイプの検証を開始し、2～3年の量産化開発を経て量産製品出荷を見込む。これによりITRSロードマップ(2009年版)に対応するので、検査装置市場、材料市場の広がりが見込める。これらより、成果の実用化可能性、波及効果および事業化までのシナリオは十分に見込まれると考える。具体的には、テーマ毎の実用化、事業化は下記に記す。(図II-2)

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

EUVマスクブランク欠陥検査技術の直接の実用化、事業化元として、フォトマスクのブランク欠陥検査装置のトップシェアメーカー（ほぼシェア100%）であるレーザーテック株式会社を共同実施先として実施体制に入れた。また、この開発したEUVブランク欠陥検査装置を用いてEUVマスクブランクおよびEUVパターンマスクを実用化、事業化に結びつけるブランクスメーカーを含むマスクメーカーが参加している。さらに、EUVマスクの最終ユーザーとなる、デバイスメーカーがこのプロジェクトに参加している。

(2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発

EUVマスクパターン欠陥検査技術の直接の実用化、事業化元として、株式会社荏原製作所を共同実施先として実施体制に入れた。また、この開発したEUVマスクパターン欠陥検査装置のユーザーであるEUVパターンマスクを実用化、事業化に結びつけるマスクメーカーが参加している。さらに、EUVマスクの最終ユーザーとなる、デバイスメーカーがこのプロジェクトに参加している。

(3) EUVレジスト材料技術開発

EUVレジスト材料技術開発で開発されたEUVレジスト材料は、レジストメーカーが直接実用化、事業化を行う。EUVレジスト材料技術開発では、EUVレジス

ト材料に関連したプロセス技術も開発される。これらのプロセス技術は、東京エレクトロンが自社装置の開発に応用されることにより実用化、事業化されるとともに、デバイスメーカーがデバイスを製造するためにも活用される。

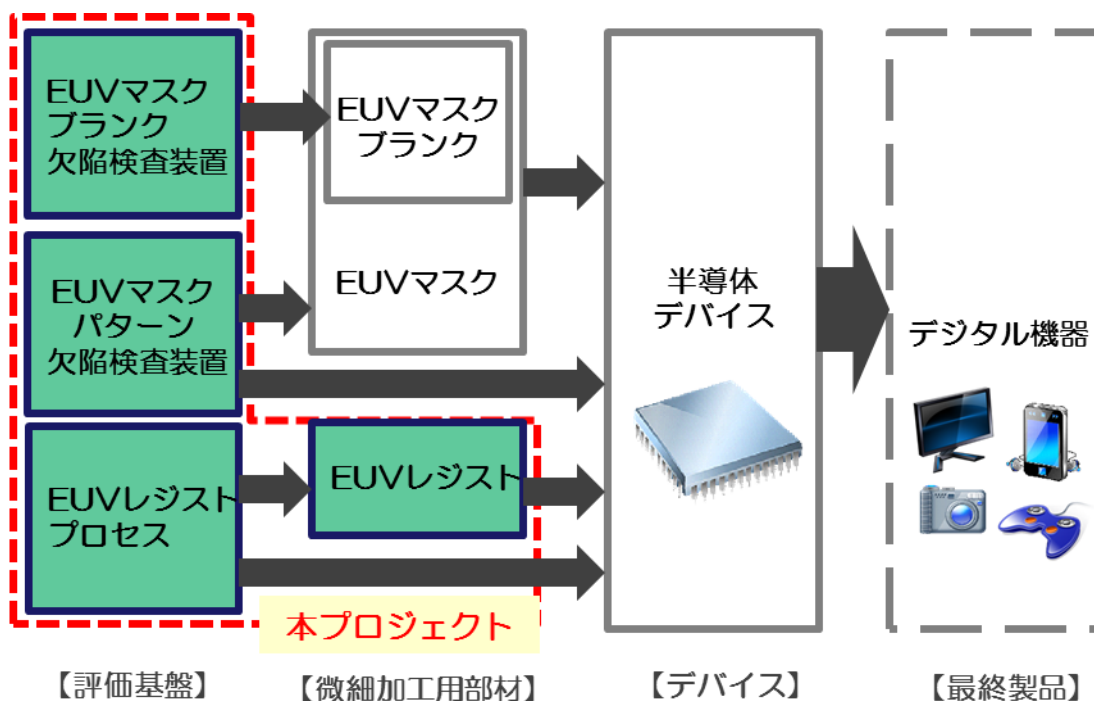


図 II-2 プロジェクト成果活用（実用化、事業化）の概要

3. 情勢変化への対応

(1) 東日本大震災

2011年3月11日に発生した東北地方太平洋沖地震による東日本大震災のために、産業技術総合研究所のスーパークリーンルームにある損傷した機器の修理のため、研究開発項目②の委託費用を2011年6月に2.2億円増額した。

(2) 他のレジスト

本プロジェクトの開始において、ITRS2009を参考にして、2013年度末にhp16nm対応技術の確立および2015年度末にhp11nm対応技術の確立を目標とした。しかし、NANDフラッシュメモリの微細化に関する国内企業の開発動向に合わせるため開発したEUVレジストをベースに他のレジスト材料を組み合わせることにより、hp11nm以細のレジスト技術を実現する開発を2013年度から開始した。

(3)フルフィールド露光機評価

2012年度までのEUVレジスト材料技術開発において、中間目標であるhp16nmを上回る解像度h p p 1 1 5 nmのEUVレジスト材料の開発に成功した。この成果は、SFET (Small Field Exposure Tool) 露光機を用いて、0.6mm×0.2mmの露光サイズでウェハの中心部分で実現したものである。これにより、EUVレジスト材料の基本性能が実証されたが、実用化のための欠陥発生、ウェハ面内均一性等の評価は未実施の段階であり、実用化に向けてこれらの評価は課題となっている。

これらの成果、課題を受けて（フルフィールド露光機による実用化評価に値するEUVレジスト材料が前倒して開発できたため）、実用化を見据えて、基本性能が実証されたEUVレジスト材料のフルフィールド露光機による評価を実施する。2013年度後半に予定していたフルフィールド露光機によるEUVレジスト材料の評価を実施する。実施においては、フルフィールドスキャナ設備NXE：3100を使用して評価を推進する計画である。このフルフィールド露光機による評価により、国内レジストメーカーが基本性能実証で世界をリードしているアドバンテージを維持したまま、実用化評価の面でもライバル他社に先行することにより、実用化促進および国際競争上の優位性の確立を同時に実現することを目指して実施する。

(4)hp11nm 対応露光装置

パターンサイズh p 1 6 nmまでのレジスト材料開発は既存のSFET (NA=0.3)を用いて推進してきたが、h p 1 1 nmのレジスト材料開発にはSFETでは解像度が不足するため、新たにNA=0.5のHSFETが必要となる。このため、2011年度3次補正予算でHSFETの要素技術の開発をMETI直執行で実施している。この開発成果を活用して、本プロジェクトのh p 1 1 nmのレジスト材料開発に対しては、新たにh p 1 1 nm対応 露光装置であるNA=0.5のHSFETを前倒して製作する。

(5)技術推進委員会

定期的な進捗把握および今後の開発の方向性について、第三者の委員に意見を伺うことを目的に開催した。

(5) - 1 第1回技術推進委員会 (2012年2月8日実施)

2012年2月8日に、研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤

技術開発」の評価を兼ねて第1回技術推進委員会を実施した。

事業の必要性、重要性を認めて頂き、達成された成果も妥当との意見を頂いた。これを基に、研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」は、2012年度以降、研究開発の実施体制を見直した上で研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」と統合して共同研究事業を実施することが了承された。第1回技術推進委員会での主な指摘事項と対応について表II-1にまとめた。

表II-1 第1回技術推進委員会（2012年2月8日実施）の指摘事項とその対応のまとめ

開発項目	指摘事項	対応
全体	研究員増強を含めた研究体制の強化	2012年度以降に必要な応じて研究員の増強
(1) EUV マスクプランク欠陥検査技術開発	hp 11 nm対応技術への展開が十分でない	2012年度の実施計画の拡大光学系(40倍)の検討を含めたhp 11 nm対応技術の開発を前倒して開始
	欠陥の転写性の理論・物理解析	2012年5月、EUV明視野顕微鏡による欠陥の観察技術の強化と転写性評価を目的に東北大学を再委託先に追加
(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発	高スループットが課題である	高輝度電子銃等の対策を2014年度に計画
(3) EUVレジスト材料技術開発	LWRを含めたレジスト性能の改善が必要	東京エレクトロンと共同実施を開始し、LWR改善を目的にリンスプロセスの開発を開始(2012年11月)
	無機レジストなど化学増感レジスト以外の各種レジスト評価も必要	2012年度にネガ型有機現像レジストの評価を実施。また、2013年度に大学等の開発したレジストの評価を計画
	hp 11 nm用露光環境の構築が必要	HSFETの製作を2013年度に計画
	次世代リソグラフィ技術の検討	EUVレジストをベースに他のレジスト開発を2013年度から開始

(5) - 1 第2回技術推進委員会（2012年11月13日実施）

設定目標に対する進捗の達成度を確認したうえで、委員の専門性を活かした中間目標達成のためのコメントを頂いた。第1回技術推進委員会での主な指摘事項と対応について表II-2にまとめた。

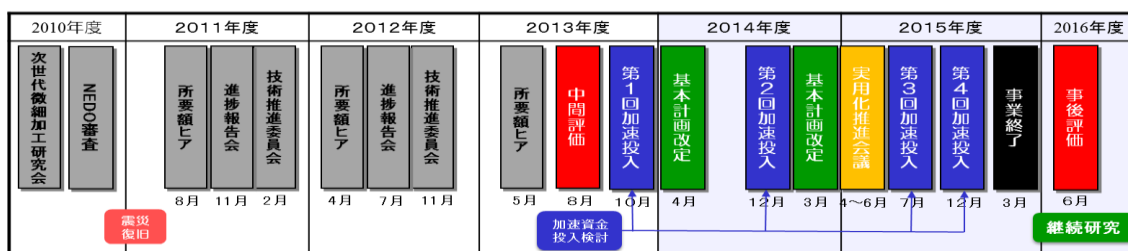
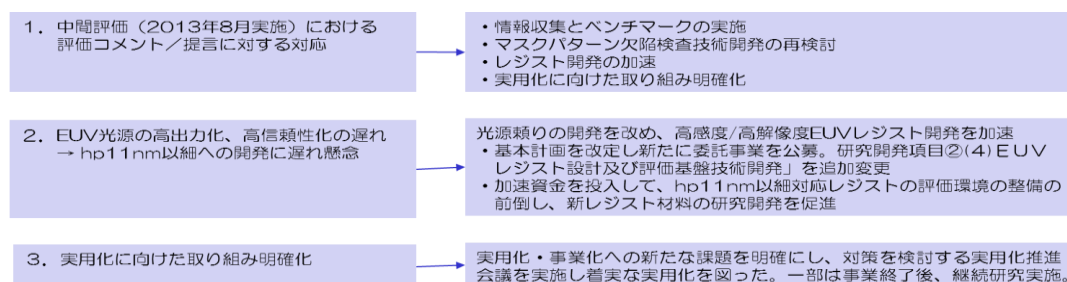
表II-2 第2回技術推進委員会（2012年11月13日実施）の指摘事項と対応のまとめ

開発項目	指摘事項	対応
全体（その他）	光源開発の重要性	別のプロジェクトで開発（本プロジェクトの推進部として推薦）
(1) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発	明視野顕微鏡の他分野(PI)応用	実施予定
(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発	高スループットが課題である（再指摘）	高輝度電子銃等の対策を2014年度より開始予定
(3) EUVレジスト材料技術開発	実用的なウェハ全面での評価の必要性	2013年度にフルフィールド露光評価を実施
	hp11nm用露光環境の構築が必要性（再指摘）	HSFETの製作を2013年度に計画

(6) 中間評価以降の状況変化への対応

中間評価以降の状況変化への対応の概要を以下の図II-3に示す。

図II-3 中間評価以降の状況変化への対応



(6) - 1 基本計画の改定

EUV光源の高出力化、高信頼性化の開発の遅れにより、hp11nm以細への研究開発の遅れが懸念されるため、2010～2011年度に実施した委託研究事業「次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発／研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」の研究開発内容を更に高度化することを目的として、研究開発項目②に「(4)EUVレジスト設計及び評価基盤技術開発」を新たに追加変更した。(表II-3に示す) この対応により、hp11nm以細のレジスト材料についての基盤技術を確立した。

表 II-3 基本計画の改定

概要	目的	具体的な内容	成果(効果)
(対象事業・項目) 平成26年度 業務委託 「研究開発項目②(4)EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発」を追加(1年間)	hp11nm以細対応の高感度EUVレジスト材料におけるLWR低減と高感度化を両立させる材料設計手法について基盤技術開発を行い、このレジスト材料の露光評価に必要な最大NA0.5の高解像度微小面積露光機HSFETを開発する。	高感度化に係るレジスト材料設計指針の構築、高感度化のための酸増殖剤の開発とこれを用いたレジストの性能評価、非化学増幅メタル系レジストの開発、及び総合収差0.6nmRMS以下の投影光学系を搭載したHSFETの開発	<ul style="list-style-type: none"> 高感度化と低LWR化を両立させる化学増幅型レジスト材料の設計指針を構築。 新規高分子タイプ酸増殖剤ポリマーの合成に成功し、2～3倍の高感度化を実現。 超高感度・高解像度メタル系レジストを開発。 投影光学系の総合収差0.29nmRMS以下、対SFET比10倍以上のウェハ面上照度、及びhp11nmの解像度を有するHSFETを開発。
(対象事業・項目) 平成27年度 業務委託 「研究開発項目②(4)EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発」を延長(1年間)			

(6) - 2 加速資金投入による研究開発の促進

2013年～2015年にかけて共同研究/委託事業の両方に対して、総計約5.1億円規模の加速資金を投入した。この対応により、hp11nm以細対応のレジスト材料及び欠陥検査装置に関する基盤技術を確立した。加速資金投入概要を表II-4に示す。

表 II-4 加速資金投入概要

概要	目的	具体的な内容	成果(効果)
(対象事業・項目) 平成25年度 共同研究 研究開発項目③(3)EUVレジスト材料技術開発 (加速資金投入額/決裁日) 128百万円 / 2013年10月11日	hp11nm以細対応のEUVレジスト開発に向けて必要な実験装置の整備前倒し	<ul style="list-style-type: none"> 現有SFETの光学系改良による高NA化(NA=0.3→0.5) フルフィールド露光機によるEUVレジスト材料の実証評価 	国内レジストメーカーが国内の設備を用いてhp11nm以細レジストの実験・評価を実施することが可能になり開発を迅速に進めることができた。フルフィールド露光評価により、EUVレジストの基盤的評価に続けて実用化評価をいち早く行う体制を構築し、国際競争上の優位性を確立した。
(対象事業・項目) 平成26年度 共同研究 研究開発項目①(1)EUVマスクブランク欠陥検査技術開発 (加速資金投入額/決裁日) 162百万円 / 2014年12月3日	EUVマスクブランク欠陥検査装置(ABI)用高輝度光源の実用化検討	高輝度光源の仕様明確化、性能評価、及びインターフェイスの構想設計を実施	hp11nm以細の微細加工技術に適用できるEUVマスクブランク欠陥検査装置における信頼性及び生産性向上のための高輝度EUV光源に係る基盤技術を構築した。
(対象事業・項目) 平成27年度 業務委託 研究開発項目②(4)EUVレジスト設計及び評価基盤技術開発 (加速資金投入額/決裁日) 180百万円 / 2015年7月7日	高感度化/高解像度化に有望なメタル系レジスト材料開発の加速	<ul style="list-style-type: none"> メタル系レジストの構成剤合成及び評価の迅速化による組成最適化 反応機構解明のためのレジスト分析・解析手法の拡大 	材料合成の回数増加と増量が可能になり、評価サイクルが短縮された結果、メタル系レジストの組成最適化が進み、大幅な性能向上につながった。反応機構解明のための様々な材料分析・解析を行うことが可能になり、材料設計指針構築に役立つ多くの知見が得られた。
(対象事業・項目) 平成27年度 業務委託 研究開発項目②(4)EUVレジスト設計及び評価基盤技術開発 (加速資金投入額/決裁日) 40百万円 / 2015年12月21日	メタル系レジストの露光評価機会増大、及び反応機構解明への新規解析手法による開発加速	<ul style="list-style-type: none"> hp11nmパターンのHSFET露光機会増大 高分解能電子顕微鏡を用いた構造解析の反応機構解明への適用 	HSFETを用いたhp11nmパターンの露光機会の増大により材料開発のフィードバックサイクルが短縮され、メタル系レジストの性能向上に大きな効果をもたらした。これまで確認する方法がなかったレジストの内部構造を明らかにすることができ、hp11nm以細対応のレジスト材料評価基盤技術の確立に大きく貢献した。

(6) - 3 継続研究による実用化

本プロジェクトにおいて確立した EUV マスクブランク欠陥検査技術及び EUV マスクパターン欠陥検査技術を基礎に hp7nm 対応を目指した欠陥検査装置の実用化に必要となる研究開発を目的とした継続研究を実施する。(表 II-5 に示す)

継続研究とすることにより本プロジェクトと同様の協力体制を維持することにより、実証研究を早期に進め、2018年～2019年頃の製品化を目指す。

表 II-5 継続研究概要

項目	内容
(1) EUVマスクブランク欠陥検査装置の高精度測定・装置安定性に係わる基盤技術開発	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p><目的> 元研究事業において確立したEUVマスクブランク欠陥検査技術を基礎に7nm世代対応を目指したEUVマスクブランク欠陥検査装置の実用化のために必要となる研究開発を目的とする。</p> <p><研究期間> 1年間(2016年度)</p> <p><委託先> レーザーテック株式会社</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;">  <p>EUVマスクブランク 欠陥検査装置</p> </div> </div>
(2) EUVマスクパターン欠陥検査装置の高精度測定・装置安定性に係わる基盤技術開発	<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 60%;"> <p><目的> 元研究事業において確立したEUVマスクパターン欠陥検査技術を基礎に7nm世代対応を目指したEUVマスクパターン欠陥検査装置の実用化のために必要となる研究開発を目的とする。</p> <p><研究期間> 1年間(2016年度)</p> <p><委託先> 株式会社荏原製作所</p> </div> <div style="width: 35%; text-align: center;">  <p>EUVマスクパターン 欠陥検査装置</p> </div> </div>

4. 中間評価対応

中間評価(2013年8月27日実施)における評価コメント/提言に対して以下の対応を行った。

(1) 情報収集とベンチマークの実施

- 調査事業(公募)を実施し、EUV その他の微細化露光技術に関する情報収集をしてロードマップ(2015年～2020年)を作成。
- 製品品種によって微細化露光技術の取り込み方と時期が異なることを踏まえ、製品品種毎にEUV露光技術の具体的な実用化/事業化の方向性を再確認した。
- EUV露光技術を単独で使用するだけでなく、他の露光技術(ArF液浸露光やダブルパタ

ーニングなど)や新規技術(DSA技術など)との組み合わせなどの可能性があることを確認した。

- 平成26年度の基本計画を変更し、新規の委託事業として研究開発テーマを追加。
hp11nm以細対応への基盤技術を確立した。

(2) マスクパターン欠陥検査技術開発の再検討

- 他方式と比較した電子線写像投影(PEM)方式による欠陥検査の利点を明確化した。

〈差別化ポイント〉

- ① 面照射によるTDIセンサでの2D化
- ② 高スループット化
- ③ DUV欠陥検査技術との親和性大

この点をマスクパターン欠陥検査技術を実用化する上での差別化ポイントとして優位性ある製品仕様を再設定し、重点的に研究開発を進めた。

これにより EUV マスクパターン欠陥検査装置の実用化・事業化が明確になった。

(3) レジスト開発の加速

EUV光源の高出力化だけに頼らず、hp11nm以細に対応するためレジスト材料の高感度化・高解像度化やプロセス最適化、そのための実験環境・体制の拡充を図った。

〈具体的な対応内容〉

- ①新規レジスト材料及び新規プロセス手法に関する研究開発テーマ(下記)を追加
 - ポリマー型酸増殖型レジスト
 - メタル系レジスト
- ②加速資金投入によるレジスト材料の評価環境の整備の前倒し
 - 高NA(0.3→0.5)化したHSFETの製作
- ③研究体制の拡充化
 - 研究開発体制の強化を図り、リンス液のプロセス最適化等、プロセス技術に係る基盤技術を構築した。

以上の対応により、hp11nm以細対応のレジスト材料開発の基盤を確立した。

(4) 実用化に向けた取り組み明確化

- ・調査事業（公募）による情報収集の結果や、状況変化等を踏まえ、マスクブランク／マスクパターン欠陥検査装置及びレジスト材料の実用化・事業化について、本プロジェクトに参画する企業16社各社と「実用化推進会議」の開催し検討した。
- ・EUVマスクブランク欠陥検査装置について、量産装置に不可欠な稼働率及びメンテナンス性を向上させるべく、EUV光源の運転条件の最適化、及び光源インターフェースの改良を行い、実用化への基盤技術を確立させた。

5. 評価に関する事項

NEDOは、技術的および政策的観点から見た技術開発の意義、目的達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等について、外部有識者による研究開発の中間評価を2013年度、事後評価を2016年度に実施する。また、中間評価結果を踏まえて必要に応じプロジェクトの加速・縮小・中止等見直しを迅速に行う。なお、評価の時期については、当該研究開発に係る技術動向、政策動向や当該研究開発の進捗状況などに応じて、前倒しする等、適宜見直すものとする。

研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」（1）～（3）については、2011年度末に外部有識者からなる委員会を開催し、研究開発計画の達成目標に照らして達成度を評価し、将来の市場化へ向けた評価基盤プラットフォーム構築のため、2012年度以降は研究開発の実施体制を見直した上で研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」と統合して共同研究事業を実施する。よって、中間評価、事後評価においては、研究開発項目②の成果を含めた上で研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」の評価を中心に行う。

また、事後評価においては、2014年度～2015年度に実施された研究開発項目②「EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」（4）に関する成果についても、研究開発項目①「EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」の評価に含めて行う。

Ⅲ EIDECにおける研究開発成果について

1. 事業全体の成果

2011～2015年度までの5年間の事業全体についての成果を、最終目標の達成状況、知財権の取得状況、学会・論文発表の状況に分別し、本節で示す。最終目標の達成状況については表Ⅲ.1.1に示すとおりである。以下に概要を示す。

EIDECプロジェクト基本計画では、平成25年度末までにhp16nm世代でのEUVリソグラフィ技術の量産化に不可欠な高精度・低欠陥マスク技術と関連検査技術、レジスト材料等においては高解像、低LWR (Line Width Roughness)、高感度、および低アウトガスを満たすレジスト材料を実現するための材料開発と評価技術開発にある技術的障壁を解決できる半導体デバイスプロセス基盤技術を確立することを目的としていた。

継続して平成27年度末までにhp11nm世代に対応可能な基盤技術を確立することを目的とした。

3つの大テーマの共同研究「研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発」における最終目標は以下のようなものである。

テーマ(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

- ・最終目標：hp11nm以細の微細加工技術に対応するEUVマスクブランクの許容欠陥の指標、及び、EUVマスクABI装置において6インチブランク全域にわたり位相欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能なEUVマスクABI基盤技術を確立する。

テーマ(2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発

- ・最終目標：hp11nm以細の微細加工技術に対応するEUVマスクパターンの許容欠陥の指標、及び、EUVマスクPI装置において6インチブランク全域にわたりパターン欠陥を検出する際の欠陥検出感度や検出確率などの指標を明確化し、これらの指標に対応可能なEUVマスクPI基盤技術を確立する。

テーマ(3) EUVレジスト材料技術開発

- ・最終目標：解像度hp11nm以細のレジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。また、開発したEUVレジストをベースに他のレジスト材料を組み合わせることにより、hp11nm以細のレジスト技術を実現する。

また、業務委託「研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発」での目標は、平成27年度末までに以下の目標を達成することである。

テーマ(4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発

- ・目標：HSFETの総合収差を、0.6nmRMS (Root Mean Square) 以内とすることを目標とし、hp11nm以細対応のEUVレジスト材料における材料設計手法及び評価の基盤技術を開発する。

さらにこれらのテーマは以下の中テーマとして分けられ、研究内容は以下のようである。

研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発

(1) -(i) ABI装置高度化(レーザーテックとの共同研究)

- ・研究内容：ABI装置をhp16nm、および、hp11nmの量産に適用するために必要となる欠陥検出性能と高スループットを実現し、装置生産性を高めメンテナンスコストを低減するためのABI装置高度化開発を行う。

(1) -(ii) ABI装置仕様検討

- ・研究内容：EUVマスクブランク欠陥の露光転写性を露光実験、および、EUV波長領域における高精度シミュレーションにより評価し、hp16nm、および、hp11nmの量産に適用するABI装置の欠陥検出性能に対する指標を明確化する。

(1) -(iii) マイクロCSMの開発(兵庫県立大学への再委託)

- ・研究内容：EUVマスクブランク上の欠陥の観察評価を行うために照明スポットサイズを縮小したマイクロCSMを実現し、欠陥の観察により得られる欠陥信号の解析を行い欠陥の特性評価を行う。

(1) -(iv) EUV明視野顕微鏡観察技術の開発(東北大学への再委託)

- ・研究内容：実ウェア露光装置では解像が困難なhp11nm以細でのブランク欠陥の露光転写性を観察評価を行うためのEUV明視野顕微鏡開発を行う。

(2) -(i) PI装置仕様検討

- ・研究内容：EUVマスクにあるパターン欠陥の露光転写性を評価し、hp16nm、および、hp11nmに対応するPI装置に必要な欠陥検出性能に対する指標を明確化する。また、必要な欠陥検出性能を実現するための画像処理技術を開発する。加えて、電子軌道シミュレーション技術を開発しPI装置の拡張性を確認する。

(2) -(ii) EUVマスクパターン欠陥検査装置(PI)コア技術開発(荏原製作所との共同実施)

- ・研究内容：PI装置にhp16nm、および、hp11nmにおいて求められる性能を実現するために必要なPI装置の高感度化・高スループット化開発を行う。

(3) -(i) EUVレジスト材料開発(東京エレクトロンとの共同実施)

- ・研究内容：研究開発項目②で整備した露光装置H S F E Tを用いて、解像度、L W R、感度、低欠陥の観点で優れた特性を持つレジスト材料およびプロセスを開発する。
- (3) -(ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立
 - ・研究内容：露光機光学系の劣化要因となるレジストアウトガスの、電子線 (EB) 照射方式による評価手法を確立する。さらに得られた知見に基づき、レジスト材料に対するアウトガスの観点からの設計指針を明らかにする。
- (3) -(iii) D S A技術開発
 - ・研究内容：h p 1 5 n mのD S Aにおける一貫プロセスによる歩留まり検証の知見を生かして、h pサブ1 0 n mのD S Aにおける一貫プロセスを構築し、3 0 0 m mウェハを使った歩留まり検証を行う。
- (3) -(iv) アウトガスデータベースの構築（兵庫県立大学への再委託）
 - ・研究内容：EUV照射方式のアウトガス評価手法により、レジスト組成などとアウトガスおよびコンタミネーションの関係を明らかにする。
- (3) -(v) 材料設計（大阪大学への再委託）
 - ・研究内容：サブ1 0 n m加工の理論予測を行い、その実現を検討する。E I D E C標準レジストの炉交互パターンのS E M解析を行い、潜像と現像その場観察によって得られる現像中の表面形状についても検討する。
- (3) -(vi) D S A材料技術開発（東京工業大学への再委託）
 - ・研究内容：h pサブ1 0 n mのD S A材料・プロセスを試作・評価し、h pサブ1 0 n mのD S Aにおける一貫プロセスに対応するD S A材料および周辺材料を選定する。
- (3) -(vii) D S A検査・計測技術開発（京都大学への再委託）
 - ・研究内容：3次元検査・計測技術として有力なi n - s i t u G I - S A X Sと3次元T E Mを使って、D S A欠陥やL W Rの発生要因を分析し、D S A欠陥およびL W Rの制御技術を確立する。
- (3) -(viii) D S Aシミュレーション技術開発（産業技術総合研究所との共同開発）
 - ・研究内容：D S Aプロセス挙動を予測できるシミュレーションの高精度化および高速化を実施し、D S Aプロセスの開発および評価を通じて得られる実験データを使ったシミュレーションモデルの検証を行う。
- (3) -(ix) D S A材料合成技術開発（北海道大学への再委託）
 - ・研究内容：h pサブ1 0 n mのD S A材料の合成方法を検討し、h pサブ1 0 n mの縮小パターンニングにおける一貫プロセスに対応するD S A材料の合成方法を選定する。

研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発

- (4) -(i) 高感度化に係わるレジスト材料設計指針の開発（大阪大学への再委託）
 - ・研究内容：ショットノイズの許容限界を反応機構に基づいたシミュレーションにより明らかにした上で、hp11nm以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にする。
- (4) -(ii) 高感度化のための酸増殖剤の開発（東京理科大学への再委託）
 - ・研究内容：高感度化と高解像性の両立を実現するために、増殖する酸を高分子主鎖に化学結合させた高分子タイプの酸増殖ポリマーの設計及び合成を行う。
- (4) -(iii) EUVレジスト高感度化の検証（産業技術総合研究所との共同実施）
 - ・研究内容：hp11nm対応の高感度EUVレジストを試作し、露光評価、プロセス最適化を実施する。また、非化学増幅メタル系レジストの開発を行う。
- (4) -(iv) 高解像度微小面積露光機の研究開発
 - ・研究内容：hp11nm以細の微細加工を実現するEUVレジスト材料の基盤技術開発に必要なNA可変の高解像度微小面積露光機HSFETを開発する。

これらのテーマに対する実施内容を以下にまとめた。

研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

(1) -(i) ABI装置高度化（レーザーテックとの共同研究）

ABI装置の構想設計を基に、EUV光源モジュール、照明光学系、および、対物光学系と、本テーマにより開発を行う高感度欠陥検出モジュール、真空搬送系、等を組み合わせることによりABI装置を実現する。このABI装置が、設計に従って完成し、仕様に適った欠陥検出性能等のhp16nmに対応した基本性能が得られることを評価し確認する。この評価に並行して、hp11nm以細に対応するための技術検討を行う。続いて、ABI装置をhp11nm以細の量産に適用するために必要となる欠陥検出安定性と高スループット、ならびに、装置生産性の向上とメンテナンスコスト低減を実現する。

【中間目標に向けた実施内容】

平成23年度に委託研究で行ったABI装置の構想設計を基に、本テーマにおいてTDI (Time Delay Integration) センサー、ステージ、信号処理システム、および、ブランクの真空搬送系の開発を行い、EUV光源モジュール、照明光学系、および、対物光学系とともにこれを組み上げABI装置を実現し、hp16nmに対応する基本性能が達成されていることを確認する。また、検出された欠陥の位置読み取り精度を高めるための高倍率レビュー機能を整備して機能の確認を行う。さらに、hp11nm以細に対応するABI装置を実現するために必要となる要素技術の検討を行い、ABI装置のhp11nm以細に対する拡張性を確認する。

【最終目標に向けた実施内容】

ABI 装置を hp11nm 以細の量産に適用するために必要となる欠陥検出安定性と高スループット、並びに、装置生産性の向上とメンテナンスコスト低減を実現することにより ABI 装置の完成度を高める。hp11nm の量産に対応する欠陥検出安定性向上のために ABI 装置の照明光学系の最適化を行う。また、欠陥位置読み取り精度を向上させる機械精度向上のための開発を行う。ABI 装置の高度化と並行して、hp11nm 以細に対応するための高精度シュバルツシルド対物鏡に係る基盤技術開発として、高精度対物鏡を実現するために必要となる鏡製造技術とその評価技術を確立する。さらに、量産において ABI 装置に必要な高機能、高生産性を実現するために、検出欠陥のレビュー機能を開発するとともに、装置メンテナンスコストの低減のための機構の開発、および、運転条件の最適化を行い ABI 装置の高度化開発を完了する。

(1) -(ii) ABI 装置仕様検討

ABI 装置を量産に適用するために、EUV マスクブランク欠陥の露光転写性評価を高精度で行い hp16nm、および、hp11nm に対応する ABI 装置に必要な欠陥検出仕様を明確化する。欠陥の露光転写性評価として、EUV 露光装置によるウェハ転写実験を行い、欠陥の ABI 装置における検出とウェハ上の転写を比較する。また、実露光実験と並行して EUV 波長におけるシミュレーション技術の開発を行い、高精度化を実現することにより、ブランク欠陥のサイズ、形状、材質（光学定数）等の欠陥に関する情報を反映したシミュレーションを可能にする。このシミュレーション技術の高精度化により ABI 装置における欠陥信号の強度プロファイルの予測も併せて行う。欠陥の特性による ABI 装置の検出信号変化を確認することで ABI 装置高感度化のための検討を可能とする。欠陥の特性の解析には、次項にあるマイクロ CSM や AFM (Atomic Force Microscope)、SEM (Scanning Electron Microscope)等を用いる。

【中間目標に向けた実施内容】

欠陥を有するテストマスクを EUV 露光装置によってウェハ上に転写し、欠陥の転写性と ABI 装置により得られる欠陥信号の比較を行う。また、欠陥による露光影響を正確に予測するためにシミュレーション技術の高度化を行い、hp11nm 検討への対応を検討する。欠陥がパターン転写に与える影響度の詳細な解析を行ない hp16nm 対応の ABI 装置に求められる検査感度を明確にする。さらに、ABI 装置により得られる欠陥信号と、計算シミュレーションとの比較を行って、ABI 装置に搭載された暗視野検査光学系の光学パラメタを検証し、hp11nm に対する ABI 装置技術の方向付けを行う。

【最終目標に向けた実施内容】

露光時にウェハ転写されるブランク欠陥が ABI 装置で事前に確実に検出されていること、並びに、露光転写に与える影響が ABI 装置の欠陥検出信号強度に対応していることを実露光による転写性評価実験で確認し、ABI 装置による EUV マスクブランク品質保証の有効性

を実証する。また、シミュレーションの高精度化により、欠陥の露光転写性評価に加え、ABI 装置による欠陥信号の解析を行うことで ABI 装置の高度化を確実なものにする。

(1) -(iii) マイクロ CSM の開発（兵庫県立大学への再委託）

EUV マスクブランク上にある欠陥の観察評価を行うために、照明スポットサイズを縮小したマイクロ CSM を実現する。マイクロ CSM における欠陥からの散乱光の特性評価を行うことにより、欠陥の特性解析を行うとともに、この評価結果より ABI 装置における欠陥検出性能向上に有効な光学系の仕様に関する検討を行う。

【中間目標に向けた実施内容】

EUV マスクブランク上にある微小欠陥の特性評価を行うためのマイクロ CSM システムを実現する。EUV 照明光を集光させるためのフレネルゾーンプレートを製作し、照明光が $\phi 200\text{nm}$ に絞られていることを確認する。 $\phi 200\text{nm}$ のビームスポットを活用してプログラム欠陥による散乱パターンの取得実験を行ない、幅 (FWHM) $\phi 30\text{nm}$ に至る微細なブランク欠陥についてまで散乱パターンを取得し評価する。マイクロ CSM による EUV マスクブランク上の欠陥の特性評価を進め、マイクロ CSM の回折像と欠陥の幾何学的構造の相関を整理して欠陥データベースを作成し、ABI 装置に欠陥検出信号の特性に関し解釈を行う。

【最終目標に向けた実施内容】

マイクロ CSM により個別に得られる欠陥の位相情報と強度情報により、欠陥の幾何学的構造 (欠陥形状) の再現、ならびに欠陥の材質の解析が可能であることを実証する。また、この位相情報と強度情報を直接取り込むことが可能となる高精度シミュレーション技術を開発する。加えて、マイクロ CSM により得られるブランク欠陥の回折プロファイルを解析し、ABI 装置の高度化開発において欠陥検出能力を向上することが可能となる光学系の検討を行う。

(1) -(iv) EUV 明視野顕微鏡観察技術の開発（東北大学への再委託）

露光装置では、解像が困難である $\text{hp}11\text{nm}$ 以細に対応したマスクにおける欠陥の露光影響を観察して確認するために、EUV 明視野顕微鏡を実現する。顕微鏡光学系の設計と製作は、東北大学にて行う。兵庫県立大学の協力の下、放射光施設ニュースバルにおいて、EUV 明視野顕微鏡による欠陥像の解析を行い、ABI 装置の仕様設定が適切であることを確認する。

【中間目標に向けた実施内容】

EUV 明視野顕微鏡を設計する。顕微鏡の光学系は、東北大学の設計による 2 段結像光学系で、3 枚の多層膜ミラーにより 1460 倍の拡大倍率を得る。ミラー基板の製作と形状計測は、東北大学にて行う。顕微鏡の完成後、兵庫県立大学の EUV 光源を用いてテストマスクを観察し、 $\text{hp}60\text{nm}$ 、 50nm 、 40nmL\&S パターンの解像を確認して、EUV 顕微鏡が $\text{hp}16\text{nm}$ ~ $\text{hp}11\text{nm}$ 以細の EUV マスク観察に十分な空間分解能を持つことを実証する。また、マス

ク上にある欠陥の観察を行い、EUV 顕微鏡を用いた欠陥観察の妥当性を検証する。

【最終目標に向けた実施内容】

EUV 明視野顕微鏡の光学系を構成する反射鏡の面内平坦度を向上させ、基材の状態で表面粗さ、特に低周波数領域の表面粗さを従前の 1/4 とし、1460 倍（限界解像度 8nm）の EUV 明視野像を取得して顕微鏡の改善を確認し、有効性を実証する。量産型 EUV 露光装置では解像することのできない hp11nm パターン内にあるブランク欠陥を観察し、顕微鏡により欠陥の露光転写性が確認できることを実証する。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

(2) -(i) PI 装置仕様検討

hp16nm、および、hp11nm におけるマスクパターン欠陥の転写性について露光シミュレーションを主に検討を行い、それぞれの世代に対応して PI 装置に必要な欠陥検出性能の仕様値を明示化する。また、欠陥検出のための画像処理技術、並びに、画像処理の最適化技術を開発し、PI 装置にそれぞれの世代で必要となる欠陥検出性能の実現を可能とする。さらに、電子軌道シミュレーション技術の開発を行い、PI 装置の写像投影光学系より得られる撮像条件に依存した電子線画像を再現し、欠陥検出のために最適な PI 装置の運用条件を検討する。

【中間に向けた実施内容】

欠陥の露光転写性をシミュレーションにより hp16nm において検出が必要となる欠陥サイズをマスクに対する露光時の照明光の入射角、欠陥の膜厚を考慮して正確に求める。開発した写像投影光学系の解像度と電子線透過率を評価して従来装置に対する性能の向上を確認し、加えて、hp11nm 対応ために必要な改善量を特定する。また、マスク構成部材の二次電子放出効率を精密に測定し利用することで電子線軌道シミュレーションにより生成する電子線画像の再現性精度を向上させる。得られる欠陥画像を解析することにより 16nm サイズ凹凸欠陥検出のために必要な検査条件を設定する。また、PI 装置のダイ比較欠陥検査における感度向上のために、比較を行うダイの相互位置を高精度で合わせるアライメント機能と、高感度欠陥検出のためのノイズ低減機能と欠陥信号強調機能を持つ画像処理技術を開発しその効果を確認する。

【最終目標に向けた実施内容】

露光シミュレーションにより、hp11nm に対応する PI 装置で検出することが必要となる欠陥サイズを特定し、開発装置の感度仕様を決定する。また、PI 装置に搭載された電子線光学系を電子軌道シミュレーションに取り込み、開発に係る PI 装置で得られる電子線画像を精度よく生成し、この生成画像により欠陥検出性能の評価を実施する。これにより、装置に必要とされる機能、並びに、精度仕様を明確化する。また、提案されている様々な構造の EUV マスクによる PI 装置の電子線像を生成し、欠陥検出に必要な装置の最適運転条件を提示する。さらに、hp11nm 以細に対応する欠陥検出能力向上のために、電子線画

像におけるノイズを低く抑える画像処理技術を開発し、加えて、欠陥検出時の論理パラメータを最適化するためのラーニングシステムの開発を行う。これらの開発により最適化された画像処理を取得画像に適用し、所望の欠陥検出感度が得られることを実証する。

(2) -(ii) EUV マスクパターン欠陥検査装置コア技術開発 (荏原製作所との共同実施)

平成 23 年度に委託研究で開発した高解像度電子線写像投影光学系を搭載する PI 装置を実現し、PI 装置の高感度化、高スループット化開発を行うことにより、hp16nm に対応する PI 装置性能を実証する。さらに、電子線写像投影方式による欠陥検査の利点である高スループットをさらに向上させるために高速画像取得技術の開発を行い、hp11nm 以細に対応するための PI 装置のコア技術を実現する。

【中間目標に向けた実施内容】

hp16nm、および、hp11nm に対応するために必要な電子線光学系の収差低減と透過率向上の実現を照明光学系と結像光学系を結合して評価する。解像度を改善するための鏡筒内印加電位の評価手法を確立し、必要となる性能を実現する。また、開発した電子線写像投影光学系を搭載する PI 装置性能を確認するために、600MPPS の処理速度での 6 インチマスク全面 19 時間スキャンを実証し、併せて、16nm□欠陥の検出が可能であることを実証する。

【最終目標に向けた実施内容】

実現した写像投影方式の電子線欠陥検査装置において、写像投影光学系による高スループット電子線欠陥検査の利点をさらに拡充するために高速画像取得技術の開発を行う。高速に画像を取得するために必要となる画像センサーと電子線光学系を開発し実現することにより、hp11nm 対応 PI 装置に必要とされる 1.8GPPS の処理速度での動作を実証し、また、前項の仕様検討において開発された画像処理技術により、hp11nm において検出が必要となる 13nm□欠陥の検出が可能であることを実証する。

(3) EUV レジスト材料技術開発

(3) -(i) EUV レジスト材料開発 (東京エレクトロンとの共同実施)

解像度 hp11nm 以細の EUV レジストについて、LWR、感度、アウトガスの合否基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発を行う。hp11nm 以細の EUV レジストを開発するために、シミュレーションによって hp11nm 以細でのコントラスト計算を行う他、様々な EUV レジスト材料の評価を行う。また、レジスト反応解析を行い、材料・プロセス開発にフィードバックする。これらの開発から、第 6 次標準レジストを選定する。

また、hp11nm 以細用レジストのより実用化に向けた評価を進める。具体的には、フルフィールド EUV 露光、EB 露光等によるレジスト材料ならびにレジストプロセスに関して、まず、感度、解像度、LWR の基本性能を評価する。その後、マージン評価（フォーカスマージン、露光量マージン等）を行う。さらにパターン寸法精度評価を行う。

さらにEUVレジストの研究開発を行っている大学・研究機関の中で、事前調査・個別ヒヤリングにて有効性が期待される新規材料等について、有効性の検証をEB露光等にて行う。具体的には、触媒作用による高感度化・ラフネス改善材料、増感材料、新規高感度化・低ラフネス化露光方法等の候補材料・技術の評価を実施する。EIDECにて有効性を確認した後、現有技術（例えば、光酸発生剤(Photo Acid Generator : PAG)、配合比率、等のノウハウ）と組合せて、量産化に向けた詳細検討（例えば、欠陥対策精製、スケールアップ検討等）を進める。これら一連の開発、評価で得られた結果から、h p 1 1 n m以細に対するレジスト材料、プロセスの課題を明確にして、学会などの情報収集からまとめたベンチマーキング結果と合わせて、h p 1 1 n m以細に対する開発目標とマイルストーンを設定する。

実用化水準におけるEUVレジストのLWR、感度、解像度の基準を策定し、それらの基準を満足するレジスト材料を開発する。高分子樹脂を用いた化学増幅レジストにおける解像度・LWR・感度・低欠陥性といったレジスト性能を最大限引き出すために、平成26年度までに構築したシミュレーション手法の最適化アルゴリズムや、分子動力学シミュレーション、リソグラフィプロセスの分析解析等を行う。これらで得られた結果を実際のレジスト材料開発にフィードバックし、化学増幅型レジストの感度向上を図った新たなh p 1 1 n m以細の標準レジストを選定する。HVMに向けてのレジストについては、HSFET露光等で評価を行い、解像度、LWR、感度、低欠陥性の観点で優れた特性を持つレジスト材料およびプロセスを開発し、実用化に結び付ける。

【中間目標に向けた実施内容】

レジスト樹脂のスクリーニングから、リソグラフィ性能を向上させる新規樹脂や増感ユニットを見出す。パターン倒れ改善、LWR改善が可能な新規リンス液ならびにリンスプロセスレシピを見出し、EIDEC標準プロセスを確立する。多数のレジスト材料を評価し、解像度、LWR、感度のバランスが良好なEIDEC標準レジストを選定する。

【最終目標に向けた実施内容】

- [1]多数のレジスト材料を評価し、解像度、LWR、感度のバランスが良好なEIDEC標準レジストを選定する。また、11nmライン形成を試みる。
- [2]新規リンス液・プロセスを創出したことにより、パターン倒れを改善する。また、下地膜材料の開発によるレジスト高感度化を検討する。
- [3]HS-AFM結果の定量化によるレジスト溶解特性を材料設計にフィードバックする。具体的には、ラインパターン形成過程観察にて、ブリッジ・断線欠陥発生挙動を明確にする。

(3) -(ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立

EUV露光装置内の光学系の反射率低下の要因となるレジストアウトガスの評価手法に関しては、EUV露光装置メーカーであるASMLからウィットネスサンプルと呼ばれる多層膜

EUV ミラーを模したサンプル上にレジストアウトガスから成るコンタミネーション(以下、コンタミ)を堆積させ、そのコンタミを解析する手法が提案されている。コンタミは、主に hidrocarbon から成り、水素ラジカルに曝露するクリーニング処理で除去可能なクリーナブルコンタミとクリーニング後もウィットネスサンプル上に残留するノンクリーナブルコンタミに大別できる。クリーナブルおよびノンクリーナブルコンタミは、露光装置の生産性を考慮し勘案された判定基準が設定され、フルフィールド EUV 露光装置にてリソグラフィ評価を行う際には、レジストがアウトガス評価において、その基準を満たしていることが求められている。さらに、上記アウトガス評価は、レジストの組成比の変更、プロセス条件の変更の際にも、再評価が必要とされている。ASML はアウトガス発生およびコンタミ堆積のために、レジストおよびウィットネスサンプルへそれぞれ照射する EUV 光の代替として、EB を用いる手法を推奨している。しかし、EB 照射によるアウトガス評価手法の検証は不十分である。本研究においては、上記状況を鑑み、EUV レジストのアウトガス評価に EB を用いる手法の妥当性を検証する。妥当性が得られた場合においては、EB 照射方式の評価手法の高精度化を行う。また、全数検査を求められているレジストアウトガス評価の評価必要数削減を検討する。さらには、アウトガス判定基準を検証する。加えて得られた知見に基づき、レジスト材料に対するアウトガスの観点からの設計指針を明らかにする。

【中間目標に向けた実施内容】

[1] ASML が推奨する EB 照射方式によるアウトガス評価手法と EUV 光照射方式との比較評価を行い、妥当性を検証する。具体的にはクリーナブルコンタミおよびノンクリーナブルコンタミについて EB 方式と EUV 光方式との相関を実証評価する。さらに、アウトガス計測の誤差要因を解析し、高精度測定手法を確立する。

[2] EUV レジスト材料において同一組成で光酸発生剤 (PAG) 添加量および溶解抑止基の保護率などの組成比を変えた一群のレジスト (レジストファミリー) からのアウトガス評価を行い、アウトガス特性の組成比依存性を明確化することで評価数の削減ルールに関する方針を明らかにする。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] EB 照射方式のレジストアウトガス評価手法と海外レジストアウトガス評価機関 (imec、SEMATECH、NIST) のアウトガス評価手法との比較評価を実施する。得られた結果に基づき、アウトガス評価手法の更なる高精度化を進める。

[2] モデルレジストを用いた実験およびシミュレーションにより、コンタミ形成のレジスト組及びプロセス条件依存性を明らかにし、得られた知見を材料設計にフィードバックすると共に、評価数の更なる削減に関して検討する。また、各レジストメーカーの実際のリソグラフィ性能評価に供する化学増幅型レジストのアウトガス評価を複数実施し、アウトガスの観点からの化学増幅型レジストの実用化可否に関する方向性を明らかにする。

[3] 高性能化が期待される非化学増幅型レジストであるメタル系レジストに関して、そのアウトガス特性に対応した水素雰囲気下アウトガス評価機構を高出力 EUV 照射装置 (HPEUV) に付与し、メタル水素化物によるアウトガス発生の有無を確認する。

(3) -(iii) DSA技術開発

hp 15 nmの縮小パターンニングにおける一貫プロセスの性能向上と工程削減を実施し、より実用的な一貫プロセスを構築した。縮小パターンニングにおける一貫プロセスの実用性評価として、300 mmウェハを使った歩留り検証を実施する。一貫プロセス構築に際しては、材料起因の不確実性を取り除くために、hp 15 nmの相分離が検証されているポリスチレン・ポリメチルメタクリレートブロック共重合ポリマーをDSA材料として用いる。hp 15 nmの縮小パターンニングにおける一貫プロセスによる300 mmウェハを使った歩留り検証の知見を生かして、hpサブ10 nmの縮小パターンニングにおける一貫プロセスの性能向上と工程削減を実施し、より実用的な一貫プロセスを構築する。また、hpサブ10 nmの縮小パターンニングにおける一貫プロセスの実用性評価として、300 mmウェハを使った歩留り検証を実施する。一貫プロセス構築に際しては、hpサブ10 nmの相分離に対応できるブロック共重合ポリマーをDSA材料として用いる。

また、シミュレーション技術開発として、DSAプロセスの寸法ばらつきや欠陥・LWRの発生に影響を及ぼす因子を反映できるシミュレーションモデルを構築し、より実用的なシミュレーションモデルに改良するために、実測データとの比較を通して、シミュレーションモデルの高精度化開発を行うとともに高速化を実施する。更に、DSAプロセスにおける寸法のばらつき、欠陥やLWRの発生などの挙動を、高精度かつ高速に予測できるシミュレーション技術を開発し、開発されたシミュレーション技術を用いて、高精度で低欠陥のDSAプロセスの構築に向けた材料開発ならびにプロセス技術を確立する。

【中間目標に向けた実施内容】

専用のプロセス装置、エッチング装置の仕様を策定し、産総研SCRへ装置を導入する。DSA材料開発(ブロック共重合ポリマー、中性化膜)と、中性化層成膜・加工、レジスト剥離、マイクロ相分離、現像プロセスを開発し、hp 15 nm L/Sパターンを300 mmウェハで形成する。後述する東京工業大学への再委託で開発した材料を使用して、周辺材料とプロセス開発を行い、hpサブ10 nm L/Sパターンを形成する。DSAに特化したマイクロ相分離シミュレーションを開発し、系の持つ自由エネルギーを比較することにより、計算機によるプロセスマージンを予測する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] hp 15 nm DSAプロセスとして、化学ガイド方式と物理ガイド方式の両方の利点を兼ね備えたハイブリッドガイド方式のCOOLプロセスを独自に開発し、構築されたDSAプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特性検証を実施する。

[2] hpサブ10nm DSAプロセスとして、物理ガイドプロセスを独自に開発し、構築されたDSAプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特性検証を実施する。

[3] DSAプロセスにおける寸法のばらつき、欠陥やLWRの発生などの挙動を、高精度かつ高速に予測できるシミュレーション技術を開発し、開発されたシミュレーション技術を用いて、高精度で低欠陥のDSAプロセスの構築に向けた材料開発ならびにプロセス技術を確立する。

(3) -(iv) アウトガスデータベースの構築（兵庫県立大学への再委託）

化学増幅型モデルレジストを用いた EUV 照射方式のアウトガス評価により、レジスト組成などとアウトガスおよび乃至コンタミネーションの関係を明らかにする。また、新規レジスト材料に対するアウトガス特性の知見を深め、新規レジストのアウトガス評価や判定基準の必要性に関する検討を行う。

【中間目標に向けた実施内容】兵庫県立大学のアウトガス評価装置を8インチウエハ対応に改良し、アウトガス評価の効率化を図る。コンタミ形成の再現性を確認し、EB方式との比較におけるコンタミ計測の補正方法を確立する。レジストファミリーのEB照射方式との相関を確認する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] 化学増幅型レジストの組成とコンタミの要因解析を行い、ハイドロカーボン系ガスの分圧とコンタミ膜厚との関係を明らかにする。

[2] メタル元素を含む有機無機ハイブリッドモデル材料のアウトガス特性を評価し、水素環境下以外でも発生しうるメタル系アウトガスの有無を明らかにする。

(3) -(v) 材料設計（大阪大学への再委託）

本研究で取り扱う解像度・LER・感度・ELおよびレジスト欠陥の発生確率のうち、通常のレジスト評価で得られるSEM画像から、実用レベルでレジスト欠陥の発生確率を予測するためには、レジスト反応機構に忠実なシミュレーションを高精度に行うことが必要である。EIDECから提供する露光結果（SEM画像）の解析を行い、解析手法の高度化、特に高精度化を行う。高精度化するために、シミュレーションコードやシミュレーションに使用するデータベース等の最適化を行い、EUV露光から現像リンス工程までのレジスト反応をより実際に則したものにす。これにより、SEM画像から得られる実際のパターン情報とシミュレーションにて算出されたパターン情報の誤差を小さくすることができる。シミュレーション高精度化の一環として、サブ10nm加工の理論予測を行い、サブ10nm実現のためには二次電子による感光点について詳細に検討していく。酸発生剤濃度の増加は通常レジスト性能の劣化を伴うため、性能劣化を誘起しない酸発生剤の添加技術についても検討していく。

解析手法の高度化に関して、EIDEC 標準レジストの露光後パターンの SEM 解析を行い、SEM 解析によって得られる潜像と現像その場観察によって得られる現像中の表面形状についても検討を行う。

【中間目標に向けた実施内容】

SFET での露光結果から、レジストのブリッジ欠陥、ブレイク欠陥、倒壊確率等を測定し、レジスト潜像との関係を明らかにする。独自に開発したシミュレーターを用いて推定したパターンの潜像から、ブリッジ欠陥やラインブレイク欠陥を消失させるのに必要な、平均保護基濃度と溶解しきい値の関係を明らかにする。EIDEC 標準レジストを用いて、レジスト中に形成される潜像と保護基数の揺らぎを推定可能にし、未露光のレジストの保護基数の揺らぎが潜像揺らぎに与える影響を明らかにする。EIDEC 標準レジストの酸拡散長が、hp16nm における最適酸拡散長と比較し妥当性を確認する。分子サイズや保護基密度等のレジスト分子構造を確率論的観点から考察し、分子レベルでの設計指針を得る。

【最終目標に向けた実施内容】

- [1] 解析手法の高度（高精度）化により、推定したパターンの潜像から、最適熱化距離のは解像度、酸発生剤濃度や感度などへの依存性を明らかにする。
- [2] サブ 10 nm における LER、レジスト欠陥の発生確率と電子の熱化距離の関係を解明し、サブ 10 nm の量産を実現するために必要になると考えられることを明らかにする。

(3) -(vi) DSA 材料技術開発（東京工業大学への再委託）

hp サブ 10 nm のモデル DSA 材料を試作・評価し、hp サブ 10 nm の縮小パターンニングにおける一貫プロセスを構築する。この一貫プロセスの構築においては、DSA ミクロ相分離におけるブロック共重合ポリマーの挙動も解析し、ガイド材料、中性化膜材料を含めた周辺材料および設計の方針を決定していく。次に、hp サブ 10 nm の DSA 材料を試作・評価し、hp サブ 10 nm の縮小パターンニングにおける一貫プロセスに対応する DSA 材料および周辺材料を選定する。

【中間目標に向けた実施内容】

hp サブ 10 nm のモデル DSA 材料として、シリコン含有ブロック共重合ポリマーを試作し、バルクでのパターン形成を確認する。

【最終目標に向けた実施内容】

- [1] シリコン含有 PMAPOS とフッ素含有 PTFEMA から成るブロック共重合ポリマーを開発し、ラメラ構造の垂直配向構造から誘導される hp 8 nm のパターン形成を検討する。

(3) -(vii) DSA 検査・計測技術開発（京都大学への再委託）

3次元検査・計測技術として有力な In-Situ GI-SAXS (Grazing-Incidence Small-Angle X-ray Scattering) や 3次元 TEM (Transmission

Electron Microscopy) を使って、DSAマイクロ相分離後のモデルDSA材料について、DSA欠陥やLWRのDSA材料依存性、ガイドパターン依存性、プロセス条件依存性を評価し、欠陥やLWRにおける重要因子を抽出する。モデルDSA材料は、DSAシミュレーションに合わせて選定していく。また、DSA欠陥やLWRの発生要因を分析し、DSA欠陥およびLWRの制御技術を確立する。

【中間目標に向けた実施内容】 SPRING 8放射光を利用したIn-Situ GISAXSによる3次元検査・計測技術を開発する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] In-Situ GISAXSおよび3次元TEMによる3次元検査・計測技術を開発し、経時測定技術を含めた3次元検査・計測技術を使って、DSAマイクロ相分離におけるDSA欠陥解析評価技術を確立する。

(3) -(viii) DSAシミュレーション技術開発（産業技術総合研究所との共同実施）

DSAプロセス挙動を高精度かつ高速に予測できるようにシミュレーションモデルの検証を実施する。具体的には、ブロック共重合ポリマーのマイクロ相分離現象を高精度かつ高速に再現する代表的なソルバーモデルとして、分子MC (Monte Carlo) 法による汎用分子シミュレーションを開発する。

【中間目標に向けた実施内容】 ソフトマテリアルにおける統合シミュレーションであるOCTAをベースに、DSAプロセス挙動を高精度かつ高速に予測できるDSAシミュレーションを開発する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] DSAプロセス挙動を高精度かつ高速に予測できる分子MC (Monte Carlo) 法による汎用分子シミュレーションを開発し、DSAプロセスの開発および評価を通じて得られる実験データを使ったシミュレーションモデルの検証のために活用する。

(3) -(ix) DSA材料合成技術開発（北海道大学への再委託）

hpサブ10nmのDSA材料の合成方法を検討し、hpサブ10nmの縮小パターンニングにおける一貫プロセスに対応するDSA材料の合成方法を選定する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] ポリカプロラクトンPCLとマルチヘプタオースMHから成るブロック共重合ポリマーに多分岐構造を導入するDSA材料合成技術を開発し、hpサブ10nmのパターン形成が可能なDSA材料の分子設計指針を確立する。

研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発

(4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発

(4) - (i) 高感度化に係わるレジスト材料設計指針の開発 (大阪大学への委託研究)

レジスト高感度化によって露光時のフォトン数が減少し、ショットノイズが増大してパターン忠実度が劣化する。このショットノイズの許容限界を反応機構に基づいたシミュレーションにより明らかにした上で、光学像からレジスト像への変換プロセスを精査し、h p 1 1 n m以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にする。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] レジスト材料の潜在的な性能と要求仕様の関係から、エネルギー不足と情報不足(レジストが十分にエネルギーをキャッチ出来ない状態)により到達出来ない領域を明らかにする。

(4) - (ii) 高感度化の為に酸増殖剤の開発 (東京理科大学への再委託)

従来の酸増殖レジストでは困難であった高感度化と高解像性の両立を実現するために、増殖する酸を高分子主鎖に化学結合させた高分子タイプの酸増殖ポリマーの設計及び合成を行う。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] 従来の酸増殖レジストでは困難であった高感度化と高解像性両立のため、増殖する酸を高分子鎖に化学結合させた新規高分子タイプ酸増殖ポリマーを合成する。さらには、それを用いたレジスト材料が酸増殖ユニットを有さない通常の化学増幅型レジストに対して、高感度化となることを実証する。

(4) - (iii) EUVレジスト高感度化の検証 (産総研との共同実施)

酸増殖剤のアイデアや基礎技術を元に、E I D E Cにてアイデアのブラッシュアップを行い、当該アイデアをベースとしたh p 1 1 n m対応の高感度EUVレジストを試作し、H S F E T露光、E B露光等を用いて露光評価、プロセス最適化を実施する。また、従来のレジストの化学増幅レジストとは異なる反応メカニズムに基づく非化学増幅メタル系レジストの開発を行う。

【最終目標に向けた実施内容】

[1] 新規な反応機構を有するメタルレジストの研究に着手し、超高感度・高解像力のメタルレジストを開発する。さらに、その反応機構解析を検討し、これまで確認する方法がなかったレジスト膜内部の構造まで解析を行い、その構造を明らかにする。

(4) - (iv) 高解像度微小面積露光機の研究開発

hp11nm 以細の微細加工を実現する EUV レジスト材料の基盤技術開発に必要な NA 可変の高解像度微小面積露光機 HSFET を開発する。

【最終目標に向けた実施内容】

[1]最大 0.51NA で且つ NA 可変とする投影光学系モジュール及び照明光学系モジュールの組立調整を行う。投影光学系の総合収差 0.6nm RMS 以内の達成を目標とする。照明光学系モジュール及び投影光学系モジュールの装置本体への組込み、ならびに光源、機構系を含めた装置の総合調整を行い、hp11nm の解像度を確認する。

表Ⅲ.1.1 最終目標の達成状況

研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料開発

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

開発項目	最終目標	達成度	達成状況
(1) - (i) ABI装置高度化 (レーザーテックとの共同実施)	[1] 高感度欠陥検出モジュール開発による量産に必要なとされる欠陥検出感度の実現	達成	[1] hp16nm 世代に検出が必要とされる 1nm 高/50nm 幅の多層膜欠陥、hp11nm 世代に検出が必要とされる 1nm 高/40nm 幅の多層膜欠陥の検出を実現し、量産に必要な欠陥検出感度を実証した。
	[2] 量産に対応した欠陥検出の安定性実現	達成	[2] 欠陥検出の安定性を向上するために、照明光学系の NA を 0.07 より 0.1 に拡大し低アスペクト欠陥の検出信号強調が実現した。これにより検出が必要となる露光転写の可能性のある欠陥をもれなく検出できることを実証した。
	[3] 量産に対応した装置機能の実現	達成	[3] 量産装置としての市場価値を高めるべく、装置機能の充実を図った。高倍率観察光学系による欠陥の位置読み取り精度の向上のための機械精度向上施策により 20nm 以下の測定誤差の達成を実証した。また、高倍率観察光学系に明視野観察機能を実装し、欠陥の特性識別（凹凸の識別）が可能となることを実証した。
	[4] 量産に対応した装置安定稼働条件の実現	達成	[4] EUV 光源の安定稼働条件の確立、ならびに、照明光学系の耐性向上により、168 時間（一週間）以上の装置安定稼働が可能であることを実証した。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(1) - (ii) ABI装置仕様検討	[1] 欠陥の露光転写性評価によるABI装置の感度確認	達成	[1] imec と露光転写性の共同評価実験をおこない、露光転写される多層膜欠陥が予めABI装置で100%欠陥検出されていること、また、露光に与える影響がABI装置の欠陥検出信号強度に対応していること確認し、ABI装置の有効性を実証した。
	[2] シミュレーション技術による欠陥転写性の予測、ならびに、ABI装置の検査光学系の最適化	達成	[2]欠陥の転写影響を確認するためにシミュレーションの高精度化をおこない、欠陥の評価結果を直接入力できる機能を開発して欠陥の転写影響を予測しその妥当性を確認した。また、シミュレーションにABI光学系を取り込むことにより、上述の照明光学系NA拡大の効果を事前に正確に予測し、装置高度化開発におけるABI装置の改善を支援した。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(1) - (iii) CSMの開発(兵庫県立大学への再委託)	[1] マイクロCSMの200nm照明実現	達成	[1] 微小領域照明のためのフレネルソープレートを実現し、200nmスポットの照明を可能とした。
	[2] マイクロCSMによる多層膜欠陥検出像の解析	達成	[2] マイクロCSMにより得られる多層膜欠陥の回折像を解析し、ABI装置の照明系NA拡大による低アスペクト欠陥の信号が強調されることを事前に確認し、装置高度化開発におけるABI装置の改善に貢献した。
	[3] マイクロCSMによる欠陥データベースの構築	達成	[3] マイクロCSMにより得られる位相情報と強度情報により、欠陥の幾

			何学的構造（欠陥形状）の再現、ならびに、欠陥の材質の解析が可能であることを実証した。
--	--	--	--

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(1) - (iv) EUV明視野顕微鏡観察技術の開発 (東北大学への再委託)	[1] EUV明視野顕微鏡の実現	達成	[1] 顕微鏡のためのシュバルツシルド光学系を作製し、完成した光学系の精度をさらに高めることにより、1460倍（限界解像度8nm）のEUV明視野像を取得することにより顕微鏡の有効性を実証した。
	[2] EUV明視野顕微鏡による多層膜欠陥の転写性予測	達成	[2] 量産型 EUV 露光装置では解像することのできない hp11nm パターン内にある多層膜欠陥の観察像を取得して、顕微鏡により露光影響が確認できることを実証した。

(2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(2) - (i) PI装置仕様検討	[1] 装置仕様（欠陥検出感度）の導出	達成	[1] 露光シミュレーションにより、hp16nm 世代においては 64nm パターン中にある 16nm サイズ、hp11nm 世代においては 44nm パターン中にある 13nm サイズの欠陥検出が必要となることを確認し、開発装置の感度仕様を決定した。
	[2] 軌道シミュレーションによる電子線増解析	達成	[2] 電子軌道シミュレーションに電子線光学系を取り込むことにより、電子線画像、ならびに、欠陥検出感度の評価を可能とし、これにより、装置に必要とされる仕様を明確化し

	[3] 欠陥検出論理の最適化	達成	<p>た。また、提案されている様々な構造の EUV マスクによる電子線像を再生し、欠陥検出に必要となる装置の最適運転条件を提示した。</p> <p>[3] 電子線画像によるノイズを低く抑える欠陥検出のための画像処理技術を開発し、加えて、欠陥検出時の論理パラメタを最適化するためのレーニングシステムの開発をおこなった。得られた欠陥検出論理を取得画像に適用し、所望の欠陥検出感度が得られることを実証した。</p>
--	----------------	----	--

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(2) - (ii) EUV マスクパターン欠陥検査装置コア技術開発(株式会社荏原製作所との共同実施)	[1] PI 装置の実現	達成	[1] 写像投影方式の電子線欠陥検査装置を実現し、電子線による高スループット欠陥検査として、hp16nm 目標仕様である 600MPPS の動作速度でマスク全面(100mm 角領域)を 18 時間で走査できることを実証した。
	[2] PI 装置高速化	達成	[2] 更なる検査高速化のために、高速フレームセンサによる画像取得を実現し、hp11nm 目標仕様である 1800MPPS の動作速度でマスク全面)を 8 時間で走査できることを実証した。
	[3] 欠陥検出論理の最適化	達成	[3] 前述の仕様検討において開発された画像処理技術により、hp16nm 感度仕様である 64nm パターン中の 16nm サイズ欠陥、および、hp11nm 感度仕様である 44nm

			パターン中の 13nm サイズ欠陥の検出が可能であることを実証した。
--	--	--	------------------------------------

(3) EUVレジスト材料技術開発

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (i) EUVレジスト材料技術開発 (東京エレクトロンとの共同実施)	[1] EUVレジスト材料の開発 (解像度 hp11nm レジスト合否判定基準策定、レジスト材料の開発)	達成	[1] 多数のレジスト材料を評価し、解像度、LWR、感度のバランスが良好な E I D E C 標準レジストを 5 種 (E S R 4 ~ 8) 選定した。また、11nm ラインと 15nm ホールパターンの形成に成功した。
	[2] EUVレジストプロセスの開発	達成	[2] 新規リンス液・プロセスを創出したことにより、パターン倒れを改善できた。また、下地膜材料の開発より、レジスト高感度化を可能にした。
	[3] レジストプロセス解析技術の開発	達成	[3] HS-AFM 結果の定量化によるレジスト溶解特性を材料設計にフィードバックできた。具体的には、ラインパターン形成過程観察にて、ブリッジ・断線欠陥発生挙動を明確にした。コンタクトホールの場合、各ホールの形成に時間差があることを明らかにした。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (ii) レジストアウトガス高精度	[1] EB 方式アウトガス評価手法の構築	達成	[1] EB 方式と EUV 方式のアウトガス比較評価により得られた良好な相関結果を持って、EB 方式評価手法の妥当性を示した。アウトガス計測の誤差要因を解析し、高精度測定手法

測定方法 確立	[2] EUV レジスト材料設計/ 材料評価への指針提示	達成	<p>を実現した。海外アウトガス評価機関 (imec、SEMATECH、NIST) 及び ASML と共同で、評価結果の機関間差を生じさせる主要因を明らかにし、対策を提案した。</p> <p>[2] 複数のモデルレジストを用いた実験およびシミュレーションから得られた、コンタミ形成のレジスト組及びプロセス条件依存性の結果を、材料設計にフィードバックし、材料開発に寄与した。また上記実験より得られた結果を元にアウトガステストの削減ルールを明確にした。約 450 種類の化学増幅型レジストを評価し、同レジストのアウトガスによる露光装置の性能劣化は軽微であることを明らかにした。</p>
	[3]非化学増幅型レジストの アウトガス評価	達成	<p>[3] HPEUV 照射装置に、メタル系レジスト評価のため、水素雰囲気下のアウトガス評価機能を付与した。同装置によりメタル成分を含むコンタミ膜生成を世界で初めて確認し、メタル系レジストのアウトガス評価手法における重要点を明らかにした。</p>

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) ー(iii) DSA技 術開発	[1] h p 1 5 n m DSAプ ロセス技術開発	達成	[1] h p 1 5 n m DSAプロセスとして、化学ガイド方式と物理ガイド方式の両方の利点を兼ね備えたハイブリッドガイド方式のCOOLプロセスを独自に開発し、構築されたDSAプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特

	[2] h p 1 0 n m D S Aプロセス技術開発	達成	性検証に世界に先駆けて成功した。 [2] h p 1 0 n m D S Aプロセスとして、物理ガイドプロセスを独自に開発し、構築されたD S Aプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特性検証に世界に先駆けて成功した。
	[3] D S A欠陥シミュレーション技術開発	達成	[3] 粗視化粒子動力学D P D (Dissipative Particle Dynamics)と自己無撞着場理論S C F T (Self-Consistent Mean Field Theory)を使ったD S A欠陥シミュレーションにより、D S A欠陥発生メカニズムを高精度かつ高速に予測し、D S A欠陥低減のためのD S A材料・プロセスの改良指針を明らかにした。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (iv) アウトガスデータベースの構築 (兵庫県立大学への再委託)	[1] アウトガスデータベースの構築 [2] メタル系材料のアウトガスデータベースの構築	達成 達成	[1] 化学増幅型レジストの組成とカーボンコンタミネーションの要因解析を行い、かつ代表的なハイドロカーボン系ガスの分圧とコンタミ膜厚との関係を明らかにした。 [2] 7種類のメタル元素を含む有機無機ハイブリッドモデル材料のアウトガス特性を評価し、水素環境下以外でも発生しうるメタル系アウトガスの存在を明らかにした。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (v)	[1] R L S 及び欠陥と潜像との関係の解析手法高度化	達成	[1] 解析手法の高度 (高精度) 化により、推定したパターン of 潜像から、

<p>材料設計 (大阪大学への再委託)</p>	<p>[2] R L S 及び欠陥発生確率の予想を可能とするアルゴリズム開発</p>	<p>達成</p>	<p>最適熱化距離は解像度だけではなく、酸発生剤濃度と感度にも依存することを明らかにした。また、サブ 10 nm 実現のためには二次電子による感光点、つまり、酸発生剤の増加が必須であることを明らかにした。</p> <p>[2] サブ 10 nm における L E R、レジスト欠陥の発生確率と電子の熱化距離の関係を解明し、サブ 10 nm の量産を実現するためには、熱化距離の短縮が求められ、熱化距離の短縮のためには金属等の添加によるレジストの高密度化が必要になると考えられることを明らかにした。</p>
-----------------------------	--	-----------	--

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
<p>(3) - (vi) D S A 材料技術開発 (東京工業大学への再委託)</p>	<p>[1] D S A 材料技術開発 h p サブ 10 nm 以細のパターン形成が可能な D S A 材料・プロセス開発</p>	<p>達成</p>	<p>[1] シリコン含有 P M A P O S S とフッ素含有 P T F E M A から成るブロック共重合ポリマーを開発し、ラメラ構造の垂直配向構造から誘導された h p 8 nm のパターン形成を実施した。</p>

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
<p>(3) - (vii) D S A 検査・計測技術開発 (京都大学への再委託)</p>	<p>[1] D S A 検査・計測技術開発 3次元検査・計測技術による D S A 欠陥解析評価機構解明</p>	<p>達成</p>	<p>[1] G I - S A X S および 3次元 T E M による 3次元検査・計測技術を開発し、経時測定技術を含めた 3次元検査・計測技術を使って、D S A ミクロ相分離プロセスにおける D S A 欠陥解析評価技術を確立した。</p>

委託)			
-----	--	--	--

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (viii) DSAシミュレーション技術開発 (産業総合技術研究所との共同実施)	[1] DSAシミュレーション技術開発 DSAプロセス挙動を予想できるシミュレーション技術開発	達成	[1] DSAプロセス挙動を高精度かつ高速に予測できる分子MC (Monte Carlo) 法による汎用分子シミュレーションを開発し、DSAプロセスの開発および評価を通じて得られる実験データを使ったシミュレーションモデルの検証のために活用した。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(3) - (ix) DSA材料合成技術開発 (北海道大学への再委託)	[1] DSA材料合成技術開発 hpサブ10nmのパターン形成が可能なDSA材料合成技術開発	達成	[1] ポリカプロラクトンPCLとマルチヘプタオースMHから成るブロック共重合ポリマーに多分岐構造を導入するDSA材料合成技術を開発し、hpサブ10nmのパターン形成が可能なDSA材料の分子設計指針を確立した。

研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発

(4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(4) - (i) 高感度化 に係わる レジスト 材料設計 指針の開 発 (大阪 大学への 再委託)	[1] 高感度化に係わるレジスト材料設計指針の開発	達成	[1] レジスト材料の潜在的な性能と要求仕様の関係から、エネルギー不足と情報不足 (レジストが十分にエネルギーをキャッチ出来ない状態) により到達出来ない領域が存在することが明らかとなった。エネルギー不足の場合は、反応系の効率化や外部からエネルギーを供給することにより高感度化が可能である。一方、情報不足の場合は、本質的にレジスト吸収係数の増加 (メタルなどの高吸収材料の導入など) が求められる。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(4) - (ii) 高感度化 の為の酸 増殖剤の 開発 (東 京理科大 学への再 委託)	[1] 高感度化の為の酸増殖剤の開発	達成	[1] 従来の酸増殖レジストでは困難であった高感度化と高解像性両立のため、増殖する酸を高分子鎖に化学結合させた新規高分子タイプ酸増殖ポリマーの合成に成功した。さらには、それを用いたレジスト材料が酸増殖ユニットを有さない通常化学増幅型レジストに対して、2~3倍の高感度化となる画期的な結果を与えた。

開発項目	当期目標	達成度	達成状況
(4) - (iii) EUVレジスト高感度化の検証(産総研との共同実施)	[1] EUVレジスト高感度化の検証	達成	[1] 新規な反応機構を有するメタルレジストの研究に着手し、超高感度・高解像力のメタルレジストを開発した。さらに、その反応機構解析を検討し、これまで確認する方法がなかったレジスト膜内部の構造まで解析を行い、その構造を明らかとした。

開発項目	最終目標	達成度	達成状況
(4) - (iv) 高解像度微小面積露光機の研究開発	投影光学系の総合収差 0.6nmRMS以下の実現	達成	投影光学系の総合収差 0.29nm RMSを達成した。EUV光源、照明光学系、投影光学系および機構系の総合組立調整を行い、従来の10倍以上のウェハ面上照度、ならびに hp11nmL&Sパターンおよび hp15nm の1:1ホールパターンの解像を確認した。

次に知財権の取得に関しては参加企業に出願依頼をし、特許出願を推進している。

表Ⅲ1.2 に示すように現在までに

「出願済」 81 件（うち外国出願 21 件（うち PCT 1 件））、「登録」 9 件、「実施」 0 件である。

表Ⅲ1.2 特許出願リスト（注：登録された特許は、備考欄に登録番号を記載）

2011 年度

出願番号	出願日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2011-219756	2011/10/04	<u>レーザーテック</u> (株)	EUVマスク検査装置及びEUVマスク検査方法	業務委託
2011-227138	2011/10/14	<u>大日本印刷</u> (株)	反射型マスクの欠陥修正方法および製造方法	共同研究
2011-253135	2011/11/18	<u>レーザーテック</u> (株)	アライメント方法、及びマスクの製造方法	共同研究
2012-052555	2012/03/09	<u>レーザーテック</u> (株)	プラズマシールド装置及びプラズマ光源装置	共同研究 登録番号 5,070,616
2012-057168	2012/03/14	<u>レーザーテック</u> (株)	欠陥座標測定装置、欠陥座標測定方法、マスクの製造方法、及び基準マスク	共同研究 登録番号 5,126,917
2012-59421	2012/03/15	<u>(株)東芝、</u> <u>大日本印刷</u> (株)	マスク基板の欠陥検査方法及び欠陥検査装置、フォトマスクの製造方法及び半導体装置の製造方法	共同研究
2012-60832	2012/03/16	<u>(株)東芝、</u> <u>大日本印刷</u> (株)	最適撮像位置検出方法、最適撮像位置検出装置、フォトマスクの製造方法及び半導体装置の製造方法	共同研究

2012 年度

出願番号	出願日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2012-088360	2012/04/09	<u>レーザーテック</u> (株)	EUVマスク検査装置	共同研究
2012-093296	2012/04/16	<u>レーザーテック</u> (株)	EUVマスクブランクス、マスクの製造方法、及びアライメント方法	共同研究
2012-239460	2012/10/30	<u>大日本印刷</u> (株)	反射型マスクの製造方法およびマスクブランクの製造方法	共同研究
2012-242810	2012/11/02	<u>大日本印刷</u> (株)、 <u>旭硝子</u> (株)	パターンの製造方法および半導体装置の製造方法	共同研究
2013-025809	2013/02/13	<u>レーザーテック</u> (株)	検査装置、及び検査方法	共同研究 登録番号 5,787,261

13/788005 (米国)	2013/03/07	<u>レーザーテック(株)</u>	Plasma shield device and Plasma source apparatus	共同研究
13/791537 (米国)	2013/03/08	<u>レーザーテック(株)</u>	DEFECT COORDINATES MEASUREMENT DEVICE, DEFECT COORDINATES MEASUREMENTS METHODS, MASK MANUFACTURING METHOD, AND REFERENCE MASK	共同研究
13/840489 (米国)	2013/03/15	<u>株東芝</u> 大日本印刷(株)	Method and Apparatus for Inspecting a Mask Substrate for Defects, Method of Manufacturing a Photomask, and Method of Manufacturing a Semiconductor Device	共同研究 登録番号 8,986,913
13/841049 (米国)	2013/03/15	<u>株東芝</u> 大日本印刷(株)	Optimum Imaging Position Detecting Method, Optimum Imaging Position Detecting Device, Photomask, Manufacturing Method, and Semiconductor Device Manufacturing Method	共同研究 登録番号 8,912,501
2013-057890	2013/03/21	<u>株荏原製作所</u>	試料検査装置及び試料の検査方法	共同研究
2013-069941	2013/03/28	<u>(株)荏原製作所</u>	電子線検査装置	共同研究

2013年度

出願番号	出願日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2013-111476	2013/05/28	<u>レーザーテック(株)</u>	光学装置、フィルタ、及びその製造方法	共同研究
2013-117742	2013/06/04	<u>レーザーテック(株)</u>	フォーカス制御方法、及び光学装置	共同研究
2013-164427	2013/08/07	<u>株東芝</u> <u>株荏原製作所</u>	画像取得装置、画像取得方法及び欠陥検査装置	共同研究
2013-236685	2013/11/15	<u>株東芝</u> 大日本印刷(株)	撮像装置及び撮像方法	共同研究
2014-052138	2014/03/14	<u>株東芝</u>	パターン形成方法	共同研究
2014-052311	2014/03/14	<u>(株)荏原製作所</u>	電子線検査装置	共同研究
2014-059140	2014/03/20	<u>株東芝</u>	パターン形成方法および半導体装置の製造方法	共同研究

2014年度

出願番号	出願日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2014-085315	2014/04/17	<u>レーザーテック</u> (株)	照明装置、及び検査装置	共同研究 登録番号 5,633,836
14/453099 (米国)	2014/08/06	<u>株東芝</u> <u>株荏原製作所</u>	IMAGE ACQUISITION APPARATUS, IMAGE ACQUISITION METHOD AND DEECT INSPECTION APPARATUS	共同研究
14/466181 (米国)	2014/08/22	<u>株東芝</u>	Imaging Apparatus And Imaging Method	共同研究
14/467213 (米国)	2014/08/25	<u>株東芝</u>	PATTERN FORMING METHOD	共同研究 登録番号 9,177,825
2014-190963	2014/09/19	<u>レーザーテック</u> (株)	検査装置、及び波面収差補正方法	共同研究 登録番号 5,843,179
2014-213996	2014/10/20	<u>レーザーテック</u> (株)	座標検出装置、検査装置、及び座 標検出方法	共同研究
2014-226352	2014/11/06	<u>東京応化工業</u> (株)	電子銃の電子線照射量の安定化 方法、及びアウトガス評価方法	共同研究
2015-002168	2015/01/08	<u>株東芝</u>	半導体装置の製造方法及び半導 体装置の製造装置の管理方法	共同研究
14/835854 (米国)	2015/01/08	<u>株東芝</u>	MANUFACTURING APPARATUS OF SEMICONDUCTOR DEVIC AND MANAGEMENT METHOD OF MANUFACTURING APPARATUS OF SEMICONDUCTOR DEVICE	共同研究
2015-011455	2015/01/23	<u>株東芝</u>	半導体装置及び半導体装置の製 造方法	共同研究
2015-021169	2015/02/05	<u>株荏原製作所</u>	検査装置及び検査方法	共同研究
104106373 (台湾)	2015/02/26	<u>株東芝</u>	Method for Forming Pattern and Method for Manufacturing Semiconductor Device	共同研究
14/637558 (米国)	2015/03/04	<u>株東芝</u>	Method for Forming Pattern and Method for Manufacturing Semiconductor Device	共同研究 登録番号 9,281,480
2015-051639	2015/03/16	<u>株東芝</u>	撮像装置及び撮像方法	共同研究

2015-052346	2015/03/16	<u>株東芝</u>	欠陥検査装置並びに欠陥検査装置の管理方法及び管理装置	共同研究
2015-052471	2015/03/16	<u>株東芝</u>	パターン形成方法	共同研究
2015-051644	2015/03/16	<u>株東芝</u>	自己組織化材料及びパターン形成方法	共同研究

2015年度

出願番号	出願年月日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2015-076640	2015/04/03	<u>レーザーテック株</u>	検査装置、検査方法、及びプログラム	共同研究
14/808109 (米国)	2015/07/24	<u>株東芝</u>	PATTERN FORMING METHOD	共同研究
2015-149104	2015/07/29	<u>富士フイルム株</u>	感活性光線性又は感放射線性樹脂組成物、並びに、この組成物を用いた感活性光線性又は感放射線性樹脂膜	共同研究
14/817253 (米国)	2015/08/04	<u>株東芝</u>	IMAGING APPARATUS AND IMAGING METHOD	共同研究
14/817780 (米国)	2015/08/04	<u>株東芝</u>	DEFECT INSPECTION APPARATUS, MANGEMENT METHOD OF DEFECT INSPECTION APPRATUS AND MANAGEMENT APPARATUS OF DEFECT INSPECTION APPARTUS	共同研究
104127051 (台湾)	2015/08/19	<u>株東芝</u>	Semiconductor Device and Method of Manufacturing the Same	共同研究
14/835868 (米国)	2015/08/26	<u>株東芝</u>	SEMICONDUCTOR DEVICE AND METHOD OF MANUFACTURING THE SAME	共同研究
10-2015-012 0119 (韓国)	2015/08/26	<u>株東芝</u>	MANUFACTURING APPARATUS OF SEMICONDUCTOR DEVICE AND MANAGEMENT METHOD OF MANUFACTURING APPARATUS OF SEMICONDUCTOR DEVICE	共同研究

104128710 (台湾)	2015/08/31	<u>株東芝</u>	Manufacturing Apparatus of Semiconductor Device and Management Method of Manufacturing Apparatus of Semiconductor Device	共同研究
2015-175361	2015/09/07	<u>レーザーテック株</u>	EUV マスク検査装置	共同研究
2015-179428	2015/09/11	<u>株ニコン</u>	収差計測方法及び装置、並びに露光方法及び装置	共同研究
2015-179535	2015/09/11	<u>株東芝</u>	パターン形成方法	共同研究
2015-180040	2015/09/11	<u>株東芝</u>	自己組織化材料及びそれを用いた微細パターンの作製方法	共同研究
2015-206762	2015/10/20	<u>株東芝</u>	マスク基板及びマスク基板の製造方法	共同研究
2015-249561	2015/12/22	<u>レーザーテック株</u>	パターンの検査方法、マスクの検査方法、パターンの検査装置、マスクの検査装置、及びマスク	共同研究
2016-003214	2016/01/12	<u>株荏原製作所</u>	検査装置及び高圧基準管の製造方法	共同研究
2016-003630	2016/01/12	<u>株荏原製作所</u>	偏向制御装置及び検査装置	共同研究
2016-003722	2016/01/12	<u>株荏原製作所</u>	検査装置	共同研究
2016-003745	2016/01/12	<u>株荏原製作所</u>	検査装置および対物レンズ	共同研究
2016-003796	2016/01/12	<u>株荏原製作所</u>	電子銃及びこれを備える検査装置	共同研究
2016-004108	2016/01/13	<u>株荏原製作所</u>	検査装置及び検査方法	共同研究
2016-004874	2016/01/14	<u>株荏原製作所</u>	検査装置、そのアライメント装置及びアライメント方法	共同研究
2016-004875	2016/01/14	<u>株荏原製作所</u>	ズームレンズ及び検査装置	共同研究
2016-005367	2016/01/14	<u>株荏原製作所</u>	検査装置及び検査方法	共同研究
2016-014182	2016/01/28	<u>株荏原製作所</u>	ウィーンフィルター	共同研究
2016-015331	2016/01/29	<u>レーザーテック株</u>	検査装置、検査方法、汚染防止構造及び露光装置	共同研究
PCT/JP 2016/053384	2016/02/04	<u>株荏原製作所</u>	検査装置	共同研究
105104047 (台湾)	2016/02/05	<u>株荏原製作所</u>	検査装置	共同研究

2016-024904	2016/02/12	<u>レーザーテック</u> (株)	マスク検査装置及びマスク検査方法	共同研究
2016-024905	2016/02/12	<u>レーザーテック</u> (株)	マスク検査装置及びマスク検査方法	共同研究
2016-036852	2016/02/29	<u>株東芝</u>	パターン形成方法	共同研究
2016-039598	2016/03/02	<u>レーザーテック</u> (株)	検査装置、及びそのフォーカス調整方法	共同研究
15/065088 (米国)	2016/03/09	<u>株東芝</u>	SELF-ORGANIZATION MATERIAL AND PATTERN FORMATION METHOD	共同研究
15/067951 (米国)	2016/03/11	<u>株東芝</u>	PATTERN FORMING METHOD	共同研究
2016-059026	2016/03/23	<u>株EUVL 基盤開発 センター</u>	感光性組成物およびパターン形成方法	業務委託
2016-065680	2016/03/29	<u>株EUVL 基盤開発 センター</u>	感光性組成物、これを用いたパターン形成方法及び半導体素子の製造方法	共同研究
2016-065681	2016/03/29	<u>株EUVL 基盤開発 センター</u>	走査型プローブ顕微鏡を用いたレジスト材料評価法	共同研究
2016-066321	2016/03/29	<u>株EUVL 基盤開発 センター</u>	レジスト膜の解析方法	共同研究

2016 年度

出願番号	出願年月日	出願人	出願時(発明提案時)発明の名称	備考
2016-074360	2016/04/01	<u>レーザーテック</u> (株)	EUV マスク検査装置、及びそのフォーカス調整方法	共同研究

学会・論文発表については、表Ⅲ1.3 に示すように研究開発成果の積極的な発表を推進し、現在までに408件の発表を実施している。

表Ⅲ1.3 学会・論文発表件数

2011 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
ERM	6/17/2011	EIDEC Symposium 2011	Resist Development Program	Toshiro Itani
All	7/7/2011	Hama Tech Japan Seminar 2011	EIDEC's EUVL Program- A new consortium launched in Japan-	Hidehiro Watanabe
ERM	10/17/2011	2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	In situ dissolution analysis of EUV resists: Ultrathin resists	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	10/17/2011	2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Defect detection sensitivity improvement of actinic blank inspection	Takeshi Yamane Noriaki Takagi Tsuneo Terasawa
PI	10/17/2011	2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	EUV mask pattern inspection using EB projection optics	Tsuyoshi Amano
BI	10/17/2011	2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Phase defect detection and analysis using actinic blank inspection tool and TEM	Tsuyoshi Amano
BI	10/17/2011	2011 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	EUV Actinic Blank Inspection tool development	Takeshi Yamane Tsuneo Terasawa Hidehiro Watanabe

				Soichi Inoue Ichiro Mori
BI	10/22/2011	MNC2011	Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope for a Defect Characterization on an EUV Mask	Youichi Usui
ERM	10/24/2011	MNC2011	In situ Dissolution Analysis of Ultrathin EUV resists	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI/PI	11/11/2011	第 38 回ナガセマイクロエレクトロニクスセミナー 38th Nagase Microelectronics Seminar	つくば国際コンソーシアム発の基盤技術 Infrastructure Technology Development from International Consortia in Tsukuba	Hidehiro Watanabe
ERC	1/6/2012	第 25 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム 25th JSR11 Symposium	レジストの EUV 光照射による in-situ カーボン膜厚測定 in-situ carbon thickness measurement by EUV exposure	Takeo Watanabe
ERC	1/9/2012	第 25 回日本放射光学会・放射光科学合同シンポジウム 25th JSR11 Symposium	レジストへの EUV 光照射による in-situ カーボン膜厚測定	Takeo Watanabe
ERM	1/19/2012	第 21 回光反応・電子用材料研究会講座	EUV レジスト材料の現状	Norihiko Sugie
BI	2/12/2012	SPIE Advanced Lithography: Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography	Phase Defect Mitigation Strategy: Study of Fiducial Mark requirements on EUVL Mask	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano Sunghyun Oh

ERM	2/12/2012	2012 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	EUV Resist Processing with Flash-lamp	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	2/12/2012	SPIE Advanced Lithography 2012	Impact of the phase defect structure on an actinic dark-field blank inspection signal and wafer printability	Tsuyoshi Amano
ERM	2/12/2012	2012 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	An in situ analysis of the resist pattern formation process	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
ERM	2/12/2012	2012 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	Modeling and Simulation of Acid Diffusion in Chemically Amplified Resists with Polymer-Bound Acid Generator	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	2/12/2012	SPIE Advanced Lithography 2012	Study of actinic dark-field inspection with programmed amplitude defects	Noriaki Takagi Takeshi Yamane Tsuneo Terasawa
BI	2/12/2012	SPIE Advanced Lithography 2012	Phase defect printability analyses depending on defect type and exposure condition	Tsuneo Terasawa Takeshi Yamane Yukiyasu Arisawa Hidehiro Watanabe
ERC	2/12/2012	SPIE Advanced Lithography 2012	Resist outgassing characterization for qualification in high power EUV Lithography	Toshiya Takahashi Norihiko

				Sugie Kazuhiro Katayama Soichi Inoue
BI	3/1/2012	会誌「光学」第41巻第 3号 Newsletter "KOGAKU" vol.41, No.3	At wavelength inspection of 6-inch EUVL mask blank	Tsuneo Terasawa Takeshi Yamane
ERM	3/15/2012	2012年春季 第59回 応用物理学関係連合 講演会	In situ Observation of Photoresist Dissolution 3	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI/PI /ERM /ERM /ERC	3/18/2012	China Semiconductor Technology International Conference 2012	Development of EUV Lithography Infrastructure for sub-20nm half pitch generation	Soichi Inoue Takeshi Yamane Hiroki Miyai* Tsuyoshi Amano Toshiro Itani Hidehiro Watanabe Ichiro Mori
ERM	3/25/2012	日本化学会 第92春季年会(2012)	Wavelength Dependence of Lithography Resolution in Extreme Ultraviolet Region and Material Design	Takahiro Kozawa Toshiro Itani

2012 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
PI	4/17/2012	Photomask Japan 2012 Symposium on Photomask and NGL Mask Technology XIX	Study of EUV mask inspection using projection EB optics with programmed pattern defect	Ryoichi Hirano
BI	4/17/2012	Photomask Japan 2012	Improved signal to noise ratio in actinic EUVL mask blank inspection	Takeshi Yamane Tsuneo Terasawa
Others	4/17/2012	Photomask Japan 2012 Symposium on Photomask and NGL Mask Technology XIX	Development of Novel Projection Electron Microscopy(PEM) System for EUV Mask Inspection	Masahiro Hatakeyama
BI	4/17/2012	Photomask Japan 2012 Symposium on Photomask and NGL Mask Technology XIX	EUV Actinic Blank Inspection Tool with a High Magnification Review Mode	
BI	4/19/2012	Photomask Japan 2012 Symposium on Photomask and NGL Mask Technology XIX	Phase Defect Mitigation Strategy: Fiducial Mark requirements on EUVL Mask	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano Sunghyun Oh
ERC	4/27/2012	先端技術セミナー 2012	高出力 EUV および電子線を用いたレジストアウトガスの評価	Toshiya Takahashi Norihiko Sugie Kazuhiro Katayama Isamu Takagi,

				Yukiko Kikuchi Eishi Shiobara
BI	4/27/2012	先端技術セミナー 2012	μ CSM による位相欠陥評価 (1)	Youichi Usui
ERC	4/27/2012	兵庫県立大学 高度 産業科学技術研究所 EUVL 産業利用報告 会	高出力 EUV 光および電子線を用 いたレジストアウトガスの評価	Toshiya Takahashi Norihiko Sugie Kazuhiro Katayama Isamu Takagi Sachiko Kikuchi Eishi Shiobara
ERC	5/23/2012	SEMI Forum Japan	極端紫外線リソグラフィ技術開発 の現状と今後の展望	Takeo Watanabe Tetsuo Harada Hiroo Kinoshita
PI	5/29/2012	The 56th International conference on EIPBN	Wafer printability of residual-type defects on EUVL mask	Tsuyoshi Amano
PI	5/29/2012	The 56th International conference on EIPBN	Energy Dependence of Incident Electron Beam on Image Characteristics for EUV Mask inspection using Monte Carlo simulation	Susumu Iida
ERM	5/29/2012	The 56th International conference on	An in situ Analysis of EUV Resist Film Inhomogeneity during the Dissolution Process	Toshiro Itani Julius Joseph

		EIPBN		Santillan
ERC	6/4/2012	2012 International Workshop in EUV Lithography	Development of the Novel Evaluation Tool with an In-situ Ellipsometer for the Thickness Measurement of the Contamination Originated by the High Power EUV Irradiation on EUV Resist	Takeo Watanabe
ERC	6/4/2012	EUVL Workshop 2012	Parsistent Efforts to Overcome the Challenge of EUVL	Soichi Inoue
ERC	6/7/2012	2012 International Worsshop on EUVL	Development of the Novel Evaluation Tool with an In-situ Ellipsometer of the Thickness Measurement of the Contamination Originated by the High Power EUV Irradiation on EUV Resist	Takeo Watanabe
ERM	6/13/2012	SEMI Forum Japan	EUVレジスト全般の開発状況報告	Toshiro Itani
PI	6/20/2012	Electron Beam Monte Carlo Simulation Workshop and User Meeting Group	Investigation of Projection Electron Microscope image for EUV Mask by using CHARLOT with 72 cores	Susumu lida
ERM	6/26/2012	The 29th International Conference of Photopolymer Science and Technology	Dissolution Characteristics of EUV resist by High Speed AFM	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	7/9/2012	EUV Mask Blank Fiducial Mark TF/Technical	FM recommendation & learning needed areas from MIRAI EUV ABI tool	Tetsunori Murachi

		Workgroup meeting at SEMICON WEST SEMI Standard Meetings		
ERC	7/13/2012	IEUVI Meeting #36	EIDEC Update on Resist Outgassing	Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Eishi shiobara, So ichi Inoue, Ichiro Mori
BI	7/19/2012	次世代リソグラフィワ ークショップ 2012	Novel Programmed Defect Mask Blanks for ML Defect	Noriaki Takagi, Kazuaki Matsui
研究 連携 推進 部	7/20/2012	NGL 2012	Current Status of EUVL Technology Development in EIDEC	Soichi Inoue, Ichiro Mori
ERC	8/1/2012	Advance Optical Technologies (AOT)	Development of core technologies on EUV mask and resist for sub-20 nm half pitch generation	Soichi Inoue, Takes hi Yamane Tsuyoshi Amano, Tos hiro Itani Hidehiro Watanabe, I chiro Mori
ERC	9/6/2012	Spring-8 産業利用 報告会	アンジュレーター光を用いた EUV レジストのアウトガス評価	Kazuhiro Katayama, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Isam u Takagi,

				Yukiko Kikuchi, Eishi shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
BI	9/10/2012	Photomask Technology 2012	Impact of EUVL Mask Surface Roughness on an Actinic Blank Inspection Image and a Wafer Image	Takeshi Yamane Tsuneo Terasawa
BI	9/10/2012	SPIE Photomask Technology	Fiducal Mark requirements from the viewpoints of Actinic Blank Inspection tool for phase defect mitigation on EUVL Mask	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano Sunghyun Oh
ERM	9/11/2012	2012 年秋季 第 73 回 応用物理学会学術講演会	In situ Observation of Photoresist Dissolution 4	Toshiro Itani Julius Joseph Santillan
ERM	9/19/2012	61th Symposium on Macromolecules	Present status of EUV resist development	Norihiko Sugie
BI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Fiducial Mark requirements from the viewpoints of EUV Actinic Blank Inspection tool for phase defect mitigation	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano Sunghyun Oh
ERM	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet	EUV resist material development at EIDEC	Norihiko Sugie Toshiya

		Lithography		Takahashi Toshiro Itani
ERM	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	EUV Resist Process Development at EIDEC	Eishi Shiobara
ERM	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	In situ characterization of the resist process effect on EUV resist patterning	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
PI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Basic performance evaluation of novel Projection Electron Microscopy (PEM) system for EUV mask pattern inspection	Ryoichi Hirano
PI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	The impact of EUV mask residual-type defect thickness on wafer printability	Tsuyoshi Amano
BI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Status of phase defect printability studies in EIDEC	Tsuneo Terasawa Tsuyoshi Amano, Oh Sunghyun, Yukiyasu Arisawa Takeshi Yamane Hidehiro Watanabe
ERC	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Study of Contamination due to EUV Resist Outgassing	Isamu Takagi, Tosh iya Takahashi, Norihiko Sugie, Take

				o Watanabe,T etsuo Harada,Hiro o Kinoshita,K azuhiro Katayama,Y ukiko Kikuchi, Eishi shiobara
ERC	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	The Characterization of the Witness Sample Testing for the Outgassing Qualification of EUV Resists	Yukiko Kikuchi,Tos hiya Takahashi, Norihiko Sugie,Take o Watanabe,T etsuo Harada,Hiro o Kinoshita,K azuhiro Katayama, Eishi shiobara.Hir oyuki Tanaka,Soi chi Inoue
PI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Projection electron microscope image for EUV Mask with various types of defects using Monte Carlo simulation	Susumu lida

BI	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Particle contamination on an EUVL blank during actinic inspection	Oh Sunghyun, Takeshi Yamane, Noriaki Takagi, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe
ERC	9/30/2012	2012 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Analysis of Stochastic Effect in Line-and-Space Patterns Fabricated by Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	9/30/2012	IEUVI Mask TWG	Fiducial Mark requirements from the viewpoints of EUV Actinic Blank Inspection tool for phase defect mitigation on EUVL Mask	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano Sunghyun Oh
ERM	10/14/2012	ISSM	EUVL resist pattern formation: an in situ analysis using HS-AFM	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
ERM	10/15/2012	ISSM 2012 TOKYO	EUV Resist Material and Process Development at EIDEC	Eishi shiobara
BI	10/30/2012	MNC2012	Phase Defect Printability Prediction Using EUV Microscope Technique	Tsuneo Terasawa, Tsuyoshi Amano, Osamu Suga, Yukiyasu

				Arisawa, Takeshi Yamane, Hidehiro Watanabe, Mitsunori Toyoda
ERM	10/30/2012	MNC2012	An in situ analysis of the dissolution characteristics of half pitch line and space EUV resist patterns	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
PI	11/1/2012	Journal of vacuum science and technology B	Identification of residue-type defect on EUV mask by projection electron microscope using Monte Carlo simulation	Susumu Iida
PI	11/1/2012	Journal of vacuum science and technology B	Residual-type mask defect printability for EUV lithography	Tsuyoshi Amano
PI	11/1/2012	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Impact of the phase defect structure on an actinic dark-field blank inspection signal and wafer printability	Tsuyoshi Amano
BI/PI /ERM /ERC	11/1/2012	MNC2012	Current progress of advanced EUVL development in EIDEC	Soichi Inoue, Hidehiro Watanabe, Toshiro Itani, Ichiro Mori
BI	12/4/2012	次世代リソグラフィ技術研究会 定例会	EUVL Symposium2012 参加報告 ーマスク(検査・リペア)技術	Tsuneo Terasawa
ERM	1/16/2013	TECHNICAL MEETING ON SILICON PHOTONICS	EUV lithographic technology: present status and future trends	Toshiro Itani

BI	2/24/2013	SPIE Advanced Lithography: Extreme Ultraviolet (EUV) Lithography	Location accuracy improvement of Fiducial Mask on EUVL Mask with MIRAI EUV ABI tool	Tetsunori Murachi Tsuyoshi Amano
PI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Evaluation of Novel Projection Electron Microscopy(PEM) optics for EUV mask inspection	Ryoichi Hirano
BI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Effect of phase defect shape for ABI intensity and patterned CD with simulation	Noriaki Takagi
BI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Impact of the phase defect structure on wafer printability and an actinic dark-field blank inspection signal	Tsuyoshi Amano
PI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Study of simulated projection electron microscope images of defects on EUV Mask	Susumu Iida
BI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Experimental phase defect printability evaluation using a programmed phase defect in EUVL mask	Tsuneo Terasawa, Tsuyoshi Amano, Oh Sunghyun, Takeshi Yamane, Hidehiro Watanabe
ERC	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Simulation study of EUV outgassing spatial distribution toward witness plate in the optics contamination evaluation system	Yukiko Kikuchi, Hiroyuki Tanaka, Toshiya Takahashi, Norihiro Sugie, Kazuhiro Katayama,

				Isamu Takagi, Eishi shiobara, Soichi Inoue
ERC	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Resist outgassing characterization based on the resist compositions and process	Norihiko Sugie, Toshiya Takahashi, Kazuhiro Katayama, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Hiroyuki Tanaka, Eishi Shiobara, Soichi Inoue
ERM	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Study of LWR Reduction and Pattern Collapse Suppression for 16 nm node EUV Resists	Eishi Shiobara
ERM	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Process Development of the EUVL Negative Tone Imageing at EIDEC	Toshiya Takahashi, Ryuji Onishi, Toshiro Itani
ERM	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	In situ dissolution analysis of half-pitch line and space patterns at various resist platfoems using high speed atomic force microscopy	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
ERM	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Relationship between Stochastic Effect and Resist Pattern Defect	Takahiro Kozawa

			in Extreme Ultraviolet Lithography	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	Impact of EUV mask roughness on lithography performance	Yukiyasu Arisawa, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe
BI	2/24/2013	2013 Advanced Lithography	EUV Actinic Blank Inspection: from Prototype to Production	Kiwamu Takehisa, Hiroki Miyai, Tomohiro Suzuki, Haruhiko Kusunose, Anna Tchikoulaeva, Takeshi Yamane, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe, Soichi Inoue, Ichiro Mori
ERC	2/24/2013	IEUVI Resist TWG in SanJose	EIDEC Outgas Testing Update	Toshiya Takahashi, Eishi Shiobara, Norihiko Sugie, Sachiko Kikuchi, Isa

				mu Takagi,Kaz uhiro Katayama,H iroyuki Tanaka,Soi chi Inoue
研究 連携 推進 部	2/27/2013	電子・情報技術分野 技術ロードマップ2013	電子・情報技術分野 技術ロード マップ 2013 リソグラフィ	Soichi Inoue
BI	2013年3月	凸版印刷株式会社ホ ームページ	Novel Programmed Defect Mask Blanks for ML Defect Understanding and Characterization	Kazuaki,Mat sui(Toppan printing),Nor iaki Takagi
先端 マスク 研究 部	3/7/2013	NGL 技術研究会定例 会	EUV マスクの欠陥検査技術	Hidehiro Watanabe
PI	3/7/2013	ナノテスト学会 平成24年度 第1回 先端計測技術研究会	Electron imag simulation for development of PEM technique	Susumu lida
先端 マスク 研究 部	3/14/2013	兵庫県立大学 極端 紫外線リソグラフィー研究 開発センター報告会、高 度産業科学技術研究 所 先端技術セミナー	Micro-CSM によるプログラム位相 欠陥の観察	Youichi Usui
ERC	3/15/2013	先端技術セミナー 2013	New SUBARU の高輝度放射光を 用いた EUV リソグラフィーの基盤 研究	Eishi Shiobara
ERM	3/22/2013	日本化学会第93春季 年会(2013)	EUV Resist Technology	Toshiro Itani
ERM	3/22/2013	日本化学会第93春季 年会(2013)	Stochastic effect of extreme ultraviolet lithography and material design	Takahiro Kozawa Julius Joseph

				Santillan Toshiro Itani
ERM	3/27/2013	2013 年 春季 第 60 回応用物理学会春季 学術講演会	In situ Observation of Photoresist Dissolution 5	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	3/27/2013	応用物理学会 2013 春季講演会	EUV マスクの欠陥特性評価のた めのマイクロコヒーレントスキャトロ メトリー顕微鏡の開発	Yusuke Tanaka

2013 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
PI	4/1/2013	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Development of EUV mask pattern inspection technology using projection EB optics	Ryoichi Hirano
PI	4/16/2013	PMJ2013	Pattern inspection performance of novel Projection Electron Microscopy(PEM) on EUV masks	Ryoichi Hirano
PI	4/16/2013	PMJ2013	Novel Projection Electron Microscopy(PEM) Optics for EUV Mask Inspection and their Basic Performance Evaluation	Masahiro Hatakeyama
BI	4/16/2013	PMJ2013	Background level analysis on an actinic inspection image of EUVL mask blank	Takeshi Yamane, Myoungsoo Lee, Tsuneo Terasawa
BI	4/16/2013	Photomask Japan 2013	Exploring probability of shallow ML defect impact to defect assurance	Kazuaki. Matsu(Toppan printing), Noriaki. Takagi
PI	4/19/2013	Applied Physics Express(APEX)	Observation of Residual-Type Thin absorber Defect on EUVL Mask Using EUV Microscope	Tsuyoshi Amano
ERC	5/22/2013	SEMI Forum Japan 2013	EUV リソグラフィーにおけるレジスト開発	Eishi Shiobara
BI	5/28/2013	57th International Conference on Electron, Iron, and Photon Beam Technology and Nanofabrication(EIPBN)	Unveiling success rate of defect mitigation by experiment with EUV Actinic Blank Inspection Prototype for 16 nm hp	Tetsunori Murachi, Tsuyoshi Amano, Hiroki Miyai(Lasertec)

PI	5/28/2013	The 57th International conference on EIPBN	Influence of EUV mask structure on electron trajectories using Monte Carlo simulation	Susumu lida
ERM	5/28/2013	THE 57TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRON, ION, AND PHOTON BEAM TECHNOLOGY AND NANOFABRICATION	An in situ analysis of negative tone development EUV resist dissolution characteristics	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
BI	5/28/2013	EIPBN2013	Phase Defect Characterization on an EUV Blank Mask using Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope	T.Harada
BI	5/31/2013	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Propagation of surface topography of extreme ultraviolet blank substrate through multilayer and impact of phase defect structure on wafer image	Tsuyoshi Amano
PI	5/31/2013	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Study on extreme ultraviolet mask defect inspection with hp 16 nm node using simulated projection electron microscope images	Susumu lida
ERM	6/10/2013	2013 international Workshop on EUVL	Stochastic Effects in Chemically Amplified Resists for Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	6/25/2013	The 30th International Conference of Photopolymer Science and	In situ analysis of the EUV resist pattern formation during the resist dissolution process	Julius Joseph Santillan Toshiro Itani

		Technology		
ERC	6/28/2013	30th international Conference of Photopolymer Science and Technology (ICPST-30)	Comparison of resist family outgassing characterization between EUV and EB	Isamu Takagi, Toshiyuki Takahashi, Norihiko Sugie, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita, Kazuhiro Katayama, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
研究連携推進部	6/28/2013	International Conference of Photopolymer Science and Technology Materials & Processes for Advanced Microlithography, Nanotechnology and Phototechnology	EUVL: Stepping up to HVM	Soichi Inoue, Toshiro Itani, Hidehiro Watanabe, Ichiro Mori
BI	7/16/2013	応用物理学会 NGL 研究会	Development status of the actinic blank inspection tool	K. Takehisa, H. Miyai, T. Suzuki, A. Tchikoulaeva, H.

				Kusunose(L asertec),T.Y amane,T.Te rasawa,H.W atanabe,S.I noue,I.Mori(EIDEC)
研究 連携 推進 部	7/17/2013	次世代リソグラフィワ ークショップ 2013	Progress of EUVIL Technology Development in EIDEC(2013)	Soichi Inoue,Toshi ro Itani,Hidehir o Watanabe,I chiro Mori
BI	2013 年 8 月	JJAP(Japanese Journal of Applied Physics)	Simulation Analysis of the Characteristics of a High Magnification Imaging Optics for the Observation of Extreme Ultraviolet Lithography Mask to Predict Phase Defect Printability	Tsuneo Terasawa, Yukiyasu Arisawa,Tsu yoshi Amano,Tak eshi Yamane,Hid ehiro Watanabe, Mitsunori Toyoda,Tet suo Harada,and Hiroo Kinoshita
PI	9/10/2013	2013 ISPIE Photomask Technology	EUV patternd mask inspection using projection electron microscope	Hidehiro Watanabe
PI	9/10/2013	SPIE 2013 Photomask Technology	Development of Inspection System for EUV mask with Novel Projection Electron	Masahiro Hatakeyam a

			Microscopy(PEM)	
BI	9/10/2013	Photomask technology 2013	Extreme ultraviolet mask defect observation using an extreme ultraviolet microscope	Tsuyoshi Amano
ERM	9/16/2013	2013 JSAP-MRS joint Symposia	High Speed Atomic Force Microscopy and the real-time visualization of nanoscale resist pattern formation during the dissolution process	Toshiro Itani, Julius Joseph Santillan
ERM	9/16/2013	2013年 第74回応用物理学会秋季学術講演会	In situ Observation of Photoresist Dissolution 6	Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERC	9/30/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Study of the relation among resist components, outgassing species and contamination	Yukiko Kikuchi, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Kazuhiro Katayama, Isamu Takagi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita

PI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Current status of EUV patterned mask inspection tool for hp 16 nm and beyond	Ryoichi Hirano
BI	10/6/2013	International symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Defect location accuracy improvement with EUV Actinic Blank Inspection Prototype for 16 nm hp	Tetsunori Murachi, Tsuyoshi Amano, Tomohiro Suzuki(Lesertec), Hiroki Miyai(Lesertec)
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Accuracy verification of phase defect printability prediction with various defect shape models	Tsuneo Terasawa, Yukiyasu Arisawa, Tsuyoshi Amano, Noriaki Takagi, Takeshi Yamane, Hidehiro Watanabe
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Understanding for defect size fluctuation in actinic inspection tool	Myoungsoo Lee, Takeshi Yamane, Kenji Sakamoto, Tsuneo Terasawa
ERC	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Resist outgassing characterization of PAG-blended and PAG-bound systems	Kazuhiro Katayama, Toshiya Takahashi,

				Norihiko Sugie, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
PI	10/6/2013	2013 EUVL International Symposium	Study on EUV mask defect inspection with hp 16 nm and 11 nm node using simulated projection electron	Susumu lida
PI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Development of new Inspection System with Novel PEM and its Basic Performance Evaluation for EUV Mask	Masahiro Hatakeyama
ERM	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Stochastic Effects in Resist Processes of Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa, Toshiro Itani, Julius Joseph Santillan
ERM	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Positive and Negative-tone development resists; Pattern formation characterization during resist dissolution	Julius Joseph Santillan, Motoharu

				Shichiri, Tos hiro Itani
ERM	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	EUV Resist Material and Process Development at EIDEC	Eishi Shiobara
ERC	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Cleanability of resist-outgas non-carbon contamination using hydrogen radical cleaning	Toshiya Takahashi, Kazuhiro Katayama, I samu Takagi, Nori hiko Sugie, Yukik o Kikuchi, Eish i Shiobara, Hi royuki Tanaka, Soi chi Inoue
ERM	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Inhomogeneity of resist film simulated by Molecular dynamics	Minoru Toriumi, Tos hiro Itani
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Correlation depth analysis of surface roughness by actinic blank inspection	Takeshi Yamane, Ts uneo Terasawa
先端 マスク 研究 部	10/6/2013	2013 EUVL International Symposium	Blank Inspection technology development at EIDEC	Hidehiro Watanabe
ERM	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet	The effect of EUV resist material composition on RLS trade-off	Norihiko Sugie, Eishi Shiobara, To

		Lithography		shiro Itani
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Mask surface roughness effects on EUV lithography performance	Yukiyasu Arisawa, Tsuneo Terasawa, Hidehiro Watanabe
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Design, fabrication, and test of an EUV mask imaging microscope for lithography generations with sub-16 nm half pitch	M. Toyoda, K. Yamasone, M. Yanagihara, T. Amano, T. Terasawa, A. Tokimasa, T. Harada, T. Watanabe, H. Kinoshita
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Development of Coherent EUV Scatterometry Microscopes for EUV Mask Evaluation	Tetsuo Harada
BI	10/6/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Development of Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope for EUV Mask Defect Characterization	Yusuke Tanaka
BI	10/7/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Effect of phase defect characteristics on ABI signal intensity	Noriaki Takagi
DSA	10/17/2013	電子通信情報学会 集積光デバイスと応用技術時限研究専門委員会	DSA(Directed Self-assembly)Lithography using Block Copolymer	Tsukasa Azuma

ERM	2013年11月	会誌「高分子」2013年11月号特集	Visual characterization of nano-sized photoresist pattern formation	Toshiro Itani
BI	11/5/2013	第26回マイクロプロセス・ナノテクノロジー国際会議(MNC 2013)	Observation Result of Defects Using Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope	Yusuke Tanaka
ERM	11/5/2013	26th International Microprocesses and Nanotechnology Conference	Effects of effective reaction radius for neutralization on performance of chemically amplified resists	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
PI	11/13/2013	The 33rd Annual NANO Testing Symposium	電子線による EUV マスクパターン検査に対する入射電子エネルギーの影響	Susumu Iida
BI	11/29/2013	次世代リソグラフィ技術研究会 定例会	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography 参加報告ーマスク(製作・検査)技術	Tsuneo Terasawa
PI	2/23/2014	2014 Advanced Lithography	EUV patterned mask inspection with an advanced Project Electron Microscope(PEM)system	Ryoichi Hirano
BI	2/23/2014	SPIE Advanced Lithography: Extreme Ultraviolet(EUV)Lithography	Success rate improvement of defect mitigation with EUV Actinic Blank Inspection Prototype for 16 nm hp	Tetsunori Murachi, Tsuyoshi Amano, Tomohiro Suzuki(Lesertec), Hiroki Miyai(Lesertec)
BI	2/23/2014	SPIE Advanced Lithography 2014	Observation of phase defect on extreme ultraviolet mask using an extreme ultraviolet	Tsuyoshi Amano

			microscope	
DSA	2/23/2014	SPIE advanced lithography 2014	Dry Development of High \times Block Copolymers for Directed Self-Assembly	Yusuke Kasahara
DSA	2/23/2014	SPIE advanced lithography 2014	Sub-10 nm Patterning Process using Directed Self-assembly with High \times Block Copolymers	Naoko Kihara
DSA	2/23/2014	SPIE advanced lithography 2014	Process optimization for direct self assembly lithography using dissipative particle dynamics and self-consistent field theory	Katsuyoshi Kodera
BI	2/23/2014	Advanced lithography 2014	Verification of effect of phase defect shape on ABI signal intensity with experiment	Noriaki Takagi, Yuki yasu Arisawa, Tsuneo Terasawa
ERM	2/23/2014	2014 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	Inhomogeneity of PAGs in resist film studied by molecular-dynamics simulations for EUV lithography	Minoru Toriumi, Toshiro Itani
ERM	2/23/2014	2014 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	Stochastic Effects in Fabrication of 11 nm Line-and-Space Patterns Using Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	2/23/2014	2014 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	Evaluations of negative tone development resist and process for EUV lithography	Toshiya Takahashi, Noriaki Fujitani, Toshiro Itani
ERM	2/23/2014	2014 SPIE International Symposium on	EUV resist simulation based on process parameters of pattern formation reaction	Norihiko Sugie, Toshiro

		Advanced Lithography		Itani, Takahiro Kozawa
ERM	2/23/2014	2014 SPIE International Symposium on Advanced Lithography	An in situ analysis of the resist dissolution in alkali-based and organic solvent-based developers using high speed atomic force microscopy	Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri, Toshihiro Itani
ERC	2/23/2014	SPIE Advanced Lithography 2014	Contribution of EUV Resist components to the non-cleanable contamination	Eishi Shiobara, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Kazuhiro Katayama, Hiroaki Tanaka, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
ERC	2/23/2014	SPIE Advanced Lithography 2014	Correlation study on resist outgassing between EUV and E-beam irradiation	Yukiko Kikuchi, Norihiko Sugie, Toshiya Takahashi, I

				samu Takagi,Kaz uhiro Katayama,E ishi Shiobara,So ichi Inoue
BI	2/23/2014	SEMATECH IEUVI Mask TWG	ABI Development in EIDEC	Hidehiro Watanabe
BI	2/24/2014	SPIE Advanced Lithography:Extreme Ultraviolet(EUV)Litho graphy	At wavelength observation of phase defect embedded in EUV mask using microscope technique	Tsuneo Terasawa,T suyoshi Amano,Tak eshi Yamane,Hid ehiro Watanabe, Mitsunori Toyoda,Tet suo Harada,Tak eo Watanabe, Hiroo Kinoshita
BI	2/24/2014	SPIE Advanced Lithography:Extreme Ultraviolet(EUV)Litho graphy	Analysis of phase defect effect on contact hole pattern using a programmed phase defect in EUVL mask	Yongdae Kim,Tsuneo Terasawa,T suyoshi Amano,Sun ghyun Oh,Yoonsuk Hyun,Hidehi ro Watanabe

BI	2/25/2014	SPIE Advanced lithography 2014	At wavelength observation of phase defects using focused lensless microscope	Tetsuo Harada
PI	2/28/2014	Electron beam Monte Carlo simulation Workshop 2014	Impact of incident electron energy on patterned EUV mask inspection	Susumu Iida
PI	2014年3月	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Patterned mask inspection technology with Projection Electron Microscope technique on EUV masks	Ryoichi Hirano
DSA	3/7/2014	応用物理学会 NGL 研究会 JSAP	サブ 10nm DSA リソグラフィ	Tsukasa Azuma
BI	3/11/2014	先端技術セミナー	実露光波長を用いた EUV マスクの多層膜欠陥観察	Tsuyoshi Amano
ERC	3/11/2014	先端技術セミナー 2014	EUVレジスト組成物のノンクリーナブルコンタミへの影響	Eishi Siobara
DSA	3/19/2014	情報機構技術セミナー	DSA リソグラフィ	Tsukasa Azuma
DSA	3/28/2014	電気学会 リソグラフィ次世代技術調査専門委員会	DSA リソグラフィ	Tsukasa Azuma
BI	3/31/2014	Applied Physics Express, The Japan Society of Applied Physics	Effectiveness improvement of EUV actinic blank inspection prototype for 16-nm half pitch for mitigation of multilayered defects	Tetsunori Murachi, Tsuyoshi Amano, Tomohiro Suzuki (LaserTEC), Hiroki Miyai (LaserTEC)

2014 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
PI	4/15/2014	Photomask Japan 2014 The 21st Symposium on Photomask and NGL Mask Technology	EUV patterned mask inspection performance of advanced Projection Electron Microscope (PEM)system for hp 16 nm and beyond	Ryoichi Hirano
BI	4/15/2014	Phtomask Japan 2014	Defect analysis on Actinic Blank Inspection tool	T.Suzuki,H. Miyai,K.Tak ehisa,H.Kus unose(Lase rtec),T.Yam ane,T.Teras awa,H.Wata nabe,I.Mori(EIDEC)
PI	4/15/2014	Phtomask Japan 2014/The 21st Symposium on Photomask and NGL Mask Technology	Development of New Inspection System with Novel PEM for EUV Pattern Masks and its Performance Evaluation	Masahiro Hatakeyam a
BI	4/15/2014	Phtomask Japan 2014	Performance in practical use of actionic EUVL mask blank inspection	Takeshi Yamane,Yo ngdae Kim,Noriaki Takagi,Osa mu Suga,Tsune o Terasawa,T omohiro Suzuki,Hiro aki Miyai,Kiwa mu

				Takehisa,H aruhiko Kusunose
DSA	4/15/2014	Journal of Micro/Nanolithograp hy, MEMS, and MOEMS	Defect-aware process margin for chemo-epitaxial directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory	Katsuyoshi Kodera
PI	4/20/2014	Photomask Japan 2015	Pattern inspection of etched multilayer mask for EUVL	Susumu lida
BI	4/20/2014	Photomask Japan 2015	Analysis of low-aspect phase defect for actinic EUVL mask blank inspection	Takeshi Yamane, Tomohisa Ino, Hiroyuki Miyai
DSA	5/22/2014	シリコンテクノロジー 分科会 リソグラフィ 研究委員会 第 171 回研究集会「SPIE Advanced Lithography 2014 特 集」	SPIE2014 参加報告 Alternative Lithographic Technologies: Directed Self-Assembly(DSA)Lithography	Hironobu Sato
DSA	5/27/2014	International Conference on Electron, Iron, and Photon Beam Technology and Nanofabrication	A Novel sub-10 nm Half Pitch Pattern Transfer Process using Directed Self-Assembly Lithography	Katsutoshi Kobayashi
DSA	5/27/2014	EIPBN 2014	A noval sub-10 nm Half Pitch Pattern Transfer Process using Directed Self-Assembly Lithgraphy	Katsutoshi Kobayashi
ERM	6/23/2014	2014 International	Theoretical study on stochastic	Takahiro

		Workshop on EUVL	effects in chemically amplified resist process for extreme ultraviolet lithography	Kozawa, Julius Joseph Santillan, To shiro Itani
PI	6/30/2014	Journal of Applied physics	Analysis of image distortion on projection electron microscope image	Susumu Iida
ERM	7/8/2014	The 31st International Conference of Photopolymer Science and Technology	Relationships between Stochastic Phenomena and Optical Contrast in Chemically Amplified Resist Process of Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, To shiro Itani
DSA	7/8/2014	International Conference of Photopolymer Science and Technology 2014	Process optimization for directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory	Katsuyoshi Kodera
DSA	7/9/2014	Journal of Photopolymer Science and Technology	Process margin of directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory	Katsuyoshi Kodera
DSA	7/9/2014	Photopolymer conference 2014	Process margin of directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory	Katsuyoshi Kodera
ERM	7/11/2014	31st international Conference of Photopolymer Science and Technology	Inhomogeneity of PAGs in resist film studied by Molecular Dynamics simulations	Minoru Toriumi, To shiro Itani
ERC	7/11/2014	Journal of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress of EUV Resist Technology in EIDEC	Eishi Shiobara
DSA	7/17/2014	NGL シンポジウム	Sub-10 nm Line patterning using	Tsukasa

		2014	DSA(Directed Self-assembly) Lithography	Azuma
研究 連携 推進 部	7/18/2014	次世代リソグラフィワ ークショッブ	Progress of EUVL Technology Development in EIDEC(2014)	Soichi Inoue, Toshiro Itani, Hidehiro Watanabe, Ichiro Mori
BI	8/29/2014	Journal of Micro/Nanolithograp hy, MEMS, and MOEMS	Observation of phase defect on extreme ultraviolet mask using an extreme ultraviolet microscope	Tsuyoshi Amano
PI	9/7/2014	18th International Microscopy Congress	Analysis of local field effect on projection electron microscope	Susumu lida
BI	9/8/2014	18th International Microscopy Congress	At-wavelength observation of phase defect embedded in extreme ultraviolet lithography mask	Tsuyoshi Amano
PI	9/16/2014	2014 SPIE Photomask Technology	Impact of B4C capping layer for EUV mask on the sensitivity of patterned mask inspection using projection electron microscope	Susumu lida
PI	9/16/2014	SPIE 2014 Photomask Technology	Recent results from EUVL patterned mask inspection using Projection Electron Microscope system	Ryoichi Hirano
BI	9/16/2014	SPIE Photomask Technology 2014	Phase defect detection signal analysis:dependence of defect size and shape	Tsuyoshi Amano
DSA	9/17/2014	応用物理学会秋季学 術講演会	Sub-10 nm patterning using DSA Lithography	Tsukasa Azuma
DSA	9/22/2014	Micro and Nano Engineering 2014	A noval simple sub-15 nm line and space patterning process using directed self-assembly	Yuriko Seino

BI	9/22/2014	40th International Conference on Micro and Nano Engineering	Atomic Step Patterning onto Quartz Glass by Thermal Nanoimprint	Osamu Suga
ERM	9/22/2014	The 40th International Conference on Micro and Nano Engineering	An in situ characterization of nano-scale resist pattern roughness during dissolution	Julius Joseph Santillan ,Motoharu Shichiri, Toshiro Itani
DSA	9/24/2014	高分子討論会	Directed Self-assembly (DSA) Lithography using Block Copolymer(BCP)	Tsukasa Azuma
DSA	9/24/2014	Micro and Nano Engineering 2014	A Novel sub-15 nm line and space patterning process flow using directed self-assembly (DSA) technology	Yuriko Seino
先端マスク研究部	10/22/2014	imec 社 クライアント報告会(PTW)	Correlation of ABI and NXE3100 at 27-22nm hp	Hidehiro Watanabe, Noriaki Takagi, R. Jonckheere, D. Van Heuvel, E. Gallagher
DSA	10/25/2014	光エレクトロニクス技術月刊誌「O plus E」2014年11月号	ブロック共重高分子を用いた DSA (Directed Self-assembly)リソグラフィ	Tsukasa Azuma
BI	10/26/2014	SEMATECH IEUVI Mask TWG	ML defect mitigation with ABI tool	Hidehiro Watanabe
ERC	10/26/2014	IEUVI Resist TWG	EIDEC Outgas Testing Updat	Eishi Shibara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi,

				Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, I. Pollentier, R. F. Berg, S. Hill, C. S.Tarrio, T. B. Luccatorto, Y. J. Fan
PI	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Development of EUV patterned mask inspection technologies for the 16nm-11nm half pitch generation	Ryoichi Hirano
ERM	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Recent Progress of Negative tone imaging with EUV exposure	Toru Fujimori, Julius Santillan, Toshiya Takahashi, Eishi Shiobara, Toshiro Itani
PI	10/27/2014	International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography 2014	Impact of EUV mask structure on defect sensitivity of patterned mask inspection using projection electron microscope.	Susumu Iida
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on	An approach to find the Carbon Growth Mechanism in the	Yukiko Kikuchi,

		Extreme Ultraviolet Lithography	various exposure conditions on Witness Samaples	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Eishi Shiobara, Soichi Inoue
ERM	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	The effect of EUV resist material composition on development behavior	Shinya Minegishi, Toshiro Itani
BI	10/27/2014	2014 International Symposium on EUV Lithography	The effect of phase defect characteristics on a scattered light image in actinic dark-field inspection	Noriaki Takagi, Tomohisa Ino, Hiroaki Miyai
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Relationship between resist outgassing and activation energy for EUV and EB	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita, Soichi Inoue

ERM	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Study on Surfactant Rinse Materials for EUVL	Kazuma Yamamoto, Santillan Julius, Moto haru Shichiri, Tos hiro Itani
BI	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Detection capability for native defect by the actionic blank inspection	Takeshi Yamane, Tomohisa Ino, Tomohir o Suzuki,, Hiro aki Miyai, Kiwa mu Takehisa, H aruhiko Kusunose
ERM	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Feasibility study of sub-10 nm half-pitch fabrication using chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography	Takahiro Kozawa, Juli us Joseph Santillan, To shiro Itani
BI	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Measurement accuracy of phase defect on EUV mask	Tsuyoshi Amano
PI	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Performance Evaluation on New Inspection System with Novel PEM for EUV Pattern Masks	Masahiro Hatakeyam a
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	The initial performance data of a LPP-source equipped High Power EUV Irradiation Tool (:HPEUV)	Hiroyuki Tanaka, Isamu Takagi,

				Soichi Inoue
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	High Power EUV Irradiation Tool (HPEUV) equipped with LPP Source	Soichi Inoue, Hiroyuki Tanaka, Isamu Takagi
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Relationship between resist outgassing and activation energy using EUV and EB	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita, Soichi Inoue
ERC	10/27/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Variability of EUV resist outgas test results: comparison of outgas versus contamination behavior at multiple test sites using model EUV resists	I. Pollentier, A. Tirumala Venkata, G. Vandenberghe, R. F. Berg, S. Hill, C.S. Tarrio,

				T.B. Lucatorto, Y. Kikuchi, T. Sasami, E. Shiobara, S. Inoue
BI	10/28/2014	EUVL Symposium 2014	Defect inspection and characterization on active blank inspection tool	Hiroki Miyai
ERM	2014年11月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Feasibility study of sub-10-nm-half-pitch fabrication by chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography: II .Stochastic effects	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	11/4/2014	2014 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2014)	Inhomogeneity of PAGs in methacrylate-type EUV resist film studied by molecular-dynamics simulations	Minoru Toriumi, Toshiro Itani
BI	11/4/2014	MNC2014	Imaging Result of Small Phase Defects Using Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope	Tetsuo Harada
DSA	11/7/2014	2014 International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2014)	300mm wafer performance of a coordinated line epitaxy(COOL) process using directed self-assembly	Yuriko Seino
BI	11/12/2014	The 34th Annual NANO Testing Symposium	EUVL マスクブランクス検査装置の紹介	Hiroki Miyai
BI	11/14/2014	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Phase defect detection signal analysis:dependence of defect size variation	Tsuyoshi Amano

PI	11/13/2014	The 34th Annual NANO Testing Symposium	Analysis of local field effect on projection electron microscope	Susumu Iida
DSA	11/2014	the Journal of Vacuum Science and Technology (JVST B)	A Novel sub-10 nm Half Pitch Pattern Transfer Process using Directed Self-Assembly Lithography	Katsutoshi Kobayashi
DSA	11/25/2014	FBPOL 2014	Directed Self-assembly(DSA) Lithography for Half Pitch(HP) Sub-15 nm Patterning using Block Copolymer(BCP)	Tsukasa Azuma
DSA	11/27/2014	36th International Symposium on dry process(DPS2014)	Directed self assembly lithography for half pitch sub-15nm pattern fabrication process	Hironobu Sato
DSA	11/30/2014	2014 MRS Fall Meeting & Exhibit	A simulation study for defects in sub-15nm line-space using directed self-assembly	Hideki Kanai
DSA	11/30/2014	2014 MRS Fall Meeting @ Boston	Directed Self-assembly Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern Fabrication Process	Tsukasa Azuma
BI	11/30/2014	Microelectronic Engineering	Atomic Step Patterning on Quartz Glass Via Thermal Nanoimprinting	Osamu Suga
DSA	11/30/2014	2014MRS fall meeting exhibit	Directed Self-assembly Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern Fabrication Process	Hironobu Sato
ERM	12/2/2014	International Symposium on Semiconductor Manufacturing (ISSM)	EUVL resist pattern formation analysis during development: in situ analysis using HS-AFM	Motoharu Shichiri, Julius Joseph Santillan ,

				Toshiro Itani
ERM	12/2/2014	THE 22nd International Symposium on Semiconductor Manufacturing(ISSM)	Negative-tone imaging process and materials with EUV exposure	Toru Fujimori, Toshiro Itani
ERC	12/2/2014	THE 22nd International Symposium on Semiconductor Manufacturing(ISSM)	Effective proposal for the outgassing test on the EUV lithography	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
BI	12/2/2014	THE 22nd International Symposium on Semiconductor Manufacturing(ISSM)	Actinic Blank Inspection tool for EUVL HVM	Hidehiro Watanabe, Osamu Suga, Hiroki Miyai(Lasertec)
DSA	12/3/2014	SEMICON Japan 2014 NEDO 展示	Directed Self-assembly (DSA) Lithography	Tsukasa Azuma
DSA	12/4/2014	SEMICON Japan 2014	Directed Self-assembly (DSA) Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern Fabrication Process	Tsukasa Azuma

DSA	1/12/2015	The 59th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication	An Electrical Yield Verifivation for Half Pitch 15 nm Patterns using Directed Self-assembly of PS-b-PMMA	Tsukasa Azuma
BI	1/30/2015	Optical Review	Background Level on Extreme UV Mask Blank Inspection Image	Takeshi Yamane, Tsuneo Terasawa
ERC	2015 年 2 月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Effect of thermalization distance on chemical gradient of line-and-space patterns with 7 nm half-pitch in chemically amplified extreme ultraviolet resists	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERC	2/10/2015	第 14 回マイクロシステム融合研究会	LPP 光源を用いた高出力 EUV 照射装置の現状	Soichi Inoue
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Recent Progress of Negative-tone imaging with EUV exposure	Toru Fujimori, Toshiro Itani
BI	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Measurement of the phase defect size using scanning probe microscope and at-wavelength inspection tool	Tsuyoshi Amano
PI	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Study of EUVL patterned mask inspection tool for half-pitch (hp) 16 nm- 11 nm node	Ryoichi Hirano
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Evaluation of surfactant rinse material and process for EUV lithography	Kazuma Yamamoto, Toshiro Itani
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Inhomogeneity of PAGs in a hybrid-type EUV resist system studied by molecular-dynamics simulations for EUV lithography	Minoru Toriumi, Toshiro Itani

DSA	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	A novel simple sub-15 nm line and space patterning process using directed self-assembly and pattern transfer	Yuriko Seino
DSA	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	RIE challenges for sub-15 nm lines and spaces patterning using directed self-assembly lithography with coordinated line epitaxy (COOL) process	Yusuke Kasahara
DSA	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Sub-10 nm fine lines and spaces patterning using high X block copolymers directed self-assembly	Hironobu Sato
DSA	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	A simulation study for 3D-defects in directed self-assembly lithography - 10 nm fine lines and spaces patterning using high blocks copolymers directed self-assembly	Hideki Kanai
BI	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Correlation of actinic blank inspection and experimental phase defect printability study on NXE3x00 EUV scanner	Rik Jonckheere 1, Hidehiro Watamabe, Dieter van den Heuvel, Osamu Suga, Noriaki Takagi
ERC	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Collaborative Work on Reducing the Inter-site Gap of Outgassing Qualification	Soichi Inoue, Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yuriko Kikuchi,

				<p>Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Robert Berg, Shanonn Hill, Charles Tarrío, Thomas Lucatorto, Ivan Pollentier, Yu-Jen Fan</p>
ERC	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Analysis of EUV Resist Outgassing Deviation between the Test Sites	<p>Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi, Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita</p>

ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Negative-tone imaging with EUV exposure for 14 nm hp and beyond	Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru Tsuchihashi , Toru Fujimori, Makoto Momota, and Takahiro Goto
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Resist dissolution process and line width roughness: an in situ analysis using high speed atomic force microscopy	Julius Joseph Santillan ,M otoharu Shichiri, Toshiro Itani
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	The effect of resist material composition on development behavior	Shinya Minegishi,T oshiro Itani
ERM	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Relationship between Information and Energy Carried by Extreme Ultraviolet Photons: Consideration from the Viewpoint of Sensitivity Enhancement	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERC	2/22/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Feasibility Study on the Impact of Higher Power EUV Irradiation on Key Lithographic Elements	Soichi Inoue
ERC	2/22/2015	IEUVI Resist TWG	EIDEC Outgas Testing Update	Eishi Shibara, Isamu Takagi, Yukiko

				Kikuchi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Soichi Inoue
BI	2/23/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Verification of an effect of phase defect characteristics on scattered light images	Noriaki Takagi
PI	2/26/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Dependence of defect size and shape on detectability for EUV patterned mask inspection	Susumu lida
ERM	2/27/2015	NIMS Nanofabrication Platform	Evaluation of EUV Photoresist material Processes by EB exposure tool	Shinya Minegishi
ERM	2/27/2015	NIMS Nanofabrication Platform	Development of EUV resist and process by EB exposure	Toru Tsuchihashi
ERM	2/27/2015	NIMS Nanofabrication Platform	Evaluation pf resist and process for EUV with Electron beam lithography exposure	Kazuma Yamamoto
ERM	2/27/2015	NIMS Nanofabrication Platform	Evaluation of EUV Photoresist material Processes by EB exposure tool	Julius Joseph Santillan
ERC	3/5/2015	EUVL 産業利用報告 会	EIDECにおけるEUV レジストのアウト ガス評価	Yukiko Kikuchi
DSA	3/18/2015	SEAJ(半導体製造装 置協会)講演会	ブロック共重高分子を用いた DSA (Directed Self-assembly)リソグラ フィー	Tsukasa Azuma

ERM	3/19/2015	日本顕微鏡学会走査型プローブ顕微鏡分科会	高速原子間力顕微鏡を用いたレジスト現象課程の観察	Motoharu Shichiri, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	3/27/2015	Tokyo Institute of Technology Nanofabrication Platform	Evaluation of resist and process for EUV with Electron beam lithography exposure	Kazuma Yamamoto
ERM	3/31/2015	NIMS Advanced Characterization Nanotechnology Platform	Inspection of EUV resist fine pattern	Toru Tsuchihashi

2015 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
ERM	2015 年 4 月	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology	Relationship between Thermalization Distance and Line Edge Roughness in Sub-10 nm Fabrication Using Extreme Ultraviolet lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	4/10/2015	AIST Nanocharacterization Facility	Tip Shape evaluation of AFM carbon nano-fiber probes	Motoharu Shichiri, Julius Joseph Santillan
DSA	4/10/2015	電気学会リソグラフィ将来技術調査専門委員会	SPIE Advanced Lithography 2015 報告	Tsukasa Azuma
DSA	4/11/2015	The 59th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication	EIPBN abstract(Defect annihilation dynamics in directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory and dissipative particle dynamics)	Katsuyoshi Kodera
BI	4/14/2015	Photomask Japan 2015	Detection capability of Actinic Blank Inspection tool	Tomohiro Suzuki
PI	4/20/2015	Photomask Japan 2015	Correlation between actinic blank inspection result and phase defect printability	N. Takagi, O. suga, H. Watanabe, R. Jonckeer, D.V.D. Heuvel, E.Gallagher

PI	4/22/2015	Photomask Japan 2015	Patterned mask inspection technology with Projection Electron Microscope(PEM) technique for 11 nm half-pitch(hp) generation EUV masks	Ryoichi Hirano
DSA	4/24/2015	フォトポリマー懇話会	誘導自己組織化(DSA)技術	Tsukasa Azuma
BI	4/30/2015	Applied Physics Express	Atomic Step Patterning on Quartz Glass Via Thermal Nanoimprinting	Osamu Suga
DSA	5/5/2015	Forum International PolyNat Industries 2015	Directed Self-assembly Lithography for Semiconductor Device Manufacturing	Tsukasa Azuma
ERM	5/21/2015	応用物理学会 シリコンテクノロジー分科会 第 181 回研究集会プログラム「SPIE Advanced Lithography 2015 特集」	SPIE Advanced Lithography 2015 特集 Advances in Patterning Materials and Processes XXX II	Toru Fujimori
PI	5/25/2015	The 59th International Conference on Electron, Ion, and Photon Beam Technology and Nanofabrication	Simulation technique for pattern inspection using projection electron microscope	Susumu lida
PI	5/26/2015	EIPBN 2015	Variation in phase defect volume on extreme ultraviolet mask before and after coating reflective multilayer	Tsuyoshi Amano
ERM	2015 年 6 月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet	Shinya Fujii, Takahiro Kozawa,

			lithography	Kazumasa Okamoto, Julius Joseph Santillan, To shiro Itani
DSA	6/1/2015	Japan-France Joint Seminar on Functional Block Copolymer 2015(JFJS2015)	Directed Self-assembly Lithography using Coordinated Line Epitaxy (COOL) Process	Tsukasa Azuma
ERM	6/16/2015	2015 International Workshop on EUV Lithography	Recent Progresses in negative-tone imaging using EUV exposure	Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi , Toshiro Itani
DSA	6/24/2015	The 32st International Conference of Photopolymer Science and Technology Materials & Processes for Advanced Micro-lithography, Nanotechnology and Phototechnology (ICPST-32)	Challenge to the Micro-phase Separation Limit of PS-b-PMMA by dopping hydrophilic materials	Yoshiaki Kawamonzen
DSA	6/24/2015	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology	Simulation study on defectivity in directed self-assembly lithography	Katsuyoshi Kodera

ERM	6/24/2015	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology (Journal of Photopolymer Science and Technology)	Recent Progress of Negative-tone imaging with EUV exposure	Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Toshiro Itani
DSA	6/24/2015	journal of photopolymer science and Technology (The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology)	manuscript submit(Simulation study on defectivity self-assembly lithography)	Katsuyoshi Kodera
ERC	6/24/2015	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress in EUV Resist Outgas Research at EIDEC	Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuro Harada

ERM	6/24/2015	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology (Journal of Photopolymer Science and Technology)	Negative-tone imaging with EUV exposure	Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru, Tsuchihashi, Toru Fujimori, Makoto Momota, Takahiro Goto
BI	6/25/2015	2015 Lithography Workshop	Actinic Blank Inspection tool for coming EUVL	Hidehiro Watanabe
DSA	6/26/2015	The 32nd International Conference of Photopolymer Science and Technology	Vertical Oriented Lamellar Formation of Fluorine- and Silicon-containing Block Copolymers without Neutral Layers	Teruaki Hayakawa
BI	6/30/2015	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Measurement of the phase defect size using scanning probe microscope and at-wavelength inspection tool	Tsuyoshi Amano
ERM	2015年7月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Quencher diffusion in chemically amplified poly (4-hydroxystyrene-co- <i>t</i> -butyl methacrylate) resist	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERM	2015年7月	28th International Microprocesses and Nanotechnology	Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet(EUV)	Shinya Fujii, Takahiro Kozawa,

		Conference (MNC 2015)	lithography	Kazumasa Okamoto, Julius Joseph Santillan, To shiro Itani
ERM	7/6/2015	Workshop NGL2015	Negative-tone imaging process for EUV lithography beyond 7nm node	Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru, Tsuchihashi, Toru Fujimori, Takahiro Goto
PI	7/6/2015	NGL Workshop 2015	Patterned mask inspection technology with Projection Electron Microscope (PEM) technique for 11 nm half-pitch (hp) generation EUV masks	Ryoichi Hirano
DSA	7/6/2015	NGL Workshop 2015	Sub-15nm line patterning using DSA with coordinated line epitaxy (COOL) process	Yusuke Kasahara
BI	7/6/2015	2015 Lithography Workshop	EUV scanner printability evaluation of natural blank defects detected by actinic blank inspection	Noriaki Takagi, Hidehiro Watanabe
DSA	7/6/2015	NGL Workshop 2015	A simulation studies on embedded defects in lamellar nanostructures	Hideki Kanai
ERM	2015 年 9 月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Effect of thermalization distance on stochastic phenomena in 7-nm-half-pitch line-and-space pattern fabrication using	Takahiro Kozawa, Julius Joseph

			chemically amplified extreme ultraviolet resists	Santillan, Toshiro Itani
ERM	9/2/2015	Joint Symposium 2015-eMDC and ISSM	High-sensitivity negative-tone imaging materials using EUV exposure for sub-10 nm manufacturing	Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Toshiro Itani
BI	9/7/2015	分試験研究会(学協会連携)・放射光学会第8回若手研究会“軟X線イメージング部の描く未来”	EUV 照明を用いたマスクブランクス欠陥の観察	Hiroki Miyai, Kiwamu Takehisa, Hidehiro Watanabe
DSA	9/15/2015	公益社団法人 高分子学会 第64回高分子討論会	誘導自己組織化(DSA)リソグラフィによるハーフピッチ 15nm 半導体回路パターン形成	Tsukasa Azuma
DSA	9/22/2015	Micro and Nano Engineering 2015	Characterization of Half Pitch 15 nm Metal Wire Circuit fabricated by Directed Self-assembly of PS-b-PMMA	Yusuke Kasahara
BI	9/29/2015	Photomask Technology 2015	Variation in programmed phase defect size and its impact on defect detection signal intensity using at-wavelength inspection system	Tsuyoshi Amano
PI	9/29/2015	2015 SPIE Photomask technology	Detection capability enhancement with a learning system for PEM mask inspection tool	Ryoichi Hirano
PI	9/30/2015	SPIE Photomask Technology 2015	Pattern inspection of etched multilayer mask for EUVL	Susumu Iida

PI	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	EUVL patterned mask inspection for 11 nm half-pitch(hp) generation with defect detection capability enhancement by a learning system	Ryoichi Hirano
ERM	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Novel ultra-high sensitive non-CAR materials using EUV exposure	Toru Fujimoru, Toru Tshichihashi, Toshiro Itani
ERC	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Recent Progress in EUV Resist Outgas Research at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Takeshi Sasami, Takeshi Kamizono, Satoshi Tanaka
PI	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Impact of conductive layer for etched multilayer EUV mask on the sensitivity of patterned mask inspection	Susumu Iida
ERM	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Suppression of stochastic effects in chemically amplified resist processes for extreme ultraviolet lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph

				Santillan, Toshiro Itani
ERM	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Development of metal resist and undelayer	Shinya Minegishi
ERC	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Comparison of EUV resist outgassing between organic and inorganic materials	Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi, Shinji Mikami, Takashi Kamizono, Toru Fujimori, Eishi Shiobara
BI	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Actinic Blank Inspection tool for coming EUVL	Hiroki Miyai
BI	10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	ABI tool performance confirmation by NXE 3300 printing results for native EUV blank defects	Rik Jonckheere
PI	10/6/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	A conductive under layer for an etched multilayer type vlack border: influence of the mask structure on mask pattern images captured by EB optics	Tsuyoshi Amano

ERC	10/14/2015	第 212 回フォトポリマー講演会	EIDEC における EUV レジスト技術開発の現状と今後の展望	Eishi Shiobara
ERC	10/14/2015	第 5 回リソグラフィ将来技術調査専門委員会	EUV Symposium 2015 報告	Eishi Shiobara
DSA	10/22/2015	Microelectronic Engineering	Characterization of Half Pitch 15 nm Metal Wire Circuit fabricated by Directed Self-assembly of polystyrene-block-poly(methyl methacrylate)	Yusuke Kasahara
DSA	10/25/2015	1st international symposium on DSA	A simulation analysis on defect annihilation in directed self-assembly lithography	Katsuyoshi Kodera
DSA	10/26/2015	1st international symposium on DSA	Half pitch 15 nm metal wire circuit fabricated using directed self-assembly of PS-b- PMMA	Yuriko Seino
DSA	10/29/2015	Japan-Korea Joint Symposium 2015	Orientation of Sub-10 nm Lamellar Domains from Air-Film Interface	Tsukasa Azuma, Dr.Lei Wang
PI	11/1/2015	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS, and MOEMS	Investigation of defect detectability for extreme ultraviolet patterned mask using two types of high-throughput electron-beam inspection systems	Susumu lida
PI	11/9/2015	Electron Scattering Simulation Workshop and Chariot Users Meeting	Simulation technique for pattern inspection using a projection electron microscope	Susumu lida
ERM	11/10/2015	28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2015)	High-sensitivity metal-based resists for EUV lithography	Julius joseph Santillan, Minoru Toriumi,

				Toshiro Itani
PI	11/10/2015	Electron Scattering Simulation Workshop and Chariot Users Meeting	Identification of multilayer structure using secondary electron yield curves: Effect of native oxide film, material density, and surface contamination	Susumu lida
DSA	11/12/2015	28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2015)	Investigation of the Micro-phase Separation Limit of PS-b-PMMA by Doping with Organic Acid Compounds for Sub-10nm Density Multiplication	Yoshiaki Kawamonzen
PI	11/12/2015	The 35th Annual NANO Testing Symposium	Patterned mask inspection technology with Projection Electron Microscope (PEM) technique for 11 nm half-pitch (hp) generation EUV masks	Susumu lida
PI	11/12/2015	The 35th Annual NANO Testing Symposium	EIPBN2015 学会報告	Susumu lida
BI	11/13/2015	28th International Microprocesses and Nanotechnology Conference (MNC 2015)	Observation Results of Actual Phase Defects on EUV Mask Using Micro Coherent EUV Scatterometry Microscope	Hiraku Hashimoto, Tsuyoshi Amano, et al.
BI	11/17/2015	The 13th Symposium on X-Ray Imaging Optics	EUV マスクの位想像観察顕微鏡の開発	Tetsuo Harada, Tsuyoshi Amano, et al.
ERM	11/24/2015	FEL-TUS 利用者懇談会	EUV resist study by IR free electron laser	Minoru Toriumi
PI	12/1/2015	Journal of Micro/Nanolithography,	EUVL patterned mask inspection performance evaluation toward	Ryoichi Hirano

		MEMS and MOEMS	16-11 nm half pitch generation	
DSA	12/15/2015	応用物理学会次世代リソグラフィ技術研究会第1回定例会	応用物理学会 NGL 研究会定例会 DSA Symposium 2015 報告	Masayuki Shiraishi
ERM	12/15/2015	次世代リソグラフィ技術研究会:第1回定例会	Review of EUVL Symposium 2015" EUV resist part"	Shinya Minegishi
研究連携推進部	12/17/2015	Semicon Japan 2015 SEMI Technology Symposium (STS)	EUVL technology development status toward hp11nm generation	Satoshi Tanaka
PI	12/25/2015	Journal of Micro/Nanolithography, MEMS and MOEMS	Pattern inspection of etched multilayer EUV mask	Susumu lida
DSA	1/8/2016	STRJ(JEIT 半導体部会)－WG5	STRJ-WG5 DSA Symposium 2015 報告	Tsukasa Azuma
ERM	1/11/2016	Applied Physics Express	Metal resist for Extreme Ultraviolet Lithography characterized by Scanning Transmission Electron Microscopy	Minoru Toriumi
DSA	1/15/2016	電気学会 第6回リソグラフィ将来技術調査専門委員会	電気学会 第6回リソグラフィ将来技術調査専門委員会 DSA Symposium 2015 報告	Masayuki Shiraishi
ERM	1/25/2016	H27 年度光ビームプラットフォーム報告会	EUV resist development by IR free electron laser	Minoru Toriumi
BI	1/25/2016	光ビームプラットフォーム報告会	コヒーレントスキヤトロメリー顕微鏡によるマスク欠陥検査技術の開発	Tetsuo Harada, Tsuyoshi

				Amano, et al.
DSA	1/27/2016	2016 年第 1 回 極限ナノ造形・構造物性研究会	Fabrication of Half Pitch Sub-15 nm Semiconductor Device Circuit Patterns Directed Self-Assembly (DSA) Lithography	Tsukasa Azuma
PI	2/1/2016	Vacuum science and technology A	An analysis of the impact of native oxide, surface contamination and density on secondary electron yield decoupled from surface charging effects	Susumu lida
BI	2/15/2016	Applied Physics Express	Actual defect observation results of an extreme-ultraviolet blank mask by coherent diffraction imaging	Tetsuo Harada, Tsuyoshi Amano, et al.
DSA	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Fabrication of Half Pitch Sub-15 nm Metal Wire Circuits using Directed Self-Assembly of Block Copolymers with Line Density Multiplication	Tsukasa Azuma
DSA	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Simulation study of defective states analyzing the polymer chain conformations in direct self-assembly lithography	Katsuyoshi Kodera
PI	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	EUVL patterned mask inspection performance of an advanced projection Electron Microscope (PEM) system for 11 nm half-pitch (hp) generation	Ryoichi Hirano
DSA	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Sub-10 nm lines and spaces patterning using grapho-epitaxial directed self-assembly of lamellar block copolymers	Yuriko Seino

DSA	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Grapho-epitaxial sub-10nm line and space patterning using lamellar-forming Si-containing block copolymer	Hironobu Sato
DSA	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Carbohydrate-based block copolymer self-assemblies: Sub-10 nm highly nanostructured thin films and DSA patterning	Tsukasa Azuma
PI	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Novel ultra-high sensitive 'metal resist' for EUV lithography	Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Shinya Minegishi, Takashi Kamizono, Toshiro Itani
ERM	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Process development of 'metal resist' for EUV Lithography	Shinya Minegishi, Julius Joseph Santillan, Takashi Kamizono, Toru Fujimori, Toshiro Itani
ERM	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Study on stochastic phenomena induced in chemically amplified poly(4-hydroxystyrene-co-t-butylmethacrylate) resist (high-performance model resist for extreme ultraviolet lithography)	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
ERC	2/21/2016	SPIE Advanced	EUV resist outgassing analysis	Eishi

		lithography 2016	for the new platform resists at EIDEC	Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Takashi Kamizono, Shinya Minegishi, Takakazu Kimoto, Toru Fujimori, Satoshi Tanaka, Tetsuo Harada, Takeo, Watanabe and Hiroo Kinoshita University of Hyogo
ERM	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Quantification of the basic resist dissolution unit size: an in situ analysis using high speed atomic force microscopy	Julius joseph Santillan, Motoharu Shichiri, Toshiro Itani
研究 連携 推進 部	2/21/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Current Developmet Status of HSFET (High NA Small Field Eposure Tool) in EIDEC	Satoshi Tanaka, Hidemi Kawai, Shunko

				Magoshi, Soichi Inoue, Luc Girard, Lou Marchetti, Bob Kestner, John Kincade
ERC	2/21/2016	IEUVI Resist TWG 2016	Update of Resist Outgas Testing at EIDEC	Eishi Shiobara
PI	2/22/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Identification of multilayer structure using secondary electron yield curves: Effect of native oxide film, material density, and surface contamination	Susumu Iida
PI	2/22/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Etched multilayer type black border formed on EUV mask; Does it cause image degradation during pattern inspection using EB optics?	Tsuyoshi Amano
ERM	2/22/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Characterization of 'metal resist' for EUV lithography	Minoru Toriumi, Toshiro Itani
DSA	2/23/2016	SPIE Advanced lithography 2016	RIE challenge for fabrication of Half Pitch Sub-10 nm lines and spaces pattern using Directed Self-Assembly	Yusuke Kasahara
ERC	2/23/2016	SPIE Advanced lithography 2016	High-power EUV irradiation tool setup for resist outgas evaluation	Shinji Mikami, Eishi Shiobara, Satoshi

				Tanaka
DSA	2/24/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Advanced CD-SEM metrology for qualification of lamellar DSA patterning	Yuriko Seino
BI	2/24/2016	SPIE Advanced lithography 2016	Advances in the detection capability on actinic blank inspection	Takeshi Yamane, Tsuyoshi Amano, Noriaki Takagi, Hidehiro Watanabe, Ichiro Mori, Tomohisa Ino, Tomohiro Suzuki, Kiwamu Takehisa, Hiroki Miyai, Haruhiko Kusunose
ERM	2/26/2016	NIMS Nanofabrication Platform	Development of EUV resist and process using EB exposure	Toru Fujimori
PI	3/15/2016	日本顕微鏡学会 SEMの物理学分科会 研究会	投影顕微鏡-写像投影型電子顕微鏡技術を用いた EUV マスク検査装置の開発-	Susumu Iida
ERM	3/25/2016	AIST Nanocharacterization Facility	Tip shape evaluation of AFM carbon nano-fiber probes	Motonobu Shichiri, Julius Joseph Santillan

ERM	3/29/2016	NGL 研究会 第一回 定例会	SPIE Advanced Lithography 2016 特集 Advances in Patterning Materials (レジスト)	Toru Fujimori
DSA	3/29/2016	次世代リソグラフィー 研究会	SPIE Advanced lithography 2016 DSA 関連報告	Naoko Kihara
ERM	2016 年 3 月	富士フィルム研究報 告 第 61 号	Negative-tone imaging with EUV exposure	Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru Tsuchihashi , Toru Fujimori, Makoto Momota, Takahiro Goto
ERM	2016 年 3 月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Analysis of stochastic effects in chemically amplified poly (4-hydroxystyrene-co-t-butyl methacrylate) resist	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, Toshiro Itani
PI	2016 年 3 月	Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS and MOEMS	Study of EUVL patterned mask inspection tool for half-pitch 11 nm node defect detection performance	Ryoichi Hirano

2016 年度				
Program	Date (発表日)	Meeting title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
PI	4/6/2016	Photomask Japan2016 The 23rd Symposium on Photomask and NGL Mask Technology	Resent results from EUVL patterned mask inspection with Projection Electron Microscope (PEM) system for 11 nm half-pitch (hp) generation	Ryoichi Hirano
PI	4/6/2016	Photomask Japan 2016 The 23rd Symposium on Photomask and NGL Mask Technology	EIDEC Contribution to be the Mask Readiness for EUVL	Hidehiro Watanabe
BI	4/6/2016	Photomask Japan2016	Effect of relative defect position to absorber pattern on the relationship between DSI and wafer print	Noriaki Takagi, Takeshi Yamane, Hidehiro Watanabe
ERM	2016 年 4 月	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Relationship between Information and Energy Carried by Photons in Extreme Ultraviolet lithography: Consideration from the Viewpoint of Sensitivity Enhancement	Shinya Fujii, Takahiro Kozawa, Kazumasa Okamoto, Julius Joseph Santillan, To shiro Itani
DSA	6/22/2016	The 33rd international Donference of photopolymer Science and Technology 2016(ICPST-33)	Fabrication of Half Pitch Sub-10 nm Metal Wire Circuits using Directed Self-Assembly of Block Copolymers	Tsukasa Azuma

PI	2016年7月	Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS and MOEMS	Defect detection capability enhancement with a learning system for projection Electron Microscope mask inspection tool	Ryoichi Hirano
BI	未定	Journal of Micro/Nanolithograp hy, MEMS, and MOEMS	Phase Defect Mitigation Strategy:Unveiling Fiducial Mark requirements on Extreme Ultra-Violet Lithography Msak	Tetsunori Murachi,Tsu yoshi Amano,Sun ghyun Oh
ERM	未定	JJAP	Resist materials and processes for extreme ultraviolet lithography	Toshiro Itani Takahiro Kozawa
ERM	未定	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Effects of deprotonation efficiency of protected units on line edge roughness and stochastic defect generation in chemically amplified resist processes for 11 nm node of extreme ultraviolet lithography	Takahiro Kozawa,Julius Joseph Santillan,Toshiro Itani
ERM	未定	Japanese Journal of Applied Physics(JJAP)	Relationship between Defects and Stochastic Effect in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography	Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan Toshiro Itani
DSA	未定	NIMS Nanofabrication Platform	Evaluation of EUV resist by electron beam lithography	Shinya Minegishi
ERM	未定	NIMS Nanofabrication Platform	Evaluation of EUV photoresist material/ processes by EB exposure tool	Julius Joseph Santillan
ERM	未定	NIMS Nanofabrication Platform	Resist material evaluation by gradation pattern using an electron beam lithography exposure	Motonobu Shichiri

ERM	未定	NIMS Nanofabrication Platform	Study of Developing process of EUV resist CH (contact holls) pattern exposed by electron beam lithography exposure	Jun-ichi Furukawa
ERM	未定	NIMS Nanofabrication Platform	PEB temperature Optimization of EUV photoresist material by EB exposure tool	Yosuke Ohta

「査読付き」 219件、 「その他」 189件

2. 研究開発項目毎の成果

2. 1 研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

(1) - (i) ABI装置高度化（レーザーテックとの共同研究）

・目標：本項目により開発を行う高感度欠陥検出モジュール、真空搬送系等に、EUV光源モジュール、照明光学系、および、対物光学系を組み合わせることによりABI装置を実現する。このABI装置が、設計に従って完成し、仕様に適った欠陥検出性能等のhp16nmに対応した基本性能が得られることを評価し確認する。この評価に並行して、hp11nm以細に対応するための技術検討を行う。続いて、ABI装置をhp11nm以細の量産に適用するために必要となる欠陥検出安定性と高スループット、ならびに、装置生産性の向上とメンテナンスコスト低減のための高度化開発を行い、量産対応が可能なABI装置を実現する。

・研究内容：平成23年度に委託研究で行ったABI装置の構想設計を基に、本項目においてTDI (Time Delay Integration) センサー、ステージ、信号処理システム、および、ブランクの真空搬送系の開発を行い、EUV光源モジュール、照明光学系、および、対物光学系とともに組み上げを行いABI装置を実現し、hp16nmに対応する基本性能が達成されていることを確認する。また、検出された欠陥の位置読み取り精度を高めるための高倍率レビュー機能を整備して機能の確認を行う。さらに、hp11nm以細に対応するABI装置を実現するために必要となる要素技術の検討を行い、ABI装置のhp11nm以細に対する拡張性を確認する。続いて、ABI装置の量産適用に必要な欠陥検出安定性とスループット、および、装置生産性の向上と、メンテナンスコスト低減を実現することによりABI装置の完成度を高める。hp11nmの量産に対応する欠陥検出安定性向上のためにABI装置の照明光学系の最適化を行う。また、hp11nmの量産に要求される欠陥位置読み取り精度を向上させる機械精度向上のための開発を行う。ABI装置の高度化に併せて、hp11nm以細に対応するため、高精度シュバルツシルド対物鏡に係る基盤技術開発として、高精度対物鏡を実現するために必要となる鏡製造技術とその評価技術を確立する。さらに、量産対応のABI装置として必要になる高機能、高生産性を実現するために、DUV、あるいは、明視野による検出欠陥のレビュー機能を開発するとともに、装置メンテナンスコストの低減のための機構開発、および、運転条件の最適化開発を行う。

(1) - (ii) ABI装置仕様検討

・目標：ABI装置の量産適用のために、EUVマスクブランク欠陥の露光転写性評価を高精度で行いhp16nm、および、hp11nmにおけるABI装置の欠陥検出仕様を明確化する。露光転写性の評価として、EUV露光装置によりウェハ転写を行い、ABI装置における検出とウェハ上の転写を比較する実露光実験を行う。また、実露光実験と並行してEUV波長領域でのシミュレーションの高精度化を実現することにより、多層膜欠陥のサイズ、形状、材質（光学定数）等、欠陥に関する情報を反映したシミュレーションを可能にする。シミュレーショ

ン技術の高精度化により A ABI 装置における欠陥信号の強度プロファイルの予測も併せて行う。欠陥の特性による ABI 装置の検出信号変化を検討することで ABI 装置高感度化のための検討を可能とする。欠陥の特性の解析は、次項にあるマイクロ CSM や AFM (Atomic Force Microscope)、SEM (Scanning Electron Microscope) 等により行う。

・研究内容：欠陥を有するテストマスクを露光装置によってウェハ上に転写し、欠陥の転写性結果と欠陥信号の比較を行う。また、欠陥による露光影響を正確に予測するためにシミュレーション技術の高度化を行う。欠陥がパターン転写に与える影響度の詳細な解析を行ない hp16nm 対応の ABI 装置に求められる検査感度を明確にする。

実露光評価では、露光時にウェハ転写されるブランク欠陥が ABI 装置で事前に確実に検出されていること、また、露光転写に与える影響が ABI 装置の欠陥検出信号強度に対応していることを確認し、ABI 装置による EUV マスクブランク品質保証の有効性を実証する。また、シミュレーションの高精度化により、欠陥の露光転写性評価に加え、ABI 装置による欠陥信号の正確な評価を行うことにより、前項の ABI 高度化開発をより確実なものとする。

(1) - (iii) マイクロ CSM の開発 (兵庫県立大学への再委託)

・目標：EUV マスクブランク上にある欠陥の観察評価を行うために、照明スポットサイズを縮小したマイクロ CSM を実現する。マイクロ CSM における欠陥よりの散乱光の特性評価を行うことにより、欠陥の解析を行うとともに、この評価結果より ABI 装置における欠陥検出性能向上に有効な光学系の仕様に関する検討を行う。マイクロ CSM に係る技術基盤と該当する光源を所有する、兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 EUV リソグラフィ研究開発センターに再委託して研究開発を行う。

・研究内容：EUV マスクブランク上にある微小欠陥の特性評価を行うためにマイクロ CSM システムを実現する。EUV 光を集光させるためにフレネルゾーンプレートにより照明光を ϕ 200nm にまで絞り、用意した幅 (FWHM) ϕ 30nm に至る微細なブランク欠陥の散乱パターンを測定する。マイクロ CSM による EUV マスクブランク上の欠陥の特性評価を進め、マイクロ CSM の回折像と欠陥の幾何学的構造の相関を整理し、欠陥データベースを作成し、ABI 装置に欠陥検出信号の特性に関し解釈を行う。さらに、マイクロ CSM により得られる欠陥の位相情報と強度情報により、欠陥の幾何学的構造 (欠陥形状) の再現、ならびに欠陥の材質の解析が可能であることを実証する。また、この位相情報と強度情報を直接取り込むことが可能となる高精度シミュレーション技術を開発する。加えて、マイクロ CSM により得られる多層膜欠陥の回折プロファイルを解析し、ABI 装置の高度化開発において欠陥検出能力を向上することが可能となる光学系の検討を行う。

(1) - (iv) EUV 明視野顕微鏡観察技術の開発 (東北大学への再委託)

・目標：露光装置では、解像が困難である hp11nm 以細の世代に対応したマスクにおける欠陥の露光影響を観察し確認するために、EUV 明視野顕微鏡を実現する。顕微鏡光学の設計と

製作は、東北大学にて行う。兵庫県立大学の協力の下、放射光施設ニュースバルにおいて、EUV 明視野顕微鏡による欠陥像の解析を行い、ABI 装置の仕様設定が適切であることを確認する。

本課題では、EUV 光学系製作の基盤技術を持つ東北大学に対して再委託を行い、光源やマスクステージなどの施設を保有する兵庫県立大学と連携して、hp16nm～hp11nm 世代対応の EUV ブランク及びマスクの欠陥観察を目的とする明視野 EUV 顕微鏡観察技術の開発を行う。

・研究内容：EUV 明視野顕微鏡を設計する。顕微鏡の光学系は、東北大学の設計による 2 段結像光学系で、3 枚の多層膜ミラーにより 1460 倍の拡大倍率を得る。ミラー基板の製作と形状計測を東北大学にて行う。顕微鏡の完成後、兵庫県立大学の EUV 光源を用いてテストマスクを観察し、hp60nm、50nm、40nm の L&S パターンの解像を確認して、EUV 顕微鏡が hp16nm～hp11nm 以細の EUV マスク観察に十分な空間分解能を持つことを実証する。また、マスク上にある欠陥の観察を行い、EUV 顕微鏡を用いた欠陥観察の妥当性を検証する。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

(2) - (i) PI 装置仕様検討

・目標：hp16nm、および、hp11nm の世代におけるマスクパターン欠陥の転写性について露光シミュレーションを主に検討を行い、それぞれの世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要な欠陥検出性能の仕様値を明示化する。また、欠陥検出のための画像処理技術、並びに、画像処理最適化技術を開発し、PI 装置によってそれぞれの世代に必要な欠陥検出性能の実現を可能とする。さらに、電子軌道シミュレーション技術の開発を行い、PI 装置の写像投影光学系より得られる撮像条件に依存した電子線画像を再現し、欠陥検出のために最適な PI 装置の運用条件を検討する。

・研究内容：欠陥の露光転写性をシミュレーションにより hp16nm 世代において検出が必要となる欠陥サイズをマスクに対する照明光の入射角の影響、欠陥の膜厚を考慮して正確に求める。PI 装置の写像投影光学系の解像度と電子線透過率を評価し、従来装置に対する性能の向上を確認する。また、hp11nm 対応のために必要な改善量を特定する。マスク構成部材の二次電子放出効率を精密に測定することに電子線軌道シミュレーションによる画像の生成精度を向上させ、得られる欠陥画像を解析することにより 16nm サイズ凹凸欠陥検出のために必要な検査条件を設定する。PI 装置のダイ比較欠陥検査感度向上のために、比較を行うダイの相互位置を高精度で合わせるアライメント機能と、欠陥検出のためのノイズ低減機能と欠陥信号強調機能を持つ画像処理技術を開発しその効果を確認する。続いて、露光シミュレーションにより、hp11nm に対応する PI 装置で検出することが必要となる欠陥サイズを確認し、開発装置の感度仕様を決定する。また、PI 装置に搭載された電子線光学系を電子軌道シミュレーションに取り込み、開発に係る欠陥検査装置で得られる電子線画像を生成し、この画像により欠陥検出感度の評価を実施する。これにより、装置に必要なとされる機能、並びに、精度仕様を明確化する。また、提案されている様々な構造の EUV マスク

による電子線像を再生し、欠陥検出に必要となる装置の最適運転条件を提示する。さらに、hp11nm 以細に対応する欠陥検出能力向上のために、電子線画像におけるノイズを低く抑える欠陥検出のための画像処理技術を開発し、加えて、欠陥検出時の論理パラメタを最適化するためのレーニングシステムの開発を行う。これにより最適化された画像処理を取得画像に適用し、所望の欠陥検出感度が得られることを実証する。

(2) - (ii) EUVマスクパターン欠陥検査装置コア技術開発（荏原製作所との共同実施）

目標：高解像度電子線写像投影光学系を搭載するPI装置を実現し、装置の高感度化、高スループット化開発を行うことによりhp16nmに対応するPI装置性能を実証する。さらに、電子線写像投影方式による欠陥検査の利点である高スループットをさらに向上させるために高速画像取得技術の開発を行い、hp11nm 以細に対応するためのPI装置のコア技術を実現する。

・研究内容：平成23年度に委託研究で開発した高解像度電子線写像投影光学系が、hp16nm、および、hp11nm 世代に対応するために必要な収差低減と透過率向上が実現されていることを照明光学系と結像光学系を結合して評価する。解像度を改善するための鏡筒内印加電位の評価手法を確立し、必要となる性能を実現する。開発した電子線写像投影光学系を搭載するPI装置性能を確認するために、600MPPSの処理速度での6インチマスク全面19時間スキャンを実証し、併せて、16nm□欠陥の検出が可能なことを実証する。続いて、写像投影光学系による電子線高スループット欠陥検査の利点をさらに拡充するために、高速画像取得技術の開発を行う。高速に画像を取得するために必要となる画像センサーと電子線光学系を開発し実現することにより、hp11nmの目標仕様である1.8GPPSの処理速度での8時間全面スキャン動作を実証し、また、前項の仕様検討において開発された画像処理技術により、hp11nm 世代において検出が必要となる13nm□欠陥の検出が可能であることを実証する。

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3) - (i) EUVレジスト材料開発（東京エレクトロンとの共同実施）

・目標：EUVレジスト材料開発を進め、解像度、LWR、感度、アウトガスの観点で優れた特性を持つレジスト材料・プロセスを開発する。hp11nm用レジスト材料仕様を構築し、それらの仕様を満足するレジスト材料を開発、選定する。また、hp11nm用レジスト材料に対して、現像、リンスプロセスにおける反応機構を解明し、現像時膨潤、パターン倒れ、膜減りなどが抑制されたレジストプロセスを構築する。

・研究内容：レジスト樹脂のスクリーニングから、リソグラフィ性能を向上させる新規樹脂や増感ユニットを見出す。パターン倒れ改善、LWR改善が可能な新規リンス液ならびにリンスプロセスレシピを見出し、EIDEC標準プロセスを確立する。多数のレジスト材料を評価し、解像度、LWR、感度のバランスが良好なEIDEC標準レジストを選定する。

分子シミュレーションを用いて EUV レジスト材料を原子分子レベルで解析し、レジスト材料の開発を促進するために、分子動力学計算および粗視化分子動力学計算を行う。

(3) - (ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立

・目標：本研究の前期では、EB 照射方式（H23 年度業務委託にて導入）によるレジストアウト評価手法を確立し、EUV 光照射方式（兵庫県立大学への再委託）との相関を取得することで、EB 照射方式の妥当性を検証し、また、EB 照射方式の評価手法の高精度化を行う。さらには、アウトガス判定基準を検証し、加えて得られた知見に基づき、レジスト材料に対するアウトガスの観点からの設計指針を明らかにすることを目標とした。本研究の後期においては、さらに前期の研究目標を深化すると共に、新たに高性能が期待されるメタル系レジストのアウトガス評価の基本手法に対する指針を明確化することを目標とする。

・研究内容：本研究の前期では ASML が推奨する EB 照射方式によるアウトガス評価手法と EUV 光照射方式との比較評価を行い、妥当性を検証する。具体的にはクリーナブルコンタミおよびノンクリーナブルコンタミについて EB 方式と EUV 光方式との相関を実証評価する。さらに、アウトガス計測の誤差要因を解析し、高精度測定手法を確立する。また、EUV レジスト材料において同一組成で光酸発生剤（PAG）添加量および溶解抑止基の保護率などの組成比を変えた一群のレジスト（レジストファミリー）からのアウトガス評価を行い、アウトガス特性の組成比依存性を明確化することで評価数の削減ルールに関する方針を明らかにする。

本研究の後期では、EB 照射方式のレジストアウトガス評価手法と海外レジストアウトガス評価機関（imec、SEMATECH、NIST）のアウトガス評価手法との比較評価を実施する。得られた結果に基づき、アウトガス評価手法の更なる高精度化を進める。さらに、モデルレジストを用いた実験およびシミュレーションにより、コンタミ形成のレジスト組及びプロセス条件依存性を明らかにし、得られた知見を材料設計にフィードバックすると共に、評価数の更なる削減に関して検討する。また、各レジストメーカーの実際のリソグラフィ性能評価に供する化学増幅型レジストのアウトガス評価を複数実施し、アウトガスの観点からの化学増幅型レジストの実用化可否に関する方向性を明らかにする。加えて、メタル系レジストに関して、そのアウトガス特性に対応した水素雰囲気下アウトガス評価機構を高出力 EUV 照射装置（HPEUV）に付与し、メタル水素化物によるアウトガス発生の有無を確認する。

(3) - (iii) DSA 技術開発

・目標：DSA 材料を用いて、ArF 液浸露光装置や EUV 露光装置の解像限界以細にパターンサイズの縮小を可能にするレジストプロセス技術を開発し、ArF 液浸レジストや EUV レジストと組み合わせることにより、hp 11 nm 以細のパターンが形成できる材料・プロセス技術を実現する。パターンサイズの微細化を可能にする DSA 材料開発を加速するには、分子設計

のシミュレーション技術の高度化が必須である。また、パターンサイズが微細なため、プロセスにおける寸法ばらつきや欠陥発生などを計測器で観測することは容易でなく、プロセス開発には計算機上でシミュレーションできることが必須である。このため、DSA プロセスにおける寸法のばらつき、欠陥やラフネス (LER や LWR) の発生などの挙動を、高精度かつ高速に予測できるシミュレーション技術を開発する。また、開発されたシミュレーション技術を用いて、高精度で低欠陥のパターンサイズ縮小レジストプロセスの構築に向けた材料開発ならびにプロセス技術を確立する。DSA 技術を次世代 LSI デバイス量産へ展開するには電気特性評価の検証が必須である。2015 年度までに電気特性取得を目指し、材料、プロセス、検査・計測、シミュレーションの各要素技術を開発し、DSA 技術を確立する。

・研究内容：専用のプロセス装置、エッチング装置の仕様を策定し、産総研 SCR へ装置を導入する。DSA 材料開発(ブロック共重合ポリマー、中性化膜)、中性化層成膜・加工、レジスト剥離、マイクロ相分離、現像プロセスを開発し、hp 15 nm L/S パターンを 300mm ウェハで形成する。更に、後述する東京工業大学への再委託で DSA 材料や周辺材料を開発し、これらから得られた知見をベースに DSA プロセス開発を行い、hp sub-10 nm L/S パターンを 300mm ウェハで形成する。また、DSA プロセスに特化したマイクロ相分離シミュレーションを開発し、系の持つ自由エネルギーを比較することにより、計算機によりプロセスマージンを予測する。最終的に、hp sub-10 nm の金属配線パターンを形成し、電気特性評価を通じて hp sub-10 nm DSA プロセスの実用化に向けた課題を抽出する。

(3) - (iv) アウトガスデータベースの構築 (兵庫県立大学への再委託)

・目標：本研究では、兵庫県立大学のニュースバル光源からの EUV 光を用いたレジストアウトガスの評価装置により、レジスト材料の組成と EUV 照射によるアウトガス・コンタミの関係を多様な材料構成において調査し、レジスト材料選択の指針となるデータベースを構築することを目標とする。

・研究内容：

化学増幅型レジストの樹脂、保護基、光酸発生剤 (PAG) の構成要素がカーボンコンタミにそれぞれどの程度の寄与率を与えているのか、モデルレジストを用いた切り分け実験を行う。また、PAG の構造の違いによってカーボンコンタミに差があるかどうかを調査する。さらに、高性能が期待されるメタル系レジストのアウトガス基礎評価として、文献等の情報に基づき選択した金属錯体をメタル系レジストのモデル材料として、そのアウトガス評価を行い、材料設計の基本的な方向性を確認する。

(3) - (v) 材料設計 (大阪大学への再委託)

・目標：レジストのテスト露光パターンからレジスト内に形成される潜像を推定し、スループットと歩留りの最適化を行えるアルゴリズムを確立する。最適化された潜像を得るための、解像度・LER・感度・EL 間の最適化及び、そのための材料設計指針を得る。さ

らに、レジストパラメーターから解像度・LER・感度・ELおよびレジスト欠陥の発生確率の予測を可能にするアルゴリズムを開発する。

・研究内容：SFETでの露光結果から、レジストのブリッジ欠陥、ブレイク欠陥、倒壊確率等を測定し、レジスト潜像との関係を明らかにする。独自に開発したシミュレーターを用いて推定したパターンの潜像から、ブリッジ欠陥やラインブレイク欠陥を消失させるのに必要な、平均保護基濃度と溶解しきい値の関係を明らかにする。EIDEC標準レジストを用いて、レジスト中に形成される潜像と保護基数の揺らぎを推定可能にし、未露光のレジストの保護基数の揺らぎが潜像揺らぎに与える影響を明らかにする。EIDEC標準レジストの酸拡散長が、hp16nmにおける最適酸拡散長と比較し妥当性を確認する。分子サイズや保護基密度等のレジスト分子構造を確率的観点から考察し、分子レベルでの設計指針を得る。

R L S及び欠陥と潜像との関係の解析手法の高度化とR L S及び欠陥発生確率の予想を可能とするアルゴリズム開発を行う。

(3) - (vi) DSA材料技術開発（東京工業大学への再委託）

・目標：ブロック共重合ポリマーの分子構造設計を見直すことによるマイクロ相分離構造の垂直配向制御に関する基盤研究に取り組むことを目標とする。DSA材料の開発や評価で得られたデータを用いてDSAシミュレーション精度を検証する。物性情報等をプロジェクト内で共有し、hp sub-10 nm L/Sパターンを形成できるDSA材料の開発を推進する。

・研究内容：hp sub-10 nm L/Sパターンを形成できるDSA材料開発研究の一環として、シリコン含有PMAPOSS系ブロック共重合ポリマーについて詳細な検討を行う。シリコン含有PMAPOSS系ブロック共重合ポリマーはhp sub-10 nm L/Sパターンの形成は可能である一方で、他のブロック共重合ポリマーと同様にドメインの垂直配向は難しい材料である。これはシリコン含有PMAPOSS系ブロック共重合ポリマーの構成成分間の表面自由エネルギーに大きな差があることが原因であると考えられる。したがって、PMAPOSSと同程度の表面自由エネルギーを持つフッ素含有ポリメタクリレート(PTFEMA)を含んだブロック共重合ポリマーを分子設計し、マイクロ相分離ラメラ構造の基板面に対する垂直配向について検討する。

(3) - (vii) DSA検査・計測技術開発（京都大学への再委託）

・目標：DSAプロセスではマイクロ相分離が3次元で起こるため、3次元検査・計測技術が必要である。3次元検査・計測データがマイクロ相分離における経時情報として得られると、マイクロ相分離におけるDSA欠陥発生の経緯が明確になり、それらのデータはDSA材料開発を加速する情報となる。したがって、3次元検査・計測技術を用いたDSA材料評価手法を確立し、パターンサイズ縮小レジストプロセス技術開発を加速する。

・研究内容：時分割小角X線散乱(GI-SAXS)法による欠陥構造生成のアニール温度依存性の検討を実施する。また、時分割GI-SAXS法による欠陥構造のアニール温度依存性の解明を目指す。これらの3次元検査・計測技術データに基づき、DSA欠陥構造の冷却速度依存性を

調査する。更に、ブロック共重合ポリマーの 3D-TEM 法による 3 次元構造観察法についても検討する。

(3) - (viii) DSA シミュレーション技術開発 (産業技術総合研究所との共同開発)

・目標: DSA プロセス挙動を予測できるシミュレーションの高精度化および高速化を実施し、DSA プロセスの開発および評価を通じて得られる実験データを使ったシミュレーションモデルの検証を行う。

・研究内容: ソフトマテリアルにおける統合シミュレーションである OCTA をベースに、DSA プロセス挙動を高精度かつ高速に予測できる DSA シミュレーションを開発する。すなわち、DSA プロセス挙動を高精度かつ高速に予測できる分子 MC (Monte Carlo) 法による汎用分子シミュレーションを開発し、DSA プロセスの開発および評価を通じて得られる実験データを使ったシミュレーションモデルの検証のために活用する。

(3) - (ix) DSA 材料合成技術開発 (北海道大学への再委託)

・目標: DSA 技術に用いられるブロック共重合ポリマーとして、これまで専ら PS-*b*-PMMA が検討されてきたが、到達可能な最小 h_p は 12 nm 程度にとどまる。その原因はブロック間の非相溶性が比較的小さいために、低重合度のブロック共重合ポリマーではマイクロ相分離が生じなくなるためである。したがって、 h_p sub-10 nm DSA プロセスには非相溶性の大きな組み合わせのブロック共重合ポリマーが必須である。非相溶性の大きな組み合わせの実用的なブロック共重合ポリマーはこれまで世界的にも例がなく、新規に開発するためには h_p sub-10 nm DSA プロセスのためのブロック共重合ポリマーについて合成方法から検討し、 h_p sub-10 nm の縮小パターンニングにおける一貫プロセスに対応する DSA 材料の合成方法を選定する必要がある。

・研究内容: 疎水性高分子セグメントとしてポリカプロラクトン PCL と、親水性高分子セグメントとしてマルチヘプタオース MH から成るブロック共重合ポリマーに多分岐構造を導入する DSA 材料合成技術を検討し、 h_p sub-10 nm のパターン形成が可能な DSA 材料の分子設計指針を確立する。

2. 2 研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発

(4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発

(4) - (i) 高感度化に係わるレジスト材料設計指針の開発 (大阪大学への委託研究)

・目標：レジスト高感度化によって露光時のフォトン数が減少し、ショットノイズが増大してパターン忠実度が劣化する。このショットノイズの許容限界を反応機構に基づいたシミュレーションにより明らかにした上で、光学像からレジスト像への変換プロセスを精査し、 $h p 1 1 n m$ 以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にすることを目標とする。

・研究内容：本研究では、エネルギー伝達によりパターン情報伝達を優先せざるを得なくなる状況(ショットノイズ限界)を反応機構に基づいたシミュレーションにより明らかにした上で、光学像からレジスト像への変換プロセスを精査し、ハーフピッチ $1 1 n m$ 以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にする。シミュレーション以外にも、必要に応じて酸定量等、シミュレーションパラメーター取得のための実験を実施する。

(4) - (ii) 高感度化の為の酸増殖剤の開発 (東京理科大学への再委託)

・目標：従来の酸増殖レジストでは困難であった高感度化と高解像性の両立を実現するために、増殖する酸を高分子主鎖に化学結合させた高分子タイプの酸増殖ポリマーの設計及び合成を行うことを目標とする。

・研究内容：本研究では、増殖する酸を高分子主鎖に化学結合させた高分子タイプの酸増殖ポリマーの設計および合成を行うこととした。このように酸増殖剤を高分子化すれば、増殖する酸の拡散は抑制され、酸増殖ユニットの添加量も共重合比で制御可能であり、酸増殖ポリマーがレジストのベース樹脂としても機能すると考えられる。この概念を導入することにより、高感度化を実現する。酸増殖ユニットのポリマーへの導入は過去に例がなく、合成が困難であることから、様々な共重合比の酸増殖ポリマーの合成法の確立、合成した酸増殖ポリマーの熱分解挙動などの物性を調べることにより高効率で酸増殖反応を引き起こし、保存安定性に優れた酸増殖ポリマーの構造を決定し、リソ性能評価実験による高感度化の検証、のステップで研究を実施する。

(4) - (iii) EUVレジスト高感度化の検証 (産総研との共同実施)

・目標：酸増殖剤のアイデアや基礎技術を元に、E I D E Cにてアイデアのブラッシュアップを行い、当該アイデアをベースとした $h p 1 1 n m$ 対応の高感度EUVレジストを試作し、H S F E T露光、E B露光等を用いて露光評価、プロセス最適化を目標とする。一方、少ない光源出力でも高い生産性を維持できる高感度レジストの開発が強く望まれてい

るが、新規コンセプトの中で、最も有望と考えられているのがメタル系レジストである。非化学増幅メタル系レジストの開発を行うことも目標とする。

・研究内容：酸増殖剤を“様々なEUVレジストプラットフォーム”と組合せてハーフピッチ11nm対応のプロトタイプレジストを調合して総合的に評価する。これらの実験評価から、高分子樹脂を用いた従来の化学増幅型レジストの限界を明確化するとともに、その限界を打破する上記新規コンセプトによる高感度化とラフネス両立の妥当性を検証する。

また、新たに新規高感度化施策としてメタルレジストを材料の合成から評価まで実施して、レジストとしての性能を評価していく。

(4) - (iv) 高解像度微小面積露光機の研究開発

・目標：hp11nm以細の微細加工を実現するEUVレジスト材料の基盤技術開発に必要な高解像度微小面積露光機HSFET (High NA Small Field Exposure Tool) を開発する。本装置に搭載される投影光学系の総合収差を0.6nm RMS以内を達成することを目標とする。

・研究内容：照明光学系モジュール及び投影光学系モジュール、それぞれについて組立調整手法ならびに装置本体への組込み調整手法を構築し、順次実施する。光源及び機構系を含めた装置の総合調整を行い、HSFETを露光機として完成させる。パターンサイズに適した露光条件を用いて解像性能を確認する。

2. 1 研究開発項目①EUVマスク検査・レジスト材料技術開発

(1) EUVマスクブランク欠陥検査技術開発

半導体の微細加工を実現するために開発が行われている EUV 露光においては、13.5nm の極端紫外線 (EUV) 光を使用する。この波長の光は、現在の半導体最先端加工で使用されている 193nm 波長の深紫外線 (DUV) 光とは性質が大きく異なり、各種材料における光吸収率が非常に高い。このため、半導体パターンの焼き付け露光に使用される写真原版にあたるフォトマスクは、DUV 露光においては透明基板である合成石英板上に遮光膜を加工して半導体レイアウトを配置した透過転写方式であったが、EUV 光においては吸収が大きいため透過型フォトマスクを実現することは不可能であることから、母材となる基板上に形成された多層反射膜上に吸収体膜を加工してレイアウトを配置する反射型のマスクを使用することが必要となる。EUV マスクの基板 (マスクブランク) 上に構成する多層反射膜は、モリブデンと珪素の積層が 40 組重ねて堆積されており、この積層がマスク基板全面にわたって完全に無欠陥であることが、EUV マスクに要求される光学性能を実現するためには不可欠となる。この EUV マスクブランクに光学異常をもたらす欠陥がないことを確認するための欠陥検査が EUV 露光の実用化のためには不可欠な技術課題となる。

EUV マスクブランクにある欠陥の検出において、これまでの DUV 光用マスクブランク品質検査に使用されてきている DUV 光を用いた欠陥検査装置では、DUV 光の多層膜に対する透過率が極端に小さいために多層膜中にある欠陥を検出することができず、EUV 露光に悪影響を与えるブランク欠陥を完全に検出することはできない。このため、露光波長である EUV 光を用いたマスクブランク欠陥検査装置 (ABI 装置) の実現に大きな期待が寄せられていた。

本邦では、ABI 装置の開発を継続して行ってきた。MIRAI プロジェクト (2001～2005 年) において、比較的小さな EUV 光源の光量でも欠陥検出が可能となる暗視野方式の ABI 検査装置の原理検証をおこない、続く MIRAI-Selete プロジェクト (2006～2010 年) においてマスクブランク全面の検査を行うことができる ABI 試験装置を実現した。この ABI 試験装置は、EUV 露光の実用を検討していた海外を含む最先端デバイスメーカ、マスクメーカ、ならびに、ブランクメーカの大きな注目を集め、量産対応型 ABI 装置の実現が強く望まれることとなった。世界中で高まった期待を受け、2011 年より 2015 年に渡り、EIDEC プロジェクトにおいて量産適用が可能な ABI 装置の開発に着手した。

EIDEC プロジェクトにおける EUV マスクブランク欠陥検査技術開発においては、ABI 量産装置の製品化を視野に、レーザーテック株式会社と共同で ABI 高度化開発を実施した。また、装置に必要とされるブランク欠陥の検出要求性能を正確に見積もるための仕様開発として、シミュレーション技術の開発、並びに、imec との共同評価による露光実験を行い、ブランク欠陥の転写性評価を行った。さらに、欠陥転写性を正確に理解し ABI 装置の実用化装置開発をより確実なものにするためにブランク欠陥の光学的振る舞いを詳細に評価することを目的に、兵庫県立大学に対してマイクロ CSM による欠陥の特性評価を、ならびに、東北大学に対して実露光では確認できない微細パターンの観察のための EUV 明視野顕微鏡開発をそれぞれ再委託した。

以下に、EIDEC プロジェクトにおける EUV マスクブランク欠陥検査技術開発の成果を述べる。

(1) - (i) ABI装置高度化(レーザーテック株式会社との共同実施)

【1】 研究開発の目標

ABI装置は、EUV光源、照明光学系、対物光学系、EUV光検出器、マスクステージ、および信号処理システム等から構成される。EUV光源より発せられたEUV光は、照明光学系を介して被検体であるブランクへ照射され、その反射・散乱光は対物光学系を介してEUV光検出器へと導かれ、信号処理システムで多層膜欠陥の有無の判定を行う。本開発テーマでは、欠陥検出効率、スループット向上のためのコア技術である高感度欠陥検出モジュールの開発、装置内で発生する微小異物および化学汚染を低減するための真空搬送系の開発、等を行う。平成23年度に委託研究で

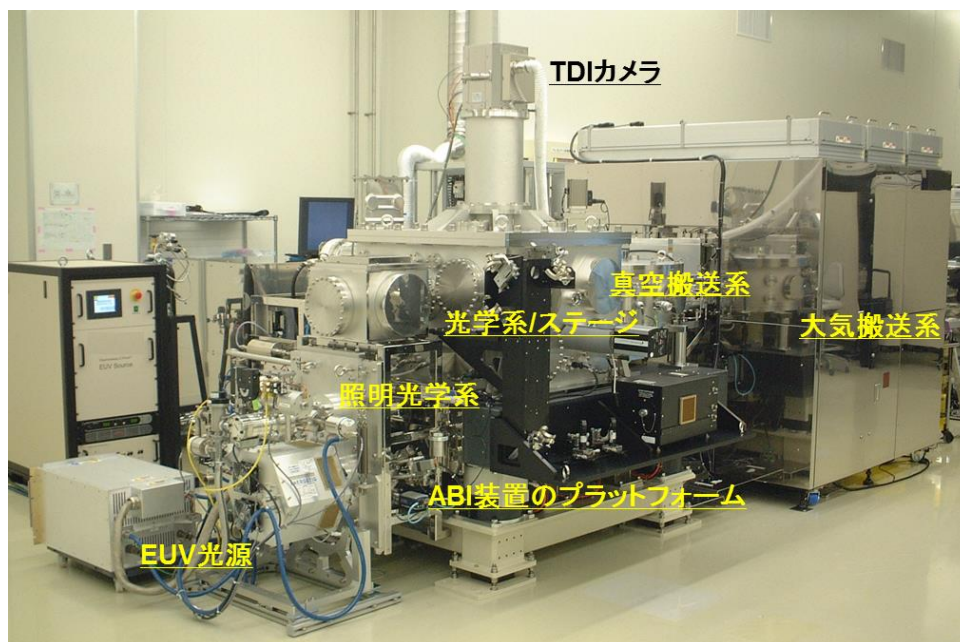
開発したEUV光源モジュール、照明光学系、および対物光学系を組み合わせ、量産に対応した多層膜欠陥検査が可能なABI装置の開発をABI装置高度化として行う。装置を実現した後は、量産対応を視野に、検出欠陥の特性を同定するための欠陥観察機能の開発、欠陥検出性能・安定性の向上のための開発、EUVマスク量産時に欠陥緩和技術として必要となる欠陥の位置読み取り精度の向上のための開発を行い、量産対応装置として必要な機能の充実を図る。加えて、量産装置に求められる稼働率を実現するための生産性の向上開発を行うとともに、hp11nm世代以細のABI装置の展開のために必要となる検査技術検討を行う。

【2】 成果

[1] ABI装置高度化

委託業務により開発を行った、ABI装置の全体の構想設計、光学系構想設計、機械部構想設計、および、検出系の構想設計をもとに、ABI装置の欠陥検出能力を決定するTDI-ステージモジュールと、ABI装置の量産への適応に重要となる装置の清浄度を決定する真空搬送系モジュールを製作し、ABI本体評価装置に組み付けを行った。これら個別技術項目の装置高度化開発の成果をhp16nmのEUVマスクブランクの量産に対応するための評価装置本体上で実証した。

図Ⅲ.2.1.1-1-1に評価モジュールの組み付けを終了したABI本体評価装置を示す。この組み付けにより、ABI本体評価装置によりEUVマスクブランクの欠陥検査実証を行うために必要な構成要素が一体化したことになる。



図Ⅲ.2.1.1-1-1 ABI本体評価装置に組み上げを完了した評価モジュール

組み付けを終了した後、ABI本体評価装置の調整を行った。EUVマスクブランクの欠陥検査機能を実証するためには、ABI本体評価装置に設計に従ってEUV光を導入し、被検査対象である試料を照明すること、並びに、試料よりの光信号を設計の通りに画像を取得するTDIカメラに導く必要がある。このため、まず、光学系の調整をおこなった。光学系の調整は、最初に可視レーザー光による光軸だしの粗調をおこなった後、実際にEUV光を導入し、微調整を行った。

図Ⅲ.2.1.1-1-2に、光学調整を行い得られたEUV光による試料像を示す。ABI装置は、暗視野光学系を採用しており、原理的にブランク上の凹凸を欠陥として検出するように作られており、凹凸のない無欠陥部分からは光が届かず、凹凸となる欠陥部分より輝信号が検出される。このた

め、図中の EUV ブランク上に形成された十字マーク、あるいは、マスクパターンは、ブランク上の凹凸として構成されているために、その形状に応じた画像が取得されることになる。視野全面にわたり、同等の輝度と同質の解像度で画像が得られることを確認し、光学系の調整を完了している。

光学系の調整に続き、欠陥検出のための電装系の実装と調整をおこなった。ABI 装置においては、EUV 光による画像は、TDI(時間積算方式)カメラにより撮影される。このため、カメラにおける信号の転送と試料を乗せたステージの移動が正確に同期していることが必要となる。また、得られた EUV 光画像を信号処理して、欠陥信号を特定することが必要となる。実証評価として、EUV マスクブランクの欠陥検出能力の評価とその能力の向上開発をおこなうために必要な電装系の実装と調整をおこなった。図 III.2.1.1-1-3 に実装と動作調整をおこなったユーザーインターフェイス画面を示す。

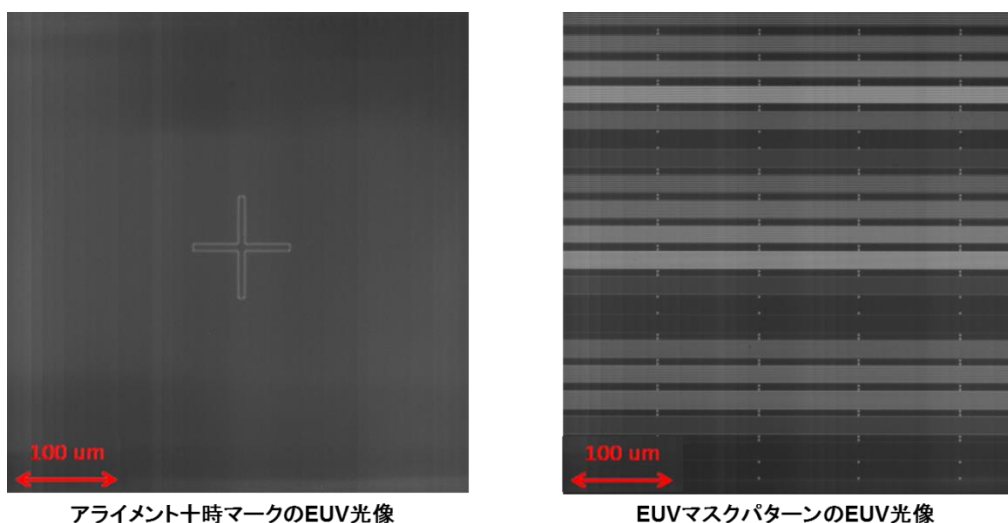


図 III.2.1.1-1-2 光学調整の後に得られた EUV 光学像

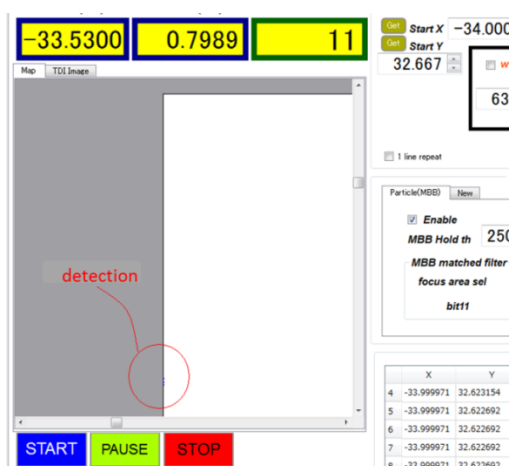
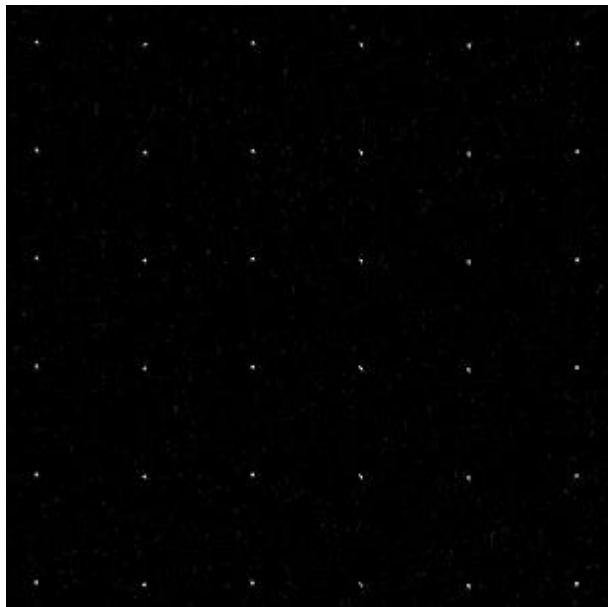


図 III.2.1.1-1-3 実装と調整を完了した ABI 装置のユーザーインターフェイス画面

光学系の調整を終了し、電装系の実装を完了した時点で、ABI 本体評価装置は、開発の目的である EUV マスクブランク欠陥の検出に関する実証評価を行うことが可能となった。

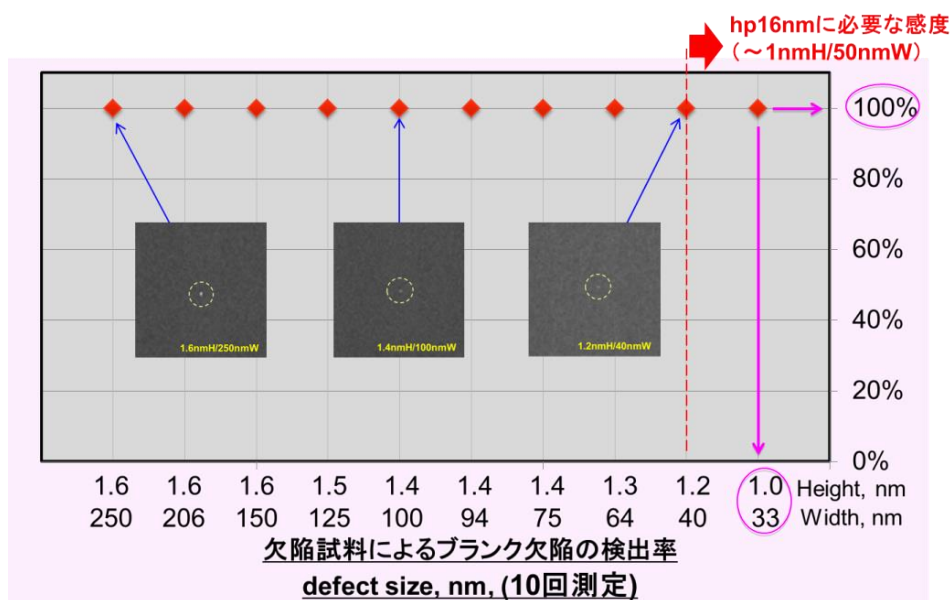
続いて、ABI 本体評価装置に、欠陥検出機能の調整、並びに、欠陥検出能力の評価を行うために、人為的に EUV マスクブランク欠陥を作り込んだ PDM(プログラム欠陥マスク)を用いて、欠陥検出機能の開発をおこなった。図 III.2.1.1-1-4 に、得られた PDM の ABI 画像を示す。図中の位

相欠陥は、大きさが 100nm と比較的大きなものであるが、格子状に作り込まれた評価のための位相欠陥を確認することができ装置の動作を実証した。



図Ⅲ.2.1.1-1-37 作り込み位相欠陥評価マスクの ABI 像

欠陥検出能力を高めるために、試料面での照明光量をできるだけ高めるための、また、輝点の信号強度を高くするための光学調整を繰り返し、また、画像処理において欠陥信号を適切に拾い出す論理と論理パラメータの調整を繰り返し行った。調整の結果、図Ⅲ.2.1.1-1-5 に示すように、高さ 1nm、幅 50nm 以下の大きさの位相欠陥を検出することが可能となった。



図Ⅲ.2.1.1-1-5 調整後の EUV マスクブランク欠陥の検出能力

[2] 欠陥観察機能の製作・評価

(a) 概要

欠陥観察機能として、表 2.1.1-1-6 に示すように暗視野光学系による自動欠陥観察機能、フォーカスオフセット観察機能、DUV 照明観察機能、明視野観察機能を制作した。

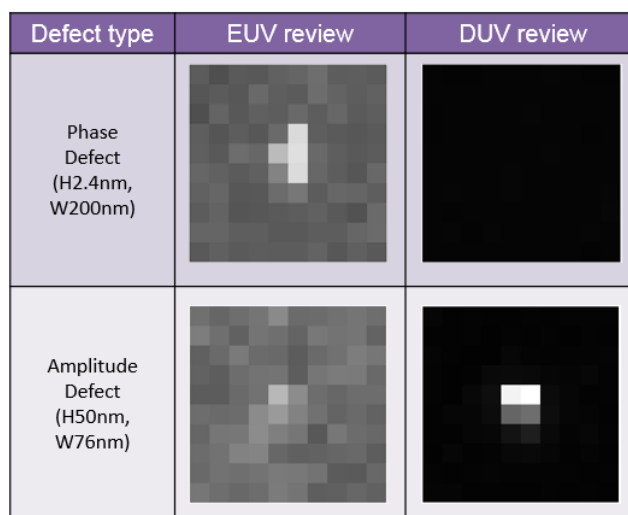
表Ⅲ.2.1.1-1-6 欠陥識別実装機能制作仕様

分類	項目	制作仕様
画像取得	自動欠陥観察機能	検査にて検出した欠陥の画像を暗視野光学系にて自動取得する機能 26倍観察、1200倍観察共に画像を取得する機能
	フォーカスオフセット観察機能	取得する欠陥画像のフォーカス点を一定量シフトさせて、連続して画像を取得する機能
	明視野観察機能	従来の暗視野観察に加えて明視野で欠陥を観察する機能
	DUV照明観察機能	EUV照明からDUV照明に切り替え欠陥を観察する機能

(i) DUV欠陥観察機能

ABI装置の検査波長13.5nmを用いたEUV照明による検査、観察機能に加えて、波長193nmのDUVレーザー光をマスクブランクスに照射し欠陥観察を可能にするDUV欠陥観察機能を追加した。DUV欠陥観察機能は振幅欠陥の観察に有効と考えられるため、振幅欠陥サンプルを用いた検出性能評価試験を実施した。振幅欠陥はカーボンをマスク上に堆積させることで欠陥を模擬し、サイズは幅20nmから2000nm、高さ13nmから110nmについて評価した。その結果、高さ20nm、幅20nm上のカーボン欠陥が判別可能であるという結果が得られた。一方、位相欠陥に対するDUV観察機能の特性を確認するため各種サンプルの観察を実施したところ、DUV光学系では比較的大きな位相欠陥の場合でも、信号を検出することは困難であるとの結果が得られた。上記の試験結果から、EUV観察とDUV観察の視認性を確認することで、位相欠陥と振幅欠陥の判定が可能であることが実証され、ABI装置の機能として位相欠陥と振幅欠陥の分類機能を追加した。

図2.1.1-1-7に位相欠陥と振幅欠陥それぞれの観察結果を示す。

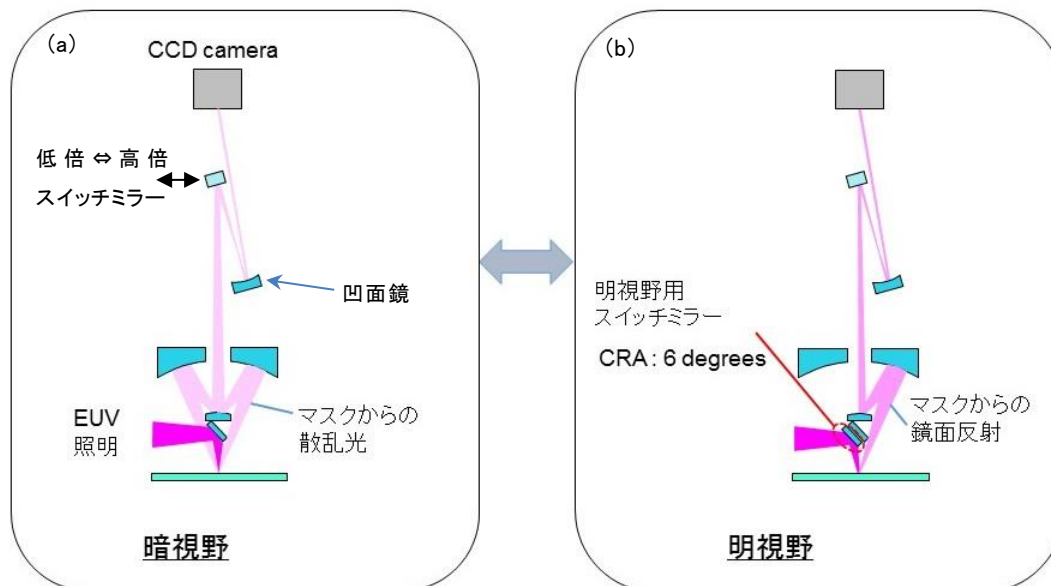


図Ⅲ.2.1.1-1-7 DUV/EUV観察による画像

(ii) 暗視野・明視野光学系観察機能

欠陥の詳細な観察を行うため、EUV暗視野照明による26倍の低倍検査機能に加えて、1200倍の高倍レビュー機能を作成した。図2.1.1-1-8(a)に概略図を示す通り、結像光路中にスイッチミラーを挿入するとスイッチミラーを反射した光が凹面鏡により拡大され、低倍から高倍に切り替わるようになっている。更に欠陥の転写性能の評価を行うために、欠陥の反射特性も考慮できる明視

野照明による評価観察も解析手段として有効であるため、ABI 装置への明視野観察機能の追加について検討を行った。



図Ⅲ.2.1.1-1-8 (a)暗視野、(b)明視野光学系の基本構成仕様

ABI 装置には暗視野照明用多層膜鏡が備わっているが、高感度に検査を行うためには暗視野光学系が必要なため、暗視野光学系による検査が可能な構成を保持しつつ、レビューを行うときのみ明視野光学系に変更することが望ましい。そこで、図 2.1.1-1-8 に示したように明視野光学系と暗視野光学系を共存させるため、一枚の多層膜鏡を照明光学系の光路中に導入することで明視野と暗視野の光路の切り替えが可能となるよう設計を行った。

図 2.1.1-1-9 に明視野光学系における欠陥像をシミュレーションにより求めた結果、図 2.1.1-1-10 に明視野光学系でプログラム欠陥を観察した実測結果を示す。

両評価試験共に凹欠陥および凸欠陥について行い、焦点位置をシフトさせたときの挙動について確認した。その結果、シミュレーション像と実欠陥画像の信号強度の分布が相関することが確認され、フォーカス特性を考慮した明視野観察を行うことにより欠陥種類やその構造を解析する上での情報が得られることが確認された。

Focus [nm]	-800	-400	0	+400	+800
Pit 100nm x 1.0nm					
Bump 100nm x 1.0nm					

図Ⅲ.2.1.1-1-9 明視野及び暗視野における欠陥シミュレーション像

Focus [nm]	-800	-400	0	+400	+800
Pit 100nm x 2.1nm					
Bump 110nm x 0.9nm					

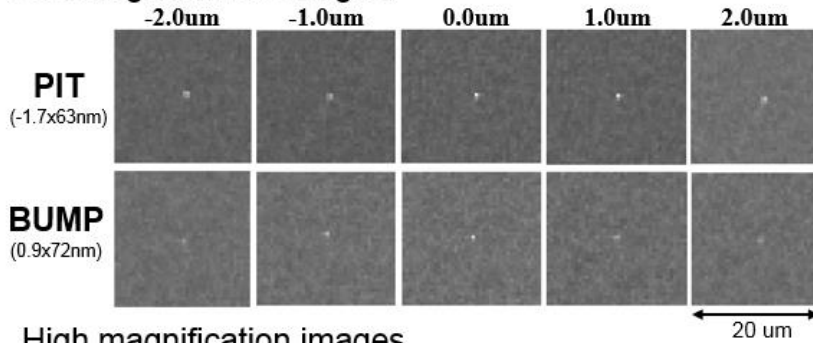
図Ⅲ.2.1.1-1-10 明視野及び暗視野における欠陥観察画像

(iii) 凹凸判定機能

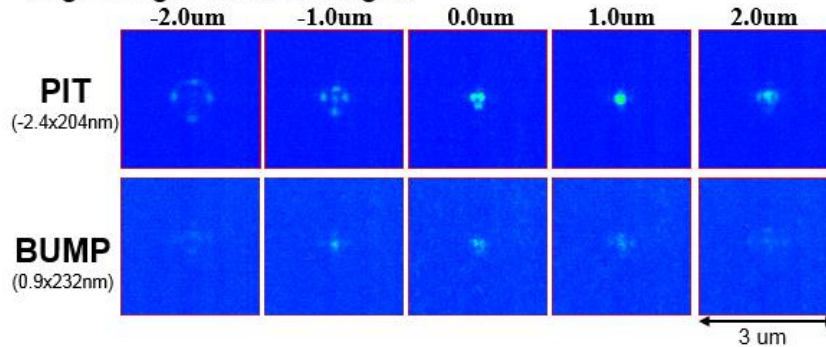
ABI装置の光学倍率26倍と1200倍の画像取得機能を用いて各種欠陥の観察を実施した。欠陥の観察時に結像光学系の焦点位置を多層膜表面からデフォーカスさせると、凸欠陥と凹欠陥の場合で欠陥周囲の信号強度分布の挙動が異なるという試験結果が得られた。図Ⅲ.2.1.1-1-11に凹凸形状の欠陥に対してABI装置を用いて焦点を変動させたときの観察例を示した。

凹欠陥と凸欠陥の観察像を解析すると、26倍、1200倍の両欠陥像において、それぞれの欠陥で中心付近の信号強度が最も強くなる焦点位置が異なる結果が得られた。欠陥付近の信号空間強度分布をまとめると、図Ⅲ.2.1.1-1-12に示した通り、高さ2nm程度の代表的な凹欠陥の場合には多層膜表面から-0.3μm程度焦点を変更した位置(多層膜表面より内側)で最も欠陥中心付近の信号強度が高くなる傾向があり、高さ1nm程度の代表的な凸欠陥では、多層膜表面から0.3μm程度フォーカスを変更させた位置(多層膜表面から離れる方向)で欠陥中心付近の信号強度が高くなる傾向があった。欠陥像の焦点位置を変動させた観察を行い、欠陥付近の信号強度が最も強くなる焦点位置を解析することにより、欠陥の凹凸判定が可能との結論が得られたため、ABI装置の欠陥解析機能として追加した。

Low magnification images

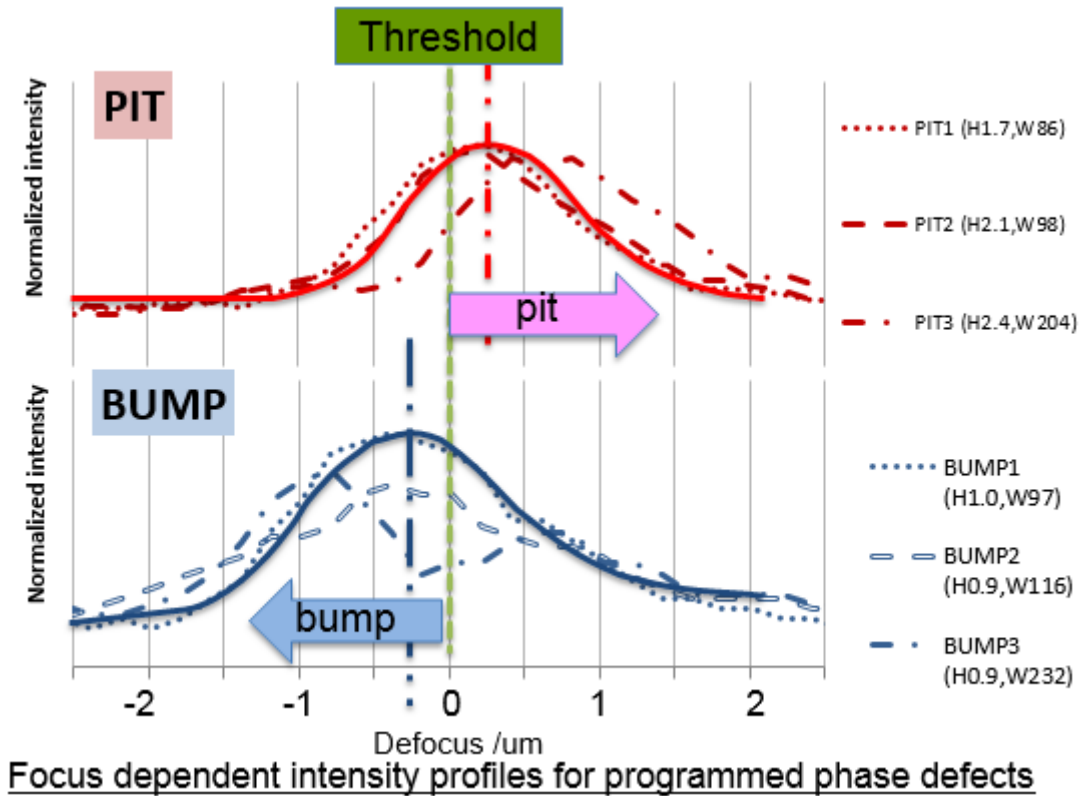


High magnification images



The position where the image focuses differs, depending on whether the defect is pit or bump.

図Ⅲ.2.1.1-1-11 凹凸欠陥のスルーフォーカス画像



図Ⅲ.2.1.1-1-12 凹凸欠陥のスルーフォーカスによる信号強度分布

[3] 欠陥検出性能の向上

(i) 高精度欠陥検出システムの製作と評価

EUV マスクブランクス欠陥検査機の欠陥検出性能を向上させるため、EUV 照射システムのプラットフォーム、TDI-stage モジュール、真空搬送部等の各ユニットを統合制御するシステムを製作し、各種欠陥検査機能とレビュー機能を拡充させる開発を実施した。ここではこれらに加えて検出信号を安定して検出するための信号平均化システム、受光素子中の感度ムラ補正機能、および、マスクブランクスからの散乱光強度を検査中一定に保持するシステムを制作した。これらの機能追加により、ブランクス表面で照射する EUV 光の散乱強度が変動する場合でも、適切な補正が可能になり、高精度に欠陥を検出することが可能になった。

(ii) 照明 NA 拡大による低アスペクト欠陥の検出効率向上

ABI 装置には第三照明鏡として平面ミラーが用いられ、マスクブランクスには $NA=0.07(\pm 4^\circ)$ の領域に EUV 光を入射する構成としていた。しかし、ABI 装置開発の過程で、マスクブランクスを照射する照明 NA を大きくすると検出効率の向上が見込まれる試験結果が得られた。そこで、照明光学系 NA を拡大したときの欠陥検出性能の改善効果を図 2.1.1-1-13 に示すモデルを用いて欠陥検出シミュレーションにより見積った。

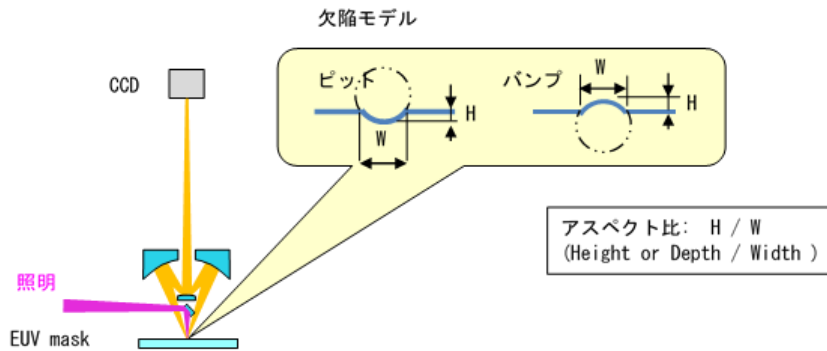


図 2.1.1-1-13 欠陥検出シミュレーションモデル

凸欠陥(バンプ)の信号強度シミュレーションからは、図 2.1.1-1-14 に示すようにマスクに対する照明 NA を 0.07 から 0.10 まで上げることで、低アスペクト比の欠陥ほど受光素子の信号強度が上がることを示された。

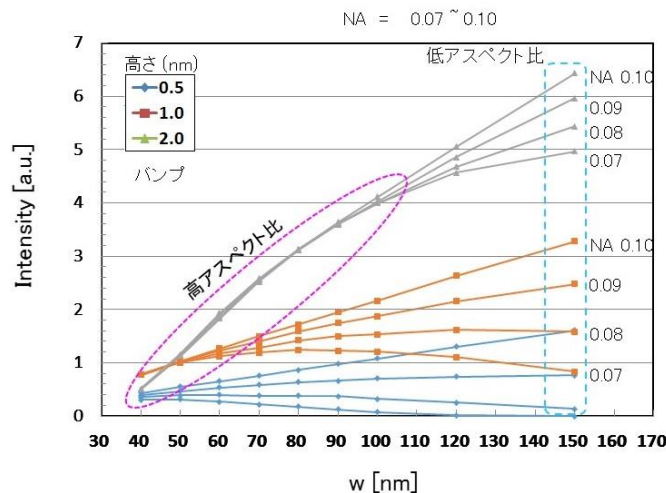


図 2.1.1-1-14 欠陥検出性能シミュレーション結果(凸欠陥)

上記の評価から、照明光学系 NA を 0.1 に拡大するとアスペクト比が小さい欠陥の検出性能が改善されることが解った。そこで、ABI 装置にも照明 NA を 0.1 付近にまで拡大する修正を施しその効果の検証を実施した。評価方法としては第三照明光学鏡を平面鏡からトロイダルミラーに変更することにより、EUV 光源から第二楕円面鏡までの光学系を従来と同一の NA 角度である $\pm 4^\circ$ に保ち、マスクに照射する NA のみを 0.1 付近 ($\pm 5^\circ$) に設定することとした。評価試験の光学部の配置図を図 2.1.1-1-15 に示す。

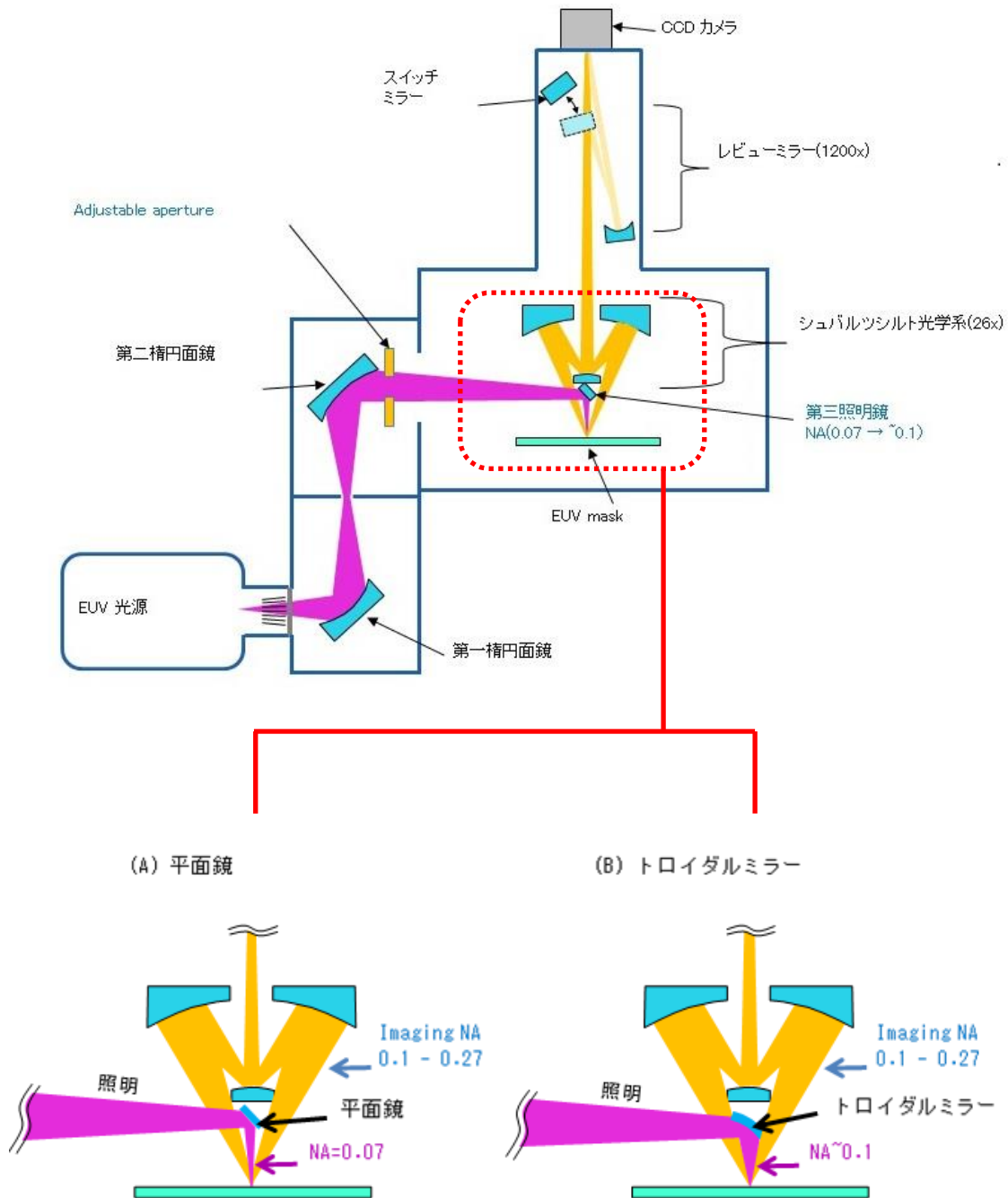


図 2.1.1-1-15 照明 NA の拡大による検出効率向上試験光学配置図

ABI 装置の照明 NA の拡大による検出効率向上の効果を確認するため、欠陥検出シミュレーションとABI 装置実機でのプログラム欠陥観察結果の比較を実施した。図 2.1.1-1-16 に欠陥信号強度シミュレーション結果を、図 2.1.1-1-17 にプログラム欠陥の観察結果を示す。

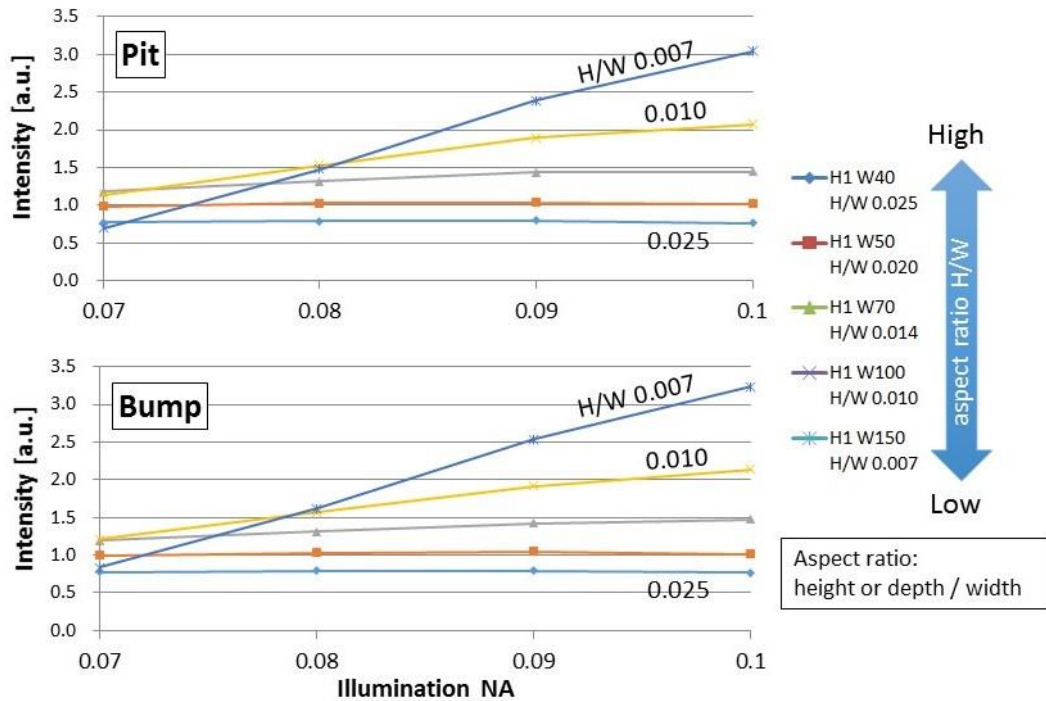


図.2.1.1-1-16 欠陥信号強度シミュレーション結果 (アスペクト比と信号強度)

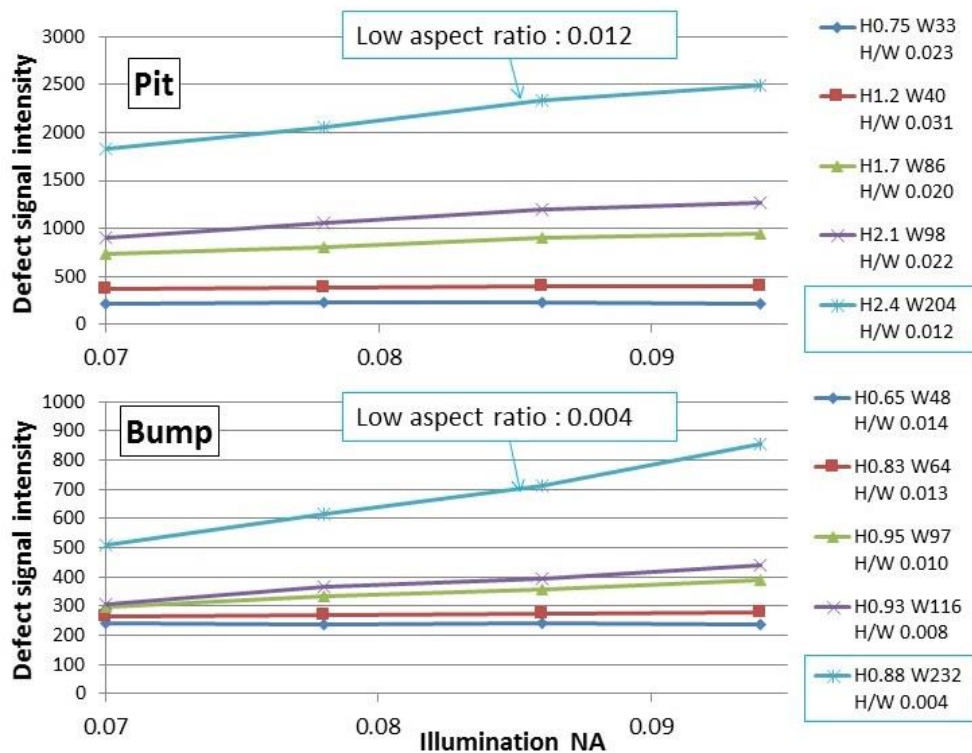
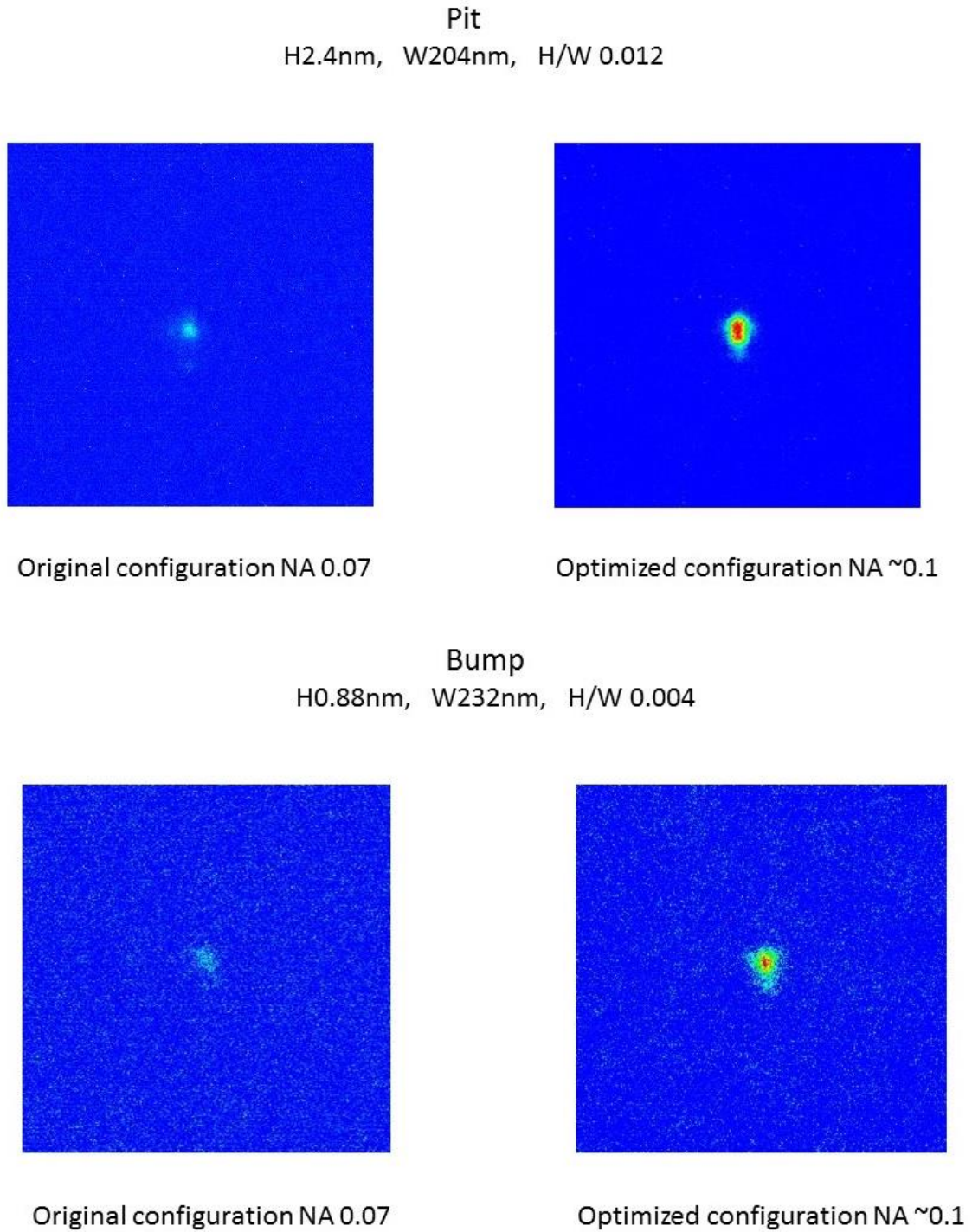


図 2.1.1-1-17 欠陥信号強度実測評価結果 (アスペクト比と信号強度)

これらの評価から、アスペクト比が小さい欠陥ほど信号強度が上がるのが解析および実測の両方から得られ、欠陥検出性能の向上に寄与することが実証された。

また、照明光学系を変更する前後での低アスペクト比の欠陥の観察像を図 2.1.1-1-18 に示すが、ここでも明確に信号強度が増加することが確認された。



図Ⅲ.2.1.1-1-18 高 NA による高倍カメライメージ図

[4] 欠陥検出位置精度の向上

(a) 概要

EUVL 実現に向けてブランクスの欠陥低減が課題として挙げられているが、欠陥を吸収層の下に配置してマスクパターンの描画を行い、露光時に欠陥の転写を抑制する手法も考案されている。この手法を適用するには、ブランクス検査の工程において欠陥の位置を高精度に測定することが必要であるため、ABI 装置で欠陥の位置を高精度に計測可能にするため拡大光学系を実装し光学分解性能を上げる対応を行った。しかし、EUVL 適用ノードの微細化が進むに伴い、検査機に要求される欠陥検出位置精度には安定した検出性能が必要となったため、光学分解能だけでなく、温度変動の影響を排除し安定して計測する性能、マスク搭載ステージの安定性向上、欠陥位置検出アルゴリズムを最適化する等、装置の総合的な性能向上を ABI 装置高度化で行った。

(i) 温度制御機能の改良

欠陥検出位置精度の検証試験において、温度変動が結像光学系、オートフォーカス機構、XY ステージ、真空チャンバー等の部材の位置変動を引き起こし、欠陥検出位置精度に影響を与えやすい結果が得られた。結像光学系が含まれる真空チャンバーの周囲に温度調整ユニットを導入し、欠陥観察の安定性を高める改良を行った。

温調調整ユニットを導入した結果、ABI 装置の温度安定性を向上させることが可能となり、安定した温度環境で評価試験を実施可能となった。

(ii) マスク搭載ステージの改良

マスク搭載ステージの外力に対する微小変形が位置計測の不安定性に影響していたため、機械的な剛性を確保する改造を実施した。

(iii) 測定アルゴリズムの最適化

取得画像の座標計測精度を改善するため、複数画像の平均化処理、・シェーディング補正 (ピクセル間感度ムラおよび暗電流の補正、照明ムラ補正)、Fiducial マーク検出アルゴリズムの最適化等のソフトウェア処理機能を実装し、それぞれの機能の効果の検証を実施した。

(b) 検出位置再現性の評価結果

ABI 装置の欠陥座標検出精度の検証結果を図 III.2.1.1-1-19 に示す。

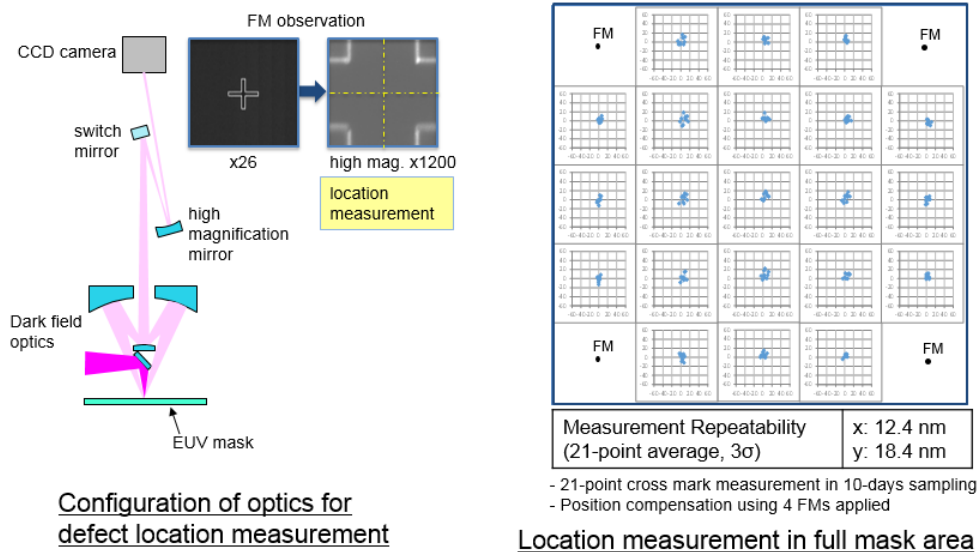


図 III.2.1.1-1-19 欠陥位置測定再現性取得結果

検証はマスク 4 隅に形成した座標が既知である Fiducial マーク(FM)を基準に位置精度の再現性を評価することとした。また、より実運用に近い状態での欠陥位置再現性を測定するため、計測毎にマスクを再ロードする工程を含めて評価した。その結果、欠陥計測位置再現性は x 方向に 12.4nm、y 方向に 18.4nm となり、ABI 装置高度化の目標としていた位置精度 20nm 以下を達成することができた。

[5] 生産性の向上

(a) 概要

ABI 装置の生産性を向上させる取り組みとして、EUV 光源の運転条件の最適化、EUV 光源からの光を受ける集光ミラーの長寿命化の 2 点を実施した。

(i) EUV 光源の運転条件最適化

EUV 光源のプラズマ発光部では EUV 光を発生させるため Z ピンチ構造を用いてプラズマを圧縮している。高いエネルギーを用いているためプラズマ発光部周辺からデブリが発生する。このデブリは光源周辺の部材にダメージを与えるため、デブリを抑制する技術が必要である。その手段として光源チャンバー内に EUV 光吸収率が低いガスをデブリの運動方向と逆向きに導入する技術を適用した。ガスを導入することによりデブリの運動量を下げ、部材のダメージが緩和される効果が期待できるが、ガスの適用条件によっては、光源の出力や安定性に影響を及ぼす可能性があるため、各条件で評価を行い安定した光源の稼動が行える条件を定めた。

また、EUV 光源の発光部に消耗部材として設置する円筒状の部材であるボアは、高エネルギーのプラズマに暴露されるため、その表面が削り取られて徐々に内径が大きくなる。ボアの内径が大きくなると安定したプラズマの生成が困難となる。またボアの消耗が過度に進むと光源本体の破損の危険があるため使用限界を定める必要がある。本評価試験にて EUV 光源の運転条件の最適化を行った後、複数のボアを用いた実運転確認を実施した結果、ボアの平均使用時間は改善された。

(ii) 集光ミラーの長寿命化

EUV 光源の運転による EUV 光の出射先に配置する多層膜鏡のダメージ評価を実施した。評価は光源出射部へのフィルターの導入有無や、EUV 光源周辺のガス導入条件を変化させて、一定時間経過後の多層膜の表面形状変化を測定することにより実施した。ガス流量変化評価試験では、ガスの導入により多層膜のエッジング進行速度が抑制されることがわかった。

[6] 11nm 世代以細の検査技術検討

(a) 概要

ABI 装置は 26 倍のシュバルツシルト光学系の後段に、2 枚組のミラーを光路中に振り込むことにより、1200 倍の高倍率レビューを得ることが可能である。高倍レビュー機能は詳細な欠陥観察評価と欠陥位置精度計測を行うことができるが、ABI 装置の適用が 11nm 世代以降になる場合、これまで以上に詳細な欠陥観察性能と欠陥位置計測精度が求められている。これらの要求性能を得るためには、波面収差を改善した光学系が必要であるため、シュバルツシルト光学系の波面収差を低減した高精度光学系の設計及び、その高精度光学系を実現するための製作技術の実証評価試験を実施した。

(i) 高精度光学系の検討

波面収差を低減できる高精度光学系を実現するためには、ミラー保持方法の改善が必要である。

ABI 装置では結像光学系にシュバルツシルト光学系を用いているが、ミラーを支持部に重力による歪が集中してミラーの波面収差の原因になっていたため、その影響を緩和する保持方法の開発を実施した。また、波面収差の改善はミラー支持部の重力による歪みを改善する設計上の課題だけではなく、ミラー製作時の研磨性能、ミラー計測性能を改善し総合的な研磨精度を上げることによっても実現することが可能と考えられた。そこで、研磨性能の改善効果を実証するためミラーの製作を実施し、その計測結果から見込まれるシュバルツシルト光学系の結像性能について波面収差を考慮したシミュレーションを実施した。その結果、スポットが拡がり観察画像の不安定性に繋がる現象が緩和されていることが確認された。

(1) –(ii) ABI装置仕様検討

【1】 研究開発の目標

ABI装置の高感度化・高度化開発による欠陥検出効率の向上のための基本検討を行い、基本仕様をまとめる。また、マスクブランク欠陥のウェハへの転写性を高精度で評価し、欠陥検出感度の要求値を明確にする。欠陥のサイズや形状によってウェハへの転写性は異なることが予想される。ABI装置に求められる欠陥検出性能を明らかにするためには、欠陥信号の特性をウェハ上への転写性に対してキャリブレーションすることが重要である。このために、実露光試験(プリンタビリティ検討)による評価を行う。また、実験による位相欠陥のEUV光による光学特性の確認、欠陥の物理的、化学的な構造の解析にあわせ、EUV領域でのシミュレーション技術を高精度化する。予想精度が向上することにより、転写に対する影響が大きい欠陥の構造の予測や、転写実験に用いた露光装置特有のクセ・誤差による転写結果への影響の補正が可能となる。更に、シミュレーション技術によりABI装置での出力信号の強度プロファイルの予測も可能となる。これにより次世代のマスクブランク欠陥検査装置の欠陥検出感度が予想できるようになるだけでなく、更に検出感度の高いABI装置実現の為の光学系を検討することが可能となる。

シミュレーション技術としてEUVマスクの近接場の電磁場計算、リソグラフィシミュレーション、EUV光を用いた検査光学系のシミュレーションを行う。また、シミュレーション高精度化のために、多層膜欠陥のサイズ、形状、材質(光学定数)等を分析評価により明確にする。欠陥サイズ、形状については次項のCSM(Coherent Scatterometry Microscope)のほか、AFM(Atomic Force Microscope)、断面SEM(Scanning Electron Microscope)等を用いる。得られたパラメータを用いてシミュレーションを実施し、実験結果と比較検証を行う。

【2】 成果

[1] 暗視野 ABI方式の限界性能解析

(a) S/N比向上と検査時間短縮方法の検討

ABI装置HVMプロトタイプを検出感度と検査時間の目標値は、それぞれ、16nm世代に転写インパクトのある位相欠陥(高さ1.0nm、幅50nm)を95%以上の確率で検出することと、マスク1枚当たり45分で検査を実施することである。これに対してMIRAI-Seleteにて開発し、EIDECにて継続して開発を実施しているフルフィールド検査プロトタイプ(MIRAI-tool)では、検出感度はほぼ目標を達成しているのに対し、マスク1枚当たりの検査時間は4.8時間であり目標値と大きな隔りがある。検査時間短縮のためには検査時のスキャン速度を速くする必要があるが、速いスキャン速度では欠陥信号のS/N比が低下する問題がある。そこでMIRAI-toolを用いてノイズ信号の解析を行い、S/N比向上に有効な要因について調査した。

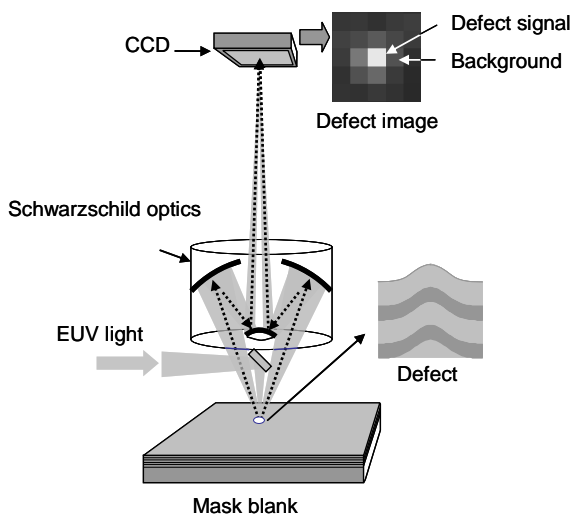
図III.2.1.1-2-1はMIRAI-toolの概略図を示す。EUV光源(EQ-10: Energetiq社製)から発せられた光は楕円鏡と平面鏡から構成される照明光学系を経てマスク面上を照射する。マスク面にて散乱された光がシュバルツシルド光学系に捕集され、CCDカメラにて撮像される。シュバルツシルド光学系の内側NAは0.1、外側NAは0.2~0.27(可変)であり今回は0.27を使用した。結像倍率は26倍、CCDカメラの画素サイズはマスク面上換算値で500nmである。

マスク面上に存在する欠陥からは強い散乱光が発生し、図III.2.1.1-2-1の「Defect image」に示すように欠陥は周辺領域より明るい点像として現れる。この点像は主にCCD検出面の電子拡散により2×2画素の拡がりを持つ。従って図III.2.1.1-2-2に示すように、ある座標(x,y)における信号強度Iは以下の式によって計算した。

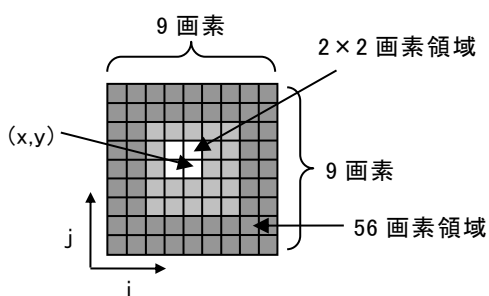
$$I(x, y) = \sum_{2 \times 2 \text{ pixels}} (P_{ij} - P_{\text{surround}})$$

ここで P_{ij} とは座標(i,j)の画素にて検出した強度、 P_{surround} は(x,y)を中心とした9×9画素領域から

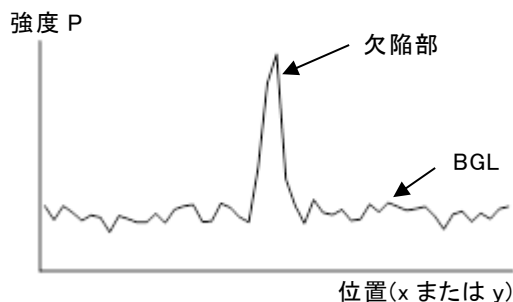
5×5画素領域を取り除いた56画素領域の平均強度を示す。図III.2.1.1-2-3は欠陥部周辺の強度プロファイルを示す。欠陥部分では大きな信号強度を示す一方、欠陥のない領域においてもマスク表面ラフネスによって僅かな散乱光が生じ、バックグラウンドレベル(BGL)を示す。このBGLのばらつきは主に装置起因の成分とマスク起因の成分に分類される。装置起因の成分は、照明強度のばらつき、ショットノイズ、CCD検出ばらつきなどが考えられ、マスク起因の成分としてはマスク表面ラフネスの分布に起因すると考えられる。BGLばらつきのうち装置起因の成分がノイズ信号でありマスク起因の成分を取り除くため、ここではデフォーカス像を用いた。ジャストフォーカス像ではマスク起因の分布がそのまま像として現れるが、デフォーカス像ではマスク起因の分布が平均化されるため、デフォーカス像のBGLばらつきをノイズ信号として求めた。



図III.2.1.1-2-1 フルフィールド検査プロトタイプ(MIRAI-tool)概略図



図III.2.1.1-2-2 信号強度計算領域



図III.2.1.1-2-3 欠陥部の強度プロファイルとバックグラウンドレベル(BGL)

8枚のマスクブランクを用い、ジャストフォーカス位置から光軸上に6.5μm移動させたデフォーカス位置にて、スキャン速度を3~5mm/sに設定して撮像を行った。得られたデフォーカス像内の画素について信号強度Iを求め、得られた像それぞれについてIの平均値と標準偏差(σ)を求めた。得られた結果を図III.2.1.1-2-4に示す。信号強度Iの標準偏差は、スキャン速度を変更しても信号強度Iの平均値と線形の関係を示すことが分かった。

BGLの絶対値は、表面ラフネスと照明強度に依存する。表面ラフネス(σ_{roughness})とBGLの関係は、係数αを用いて以下の式にて表される。

$$BGL = \alpha \sigma_{roughness}^2$$

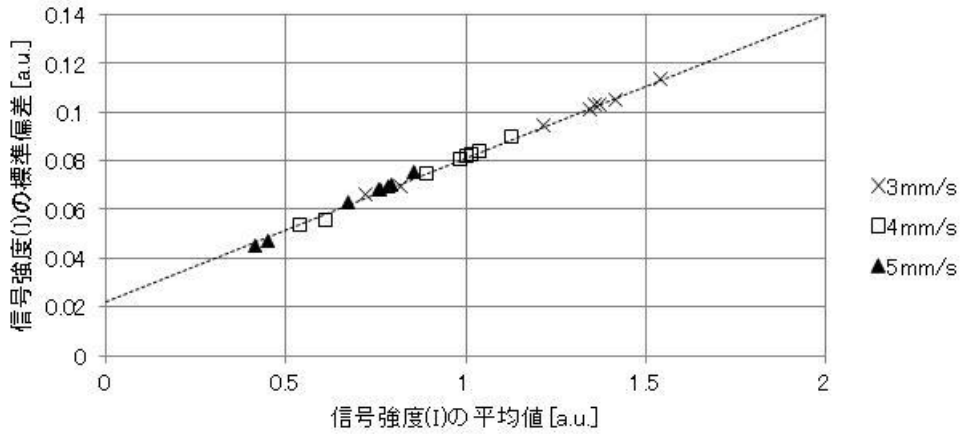


図 III.2.1.1-2-4 デフォーカス像の信号強度ばらつきと平均値の関係

この式の α を実験的に求め、図 III.2.1.1-2-4 のプロットを線形近似して得られた式を用い、表面ラフネスから信号強度 I の標準偏差を求め、ノイズ信号(S/N 比の「N」とした。一方、16nm 世代に転写インパクトのある高さ 1.2nm 幅 40nm のプログラム位相欠陥の信号強度を S/N 比の「S」とし、スキャン速度 3~5mm/s における表面ラフネスと S/N 比の関係を求めた。得られた結果を図 III.2.1.1-2-5 に示す。表面ラフネスは S/N 比に大きな影響を与えることが分かった。また表面ラフネスを 0.1nm と仮定し、現在の照明強度を 1 とした照明強度の相対値と S/N 比の関係を図 III.2.1.1-2-6 に示す。この結果により、スキャン速度を 3mm/s から 5mm/s に増加した場合、同じ S/N 比を得るためには照明強度をスキャン速度の比(5/3 倍)の分だけ増加させる必要があることが分かった。

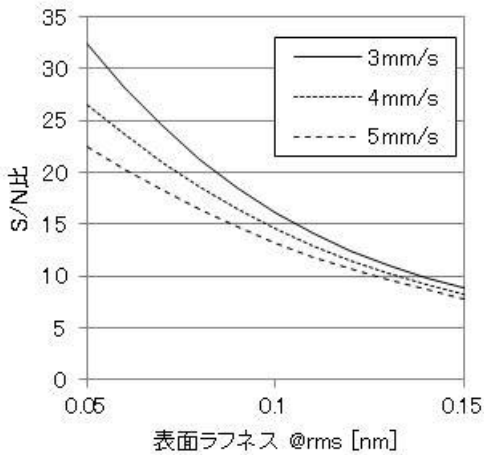


図 III.2.1.1-2-5 スキャン速度 3~5mm/s における表面ラフネスと S/N 比の関係

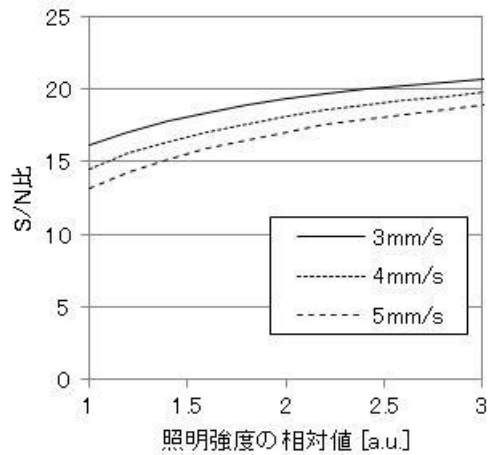


図 III.2.1.1-2-6 スキャン速度 3~5mm/s における照明強度と S/N 比の関係

上記の結果を踏まえて照明系の EUV 光透過効率を改善し、照明強度を 5/3 倍以上である 1.7 倍に拡大し、スキャン速度 3~5mm/s における高さ 1.2nm 幅 40nm のプログラム位相欠陥の検出確率を評価した。この検出確率は、信号強度が検出しきい値以上の値を示す確率を、信号強度のばらつきを用いて統計的に計算した。検出しきい値は、マスクブランク全面(140mm 角)領域に発生する疑似欠陥が 1 以下となるように設定した。得られた結果を図 III.2.1.1-2-7 に示す。透過効

率改善前では 100%の検出確率を得るためにはスキャン速度を 3mm/s に設定する必要があったが、改善後はスキャン速度 5mm/s においても 100%の検出確率を示すことが分かった。図 III.2.1.1-2-8 はスキャン速度と検査時間の相関を示す。照明強度を 1.7 倍に拡大することにより検査時間を 4.8 時間から 3.25 時間に短縮できることを確認した。

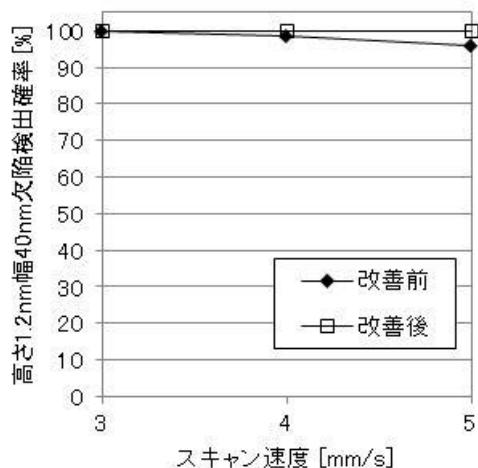


図 III.2.1-2-7 高さ 1.2nm 幅 40nm 欠陥の検出確率とスキャン速度

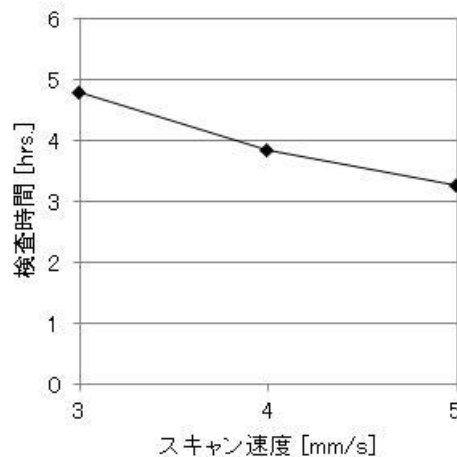


図 III.2.1-2-8 マスクブランク全面検査時間とスキャン速度

以上の結果により、検査時間を短縮するためにはスキャン速度の増加比と同じだけ光量を増加させる必要があることを示し、MIRAI-tool にて実証することができた。

(b) 表面ラフネスが ABI 信号に与える影響の解析

(a) にて記述したように、マスクブランクの表面ラフネスは微弱な散乱光を発生させ、ABI 像のバックグラウンドレベル(BGL)として検出される。この BGL ばらつきは主に装置起因とマスク起因の要因に分けられ装置起因の要因を取り除くため、あるマスクブランクの同一位置を MIRAI-tool と ABI 装置 HVM プロトタイプで 20 回撮像した。得られた像強度をそれぞれ平均化した像を図 III.2.1.1-2-9 に示す。白黒のコントラストはマスク起因による BGL ばらつきを示しているが、MIRAI-tool、HVM プロトタイプ共に同様のパターンが観察される。従って、このパターンは収差などの光学系の問題によって発生しているものではないことが確認できた。

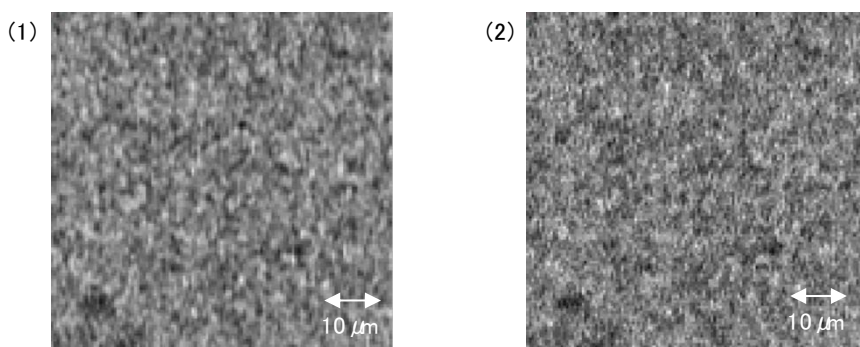
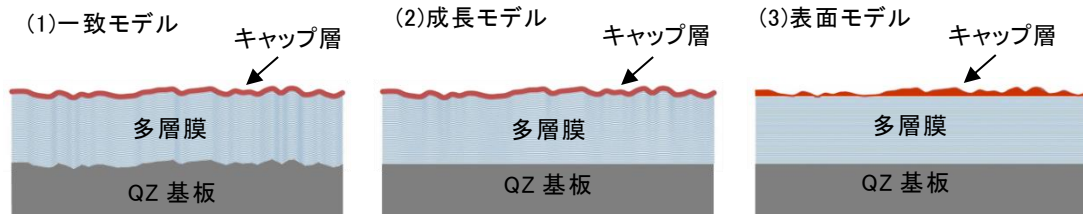


図 III.2.1.1-2-9 (1)MIRAI-tool、(2)HVM プロトタイプによる同一個所の 20 回平均像

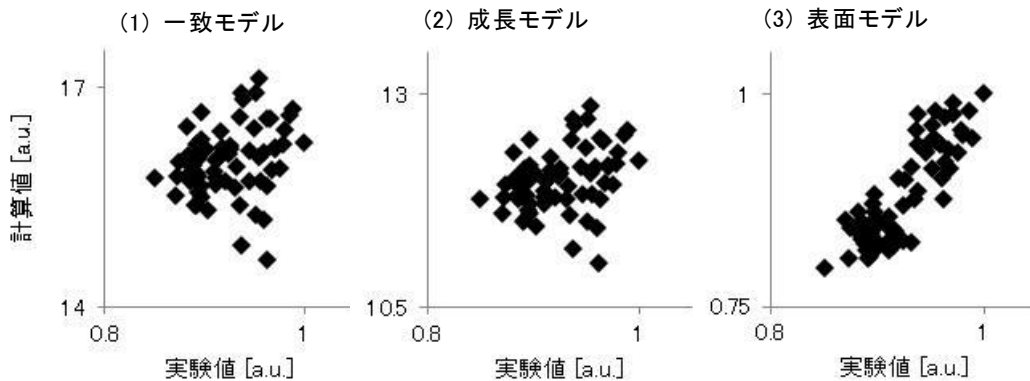
次にあるマスクブランクの $2.5 \mu\text{m}$ 角領域 6 か所について表面形状を AFM にて測定し、シミュレーションを用いて BGL ばらつきを再現し、MIRAI-tool で実際に得られた BGL ばらつきと比較した。

ここで表面から内部のラフネス構造として図Ⅲ.2.1.1-2-10に示す(1)一致モデル、(2)成長モデル、(3)表面モデルの3通りを想定した。(1)はQZ基板、多層膜、キャップ層がAFM計測値と同一の凹凸形状、(2)はQZ基板と多層膜底部が平坦状でキャップ層に近づくに従ってAFM計測値に近づいていく形状、(3)はQZ基板、多層膜が平坦状でキャップ層のみがAFM計測値と同一の形状を持つと仮定した。



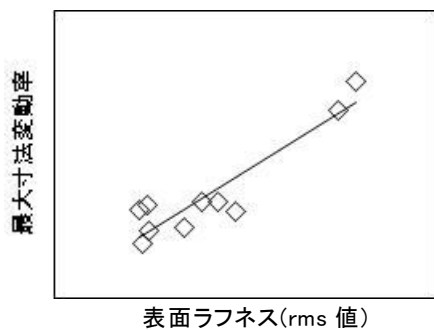
図Ⅲ.2.1.1-2-10 多層膜内部のラフネス構造モデル

シミュレーションで得られたBGL強度(計算値)とMIRAI-toolで20回撮像して平均化することによって得られたBGL強度(実験値)を比較した結果を図Ⅲ.2.1.1-2-11に示す。一致モデルと成長モデルでは計算値と実験値の相関がみられないのに対し、表面モデルでは両者の相関が見られる。従って今回のサンプルは多層膜内部ラフネス構造が表面モデルに近いことが分かり、ABI像のバックグラウンドばらつきによって内部構造が予測できることを実証できた。

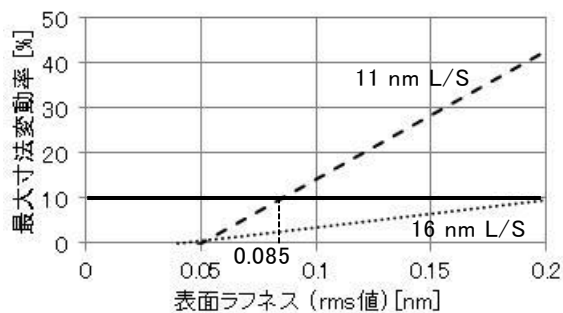


図Ⅲ.2.1.1-2-11 シミュレーションによって得られたBGLばらつき(計算値)とMIRAI-toolで20回撮像の強度平均により得られたBGLばらつき(実験値)の比較

次に、多層膜内部のラフネス構造が表面モデルであると仮定した場合のウェハ転写インパクトをシミュレーションにて評価した。10枚のマスクブランクの表面形状をAFMで測定し表面モデルを適用した多層膜上に11nmL/Sもしくは16nmL/Sを配置した。計算領域は $2.552\mu\text{m}$ 角、 $2.56\mu\text{m}$ 角とし、11nmL/Sパターンの露光条件はNA0.45、 σ 0.4/0.8、開口角90度のダイポール照明、16nmL/SはNA0.33、 σ 0.4/0.8、開口角90度のダイポール照明とした。得られた転写像のスペースパターン寸法の内、ターゲット寸法(11nmもしくは16nm)から最も乖離した寸法差と、ターゲット寸法との比を最大寸法変動率として求めた。一方、上記10枚のマスクブランクの表面ラフネス(rms値)をAFM計測値から求め、シミュレーションから得られた最大寸法変動率と比較した。得られた結果を図Ⅲ.2.1.1-2-12に示すが、両者は線形の関係を示すことが分かった。得られたプロットを直線近似した結果を図Ⅲ.2.1.1-2-13に示す。転写インパクトのある最大寸法変動率を10%とすると、転写インパクトのある表面ラフネスは、11nmL/Sでは85pm、16nmL/Sでは0.2nmであることが分かった。



図Ⅲ.2.1.1-2-12 最大寸法変動率と表面ラフネスの相関プロット

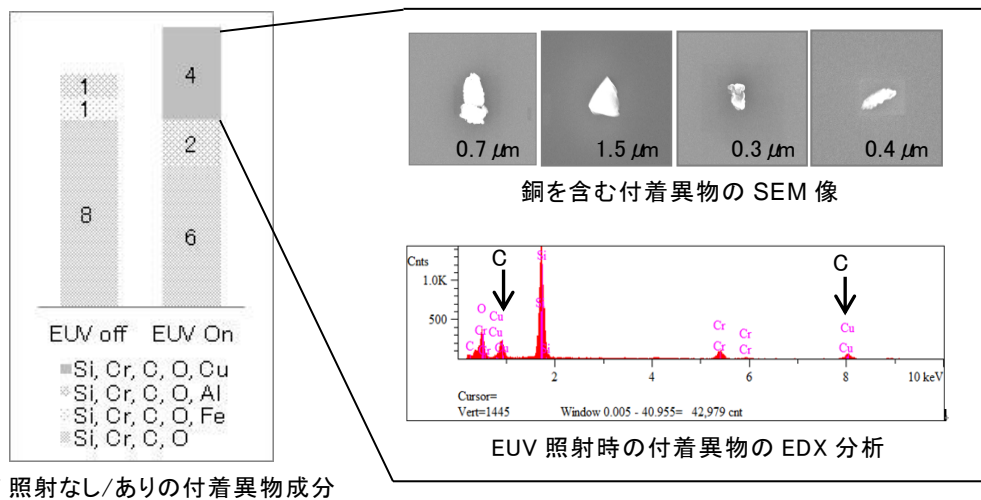


図Ⅲ.2.1.1-2-13 最大寸法変動率と表面ラフネスの相関近似直線

以上の結果により、ABI 像のバックグラウンドレベルから多層膜内部構造を予測でき、得られた結果からウェハ転写インパクトを計算できることを実証した。

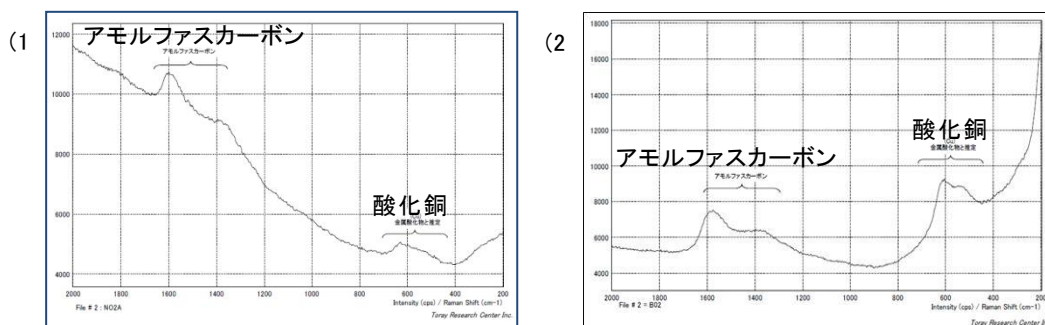
(c) ABI 装置の付着異物解析と低減方法の検討

マスクブランク検査において、検査中に付着異物を発生させないことは基本性能として望まれる事項である。そこで付着異物検査装置(M3350:レーザーテック社)を用いて MIRAI-tool の付着異物発生状況を調査したところ、EUV 光を照射せずに 100×25mm 領域の検査動作を行った際に 30 個の付着異物が発生したのに対し、EUV 光を照射した場合は 63 個と約 2 倍に増加した。更に観察・分析可能な大きさを持つ 22 点について SEM 観察と EDX 分析を行った結果、EUV 光を照射した場合は銅(Cu)を含む成分が検出された(図Ⅲ.2.1.1-2-14)。



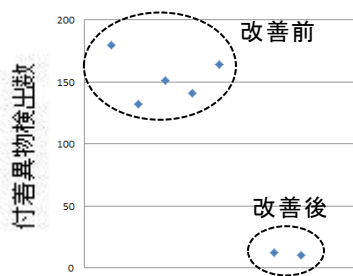
図Ⅲ.2.1.1-2-14 MIRAI-tool の付着異物の SEM 観察像と EDX 分析結果

EUV 光源の Bore と呼ばれるプラズマ絞りは銅で作成されており、この部分から付着異物が発生していると推定した。そこで EUV 光源の真下に配置し、照明光の単色化と圧力隔壁として用いている Zr フィルター上に堆積した異物と、EUV 光を照射した際のマスク上に発生する付着異物についてラマン分光分析を実施した。その結果、図Ⅲ.2.1.1-2-15 に示すように SEM 観察の際に発生したと思われるアモルファスカarbonの他に両者から酸化銅が検出され、付着異物は EUV 光源から発生していることを確認した。

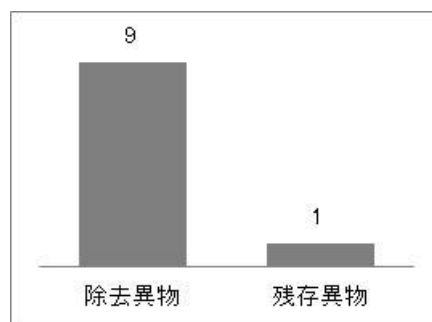


図Ⅲ.2.1.1-2-15 (1)Zr フィルター上と(2)マスク上に発生した付着異物のラマン分光分析結果

そこで EUV 光源点灯方法を改善(エラー発生時のリトライ間隔を最適化)し、マスクブランク検査時の付着異物発生状況を評価した。その結果、図Ⅲ.2.1.1-2-16 に示すように改善前に比べて付着異物が約 1/15 に低減していることを確認した。改善後に検査したマスクブランク上の付着異物 10 個について洗浄実験を行った。洗浄条件としては 2 流体ノズル(DIW+N₂)、スキャン速度 6mm/s を用いた。得られた結果を図Ⅲ.2.1.1-2-17 に示すように 10 個中 9 個は洗浄によって除去できることが分かった。更なる改善のためには上記以外の洗浄方法検討や、検査装置の付着抑制対策が必要である。



図Ⅲ.2.1.1-2-16 EUV 光源点灯方法改善前後における付着異物検出数



図Ⅲ.2.1.1-2-17 EUV 光源点灯方法改善後の付着異物の洗浄評価結果

(d) フィデュシアルマーク検討

極端紫外光リソグラフィ(Extreme Ultra-Violet Lithography: EUVL)において、欠陥の無い多層膜マスクブランクの製造は、最も難しい課題の一つである。多層膜欠陥は、多層膜蒸着中のゴミや基板上的欠陥によって発生し、位相欠陥とも呼ばれる。

もしも、ある程度の数の欠陥のある多層膜ブランクを受け入れることができれば、多層膜ブランクの歩留まりは劇的に改善可能である。吸収体で覆い隠すことで位相欠陥の影響を軽減することができ、ごく少数の欠陥のある多層膜ブランクであれば EUVL の半導体製造工程へ受け入れることができる。そのためには、吸収体に半導体回路パターンを形成する前に、位相欠陥検査装置で欠陥の位置を割り出しておく必要がある。欠陥の位置を精度・再現性良く割り出すために、また、マスク上のパターンの位置決めのため、多層膜ブランク上に位置の基準となるフィデュシアルマークが必要である。欠陥の位置精度の要求値は 10 nm (3 σ)以下とされている。

この報告では、EUV 光を用いた位相欠陥検査装置(Actinic Blank Inspection: ABI 装置)を用いて位相欠陥の影響を軽減する手法を確立するために、多層膜ブランク上のフィデュシアルマークの検討結果について報告する。フィデュシアルマークの最適な形成層は多層膜への彫り込みで、最適な幅は 3~5 μ m で、最適な深さは 100 nm 以上であった。

(i) 背景と目的

EUVL マスクにおいて、多層膜欠陥は、基板上の凹凸や多層膜蒸着中のゴミなどによって発生する。この多層膜欠陥は、EUV 光の位相の偏移も引き起こすので位相欠陥とも呼ばれる。この位相欠陥は多層膜の中に埋め込まれてしまっているため、取り除くことも補修することもできない。

理想的には、無欠陥多層膜マスクを製造することができれば良いのであるが、これは多層膜マスクの製造者にとって困難なことのひとつである。そして、位相欠陥を減らすことですら、基板材料、研磨、洗浄、基板の取り扱い方、多層膜蒸着方法を改善するために、高額な投資が必要となる。もしも、ある程度の数の欠陥のある多層膜ブランクを受け入れることができれば、多層膜ブランクの歩留まりを劇的に改善でき、高額な投資の必要性が無くなる。複数の研究者が、位相欠陥の影響を軽減するため、吸収体で覆い隠す方法^[1]や、吸収体パターンを修正する方法^[2]を提案している。どちらの方法でも、吸収体に半導体回路パターンを形成する前に、位相欠陥検査装置で欠陥の位置を割り出しておく必要がある。欠陥の位置を精度・再現性良く割り出すために、また、マスク上のパターンの位置決めのため、多層膜ブランク上に位置の基準となるフィデュシアルマークが必要である。電子線描画装置で吸収体にパターンを刻むときに、フィデュシアルマークを基準にしてパターンを移動させて、 3σ (99.7%) の信頼度で欠陥を覆うためには、欠陥の大きさや欠陥の位置精度 (6σ 相当値) の合計が、パターン幅よりも小さくなければならない。次世代 EUVL において、欠陥の位置精度の要求値は 10 nm (3σ) 以下とされている^[3]。EUV ABI 装置も電子線描画装置も、両方とも、位相欠陥の検出と、吸収体パターンによる位相欠陥の低減に必要不可欠であり、両者とも 10 nm (3σ) 以下の精度が必要である。

この精度は主に 3 つの要素から成り立っている。フィデュシアルマーク検出の位置精度、フィデュシアルマークと欠陥の間を移動するときのステージの移動精度、欠陥検出の位置精度である。10 nm (3σ) 以下の総合位置精度を達成するための第一段階として、今回はフィデュシアルマーク形状の検討を行った。

この報告では、ABI 装置を用いて位相欠陥の影響を軽減する手法を確立するために、多層膜ブランク上のフィデュシアルマークの検討結果について報告する。また、フィデュシアルマークの最適な形成層、最適な幅、最適な深さを提案する。

(ii) 収束イオンビームを用いたフィデュシアルマーク作製、及び、その構造の基礎評価

収束イオンビーム装置^[4]を用いて、多層膜蒸着前のクォーツ基板上と、多層膜表面上のそれぞれに、以下の形状のフィデュシアルマークを作成した。図 III.2.1.1-2-18 は作成されたフィデュシアルマークの画像である。

線幅: 1, 5, 9 μm
線の深さ: 20, 120, 220 nm

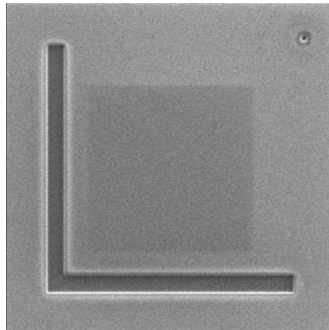


図 III.2.1.1-2-18 収束イオンビーム装置で多層膜表面上に作成されたフィデュシアルマーク画像。線幅は 1 μm 、深さは 220 nm である。

このフィデュシャルマークを MIRAI ABI 装置^[5, 6]で検査した結果が図 III.2.1.1-2-19 である。多層膜蒸着前のクォーツ基板の上に彫り込んだフィデュシャルマークでは信号が強すぎて飽和してしまっており、位置検出を行うのには不適である。また、多層膜表面上に彫り込まれたフィデュシャルマークでも、深さ 20 nm のものは十分な信号が得られていない。したがって、フィデュシャルマークの彫り込み層は多層膜表面上で、深さは 120 nm 程度以上が必要ながかった。

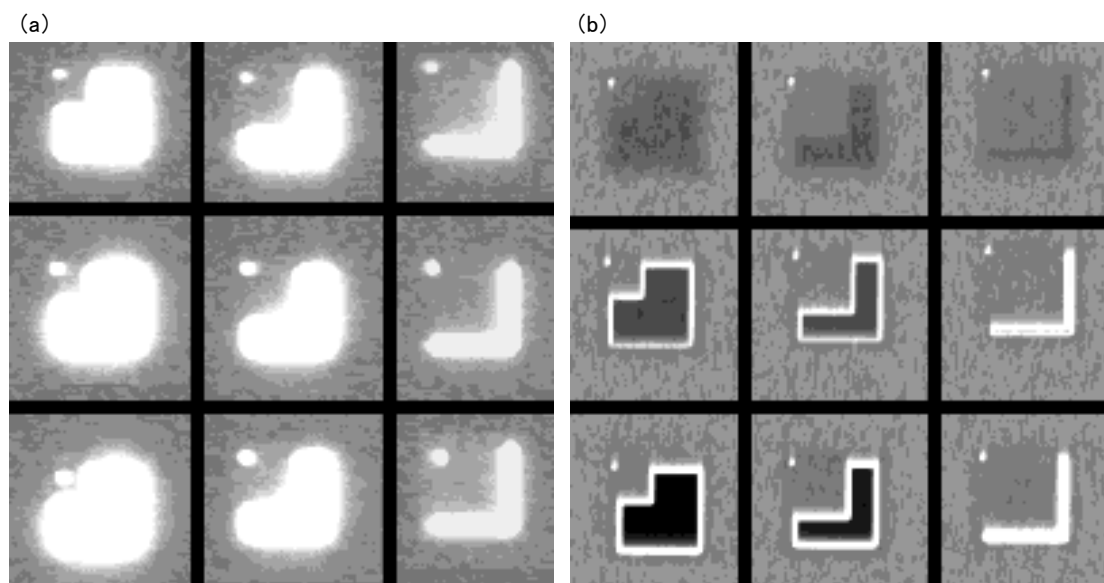


図 III.2.1.1-2-19 MIRAI ABI 装置で取得されたフィデュシャルマーク画像

(a) クォーツ基板の上に作成されたもの (b) 多層膜基板の上に作成されたもの それぞれ、線幅の目標値は左から 9, 5, 1 μm で、線の深さの目標値は上から 20, 120, 220 nm である

(iii) 電子線描画装置によるフィデュシャルマーク・マスク作製

電子線描画装置によるレジスト露光と、エッチングによって、以下のフィデュシャルマークの線幅、線の深さ、彫り込み層のマスクを作製した。

線幅:	1, 3, 5, 7 μm
線の深さ:	65, 130, 180, 215, 290, 300 nm
彫り込み層:	多層膜

図 III.2.1.1-2-20 は作成されたフィデュシャルマークの走査型電子顕微鏡画像である。

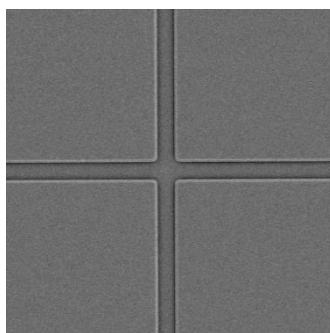


図 III.2.1.1-2-20 作製されたフィデュシャルマークの走査型電子顕微鏡画像

上記の線幅と深さのフィデュシャルマークを1つのマスク上に2組作成し、片方は吸収体で覆い、もう片方は吸収体を除去し、フィデュシャルマークが露出した状態とした。また、このマスクは2つ作成し、1つは85 nm膜厚の吸収体で覆い、もう1つは50 nm膜厚の吸収体で覆った。図 III.2.1.1-2-21 は作成されたマスクの断面の概略図である。これらのマスクを、MIRAI プロジェクトで作成された ABI 装置、原子間力顕微鏡、走査型電子顕微鏡、電子線描画装置で検査を行った。次章ではこれらの検査結果の中から重要な結果として、ABI 装置と原子間力顕微鏡の結果について触れる。

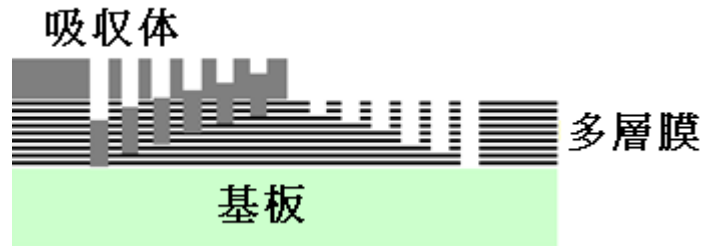


図 III.2.1.1-2-21 作製されたマスクの断面の概略図

(iv) 電子線描画装置で作成したフィデュシャルマーク検査結果

作成したフィデュシャルマークの側壁角を原子間力顕微鏡で測定した結果が図 III.2.1.1-2-22 である。65 nm の深さのフィデュシャルマークの側壁角は、吸収体蒸着前・蒸着後・除去後で変化が大きい。これは、フィデュシャルマークの位置自体の移動につながるため、100 nm 以上の彫り込みの深さが必要なことが分かった。

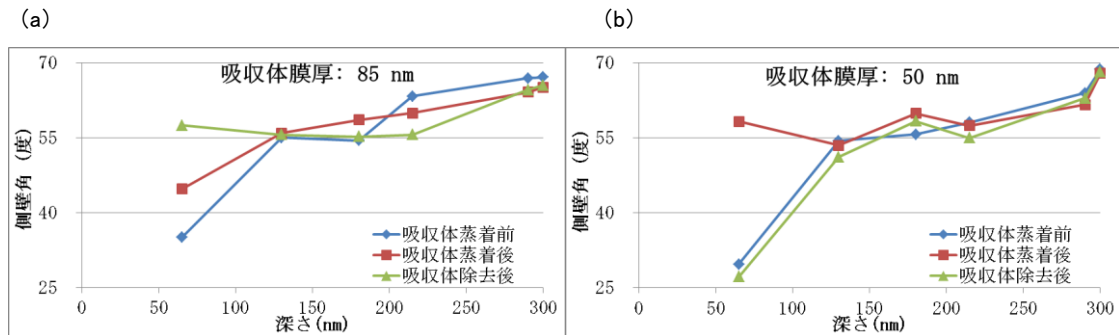


図 III.2.1.1-2-22 原子間力顕微鏡でのフィデュシャルマークの側壁角の測定結果
(a) 85 nm 膜厚の吸収体を蒸着した場合 (b) 50 nm 膜厚の吸収体を蒸着した場合

作成したフィデュシャルマークの画像を MIRAI ABI 装置で取得し、縦線・横線の中心位置を求め、その標準偏差から MIRAI ABI 装置でフィデュシャルマークを観察した場合の位置精度を求めた。その結果は表 III.2.1.1-2-23 と図 III.2.1.1-2-24 である。

より深く、また、より幅が広いフィデュシャルマークの方が概して精度が良いという結果である。このフィデュシャルマークの位置精度に加えて、ステージの位置精度と、欠陥検出の位置精度が、欠陥の総合位置精度に含まれる。要求されている欠陥の総合位置精度は 10 nm (3σ) 以下であるので、この結果は要求を満たせていない。この原因は、MIRAI ABI 装置の解像力が、Mask 上で 500 nm であるからと考えられる。

上記の結果から、フィデュシャルマークの位置精度としては、線幅が 3-5 μm で、かつ、深さが 100 nm 以上のマークであれば、40nm (3σ) が達成可能と思われる。10nm (3σ) 以下の欠陥の総合

位置精度を達成するためには、3つの誤差要素が等価で、誤差の伝搬の法則に従うのであれば、フィデュシャルマークの位置精度への割当分は5.7 nm以下でなければならない。もしも、フィデュシャルマークの位置精度が単純にABI装置の解像力のみ依存するのであれば、上記の結果から、72 nmの解像力があれば良い。これはMIRAI ABI装置の光学系に対して、7倍の拡大に相当する。

表 III.2.1.1-2-23 MIRAI ABI 装置でフィデュシャルマークを観察した場合の位置精度

幅 (μm)	方向	深さ (nm)					
		65	130	180	215	290	300
1	X	147.08	35.49	154.36	43.11	29.95	35.42
1	Y	196.81	24.65	253.16	25.60	16.73	39.19
3	X	25.64	39.10	25.29	70.23	17.25	32.37
3	Y	32.49	28.59	29.00	65.66	21.16	12.00
5	X	21.51	34.08	23.08	18.93	20.05	33.41
5	Y	45.94	34.44	20.76	24.41	23.97	38.19
7	X	25.47	43.22	22.40	19.60	66.64	32.77
7	Y	28.71	57.28	32.49	26.46	146.44	34.08

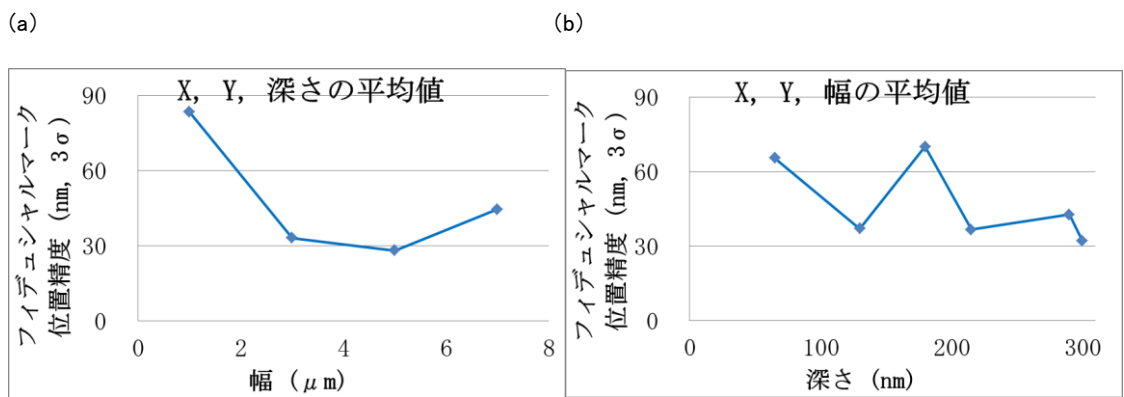


図 III.2.1.1-2-24 (a) 線幅と (b) 線の深さによるフィデュシャルマークの位置精度依存性

7倍の拡大後でもMIRAI ABI装置で得られる信号強度と同等にするためには、観察時間は49倍以上必要である。光源の明るさと光学系の透過率はMIRAI ABI装置と同等であると仮定すると、7倍の倍率では観察時間は7秒間以上必要である。マスクブランクの全面検査時間に数十分かかることを考えると、この程度の時間は許容範囲内である。

(v) 結論

MIRAI ABI装置を用いて位相欠陥の影響を軽減する手法を確立するために、フィデュシャルマークの検討を行った。フィデュシャルマークの最適な形成層は多層膜への彫り込みで、最適な幅は3~5 μmで、最適な深さは100 nm以上であった。この最適値はSEMIによるフィデュシャルマークのスペック文書に反映される予定である。

また、10 nm (3σ)以下の欠陥の総合位置精度を達成するためには、ABI装置は拡大光学系を備える必要がある。拡大光学系の解像度としては72 nm以下の解像度が必要である。レーザーテ

ックが開発中の ABI 装置^[7]の拡大光学系の解像度は 30 nm 以下なので、上記の要件を満たしている。上記のフィデューシャルマークの最適値は MIRAI ABI での結果なので、LT ABI の拡大光学系の完成後は、拡大光学系向けのフィデューシャルマークの最適化が必要である。

【参考文献】

- [1] P. Y. Yan and C. Wagner, “EUVL ML blank fiducial mark generation via laser heating,” SPIE Vol. 5374, 254-260, 2004.
- [2] A. K. Ray-Chaudhuri, G. Cardinale, A. Fisher, P. Y. Yan, and D. W. Sweeney, “Method for compensation of extreme-ultraviolet multilayer defects”, J. of Vac. Science & Tech B(17), 3024-3028, (1999).
- [3] P. Y. Yan, Y. Liu, M. Kamna, G. Zhang, R. Chen, and F. Martinez, “EUVL multilayer mask blank defect mitigation for defect-free EUVL mask fabrication”, Proc. SPIE Vol. 8322, 83220Z (2012).
- [4] F. Aramaki, T. Kozakai, Y. Sugiyama, M. Muramatsu, Y. Koyama, O. Matsuda, K. Suzuki, M. Okabe, R. Hagiwara, A. Yasaka, T. Adachi, Y. Tanaka, O. Suga, N. Nishida, and Y. Usui, “Advanced Photomask Repair Technology for 65nm Lithography (5)”, SPIE Vol.6283, 628310 (2006)
- [5] T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, T. Iwasaki, O. Suga, and T. Tomie, “Actinic Mask Blank Inspection and Signal Analysis for Detecting Phase Defects Down to 1.5 nm in Height”, Jpn. J. Appl. Phys., Vol. 48, 06FA04-1, (2009)
- [6] T. Terasawa, T. Yamane, T. Tanaka, T. Iwasaki, O. Suga, and T. Tomie, “Development of actinic full-field EUV mask blank inspection tool at MIRAI-Selete”, Proc. SPIE 7271, 727122-1, (2009)
- [7] H. Miyai, T. Suzuki, K. Takehisa, H. Kusunose, T. Yamane, T. Terasawa, H. Watanabe, S. Inoue, and I. Mori, “EUV Actinic Blank Inspection Tool Development”, International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography, Miami, (2011)

(e) カーボン堆積物を使用したプログラム振幅欠陥の ABI 信号強度の挙動確認

(i) 検討の目的

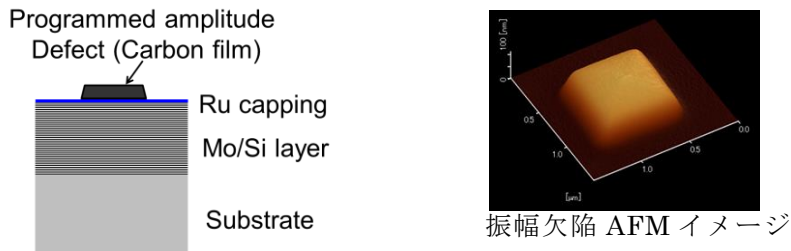
測定サンプル上にパーティクル等の振幅欠陥が存在した場合、ABI 検査時に振幅欠陥に照射した検査光が、振幅欠陥部で散乱、反射し、検査光学系に捕捉されることが推定される。本評価では、カーボン堆積膜を振幅欠陥のサンプルに使用し、堆積膜の厚さ、サイズを変更した場合に ABI 信号強度がどのように変化するかを確認し、ABI 検査の振幅欠陥に対する知見を増すことを目的とする。

(ii) 研究内容および成果

以下に評価に使用したプログラム振幅欠陥サンプルの説明および ABI 装置検査により得られた結果について示す。

図 III.2.1.1-2-25 に、評価の使用した振幅欠陥サンプルについてを示した。上記プログラム振幅欠陥サンプルを ABI 装置で検査を行い、得られた信号の積算信号強度(4 ピクセル分(2×2 ピクセル))を計算した。図 III.2.1.1-2-26 に、積算信号強度を欠陥サイズ毎に分けて示した。振幅欠陥膜厚と積算信号強度の関係では、膜厚が増加するほど信号強度は大きくなる傾向であり、その傾向は評価を行った欠陥サイズの範囲内でおおよそ同様であった。欠陥サイズと信号強度の関係では、膜厚程顕著な影響ではないが、欠陥サイズが大きいほど、信号強度が増加する傾向であった。本評価を模したシミュレーションの結果では、光の散乱は主に振幅欠陥の輪郭部で生じており、膜厚

増加、サイズ増加に伴い信号強度が増加するという基本的な傾向は評価結果と同様であった。これらの結果よりひとつの仮定として、振幅欠陥が多層膜に存在した場合、暗視野光学系では振幅欠陥の輪郭部で強い散乱光を生じ、その強度は、欠陥厚さにより変動するということが考えられる。つまり、欠陥の厚さが厚い場合には欠陥部では多層膜からの反射光が強く吸収されるため、無欠陥部からの反射光との差が大きくなり、結果として、その境界である欠陥輪郭部で強い散乱光を生じている可能性が考えられる。これらの評価結果および仮定より、振幅欠陥の EUV 光吸収量が ABI 信号強度に影響する重要な要素である可能性が考えられる。



多層膜基板 : Qz/多層膜(Mo/Si)/Ru キャッピング
EB 照射条件 : 加速電圧(3.0keV)
供給ガス : フェナントレン
振幅欠陥サイズ : 150nm~1000nm、振幅欠陥厚さ : 10nm~100nm

図 III.2.1.1-2-25 プログラム振幅欠陥サンプル

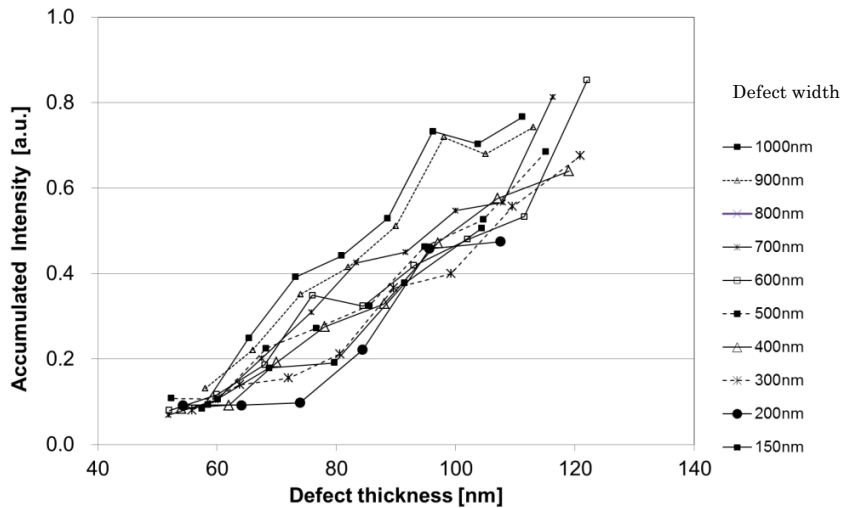


図 III.2.1.1-2-26 積算信号強度

(iii) まとめ

本評価の結果より、振幅欠陥が多層膜上に存在した場合の ABI 信号強度に及ぼす影響について、振幅欠陥膜厚、サイズが変動した場合の挙動について知見を得ることができた。この結果より、振幅欠陥の EUV 光吸収の状況により ABI 信号強度に影響される可能性があることが示唆された。

(f) NA 拡大による感度向上の検討

(i) 自然欠陥の検出感度評価

ABI 装置 HVM プロトタイプ(以下 ABI 装置)の検出感度の目標値は、16nm 世代に転写インパクトのある位相欠陥(高さ 1.0nm、幅 50nm)を検出することである。欠陥を意図的に作りこんだプログラム欠陥では高さ 1nm 幅 36nm の欠陥を 100%検出することは実証済みであるため、ここでは実ブランク上に存在する自然欠陥を用いて検出感度の評価を実施した。複数のマスクブランクを ABI 装置にて検査を行い、3 回検査で 100%検出した欠陥あるいは同等の欠陥信号強度(DSI: Defect signal intensity)を持つ欠陥を抽出した。抽出された欠陥の形状を SII-NT 製 AFM(Atomic Force Microscope) L-Trace2 にて観察し、欠陥の高さもしくは深さと幅を計測した。幅は縦と横の半値幅の平均として求めた。得られた欠陥寸法を用い、ABI 装置で検出した欠陥の寸法毎の検出密度を求めた。得られた図を図 III.2.1.1-2-27 に示す。

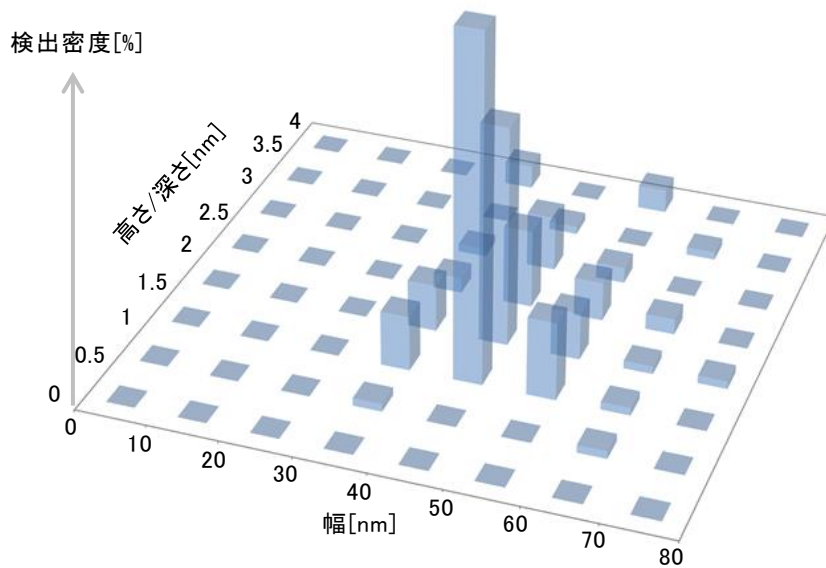


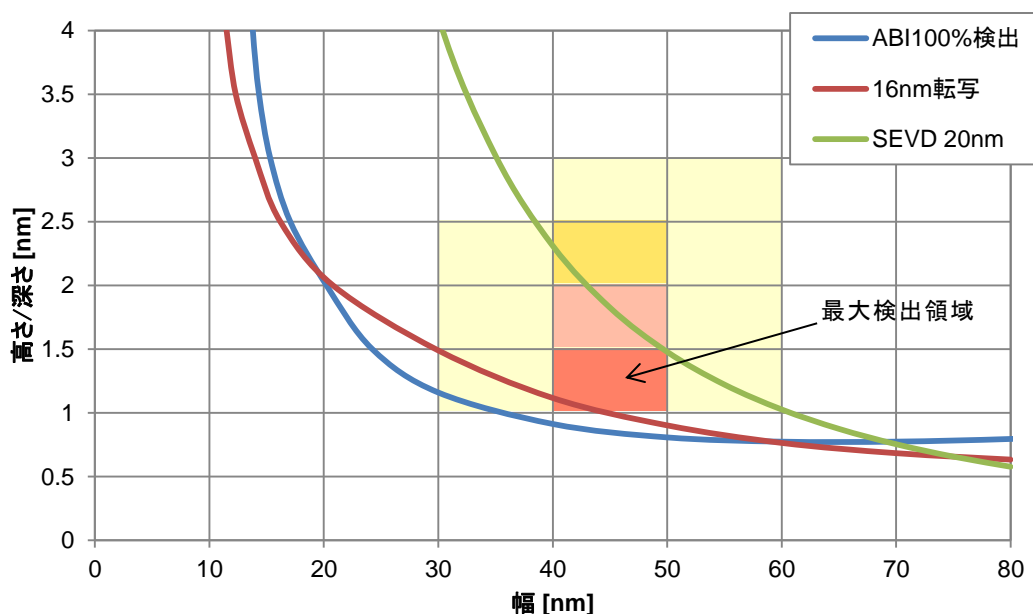
図 III.2.1.1-2-27 自然欠陥の寸法と検出密度

検出密度とは、ある寸法範囲における検出数の全検出数に対する比率を示している。従って、[図 III.2.1.1-2-27](#) で最も検出密度の高い寸法範囲は、高さ/深さ 1~1.5nm、幅 40~50nm であり、25%を示していた。また、高さ/深さ 1~2.5nm、幅 30~60nm の範囲には全体の 67%にあたる欠陥が検出されたことを示している。次にシミュレーション(Luminescent 製 DPS)を用いて、ABI 装置で 100%検出できる高さ 1nm 幅 36nm と同じ欠陥信号強度を持つ欠陥寸法と、16nmL/S パターンに転写インパクトのある欠陥の寸法を計算した。得られた結果を[図 III.2.1.1-2-28](#) に示す。ABI 装置で 100%検出する欠陥寸法は 16nm 世代に転写インパクトのある欠陥寸法を網羅しており、ABI 装置は 16nm 世代に転写インパクトのある欠陥をほぼ 100%の確率で検出できることが分かった。緑色の曲線は SEVD(Sphere Equivalent Volume Diameter: 等価球径)20nm を示している。なお SEVD は、欠陥高さ H と幅 W を用いて以下の定義によって算出している。

$$SEVD = \sqrt[3]{\frac{3HW^2}{2\ln 2}}$$

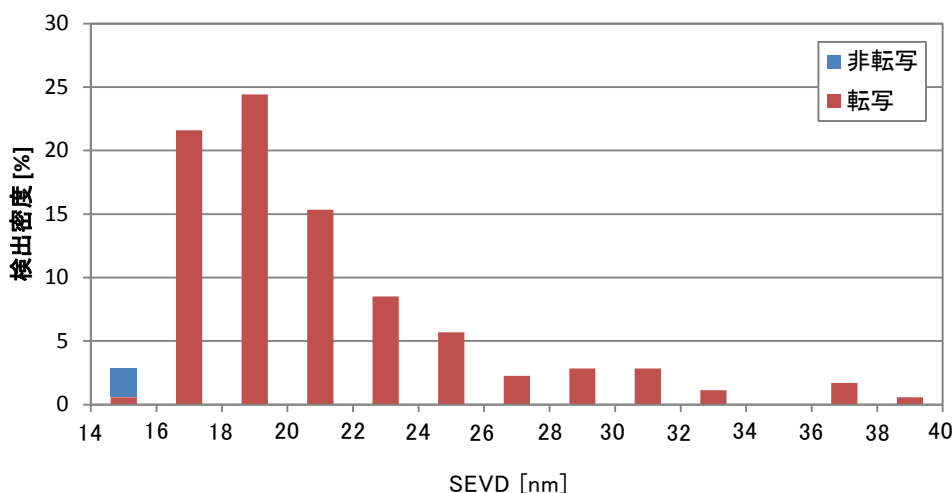
また[図 III.2.1.1-2-27](#) で得られた検出密度を[図 III.2.1.1-2-28](#) に黄(低)→赤(高)の着色で示した。赤色着色部は最も多く検出した欠陥寸法を示しているが、その SEVD が 20nm 以下であることが分かる。[図 III.2.1.1-2-29](#) は SEVD と検出密度の関係を示しているが、転写インパクトのない欠陥の SEVD は 16nm 以下であること、SEVD が 16~18nm であり転写インパクトのある欠陥が ABI

装置で最も多く検出していること、転写インパクトのある欠陥の 46%は SEVD が 20nm 以下であることが分かった。従って転写インパクトのある微小な自然欠陥は多数実在し、それらは ABI 装置で十分に検出できることを実証した。



図Ⅲ.2.1.1-2-28 ABI100%欠陥と16nm 転写欠陥の寸法

次に同じマスクブランクを光学式検査装置にて検査を行い、ABI 装置で検出しなかった欠陥について解析を行った。AFM 観察像、DUV 顕微鏡観察像、SEM 観察像、EDX 分析などを用いて位相欠陥もしくは振幅欠陥に分類した。このうち位相欠陥の AFM 像を用いて欠陥寸法を求め、シミュレーションを用いて 16nm 世代への転写インパクトを確認した。その結果、ABI 未検出で転写インパクトのある位相欠陥が存在し、その割合は全検出数の 1%以下であること、それらの欠陥は幅に対する高さ/深さの比で表されるアスペクト比が 0.01 以下であることが分かった。

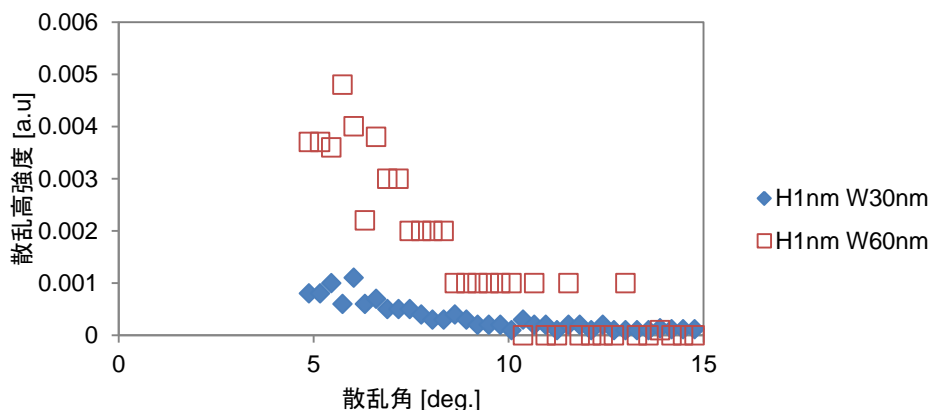


図Ⅲ.2.1.1-2-29 ABI 検出欠陥の SEVD と検出密度

(ii) 低アスペクト欠陥検出感度向上の検討

そこでアスペクト比が 0.01 以下であり転写インパクトのある位相欠陥を検出する方法について検

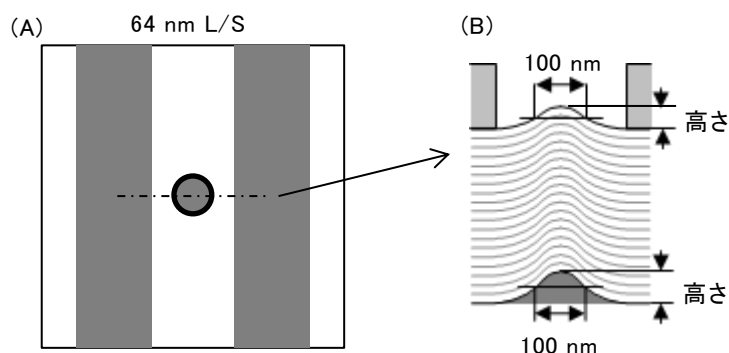
討を行った。兵庫県立大学で開発した μ CSM(Coherent EUV Scatterometry Microscope)を用いて、アスペクト比の異なる2つの位相欠陥(高さ1nm幅30nm、高さ1nm幅60nm)から発生する散乱光の強度を測定し、その結果を図III.2.1.1-2-30に示す。



図III.2.1.1-2-30 アスペクト比の異なる2つの欠陥から発生する散乱光強度

幅60nmの欠陥は幅30nmの欠陥に比べて低い散乱角側の強度が大きいことが分かる。ABI装置ではNA0.1~0.27に相当する5.74~15.7degの範囲に広がる散乱光を捕集して暗視野像を取得しているため、NA0.1に相当する5.74deg以下の散乱光を捕集することが低いアスペクト比の位相欠陥を検出するために必要であることを示唆している。

位相欠陥の特性として、転写像のフォーカス特性が非対称であること、転写像にて位相欠陥に相当する領域の反射率が低下することが挙げられる。これらの特性がアスペクト比によってどのように変化するかをシミュレーションを用いて解析した。図III.2.1.1-2-31(A)に示すように、高さ/深さの異なる幅100nmのバンプまたはピット欠陥がマスク上64nmL/Sパターンのスペース中央にあると仮定した。このバンプまたはピット欠陥は図III.2.1.1-2-31(B)に示すように、基板上と多層膜上の高さや幅が同じであるコンフォーマル構造であると想定した。



図III.2.1.1-2-31 シミュレーションに用いたマスクパターンと欠陥
(A)上から見た図、(B)断面図

シミュレータDPSを用い、4倍体、NA0.33、 σ 0.8-0.4、90degダイポール照明の条件にて転写像を計算した。得られた転写像を用いて、転写されたスペースパターンのターゲット寸法(16nm)に対して最も乖離の大きい部分の寸法変動(以下、ウェハ寸法変動)を求めた。その結果を図

III.2.1.1-2-32 に示す。アスペクト比が 0.015(高さ/深さ 1.5nm、幅 100nm)の場合、デフォーカス量に対してウェハ寸法変動が非対称に変化していること、バンプ欠陥とピット欠陥でその傾向が反転していることなど、位相欠陥の典型的な特性を示していることが分かる。対してアスペクト比 0.01 以下の場合、フォーカス特性が対称に近づいており、位相欠陥特有の性質が失われていることが分かった。

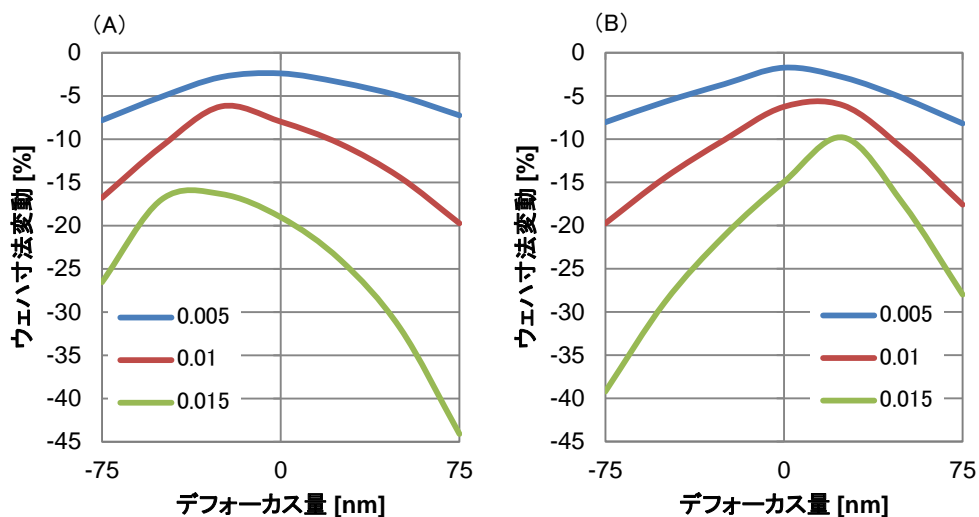


図 III.2.1.1-2-32 (A)バンプ欠陥と(B)ピット欠陥のアスペクト比と転写寸法フォーカス特性

次に幅が 100~200nm で高さ/深さの異なるバンプもしくはピット欠陥がマスクブランク上にあるとし、ジャストフォーカス位置における転写像をシミュレータ DPS にて計算した。上記と同様にコンフォーマル構造の欠陥を想定して、計算条件は 4 倍体、NA0.33、 σ 0.8-0.4、90deg ダイポール照明とし、欠陥による光量損失を求めた。光量損失は欠陥のない領域に対する反射率の低下を百分率で示した。図 III.2.1.1-2-33 に得られた結果を示す。

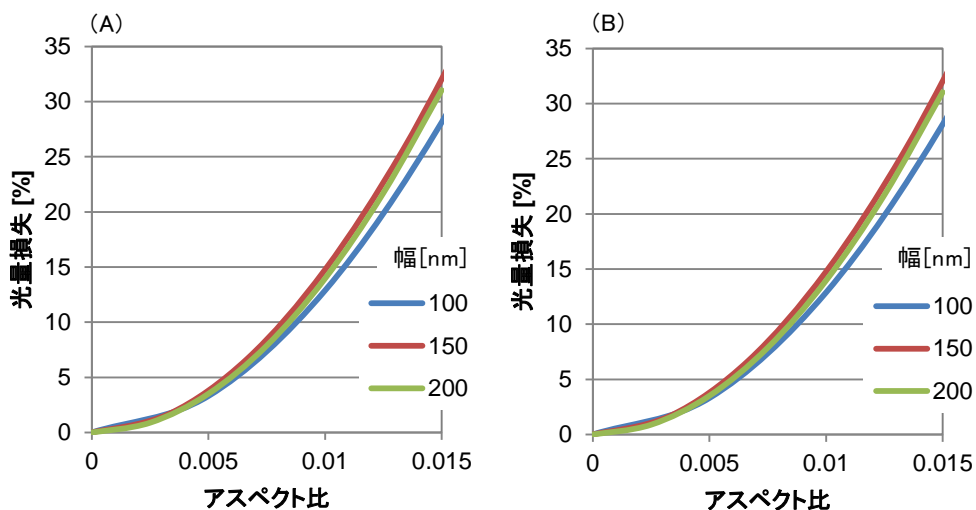


図 III.2.1.1-2-33 (A)バンプ欠陥と(B)ピット欠陥のアスペクト比と光量損失

光量損失はアスペクト比に依存し、欠陥幅には殆ど影響しないことが分かった。16nm 世代に転写インパクトがあるとされる高さ 1nm 幅 50nm 欠陥の光量損失は 26.7%である。アスペクト比 0.01 の光量損失は 13~15%であり、転写インパクトのある位相欠陥に比べて光量損失が少なく、位相欠陥特有の性質が失われていることが分かった。従ってアスペクト比が 0.01 以下の位相欠陥では、

フォーカス特性や光量損失などの特性が失われ、凸面鏡や凹面鏡としてみなすことができると思われる。

そこで、アスペクト比 0.01 のピット欠陥を円錐状の凹面鏡とみなし、入射光と散乱光の角度について幾何学的な解析を行った。図 III.2.1.1-2-34 に示すように凹面鏡の斜面の角度を θ とし、入射光の角度を ϕ とすると、散乱光の角度は $(\phi + 2\theta)$ になる。

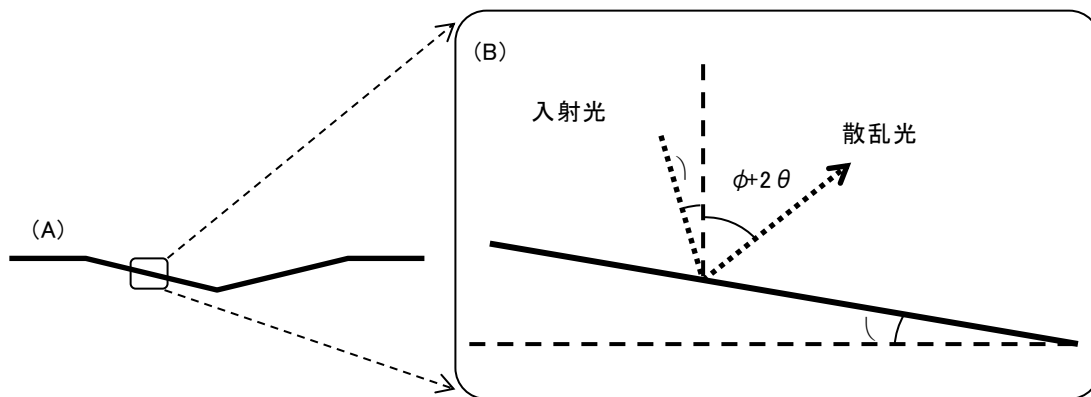
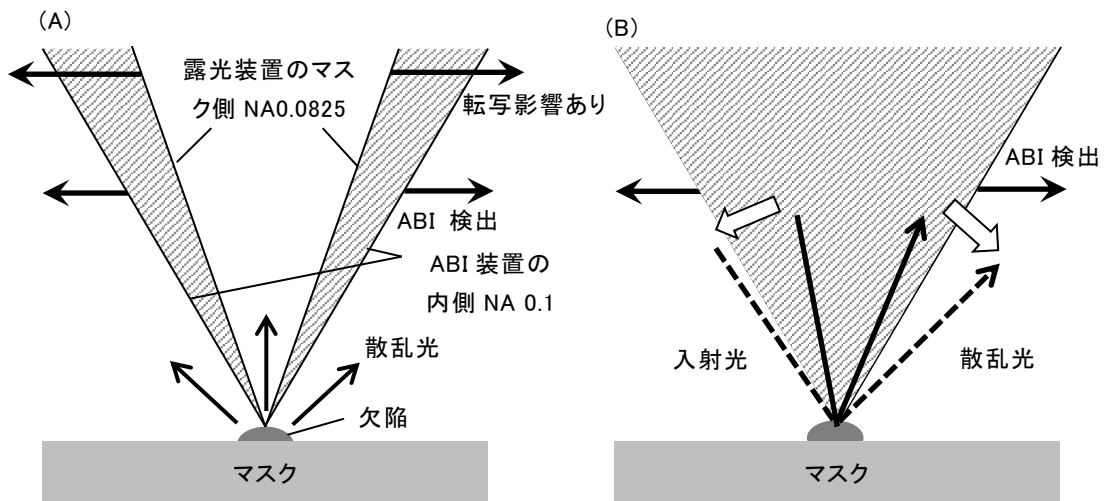


図 III.2.1.1-2-34 (A)円錐状の凹面鏡に対する(B)入射光と散乱光の角度

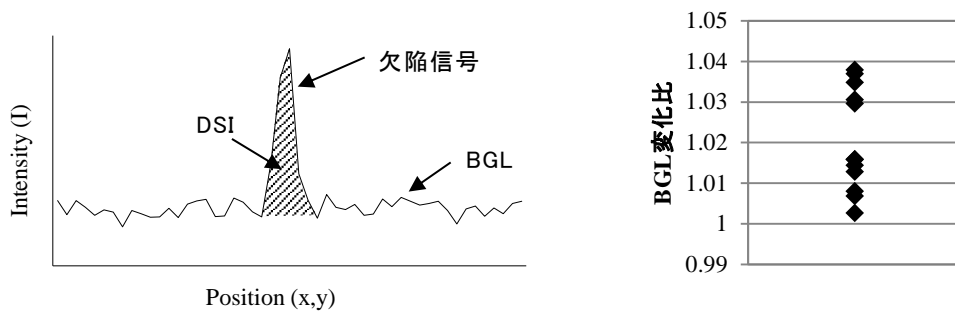
マスク上に欠陥があり、その欠陥からの散乱光が露光装置の NA の外側に進む場合、局所的な光量損失が発生し、転写パターンに影響すると思われる。ここで図 III.2.1.1-2-35(A)に示すように、露光装置のマスク側 NA が 0.0825、照明 σ が 0.8-0.4 の場合、入射角 ϕ は最大で 3.78deg である。円錐状の凹面鏡とみなした欠陥のアスペクト比が 0.01 の場合、 θ は $\text{Tan}^{-1}(0.01)$ により 0.57deg と求められ、 $(\phi + 2\theta)$ で表される散乱角は最大で 4.93deg である。露光装置のマスク側 NA に相当する散乱角 4.73deg より大きいため、アスペクト比 0.01 の欠陥からの散乱光は NA の外側に進み転写インパクトがあると予想される。一方 ABI 装置では照明 NA は 0.07 であり、入射角 ϕ は最大で 4deg、アスペクト比 0.01 の欠陥からの散乱光 $(\phi + 2\theta)$ は最大で 5.14deg である。結像系の内側 NA は 0.1 であり、その内側 NA に相当する角度 5.74deg 以上の散乱光を捕集して結像するため、アスペクト比 0.01 の欠陥は ABI 装置によって検出されないと予想される。図 III.2.1.1-2-35(B)に示すように、ABI 装置の照明 NA を 0.1 に拡大した場合、アスペクト比 0.01 の欠陥からの散乱光 $(\phi + 2\theta)$ は最大で 6.88deg になり、ABI 装置で検出できると予想される。

ABI 装置で取得する欠陥信号強度プロファイルを図 III.2.1.1-2-36 に示す。バックグラウンドレベル(BGL)上にあるピーク信号を欠陥として検出し、ピーク部分の体積を DSI として定義している。一方、BGL の変動はノイズ成分になり、ABI 装置の照明 NA を拡大した場合は BGL が大きくなりノイズ成分も大きくなるため、欠陥検出感度の低下が懸念される。このため照明 NA を拡大した場合に BGL がどの程度変化するかをシミュレーション DPS を用いて評価した。12 枚のマスクブランクの AFM 像から ABI 像を計算して BGL を求め、照明 NA を 0.07 から 0.1 に拡大した場合の BGL の変化比を算出した。得られた結果を図 III.2.1.1-2-37 に示すように、照明 NA 拡大によって BGL は約 2%しか変化しないことが分かった。従って照明 NA 拡大によるノイズ成分の増加は殆どないことを確認した。

次にシミュレーション DPS を用いて照明 NA の拡大によって DSI がどれくらい変化するかを評価した。結果を図 III.2.1.1-2-38 に示す。アスペクト比が 0.01 以下で 16nm 世代に転写インパクトのある欠陥は、照明 NA0.07 の ABI 装置では 100%検出できないが、照明 NA を 0.1 に拡大すればそれらの欠陥を検出できるようになることが分かった。

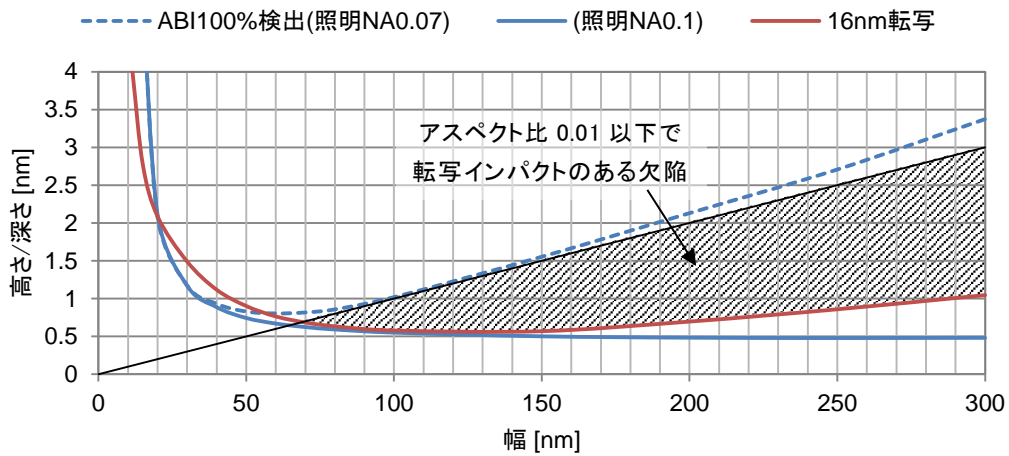


図Ⅲ.2.1.1-2-35 (A) 転写インパクトのある散乱光とABI検出する散乱光の角度
(B)ABI装置の照明NAを拡大した場合の散乱光



図Ⅲ.2.1.1-2-36 欠陥信号プロフィール

図Ⅲ.2.1.1-2-37 照明NA拡大によるBGL変化比



図Ⅲ.2.1.1-2-38 欠陥信号プロフィール

(iii) 照明 NA 拡大の効果検証

上記の結果に基づいて ABI 装置の照明 NA を 0.07 から 0.1 に拡大する改造を行った。改造後、改造前に検出できなかった位相欠陥のうち最も DSI が小さかったものについて DSI と BGL を測定し、改造前の値と比較した。その結果を図 III.2.1.1-2-39 に示す。照明 NA 拡大により DSI は 2.65 倍に向上し、BGL は約 2% 増加したことが分かり、ABI 装置で十分に検出できるようになったことを確認した。

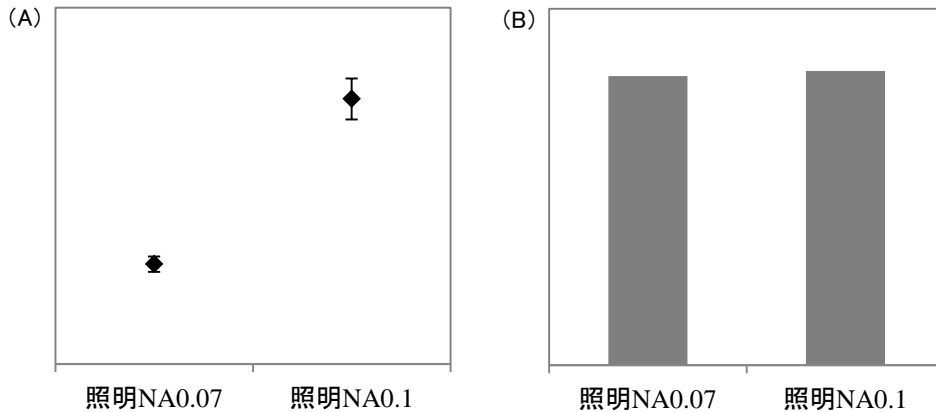


図 III.2.1.1-2-39 (A)照明 NA 拡大による DSI 変化、(B)BGL 変化

更に、低アスペクト以外の位相欠陥 5 個と、振幅欠陥 5 個を用いて、照明 NA 拡大による DSI の変化について評価した。その結果を図 III.2.1.1-2-40 に示す。NA 拡大により、位相欠陥 No.2 と振幅欠陥 No.1 では明らかに DSI が増加し、他はばらつきの範囲であると思われる。従って、NA 拡大によって低アスペクト欠陥以外の欠陥の検出感度低下はみられないことを確認できた。

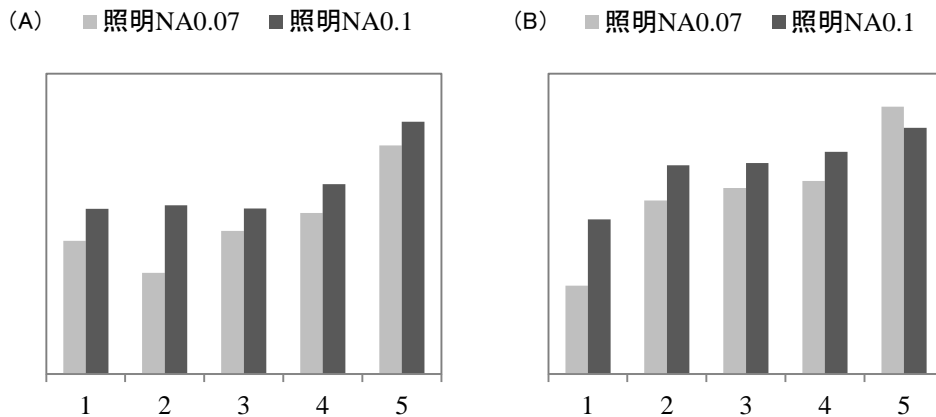


図 III.2.1.1-2-40 (A)SEVD18~29nm の位相欠陥、(B)SEVD64~124nm の振幅欠陥における NA 拡大による DSI 変化

(iv) まとめ

実マスクブランク上にある自然欠陥を用いて ABI 装置の検出感度を評価した。その結果、16nm 世代に転写インパクトのある位相欠陥はほぼ検出できることを確認した。一方、アスペクト比が 0.01 以下で転写インパクトのある位相欠陥は 1% 以下しか存在しないものの、ABI 装置で検出できないことが分かった。 μ CSM や幾何光学モデルを用いた解析の結果、照明 NA を拡大することでこれら

の欠陥が検出できることを確認した。そこで ABI 装置の照明 NA を 0.07 から 0.1 に拡大した結果、検出できなかった位相欠陥を検出できるようになり、他の位相欠陥や振幅欠陥の検出感度にも影響がないことを確認した。

(g) 欠陥構造と ABI 信号の相関解析

(i) 背景と目的

位相欠陥の検出信号強度解析や欠陥検出確率評価を実施するには、プログラム欠陥マスクを用いることが有効である。その理由は評価目的に合わせ、位相欠陥のサイズ、座標および個数を自由に設計(プログラム)することが可能なためである。しかしプログラム欠陥マスク上に形成した複数の同一サイズに設計した欠陥であっても、欠陥サイズバラツキがあった場合、欠陥検出信号強度解析や欠陥検出確率評価を正確に実施できない恐れがある。そこで本研究では、同一サイズに設計した欠陥のサイズバラツキの測定と、サイズバラツキが ABI 信号強度に与える影響を解析した。

(ii) 研究内容および成果

評価に使用したプログラム位相欠陥マスクの構造は、位相欠陥の元となるいわゆるタネ欠陥をガラス上に形成し、その上に多層膜を形成したものである。欠陥のサイズは幅 30, 40, 50, 60 および 70 nm のピット型位相欠陥であり、同一サイズの欠陥を図 III.2.1.1-2-41 に示す通り 10 個配置した。

欠陥サイズの測定は多層膜前後に Scanning probe microscope (SPM、型番: L-Trace II) を用いて実施した。欠陥サイズの測定に先立ち、SPM 測定条件を設定するため、表 III.2.1.1-2-42 に示す画像取得条件で測定再現性評価を行った。測定再現性評価は 50 nm サイズの欠陥を用い、撮像エリア 600 x 600 nm にて各測定 ID で 10 回撮像を実施した。ここで、SPM の繰り返し撮像による探針摩耗および試料ダメージによる測定エラーの無いことを確認するため、測定 ID 5 は ID 1 と同一条件にて撮像した。

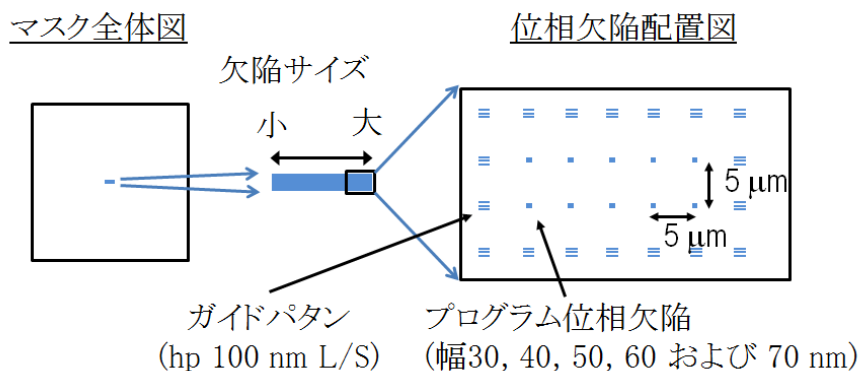
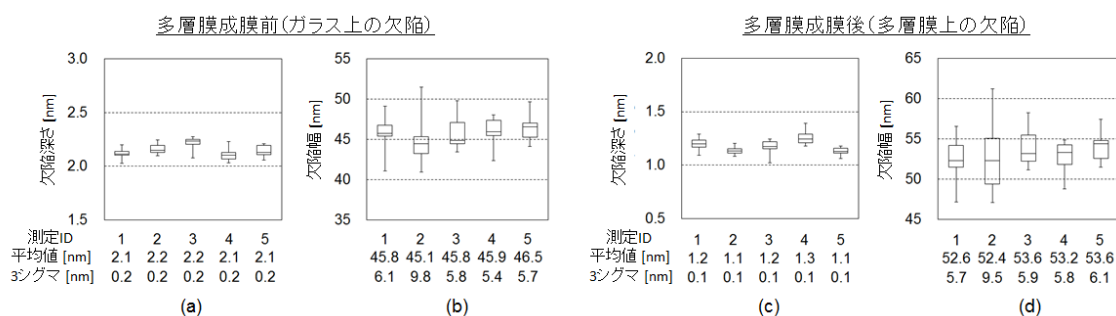


図 III.2.1.1-2-41 プログラム欠陥マスクの全体図とプログラム欠陥の配置

測定 ID		1	2	3	4	5
画像ピクセル数	X	512	512	512	1024	512
	Y	256	128	512	1024	256
ピクセルサイズ [nm/ pixel]	X	1.17	1.17	1.17	0.59	1.17
	Y	2.34	4.68	1.17	0.59	2.34

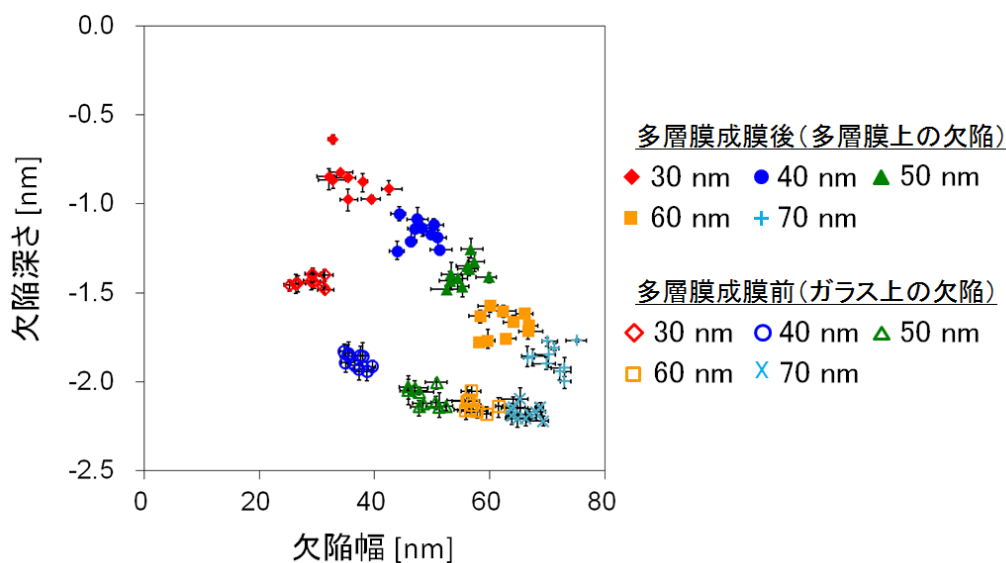
表 III.2.1.1-2-42 SPM 像の画像ピクセル数とピクセルサイズ

図III.2.1.1-2-43は、撮像した各SPM像から欠陥の深さと幅(半値全幅)を算出した結果を箱ひげ図にまとめたものである。画像ピクセル数 Y はスキャンライン本数を表し、値が大きいほど探針と試料の接触回数が増え、探針または試料のダメージ発生の恐れが大きくなる。そのため画像ピクセル数 Y の値は小さい方が良い。(画像ピクセル数 X の大小は探針または試料のダメージ発生の程度に影響しない。なぜなら、探針は常時試料と接触を繰り返しており、画像ピクセル数 X はデータ保存数を表すだけであるため。)ここで測定結果を比較すると、測定 ID 2(ピクセルサイズが最も大きい)は他の測定 ID と比較し、ガラス上、多層膜上共に、欠陥幅の測定再現性が悪い結果となり、本評価で対象とする欠陥のサイズを測定するにはピクセルサイズが大きすぎることが示された。一方、その他の測定 ID では測定サイズおよびバラツキの差は無視できるほど小さい結果となった。そこで本実験ではSPMを用いた欠陥サイズ測定は測定 ID 1 の条件にて実施することとした。測定 ID 1 と ID 5 の測定結果に有意差無く、測定再現性評価の途中で探針または試料に、測定結果に影響を与えるようなダメージの無いことも確認された。



図III.2.1.1-2-43 欠陥深さおよび幅の測定結果まとめ (a)および(b):ガラス上に形成した欠陥の深さおよび幅の測定結果 (c)および(d):多層膜上に形成した欠陥の深さおよび幅の測定結果

上記の通り決定した測定条件にて、図III.2.1.1-2-41に示した欠陥のサイズ測定を、1つの位相欠陥につき5回実施しグラフにまとめた(図III.2.1.1-2-44)。ここでガラス上に形成した欠陥サイズは、設計サイズ50nm以下では欠陥幅が小さくなるにつれて深さが浅くなる傾向にある。これはガラスのエッチング工程に起因するものである。



図III.2.1.1-2-44 SPMで測定した多層膜成膜前後の欠陥サイズ

30 nm および 40 nm サイズの欠陥を用いて、欠陥サイズのバラツキ量を詳しく検証した。図 III.2.1.1-2-45 は両サイズの欠陥を抽出し拡大表示したものである。30 nm サイズの欠陥では、10 個の欠陥の深さバラツキ量は多層膜成膜前後で 0.1 nm から 0.3 nm (3 シグマ) に増大した。個々の欠陥で比較すると、30 nm サイズの欠陥では、欠陥 A (深さ 1.4 nm、幅 29.2 nm) と欠陥 B (深さ 1.4 nm、幅 31.3 nm) はガラス上でほぼ同一の欠陥サイズであるが、多層膜成膜後には欠陥 A' (深さ 0.9 nm、幅 32.1 nm) と欠陥 B' (深さ 0.6 nm、幅 32.7 nm) となり両者の深さに明確な差が発生した。同じく 40 nm サイズの欠陥でも、欠陥 C (深さ 1.8 nm、幅 35.4 nm) と欠陥 D (深さ 1.8 nm、幅 35.4 nm) はガラス上では同一の欠陥サイズであるが、多層膜成膜後の欠陥 C' (深さ 1.3 nm、幅 43.9 nm) と欠陥 D' (深さ 1.1 nm、幅 47.4 nm) には欠陥深さに顕著な差が観られた。これらの結果は、多層膜成膜工程により欠陥サイズにバラツキが発生することを示すとともに、多層膜上の欠陥サイズを測定してもガラス上の欠陥サイズを正確に予測することが困難であることも意味する。

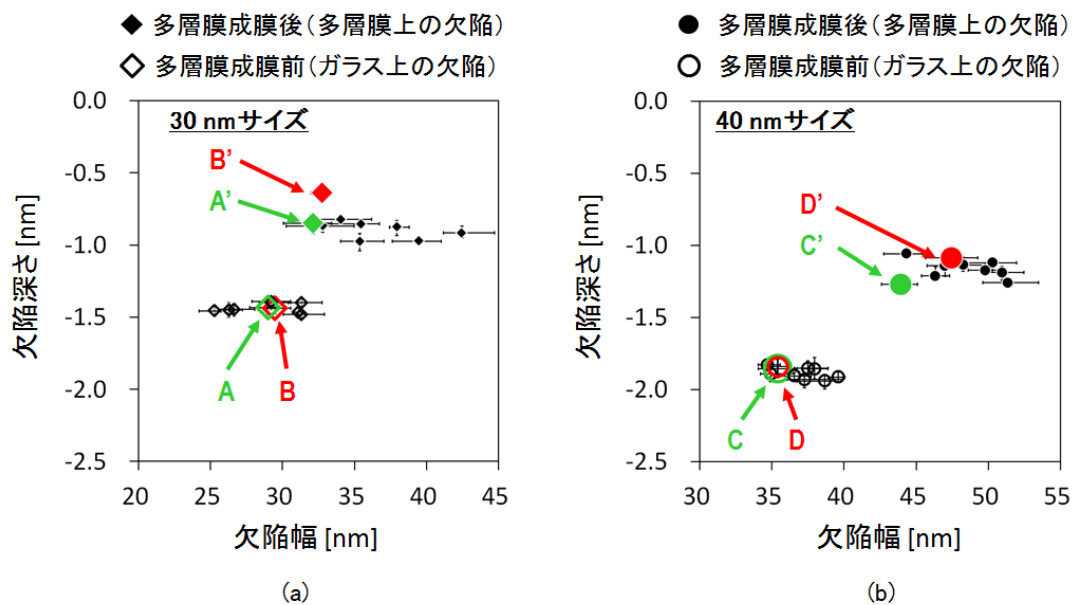
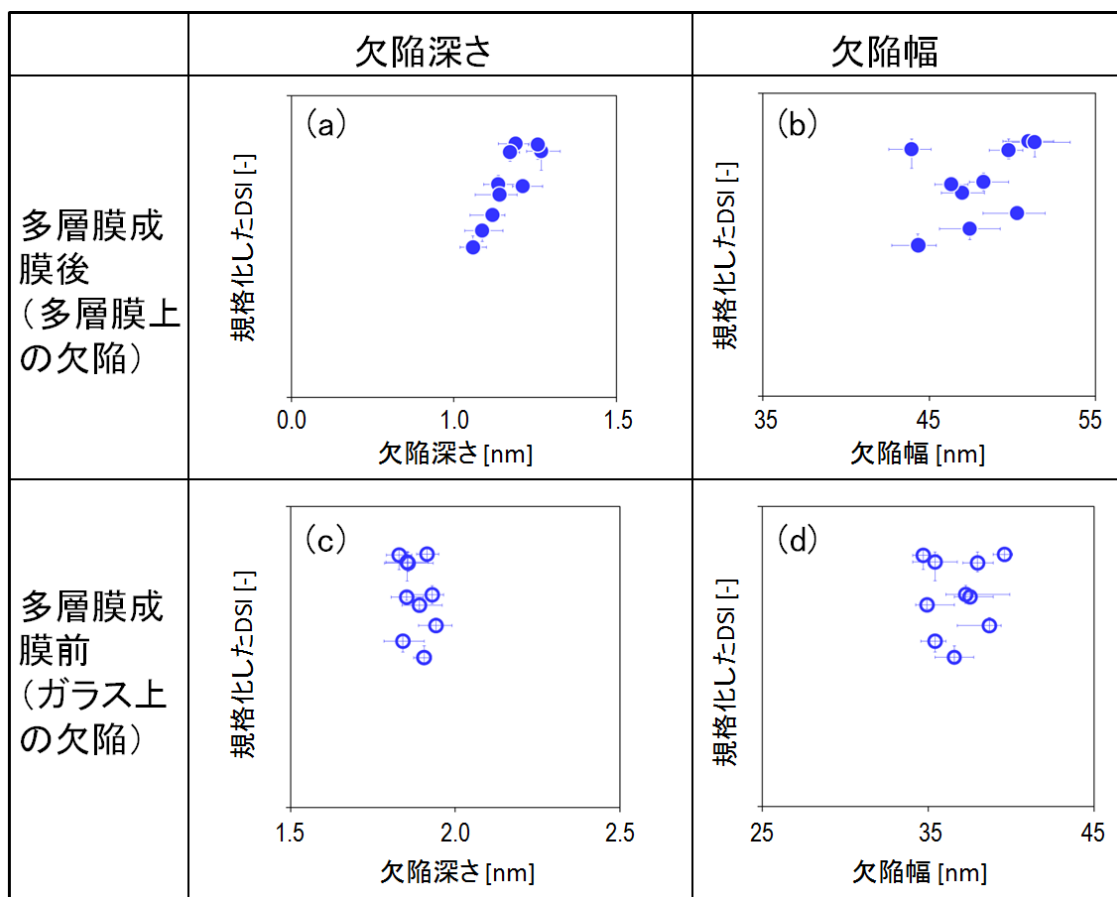


図 III.2.1.1-2-45 SPM で測定した多層膜成膜前後の欠陥サイズ 設計サイズ (a) 30 nm、(b) 40 nm

SPM を用いて多層膜成膜前後の欠陥サイズの測定と欠陥サイズにバラツキあることを特定したわけだが、ABI 装置の欠陥検出信号強度 (Defect Signal Intensity (DSI)) は多層膜成膜前後のどちらの欠陥サイズと相関が強いかが検証した。ABI 装置を用いた位相欠陥の観察は、レビューモードにて 5 回実施し、照明 NA は 0.07、撮像時間は 2 秒と設定した。まず、個別サイズの欠陥について述べる。図 III.2.1.1-2-46 は 40 nm サイズ欠陥の欠陥サイズと DSI の関係をまとめたもので、欠陥サイズは多層膜成膜前後の深さと幅に分割表示している。これらの図からわかることは、DSI は多層膜成膜前の欠陥サイズとの相関は弱いことである。つまり、欠陥検出信号強度や欠陥検出確率の評価を実施するには、タネ欠陥のサイズバラツキの影響は軽微といえる。一方、多層膜成膜後の欠陥サイズのうち、欠陥深さのバラツキは DSI と強い相関を示した。このことは、ABI 装置は多層膜成膜後の欠陥サイズの小さなバラツキを特定できることを示す。これらの結果は、プログラム欠陥マスクを用いて欠陥検出確率評価を実施する際は、同一設計サイズの位相欠陥 (たとえば 100 個) のうち 1 つを抜き取り SPM でサイズ測定し、そのサイズを 100 個の位相欠陥の代表値とすることは不適切であることを表す。SPM でサイズ測定する位相欠陥の個数に制限がある場合、サイズ測定した位相欠陥に対して、検査動作を複数回実施し検出確率を評価するのが良いと考える。



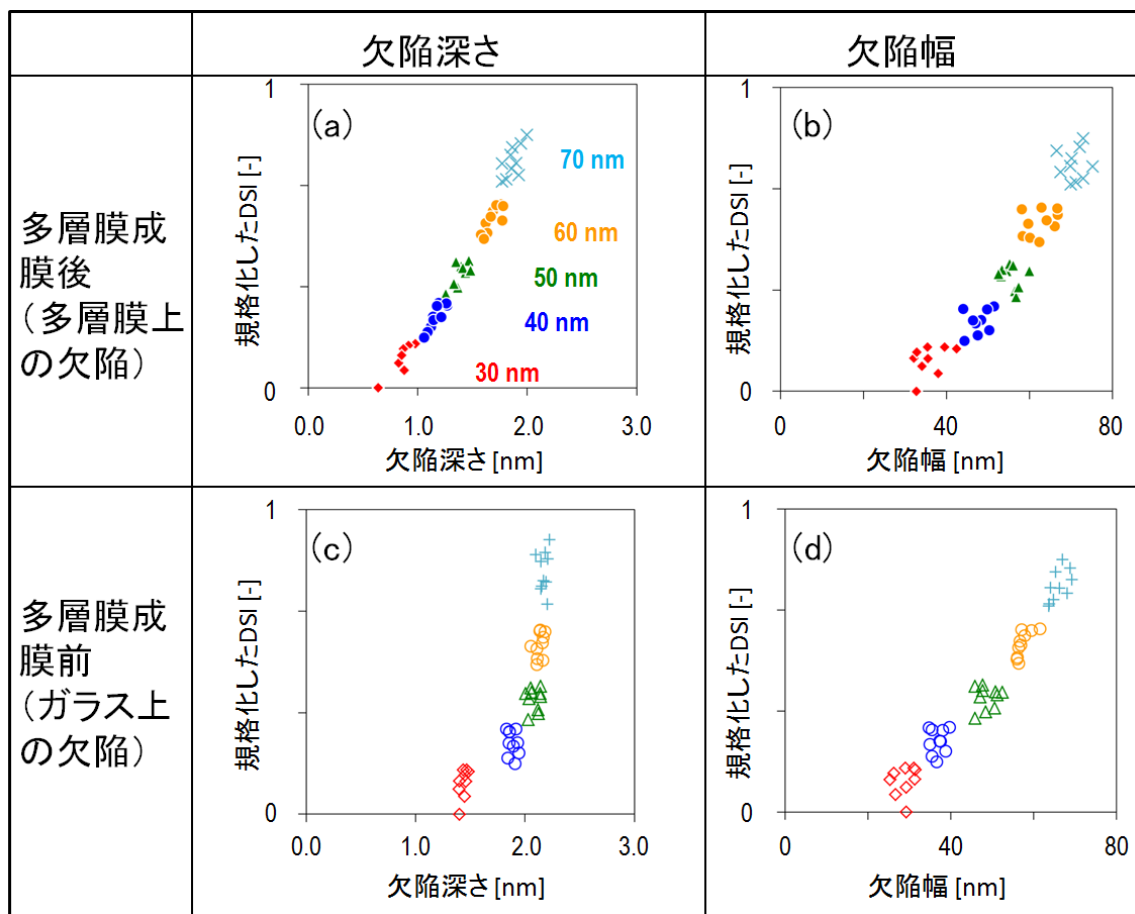
図Ⅲ.2.1.1-2-46 40 nm サイズ位相欠陥の DSI と欠陥サイズの関係

(a)多層膜上の欠陥深さ、(b)多層膜上の欠陥幅、(c)ガラス上の欠陥深さ、(d)ガラス上の欠陥幅

図Ⅲ.2.1.1-2-47 は本評価に準備した全欠陥のサイズと DSI の関係をまとめたもので、図Ⅲ.2.1.1-2-46 同様、欠陥サイズは多層膜成膜前後の深さと幅に分割表示している。これらの結果から、先の 40 nm サイズ欠陥の DSI と欠陥サイズの関係は特別なケースでなく、今回準備した全ての位相欠陥において、DSI は欠陥サイズのバラツキ、特に多層膜上の欠陥深さのバラツキを反映した値が得られることが確認された。

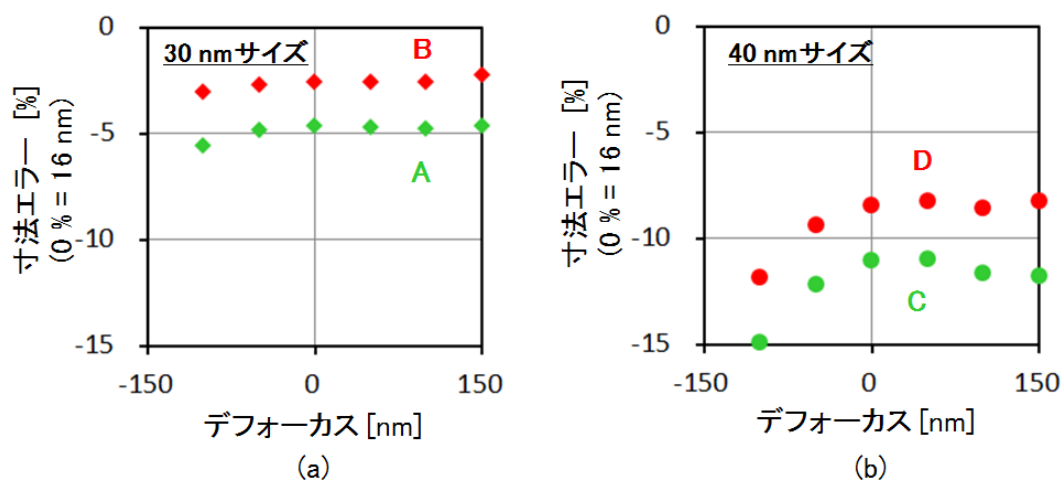
図Ⅲ.2.1.1-2-47 では、欠陥 A と B、欠陥 C と D のように、ガラス上のサイズが同じ欠陥であっても、多層膜上のサイズが異なる欠陥があることを示した。それぞれの位相欠陥がウェハ転写像に与える影響をシミュレータ(LAIPH™ EUV Defect Printability Simulator (DPS))を用いて検証した。転写光学系の条件は NA= 0.33、sigma= 0.8/ 0.4 ダイポール照明とし、吸収層パターンは hp 64 nm(ウェハ上 hp 16 nm)の L/S とした。位相欠陥の位置はスペースの中心とした。転写寸法のフォーカス依存性を計算しまとめたものが図Ⅲ.2.1.1-2-48 である。

位相欠陥が転写寸法に与える影響は、欠陥 A および C、つまりより深い欠陥の方が大きい結果となった。ここで欠陥 B は図Ⅲ.2.1.1-2-47(a)に示す通り、多層膜上で最も浅く、かつ DSI が最も小さな欠陥であり、転写寸法への影響は 5% 以下と、デバイス製造上問題とならない欠陥であることがわかった。一方、欠陥 A は転写寸法に約 5% の影響を与える欠陥であり、ABI 装置を用いて十分な強度の DSI が得られる、つまり検出可能な欠陥であることが示された。



図Ⅲ.2.1.1-2-47 本評価に準備した全位相欠陥の DSI と欠陥サイズの関係

(a) 多層膜上の欠陥深さ、(b) 多層膜上の欠陥幅、(c) ガラス上の欠陥深さ、(d) ガラス上の欠陥幅



図Ⅲ.2.1.1-2-48 位相欠陥がウェハ転写寸法に与える影響

(a) 30 nm サイズ欠陥 A および B、(b) 40 nm サイズ欠陥 C および D

(iii) まとめ

本評価の結果より、以下のことが示された。1. プログラム欠陥マスクにおいて、ガラス上で欠陥サイズが同等であっても、多層膜成膜後の欠陥サイズは必ずしも一致しない。2. DSI の値は多層

膜上の欠陥深さに最も強い相関を示す。3. 位相欠陥がウェハ転写寸法に与える影響は DSI の値に比例する。また ABI 装置はウェハ上 hp 16 nm L/S パターンに 5% の転写寸法エラーを与える位相欠陥の検出が可能である。

(h) 欠陥位置検出精度評価、解析

(i) 背景と目的

現状において全てのブランクスの位相欠陥をそのサイズに関わらずゼロにすることは非現実的である。そこで、位相欠陥のウェハへの転写を抑制することで、一定サイズ以下の欠陥をある程度許容することが提案されている。これを実現するためには、マスクのパターニング段階で位相欠陥を吸収体で正確に覆い隠す必要がある。そのためには ABI によるブランクス検査段階において高い精度での欠陥の位置情報の把握が必要不可欠となる。以上のことから本評価では、現在の ABI の欠陥位置の繰り返し計測精度をより実用に近い条件で確認することを目的とする。達成度の基準として、プロジェクトに先立ち設定された目標値 (3 sigma (nm)) を使用する。

(ii) 評価内容および成果

ABI の欠陥位置の繰り返し計測精度評価に際し、できるだけ現実の位相欠陥に近い条件を作り出すために、プログラム欠陥マスク (Mo/Si 40 pairs、Ru capped、吸収体なし) を新規に作製した。概要は図 III.2.1.1-2-49 に示すとおりである。評価に使用する欠陥は平面上の大きさ 50nm x 50nm、深さ 1nm の凹み欠陥 (ピット) に統一した。このサイズは、実用上許容されるうえで最大級、かつ ABI の信号強度を安定して得られる大きさを基準として設定した。

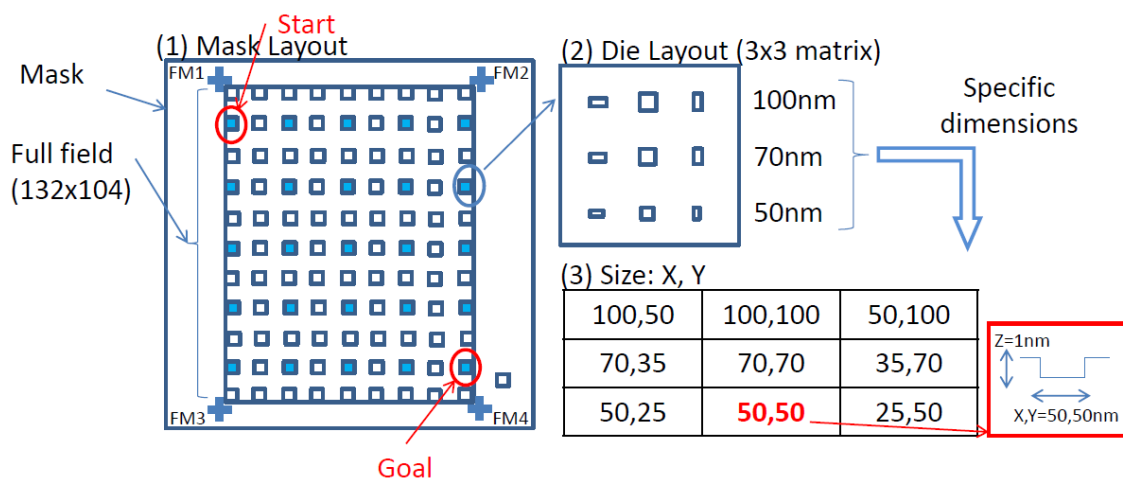


図 III.2.1.1-2-49 (1) プログラム欠陥マスクの概観 (図中左上を始点 (Start)、右下を終点 (Goal) として X/Y 方向に等間隔 25 点の計測を行なった) (2) 各ダイの詳細 (3) 各欠陥の設計寸法まとめ
FM は Fiducial Mark を示し、全て凹み欠陥 (ピット) である

欠陥の位置計測は露光エリア全面に均等に散りばめられた欠陥のうち、計測時間の都合上、間引きした 25 点において実施し、その日のうちに連続して 5 回繰り返した。このセットを 3 日間行うことで、各欠陥について合計 15 点の計測点を得た。ただし、通常であれば 1 回のロードで X, Y 共に位置の計測値が得られるはずであるが、今回の計測においてはまず X を計測し、アンロード→90 度回転→ロードしてから再び X を計測し、Y の値としている。このような変則的な計測法をとる理由は、本装置の Y 方向の位置計測誤差が X に対して 2 倍ほど大きいことが既に分かっており、それを避けるためである。Y 方向の大きな位置計測誤差は、Schwarzschild 光学系の更新なしには改善しない (光学系の収差

(Trefoil)に関わる誤差である) ことが検証済みであることから、今回の措置は光学系が改善されるまでの当面の迂回策として講じている。評価指標としては、各欠陥における 15 点の計測点においてそれぞれの 3 sigma (nm) を計算し、その値を全欠陥 25 箇所において平均した。この指標を導入した理由として、(1) 25 点の欠陥が概ねブランクスの露光エリア全体をカバーしていること、(2) 全面の全ての計測値をプールすると、欠陥の各位置による精度の良否(面内ばらつき)の情報を失われてしまうこと、の 2 点が挙げられる。欠陥位置の算出にけるグローバルな位置の補正は、ブランクス の四隅に配置されている Fiducial Mark (FM、MoSi 掘り込み構造、3um 幅)による射影補正を行った。一方、ローカルな位置の補正は 10mm ピッチのグリッドマスクによるマップ補正(欠陥周りの局所的な射影補正)を行った。これらの計測法および補正法を施したうえで得られた結果として、表.2.1.1-2-50 に欠陥位置精度のまとめ、図 III.2.1.1-2-51 に欠陥位置精度の箱ひげ図を示す。

方向	実績値 [nm]	EIDEC 目標値 [nm]
X	9.6	<20
Y	12.2	<20

表 III.2.1.1-2-50 欠陥の位置検出における繰り返し精度まとめ

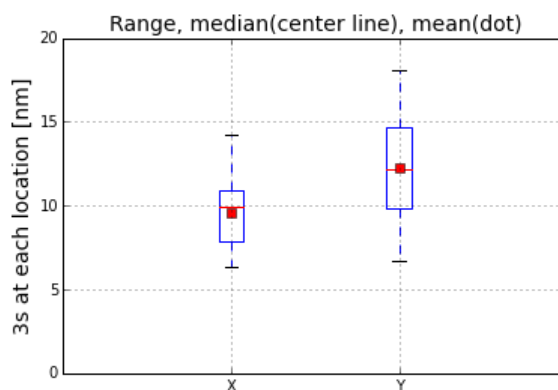


図 III.2.1.1-2-51 25 か所の欠陥の位置検出における繰り返し精度の箱ひげ図
(上下端はレンジを示し、中央横線は中央値、中央ドットは平均値を示す)

特筆すべきは、図 III.2.1.1-2-51 において欠陥 25 箇所のうちばらつきが最大の点においても、目標値の 20nm を下回る値となっていることである。なお、表 III.2.1.1-2-50 における実績値は、図 III.2.1.1-2-51 における平均値である。

(iii) まとめ

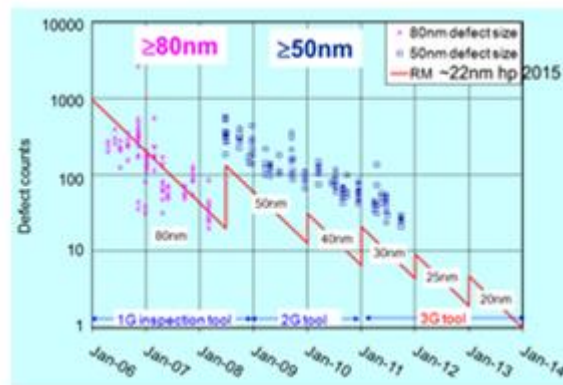
本評価は、可能な限り実際の欠陥位置計測の状況に近づけるために、平面上の大きさ 50nm x 50nm、深さ 1nm の凹み欠陥(ピット)をブランクス全面に散りばめたプログラム欠陥マスクを使用した。結果として、欠陥の計測位置の繰り返し精度(3s)の全 25 欠陥の平均値は X 方向 9.6nm、Y 方向 12.2nm となり、その最大値においても当初の目標値である 20nm を下回ったことから、十分な位置精度を持っていることが示された。しかしながら先に示したように、本評価は一旦 X 方向の計測をしてから 90 度回転し、さらに Y 方向の値を得るための計測を繰り返すという変則的な方法を採用している。これがマスクブランクス 1 枚の計測にかかる時間を 2 時間から 4 時間ほどに伸ばしてしまっており、実用上の懸念事項となっている。今後、Schwarzschild 光学系の改善により、一括した計測が可能になることを期待する。

(i) 新規ブランク欠陥低減概念の検討

(i) はじめに

EUVリソグラフィの量産実用化に向けて低欠陥 EUV マスクブランクは不可欠である。既にデバイスメーカー各社からはそれぞれの実用化時期に向けた要求欠陥密度のロードマップが示されている。これに呼応しブランクサプライヤ各社ではそれぞれの石英ガラス製造方法や検査方法などを改良改善し欠陥密度は着実に低減してきている。しかしデバイスメーカー各社による目標欠陥密度との乖離は依然、桁レベルである。しかも目標レベルは年を追うごとに高度化しており、然るべき量産時期での目標達成は厳しい(図Ⅲ.2.1.1-2-52)。このことはサプライヤ各社がこれまで取り組んできている EUV マスクブランクの低欠陥化手法とは全く異なる新概念方式を模索すべきことを示唆している。

一方、ガラス加工分野では既にインプリント技術を利用した種々加工技術が研究されてきている。産総研(高橋)等の熱インプリント方式によるマイクロオーダーの低コスト3次元深堀加工技術、あるいはその対極にある東工大(吉本)等によるピコメータオーダーのテンプレートによる表面の超平坦化技術などが知られている。これ等はいずれもガラス転移点 500~600℃のソーダガラスが加工主体である。そこで EIDEC では特に東工大でのガラス表面の超平坦化技術に着眼し、これをガラス転移点 1000℃以上の EUV マスクブランク用石英ガラスに適用した際の超平坦化、ひいては低欠陥化に関してそのフィジビリティを検討した。

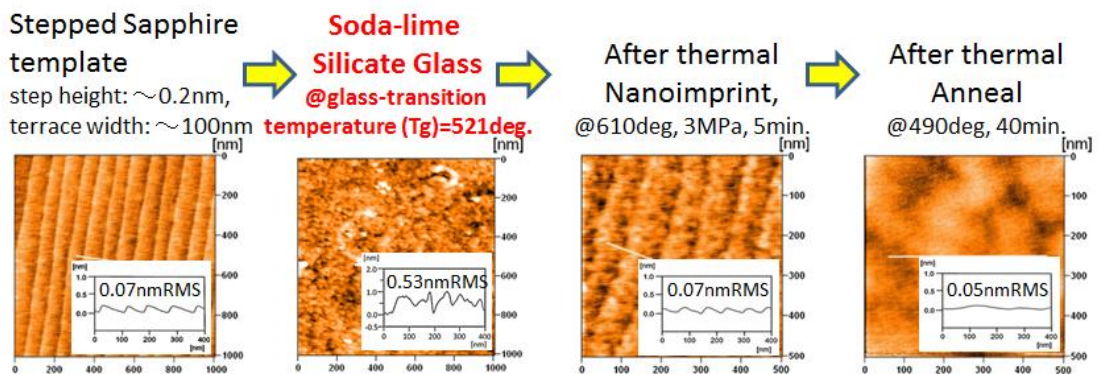


図Ⅲ.2.1.1-2-52 EUV マスクブランクの欠陥改善傾向とデバイスメーカー要求ロードマップ

T. Liang, Proc. of Int'l Symp. On EUVL (2011)より引用

(ii) 熱インプリントによるソーダガラス表面の超平坦化加工

図Ⅲ.2.1.1-2-53 に東工大でピコメータオーダーのテンプレートを用いた熱インプリント処理(610℃)によるソーダガラス表面の超平坦化例を示す。

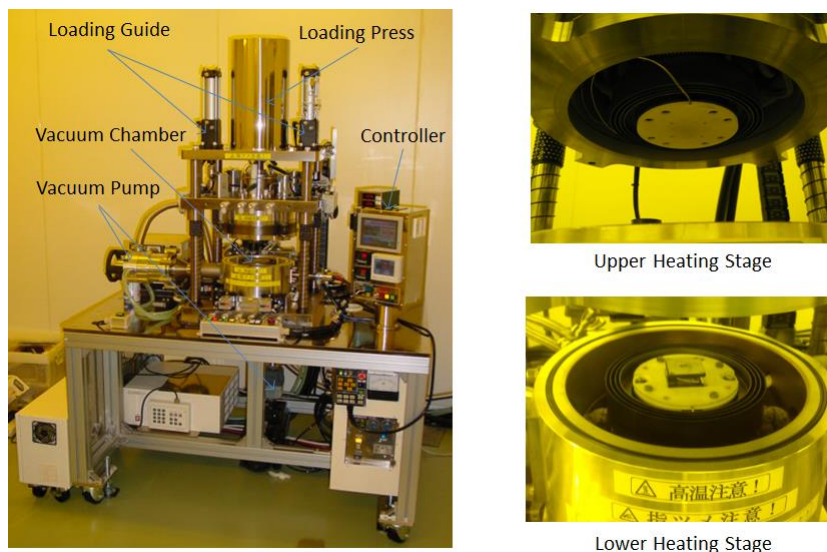


図Ⅲ.2.1.1-2-53 ソーダガラス表面の超平坦化例

テンプレートにはサファイア基板の熱処理を通じて自己整合形成された規則性サファイア原子ステップ(段差 0.2nm、幅 100nm)を使用。結果、初期表面粗さ 0.53nm RMS のソーダガラスにはサファイア基板表面相当の 0.07nmRMS 原子ステップが忠実に転写され、更に熱アニール処理後(490℃)にはそれが 0.05nmRMS にまで改善したことが分かる。

(iii) 熱インプリントによる石英ガラス表面の超平坦化加工

ガラス転移点 1000℃以上の石英ガラスの超平坦化実験には産総研産業技術総合研究所集積マイクロシステム研究センターが独自開発した Hot Emboss 装置(図Ⅲ.2.1.1-2-54)を利用した。同装置は、インプリント中のサンプル表面酸化を防止する減圧機構(0.07Pa)と最大 1400℃の高温加熱機構、ならびに熱膨張に応じたインプリント加重制御機構を各々装備している。



図Ⅲ.2.1.1-2-54 Hot Emboss 装置(産総研開発)

実験サンプルには、装置都合により、EUV マスクブランク材料の低熱膨張 LTEM(Low Temperature Expanding Material) 石英ガラスのカットサンプル(20mm□、6.35mm 厚)、および原子ステップ付きサファイア基板(15mm□、0.5mm 厚)を用い、インプリント実験は種々の熱インプリント条件(加圧加重、加圧時間、加圧温度)の組み合わせで実施した。また転写状態は都度、原子間力顕微鏡 AFM5400(日立ハイテクノロジー)および NanoScope V Dimension Icon(Bruker AXS K.K.)で評価した。結果を図Ⅲ.2.1.1-2-55 ならびに図Ⅲ.2.1.1-2-56(a)に示す。

図Ⅲ.2.1.1-2-55 より、1000℃前後の高温下ではインプリント条件が適切でないでサファイア基板テンプレートと石英ガラスとが相互反応しサンプル/テンプレートの全面ないし一部に接着が生じることが分かった(表中「X」)。また接着は高加重、高温なほど生じ易く、加圧時間への依存傾向も窺える。しかし概ね加圧温度 1000℃ではサンプル接着を抑制できると同時に、転写をも実現できることが分かった(表中「○」)。ただし再現性にはなお課題が残る(表中「△」:接着も転写せず)。これら一連の実験の結果、石英ガラスであっても 1000℃前後の適切なインプリント条件を与えれば、ソーダガラス同様、その表面に一樣な規則性のあるピコメートルレベルのサファイア段差を転写できることを初めて明らかにした。しかし同時に、転写後の AFM 測定結果(図Ⅲ.2.1.1-2-56(a))はサファイア原子ステップについての忠実転写を示していない。これが石英ガラス固有の材料起因なのか、あるいは実験条件起因なのかを今後の更なる実験条件の最適化と併行して検討する必要がある。

テンプレート段差転写後の石英ガラスを熱アニール処理することによりソーダガラス同様の表面の超平坦化を検討した。アニール温度はインプリント時と同じ 1000℃とし真空環境で実施した。

0.89MPa	1100°C	1050°C	1000°C	950°C
10min.	X	△	△, ○	NA
30min.	NA	X	△	NA
50min.	NA	NA	△, ○	NA

1.33MPa	1100°C	1050°C	1000°C	950°C
10min.	X	△	△, ○	NA
30min.	NA	X	△	NA
50min.	NA	NA	△, ○	NA

2MPa	1100°C	1050°C	1000°C	950°C
10min.	NA	X	X	△
30min.	NA	NA	NA	△, ○
50min.	NA	NA	NA	△

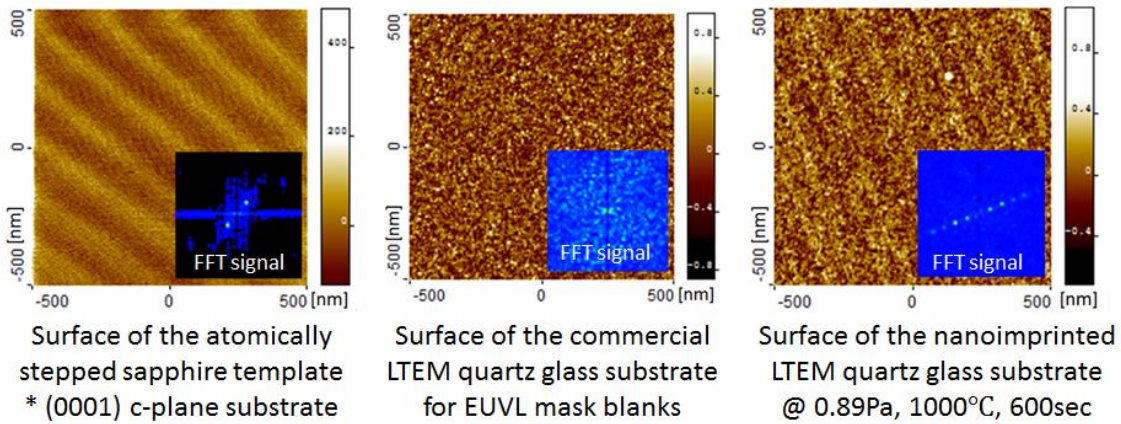
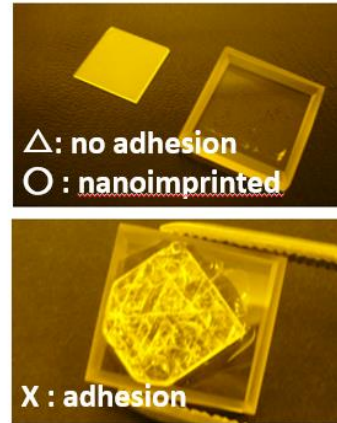


図 III.2.1.1-2-55 EUV マスクブランクへの高温熱インプリント結果

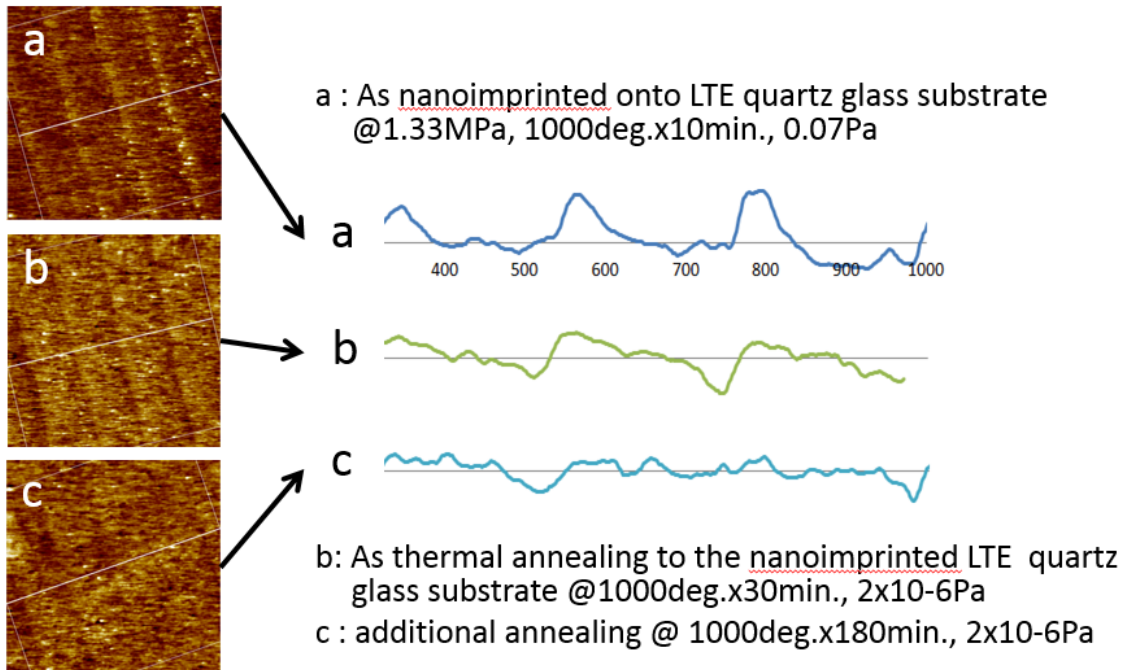


図 III.2.1.1-2-56 インプリント後 AFM 測定結果 (a) およびアニール後の測定結果 (b) (c)

図Ⅲ.2.1.1-2-56 (b) (c) に示すようにアニール時間の増大に伴い、規則性段差部での同時一斉ガラス流動による表面の平坦化が生じたと考えられ、今後の超平坦化実現に目処を得た。

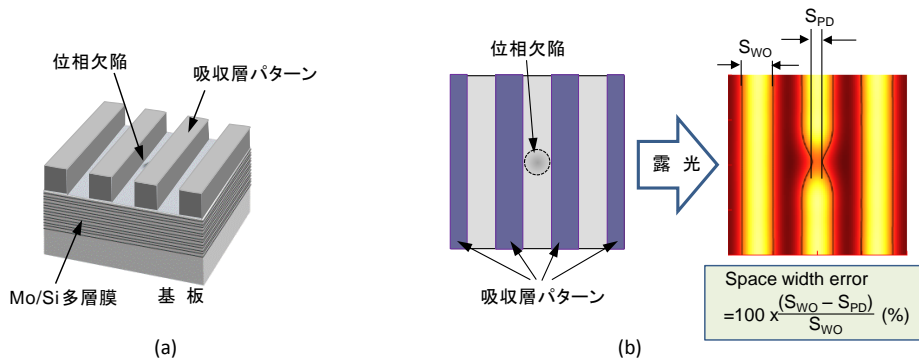
(iv) まとめ

ソーダガラスを対象に東工大で実績ある熱インプリント/アニール処理によるガラス表面の超平坦化技術を今回 EUV マスクブランク用石英ガラスに適用した。結果、ソーダガラス同様、ピコメータオーダーの超微細形状のテンプレート転写ならびにその超平坦化の目処を確認した。これにより EUV マスクブランクの低欠陥化について新たなアプローチ手法の可能性を示すことが出来た。

[2] プリンタビリティ評価

(a) 露光実験による位相欠陥転写性評価

マスクブランクに存在する位相欠陥が露光装置で投影される吸収体パターン転写像に与える影響を、テストマスクの露光実験を行って評価し、シミュレーション結果と比較した。EUVマスクは、基板上に Mo/Si を 40 対積層した多層膜と厚さ 2.5 nm の Ru キャッピング層を成膜した後に、厚さ 66 nm の吸収層パターンを設ける構造とした。種々のサイズのプログラム位相欠陥と吸収層 L&S パターンを含むテストマスクを製作し、これを EIDEC メンバーが保有する露光装置 NXE:3100 (NA=0.25) に載置してパターン転写実験を行った。NA の制約から、ウェハ上に転写して評価する L&S パターン寸法 (hp) を 22 nm、24 nm、26 nm の 3 種類とし、転写パターンに与える影響を、転写パターンの寸法変化 (CD 誤差) として解析した。図Ⅲ.2.1.1-2-57 は、EUV マスクのモデルと、転写パターンの CD 誤差をスペース寸法誤差 (%) で表すことを示す。



図Ⅲ.2.1.1-2-57 位相欠陥の転写性評価の方法

(a) EUVLマスク構造、(b) 転写性評価の為の CD 誤差の定義

(i) 評価用テストパターン

露光条件は、開口数(NA)が 0.25 であり、照明条件は L&S パターンの解像を強調するダイポール照明とした。更に、マスク照明光の主光線入射角度は 6 度とし、入射面はラインパターンと平行とした。

露光テストマスクは、図Ⅲ.2.1.1-2-58 に示すように、多数のプログラム位相欠陥アレイを設けたマスクブランク上に吸収層 L&S パターンを設ける構造とした。着目する位相欠陥の周辺には、パターン評価時に影響を与えない距離を置いて 4 本のラインパターン(位相欠陥パターン)を配置し、パターン転写後の SEM 観察において、位相欠陥位置を容易に認識できるようにした。この認識方法は、位相欠陥が吸収層パターンに完全に被覆された場合であっても有効である。ここで作製した位相欠陥の種パターンは基板上で深さ 1.9 μm のピット欠陥であり、それをピッチ 25 μm で多数配列した。その後、Mo/Si 多層膜を 40 対成膜し、更に厚さ 2.5 nm の Ru キャップ層を設けてマスクブランクとした。さらに厚さ 66 nm の吸収層を設けて、hp 88 nm、96 nm、104 nm L&S パターンを形

成し、4倍マスクとした。

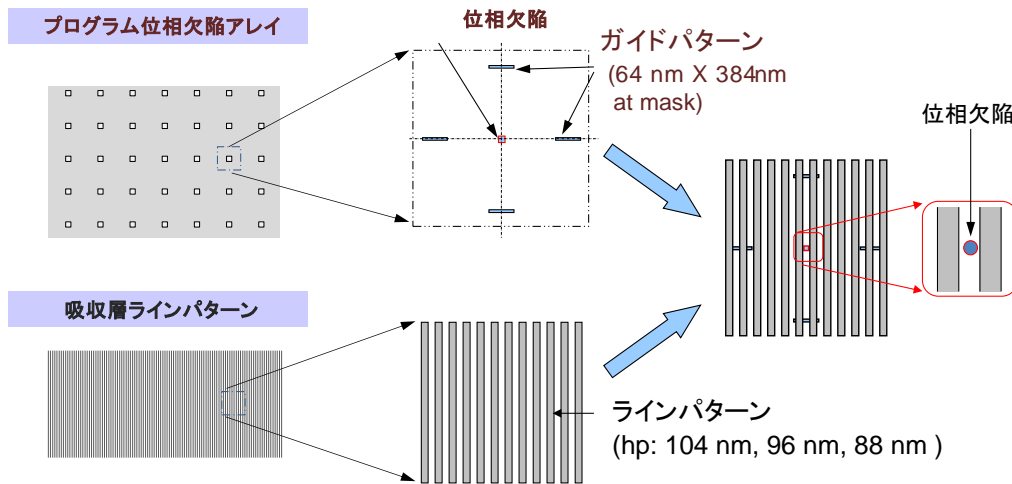


図 III.2.1.1-2-58 位相欠陥と吸収層パターンを含むテストマスク

完成したテストマスクの複数箇所を AFM で計測して、位相欠陥と吸収層パターンの形状を確認すると共に、両者の相対位置も計測した。幅 80 nm のピット欠陥と hp 96 nm L&S 吸収層パターンを AFM で計測した結果を図 III.2.1.1-2-59 に示す。吸収層パターンに対して様々な位置に位相欠陥を配置できたことがわかる。

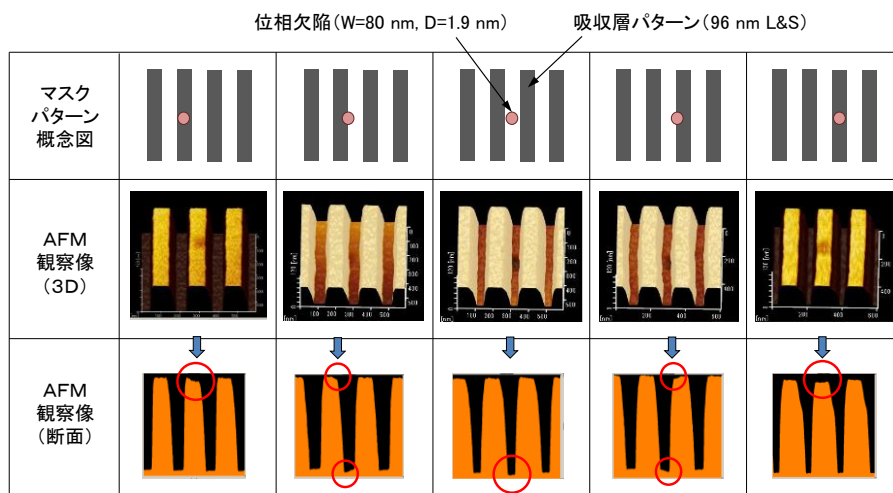


図 III.2.1.1-2-59 テストマスク上の吸収層と位相欠陥の AFM 計測例

(ii) 転写実験結果

これまでに実施してきたシミュレーションや露光実験から、吸収層パターン転写像に与える位相欠陥の影響度の大きさは、転写時のデフォーカス量に依存して変化することが分かっている。実験ではテストマスクに設けたピット位相欠陥の影響を調べたので、以下の実験結果の説明では+30 nm のデフォーカス状態での転写結果を纏めた。

ウェハ上に転写される hp 22 nm、24 nm、および 26 nm レジストパターンに与える位相欠陥影響度の欠陥位置依存性を図 III.2.1.1-2-60 に示す。ここで、幅 80 nm、深さ 1.9 nm の位相欠陥は、それが隣接する吸収層パターンの間に存在する場合に hp 24 nm および 26 nm レジストパターンにブリッジ欠陥を引き起こすので、明らかに致命欠陥である。しかしながら、位相欠陥が吸収層パタ

ーンで被覆されるとレジストパターンのCD誤差が小さくなり、位相欠陥の影響度は無視できるほど小さくなった。この傾向は、同図に示す幅 70 nm、深さ 1.8nm の位相欠陥が hp 22 nm レジストパターンに与える影響度にも同様に表れている。

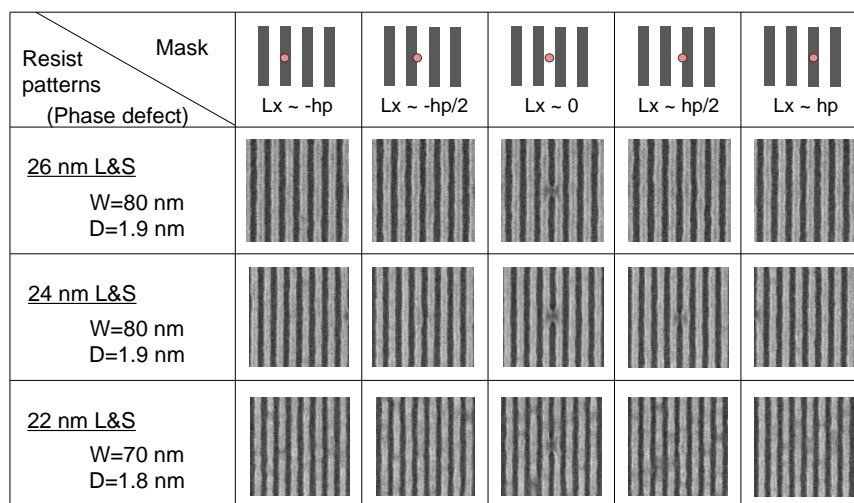


図 III.2.1.1-2-60 位置が異なる位相欠陥の影響を受けたレジストパターン

種々のサイズの位相欠陥が hp 24 nm レジストパターンに与える影響を、CD誤差の欠陥位置依存性実験結果として、図 III.2.1.1-2-61 に示す。

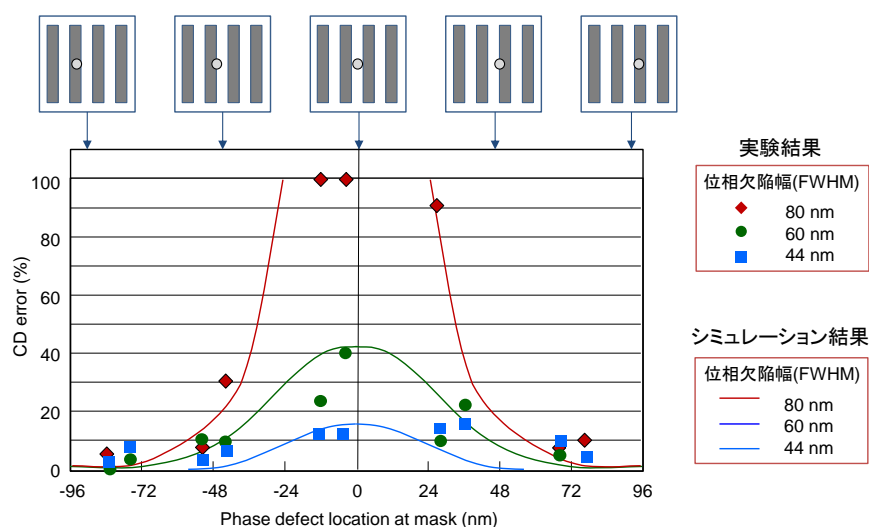


図 III.2.1.1-2-61 位相欠陥インパクトに欠陥位置依存性

ここで、位相欠陥位置 L_x は着目するスペース部の中心を原点とする欠陥中心位置と定義し、同図ではマスク上 $-96 \text{ nm} \leq L_x \leq 96 \text{ nm}$ とした。また、前記3種のサイズの位相欠陥によるCD誤差を計算したシミュレーション結果も同図に示した。シミュレーションにおいて位相欠陥をモデル化するに当たり、幅 44 nm 欠陥はガウシアン形状を仮定したが、幅 60 nm および 80 nm の欠陥については、AFM 計測結果をもとに円錐台形状を仮定した。いずれの欠陥も、その位置が $-48 \text{ nm} \leq L_x \leq 48 \text{ nm}$ の場合はCD誤差が大きくなるかあるいはブリッジ欠陥 (CD 誤差 100%) が生じるものの、 $48 \text{ nm} \leq |L_x| \leq 96 \text{ nm}$ の場合はCD誤差が十分に小さくなることを、実験とシミュレーションの両方で確認できた。当初、幅 60 nm および 80 nm の欠陥をガウシアン形状と仮定して計算したところ、得ら

れた CD 誤差は実測値の半分程度であった。しかし、上述のように円錐台形状にモデル化することによりシミュレーション予測精度を向上させることができた。ここで、シミュレーションにより CD 誤差が 10% 以下となる Lx の領域では、実験的に得られる CD 誤差もおおよそ 10% である。ただし、レジストパターンのラインエッジラフネス(LER)の影響により、10% 以下の CD 誤差を議論することは困難である。位相欠陥起因の転写像 CD 誤差を抽出する工夫が望まれる。

種々のサイズの位相欠陥が転写パターンに与える影響を、転写したレジストパターンの寸法変化を捉えた SEM 画像として 図 III.2.1.1-2-62 に示す。ここでは、位相欠陥はスペース部のほぼ中央にある場合の結果を示した。レジストパターンの評価では LER の影響を受けるので、実験的に 10% から 100% に至る CD 誤差を正確に計測することは困難であったが、hp 22 nm、24 nm、26 nm L&S レジストパターンのいずれにおいても、位相欠陥のサイズが大きくなるにつれて CD 誤差が大きくなりブリッジ欠陥に至ることがわかる。少なくとも幅 52 nm より小さい位相欠陥は hp 24 nm、26 nm レジストパターンに対しては致命欠陥ではないこと、また、幅 44 nm より小さい位相欠陥は hp 22 nm レジストパターンに対しては致命欠陥ではないこと、がわかった。

位相欠陥の レジストパターン (マスクパターン)	位相欠陥の サイズ							
	W=100 nm D=2.0 nm	W=80 nm D=1.9 nm	W=70 nm D=1.9 nm	W=60 nm D=1.8 nm	W=52 nm D=1.7 nm	W=44 nm D=1.5 nm	W=34 nm D=1.5 nm	
26 nm L&S (104 nm L&S)								
24 nm L&S (96 nm L&S)								
22 nm L&S (88 nm L&S)								

図 III.2.1.1-2-62 位相欠陥インパクトの欠陥サイズ依存性評価結果

ここで計測した CD 誤差を纏めた結果を光学像シミュレーション結果と共に 図 III.2.1.1-2-63 に示す。3 種の寸法のレジストパターンの内、hp 24 nm と 26 nm L&S パターンについては実験結果とシミュレーション結果はよく一致し、シミュレーションは、幅 70 nm、深さ 1.9 nm 以上のサイズの位相欠陥でブリッジ欠陥を発生させることを予測している。

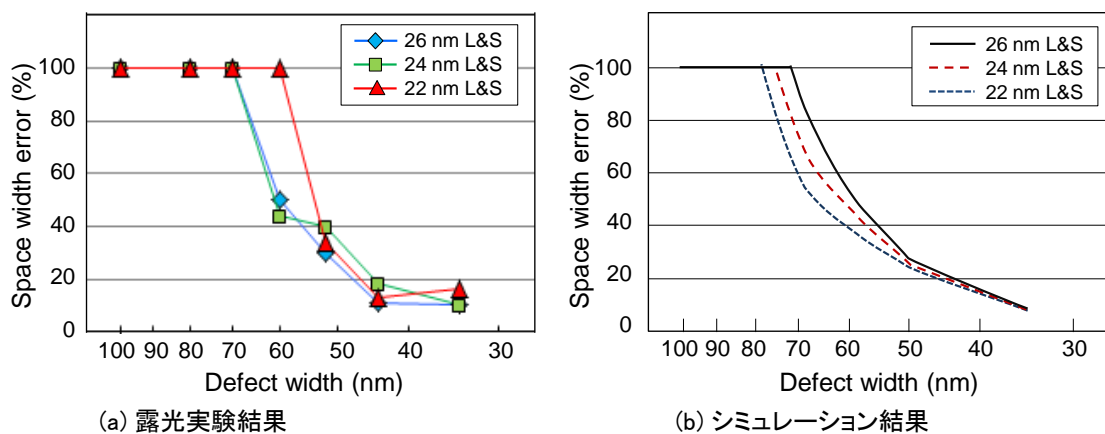


図 III.2.1.1-2-63 転写パターンの CD 誤差の欠陥サイズ依存性。シミュレーションでは、位相欠陥の位置は隣接する吸収層ラインパターンの中央と仮定。

一方、hp 22 nm L&S レジストパターンに対しては、ブリッジ欠陥を引き起こす位相欠陥サイズが光学像シミュレーションと露光実験では異なり、シミュレーション結果は位相欠陥影響度がより小さい傾向を示している。光学的には hp 22 nm L&S パターンの投影像を強調する照明光学条件になっているので妥当な予測と思われるが、レジストパターン形成においては現像プロセスや LER の影響を受け、シミュレーション予測よりも小さなサイズの位相欠陥でブリッジ欠陥に致ったと考えられる。

(iii) まとめ

位相欠陥転写性(プリンタビリティ)を、位相欠陥が吸収層パターン転写像に与える寸法変化(CD 誤差)として表し、CD誤差の欠陥サイズ依存性や欠陥位置依存性を転写実験から評価し、シミュレーション結果と比較検討した。パターン転写実験では現状の露光装置の NA の制約からダイポール照明を採用しても hp 22 nm 以上のパターンの評価にとどまったが、シミュレーション予測した位相欠陥転写性を実験的に検証した。また、シミュレーション結果との比較から、より微細領域の位相欠陥転写性を予測するシミュレーションでは、欠陥形状モデルの精度が予測精度に大きな影響を与えることが分かった。

(b) 欠陥の斜め成長とインパクト

本節では、位相欠陥を吸収層パターンで正確に覆うことを目的とし、位相欠陥が多層膜を斜めに伝搬した場合の、i) 伝搬方向および傾きと、実質的な位相欠陥の位置シフト量の関係、ii) 位相欠陥を吸収層で覆う際の吸収層パターン配置方法、iii) EUV 光を用いた欠陥検査時の欠陥検出信号および欠陥の位置特定 に関して述べる。

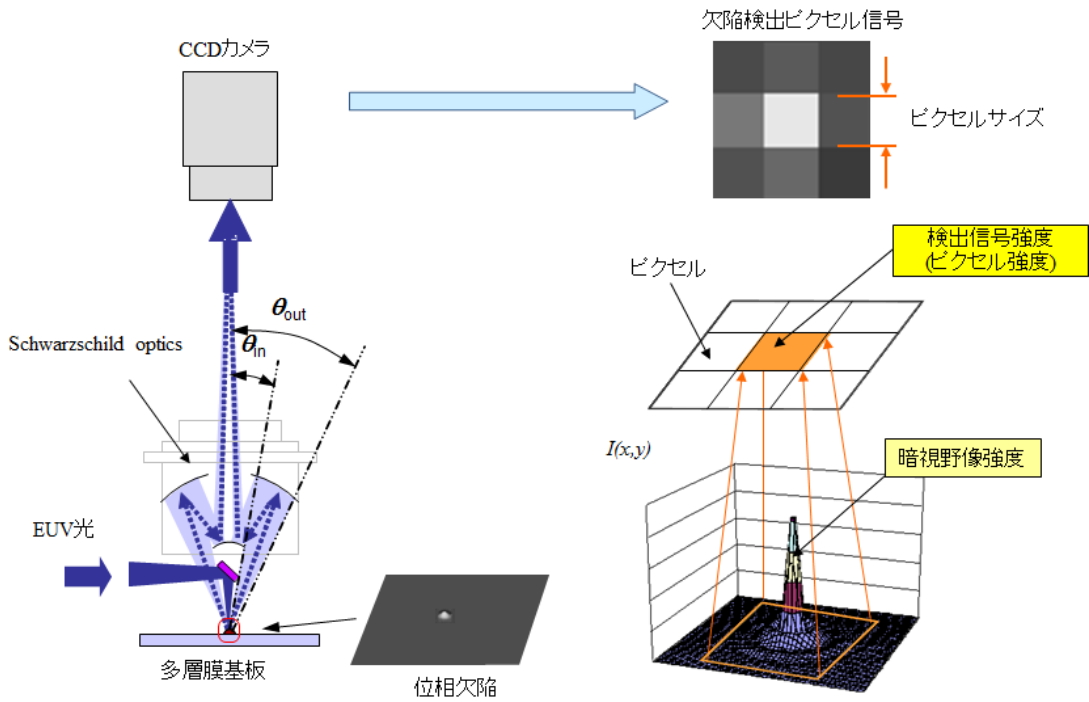
(i) 実験方法

実験は以下の流れで実施した。

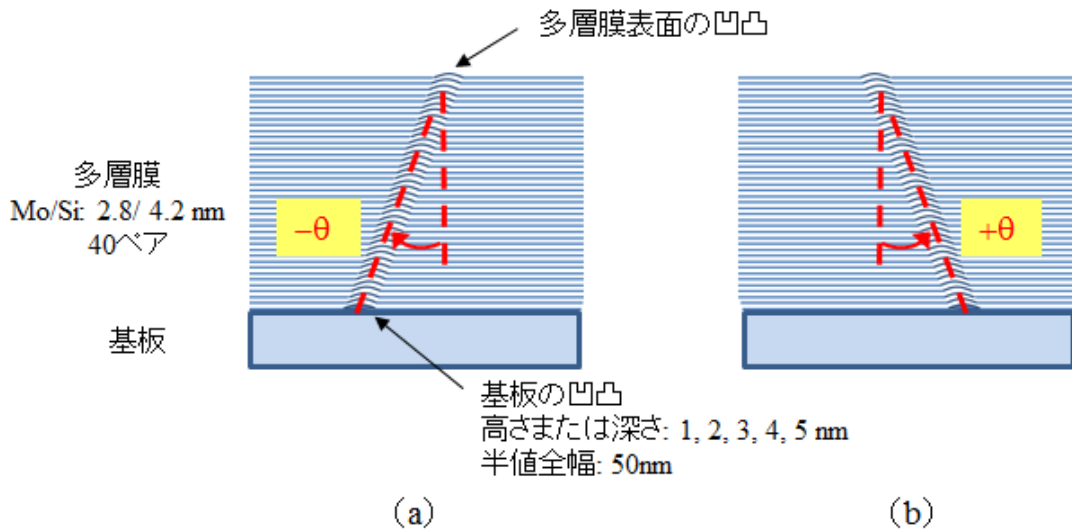
- (1)TEM を用いた位相欠陥断面構造の観察。
- (2)位相欠陥の伝搬方向および傾きと、実質的な位相欠陥の位置シフト量の関係評価。
- (3)位相欠陥を吸収層で覆う際の吸収層パターン配置方法の評価。
- (4)EUV 光を用いた欠陥検査時の欠陥検出信号および欠陥の位置特定評価。

位相欠陥の観察は、多層膜基板を ABI で検査し、検出した位相欠陥を TEM で観察することで行った。図 III.2.1.1-2-64 に ABI の光学系概念図と欠陥検出信号の例を示す。検査光学系は、NA(inner/ outer):0.1/ 0.27、欠陥検査時のピクセルサイズは 500 nm である。マスクに照射された EUV 光は位相欠陥が存在した場合は位相欠陥の形状に応じた散乱が起こり、Schwarzschild 光学系で捕集され CCD カメラでとらえられる。一方、位相欠陥が無い場合は多層膜表面で散乱が無い場合、CCD カメラに EUV 光は入らない。本装置で検出した位相欠陥は TEM を用いて位相欠陥の断面構造観察((1))を行った。

位相欠陥の伝搬方向および傾きと、実質的な位相欠陥の位置シフト量の関係評価((2))は、リソグラフィシミュレータ LAIPH™ EUV Defect Printability Simulator (Luminescent Technologies) を用いて計算により求めた。位相欠陥がウェハ上に転写される位置の計算条件は、EUV 露光装置 NXE:3300 (ASML) の露光設定条件に合わせて NA:0.33、Sigma:0.8 (conventional)、縮小倍率: 4、波長:13.5 nm、主光線入射角度:6 度にて行った。マスク構造は、多層膜として膜厚 2.8 nm および 4.2 nm の Mo と Si を 40 ペア、キャップ層として膜厚 2.5 nm の Ru。位相欠陥のサイズは、高さまたは深さが 1, 2, 3, 4 および 5 nm、半値全幅 50 nm のバンプおよびピット型欠陥で、欠陥の伝搬角度 θ は -12, -9, -6, -3, 0, 3, 6, 9 および 12 度と設定した。マスク構造および位相欠陥構造を図示すると図 III.2.1.1-2-65 のようになる。

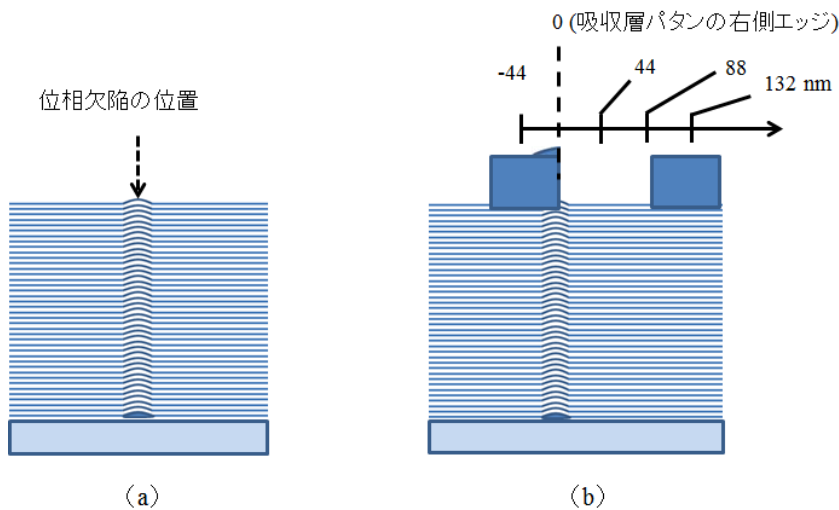


図Ⅲ.2.1.1-2-64 EUV 光を検査光とする暗視野位相欠陥検査光学系概念図と、暗視野で検出した欠陥検出信号の例



図Ⅲ.2.1.1-2-65 計算に使用した位相欠陥を含む多層膜基板の断面概略図

位相欠陥を吸収層で覆う際の吸収層パターン配置方法の評価(3)に使用したマスク断面モデルは、図Ⅲ.2.1.1-2-65 の多層膜基板に、吸収層として膜厚 66 nm からなる TaN を hp 88 nm L/S 状に配置した。位相欠陥の位置の定義は、図Ⅲ.2.1.1-2-66 (a) に示すように多層膜上の凹凸の位置を位相欠陥の位置とした。吸収層パターンと位相欠陥の位置関係の定義は、図Ⅲ.2.1.1-2-66 (b) に示すように吸収層パターンの右側エッジをゼロとし、右側(スペース部の方向)をプラス、左側(ライン部の方向)をマイナスとした。EUV 転写条件は(2)と同じ条件で実施した。ABI の欠陥検出信号および欠陥の位置特定評価(4)に使用した欠陥検査光学条件および、位相欠陥の構造はそれぞれ①、②と同様にセットした。

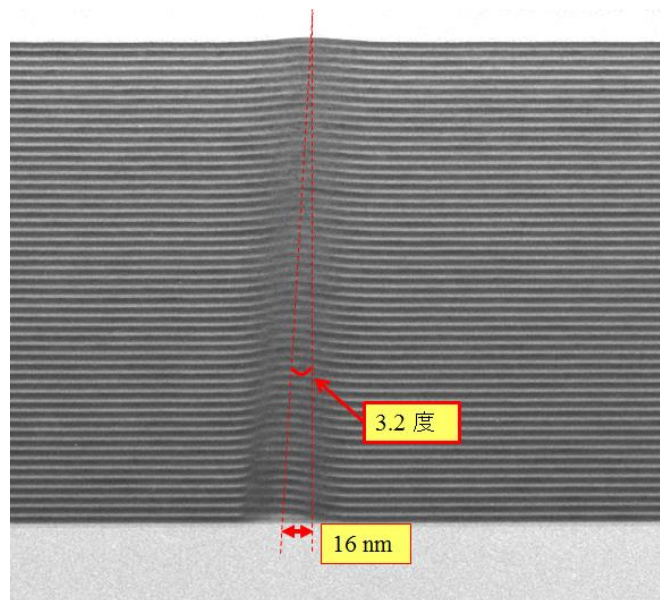


図Ⅲ.2.1.1-2-66 位相欠陥の位置の定義を示すマスク断面図
 (a)位相欠陥の位置を示す図、(b)吸収層パターンと位相欠陥の位置関係の定義を示す図

(ii)結果と考察

<位相欠陥の構造が EUV 転写性能に与える影響>

図Ⅲ.2.1.1-2-67 に、基板の凸形状が多層膜を斜めに伝搬した位相欠陥の TEM 像を示す。位相欠陥検査装置で検出したいくつかの位相欠陥の断面構造を観察したところ、多層膜を斜めに伝搬する位相欠陥があることがわかった。図Ⅲ.2.1.1-2-67 で示した位相欠陥は、伝搬角度 3.2 度であり、基板上と多層膜上の凸形状の位置ズレ量は 16 nm であった。



図Ⅲ.2.1.1-2-67 基板の凸形状から多層膜を斜めに伝搬する位相欠陥の TEM 像

図Ⅲ.2.1.1-2-68 のように位相欠陥が斜めに伝搬している場合、EUV 転写でウェハ上に転写される位相欠陥の位置に与える影響をシミュレーションで計算した。図Ⅲ.2.1.1-2-68 に位相欠陥の断面構造とウェハに転写された位相欠陥の暗部を示した。このとき位相欠陥の位置、すなわち多層膜上の凹凸位置は、垂直に伝搬した位相欠陥も、斜めに伝搬した位相欠陥も同じと設定した。ウェハ上に転写された位相欠陥の暗部の位置は、2 種の位相欠陥で位置シフトが発生していることがわかる。

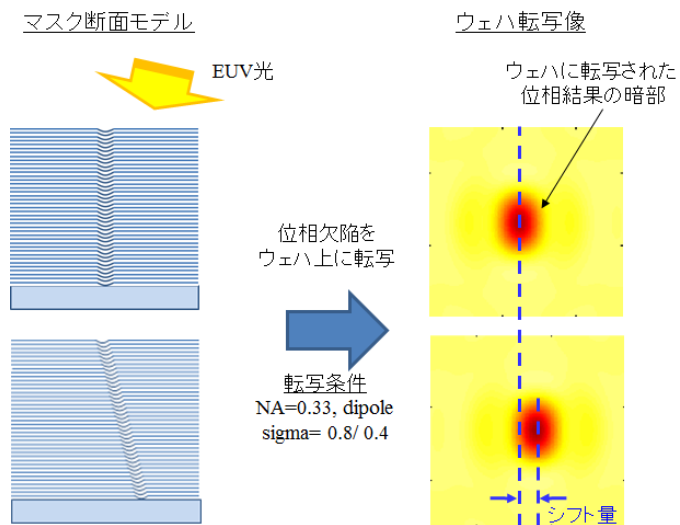


図 III.2.1.1-2-68 垂直および斜めに多層膜を伝搬する位相欠陥の断面図と
位相欠陥がウェハに転写された位相欠陥の暗部

位相欠陥の伝搬角度と位相欠陥が転写される方向および位置の関係を、欠陥高さ 4, 6, 8 nm、幅 50 nm の位相欠陥について調べた。転写条件は先に示した通りである。図 III.2.1.1-2-69 は位相欠陥の傾斜角度とウェハに転写される位相欠陥の位置シフト量の関係を示したものである。

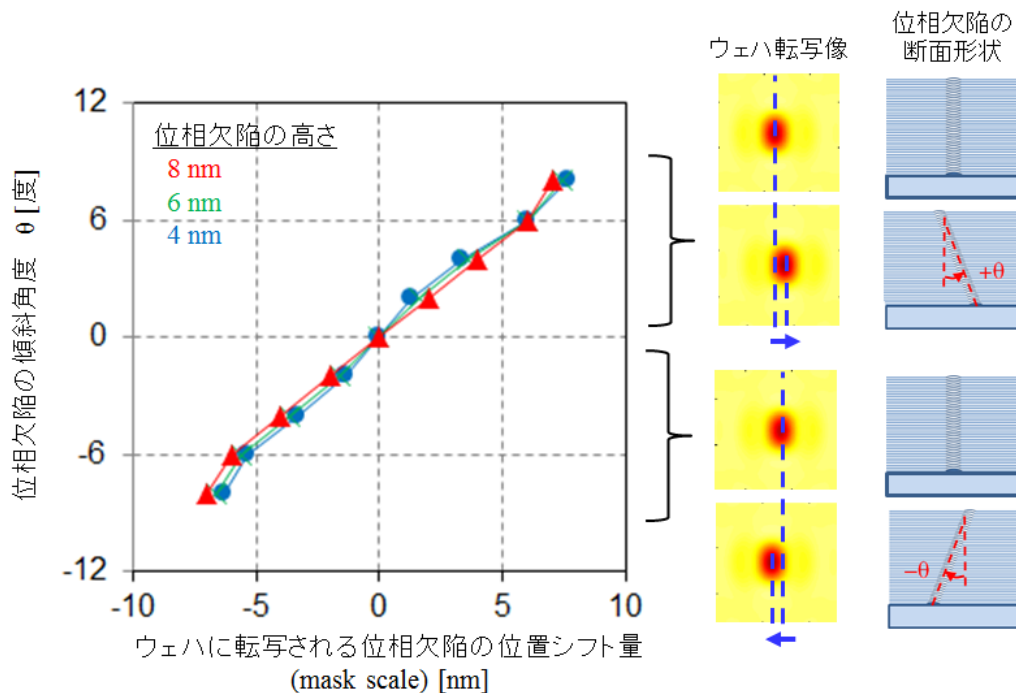


図 III.2.1.1-2-69 位相欠陥の傾斜角度とウェハに転写される位相欠陥の位置シフト量の関係

位置シフト量は、位相欠陥が多層膜を垂直に伝搬 ($\theta = 0$ 度)した位相欠陥のウェハ転写位置を基準として算出した。計算の結果、ウェハに転写される位置は位相欠陥が傾いている方向にシフトする結果となり、多層膜上の欠陥位置が同じであっても、位相欠陥が 1 度傾斜するごとにウェハに転写される位相欠陥位置は 0.9 nm シフトした。また、位相欠陥の高さが 4, 6 および 8 nm の範囲では、位相欠陥のシフト量に優位な差は観られなかった。以上の結果から、位相欠陥を吸収層パ

ターンで覆い、位相欠陥がウェハに転写されないようにするには、位相欠陥の断面形状を考慮に入れて吸収層パターンを配置する必要があると想定される。

次いで、急欠陥の断面形状が吸収層パターンの転写性能に与える影響を評価した。評価パターンはマスク上 hp 88 nm L/S(ウェハ上 hp 22 nm L/S)、位相欠陥の伝搬角度は 6 度とした。位相欠陥のサイズ、伝搬角度、吸収層パターンとの位置関係が、吸収層パターンの転写寸法に与える影響を図 III.2.1.1-2-70 に示した。位相欠陥の位置は図 III.2.1.1-2-66 (b) に示した通りである。予想通り位相欠陥のサイズが大きく、特に位相欠陥の位置が 0 nm~88 nm の範囲、つまり位相欠陥が吸収層パターンで覆われていない場合においては、伝搬角度に依存せずパターン転写寸法に大きな影響を与えた。

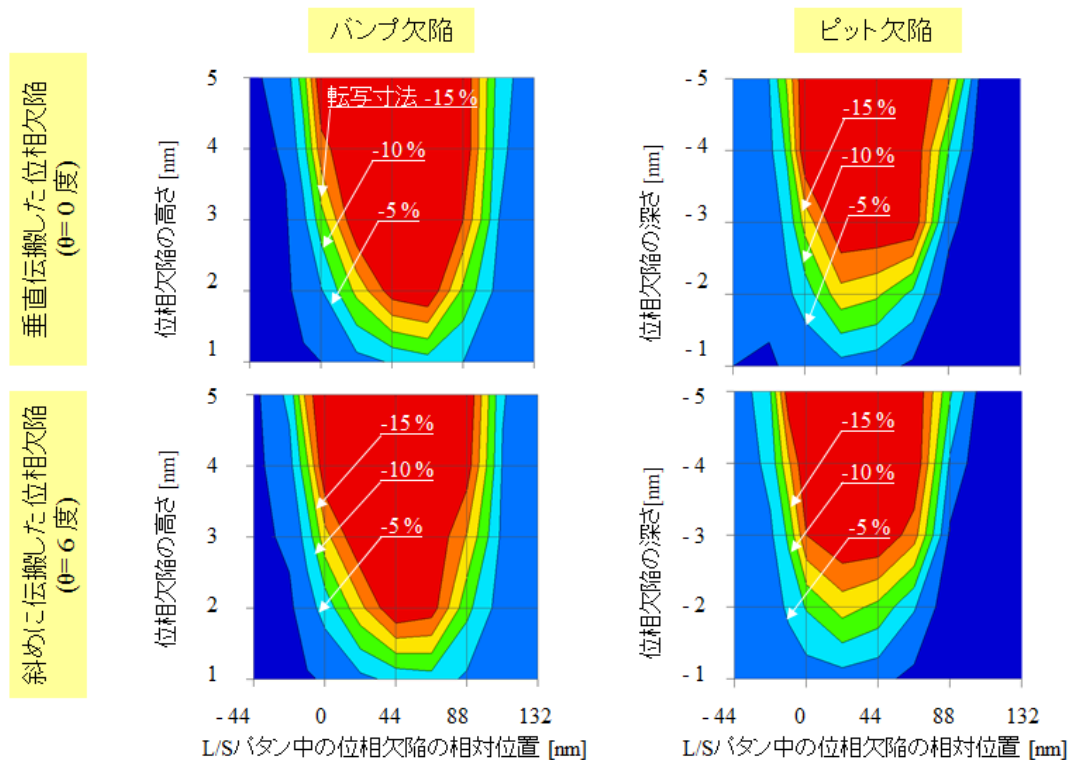


図 III.2.1.1-2-70 位相欠陥のサイズ、伝搬角度、吸収層パターンとの位置関係が転写寸法に与える影響
 図中の百分率表記は、スペース部の転写パターン寸法エラー量を表す

位相欠陥の伝搬角度が転写パターン寸法に与える影響を明らかとするため、図 III.2.1.1-2-70 に示した結果をもとに、位相欠陥の伝搬角度が 6 度の転写寸法から、伝搬角度 0 度の転写寸法を差し引いた結果を図 III.2.1.1-2-71 に示した。計算の結果、位相欠陥の位置が吸収層パターンのエッジ付近に位置する場合に、転写寸法は位相欠陥の伝搬角度の影響を強く受けることがわかった。位相欠陥の実質的な位置は伝搬方向にシフトするので、欠陥位置が 0 nm 付近の場合、伝搬角度が 6 度傾いた位相欠陥は、0 度の位相欠陥よりも転写寸法に与える影響が大きくなるためである。逆に欠陥位置が 88 nm 付近では、伝搬角度 0 度の位相欠陥の方が、6 度の欠陥よりも転写寸法に与える影響が大きくなる。

このように位相欠陥が吸収層パターンエッジ付近に位置した場合、転写寸法に与える影響が出てくる。そこで、位相欠陥の伝搬角度が転写寸法に与える影響をシミュレーションで計算した。評価パターンはマスク上 hp 88 nm L/S(ウェハ上 hp 22 nm L/S)、位相欠陥のサイズは高さ 4 nm、半値全幅 50 nm のバンプで、伝搬角度は 0 から 12 度とした。吸収層パターンと位相欠陥の位置関係は、図 III.2.1.1-2-72 (a)-44 nm(位相欠陥が吸収層に完全に覆われたモデル 1)と図 III.2.1.1-2-72 (b)-11 nm(位相欠陥の一部が吸収層に覆われたモデル 2)とした。両モデルの転

写寸法の計算は、図中の転写寸法評価と記したスペース部の寸法で行った。位相欠陥の伝搬角度が転写寸法に与える影響は、**図 III.2.1.1-2-72(c)** に示す通りモデル 1 では計算した伝搬角度の範囲では、無欠陥パターンと同等な転写性能が得られた。一方、モデル 2 では伝搬角度が大きくなるにつれて転写寸法が小さくなり、伝搬角度が 4 度傾くと目標寸法 22 nm と比較して 10% 以上の寸法変動量となり、本マスクを用いた EUV 転写では欠陥の無いデバイス製造はできない。以上のことから、位相欠陥の伝搬角度を考慮に入れて吸収層パターンを配置するか、位相欠陥の伝搬角度が特定できない場合は、位相欠陥を吸収層パターンで完全に覆う必要があると言える。

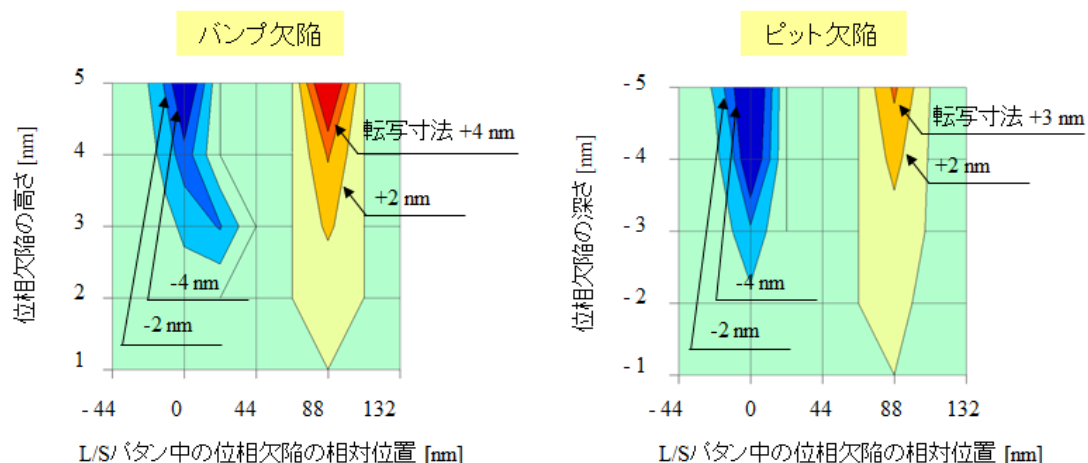


図 III.2.1.1-2-71 **図 III.2.1.1-2-70** に示した位相欠陥の伝搬角度が 6 度の転写寸法から、伝搬角度 0 度の転写寸法を差し引いた結果

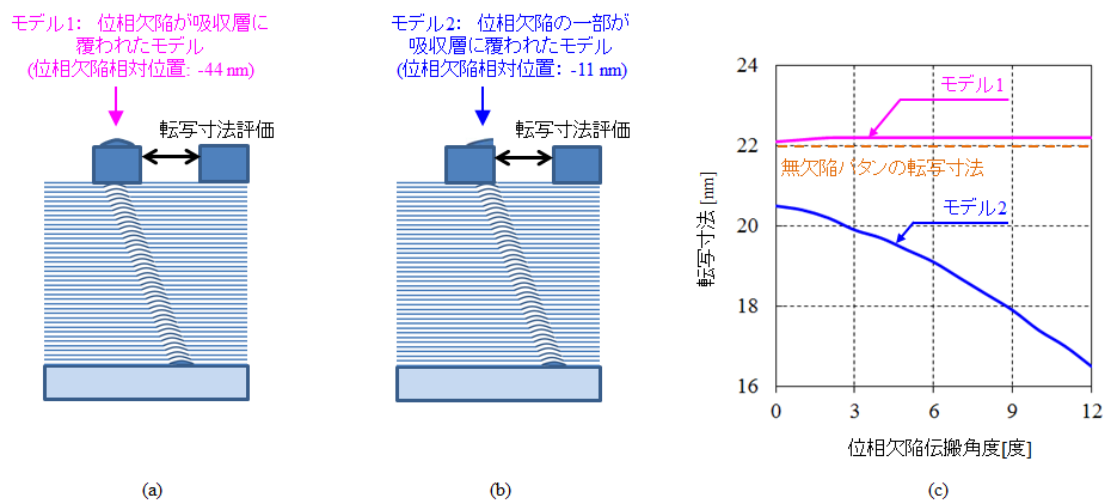
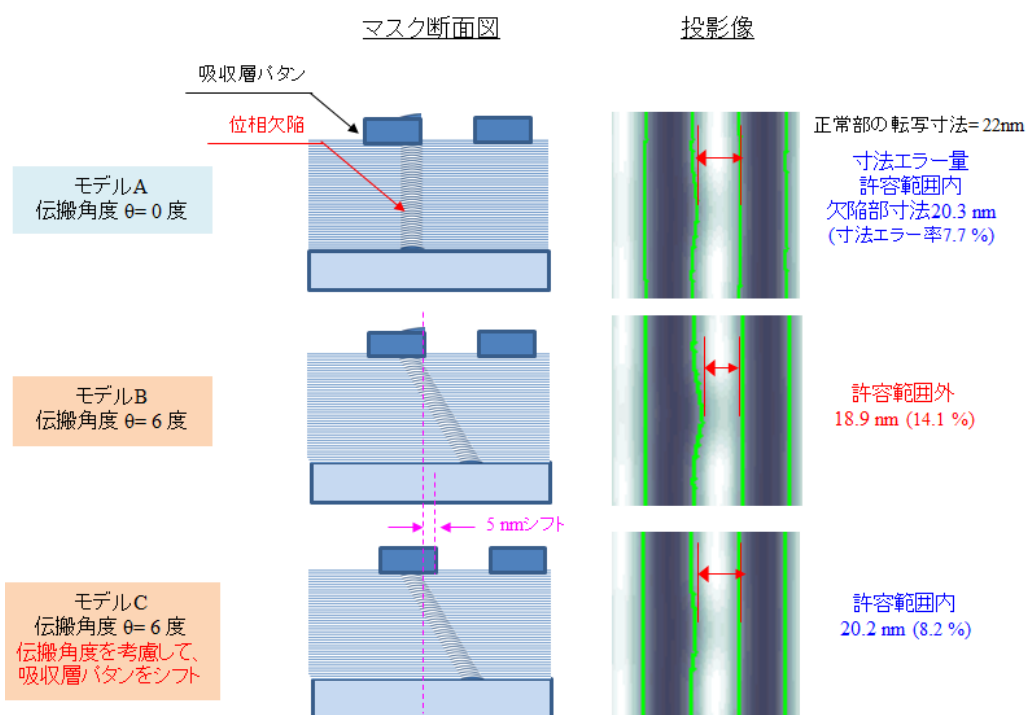


図 III.2.1.1-2-72 位相欠陥と吸収層パターンの相対と、位相欠陥の伝搬角度が転写寸法に与える影響を計算した結果 (a) 位相欠陥が吸収層パターンで覆われたモデル、(b) 位相欠陥の一部が吸収層パターンで覆われたモデル、(c) モデル 1 および 2 の位相欠陥伝搬角度が転写寸法に与える影響を計算した結果

位相欠陥の伝搬角度が特定できた場合、吸収層パターンの位置を適切にシフトさせることでウェハに転写されるパターン寸法に与える効果を計算により検証した。**図 III.2.1.1-2-73** は、位相欠陥を吸収層パターンで覆う際、位相欠陥の伝搬角度を考慮に入れた場合と入れない場合のパターン転写寸法を比較したもので、マスク断面図とウェハ面への投影像を表している。評価パターンはマスク上 hp 88 nm L/S (ウェハ上 hp 22 nm L/S)、位相欠陥のサイズは高さ 4 nm、半値全幅 50 nm

のバンプで、伝搬角度は0または6度とした。吸収層パターンと位相欠陥の位置関係は、パターンエッジから吸収層パターン側に-11 nmの位置とした。モデルAは伝搬角度が0度の場合で、この時ウェハ転写寸法は20.3 nmであった。正常部の転写寸法は22 nmなので転写寸法エラー率は7.7%と計算され、寸法エラー率の許容範囲10%を満足する。モデルBは伝搬角度が6度の場合で、ウェハ転写寸法は18.9 nm、エラー率14.1%と許容範囲外となった。ここで図III.2.1.1-2-69に示した位相欠陥の伝搬角度と実質的な位相欠陥の位置シフト量を考慮に入れ、モデルCとして吸収層パターンを位相欠陥の傾斜角度側に5 nmシフトさせた。この時ウェハ転写寸法は20.2 nm、エラー率8.2%と計算され、位相欠陥が転写パターン寸法に与える影響は予想通りモデルAと同等となることが確認できた。以上のことから、位相欠陥を吸収層パターンで完全に覆うことができない場合であっても、伝搬角度を考慮に入れて吸収層パターンを適切に配置することで、転写パターン寸法エラー量を許容範囲内にすることが可能であることが示された。



図III.2.1.1-2-73 位相欠陥の伝搬角度および吸収層パターンとの位置関係が転写パターンに与える影響を算出したモデルと投影像

<位相欠陥の構造が欠陥検出信号に与える影響>

位相欠陥が多層膜を伝搬する角度が、EUV光を用いた暗視野欠陥検査(ABI)信号に与える影響を評価した。まず多層膜基板全面の欠陥検査時に関しては、図III.2.1.1-2-74(a)バンプ欠陥、および(b)ピット欠陥のサイズおよび伝搬角度が検出信号強度に与える影響に示すように、位相欠陥の構造が欠陥検出信号に与える影響は無視できるほど小さい。これは、EUV光が位相欠陥の伝搬角度に応じて散乱しても、欠陥検査時のピクセルサイズが500 nmと大きく、散乱したEUV光は1つのピクセルで捕捉されるためである。これは後述、欠陥観察時のピクセルサイズ20 nmとした場合の検出信号ヒストグラムからもわかる。以上の計算結果から、図III.2.1.1-2-74の伝搬角度の範囲では欠陥検出感度に差は無いと想定される。

先に述べたとおり、位相欠陥がウェハに転写される位置は、位相欠陥の伝搬角度に依存し、位相欠陥を吸収層パターンで覆うには、高い精度で位相欠陥の実質的な位置を特定する必要がある。マスクを全面検査する際に使用する500 nmのピクセルサイズでは、欠陥を高い感度で検出す

ることができるが、欠陥の位置を正確に特定することはできない。そこで欠陥検出後のピクセルサイズ 20 nm の観察光学系を用いて、位相欠陥の伝搬角度起因の実質的欠陥位置の特定可否を、シミュレーションにより評価した。ピクセルサイズが小さくなると図 III.2.1.1-2-75 に示すように、同一暗視野信号強度分布であっても、検出信号強度ヒストグラムを解析することで欠陥位置の特定が期待できるためである。

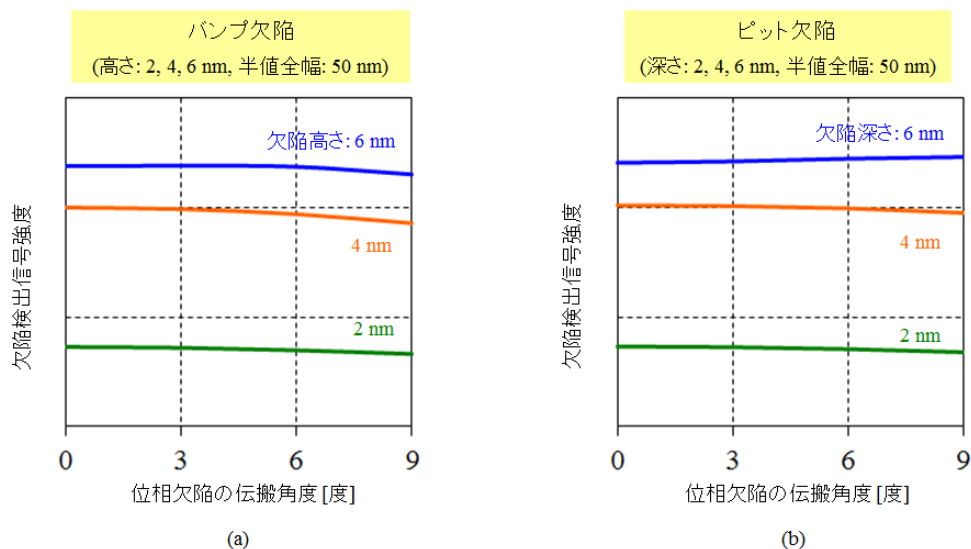


図 III.2.1.1-2-74 暗視野欠陥検査光学系における位相欠陥の伝搬角度が欠陥検出信号強度に与える影響(ピクセルサイズ 500nm) (a)バンプおよび(b)ピット欠陥に対する検出信号強度

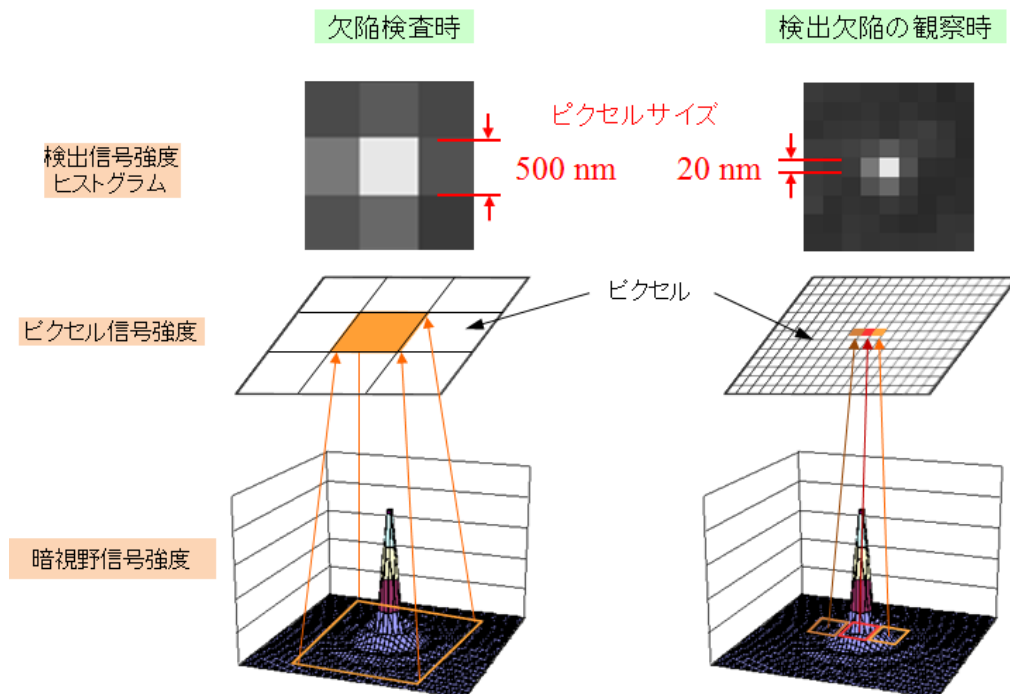


図 III.2.1.1-2-75 ピクセルサイズの違いによる、検出信号強度ヒストグラム概念図

計算に使用したモデルは、高さ 4 nm、半値全幅 50 nm のバンプ欠陥で、伝搬角度は 0 度と 6 度とした。図 III.2.1.1-2-76 に、伝搬角度 0 度と 6 度の位相欠陥の検出信号強度ヒストグラムを示す。

ヒストグラムの最も明るいピクセルは、伝搬角度 0 度と比較して 6 度の場合、伝搬方法と同じ右側に 1 ピクセルシフトした。得られたヒストグラムの光強度断面プロファイルを図 III.2.1.1-2-77 に示す。ここで、伝搬角度 0 度と 6 度の位相欠陥の位置を、信号強度の半値として定義すると、両位相欠陥の位置の差は 5.8 nm と算出された。図 III.2.1.1-2-69 に示した、伝搬角度による実質的な位置シフト量である、1 度につき 0.9 nm シフトするという計算結果と一致(差 0.4 nm)する結果が得られた。以上の結果から、EUV 光を用いた暗視野検査装置の欠陥観察光学系を用いることで、位相欠陥の伝搬角度起因の実質的な欠陥位置を特定することが可能であり、位相欠陥を吸収層パターンで隠すには、検査装置で特定した欠陥座標をもとに吸収層パターンを配置すればよいと言える。

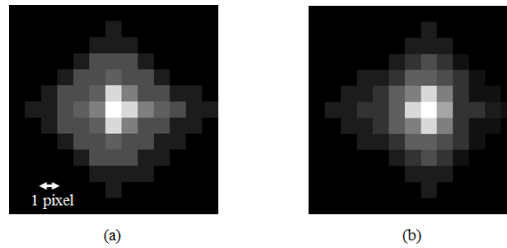


図 III.2.1.1-2-76 ピクセルサイズ 20 nm の光学系を用いて観察した、高さ 4 nm、半値全幅 50 nm のバンパ欠陥検出信号強度ヒストグラム計算結果 (a) $\theta = 0$ 度、(b) $\theta = 6$ 度

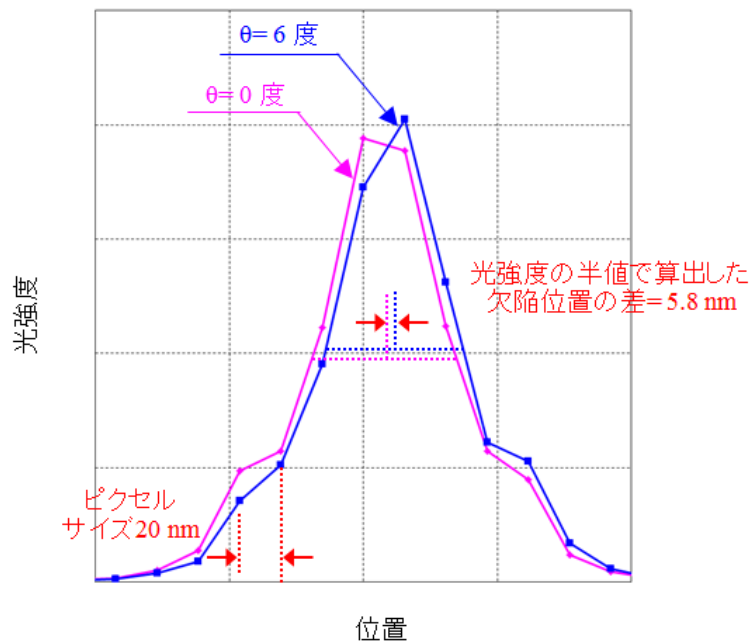


図 III.2.1.1-2-77 ピクセルサイズ 20 nm の光学系を用いて観察した、 $\theta = 0$ 度と 6 度の位相欠陥の検出信号強度ヒストグラムの光強度断面図

(iii) まとめ

Q_z 基板表面の凸形状が多層膜中を斜め方向に伝搬する位相欠陥を TEM により観察した。位相欠陥の伝搬角度とサイズおよび吸収層パターンとの位置関係が転写寸法に与える影響を計算により求めた。位相欠陥の伝搬角度 1 度につき、実質的な欠陥位置は傾斜方向に 0.9 nm シフトした。位相欠陥が吸収層パターンに完全に覆われた場合、転写寸法は位相欠陥の伝搬角度に影響を受けないが、吸収層パターンに覆われていない場合、転写寸法は伝搬角度の影響を大

きく受けた。伝搬角度が事前にわかっている場合、伝搬角度に応じて吸収層パターンをシフトさせることで、欠陥が転写されなくなった。

位相欠陥の伝搬角度が、ABI の欠陥検出信号に与える影響を計算により求めた。マスク全面検査時に使用するピクセルサイズ 500 nm の光学系を用いた場合、欠陥検出感度は伝搬角度に依存しない。欠陥観察時に使用するピクセルサイズ 20 nm の光学系を用いた場合、ピクセル強度を解析することで、伝搬角度に応じた実質的な欠陥位置を特定できた。位相欠陥を吸収層パターンで隠すには、ABI で特定した欠陥座標をもとに吸収層パターンを配置すればよいことがわかった。

(c) 露光実験による転写性評価

(i) 目的

EIDEC では、EUV リソグラフィにおいてウェハ工程において問題となる多層膜欠陥(位相欠陥)を検出することを目的に ABI 装置の研究・開発を行ってきた。半導体の世代が進むにつれて、パターンは微細になり、転写影響を与える位相欠陥のサイズも小さくなる傾向となることが想定されている。ABI 装置の位相欠陥検出性能が半導体に各世代に対して十分な性能を有しているかどうかを確認することが重要である。これまで、ABI 装置で検出した位相欠陥がウェハ上にどのように転写し、レジストパターンに影響を及ぼすかの影響については、コンピューターシミュレーションを通じて検証を行ってきた。これまでのシミュレーションの結果より、ABI 装置は Hp16nm ノードで転写影響を及ぼす位相欠陥に対し十分な検出性能を有していることが確認されている。また、ABI 検査で得られる各位相欠陥の検出信号強度 (DSI : Defect Signal Intensity) はウェハ転写性と整合性があることが確認されている。

しかし、コンピューターシミュレーションでは、使用するレジストの特性、現像特性等の影響までは考慮することが困難である。そこで、今回、imec との EUV ブランク欠陥の転写性についての共同評価により、実際の EUV スキャナーを使用した露光評価を実施した。本転写評価では、Backward correlation と Forward correlation という2種類の検証を行った。前者は、転写されたウェハパターンをウェハ用欠陥検査装置で検査を行った後、EUV フォトマスクの欠陥によって生じたウェハ欠陥を抽出し、それらが ABI 検査で検出されていたか確認する方法である。つまり、ウェハ転写影響を有する位相欠陥を ABI 装置が検出できたかどうかの検証が目的となる。後者は、ABI 検査で検出した位相欠陥の DSI とウェハ転写性の関係性の検証を行うことが目的となる。また、今回の評価では、サンプルの位相欠陥に、自然欠陥を使用した。

図 III.2.1.1-2-78 に2種の評価手順と評価パターンレイアウトを示した。

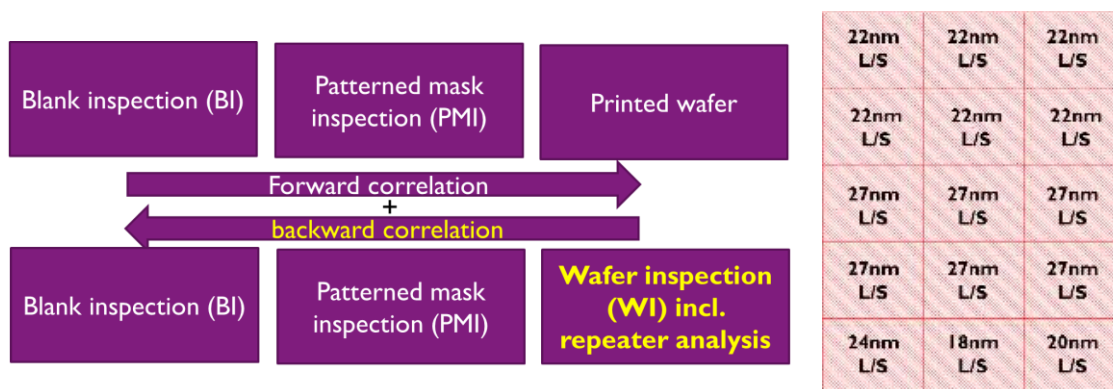


図 III.2.1.1-2-78 Backward と Forward correlation の評価手順評価、パターンレイアウト
※本評価では、Hp22nm,27nm のエリアを使用

(ii) 評価条件

今回の評価で用いた主な評価条件を以下に記した。

ウェハ転写条件 EUV スキャナー: NXE3300、NA: 0.33、 σ : 0.88、照明: Conventional

評価パターン L/S パターン(1:1)、サイズ: Hp27nm, 22nm(ウェハ上×1)、

評価エリア(マスク上×4、両パターンサイズ共通): 104mm×52.8mm

(iii) Backward correlation の評価結果

本検証では、ウェハ欠陥検査で検出した欠陥のうち、EUV フォトマスクの欠陥に起因するものを抽出する必要がある。そこで、ウェハに転写されたDie パターンにおいて、複数のDie パターン内で同一個所に発生する欠陥を EUV フォトマスク起因として抽出した。図 III.2.1.1-2-79 にウェハ転写欠陥、および ABI 検出欠陥、パターンマスク検査検出欠陥との照合結果を示す。

26 defects detected with WI

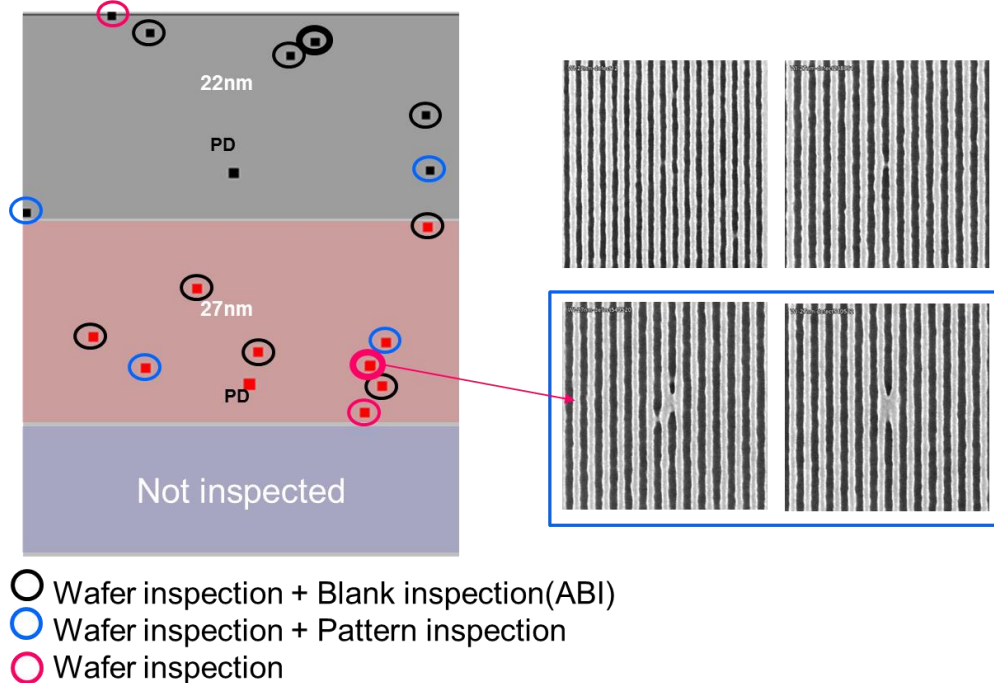


図 III.2.1.1-2-79 ウェハ転写欠陥と ABI 検出欠陥、パターンマスク検査検出欠陥の照合

ウェハ検査の結果、合計で 26 個の欠陥が EUV フォトマスク起因の欠陥として抽出された。このうち、4 個はパターンマスク検査で検出した欠陥と一致していることから、吸収層パターン欠陥により生じたものと判定した。図中の青丸で示した欠陥となる。また、18 個は ABI 検出欠陥と一致した。図中の黒丸で示した欠陥となる。ABI 検出欠陥との照合では一か所で密集状欠陥(10 個)があり数としては多い結果であった。26 個のウェハ欠陥中、4 個は ABI 検査、パターンマスク検査での照合で一致が確認されなかった。図中では赤丸で示した欠陥となる。可能性として、①ABI 検査およびパターンマスク検査での見逃し、②サンプルマスク上に付着したパーティクルによって生じたことが考えられる。②の可能性をがあるか確認するため、サンプルマスクを洗浄した後に、再びウェハ転写を行い、同一個所に欠陥が発生するか確認した。結果として、同一個所では、転写欠陥が見られなかったことから、これらの欠陥は、サンプルマスクの輸送中、または EUV スキャナー内の発塵により付着したパーティクルに起因していると考えられる。以上の結果より、ウェハ欠陥検査で検出

した欠陥は、ABI 検査、およびパターンマスク検査で検出されていたことになり、転写影響を及ぼす位相欠陥欠陥は全て ABI 検査で検出されていたと結論付けた。

(iv) Forward correlation の評価結果

本評価では、ABI 検査で検出された各位相欠陥の DSI と転写影響の関係について検証した。図 III.2.1.1-2-80 に、Hp27nm パターンでの DSI と転写の関係をしめした。ここでは便宜上、DSI の大ききでクラス分けして示した。Class1 が DSI が最も小さいカテゴリーで、数値が大きくなるにつれ DSI が大きくなること示す。大きな傾向として、DSI が大きくなるにつれ、転写性が大きくなるのがわかる。Class1 で検出した欠陥は、大半の欠陥が非転写であり転写性も極めて低い結果であった。これに対し、Class9 以上では、検出される欠陥数自体は少ないものの全ての欠陥が転写された結果が得られた。Class2 から Class8 では、転写性が約50%付近でばらけており、明確な DSI と転写性の傾向がみられなかった。原因として、位相欠陥サンプルとして自然欠陥を使用しているため欠陥位置がランダムであり、ベースパターンとして使用した1:1ラインスペースパターンとの相対的な位置関係がランダムとなった結果、位相欠陥が吸収層パターンに覆われる現象がランダムに発生したことが推定される。Class1 では、ここにカテゴライズされた欠陥の DSI が小さく、吸収層パターンに覆われるかどうかに関わらず大半の欠陥が転写されなかったものと推定される。逆に、Class9 以上では、各欠陥の元々の転写影響が大きく、吸収層パターンで覆いきれなかったため転写性が 100%となった推定する。この結果より大まかな DSI と転写性の関係は確認できたが、上記のとおり、吸収層パターンとの位置関係により、明確な関係性を確認できなかった。そこで、位相欠陥と吸収層パターンの相対位置について検証を行い、DSI と転写性の関係を明確にする検討を行った。

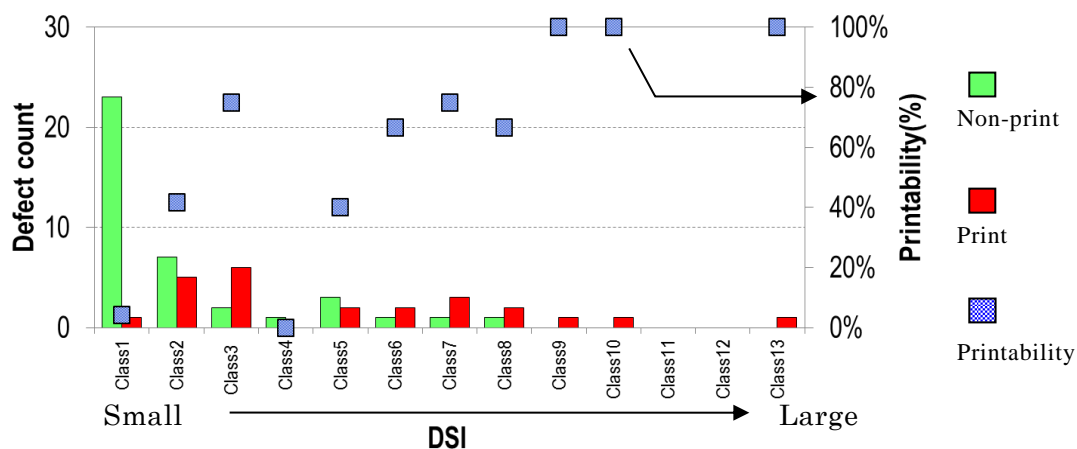
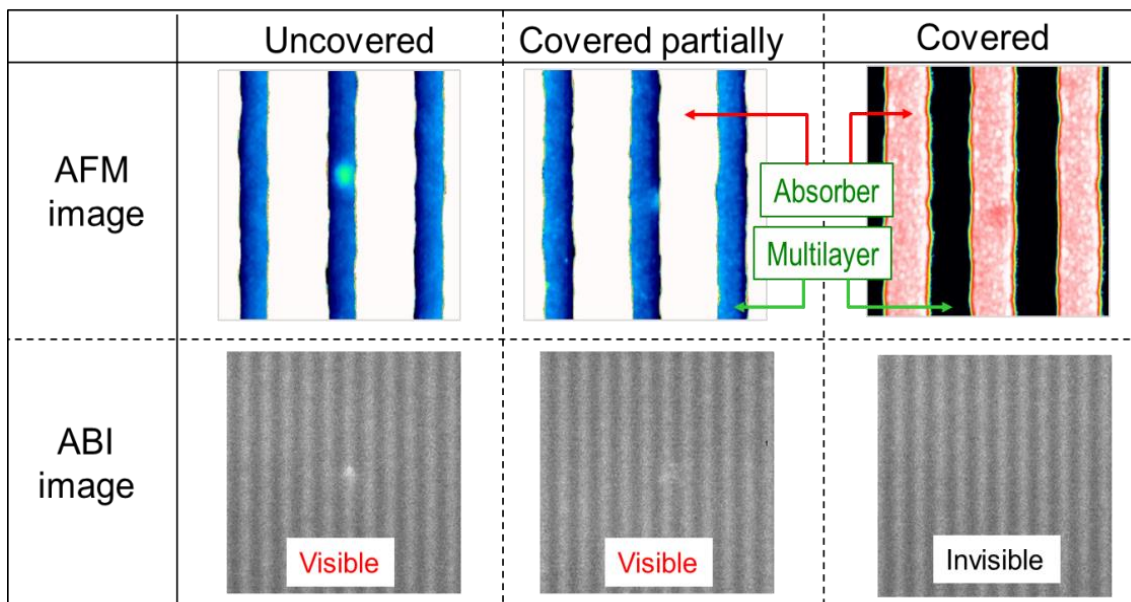


図 III.2.1.1-2-80 DSI とウェハ転写の関係

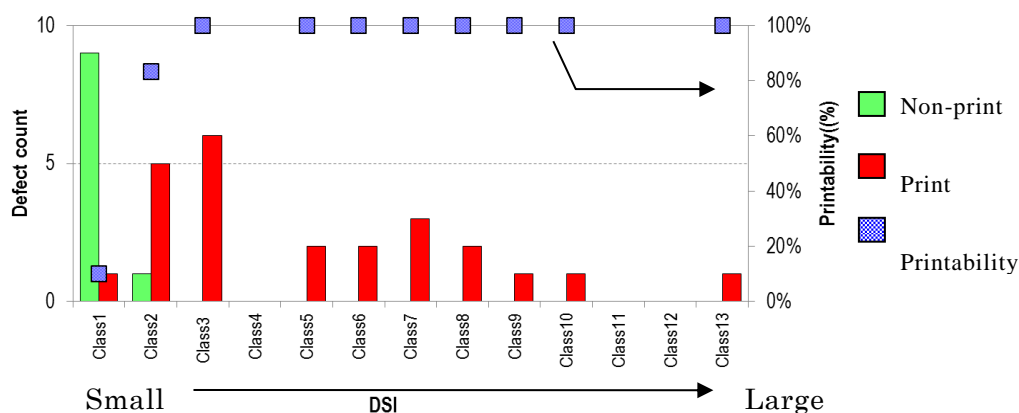
本評価では、位相欠陥と吸収層パターンの相対位置を確認する手法として、ABI 高倍率観察像を用いる方法を検討した。ABI 装置では、位相欠陥位置精度向上を目的に高倍率観察機構を備えており、位相欠陥が吸収層パターンで覆われていない場合、その部分からの散乱光をとらえ、散乱光像を形成すると考えられる。逆に、位相欠陥の大半が吸収層パターンに覆われている場合、散乱光を生じないと推定されるため、この機能を用い、位相欠陥が吸収層パターンに覆われているかどうか確認することとした。図 III.2.1.1-2-81 に、位相欠陥と吸収層パターンの相対位置関係と ABI 像の見え方をしめした。この図で、位相欠陥と吸収層パターンの相対位置関係について、代表的な3形態、①吸収層パターンに覆われていない場合(Uncovered)、②部分的の覆われている場合(Covered partially)、③大半が覆われている場合(Covered)、を示した。3形態それぞれの相対位置関係は、AFM 測定により確認した。図の ABI 像からわかるとおり、位相欠陥が覆われてい

ない場合は、散乱光が明確に確認できることができた。部分的に覆われた場合は、やや明瞭さは劣るものの確認することができるのに対し、覆われた場合には、全く確認することができなくなることが確認された。この傾向を利用し、位相欠陥の位置を ABI 観察にて確認し、位相欠陥からの散乱光像が確認できない場合は、位相欠陥が吸収層パターンに覆われていると判定した。



図Ⅲ.2.1.1-2-81 位相欠陥と吸収層パターンの相対位置関係とABI像

上記の方法を用いて、吸収層パターンに覆われた位相欠陥 (Covered 欠陥) を識別し、先の図Ⅲ.2.1.1-2-80のグラフから除去し、図Ⅲ.2.1.1-2-82に示した。Covered 欠陥の除去前後のグラフを比較した場合、非転写の欠陥数が全体的に減少し、転写率が大きくなっていることがわかる。特に Class3 から Class8 では非転写であった位相欠陥は全て Covered 欠陥と識別され除去された結果、転写性が 100%に大きく上昇した。つまり、Class3 以上の位相欠陥は、元来、転写影響を有する位相欠陥であり、吸収層パターンで覆われない限りは転写影響を及ぼすことが確認されたこととなる。Class1 と Class2 では、転写欠陥と非転写欠陥が混在していることから、DSI 値より設定される転写性の境界がこのエリアに存在することが推定される。



図Ⅲ.2.1.1-2-82 DSIとウェハ転写の関係(Covered 欠陥除外)

そこで、更に詳細に DSI と転写性の関係を確認するために、この区間の欠陥を DSI 値順で並べ、転写が確認された最少 DSI の位相欠陥の前後の欠陥について AFM 測定を行い、詳細な欠陥情報を得た。図 III.2.1.1-2-83 に AFM 測定による欠陥情報、および DSI 値の相対値目安を示した。

転写が確認された最少 DSI 欠陥は、No4 であるが、それよりも DSI が大きい No5、No7 は非転写であった。この原因として、転写欠陥 (No4、No6、No8) と非転写欠陥 (No5、No7) の吸収層パターンとの位相欠陥相対位置に着目した場合、非転写欠陥では、位相欠陥がパターンに覆われている割合が転写欠陥と比較して大きい傾向が AFM 像からみてとれることがわかる。可能性として、この被覆割合の差が転写性の差を生じさせていると考えられる。非転写欠陥であった No5、No7 欠陥も、被覆割合が小さくなる位置であった場合には転写されたと考えられる。これらの結果から、DSI から転写性の境界を求めた場合、少なくとも No4 欠陥の DSI より大きい場合には、転写影響があるという暫定的な境界を設定できると考える。

Forward Correlation の結果より、これまでコンピューターシミュレーションのみで確認されていた DSI と転写影響の関係、DSI 値が大きいほど転写影響も大きくなるという事象について、実転写評価を通じて検証することができたことは、大きな成果であったと考える。

No	1	2	3	4	5	6	7	8
Non print /Print	Non print	Non print	Non print	Print	Non print	Print	Non print	Print
DSI (Sorted by DSI value)								
AFM image								
Defect type	Bump	Pit	Pit	Pit	Pit	Pit	Pit	Pit
Height/Depth(nm)	2.2	-1.5	-0.9	-2.0	-2.1	-2.4	-2.0	-2.0
Width(nm) *FWHM	43	46	70	54	52	57	43	49

図 III.2.1.1-2-83 位相欠陥情報と転写性の比較

[3] シミュレーション

(a) 位相欠陥転写性の欠陥サイズ依存性

(i) シミュレーションの条件

本シミュレーションでは、マスクに残存する位相欠陥がウェハ上 28 nm~16 nm の転写パターンに与える影響を、転写パターンの寸法変化 (CD 誤差) として解析した。本解析で使用したシミュレータは、DPS (Defect Printability Simulator、Luminescent Technologies Inc.) である。

図 III.2.1.1-2-84 は、本評価で使用する EUV マスクのモデルと、転写パターンの CD 誤差を表すスペース寸法誤差 (%) の定義を示す。EUV マスクは、基板の上に Mo/Si を 40 対積層した多層膜と厚さ 2.5 nm の Ru キャッピング層を成膜した後に、厚さ 66 nm の吸収層パターンを設ける構造とした。また、位相欠陥が転写パターンの CD 誤差に与える影響度の欠陥サイズ依存性の大局的な傾向を把握するために、ここで取り扱う位相欠陥の構造は、基板表面の凹凸がそのまま多層膜表面まで伝搬するコンフォーマルモデルを採用し、その大きさを、欠陥の高さ D あるいは深さ H と半値全幅 (FWHM) で定義した。露光条件は、EUV 露光装置 NXE:3100 と露光装置 NXE:3300 の条件とし、開口数 (NA) を 0.25 と 0.33 の 2 種類を仮定した。また、照明条件も、有効光源の形状

が円形である円形照明 ($\sigma=0.8$)とL&S パターンの解像を強調するダイポール照明 ($\sigma=0.4/0.8$, x 開口角度=90 度)の2種類を状況に応じて使い分けた。更に、マスク照明光の主光線入射角度は6度とし、入射面はラインパターンと平行とした。

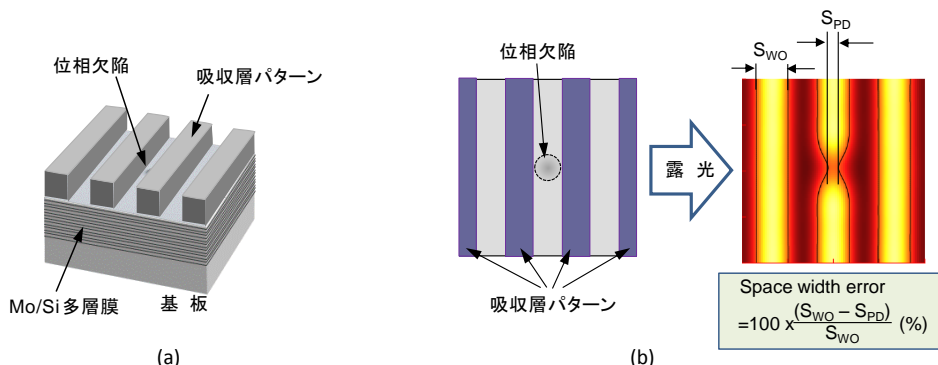


図 III.2.1.1-2-84 シミュレーションモデル;

(a) EUVLマスク構造、(b) 転写性評価のための CD 誤差の定義

(ii) 計算結果

図 III.2.1.1-1-85 は、2種類の露光条件に対して、幅 60 nm、高さ 1.5 nm のバンプ位相欠陥、及び、幅 60 nm、深さ 1.5 nm のピット位相欠陥がウェハ上 26 nm, 24 nm, 22 nm L&S パターンに与える影響度のフォーカス位置依存性を計算した結果である。

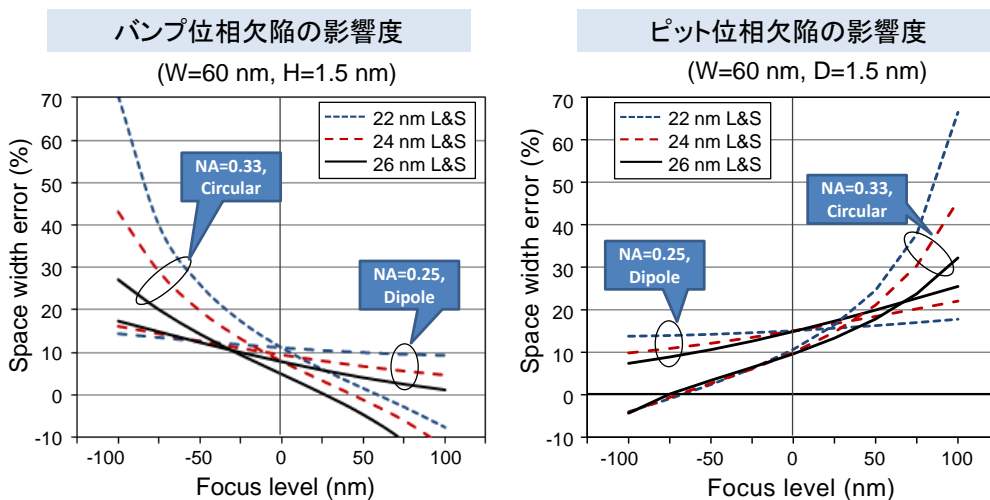


図 III.2.1.1-1-85 位相欠陥影響度の計算例。露光条件は、NA=0.25, 0.33 の2種類

前述の2種類のNAの条件で同等の解像性能が得られるように、NA=0.25ではダイポール照明を、NA=0.33では円形照明を仮定した。同図から、バンプ位相欠陥の影響は負のデフォーカスで大きくなり、ピット位相欠陥の影響は逆に正のデフォーカスで大きくなること、それらの量は露光照明条件で大きく変化すること、ダイポール照明では、転写パターンの寸法が大きいても必ずしも欠陥インパクトが小さいとは限らないこと、がわかった。そこで本節のシミュレーションでは、バンプ位相欠陥の影響度は-75 nmのデフォーカス、ピット位相欠陥の影響度は+75 nmデフォーカスの条件で評価することとする。

ウェハ上の hp 22 nm および 16 nm L&S パターンに対して、更に詳細な位相欠陥影響度を理解することを目的に、位相欠陥による CD 誤差を位相欠陥の幅と高さ/深さの関数として計算した。hp

22 nm L&S パターンに対する露光照明条件は、NA=0.25 かつダイポール照明と NA=0.33 かつ円形照明の2種類を、hp 16nm L&S パターンに対しては、NA=0.33 かつダイポール照明とした。結果を図 III.2.1.1-2-86 に示す。

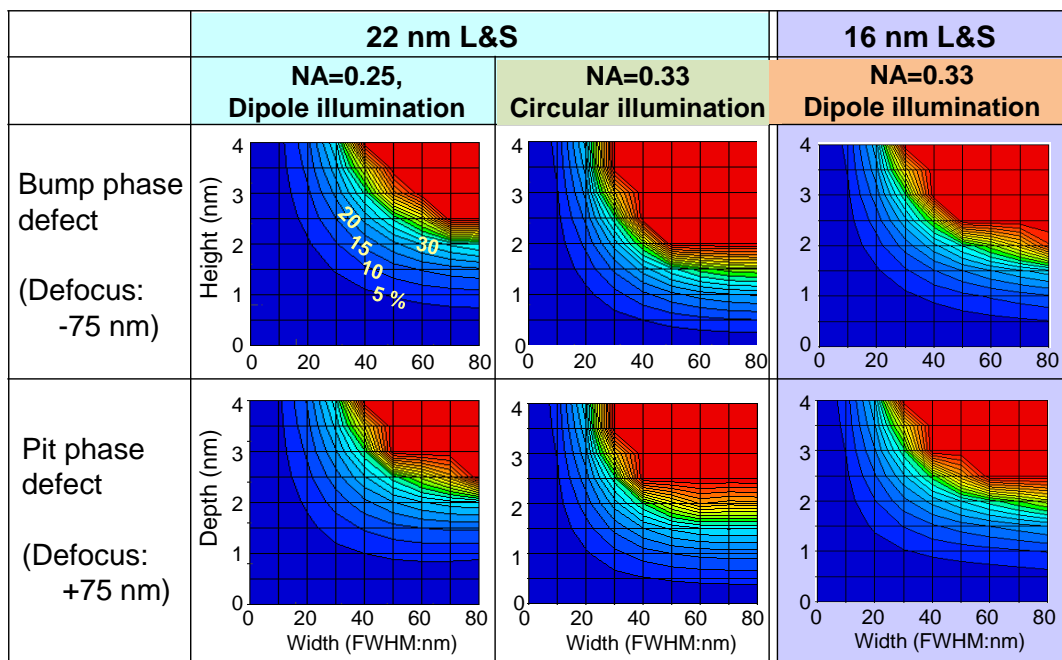


図 III.2.1.1-2-86 ウェハ上パターンのCD誤差の位相欠陥サイズ依存性計算結果

ここで、定義からCD誤差 100%とは転写するパターンにブリッジ欠陥が生じたことを示す。同図から、同一のCD誤差(例えば10%)を与える位相欠陥の幅と高さあるいは深さの組み合わせは一つの等高線上に多数存在すること、バンプ位相欠陥とピット位相欠陥のサイズが同一でも、両者のインパクトは異なること、更に照明条件が異なるとインパクトも異なること、が分かる。ここで、それぞれの寸法のL&Sパターンに対して10%のCD誤差を与える位相欠陥のサイズの代表例を示すとすれば、例えばhp 22 nm L&Sでは欠陥幅60 nm、欠陥高さ1.2 nm、hp 16 nm L&Sでは欠陥幅50 nm、欠陥高さ1.0 nmとなる。この値は、ABI装置の検出感度目標値が妥当であることを示している。

(iii) まとめ

位相欠陥転写性(プリンタビリティ)を、位相欠陥が吸収層パターン転写像に与える寸法変化(CD誤差)として表し、シミュレーションによりCD誤差の欠陥サイズ依存性や欠陥位置依存性を明らかにした。本シミュレーション解析では、hp 26 nm~16 nm世代のEUVマスクパターンのCD誤差を、欠陥の幅と高さ(深さ)の関数として評価した。また、露光照明条件依存性が強いことも示し、ダイポール照明は円形照明より転写性が低いことを示した。

(b) EUV転写時の欠陥像強度への影響に関するシミュレーション

(i) 目的

位相欠陥のABI検査信号への影響を見積もる指標のひとつとして、多層膜表面の欠陥体積が使用される。両者の関係は概ね比例関係となる場合が多いが、比例関係とならない場合があることも知られている。本シミュレーションでは、欠陥体積以外の要素として欠陥形状がABI検査信号強度に及ぼす影響について確認することを目的とする。また、合わせてウェハ転写時の欠陥像転写に及ぼす影響についても同様に確認する。

(ii) 内容および成果

以下に本シミュレーションで用いた欠陥モデルについて説明する。欠陥体積の影響を除外するために本シミュレーションでは、欠陥体積一定の条件の元で、欠陥形状を3通りの方法(Case1～Case3)で変化させた。図 III.2.1.1-2-87 に各々のケースについて形状変化の条件を示した。Case1:欠陥側壁角(無欠陥の多層膜表面と欠陥側壁が形成する角度)を $0.5^{\circ} \sim 8.0^{\circ}$ に変化させ、高さ、幅は、側壁角の変化に従って変動する場合を想定した。Case2:欠陥底面の幅を一定に保った状態で欠陥上面の面積を変化させ、基本的な欠陥形状(円錐か円錐台か)、側壁角、高さは上面の面積に連動して変動する場合を想定した。Case3:欠陥高さを一定に保った状態で欠陥上面の面積を変化させ、基本的な欠陥形状(円錐か円錐台か)、側壁角は上面の面積に連動して変動する場合を想定した。

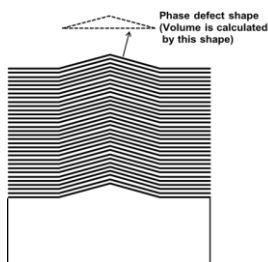
各欠陥モデルの共通条件を以下に示した。

【欠陥モデル共通条件】

欠陥体積: 2618nm^3 (FWHM: 50nm , Height: 1.0nm の円錐型欠陥モデルより設定)

多層膜積層モデル: コンフォーマルモデル

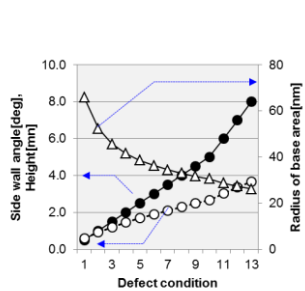
欠陥形状: 円錐型、円錐台型を想定



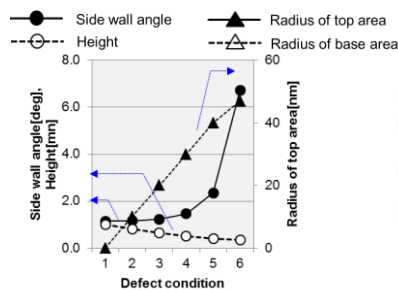
(a)位相欠陥モデル

	Case1	Case2	Case3
Fixed value	Volume, Basic shape	Volume, Base area	Volume, Height
Changed value	Height, Base area, Side wall angle	Height, Side wall angle, Basic shape	Base area, Side wall angle, Basic shape
Variation of defect shape			

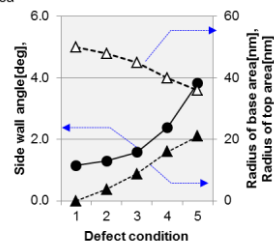
(b)3種類の位相欠陥形状変化



Case1



Case2



Case3

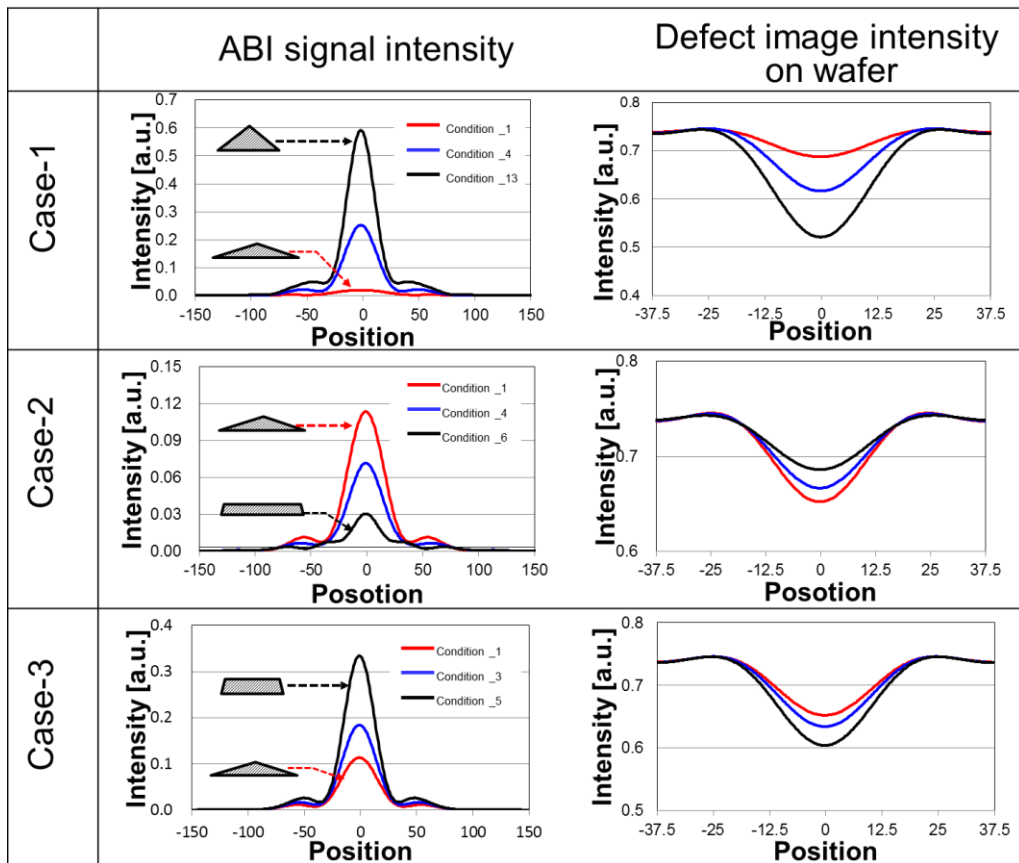
(C)各欠陥条件のパラメータ

図 III.2.1.1-2-87 位相欠陥モデルと各欠陥モデル条件

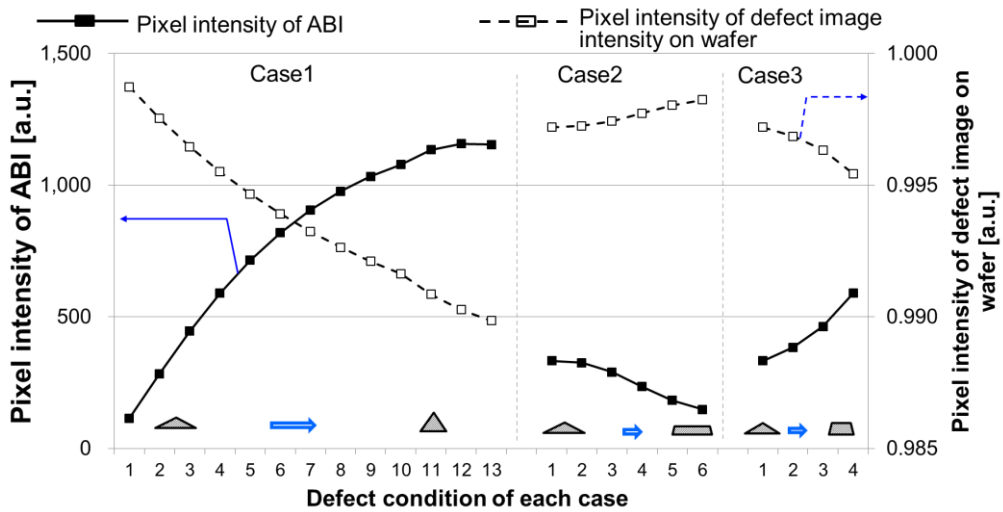
シミュレーション条件を、表 III.2.1.1-2-88 に示した。図 III.2.1.1-2-89 に、各 Case の代表的な信号強度を示した。図 III.2.1.1-2-90 にピクセル強度を示した。ピクセル強度は上表に記載のとおり、ABI 信号強度では $500\text{nm} \times 500\text{nm}$ の範囲での積算強度とし、ウェハ転写の欠陥像強度では、 $125\text{nm} \times 125\text{nm}$ の範囲での積算強度とした。

表Ⅲ.2.1.1-2-88 シミュレーション条件

シミュレーション条件／計算条件	
基本条件	シミュレータ:DPS(ルミネッセントテクノロジー社製) 計算エリア : 1000nm×1000nm(ブランク上)
ABI 信号強度	検査条件 : 検査波長 13.5nm NAinner =0.1 NAouter=0.27 ピクセル強度:積算エリア 500nm×500nm
ウェハ転写での欠陥像強度	露光条件 : イルミネーション条件 通常円形照明 NA=0.33 $\sigma=0.8$ 入射角=6度 波長=13.5nm ピクセル強度:積算エリア 125nm×125nm ※各ピクセル強度は、無欠陥の場合のピクセル強度で規格化



図Ⅲ.2.1.1-2-89 信号強度



図Ⅲ.2.1.1-2-90 ピクセル強度

【Case1】

ABI 信号強度では、欠陥条件が、条件 1 から 13 へ変化してゆくにつれ(側壁角度が、 0.5° から 8.0° に大きくなるにつれ)信号強度が大きくなる傾向であることが分かる。言い換えると、欠陥体積が同一であった場合、欠陥側壁角が大きい方の ABI 信号強度が大きくなり、検出し易くなる傾向と考えられる。ウェハ転写での欠陥像強度では、欠陥条件が、条件 1 から 13 に変化するにつれ、強度が小さくなる傾向であることが分かる。つまり、欠陥側壁角が大きい方が欠陥による転写影響が大きくなる傾向であるといえる。

上記結果を説明するために、以下の式が適用できるものと仮定する。

公式 : $NA = \sin \theta$ NA:シミュレーションで用いた ABI 光学系の NA、および露光機の NA
 θ : 欠陥に入射された光と、欠陥から反射された光の成す角度

本シミュレーションで用いた ABI 暗視野光学系の NA ($NA_{outer}:0.27, NA_{inner}:0.1$) を上記公式に当てはめた場合、本光学系は主に欠陥側壁角が $2.9^\circ \sim 7.8^\circ$ の領域である場合に反射光を捕え易いといえる。これをシミュレーション結果にあてはめると、条件 6(側壁角 3.0 度)~13(8.0 度)に相当し、シミュレーション結果においてもこの領域では ABI 信号強度が大きくなっていることから公式と光学系から計算した結果と矛盾しないことがわかる。同様にウェハ転写時欠陥像強度に関して検討すると、計算式より欠陥側壁角が 2.4 度以上の範囲では、欠陥像強度がより小さくなる傾向(欠陥影響が大きくなる)となり、これをシミュレーション結果に当てはめると、条件 5(側壁角 2.5 度)以上の領域に相当する。シミュレーション結果においても、この領域では欠陥像強度が小さくなっており、公式と光学系から計算した結果と矛盾しない結果であった。

上記検討より、欠陥側壁の角度により、ABI 信号強度、欠陥像強度とも影響される可能性があることが示唆された。

【Case2】

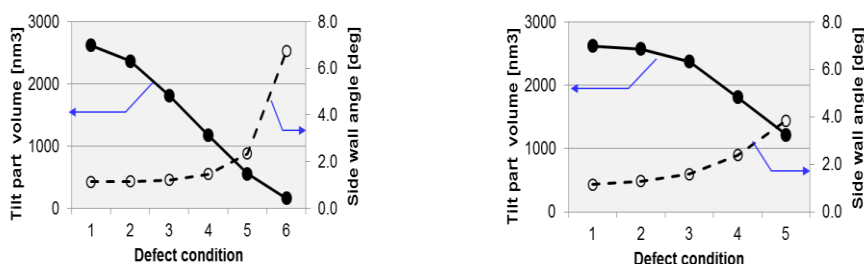
Case2 では、欠陥体積一定の条件に加え欠陥底面のサイズを一定にした状態で、欠陥上面のサイズを変化させた。条件 1 の円錐型から、欠陥上面のサイズを大きくし、円錐台型へと変化させた。この変化に伴い、欠陥高さは徐々に低くなる。円錐型と円錐台型で欠陥内部の多層膜の状況を比較した場合、円錐では欠陥内部の多層膜が側壁角に合わせて傾いた状態であるの対し、円錐台では、中央部の平な部分では、欠陥内部の多層膜は無欠陥部と同様に平坦となっていることとなる。ABI 強度では、欠陥条件が条件 1 から 6 に変化してゆくにつれ、信号強度が小さくなる傾向であることが分かる。欠陥体積が同一であっても、欠陥形状が円錐型から円錐台型になり、かつ、

欠陥高さが低くなるにつれ、信号強度が小さくなる傾向であるともいえる。ウェハ転写での欠陥像強度では、欠陥条件が、条件 1 から 6 に変化するにつれ、強度が大きくなる傾向であることがわかる。欠陥形状の変化に伴い、ウェハ転写時には位相欠陥の影響が緩和される方向に変化することとなる。

【Case3】

Case3 では、欠陥体積および高さを一定にした状態で、欠陥上面のサイズを変化させた。条件1 の円錐型から、欠陥上面のサイズを大きくし、円錐台型へと変化させた。この変化に伴い、欠陥底面のサイズは徐々に小さくなる。ABI 強度では、欠陥条件が条件 1 から 5 に変化してゆくにつれ、信号強度が大きくなる傾向であることが分かる。ウェハ転写での欠陥像強度では、欠陥条件が、条件 1 から 5 に変化するにつれ、強度が小さくなり、欠陥影響が大きくなる傾向であることがわかる。

Case2、Case3 のシミュレーションでは、欠陥モデルの形状が円錐型から円錐台型に変化しており、円錐型では欠陥内部に多層膜が平坦な部分は存在しないのに対し、円錐台型では、多層膜が平らな部分と傾いた部分を併せ持つこととなる。平らな部分では、位相差は無欠陥部との高さの違いのみで生じるのに対し、傾いた部分では、高さの違いおよび傾いた多層膜の影響によっても生じるものと推測する。よって、欠陥内の傾いた部分の割合が多い程、位相差影響は大きくなる可能性が考えられる。そこで、Case2、Case3 について、信号強度に影響すると考えられる、傾いた部分の体積変化と側壁角の変化について集計し、**図 III.2.1.1-2-91** に示した。Case2 と Case3 を比較した場合、傾斜部分の体積が Case2 では欠陥条件が変化するにつれ急激に減少しているのに対し、Case3 では Case2 程顕著な減少は見られない。同時に両 Case において、側壁角の上昇が生じており、両要素の相互作用により信号強度の増減が生じるものと推測する。



(a) Case2

(b) Case3

図 III.2.1.1-2-91 傾斜体積と側壁角

(iii) まとめ

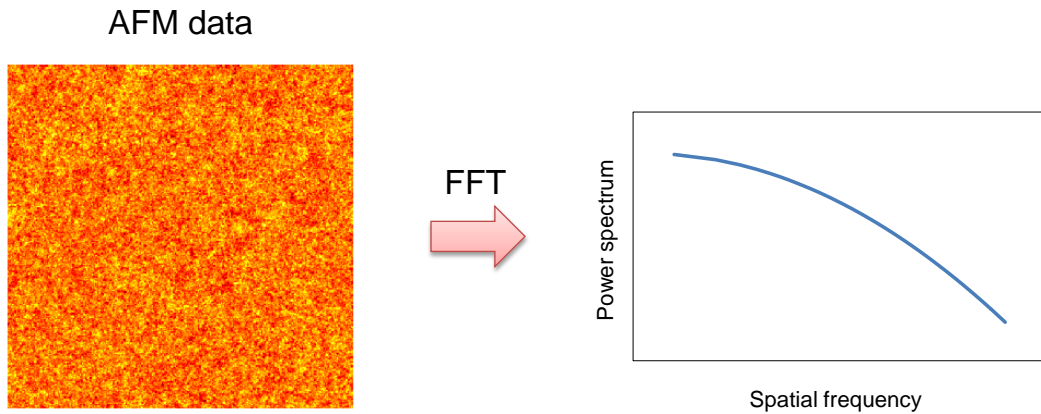
本シミュレーションの結果より、位相欠陥が ABI 信号強度、ウェハ転写での欠陥像強度に影響を及ぼす要因として欠陥体積以外に、欠陥側壁角等の要因が大きく影響している可能性があることが示唆された。本シミュレーションは、理想型の位相欠陥モデルを使用したものであるが、今後、実験を通じシミュレーションより得られた知見と比較し、更に知見を得ることにより、ABI 装置の位相欠陥検査時の検査精度を更に向上することに寄与できると考える。

(c) ラフネスと欠陥インパクトとの関係の検討

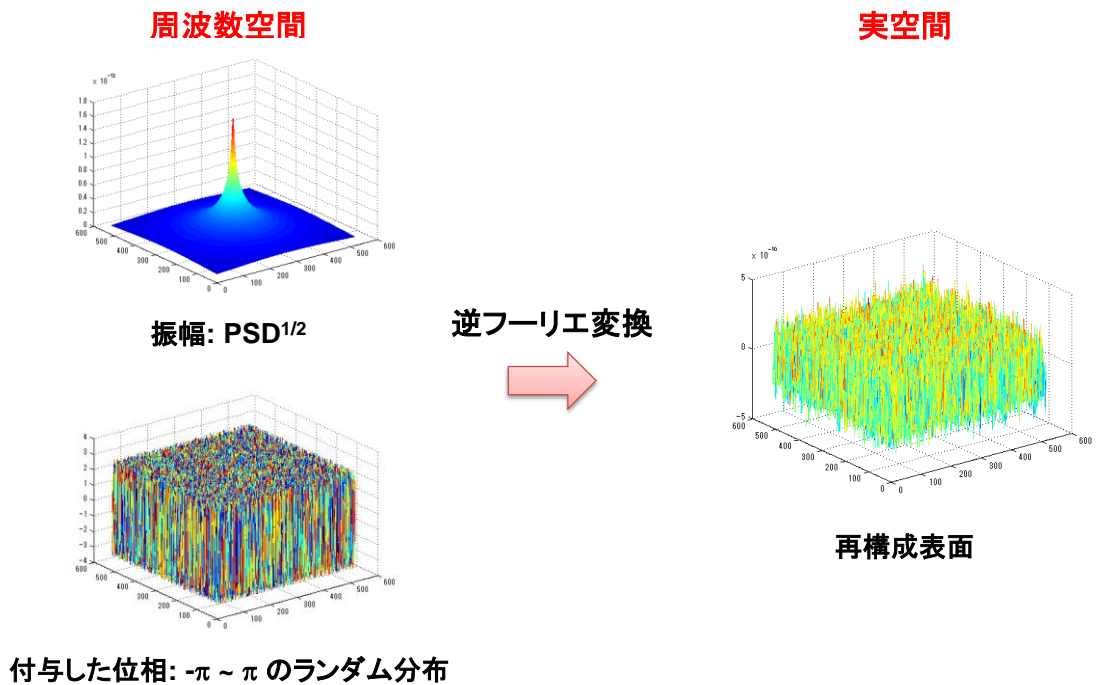
マスクの表面ラフネスが、露光装置で投影される吸収体パターン転写像に与える影響を、シミュレーションにより評価した。表面ラフネスの大きさは rms 値で表すこととするが、途中の解析ではその空間周波数特性を示す PSD(Power Spectral Density)を利用した。

(i) 表面ラフネスの PSD

実際のブランクをAFMで測定し、得られたラフネスの高さプロファイルをFFT処理することにより、ラフネスの Power Spectral Density (PSD)を求めた。PSDはラフネスの空間周波数領域の特性を表しており、本解析では図Ⅲ.2.1.1-2-92に示すように、マスクプロセスが同一ならスケールファクターを除きその形状は同一であると仮定する。実マスクから得られた PSD に位相分布を付与することで疑似表面を再構成することができる。また、ラフネスの rms は PSD のスケールファクターを変化させることで調節が可能である。なお、今回のシミュレーションでは、ラフネスの位相分布はランダムであると仮定した。(図Ⅲ.2.1.1-2-93)



図Ⅲ.2.1.1-2-92 表面ラフネスの PSD



図Ⅲ.2.1.1-2-93 表面の再構成

(ii) 多層膜のラフネスモデリング

多層膜のラフネスを表現するにあたり、ラフネスの凹凸が基板から表面まで全く同一であるコンフォーマルモデル、基板、ML 界面、表面の全てで凹凸が異なっているランダムモデル、および両者が混合したモデルの 3 通りの場合を検証した。ただし、全てのモデルにおいて各界面におけるラフネスの PSD は同一であると仮定している。コンフォーマルモデルはラフネスのスペックという観点で言うと最も厳しい場合である。本シミュレーションでは主として図 III.2.1.1-2-94 に示すコンフォーマルモデルを取り扱った。

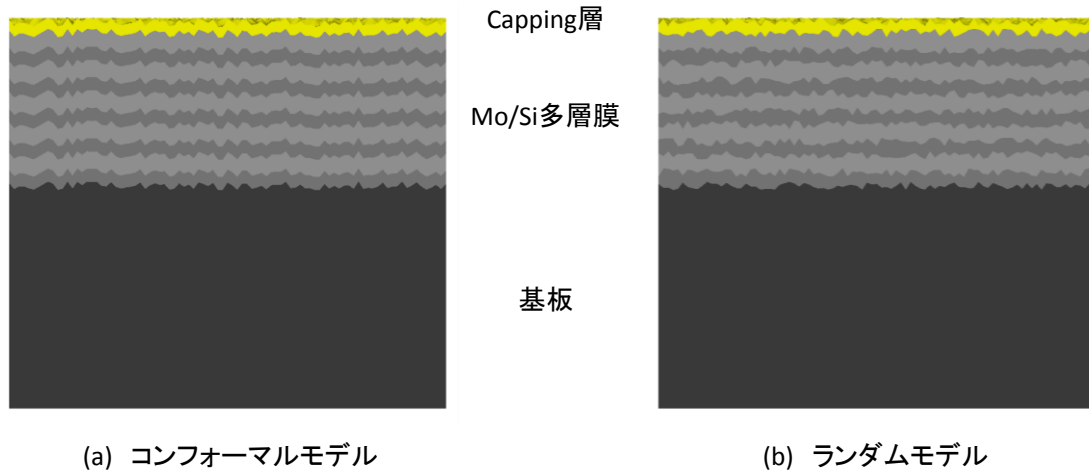


図 III.2.1.1-2-94 多層膜のラフネスモデル (a)はコンフォーマルモデルであり、界面/表面のラフネス凹凸は全て同一である。一方、(b)はランダムモデルであり、界面/表面のラフネス凹凸は全て異なる

(iii) モンテカルロシミュレーション

同一の PSD をもつ表面でも、その位相の違いによりラフネスの凹凸プロファイルが異なる。すなわち、同一の PSD を有する表面は無数に存在する。したがって、ラフネスの転写性への影響を調べるには統計的手段に頼るほかない。そこで、図 III.2.1.1-2-95 にその概要を示すように、実マスクから得られた PSD に複数のランダム位相を付与することで複数の 3D マスク構造を構築し、同一パラメータに対して複数回の転写シミュレーションを行った。

パラメータとしてはラフネスの rms を用いた。ラフネス rms に対する転写パターン of 光学像における寸法変化(CD 誤差)を調べることでラフネスの影響を解析している。CD を求めるための閾値は rms パラメータのグループ毎に、CD 平均値が、hp 16 nm パターンに対しては 16 nm、hp 11 nm パターンに対しては 11 nm になるように設定した。

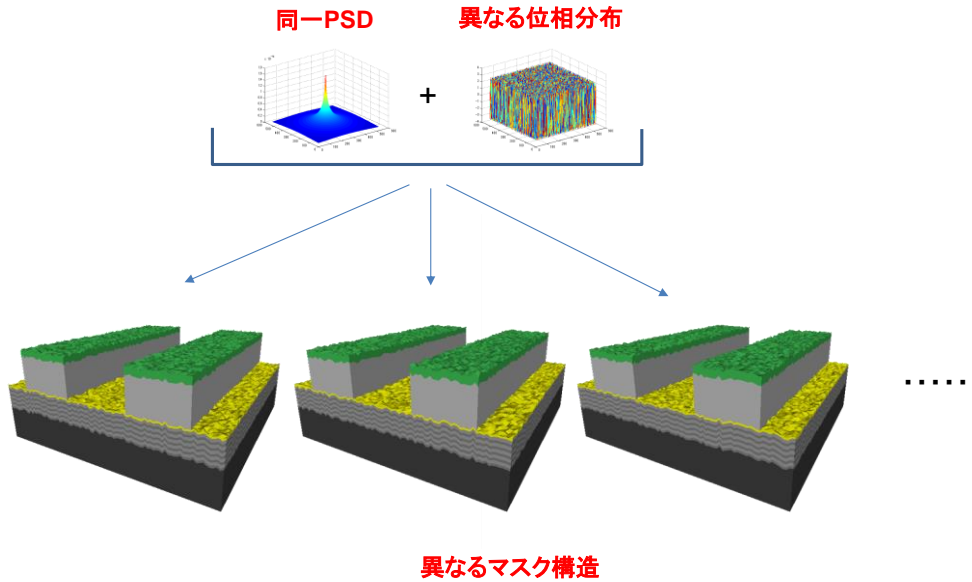
(iv) シミュレーション条件

マスクは、基板上に Mo/Si を 40 対積層した多層膜と厚さ 2.5 nm の Ru キヤッピング層を成膜した後に、厚さ 66 nm の L&S 吸収層パターンを設ける構造とした。L&S パターンとしては hp 16 nm および 11 nm の 2 通りのシミュレーションを実施した。露光条件は、hp 16 nm に対しては NA=0.25、hp 11nm に対しては NA=0.33 を用いた。照明条件は、両者ともに同一のダイポール照明 ($\sigma = 0.4/0.8$, x開口角度=90 度)を用いたが、マスク照明光の主光線入射角度は hp 16 nm パターンに対しては 6 度、hp 11nm パターンに対しては 8 度に設定した。なお、入射面はラインパターンと平行とした。

(v) シミュレーション結果

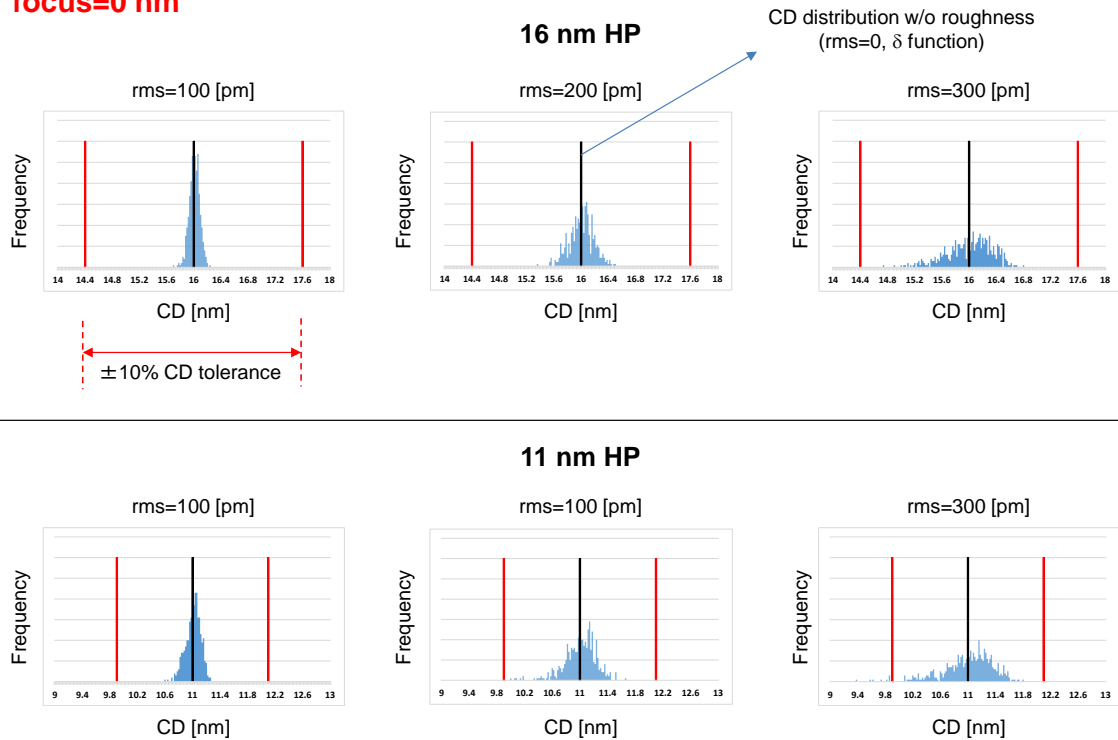
図 III.2.1.1-2-96 にrmsを 100 pm、200 pm、300 pm の 3 種類に変化させたときの CD 分布を示

す。ここで、デフォーカス量は0とし、モンテカルロシミュレーションの試行回数は1パラメータ当たり512回とした。図中、黒い縦棒はラフネスが無い場合のCD分布、すなわち、 δ 関数を示しており、赤い縦棒は $\pm 10\%$ のCDトレランスを表している。ラフネス許容値の大まかな目安としては、CD分布が赤い棒の範囲に収まることである。同図に示す範囲内では、hp 11 nmかつrms=300 pmの場合を除いてこの範囲に収まっていることが分かる。



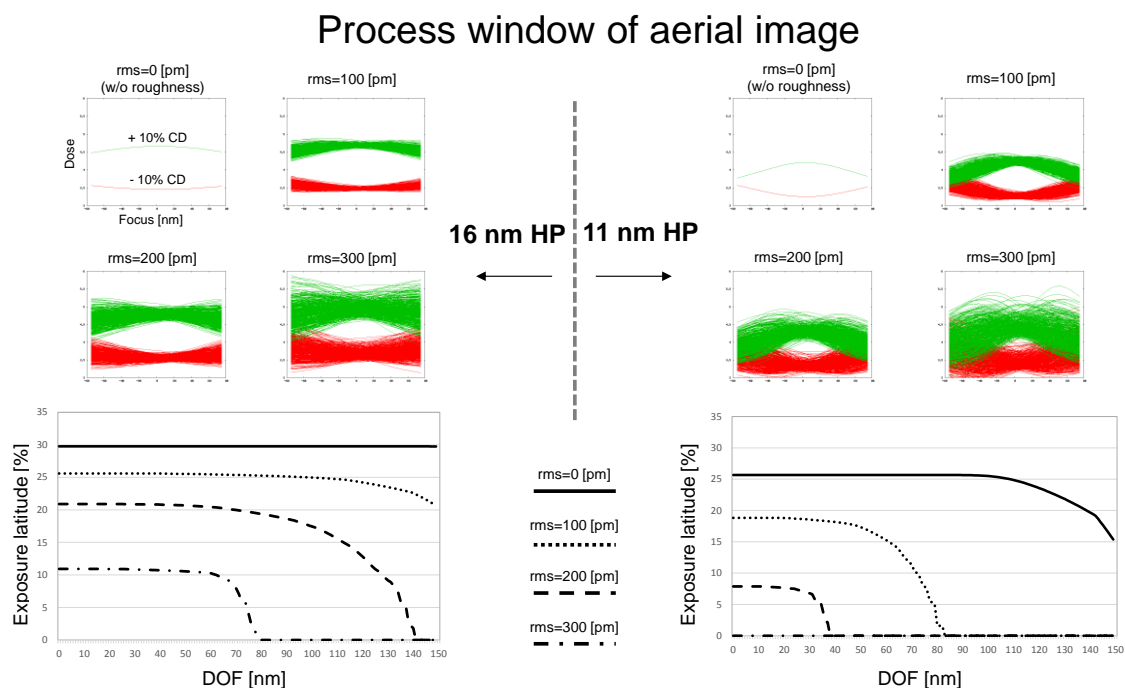
図Ⅲ.2.1.1-2-95 モンテカルロシミュレーションの概念図。実マスクに基づく同一のPSDと異なるランダム位相分布から異なるマスク構造を構築する。(マスク構造はコンフォーマルモデル)

focus=0 nm



図Ⅲ.2.1.1-2-96 モンテカルロシミュレーションの結果

さらに、デフォーカス位置でのラフネス影響を調べるために、プロセスウィンドウ計算を行った結果を図Ⅲ.2.1.1-2-97に示す。hp 16 nm、および 11nm の両者ともラフネスが無い場合は十分なプロセスマージンをもっているが、ラフネスが増大するにつれ、急激にマージンが減少することが分かる。例えば、100 nm のデフォーカス位置で 20%の露光裕度(Exporsure Latitude, EL)を確保するためには、ラフネスを、hp 16 nm パターンでは rms=180 pm、hp 11 nm パターンでは rms=30 pm 程度に抑える必要がある。なお、ここで示した結果はすべてラフネスコンフォーマルモデルに基づいている。



図Ⅲ.2.1.1-2-97 プロセスウィンドウ計算 上方にある緑と赤線のグラフは ED-Tree を表しており、ラフネス rms が増大するにつれプロセスマージンが小さくなっていることが一目瞭然で分かる

(vi) ラフネスモデリングの影響

ここでは、コンフォーマルモデルとランダムモデルが複合した場合を想定し、n 層目のラフネスの高さが次式で表されるようなモデルを検討する。

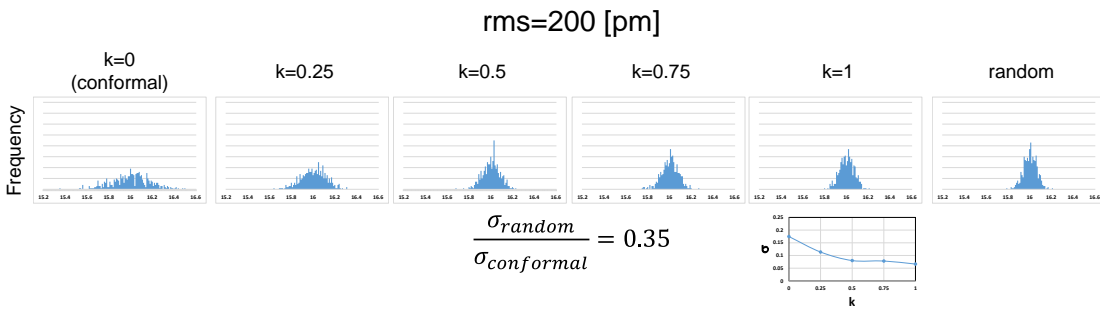
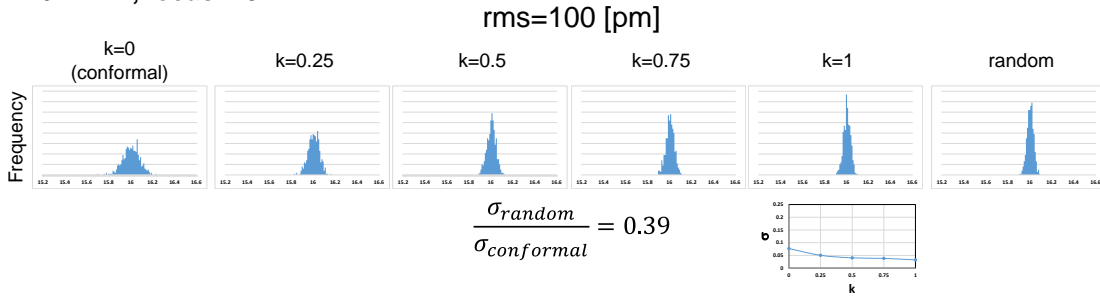
$$h_n(x, y) = (1 - k \cdot l) \cdot h_{n-1}(x, y) + C_n \cdot r_n(x, y)$$

ここで、 $h_n(x, y)$ は x, y における n 層目のラフネスの高さ、k は Mo/Si bilayer 毎のラフネス減衰定数、l は bilayer の膜厚、 $r_n(x, y)$ はランダム成分、 C_n は n 層目の PSD を設定した値にするための n 層目における規格化定数である。すなわち、ある層のラフネスの高さは、前層のラフネス情報を一定の割合保持していて、減衰した分はランダム成分が補うという単純なモデルである。k が 0 のときはコンフォーマルモデル、ある値より大きいときはランダムモデルを表す。

図Ⅲ.2.1.1-2-98 に、式(1)に従って算出した CD 分布を示す。図中の σ は CD 分布の標準偏差を表している。k が増大するに従い、CD 分布の σ が減少していくことが分かる。(コンフォーマルモデルがスペックの観点から言うと最も厳しい。)また、コンフォーマルモデルとランダムモデルの σ の比が rms の値に依らずほぼ一定であり、パターンの feature サイズが小さくなるとその比が大きくなる事が分かる。

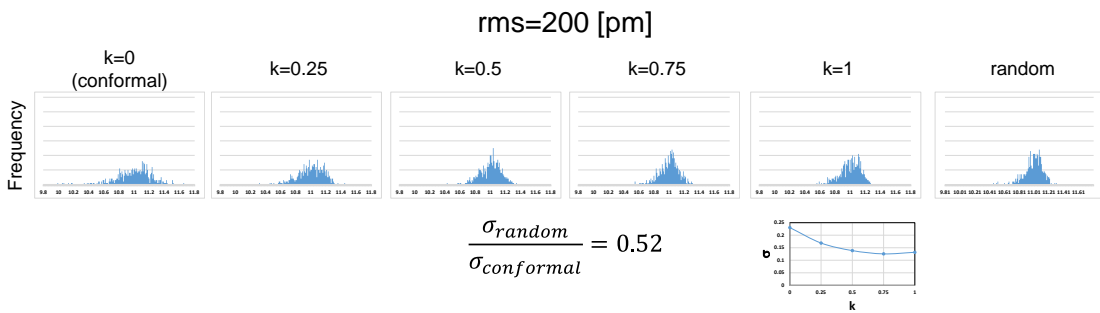
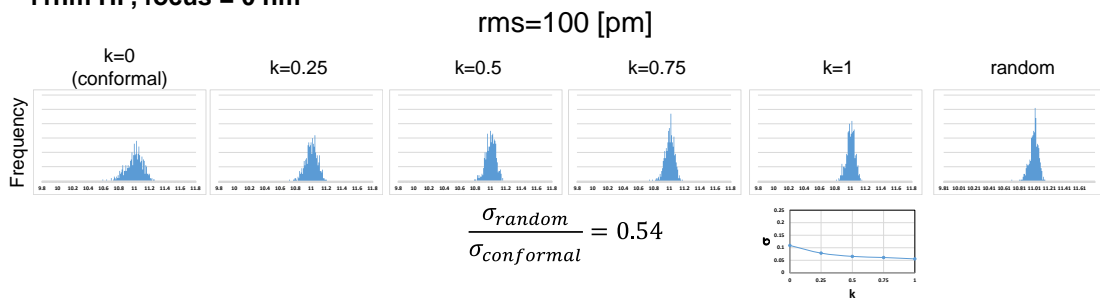
(a)

16nm HP, focus = 0 nm



(b)

11nm HP, focus = 0 nm



図Ⅲ.2.1.1-2-98 多層膜モデリングの影響

(a)は 16 nm HP、(b)は 11 nm HP の結果を表す (a)、(b)の両者とも rms の値に依らず、コンフォーマルモデルの CD 分布幅とランダムモデルの CD 分布幅はほぼ一定である

(vii) 位相欠陥が存在するときのラフネスの影響

(v)で説明したシミュレーション結果は理想的なマスク構造にラフネスのみが存在する場合のもの

であるが、ラフネスと位相欠陥の両方が存在する場合についても検証を行った。位相欠陥としては Bump と Pit の Gaussian 形状欠陥を考慮し、hp 16 nm パターン転写用マスクにおける欠陥サイズは、height/depth: 1 nm、FWHM: 50 nm、hp 11 nm におけるマスク上の欠陥サイズは、height/depth: 0.7 nm、FWHM: 50 nm とした。ただし、欠陥はラフネスにより形状が変調されるため、設定サイズはあくまでも平均的な形状ということになる。(図 III.2.1.1-2-99)

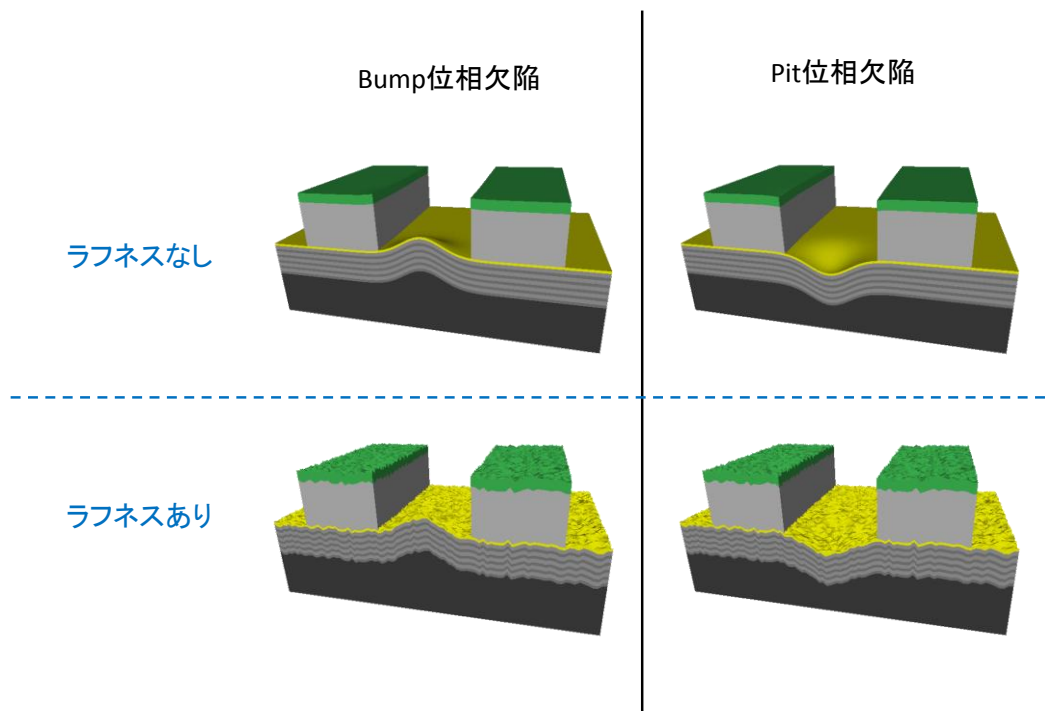


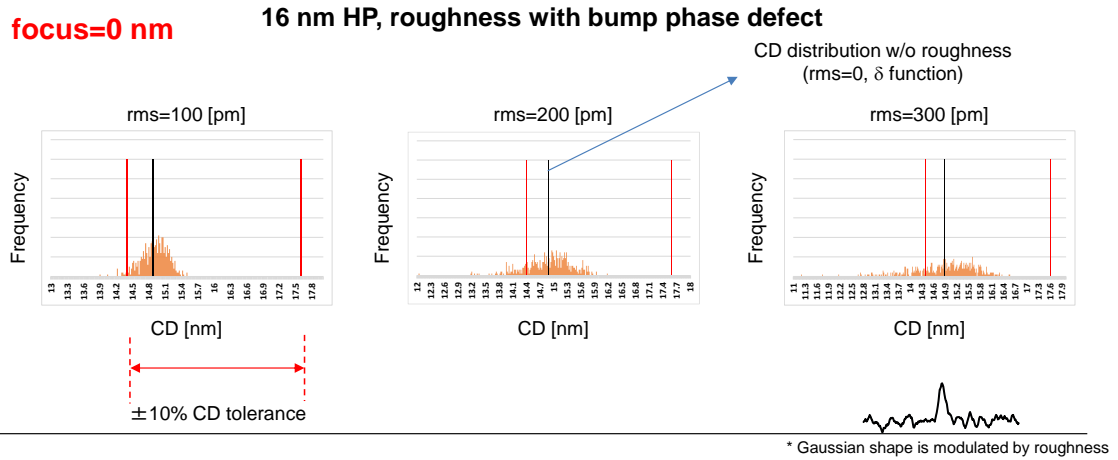
図 III.2.1.1-2-99 ラフネスと位相欠陥が存在するときのマスク概略図。ラフネスにより Gaussian 形状が変調されている。

図 III.2.1.1-2-100 に focus=0 nm における CD 分布を示す。位相欠陥がないときの分布形状が単にマイナス方向にシフトするだけかと予想していたが、実際にはかなり広がる分布になることが分かった。これは、位相欠陥とラフネスが両方存在する場合、CD スペックが未達になる可能性が非常に高いことを意味する。また、片側 3σ の寸法値がターゲット寸法からどの程度ずれているかを図 III.2.1.1-2-101 に示した。

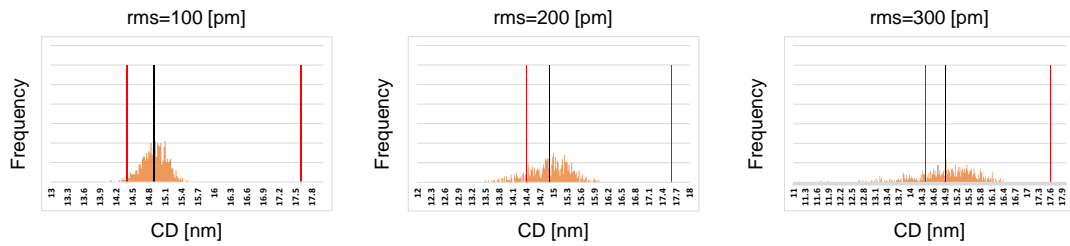
(viii) まとめ

高速シミュレータを用いることで、知る限り他には例のない、3D マスク構造に対するモンテカルロシミュレーションを実行し、マスクラフネスの影響を統計的、定量的に評価することができた。コンフォーマルモデルに基づくシミュレーションに拠ると、ラフネスの許容値としては、例えば、100 nm デフォーカスで 20% の EL を確保するためには、16 nm HP で rms=180 pm、11 nm HP で rms=30 pm 程度であることが分かった。

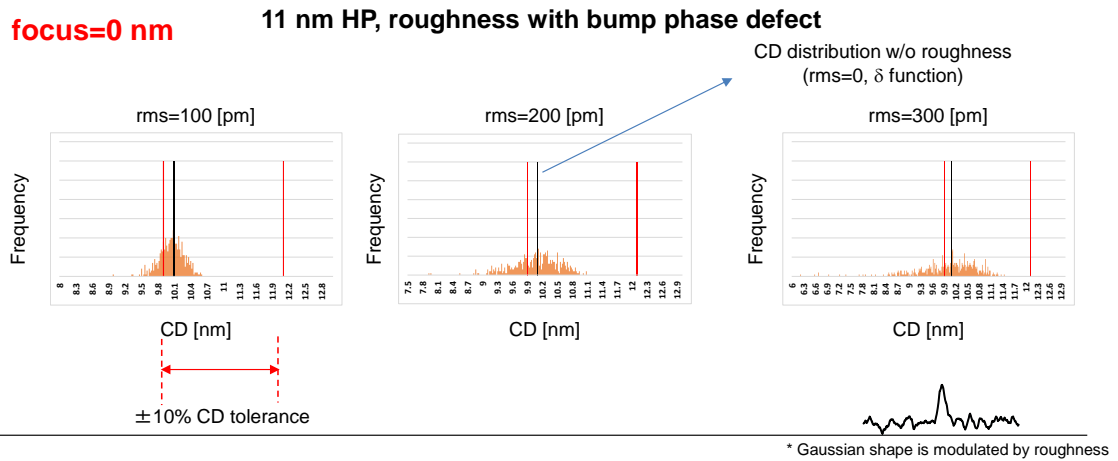
(a)



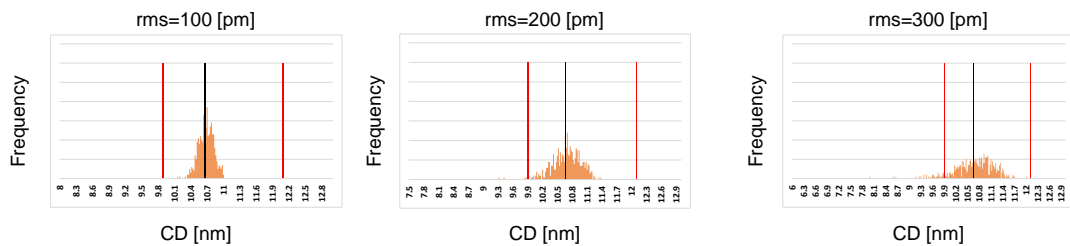
16 nm HP, roughness with pit phase defect



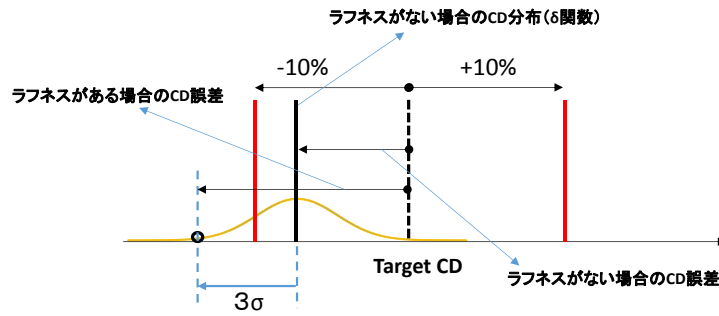
(b)



11 nm HP, roughness with pit phase defect



図Ⅲ.2.1.1-2-100 位相欠陥とラフネスがある場合の CD 分布
(a)は 16 nm HP、(b)は 11 nm HP の結果を示している



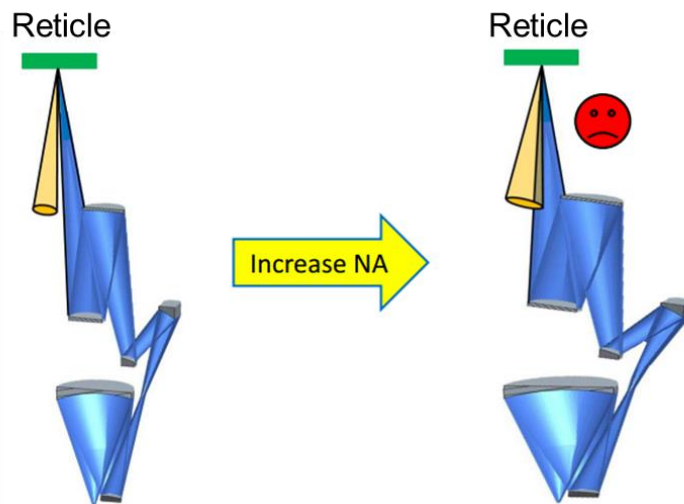
		ラフネスrmsとCD誤差			
		0 pm	100 pm	200 pm	300 pm
16 nm HP	Bump	-6.9%	-11.6%	-16.9%	-22.2%
	Pit	-6.9%	-11.1%	-15.4%	-20.6%
11 nm HP	Bump	-8.7%	-14.8%	-21.4%	-30.0%
	Pit	-3.0%	-6.8%	-10.8%	-16.5%

図Ⅲ.2.1.1-2-101 位相欠陥とラフネスがある場合の CD 誤差

(d) ML エッチングマスクの位相欠陥転写性

(i) 背景と目的

パターンシュリンクに伴い EUVL に対しても高 NA が求められている。例えば、HP 10 nm 以下のパターンに対しては 0.4 以上の NA が必要になる。しかし、現行の入射角 6° のまま高 NA を実現すると、入射光と反射光が干渉してしまう。(図Ⅲ.2.1.1-2-102)



“High NA – the Extension Path of EUV Lithography”
 Carl Zeiss SMT GmbH – Dr. Tilmann Heil, Dresden, Semicon Europa 2013

図Ⅲ.2.1.1-2-102 レチクルに対する高 NA の影響

主な対策としては、CRAO (Chief Ray Angle at Object) を大きくすること、マスクの倍率を大きくすることが考えられる。しかし、CRAO を大きくすると shadowing (マスク3D) 効果が顕著になり露光マージンが小さくなってしまい、倍率を大きくすると(6 もしくは 8 倍)、大きなマスク(9 もしくは 12 イ

ンチ)が必要になり、マスクハウスのインフラ構築が問題になる。このような背景のもと、shadowing 効果を低減することで、これまでの4倍体を維持することを目的に Multilayer (ML) エッチングマスクが提案されている^[8]。本報告では、欠陥検査感度の面から ML エッチングマスクを評価すべく、位相欠陥転写性のシミュレーションを実施した。

【参考文献】

[8] K. Takai, T. Motokawa, K. Murano, T. Kamo, and N. Hayashi, "Patterning of EUVL binary etched multilayer mask," Proc. SPIE8880, 88802M (2013)

(ii) 位相欠陥転写性シミュレーション

ML エッチングマスクは図 III.2.1.1-2-103 に示すように、Ru cap / MoSi 20 pairs ML / substrate の構造になっている。(図には Bump 欠陥が含まれている)。MoSi 層が 20pairs である点が吸収体マスクとの大きな違いとなっている。(吸収体マスクは 40pairs)

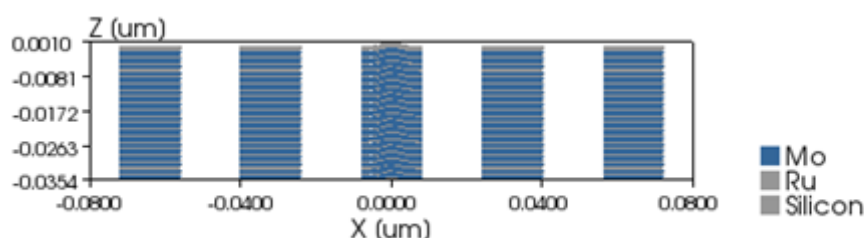


図 III.2.1.1-2-103 Bump 欠陥がある場合の ML エッチングマスク

(iii) シミュレーション条件

シミュレーションは ML エッチングマスクと吸収体マスクの両方について実施した。シミュレーション条件を以下に示す。

Pattern: 64 nm half-pitch line/space (L/S=1:1, on mask scale)

Illumination: Dipole, NA: 0.33

Etched ML mask structure: Ru cap / MoSi 20 pairs ML / substrate

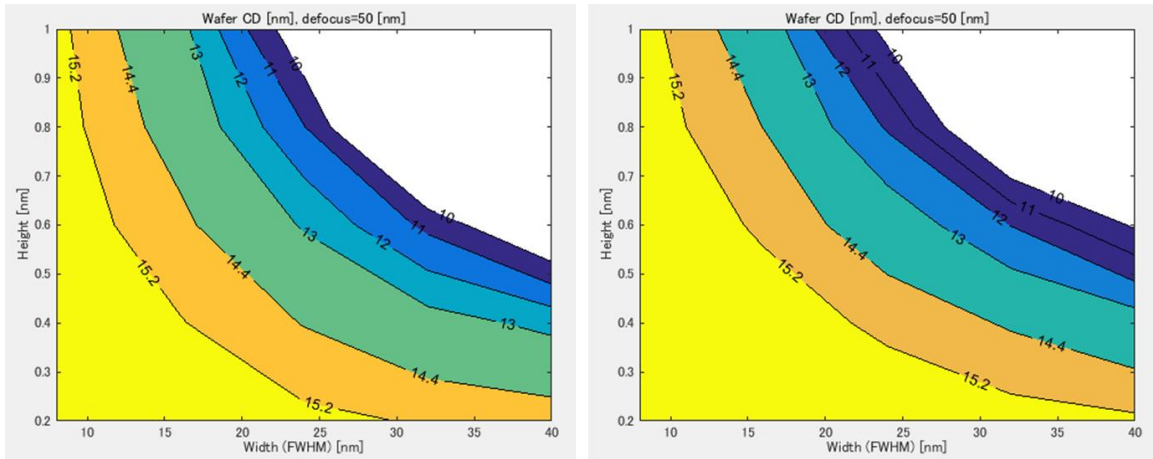
Absorber mask structure: absorber stack / Ru cap / MoSi 40 pairs ML / substrate

(iv) シミュレーション結果

Bump 位相欠陥サイズに対する wafer CD 値 (CD ターゲット=16 nm) の計算例を図 III.2.1.1-2-104 に示す。縦軸は欠陥高さ、横軸は欠陥幅 (FWHM) を表している。なお、欠陥形状については、Gaussian 形状で基板から ML 上層まで同一の形状を仮定している。上図から欠陥許容サイズは吸収体マスクの方が大きいことが分かる。許容サイズは defocus の関数になっているが、平均的に見ると bump 欠陥に対しては ML エッチングマスクの欠陥許容サイズは吸収体マスクの 90%程度である。つまり、ML エッチングマスクは吸収体マスクより 90%サイズの小さい欠陥を見つける必要がある。

さらに、図 III.2.1.1-2-105 に欠陥サイズを height=0.8 nm、width=40 nm に固定した場合の defocus に対する CD 値を示す。欠陥検査の観点では、Bump 欠陥に関しては吸収体マスクの方が有利であり、pit 欠陥に関しては、若干 ML エッチングマスクの方が有利なことが分かった。

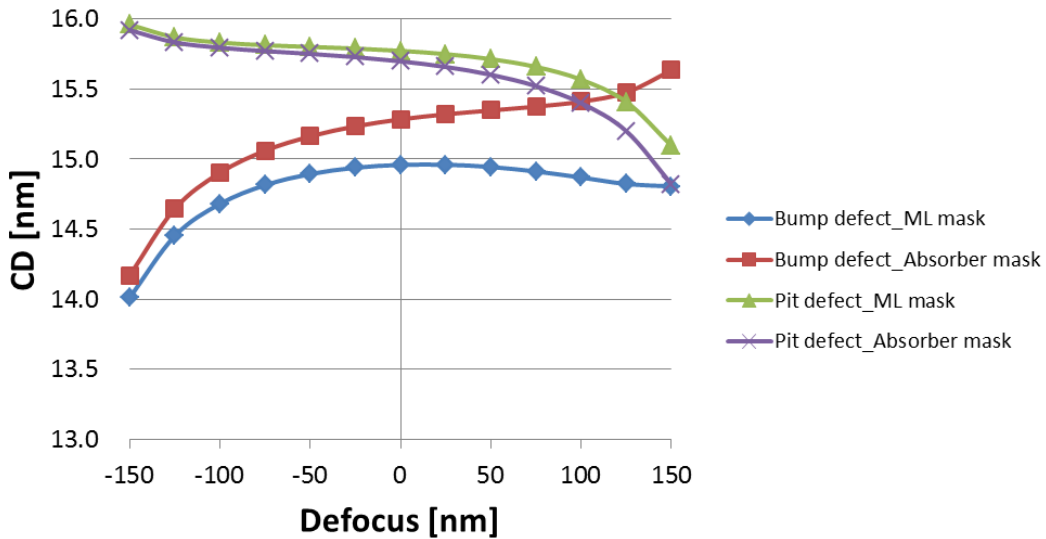
最後に、位相欠陥サイズの height、width の比を height/width=0.02 に固定した場合の ML エッチングマスクに対する欠陥サイズを表 III.2.1.1-2-106 に示す。



MLEッチングマスク

吸収体マスク

図Ⅲ.2.1.1-2-104 Bump 位相欠陥サイズと wafer CD (defocus=50 nm)



図Ⅲ.2.1.1-2-105 Height=0.8 nm、width=40 nm 固定の場合の CD vs. defocus

Bump phase defect

Defocus [nm]	-80	80
Height [nm]	0.89	0.96
Width (FWHM) [nm]	44.38	47.84

Pit phase defect

Defocus [nm]	-80	80
Height [nm]	1.38	1.12
Width (FWHM) [nm]	68.97	56.19

表Ⅲ.2.1.1-2-106 Height/width = 0.8/40 nm における CD vs. defocus

(iv) 結論

Bump 位相欠陥に関しては、許容サイズは吸収体の方が大きく、pit 欠陥に関しては若干ではあるが許容サイズは ML エッチングマスクの方が大きいことが分かった。総合的に見ると ML エッチングマスクの方が若干不利ではあるが、重大な差ではないので十分実用に耐え得ると考える。

[4] 高出力 EUV 照射によるマスク光学特性変化

(i) 目的

半導体用フォトマスクは、ウェハへのパターン転写工程において、短波長の高エネルギーの光が長時間、繰り返し照射されることとなる。この工程により、フォトマスクを構成する材料に劣化が生じるかどうかは検証しておくべき重要な課題である。

EUV露光工程では、露光波長が従来の ArF 光(193nm)と比較し 13.5nm と非常に短く、エネルギーは極めて高いと考えられる。また、EUVフォトマスクブランクスは、従来の光透過型ではなく、光反射型の構成となっており、吸収層パターンの下にシリコン、モリブデンで構成される多層膜構造を有している。このため、極度の高温状態となると、多層膜の Si/Mo 境界部で重合が起こり、反射膜として十分な性能を維持できないことが知られている。また、従来のArF光等であれば、フォトマスクブランクス材料が十分な照射耐性を有しているかどうか、加速照射試験を実施し確認することが行われたが、EUVフォトマスクブランクスでは、13.5nm 波長の光源自体が開発段階であり、これまで照射耐性試験の実施ができない状況であった。

今回、開発された高出力EUV照射機により、EUVフォトマスクブランクス材料の照射時の昇温試験を行ったので報告する。

(ii) 評価方法と結果

実験で使用した高出力EUV照射装置では、照射対象物の表面温度を測定するための IR カメラを有しており、照射中の温度変化を観察・測定できる構造となっている。装置概略を [図 III.2.1.1-2-107](#) に示した。

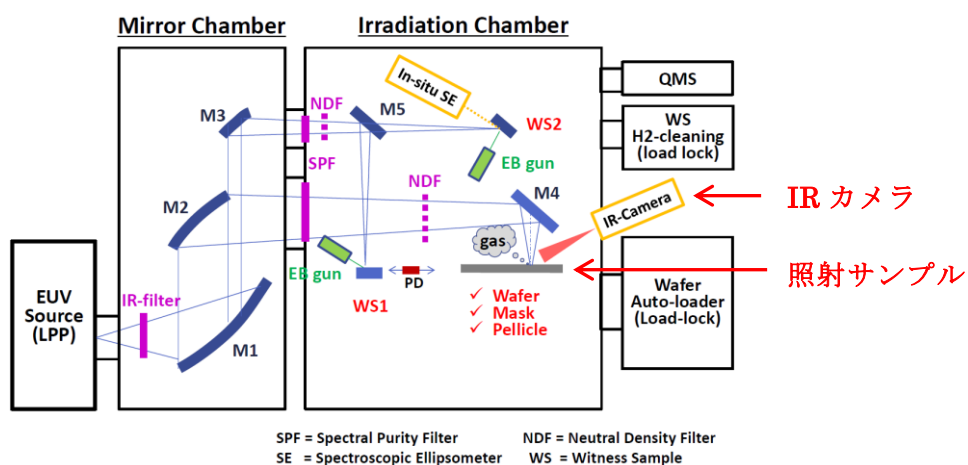


図 III.2.1.1-2-107 高出力EUV照射装置

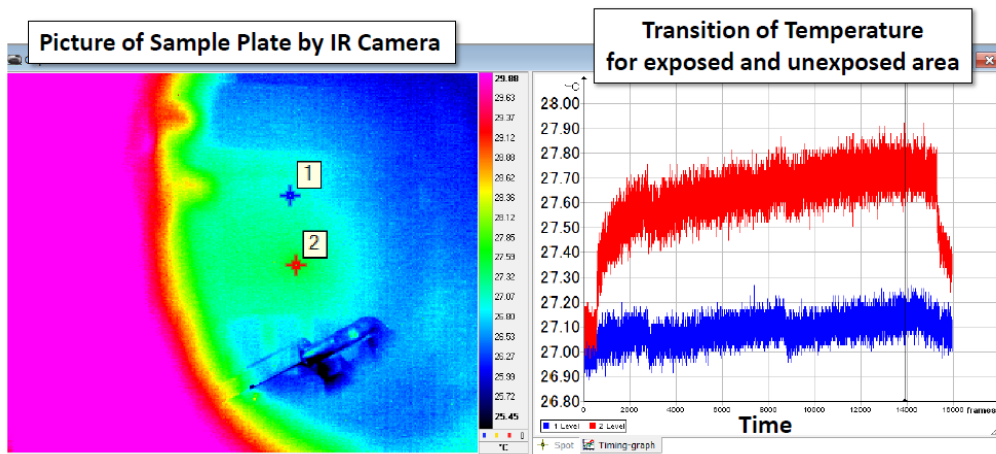
今回の実験では、EUVフォトマスクブランクス材料の中で、昇温による性能劣化が懸念される Si/Mo 多層膜ブランクス温度変動の測定を行った。主な評価条件を以下に示す。

- 露光波長 : 13.5nm
- 照射光強度 : 約 100mW/cm²
- IRカメラ観察・温度測定個所 : 照射部と非照射部の2か所を同時に観察、測定

照射中のIRカメラ観察像と、温度変動推移を [図 III.2.1.1-2-108](#) に示した。IRカメラ像中の1は非照射部であり、2は照射部である。また、温度推移グラフ中の青線が非照射部であり、赤線が照射部である。温度推移グラフより、非照射部の温度変動は 0.1℃以下程度とほぼ一定であるのに

対し、照射部では、照射直後に約 0.5℃の昇温が確認され、その後比較的安定した状態へと移行する傾向が確認された。

今回の照射評価結果より、EUVブランクス(Mo/Si 多層膜)表面では、EUV光照射により昇温が生ずることが確認されたが、本照射評価実験の範囲においては、多層膜の光学特性変化が想定される程度の温度上昇は確認されなかった。



図Ⅲ.2.1.1-2-108 IRカメラ観察像と照射中温度推移

(1)-(iii) CSM の開発(兵庫県立大学への再委託)

【1】 研究開発の目標

本研究開発の目標は、欠陥サイズと欠陥検出信号強度との相関が弱くなる半値全幅(FWHM: Full Width at Half Maximum)30nm以下の位相欠陥について、散乱パターンを測定し・分類することである。これを実現するために、位相欠陥上に微小スポットに集光したコヒーレントな EUV 光を照射して、その回折パターンを撮像する装置(マイクロ CSM)を開発して、回折パターンから位相欠陥の情報を再構成することとした。

これらに係る技術基盤と該当する光源を所有する、兵庫県立大学 高度産業科学技術研究所 EUV リソグラフィ研究開発センターに再委託して研究開発を行った。

【2】 成果

[1] マイクロ CSM 開発

(a) 背景

ABI は hp16nm で問題となるのは FWHM35nm、高さ 1nm 相当の位相欠陥検出を中間目標としている。このサイズの位相欠陥については、測定できるシグネチャーが乏しいため、欠陥のキャラクタライズ、特に転写影響を与える致命欠陥の判別が困難であることが、Mirai プロジェクトの成果から予測された。そこでキャラクタライズする手段として、位相欠陥を微小スポットに集光された EUV 光で照明し、回折された光の分布を測定する方法を検討して、シミュレーションを行い、位相欠陥のサイズ判別が可能であることが判った。図 III.2.1.1-3-1 は集光スポット径を、1000, 200, 100 nm で変化させた場合の散乱角度分布のシミュレーション結果を示している。条件として、照明した範囲は完全にコヒーレントであると仮定し、欠陥は計算の簡易化のためトップハット型を使用した、また、表面粗さ rms=0.15nm を仮定して作られた散乱、スペックルノイズを予測した。集光径 1000nm では欠陥信号はスペックルノイズに埋もれてしまうが、集光径が 200 nm 以下であれば、有意に観測可能であることが判った。

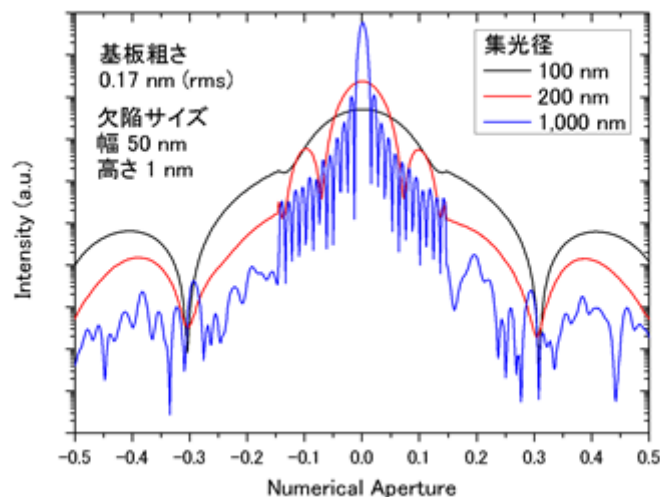
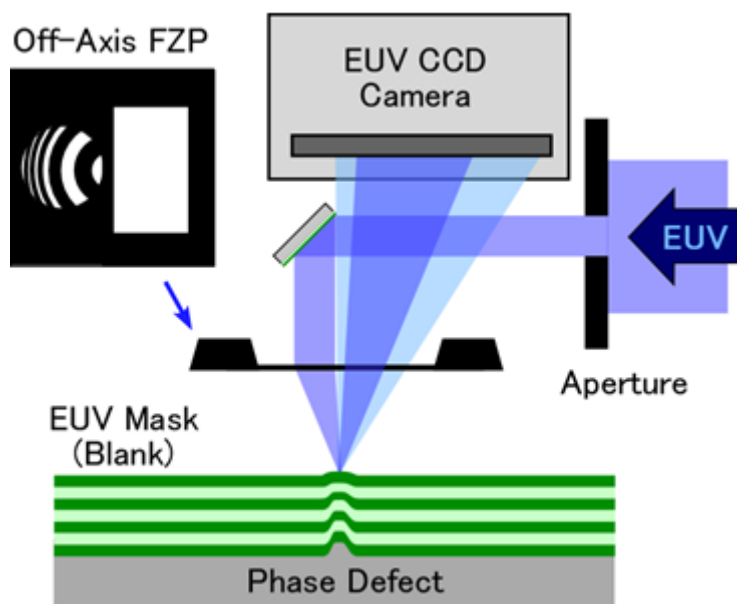


図 III.2.1.1-3-1 シミュレータにより求められた位相欠陥による散乱パターン

(b) 設計

マイクロ CSM の要点は、位相欠陥に集光したコヒーレントな EUV 光を照明して、散乱パターンを計測することである。EUV 光の散乱パターンを計測する技術は EUV リソグラフィ研究開発センター

がCRESTのプロジェクトにおいて開発した技術で確立されているので、新たな開発項目はEUV光を200nm以下に集光することと、集光したEUV光と位相欠陥を正しく位置合わせすることであった。



図Ⅲ.2.1.1-3-2 フレネルゾーンプレートを用いたマイクロCSMの概念図

図Ⅲ.2.1.1-3-2に示す様に、EUV光の集光にフレネルゾーンプレートを利用する方式で、設計を行った。光源の単色性1300分の λ (NEW-SUBARU BL-10)から、200nm以下のビームスポット系を実現できる焦点距離として750 μm が求められた。また、予想される撮像時間からステージの要求静定精度を見積り、ドリフト量が5nm以下/10分を目標とした。

(c) 実証実験

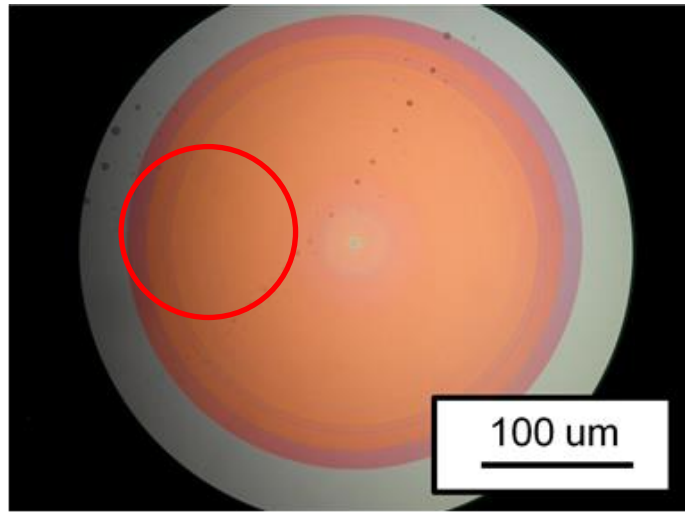
(i) フレネルゾーンプレート

波長と焦点距離が定めれば、フレネルゾーンプレートのパターンは一意的に決まるので、集光性能を確認するためSiNメンブレン上にZEP-520Aレジストでパターンを作ってゾーンプレートとし、EUV光を集光してビームスポット径を計測した。

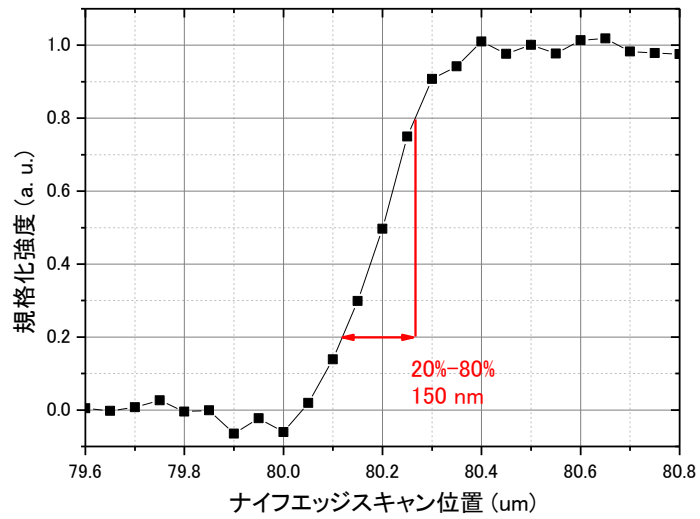
図Ⅲ.2.1.1-3-3は兵庫県立大学で試作したフレネルゾーンプレートの光学顕微鏡像である。図中赤線の円は、照明に利用する直径120 μm 軸外し領域を示す。図Ⅲ.2.1.1-3-4は、前述のフレネルゾーンプレートで集光を行い、ナイフエッジ法で測定した結果である。観測された集光スポット径は、強度の20-80%で150nm以下であった。図Ⅲ.2.1.1-3-5は、実証実験を元に製造した、測定用フレネルゾーンプレートの光学顕微鏡像である。

(ii) ステージ

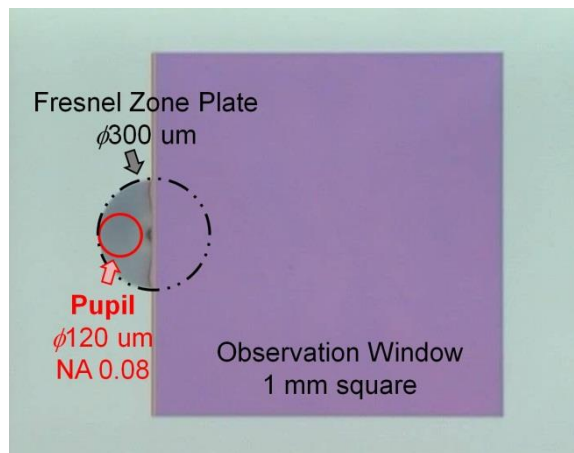
ブランクを乗せるステージに要求される静定精度が5nm/10分に収まるかを、ステージ組み立て後に確認した。図Ⅲ.2.1.1-3-6はドリフト量測定結果である。実測されたドリフト量は50nm/12hr程度で、要求を満足することが確認された。



図Ⅲ.2.1.1-3-3 フレネルゾーンプレートの光学顕微鏡像



図Ⅲ.2.1.1-3-4 ナイフエッジ法による集光スポットサイズ測定結果



図Ⅲ.2.1.1-3-5 測定用フレネルゾーンプレートの光学顕微鏡写真

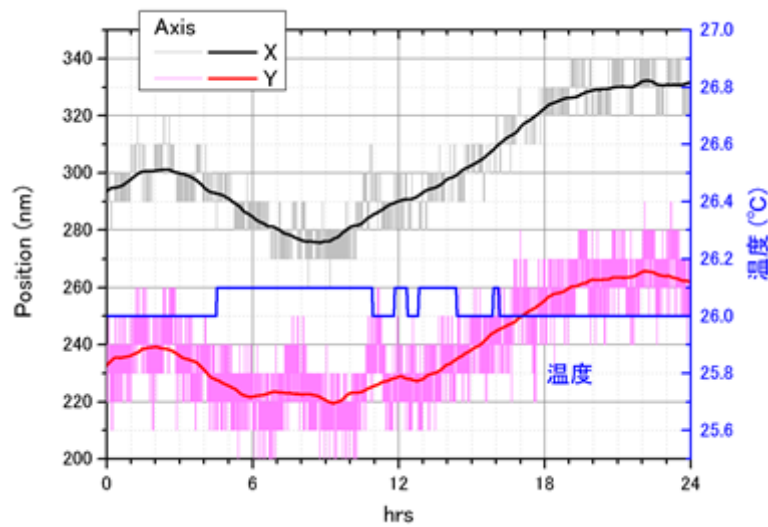


図 III.2.1.1-3-6 ステージのドリフト量測定結果

(d) 測定の準備

(i) プログラム位相欠陥のバックグラウンドノイズ評価

位相欠陥の評価を行う本研究は、多層膜反射鏡成膜前の基板に意図的に凹凸を作ったプログラム位相欠陥(=PDM)を多用する。プログラム位相欠陥製造で凹凸を形成する工程で、基板の粗さが変化してしまうと、バックグラウンドのノイズが実際のブランクと異なることになり、プログラム位相欠陥による評価自体が意味をなさなくなる。そこで、EUV 散乱角度分布測定とX線反射ロックングスキャンでPD製造によるバックグラウンドノイズへの影響を確認した。

図 III.2.1.1-3-7 は、EUV 散乱角度分布測定結果で、Ref.#1 は PDM と同一ロットで PDM 用の工程を経していない対象サンプル、PDM#2,#3 は異なる PDM 製造工程を経たサンプル、Ref#4,#5 散乱測定自体の有効性を確認するために多層膜反射鏡の成膜条件を変えて散乱強度を変えたサンプルである。

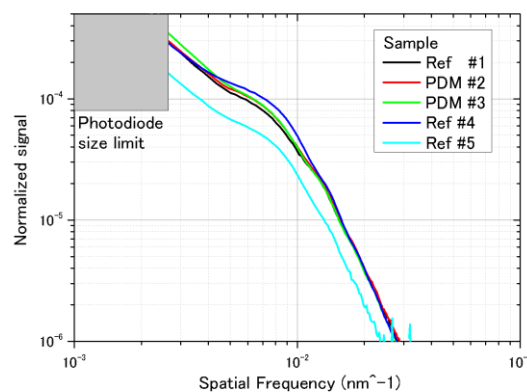
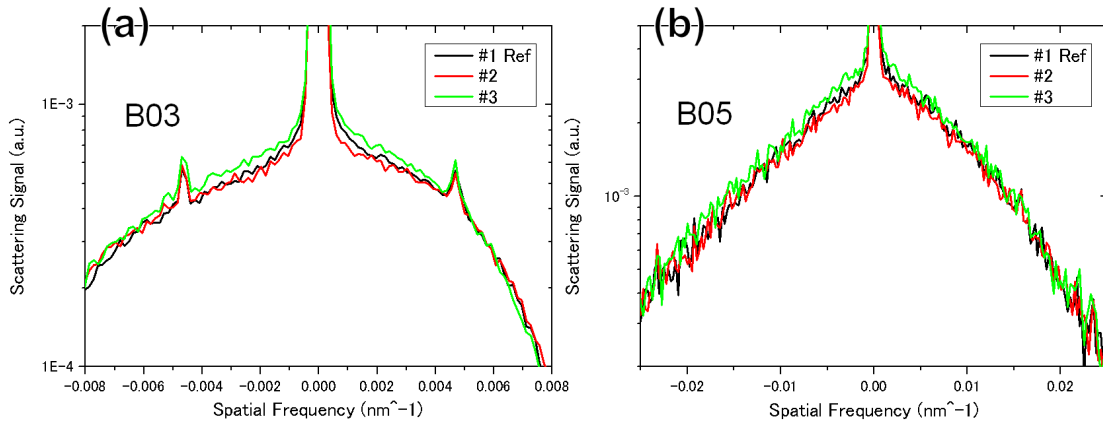


図 III.2.1.1-3-7 EUV での散乱角度分布測定結果

PDM の製造工程による違いは、EUV の散乱に影響を大きな与えないことが判る。ただし、PDM#3 は、Ref#1,PDM#2 と比べ、 $5 \times 10^{-3} \text{nm}^{-1}$ 以下の空間周波数で散乱が有意に大きい。この差を X 線反射率計によるロックングスキャンで確認した。

図 III.2.1.1-3-8 は、X 線反射率ロックングスキャンの結果である、(a)は第 3 ブラグピーク周辺、

(b)は第5ブラグピーク周辺である。この測定においても、該当する空間周波数で、PDM#3(緑線)のX線の散乱も大きいことが判り、この空間周波数領域では多層膜反射鏡の粗さによる散乱が増加しているのがわかる。

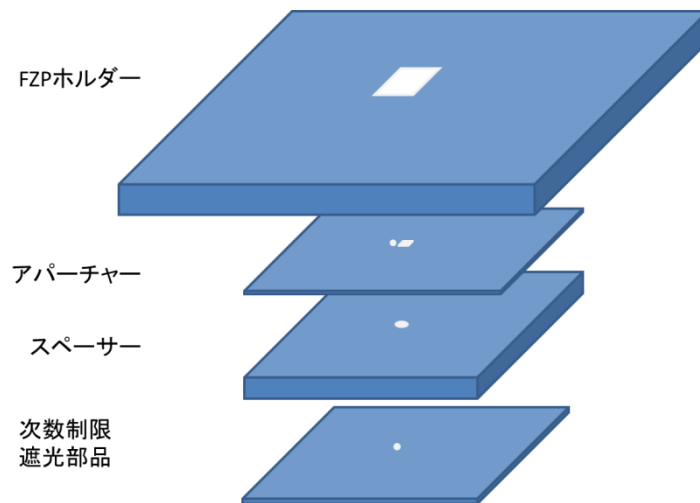


図Ⅲ.2.1.1-3-8 X線反射率ロックングスキャンの結果

これらの結果から、PDM製造工程によるEUV光の散乱バックグラウンドの変化は10%以内と見積られ、マイクロCSMの測定には影響しないことが確認できた。

(ii) 測定用遮光部品

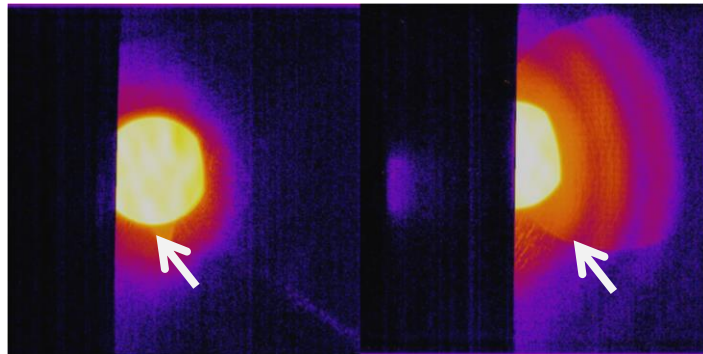
フレネルゾーンプレートを利用して集光する場合、1次回折光以外の成分(主に0次光と2次回折光)はノイズの発生原因となるため遮光する必要があった。図Ⅲ.2.1.1-3-9は、遮光部品の概念図である。この遮光部品は焦点距離内に収める必要があり、すべての部品を張り合わせた状態で、アパーチャーから次数制限遮光部品までを650μm(ブランクとの空隙100μm)以内に収まるように設計・製造にあたった。



図Ⅲ.2.1.1-3-9 遮光部品概念図

図Ⅲ.2.1.1-3-10はマイクロCSMにより取得された画像で、次数制限遮光部品の効果を示している。右側は同部品が無い場合の画像で、白矢印で示す円形の領域のフレネルゾーンプレートの2次回折光の反射が見られる。また、左半分が折り返しミラーの影になっている。左側は次数制限部品を組み込み、各部アライメントを再調整した後の画像で、2次回折光の影響を低減している。

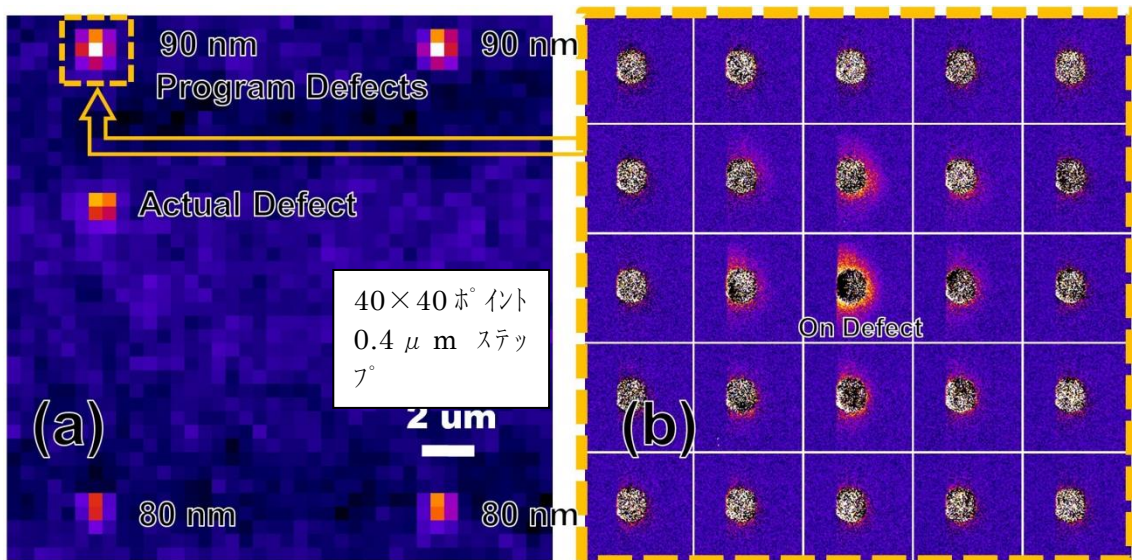
ただし、現行製造方法による限界で完全には 2 次回折光を遮光できない。
製造方法を含めた改良を検討中である。



図Ⅲ.2.1.1-3-10 次数制限遮光部品の効果
(以下マイクロCSMの画像は、強度をログスケールで疑似カラー化して示す。)

[2] プログラム位相欠陥の回折像取得

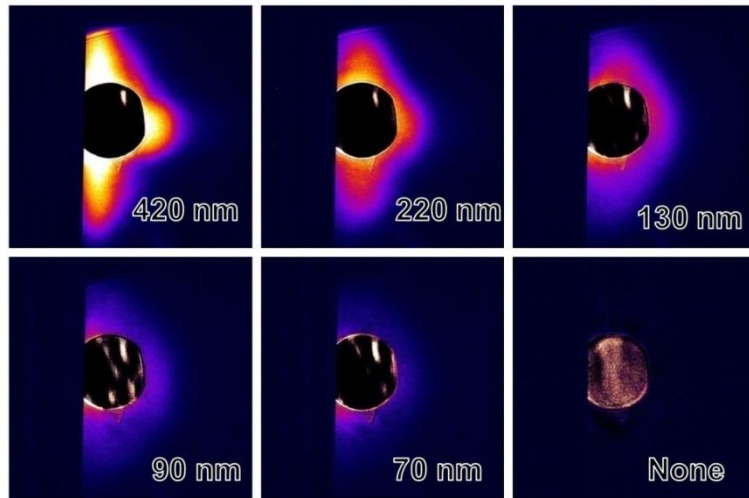
プログラム位相欠陥として、位相欠陥検査の標準に使用してきたプログラム位相欠陥（以下：標準プログラム位相欠陥）と、マイクロ CSM 用に新たに設計したプログラム位相欠陥（以下：専用プログラム位相欠陥）の 2 枚を用意した。プログラム位相欠陥は、数百 nm から 20nm 程度の直径で作られている。マイクロ CSM のビームとプログラム位相欠陥とは精密に位置合わせを行う必要がある。計測では測定対象の EUV ブランクを把持するステージに組み込まれた微小移動用ピエゾステージで、XY にステップアンドリピートで撮像して、プログラム欠陥とビームスポットの最適位置をサーチして測定した。



図Ⅲ.2.1.1-3-11 プログラム欠陥とビームスポットの位置合わせ

図Ⅲ.2.1.1-3-11 の左の図は、プログラム欠陥の一部を 40×40 のステップアンドリピートで撮像して、各移動点の回折光強度を積分した値でマッピングしたものである。また、右の図はプログラム欠陥近傍の 5×5 点のマイクロ CSM の撮影画像である。中心でプログラム欠陥とビームスポットの位置が一致して、強い回折光が表れるのがわかる。

Program Defects



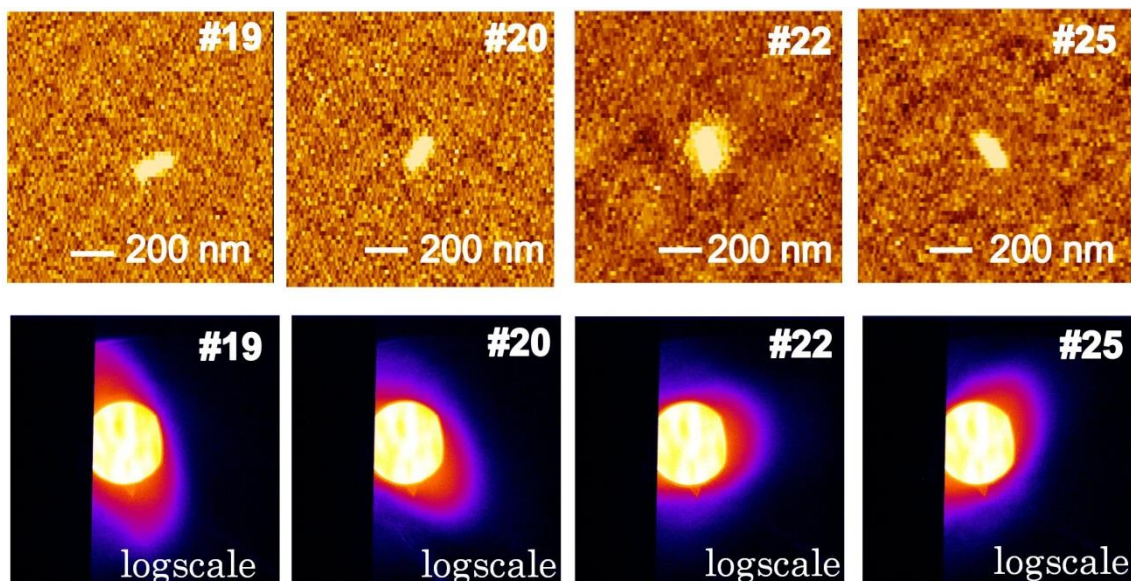
図Ⅲ.2.1.1-3-11 標準プログラム欠陥のマイクロ CSM による観察像

(a) 標準プログラム位相欠陥の観察結果

標準プログラム位相欠陥は、高さが 6nm のバンプ型の欠陥で、水平方向の各種サイズのプログラム欠陥が作りこまれている。図Ⅲ.2.1.1-3-12 は、種々のプログラム欠陥サイズをマイクロ CSM 観察、撮像した結果である。

図中の数字～nm はプログラム位相欠陥(方形)の設計寸法である。420 nm と 220 nm はビームスポットより大きいので、フォーカスをビームウェストから外し、欠陥より大きいビームで撮影している。プログラム位相欠陥が大きい場合には、プログラム欠陥の種になっている方形の辺に直行する方向に強い回折光が生じる。小さい場合は等方的な回折となり、強度も弱い。

標準プログラム位相欠陥には非対称の位相欠陥があり、これを使って AFM 像とマイクロ CSM 像の相関を調べて、捉えた画像が位相欠陥の回折光であることを検証した。非対称の位相欠陥の場合、長軸と直行する方向に強い回折が生じることが予測された。図Ⅲ.2.1.1-3-12 はその検証結果で、形状から予測される方向に強い回折光が生じている。



図Ⅲ.2.1.1-3-12 非対称欠陥の AFM 像とマイクロ CSM で捉えた回折光像

(b) マイクロ CSM 専用プログラム位相欠陥の観察結果

標準プログラム位相欠陥は、10年以上前に作られたので、現時点では大きな位相欠陥しか作成されていない。今回の目標に合わせて専用プログラム位相欠陥を作成し、マイクロ CSM の感度を検証した。図 III.2.1.1-3-13 は、EUV ブランクの粗さによる散乱の揺らぎをバックグラウンドとして、観測された欠陥サイズ毎の S/N 比をプロットしたものである。ここでのサイズは、基板上に形成した位相欠陥のタネとなるピットの辺長で、また、深さは 1.0~1.5nm であった。図 III.2.1.1-3-14 は、検出した最少の欠陥(辺長 25.5nm 深さ 1.4nm)の回折光像である。

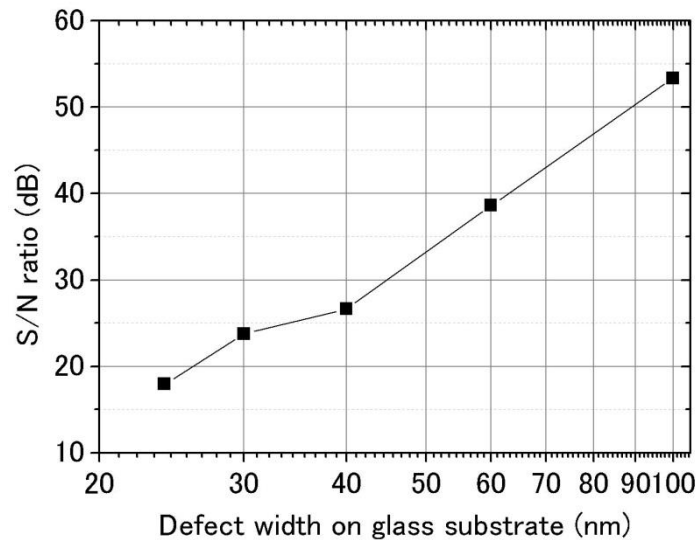


図 III.2.1.1-3-13 マイクロ CSM の感度

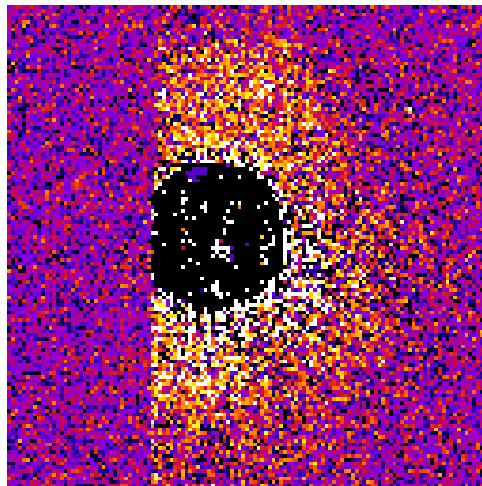


図 III.2.1.1-3-14 検出した最少プログラム位相欠陥の回折光像

(c) まとめ

当初予定された、マイクロ CSM の装置開発を行って、プログラム欠陥の観察を行うことが出来た。観察結果から非対称な形状の欠陥では、回折光のパターンも形状に応じて非対称であることが確認された。また、感度については、 $d=1.4\text{nm}/w=25.5\text{nm}$ の欠陥まで観測できた。今年度は目標である実欠陥のキャラクタイズを行う。また、新たに発見された非対称性に重点をおいて、プログラム欠陥のバラツキを評価し、適切な位相欠陥の表現方法を検討する。これらの結果を利用して ABI の開発支援を行う。

[3] プログラム位相欠陥の像再生

欠陥の観察アルゴリズムとしては、コヒーレント回折イメージング法の一つであるタイコグラフィー法を利用した。^[9,10] タイコグラフィーでは、照射位置をずらした複数枚の回折画像を反復計算に用いる。各照明領域が重なるようにずらし、重なった領域は同じ情報が含まれるという拘束条件を利用して像再生する。

エルボーパターンの測定例を図 III.2.1.1-3-15 に示す。エルボーパターンは設計深さ 3 nm のピット構造をガラス基板上に作り込んだプログラム位相欠陥である。ガラス基板上にピット構造をドライエッチングした後、ブランク用の Mo/Si 多層膜 81 層をコーティングした。図 III.2.1.1-3-15(a) に測定対象のエルボーパターン形状と、照明光の照射位置を示した。測定ステップは 100 nm であり、照明光のサイズ 140 nm (半値全幅) より小さなステップで照射位置をずらす。10×10 個の測定点は赤丸で示されているが、各測定点で得られた回折画像を図 III.2.1.1-3-15(b) に並べて示した。エルボーパターン上で反射光の強度が低下し、回折光が生じている。すべての回折光画像に対してフーリエ変換と逆フーリエ変換による反復計算を施し、記録されていない位相情報を回復する。回折画像 (周波数空間) の位相を回復するため、実空間のパターン像においても強度のみではなく、位相情報を得ることができる。位相欠陥において、位相情報は 3 次元的な形状に相当する。よって、マイクロ CSM では EUV における実効的な欠陥形状を観察することができる。

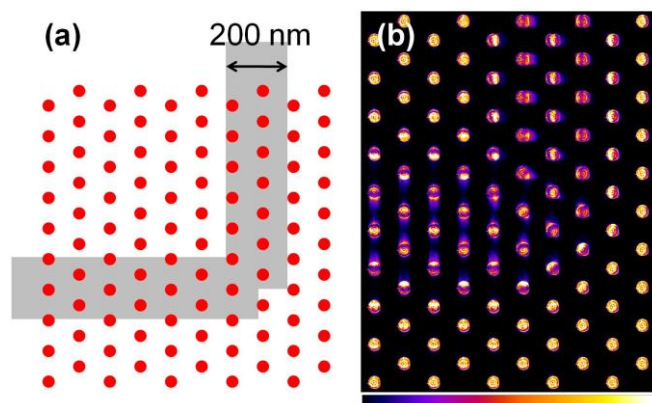
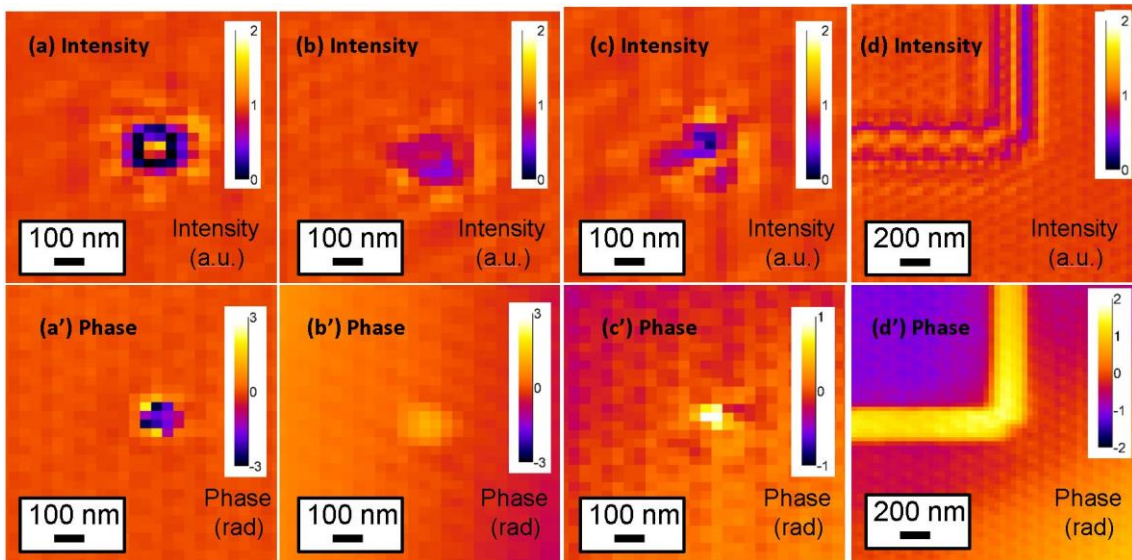


図 III.2.1.1-3-15 タイコグラフィー法による測定例

(a) 灰色のエルボーパターン上に測定点を赤丸で示している

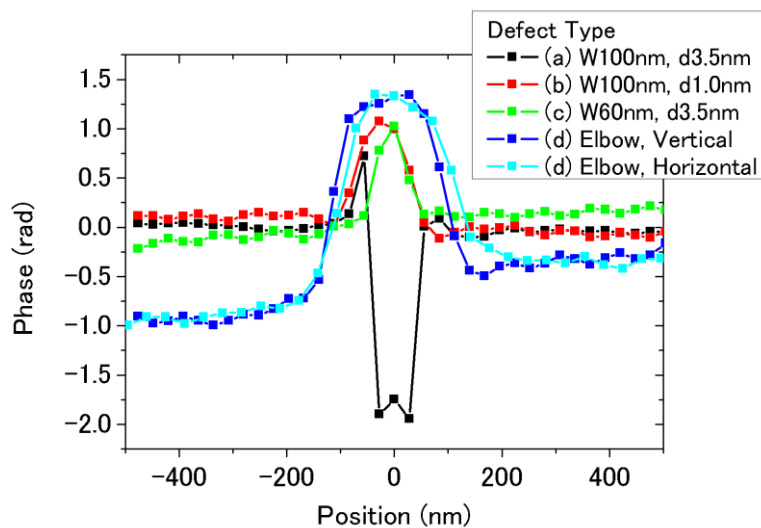
(b) 各測定点で得られた回折画像を並べた画像。欠陥上で反射強度が低下した回折光が記録されている

実際のプログラム欠陥の観察では 10×10 点で回折画像を記録した。測定ステップは 100 nm のため、観察領域は 1 μm×1 μm である。各回折画像の露光時間は 5 秒であり、1つのプログラム欠陥の観察時間は約 10 分である。図 III.2.1.1-3-16 に4つのプログラム欠陥の観察結果を示す。上段に強度像を、下段に位相像を示す。回折光の取り込み角度から計算される分解能は1ピクセルあたり縦 28.0 nm、横 35.4 nm である。折り返しミラーで回折画像の左半分が隠されているため、縦横で非対称な分解能となっている。図 III.2.1.1-3-16(d) のエルボーパターンは、パターン領域が大きいため 20×20 点で測定した。図 III.2.1.1-3-16 に示すとおり4つのプログラム欠陥の形状を像再生することができた。すべての欠陥はピット型欠陥である。エルボーパターンにおいて角部分は図 III.2.1.1-3-15(a) に示した様に欠けた構造になっているが、この構造も含めて再生できた。深さが 3.5 nm と深い位相欠陥では、境界部分が弱め合いの干渉により黒くなっている。また、すべての欠陥の内部は基板との位相差により、全体に位相が変化している。また、図 III.2.1.1-3-16(c) の 60 nm 口の微小欠陥においても、欠陥を像再生できた。大きな欠陥とは異なり、全体に弱め合いの干渉により強度が低下している。



図Ⅲ.2.1.1-3-16 各プログラム欠陥の再構築画像 強度は明るさで、位相は色相で示している。欠陥はピット型で、設計深さは3 nmである (a) 100 nm口、深さ3.5 nmの欠陥パターン (b) 100 nm口、深さ1 nmの欠陥パターン (c) 60 nm口、深さ3.5 nmの欠陥パターン (d) 幅200 nm、深さ1.0 nmのエルボーパターン

それぞれの欠陥の位相分布を図Ⅲ.2.1.1-3-17 にグラフとして示す。各欠陥の位相分布を定量的に像再生できている。欠陥(a)では、中心部の位相が -1.8 radとなった。しかし、これは位相量が $+\pi$ radを超えて大きく折りたたまれた (wrapping) ためであり、実際の位相量は $+4.5$ radと推定される。欠陥(b)と欠陥(d)において、AFM による多層膜表面の深さ測定結果は2.1 nmである。これは、EUV の位相に直すと2.0 radに相当する。一方で、マイクロCSMで測定した結果は欠陥(d)のエルボーパターンで1.9 radであり良く一致した。しかし、欠陥(b)では1.1 radであり、AFM の測定結果より小さい。



図Ⅲ.2.1.1-3-17 各プログラム欠陥の位相分布

これは、マイクロCSMの像はCCDカメラで受光可能な回折光の周波数成分の情報から像再生しているためである。よって、微小な欠陥では高周波受光できない高周波成分は取り込まれず、AFM 測定と違いが生じる。EUV 露光機も同様であり、露光機の結像光学系が取り込み可能な空

間周波数情報をウェハ上に転送する。よって、露光機に取り込まれる範囲の、欠陥からの周波数成分が露光機での転写特性を議論するには重要である。マイクロ CSM の NA は 0.27 程度であり、4倍縮小系の露光機で考えるとウェハ側の NA が 1 を超える。つまり、露光機で光学系に取り込む可能性のあるすべての回折光を取り込めている。さらにマイクロ CSM では強度と位相像を観察可能であるため、実空間と周波数空間の複素振幅が得られる。複素振幅に対して周波数空間でフィルターをかけることにより、任意の光学系での像を導出可能である。例えば、露光機のある条件の OTF (Optical Transfer Function) をフィルターとして計算することで、転写像が推定できる。

【参考文献】

[9] J. M. Rodenburg and H. M. L. Faulkner: Appl. Phys. Lett. 85 (2004) 4795
 [10] Tetsuo Harada et al., Jpn. J. Appl. Phys. 52 (2013) 06GB02

[4] 像再生精度の向上

高精度な再生像を得るために以下に述べる2つの対策を施した。

(i) 照射位置ドリフトの抑制

現在、位相欠陥の観察には 10×10 点で回折画像を測定しており、観察時間は 10 分である。そのため、観察中にマスクとゾンプレートの相対位置がドリフトすると、照射位置がずれてしまい、欠陥像がぼけて像再生精度が低下する。ドリフト量を評価するため、ゾンプレート固定板と、粗動ステージの相対距離をレーザー干渉計にて測定した。X, Y 軸方向の測定結果を [図 III.2.1.1-3-18\(a\)](#) に示す。その結果、周期 15 分程度で 60 nm 以上の大きな照射位置変動が観察された。この変動は、CCD カメラの冷却に用いている水冷チラーの温度変動が原因であることが判明した。現在用いている水冷チラーは ON/OFF 制御であり、±2℃の温度変動が生じていた。真空中でカメラの温度が変動し、ステージやゾンプレートの固定金具に熱が伝わり、照射位置変動を引き起こしている。ステージ固定台や、ステージ本体はスーパーインバーやセラミックで構成し、温度変動の影響を少ない構成としているが、水冷チラーの温度変動が大きいいため変動を抑え切れていない。そこで、水冷チラーを±0.1℃で PID 制御可能なタイプに変更し、同様にレーザー干渉計で測定した結果を [図 III.2.1.1-3-18\(b\)](#) に示す。15 分周期の変動は完全になくなり、ドリフト量も非常に小さくなった。測定時間の 10 分では 20 nm 以内の変動に抑えられた。

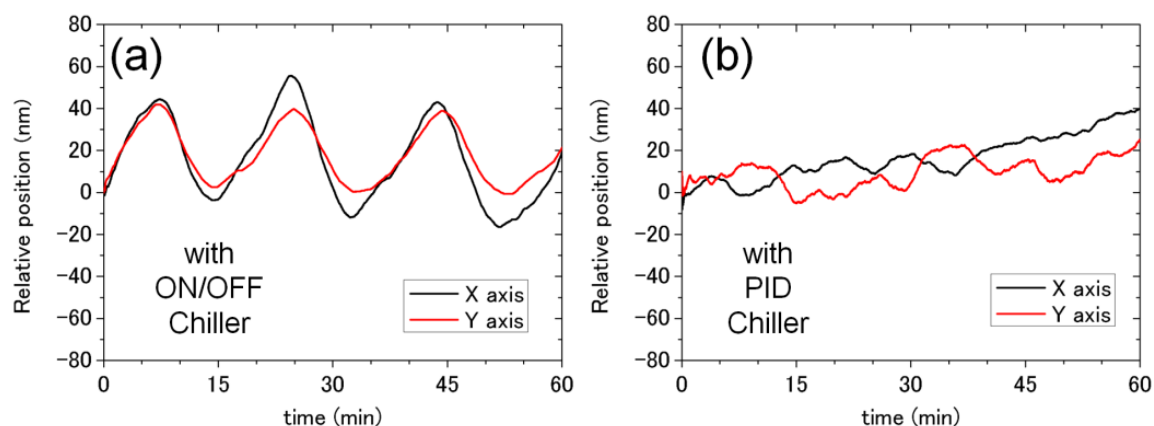
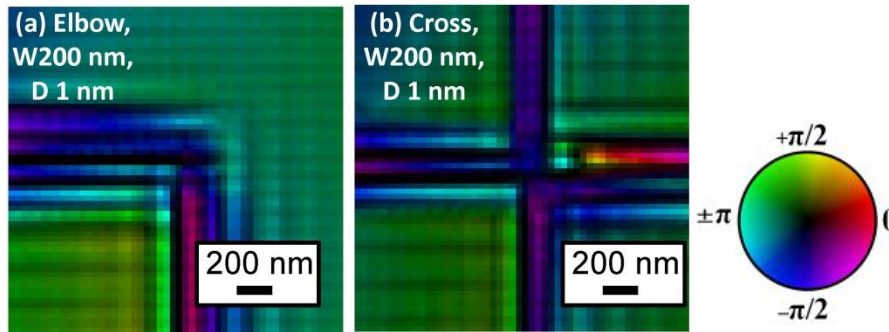


図 III.2.1.1-3-18 チラーによる照射位置ドリフトの比較
 (a) ON/OFF 制御チラーによるドリフト (b) PID 制御チラーによるドリフト

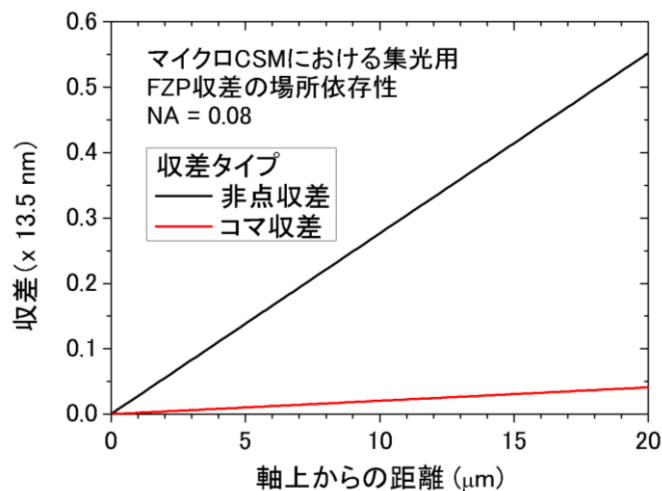
(ii) ゾーンプレート光軸の調整

像再生条件の最適化前の像再生結果を図III.2.1.1-3-19に示す。強度は明度で、位相はサイードで示している。エルボーや十字形状が再現できていないだけでなく、パターン内で位相が不均一となっていた。



図III.2.1.1-3-19 ゾーンプレート光軸調整前の再生像。設計深さ1 nmのプログラム欠陥構造

像再生精度が低い原因として、ゾーンプレート収差による照明プロファイルが理想集光条件からずれていることが考えられた。マイクロCSMの集光ゾーンプレートの収差を軸上からの距離で計算し、図III.2.1.1-3-20に示す。主な収差である非点収差とコマ収差を示す。レイリー条件の収差1/4波長以下を満たすのは軸上から8 μm (Φ 16 μm)の領域のみである。軸上より集光位置が8 μm ずれた場合での光軸傾きは0.6°程度と小さい。よって、ゾーンプレートの光軸(入射光の角度)が、設計(垂直入射)から、少しでもずれると収差が生じ、照明プロファイルが理想条件(収差ゼロ条件)でなくなっていると考えられる。図III.2.1.1-3-19の像再生例では、ゾーンプレート光軸のずれはなく、収差ゼロで集光プロファイルを計算しており、実際の収差を含む集光プロファイルとの違いから像再生精度が低下していた。



図III.2.1.1-3-20 ゾーンプレート収差の軸上からの距離依存性

そこで、像再生計算において、照明光形状に収差を反映して像再生を行った。図III.2.1.1-3-21に計算に用いた光軸からの距離(R)とずれの方向(角度: Angle)の定義を示す。理想的な集光点(光軸)からのずれを表している。理想集光条件からの集光距離からのずれを幾何学的に計算した。計算によって導出された光路差をZernike多項式によりフィッティングして、非点

収差や、コマ収差の光を導出した。フィッティングで得られた収差を、ゾーンプレート瞳面の位相分布として照明プロファイルを計算した。

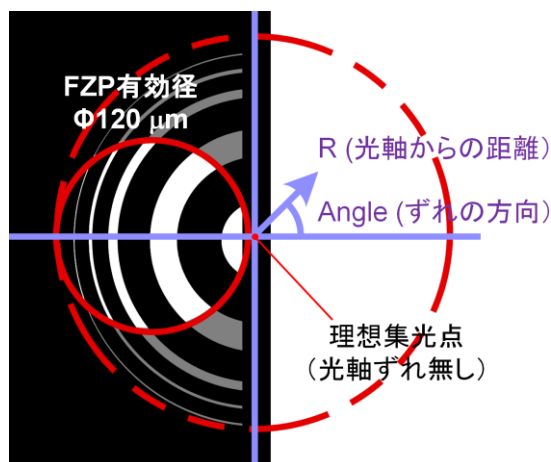


図 III.2.1.1-3-21 ゾーンプレートの収差の計算に用いた座標説明図

光軸ずれの距離(R)を0~18 μm までと、方向を45度ずつずらした条件で照明プロファイルを計算して、欠陥像再生した結果を図 III.2.1.1-3-22 と図 III.2.1.1-3-23 に示す。どちらもピット型の欠陥で、設計深さは3 nm である。

図 III.2.1.1-3-22 は200 nm 四角の位相欠陥の像再生結果である。R=0 μm の収差無し条件では、位相が四角い形状を反映していない。R=6 or 8 μm、180° の領域で、四角い形状がはっきりしており、位相差も最大となった。同様に図 III.2.1.1-3-23 の100 nm×300 nm 四角の位相欠陥の像再生においても R=6 or 8 μm、180° の領域の像再生精度が高い。この結果より、位置ずれ量を R=6~8 μm、180° と仮定した。この結果に基づき、折り返しミラー角度を調整し、ゾーンプレートへの入射光の角度を補正した。補正した条件で像再生した結果を図 III.2.1.1-3-24 に示す。図 III.2.1.1-3-19 とは違い、十字パターンの形状がはっきりしている。また、パターン内での位相分布も均一になり、像再生精度を大幅に向上できた。サンプル上で8 μm のずれはレイリー条件内であるが像再生精度には大きな影響がある。つまり、レイリー条件内の1/4 収差条件であっても、補正が必要であることがわかる。図 III.2.1.1-3-16 に示した像再生結果はすべて、折り返しミラーの入射角を補正した後の結果である。

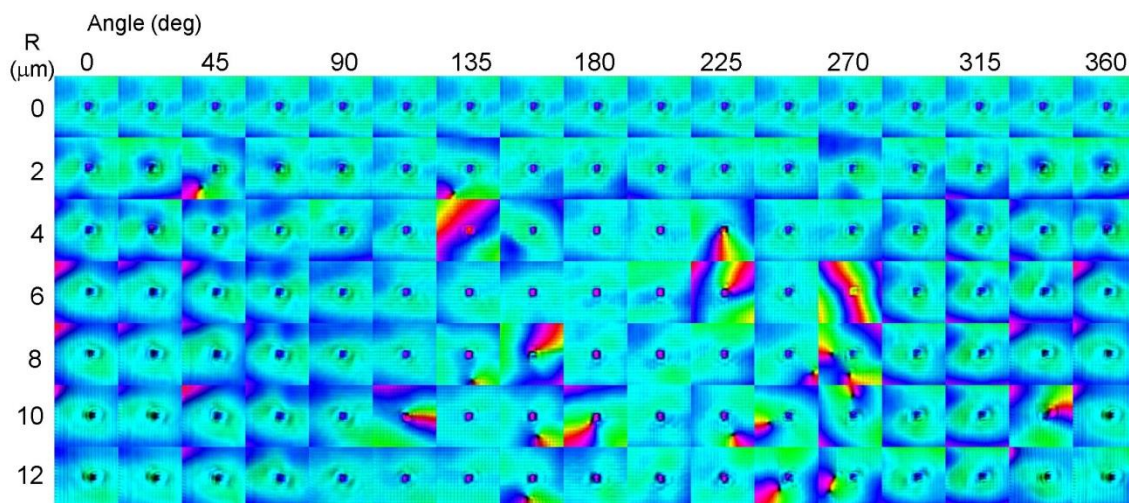
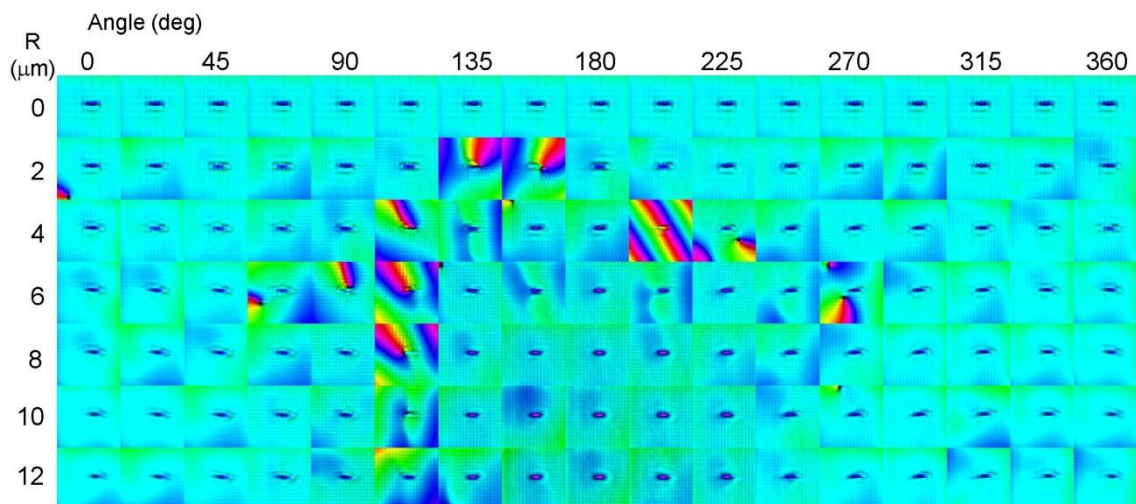
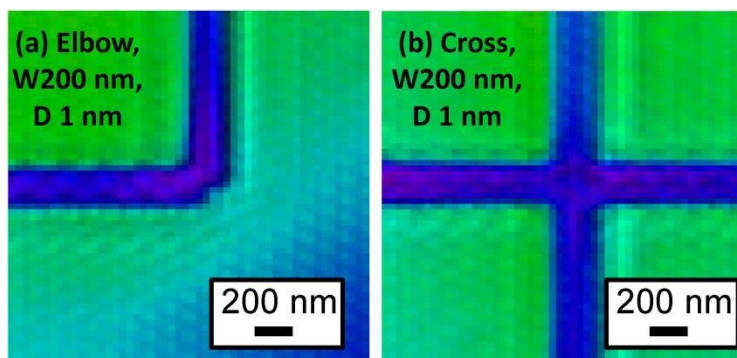


図 III.2.1.1-3-22 収差を反映した照明形状を用いた像再生結果。200 nm 四角の位相欠陥



図Ⅲ.2.1.1-3-23 収差を反映した照明形状を用いた像再生結果
300×100 nm 四角のプログラム位相欠陥



図Ⅲ.2.1.1-3-24 光軸ずれを補正した後で測定した位相欠陥の像再生結果。設計深さ 1 nm

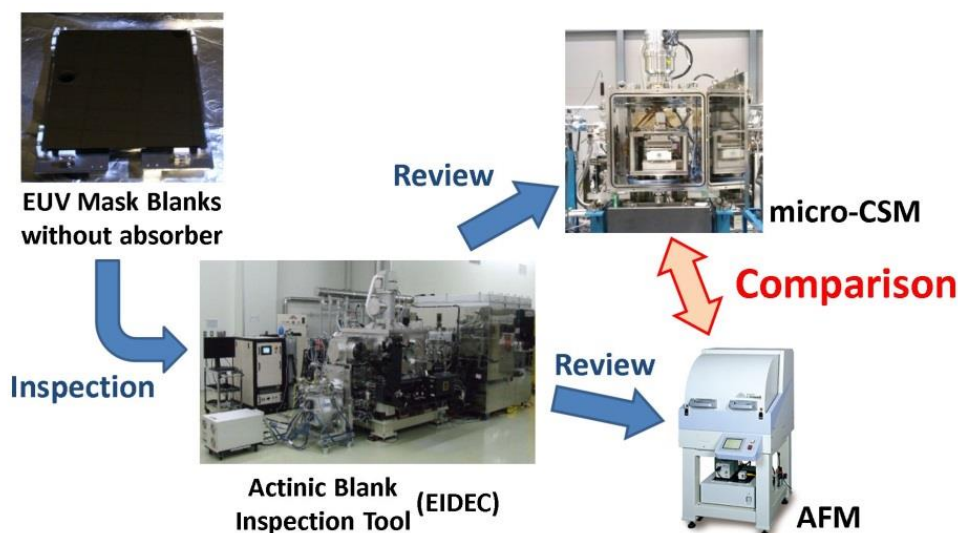
[5] 実欠陥の観察

プログラム位相欠陥はガラス基板にエッチングで作製した、意図した欠陥であり、これまでマイクロCSMの性能評価に利用してきた。しかし、実際のマスク上の欠陥は、形状も様々であり、異物のような吸収体欠陥もあり、多彩である。このような実欠陥の観察によりマイクロCSMの性能を評価した。測定サンプルは半導体量産に用いられるマスクと同グレードの、吸収体なしのブランクである。測定の流れを図Ⅲ.2.1.1-3-25に示す。欠陥の位置はABIにより事前に測定済みである。今回、欠陥(a), (b), (c), (d)の4つの実欠陥の測定結果を示す。ABIで評価した欠陥信号強度はそれぞれ、1.0, 0.94, 2.19, 2.00である。欠陥信号強度は欠陥(a)の強度で規格化している。欠陥信号強度は、転写されやすさを表す指標である。欠陥(a), (b)にくらべ欠陥(c), (d)は2倍程度、欠陥信号強度が大きい。ABIで検出した欠陥はAFMで形状測定をした。

図Ⅲ.2.1.1-3-26から図Ⅲ.2.1.1-3-29に実欠陥(a)-(d)の観察結果を示す。図(a)はAFMの観察結果である。マイクロCSMの観察結果は図(b)に強度像を示し、図(c)に位相像を示した。3つの画像で空間スケールは同じである。図(b)の強度像において欠陥のない領域の強度を1に規格化した。各欠陥の観察結果について述べる。

欠陥(a)(図Ⅲ.2.1.1-3-26)はAFM測定結果より、形状は縦横 $203 \times 51 \text{ nm}^2$ 、高さ33 nmである。マイクロCSMの観察結果は形状をよく再生できた。吸収の最も大きい場所で、規格化強度は0.13であり、位相は+0.40 radであった。位相像のコントラストは低く、位相は折りたたまれていない。もし

この欠陥が位相欠陥であるとする、AFMで測定した高さ33 nmから推定される位相量は31 radと非常に大きく、非常に高い位相像のコントラストが予想される。これらから、この欠陥は位相欠陥ではなく、表面上の異物による吸収体欠陥である。



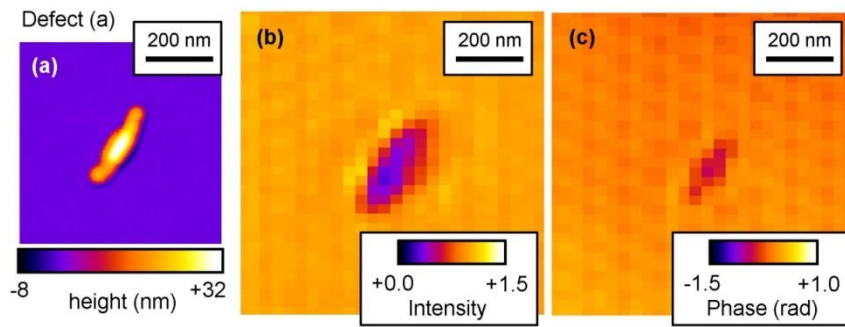
図Ⅲ.2.1.1-3-25 実欠陥マスク測定の流れ
事前にABIで欠陥位置を特定しておき、AFMとマイクロCSMで観察した

欠陥(b)([図Ⅲ.2.1.1-3-27](#))はAFM測定結果より、幅100 nm、長さ1 μm以上のスクラッチ状の傷と推定される。マイクロCSMの測定結果でも、位相像においてははっきりとスクラッチ形状が観察された。一方、強度像では規格化強度は0.9程度であり、はっきりとは観察できていない。位相像における高さは0.34 radであり、位相から計算されるスクラッチの深さは0.4 nmである。AFM測定結果でも、深さは0.4 nmであり、測定結果が良く一致した。よって、欠陥(b)は基板上の傷による位相欠陥である。

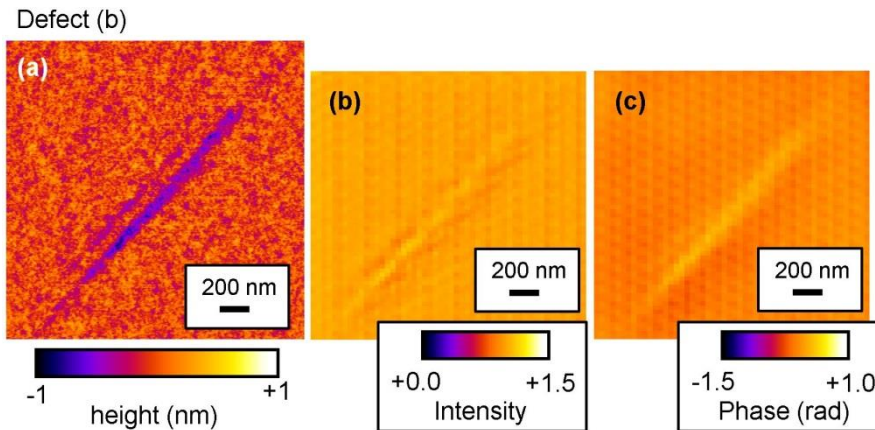
欠陥(c)([図Ⅲ.2.1.1-3-28](#))はAFM測定結果より、形状は縦横76×87 nm²、高さ8.8 nmである。マイクロCSMの測定結果では、欠陥(a)と同様に大きな位相シフトは観察されず、最大で-0.63 rad程度である。よって、欠陥(a)と同様に吸収体欠陥である。

欠陥(d)([図Ⅲ.2.1.1-3-29](#))はAFM測定結果より、形状は縦横67×57 nm²、深さ4.5 nmである。マイクロCSMの結果、位相像では非常に高いコントラストが観察された。このときの位相シフト量は-1.5 radと他の欠陥に比べて、非常に大きい。よって、欠陥(d)は位相欠陥である。また、位相像において欠陥はAFM測定と同様に点形状に像再生された。空間分解能は、ピクセルサイズと同じ、30 nm程度あることが明白である。通常の結像光学系を利用した顕微鏡では、これほど小さな欠陥では、収差の影響が大きく、点形状のサンプルを点形状に観察することは難しい。マイクロCSMは、結像光学系のない、収差のない光学系であるため、欠陥のような点形状の観察でも非常に有利である。

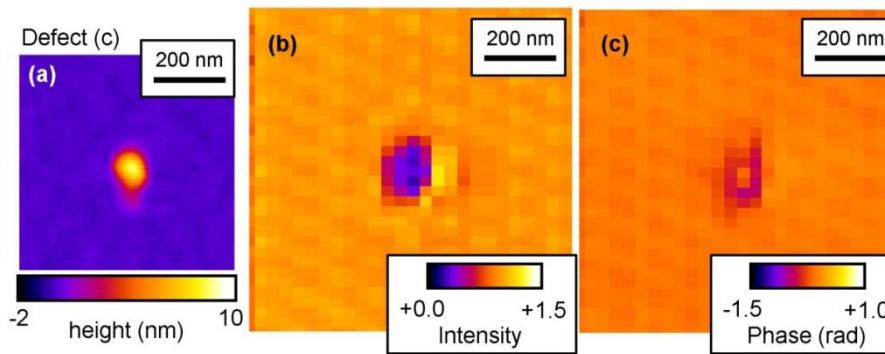
このように、実欠陥を、回折限界の分解能で観察でき、位相像より実欠陥が吸収体であるか、位相欠陥であるかを判別することができた。また、位相の情報に欠陥の露光における影響を見積もるには重要であり、今回マイクロCSMという複雑な結像光学系のない簡便なセットアップで取得できた。そのため、ABIで検出した欠陥の特性を評価する顕微鏡としての非常に高いポテンシャルを実証できた。今後は、マイクロCSMを実験室で利用できるよう、高次高調波EUV光源等の実験室コヒーレント光源と組み合わせることが重要となる。



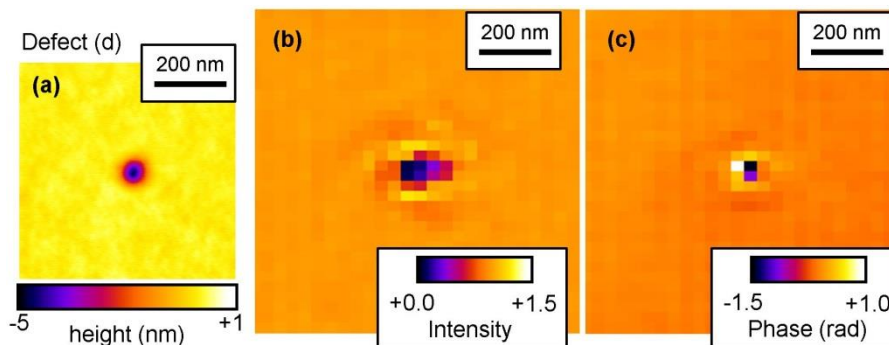
図Ⅲ.2.1.1-3-26 欠陥(a)の(a)AFM 観察結果、マイクロCSM 観察結果の(b)強度像と(c)位相像
3つの画像で空間スケールは同じ



図Ⅲ.2.1.1-3-27 欠陥(b)の観察結果



図Ⅲ.2.1.1-3-28 欠陥(c)観察結果



図Ⅲ.2.1.1-3-29 欠陥(d)の観察結果

[6] マイクロ CSM 観察像から ABI 像の推定

前節で述べたようにマイクロ CSM で観察した実欠陥の回折光強度より、反復計算により欠陥の強度と位相情報を導出した。つまり、実空間の複素振幅が得られていることに相当する。実空間の複素振幅をフーリエ変換すると、周波数空間の複素振幅を導出可能である。周波数空間でフィルターをかけることで、任意の光学系での欠陥像を計算可能である。具体的には光学系において、任意の照明条件、任意の結像光学系(入射瞳)、任意の収差条件における欠陥像の空間像を計算可能である。周波数空間にてこれらの条件をフィルターとして作用させ、逆フーリエ変換にて任意の光学系の実空間像を導出する。このとき欠陥特性は、照明光の入射角度によらず一定と仮定している。

今回、ABI 光学系における空間像を計算し、実際に ABI 光学系で得られた像と、空間像の計算結果を比較した。ABI 光学系の条件は NA0.27, 中心遮蔽の NA は 0.1、照明 σ 0.2、無収差としてフィルター処理した。図 III.2.1.1-3-30~35 に 6 個の欠陥の (a) AFM 観察結果、(b) マイクロ CSM 観察結果の強度像と(c) 位相像、(d) マイクロCSMの欠陥照射時の CCD 画像、(e) ABI 観察結果、(f) ABI 光学系を仮定した空間像計算結果を示す。(d)の CCD 画像はステップ&スキャンにおいて、最も回折強度が強くなった点における、欠陥からの回折画像である。

欠陥(a)の吸収体欠陥における図 III.2.1.1-3-30(f)の空間像計算結果には、マイクロ CSM のステップ&スキャン測定に応じた点状のアーティファクトが生じている。これは実際の形状ではなく、像再生における誤ったデータである。位相像ではあまり目立たないが、空間像計算結果には大きく出してしまうため低減が必要である。例えばスキャンステップをランダムに変化させるなどして低減が可能である。図 III.2.1.1-3-30(d)のマイクロ CSM の CCD カメラ画像では、欠陥形状に応じて左上から左下に伸びた回折光が記録されている。これは、後述の ABI 光学系の収差(特にコマ収差)の影響を受けにくい方向であり、ABI 観察においても収差の影響は少ないと予想される。

空間像計算結果は AFM やマイクロ CSM で得られた形状と大きく異なり、欠陥が短軸側にも広がっている。これは、ABI 光学系が暗視野であるため、エッジ部分の多い短軸側が太ったためと考えられる。図 III.2.1.1-3-30(e)の ABI 観察結果は、空間像観察結果と一致しており、欠陥の短軸側が太って観察された。よって、ABI 光学系でこのような細長い欠陥を観察した場合は、短軸側が太く観察されることを実験的にも、空間像の計算でも実証できた。

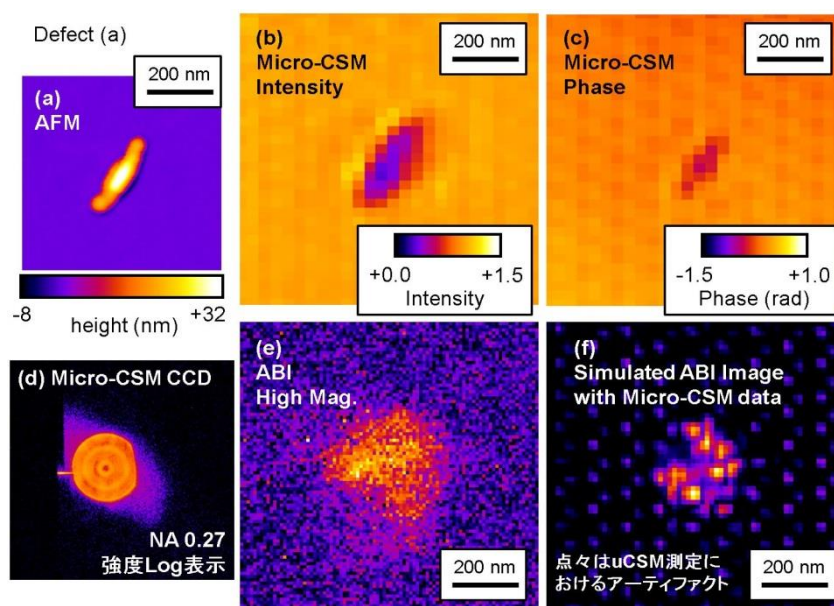


図 III.2.1.1-3-30 吸収体欠陥(a)の観察結果と、空間像の計算結果

欠陥形状が長く、深さが浅い欠陥である欠陥(b)では、空間像計算結果はステップ&スキャンのアーティファクト成分が大きい。そのため、欠陥形状を空間像としては評価できなかった。

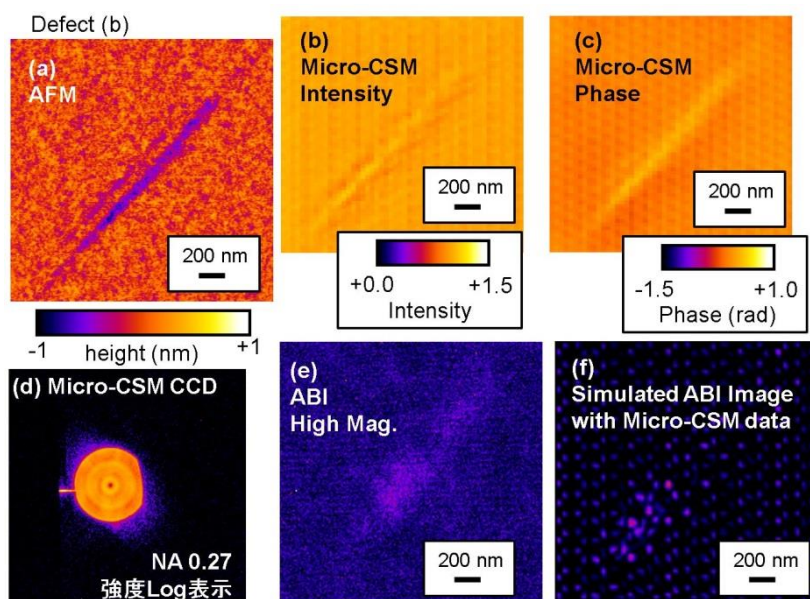


図 III.2.1.1-3-31 位相欠陥(b)の観察結果と、空間像の計算結果

吸収体欠陥である欠陥(c)では、図 III.2.1.1-3-32(c)の空間像計算結果は四角い形状であり、図 III.2.1.1-3-32(e)の ABI 測定結果と一致した。これは図 III.2.1.1-3-32(d)に示すように回折光が生じる方向が横方向であり、後述する上下方向の収差の影響を受けにくいためである。よって、収差の影響を受けにくい条件は ABI 測定結果と、空間像計算結果は一致している。

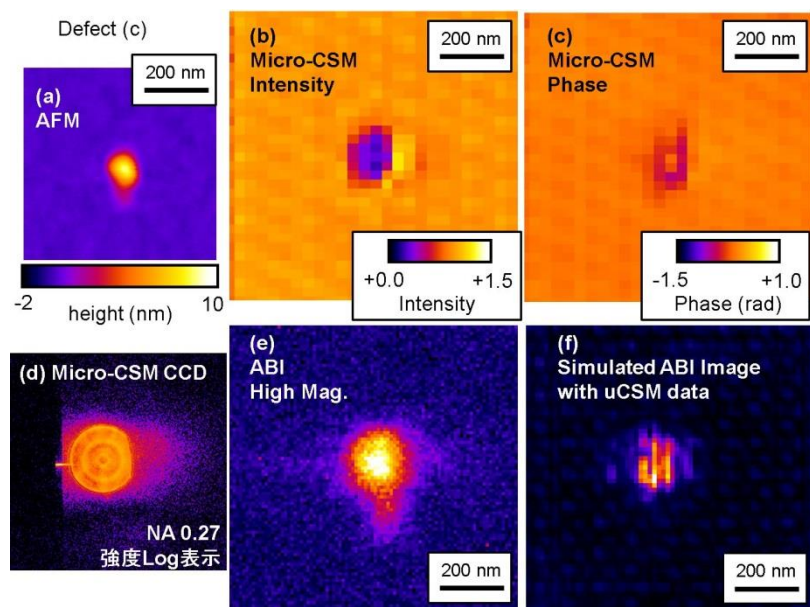


図 III.2.1.1-3-32 吸収体欠陥(c)の観察結果と、空間像の計算結果

位相欠陥である欠陥(d)では、図 III.2.1.1-3-33(e)の ABI 像が大きく上下に流れており、上下方向の収差の存在が推定される。そのため、他の結果についても同様に上下方向に収差が存在して

いと推定される。図 III.2.1.1-3-33(d)のマイクロ CSM の CCD 画像から、欠陥からの回折光は左右方向だけでなく上方向にも広がっているため、上下方向の収差の影響を受けていることがわかる。図 III.2.1.1-3-33(f)の空間像計算結果は、AFM や位相で観察された形状通り点形状となった。

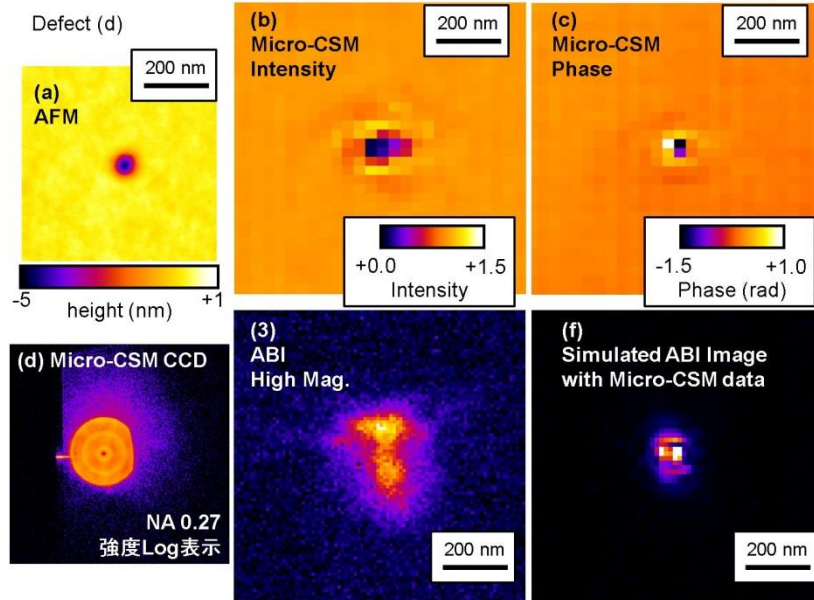


図 III.2.1.1-3-33 位相欠陥(d)の観察結果と、空間像の計算結果

吸収体欠陥である欠陥(e)の図 III.2.1.1-3-34(f)に示す空間像計算結果は、マイクロ CSM 測定結果の位相形状を反映している。また、図 III.2.1.1-3-34(d)のマイクロ CSM の CCD 画像から、欠陥からの回折光は左右だけでなく上下方向にも広がっており、コマ収差の影響が懸念される。実際に、ABI の測定結果は、空間像計算結果にコマ収差を掛け合わせたような形状になっている。

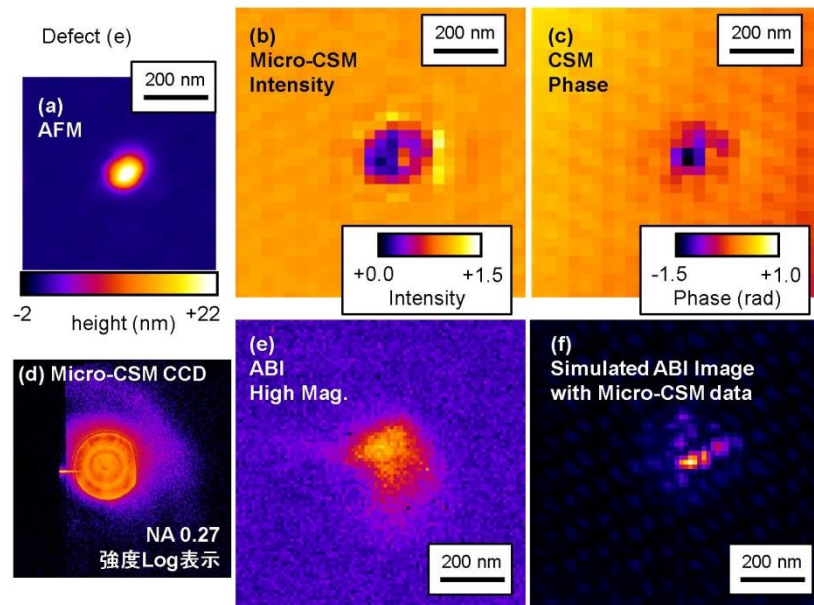


図 III.2.1.1-3-34 吸収体欠陥(e)の観察結果と、空間像の計算結果

吸収体欠陥である欠陥(f)でも、図 III.2.1.1-3-35(f)の空間像計算結果は図 III.2.1.1-3-35(c)の

マイクロ CSM 位相測定結果と同様になった。よって、吸収体欠陥であっても、ABI 像は欠陥の位相分布に大きく影響されることがわかる。図 III.2.1.1-3-35(d)のマイクロ CSM の CCD 画像より、回折光は上下左右と全方位に広がっており、ABI 測定においては収差の影響が発生すると考えられる。実際に、図 III.2.1.1-3-35(e)の ABI 測定結果は、収差の形状の影響が大きい。

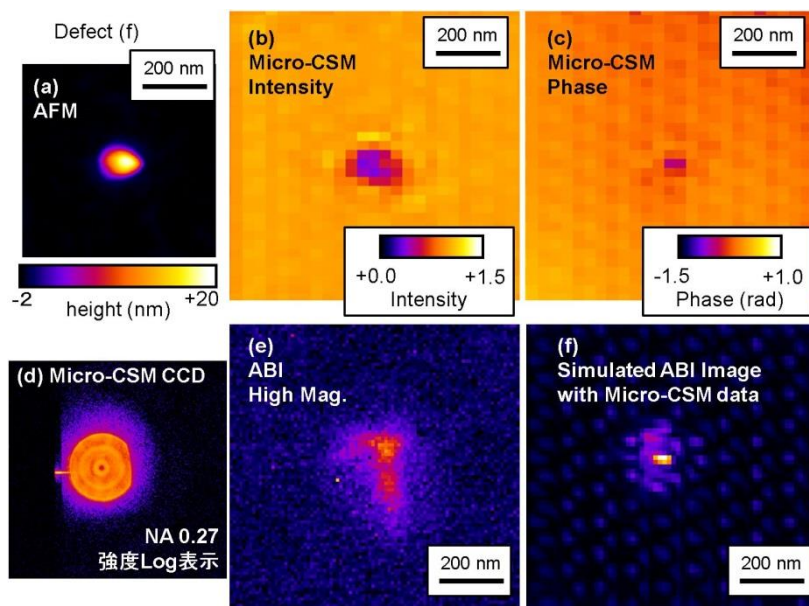


図 III.2.1.1-3-35 吸収体欠陥(f)の観察結果と、空間像の計算結果

マイクロ CSM 観察結果より ABI における空間像を推定し、各欠陥が ABI 観察像と比較することで、ABI 装置へのフィードバックができた。また、マイクロ CSM の CCD 画像より、ABI 光学系に取り込まれる回折光画像の分布が予想でき、ABI 光学系に存在する収差(特にコマ収差)の影響を予想することができた。このように、マイクロCSMは ABI 検出欠陥の特性評価顕微鏡として非常に高いポテンシャルを有することを実証できた。将来的には、現在の ABI の収差を仮定して空間像を推定することで ABI 像と空間像の計算結果が一致し、装置開発へさらなるフィードバックが可能となる。

[7] まとめ

EUV マスクの欠陥を観察するため、欠陥に集光 EUV 光を照射し、回折光を記録する顕微鏡であるマイクロCSMを開発した。プログラム欠陥の観察し、30 nm と非常に高い空間分解能で強度と位相像を得ることができた。位相情報は露光機における欠陥の影響を見積もるために非常に重要である。像再生精度を向上するため、ステージドリフトを抑え、照明形状の収差を低減した。

プログラム欠陥だけではなく、実際の EUV マスク上の欠陥である実欠陥も観察した。観察した実欠陥は事前に ABI 装置により検出したものであり、マイクロ CSM と AFM の測定結果を比較した。実欠陥として、線状の位相欠陥、ピット状の実欠陥を 30 nm と非常に高い分解能で観察できた。特に、ピット欠陥の形状は AFM の形状をよく反映しており、結像性能の高さを実証できた。さらに、位相量から、他の欠陥が吸収体欠陥であることを明らかにできた。マイクロCSMと位相像と AFM 像を比較することで、様々な比較が可能であり、欠陥の特性評価に非常に有用であることを実証できた。

また、実空間の複素振幅情報であるマイクロ CSM 測定結果より、無収差な ABI 光学系における空間像を計算した。実際の ABI 観察結果と、空間像計算結果を比較することにより、暗視野である

ABI の結像特性と、収差特性を分けて議論することができた。マイクロ CSM の測定では回折光画像を直接記録するため、欠陥形状によって収差が影響するかどうかを回折光分布として判断できた。将来的には、ABI だけでなく、露光機や AIMS 光学系の像などの空間像を計算することで、様々な EUV 光学系への結像特性のフィードバックが可能となる。

今後は、マイクロCSMを実験室で利用できるよう、高次高調波EUV光源等の実験室コヒーレント光源と組み合わせることが重要となる。

(1)-(iv) EUV 明視野顕微鏡観察技術の開発(東北大学への再委託)

【1】 研究開発の目標

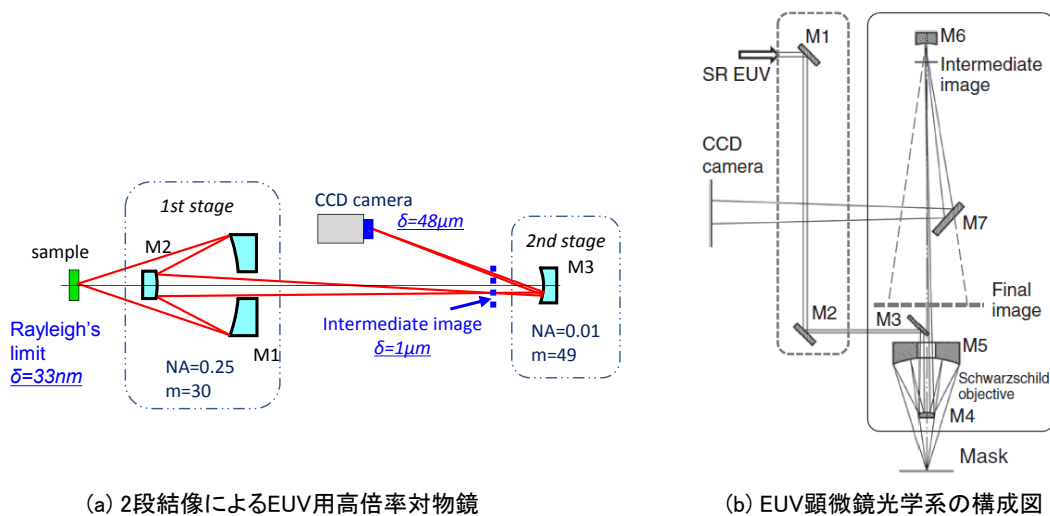
上記(1)-(i)(ABI装置高度化)、および(1)-(ii)(ABI装置仕様検討)で開発するABI装置技術では、高速検査にも重点を置き検査ピクセルサイズを大きくしているので、検出される欠陥の微細構造の影響を把握することはできない。一方、転写性は欠陥の微細構造に影響されると考えられ、微細構造を知ることが重要である。このために、検査の高速性は不要だが空間分解能が高い、明視野EUV顕微鏡が必要である。すでに兵庫県立大学ではシュバルツシルド光学系とX線ズーム管を組み合わせたEUV顕微鏡を開発し、種々のEUVマスクパターンや欠陥を観察した実績を有していた。しかし、構成上の制約から、マスク上で100nm以下のパターンを高いコントラストで結像することは困難であった。一方、東北大学は計測用多層膜光学技術の研究実績があり、近年、多層膜鏡のみを用いた高倍率結像光学系(>1000X)を提案した。

本課題では、光学系を提供できる東北大学と、光源やマスクステージなどの施設を保有する兵庫県立大学と連携して、hp 16nm~11nm世代対応のEUVブランク及びマスクの欠陥観察を目的とする明視野EUV顕微鏡観察技術の開発を行う。また、マスクブランク内に存在する多層膜欠陥を明視野観測し、欠陥がパターン転写像に与える影響を顕微鏡で得られる観察像から予測する。特に、現時点で提供されているEUV露光装置は開口数(NA)の制限からhp 11nm世代の露光転写像を確認することはできないので、hp 11nm世代において欠陥の影響を受けるパターン転写像を評価する装置として活用する。

【2】 成果

[1] EUV用高倍率拡大光学系の設計とミラーの製作

EUVマスク観察用顕微鏡の心臓部となる、高倍率結像光学系(対物鏡)の基本構成と、それを採用したEUV顕微鏡光学系の構成を図III.2.1.1-4-1に示す。対物鏡は、東北大学が独自に考案した、2段結像光学系で、3枚の多層膜球面ミラーで構成される。同図に示すように、第1段には、倍率30倍のシュバルツシルド対物鏡を採用し、中間像の後方に第2段拡大系である凹面鏡を配置する。光学系全体の拡大倍率は、第1段および第2段光学系の倍率の積となり、全長600mm程度のコンパクトな光学系で1460倍という高い拡大倍率を得ることができた。EUV像は、ピクセルサイズが $13\mu\text{m}$ のCCDカメラで観測する。CCDカメラの1ピクセルのサイズは、観察対象であるマスク面上で9nm角に相当する。



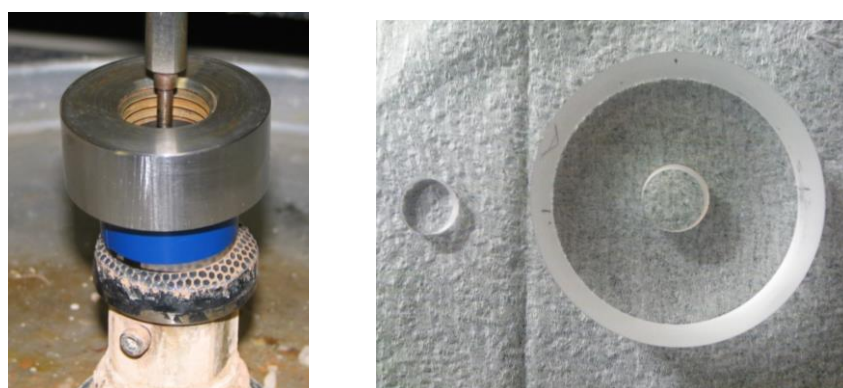
図III.2.1.1-4-1 東北大学で設計・製作されたEUV明視野顕微鏡光学系

対物鏡に期待される結像特性を光線追跡計算で見積もった結果、第2段拡大系である凹面鏡

は倍率を増大するほかに軸外収差を効率的に補正すること、及び、2段拡大対物鏡では直径 160 μm の広い視野内で回折限界分解能(30nm)を期待できること、が示された。

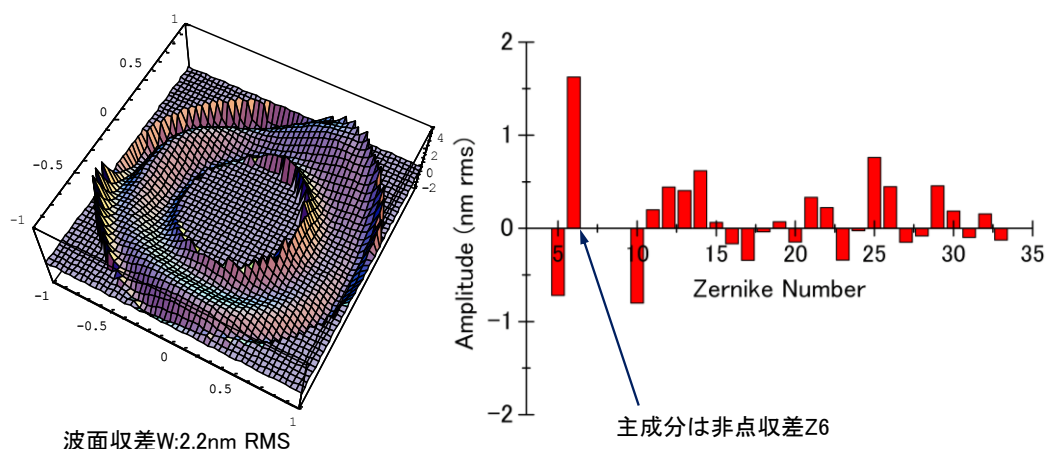
照明光学系は図Ⅲ.2.1.1-4-1(b) における2枚のミラーM1およびM2から構成され、M1は球面ミラー、M2はシリンダリカルミラーである。これらのミラーは対物鏡の手前で照明光源の像を形成し、更に対物鏡の射出瞳面上に光源像を形成することによりケーラー照明を実現している。放射光を利用するのでコヒーレント照明($\sigma < 0.01$)である。ただし、2枚のミラーM1、M2の姿勢を組み合わせることで制御することにより、マスク面上の照明位置を保ったまま射出瞳上に形成される光源像の位置を任意の位置に調整することが可能である。したがって、射出瞳上の異なる位置での照明条件でマスクの拡大像を収集し、それらの強度和をとれば、見かけ上部分コヒーレントの観察像を得ることができる。

高い空間分解能を得るには、nm形状精度を持つミラー基板の作製が鍵となる。EUVLマスク観察用の対物鏡基板は、東北大学多元物質科学研究所に付属する光器械工場(レンズ工場)との共同で行った。図Ⅲ.2.1.1-4-2において、左図が、ピッチ皿による研磨工程の様子、右図の写真は完成したミラー基板を示す。



図Ⅲ.2.1.1-4-2 ピッチ皿による研磨工程の様子と完成したミラー基板

ミラー基板の形状精度の精密計測も東北大学にて行った。図Ⅲ.2.1.1-4-3は、レーザー干渉計で精密に計測したミラー形状誤差の実測値を用いて、光軸調整後に対物鏡で生じる波面収差の数値予測を示す図である。



図Ⅲ.2.1.1-4-3 ミラー形状誤差の実測値から予測した、対物鏡の波面収差

レーザー干渉計でミラー基板の形状誤差を計測した結果、第1段結像系を構成する、凹面 M1・

凸面 M2 とも 1.5nm rms 程度の高い形状精度を得た。波面収差は鳥瞰図に示す分布のように計算され、その値として、2.2nm rms を得た。また、輪帯状の瞳内で直交する Annular Zernike 多項式により、波面収差を成分分解した結果も合わせて示した。残留する波面収差の主要成分は、非点収差(Z6)であることが分かった。

[2] 顕微鏡光学系の基本性能評価

2 段拡大光学系の第 1 段に用いた、Schwarzschild 光学系では、ザイデル収差の最初の 3 項である、球面収差、コマおよび非点収差が補正できる。一方で、設計自由度の不足から、第 4 項である Petzvar 項は残留し、像面は湾曲する。このため、物体面から像面までの光線追跡計算で得られるスポットダイアグラムを調べると、中間像面では、[図 III.2.1.1-4-4\(a\)](#)に示すように、物体高さ y が増大するにしたがって、像は丸く広がってしまう。ここで、図内の黒丸は、Airy disk で回折限界での空間分解能を表す。2 段拡大系では、付加する拡大系により設計自由度が増大し、Petzvar 項を補正できる。このため、最終像面はほぼ平面となる。[図 III.2.1.1-4-4\(b\)](#)に示すように、本設計例では物体高 $80 \mu\text{m}$ まで、高い分解能(30nm)を得ることが可能となる。

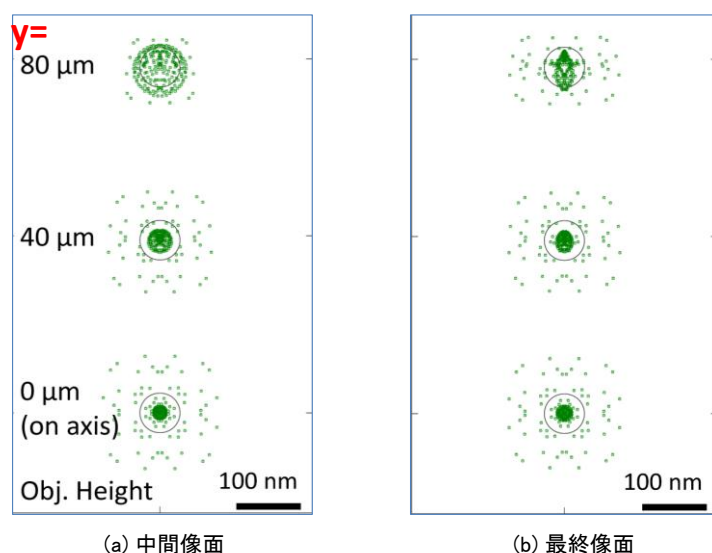
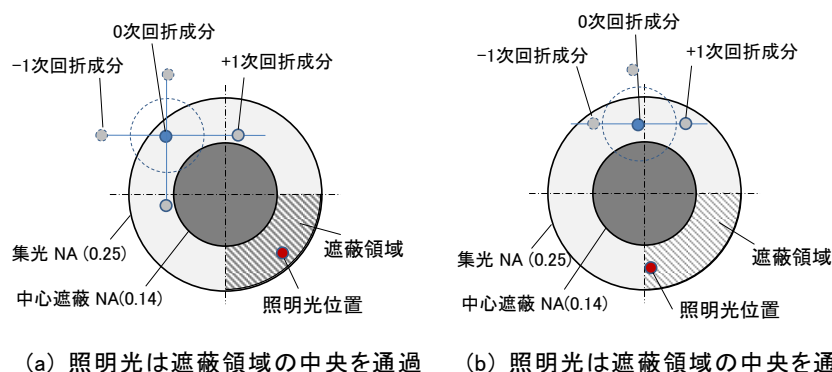


図 III.2.1.1-4-4 スポットダイアグラムによる、収差補正の評価

実際に 2 段拡大系を組立てて、EUV マスク上の微細な吸収層パターンを観察した。準備したテストマスクは、マスク基板(Qz)上に Mo/Si 多層膜を 40 ペア成膜し、Ru キヤッピング層(厚さ 2.5 nm)を形成した後に、厚さ 66 nm の吸収層 L&S パターンを設けた構造を有する。

L&S パターン観察像の特性は主として 0 次、-1 次、及び+1 次の回折成分で表される 1 次元パターンの像で議論され、0 次回折成分の瞳通過位置が変化すると像質も変化する。[図 III.2.1.1-4-5](#) は、今回開発の EUV 顕微鏡光学系の瞳とそこを通過する回折成分の典型的な 2 例を示す。瞳の形状は集光 NA=0.25、中心遮蔽 NA=0.14 で定義される輪帯であるが、その 1/4 は照明用ミラー M3 の存在による遮光領域である。同図(a)は照明光が瞳遮蔽領域の中央部を通過する場合であり、微細な L&S パターンの回折成分のうち+1 次成分は瞳を通過するが-1 次成分は遮断されて像形成に寄与しない。マスクを照明する EUV 光の主光線入射角度は約 13 度となり、その射面は、マスク上のラインパターンの方向と 45 度の交差角度を有する。2 光束干渉による像形成であり、x 方向及び y 方向いずれの L&S パターンも同一の高分解能な結像特性を有する。一方、図(b)は照明光が瞳遮蔽領域の端部を通過する場合であり、照明光の入射角度を 10 度程度とすることができる。y 方向に延びる L&S パターンについては、ある程度の微細パターンまで 0 次、-1

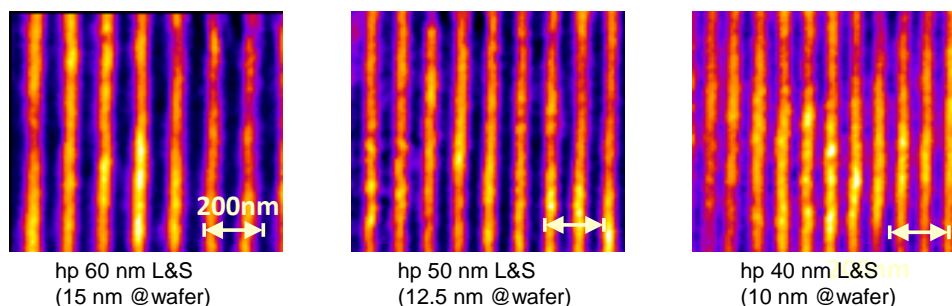
次、及び+1 次の3回折成分が観察像形成に寄与する。しかし、x方向に延びる L&S パターンに対する解像度は低い。



図Ⅲ.2.1.1-4-5 EUV 顕微鏡光学系の瞳とそこを通過する回折成分の典型的な2例

ここでは、瞳を通過して像形成に寄与する回折成分は非対称であるものの、回折角度の大きな +1 次成分を確保するとの観点から、照明光は瞳遮蔽領域の中央部を通る照明法を採用した。作製した拡大光学系を用いて評価用の吸収層テストパターンを観察し、拡大光学系の空間分解能を評価した結果を図Ⅲ.2.1.1-4-6 に示す。図中、左から、hp 60nm, 50nm, 40nm の L&S パターンの空間像(波長 13.5nm)で、露光装置で転写されるウェハ上では、それぞれ、hp 15nm, 12.5nm, 10nm に相当する。各パターンとも、50%程度の良好なコントラストが得られている。これにより、本研究による拡大光学系が、hp 16 nm~11 nm 世代の EUV マスク検査に十分な空間分解能を持つことを確認した。

一方で、像には放射光の高い空間コヒーレンスに由来する、スペックルノイズが重なっている様子がわかる。スペックルノイズの低減には、照明光の空間コヒーレンスの低減が必要となる。今後は、コヒーレンスの制御のため、照明光学系を改良する予定である。



図Ⅲ.2.1.1-4-6 倍率 1460 の EUV 明視野顕微鏡で観察した微細マスクパターンの観察像

[3] 位相欠陥が転写パターンにあたる影響の直接観察(シミュレーション予測)

マスクブランクに位相欠陥が残存する EUV マスクのパターン部を EUV 顕微鏡で明視野観察すると、位相欠陥がパターン転写像に与える影響の有無を直接観察できることが期待される。しかし、ここで活用する EUV 明視野顕微鏡を構成する光学系と、マスクパターンをウェハ上に転写する露光装置の光学系とは構成が異なるので、EUV 明視野顕微鏡観察像とウェハ上のパターン投影像とは同一ではない。

観察実験に先立って、まず EUV 明視野顕微鏡観察像のシミュレーションを行って位相欠陥が

観察像に与える影響を調べ、ウェハ上のパターン投影像シミュレーション結果と比較した。位相欠陥は隣接する吸収層ラインパターン間のスペース部の中央に存在すると仮定し、観察像の光強度の変化を調べた。ピット位相欠陥及びバンプ位相欠陥が存在する場合の顕微鏡観察像光強度分布の計算例と、位相欠陥により光強度が変化するスペース部の光強度断面図(P-P'断面)を図 III.2.1.1-4-7 に示す。顕微鏡観察のための照明条件として、照明光の主光線を含む入射面はマスク上のラインパターンの長手方向に対して 45 度回転しているため、観察像光強度分布は X 軸に対しても Y 軸に対しても非対称である。ここで、図に示すように、スペース部に沿った明るい観察像光強度のうち、その最大値を I_{max} 、最小値を I_{min} 、欠陥から十分に離れた位置の光強度を I_0 とする。このとき、EUV 顕微鏡観察像における位相欠陥の影響として、光強度の変化 (Intensity variation: ΔI) を以下のように定義した。

$$\Delta I = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_0} \times 100 (\%)$$

一方、欠陥転写性評価の節で説明したように、位相欠陥がマスクパターン投影像に与える影響をウェハ上に投影されたパターン像から定義されるスペース寸法誤差 (CD 誤差: ΔS) で表し、以下のように定義する。

$$\Delta S = \frac{S_0 - S_{PD}}{S_0} \times 100 (\%)$$

ここに、 S_0 と S_{PD} は、ウェハ上において無欠陥の場合のスペース寸法と位相欠陥の影響を受けて変化したスペース寸法を示す。

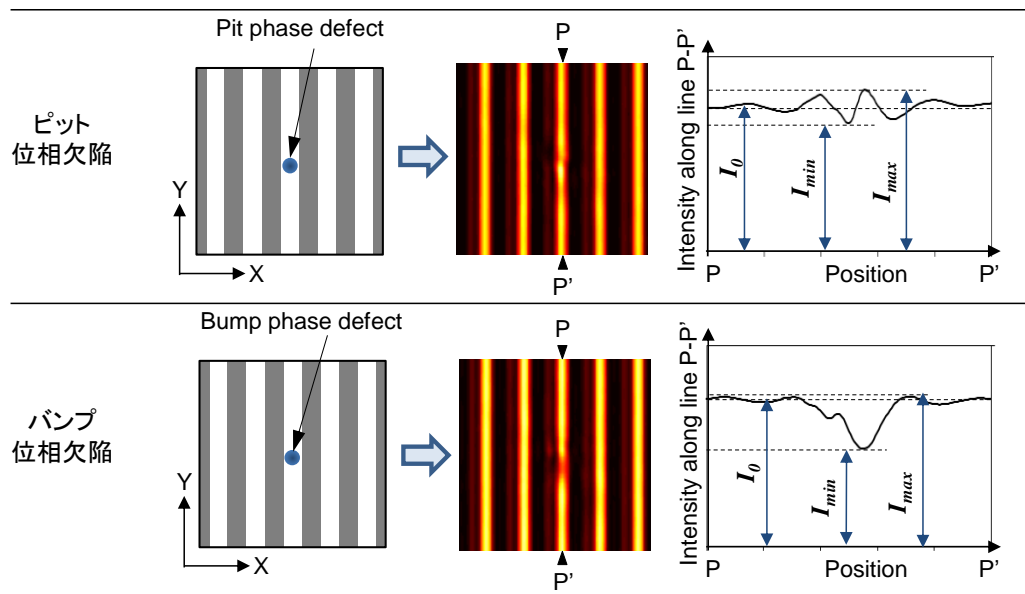


図 III.2.1.1-4-7 位相欠陥を含む吸収層 L&S パターンの EUV 顕微鏡観察像シミュレーションの例

マスク上の hp 64 nm L&S パターンを想定し、ブランクに幅 (FWHM) 50 nm、高さ 1 nm のバンプ位相が残存する場合の、EUV 顕微鏡観察像光強度分布とウェハ上に縮小転写した hp 16 nm L&S 投影像光強度分布の計算結果を図 III.2.1.1-4-8 に示す。このマスクパターンをウェハ上に転写するための露光条件は、NA=0.33、ダイポール照明を仮定した。ここで仮定した位相欠陥はパターン転写像に約 10% の CD 誤差 ΔS を与えるサイズのものであり、検出すべき欠陥である。EUV 顕微鏡観察像には、位相欠陥部で明らかに光強度の低下がみられ、欠陥を認識できる。

ここで、種々のサイズの位相欠陥の影響を受けて変化する量として、EUV 顕微鏡で得られる吸収層パターン観察像光強度の光強度変化 ΔI と、縮小転写されたウェハ上パターン投影像から予

測した CD 誤差 ΔS との関係を、**図 III.2.1.1-4-9** に示した。ここでは、マスク上の吸収層パターンとして hp 64 nm と hp 44 nm の 2 種類を想定し、ウェハ上に縮小投影するための露光条件として、前者は NA=0.33、ダイポール照明、後者は NA=0.45、ダイポール照明を仮定した。また、ここで取り扱ったマスク上の位相欠陥のサイズは、幅 W が 30 nm、35 nm、40 nm、50 nm、60 nm、70 nm、80 nm であり、それぞれの W に対してピット位相欠陥の深さあるいはバンプ位相欠陥の高さは、0.5 nm、0.7 nm、1.0 nm、1.3 nm、1.6 nm、2.0 nm である。

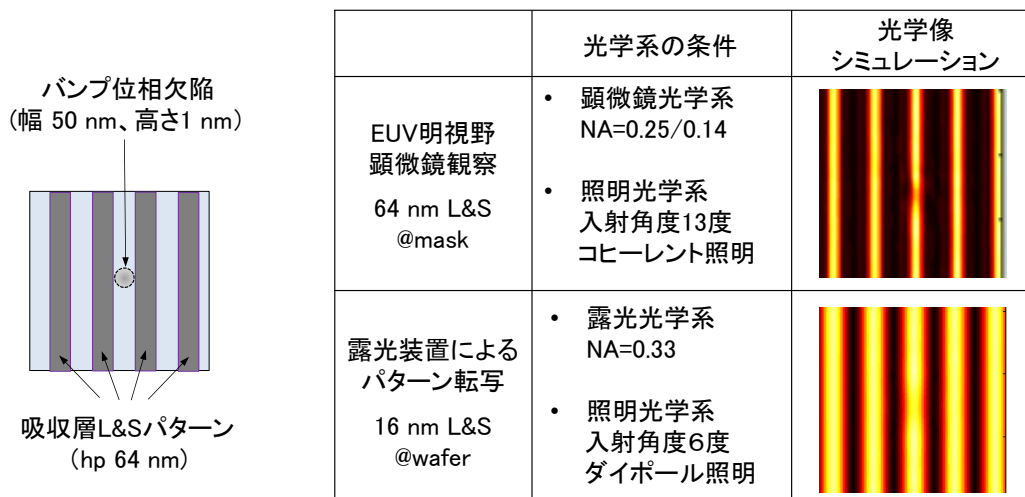


図 III.2.1.1-4-8 EUV 顕微鏡観察像とウェハ上パターン投影像のシミュレーションの例

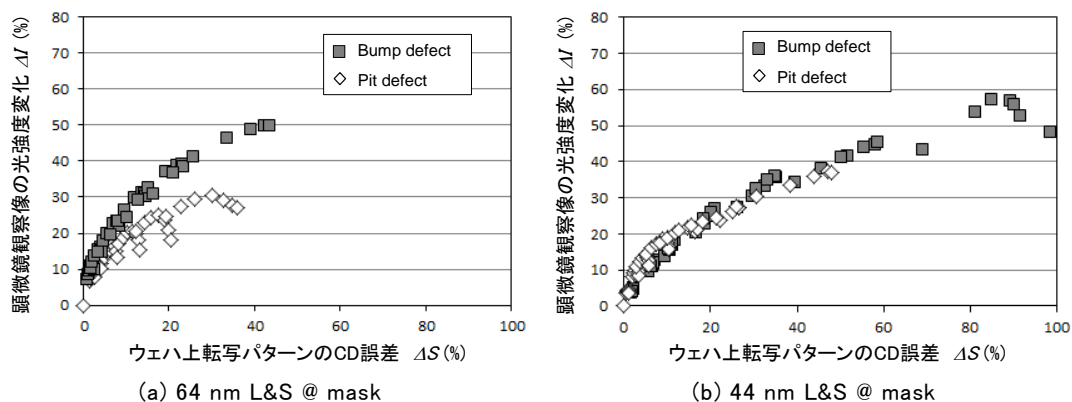


図 III.2.1.1-4-9 位相欠陥部分における、EUV 顕微鏡観察像の光強度変化 ΔI とパターン投影像の CD 誤差 ΔS との相関

ここで、ウェハ上パターンにおいて 10% 以上の CD 誤差を与える位相欠陥を致命欠陥と定義すれば、マスク上 hp 64 nm L&S パターンでは約 20% 以上の観察像光強度変化を、44 nm L&S パターンでは約 15% 以上の観察像光強度変化を与える位相欠陥が致命欠陥に対応することが分かる。既出の **図 III.2.1.1-4-8** から明らかなように、EUV 明視野顕微鏡観察像は露光装置で得られるパターン転写像を模擬するものではない、しかし、本開発で実現したマスクパターンの顕微鏡観察像の光強度変化の検査から、hp 16 nm ~ 11 nm 世代対応の EUV マスクに残存する位相欠陥の有無や致命欠陥か否かの判断を行なうことができる。プログラム位相欠陥と吸収層パターンとを含むテストマスクを準備し、観察実験を行うとともに可能な寸法領域内での露光実験により、上記のシミュレーション予測の妥当性を検証する予定である。

[4] 新規多層膜ミラーの製造および実装

hp 11 nm 世代のマスクパターンおよび位相欠陥を低ノイズで観察するために新規手配および交換したミラーは M7 である。M7 の役割は第一段および第二段拡大光学系で拡大されたマスクパターン像を図の通り約 90 度折り返し CCD カメラに導くものである。ここで M7 の形状精度が悪かったり、汚れや欠陥が存在したりすると、CCD カメラに入射するマスクパターン像に直接的に影響を与える。図 III.2.1.1-4-10 に 2 つの角度から撮影した EUV 顕微鏡の内部写真を示す。M7 は金属製の掘り込み型ホルダーにはめ込みネジ留めして保持される。ミラーの厚みに応じてホルダーの位置を調整する必要があるが、ホルダーには微調機構が備わっており、正確に位置決めを行うことが可能である。

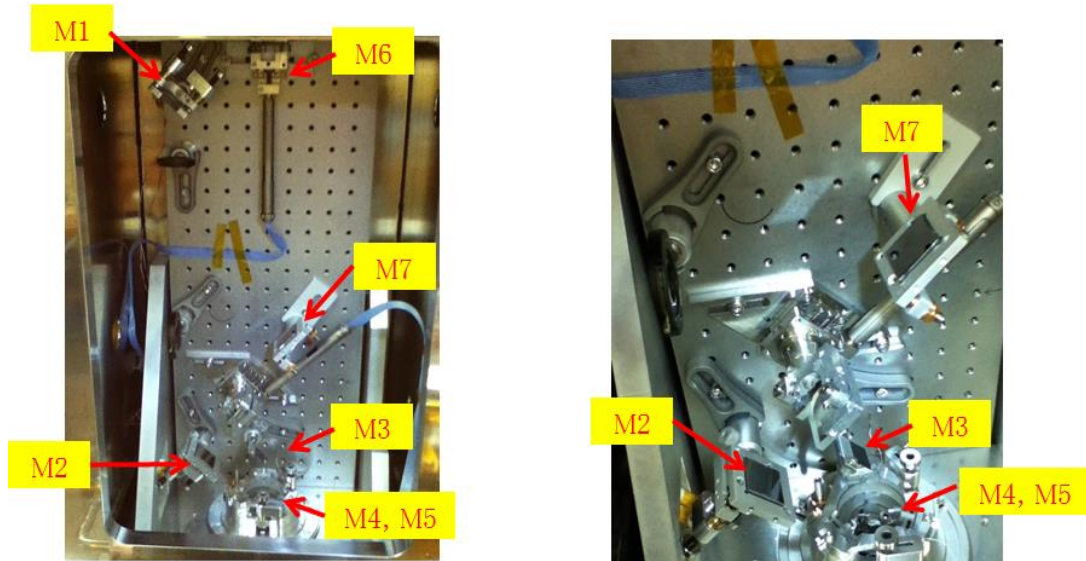


図 III.2.1.1-4-10 EUV 明視野顕微鏡の内部写真

図 III.2.1.1-4-11 に M7 交換前後に撮像した EUV 顕微鏡像を示す。交換前の M7 ガラス基板ラフネスは 0.3 nm rms であったものを 0.2 nm rms に改良している。

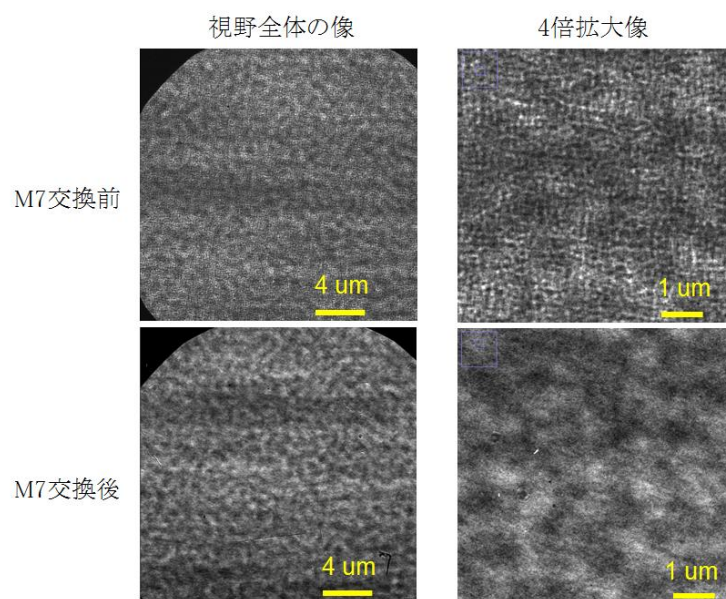


図 III.2.1.1-4-11 M7 交換前後の EUV マスク反射多層膜部観察像

観察試料は EUV マスクの反射多層膜である。図中 4 倍拡大像の比較から、M7 交換により短周期の明暗のムラが除去されていることが確認できる。本改善による効果をマスクパターン観察像で比較するとよりわかりやすい。図 III.2.1.1-4-12 に M7 交換前後のマスク上 hp 88 nm Lines and Spaces (L/S) 観察像を示す。

M7 交換前には図 III.2.1.1-4-11 の 4 倍拡大像で示した短周期のムラによりマスクパターン自体にエッジラフネスがあるように観察され、パターン欠陥および位相欠陥の観察評価が困難であった。M7 交換により長周期のムラは残るものの、微小な欠陥の特定を妨げる短周期のムラが改善されていることが確認できた。観察像のムラは放射光の高い空間コヒーレンスに由来するのだが、これは顕微鏡の視野内で観察対象パターンを移動しながら複数枚画像を取得し、重ね合わせ処理を行うことで除去可能である。

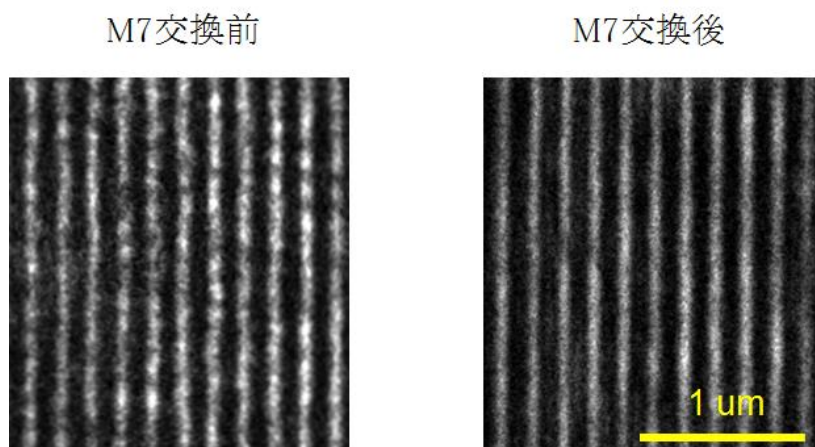


図 III.2.1.1-4-12 M7 交換前後の EUV マスクの hp88nm L/S 観察像

[5] 位相欠陥が吸収層パターン観察像に与える影響の明視野観察

まず、EUV 明視野顕微鏡の照明条件とマスクパターン情報を反映した EUV 光(回折成分)に関する説明をする。L/S 観察像の特性は主として 0 次、-1 次、及び+1 次の回折成分で表される 1 次元パターンの像で議論され、0 次回折成分の瞳通過位置が変化すると像質も変化する。図 III.2.1.1-4-13 は、今回開発の EUV 顕微鏡光学系の瞳とそこを通過する回折成分の典型的な 2 例を示す。

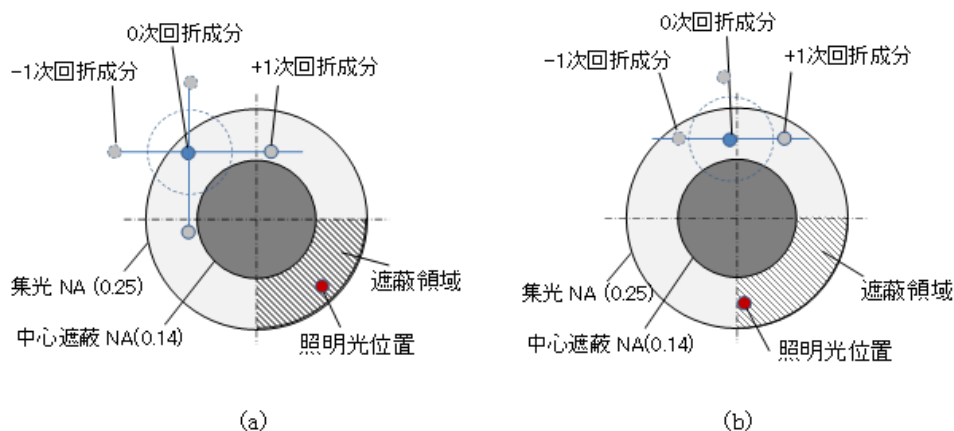


図 III.2.1.1-4-13 EUV 明視野顕微鏡光学系の瞳と瞳を通過する回折成分の典型的な 2 例 (a) 照明光が遮蔽領域の中央を通過する場合、(b) 照明光が遮蔽領域の端部を通過する場合

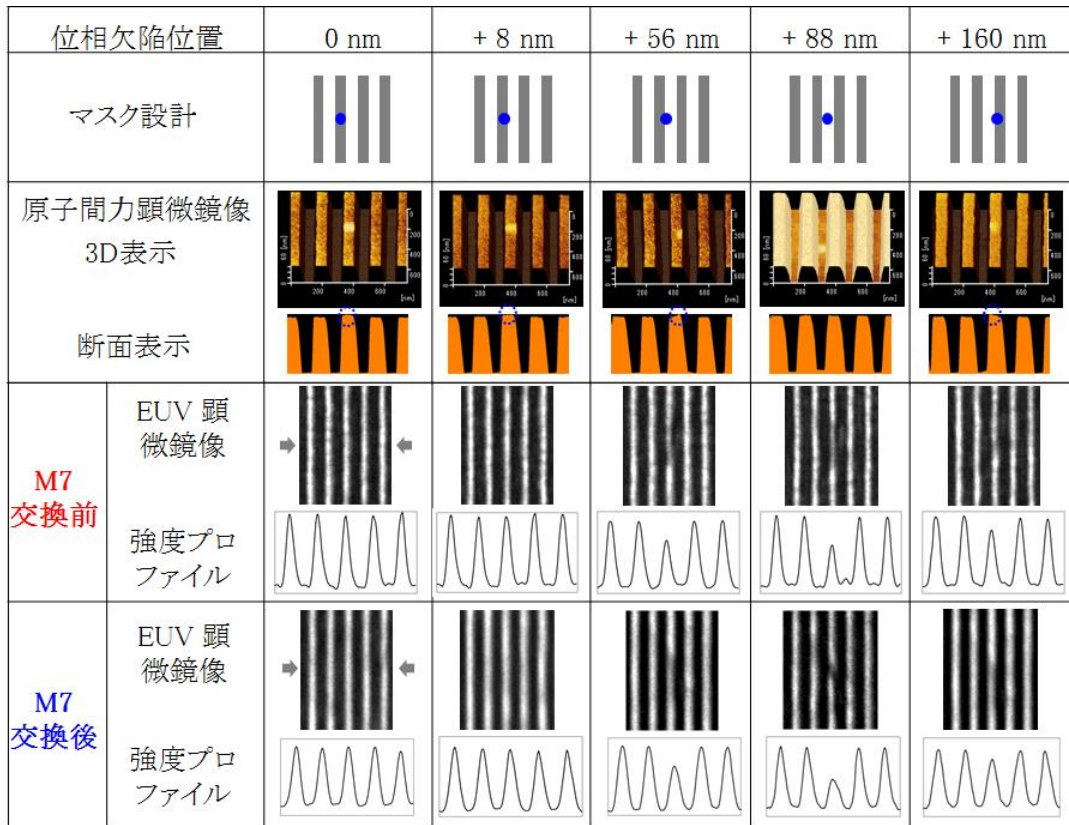
瞳の形状は集光 NA= 0.25、中心遮蔽 NA= 0.14 で定義される輪帯であるが、その 1/4は照明用ミラーM3 の存在による遮光領域である。同図(a)は照明光が瞳遮蔽領域の中央部を通過する場合であり、微細なL/Sの回折成分のうち+1次成分は瞳を通過するが-1次成分は遮断されて像形成に寄与しない。マスクを照明する EUV 光の主光線入射角度は約 13 度となり、その射面は、マスク上のラインパターン方向と 45 度の交差角度を有する。2 光束干渉による像形成であり、x 方向及び y 方向いずれの L/S も同一の高分解能な結像特性を有する。一方、図(b) は照明光が瞳遮蔽領域の端部を通過する場合であり、照明光の入射角度を 10 度程度とすることができる。y 方向に延びる L/S については、ある程度の微細パターンまで 0 次、-1 次、及び+1 次の 3 回折成分が観察像形成に寄与する。しかし、x 方向に延びる L/S に対する解像度は低い。マスク上 hp 44 nm L/S パターンの観察には、図中(b)の照明条件で+/-1 次の回折成分を捕集することが可能なので、ここでは照明光は瞳遮蔽領域の端部を通る照明法を採用した。

M7 交換前後の位相欠陥観察評価に使用した EUV マスクの構造は、ガラス基板上に Mo/ Si 多層膜を 40 ペア成膜し、キャッピング層として膜厚 2.5 nm の Ru、吸収層として膜厚 66 nm の Ta を主成分とする材料である。位相欠陥はあらかじめガラス上に所定のサイズの凹凸を形成しておき、上記多層膜とキャッピング層を製膜することで形成した。評価パターンは hp 88, 44 nm の L/S を吸収層上に形成したものである。位相欠陥が吸収層パターンに被覆される割合に応じた欠陥観察評価を行うため、位相欠陥とパターンの相対位置を系統的に変化させた試料を準備した。EUV 明視野顕微鏡観察は、光学系起因の顕微鏡像のノイズを低減するため、観察パターン 1 種類につき 16 枚の撮影を実施し、画像の重ね合わせ処理を実施した。16 枚の画像撮影は、観察パターンを顕微鏡の視野内でステージ移動および撮像を繰り返した。撮影時の露光時間は 30 秒と設定した。図 III.2.1.1-4-14 に評価パターン hp 88 nm L/S と位相欠陥(高さ 2.5 nm、幅(半値全幅) 79.8 nm) の原子間力顕微鏡像および M7 交換前後の EUV 明視野顕微鏡像をまとめた。ここで、位相欠陥位置は、位相欠陥が吸収層パターンの中心にあるときを 0 nm とし、位相欠陥が図中右に位置する場合をプラスとして定義した。評価パターンが hp 88 nm の場合、位相欠陥位置+88 nm は、位相欠陥がスペース部の中心にあることを意味する。

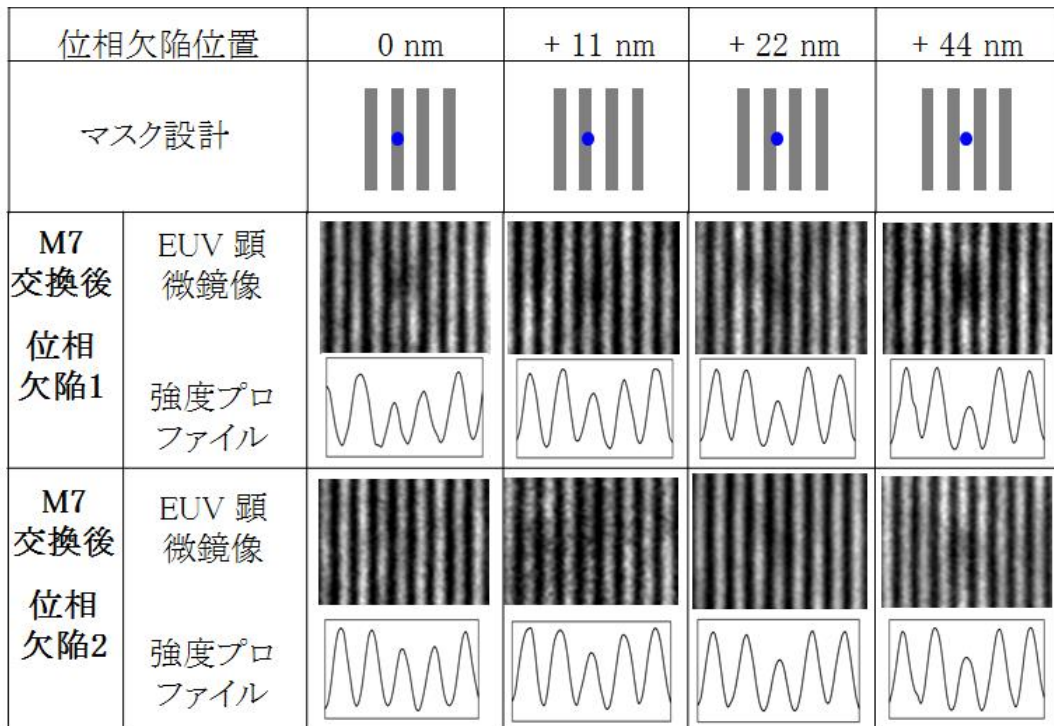
M7 交換前には画像重ね合わせ処理を施した場合でもスペース部に明暗のムラが観られ、位相欠陥の特定が困難であるのに対し、M7 交換後には明暗のムラが低減した。これにより、位相欠陥が吸収層パターンに被覆される割合に応じてスペース部の光強度が変化する様子を明瞭に観察可能となることを確認した。そこで、目的である hp 11 nm 世代向けマスクパターンおよび位相欠陥の観察実験を実施した。図 III.2.1.1-4-15 に評価パターン hp 44 nm L/S と位相欠陥 1 (高さ 1.9 nm、幅 66.0 nm) および位相欠陥 2 (高さ 1.5 nm、幅 41.1 nm) の M7 交換後の EUV 明視野顕微鏡像をまとめた。評価パターン hp 44 nm の L/S は原子間力顕微鏡観察に用いた探針が十分にスペース底部に到達することができず画像取得が困難であったため、位相欠陥位置とマスク設計のみを示した。

観察実験を通し、位相欠陥 1 および 2 共通して以下の結果が得られた。位相欠陥が+44 nm と +22 nm の位置では位相欠陥の影響を受け、位相欠陥が位置するスペース部の光強度が低下した。位相欠陥の中心がラインパターンに隠れる+11 nm、0 nm の位相欠陥位置では、位相欠陥の影響により当該ラインパターンの左右のスペース部の光強度が低下した。これは、位相欠陥 2 のように欠陥の半値全幅がライン線幅よりも小さい欠陥であっても、位相欠陥による影響範囲がラインパターンの線幅よりも広いことを表す。

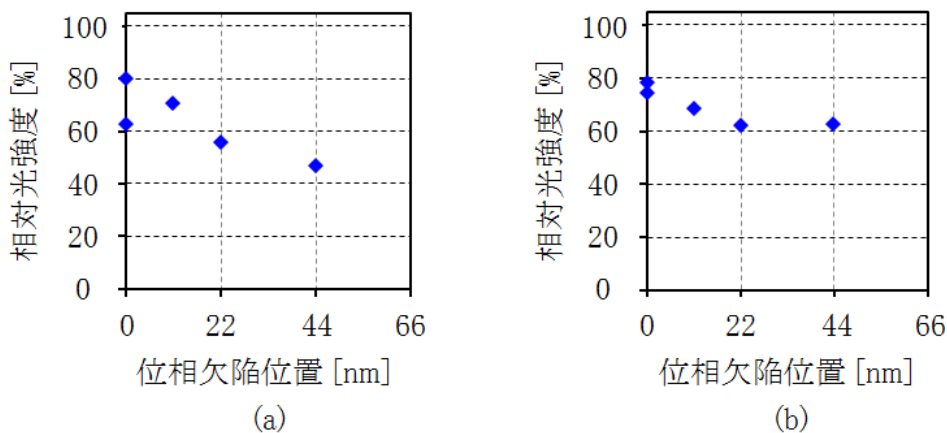
また、得られた EUV 顕微鏡像から、位相欠陥の影響を受けたスペース部光強度の、位相欠陥位置依存性を図 III.2.1.1-4-16 にまとめた。スペース部の光強度は、ライン部およびスペース部の光強度をそれぞれ 0 % および 100 % に規格化している。先述の通り、位相欠陥 1、2 共に、位相欠陥位置が 0 nm の場合であっても、相対光強度は 20 % 以上低下することが確認された。



図Ⅲ.2.1.1-4-14 M7 交換による位相欠陥視認性評価に用いた hp 88 nm L/S および位相欠陥の原子間力顕微鏡像と、M7 交換前後の EUV 明視野顕微鏡観察像と強度プロファイル



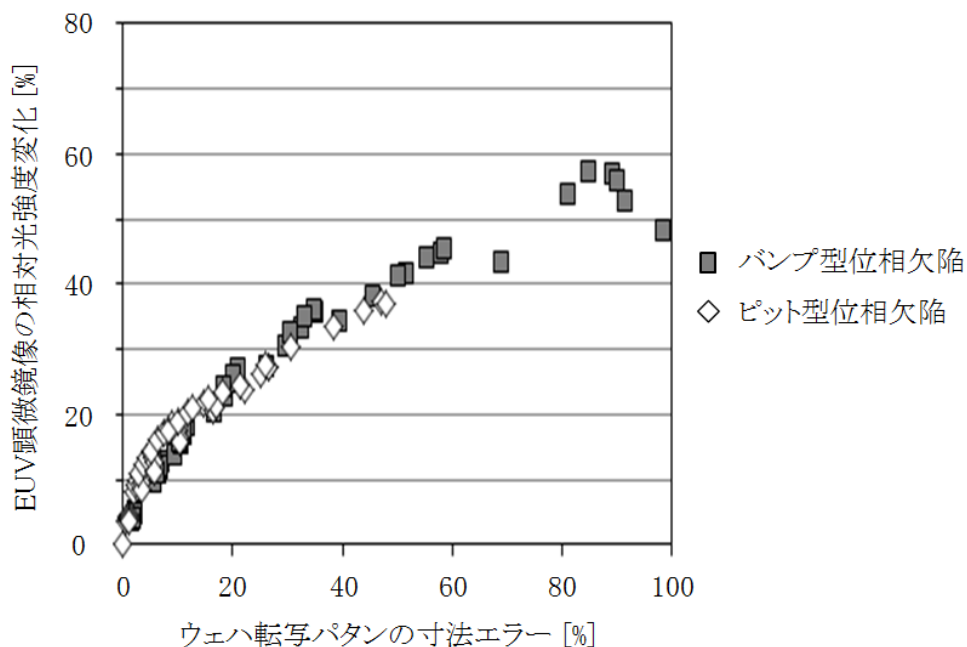
図Ⅲ.2.1.1-4-15 M7 交換後に観察した hp 44 nm L/S および位相欠陥の EUV 明視野顕微鏡観察像と強度プロファイル 位相欠陥 1(高さ 1.9 nm、幅 66.0 nm)、位相欠陥 2(高さ 1.5 nm、幅 41.1 nm)



図Ⅲ.2.1.1-4-16 位相欠陥により影響を受けた hp 44 nm L/S のスペース部光強度の位相欠陥位置依存性 (a) 位相欠陥 1(高さ 1.9 nm、幅 66.0 nm)、(b) 位相欠陥 2(高さ 1.5 nm、幅 41.1 nm)

ここで、EUV 顕微鏡で観察した際の相対光強度の低下量とウェハ転写寸法の間関係をシミュレーションにて調査し図Ⅲ.2.1.1-4-17 にまとめた。

マスクパターンは hp 44 nm L/S とし、種々のサイズの位相欠陥の影響を評価した。hp 44 nm L/S (ウェハ上 hp 11 nm L/S) を解像する露光条件として、NA= 0.45、ダイポール照明を仮定し算出した。ウェハ転写寸法に 10% 以上のエラーを与える位相欠陥を致命欠陥と定義すれば、マスク上 hp 44 nm L/S パターンでは約 15% 以上の観察像光強度変化を与える位相欠陥が致命欠陥に対応することがわかる。つまり、図Ⅲ.2.1.1-4-16 で示した通り位相欠陥 1 および位相欠陥 2 は吸収層パターンで覆った場合でも、位相欠陥に隣接するスペース部の光強度は約 20% 低下しており、ウェハ上に致命欠陥を与えることが想定される。



図Ⅲ.2.1.1-4-17 位相欠陥により影響を受けた hp 44 nm L/S のスペース部の、EUV 顕微鏡で観察した際の光強度変化と、ウェハ転写寸法エラーのシミュレーション結果

(iii) まとめ

hp 11 nm 世代のマスクパターンおよび位相欠陥を低ノイズで観察するため、高精度に研磨した多層膜鏡を準備し EUV 明視野顕微鏡に実装および性能評価を実施した。EUV 明視野顕微鏡観察評価の結果、多層膜鏡交換前には、微小な欠陥の特定を妨げる短周期の明暗ムラが EUV 顕微鏡像に観られたが、多層膜鏡交換により改善されていることが確認できた。マスクブランク内に存在する位相欠陥の視認性が向上し、hp 11 nm 世代のマスクパターンおよび位相欠陥観察実験を実施することができた。実験結果とシミュレーションの結果から、本開発で実現したマスクパターンの顕微鏡観察像の光強度変化を特定することで、hp 11 nm 世代対応の EUV マスクに残存する位相欠陥の有無や致命欠陥か否かの判断が可能であることが確認された。

(2) EUVマスクパターン欠陥検査技術開発

半導体の微細加工を実現するために開発が行われている EUV 露光においては、ウェハ上に 20nm 以細線幅のパターンを転写形成することが目的となる。ウェハ上にこの線幅のパターンを焼き付け形成するための写真原版にあたる EUV マスクでは、EUV 露光装置光学系の縮小倍率 4 倍にあたる 80nm 以細の線幅であるマスクパターンを精度よく、また、パターン欠陥なく実現が必要となる。このため、EUV 露光の実用化にあたっては、EUV マスクのパターン欠陥検査を行い、品質保証を行うことが必要となる。EUV マスクのパターン欠陥検査においては、実露光波長である 13.5nm の EUV 光を使った欠陥検査装置を使用することが当然に望ましい。しかし、欠陥検査のために必要な拡大光学倍率において、EUV マスクの量産に対応できる検査時間(数時間)を実現するためには、輝度の大きな EUV 光源が必要となる。EUV 光源を実現することの技術的困難度、また、装置価格の現実的な制約により EUV 光を使ったマスクパターン欠陥検査装置の実現は非常に困難となる。一方、現在の最先端である 193-199nm 波長の DUV 光を用いた欠陥検査装置では、その限界解像度が 100nm 以下程度であることから、マスク上でのパターン線幅が 64nm から 44nm 以細となる EUV マスクパターン欠陥検査装置(PI 装置)としては解像度が不足する。高解像度で、かつ、経済的に現実的な PI 装置を実現するためには、電子線を光源(プローブ)とすることが最適となる。しかし、量産用 PI 装置開発の視点から見ると、広く使用されている走査型電子顕微鏡(SEM)方式を PI 装置に採用した場合、撮像時間が長いと現実的なスループットを得ることができない。この問題を解決するために EIDEC プロジェクトにおいては、電子線写像投影方式の顕微鏡(PEM)技術を世界で初めて PI 装置に採用し、SEM 方式における 1 次元での画像取得を PEM 方式による 2 次元での画像取得により現実的なスループットを実証することを開発の目標とした。電子線の利点である高解像度を活かしたまま、DUV 欠陥検査装置並みのスループットを実現することを目標に、2011 年より 2015 年に渡る EIDEC プロジェクトにおいて PEM 方式の PI 装置の開発に着手した。

EIDEC プロジェクトにおける EUV マスクパターン欠陥検査技術開発においては、PEM 方式の欠陥検査装置技術を有し、また、完成される PI 装置の商品化を志向している株式会社荏原製作所と共同で PI コア技術開発を実施した。また、装置に必要とされるパターン欠陥の要求検出性能を正確に見積もるための仕様検討として、露光シミュレーションによるパターン欠陥の露光転写性の正確な評価をおこなうと共に、電子線軌道計算技術の開発を行い、電子鏡筒運転条件に依存する取得画像の解析と欠陥検出能力の予測、得られる画像対応する欠陥検出論理の最適化開発を行い、装置の完成度の向上と開発効率の向上を図った。

(2)-(i) PI 装置仕様検討

【1】研究開発の目標

(2)-(i) PI 装置仕様検討においては PI 装置の高感度化、及び高スループット化のための理論検討を行い、PI 装置の検出感度に関する基本仕様をまとめ、(ii)で開発する PI 装置製作に反映する。また、パターン欠陥のウェハ転写性を高速、高感度に評価可能な手法を開発する。そのため、hp20nm 以細に必要となる PI 装置の欠陥検出感度を、その欠陥転写性をシミュレーションおよび EUV 顕微鏡による EUV マスク観察などの手法を用いて精密に見積もると共に、電子ビームを用いた PI 装置により高い検出感度を得るため、電子軌道シミュレーションにより検査条件の最適化を行っていく。更に、開発した PI 装置の性能が目論見どおりに得られていることを精度よく検証するための手法を確立すると共に、欠陥検出信号の強調とノイズ低減のため、信号処理のための論理と回路への実装検討を行う。更に、開発した信号処理手法を用いて PI 装置により採取した電子線画像を処理し、hp11nm 以細の HVM において検出が必要となる欠陥が、開発した PI 装置の照明光学系と低収差結像光学系の仕様により検出できることを明確化することにより、PI 装置仕様検討を完了する。

【2】研究開発の成果

[1] PI 装置の欠陥検出性能解析

(a) PEM 方式の hp11nm への適用検討

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において検討した手法を用いて、PEM 方式の hp11nm への適用性を検討した。異なるサイズの黒孤立欠陥に対して欠陥検出信号(S/N)が、一画素当たりの電子数に依存してどのように変化するを見積もった。図 III.2.1.2-1-1 にその結果を示す。

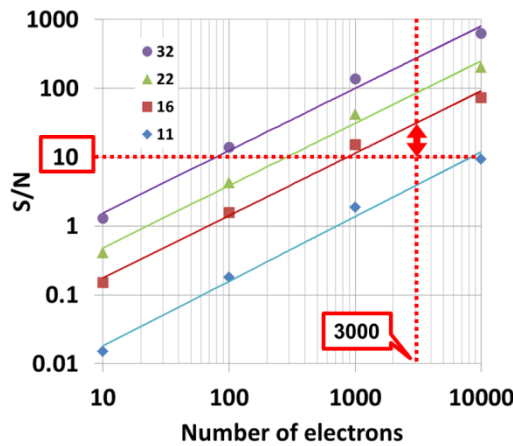


図 III.2.1.2-1-1 黒孤立欠陥サイズに依存した欠陥検出信号の変化

開発した写像投影光学系において見込まれる一画素当たり 3000 個では、サイズ 16nm の欠陥に対して S/N10 以上が得られるが、11nm サイズにおいては下回る結果となった。図 III.2.1.2-1-2 に欠陥信号のマップ表示を一画素当たりの電子数をパラメータとして表示した結果を示す。電子数 10,000 においては S/N=8.9 と目標値 10 にかかなり近い値が得られるところまで改善していることがわかった。従って、(a)検出アルゴリズムの改良、(b)検出電子数の増加、(c)画像コントラスト改善などを加えることで、検出可能となる欠陥検出信号レベル: S/N=10 が得られると考えられる。

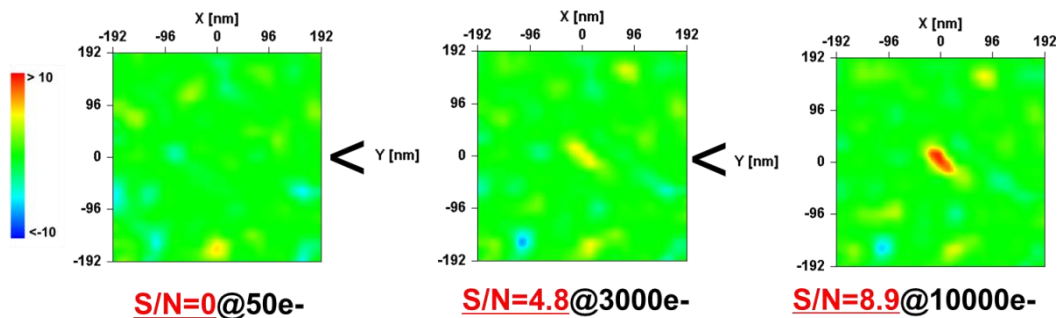


図 III.2.1.2-1-2 11nm サイズ欠陥の欠陥検出信号

(b),(c)に関しては写像投影光学系のハードウェアとしての改良が必要となるため開発リソースへの影響が大きくなることが予想されるが、上記(a)に注力して検討を進めることにより、本開発ハードウェアのポテンシャルを限界まで引き出すことで、hp11nm 以細の微細化に向けた PI 装置の仕様検討を詳細に行うことが可能となる。

[2] プリントビリティ検討

(a) インパクトの欠陥形状依存性

hp16nm 世代対応の必要検出欠陥サイズを見積もるため、ITRS2012(ITRS: International

Technology Roadmap for Semiconductors)を参照した。ウェハ上 hp16nm のパターンとして、マスク上の最小線幅が 64nm となる世代に注目した。以上の条件より、18nm 以下のサイズ欠陥を検出する必要があることが確認できた。更に、欠陥のウェハ上への転写性を転写性シミュレータを用いて評価した。シミュレータは Luminescent 社製 LAIPH™ Defect Printability Simulator(DFS)を採用した。転写装置条件は現在入手可能な最新鋭機における値を用いた(NA: 0.33, Sigma:0.2(Inner)-0.9:(Outer)。欠陥形状はパターン欠陥の代表的な形状(凹凸)を用いた。結果を図 III.2.1.2-1-3 に示す。欠陥の形状は正方形とし、一辺の長さを欠陥の寸法とした。欠陥がウェハ転写に及ぼす影響として、欠陥により L/S パターンの寸法が設計からどれだけずれるかを以って影響の度合いとした。図中に寸法の 10% ずれラインを赤の点線で示した。欠陥サイズの増大に伴い、転写寸法が設計値(16nm)からずれ、10%を超えた値が生じる欠陥寸法が検出必要欠陥サイズとなる。

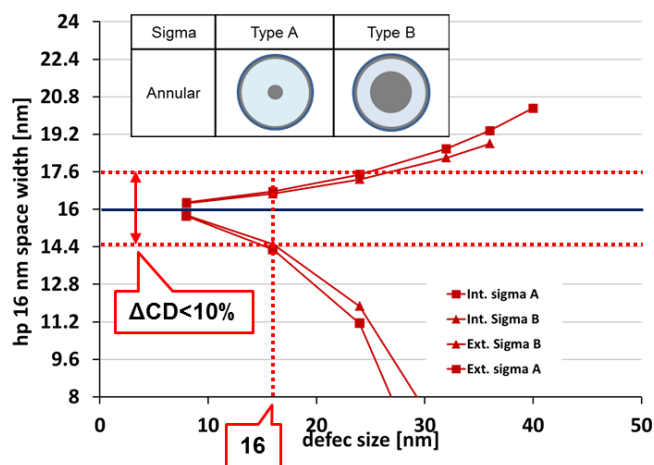


図 III.2.1.2-1-3 転写性シミュレータを用いた欠陥のウェハ転写性評価

16nm 以上の寸法で凸欠陥が凹欠陥に先んじて寸法ずれが 10%を超えており、この結果から 16nm 以上の寸法欠陥が検出できれば、hp16nm 対応微細加工が可能となることがわかる。従って、欠陥検出ターゲットとして 16nm²を選定した。

更に、EUVリソグラフィによる微細パターン転写に対し、スキャナ光学系の高 NA 化に向けた議論が本格化している。具体的には、マスク面に対する EUV 光入射角(Chief Ray Angle to Object, CRAO)の増大に対する検討が必要となっている。図 III.2.1.2-1-4 に示すように、EUV 露光においては斜入射照明が不可避であるが、入射光に対してパターンの向きが異なるためそれによる欠陥の影響が変化することが予測される。

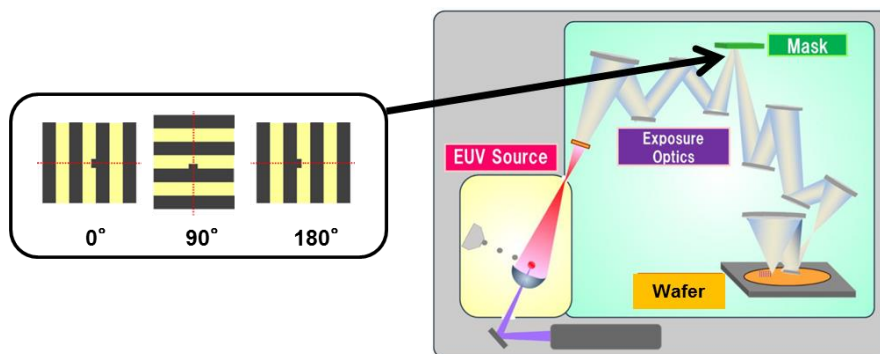


図 III.2.1.2-1-4 EUV 露光システムと、マスクパターンの方向依存

そこで元々の斜入射(6 度)方向に対して、0~180 度パターンの方向が異なる場合について、欠陥

のサイズごとに寸法変化に及ぼす影響をシミュレーションにより求めた。照明条件は欠陥の影響が最大となる条件を想定し、輪帯照明条件を採用した。結果を 図 III.2.1.2-1-5 に示す((a)凹欠陥、(b)凸欠陥の場合)。

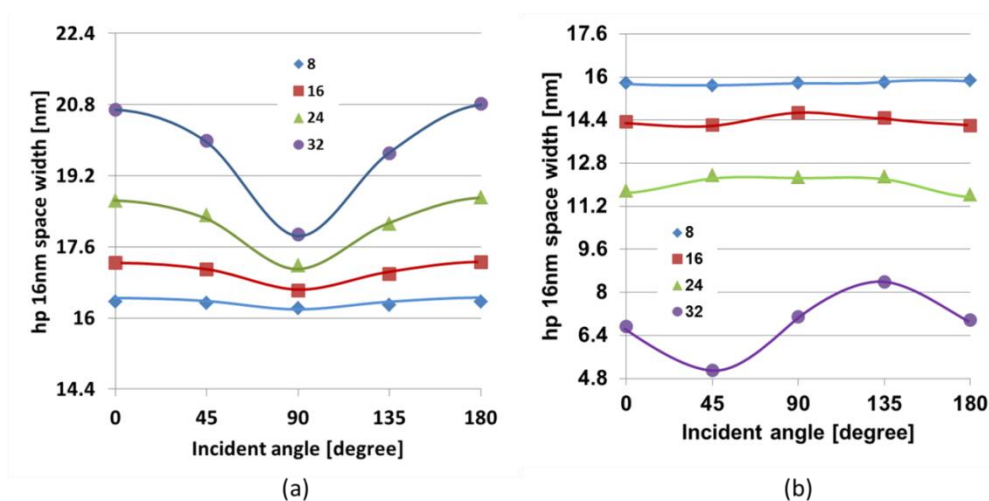


図 III.2.1.2-1-5 欠陥のウェハ転写性に対する影響(入射角依存性)

凹凸欠陥共に入射角に変化に伴い、入射角に依存してその転写性が変化することがわかる。例えば 24nm の凹欠陥においては、入射角に依存して 10%の寸法ずれを超える場合と超えない場合がある。即ち欠陥のウェハ転写性を評価する際にはパターンの EUV 入射光に対する方向を考慮する必要があることに他ならない。16nm の凹凸欠陥において、角度依存性は 1nm 程度に減少し、現状の露光システムにおいては必要検出欠陥サイズを 16nm に設定しても支障はない。しかし、入射角が増大した場合の影響を見積もるため、図 III.2.1.2-1-6 に示すモデルを想定し、転写性シミュレーションを適用した。

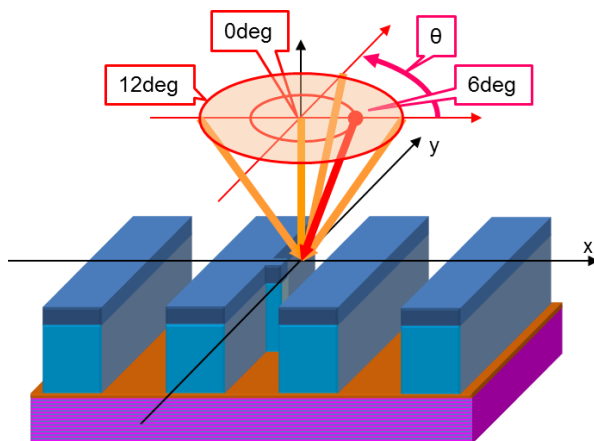
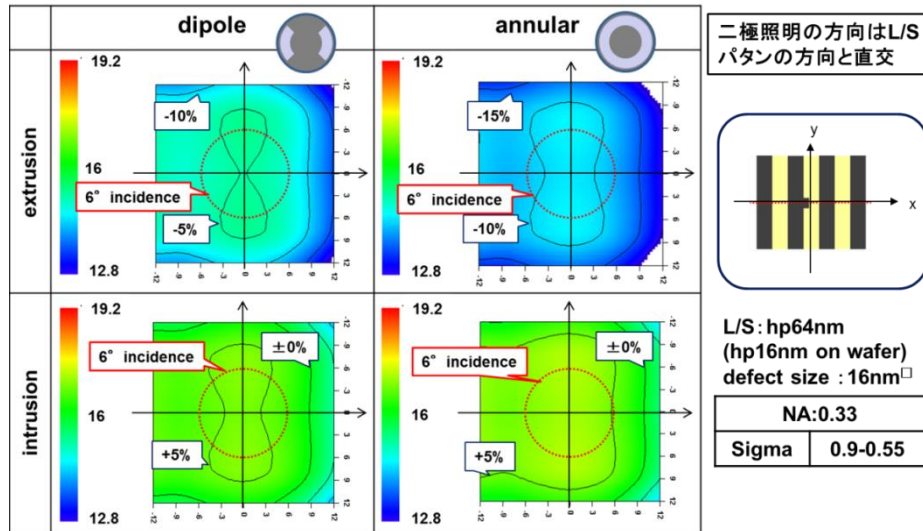


図 III.2.1.2-1-6 欠陥のウェハ転写性に対する影響(入射角依存性)

入射角増大に対する影響を詳細に見積もるため、照明条件は二極及び輪帯照明をそれぞれ適用した。評価対象となる凹凸欠陥は 16nm²である。図 III.2.1.2-1-7 にシミュレーション結果を示す。図中に 6 度入射のラインを赤の点線で示す。入射角が増大すると凹欠陥と比較して凸欠陥の誤差は急激に増大し、輪帯照明(annular)においては 0 度方向の入射光に対しては 9 度弱の入射角において誤差 15%を超える。一方、凹欠陥においては逆に角度増加により転写誤差が減少し、入射角 9 度近傍でほぼ 0 になる。更に入射角が増大すると緩やかに線幅は更に狭くなる。以上のことから、欠陥サイズと入射角両方の影響を加味して転写性評価を行う必要があることがわかつ

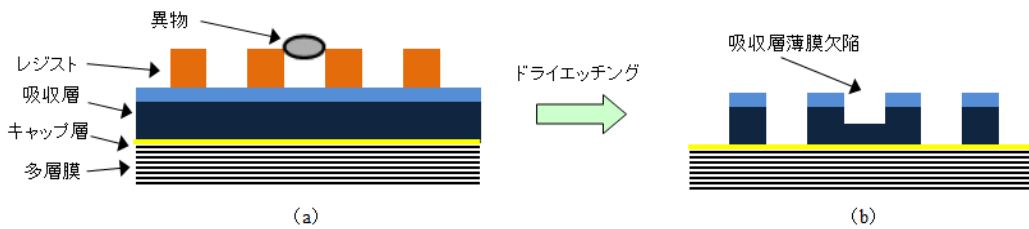
た。



図Ⅲ.2.1.2-1-7 欠陥のウェハ転写性に対する影響(入射角依存性)

(b) 薄膜欠陥とインパクト(1)-製作と転写評価

本節では、マスクパターンニング工程において、吸収層パターンのエッチングが完全におこなわれなかった、吸収層薄膜欠陥が転写性能に与える影響に関して述べる。EUV リソグラフィは hp 10 nm よりも微細なデバイス製造に適用されるため、従来のフォトマスクと比較して微細なマスクパターンが必要とされる。パターンの微細化に伴いマスクパターンの欠陥密度も増加する傾向にあり、EUV マスクにおいても様々な欠陥が形成される可能性がある。たとえば図Ⅲ.2.1.2-1-8 に示すように、マスクパターンニング工程で異物が付着し、吸収層を加工するドライエッチング工程で吸収層が完全にエッチングされない欠陥である。(a)はレジスト現像後のマスク断面図を表す。レジストパターンに異物が付着した状態で吸収層のドライエッチングを行うことで、(b)に示す吸収層の薄膜欠陥が形成される。



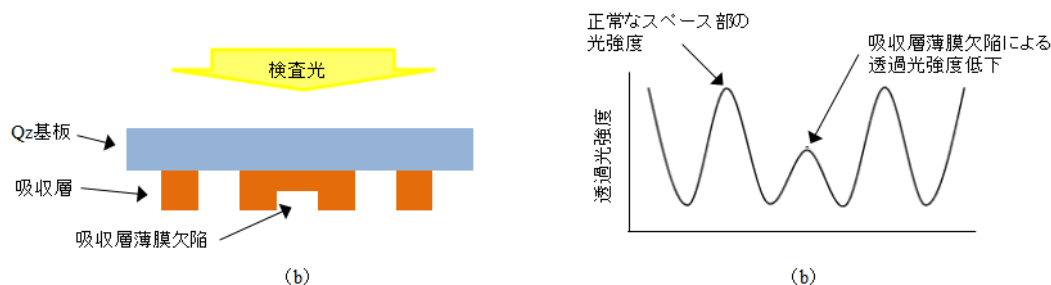
図Ⅲ.2.1.2-1-8 マスクパターンニング工程で吸収層薄膜欠陥が発生する説明図 (a)レジスト現像後のマスク断面図。レジストパターン上に異物が付着している。(b)異物が付着した状態でドライエッチングを行い、吸収層薄膜欠陥が形成された図。

フォトマスクの場合、吸収層と同等の膜厚の欠陥も、吸収層薄膜欠陥も転写される欠陥の検出は比較的簡単である。その理由は次の2点からである。

- ・露光波長と同等の検査波長を用いることが可能である。
- ・転写工程と同じく透過光を用いたパターン欠陥検査が可能である。

図Ⅲ.2.1.2-1-9 にフォトマスクに薄膜欠陥があった場合に検出される透過光強度低下を示す。(a)はマスク断面概略図である。吸収層薄膜欠陥は中央部に位置している。検査光はマスクの Qz 基板面から照射され、マスクパターン面側に配置した結像光学系を通して観察される。(b)は透過光の光強度プロファイルを表す。吸収層薄膜欠陥部の透過光強度は正常部と比較して小さくなるため欠陥として検出される。先に示した通り検査波長は露光波長と同等なため、転写に影響を与

える可能性のある欠陥の検査は比較的簡単である。



図III.2.1.2-1-9 吸収層薄膜欠陥による光強度透過光強度の変化を説明する図。(a)吸収層薄膜欠陥を有するフォトマスク断面図 (b)透過型欠陥検査で得られる光強度プロファイル。

一方 EUV マスクの場合は欠陥検査に使用できる高出力かつ安定性の高い EUV 光源の開発が遅れているため、代わりに DUV 光または電子線を用いた欠陥検査技術の開発が進められている。DUV 光を用いる場合、EUV 露光波長に対して波長が約 14 倍の 193 nm の検査技術を適用するため、ウェハに転写される欠陥の検出感度は十分とは言えない。電子線を用いる場合、欠陥検出感度は高いものの、DUV 光を用いた検査技術と比較して 10 倍以上の検査時間がかかるため実用的ではない。

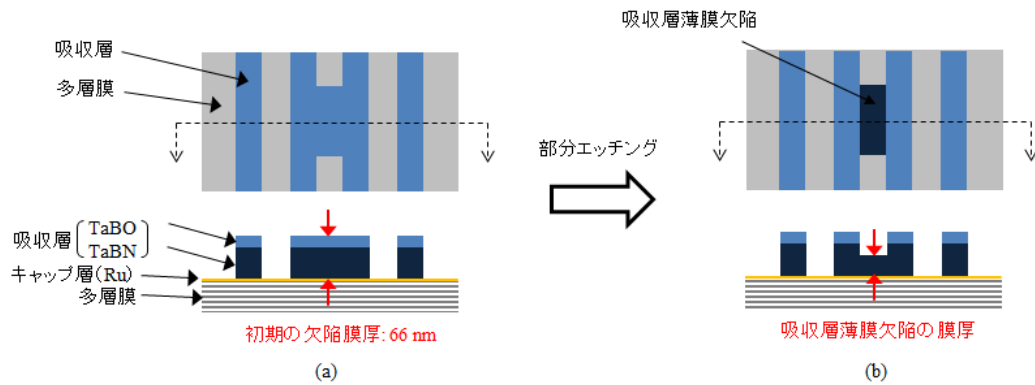
これまで吸収層と同等の膜厚を有するパターン欠陥に関する転写性能評価は行われているが、吸収層薄膜欠陥に対する転写性能評価はほとんどない。薄膜欠陥を製造することが困難だからである。そこで本研究では、種々の膜厚の吸収層薄膜欠陥を EUV マスク上につくりこみ、EUV 露光装置を用いてウェハ上に塗布したレジストへ評価パターンを転写し、吸収層薄膜欠陥が転写性能に与える影響を評価した。

(i)実験方法

実験は以下の流れで実施した。

- ①EUV マスク上に黒欠陥を有する L/S パターンを形成。
- ②黒欠陥部を EB-GAE 技術を用いて指定の膜厚までエッチングし吸収層薄膜欠陥を形成。
- ③吸収層薄膜欠陥部形成工程で多層膜へのダメージ発生の有無を確認。
- ④SFET を用いてウェハに転写し転写パターンを CD-SEM で観察。

評価に使用した EUV マスクの構造は、Qz 基板上に多層膜として Mo と Si を 40 ペア積層し、キャップ層として膜厚 2.5 nm の Ru、吸収層として膜厚 52 nm の TaBN および 14 nm の TaBO である。このマスク上の吸収層に、黒欠陥としてサイズ 900×225 nm のブリッジ欠陥を有する hp 225 nm L/S パターンを形成した(①)。種々の膜厚の吸収層薄膜欠陥の形成は、EB-GAE 技術を用いてブリッジ欠陥部をエッチングすることで行った(②)。このとき事前に吸収層のエッチング時間とエッチング深さの関係を求めておくことで、目的の膜厚の吸収層薄膜欠陥を形成した。形成した吸収層薄膜欠陥の膜厚の定義は図 III.2.1.2-1-10 に示す通りで、AFM を用いて測定した。(a)、(b)はそれぞれ、エッチング前の吸収層欠陥および、形成した吸収層薄膜欠陥部の上面および断面概略図である。吸収層薄膜欠陥の膜厚は、初期の欠陥をエッチングした後に残った吸収層膜厚として定義した。吸収層膜厚は AFM を用いて測定した。目標とする欠陥部の膜厚は、リソグラフィシミュレータ EM-Suite (Panoramic Technology)を用いて、吸収層膜厚と反射率の関係を算出することで決定した。



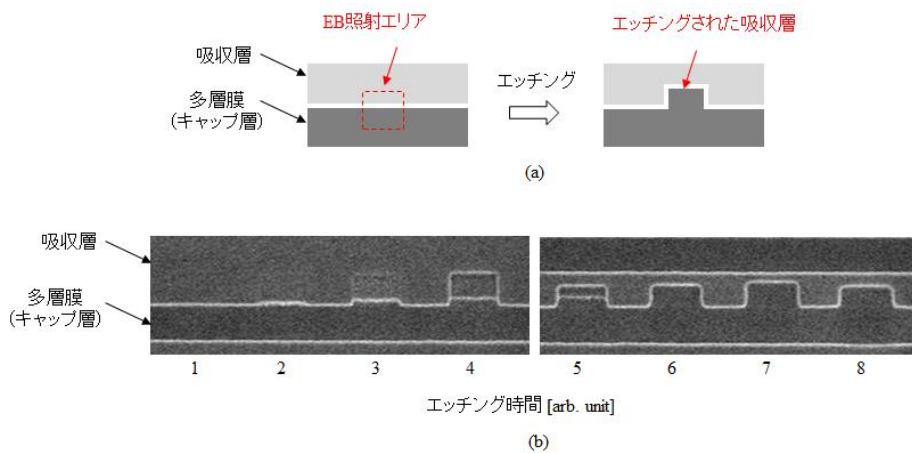
図III.2.1.2-1-10 吸収層薄膜欠陥形成前後のパターン上面および断面図。(a)hp 225 nm L/S パターンに形成したブリッジ欠陥、(b)EB-GAE 技術によりブリッジ欠陥をエッチングすることで形成した吸収層薄膜欠陥。

吸収層薄膜欠陥形成後、加工部および周辺が多層膜部を AFM 観察することで、評価に使用したプロセスが多層膜へ与えるダメージを評価した(③)。また、欠陥を完全にエッチングした箇所の EUV 転写パターンを観察することでも多層膜のダメージ評価を行った。作製した 4 種の吸収層薄膜欠陥および欠陥を完全にエッチングした箇所は、SFET を用いてウェハ上に塗布したレジストへ転写し、現像後のレジストパターンを観察することで行った(④)。

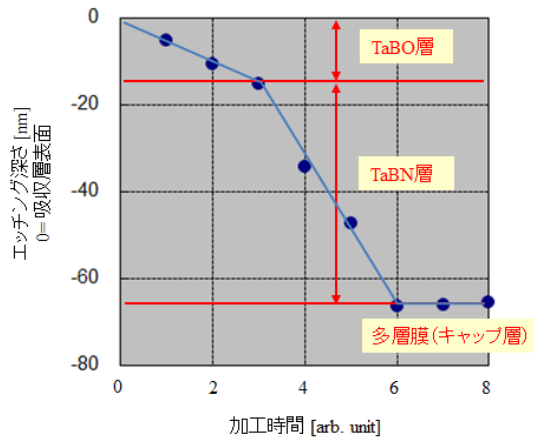
(ii)結果と考察

(ii)-1 吸収層エッチングレートの算出

薄膜吸収層欠陥を形成する事前評価として、EB-GAE を用いた吸収層のエッチングレートを算出した。図 III.2.1.2-1-11 に吸収層エッチングレート評価を行った箇所の (a) 概略図と (b) エッチング後の SEM 像を示す。8 種の加工時間でエッチングした。吸収層のエッチングは赤点線内に EB を照射することで行った。エッチング深さを AFM で測定し、図 III.2.1.2-1-12 にエッチング時間と吸収層および多層膜のエッチング深さの関係をプロットした。評価の結果、TaBN 層および多層膜のエッチングレート差は大きく、吸収層薄膜欠陥を形成するのに必要な加工時間の範囲内では多層膜にダメージが発生しないことが確認できた。hp 225 nm L/S 中に形成された吸収層のブリッジ欠陥をエッチング除去することで、評価に使用する吸収層薄膜欠陥を形成する際の高層膜ダメージの有無を解析した。

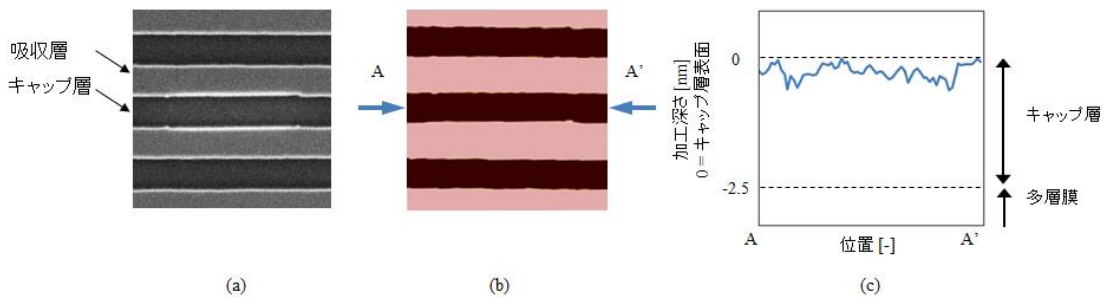


図III.2.1.2-1-11 吸収層エッチングレート測定箇所の説明図とエッチング後の SEM 像。(a)電子線照射エリアとエッチング箇所の概略図、(b)8 種の加工時間でエッチングした箇所の SEM 像。



図Ⅲ.2.1.2-1-12 EB-GAE工程のエッチング時間とTaBO層、TaBN層および多層膜のエッチング深さの関係。

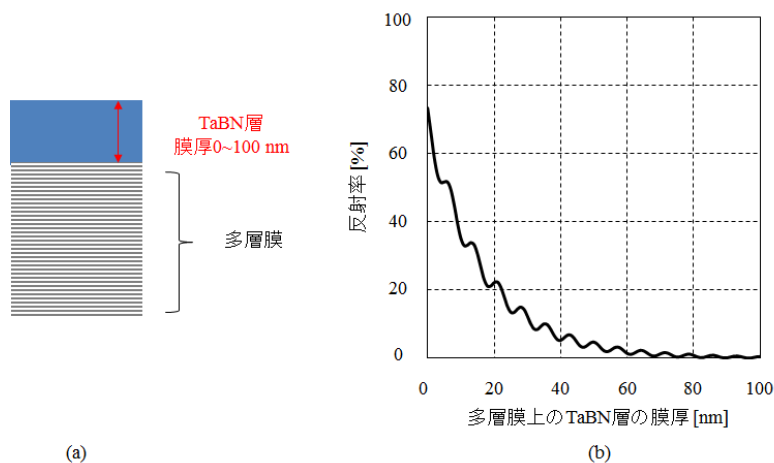
図Ⅲ.2.1.2-1-13 はブリッジ欠陥を完全に除去した箇所の観察結果である。SEM像(a)からは欠陥修正箇所の多層膜がエッチングされた様子は認められなかった。(b)はSEM像と同一箇所のAFM像であり、(c)はA-A'部の多層膜部断面プロファイルを表す。AFM観察の結果、ブリッジ欠陥部も欠陥周辺も、エッチングは膜厚2.5nmのキャップ層内で停止していることが確認でき、評価に使用したEB-GAE工程では多層膜をエッチングするダメージが発生しないことを確認できた。



図Ⅲ.2.1.2-1-13 L/Sパターン中のブリッジ欠陥をEB-GAE技術を用いて完全に除去した箇所の(a)SEM像、(b)AFM像、および、(c)AFM像のA-A'間の断面プロファイル。

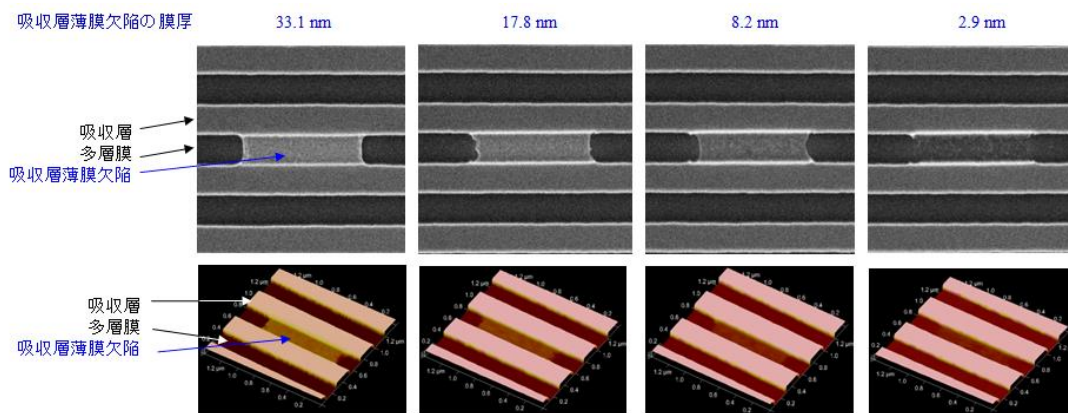
(ii)-2 吸収層薄膜欠陥の作製

吸収層薄膜欠陥の膜厚を設定するために、多層膜上に種々の膜厚のTaBN層が形成された場合のEUV光反射率低下量を算出した。図Ⅲ.2.1.2-1-14(a)は計算に使用したEUVマスクの断面モデルであり、TaBN層の膜厚は0nmつまり吸収層薄膜欠陥の無い条件から、膜厚100nmまでとした。(b)は計算により算出したTaBN層の膜厚と反射率の関係を示す。計算の結果、TaBN層の膜厚が増えるに従って反射率低下が観られることと、膜厚の変動に対して反射率変化量の小さい極大点と極小点が存在することがわかった。本研究では吸収層薄膜欠陥の膜厚がEUV転写性能に与える影響を精度よく評価するため、膜厚変動に対して反射率変動量の小さい、3、8、18および33nmを薄膜吸収層欠陥の膜厚目標値とした。



図III.2.1.2-1-14 多層膜上に形成した TaBN 層の膜厚と EUV 反射強度の関係の計算結果。(a)計算に使用したマスクの断面モデル、(b)多層膜上の TaBN 層膜厚と EUV 反射強度の関係。

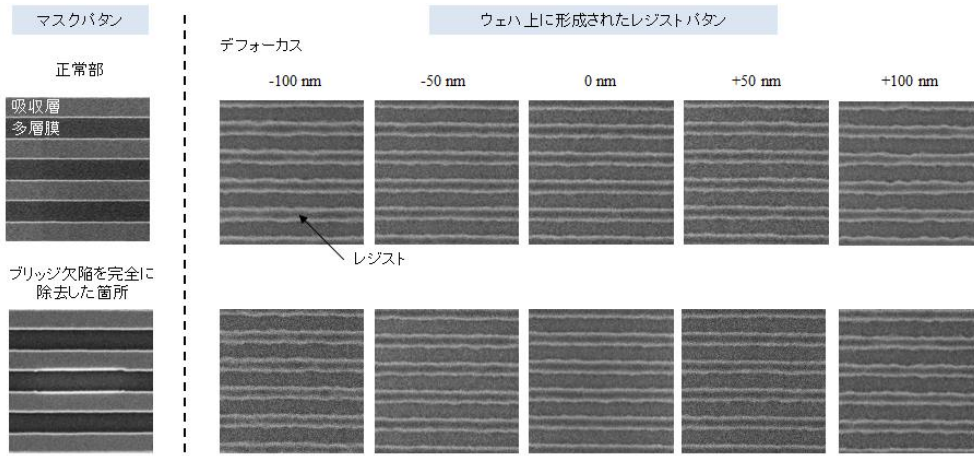
EUV 転写評価用に作製した、hp 225 nm L/S 中の吸収層薄膜欠陥の SEM 像と AFM 像を図 III.2.1.2-1-15 に示す。AFM 観察の結果から、実際に形成された吸収層薄膜欠陥の膜厚はそれぞれ、2.9, 8.2, 17.8 および 33.1 nm であった。多層膜の EUV 光反射率を 1.0 とすると、吸収層薄膜欠陥部の相対反射強度は、0.73, 0.61, 0.29 および 0.12 と算出された。EB-GAE 箇所周辺には図 III.2.1.2-1-11 および図 III.2.1.2-1-13 で示した通り多層膜へのエッチングダメージは確認されなかった。



図III.2.1.2-1-15 EB-GAE 技術を用いて作製した hp 225 nm L/S 中に形成した吸収層薄膜欠陥の SEM 像および AFM 像。

(ii)-3 正常パターンおよび欠陥を完全に除去したパターンの転写性能評価

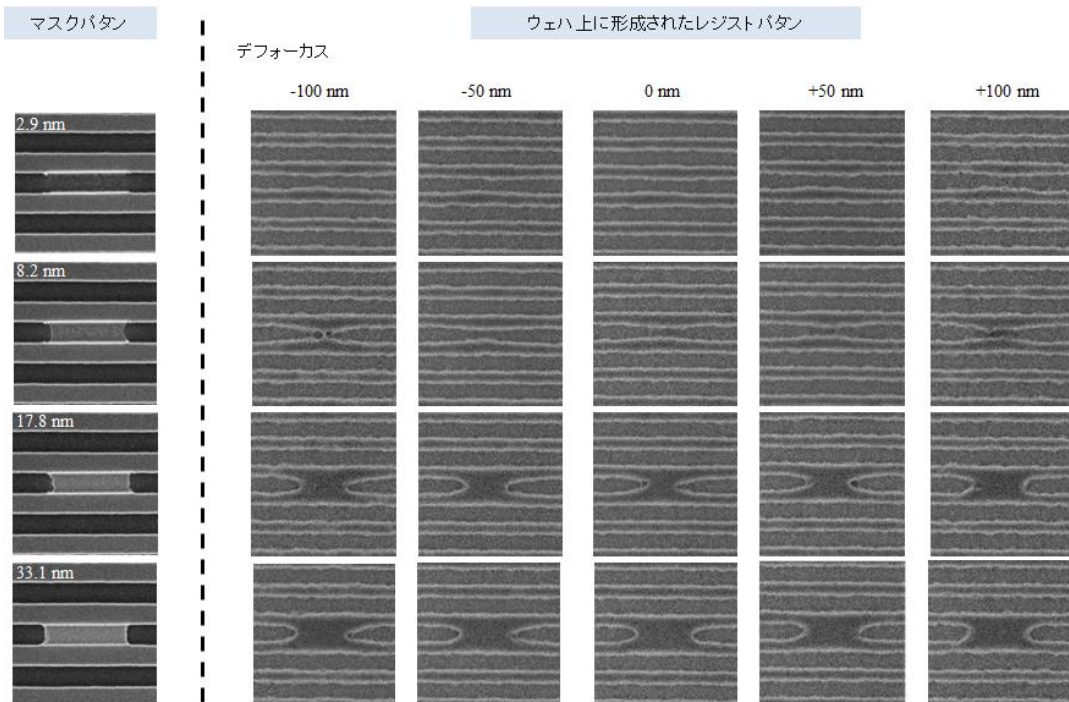
吸収層薄膜欠陥形成箇所を SEM や AFM で観察した結果、多層膜のエッチングダメージが無いことを先に説明した。SEM や AFM の観察結果は多層膜の表面形状のみを観察するので、多層膜内部の周期構造変化を特定することは困難である。そこで吸収層薄膜欠陥部の転写性能評価の前に、正常なパターンと、図 III.2.1.2-1-13 に示したブリッジ欠陥を完全に除去した箇所の転写性能評価を比較することで、EB-GAE 工程による多層膜ダメージの有無を評価した。図 III.2.1.2-1-16 に正常パターンと欠陥を完全に除去したパターンのマスクパターン SEM 像および、ウェハ転写パターンの SEM 像を示す。欠陥修正箇所の EUV 転写寸法は正常パターンと比較して最大 0.6 nm、寸法エラー比率に換算すると 1.3 % と小さく、多層膜には EUV 転写されるようなダメージが EB-GAE 工程で発生しないことが確認された。



図Ⅲ.2.1.2-1-16 マスクの正常箇所とブリッジ欠陥を完全に除去した箇所の SEM 像および、ウェハ上に転写したレジストパターンの SEM 像。マスクおよびウェハ上のパターンサイズはそれぞれ hp 225, 45 nm L/S。

(ii)-4 吸収層薄膜欠陥の転写性能評価

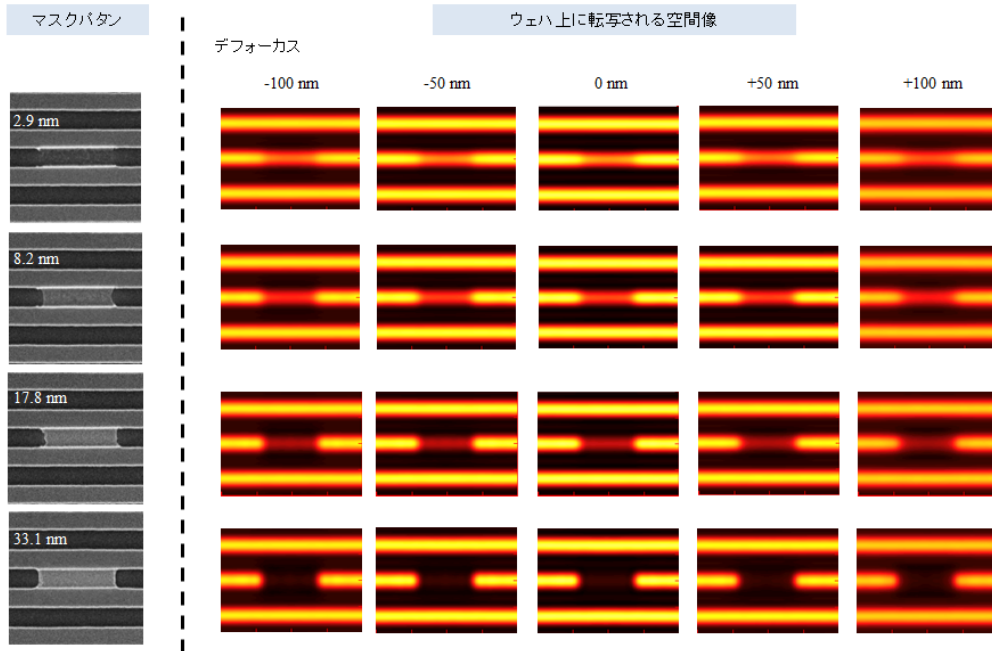
吸収層薄膜欠陥を有するマスクパターン SEM 像とウェハ転写パターン SEM 像を図Ⅲ.2.1.2-1-17 に示す。膜厚 33.1 nm と 17.8 nm の吸収層薄膜欠陥は、正常部と比較して EUV 反射強度は 12% および 29% に低下している。これにより転写パターンはレジストパターンがつながったブリッジ欠陥が形成され、反射強度が小さいほどブリッジ欠陥の面積が小さくなる傾向が確認された。EUV 反射強度が 61% に低下する膜厚 8.2 nm の吸収層薄膜欠陥の場合は、転写パターンにブリッジ欠陥は観られないが、明らかな転写寸法エラーとして転写された。このように EUV 反射強度低下量に依存して転写される欠陥サイズが変化していく様子が確認された。



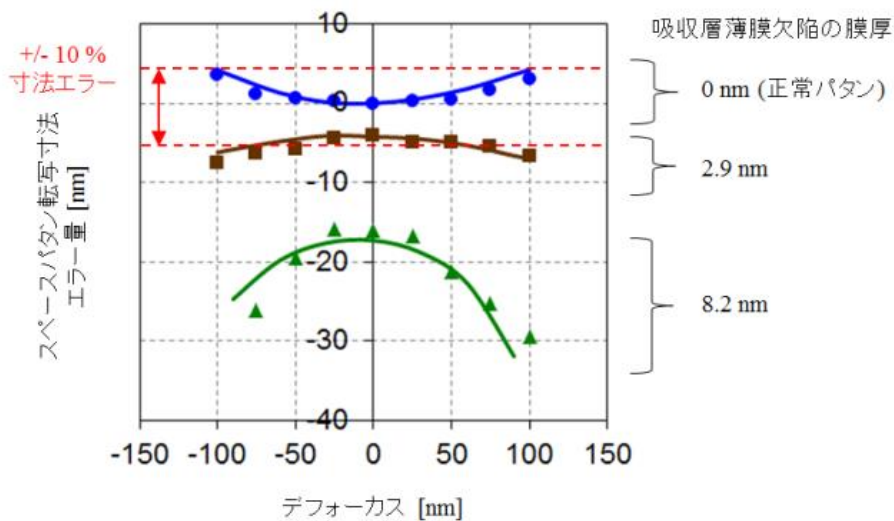
図Ⅲ.2.1.2-1-17 膜厚 2.9, 8.2, 17.8 および 33.1 nm の吸収層薄膜欠陥部のマスク SEM 像および、ウェハ上に転写したレジストパターンの SEM 像。マスクおよびウェハ上のパターンサイズはそれぞれ hp 225, 45 nm L/S。

吸収層薄膜欠陥がウェハ面上に転写される EUV 光強度に与える影響を計算により求めた。図

Ⅲ.2.1.2-1-18 は EUV 転写性能評価と同じ光学条件で、ウェハ上に転写される空間像を求めたものである。計算された空間像は EUV 転写性能評価の通り、吸収層薄膜欠陥の膜厚に応じてウェハ上に転写される光強度が低下し、EUV 反射強度が 73%に低下する膜厚 2.9 nm の吸収層薄膜欠陥であっても光強度が低下し、欠陥として転写され得ることを示した。そこで、欠陥が転写寸法に与える影響を明らかとするため、**図Ⅲ.2.1.2-1-17** および**図Ⅲ.2.1.2-1-18** から欠陥部の転写パターン寸法を算出して**図Ⅲ.2.1.2-1-19** に示した。転写パターン寸法から、膜厚 2.9 nm の吸収層薄膜欠陥であってもデフォーカス量 100 nm の領域において 10%以上の転写パターン寸法エラーを発生させることが明らかとなり、マスクパターン欠陥検査で検出し、欠陥部を修正により除去する必要のある、マスクパターン欠陥として分類されることがわかった。



図Ⅲ.2.1.2-1-18 膜厚 2.9, 8.2, 17.8 および 33.1 nm の吸収層薄膜欠陥部のマスク SEM 像および、ウェハ上に転写される空間像。マスクおよびウェハ上のパターンサイズはそれぞれ hp 225, 45 nm L/S。

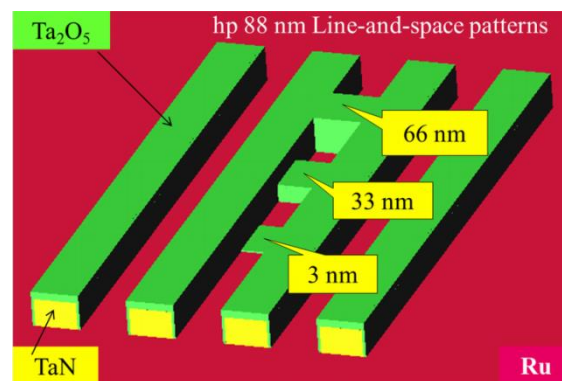


図Ⅲ.2.1.2-1-19 吸収層薄膜欠陥の膜厚が転写寸法に与える影響。プロットは実験値、実線は計算値。スペースパターン転写寸法エラー量は、転写寸法 45 nm からのずれ量。点線は転写寸法エラー量 10%を示す。

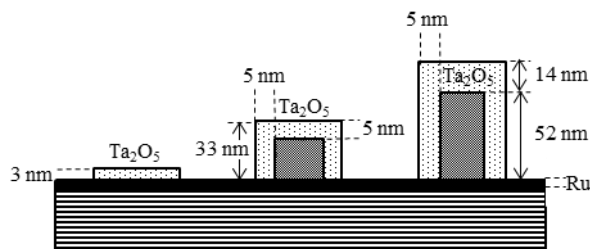
(iii) まとめ

EUVマスク上の吸収層薄膜欠陥がEUV転写性能に与える影響を評価した。評価に使用したマスクパターンは膜厚66nmのhp225nm L/Sで、ラインブリッジ欠陥の平面サイズは900×225nmのものを使用した。吸収層薄膜欠陥の形成は、吸収層と同等膜厚を有するラインブリッジ欠陥をEB-GAE技術を用いてエッチングすることで行った。EB-GAE技術による吸収層薄膜欠陥形成工程では、多層膜に転写され得るダメージを形成しないことAFM観察およびEUV転写評価により確認した。吸収層薄膜欠陥の目標膜厚は、3、8、18および33nmとした。形成した吸収層薄膜欠陥の膜厚は、2.9、8.2、17.8および33.1nmであった。吸収層薄膜欠陥がEUV転写性能に与える影響は、EUV転写装置を用いてウェハ上に塗布したレジストパターンに転写し、転写パターンをSEMで観察することと、シミュレーションにより行った。EUV転写評価とシミュレーションの結果、膜厚2.9nmの欠陥であっても転写時のデフォーカス量に応じて転写パターンの寸法が10%以上変動することがわかった。

(c) 薄膜欠陥とインパクト(2)-電子線画像の有効性検討



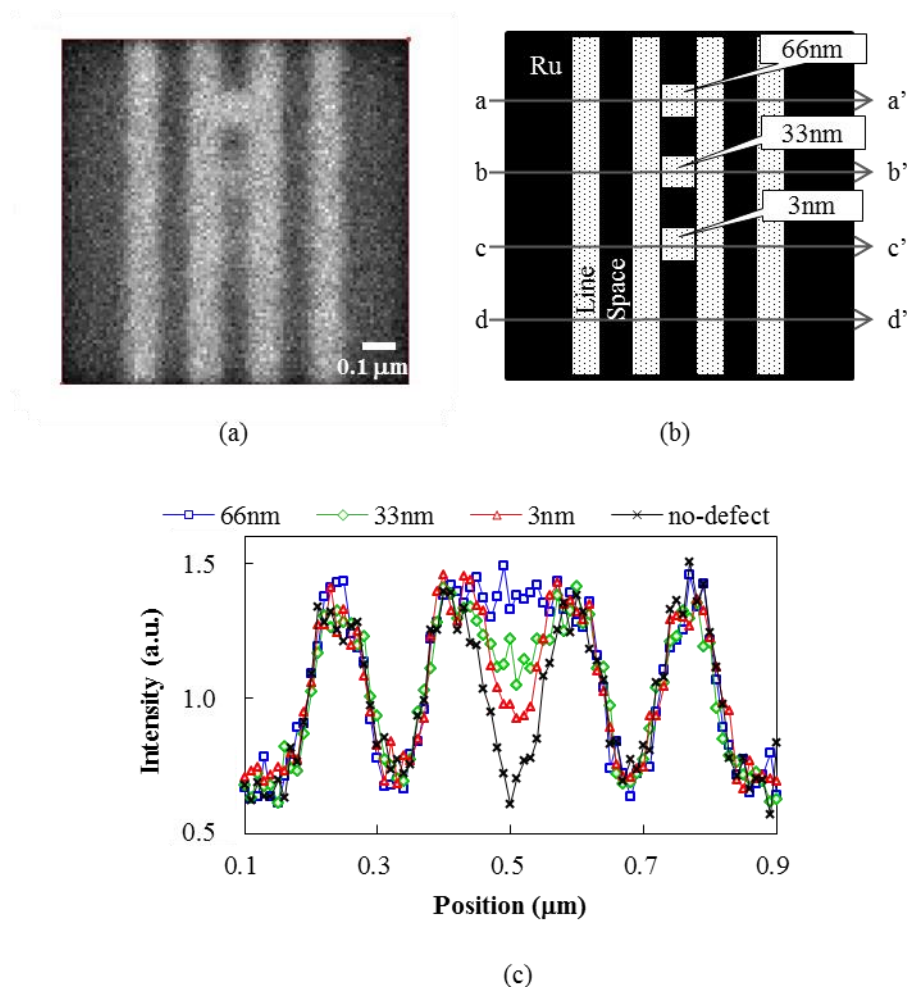
(a)



(b)

図III.2.1.2-1-20 シミュレーションに用いた試料の(a)鳥瞰図と(b)断面模式図

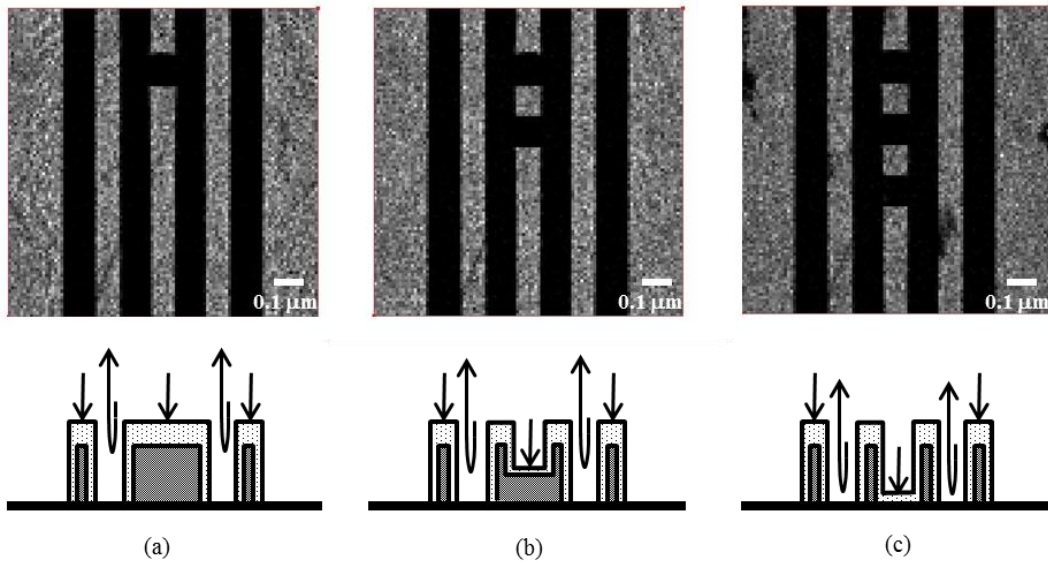
図III.2.1.2-1-20(a)はシミュレーションに用いた試料の鳥瞰図である。Ru層の上にhp88nmのLSパターンを形成し、中央のスペース部に厚さ66nmのブリッジ欠陥及び、厚さ33nmと3nmの薄膜欠陥を作製した。図III.2.1.2-1-20(b)は試料の断面模式図である。サンプル形状を実際のマスクに近づけるため、本シミュレーションでは自然酸化膜を考慮している。吸収層であるTa₂O₅層は非常に酸化しやすく、凡そ5nmの自然酸化膜が形成される。厚さ66nmのブリッジ欠陥の上面にはもともとTa₂O₅層が14nm形成されているが、本シミュレーションでは吸収層側面にも自然酸化膜としてTa₂O₅層を5nmずつ形成している。厚さ33nmの薄膜欠陥は上面側面ともに自然酸化膜のTa₂O₅層を5nm形成しており、厚さ3nmの薄膜欠陥は全てが酸化している。結果的に厚さ66nm、33nm、3nmの欠陥上面には、それぞれ厚さ14nm、5nm、3nmのTa₂O₅層が形成されていることになる。



図III.2.1.2-1-21 入射電子 1000 eV でサンプルを照射した場合の (a) シミュレーションイメージ、(b) イメージモード図、及び、(c) 欠陥信号。

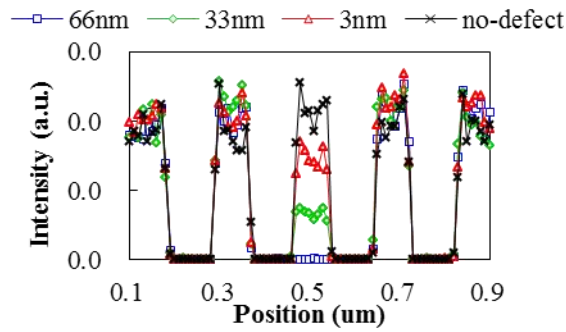
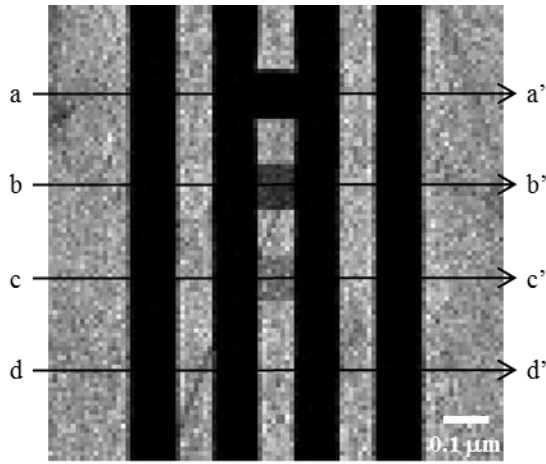
図III.2.1.2-1-21 に入射電子 1000 eV でサンプルを照射した場合のシミュレーション結果を示す。ライン部と欠陥部が白く観察された。欠陥は厚さが薄くなると欠陥信号が小さくなることが分かった。二次電子イメージを用いて薄膜欠陥を観察することにより、厚さの違う欠陥を信号強度の違いとして同定できることが分かった。

写像投影方式では、二次電子による画像取得の他に、ミラー電子による画像取得も可能である。ミラー電子とは、電子線源から放出された一次電子を試料に印加した負電位により減速させることにより、試料に衝突することなく跳ね返る電子のことである。試料近傍には試料に印加された電位により試料表面形状に応じた等電位線が現れる。減速された一次電子は、その等電位線と同じエネルギーになると試料に衝突することなく跳ね返ることになる。EUV マスクは、図III.2.1.2-1-20 に示したように、金属であるスペース部と誘電体であるライン部(吸収体)から構成されている。試料に電位を印加すると金属表面と誘電体表面の電位が異なる。この現象を利用することにより一次電子の一部だけを試料に衝突させ、衝突に寄与しない電子をミラー電子として反射させることが可能となる。図III.2.1.2-1-22 は試料に-1V を印加し、一次電子のエネルギーを変化させたときのミラー電子イメージと試料近傍の電子の振る舞いの模式図である。



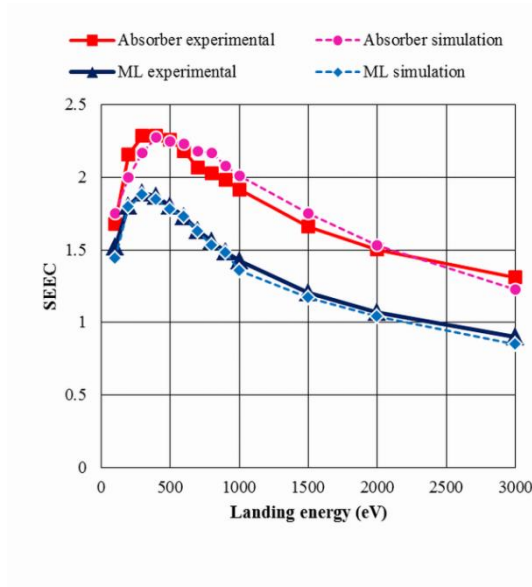
図Ⅲ.2.1.2-1-22 試料に $-1V$ を印加し、一次電子のエネルギーを変化させたときのミラー電子イメージと試料近傍の電子の振る舞いの模式図。(a)ブリッジ欠陥の表面電位を入射電子エネルギーよりも若干小さくした場合、(b)33nm 欠陥の表面電位を入射電子エネルギーよりも若干小さくした場合、(c)3nm 欠陥の表面電位を入射電子エネルギーよりも若干小さくした場合。

一次電子のエネルギーをブリッジ欠陥の表面電位よりも僅かに大きくすると、一次電子はライン部及びブリッジ欠陥表面にだけ衝突する。この時、衝突エネルギーは極めて小さいため二次電子はほとんど発生しない。一方、スペース部や薄い膜厚の薄膜欠陥表面は一次電子のエネルギーよりも表面電位が大きいため、一次電子は試料に衝突することなくミラー電子として反射する。このため、ミラー電子発生部の信号強度が高く、一次電子が衝突した部分の信号強度は極めて小さいため、[図Ⅲ.2.1.2-1-22](#)のようなコントラストの大きな電子線イメージが得られる。このイメージは[図Ⅲ.2.1.2-1-21](#)に示したような二次電子イメージとコントラストが反転していることも特徴的である。一次電子のエネルギーを厚さ 33nm の薄膜欠陥表面電位よりも僅かに大きくした場合は、一次電子はライン部及び、ブリッジ欠陥と 33nm の薄膜欠陥にのみ衝突し、その他の部分ではミラー電子となる。更に、一次電子のエネルギーを厚さ 3nm の薄膜欠陥表面電位よりも僅かに大きくした場合は、一次電子はライン部及び、ブリッジ欠陥と 33nm、3nm の薄膜欠陥にのみ衝突し、その他の部分ではミラー電子となる。このようにして、一次電子エネルギーを調整することにより薄膜欠陥を選択的に同定することが可能であることが分かった。ただし、このシミュレーションは一次電子のエネルギーに幅がない理想的な状態で行っているが、実際の電子線源にはエネルギー幅がある。そのため、実際のミラー電子イメージを再現するために、これらの一次電子エネルギーを全て重畳した画像を作成した。[図Ⅲ.2.1.2-1-23](#)は一次電子のエネルギー幅を考慮したミラー電子の重畳イメージと欠陥信号強度である。ミラー電子イメージを用いて薄膜欠陥を観察することにより、酸化膜厚の違う欠陥を信号強度の違いとして同定できることが分かった。



図Ⅲ.2.1.2-1-23 一次電子のエネルギー幅を考慮したミラー電子の重畳イメージと欠陥信号強度

- [3] 電子軌道シミュレーションによる電子線像の予測
 (a) EUV マスクを構成する材料の二次電子放出効率



図Ⅲ.2.1.2-1-33 吸収体と反射膜の二次電子放出効率

図Ⅲ.2.1.2-1-33 は、EUV マスクを構成する吸収体と多層反射膜の二次電子放出効率である。吸

収率は 400eV にピークがあり、二次電子放出効率が 2 以上である。吸収体の表面は誘電体であり、二次電子放出効率が 1 以上であることから、誘電体表面は正に帯電する可能性があることが分かった。一方、多層膜は 300eV にピークがあり、二次電子放出効率は 1.5 以上であった。多層膜の抵抗率を測定したところ $2 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ であったことから、二次電子放出効率が 1 以上ではあるが、多層膜は帯電しにくいと考えられる。点線で示したものが、シミュレーションの値である。それぞれ、実験値とシミュレーション値が良く一致していることが分かる。

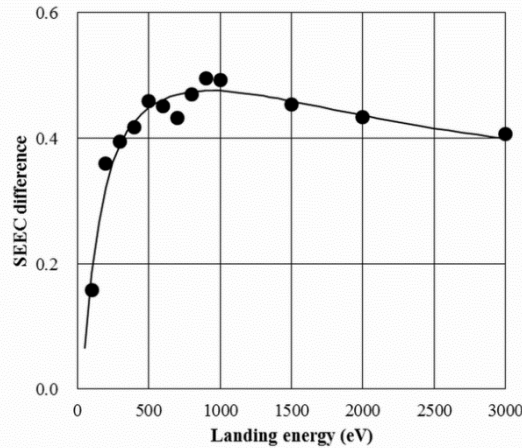


図 III.2.1.2-1-34 吸収体と反射膜の二次電子放出効率差

図 III.2.1.2-1-34 は実験で得られた吸収体の二次電子放出効率から反射膜の二次電子放出効率を差し引いたグラフである。このカーブは吸収体と反射膜のコントラストに相当し、1000eV 付近にピークがあることが分かった。

(b) 欠陥検出信号の電子条件依存性

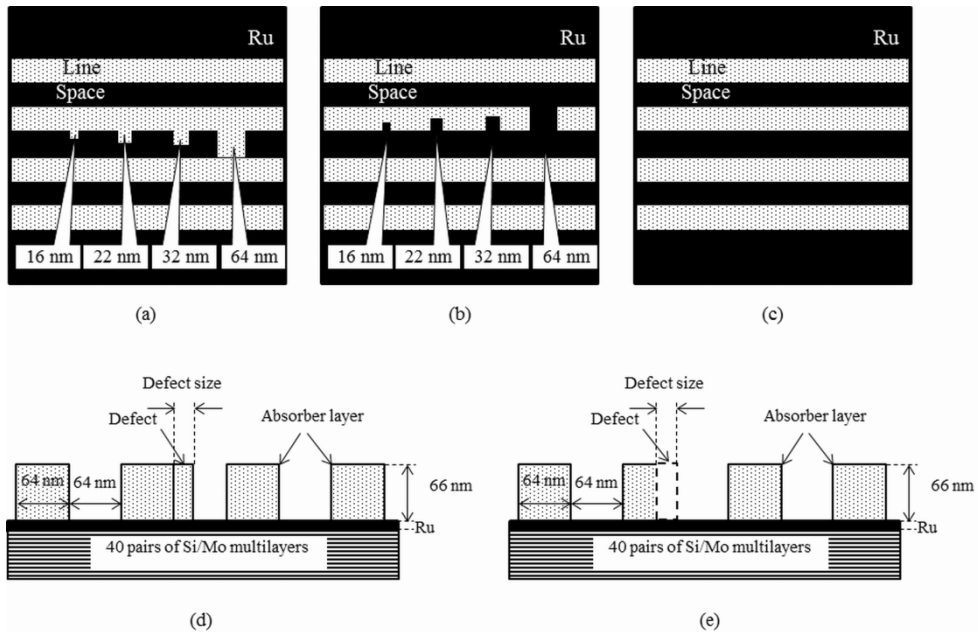


図 III.2.1.2-1-35 シミュレーションに用いた試料形状の模式図。(a) 凸欠陥試料の表面模式図、(b) 凹欠陥試料の表面模式図、(c) 欠陥なし試料の表面模式図、(d) 凸欠陥試料の断面模式図、(e) 凹欠陥試料の断面模式図。

図 III.2.1.2-1-35 はシミュレーションに用いた試料形状の模式図である。hp64 の LS パターンに凸欠陥と凹欠陥を作製した。欠陥の大きさは面積の平方根で定義され、ここで用いた欠陥形状は正方形であるため、一辺が 64nm、32nm、22nm、16nm の欠陥はそれぞれ 64nm、32nm、22nm、16nm 欠陥と定義できる。欠陥検査シミュレーションは、欠陥付画像と欠陥なし画像をそれぞれ画像処理した後、両者の差画像を取得することによって行った。欠陥検出が可能な信号強度は、差画像の欠陥信号が欠陥以外のノイズレベルの 10 倍以上である場合と定義した。

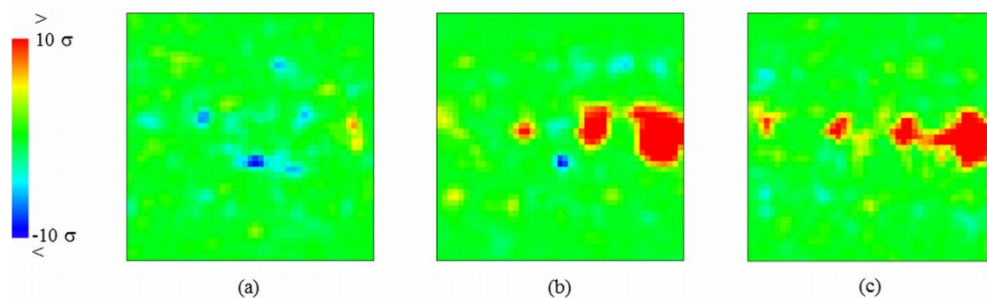


図 III.2.1.2-1-36 凸欠陥付試料を用いた場合のシミュレーションによる欠陥検査画像。検出器の 1 ピクセル辺りの電子数は、(a) 50 電子、(a)500 電子、及び、(a)3000 電子。

図 III.2.1.2-1-36 は凸欠陥付試料を用いた場合のシミュレーションによる欠陥検査画像である。検出器の 1 ピクセル辺りの電子数を(a) 50 電子、(b) 500 電子、(c) 3000 電子と変化させてシミュレーションを行った。赤く示される部分が、周囲のノイズレベルよりも 10 倍以上高い信号強度が現れた部分である。1 ピクセル辺り 3000 個以上の場合に 16nm 欠陥が検出できた。

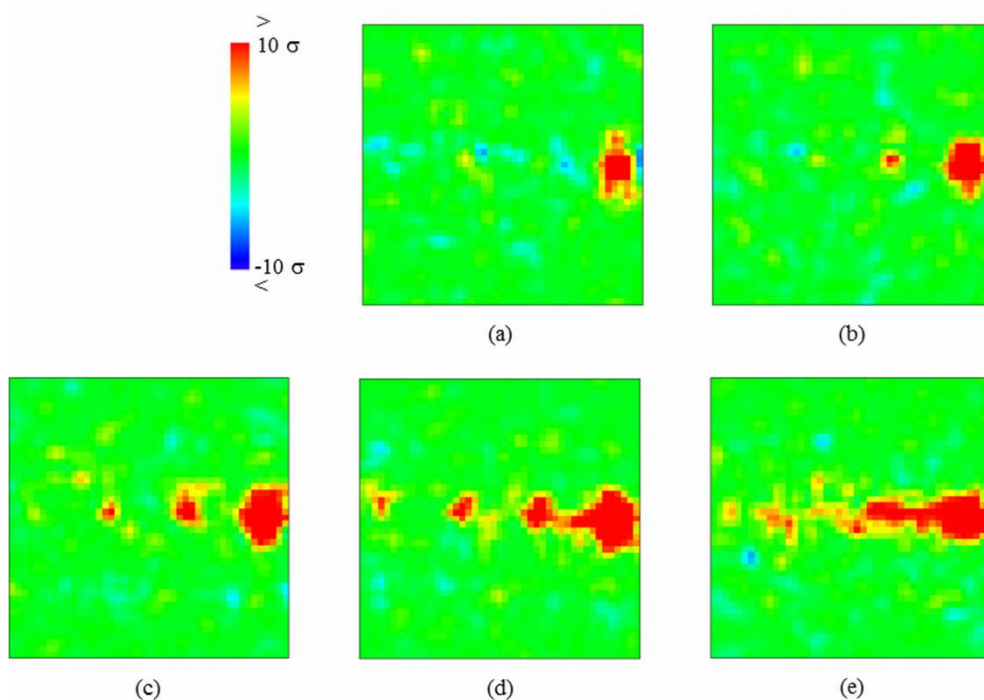


図 III.2.1.2-1-37 凸欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性。入射電子エネルギーは(a) 50eV、(b) 250eV、(c) 500eV、(d) 1000eV、(e) 3000eV。

次に、入射電子エネルギーが凸欠陥検査感度に与える影響を調べるために、入射電子エネルギーを 50eV、250eV、500eV、1000eV、3000eV と変化させてシミュレーション画像を取得し、検査画像を比較した。図 III.2.1.2-1-37 に示すように、16nm 欠陥信号は 1000eV の場合に最も高いことが

分かる。これらの欠陥信号をまとめたのが図 III.2.1.2-1-38 である。

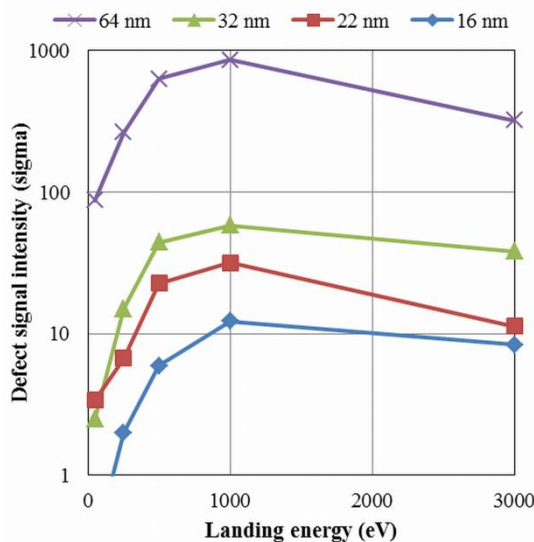


図 III.2.1.2-1-38 凸欠陥信号強度の入射電子エネルギー依存性

全ての大きさの欠陥において 1000eV にピークがあることが分かった。このカーブの傾向は、図 III.2.1.2-1-34 に示した吸収体と反射膜の二次電子放出効率差のカーブと良く一致しており、画像コントラストが高いほど凸欠陥信号が高くなることが分かった。また、実験で得られたコントラストカーブと本シミュレーションで得られた欠陥信号強度が一致したことから、このシミュレーションの信頼性も確認できた。

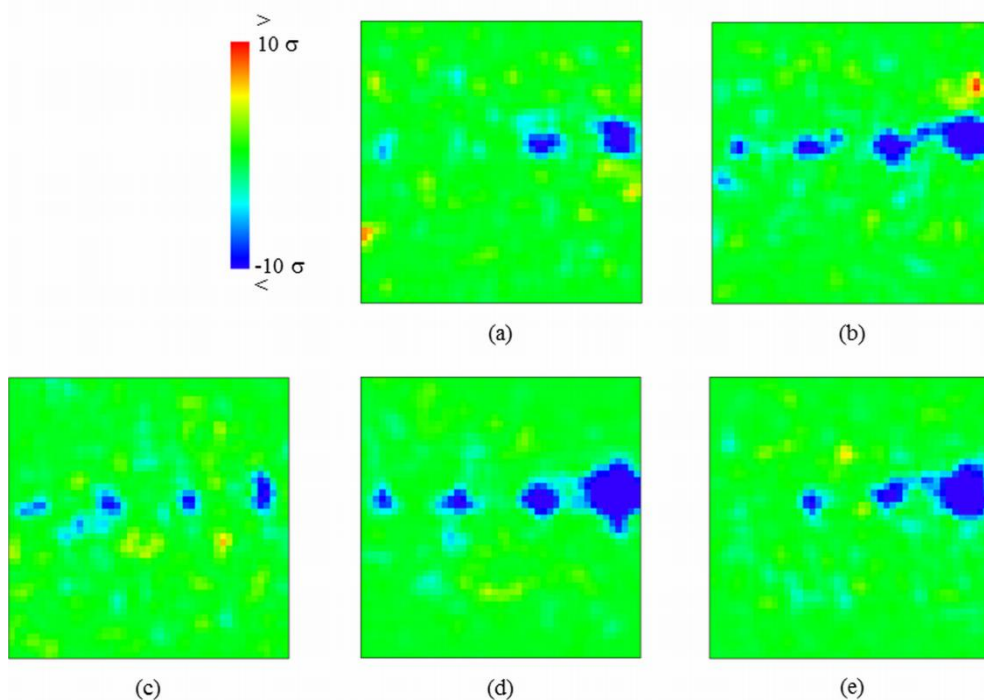


図 III.2.1.2-1-39 凹欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性。入射電子エネルギーは(a) 50eV、(b) 250eV、(c) 500eV、(d) 1000eV、(e) 3000eV。

次に、入射電子エネルギーが凹欠陥に関しても同様のシミュレーションを行った。図 III.2.1.2-1-39 は凹欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性である。青く示される部分が、周囲のノイズレベ

ルよりも 10 倍以上高い信号強度が現れた部分である。凹欠陥の場合は、16nm 欠陥が 250eV、500eV、1000eV の場合に検出された。これらの欠陥信号をまとめたのが図 III.2.1.2-1-40 である。

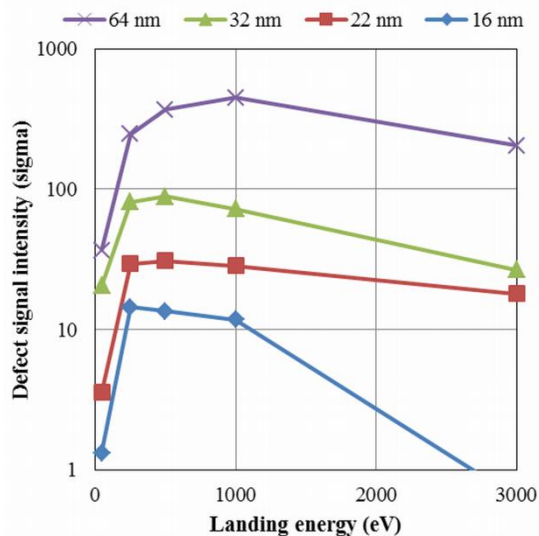


図 III.2.1.2-1-40 凹欠陥信号強度の入射電子エネルギー依存性

64nm 欠陥の場合は 1000eV に感度のピークがあるが、欠陥サイズが小さくなるにつれてピークが低エネルギー側にシフトし、16nm 欠陥では 250eV にピークがあった。この現象は二次電子放出効率と欠陥のアスペクト比によって説明できる。

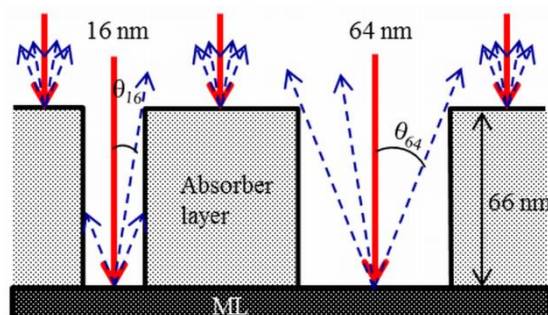


図 III.2.1.2-1-41 凹欠陥サイズと仰ぎ角との関係

図 III.2.1.2-1-41 は欠陥のアスペクト比と仰ぎ角の関係を示した模式図である。欠陥サイズが小さくなると欠陥のアスペクト比が大きくなるため、仰ぎ角が小さくなり、欠陥の底で発生した二次電子がセンサーまで到達する量が減少する。そのため、欠陥信号は吸収体の二次電子放出効率のカーブに近づくことになる。このように、凸欠陥と凹欠陥では欠陥サイズが小さくなるにつれて、入射電子エネルギーに対する依存性が異なることが分かった。また、実際の検査動作の場合は、1000eVで行うことにより、凸欠陥でも凹欠陥でも 16nm サイズの欠陥が 10σ 以上で検出可能なことも分かった。

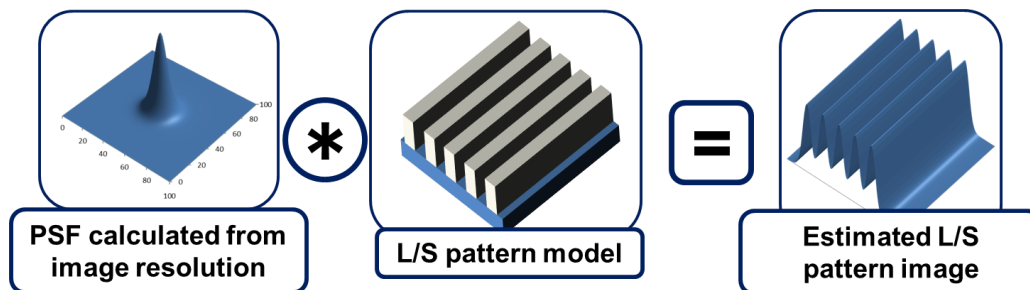
[4] 欠陥検出用の論理と回路の検討

(a) 欠陥検出用の論理と回路の検討

hp16nm 微細加工技術に対応する指標に対応可能な EUV マスク PI 基盤技術を確立することを目標として、PI 装置に搭載する欠陥検出用の論理と回路の検討をおこなった。

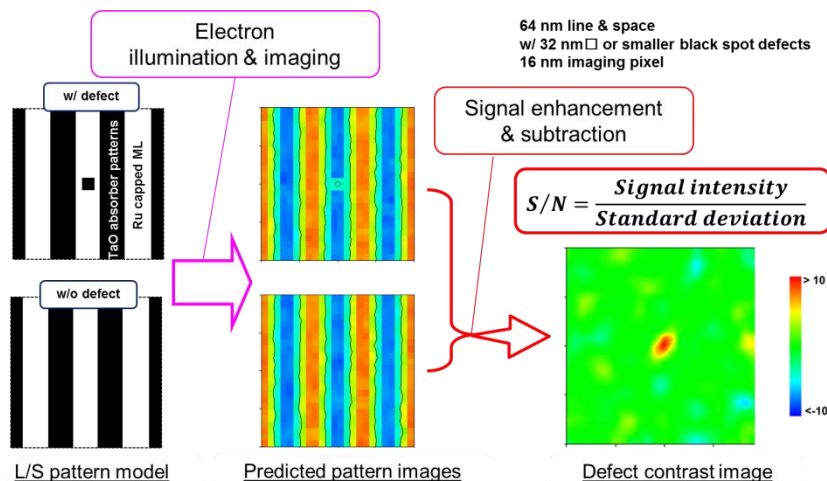
(b) 欠陥検出用の実装論理による効果見積もり

開発装置の実際の解像度が確認できたことに基づき、[図 III.2.1.2-1-42](#) に示すように、点拡がり関数(PSF, Point Spread Function)を求めて、所望の矩形パターン形状に畳み込むことで、実際に得られる電子線画像を予測することができるようになった。



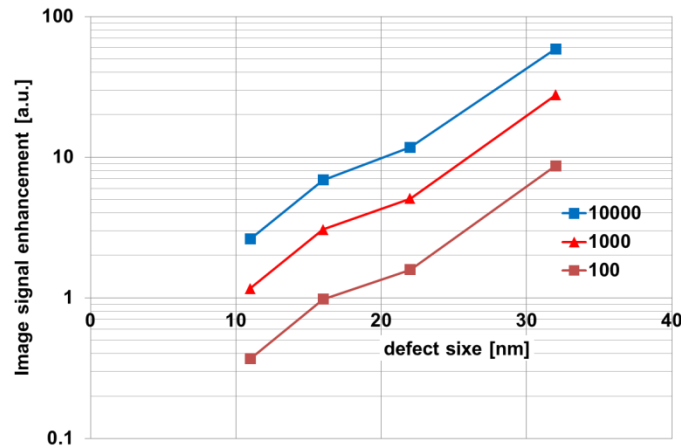
[図 III.2.1.2-1-42](#) 開発装置の解像度に基づくパターンの像プロファイル算出手順

そこで、凹凸欠陥付 L/S パターンの電子線像をシミュレーションし、欠陥検出信号に対して強調/ノイズ低減処理を適用した。信号処理の流れを[図 III.2.1.2-1-43](#) に示す。



[図 III.2.1.2-1-43](#) 画像処理の流れ

欠陥なし/ありパターンの電子線像を算出し、欠陥なしパターンの検査画像を欠陥あり検査画像から差し引くことで欠陥検出信号を生成する。お互いの差を検出器で採取する電子像は画素あたりに入射する電子数によりばらつくため、画素あたりの電子数を考慮に入れて計算した。また、実際のマスクパターンエッジは微小寸法でがたつくため、寸法ばらつきが $1\text{nm}(\sigma)$ 生じた状態を仮定し計算を行った。欠陥検出信号は、各画素の信号出力を欠陥がないエリアの信号ばらつきで割った(規格化した)出力を用いた。換言すれば、欠陥における差信号がバックグラウンドのばらつきと有意でなければ安定かつ信頼性のある検出ができないことを意味しており、ここでは 10 以上の信号検出信号を得ることを目標としている。信号強調により欠陥検出信号がどれだけ強調されたかを、差信号から得られる欠陥検出信号と、信号処理後の欠陥検出信号の比でまとめた。結果を[図 III.2.1.2-1-44](#) に示す。



図III.2.1.2-1-44 欠陥信号の強調・ノイズ低減処理の効果

一画素あたりの入射電子数をパラメータとした。欠陥サイズの減少に伴いその効果も低下するが、電子数の増加により画像処理の効果を維持することが可能となる。サイズが 11nm²まで減少すると電子数が少ない場合(100 個/画素)はむしろ逆効果となり、高感度の欠陥検査を実現するためには、画像処理と並行して電子数の確保も重要なポイントとなることが確認された。

[5] PI 装置の欠陥検出性能解析

(a) PI 装置のマスク画像信号解析

(i)検討の目的

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 ②EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において検討した手法を用いて、写像投影方式電子線光学系(Projection Electron Microscope, PEM)方式に基づくPI 装置によって得られるマスク画像信号の解析を行い、欠陥検出感度向上への適用性を検討した。EUV マスクに電子線を照射することで得られる電子線像を写像投影方式の光学系によりエリアセンサー上に取り込み、マスクパターンの画像情報を得る。得られた画像からダイ比較方式により欠陥検出信号を得るに当たり、検出が必要となる欠陥から生じる欠陥信号を強調し、画像ノイズを低減する処理を定量的に探索し、欠陥検査の高感度化に効果があることを確認する。更に、PEM 画像に特徴的な画素あたりの照射電子数に依存したノイズ成分が欠陥検出信号に及ぼす影響を見積もるため、複数の採取画像を利用し他画像重ね合わせ手法を開発した。

(ii)研究内容及び成果

写像投影方式を用いた電子線光学系は、EUV マスクパターンの電子線画像を高分解かつ高スループットで得るのに効果的である。得られた画像を用いてダイ比較方式で欠陥検出を行う場合、DUV 光を用いた欠陥検査画像と比較して 1 画素あたりに入射する電子数は DUV 光による画像における光子数と比べて少ないため、欠陥検出において適用する画像処理の重要性が更に増加している。欠陥から生じる欠陥検出信号を消すことなく、ノイズ低減を行う処理が必要となる。欠陥検出処理に用いる画像処理アルゴリズムを検討するために、様々な欠陥サイズを異なるレイアウトで配置し、画像に含まれるノイズ成分を変えたシミュレーション画像を作成した。ダイ比較方式では欠陥検出を行うため比較する二枚の画像間の位置あわせを精密に行うことが重要となる。図 III.2.1.2-1-45 に示す。(a)は開発した PI 装置に搭載した位置あわせ機能による差信号であり、(b)は従来方式の画素単位での位置あわせにより得られた差信号である。比較のため、図中の一部を拡大して矩形内に示す。3×3 個の欠陥をマトリクス状に配置しており、従来方式では欠陥部以外

に L/S 状に信号差が生じており欠陥部の信号が認識できないのに対し、開発した位置あわせ機能により検出が必要な欠陥部のみが差信号として生じており、二次元パターンマッチング手法による位置あわせ機能が有効に動作していることが確認出来た。この手法を用いて、欠陥検出を高感度で行うためのアルゴリズム検討を、4×4 マトリクス状に配置した欠陥を異なるサイズでシミュレーションにより生成した画像を用いて行った。結果を **図 III.2.1.2-1-46** に示す。

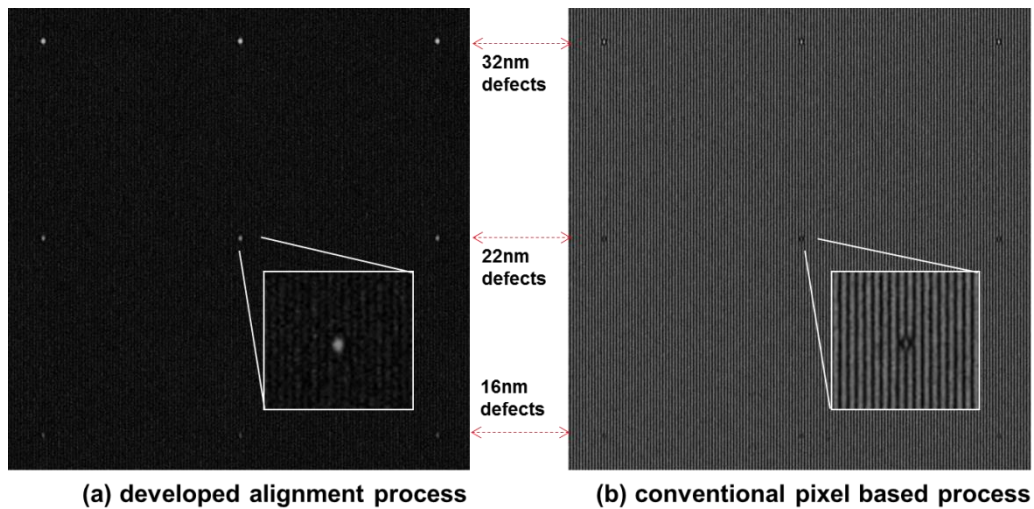


図 III.2.1.2-1-45 開発した位置あわせ機能を用いて生成した差画像による欠陥検出結果

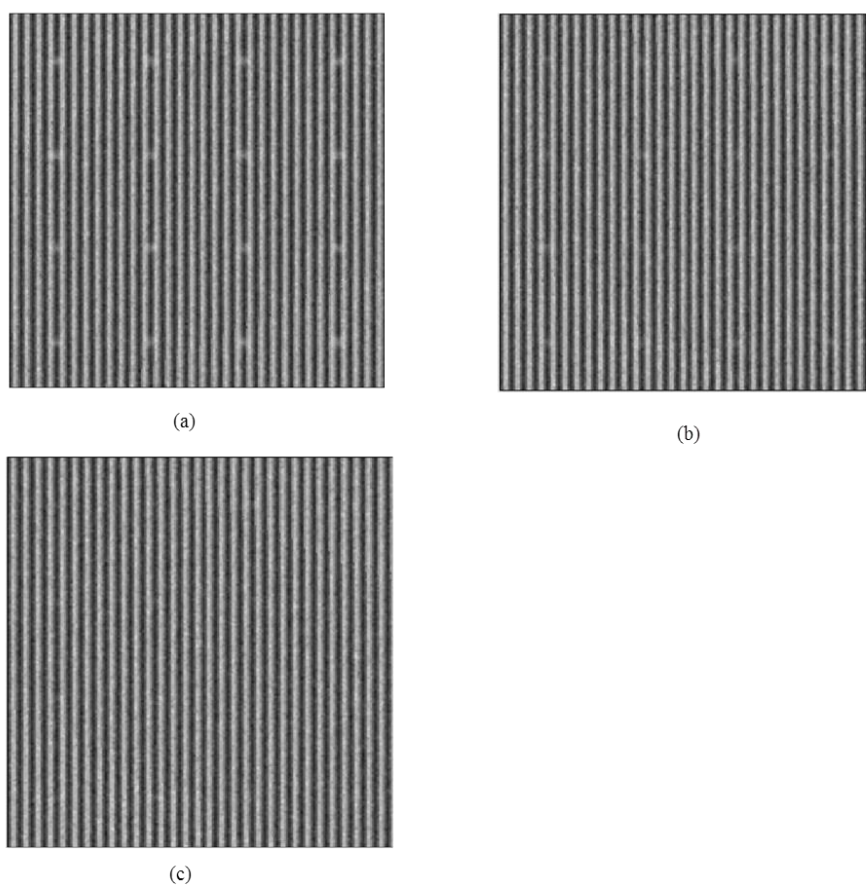
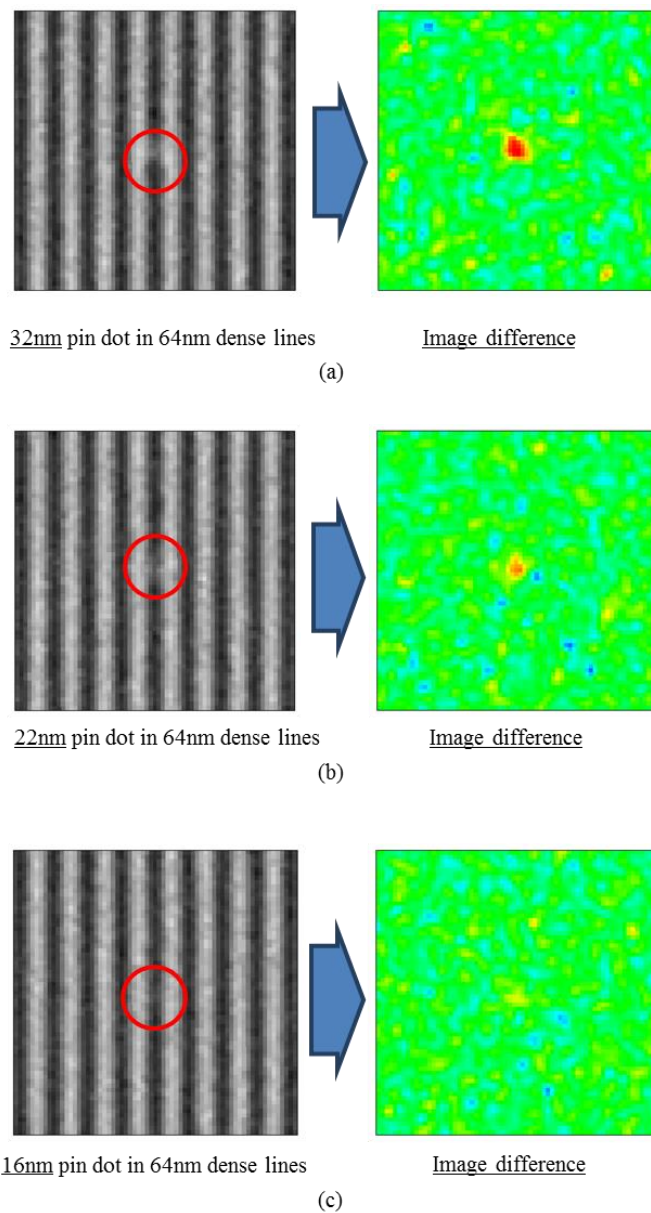


図 III.2.1.2-1-46 シミュレーションにより生成した hp 64 nm L/S パターン中のドット欠陥

(a)、(b)、(c)に示すマスク上 hp 64nmL/S パターン(ウェハ上 16 nm)画像に含まれるドット欠陥サイズは夫々32、22、16nm である。サイズ 32nm の欠陥はパターン中に存在していることが容易に判別できるが、サイズ縮小に従い欠陥検出信号は減少し、サイズ 22nm の欠陥は検出可能であるが、サイズ 16nm の欠陥は認識が困難となる。夫々の差信号を [図 III.2.1.2-1-47](#) に示す。サイズ 16nm の欠陥検出画像に対して、ノイズ低減処理を加えた結果を [図 III.2.1.2-1-48](#) に示す。画像領域中央に配置されている検出を目的とする欠陥は、図中赤丸で囲まれているように、得られる信号により明確に認識されているが、ノイズ成分による信号も併せて赤丸で示すように同時に認識されてしまっている。従って、hp 16 nm 以細世代対応の欠陥検出感度を開発した PEM 光学系を用いて、照射電子数に依存したノイズを含む画像から得るためには、目的とする欠陥から得られる信号のみを強調し、ノイズ成分によるピークを除去することが重要となる。技術検討のため、ここではマスク上 hp 64 nm L/S 中のサイズ 16nm の欠陥の検出を目的とした。



[図 III.2.1.2-1-47](#) 32/22/16nm サイズドット欠陥から得られる差信号

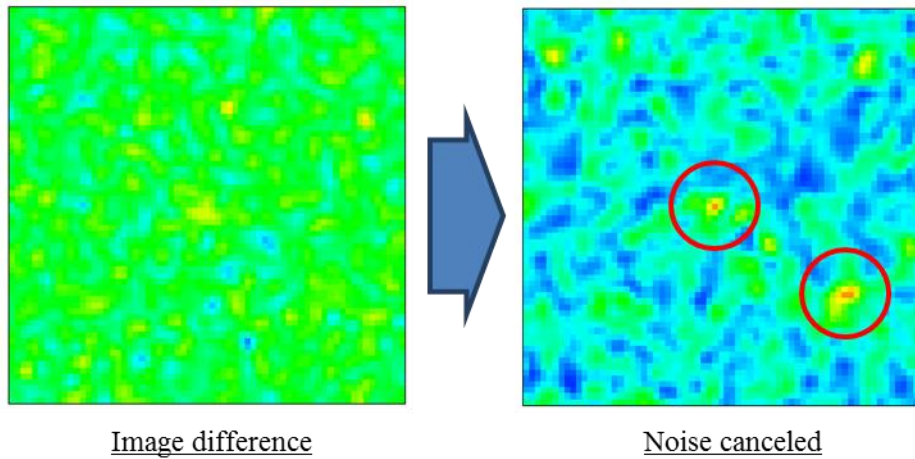


図 III.2.1.2-1-48 16nm サイズドット欠陥信号から得られる差信号とノイズ低減信号

PEM 光学系により採取した電子線像は、一画素あたりの照射電子数に依存したノイズ成分(ショットノイズ)を有するため、高感度欠陥検出に向けた信号解析を行った。結果を図 III.2.1.2-1-49 に示す。欠陥画像の信号強度変化を L/S パターンと垂直方向に微小量変位させ、複数の断面で採取した。信号は複数の指標に基づき特徴量を有する。図 III.2.1.2-1-50 に画像中の各々の画素ごとに得られる信号強度を、ヒストグラム表示したものを示す。(a)に示す差分信号及びノイズ低減処理信号(b)中の欠陥信号は、図中の赤矢印で示すように、信号分布中の最大信号強度とはならず、閾値により欠陥信号のみを弁別することはできない。そこで図中(c),(d)に示す信号の偏り(skew)や偏差の組み合わせ量(Associated derivative)等の様々な特徴量を検討した。

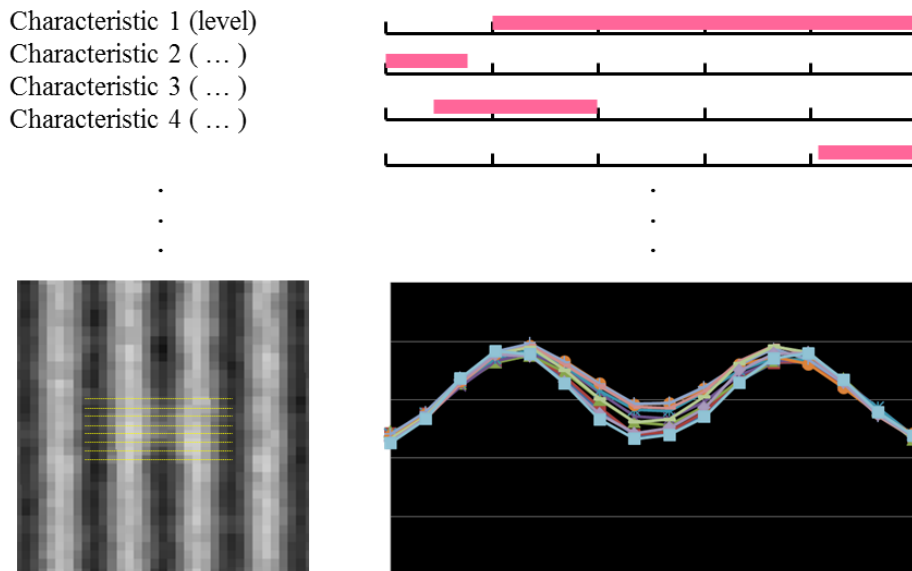
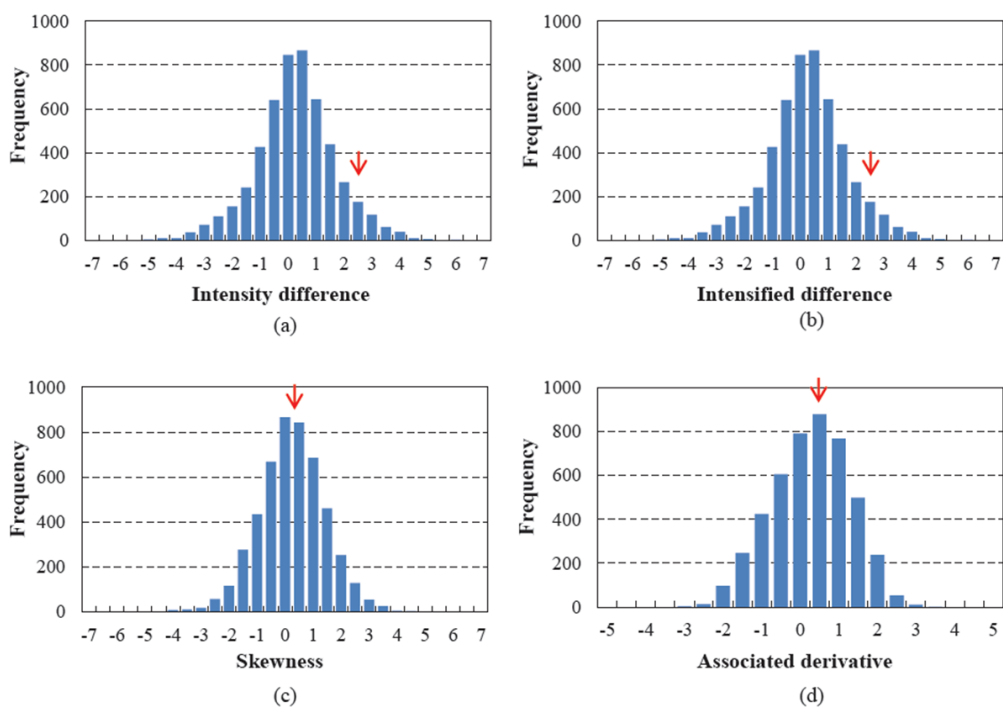


図 III.2.1.2-1-49 欠陥信号の特徴解析

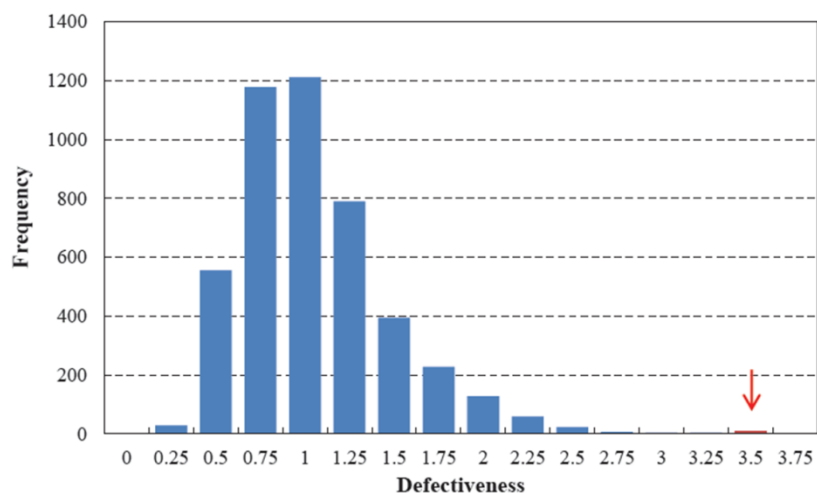


図Ⅲ.2.1.2-1-50 欠陥信号の特徴量ヒストグラム

目的とする欠陥から得られる極大を取る信号を、他の極大信号と弁別するため、多次元空間における欠陥度(defectiveness)を上記の特徴量の測定値に基づく関数として定義した。欠陥度は特徴量の直積空間内で以下のように定義される。

$$\text{Defectiveness} \equiv C_1 \otimes C_2 \otimes C_3 \otimes C_4 \otimes \dots$$

ここで、 C_{is} は画像の特徴量を示す。欠陥度を決定する特徴量を、各々の特徴量の測定結果を重み付けして求めた。hp 64 nm L/S パターン中の 16 nm サイズ欠陥に以上の処理を適用した結果を図Ⅲ.2.1.2-1-51 に、画像を構成する各画素の輝度分布ヒストグラムとして示す。欠陥度を示す信号



図Ⅲ.2.1.2-1-51 欠陥信号の特徴量ヒストグラム

は他の輝度信号と分離して強調され、ノイズ成分が軽減されていることがわかる。欠陥検出を行う差信号が、欠陥度を指標として最適化を行ったことによる効果を図 III.2.1.2-1-52 に示す。目的と

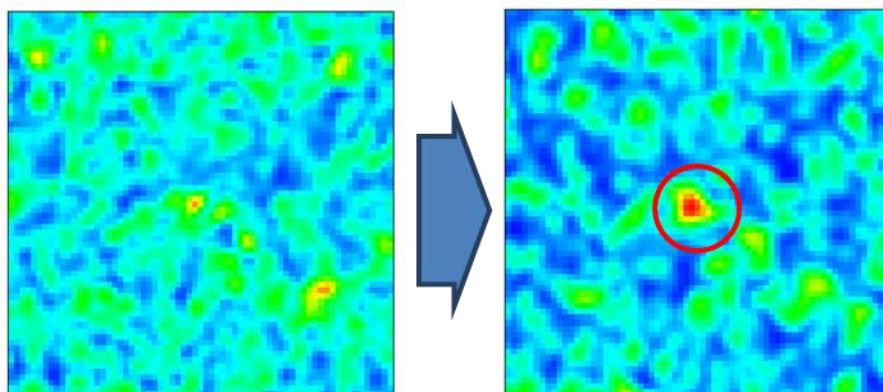


図 III.2.1.2-1-52 欠陥検出信号の差信号からの改善

する欠陥信号のみが強調され、それ以外の極大値が抑制されることで、擬似欠陥のない欠陥検出が行われていることがわかる。更に、高い欠陥検出感度を安定して得るためには、様々なパターン種類に対応して高い欠陥度が得られる最適な特徴量を選定する必要がある。そのためには、検出が必要な欠陥画像をライブラリ化したデータベースに基づき、欠陥度を最適化するツールを PI 装置に備えることが有効である。本件に関しては[8]において言及する。ここで、開発した欠陥検出用の画像処理手法による欠陥検出感度が、PEM 画像の特性変化によりどのように変化するかを見積もる必要がある。そこで、同一マスクパターンに対して複数枚の PEM 画像を連続して採取し、オフラインにてお互いの位置ずれを精密に合わせた上で重ね合わせることで、画像あたりの電子数が異なる画像を模擬的に生成する手法を開発した。

(iii)まとめ

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 ②EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において検討した手法を用いて、写像投影方式電子線光学系(Projection Electron Microscope, PEM)方式に基づくPI 装置によって得られるマスク画像信号の解析を行い、欠陥検出感度向上への適用性を検討した。EUV マスクに電子を照射し PEM 光学系を用いて得られた電子線画像は、画素あたりの電子数に依存したノイズ成分を有するため、シミュレーションモデルに基づく hp 64 nm L/S パターン中の異なるサイズのドット欠陥画像に対して最適な特徴量を探索した。画像の特徴から欠陥度を定義し、欠陥検出処理を行うことで 16 nm サイズ欠陥が評価領域内で擬似欠陥なく検出できることがわかり、本開発による欠陥画像処理が欠陥検査の高感度化に効果があることが確認出来た。また、PEM 画像に特徴的な画素あたりの照射電子数に依存したノイズ成分が欠陥検出信号に及ぼす影響を見積もるため、複数の採取画像を利用した画像重ね合わせ手法を開発し、その有効性を確認できた。

(b) 遮光枠構造が電子線像に与える影響評価

(i) 検討の目的

電子線欠陥検査技術では、検査工程中の試料帯電による像の乱れ、例えばフォーカスぼけや画像の倍率変動等が発生する懸念がある。検査対象の EUV マスクには転写性能を向上させるため遮光枠と呼ばれるマスクパターン外周の多層膜を全層除去した構造が提案されている。多層膜を除去し基材(ガラス)がむき出しになった状態では、マスクパターン領域とマスク外周領域の導通がほぼゼロになる。本検討では遮光枠付き EUV マスクを電子線光学系で検査する際に、試料の帯電等が発生し電子線画像に乱れが生ずるか否かを評価した。

(ii) 研究内容および結果

本評価に準備した遮光枠付き EUV マスクの全体図を図 III.2.1.2-1-53 に示す。遮光枠部に導電性を付与するため、基材と多層膜の間に種々の膜厚の Ru を成膜した EUV マスクを準備した。また、リファレンスとして導電膜を成膜していない EUV マスクも準備した。EUV マスクの断面構造は図 III.2.1.2-1-53 (b) に示した通り、遮光枠の幅 3mm とし、遮光枠部は吸収層および多層膜を全量除去した。

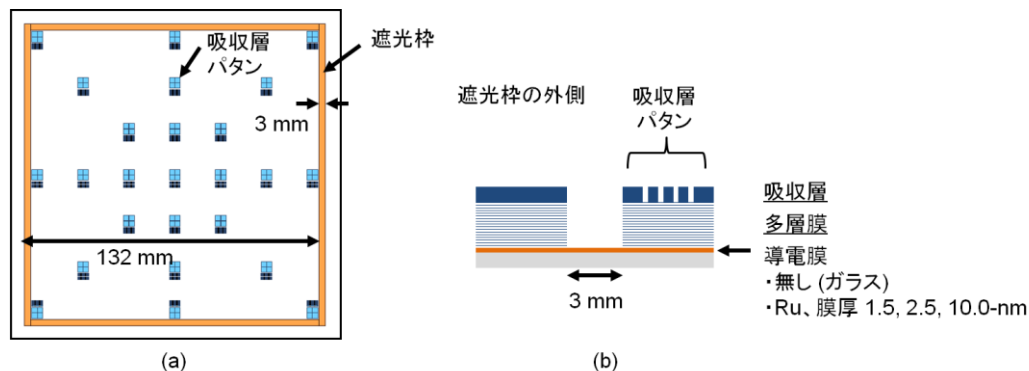


図 III.2.1.2-1-53 準備した遮光枠付き EUV マスク (a) マスク全体図 (b) 遮光枠部を含むマスク断面図

作製した EUV マスクの全体写真および遮光枠部の拡大写真を図 III.2.1.2-1-54 に示す。ここで遮光枠部が黒く見えるのは、基材(ガラス)を通して黒色のマスクケースが観えているためである。Ru の膜厚に応じて遮光枠部の透明性が変化している様子を目視で判断可能である。

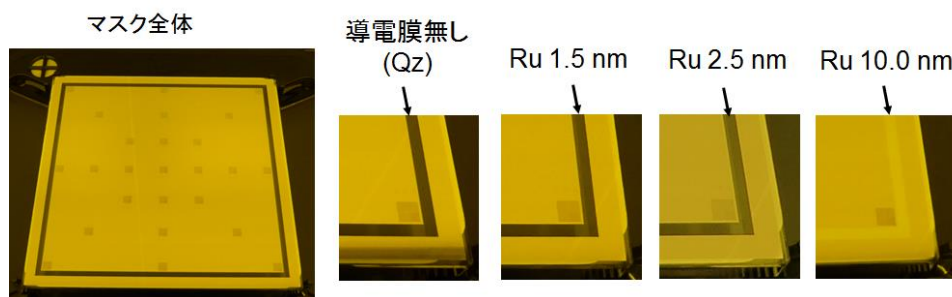
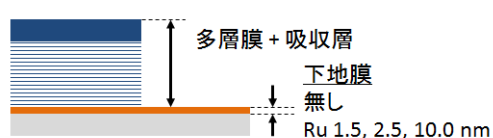


図 III.2.1.2-1-54 準備した EUV マスク全体写真および遮光枠部の拡大写真

遮光枠部の多層膜除去工程で Ru 膜が除去されていないことを確認するため、遮光枠部の段差測定と遮光枠部の抵抗値を測定した。遮光枠部の段差は設計上 352.5 +/- 1.5 nm (多層膜 280 nm、最表面 Si 4 nm、キャッピング層 2.5 nm、吸収層 66 +/- 1.5 nm) であり、段差測定は AFM(L-Trace II) を用いて各マスク 4 回測定実施した。測定結果は図 III.2.1.2-1-55 に示す。吸収層膜厚の公差 1.5 nm を考慮すると段差の範囲は 351.0 から 354.0 nm となるのだが、AFM の段差測定においても装置の実力値として +/- 0.9 % (約 3 nm) の測定バラツキが発生する。そのため段差測定結果から Ru 層へのダメージを確認することはできなかった。

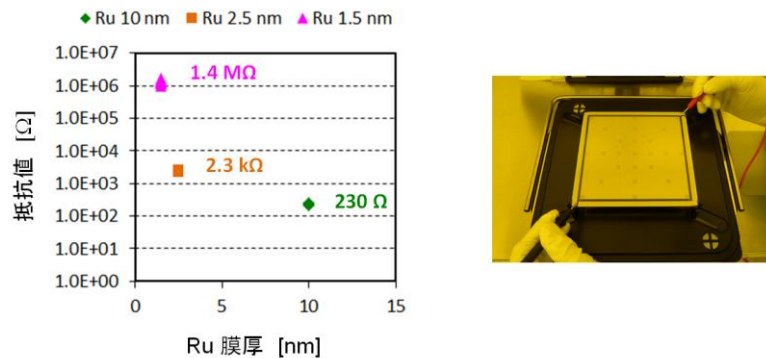
	無し (ガラス)	Ru_1.5nm	Ru_2.5nm	Ru_10nm
段差	355.5 nm	350.5 nm	351.7 nm	352.3 nm



測定条件
 ・Scan area: 1 x 1 um
 ・X/Y pixel: 512 / 32
 ・Scan speed: 1.1 Hz
 ・値は4回測定の平均値

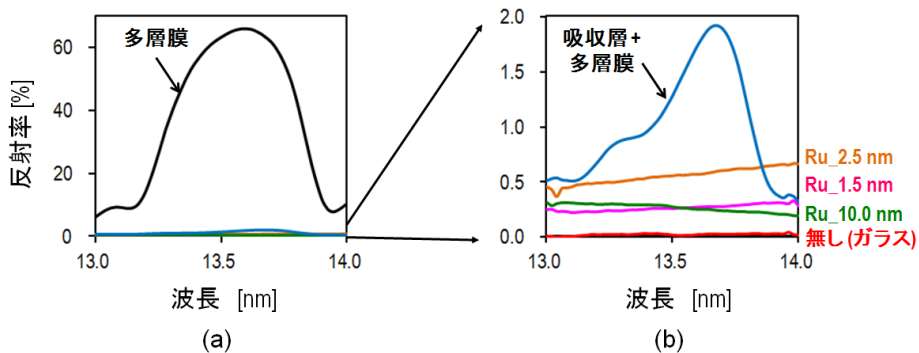
図Ⅲ.2.1.2-1-55 遮光枠部の段差測定結果

Ru 膜厚設計値と測定した抵抗値の関係を図Ⅲ.2.1.2-1-56 に示す。測定の結果、Ru 膜厚に応じた抵抗値が確認されており、多層膜除去工程後にも Ru が除去されていないことが確認できた。ここで、導電膜を成膜していないマスクでは導通が確認されず(グラフ上プロット無し)、遮光枠部の導電性が異なる 4 種の EUV マスクを予定通り入手できていることが確認できた。



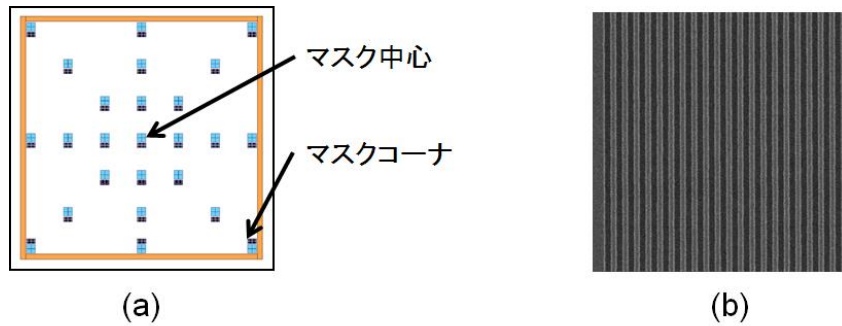
図Ⅲ.2.1.2-1-56 遮光枠部の 2 点間抵抗値と測定の様子

遮光枠部には露光時に EUV 光が低反射であることが求められる。そこで、作製した EUV マスクの遮光枠部の EUV 反射強度の測定を実施した。図Ⅲ.2.1.2-1-57 (a)は多層膜部、多層膜上の吸収層部、および遮光枠部の EUV 反射率測定結果である。多層膜部の反射率は約 65 %と仕様通りであった。遮光枠部の反射率詳細を確認するため、図Ⅲ.2.1.2-1-57(b)に反射率範囲 0 から 2 %の拡大図を示した。遮光枠形成しない場合の反射率は、吸収層+多層膜で表される反射強度で、約 1.9 %である。一方、準備した遮光枠は多層膜を全量除去しているため反射率は低く、Ru を成膜していないマスクは約 0 %、Ru を成膜したものは 0.4 から 0.7 %と、遮光枠形成しない EUV マスクと比較して低い反射率が得られることを確認した。



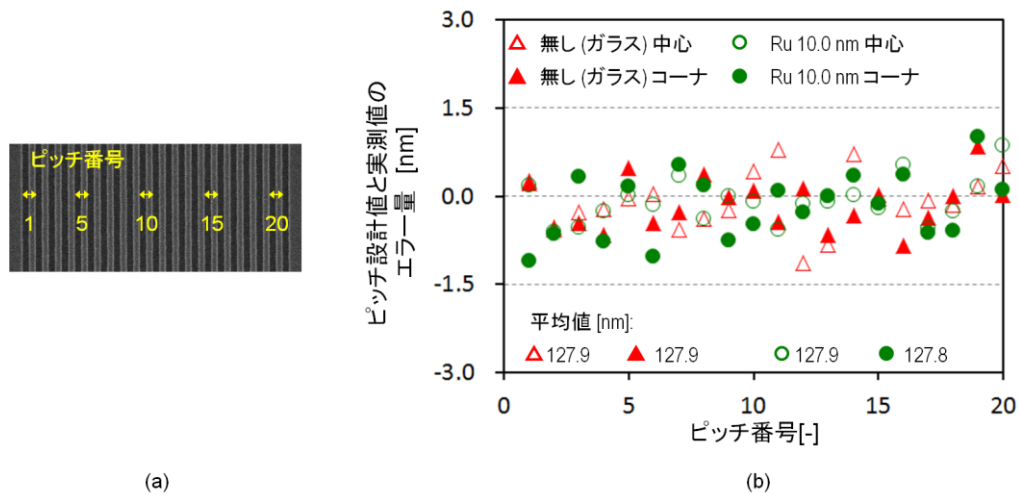
図Ⅲ.2.1.2-1-57 EUV マスクの EUV 反射強度 (a) 多層膜部、多層膜上の吸収層部および遮光枠部の反射強度 (b) 遮光枠部の反射強度と遮光枠形成しないマスク(吸収層+ 多層膜)の反射強度

遮光枠部の導電性が電子線検査画像に与える影響を評価した。評価はマスク寸法測定 SEM (E3620、加速電圧と電流値はそれぞれ 1.5 keV、10 pA と設定)を用い、同一条件で撮像した画像の画像内倍率変動(スクリンリニアリティ)測定および比較することで行った。観察対象パターンは図Ⅲ.2.1.2-1-58(a)に示したマスク中心部とコーナ部の 1 ピッチ 128 nm の L/S パターン(図Ⅲ.2.1.2-1-58(b))である。



図Ⅲ.2.1.2-1-58 寸法測定 SEM による観察箇所とパターン (a) 観察箇所 (b) 観察した L/S 像

Ⅲ.2.1.2-1-59(a)に示す通り、撮像した L/S パターンの 20 点のピッチ寸法を測定した。Ⅲ.2.1.2-1-59(b)には、図Ⅲ.2.1.2-1-56 に示した導電性の異なる 2 枚のマスク(導電膜無しと Ru 10nm 膜厚)の測定結果を示す。測定の結果、遮光枠部の導電性有無および、マスク中心およびマスクコーナに依存せず、スクリーンリアリティが保たれている、つまり、SEM 像は帯電による影響が無いことが確認された。



図Ⅲ.2.1.2-1-59 遮光枠部の導電性が電子線検査画像に与える影響 (a) 測定したピッチの番号 (b) 2 枚のマスクのピッチ測定結果

(iii) まとめ

遮光枠部の導電性が電子線検査画像に与える影響を評価した。評価基板としてガラス基板上に導電膜を製膜した EUV ブランクと、導電膜を成膜しない EUV ブランクを準備した。用意した EUV ブランクの吸収層に電子線検査画像評価用パターンと、パターン周辺に多層膜除去型遮光枠をそれぞれ形成した。遮光枠部の段差測定および導通試験により、遮光枠形成工程による導電膜のダメージが無いことが確認された。遮光枠部の EUV 反射率は 0 から 0.7 % であり、遮光枠を形成しない場合の 1.9 % と比較して反射率抑制に効果的であることが確認された。遮光枠形成による EUV マスクのパターン部と外周部の導通性有無が、電子線検査画像に与える影響を寸法測定 SEM(E3620)にて実施したところ、SEM 像には帯電による影響が観られないことが確認された。

[6] プリントビリティ検討

(a) インパクトの欠陥形状依存性

(i) 検討の目的

hp 11 nm 以細の世代に対応する PI 装置を開発するにあたり、検出すべき欠陥と検出すべきでな

い欠陥(疑似欠陥)を正確に弁別する性能が必要となる。そのためには、パターン欠陥のウェハ転写性を高精度に見積もっておく必要がある。そこで、先行研究の知見及び EUV 露光シミュレーション技術を用いて、大きさや種類(物理的構造)の異なるパターン欠陥のウェハ転写性を求める。

(ii)研究内容及び成果

ITRS2013(ITRS: International Technology Roadmap for Semiconductors)を参照した。ウェハ上 hp 11 nm のパターンとして、マスク上の最小線幅が 44 nm となる世代に注目した。以上の条件より、15 nm 以下のサイズ欠陥を検出する必要があることが確認できた。更に、欠陥のウェハ上への転写性を転写性シミュレータにより評価した。シミュレータは Luminescent 社製 LAIPH™ Defect Printability Simulator(DFS)を採用した。転写装置条件は現在の最先端技術において想定されている値を用いた(NA: 0.45, Sigma:0.2(Inner)-0.4/0.8:(Outer))。欠陥形状はパターン欠陥の代表的な形状(凹凸)を用いた。結果を図 III.2.1.2-1-60 に示す。欠陥の形状は正方形とし、一辺の長さを欠陥の寸法とした。欠陥がウェハ転写に及ぼす影響として、欠陥により L/S パターンの寸法が設計からどれだけずれるかを以って影響の度合いとした。図中に寸法の 10% ずれラインを赤の点線で示した。欠陥サイズの増大に伴い、転写寸法が設計値(11 nm)からずれ、10 %を超えた値が生じる欠陥寸法が検出必要欠陥サイズとなる。

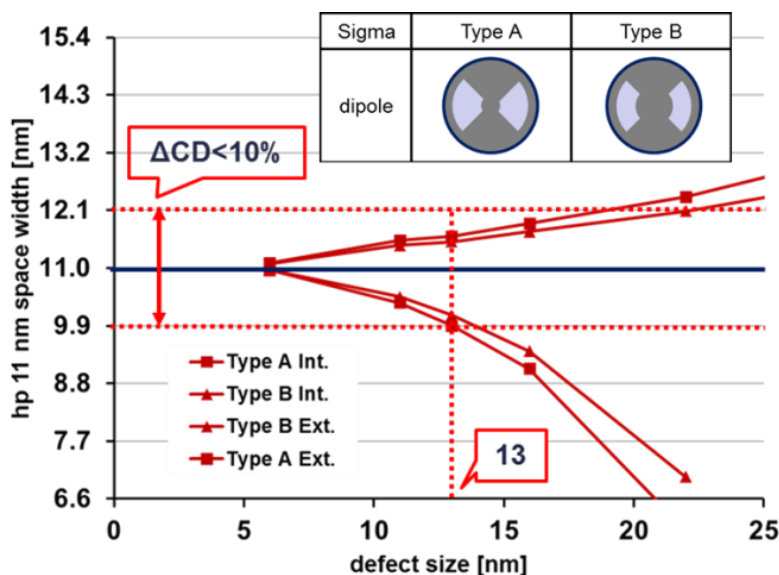
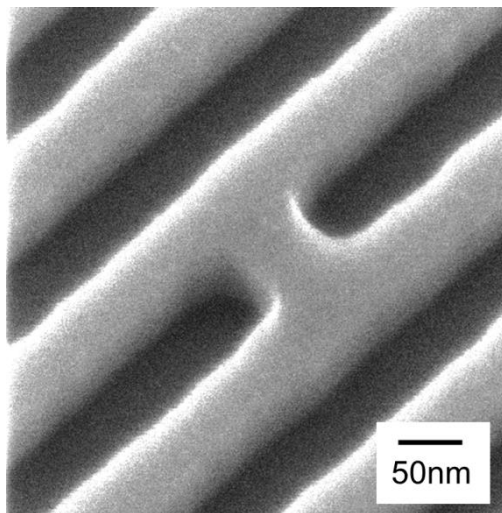


図 III.2.1.2-1-60 転写性シミュレータを用いた欠陥のウェハ転写性評価

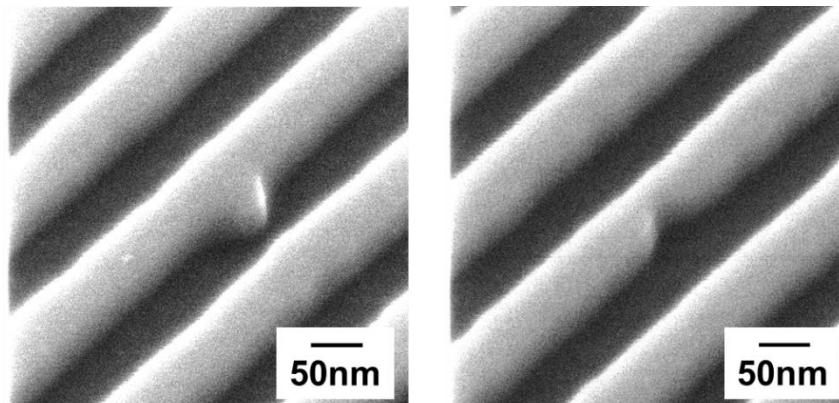
13 nm 以上の寸法で凸欠陥が凹欠陥に先んじて寸法ずれが 10 %を超えており、この結果から 13 nm 以上の寸法欠陥が検出できれば、hp 11 nm 対応微細加工が可能となることがわかる。従って、欠陥検出ターゲットとして 13 nm[□]を選定した。

更に、EUV リソグラフィによる微細パターン転写に対し、マスクパターンの立体形状が及ぼす影響の議論が本格化している。パターンの形状を精密に計測する手段として走査型電子線顕微鏡(Scanning Electron Microscope, SEM)が用いられるが、近年試料の奥行き方向の情報を得るために、ヘリウムイオン顕微鏡(Helium Ion Microscope, HIM)の適用が有効である。EUV マスクの構造においては、マスクパターンを形成する吸収体の高さが 60~70 nm あるため、側壁形状がパターン欠陥のウェハ転写性に影響を及ぼすことが考えられる。例として、図 III.2.1.2-1-61 に示すような、設計欠陥(凸欠陥)が形成された場合に推定される 3 次元的な形状(吸収体高さ方向)がパターン転写に及ぼす影響を検討した。共同研究先である産総研所有の HIM を用いて設計欠陥つきマスクの観察を行った(図 III.2.1.2-1-62)。hp64nmL/S パターン中のブリッジ欠陥を俯角 30 度方向から観察することで、約 30 万倍という高倍率で吸収体深さ方向の観察が可能となっている。



図Ⅲ.2.1.2-1-61 hp64nmブリッジ欠陥の観察

hp 64 nm 中の凸欠陥及び凹欠陥を HIM により観察した結果を 図Ⅲ.2.1.2-1-62 に示す。欠陥のサイズは SEM 観察画像より欠陥の占める面積を求め、その平方根をとした。得られた欠陥サイズはそれぞれ凸欠陥:34 nm、凹欠陥:33 nm である。



凸欠陥(34 nm)

凹欠陥(33 nm)

図Ⅲ.2.1.2-1-62 HIMによる凹凸欠陥の観察

得られた画像から推定されるマスクパターンの立体形状の違いを 図Ⅲ.2.1.2-1-63 に示す。SEM 観察においては高さ方向の情報が得られず同一寸法とみなす必要がある一方、HIM 観察においては高さ方向の情報も得られるため、凹凸それぞれの欠陥形状を勾配が逆方向の半円錐形状に当てはめ、欠陥転写性シミュレータを用いて転写寸法を算出した。シミュレータは Panoramic technology 社の EM-Suite™を用いた。

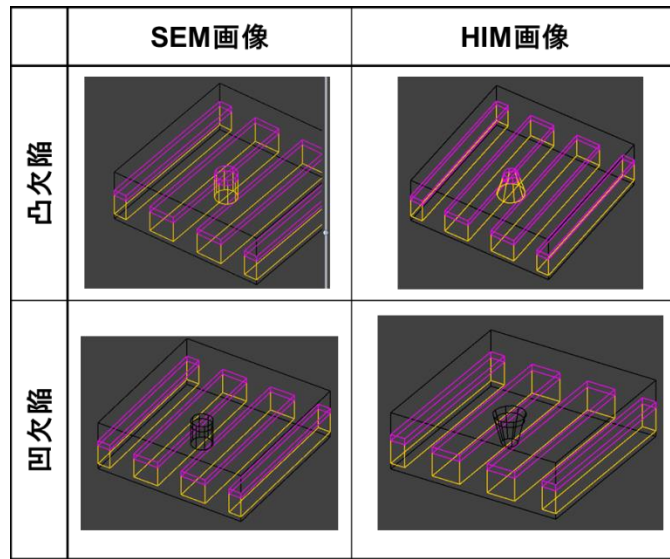


図 III.2.1.2-1-63 SEM 画像と HIM 画像より推定される凹凸欠陥の形状

転写装置条件は現在入手可能な最新鋭機における値を用いた(NA: 0.33, Sigma: 0.55 (Inner)-0.9:(Outer))。結果を図 III.2.1.2-1-64 に示す。

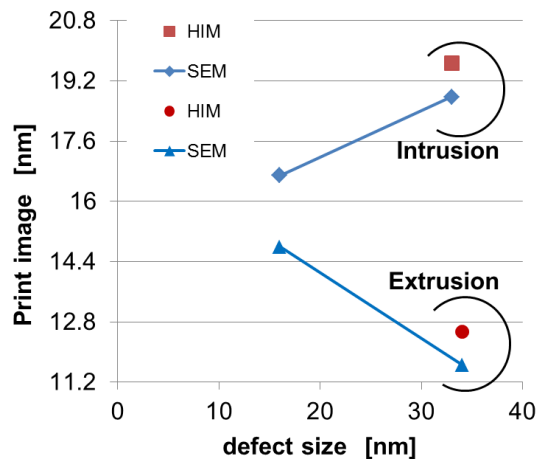


図 III.2.1.2-1-64 SEM 画像と HIM 画像による推定欠陥形状から求めた転写寸法

SEM 画像と HIM 画像から推定された転写寸法の違いが 1 nm 生じており、今後のパターン微細化に向けて配慮が必要と考えられる。

(iii)まとめ

hp 11 nm 以細の世代に対応する PI 装置を開発するにあたり、検出すべき欠陥と検出すべきでない欠陥(疑似欠陥)を正確に弁別する性能を特定するため、先行研究の知見である ITRS2013 を参照して検出が必要な最小欠陥サイズが 15 nm であることを確認した。更に、代表的な欠陥形状である凹凸欠陥に対して欠陥転写性シミュレータを適用し、検出が必要となる最小欠陥サイズが 13 nm であることを見出した。また、EUV マスクパターンの立体構造がパターン転写性に及ぼす影響を、ヘリウムイオン顕微鏡(HIM)の観察結果を用いて評価した。マスク上 hp 64 nm (ウェハ上 hp 16 nm)パターンの 30 nm サイズ欠陥に対して、その立体形状を考慮した場合ウェハ転写性に及ぼす影響は約 1 nm であり、更なるパターン微細化の深耕に向けて考慮していく必要があることがわかった。

(b) EUV 顕微鏡を用いた欠陥観察による転写性評価

(i) 検討の目的

電子線欠陥検査技術では、電子線を用いて Extreme Ultraviolet (EUV)マスクパターン像を取得し、マスクパターン欠陥の有無を判定する。一方、EUV リソグラフィではマスク上のパターンは EUV 光を用いてウェハ上に転写される。そのため、欠陥転写性を予測するためには、EUV 光を用いたマスクパターンおよび欠陥の観察評価が重要である。EUV 光を用いたマスクパターン観察装置としては、EUV 明視野顕微鏡として兵庫県立大学にて、シュバルツシルド光学系と X 線ズーム管を組み合わせた装置を開発し、EUV マスクパターンの観察実績がある。しかし装置構成上の制約から、マスク上で 100 nm より微細なパターンを高コントラストで観察することは困難であった。近年、計測用多層膜光学技術の研究実績を有する東北大学から、多層膜鏡のみを用いた高倍率結像光学系の提案を受け、兵庫県立大学と連携して高解像 EUV 明視野顕微鏡の開発を行った。本 EUV 明視野顕微鏡を活用し、パターン欠陥がウェハ転写像に与える影響を、顕微鏡観察像から予測することとした。また、現時点で提供されている EUV 露光装置は開口数 (NA) の制限から hp 11 nm 世代の露光転写像を確認することはできないので、EUV 明視野顕微鏡を用いた hp 11 nm 世代パターン欠陥の転写性予測の評価をシミュレーションにて実施した。

(ii) 研究内容および結果

実験に使用した EUV 明視野顕微鏡の光学系構成と内部写真を図 III.2.1.2-1-65 に示す。対物光学系は、東北大学が独自に考案した 2 段結像光学系で、3 枚の多層膜球面ミラー M4、M5 および M6 で構成される。同図に示すように、第 1 段には、倍率 30 倍のシュバルツシルド対物鏡 (M4 および M5) を採用し、中間像の後方に倍率 49 倍の第 2 段拡大系である凹面鏡 (M6) を配置する。光学系全体の拡大倍率は、第 1 段および第 2 段光学系の倍率の積となり、全長 600 mm 程度の光学系で 1460 倍という高い拡大倍率を得る。顕微鏡像は、ピクセルサイズが 13 μm の Charge Coupled Device (CCD)カメラで観測する。CCD カメラの 1 ピクセルのサイズは、観察対象であるマスク面上で 9 nm 角に相当する。照明光学系は図中 2 枚のミラー M1 および M2 から構成され、M1 は球面ミラー、M2 はシリンドリカルミラーである。これらのミラーは対物鏡の手前で照明光源の像を形成し、更に対物鏡の射出瞳面上に光源像を形成することによりケーラー照明を実現している。光源は放射光施設 NewSUBARU のビームライン BL-3 から供給されており、コヒーレント照明 ($\sigma < 0.01$)となる。ここで、M1、M2 の姿勢を組み合わせることで制御することにより、マスク面上の照明位置を保ったまま射出瞳上に形成される光源像の位置を任意の位置に調整することが可能である。したがって、射出瞳上の異なる位置での照明条件でマスクの拡大像を収集し、それらの強度和をとれば、見かけ上部分コヒーレントの観察像を得ることができる。ミラー基板の研磨は、東北大学多元物質科学研究所に付属する光機器工場との共同で実施した。また、ミラー基板の形状精度測定および多層膜成膜は東北大学にて実施した。

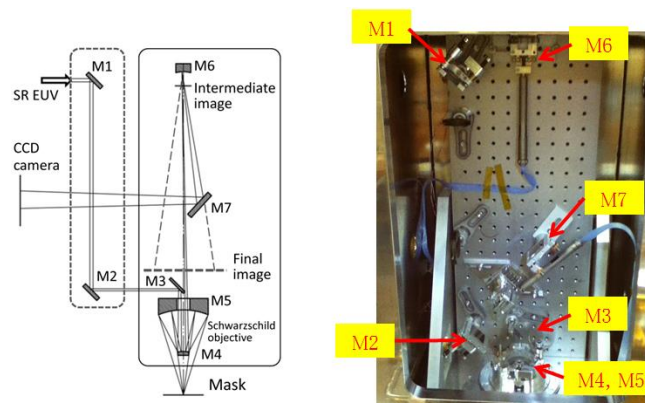


図 III.2.1.2-1-65 東北大学で設計・製作された EUV 明視野顕微鏡光学系の構成図と内部写真

EUV 明視野顕微鏡の照明条件とマスクパターン情報を反映した EUV 光(回折成分)に関する説明をする。L/S 観察像の特性は主として 0 次、-1 次、及び+1 次の回折成分で表される 1 次元パターンの像で議論され、0 次回折成分の瞳通過位置が変化すると像質も変化する。図 III.2.1.2-1-66 は、EUV 明視野顕微鏡光学系の瞳とそこを通過する回折成分の典型的な 2 例を示す。瞳の形状は集光 NA=0.25、中心遮蔽 NA=0.14 で定義される輪帯であるが、その 1/4 は照明用ミラー M3 の存在による遮光領域である。同図(a)は照明光が瞳遮蔽領域の中央部を通過する場合であり、微細な L/S の回折成分のうち+1 次成分は瞳を通過するが-1 次成分は遮断されて像形成に寄与しない。マスクを照明する EUV 光の主光線入射角度は約 13 度となり、その射面は、マスク上のラインパターンの方向と 45 度の交差角度を有する。2 光束干渉による像形成であり、x 方向及び y 方向いずれの L/S も同一の高分解能な結像特性を有する。一方、図(b) は照明光が瞳遮蔽領域の端部を通過する場合であり、照明光の入射角度を 10 度程度とすることができる。y 方向に延びる L/S については、ある程度の微細パターンまで 0 次、-1 次、及び+1 次の 3 回折成分が観察像形成に寄与する。しかし、x 方向に延びる L/S に対する解像度は低い。マスク上 hp 44 nm L/S パターンの観察には、図中(b)の照明条件で +/-1 次の回折成分を捕集することが可能なので、ここでは照明光は瞳遮蔽領域の端部を通る照明法を採用した。

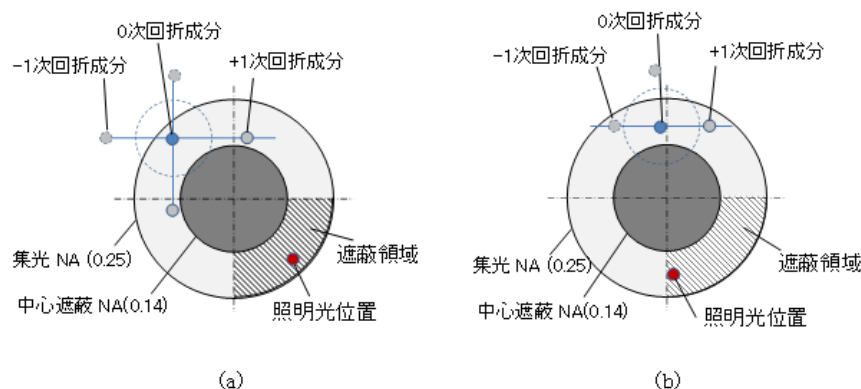


図 III.2.1.2-1-66 EUV 明視野顕微鏡光学系の瞳と瞳を通過する回折成分の典型的な 2 例 (a) 照明光が遮蔽領域の中央を通過する場合、(b) 照明光が遮蔽領域の端部を通過する場合。

図 III.2.1.2-1-67 にマスク上 hp 88 nm Lines and Spaces (L/S) 観察像を示す。顕微鏡像には明暗のムラが観られマスクパターン自体にエッジラフネスがあるように観察されるのだが、観察像のムラは放射光の高い空間コヒーレンスに由来するものである。これは顕微鏡の視野内で観察対象パターンを移動しながら複数枚画像を取得し、重ね合わせ処理を行うことで除去可能である。本実験では観察パターン 1 種類につき 16 枚の撮影を実施し、画像の重ね合わせ処理を実施した。16 枚の画像撮影は、観察パターンを顕微鏡の視野内でステージ移動および撮像を繰り返した。撮影時の露光時間は 30 秒と設定した。

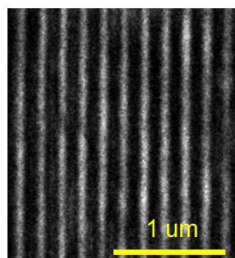
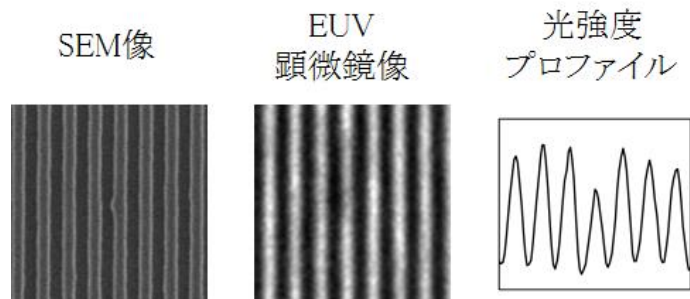


図 III.2.1.2-1-67 EUV マスクの hp88nm L/S 観察像(露光時間 30 秒、重ね合わせ処理無し)

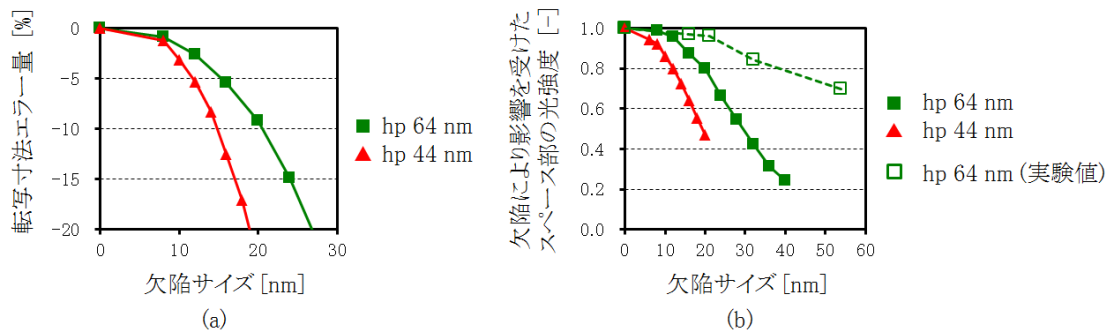
パターン欠陥観察評価として、hp 64 nm L/S に付与したエッジ凸欠陥を含むマスクを準備し EUV 明視野顕微鏡観察を実施した。図 III.2.1.2-1-68 にマスクパターンおよび欠陥の SEM 像、顕微鏡

像および顕微鏡像から算出した欠陥部を含む光強度プロファイルの一例を示す。EUV 明視野顕微鏡では吸収層からなるライン部が黒く、多層膜からなるスペース部が白く観察され、hp 64 nm L/S が高コントラストに観察することができている。L/S に凸欠陥がある場合、欠陥位置に対応したスペース部の光強度が減少して観察された。



図III.2.1.2-1-68 パターン欠陥を含む L/S の SEM 像、EUV 明視野顕微鏡像および欠陥部を含む光強度プロファイル。

ここで、エッジ凸欠陥のサイズとウェハ転写寸法に与える影響をシミュレーションにて計算し図 III.2.1.2-1-69 (a) に示した。hp 64 nm L/S (ウェハ上 hp 16 nm L/S) の露光条件は NA= 0.33、ダイポール照明、hp 44 nm L/S (ウェハ上 hp 11 nm L/S) を解像する露光条件として、NA= 0.45、ダイポール照明を仮定し算出した。また、上記パターンおよび凸欠陥を EUV 明視野顕微鏡で観察した際の、欠陥の影響度をシミュレーションした結果を図 III.2.1.2-1-69 (b) に示した。このとき、吸収層ライン部およびスペース部の光強度をそれぞれ 0 および 1.0 とし、欠陥の影響を受けたスペース部の光強度低下量をプロットしている。さらに顕微鏡観察実験で得られた観察像から、欠陥の影響により光強度が低下したスペース部の光強度を併せてプロットした。



図III.2.1.2-1-69 パターン欠陥(エッジ凸欠陥)が (a) ウェハ転写寸法に与える影響、(b) EUV 明視野顕微鏡像に与える影響。

ウェハ転写寸法に 10%以上のエラーを与える欠陥を致命欠陥と定義すれば、hp 64 および 44 nm L/S 中のエッジ凸致命欠陥サイズはそれぞれ 21 nm および 15 nm と算出された。これらの欠陥を EUV 明視野顕微鏡で観察すると、それぞれ約 20%および 30%の観察像光強度変化を与えると計算され、マスク上 hp 64 および 44 nm L/S の観察および欠陥の影響度評価をウェハ転写に先駆けて判定することが可能であると示された。一方、実験では光学系の収差の影響をうけていることと、欠陥形状がシミュレーションでは矩形であるのに対し、評価に使用したものはラインに沿ったなだらかな形状であったため、欠陥の影響度はシミュレーションで予測値よりも小さくなった。

(iii) まとめ

EUV 明視野顕微鏡を用いたパターン欠陥の観察実験を行った。シミュレーションでは、hp 64 およ

び 44 nm L/S (ウェハ上 hp 16 および 11 nm)中のエッジ凸致命欠陥サイズは、それぞれ 21 nm および 15 nm と算出された。これらの欠陥を EUV 明視野顕微鏡で観察すると、それぞれ約 20%および 30%の観察像光強度変化を与えると算出され、ウェハ転写前に致命欠陥の判定が可能であることが示された。観察実験では光学系の収差および欠陥形状の影響を受け、欠陥が顕微鏡像に与える影響度は計算値よりも小さくなった。

[7] 電子軌道シミュレーションを用いた電子線画像解析

(a) EUV マスク構成材料と構造の違いによる電子線画像形成及び検出感度への影響予測

(i) 検討の目的

EUV マスクは多層膜(ML)の存在により入射した電子線が複雑に散乱される。また、MLのキャップ層材料や、マスクの幾何学的構造の違いによっても電子線画像は大きく影響を受ける。そのため、入射電子エネルギーを初めとする検査条件を最適化するためには、シミュレーションによる電子軌道の可視化が重要である。そこで、aBeam 社の CHARIOT というモンテカルロシミュレータを用いて材料や構造の異なる EUV マスク内外の電子軌道を観察し、取得された画像解析及び検査感度予測を行った。

(ii) 研究内容及び成果

(ii)-1 EUV 反射多層膜(ML)の影響

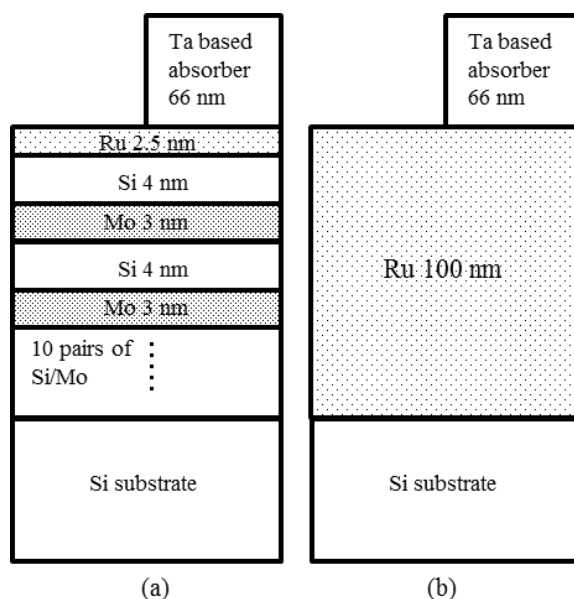
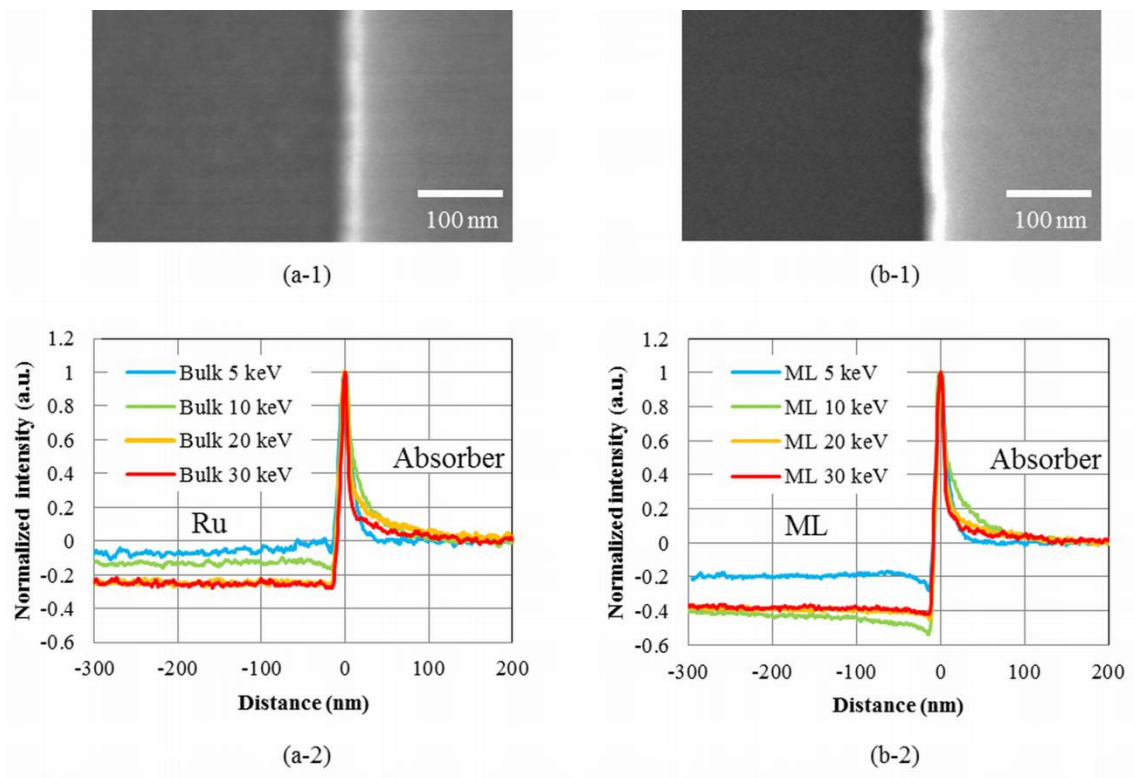


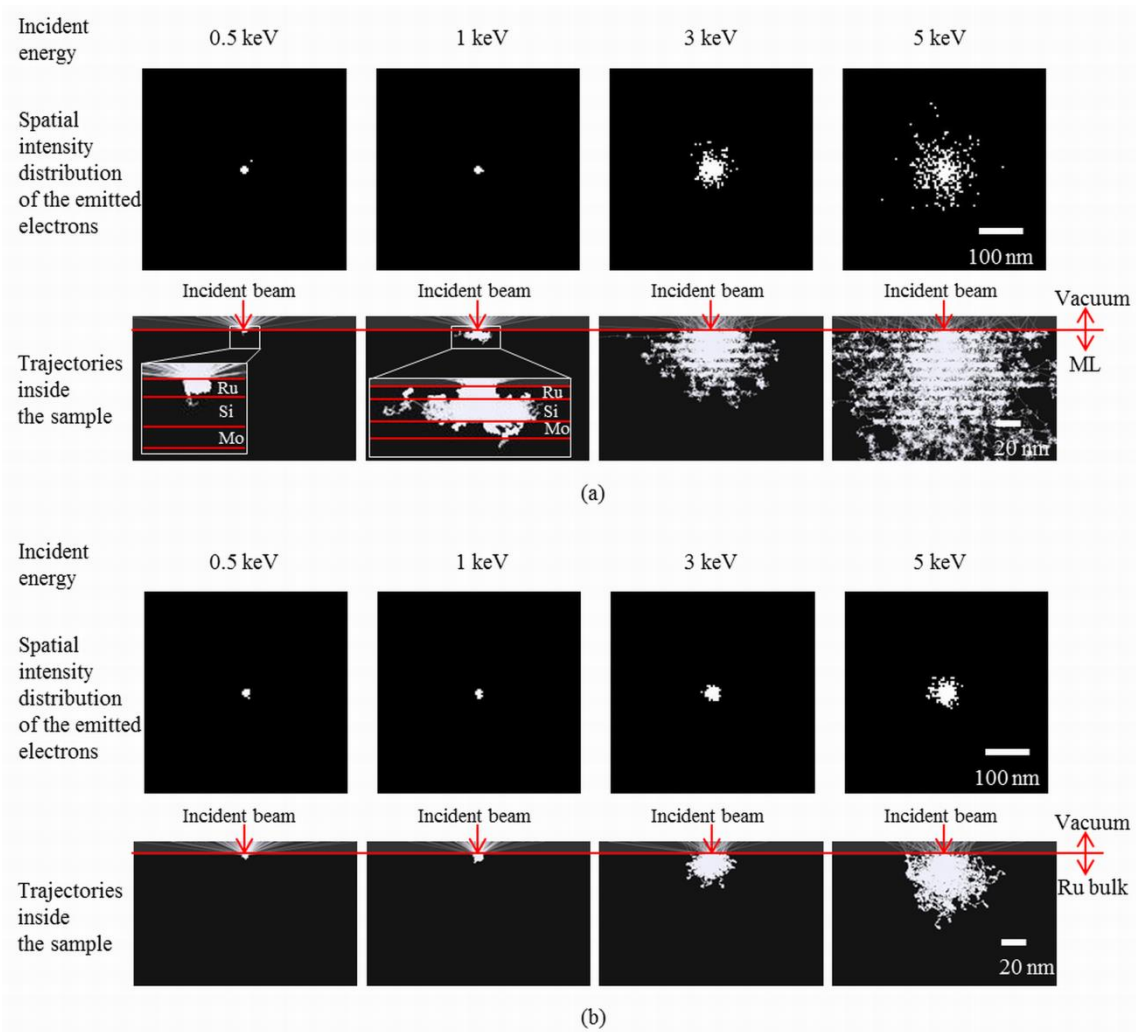
図 III.2.1.2-1-70 (a)ML サンプルと(b)Ru バルクサンプルの断面模式図

ML が電子線画像に与える影響を調べるために、図 III.2.1.2-1-70 に示すような二種類の試料をマグネトロンスパッタ法で作製した。一つ目は、EUV マスクと同様の構造である厚さ 3 nm の Mo と 4 nm の Si による ML を 2.5 nm の Ru でキャップした試料(以下 ML サンプル)である(図 III.2.1.2-1-70(a))。二つ目は、ML の代わりに 100nm の Ru バルクを堆積させた試料(以下バルクサンプル)である(図 III.2.1.2-1-70(b))。両試料の最上面には Ta によるパターンを形成した。これらの試料を SEM により観察し、画像の違いをシミュレーションにより解析した。



図Ⅲ.2.1.2-1-71 ナイフエッジパターンの SEM 像及び信号強度プロファイル (a) Ru バルクサンプル、(b) ML サンプル。入射電子エネルギーは 5keV、10keV、20keV、30keV と変化させた。

図Ⅲ.2.1.2-1-71 にエッジパターンの SEM 写真と信号強度プロファイルを示す。ML サンプルの場合、エッジパターンプロファイルに大きなアンダーシュートが観察されるのに対し、バルクサンプルの場合はアンダーシュートが小さい。この原因を調べるために、サンプル内の電子散乱を CHARIOT を用いてシミュレーション解析を行った。



図Ⅲ.2.1.2-1-72 シミュレーションによる(a)ML サンプルと(b)Ru バルクサンプルの二次電子発生分布と試料内部の電子軌道。

図Ⅲ.2.1.2-1-72 に試料内部の電子軌道と試料表面から発生した二次電子(SE)発生領域分布のシミュレーション結果を示す。ML サンプルの場合、入射電子のエネルギーが 0.5 keV の場合では、2.5 nm の Ru キャップ層内部で電子散乱が起こっている。1 keV になると Si 膜中に到達し 3 keV、5 keV とエネルギーが大きくなると Si 内で反射電子(BSE)が横方向に大きく広がることが観察された。一方、バルクサンプルでは ML サンプルの SE 発生領域がバルクサンプルに比べ 3 keV と 5 keV の場合に小さいことが分かった。これは、Si が Ru や Mo に比べ密度(原子番号)が小さく侵入深さが大きいため、横方向に広がった BSE が SE(II)を発生しながら真空中に放出されるためである。このような進入深さの違いは、二次電子放出効率(Total Secondary electron emission coefficient: Total SEEC)の違いにも反映されている。図Ⅲ.2.1.2-1-73 は EUV マスク材料の Total SEEC である。この Total SEEC は、50eV 以下の真の二次電子と 50eV 以上の反射電子を含む全ての発生電子の発生効率である。Mo と Si は大気に暴露されていないため自然酸化膜がない状態であり、Ru バルクと ML サンプル及び吸収層は最表面の自然酸化膜を除去しない状態で測定した。0 から 50eV までは Ru バルクと ML サンプルがほぼ同等の値であるが、50eV 以上では ML の値が Ru バルクの値よりも小さいことが分かる。この現象は、図Ⅲ.2.1.2-1-72 で示した進入深さの傾向とよく一致している。

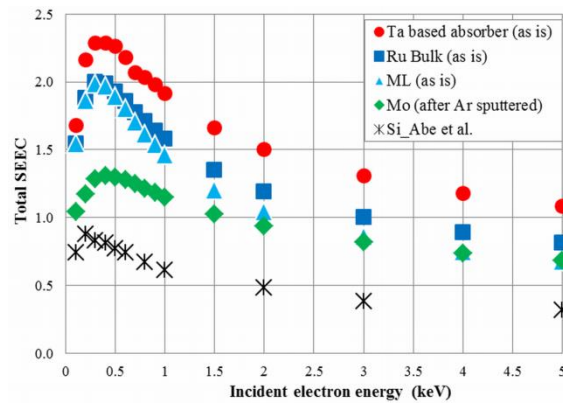


図 III.2.1.2-1-73 EUV マスク材料の Total SEEC

図 III.2.1.2-1-72 で示したように試料内で電子が横方向に広がることは電子線画像の解像度低下につながる事が知られている。一方、パターンエッジ近傍の ML に電子が入射した場合は、図 III.2.1.2-1-74 に示すように、横方向に広がった電子が吸収層の存在によって真空中に放出されない。そのため、SE の信号強度が小さくなる。横方向の広がりが大きいほどエッジから離れた場所に入射した場合でも信号強度が低下する。これが、ML サンプルの場合にエッジ近傍のアンダーシュート幅が広がる原因である。

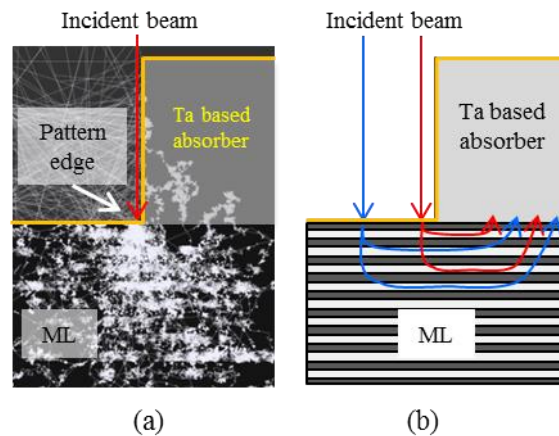


図 III.2.1.2-1-74 エッジ近傍に一次電子が入射した際の(a)電子軌道と(b)模式図。

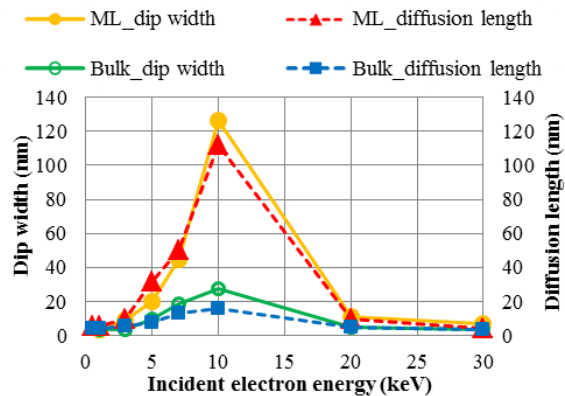


図 III.2.1.2-1-75 アンダーシュート幅と拡散長の入射電子エネルギー依存性

アンダーシュート幅とBSEの広がりを見積もるためにフィッティングカーブを用いて解析した。図III.2.1.2-1-73で得られたエッジ近傍の信号強度プロファイルは以下に示すような誤差関数を用いてフィッティングを行った。

$$f(x, y) = (1 - e^{a_1 x})(Aerfc(b_1 x - c_1)) \quad (x < 0),$$

$$f(x, y) = (1 - e^{-a_2 x})(Berfc(b_2 x + c_2)) \quad (x \geq 0),$$

A, B, a_1 , a_2 , b_1 , b_2 , c_1 , c_2 はフィッティングパラメータである。 $(x < 0)$ はエッジ近傍のMLもしくはRuバルクのプロファイル、 $(x \geq 0)$ はエッジ近傍の吸収層のプロファイルである。係数 b_1 はアンダーシュートの傾きであり $1/b_1$ はアンダーシュートの幅に対応する。図III.2.1.2-1-72で得られたSE発生領域は以下に示すようなダブルガウシアン分布を用いてフィッティングを行った。

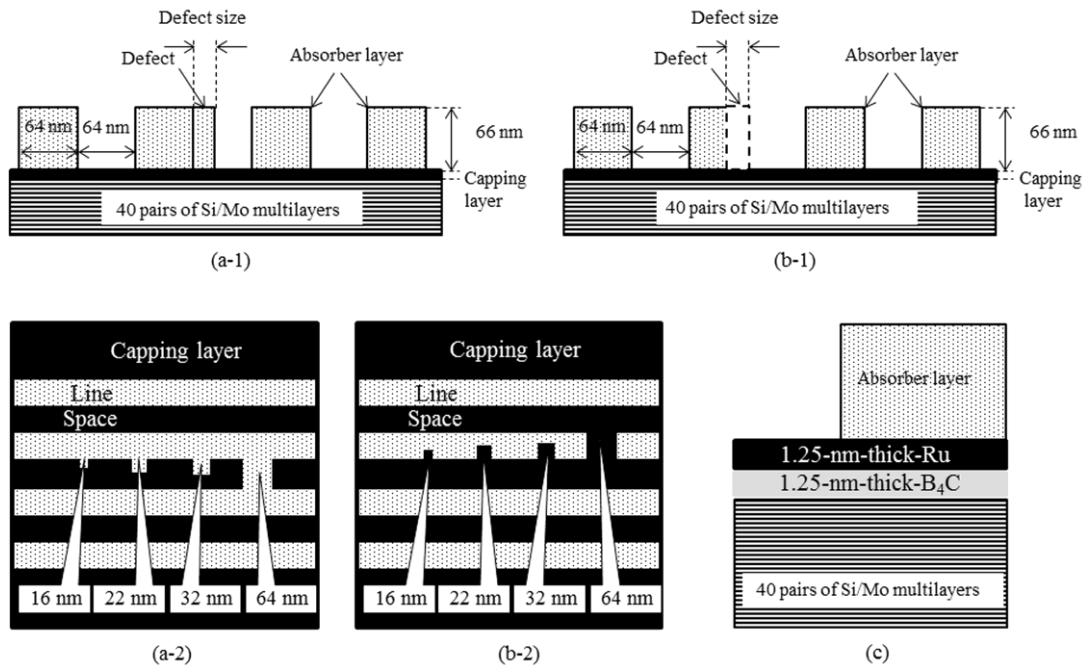
$$g(x, y) = D e^{-\alpha(x^2+y^2)} + E e^{-\beta(x^2+y^2)}$$

D, E, α , β はフィッティングパラメータであり、第一項と第二項はそれぞれ SE (I)と SE (II)の発生領域を示している。係数 β は拡散電子の減衰係数であり、 $1/\sqrt{2\beta}$ は拡散長である。図

III.2.1.2-1-75に拡散長及びアンダーシュート幅の入射電子エネルギー幅依存性を示す。いずれのパラメータも3 keV~20 keVの範囲においてMLサンプルの方が大きな値であり、ピークは10 keVであった。これらの結果により、3 keV~20 keVの範囲ではSi層による横方向への広がりが顕著であり微細パターンにおいては解像度低下が懸念されることが分かった。

(ii)-2 ML キャップ層の影響

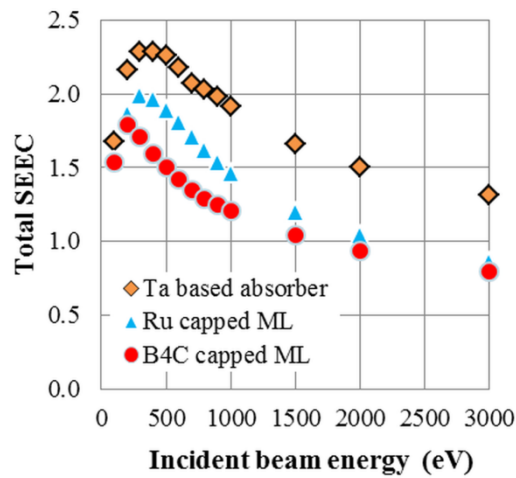
近年、洗浄耐性向上を目的としてRuキャップの代わりにB₄Cを用いる構造がSEMATECH等から提案されている。この場合の検査条件及び検査感度への影響を調べた。



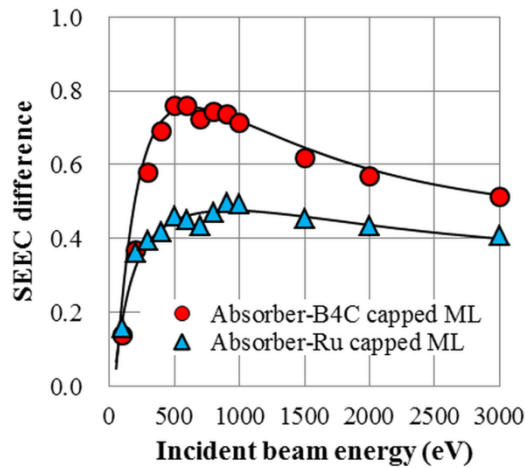
図III.2.1.2-1-76 キャップ材料による影響を調べるために用いたシミュレーション用サンプル。(a-1)-(a-2)凸欠陥サンプルの断面図と上面図、(b-1)-(b-2)凹欠陥サンプルの断面図と上面図、(c)B₄C buffered Ru capped ML サンプルの断面図。パターンはhp64nmのラインスペース(L/S)パターンである。

図III.2.1.2-1-76はシミュレーションに用いたサンプルである。キャップ層として2.5nm厚のRu及び

B₄C、更には厚 1.25nm の B₄C を Si と Ru との間のバッファー層とした B₄C buffered Ru capped ML の三種類を用いた。



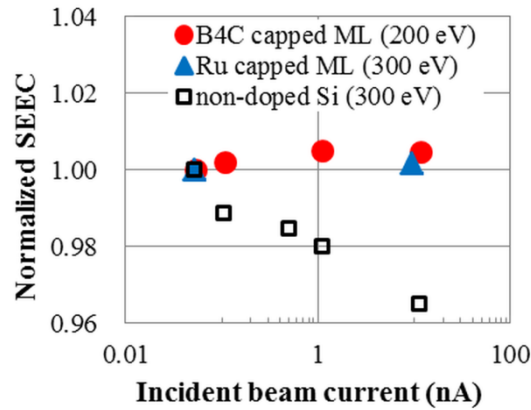
(a)



(b)

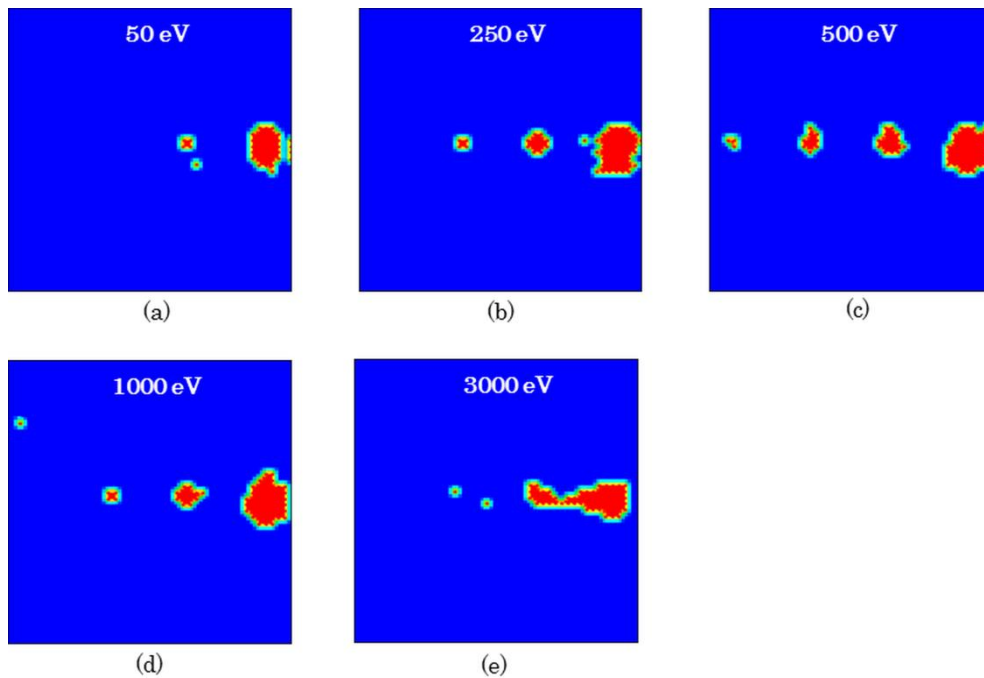
図Ⅲ.2.1.2-1-77 実験的に測定した、吸収層、Ru キャップ ML 及び B₄C キャップ ML の(a)二次電子放出効率カーブと(b)吸収層とそれぞれの ML との差

Ru キャップ ML と B₄C キャップ ML の Total SEEC カーブの違いを調べるために、B₄C キャップ ML を作製し、Total SEEC を測定した。図Ⅲ.2.1.2-1-77 は Ru キャップ ML と B₄C キャップ ML の Total SEEC カーブの比較である。B₄C は Ru に比べ密度が小さいため Total SEEC も小さくなる。そのため、吸収層との Total SEEC 差も大きくなることが分かった。また、Total SEEC 差のカーブのピークの位置が Ru では 1000eV 付近なのに対し、B₄C では 500eV 付近であることも分かった。



図III.2.1.2-1-78 Ru キャップ ML、B₄C キャップ ML 及びノンドープ Si の Total SEEC の一次電子ビーム電流依存性

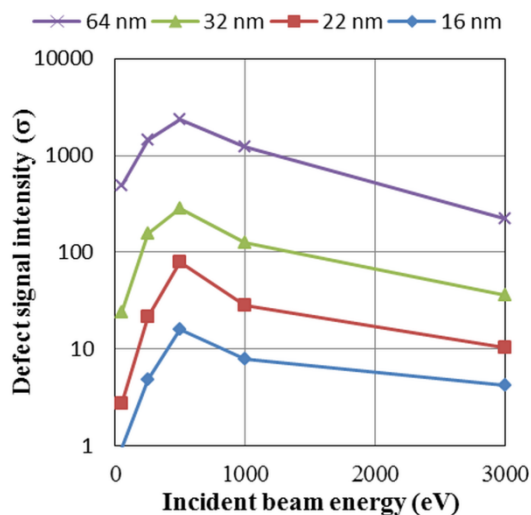
B₄C キャップ ML の帯電の影響を調べるために、図III.2.1.2-1-78 に示すように Total SEEC の一次電子ビーム電流依存性を調べた。Ru キャップ ML と B₄C キャップ ML は電流が増加しても Total SEEC に大きな変化は見られなかった。一方、抵抗が大きいノンドープ Si の場合、Total SEEC は電流増加と共に減少した。これは、以下のように説明できる。電流が増加するほど表面が正に帯電するため発生した二次電子がサンプル表面に引き戻される。そのため、検知器に到達する二次電子数が減少し、見かけの Total SEEC が減少する。Ru キャップ ML と B₄C キャップ ML は抵抗が十分に小さいため、このような帯電による影響が無視できるほど小さいことがわかった。



図III.2.1.2-1-79 B₄C キャップ ML 上に形成した凸欠陥付き L/S パターンの欠陥検査シミュレーション結果 (差画像)。入射電子エネルギーは(a)50eV、(b)250eV、(c)500eV、(d)1000eV、(e)3000eV。閾値 10σで二値化している。

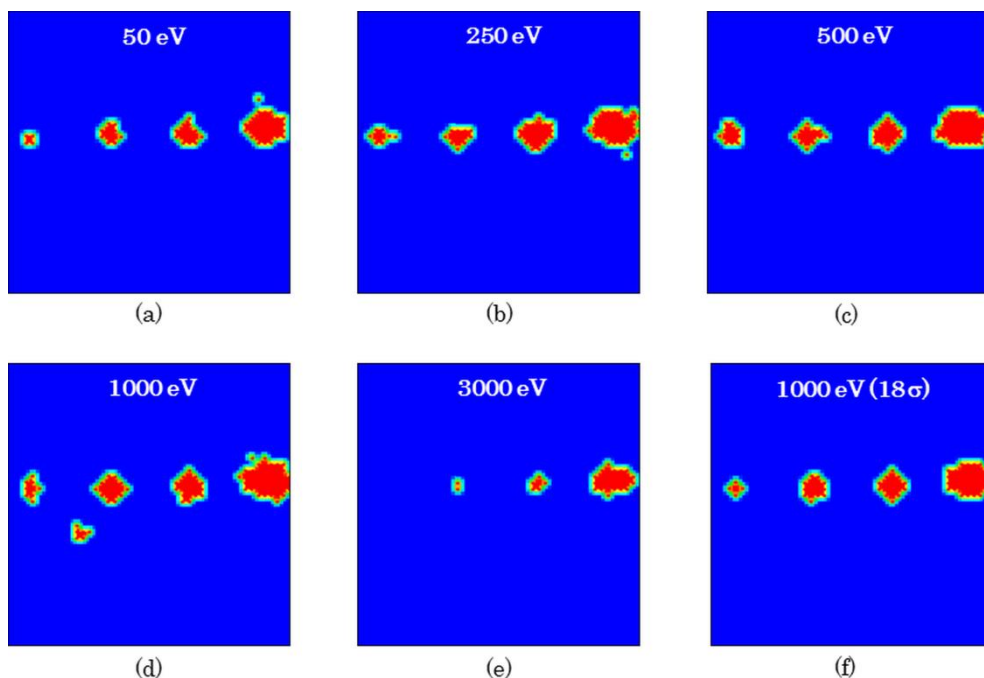
B₄C キャップ ML を用いた場合の検査条件及び検査感度を調べるために、シミュレーションで得られた凸欠陥付き L/S パターンの PEM 画像と参照画像の差画像を解析した。その結果を図

Ⅲ.2.1.2-1-79 に示す。入射電子エネルギーが 500eV の場合に 16nm 欠陥が 10σ 以上で検出出来ており、最も感度が良いことが分かる。入射電子エネルギーが 500eV である理由は、[Ⅲ.2.1.2-1-77\(b\)](#)に示すように SEEC 差のカーブのピークが 500eV であるからである。



図Ⅲ.2.1.2-1-80 凸欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性

[Ⅲ.2.1.2-1-80](#) にそれぞれの大きさの欠陥の検査感度の入射電子エネルギー依存性を示す。全ての欠陥において 500eV が最も感度が良いことが分かる。



図Ⅲ.2.1.2-1-80 B_4C キャップ ML 上に形成した凹欠陥付き L/S パターンの欠陥検査シミュレーション結果 (差画像)。入射電子エネルギーは(a)50eV、(b)250eV、(c)500eV、(d)1000eV、(e)3000eV。(a)~(e)は閾値 10σ で二値化。(f)は閾値 18σ で二値化した場合の 1000eV の差画像。

一方、[Ⅲ.2.1.2-1-80](#) に示すように凹欠陥の場合は 50eV~1000eV の条件で 16nm 欠陥が検出

された。また、[図 III.2.1.2-1-82](#) に示すように、検査感度は凸欠陥に比べ全体的に高く、最適検査条件も欠陥サイズによって異なっていた。64nm の場合は凸欠陥同様 500eV が最も高感度であるが、サイズが小さくなるに従い高感度条件が低エネルギー側にシフトしていることが分かる。この理由を [図 III.2.1.2-1-83](#) を用いて説明する。凹欠陥のサイズが小さくなると、欠陥の底(キャップ層)から発生した二次電子が欠陥側面にブロックされ検知器まで到達しない。そのため、欠陥からの信号強度が低下する。一方、吸収層から発生した二次電子は欠陥サイズに係わらず同じであるため、小さい欠陥の差信号が強調される。キャップ層からの信号が小さくなると、SEEC 差は吸収層の SEEC カーブ(ピークが 300eV)に近づくために、感度曲線も SEEC 差のカーブ(ピークが 500eV)から 300eV シフトする。

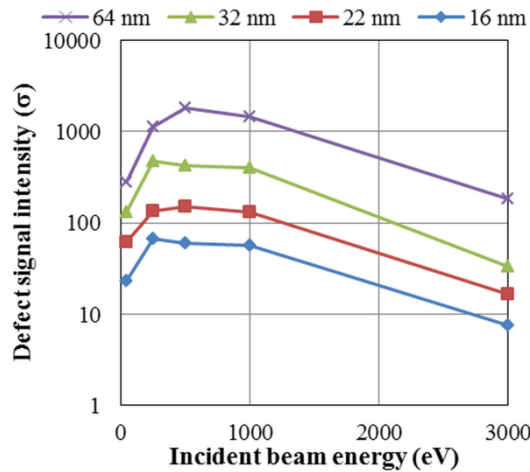


図 III.2.1.2-1-82 凹欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性

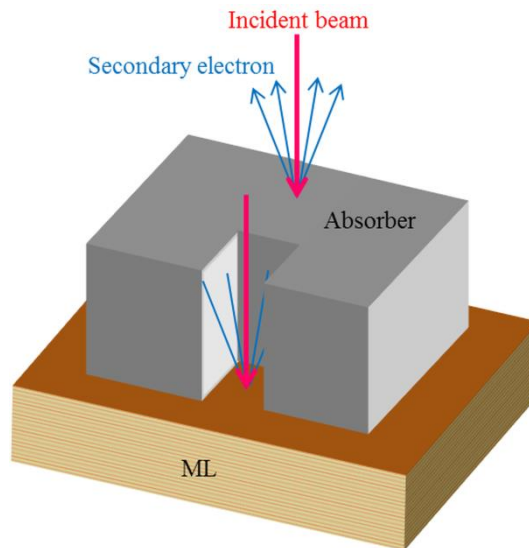


図 III.2.1.2-1-83 小さな凹欠陥周辺から発生した二次電子軌道の模式図

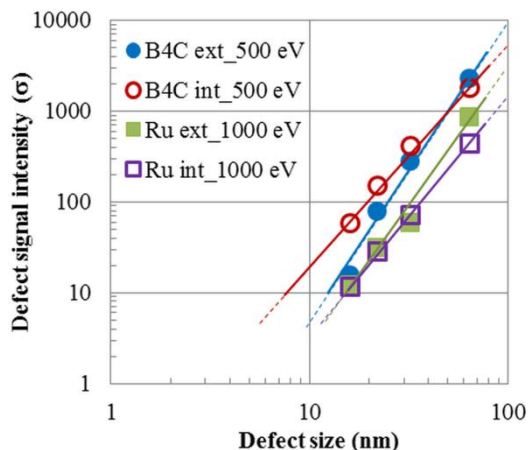


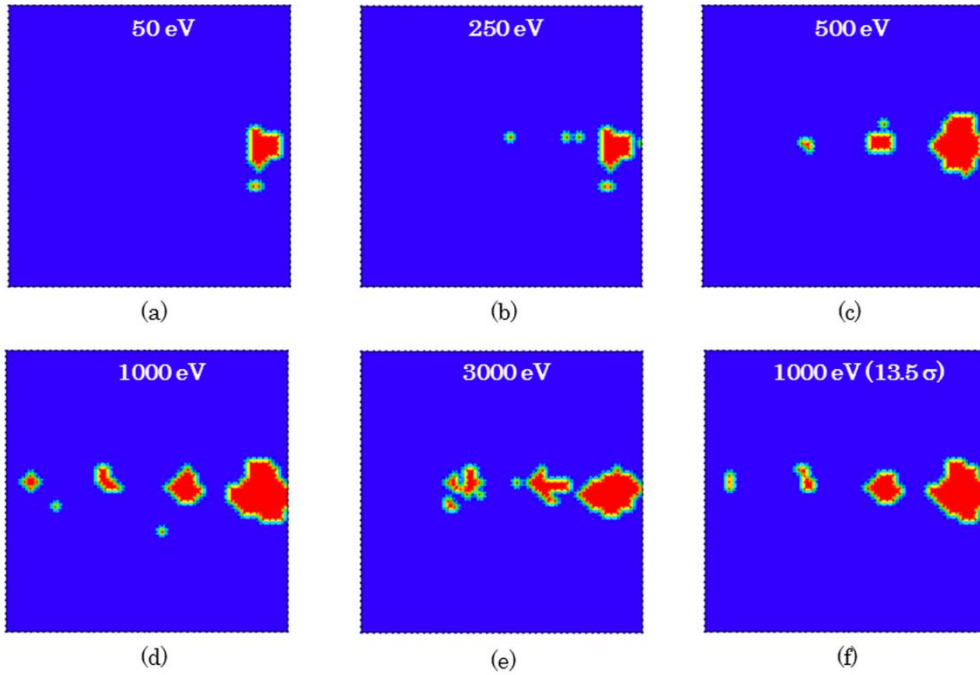
図 III.2.1.2-1-84 欠陥検査感度と欠陥サイズとの関係

欠陥検査感度と欠陥サイズとの関係を両対数グラフにプロットすると図 III.2.1.2-1-84 のようになる。B₄C は Ru よりも SEEC が小さく吸収層との SEEC 差が大きいため欠陥検査感度が大きい。また、凹欠陥は凸欠陥よりもサイズ減少に伴う感度劣化が小さいため傾きが小さくなる。このように欠陥検査感度の欠陥サイズ依存性をグラフ化することにより、10σ 以上で検出可能な欠陥サイズを外挿することが可能になる。表 III.2.1.2-1-6 にその結果をまとめる。B₄C は Ru よりも小さい欠陥が検出可能で、凹欠陥の場合、7nm まで検出可能であることが分かった。

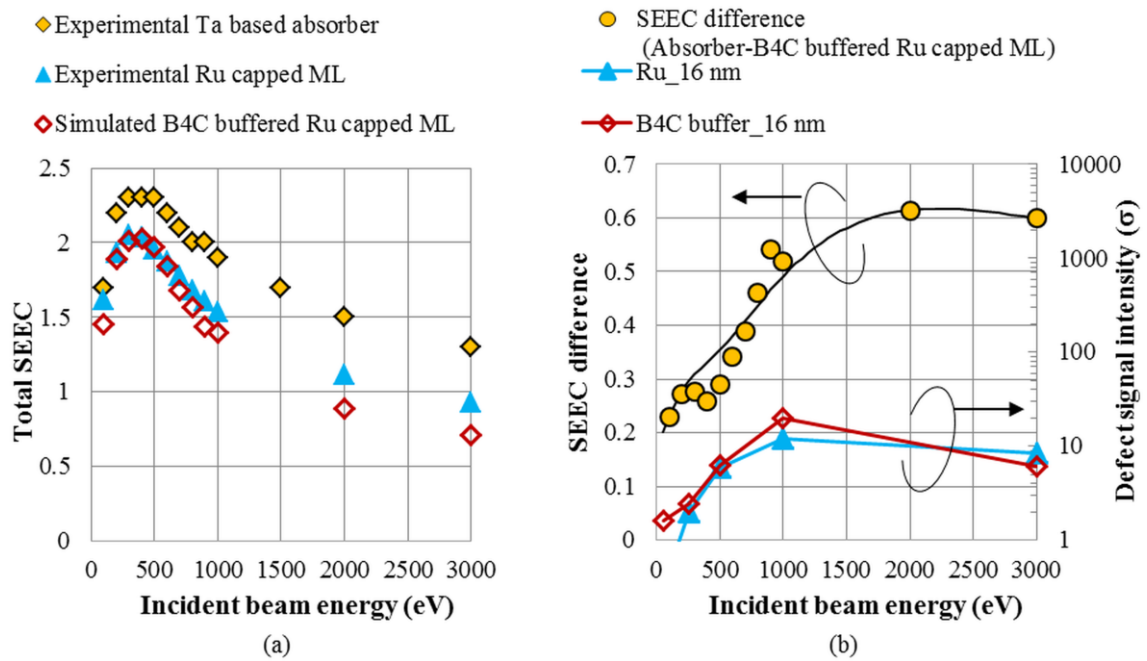
表 III.2.1.2-1-6 10σ以上で検出可能な欠陥サイズ

	Extrusion	Intrusion
Ru capped ML	15 nm	15 nm
B ₄ C capped ML	13 nm	7 nm

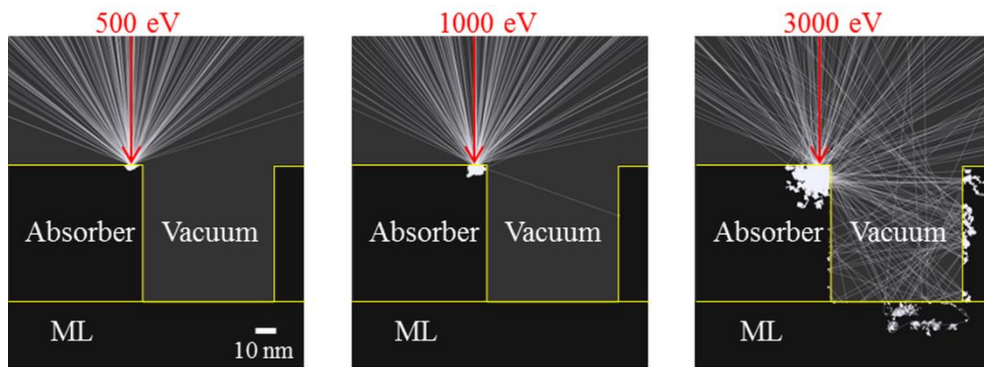
次に、B₄C buffered Ru capped ML を用いた場合のシミュレーション結果について説明する。図 III.2.1.2-1-85 は B₄C buffered Ru capped ML 上に形成した凸欠陥付き L/S パターンの欠陥検査シミュレーション結果である。1000eV のときに 16nm 欠陥が検出されており、Ru の場合と同じ検査条件であることが分かった。これは、図 III.2.1.2-1-86(a) に示すように、B₄C buffered Ru capped ML の SEEC カーブがほぼ Ru キャップ ML と同様であるためである。しかしながら、B₄C buffered Ru capped ML は Ru の膜厚が Ru キャップ ML の Ru 膜厚よりも薄いため下地の影響を受けやすい。そのため高エネルギー側では Ru キャップ ML の SEEC よりも値が小さくなる。これは、Ru の下地である B₄C、Si、Mo 共に SEEC が Ru よりも小さいからである。そのため、図 III.2.1.2-1-86(b) に示すように、Ru キャップ ML よりも B₄C buffered Ru capped ML の欠陥検査感度の方が 1000eV では高感度となる。更に注目すべきは SEEC 差と欠陥検査感度との関係である。SEEC 差は 1000eV よりも 3000eV の方が高いにも関わらず、検査感度は 3000eV の方が小さい。この理由はパターンエッジ周辺での電子散乱の影響で説明できる。図 III.2.1.2-1-87 はエッジ近傍に一次電子が入射した場合の電子軌道である。入射電子エネルギーが大きくなると、進入深さが大きくなるため、エッジ側面から発生する二次電子及び反射電子の数が増加する。これらの電子はパターン内部で更に多重散乱を繰り返しながら一部はパターン上部を通りながら検知器に到達する。そのため、パターン内部から発生した電子が相対的に増加し、パターンのコントラストを小さくする原因となる。



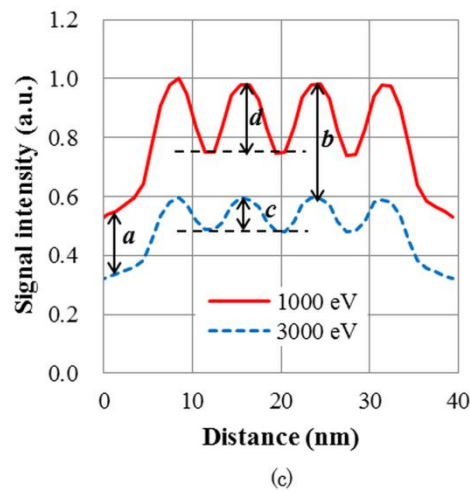
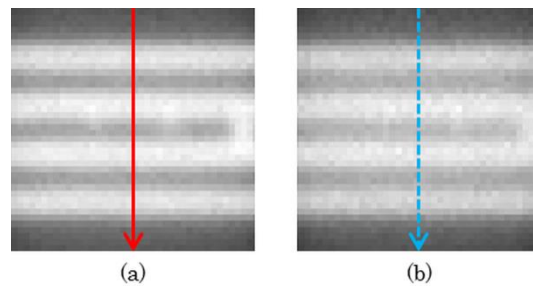
図Ⅲ.2.1.2-1-85 B₄C buffered Ru capped ML 上に形成した凸欠陥付き L/S パターンの欠陥検査シミュレーション結果(差画像)。入射電子エネルギーは(a)50eV、(b)250eV、(c)500eV、(d)1000eV、(e)3000eV。(a)~(e)は閾値 10σで二値化。(f)は閾値 13.5σで二値化した場合の 1000eV の差画像。



図Ⅲ.2.1.2-1-86 (a)SEEC カーブと(b)SEEC 差及び欠陥検査感度の入射電子エネルギー依存性



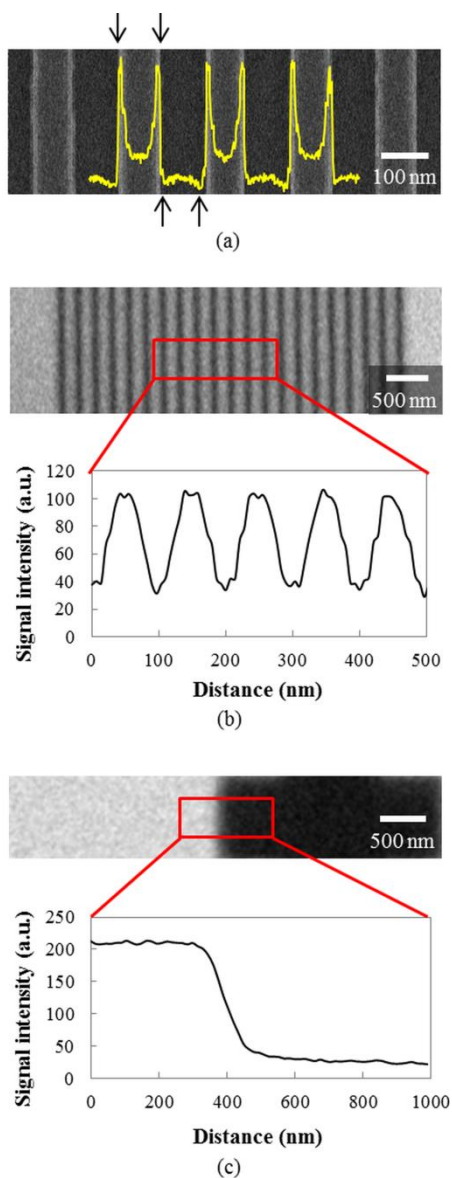
図Ⅲ.2.1.2-1-87 エッジ近傍に一次電子が入射した場合の電子軌道



図Ⅲ.2.1.2-1-88 (a)1000eV 及び(b)3000eV で入射した場合の PEM 像(シミュレーション)と(c)L/S パターンのスイング強度。

図Ⅲ.2.1.2-1-88 に示すように、3000eV で入射した場合、1000eV で入射した場合よりも L/S パターンのスイング強度が小さくなるのが分かる(図中 *c* と *d*)。このことから、入射エネルギーが大きいとノイズ成分も大きくなるのが分かった。これらの結果から、検査感度を最大にするためには、十分な SEEC 差を保持した上で、なるべく小さな入射エネルギーで検査することが望ましいことが分かった。

(ii)-3 PEM 画像の形成メカニズムの解析



図Ⅲ.2.1.2-1-89 (a) L/S パターンの SEM 画像及び信号強度プロファイル、(b) L/S パターンの PEM 画像及び信号強度プロファイル、(c) ナイフエッジパターンの PEM 画像及び信号強度プロファイル。

二種類のキャップ層を用いることにより、一般的な SEM 画像とは異なる PEM 画像に特有な特徴の解析を行うことが可能になる。図Ⅲ.2.1.2-1-89(a)に示すように、SEM 画像にはホワイトバンドと呼ばれるエッジピークや、エッジ底面付近に現れるアンダーシュートが観察される。これらは、エッジ側面から二次電子が多く発生することや、パターン近傍で二次電子がブロックされることに起因している。しかしながら、図Ⅲ.2.1.2-1-89(b)や(c)に見られるように PEM 画像にはそのような特徴が観察されない。この現象を解析するために、シミュレータの像面にカウンター型センサーを設置し信号強度プロファイルを取得した。図Ⅲ.2.1.2-1-90に示すように、通常の PEM 像を取得するためには、発生した二次電子を結像光学系 (imaging EO: imageng electron optics) により、像面に設置したイメージセンサー上に結像させる必要がある。この場合、PEM 像の解像度は結像光学系の点拡がり関数 (PSF: Point spread function) によって決まる。一方、像面にカウンター型センサーを設置し、試料にポイントビームを照射する場合、取得画像の解像度はポイントビーム間距離により

決まる。

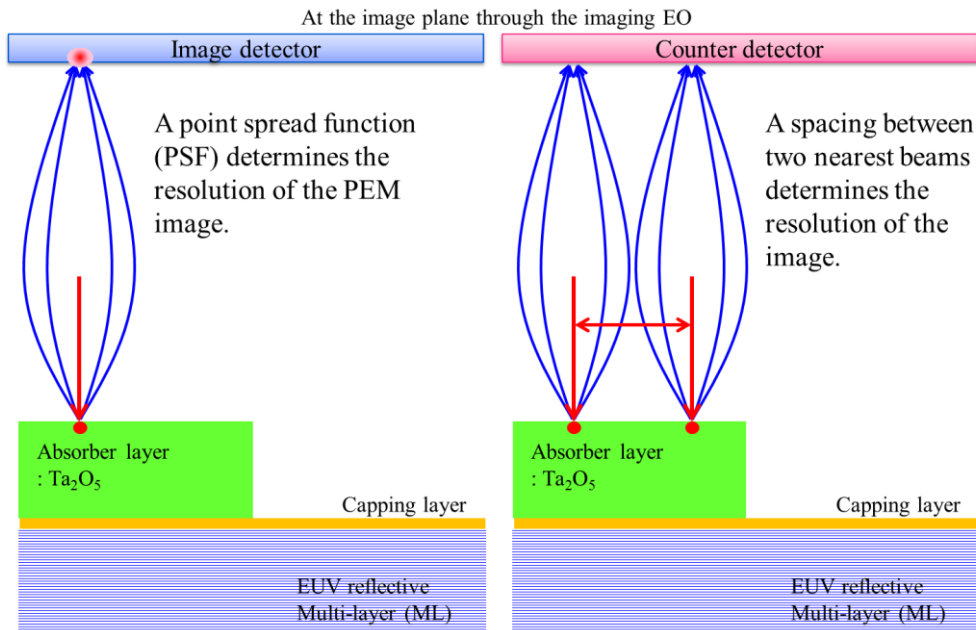


図 III.2.1.2-1-90 シミュレータの像面にイメージセンサーを設置した場合とカウンター型センサーを設置した場合の断面模式図。

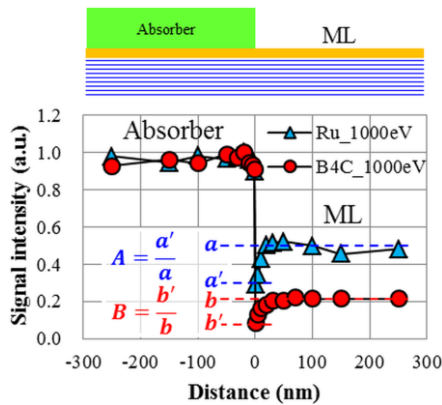


図 III.2.1.2-1-91 シミュレータの像面にカウンター型センサーを設置した場合の信号強度プロファイル

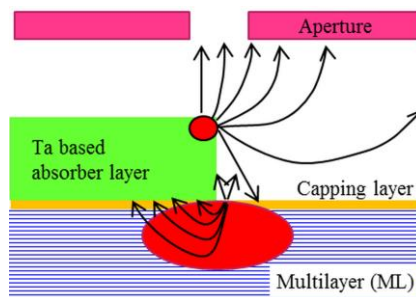


図 III.2.1.2-1-92 PEM 画像形成メカニズムの模式図

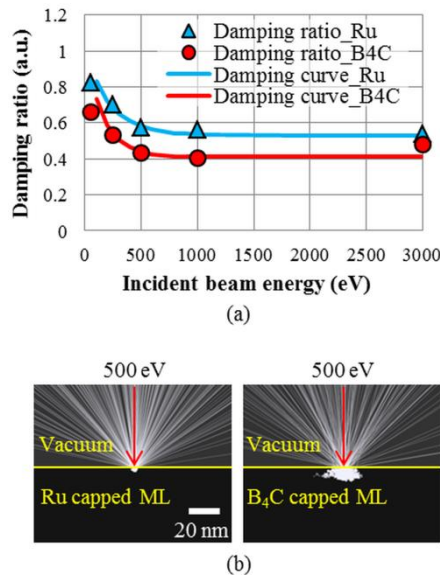
図 III.2.1.2-1-91 にカウンター型センサーによって取得した画像の信号強度プロファイルを示す。Ru 及び B₄C キャップ ML ともにホワイトバンドは観察されないが、アンダーシュートは観察された。

このことから、アンダーシュートが表れない原因はPEM画像がSEM画像に比べ解像度が低いためであることが分かった。更に、ホワイトバンドが現れない原因は、[図 III.2.1.2-1-92](#) に示すように大きな出射角度で発生した二次電子が結像光学系内に設置してある絞り(Aperture)にけられることにより画像形成に寄与しないためであることが分かった。[図 III.2.1.2-1-91](#) 中のアンダーシュートの割合(減衰比率)を一次電子の入射エネルギーの関数としてグラフ化すると[図 III.2.1.2-1-93\(a\)](#)のようになる。実線は下記式で得られるフィッティングカーブである。

$$f_{Ru}(E) = (1 - A)e^{-\omega_1 E} + A \quad (1)$$

$$f_{B_4C}(E) = (1 - B)e^{-\omega_2 E} + B \quad (2)$$

ここで、Eは入射電子エネルギー、 ω_1 及び ω_2 は減衰係数、A及びBは[図 III.2.1.2-1-91](#)で定義した減衰比率である。式(1)と(2)はそれぞれRuとB₄Cの場合の式である。両方の場合においても入射電子エネルギーが大きいほどアンダーシュートが大きくなり、B₄CはRuの場合よりもアンダーシュートが大きいたことが分かる。これは、[図 III.2.1.2-1-93\(b\)](#)に示すように、B₄Cの密度が小さいため同じエネルギーで入射しても進入深さが深くなるためである。この結果は、[図 III.2.1.2-1-71](#)で示した進入深さとアンダーシュートとの関係と合致している。

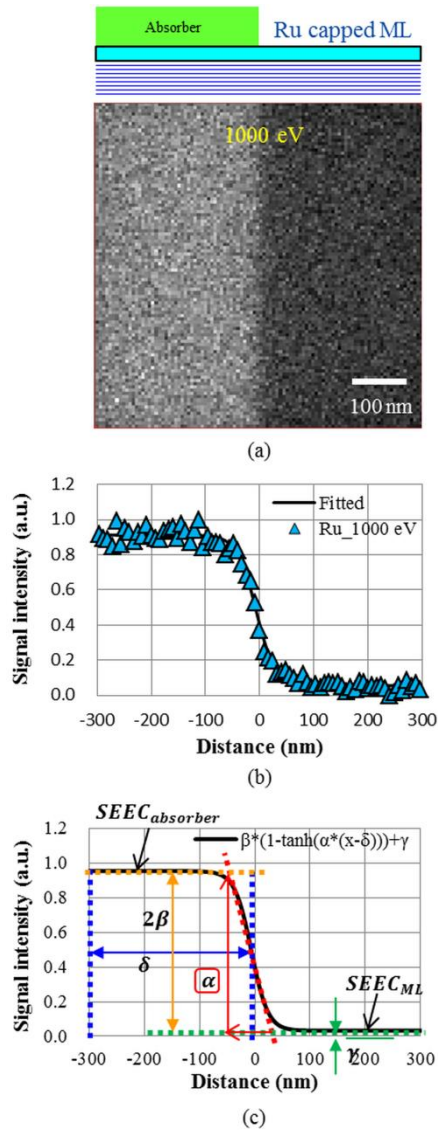


[図 III.2.1.2-1-93](#) (a)アンダーシュートによる減衰比率及びフィッティングした減衰カーブの入射電子依存性、(b)500eVで一次電子が入射した場合の電子軌道。

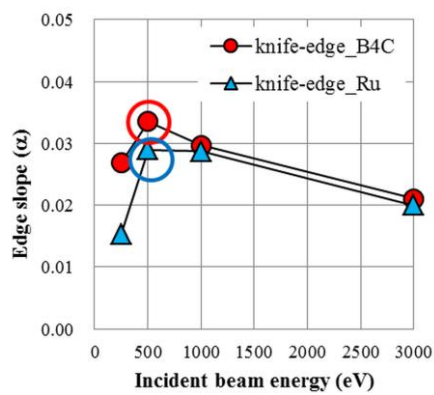
次に、このようなアンダーシュート成分がPEM画像に与える影響を調べるために、RuとB₄Cのナイフエッジプロファイルを詳細に解析した。[図 III.2.1.2-1-94](#)に示すように、得られたプロファイルは下記に示すような式でフィッティングすることができる。

$$g(x) = \beta[1 - \tanh\{\alpha(x - \delta)\}] + \gamma \quad (3)$$

ここで α , β , γ , δ はフィッティングパラメータであり、 α がエッジ勾配に相当し、 2β が吸収層とMLとのSEEC差に相当する。[図 III.2.1.2-1-95](#)にエッジ勾配 α の入射電子依存性のグラフを示す。エッジ勾配はいずれも500eVにピークがあった。PEM画像がPSFのみで決まるとするとエッジ勾配は一次電子エネルギーの依存性はないはずである。一方、[図 III.2.1.2-1-77\(b\)](#)に示したように 2β に相当するSEEC差には入射電子依存性がある。しかし、SEEC差のカーブのピークはRuとB₄Cの場合でそれぞれ1000eVと500eVであり[図 III.2.1.2-1-95](#)に示したようなエッジ勾配のカーブとも一致しない。そこで、SEEC差のカーブにアンダーシュート成分を考慮すると下記式(4)及び(5)のようになる。



図Ⅲ.2.1.2-1-94 (a)シミュレーションで得られたナイフエッジパターンのPEM画像と(b)その信号強度プロファイル、及び(c)プロファイル解析方法の説明図。

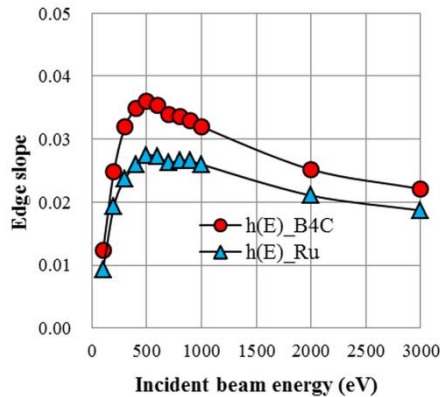


図Ⅲ.2.1.2-1-95 エッジ勾配の入射電子エネルギー依存性

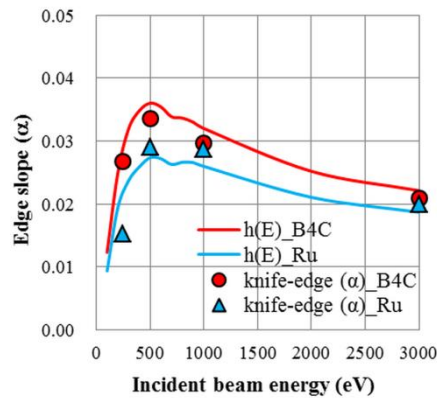
$$h_{Ru}(E) = C \times [SEEC_{absorber} - \{(1 - A)e^{-\omega_1 E} + A\} \times SEEC_{Ru\ capped\ ML}] \quad (4)$$

$$h_{B_4C}(E) = C \times [SEEC_{absorber} - \{(1 - B)e^{-\omega_2 E} + B\} \times SEEC_{B_4C\ capped\ ML}] \quad (5)$$

ここで、Cはフィッティングパラメータであり、サンプルからの像面までの電子の透過率の成分も含まれている。この式をグラフ化したものが図III.2.1.2-1-96(a)であり、エッジ勾配のプロット点を重畳させると図III.2.1.2-1-96(b)のようになる。カーブの形状やピークの位置などがエッジ勾配のプロット点と近づいているのが分かる。このことにより、PEM 画像には解像しないもののアンダーシュートの成分が画像形成、とりわけエッジ勾配に影響していることが分かった。



(a)



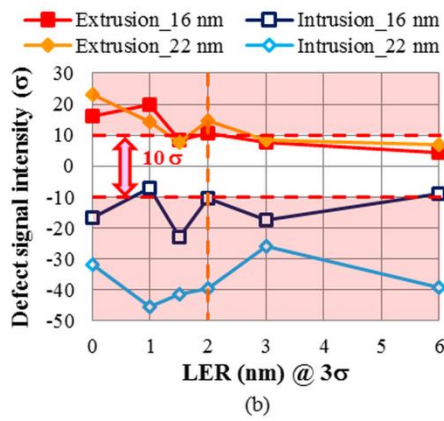
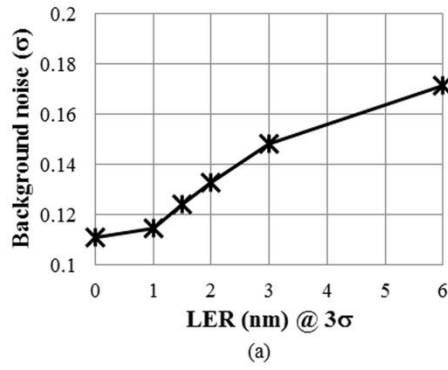
(b)

図III.2.1.2-1-96 (a)式(4)及び(5)のカーブ、(b)エッジ勾配と式(4)及び(5)を重畳したグラフ

(ii)-4 ラインエッジラフネスの検査感度を与える影響

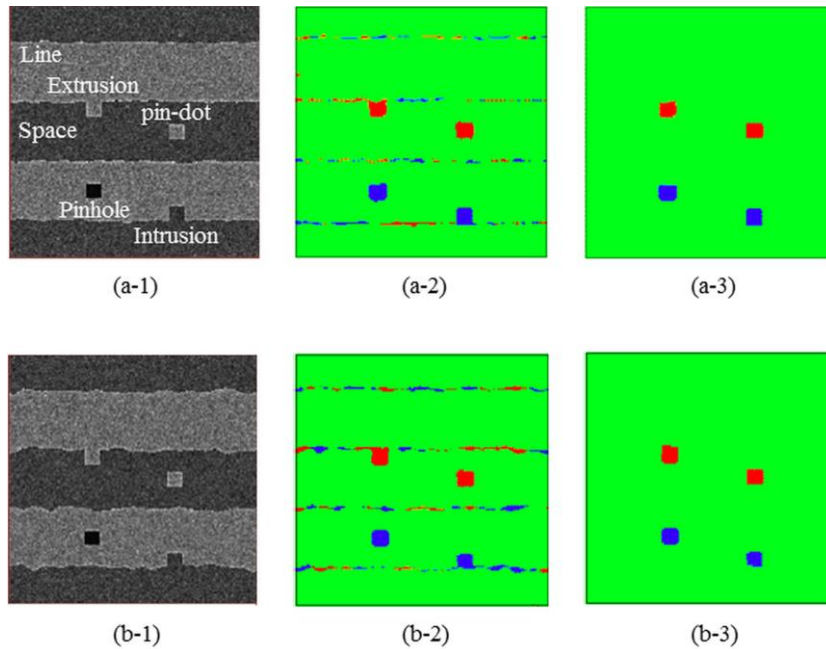
(ii)-4-1 PEM による欠陥検出感度を与える影響

シミュレーションではラインエッジラフネス(LER)の影響も調べることができる。LERが大きくなると小さい欠陥とLERの判別が困難になるため検査感度が劣化する。しかしながら、PEM画像の場合、上述のように解像度がSEMに比べて低いため比較的小さなLERは解像限界以下である。そこで、どの程度のLERまでが検出感度に影響するかを調べ、また、そのメカニズムを解明するために、16nmと22nmの欠陥を異なるLERのL/Sパターン(hp64nm)上に配置したサンプルのPEM画像をシミュレーションにより取得し画像解析を行った。図III.2.1.2-1-97に示すように、LERが大きくなると差画像のバックグラウンドノイズが大きくなるのがわかる。欠陥信号は欠陥部の信号強度をバックグラウンドノイズの標準偏差で割った値で定義されている。そのため、バックグラウンドノイズが増加すると欠陥検出感度も低下する。しかしながら10σ以上の信号強度を欠陥検出の閾値と定義するとLERがおおよそ2nmまで16nm欠陥の検出が可能であることが分かった。

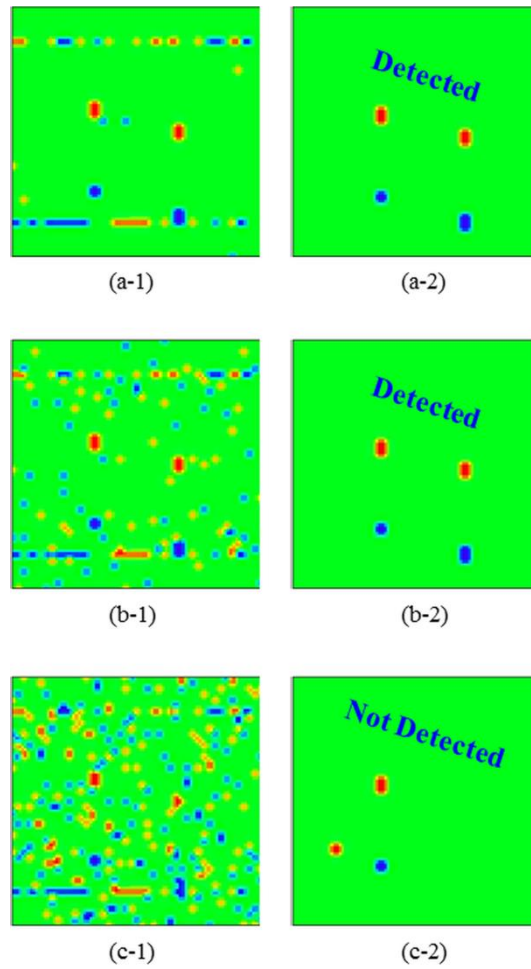


図Ⅲ.2.1.2-1-97 (a)差画像のバックグラウンドノイズの標準偏差と、(b)欠陥検出感度の LER 依存性

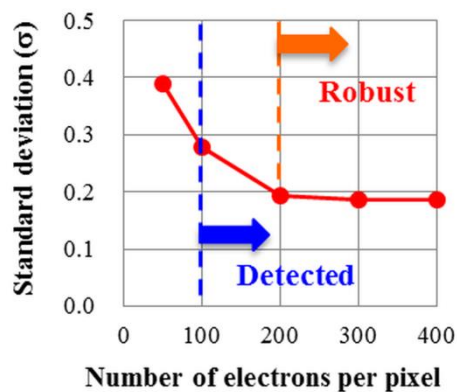
3-1-4-2. SEM 方式による欠陥検出感度及びスループットと PEM 方式との比較



図Ⅲ.2.1.2-1-98 (a-1)-(a-3)LER 1nm、(a-1)-(a-3)LER 2nm の場合の hp64nmL/S パターン上 16nm 欠陥の SEM シミュレーション画像及び検査画像(二値化処理前及び二値化処理後の差画像)。単位面積当たりの電子数は PEM と同じとし、入射電子エネルギー1000eV のポイントビームを用い、ビーム間隔(画像のピクセルサイズ)は 1.5nm とした。



図Ⅲ.2.1.2-1-99 解像度 6 nm の場合の二値化処理前後差画像。ピクセル当たりの電子数は(a-1)-(a-2) 200, (b-1)-(b-2) 100, and (c-1)-(c-2) 50。試料形状は図Ⅲ.2.1.2-1-104(a-1)と同様で LER は 1nm。



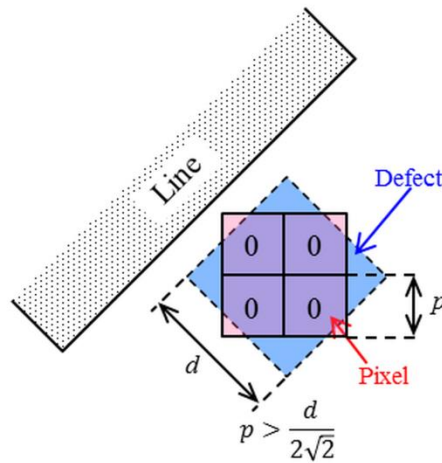
図Ⅲ.2.1.2-1-100 二値化処理前画像(図Ⅲ.2.1.2-1-98(a-1)、(b-1)、(c-1))の標準偏差の電子数依存性

図Ⅲ.2.1.2-1-98 に示すように、高解像度な SEM 方式では LER が解像されるため、検査後の差画像を観察すると LER が疑似欠陥として検出されてしまう(図中(a-2)及び(b-2))。そこで、二値化処理を行うとこのような疑似欠陥は消すことが可能である(図中(a-3)及び(b-3))。これは LER に起因する疑似欠陥は欠陥サイズと比べて小さいためである。これが解像度の良い SEM 方式の特徴で

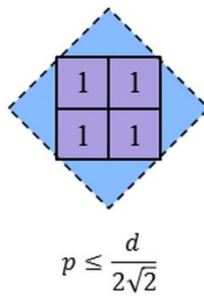
ある。また、入射電子エネルギー及び単位面積当たりの電子数を PEM と同じにすると欠陥信号強度は PEM と同じで 10σ 程度となる。これは SEEC と S/N 比がそれぞれ PEM の場合と同じだからである。SEM は高解像度である反面、検査速度が遅い。そのため、検査速度を向上させるためにはできるだけ低解像度、且つ、少ない電子数で検査する必要がある。そこで、電子数と解像度を変化させてシミュレーションを行った。その結果、[図 III.2.1.2-1-99](#) に示すように 16nm 欠陥を検出するためには 6nm まで解像度を落とすことが可能であることが分かった。また、1ピクセル(この場合は 6nm×6nm)当たりの電子数を 50、100、200 個と変化させると 100 個以上ですべての欠陥が検出できた。しかしながら、[図 III.2.1.2-1-100](#) に示すように、二値化処理前差画像の標準偏差を調べると 200 個以上で最小値に漸近するため、よりロバストな条件は 1ピクセル当たり 200 個であることが分かった。同様の方法で 11nm 欠陥の検査条件を求めたところ、解像度が 3nm で 1ピクセル (3nm×3nm) 当たりの電子数が 200 個がロバストな条件であることが分かった。ピクセルサイズと欠陥サイズとの関係は [図 III.2.1.2-1-101](#) に示すような模式図でも説明できる。欠陥とピクセルサイズがともに正方形であると仮定した場合、欠陥検出にとって最も不利な条件は L/S パターンが 45° のとき、且つ、欠陥の角がピクセルの中央に位置した場合である。この場合に欠陥がピクセル内に全て包括される条件は

$$p \leq \frac{d}{2\sqrt{2}}$$

で表すことができる。ここで p がピクセルサイズ、d が欠陥サイズである。この式をもとに 16nm 及び 11nm 欠陥に必要なピクセルサイズを求めるとそれぞれ 6nm と 4nm となりシミュレーション結果とほぼ一致する。11nm の場合にシミュレーション結果 (3nm) が計算値よりも小さくなったのは、欠陥が小さくなるにつれて LER による影響が大きくなるためであると考えられる。



(a)



(b)

[図 III.2.1.2-1-101](#) L/S パターンが 45° の場合のピクセルサイズと欠陥サイズとの関係。(a)欠陥未検出条件、(b)欠陥検出条件。

これらの結果と最新のマルチビーム SEM の仕様とを考慮することにより、PEM 方式とマルチビーム SEM 方式との比較をすることが可能になる。その結果を表 III.2.1.2-1-7 に示す。SEM の場合、解像度が良いためにピクセル当たりに必要な電子数は少ないが、PEM と同様の検査速度を要するためには 16nm 欠陥検出用に 200 本、11nm 欠陥検出用としては 1850 本のビームが必要であることが分かった。

表 III.2.1.2-1-7 PEM とマルチビーム SEM 方式による検査装置の仕様比較

SEM	Target defect size (nm)	Pixel size (nm)	Number of beams	Throughput (h)
	16	6	200	18.5
11	3	1850	8.0	
PEM	Target defect size (nm)	Pixel size (nm)	Swath (mm)	Throughput (h)
	16	16	32.8	19 (600MPPS)
11	11	22.5	8 (>1.5GPPS)	

(ii)-5 マスク構造の影響(多層膜掘り込みマスクの欠陥検出)

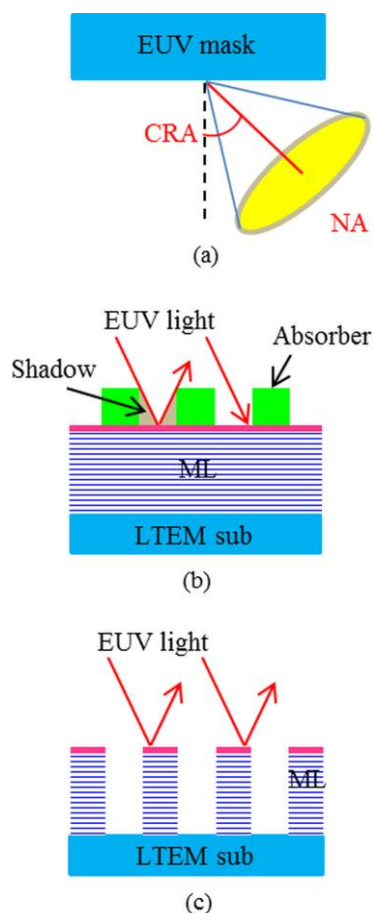


図 III.2.1.2-1-95 (a) 高 NA 露光方法、(b)マスク 3D 効果、(c)多層膜掘り込みマスクの優位性の説明図。

図 III.2.1.2-1-95 に示すように、近年、1xnm 世代に向けた取り組みとして高 NA 露光方法が提案されている。しかしながら問題点として主光線入射角(CRA: Chief ray angle)が大きくなるため従来型

の EUV マスクではシャドローイング効果を代表とする 3D 効果が問題視されている。その解決策の一つとして東芝などから提案されているのが ML を掘り込むことによりパターニングを行う、多層膜掘り込みマスクである。しかしながら問題点として ML を基板まで掘り込むことでパターンが電氣的に孤立することが挙げられる。このことは、電子線技術を用いた検査や計測、または修正プロセスにおいて帯電などによるプロセス精度低下を招くために、ML と基板との間に導電膜を挿入する方法が提案されている(図 III.2.1.2-1-103)。

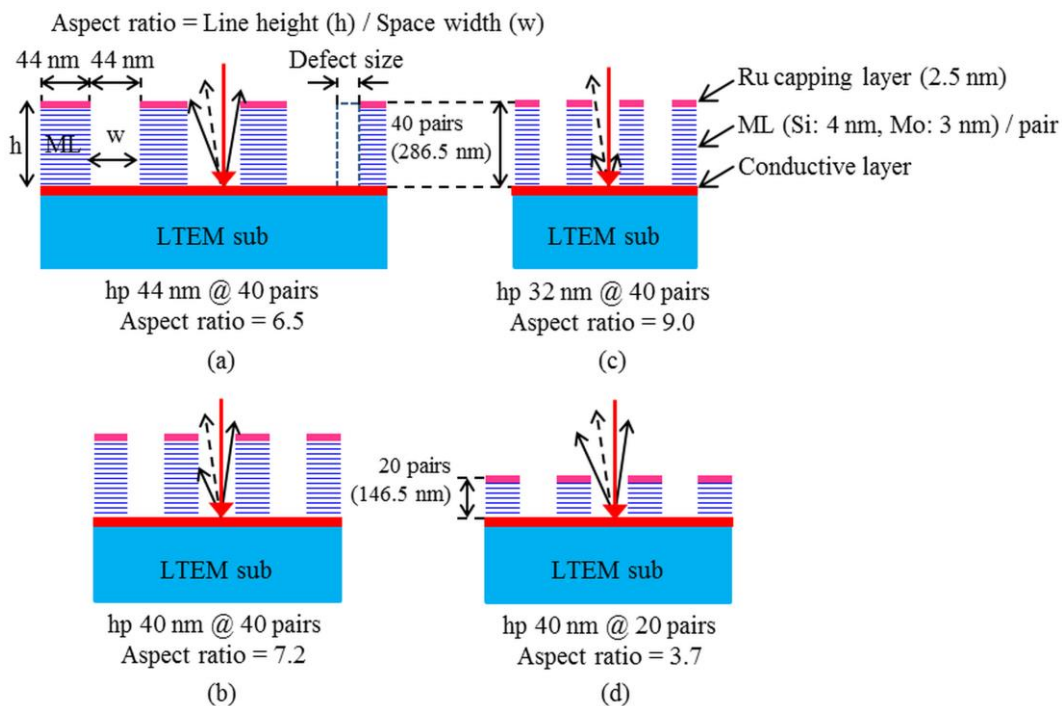
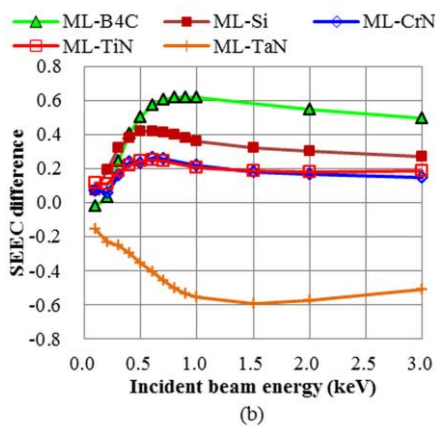
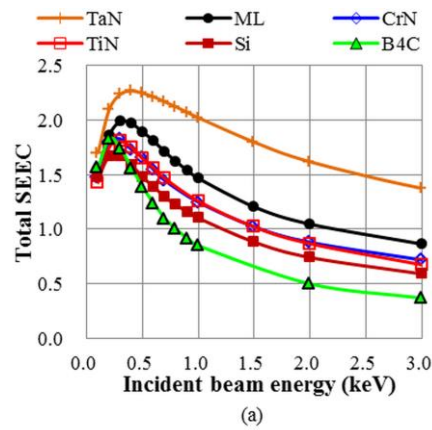
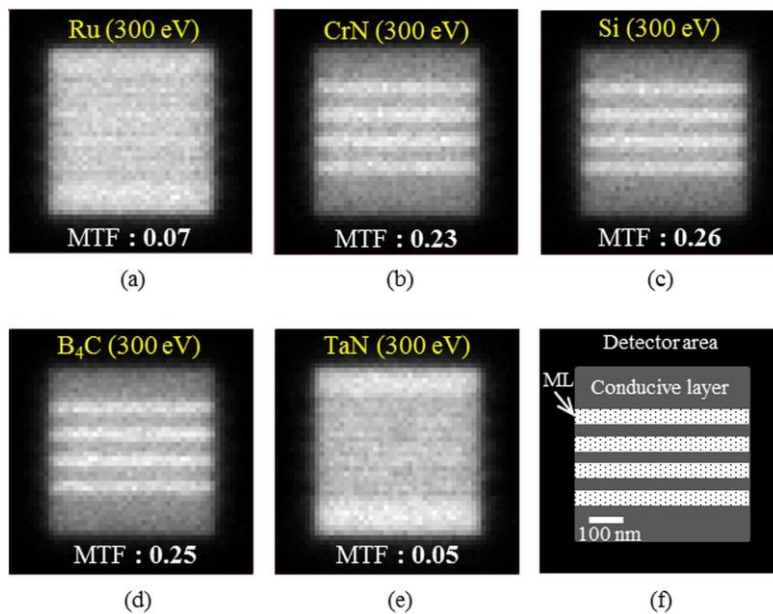


図 III.2.1.2-1-103 多層膜掘り込み EUV マスクの断面模式図。(a) hp44nm(ML40 ペア)、(b) hp40nm(ML40 ペア)、(c) hp32nm(ML40 ペア)、(d) hp40nm(ML20 ペア)。

更に、本構造では、洗浄等によるパターン倒れを防ぐことを目的として ML の高さを低くするために ML を 20 ペアにするという提案も行われている。40 ペアの場合では、L/S パターンのアスペクト比が大きいためスペース部底面からの信号がライン側面でブロックされる。そのため、スペース部の信号が低下しパターンのコントラストが高くなる。しかしながら、20 ペアの場合、その効果が抑制されるため、40 ペアに比べてコントラストが低下する。そのため、電子ビームを用いた欠陥検査の観点からすると ML のキャップ層(ライン部)と導電膜(スペース部)との材料コントラストをできるだけ大きくできるような導電膜材料の選択が求められる。そこで、EUV マスクや通常のフォトマスクに比較的好く使用される材料の SEEC の測定を行った。その結果を図 III.2.1.2-1-104 に示す。CrN、TiN、Si 及び B₄C は Ru キャップ ML に比べ SEEC が小さいが、TaN は大きい。材料コントラストに最も影響を与える SEEC 差は B₄C が最も大きい。TaN も差は大きいコントラストが反転することが予想される。図 III.2.1.2-1-105 にそれぞれの材料を導電膜とした場合の 40 ペア ML、hp40nm パターンのシミュレーション PEM 画像を示す。TiN と CrN は SEEC カーブがほぼ同一であるため CrN を用いた。導電膜が Ru の場合、キャップ層と導電膜が同じ材料であるため、材料コントラストがなくパターンコントラストも小さい。また、TaN の場合は SEEC が大きく二次電子が多く発生するがスペース部の高アスペクト比が大きいため多くの電子が検知器まで到達せずコントラストが小さくなる。この場合は Si と B₄C の場合のコントラストが最も大きかった。



図Ⅲ.2.1.2-1-104 導電膜の候補材料として挙げた TaN、CrN、TiN、Si、B₄C の(a)SEECと(b)Ru キャップ ML との SEEC 差。



図Ⅲ.2.1.2-1-105 40 ペア ML の多層膜掘り込みマスクの導電膜として (a)Ru、(b)CrN、(c)Si、(d)B₄C、(e)TaN を用いたときのシミュレーション PEM 画像と(f)試料の上面模式図。

ML を 20 ペアとした場合は、図Ⅲ.2.1.2-1-106 に示すように TaN の場合の L/S パターンコントラ

ストが他の材料と比べ反転していることがわかる。更に、Si の場合のコントラストと B₄C の場合のコントラストの違いが顕著になっており、40 ペアに比べ 20 ペアの場合には導電膜がコントラストに与える影響が大きいことがわかる。図 III.2.1.2-1-107 に 40 ペア ML の場合の検査結果を示す。導電膜を Si とし hp を 44、40、32nm と小さくしても 16nm 欠陥が検出できることがわかる。しかし、図 III.2.1.2-1-108 に示すように 20 ペア ML の場合は、Si 導電膜の場合、16nm 凸欠陥が検出できず、導電膜が B₄C の時のみ 16nm 凸欠陥が 10 σ 以上で検出できることがわかった。

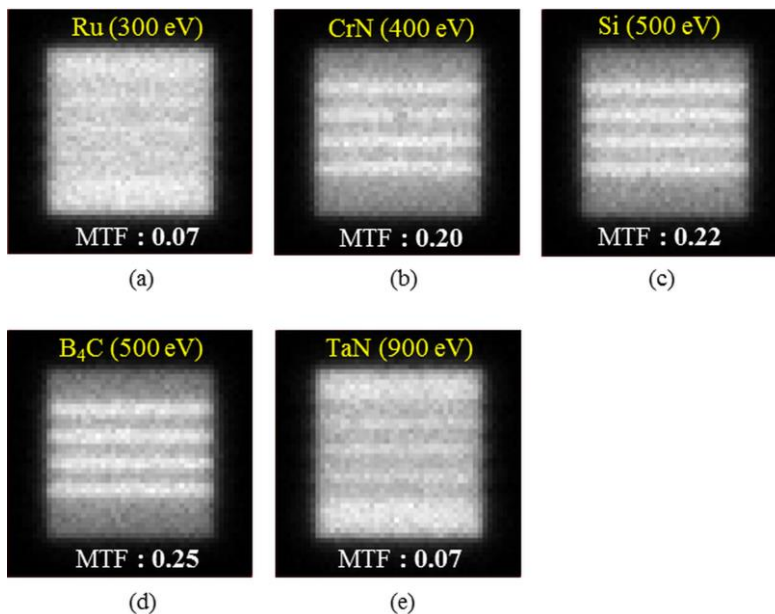


図 III.2.1.2-1-106 20 ペア ML の多層膜掘り込みマスクの導電膜として (a)Ru、(b)CrN、(c)Si、(d)B₄C、(e)TaN を用いたときのシミュレーション PEM 画像。

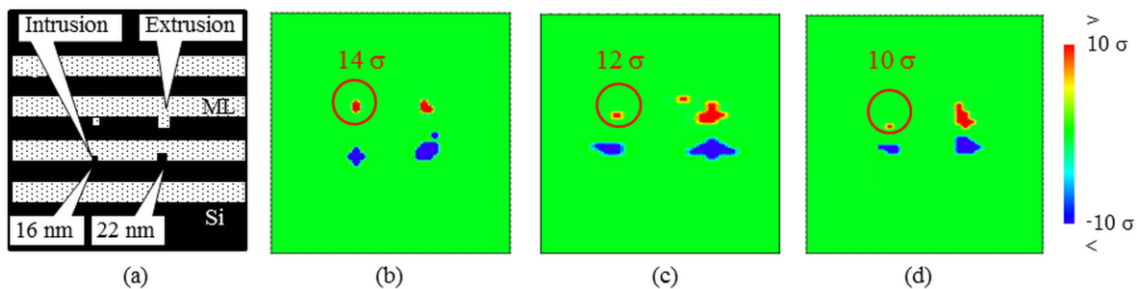


図 III.2.1.2-1-107 (a) 検査シミュレーションに用いた試料上面の模式図と、40 ペア ML の (b) hp 44、(c) hp 40、(d) hp 32 nm L/S を用いたときの検査結果 (差画像)。導電膜は Si。

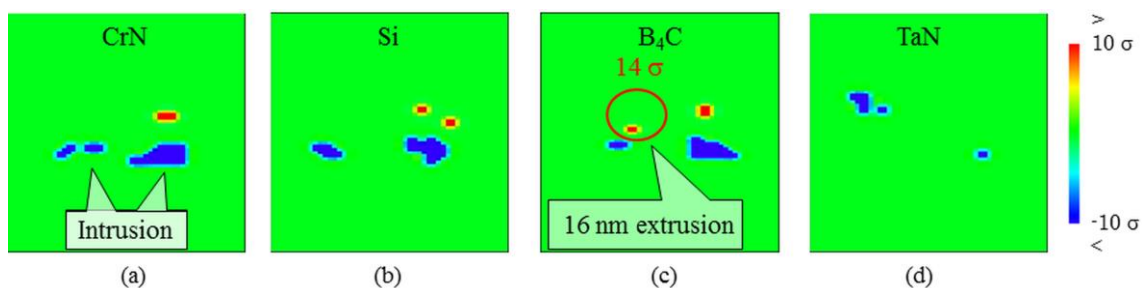
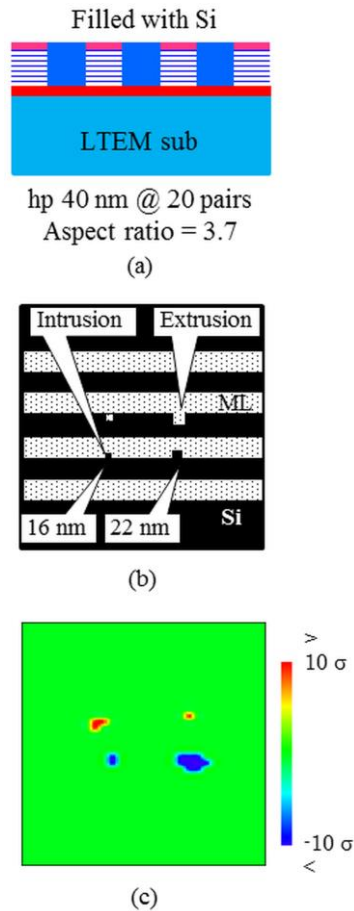


図 III.2.1.2-1-108 20 ペア ML に作製した hp40nmL/S パターンを用いた検査結果。導電膜は (a) CrN、(b) Si、(c) B₄C、(d) TaN。



図Ⅲ.2.1.2-1-109 20ペアMLに作製したhp40nmL/Sパターンの掘り込み部をSiで埋め込んだ構造の (a) 断面模式図、(b) 上面模式図、及び、(c) 検査結果。

多層膜掘り込みマスクでは、パターン倒れや酸化防止の観点から掘り込み部を Si 等で再埋め込みする方法も提案されている。この場合でも、図Ⅲ.2.1.2-1-109 に示すように 16nm 欠陥が検出可能であることが分かった。Si を Ru キャップ層と同じレベルまで埋め込むとマスク表面の凹凸がないため、パターンエッジ部での電子散乱が抑制される。そのため、Ru と Si の SEEC 差であっても電子散乱によるノイズが抑制されるため、高コントラストと高検査感度が達成できることが分かった。

表Ⅲ.2.1.2-1-8 導電膜材料として候補に挙げられた材料の抵抗率 (Ωcm)

TiN	CrN	TaN	Doped crystal -Si	a-Si	B ₄ C	B ₄ C (5 nm)	2.5-nm-B ₄ C on metal film
1.0x10 ⁻⁴	1.4x10 ⁻⁴	2.3x10 ⁻⁴	~ 1.0	Unmeasurable	23.3	Unmeasurable	< 5.4x10 ⁻⁵

次に、それぞれの材料の導電性と帯電に対する影響を確認した。導電性は四探針法により測定した。その結果を表Ⅲ.2.1.2-1-8 に示す。TiN、CrN、TaN は良い導電性を示している。Si は不純物をドーブした単結晶の場合、良い導電性を示すが、アモルファス材料であるマスク上にスパッタで成膜した場合、アモルファス Si となるため高抵抗となる。B₄C も膜厚が 100nm の場合では導電膜であるが、ガラス上に 5nm の薄膜として成膜した場合には測定限界以上の高抵抗となった。そこ

で、SEEC 特性と導電性の両方の利点を最大化するために金属上に 2.5nm の B₄C 薄膜を成膜した二重構造を作製した。この二重構造の導電率は TiN、CrN、TaN よりも高くなることが分かった。

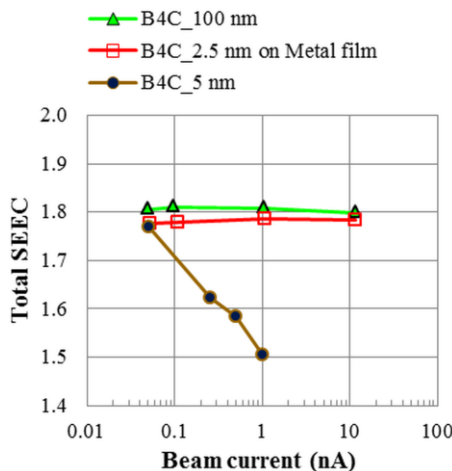
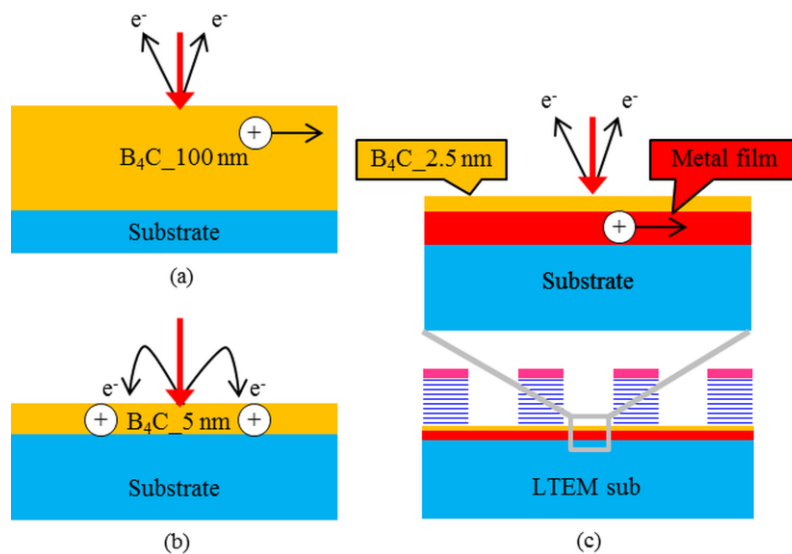
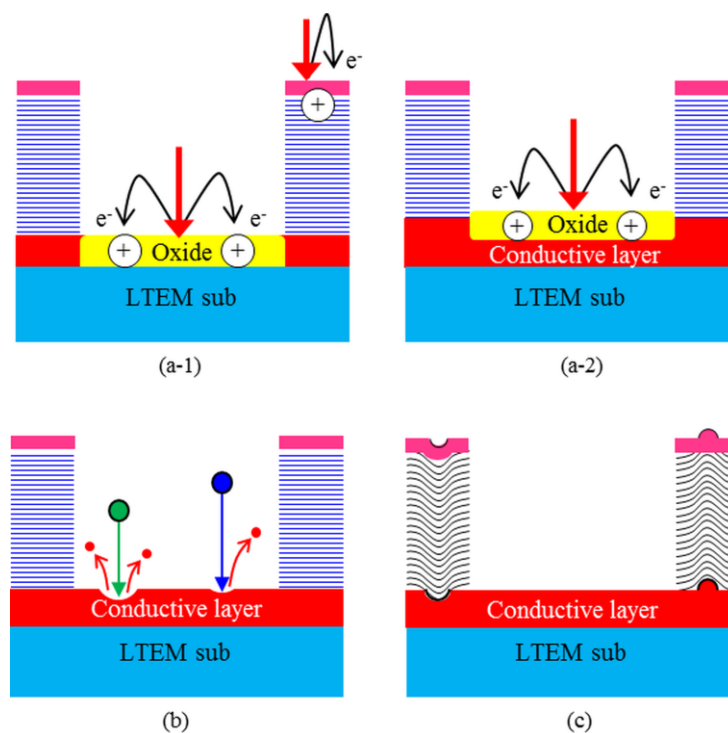


図 III.2.1.2-1-110 3 種類の B₄C サンプルを用いた、SEEC の一次電子ビーム電流依存性。ビームエネルギーは SEEC が最大になる 200eV とした。

作製した 3 種類の B₄C サンプルの導電性の確認と、電子ビーム照射時の帯電の影響を調べるために、SEEC の一次電子ビーム電流依存性を調べた。図 III.2.1.2-1-110 に示すように、100nm 厚の B₄C と金属上 2.5nm B₄C 薄膜二重構造ではビーム電流に対して SEEC の変化はなかったが、ガラス上 5nm B₄C 薄膜の場合は、ビーム電流増加に伴う SEEC の顕著な低下がみられた。これは、図 III.2.1.2-1-111 を用いて以下のように説明できる。100nm B₄C の場合は、導電率が比較的良いため B₄C 膜を通して除電されるが、ガラス上 5nm B₄C 薄膜の場合は抵抗が高いため正に帯電する。そのため、発生した二次電子が試料に戻ることににより見かけの SEEC が低下する。しかし、金属上 2.5nm B₄C 薄膜二重構造の場合は、金属膜を通して除電されるために、このような見かけの SEEC 低下がみられない。このことから、導電性を最大にし、且つ、小さい SEEC 特性の利点を最大に活用するためには金属上 2.5nm B₄C 薄膜二重構造が最適であることが分かった。これまで、欠陥検出感度、導電性、帯電の観点から材料の提案を行ってきたが、導電膜構造を決定するためには、その他にも下記に示すようないくつかの事柄を考慮する必要がある。一つは自然酸化膜の形成である。材料によってはマスク作製後やクリーニングプロセスなどによって絶縁性自然酸化膜が成長する場合がある。図 III.2.1.2-1-112 (a-1) のように絶縁性自然酸化膜厚が導電膜よりも厚くなると、パターンが電氣的に孤立してしまう。一方、図 III.2.1.2-1-112 (a-2) のように自然酸化膜厚が導電膜よりも薄い場合は、導電性は保持できるが、表面の帯電が問題となる場合がある。B₄C の場合、酸化膜は 800°C 以上でしか生成されないため、金属膜を B₄C でキャップする二重構造を用いると、この問題は解決できる。二つ目はエッチング選択性である。図 III.2.1.2-1-112 (b) に示すように、導電膜は ML をエッチングする際のエッチストップ層としての機能が不可欠である。一般的に B₄C は化学的にも機械的にも非常に安定な材料であることが知られているが、ML とのエッチング選択性を保持できるようなドライエッチプロセス条件の確立が必要である。三つ目は導電膜に起因する位相欠陥発生である。EUV マスクにはパターン欠陥以外にも ML に特有な位相欠陥が問題視されている。導電膜に起因する位相欠陥の発生を抑制するための最適成膜条件や膜厚などを確認する必要がある。



図Ⅲ.2.1.2-1-111 電子ビーム照射時の除電と帯電の説明図 (a) 100nm B₄C、(b) ガラス上 5nm B₄C 薄膜、(c) 金属上 2.5nm B₄C 薄膜二重構造



図Ⅲ.2.1.2-1-112 導電膜に必要なその他の条件 (a-1)–(a-2)自然酸化膜の生成、(b) エッチング選択性、(c) 位相欠陥への影響。

(iii) まとめ

EUV マスクを構成する材料の二次電子放出効率 (SEEC) を実験的に測定し、その結果をシミュレータに組み込むことによりシミュレーション精度を向上させた。ML による電子散乱は 3 keV ~ 20 keV の範囲で影響があることが分かった。Ru キャップ ML と B₄C キャップ ML では最適検査条件が異なり、その条件は吸収層と ML との SEEC 差を求めることにより予想できることが分かった。入射電子エネルギーが大きい場合、パターンエッジでの電子散乱が大きく、PEM 画像のノイズ成分が

大きくなることが分かった。そのため、SEEC 差が十分に大きく、且つ、入射電子エネルギーが出来るだけ小さいことが、欠陥検出感度を最大限に向上させる条件であることが分かった。また、検出光学系を考慮したシミュレーションを行うことにより、更なるシミュレーション精度と画像解析能力の向上を実現できた。パターンエッジ近傍の電子散乱は、PEM 画像の信号強度プロファイルに影響することが分かった。また、LER が $2\text{nm}(3\sigma)$ 以下であれば 16nm 欠陥が 10σ 以上で検出可能であることがわかった。PEMとSEM方式の検査装置を用いて、同一時間で同一欠陥サイズを検出するためのピクセルサイズやピクセルあたりの電子数を比較した。SEM は解像度が良いため、ピクセルあたりの電子数は PEM よりも少なくても良いが、PEM と同じ時間で検査するためには、 $200\sim 2000$ 本程度のビーム数が必要であることがわかった。さらに、電子線検査の立場から、ML 掘り込み EUV マスクの最適構造と検査条件を提案し、金属上 $2.5\text{nmB}_4\text{C}$ 薄膜二重構造の導電膜が、欠陥検出感度、導電性、帯電の観点から最も適していることを提案した。

(b) PEM 画像歪のメカニズムと歪緩和方法

(i) 検討の目的

PEM 方式の問題点として VLSI ウェハの表面電位不均一による画像歪が報告されている。ウェハは SiO_2 、 Si_3N_4 、 HfO_2 など様々な種類の絶縁膜が堆積しており、また、Contact/Via hole などの三次元構造により表面電位不均一の影響を受けやすい。一方、EUV マスクは EUV 光の吸収層である数 nm の Ta_2O_5 のみが絶縁体であり、ウェハに比べ単純な構造であるため画像歪は起り難い。しかしながら、パターンサイズが小さくなるに従い検査画像の正確性に対する要求は深まってくる。とりわけ、Die to Database 検査では、画像歪がある場合には画像を修正する必要があり、画像歪の詳細なメカニズムを理解することが非常に重要になる。そこで、PEM 方式の歪画像と帯電条件との関係を PEM シミュレータにより解析した。

(ii) 研究内容及び成果

図 III.2.1.2-1-113 は像面に写像投影された L/S パターンの歪画像である。hp100nm の L/S パターンの近くに電極を配置し+10V から-10V の範囲で電圧を印加した。今後、電極に一番近いライン(左側)を L1、中央を L2、一番遠いライン(右側)を L3 と記載する。正帯電の場合、パターンは帯電部から離れるように曲がり、負帯電の場合、パターンは帯電部に近づくように曲がる。また、帯電部の電位が大きい程大きく曲がっていることが分かる。

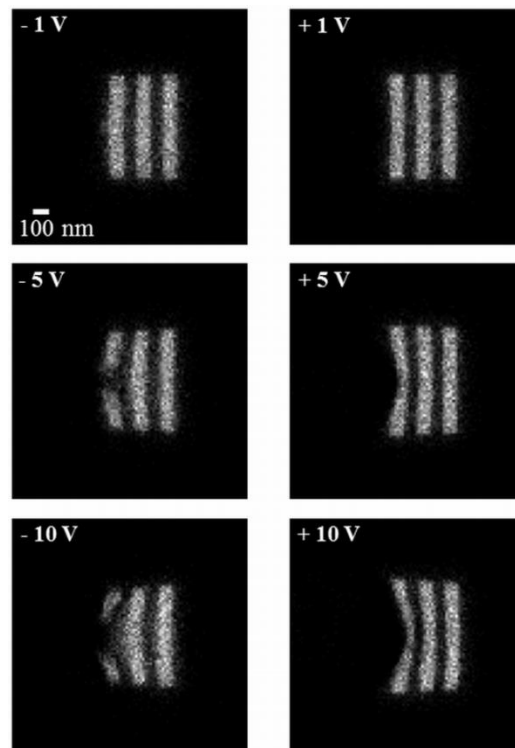
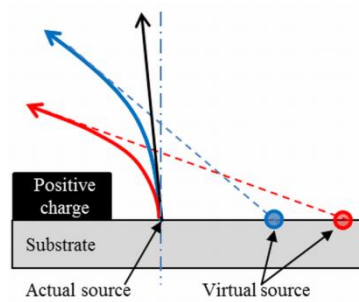


図 III.2.1.2-1-113 シミュレーションによる PEM 画像歪。パターンは hp100nm の L/S パターンであり、左側のラインを L1、中央を L2、右側を L3 とし、L1 の 100nm 左に帯電を模擬した電極を設置した。電極には-10V から+10V までの電位を印可した。

この現象は図 III.2.1.2-1-114 に示すように局所電界効果 (Type II) として説明できる。正帯電の場合、発生した二次電子は帯電部に引き寄せられるため、仮想光源が帯電部から離れる方向に移動する。PEM 画像は仮想光源を像面に投影するため、像面では帯電部から離れるように湾曲した

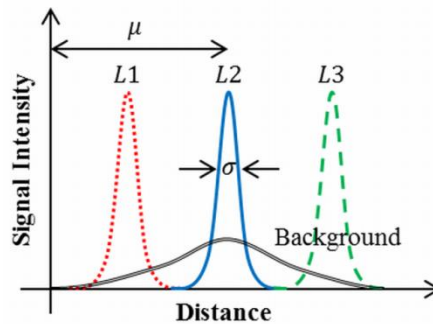
パターンとなる。負帯電の場合は反対の現象が起こる。図Ⅲ.2.1.2-1-113 に示すように負帯電の場合、L1 中央部の顕著な信号強度低下が観察される。また、歪んだラインの線幅が変化していることがわかる。このような歪現象を定量的に解析するために L/S パターンの中央部を図Ⅲ.2.1.2-1-121 に示すような 4 つの正規分布で近似した。L1、L2、L3 及びバックグラウンドノイズは、以下の式で表される。



図Ⅲ.2.1.2-1-114 画像歪の説明図

$$f(x) = Ae^{-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}}$$

ここで、A は定数、 μ は平均、 σ は標準偏差であり、それぞれ、信号強度、位置、線幅に相当する。尚、バックグラウンドノイズは出射角度(広がり角度)の大きい SE が球面収差などの影響によって結像に寄与しなかった場合に生じる成分である。



図Ⅲ.2.1.2-1-115 パターン歪の近似に用いた正規分布の説明図

局所帯電と SE のクーロン力によるラインの位置ずれ d は以下の式で近似できる。図Ⅲ.2.1.2-1-116 にその模式図を示す。

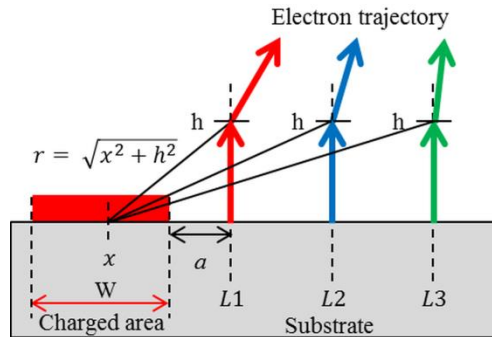
$$d = C \cdot Q \int_0^\infty \int_a^{a+W} \frac{x}{(x^2 + h^2)\sqrt{x^2 + h^2}} dx dh$$

$$= C \cdot Q \{\log(a + W) - \log a\} \quad (6)$$

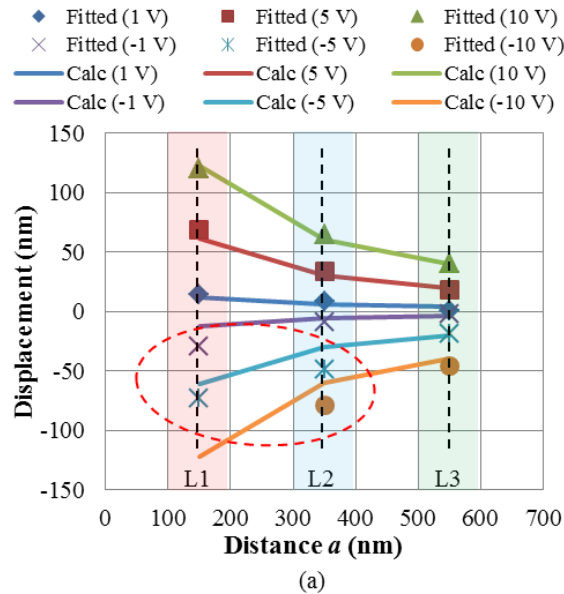
ここで a は帯電領域の端からライン中央までの距離、 h は試料表面から SE までの距離、 C はスクエーリングパラメータ、 $x/\sqrt{x^2 + h^2}$ はクーロン力の横方向成分を示す。帯電領域が小さい場合、上式は以下のように表される。

$$\lim_{W \rightarrow 0} \frac{\log(a+W) - \log a}{W} = \frac{1}{a} \quad (7)$$

これは、位置ずれ量 d が帯電領域からの距離 a の逆数に比例することを示している。



図Ⅲ.2.1.2-1-116 画像歪による位置ずれの分析に用いたモデルの説明図



図Ⅲ.2.1.2-1-117 L1、L2、L3 の位置ずれ量

図Ⅲ.2.1.2-1-117 は、歪画像中のラインの位置ずれ量 d を示す。位置ずれ量は、帯電量 Q と、帯電領域からの距離 a の逆数に比例しており式(6)、(7)と良く一致していることが分かる。しかしながら、破線部に示すように、負帯電条件では計算式との優位な差が見られた。この現象を解析するために、正帯電、負帯電条件の電子軌道を調べた。図Ⅲ.2.1.2-1-118 は試料から垂直に出射した二次電子の電子軌道とサンプル近傍の電位分布である。負帯電の場合は二次電子の軌道が正帯電に比べて大きく曲げられていることが分かる。正帯電領域の上方には電位鞍点が形成されるため、その周辺の電位勾配が小さくなり、負帯電近傍より曲げ応力が小さくなる。負帯電の場合のように二次電子が大きく曲げられると球面収差の影響で像面に結像せずバックグラウンドノイズとなり信号強度劣化として現れる。図Ⅲ.2.1.2-1-119 に示すように帯電量が大きくなる程、また、帯電領域に近い程、負帯電条件の場合に信号強度劣化が大きいことが分かる。

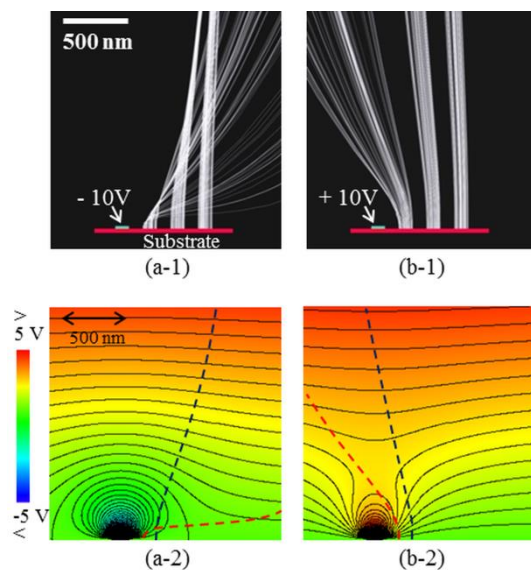


図 III.2.1.2-1-118 電極に(a-1)-(a-2) -10V、(b-2)-(b-2) +10V を印可した場合の二次電子軌道と等電位線。(b-1)-(b-2) 中の破線は L1 から発生した二次電子軌道の一部を示している。

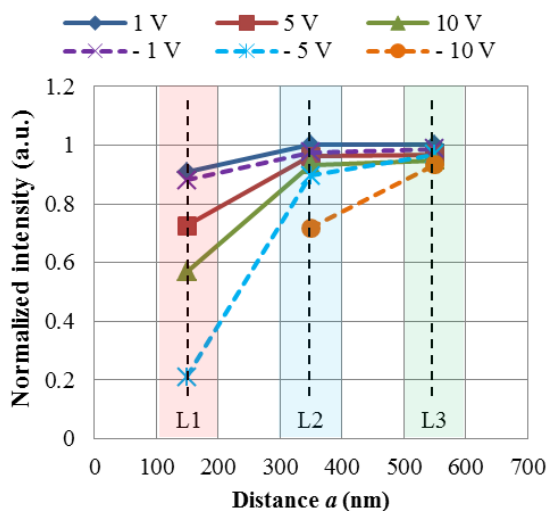
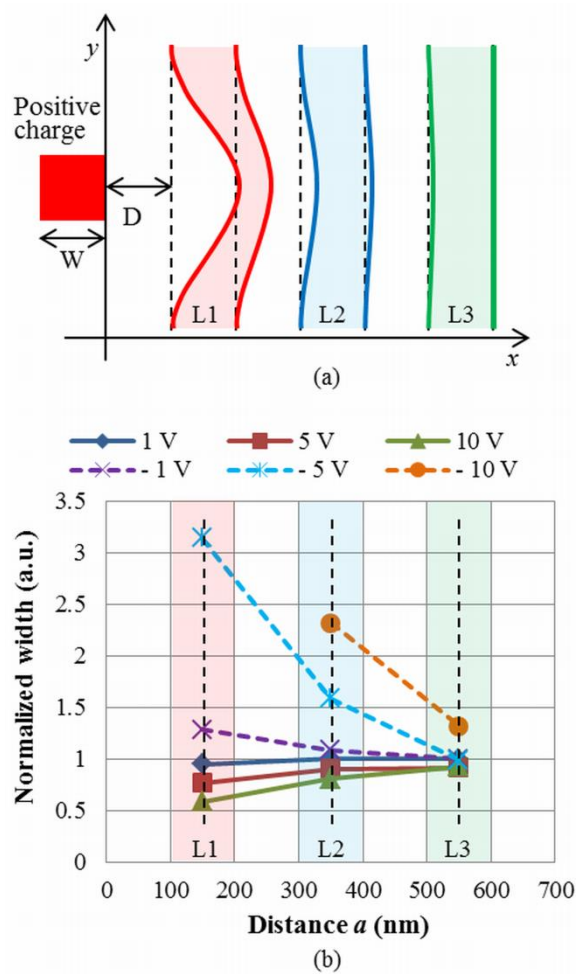


図 III.2.1.2-1-119 L1、L2、L3 の信号強度変化量。

また、このような大きな曲げ応力は線幅の変化にも影響を与える。線幅の変化するメカニズムは図 III.2.1.2-1-120(a) の模式図を用いて説明できる。前述のように位置ずれ量 d は帯電領域からの距離 a の逆数に比例するため、帯電領域に近い側のライン端の方が帯電領域から遠い側のライン端よりも位置ずれが大きくなる。そのため、正帯電の場合は線幅が細くなり、負帯電の場合は線幅が太くなる。しかしながら、図 III.2.1.2-1-120(b) に示すように、同じ帯電量であっても負帯電の場合の方が変化量大きい。この原因も、負帯電の場合の大きな曲げ応力によるものであると考えられる。また、負帯電の場合に画像がボケて観察されるのは、線幅が広くなるためであることが分かった。このような位置ずれ、信号強度劣化、ボケなどの画像劣化は実験的に取得された歪画像でも同時に観察されることが報告されている。

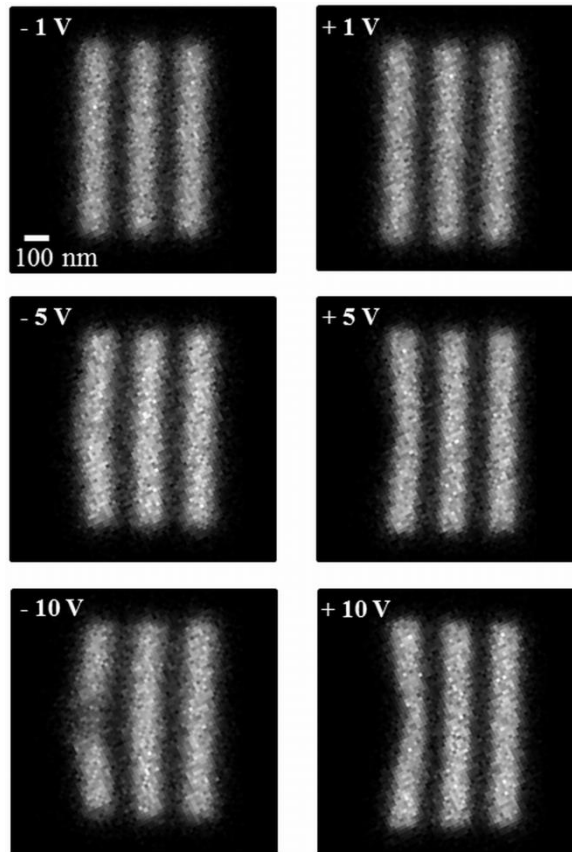


図Ⅲ.2.1.2-1-120 L1、L2、L3 の(a)ライン幅変化の説明図と(b)ライン幅変化量。

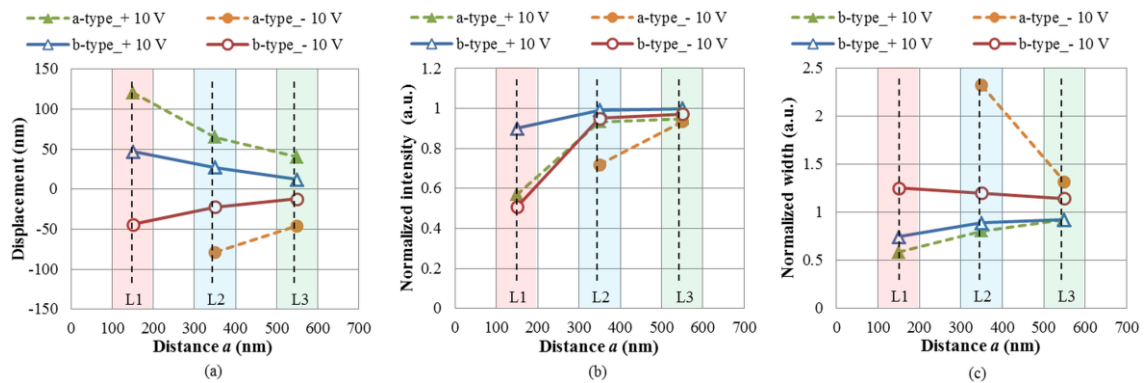
このような画像劣化は、引き出し電圧を大きくすることで改善できる。図Ⅲ.2.1.2-1-120 は、引き出し電圧を7.5倍大きくした場合のシミュレーションによるPEM画像である。今後、図Ⅲ.2.1.2-1-113から図Ⅲ.2.1.2-1-120までに使用したPEMをa-type PEM、引き出し電圧を7.5倍大きくしたPEMをb-type PEMと呼ぶこととする。図Ⅲ.2.1.2-1-121に示すように、引き出し電圧を大きくすると、歪が改善することがはっきりと見て取れる。図Ⅲ.2.1.2-1-122はa-type PEMとb-type PEMの位置ずれ量、信号強度劣化、線幅変化量の比較である。位置ずれ量は約2.5倍の改善が見られた。これは以下の式で、理論的にも説明できる。

$$p = \sqrt{2m_e E}$$

ここで E はSEの運動エネルギー、 p は運動量、 m_e は電子の質量である。この式は運動量が運動エネルギーの平方根に比例することを示しており、SEの運動エネルギーを7.5倍にすると、運動量が $\sqrt{7.5}$ (≈ 2.7)倍になり、位置ずれ量が約2.5倍の改善したこととほぼ一致する。また、信号強度劣化と線幅変化量も大きく改善し、正帯電と負帯電との違いが小さくなっていることも分かった。このように、引き出し電圧のを大きくすることは、画像歪に伴う画像劣化に効果が分かった。



図Ⅲ.2.1.2-1-121 引き出し電圧を7.5倍大きくした場合のシミュレーションによるPEM画像歪。L1の100nm左に帯電を模擬した電極を設置し、その電極に-10Vから+10Vまでの電位を印可した。



図Ⅲ.2.1.2-1-122 a-type PEM と b-type PEM の(a)位置ずれ量、(b)信号強度劣化、(c)線幅変化量の比較。

(iii) まとめ

写像投影型電子顕微鏡の画像歪をシミュレーションを用いて解析した。画像歪は、結像光学系を通った後の像面で再現でき、局所電界効果 (TypeII) で説明することができた。ライン部の位置ずれ、コントラスト低下、線幅変化が同時に観察された。これらの現象は負帯電の場合に顕著であり、帯電部と二次電子のクーロン力だけではなく、帯電部と引き出し電圧によって生じる電位分布が歪現象に影響を与えていることが分かった。引き出し電圧を大きくすることによって歪は緩和された。

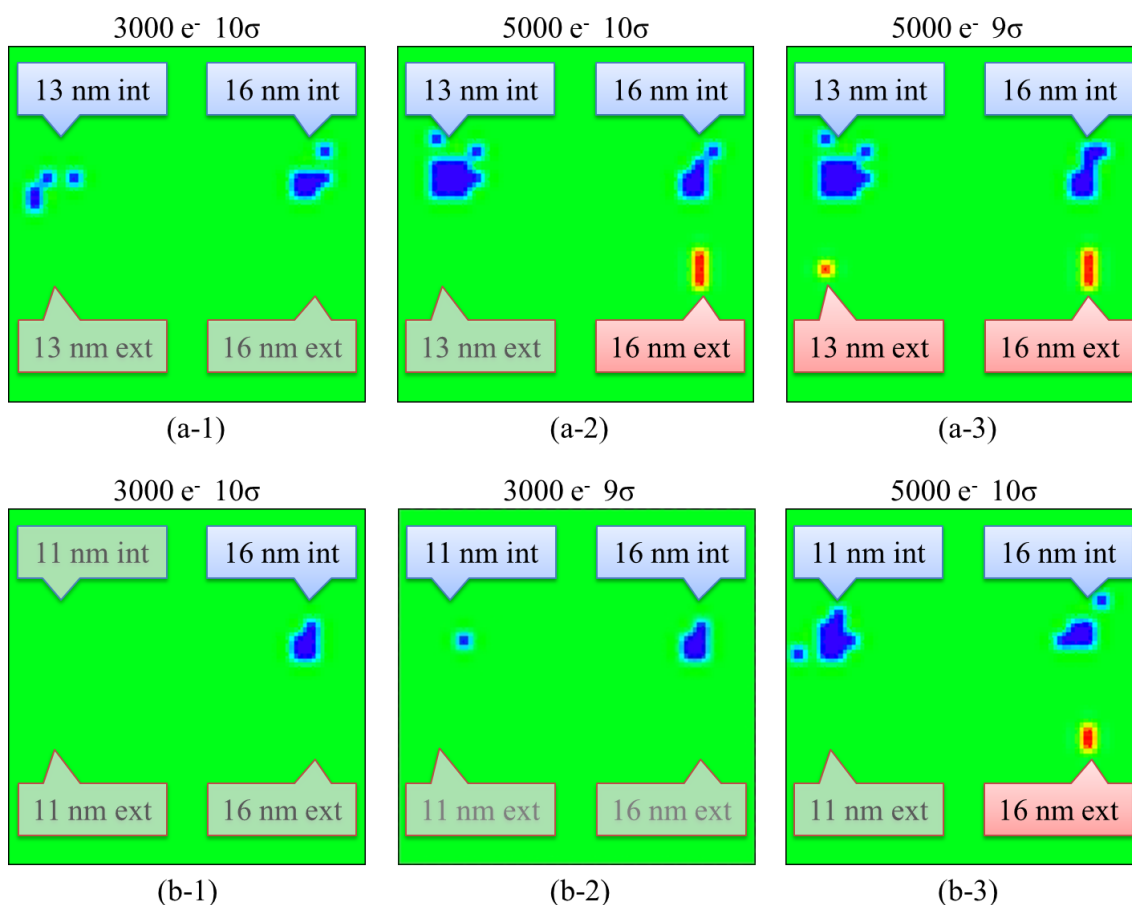
(c) PEM方式の hp11nm への適用検討

(i) 検討の目的

hp11nm 用 EUV マスクの PEM 画像を解析することにより、欠陥検出条件(必要な電子数)を予測すること。

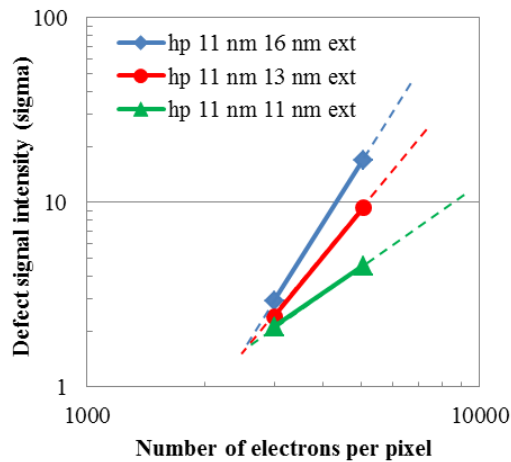
(ii) 研究内容及び成果

hp11nm 用 EUV マスクである hp44nmL/S パターン上に形成した欠陥の検出精度をシミュレーションによって求め、ピクセルあたりに必要な電子数を導出した。欠陥サイズは 16nm、13nm、11nm とした。プリンタビリティ検討の結果、13nm 凸欠陥が hp44nmL/S パターン上のクリティカル欠陥であることが判明したため、13nm 凸欠陥が 10σ 以上で検出できる検出条件を求めた。検知器のピクセルサイズは 11nm とした。



図Ⅲ.2.1.2-1-123 hp44nmL/S パターン上 16nm、13nm、11nm サイズ欠陥のシミュレーションによる検査結果。(a-1)-(a-3)は 13nm と 16nm サイズ欠陥、(b-1)-(b-3)は 11nm と 16nm サイズ欠陥の結果。11nm ピクセルあたりの電子数と閾値はそれぞれ画像上部に示す。

図Ⅲ.2.1.2-1-123 にシミュレーションによる検査結果を示す。hp16nm の場合と同様、凸欠陥よりも凹欠陥の方が高感度であり、3000 電子の場合、13nm 及び 16nm 凹欠陥のみ検出できた。5000 電子の場合、13nm の凹欠陥は検出できるが、凸欠陥できない。しかしながら、欠陥信号強度は 9.3σ であり、閾値を 9σ とすると擬似欠陥なく検出できる信号強度であった。11nm 凹欠陥は 3000 電子の場合においても検出できなかったが、欠陥信号強度は 9.5σ であり、閾値を 9σ とすると擬似欠陥なく検出できる信号強度であった。



図Ⅲ.2.1.2-1-124 hp44nmL/S パターン上 16nm、13nm、11nm サイズ欠陥検出感度の電子数依存性。

図Ⅲ.2.1.2-1-124 に示すように、欠陥信号強度と電子数との関係を両対数グラフで表すと、べき乗関数で直線近似できるため、それぞれの欠陥に必要な電子数を外挿または内挿することにより見積もることができる。表Ⅲ.2.1.2-1-9 にその結果をまとめる。

表Ⅲ.2.1.2-1-9 hp11nmL/S パターン上の欠陥検出に必要な 11nm ピクセルあたりの電子数

	11 nm	13 nm	16 nm
Extrusion	8700	5200	4300
Intrusion	3100	<3000	<3000

13nm 凸欠陥を検出するためには 5200 電子以上必要であり、11nm 凸欠陥は 8700 以上必要であることがわかった。

(iii) まとめ

hp11nm 用 EUV マスクである hp44nmL/S パターン上 13nm サイズ欠陥を検出するための条件は、検出器のピクセルサイズを 11nm とした場合、ピクセル辺り 5200 個以上必要であることがわかった。

[8] 欠陥検出用の論理と回路の検討

(a) 欠陥検出高精度化論理の設計と効果見積もり

(i) 検討の目的

hp 16 nm 微細加工技術に対応するPI装置の高感度化により、hp 11 nm 以細の世代に対応可能な EUV マスク PI 基盤技術を確立することを目的として、PI 装置に搭載する欠陥検出用の論理と回路を高精度化するための設計と効果の見積もりを行う。今回、開発をおこなっている PI 装置の欠陥検査方式は、マスク上に複数おかれたチップダイ同士を比較して差異を見つけ欠陥を同定するダイ比較方式を採用している。ダイ比較の欠陥検査をおこなう上で、比較をおこなう二つのダイの信号強度分布が欠陥部を除いて正確に一致していることが重要である。今回の検討では、欠陥検出誤差の原因となるお互いのダイ同士位置ずれと、信号強度分布のずれを抑制する、画像信号の処理手法について検討をおこなった。

(ii) 研究内容及び成果

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2) EUV マスクパターン欠

「欠陥検査装置開発」において開発した PI 装置を用いて、欠陥検出用の論理の hp 11 nm への適用性を検討した。本検討では欠陥検査装置で、より繊細な欠陥を検出できるようにアルゴリズムを検討するもので、既存の電気基板を前提にハード化が可能なアルゴリズムの検討をおこなう。その後、アルゴリズムをシミュレーションにより検証する。図 III.2.1.2-1-125 に、ダイ比較方式における欠陥検出処理の概要を示す。例として EUV マスク上 hp 64 nm L/S(ウェハ上 16 nm L/S)中の 45 nm サイズ凹欠陥の PEM 画像と、欠陥検出信号を示す。欠陥部は採取画像の中央部に配置されている。EUV 光を反射する多層膜上には 2.5nm の Ru-cap 層が形成され、その上に EUV 光の吸収体が 52 nm 厚さの TaBN 上に 14 nm 厚の TaBO で形成されている。

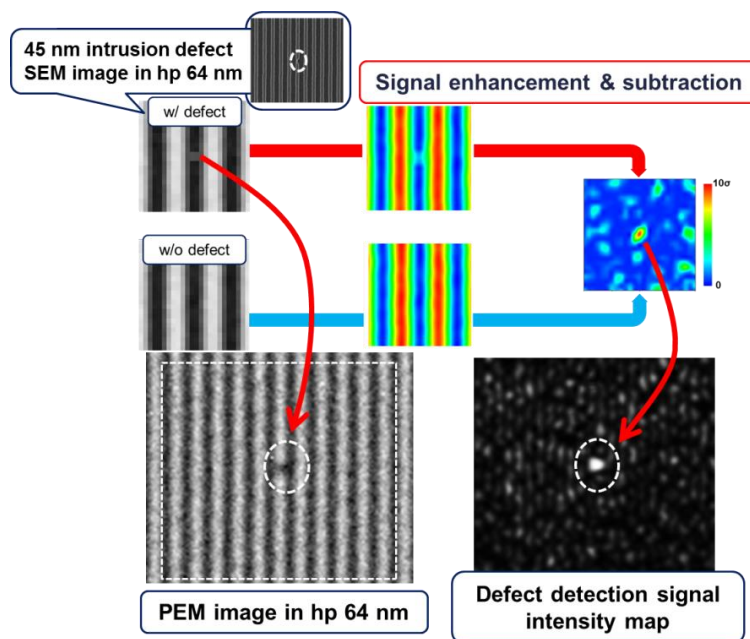


図 III.2.1.2-1-125 ダイ比較方式における欠陥検出処理の概要と、欠陥検出信号の例

従って、高精度欠陥検出技術を実現するためには、PEM 画像に含まれる輝度むらを比較ダイ間で欠陥信号を低下させることなくそろえることが重要となる。また、欠陥検出信号の欠陥部における信号強度は、欠陥のサイズに依存して変化する。サイズの異なる凹凸欠陥から得られる欠陥部から得られる信号強度のサイズ依存性を凹凸欠陥に対して測定した結果を図 III.2.1.2-1-126 に示す。欠陥サイズの減少に伴い、凹凸欠陥共に信号強度が線形の関係に従って低下し、サイズが 0 の場合に検出信号が 0 に収束する関係となっている。従って、欠陥検出信号は欠陥サイズと同等の指標と考えることができるため、検出必要な微小欠陥のサイズから、必要とされる欠陥検出信号を予測することができる。

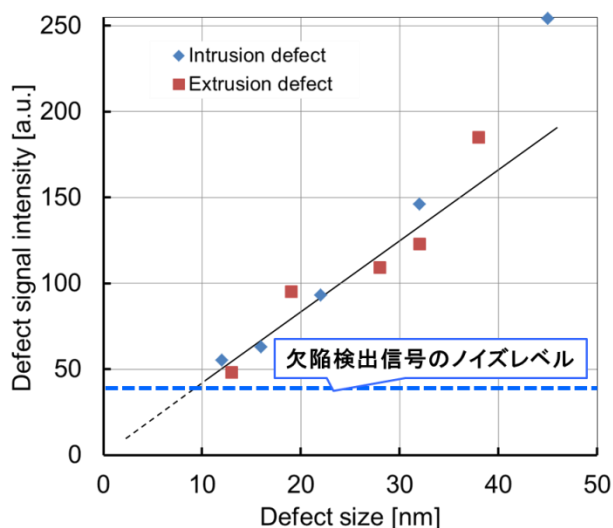


図 III.2.1.2-1-126 hp64nm L/S 中の欠陥に対する欠陥検出信号

欠陥検出の高感度化を実現するためには、(1)欠陥検出信号の強度向上もしくは(2)欠陥検出信号に含まれるノイズ信号の低減、が必要となる。(1)については欠陥検出信号に適用する画像処理の改良、PEM 光学系の解像度向上などが考えられ、(2)については画像信号に含まれる誤差成分の補正精度向上による誤差低減や、EUV マスクパターンの製造誤差低減などが考えられる。欠陥検出信号の強度が変わらない場合でも、ノイズ信号の強度が低下できれば、更なる微小サイズ欠陥の検出が可能となる。そこで、欠陥検出信号の強度マップに注目した。図 III.2.1.2-1-127 に hp 64 nm L/S パターン中の 32 nm サイズ凹欠陥から得られた欠陥検出信号の強度マップ(a)と、マップ中の信号強度の発生頻度の分布をヒストグラム表示したものを(b)に示す。図中(4)で示されるピークは、欠陥検出の欠陥に対する信号に含まれる

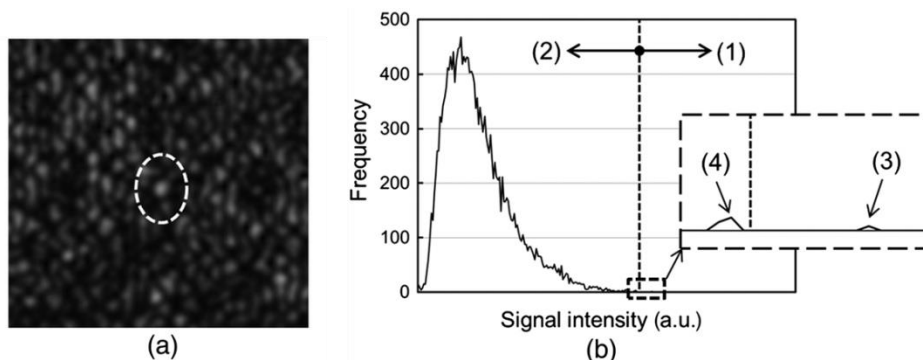


図 III.2.1.2-1-127 hp64nm L/S 中欠陥検出信号

欠陥部以外の最大値を示し、(3)に示すピークは検出すべき欠陥から得られた信号の最大値を示す。図中の(1)と(2)により示される信号強度の閾値により、欠陥以外の部分から得られる信号強度分布は検出すべき欠陥から得られる最大信号強度と分離できるため、疑似欠陥を生じることなく目的の欠陥を検出することができる。以上のことから、目的とする欠陥から得られる信号と、欠陥部以外から得られる信号分布との間に信号差が十分に確保できることが欠陥検出高感度化に必要であることがわかった。

次に、疑似欠陥なく目的欠陥が検出できる条件における、欠陥検出信号マップの分布を定量的に検討する。採取画像において、欠陥部以外から生じる画像信号はノイズも含めて同一に近いと考えられる。しかし、画像採取の過程においては信号のばらつきが生じる要因が数多く存在する。

画像面内に信号強度変動が生じると、欠陥検出信号にその変動が現れる。PEM光学系を用いたEUVマスクパターンの画像採取においては、マスクパターン面に電子線を照射することにより、EUVマスクパターンを構成する材料の二次電子放出係数(Secondary Electron Emission Coefficient, SEEC)に従い発生した二次電子分布が画像として得られる。発生した電子は帯電や電子線照明の履歴の影響を受ける可能性があり、設計上のEUVマスク材料特性との電子線照明エネルギーにより決められる電子線画像形成モデルからのずれが生じ、結果として欠陥検出信号の劣化につながる。例えば、画像の面内輝度むらは、照明光の不均一性やマスク材料の局所的な特性変動によっても生じる。このような採取画像の面内不均一性が生じた状態でも安定したダイ比較方式での欠陥検出を実現するためには、目的とする欠陥から生じる信号強度と、欠陥以外の部分から生じる信号ノイズの分布との分離量を増加させる必要がある。欠陥部を含む採取画像と、ダイ比較方式の検査を行うための参照画像とを比較し、欠陥検出のための差信号を生成する際の誤差を低減するために、マスク上の hp 64 nm L/S パターンから得られる電子線画像の、お互いの信号の全体的なレベル差と、信号振幅の差(Image Intensity Unevenness,)を補正する機能(I²U補正)を開発した。実機から得られた PEM 画像を用いて I²U 補正を行った例を図 III.2.1.2-1-128 に示す。(a)にサイズ 32 nm の凸欠陥が採取画像の中央部に配置された欠陥部の PEM 画像を、(b)にダイ比較方式の欠陥検出を行うための参照部の PEM 画像を示す。それぞれの画像から、画像各部の緩やかな信号レベル変動成分を抜き出して等高線表示したものを(c)、(d)に示す。等高線の濃さと信号強度を対応させたバーを図の脇に付記した。それぞれの画像の全体的なレベルと信号の変化(勾配)に大きな差があり、この信号をそのままダイ比較方式の検査に用いると疑似欠陥の発生を招くこととなる。

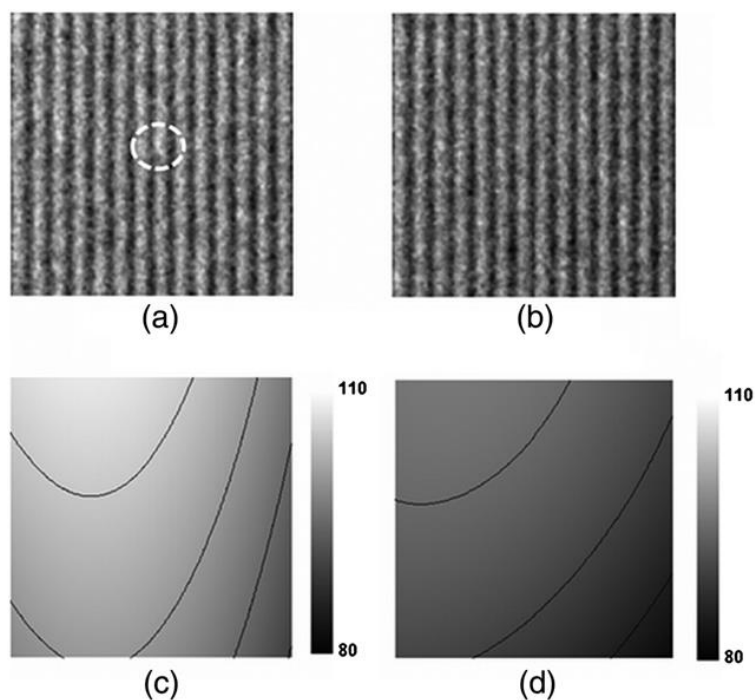


図 III.2.1.2-1-128 ダイ比較方式の検査に用いた PEM 採取画像と面内の信号レベル変動

採取画像に含まれるお互いの信号の全体的なレベル差と、信号振幅の差を補正(I²U補正)するための信号処理手順を図 III.2.1.2-1-129 に示す。 $I_{w/defect}$ 及び $I_{w/o defect}$ は、採取した欠陥部及び参照部の画像である。図中の(a)及び(b)において採取画像の低周波成分(緩やかな信号レベル変動)を除去する。次に、採取画像を所定の領域に分割し、図中(c)及び(d)で示される各々の領域における低周波成分を用いて欠陥部信号と参照部信号間の信号レベルずれを補正する。(c)と(d)を平均した画像は、 $I_{w/defect}$ 及び $I_{w/o defect}$ の平均レベルを揃えるための代表値となる。以上のように規格

化された $I_{w/defect}$ と $I_{w/o defect}$ の差をとることで、 I^2U 補正を適用した欠陥検出用の差信号を得ることができる。本アルゴリズムは既存の電気回路基板を前提にハード化が可能なアルゴリズムである。

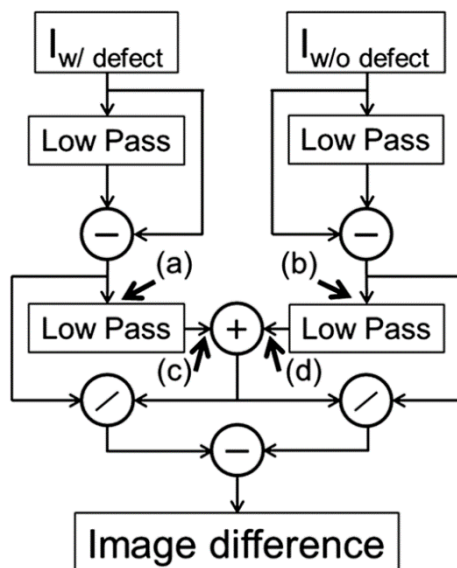


図 III.2.1.2-1-129 Image Intensity Unevenness 補正(I^2U 補正)のブロック図

以上の処理をシミュレータに搭載し、図 III.2.1.2-1-128(a)、(b)の画像に適用した結果を図 III.2.1.2-1-130 に示す。

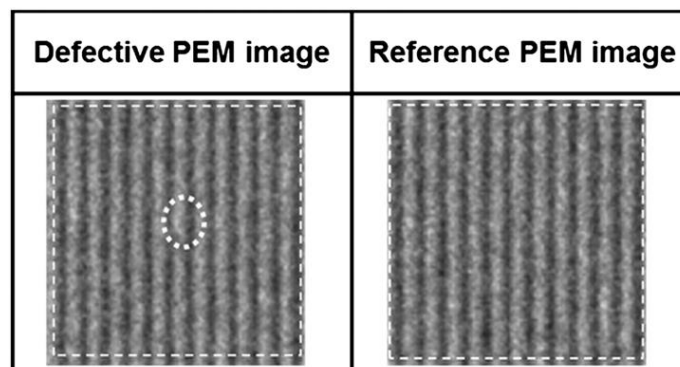


図 III.2.1.2-1-130 ダイ比較方式の検査に用いた PEM 採取画像と面内の信号レベル変動

画像間に生じていた全体的な信号のレベル差及び画像面内の輝度むらが補正されていることがわかる。補正による効果を定量的に見積もるため、欠陥検出信号の分布をガンマ分布で近似した。ガンマ分布 $f(x)$ は

$$f(x) = x^{k-1} \frac{e^{-x/\theta}}{\Gamma(k)\theta^k}, \text{ for } x > 0$$

で定義される確率密度関数である。ここで、 $\Gamma(k)$ はガンマ関数、 k は形状母数、 θ は尺度母数である。ガンマ分布の確率変数を χ とするとき、平均 $E(\chi)$ 、分散 $V(\chi)$ は次のようにあらわされる。

$$E(\chi) = k\theta, \quad V(\chi) = k\theta^2$$

欠陥検出信号の強度マップを I^2U 補正あり/なしそれぞれの場合について計算し、ガンマ分布による近似曲線を求めた。結果を図 III.2.1.2-1-131 に示す。

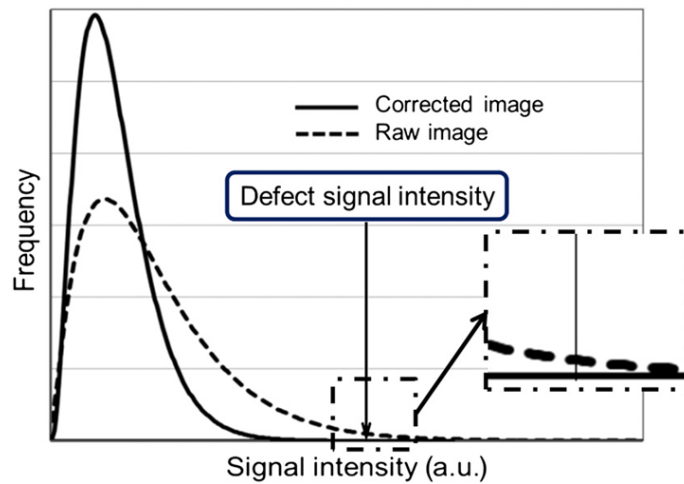


図 III.2.1.2-1-131 ガンマ分布で近似した I²U 補正前/後の欠陥検出信号マップの信号出力分布

図中、検出目標欠陥の信号強度近傍の信号分布を拡大し、矢印の先に示す。I²U 補正の適用により、欠陥信号と欠陥部以外の検出信号が形成する信号強度分布との分離量が増加し、欠陥信号との重畳が 0 に低下していることがわかる。得られたガンマ分布から、補正前後の平均値 $E(\chi)$ 及び標準偏差値(分散 $V(\chi)$ の平方根)を求めた。結果を図 III.2.1.2-1-132 に示す。

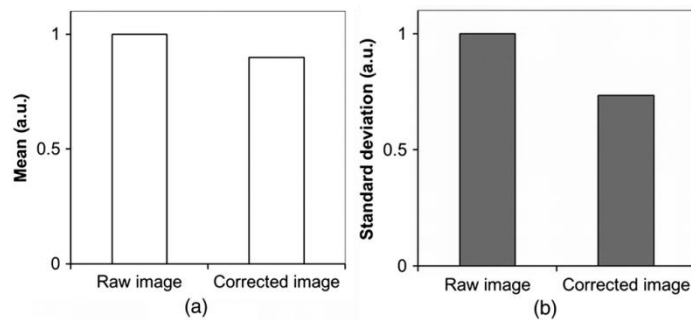


図 III.2.1.2-1-132 ガンマ分布で近似した I²U 補正前/後の欠陥検出信号マップの信号出力分布

補正前の値で規格化した平均値と標準偏差を(a)及び(b)に示す。I²U 補正を適用することにより、それぞれ10%及び30%低減しており、図 III.2.1.2-1-131 の信号分布形状の変化と対応付けすることができた。更に、補正あり/なしの画像信号を用いて欠陥検出処理を行い、その効果を評価した。検出した欠陥は hp 64 nm 中の 32 nm サイズ凸欠陥である。結果を図 III.2.1.2-1-133 に示す。

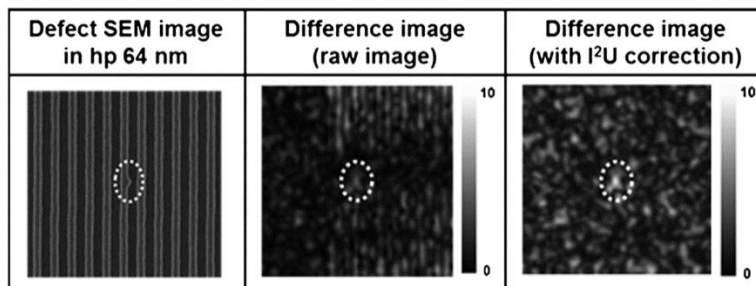
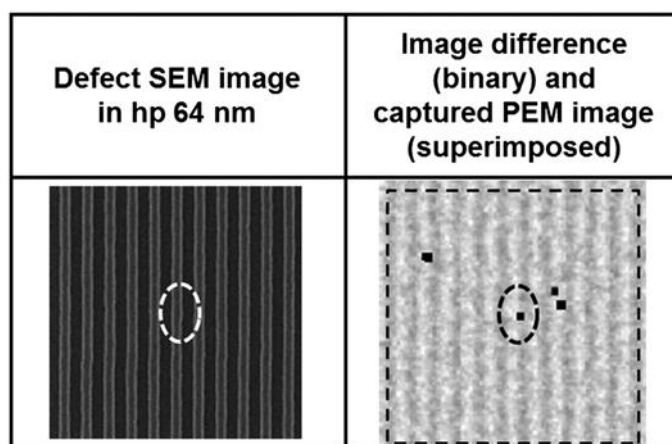


図 III.2.1.2-1-133 I²U 補正あり/なし条件における欠陥検出結果

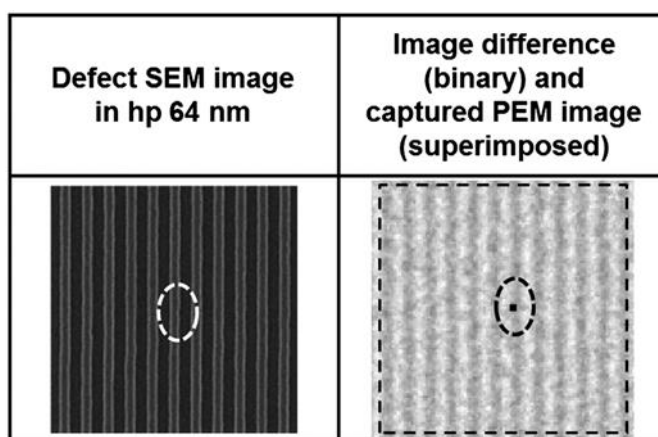
図中左の枠内に欠陥部の SEM 画像を示す。白点線の楕円内に凸欠陥が配置されている。中央

にI²U補正なしの場合の欠陥検出信号マップを、右の枠内にI²U補正を適用した上で欠陥検出処理を行った場合の欠陥検出信号マップを示す。マップの右側に信号強度とマップの色の濃さを対応付けたバーを付記した。信号強度は欠陥検出信号マップのばらつきで規格化した。欠陥検出信号マップに対して閾値を設定し、値が上回るものを欠陥と判定する。補正なしの場合は、目標欠陥以外に閾値を上回る点が画像内に存在し疑似欠陥となるが、補正ありの場合は欠陥部の信号強度は欠陥部以外の信号強度分布を超えた値となり、疑似欠陥なく目標欠陥が検出できた。欠陥検出信号の指標となるS/N比は補正を適用することで補正なしの場合に対して40%向上し、I²U補正が欠陥検出感度向上に有効であることがわかった。本補正を微小欠陥の検出に適用した。13 nmサイズ凸欠陥の結果を図Ⅲ.2.1.2-1-134に、12 nmサイズ凹欠陥の結果を図Ⅲ.2.1.2-1-135に示す。左側の枠内に欠陥部のSEM画像を示す。白点線の楕円内に目標欠陥が配置されている。右側の枠内には欠陥検出信号を閾値により二値化した結果を示す。目標欠陥の位置を特定するため、欠陥検査画像を半透明に加工し重ね合わせている。



図Ⅲ.2.1.2-1-134 13nm サイズ凸欠陥の検出結果

13 nm サイズ凸欠陥の位置を黒点線で囲んで表示した。目標欠陥が明瞭に認識されているが、複数の疑似欠陥も生じている。更なる欠陥検査感度向上を検討する。



図Ⅲ.2.1.2-1-135 12nm サイズ凹欠陥の検出結果

12 nm サイズ凹欠陥の位置を黒点線で囲んで表示した。目標欠陥が疑似欠陥なく検出されており、hp64nm中の欠陥ではあるが、hp 11 nm 世代対応の欠陥検出目標値である13 nm以下の欠陥検出が可能であることがわかり、hp 11 nm 以細世代への対応可能性を確認した。

(iii)まとめ

hp 16 nm 微細加工技術に対応するPI装置の高感度化により、hp 11 nm 以細の世代に対応可能な EUV マスク PI 基盤技術を確立するため、PEM 採取画像の含まれる輝度むらを高精度に補正する技術(I²U 補正)を開発した。開発技術が既存の電気基板を前提にハード化が可能であることを確認し、アルゴリズムをシミュレーションにより検証するため、EUV マスク上に作りこんだ欠陥検出感度評価パターン中の凹凸欠陥の画像を、開発した PI 装置を用いて採取し、I²U 補正の効果を評価した。評価のため欠陥検出信号マップから得られる信号強度ヒストグラムをガンマ分布で近似し、その平均値及び標準偏差が補正により低減し、欠陥部から得られる欠陥信号と、欠陥部以外の信号強度分布との分離量が増加することを定量的に確認した。更に hp64nm 中の微小サイズ欠陥の検出を試み、hp 11 nm 世代対応の欠陥検出目標値である 13 nm 以下である 12 nm サイズ凹欠陥が疑似欠陥なく検出できることがわかり、PI 装置仕様検討の目標を満足するPI装置の実現を確認した。

(b) 欠陥検査の高性能化ツールの設計と効果見積もり

(i)検討の目的

hp 16 nm 微細加工技術に対応するPI装置の高感度化により、hp 11 nm 以細の世代に対応可能な EUV マスク PI 基盤技術を確立することを目的として、PI 装置の欠陥検査を高性能化するためのツールの設計と効果を見積もる。

(ii)研究内容及び成果

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において開発したPI装置を高性能化するためには、hp 16 nm 世代対応の欠陥検出感度を達成した PI 装置の欠陥検出アルゴリズムを用いて、hp11nm 以細対応の欠陥検出感度が得られることを確認、調整する必要がある。図 III.2.1.2-1-136 にパターン微細化における欠陥検出感度向上の必要性を模式化した図を示す。ベースパターンサイズ縮小に伴い、スケーリング則により検出必要な欠陥サイズも減少する。更に、マスク製作及びデバイス製造上の誤差要因による影響も相対的に増加するため、目標欠陥を疑似欠陥なく検出できるように欠陥検出アルゴリズムを調整するには多大な労力と時間が必要となる。

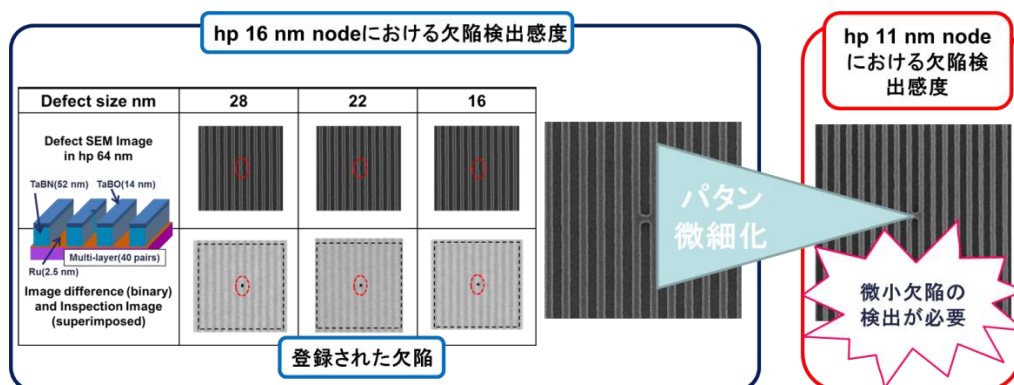


図 III.2.1.2-1-136 hp 16 nm 世代対応から hp 11 nm 世代対応に必要な欠陥検出高感度化

これまで、パターン微細化に伴い検出が必要となる欠陥が新たに生じた場合は、ユーザは欠陥検査装置メーカーに依頼して欠陥検出アルゴリズムのパラメータ最適化を行っていた。また、得られた最適化により所望の性能が得られていることを確認する作業も必要となり、最終的に目的とする欠陥検出性能を得るためには多大なコストと労力が必要となっていた。そこで、以上の最適化を自動的かつ高速に行う手法の開発が必要となってきた。これらの問題点を解決するため、開発したラーニングシステムの構成を図 III.2.1.2-1-137 に示す。採取画像に対して、欠陥信号の強調及

びノイズ成分の低減処理を行いお互いの差分信号から欠陥検出信号を生成し、ダイ比較方式より欠陥検出を行う画像処理ユニットと、欠陥検出が必要となる欠陥画像の登録欠陥ライブラリと、これらのデータと画像処理ユニットとの入出力インターフェースを備えたパラメータ最適化エンジンとを PEM 方式の欠陥検査光学系に付加している。パラメータ最適化エンジンにはオープンソースで開示されており世界中でダウンロード可能な Dakota ツールキットを採用した。本ソフトウェアは最適化を行うための目標値の設定などをユーザの要求に合わせて柔軟に設定できる特徴を持っている。

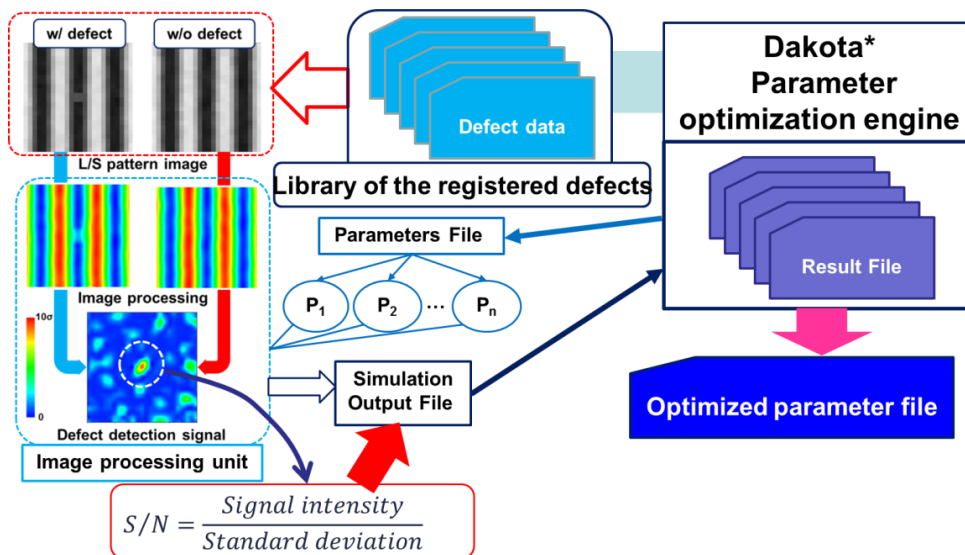


図 III.2.1.2-1-137 開発したラーニングシステムの構成

登録欠陥ライブラリから、欠陥検出が必要となる目標欠陥画像をデータ処理ユニットに入力し、欠陥検出処理を実施することで、欠陥検出信号を算出する。ここでは、欠陥検出信号として、欠陥部の信号強度を欠陥部以外の信号ばらつきで規格化した値(S/N 比)を採用している。パラメータ最適化エンジンは画像処理システムに異なる欠陥検出感度調整用のパラメータを与えて繰り返し欠陥検出信号を求めることで、欠陥検出信号の最大値とそのときの最適欠陥検出感度パラメータを得る。以上の処理をすべての登録欠陥ライブラリの画像に対して行い、結果として登録された欠陥すべてに対して疑似欠陥が生じることなく欠陥検出が行えるように最適化したパラメータを得ることができる。以上の機能を備えたラーニングシステムの GUI 概要を図 III.2.1.2-1-138 に示す。

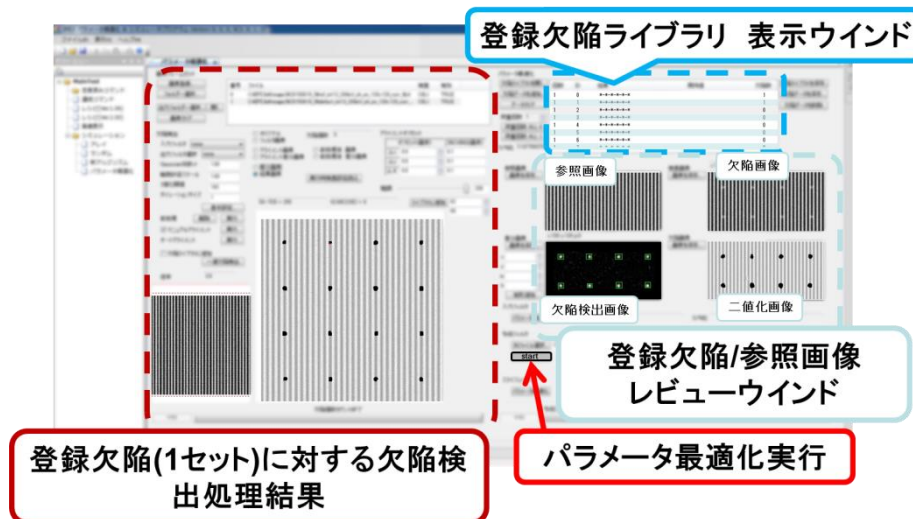


図 III.2.1.2-1-138 開発したラーニングシステムの GUI 概要

画面左には登録した欠陥画像を用いて、画像処理ユニットにより欠陥検出処理を行い欠陥を検出した結果を示す。右上には登録欠陥がリスト形式で示されており、任意の一組の登録欠陥を選択することで、参照画像/欠陥画像/欠陥検出画像/二値化画像を確認することが可能となっている。検出が必要となる欠陥は、図中の緑の矩形で囲むことにより登録されており、全ての欠陥の登録が完了した後に[Start]ボタンを押すことで欠陥検出感度を調整するパラメータの最適化が自動で実施される。ラーニングシステムを動作させることでパラメータ最適化が正しく行われることを、シミュレーション画像及び実画像を用いて確認した。図 III.2.1.2-1-139 に本評価に用いたシミュレーション画像の構成を示す。hp 64 nm パターン中に、32 nm サイズのドット欠陥を 4×4 個マトリクス状

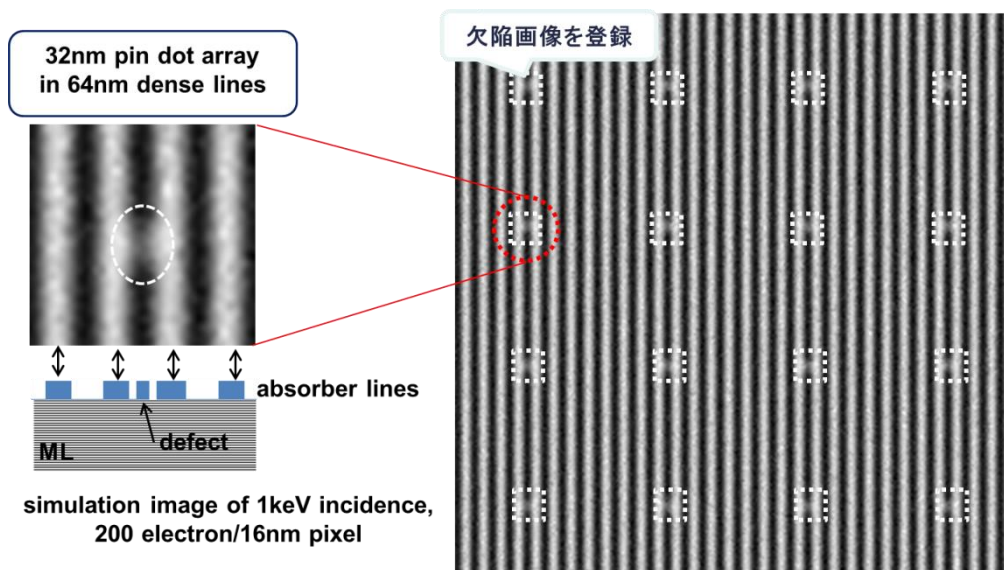


図 III.2.1.2-1-139 本評価に用いたシミュレーション画像の構成

に配置し、全ての欠陥画像を検出必要欠陥として登録する。ラーニングシステムを用いて、欠陥検出信号を最大化するパラメータを自動で算出する。パラメータ最適化動作の模式図と、パラメータ最適化により得られた欠陥検出結果を図 III.2.1.2-1-140 に示す。

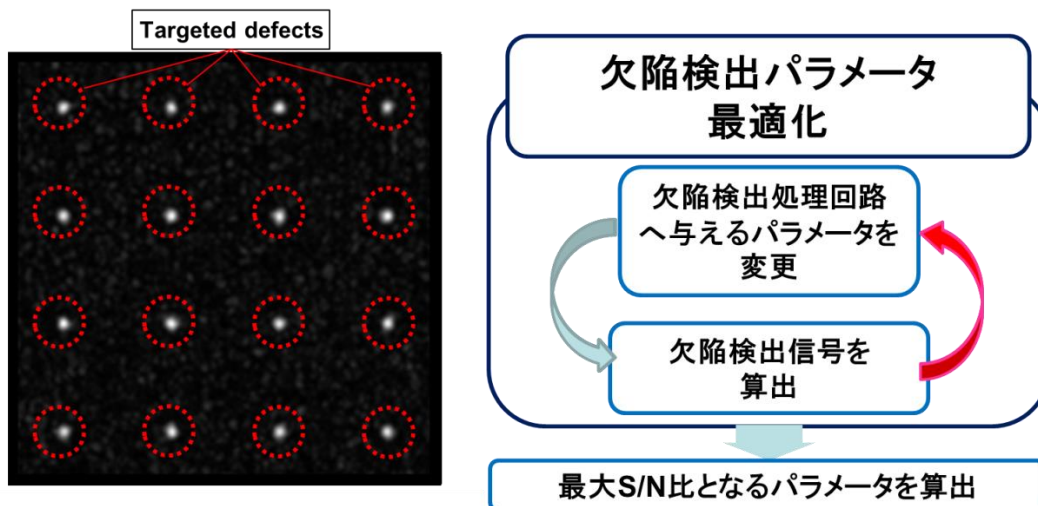


図 III.2.1.2-1-140 シミュレーション画像を用いた欠陥検出パラメータ最適化結果

欠陥検出を行う画像処理ユニットに、異なる欠陥検出感度調整パラメータを順次与えていき、その都度欠陥検出信号を算出する。最終的に、欠陥検出信号(S/N 比)が最大値を得ると共に、最適

パラメータを決定する。結果として、最適パラメータを用いることで、図に示すように登録した hp 64 nm パターン中の 32 nm サイズのドット欠陥が疑似欠陥なく検出できることを確認できた。次に、実際に採取した PEM 画像を検出必要欠陥としてラーニングシステムに登録することにより、欠陥検出感度を最大化するための欠陥検出パラメータ最適化を行った。図 III.2.1.2-1-141 にパラメータ最適化及び欠陥画像の処理結果を示す。hp 64 nm 中に作りこんだサイズ 45 nm 凹欠陥画像に対して、シミュレーション画像と同様に、異なる欠陥検出感度調整パラメータを順次与えていき、その都度欠陥検出信号を算出する。最終的に、図に示すように登録した 45nm サイズ凹欠陥が疑似欠陥なく検出できることを確認できた。以上により、開発したラーニングシステムの機能の有効性を確認した。

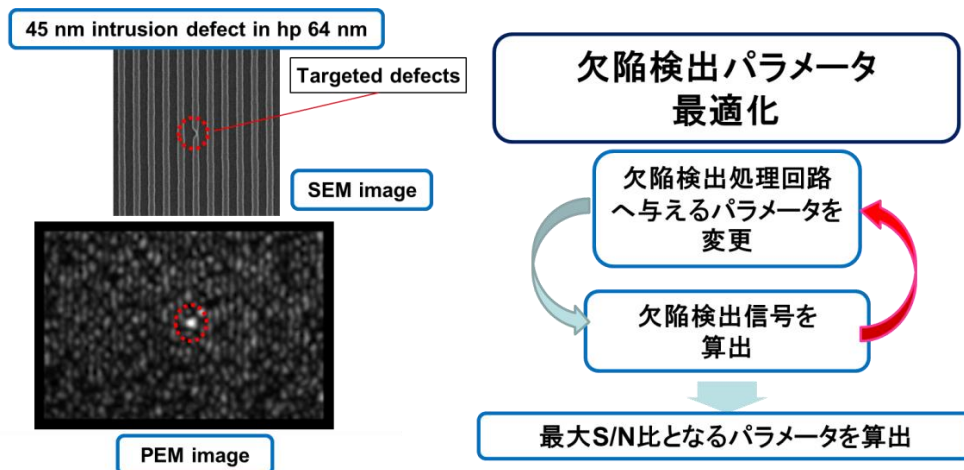


図 III.2.1.2-1-141 PEM 光学系により採取した設計欠陥画像を用いた欠陥検出パラメータ最適化結果

更に、欠陥検出パラメータの最適化処理を行う機能として重要な指標となる、処理時間に注目した。欠陥検査の高性能化ツールに対して必要とされる機能とその評価結果を図 III.2.1.2-1-142 に示す。

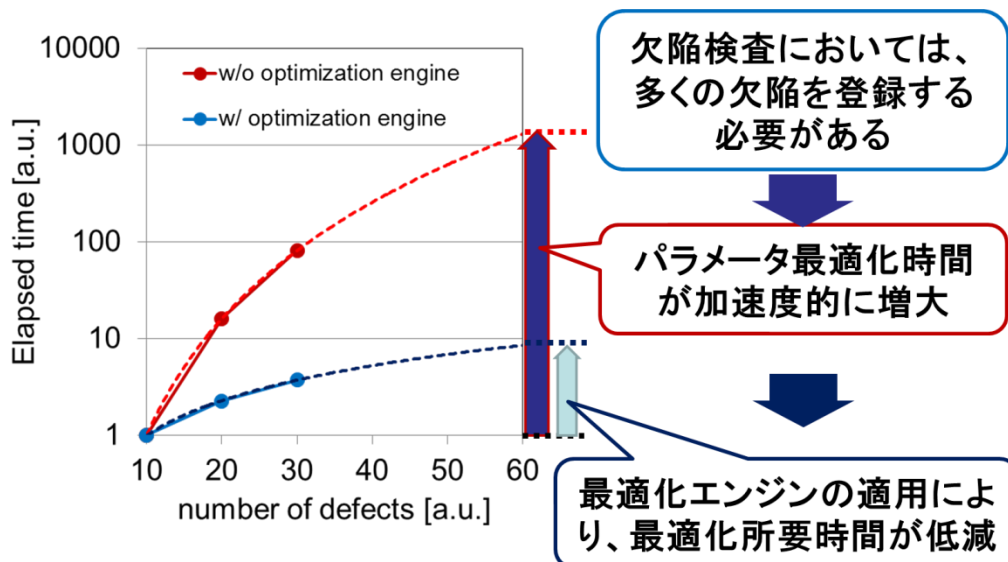


図 III.2.1.2-1-142 最適化エンジンを用いることによる、欠陥検出パラメータの最適化時間短縮効果

図 III.2.1.2-1-136 に示したようなパターン微細化における欠陥検出の高感度化においては、マスク製作及びデバイス製造上の誤差要因による影響も相対的に増加するため、欠陥を規定する検出信号の閾値と信号ノイズとのマージンが著しく低下する。従って、検出必要な欠陥画像を数多く

登録することで、閾値を精密に決定できるようにパラメータの最適化を行う必要がある。図中の最適化エンジンを用いずにパラメータ最適化を行う時の所要時間は、登録欠陥数の増大により、加速度的に増加する。一方、最適化エンジンを適用することにより、パラメータの組み合わせ探索を効率化することが可能となる。従って、登録欠陥数の増大に対してパラメータ最適化時間も増加量削減への有効性を確認できた。以上述べたように、開発した欠陥検査の高性能化ツールを検査装置に搭載し、hp 11 nm 世代対応の欠陥検出感度を評価した。図 III.2.1.2-1-143 にマスク上 hp 44 nm (ウェハ上 hp 11 nm)の凸欠陥のダイ比較方式による欠陥検出結果のアップデートを、図 III.2.1.2-1-144 にマスク上 hp 44 nm (ウェハ上 hp 11 nm)の凹欠陥のダイ比較方式による欠陥検出結果のアップデートを示す。

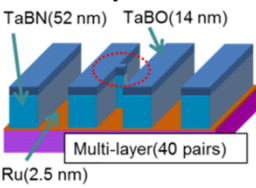
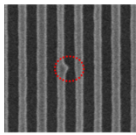
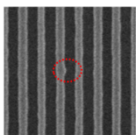
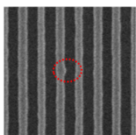
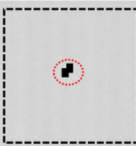
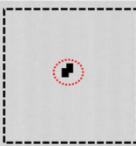


Defect size nm	23	Defect size nm	15
Defect SEM Image in hp 44 nm 		Defect SEM Image in hp 44 nm 	
Defect detection result 		Defect detection result 	

図 III.2.1.2-1-143 マスク上 hp 44 nm 凸欠陥の検出結果アップデート

これまでの欠陥検出感度評価において、凸欠陥における最小検出サイズは 23 nm であったが、開発の進捗による装置の改良及び安定性向上により、凸欠陥における最小検出サイズが 15 nm に改善した。なお、目標欠陥以外にも欠陥検出閾値を超える点(疑似欠陥)も確認され、更なる欠陥検出アルゴリズムの改良及び PEM 光学系の改良が必要であり検討を継続する。これまでの欠陥検出感度評価において、凹欠陥における最小検出サイズは 16 nm であったが、開発の進捗による装置の改良及び安定性向上により、凹欠陥における最小検出サイズが 13 nm に改善した。なお、[2](a) インパクトの欠陥形状依存性 において述べたように、hp 11 nm 世代における検出が必要な欠陥サイズは 13 nm であり、上記の結果を以って開発目標の欠陥サイズ検出が達成されたこととなり、本レーニングシステムの開発を通じて PI 装置の欠陥検査感度の高性能化効果を実証することができた。

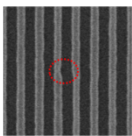
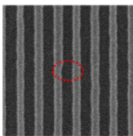
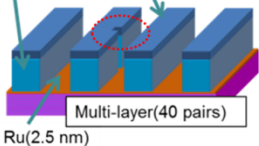
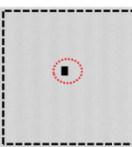
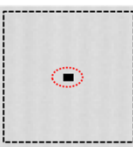
Defect size nm	16	Defect size nm	13
Defect SEM Image in hp 44 nm TaBN(52 nm) TaBO(14 nm) 		Defect SEM Image in hp 44 nm 	
			
Defect detection result 		Defect detection result 	

図 III.2.1.2-1-144 マスク上 hp 44 nm 凹欠陥の検出結果アップデート

(iii)まとめ

hp 16 nm 微細加工技術に対応するPI装置の高感度化により、hp 11 nm 以細の世代に対応可能な EUV マスク PI 基盤技術を確立することを目的として、PI 装置の欠陥検査を高性能化するためのツールとなるラーニングシステムを設計し、シミュレーション及び PEM 光学系を搭載した PI 装置により取得した、hp 44 nm 中の設計欠陥パターンの画像を処理することでその効果を見積もった。PI 装置のリソースを有効活用し、実際の製造プロセスにおける適用を考慮して検出が必要な欠陥画像をライブラリとして保存、登録することで、登録した欠陥が全て疑似欠陥なく検出できる条件を、欠陥検出パラメータの最適化を自動的に行うことで算出した。最適化エンジンに公開ソフトウェアである Dakota を採用し、最適化時間の約 1/100 低減を確認すると共に、開発した欠陥検査を高性能化するためのツールを搭載した PI 装置を用いて最新の状態で欠陥検出感度を評価した。結果、転写性評価シミュレーションなどで見積もられた、最小検出必要サイズ 13 nm の凹欠陥を疑似欠陥なく検出できることがわかり、PI 装置仕様検討の目標を満足する PI 装置の実現を確認した。

(2)-(ii) EUV マスクパターン欠陥検査装置コア技術開発(荏原製作所との共同実施)

【1】 研究開発の目標

(2)-(ii) EUV マスクパターン欠陥検査装置コア技術開発においては、PI 装置を高感度化、及び高スループット化するためのコア技術を開発する。具体的には、hp16nm 以細の微細加工技術に対応した電子ビーム写像投影光学系の研究開発を行うことにより、(2)-(i)において示された許容欠陥サイズの指標に対応可能な EUV マスクパターン欠陥検査基盤技術を確立する。平成23年度に委託研究で開発した電子ビーム写像投影光学系の基本的な機能と性能を試験架台の上で確認し、ハードウェアの高精度化を行う。特に EUV マスクの電子線像の確認と、照明光学系と結像光学系の電子透過率に注目しその性能を精密に評価する手法を確立する。さらに、hp11nm 世代以細に対応するコア技術開発として、PEM 方式の PI 装置の利点である高いスループットを更に高めるために、高速画像取得技術の開発を行い、必要な機能が実現されていることを確認する。

(2) 研究開発の成果

[1] 基本性能評価及び条件最適化

(a) PI 装置のマスク画像信号解析

電子線を用いた PI 装置において、得られた画像により欠陥検出を行うに当たりその解像度と信号ノイズの影響を定量的に見積もることが重要となる。

ここで、検出される電子線量が画像の S/N 比に及ぼす影響を示す。画像のノイズ主要因がショットノイズと仮定すると、一画素あたりの電子数と画像のノイズレベルの関係は図 III.2.1.2-2-1 に示す関係となる。

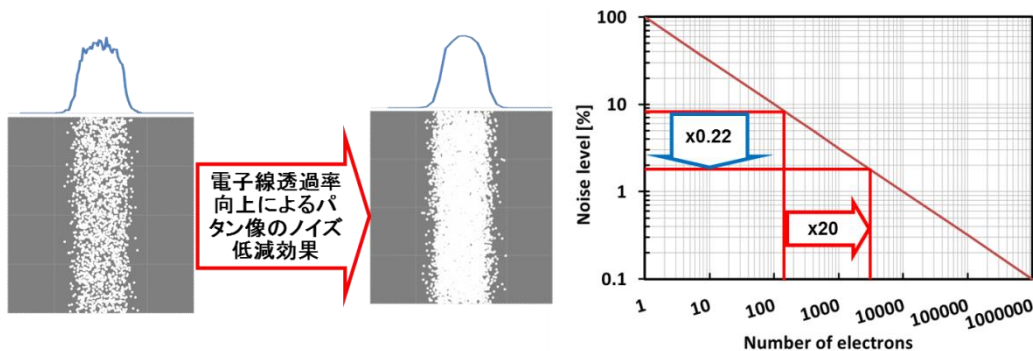


図 III.2.1.2-2-1 電子数と画像のノイズレベルの関係

例として電子数が 20 倍に増加したときのノイズレベルの低下を赤線で示す。ノイズは電子数の平方根に逆比例して減少する。図中に L/S パターンの電子線像の断面プロファイル形状が、電子線の増加に伴いノイズを含まない理想的な形状に近づいていく様子を併せて示す。この結果から、hp16nm 以細の微小欠陥検出のためには、画像のノイズ低減、即ち一画素あたりの電子数確保が重要となることが分かる。

(b) 基本性能評価

結像光学系の解像度評価結果を図 III.2.1.2-2-2 に示す。マスク面上の矩形信号から、エッジプロファイルの信号強度変化を求める。得られたプロファイルを、hp22nm 対応装置の設計値と比較した結果を図中に示す。開発装置におけるエッジプロファイルがより急峻になっていることがわかり、実際の採取画像から明確な解像度向上が得られていることが確認できた。

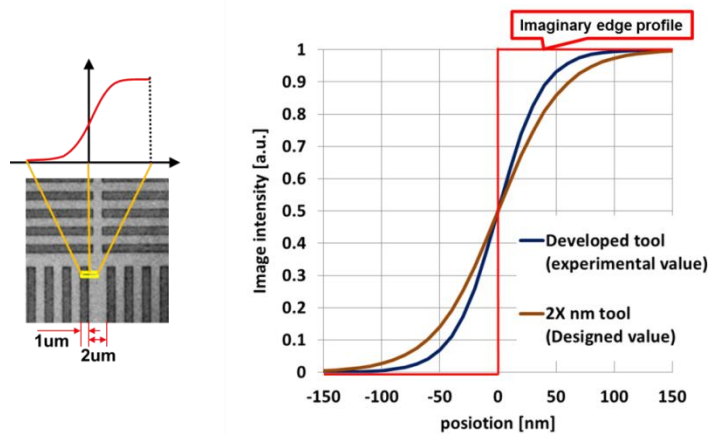


図 III.2.1.2-2-2 矩形パターンの画像採取とエッジプロファイルの算出

改善量を定量的に評価するため、得られたエッジプロファイルを微分することで LSF(Line Spread Function)を求め、これと理想的な矩形波との畳み込み積分を行うことで L/S パターンのコントラストを算出した。得られた hp64nm の L/S パターンから得られる信号プロファイルを 図 III.2.1.2-2-3 に示す。

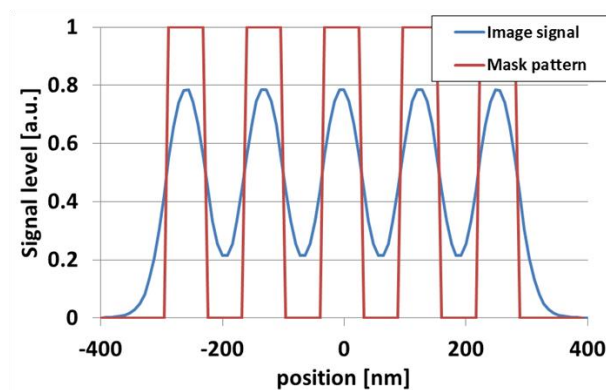


図 III.2.1.2-2-3 採取画像から算出した L/S パターンの信号プロファイル

この波形に基づき、得られる信号コントラストを算出し、hp22nm 対応装置と今回の開発光学系の信号コントラスト(設計値)をプロットしたグラフに重ねて表示したものを 図 III.2.1.2-2-4 に示す。ターゲットとしている hp16nm(マスク上で hp64nm)において、設計値とほぼ同等な信号コントラストが得られていることが確認でき、設計の妥当性と本開発光学系を用いることで目標欠陥検出感度が達成できる見通しが得られた。

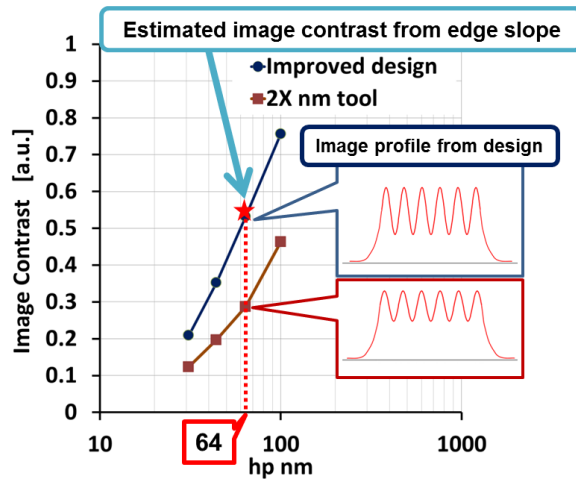


図 III.2.1.2-2-4 採取画像から算出した hp64nmL/S パターンの像コントラストと、設計値の比較

以上の結果より、開発した PI 装置において解像度及び電子線透過率を評価することで、hp16nm 微細加工技術に対応する欠陥検出感度を得るための基本性能が得られていることを確認した。

(e) 結像光学系及び照明光学系の合体評価

図 III.2.1.2-2-5 は、上記1)の場合で、評価用試料を用いた撮像例である。合体した連動動作による 2 次電子像にて、hp64nm と hp44nm のパターン認識が可能であることを実証できた。像解像度向上のため、更なる条件評価及び最適化を継続する必要がある。

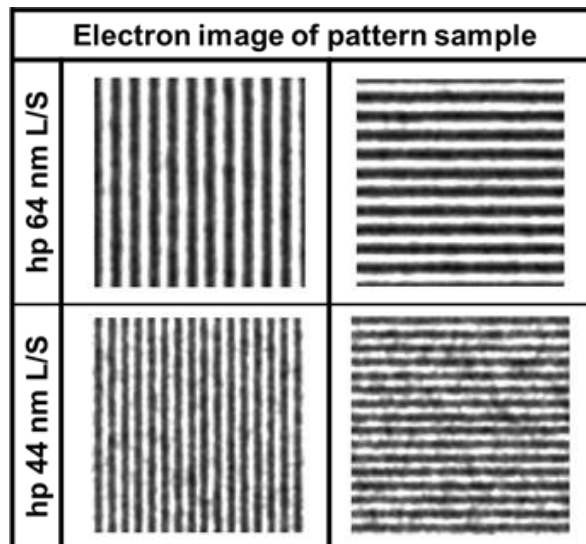


図 III.2.1.2-2-5 取得した高倍率像の例

[2] 欠陥検出感度と検出確率の評価

(a) 欠陥検出感度検証

PI 装置における電子ビーム写像投影光学系の欠陥検出感度、S/N 比等を実証するために、は開発した写像投影光学系を用いて、設計欠陥を作りこんだ EUV マスク全域の画像を採取すると共に、欠陥のないパターンと設計欠陥付のパターンの画像を取り込み、欠陥信号の強調及びノイズ低減などの画像処理を行ったうえで比較し、欠陥検出を行う制御システムが必要となる。そこで

これらの機能を備えた電子ビーム写像投影系評価装置の導入・整備をおこなった。整備を行った電子ビーム写像投影系評価装置は、搬送系、真空チャンバー、ステージ、イメージセンサー、システム制御系等から構成されている。

(b) 6インチブランク全域にわたるパターン欠陥検査評価

EUV マスクのパターン検査を行うに当たり、その検査時間は検査性能を決定する重要な要因となる。マスク全面を検査するための検査時間(Inspection Time)は、画素サイズ p 、画像センサーの幅(画像取り込み幅) l 、データ処理速度 DP 、ステージスキャン方向のパターンエリア幅 H 、スキャン垂直方向のパターンエリア幅 V から、以下の式で計算される。

$$\text{Inspection Time} = \left\{ \left(\frac{V}{p} \right) \times \left(\frac{H}{p} \right) / (l \times s) \right\} \times \left\{ (l \times s) / DP \right\}$$

マスク全面検査を 100mm^2 と仮定すると ($H=V=100\text{mm}$)、画像センサーの幅は数千画素確保できるため検査時間は画素サイズ p とデータ処理速度 DP で決まり、[図 III.2.1.2-2-6\(a\)](#) で示される関係となる。例えば、 $p=16\text{nm}$ 、 $DP=600\text{MPPS}$ の場合検査時間は 19 時間となる。(b)、(c) は $DP=600\text{MPPS}$ 、 $p=16\text{nm}$ に固定したときの検査時間を示す。

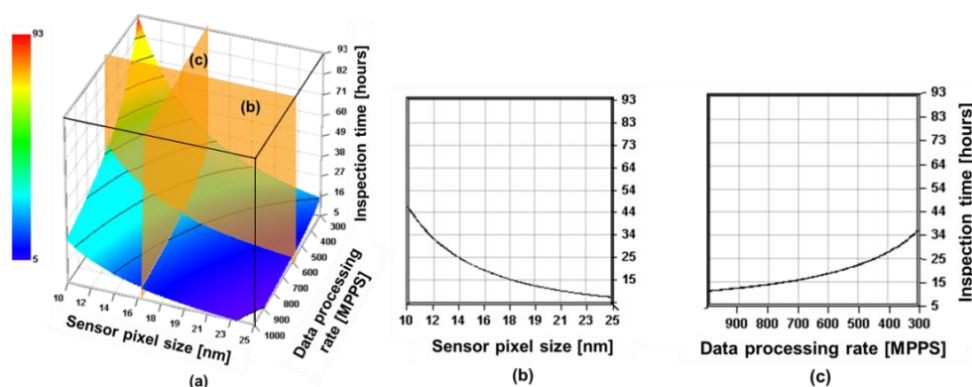


図 III.2.1.2-2-6 検査時間に対する画素サイズとデータ処理速度の影響

[図 III.2.1.2-2-6\(c\)](#) から、検査時間はデータ処理速度に反比例し例えば 10 時間以下とするためには 1.1GPPS の処理速度が必要となることから分かる。この場合、一画素あたりの電子線蓄積時間も低下するため処理速度の向上に加えて照明強度も向上させる必要がある。一方 [図 III.2.1.2-2-6\(b\)](#) からは画素サイズを拡大することで検査時間は短縮され、 $hp=22\text{nm}$ において検査時間 10 時間以下が達成される。このときの画素あたりの蓄積時間は変わらないため、照明密度を低くして画素当たりの電子数を合わせることで、 S/N 比を維持することが可能となる。この場合、画素サイズ拡大による解像度低下が懸念されるが、本開発におけるターゲットパターンサイズ(ウェハ上 $hp16\text{nm}$)における画像コントラストは 0.5 を想定しており、実際の検査、例えば DUV 光を用いた検査装置においては 0.1~0.2 程度のコントラストにて検査を行っており、DUV 検査にて適用している画像処理、即ち欠陥検出論理を参考に本開発で採用している写像投影方式の電子線画像に欠陥検出用論理検討を適用することで、コントラスト低下に対する余裕度が期待できる。このとき、6インチブランク全域にわたるパターン検出を安定かつ信頼性を持って行うことで、目標欠陥検出に必要な画像コントラストと S/N 比を精密に見積もることが可能となる。現時点においては 6 インチブランク全域にわたるパターン欠陥検査評価を行うための評価装置の整備が完了しており、今年度末までに当初目的通りの評価を完了する。

[3]検査装置高スループット化の設計及び機能評価

(a) $hp16\text{nm}$ 世代の PI 装置スループット性能評価

(i)検討の目的

写像投影光学系の欠陥検出に寄与する基本的な機能と性能を、hp 16 nm 世代対応モジュールを用いて評価し、高精度画像取得技術と、高感度欠陥検査技術の開発を実施する。整備が完了した、6インチブランク全域にわたるパターン欠陥検査を行うための評価装置を用いてPI装置の欠陥検査スループット性能及び欠陥検出感度を評価し、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置技術の実現を確認する。

(ii)研究内容及び成果

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において開発したPI装置の整備が完了したため、装置に EUV マスクを搭載しダイ比較方式の欠陥検出処理を行った。処理においては、150 mm²のマスクエリアにおいて、ダイ比較方式の欠陥検査機能確認のため、隣接する20 mm²エリアを2×2個設定し、お互いを欠陥検査用の参照ダイと欠陥検査ダイに設定した。検査を実行すると、欠陥検査のための撮像点が移動し、ステージスキャンに伴い参照ダイと検査ダイをスキャンして画像を採取する動作がリアルタイムで確認できる。検査画像はマスクスキャンにより取得され、検査領域端を超えると減速/停止し、マスクスキャンの直交方向に画像取り込み幅分ステップ移動した後、折り返してスキャンを開始する。1 ラインのスキャンごとに参照/検査ダイ間で欠陥検出処理が行われ、検出された欠陥が制御システム上に蓄積されていく。欠陥が検出されると、表示画面中の検出欠陥リストに順次追加される。リストをクリックすることで、検出された欠陥の PEM 画像(Defect Image)と、ダイ比較を行った参照部の画像(Reference Image)、及び設定した閾値に基づき差信号を二値化した欠陥検出信号(Image difference(Binary Image))を表示する。ダイ比較方式の欠陥検出処理に従い、欠陥検出動作が正常に行われることを確認した。次いで、hp180nm ベースパターンにおける設計欠陥作りこみパターンと参照パターンとを各々ダイ比較方式の欠陥検査における検査領域に設定し検査動作を実施した。処理結果をより、アライメント処理によりお互いの位置を補正した上で断線欠陥部が検出できることを確認した。

欠陥が埋め込まれている領域は周囲が L/S パターンで埋められているためパターン周期情報が正しく得られており、位置ずれ補正の上、お互いの差分画像を得ることで良好な欠陥信号が得られている。一方、L/S パターン端部においては位置情報がエッジプロファイルに限定されるためノイズの影響により位置ずれが正しく補正されず、結果的に差画像の階調値が増大して疑似欠陥として認識されることとなっている。これに関しては (2)-(i) PI 装置仕様検討 [4]-1 欠陥検出高精度化論理の設計と効果見積もり において開発したアライメント誤差低減フィルターを実装することで対応する。欠陥検査スループット評価のため、[図 III.2.1.2-2-7](#) に示すように複数ストライプをスキャンする時間を計測した。602 ストライプ分のスキャン開始時刻と終了時刻から、マスクスキャンに要する時間、3時間45分49秒を得た。マスク全面のスキャンには3013スキャン分必要であるため、100mm²スキャンに要する時間は18時間50分19秒となり、目標検査時間(19時間)以下であることが確認できた。

次に、整備が完了した評価装置を用いてPI装置の欠陥検出感度を評価した。評価には、EUV 光を反射する多層膜上に2.5 nmのRu-cap層が形成され、その上にEUV光の吸収体が52 nm厚さのTaBN上に14 nm厚のTaBOで形成されているEUVマスクを用いた。マスク上 hp 64 nm L/S パターン中に、異なるサイズの凹凸形状欠陥を作りこんだプログラム欠陥マスクを作成した。複数サイズの凸欠陥に対して、ダイ比較方式の欠陥検出を行った結果を、[図 III.2.1.2-2-7](#) に示す。図中に欠陥のサイズ(欠陥の占める面積の平方根。正方形形状の一辺の長さに相当)と、SEM 画像/PEM 画像/欠陥検出を行い得られた二値化画像(欠陥の位置を判別し易くするため、下地に欠陥画像を半透明にして重畳)を示す。二値化画像は、欠陥検出信号に対して閾値を設定し、閾値を上回る点に欠陥が存在することを示すように生成した。38、32 nm サイズの欠陥については、検出目標欠陥を疑似欠陥なく検出できた。28 nm サイズの欠陥については、検出目標欠陥が明確に認識できているが、複数の点で検出信号が閾値を超えており疑似欠陥として認識されている。

疑似欠陥低減、及び更なる微小サイズ欠陥の検出を、開発した PI 装置の調整を継続することで 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置技術の実現を確認する。

Defect size nm	38	32	28
設計欠陥のSEM画像 Edge defect (Extrusion)			
設計欠陥のPEM画像			
差画像(二値化) (下地に欠陥画像を表示)			

図 III.2.1.2-2-7 ダイ比較方式における欠陥検出処理結果(凸欠陥)

更に、複数サイズの凹欠陥に対して、ダイ比較方式の欠陥検出を行った結果を、図 III.2.1.2-2-8 に示す。凸欠陥と同様、図中に欠陥のサイズと、SEM 画像/PEM 画像/欠陥検出を行い得られた二値化画像を示す。

Defect size nm	28	22	16
設計欠陥のSEM画像 Edge defect (Intrusion)			
設計欠陥のPEM画像			
差画像(二値化) (下地に欠陥画像を表示)			

図 III.2.1.2-2-8 ダイ比較方式における欠陥検出処理結果(凹欠陥)

28、22、16 nm サイズの欠陥についてそれぞれ検出目標欠陥を疑似欠陥なく検出できた。「研究開発項目①EUV マスク検査・レジスト材料技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査技術開発」の(2)-(i) PI 装置仕様検討において導出した、hp 16 nm 世代対応の PI 装置に必要とされる検出欠陥ターゲットの欠陥サイズは 16 nm であり、16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置技術の実現を確認した。

(iii)まとめ

hp 16 nm 微細加工技術に対応するPI装置の整備が完了した。これを受けて 6 インチブランク全域にわたるパターン欠陥検査に関して、欠陥検査スループット性能及び欠陥検出感度を評価した。装置に評価用の EUV マスクを搭載し、装置制御システムの GUI を用いてダイ比較方式によりマスクパターンのスキャン画像を採取し、欠陥検出処理を行った。PI 装置は TDI センサーの画像取り込み幅(ストライプ)の画像を取り込んだ後、スキャンと直角方向にステップ移動した後に折り返してマスクスキャンを再度実施する(ステップ&スキャン動作)。この動作を繰り返すことで 6 インチマスク全面の検査を実現する。ステップ&スキャン動作の時間を計測することで、6 インチ全面(100 mm²)

をスキャンするために必要な時間を見積もり、PI 装置仕様検討に基づき整備した PI 装置が所定の設定条件(画素サイズ:16 nm、データ処理速度:600 MPPS)における設計値(スキャン時間 19 時間/100 mm²)を達成していることを確認した。また、欠陥検査感度評価のため作成した、複数種類の欠陥を異なるサイズで作ったプログラム欠陥 EUV マスクを用いて、開発した PI 装置に搭載された PEM 光学系による欠陥検査画像を採取した。ダイ比較方式により欠陥検査を行い、最小欠陥検出サイズ 16nm を確認した。このサイズは PI 装置仕様検討において算出した、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要とされる欠陥のサイズに等しく、以上を以って hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置技術の実現が確認できた。

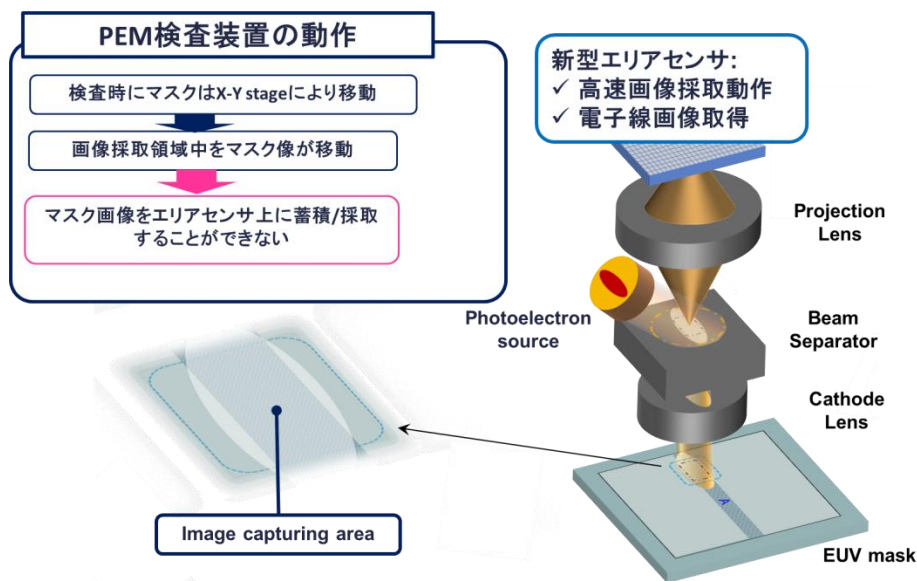
(b) 高速画像偏向機能評価

(i)検討の目的

hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、開発した PI 装置の高性能化による、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の開発を行う。具体的には、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高速欠陥検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、高速画像取得技術を開発する。設計・製作を行った電子線カメラユニットを PI 装置に搭載するためには、EUV マスクを電子線写像投影光学系に対して電子線を照射しながら連続的にスキャンし、得られた PEM 画像を PI 装置上に固定された電子線カメラユニット上加算蓄積する必要がある。そこで、高速画像偏向機能を設計・製作し PI 装置への組み込み評価を行う。

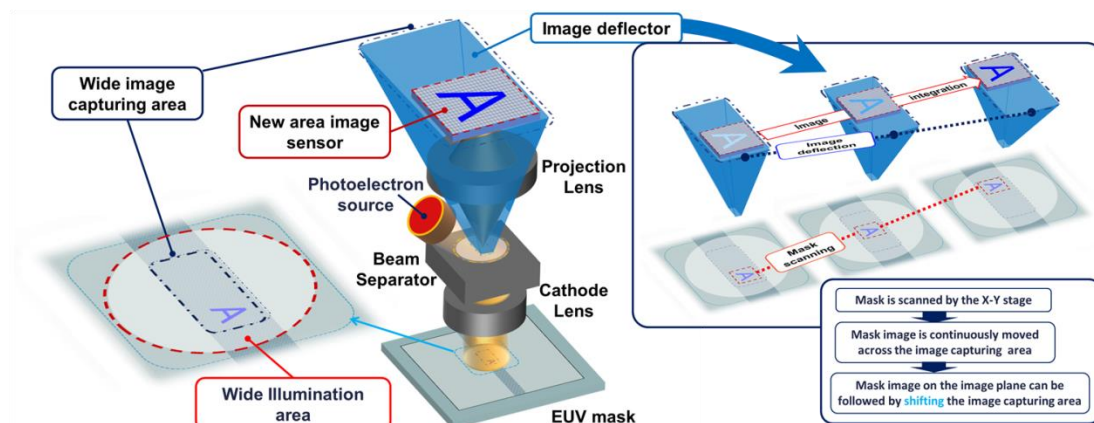
(ii)研究内容及び成果

「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において開発した PI 装置に、高速画像偏向機能の増設を行う。PEM 画像を用いた検査において、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高速欠陥検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、電子線画像に対して高速取得動作が可能である新型エリアセンサーを採用する。一方、これまで PI 装置で行っていた、TDI カメラの機能を用いて、マスクを連続スキャンして取り込んだマスクパターンの電子線像を加算蓄積する処理は、開発した装置に搭載する画像取得素子が高速欠陥検査動作を行うために新型エリアセンサーへ変更する必要が生じたため、**図 III.2.1.2-2-9** に示すように新型エリアセンサー上にマスクパターンを蓄積することはできない。従って、TDI 動作に代わる画像蓄積機能を写像投影方式光学系に増設する必要がある。



図Ⅲ.2.1.2-2-9 高速検査実現のための新型エリアセンサー採用による PEM 検査装置における問題点

図Ⅲ.2.1.2-2-10 に、開発した PI 装置に増設した画像偏向機能の概要を示す。結像光学系はカソードレンズ(Cathode Lens)から成る第一次結像系と、投影レンズ(Projection Lens)から成る第二次結像系から構成される。第一次結像系の像面に生成されたマスクパターンの電子線画像が第二次結像系によりエリアセンサー上に結像する際、撮像対象となるマスクパターン(図中”A”で示される領域)は、マスクスキャンに伴い撮像面上を移動する。ここで、第二次結像系の撮像領域を移動量分だけマスクスキャンと逆方向に移動することで、エリアセンサー上にスキャン画像を静止させることが可能となる。マスクパターンが撮像面上でエリアセンサーの一辺の長さ分移動した後、再度撮像領域を元の位置に振り戻すことで、撮像対象に隣り合う次のマスクパターン領域をエリアセンサー上に結像させることができる。この動作を繰り返すことで、TDI カメラを用いたマスクパターンの採取が可能となる。なお、マスク上を移動する撮像対象パターンはセンサー上へ画像を蓄積する間は電子線を照射し続ける必要があるため、第二結像系の偏向領域をカバーする広い領域を照明する必要がある。



図Ⅲ.2.1.2-2-10 PI 装置に増設した高速画像偏向機能

(iii)まとめ

以上のように、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、目的で

あったPI装置の高性能化を行い、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要となる、高速画像偏向機能の設計及び機能評価を非常に高い精度で行うことができた。本PI装置を用いて評価・実証をし、製品化をおこなうPI装置は、半導体の超微細化の鍵となるEUV露光による半導体パターンの形成の基盤に係る装置であり、より高感度で高精度のEUVマスク基板の品質保証のために、電子ビームを利用する、非常に高い分解能を有し現実的な検査時間(8時間)で検査を完了する、現時点では世界で唯一の装置である。この、装置に用いる写像投影光学系技術自体が技術的発展の途上であり、技術的なリスクが大きく、また、整備に要するコストの非常に大きな技術項目であるが、以上述べたように現時点で考えられる最高の技術を採用することができたため、量産時に必要とされる技術水準でPI装置の電子ビーム写像投影光学系を実証・評価することが可能な写像投影光学系を搭載した欠陥検査装置を用いて、欠陥検出感度検証を行うため機能評価ができた。本設計及び機能評価により得られた結果を用いて、高感度で高スループットのPI装置の製造が可能となった。

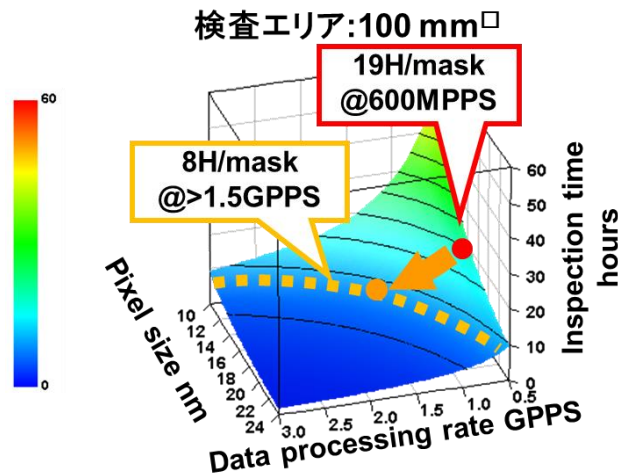
(c) 高速電子線カメラの評価

(i) 検討の目的

hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、開発したPI装置の高性能化による、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の開発を行う。具体的には、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高速欠陥検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、高速画像取得技術として電子線カメラユニットを開発する。非常に高い分解能を有し現実的な検査時間(8時間以下)で検査を完了するために、開発する電子線カメラユニットに必要とされる仕様を検討し、その仕様を満たす電子線カメラユニットの製作及びPI装置への組み込み評価を行う。

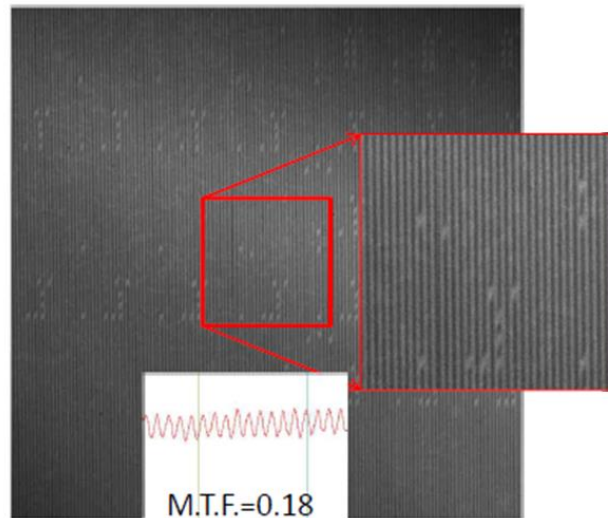
(ii) 検討内容

「研究開発項目②EUVマスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUVマスクパターン欠陥検査装置開発」において開発したPI装置において、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高速欠陥検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、電子線画像に対して高速取得動作が可能である新型電子線カメラの仕様を検討する。6インチEUVマスク全面を、非常に高い分解能を有した上で実的な検査時間(8時間以下)で検査を完了するためには、カメラの画像取得エリアに対応したマスクパターン画像を高速でダイ比較方式の欠陥検出用の画像処理ユニットに入力する必要がある。図III.2.1.2-2-11に、検査時間と画像データ処理速度及び画素サイズの関係を示す。図中に hp 16 nm 世代と hp 11 nm 世代対応の目標欠陥検査速度(19時間/8時間)を示す。検査エリアは 100 mm²である。データ処理速度の向上及び画素サイズを適切に選択することで、hp 11 nm 世代対応の欠陥検査速度を得ることを考える。



図Ⅲ.2.1.2-2-11 検査時間と画像処理速度及び画素分解能の関係

目標欠陥検査速度を得るために、電子線カメラユニットに必要とされる画像取り込み速度を 1.5 GPPS 以上とした。本カメラを用いて採取した EUV マスク上に形成された hp 64 nm L/S パターン画像の例を図Ⅲ.2.1.2-2-12 に示す。L/S のコントラスト(MTF)は 0.18(目標 MTF0.15 以上)と良好な値が得られており、開発した高速電子線カメラが所定の性能を有していることが確認できた。



図Ⅲ.2.1.2-2-12 高速電子線カメラを用いて採取した EUV マスク上の hp 64 nm L/S パターン像

(iii)まとめ

以上のように、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、目的であった PI 装置の高性能化を行い、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要となる、電子線カメラユニットの開発を非常に高い精度で行うことができた。本 PI 装置を用いて評価・実証をし、製品化をおこなう PI 装置は、半導体の超微細化の鍵となる EUV 露光による半導体パターンの形成の基盤に係る装置であり、より高感度で高精度の EUV マスク基板の品質保証のために、電子ビームを利用する、非常に高い分解能を有し現実的な検査時間(8 時間)で検査を完了する、現時点では世界で唯一の装置である。本開発により、目的とする EUV マスク上の hp 44 nm L/S パターンを目標とする MTF 以上の高いコントラストで得ることができた。画像採取速度はフレームレート 440 fps を達成していることを確認し、高感度で高スループットの PI 装置の製

造が可能となった。

[4] 欠陥検出の高感度化と高スループット化の性能評価

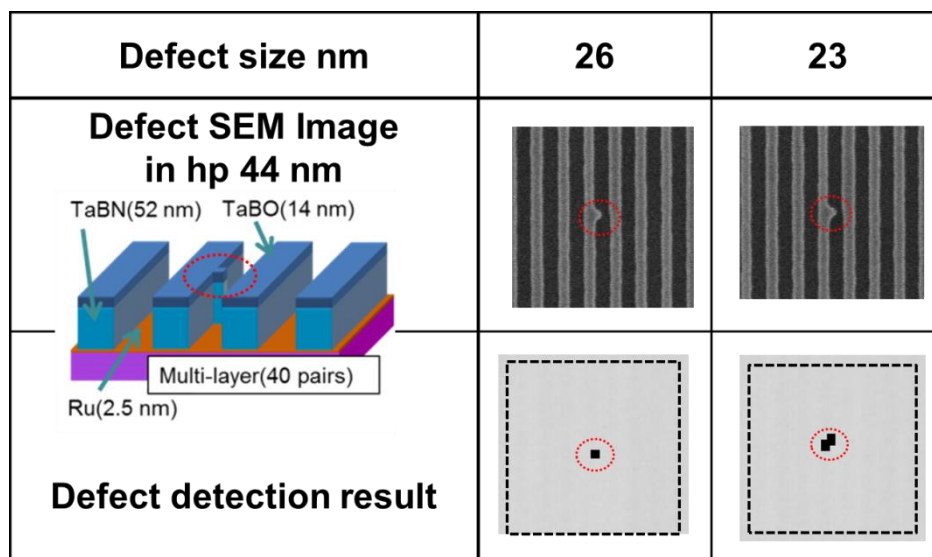
(a) 欠陥検出感度検証評価

(i) 検討の目的

hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、開発した PI 装置の高性能化による、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の開発を行う。具体的には、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高分解能検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、従来装置と比べて高エネルギー電子を採用することで収差低減を実現した。「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2) EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において開発した PI 装置においては、電子像投影系と電子照射系の電子エネルギーは従来装置の約6倍以上が得られている。この低収差写像投影方式電子線光学系を用いて、hp 11 nm 世代に必要とされる欠陥検出感度が開発した PI 装置において得られることを確認する。

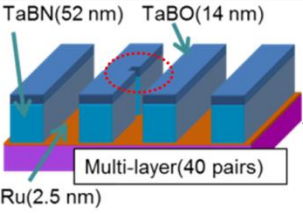
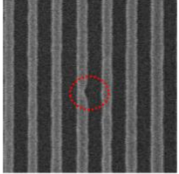
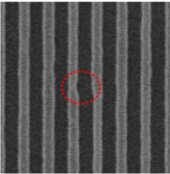
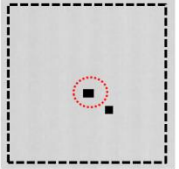
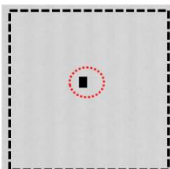
(ii) 研究内容及び成果

hp 11 nm 世代対応の欠陥検出感度評価を行った。具体的には、EUV 光を反射する多層膜上に 2.5 nm の Ru-cap 層が形成され、その上に EUV 光の吸収体が 52nm 厚さの TaBN 上に 14nm 厚の TaBO で形成されている EUV マスクを用いた。マスク上 hp 44 nm L/S パターン中に、異なるサイズの凹凸形状欠陥を作りこんだプログラム欠陥マスクを作成した。複数サイズの凸欠陥に対して、ダイ比較方式の欠陥検出を行った結果を、[図 III.2.1.2-2-13](#) に示す。図中に欠陥のサイズ(欠陥の占める面積の平方根。正方形形状の一辺の長さに相当)と、SEM 画像/PEM 画像/欠陥検出を行い得られた二値化画像(欠陥の位置を判別し易くするため、下地に欠陥画像を半透明にして重畳)を示す。二値化画像は、欠陥検出信号に対して閾値を設定し、閾値を上回る点に欠陥が存在することを示すように生成した。



[図 III.2.1.2-2-13](#) EUV マスク hp 44 nm L/S 中の設計欠陥検出結果(凸欠陥)

サイズ 23 nm の凸欠陥が擬似欠陥なく検出できることが確認出来た。開発した PI 装置を用いて得られた結果を PI 仕様検討にフィードバックし、hp 11 nm 世代に必要な欠陥検出感度が得られるように、PI 装置の高精度化及び欠陥検出アルゴリズムの高性能化を進めていく。次に、複数サイズの凹欠陥に対して、ダイ比較方式の欠陥検出を行った結果を、[図 III.2.1.2-2-14](#) に示す。

Defect size nm	21	16
Defect SEM Image in hp 44 nm 		
Defect detection result 		

図Ⅲ.2.1.2-2-14 EUV マスク hp 44 nm L/S 中の設計欠陥検出結果(凹欠陥)

サイズ 16 nm の欠陥を擬似欠陥なく検出することができた。サイズ 21 nm の欠陥も明確に認識できたが、同時に擬似欠陥も生じており、PI 装置の動作安定化による更なる欠陥検出信号の向上が必要と考えられる。開発した PI 装置を用いて得られた結果を PI 仕様検討にフィードバックし、hp 11 nm 世代に必要な欠陥検出感度が得られるように、PI 装置の高精度化及び欠陥検出アルゴリズムの高性能化を進めていく。

(iii)まとめ

以上のように、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、目的であった PI 装置の高性能化を行った。この低収差写像投影方式電子線光学系を用いて、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要な、EUV マスク上の hp 44 nm L/S パターン中に作りこんだ凹凸形状の設計欠陥を高精度で検出することができた。

(b) パターン欠陥高速検査性能評価

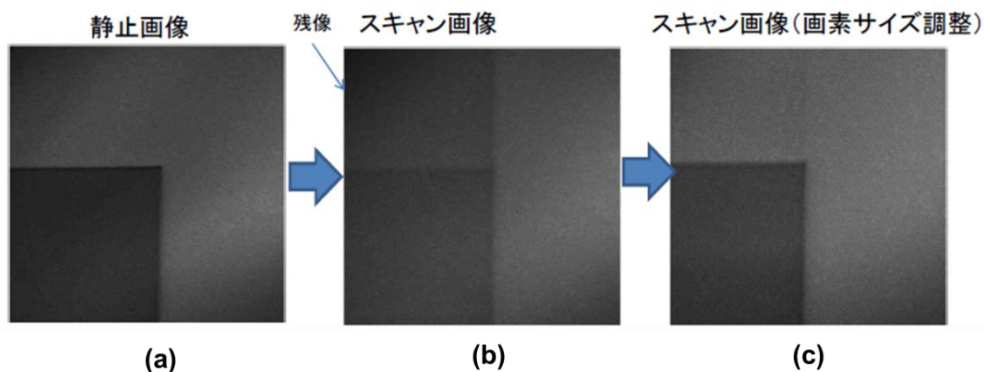
(i)検討の目的

hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、開発した PI 装置の高性能化による、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の開発を行う。具体的には、電子線写像投影光学系を用いた欠陥検査装置の利点である、高スループット検査を hp 11 nm 以細の世代においても実現するために、「研究開発項目②EUV マスク検査装置・レジスト材料基盤技術開発 (2)EUV マスクパターン欠陥検査装置開発」において開発した PI 装置に、新型高速電子線カメラと写像投影方式電子線光学系を用いて撮像面に結像する電子線像を、ステージスキャンと同期して高速に偏向させる画像追従方式を電子線投影光学系に搭載することで実現した。この高速画像追従方式を備えた写像投影方式電子線光学系を用いて、hp 11 nm 世代に必要なとされる高スループット検査が開発した PI 装置において得られることを確認する。

(ii)研究内容及び成果

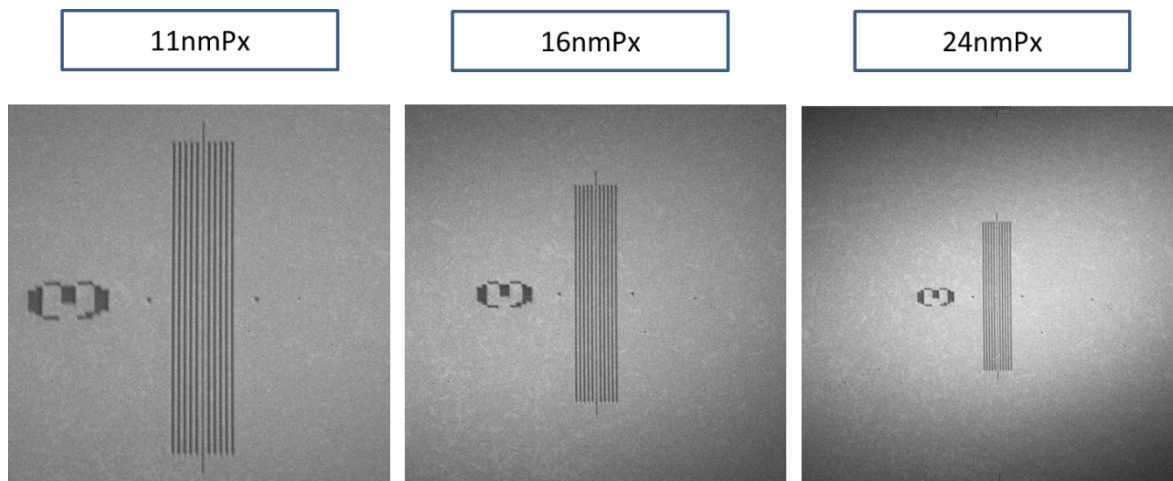
hp 11 nm 世代対応の装置目標である、検出欠陥サイズ 13 nm, 検査速度 1.5GPPS 以上を可能とするため、PI 装置に搭載される要素ユニットの仕様検討を行った。高速検査を可能とする電子線光学系の改良において、電子像追従式の撮像を可能とするため、要素ユニットの改良が必要となる。必要な改良要素ユニットを製作し、開発した写像投影光学系を搭載した PI 装置に組み込んだ。高スループット検査を実現するため、以下の各項で述べた開発要素[3]高速画像偏向機能、高照

度電子線照明光学系ユニット、高速電子線カメラ、及び高速欠陥検査画像処理系を製作し画像採取評価を行った。結果を図Ⅲ.2.1.2-2-15に示す。最初に、ステージを静止させた状態で EUV マスクパターンの電子線像を採取した結果を(a)に示す。次いで XY ステージを駆動することによりマスクスキャンを行う。電子線像は撮像面でステージスキャンにより移動するため、ステージスキャン中に電子線カメラ上にはパターンが流れて蓄積されることとなる。(b)の画像はマスク上のパターンにステージスキャンによる残像が生じたものである。更に、ステージスキャンに同期してカメラ上に投影される撮像領域を高速画像偏向機能で移動する。これにより、(c)に示すように(a)に示す静止画像と同様に、残像のない電子線像が得られることが確認できた。



図Ⅲ.2.1.2-2-15 改良ユニットを搭載したPI装置を用いて採取した電子線画像

次に、ピクセルサイズ(結像倍率)、偏向量確認、電子線源のエミッション効率の評価を行った。その結果を以下に述べる。図Ⅲ.2.1.2-2-16は改良した電子光学系のピクセルサイズ(結像倍率)の検証結果である。光学設計に対応した結像条件にて、(a)11nmピクセル、(b)16nmピクセル、(c)24nmピクセルの画像が得られ、設定倍率に応じたピクセルサイズの画像が確認できた。



図Ⅲ.2.1.2-2-16 改良した電子光学系のピクセル(Px)サイズと画像

図Ⅲ.2.1.2-2-17は高速偏向器の偏向量動作確認を行った例である。設定値に対応したY方向の偏向量 ± 0.1 (規格値)が得られた。高速偏向器による動作が正常に行われていることが確認できた。微小なズレ量は、パラメータの高精度調整にて合わせることができる。

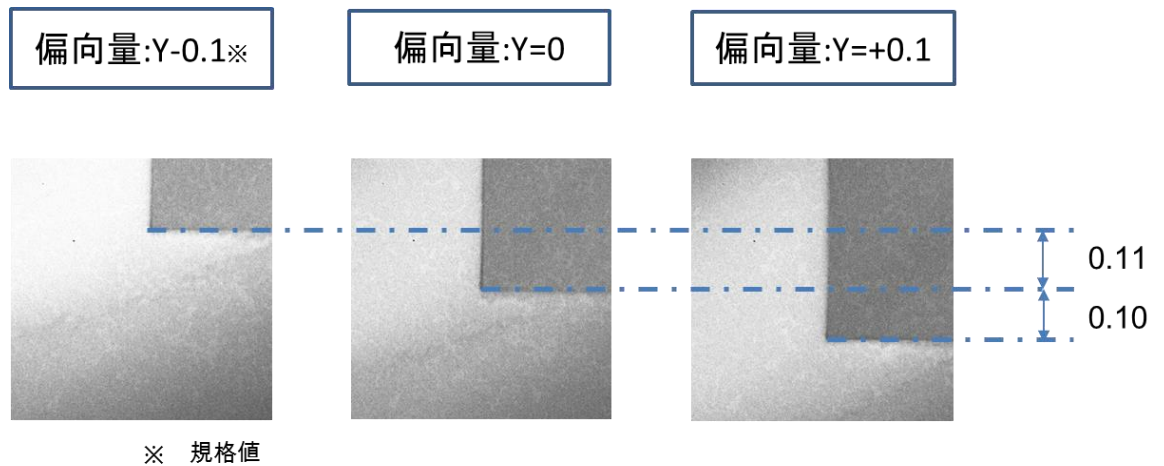


図 III.2.1.2-2-17 改良した電子光学系の偏向量

次に改良した電子ビーム写像投影光学系・新検出器ユニット・新撮像システムを評価装置に搭載した形態で撮像システムの動作検証を行った例を図 III.2.1.2-2-18 に示す。(a)は静止画像で、ステージは静止。つまり、ステージ上の EUV マスクパターンが静止している状態で2次元電子像を撮像した。(b)はステージが連続移動している時に追従動作なしの撮像例である。ステージ上の EUV マスクパターンが連続移動することに伴い検出器のセンサー面上の電子像は移動するので、ステージ移動方向に流れた像になっている。(c)はステージが連続移動している時に、追従動作を行った撮像例である。ステージの連続移動があっても高速偏向器により検出器のセンサー面で静止像を形成するため像流れのない良好な画像となっている。スキャン像がセンサー像と同等の画質になっているため、高速偏向器による電子像の位置制御が良好に行われていることが確認できた。つまり、電子像追従方式の実証ができた。

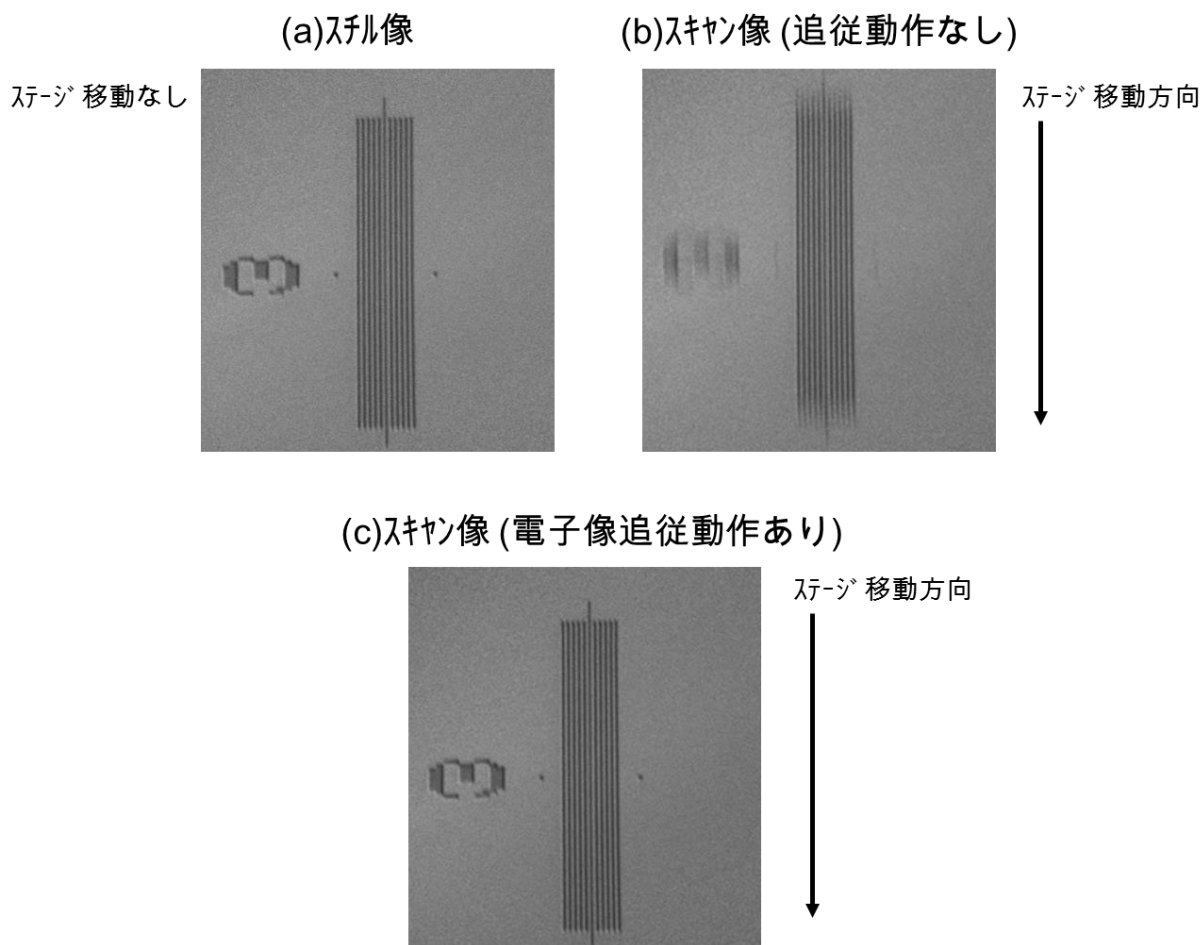


図 III.2.1.2-2-18 追従動作の検証

図 III.2.1.2-2-18 は電子像追従方式で得られるスキャン像の 1 フレーム画像であったが、複数フレーム画像の撮像動作の検証を行った例を図 III.2.1.2-2-19 に示す。ステージが連続移動を行い、連続した 3 フレーム分の画像が電子像追従方式により撮像された。このときフレーム間の画像位置移動(センサー面に次のフレーム画像を切り替えて結像させる偏向動作)の時間は、1 ピクセル(y 方向)のステージ移動時間以下の高速で行われている。そのため、フレーム間の位置誤差の小さい連続フレーム画像を撮像することが可能である。1 フレーム画像は条件調整等で用いる。連続フレーム画像は領域の欠陥検査を行う時に用いられる。図 III.2.1.2-2-20 は、データレート 1.76GPPS(検査時間 8hr/100mm²対応)の高速スキャン撮像を行った例である。高速スキャンの撮像動作が確認された。

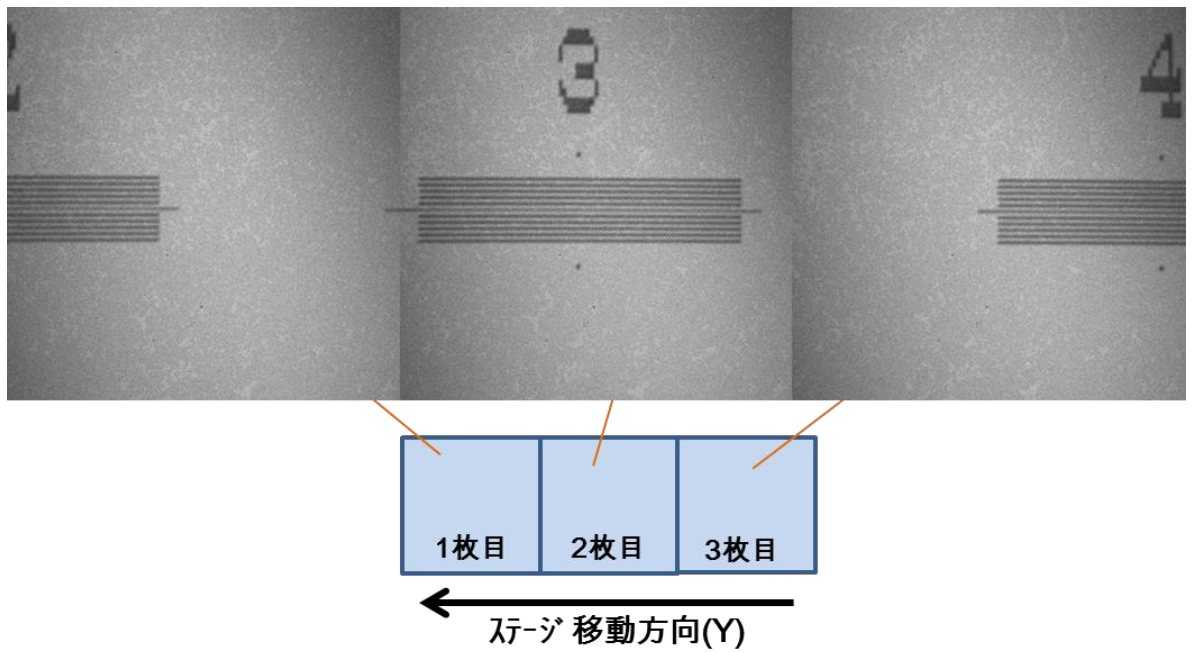


図 III.2.1.2-2-19 連続フレーム撮像

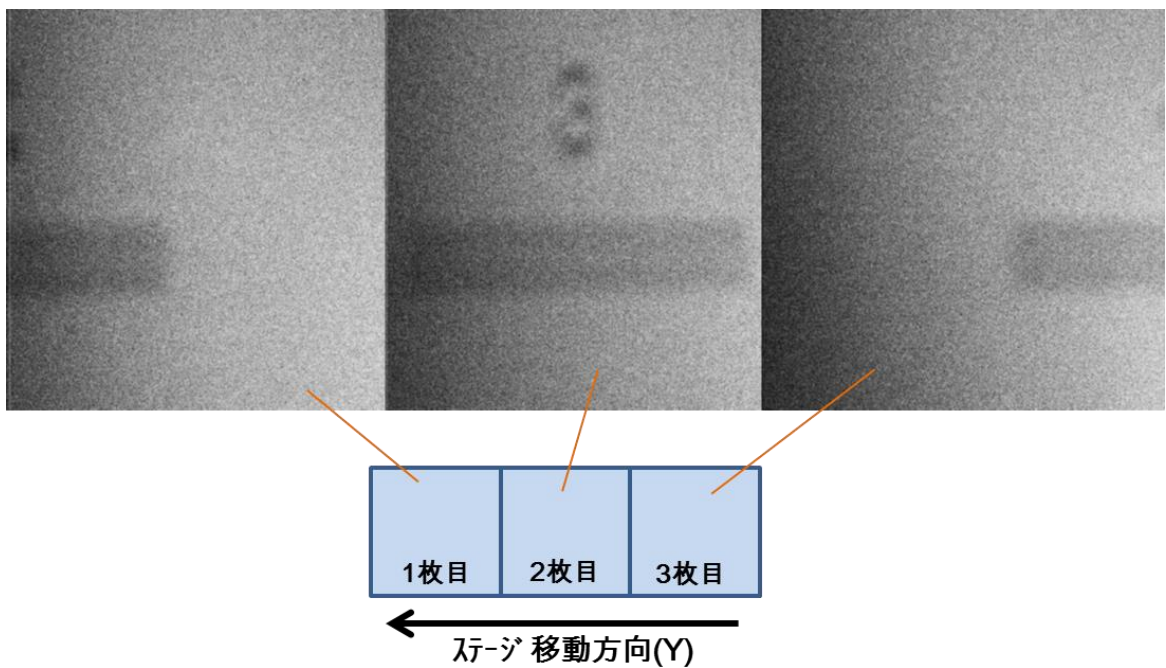


図 III.2.1.2-2-20 高速スキャン撮像動作

図 III.2.1.2-2-21 は、電子ビーム写像投影光学系とユニットの改良を行う前後の画像比較を行った例である。(a)は改良前の TDI 像で(b)は改良後の静止画像である。EUV マスクの 64nmL/S パターン部の撮像を行い、MTF の比較を行った。(b)の MTF は(a)に比べ、10%以上の向上が確認された。これは、光学系の収差向上と新検出器ユニットによる MTF 向上の効果と考えられる。尚、改良前のコラムでは TDI 像と静止画像は同等の MTF が得られている。図 III.2.1.2-2-22 は、フレーム内の分解能均一性を評価するため、フレーム内の中心、中間部、端部における MTF の比較を行った結果である。改良前(現行コラム)はフレーム端部の MTF が中心部に対し 80%程度劣化してい

るのに対し、改良コラムでは中心部と同等の MTF が得られている。フレーム内の分解能均一性が大幅に向上したことが分かる。

図 III.2.1.2-2-23 は、作り込み欠陥部の撮像例である。EUV マスク 64nmL/S パターン部に形成された作り込み欠陥の静止画像撮像を行った。この例では、凸欠陥の作り込みで PD 番号 PD-2 と PD-11 の例である。双方とも目視確認できる画像の取得ができた。

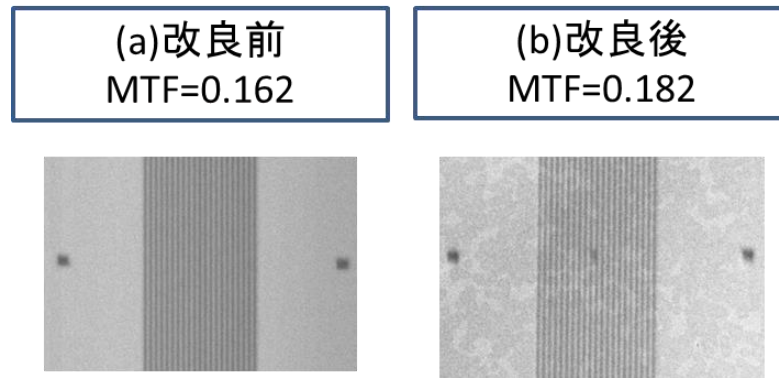


図 III.2.1.2-2-21 静止画像中心部の分解能向上

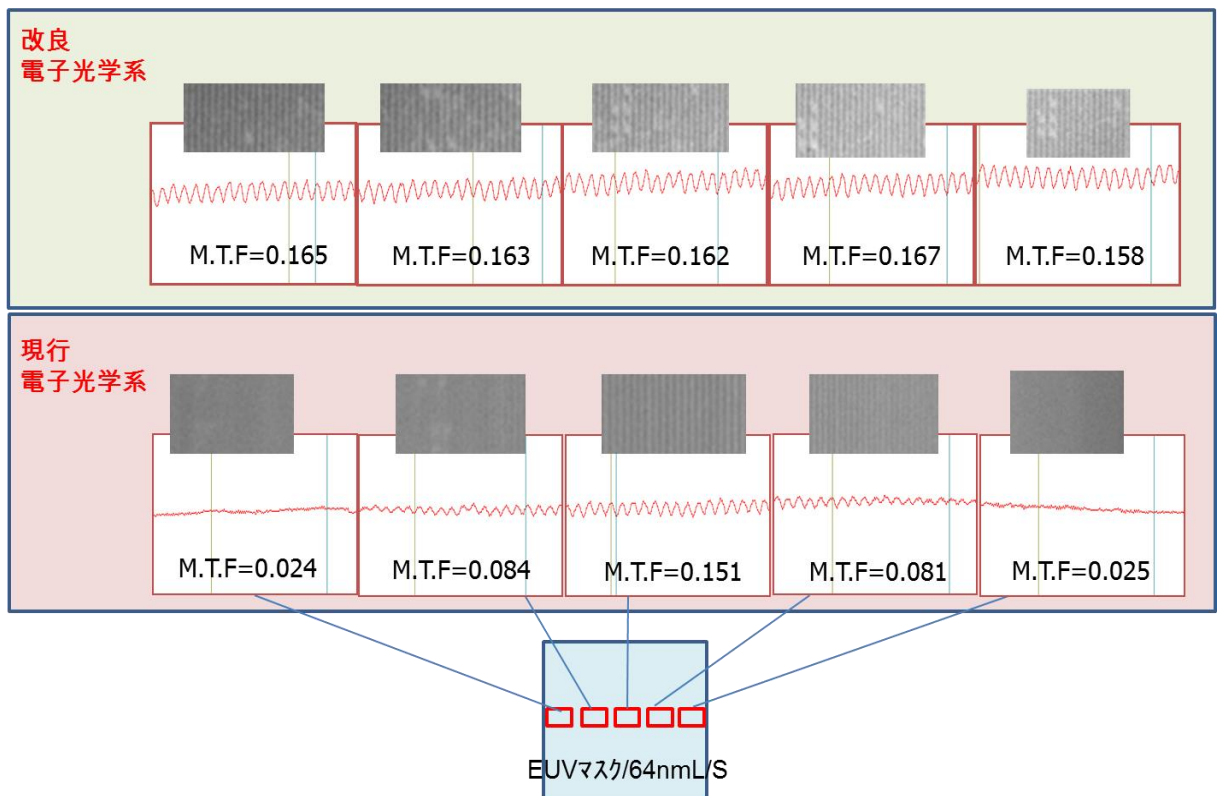
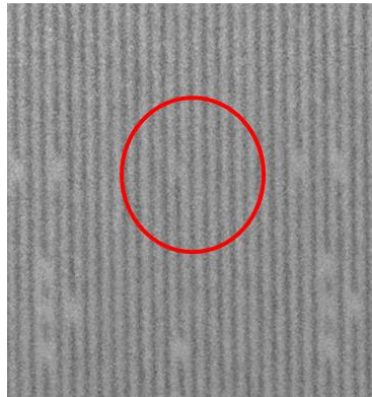


図 III.2.1.2-2-22 端部の分解能向上

PD凸-2



PD凸-11

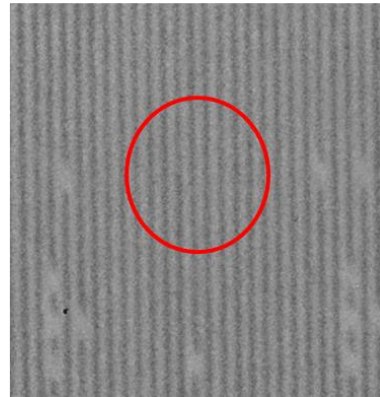


図 III.2.1.2-2-23 PD 撮像の例 (hp64nmL/S)

図 III.2.1.2-2-24 は欠陥検査動作の検証を行った結果である。参照ダイと検査ダイの画像比較による D/D 検査を行った。図に示されるように、検出部について、参照画像・欠陥画像・2 値化画像のパッチ画像が記録される。欠陥検査の動作確認ができた。又、広領域の検査動作検証として、100mm²領域の欠陥検査動作を、D/D、1.76GPPSで行い、8hr 以下で終了したことを確認できた。

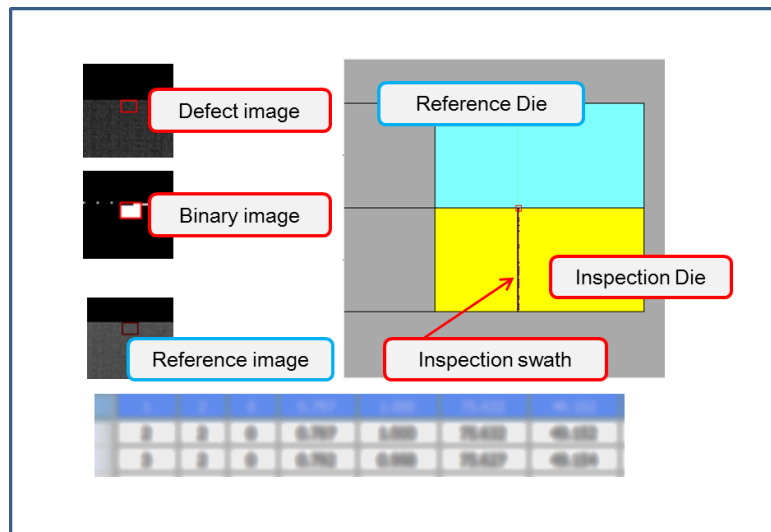
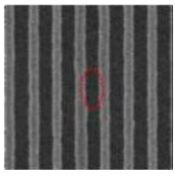
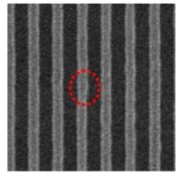
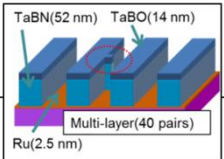
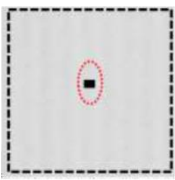
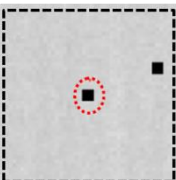


図 III.2.1.2-2-24 検査動作検証

欠陥サイズ	13nm	11nm
SEM image defect in hp44nm 		
		
検出処理結果 		

図Ⅲ.2.1.2-2-25 欠陥検査感度検証結果

最後に、本開発により達成した hp 11 nm 世代対応の欠陥検出感度を示す。図Ⅲ.2.1.2-2-25 にマスク上 hp 44 nm (ウェハ上 hp 11 nm) の凸欠陥のダイ比較方式による欠陥検出結果を示す。hp 11 nm 世代において検出が必要であるサイズ 13 nm の凸欠陥が擬似欠陥なく検出できることが実証された。また、いくつかの擬似欠陥が観察されるものの、目標サイズよりも更に小さな欠陥であるサイズ 11 nm の凸欠陥も検出可能であることが実証できた。

(iii)まとめ

以上のように、hp 16 nm 世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置の実現を受けて、目的であった PI 装置の高性能化を行った。この低収差写像投影方式電子線光学系を用いて、hp 11 nm 以細の世代に対応するマスクパターン欠陥検査装置に必要となる、EUV マスク上の hp 44 nm L/S パターン中に作りこんだ凹凸形状の設計欠陥を高精度で検出することができた。また、電子ビーム写像投影光学系、新型検出器、新型画像処理器、及び、撮像制御系の改良を行うことにより、新撮像方式の電子像追従方式にてスキャン画像を実現できることと、検査動作の実証ができた。さらに、マスク上 hp 44 nm (ウェハ上 hp 11 nm) の開発仕様であるサイズ 13 nm の欠陥が検出できることが実証された。

- (3) EUVレジスト材料技術開発
(3)-(i) EUVレジスト材料技術開発

[1] EUVレジスト関連情報のベンチマーキング

(a) 主要レジストメーカーの研究開発状況

EUVレジストを研究開発しているメーカーは、既にレジストビジネスを行っている6社(Dow chemical、富士フイルム、JSR、信越化学工業、住友化学、東京応用化学工業、(アルファベット順))の他、レジスト研究開発ベンチャーのInpriaがある。特に富士フイルム、JSR、東京応用化学工業、Inpriaの4社が積極的に学会発表を行い、どのメーカーも依然としてRLS(R:Resolution、L:Line Width Roughness (LWR)、S:Sensitivity)のトレードオフを脱却してはいないが着実にリソグラフィ性能を向上させている。下記に各メーカーの特徴を記載する。(図 III.2.1.3-1-1)

(i) 富士フイルム

現像液に有機溶剤を用いることでレジストの膨潤を抑え、高感度・高解像性を実現している。有機溶剤のいる現像では、通常の水酸化テトラメチルアンモニウム水溶液による現像と違い、露光部がパターンになり、未露光部が解像され、Negative tone imaging (NTI)と呼ばれる。NTI向けEUV材料開発では既存のArF向けの現像液ではなく、EUV向けの新規現像液、リンス液の開発が報告された。新規現像液では溶解コントラストが向上し、リンスによって膨潤が抑えられる。これによりhp15nm・37 J/cm²を解像。また、Pillar hp18nm・46 mJ/cm²というデータを報告が報告された。

(ii) JSR

レジストベース樹脂のガラス転移温度(Tg)が高いほど、光酸発生剤(PAG)から発生する酸の拡散長が抑制されるとの見解から、レジストベース樹脂に高Tg化に取り組んでいる。また、酸拡散長の短い新規PAG適用も行っている。その結果、解像度、ラフネスを劣化させずに感度が41.6 J/cm²であったレジストが25.2mJ/cm²まで向上した。さらに、金属種を感度増感剤として化学増幅型レジストに添加の他、メタル材料による非化学増幅型の高感度/高解像レジストの開発を進めている。

(iii) 東京応用化学工業

ポリマーバウンドPAG(レジストベース樹脂にPAGを化学結合させた材料)には、レジスト中のPAG濃度向上による高感度化及び、PAGが樹脂に固定されていることで酸の拡散長が抑制され、解像度、LWRが改善できるとの見解がある。また、樹脂のTgを下げずに脱保護反応の活性化エネルギーを下げた新規保護基や、カチオンに新しい電子吸引性基を導入し酸を発生しやすくしたPAGを開発。これらの検討からNXE3100でhp14nm・43mJ/cm²を解像している。

(iv) Inpria

Inpria社は特にメタルレジストに特化した材料開発を行っている。Paul Scherrer Institut (PSI)での干渉露光では、9.5nmL20nmP・LWR1.8nm・感度50mJ/cm²のパターニングを行っている他、NXE3300での露光ではhp13nm・LWR4.6nm・感度27mJ/cm²と化学増幅型レジストを含めてもトップクラスの性能を出している。以前はレジスト材料の保存安定性に課題があったが、現在では室温で200日間、感度にはほとんど変化がなかった。NXE3300での露光、エッチング転写検討、レジストメタル以外の金属元素除去、装置の金属汚染検査など、量産適用に向けた検討も進めている。

(b) レジストプロセス ベンチマーキング

レジストプロセス技術に関しては、レジストのリソグラフィ性能を補完する下層膜、Dry development rinse material (DDRM)などの補助材料開発とレジストパターンのリンス処理やプラズマ処理などの付加プロセスに大別できる。EIDEC では、EUV リソグラフィにおいて特に課題となるレジストパターン倒れ抑制による高解像度化とレジストパターンのLWR低減を目的としたプロセス開発に注力した。各レジストプロセスによる課題の改善効果を定量化し、EUV リソグラフィ量産化を推し進めるプロセスの開発を加速している。(図 III.2.1.3-1-2)

(c) 研究機関 ベンチマーキング

EIDEC では、HSFET を利用したレジスト材料・プロセスの評価を進める一方で、液中 AFM による現象時観察、反応機構解析や、MD 計算などシミュレーションのレジスト基礎研究において、他の研究機関に対し先行している。IMEC は NXE3300 を利用したデバイス試作に関連するレジスト評価を実施している。SEMATECH の実質的後継組織である EUREKA は 2015 年に設立され、主にバークレーMET(B-MET)を利用し、hp1x-nm 用レジストの基礎評価を進める模様。(図 III.2.1.3-1-3)

レジストメーカー	リソグラフィ性能			備考
	R (nm)	L (nm)	S (mJ/cm ²)	
富士フイルム	○ 14	No data	× 37	・NTIによる倒れ防止 ・特別なリンスでLWR改善 ・高反応性レジストで高感度化
JSR	○ 15	△ 5.3	△ 25	・ベース樹脂の高T _g 化で倒れ抑制 ・同じく酸の拡散長制御でLWR改善 ・増感剤の適用による高感度化
東京応化	○ 14	No data	× 43	・ポリマーバウンドPAGでLWR改善 ・プロトンソース基の導入で高感度化 ・ベース樹脂のT _g と感度の検討
信越化学	× 24	△ 5.4	○ 15	・ポリマーバウンドPAGでLWR改善 ・嵩高いPAGの導入 (おそらく膨潤抑制でLWR改善)
住友化学	No data	No data	No data	(EUVレジストの学会発表なし)
Dow	× 22	○ 3.2 (LER)	○ 17	・光崩壊性塩基で高コントラスト化 (露光部でクエンチャー能を低下) ・OOB対応PAG適用
Inpria	○ 13	○ 4.6	△ 27	・Snベース非化学増幅型レジスト ・限界解像度のチャンピオンデータ 9.5nmも有り。

図 III.2.1.3-1-1: 主要レジストメーカーのレジスト開発状況 学会報告より抜粋

プロセス	下地膜	リンス	DDRM	スムージング	プラズマ
主力メーカー	日産化学 Brewer Merck	Merck/TEL	日産化学	TEL SOKUDO	TEL AMAT
解像性	△ (~10%)	○ (~20%)	◎ (~30%)	—	—
ラフネス	◎ (~30%)	○ (~20%)	△ (~10%)	○ (~20%)	○ (~20%)
感度	◎ (~30%)	—	—	—	—
CD均一性	—	◎ (~40%)	—	—	—
備考	レジストとウエハの間に、 密着性を向上する膜 を形成	パターン現像直後、 特殊洗浄液で、レジ ストを処理		レジストパターンをシナー 雰囲気中で処理し、 表面を溶融	ウエハのエッチング前に水 素などのプラズマでレジ スト表面をエッチング処理

図 III.2.1.3-1-2:レジストプロセス ベンチマーキング

サイト	EIDEC	IMEC	Eureka
露光装置	HSFET (0.5NA)	ASML NXE3300B (0.33NA)	LBNL MET (0.3NA) LBNL MET5 (0.5NA) →高NA装置立ち上げ予定
解像度 (R)	~11nm	13nm	16nm (LBNL)
ラフネス (L)	(非公開)	5.3nm @ 15nmLS	3.2nm (LBNL) @ 18nmLS
感度 (S)	(非公開)	25.2mJ/cm ² @ 15nmLS	19.0mJ/cm ² (LBNL) @ 18nmLS
特徴	<ul style="list-style-type: none"> 材料・プロセス評価 基礎研究 	<ul style="list-style-type: none"> 材料・プロセス評価 デバイス試作 	<ul style="list-style-type: none"> 材料・プロセス評価 基礎研究

図 III.2.1.3-1-3:研究機関 ベンチマーキング

[2] EUV レジスト材料の開発

(a) 解像度 hp11nm レジストの合否判定基準策定、レジスト開発 (EIDEC 標準レジストの選定)

Hp11nm レベルの EIDEC 内でのプロセス開発およびデバイスメーカーにおけるデバイス試作に供するレジスト材料を開発することを目標に、レジストメーカー各社のレジストを評価した。その結果、“第 4 次 EIDEC 標準レジスト”(ESR4)から“第 8 次 EIDEC 標準レジスト”(ESR8)を選定した。以下にその開発の経緯を述べる。

(i) 第 4 次 EIDEC 標準レジスト(ESR4)

ESR1 からベース樹脂の保護率や溶解コントロールユニットの最適化を行い、ESR4 として選定した。ESR4 は ESR1 に比べ、感度が若干悪化するものの、解像度及び LWR が改善された。(Resolution: 24nm, LWR: 7.2nm, Sensitivity: 15.8mJ/cm² @30nmL/S) (図 III.2.1.3-1-4)

(ii) 第 5 次 EIDEC 標準レジスト(ESR5)

ESR5 は、ネガ現像レジストで、先に選定してネガ現像レジストである ESR3 をベース樹脂と PAG の最適化を行った結果、ESR3 に比べ解像度と感度が改善した(ESR5: 解像度 25nm L/S, LWR 6.0nm、感度 16.9mJ/cm²)。 (図 III.2.1.3-1-4)

(iii) 第 6 次 EIDEC 標準レジスト(ESR6)

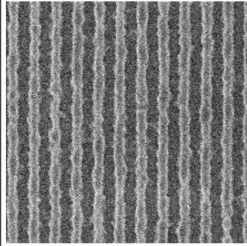
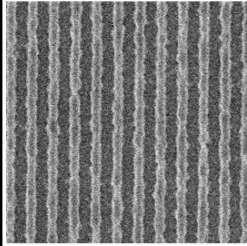
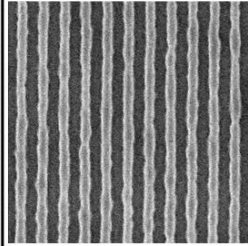
レジスト反応メカニズムシミュレーションやレジスト溶解挙動の直接観測などの基礎研究に基づいて、新規 EIDEC 標準レジスト(ESR6;ネガ現像レジスト)を選定した。ESR6 は ESR5 対比で、LWR (ESR5: 3.7nm vs ESR6: 3.8nm at 22nm 1:1 ラインアンドスペース)を維持しながら、40%の高感度化(ESR5: 20mJ/cm² vs ESR6: 13mJ/cm² at 22nm 1:1 ラインアンドスペース)を達成していることをフルフィールド EUV 露光で確認している。(図 III.2.1.3-1-5)

(iv) 第 7 次 EIDEC 標準レジスト(ESR7)

EUV レジストプロセス開発のため、過去の ESR 開発の知見から、光酸発生剤(PAG)とクエンチャーを改善し、ハイブリッド系樹脂を用いたポジ型化学増幅型レジスト ESR7 を選定した(図 III.2.1.3-1-6)。高解像化のためにはパターン倒れ防止のため、レジスト膜厚を 30nm とした。HSFET での ESR8 のリソ性能は感度 14.5 mJ/cm²、解像度 18 nmL/S、LWR 5.1 nm である。これは基準して用いた ESR1 対比で、解像度 40%、LWR 30%の向上であり、感度も学会等で高感度レジストと認識される 15mJ/cm² 以下を達成した。

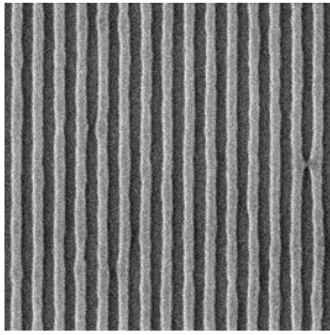
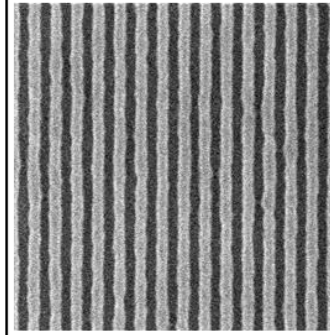
(v) 第 8 次 EIDEC 標準レジスト(ESR8)

第5次、第6次標準レジストは、有機溶媒を現像液として用いたネガ型化学増幅型レジストであるが、本年度はその材料をさらに解像力向上処方を実施し、良好なラインアンドスペースの性能が得られることが確認された。さらに新たに現像液の改良、さらにはリンス液の導入を実施し、第8次 EIDEC 標準レジスト(ESR8)を選定した。性能は HSFET で確認しており、同現像条件では ESR6 に比し約2倍の感度を達成、新現像液・リンス液を用いることで、感度 21.0mJ/cm²、解像度 18nmL/S を達成した。LWR は、4.0nm とポジレジストより優位な結果を得、十分実用に値するリソ性能を達成した。(図 III.2.1.3-1-7)。

Resist		ESR1	ESR4	ESR5
Type		Positive-tone	Positive-tone	Negative-tone
Resolution	nm	25	24	25
LWR	nm	8.1	7.2	6.0
Sensitivity	mJ/cm ²	12.2	15.8	16.9
Top-Down SEM Image 30nm L/S (Mag. 200k)				

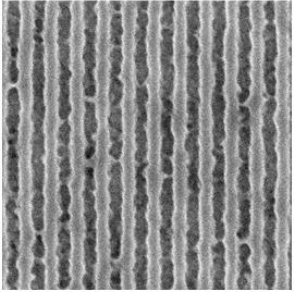
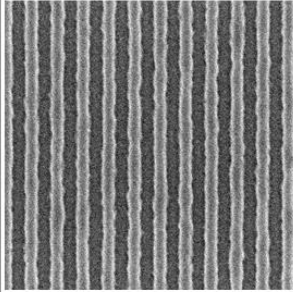
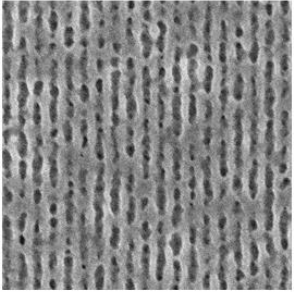
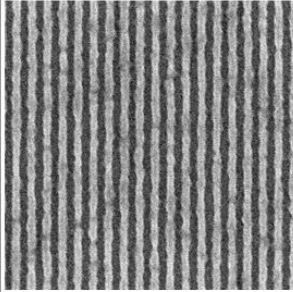
SFET Illumination: Annular (σ 0.7/0.3)

図 III.2.1.3-1-4: EIDEC 標準レジスト リソグラフィ性能一覧

Resist		ESR5	ESR6
Type		Negative-tone	Negative-tone
Resolution	nm	22	22
LWR	nm	3.7	3.8
Sensitivity	mJ/cm ²	20	13
Top-Down SEM Image 22nm L/S (Mag. 200k)			

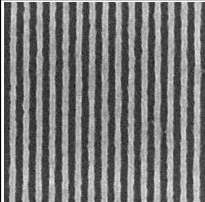
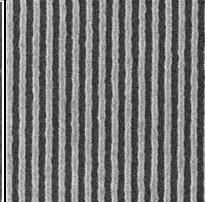
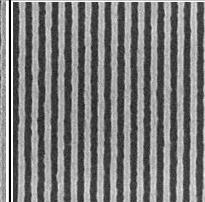
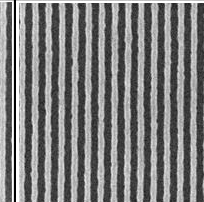
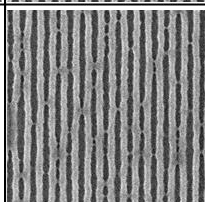
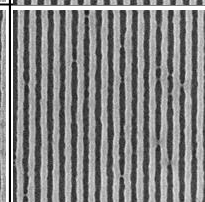
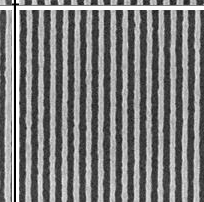
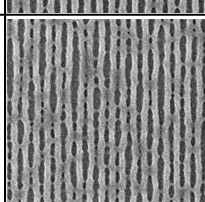
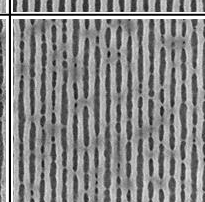
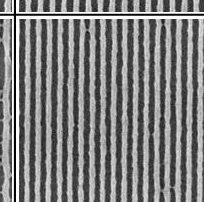
Full field scanner (NA 0.25)

図 III.2.1.3-1-5: EIDEC 標準レジスト リソグラフィ性能一覧

Resist		ESR1	ESR7
Type		Positive-tone	Positive-tone
30nmLS	LWR (nm)	7.2	4.2
	Sensitivity (mJ/cm ²)	5.0	14.5
	Top-Down SEM Image (Mag. 200k)		
18nmLS	LWR (nm)	–	5.1
	Sensitivity (mJ/cm ²)	5.0	14.5
	Top-Down SEM Image (Mag. 200k)		

HSFET (Quad.)

図 III.2.1.3-1-6: EIDEC 標準レジスト リソグラフィ性能一覧

Resist		ESR6		ESR8	
Developer		Standard		New	New (+ Rinse)
Type		Negative-tone			
Resolution	nm	22	22	20	18
LWR	nm	4.2	~4	~4	~4
Sensitivity	mJ/cm ²	46	26	23	21
Top-Down SEM Image (Mag. 200k)	22nm L/S				
	20nm L/S	No image			
	18nm L/S	No image			

HSFET (Quad.)

図 III.2.1.3-1-7: EIDEC 標準レジスト リソグラフィ性能一覧

(b) レジスト組成物のスクリーニング

hp11nm 向けのレジストに必要な要素技術検討のために、レジスト組成物(ベース樹脂、光酸発生剤(PAG)、クエンチャー等)のスクリーニング評価を行った。レジスト組成物の種類は多岐にわたるため、事前にコンセプトを十分に精査し、スクリーニングすべき要素を系統立てて選択する必要がある。具体的には、ベース樹脂には、保護基ユニット、親疎水性コントロールユニット、その他機能性ユニット(PAGから発生した酸の拡散長のコントロール、ベース樹脂の Tg コントロール、吸光度コントロール)、ポリマーバウンド PAG 樹脂(PAG をベース樹脂に結合させた樹脂)等がある。その中でも保護基ユニットに関しては、保護基ユニットの導入率、嵩高さ、反応性等のパラメーターがある。また、PAG、クエンチャーには、嵩高さ、添加量、酸塩基性度等のパラメーターがある。これらを単純にスクリーニングすると、その組み合わせは無限に存在する。そのため、EUV レジストに求められている主要な課題である、RLS(R:解像度、L:LWR(Line Width Roughness)、S:感度)に対し、関与すると思われるパラメーターを抽出し、起こりうる現象の仮説を立て、スクリーニング評価を行い、結果を検証する事が重要である。

以下にレジスト材料スクリーニングの主要な評価結果を記載する。

(i) レジスト基礎特性に基づくスクリーニング評価

レジスト材料の評価を行う際には、実際のパターニング評価以外に、レジストの基礎特性評価として、広い領域(例えば1cm x 1cm 角)を露光してレジスト膜の残膜量を測定する評価や、レジスト現像アナライザなどを用いたレジストの溶解速度の評価などが行われている。これらもスクリーニング評価の一環として行われている。特にコンセプトの検証などに有効な手段である。また、高速 AFM によりレジスト材料の現像挙動を直接観測することで、レジスト材料設計の指針を得る検討も行っている。レジストパターニングで現像は最も重要なステップの一つであるが、高速 AFM を用いることでその挙動を直接観測できる。そのため、現像中にレジスト材料がどのように溶解していくか、溶解の挙動とレジストパターンにどのような相関があるかを確認した(図 III.2.1.3-1-8)。実際の評価としてはベース樹脂骨格違いで、露光部のレジストがどのように現像液に溶解するかという評価を行った。その結果、レジストの組成違いで、現像液に対する溶解性が大きく異なることが明らかになった(図 III.2.1.3-1-8)。具体的には、現像液に溶解する時にレジスト樹脂が大きく膨潤するものと、膨潤が小さいものがあった。これらを実際に露光してみると、樹脂の膨潤が小さい樹脂では、レジストの LWR が小さいことが判明した。これらの検討は EUV レジスト材料設計の指針として大きく役立つものであった。

(ii) パターニングによるスクリーニング評価

通常レジスト組成を変更する場合、レジスト樹脂の組成を変更する、光酸発生剤(PAG)やクエンチャーなどの低分子添加剤を変更するのが一般的である。しかし、レジスト樹脂の組成変更のためには、レジスト樹脂を構成するモノマーの組み合わせに限界があるなど、自由な材料設計ができない可能性がある。また、PAG やクエンチャーなどの低分子添加剤の場合、低分子であることで酸の拡散などに影響が出たり、塗布性不良を引き起したりする可能性がある。

これらの課題を解決する方法として、メインのレジスト樹脂以外に、樹脂型添加剤を用いることで上記の課題を解決できる可能性がある。そのため、今回参照レジストに対して、樹脂型添加剤 2 種を加え、評価を行った。これらのレジストは塗布不良などの発生もなく、また EUV 露光の結果約 5% の高感度化、約 10% の LWR 改良を達成した(図 III.2.1.3-1-9)。

EUV レジストの組成は主に、樹脂/光酸発生剤(PAG)/クエンチャーからなる。この中で、化学増幅レジストの特徴として、レジスト溶液中では不活性な状態ながら、露光することで酸を発生し、レジストを解像する。また、PAG から発生した酸はレジスト膜中を拡散するが、この拡散挙動によって、レジストパターンは大きく影響を受ける。

このように、PAG はレジストに大きな影響を与えるため、新規 PAG のスクリーニングを行った。参照となるレジストは解像限界が CD=28nm であったが、新規 PAG を適用することにより、CD=25nm まで、解像限界を 10%改良することに成功した(図 III.2.1.3-1-10)。

また、新規クエンチャー適用により、解像性能、ラフネスを維持したまま、高感度化を目指してスクリーニングを行った。クエンチャーに合わせて、樹脂の保護率も最適化した結果、参照レジスト対比で解像性能とラフネスを劣化させず 46%の高感度化に成功した(図 III.2.1.3-1-11)。

(iii) コンタクトホール(C/H)評価

EUV レジストは、実際のデバイスの量産においては、ラインアンドスペース(L/S)パターンだけでなく、C/Hパターンを始めとした様々なパターンで用いられる。ArF 液浸世代までの実績から、L/Sパターンと C/H パターンにおいては、レジストに求められる特性が異なる事が明らかである。そのため、C/Hパターンの評価も同時に行っている。

実際に hp26nm の C/H パターン評価を実施した。当初 L/S 向けのレジスト(参照レジスト)を用いて検討していたが、このレジストではパターニングは可能だが、特に感度の面で十分に満足できるリソグラフィ性能は得られなかった。そこで、再度酸の拡散長に着目してスクリーニング評価を行い、C/H パターンに最適化したレジスト(Resist-E)を開発することで、約 25%の感度マージンを向上させることができた(図 III.2.1.3-1-12)。

EIDEC では上記のようにスクリーニング評価を繰り返す事で、着実にリソグラフィ性能を向上させてきた。EUV は量産適用が間近に迫ってきており、これらの研究成果をもとに、実際の半導体生産で適用する材料の開発が進められていく予定である。

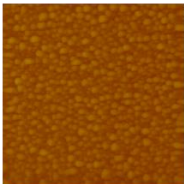
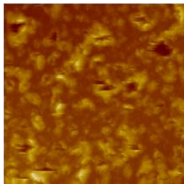
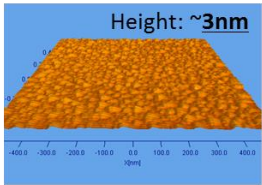
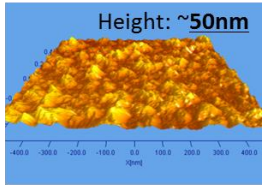
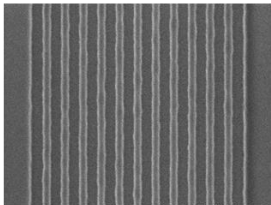
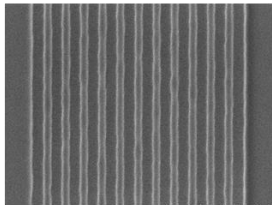
Sample #			S-1	S-2
高速AFMによる 露光部のレジスト現像挙動				
				
40nm L/S	LWR	nm	6.8	8.3
	Sensitivity	uC/cm ²	144	115
	Top-Down SEM image CD / nm			

図 III.2.1.3-1-8: 高速 AFM によるレジスト膜溶解挙動とラフネスの関係

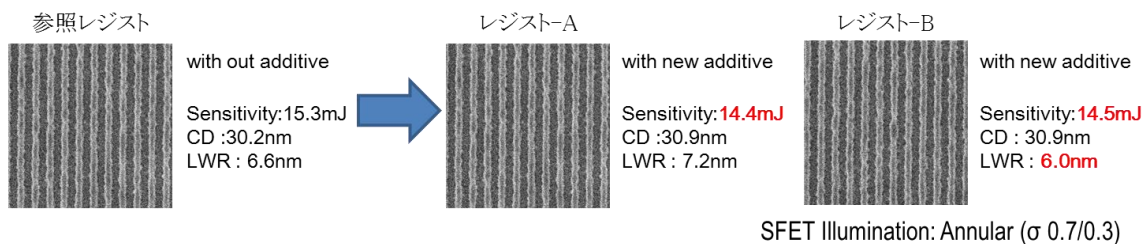


図 III.2.1.3-1-9: 樹脂型添加剤による感度、ラフネス改良検討

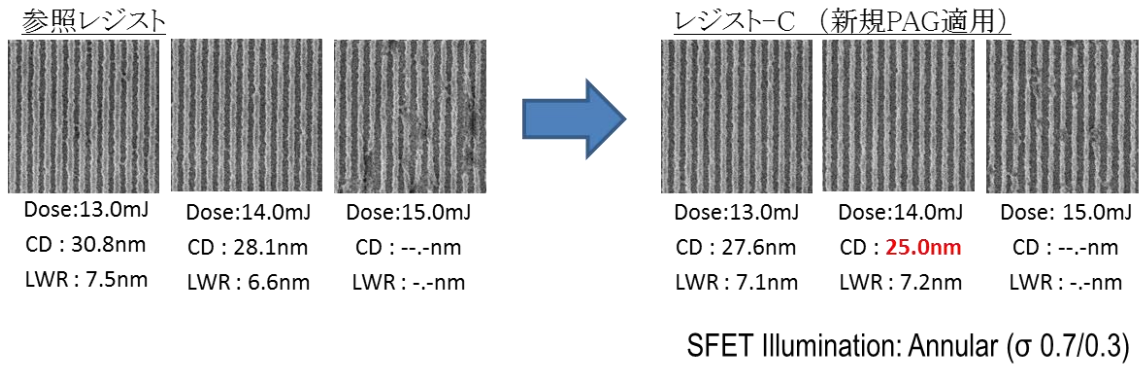
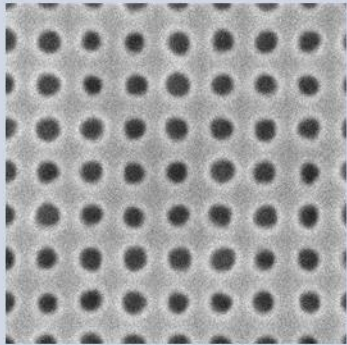
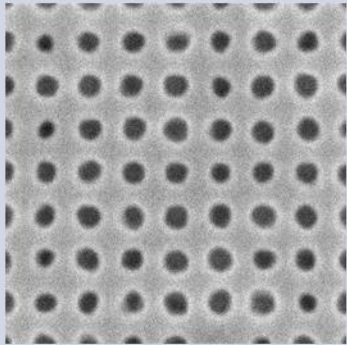


図 III.2.1.3-1-10: 新規 PAG 適用検討

Sample Thickness PAB/PEB	Profile 22nm L/S	Esize [mJ/cm ²] 22nmL/S	LWR [nm] 22nmL/S	Resolution [nm] 22nmL/S Esize
参照レジスト 膜厚: 40nm 130 / 120		26.6	4.0	19
レジスト-D 膜厚: 40nm 130 / 120		14.4 (-46%) Improved	3.8 (-0.2nm) Improved	20

図 III.2.1.3-1-11: 新規クエンチャー適用検討

26nmCH	参照レジスト	Resist-E
SEM (333k)		
Eop (mJ/cm ²)	39.6	30.2
膜厚	50nm	←
Illumination	Conventional	←
Substrate	HMDS:90C60s	←

Full field scanner (0.25NA)

図 III.2.1.3-1-12: ホールパターン評価

(c) ネガ現像レジストの開発

EUV リソグラフィは、前述のとおり 10nm以下の技術ノードにおいて最も有望な技術として期待されている。レジスト材料としては、化学増幅型レジストが有望視されているが、その性能は限界に近づいており新しい材料が必要であるという声も出始めている。

通常の化学増幅型レジストは、2.38%テトラメチルアンモニウムヒドロキシド (TMAH) 水溶液に代表されるアルカリ水溶液ベースで現像されるもので、これをポジ現像プロセスと呼び、そのレジストはポジ型化学増幅レジストと呼ばれている。2.38%TMAHは、リソグラフィ業界では標準現像液と呼ばれ各デバイスメーカーも必ずこの現像液をすでに使用していることから、工業的に非常に有用な手段である。しかしながら、このアルカリ水溶液ベースの現像液を用いた現像には、レジスト膜の膨潤という問題を抱えており、ひいてはこの現象がラインエッジラフネス (LWR) の悪化やパターン倒れを引き起こす要因となっている。特に、パターン線幅が微細になるほどパターン倒れは深刻になってくる。

化学増幅型レジストは、発生した酸の作用によりポリマーの保護基が脱離しカルボン酸基が発生する。発生したカルボン酸基は、アルカリ水溶液には可溶であり前述に示すポジ型画像を得る事が出来る一方、その高い親水性から有機溶剤には不溶である。そこで、現像液をアルカリ水溶液から有機溶剤に変更することにより露光部が残膜するネガ現像プロセスが可能となる(図 III.2.1.3-1-13)。

有機溶剤現像によるネガ型化学増幅レジストは、有機化合物を有機溶剤で溶解させる特徴から、低膨潤かつスムーズな溶解が可能となる。その結果、露光されたパターンは忠実に光学像を再現し、良好な LWR を与える事が期待される。EIDEC では、この現象に関する研究を行い、現像挙動を in-situ で観察可能な高速原子間力顕微鏡 (High-Speed Atomic Force Microscopy: HSAFM) によりポジ現像に

比しネガ現像が低膨潤でスムーズな現像挙動を示すことを明らかにしている(図 III.2.1.3-1-14)。

そこで、この利点を活かすべくネガ型化学増幅レジストの検討を実施し、ポジ型化学増幅レジストと比較してその優位点を検討した。ネガ型化学増幅レジスト用のポリマーは、ポジ型化学増幅レジストのそれと最適な共重合比が異なるため最適な共重合比のポリマーを合成し、最適な光酸発生剤(PAG: Photo acid generator)を配合してレジスト液を調整した。得られたレジスト液をメンバーカンパニー保有のASML社製EUVスキャナーNXE3100(NA=0.25)にて、ハーフピッチ35nm(ライン/スペース=1/1)のマスクを介して露光、有機溶剤(酢酸ブチル)で現像してパターンを得た。比較として別途調整したポジ型化学増幅レジストを同様にNXE3100で露光し2.38%TMAHにて現像しパターンを得た。両方のレジストの感度が同じになるように各材料を調整し比較検討した結果、ポジ現像が15mJ/cm²でのLWRが5.4nmであったのに対し、ネガ現像のLWRは4.3nmと優位な結果を得た(図 III.2.1.3-1-15)。

ところで、EUVリソグラフィの実現化へ向けには露光装置の光源パワー不足を補う意味で、レジスト材料からの助け、すなわち高感度化が求められている。一方、レジストの性能として感度とLWRはトレードオフであることは、様々な検討から知られている。そこで、EUVリソグラフィの実現化へ向け、ネガ現像の低膨潤かつスムーズな現像によるLWRの良化分を感度に振り分け、ネガ型化学増幅レジストによる高感度化の検討を行った。高感度化施策用ネガ型化学増幅レジストおよび比較のポジ型化学増幅レジストを調整し、前述同様メンバーカンパニー保有のASML社製EUVスキャナーNXE3100(NA=0.25)を用いて、ハーフピッチ24nm(ライン/スペース=1/1)のマスクを介して露光、現像を行った。ポジ現像が、LWRが3.6nm、21mJ/cm²でパターン形成するのにに対し、ネガ現像はLWRが3.9nm、13mJ/cm²と約1.5倍の高感度化が可能であることが明らかとなった(図 III.2.1.3-1-16)。

さらに、前述のネガ型化学増幅レジストの処方検討により超高感度処方から低感度処方まで調整し作成したレジスト材料を、前述同様メンバーカンパニー保有のASML社製EUVスキャナーNXE3100(NA=0.25)を用いて、ハーフピッチ24nm(ライン/スペース=1/1)およびハーフピッチ22nm(ライン/スペース=1/1)のマスクを介して露光、現像しパターン形成性評価を行った。感度とLWRはトレードオフの関係にあるため、低感度処方レジストがハーフピッチ24nmマスク露光において感度33mJ/cm²ながらLWRが3.0nmと良好な結果を示した。同条件下、超高感度処方はLWRが4.9nmまで悪化するものの感度が10mJ/cm²をきって一桁台の9mJ/cm²でと画期的な結果を与えた。さらに、その感度においても該スキャナー評価では限界値に近いハーフピッチ22nmでも良好な結果を与え、有望な高感度レジストが出来ることが確認されEUVリソグラフィ実現化へ弾みがつく結果となった(図 III.2.1.3-1-17)。

Coat & Exposure ⇨ Bake (Reaction) ⇨ Development

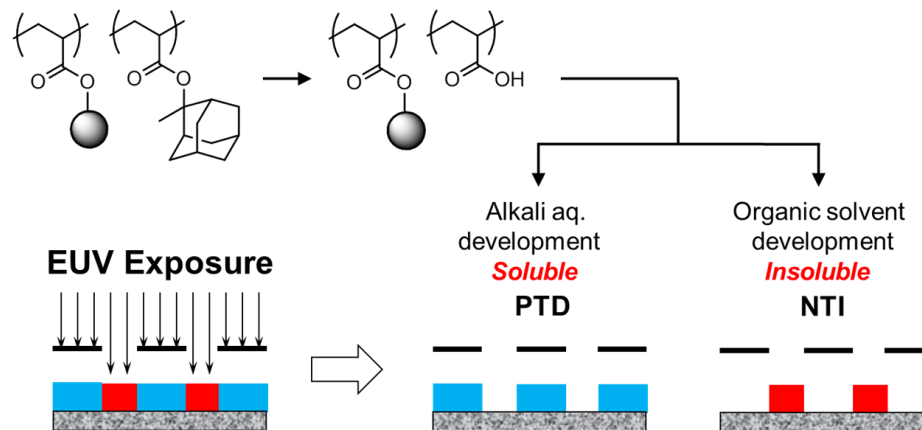


図 III.2.1.3-1-13 化学増幅型レジストの有機溶剤現像(ネガ現像:NTI)とアルカリ水溶液現像(ポジ現像:PTD)

Development behavior using in situ High Speed-AFM

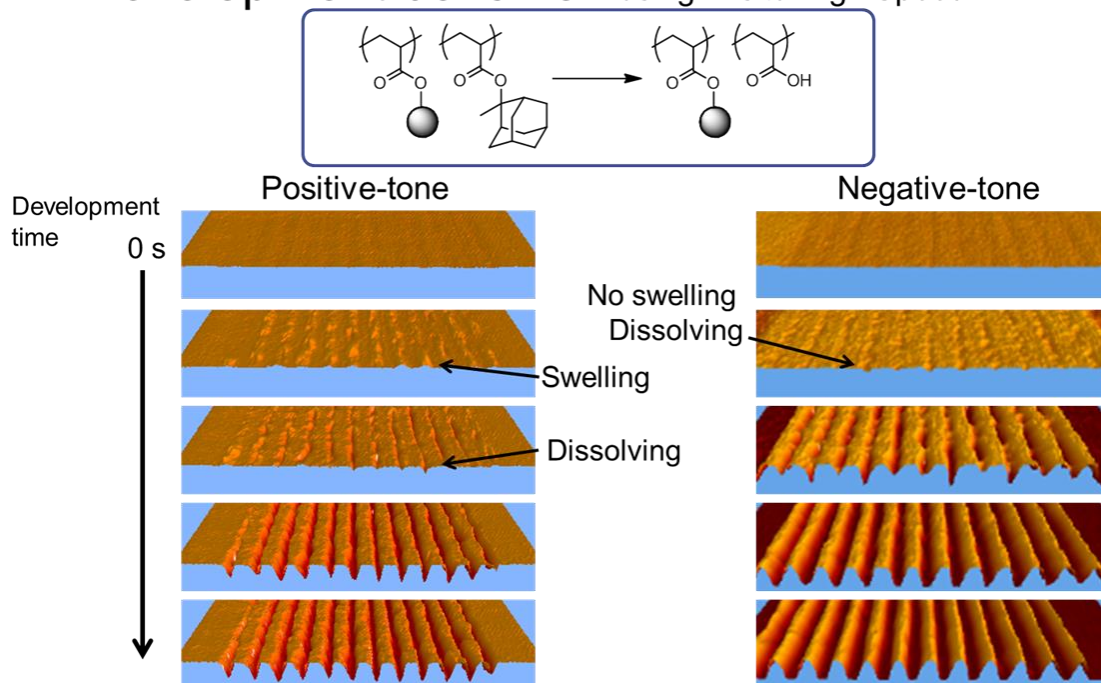


図 III.2.1.3-1-14: HSAFMを用いたネガ型化学増幅レジストとポジ型化学増幅レジストの溶解挙動

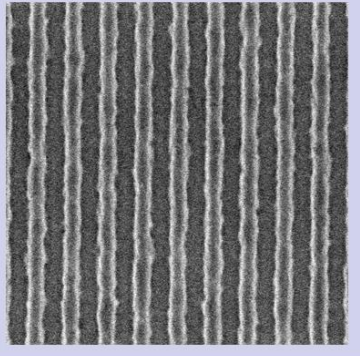
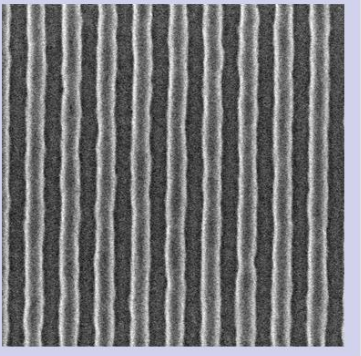
	Positive-tone	Negative-tone
Resolution	35 nm hp	35 nm hp
LWR	5.4 nm	<u>4.3 nm</u>
Sensitivity	15 mJ / cm ²	15 mJ / cm ²
L / S (Line / Space)		
1:1		

図 III.2.1.3-1-15: ポジ現像とネガ現像の露光感度をそろえた時のリソグラフィ性能比較

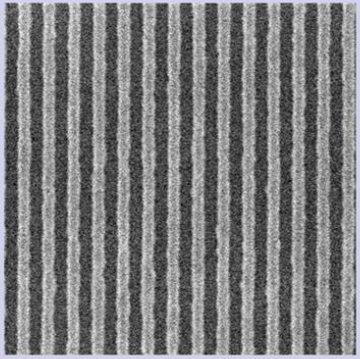
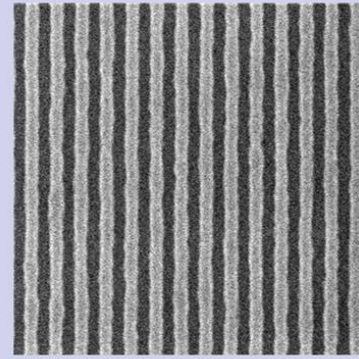
	Positive-tone	Negative-tone
Resolution	24 nm hp	24 nm hp
LWR	3.6 nm	3.9 nm
Sensitivity	21 mJ / cm ²	<u>13 mJ / cm²</u>
L / S (Line / Space) 1:1		

図 III.2.1.3-1-16: ポジ現像とネガ現像の LWR をそろえた時のリソグラフィ性能比較

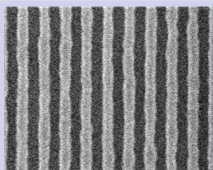
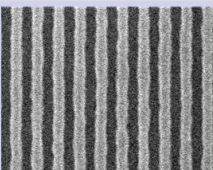
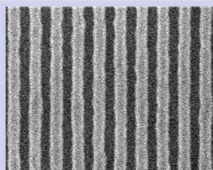
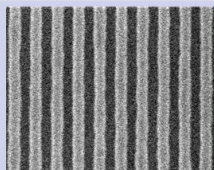
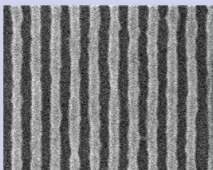
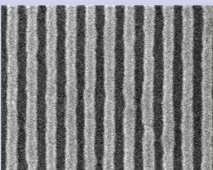
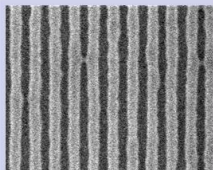
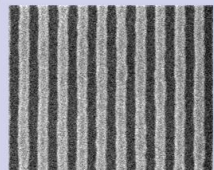
hp size (nm)	9 mJ	13 mJ	18 mJ	33 mJ
24 nm hp	 LWR=4.9nm	 LWR=3.9nm	 LWR=3.9nm	 LWR=3.0nm
22 nm hp	 LWR=5.4nm	 LWR=3.8nm	 LWR=3.7nm	 LWR=3.8nm

図 III.2.1.3-1-17: ネガ型化学増幅レジストのリソグラフィ性能

(d) Full field EUV 露光評価

NA0.25 の EUV 露光装置によるフルフィールド露光評価のスキームを構築し、ウェハ全面において十分な精度を持って評価可能であることを確認した。EIDEC 標準レジストの ESR1、及びネガ現像レジスト (ESR5) にて、Dipole 照明を用い、hp19nm のパターンの解像を確認した。さらに、極端な Dipole 照明を用いることで、ESR1 にて hp16nm の限界解像度を確認した(図 III.2.1.3-1-18)。

同様に C/H パターンの評価も行っている。実際に C/H パターン評価を L/S パターンにて良好なリソグラフィ性能を示したレジスト(Resist-A)にて実施した。その結果、パターンニングは可能だが、十分に満足できるリソグラフィ性能は得られなかった。そこで、PAG を検討し、再度酸の拡散長について改善し、PAG に合わせたクエンチャーの開発を行った。これらの新規材料を用いてレジストスクリーニング評価を行った結果、C/H パターンに最適化したレジスト(Resist-4)を開発することで、約 20%の高感度化と約 10%の CD uniformity (CDU)を向上させることができた(図 III.2.1.3-1-19)。

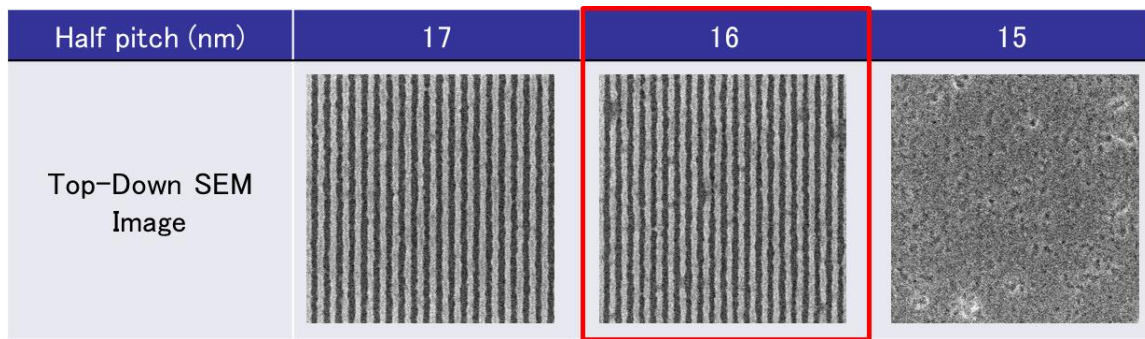


図 III.2.1.3-1-18: 極端 Dipole 照明による ESR1 のフルフィールド限界解像度

hp26nm	参照レジスト	Resist-F
SEM (333k)		
CD (nm)	26.3	26.1
Eop (mJ/cm ²)	36.2	29.7
CDU (3σ, nm)	3.80	3.49

図 III.2.1.3-1-19: フルフィールド露光による C/H パターンの CDU 評価

(e) 限界解像度評価

EUV レジストに主に求められている課題は、RLS のトレードオフの打開である。しかしながら、hp11nm のパターンニングを見据えた場合、現状の化学増幅型有機レジストで対応できるかどうかの判断をいち早く行う必要がある。そのためには、高解像度に特化したレジストの評価は必要不可欠である。

(i) ポジ現像型レジストの限界解像度

EUV リソグラフィを用いた微細パターンの解像に関して、EIDEC では露光機として HFSET (High NA Small Field Exposure tool)を用いて 11nm のトレンチパターン及び 15nm のホールパターン解像を確認した(図 III.2.1.3-1-20)。11nm トレンチパターンは半導体デバイスにおいて実際に配線部分となるパターンの解像で、あらゆる EUV 露光機の中でもトップレベルの微細パターン解像と言える。ホールパターンについては、従来の露光機およびプロセスでは hp17nm 以下の解像例はほとんど報告されていなかったが、高解像度に特化したレジストの評価を行い、hp15nm までの C/H パターンを解像することに成功した。

(ii) ネガ現像型レジストの限界解像度

ネガ型化学増幅レジストの限界解像力ポテンシャルを確認する目的で、現在最も解像力の高い描画方法の一つであるEB描画装置を国立研究法人材料物質開発機構保有で微細加工ナノプラットフォームコンソーシアムのナノテクノロジープラットフォームを加工委託により活用し描画評価を行った結果、ハーフピッチ 20nm 以下のパターン描画が可能であることが分かり、限界解像力が 14nm であることが分かった(図 III.2.1.3-1-21)。これは、7nm テクノロジーノードロジックに適用可能な寸法サイズであり、本研究で開発されたネガ現像レジストが EUV リソグラフィ実現化へ向け大きく貢献することが確認された。

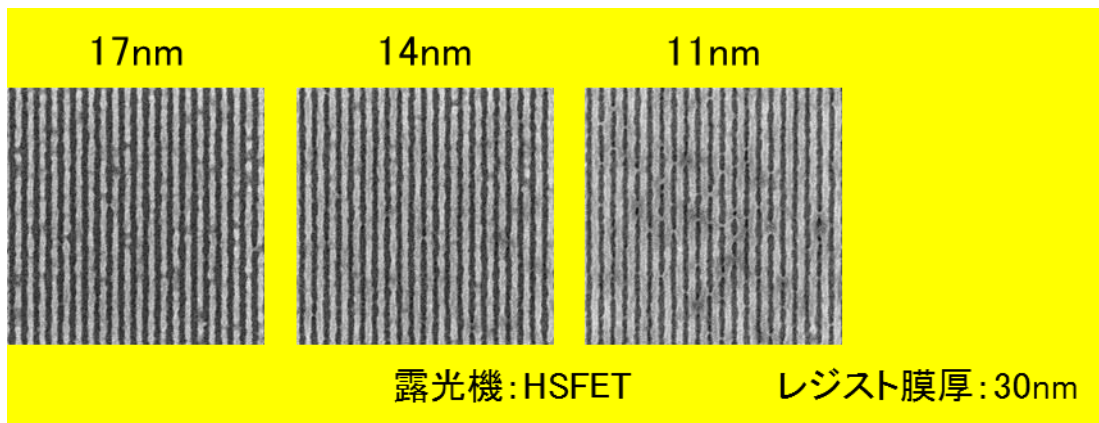


図 III.2.1.3-1-20: HSFET による限界解像度検討

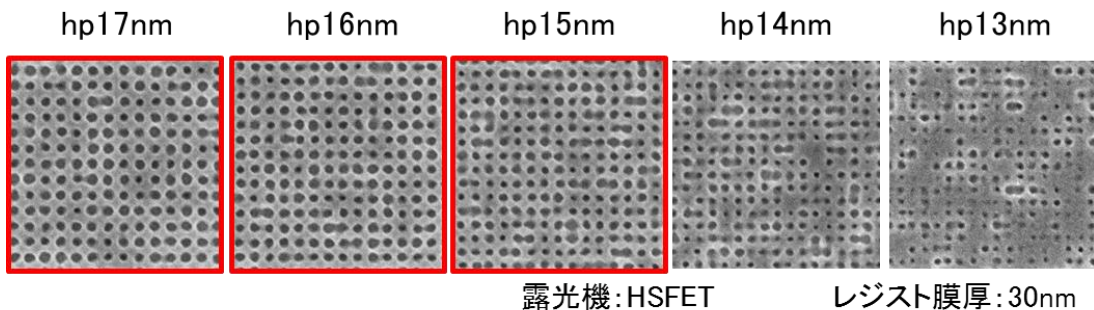


図 III.2.1.3-1-21: フルフィールド露光による C/H パターンの CDU 評価

- [3] EUV レジストプロセスの開発
- (a) EUV 向けリンスプロセス開発

パターン倒れ改善、感度改善を目的とし、現像後に用いる界面活性剤リンス液を、レジスト-G と組合せて評価した。

20種類以上のリンス液を評価し、通常のリンス液(D.I.W.)で処理した場合と、新規リンス液で処理した場合とで比較を行ったところ、Rinse B を適用することによって、パターン倒れならびにレジスト感度を改善することができた。Rinse B を標準リンス液として選定した(図 III.2.1.3-1-22)。

本リンス液は、通常のリンス液(D.I.W.)と比較し表面張力が低く、リンス液が乾燥する際に掛かる応力を抑えることで、パターン倒れを緩和することができた(図 III.2.1.3-1-23)。

	D.I.W (Ref.)	Rinse A	Rinse B
Minimum CD@22nm (nm)	21.7	19.2	17.5
LWR @22nm (nm)	4.9	4.8	4.9
Sensitivity @22nm (mJ/cm ²)	39.3	38.4	37.5
Top-Down SEM image @ 22nm hp			

図 III.2.1.3-1-22: 新規リンス液評価結果

Dose (mJ/cm ²)	Good ■ NG (Collapse)						
	36	38	40	42	44	46	48
DIW							
	23.9	22.5	21.7	Collapse			
Rinse-A							
	23.1	22.2	20.7	20.2	19.2	Collapse	
Rinse-B							
	23.0	21.6	20.4	19.4	18.3	17.5	Collapse

図 III.2.1.3-1-23: 新規リンス液によるレジスト解像度向上検討

(b) 下層膜プロセスの開発

EUV リソグラフィにおいて、レジストの感度、解像性、ラフネスの更なる改善が求められる。特に、近年においては、レジストの感度改善が重要項目として挙げられる。よって、レジストの感度を向上させる下層膜プロセスの構築を目標として、有機下層膜の開発を行った。

下層膜に二次電子を発生させる材料を用い、レジスト中の酸発生を促進させ、レジストの高感度化を目標とした。レジストには EIDEC 標準レジスト 1 (ESR1) を用いた。

hp32nm のラインアンドスペースパターンにおいて HMDS 処理したシリコンウェハの場合と下層膜を適用した場合とで比較を行ったところ、前者の感度が $12.6\text{mJ}/\text{cm}^2$ であったのに対して後者の感度は $6.4\text{mJ}/\text{cm}^2$ であった。下層膜の適用によって約 49% 高感度化することを確認した。これは、適用した下層膜の酸発生促進効果によって、レジストの感度が改善されたと考えられる(図 III.2.1.3-1-24)。

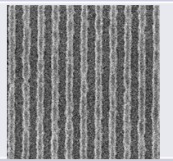
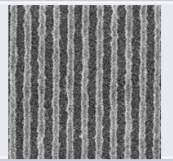
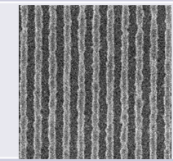
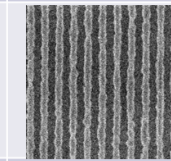
Underlayer	HMDS	Underlayer A		
UL Bake temperature (C/60s)	-	225	240	270
Sensitivity (mJ/cm^2)	12.6	8.9	7.6	6.4
Sensitivity improvement	Ref.	29.4%	39.7%	49.2%
Top-Down SEM image (32nmLS)				
LWR (nm)	9.1	9.4	9.9	10.5

図 III.2.1.3-1-24:新規下層膜によるレジスト高感度化

[4] レジストプロセス評価技術の開発

(a) レジスト溶解反応中の評価技術の開発

EUV レジストパターンの形成過程(現像過程、リンス過程など)を可視化・解析することは、レジスト材料の評価、新規開発の大きな手掛かりとなる。我々は 2010 年に高速原子間力顕微鏡(HS-AFM)を用いて希釈アルカリ現像液中で起こる孤立ラインの現像過程観察に世界で初めて成功した。その後、機器の改造、手法の改良を行うことにより、2014 年には標準濃度のアルカリ現像液(2.38% TMAH)中で hp32nm ラインアンドスペース(L/S)パターンの現像過程観察、およびネガレジストが有機溶剤中で現像される課程の観察にも成功した。しかし、ここまでで得られた結果は、単に AFM で観察された画像データに過ぎず、プロセスやレジスト材料評価の指標とするためには数値データに変換することが必要となる。

本技術開発では、得られた HS-AFM の画像データから、さまざまな数値データを導き出す手法の開発を行い、さらに従来技術では不可能であったレジストのパターン形成過程(現像課程)を通して、これらの数値変化の動向を明らかにすることを目的とした。

(i) AFM 画像の適正化処理

AFM で得られる生の画像データは、さまざまな要因によるノイズやひずみを含む。さらに探針(プローブ)を用いて表面を走査するという AFM の原理上、用いた探針の形状が画像データに影響を与えている。特に観察対象がナノメートルサイズの微細なものであるほど、この影響は大きくなる。こ

のため、AFM 画像データから正確な数値データを得るには、これらの影響を極力取り除く処理が必要である。ノイズ除去については、メディアンフィルタによりスパイクノイズを、FFT フィルタにて周期的なノイズの除去を行った。ドリフトによるサンプルの移動や機械的なひずみは、最適な三次式による除去を行った。探針形状の影響は、カンチレバー製造業者が提示する平均的な探針形状を参考にして影響の除去(デコンボリューション)を行った。これらの処理には、AFM 画像処理専門ソフトである SPIP (Image Metrology 社)を用いた。

(ii) ラインラフネス (手法、および検証)

ラインラフネスは、レジスト材料、およびプロセスの影響により生じるラインの局所的なゆらぎであり、半導体分野では、もっとも多くの場面で評価の参考とされる数値データである。一般的には、レジスト現像後のラインスペースパターンについて走査型電子顕微鏡 (SEM) を用いて観察を行い、その画像から算出される LER (Line Edge Roughness)、LWR (Line Width Roughness)、CD (Critical Dimension) などの数値データを指す。

まず、HS-AFM により得られた画像データから、これらの数値データを導き出す手法の開発と、その妥当性の検証を行った。手法については、SPIP を用いて前記の AFM 画像の適正処理を行った後、同ソフトにてレジスト表面(ラインのトップ)から特定の深さでスライスした際のラインラフネスを求めることとした(図 III.2.1.3-1-25)。この手法の妥当性を検証するため、従来のプロセスで作成された 1:1 L/S パターンを SEM と AFM の両方で観察し、それぞれから CD と LWR を計測した。その結果、AFM 画像から得られる計測値が、従来法である SEM の値とほぼ同じとなる深さは、ラインのトップから 10nm 下あたりであることが判明した。また、パターンのピッチ (32, 36, 40, 50nm) に大きく左右されることが無いことから、信頼性、および妥当性も高いと判断した(図 III.2.1.3-1-26)。

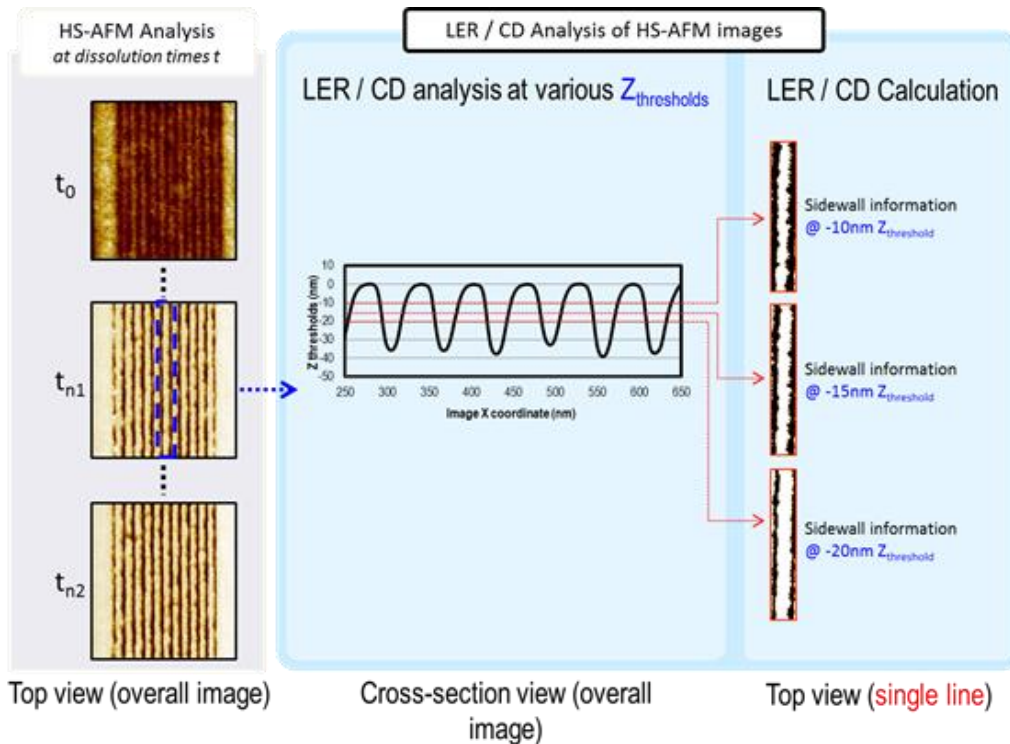


図 III.2.1.3-1-25: 高速原子間力顕微鏡による現像中のレジスト直接観測と定量解析

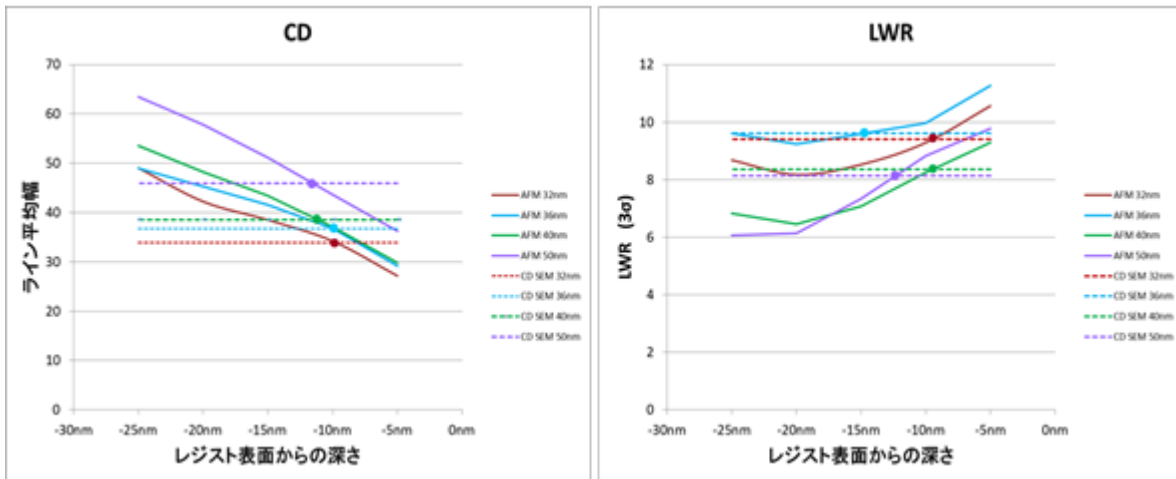


図 III.2.1.3-1-26: HS-AFM と SEM から得られた数値データの比較

(iii)ラインラフネス（現像過程中的の変化）

ラインが形成される現像課程中の観察を行った HS-AFM の画像データから、ラインラフネス(CD, LER)がどのように変化していくかの解析を試みた。観察に用いたパターンは、1:1 hp32nm L/S パターンを、またラフネスの解析は、ライトトップから 10nm 下でスライスした場合の値を用いた。解析に用いたレジスト(PHS based EUV resist)の場合、現像が開始された直後の 0 秒～45 秒は、スペース部分が 10nm に達しておらずラフネス値が得られていないが、10nm に達した後は一気に CD が小さくなると同時に、LER も小さくなる様子が明らかとなった。また、CD にくらべ LER の方が急激に下がり、ともに一定時間に達するとそれ以上の変化が無くなることが判明した(図 III.2.1.3-1-27)。現像中のラインラフネス値の変化を解析した報告は過去になく、世界初である。

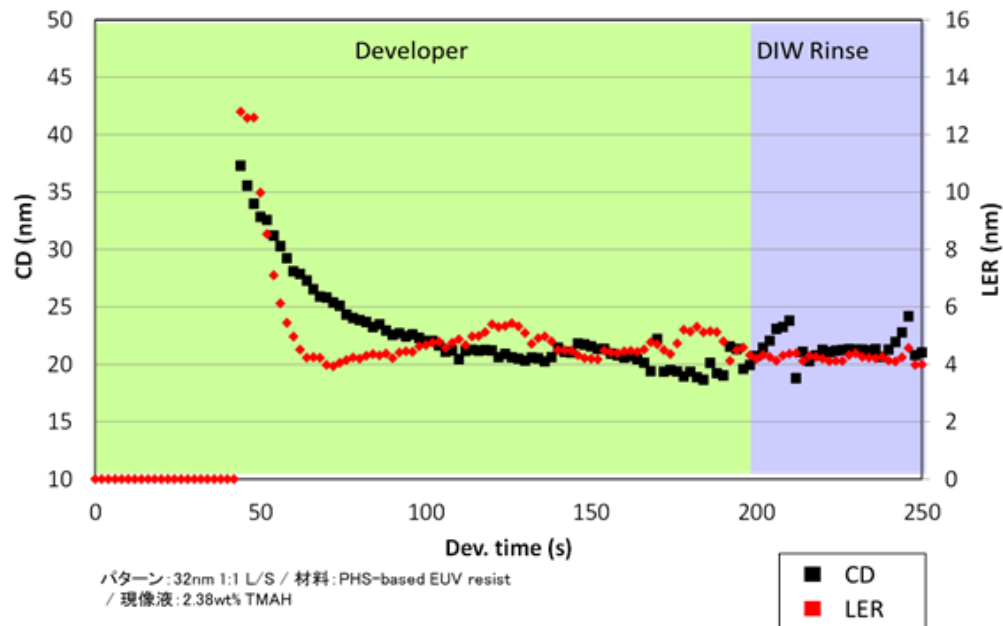


図 III.2.1.3-1-27: 現像中のレジストパターンサイズ(CD)と LER の比較

(iv) 表面ラフネス

ラインが形成される現像課程中のレジスト表面ラフネスがどのように変化していくかの解析を試みた。観察には PHS ベースの EUV レジストを、パターンは、1:1 hp32nm L/S パターンを使用した。表面ラフネスは、AFM 画像中のライン 5 本の中央と、同じく 5 本のスペース中央部の標準偏差を平均した値を用いた。ラインとスペースの表面ラフネスを現像課程を追ってグラフした結果、それぞれの変化が明確となった。スペース部の表面ラフネスは、現像液注入後、徐々に大きくなり(0~45 秒)、ラインが形成される時期に急激に大きくなって最大(50 秒)を迎え、その後減少して一定値に落ち着く(80 秒)。また、ライン部は、スペース部が増大するのに合わせて、徐々に増加し、ライン形成が終わった後(60 秒)は、ほぼ一定値を維持することが明らかとなった(図 III.2.1.3-1-28)。

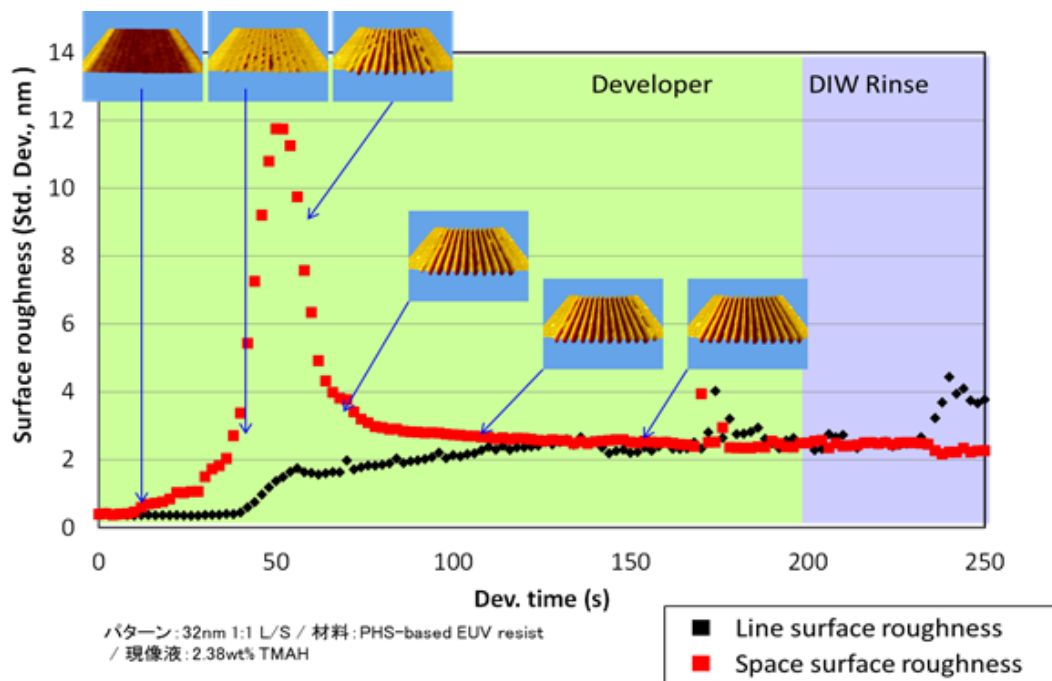


図 III.2.1.3-1-28: 現像中のラインパターン天辺とスペース(溶解部分)の粗さ変動

(v) ライン欠陥解析

L/S パターンに起こるラインブリッジや断線の欠陥がどのように起こるかを解析した。AFM 画像中のライン 5 本(長さ1 μ m \times 5 本)に起こるブリッジや断線の数を計測した。この結果から、欠陥の無い、最適な現像時間が明確となった。今回の解析は、ESR1 レジストの 1:1 hp32nm L/S パターンを使用した。さらに微細なパターンを用いて解析することにより、そのレジストの限界解像度(ラインブリッジと断線が同時に起こる)を明らかにすることが可能である(図 III.2.1.3-1-29)。

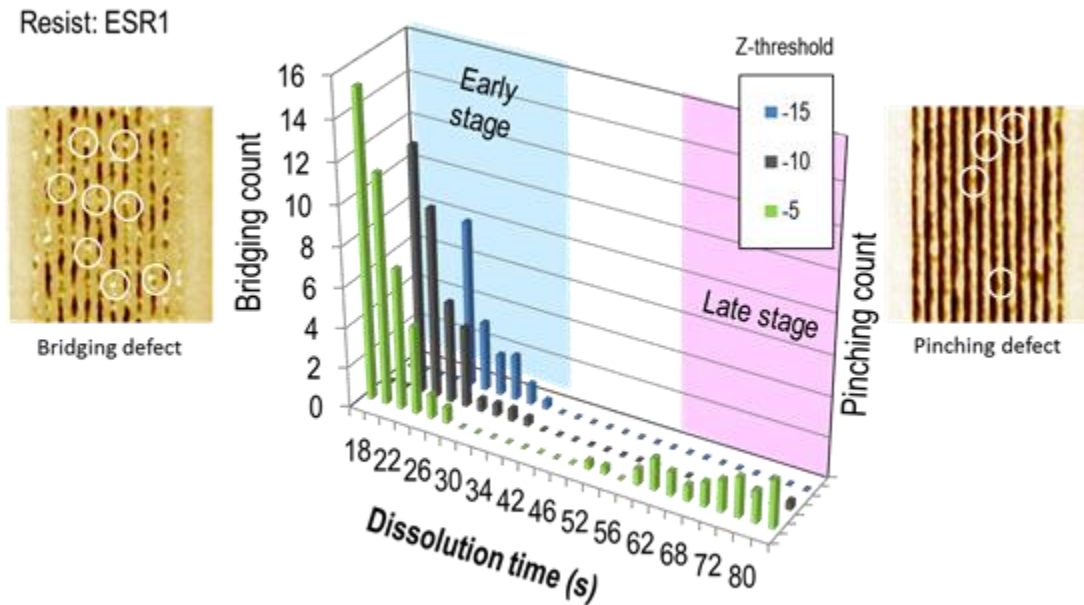


図 III.2.1.3-1-29: 現像中のパターン形成過程での欠陥生成

(vi) コンタクトホール現像課程観察

コンタクトホールは、多層配線構造などを形成する場合の層間絶縁膜に明けられた穴であり、このコンタクトホールを介して下層の電極層と上層の電極層が接続される。トランジスタのゲート、ソース、ドレインなどの電極を絶縁膜上に引き上げるためなどにも使用される重要な構造体である。このため、L/S パターンに並び、レジスト材料やプロセスの評価に多く用いられるパターンである。このコンタクトホールについても HS-AFM を用いて、その現像課程の観察を行った(図 III.2.1.3-1-30)。hp32nm と hp60nm の 1:1 コンタクトホールの現像課程観察を行った結果、両方のサイズともに、ホールによって現像に時差があることが明らかとなった。このことは、現像後に穴が開いていないミッシングホールやホールがつながっているなどの欠陥発生メカニズムの解明につながるものと考えられる。

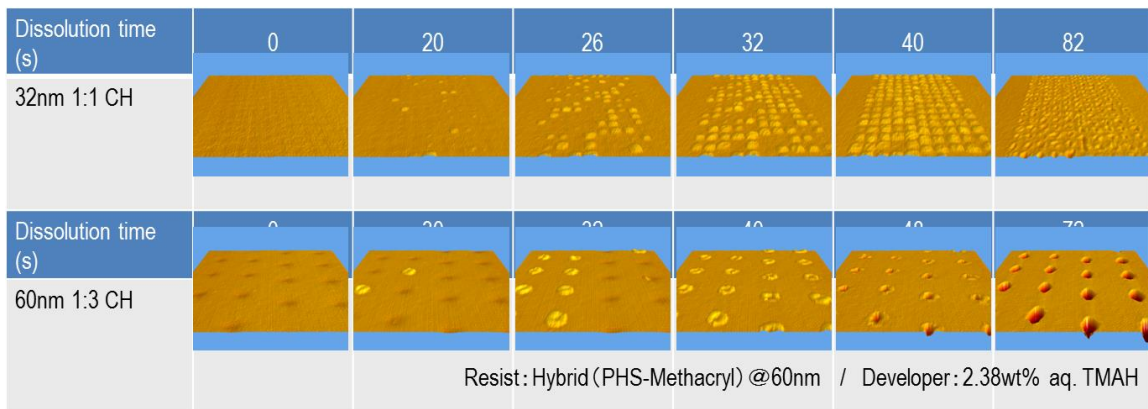


図 III.2.1.3-1-30: 現像中のコンタクトホールの形成過程

(b) 分子動力学計算を用いたレジスト評価技術の開発

分子シミュレーションを用いて EUV レジスト材料を原子分子レベルで解析し、レジスト材料の開発を促進するために、分子動力学計算および粗視化分子動力学計算を行った。具体的には、EUV モデルレジストの分子シミュレーションと現像シミュレーションを行った。

(i) EUV モデルレジストの分子動力学計算による分子シミュレーション

分子動力学計算による分子シミュレーション技術により、EUV モデルレジストの分子シミュレーションを行った。EUV モデルレジストとして、メタクリレート樹脂と光酸発生剤(PAG)からなるメタクリレート系 EUV モデルレジストを使用した(図 III.2.1.3-1-31)。

バルクのレジスト中の分子構造をシミュレーションするために、三次元周期境界条件を用いて、基本セルを作製し、隣接セルからの相互作用を取り入れて分子シミュレーションし、メタクリレート系 EUV モデルレジスト中のPAGの空間分布を求め、PAG は基本セル内で不均一に分布していることが分かった(図 III.2.1.3-1-32)。また、PAGは陽イオンと陰イオンからなる塩を形成しており、5nsの分子シミュレーション結果より、基本セル内で運動することが分かった。このPAG陽イオンと陰イオンが運動した軌跡空間を回転楕円体で近似して、PAG陽イオンと陰イオンの軌跡空間を解析した(図 III.2.1.3-1-33)。PAG陽イオンと陰イオンの軌跡空間も不均一に分布することが分かった。したがって、EUV モデルレジスト中のPAG陽イオンと陰イオンの軌跡空間は不均一に分布し、その軌跡空間の寸法や運動方向も不均一であることが明らかになった。メタクリレート樹脂とPAG陰イオンとの空間位置関係を調べた(図11 図 III.2.1.3-1-34)。軌跡体積が大きいPAG AとPAG Bの陰イオンはメタクリレート樹脂の隙間である自由体積内に存在する。そのために、PAG AとPAG Bの陰イオンは大きく拡散することができ、大きな軌跡体積を示すと考えられる。一方、PAG Cの陰イオンはメタクリレート樹脂中に完全に埋まっている為に、メタクリレート樹脂中を拡散することが難しく、軌跡体積も小さくなっている。また、メタクリレート樹脂は点線で示す自由空間も有しているが、その自由空間を利用できるPAGが存在していない。このようにメタクリレート樹脂がPAGの拡散挙動に大きな影響を示すことが分かった。PAG陰イオンの全体の運動に加えて、その構成原子の運動挙動も調べた。各原子の時刻毎における存在位置を色分けしたドットで示し、その軌跡空間をドット表示した(図 III.2.1.3-1-35)。PAG陰イオンのスルホ基の硫黄原子と3つの酸素原子は、明確に軌跡領域が判別できることから、あまり動かないことが分かる。一方、PAG陰イオンの末端のトリフルオロメチル基の3つのフッ素原子の存在位置を黄色、茶色、オレンジ色で示したが、赤紫色の炭素原子を中心に取り込んで、一様に分布しており、広い領域で運動していることがわかる。これはフッ素原子が、親水性でも親油性でもないために、周囲のメタクリレート樹脂との相互作用が小さいために、大きく運動すると考えられる。同様にPAG陽イオンに関して解析をすると、PAG陽イオンの軌跡体積は小さく、嵩高いフェニル基がメタクリレート樹脂に取り囲まれて、PAG陽イオンの拡散を抑えていると思われる。(図 III.2.1.3-1-36)。以上、分子動力学計算を用いた分子シミュレーションは、原子分子の挙動を可視化し、新たな知見を与えることにより、EUV レジスト材料を原子分子レベルで解析し、レジスト材料の開発を促進するために有益な評価技術であることが分かった。

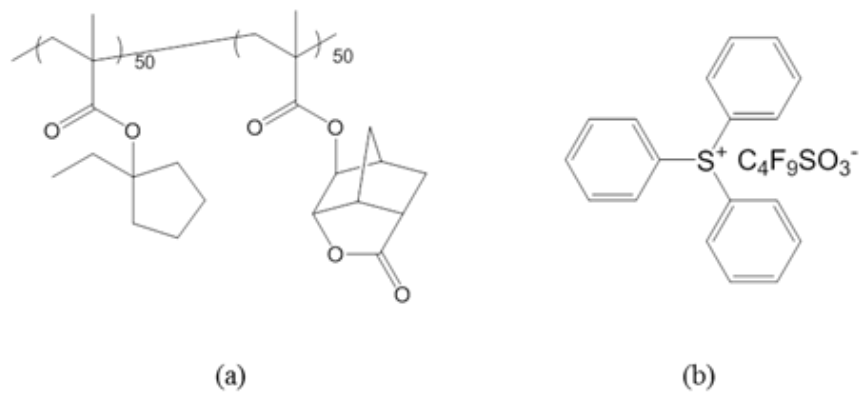


図 III.2.1.3-1-31: 分子シミュレーションに用いた(a)メタクリレート系高分子と(b)光酸発生剤の分子構造の図

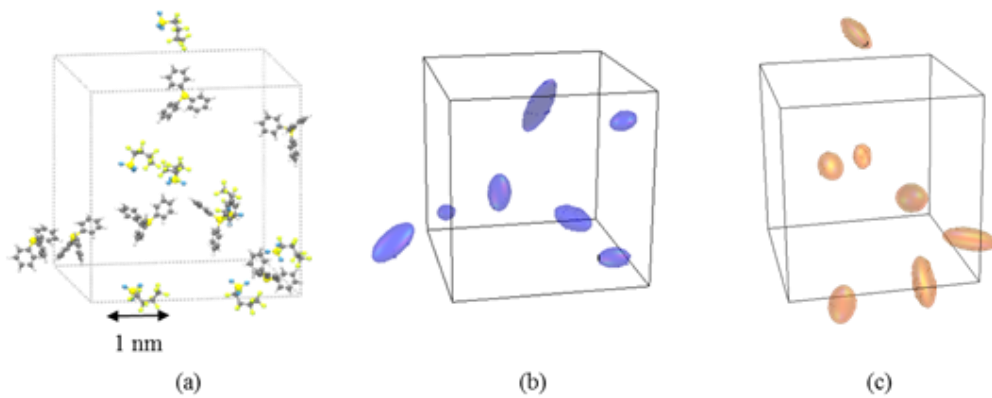


図 III.2.1.3-1-32: メタクリレート系 EUV モデルレジスト中に分布した(a)光酸発生剤、(b)陽イオンと(c)陰イオンの軌跡空間の図

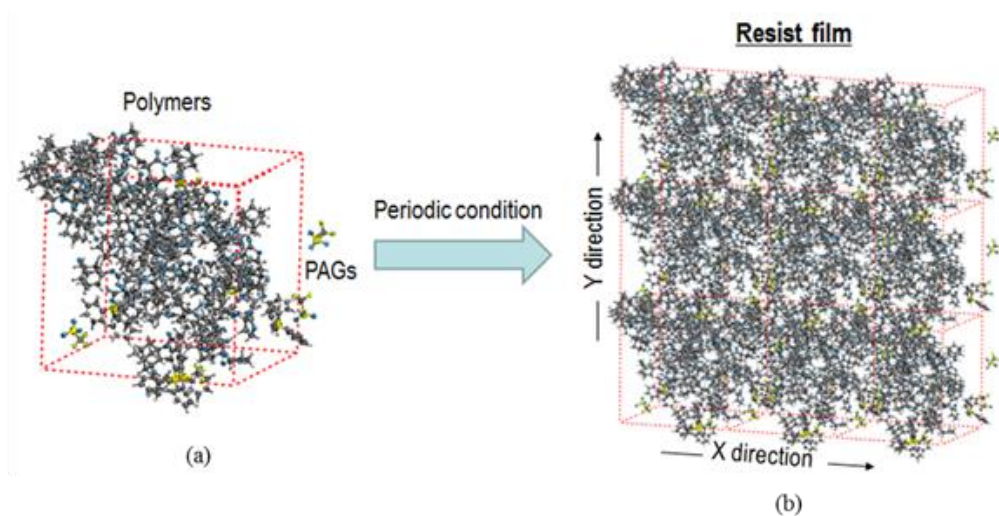


図 III.2.1.3-1-33: 基本セルを中心にXY方向に周期境界条件を課したアモルファス構造の図

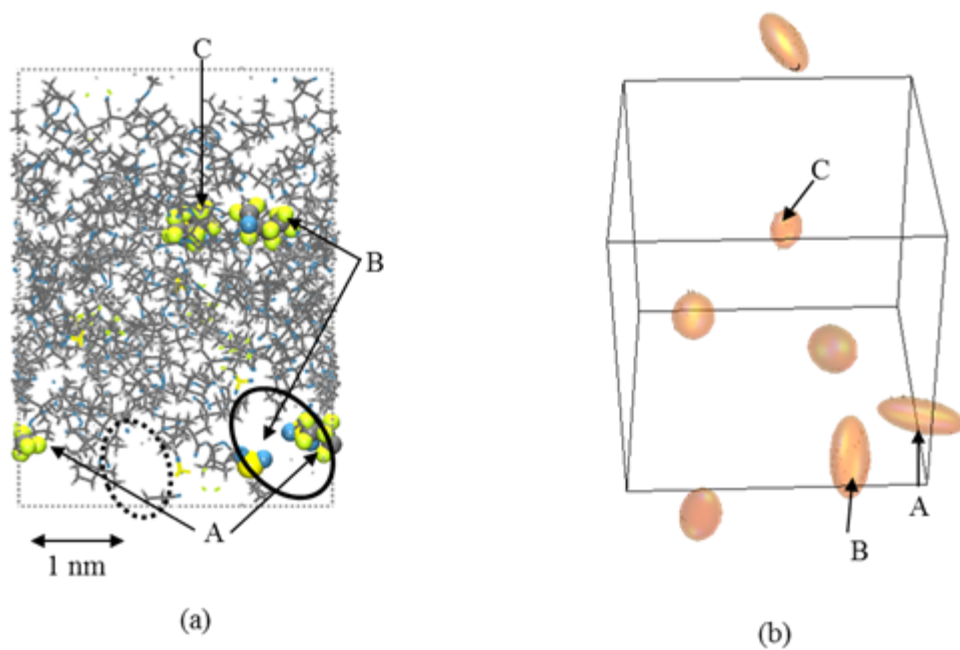


図 III.2.1.3-1-34: メタクリレート系 EUV モデルレジスト中の (a) ワイヤモデル表記したメタクリレート樹脂が形成する自由体積 (楕円) と空間充填モデルで表記した光酸発生剤の陰イオンの空間分布と (b) 負イオンの軌跡空間の図

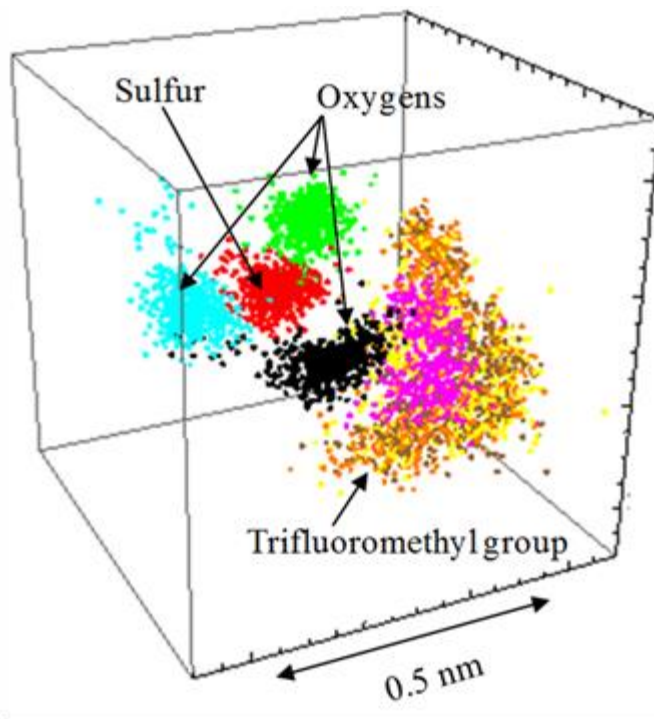


図 III.2.1.3-1-35: メタクリレート系 EUV モデルレジスト中の光酸発生剤の原子の軌跡を色分けしてドット表示した図

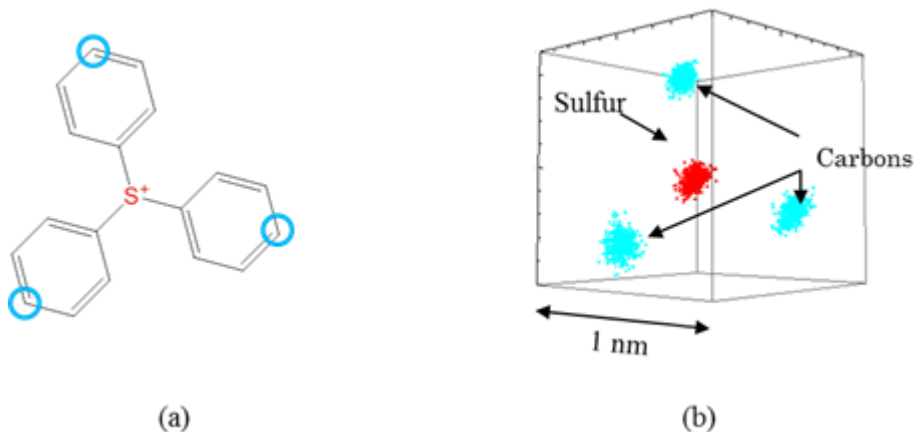


図 III.2.1.3-1-36: 光酸発生剤の(a)陽イオンの分子構造と(b)軌跡空間の図

(ii) EUVレジストの粗視化分子動力学計算

分子動力学計算では力場における各原子に働く運動方程式を時々刻々計算する為に、シミュレーションできるレジストの大きさが数nm程度までと限られている。しかし、EUVレジストの現像プロセスを分子レベルで把握するためには、数十nm以上の大きな領域の計算が必要になる。そこで、そのようなメゾスコピックなシミュレーションとして、粗視化分子動力学計算を行った。系全体はポリマーと溶媒の混合系からなり、各ポリマーはDPD粒子からなるバネ・ビーズモデルで表現されている(図 III.2.1.3-1-37)。ここで、このDPD粒子は1粒子あたり複数のモノマーから構成されているとし、DPD粒子のサイズが約1~2nmとなるように粗視化し計算を行った。DPDシミュレーションによりレジストの溶解現象をシミュレーションすることができ、ポリマーと溶媒の相互作用が溶解性を決めていることが示された(図 III.2.1.3-1-38)。以上、粗視化分子動力学計算を用いた分子シミュレーションは、現像プロセスを可視化し、新たな知見を与えることにより、EUVレジスト材料をメゾスコピックレベルで解析し、レジスト材料の開発を促進するために有益な評価技術であることが分かった。

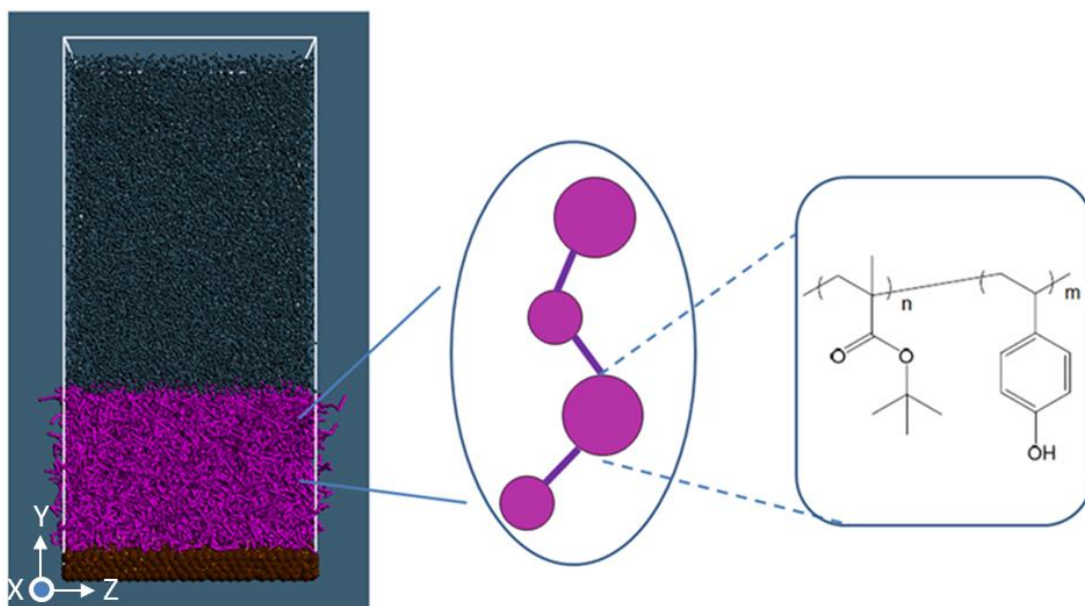


図 III.2.1.3-1-37: シミュレーションに用いたレジストポリマーの粗視化モデルの図 (a)ポリマー/溶媒混合系、(b)ポリマーのビーズモデル。(c)実際のレジストポリマー

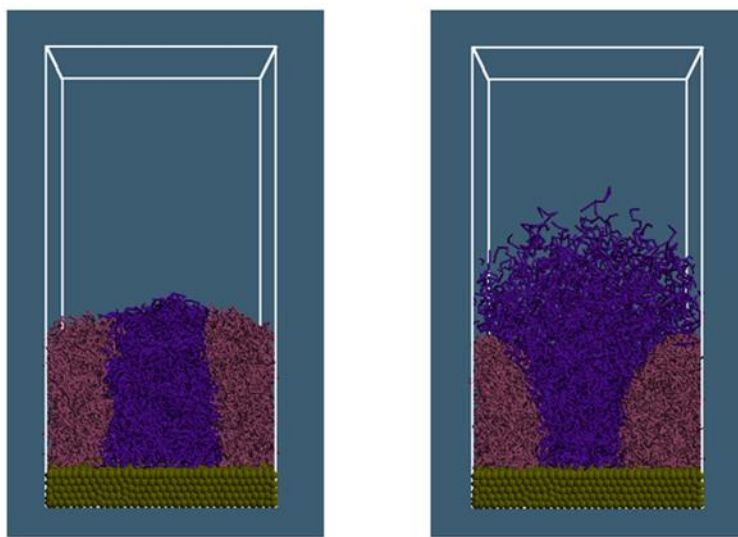


図 III.2.1.3-1-38: ラインパターン形成の DPD シミュレーションのスナップショット: (a) 初期構造と (b) 2000 ステップ後の界面構造の図

[5] EIDEC EUV レジストワークショップ

本ワークショップは、EUV レジスト材料・プロセス開発に関する研究会であり、学术界及び産業界における、EUV レジスト材料・プロセス開発について意見交流を行い、EUV レジスト研究開発コミュニティの研究活動を活性化することを目的として開催した。(図 III.2.1.3-1-39)

EUV レジストに関する研究を行っている大学の先生方、およびメンバー会社(半導体メーカー、半導体装置メーカー、レジスト関連材料メーカー)の方々をお迎えし、大学の先生方の研究進捗状況、EIDEC の研究開発状況を報告した。概ね 30 人程度の参加者であった。大学の先生方からは、最新の研究進捗を聴取することができ、また質疑応答時間を十分にとる事で、通常の学会ではできないような闊達な意見交換を行う事ができた。学术界及び産業界が互いに刺激し合い、研究活動を活発化させることができた。

開催した研究会は以下の通り:

第 3 回 EIDEC EUV レジストワークショップ (平成 26 年 8 月 22 日)

講演: シミュレーションの次世代レジスト開発への適用	古澤孝弘教授 (阪大)
酸増殖剤の開発とレジスト材料への応用	有光晃二准教授 (東理大)
放射線化学反応初期過程に基づいた EUV レジストの高感度化の検討	岡本一将助教 (北大)

EUVレジスト研究開発コミュニティ



図 III.2.1.3-1-39: EIDEC EUV Resist Workshop の位置付け

[6] 総括

EUV レジスト材料・プロセスの研究開発を進めた結果、“標準レジスト”ESR4～ESR8 を選定・リリースした。レジストプロセス開発では、20 種類以上のリンス液を評価し、さらにリンスシーケンスを確立して“標準リンスプロセス”を構築した。大学共同研究・反応解析では、LWR 解析・新規レジスト材料評価・レジスト溶解反応解析を行い総括した(EUV レジスト workshop 1 回含む)。学会発表として、国際学会 46 件、国内学会 8 件の社外発表を行い、プレゼンス向上に寄与した。

[7] 学会発表・査読付き論文一覧(2013.9～2016.3)

■ 国際学会; 46 件 (筆頭:33 件、共著:13 件)

- Intl. Conf. on Photopolymer Science and Tech. (Photopolymer conf.) ;6 件
- Intl. Symp. on Extreme Ultraviolet Lithography (EUV Symp.) ;12 件
- Intl. Symp. on Semiconductor Manufacturing (ISSM) ;3 件
- Intl. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC) ;4 件
- Intl. Conference on Micro and Nano Engineering (MNE) ;1 件
- Intl. Workshop on EUVL ;2 件
- SPIE Advanced Lithography ;17 件
- Fraunhofer IISB Lithography Simulation Workshop ;1 件

■ 国内学会； 8 件（筆頭:8 件、共著:0 件）

- 応用物理学会 ;1 件
- 光・量子デバイス委員会 ;1 件
- 次世代リソグラフィ技術研究会 ;2 件
- シリコンテクノロジー分科会 ;1 件
- リソグラフィ将来技術調査専門委員会 ;1 件
- 日本顕微鏡学会 走査型プローブ顕微鏡分科会 ;1 件
- 光ビームプラットフォーム報告会 ;1 件

■ 査読付き論文； 24 件（筆頭:6 件、共著:18 件）

■ 特許出願； 4 件

■ 国際学会（詳細）

○ Intl. Conf. on Photopolymer Science and Tech. (Photopolymer conf.) (6 件)

1. “Recent Progress of EUV Resist Technology in EIDEC”, Eishi Shiobara (2014)
2. “Relationship between Stochastic Phenomena and Optical Contrast in Chemically Amplified Resist Process of Extreme Ultraviolet Lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2014).
3. “Inhomogeneity of PAGs in Resist Film studied by Molecular Dynamics Simulations”, Minoru Toriumi and Toshiro Itani (2014).
4. “Recent Progress of Negative-tone Imaging Process and Materials with EUV Exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
5. “Relationship between Thermalization Distance and Line Edge Roughness in Sub-10 nm Fabrication Using Extreme Ultraviolet Lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
6. “Negative-tone imaging with EUV exposure”, Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru Tsuchihashi, Toru Fujimori, Makoto Momota, Takahiro Goto (2015)

○ Intl. Symp. on Extreme Ultraviolet Lithography (12 件)

1. “EUV Resist Material and Process Development at EIDEC”, Eishi Shiobara, Norihiko Sugie, Toshiya Takahashi, Yukiko Kikuchi, Noriaki Fujitani, Julius Santillan, Minoru Toriumi, Motoharu Shichiri, Hiroyuki Tanaka, Shunko Magoshi and Toshiro Itani (2013).

2. “Inhomogeneity of resist film simulated by Molecular dynamics”, Minoru Toriumi and Toshiro Itani (2013).
 3. “The effect of EUV resist material composition on RLS trade-off”, Norihiko Sugie, Eishi Shiobara and Toshiro Itani (2013).
 4. “Positive and Negative-tone development resists; Pattern formation characterization during resist dissolution”, Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri and Toshiro Itani (2013).
 5. “Stochastic Effects in Resist Processes of Extreme Ultraviolet Lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2013).
 6. “Recent progress of Negative-tone Imaging with EUV Exposure”, Toru Fujimori, Julius J Santillan, Toshiya Takahashi, Eishi Shiobara, Toshiro Itani and Soichi Inoue (2014).
 7. “Feasibility study of sub-10 nm half-pitch fabrication using chemically amplified resist processes of EUV lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2014).
 8. “The Effect of EUV Resist Material Composition on Development Behavior”, Shinya Minegishi and Toshiro Itani (2014).
 9. “Study on Surfactant Rinse Materials for EUVL”, Kazuma Yamamoto and Toshiro Itani (2014).
 10. “Novel ultra-high sensitive non-CAR materials using EUV exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Julius Santillan, Shinya Minegishi, Takashi Kamizono and Toshiro Itani (2015).
 11. “Development of metal resist and underlayer”, Shinya Minegishi and Toshiro Itani (2015).
 12. “Suppression of stochastic effects in chemically amplified resist processes for extreme ultraviolet lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Symp. on Semiconductor Manufacturing (ISSM) (3 件)
1. “EUVL resist pattern formation analysis during development: in situ analysis using HS-AFM Inhomogeneity of PAGs in Methacrylate-Type EUV Resist Film Studied by Molecular-Dynamics Simulations”, Motoharu Shichiri, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2014).
 2. “Negative-tone imaging process and materials with EUV exposure”, Toru Fujimori and Toshiro Itani (2014).
 3. “High-sensitivity Negative-tone Imaging materials with EUV exposure for sub-10 nm manufacturing”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC) (4 件)
1. “Effects of Effective Reaction Radius for Neutralization on Performance of Chemically Amplified Resists”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2013).
 2. “Inhomogeneity of PAGs in Methacrylate-Type EUV Resist Film Studied by Molecular-Dynamics Simulations”, Toru Toriumi and Toshiro Itani (2014).
 3. “High-Sensitivity Metal-based Resists for EUV Lithography”, Julius Joseph Santillan, Toru Toriumi and Toshiro Itani (2015).
 4. “Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme-ultraviolet (EUV) lithography”, Shinya Fuji, Takahiro Kozawa, Kazumasa Okamoto, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Conference on Micro and Nano Engineering (MNE) (1 件)

1. “In Situ Characterization of Nano-Scale Pattern Roughness during Resist Dissolution Process”, Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri and Toshiro Itani (2014).
- Intl. Workshop on EUVL (2 件)
1. “Theoretical Study on Stochastic Effects in Chemically Amplified Resist Process for Extreme Ultraviolet Lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan, and Toshiro Itani (2014).
 2. “Recent Progresses in Negative-tone Imaging using EUV Exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
- SPIE Advanced Lithography (17 件)
1. “An in-situ analysis of resist dissolution in alkali-based and organic solvent-based developers using high-speed atomic force microscopy”, Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri and Toshiro Itani (2014).
 2. “Inhomogeneity of PAGs in resist film studied by molecular-dynamics simulations for EUV lithography”, Minoru Toriumi and Toshiro Itani (2014).
 3. “Evaluations of negative-tone development resist and process for EUV lithography”, Toshiya Takahashi, Noriaki Fujitani and Toshiro Itani (2014).
 4. “EUV resist simulation based on process parameters of pattern formation reaction”, Norihiko Sugie, Takahiro Kozawa and Toshiro Itani (2014).
 5. “Stochastic effects in fabrication of 11nm line-and-space patterns using extreme-ultraviolet lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2014).
 6. “Recent progress of negative-tone imaging with EUV exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
 7. “The effect of resist dissolution process on pattern formation variability: an in situ analysis using high-speed atomic force microscopy”, Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri and Toshiro Itani (2015).
 8. “Inhomogeneity of PAGs in hybrid-type EUV resist system studied by molecular-dynamics simulations for EUV lithography”, Minoru Toriumi and Toshiro Itani (2015).
 9. “The effect of resist material composition on development behavior”, Shinya Minegishi and Toshiro Itani (2015).
 10. “Evaluation of surfactant rinse material and process for EUV lithography”, Kazuma Yamamoto and Toshiro Itani (2015).
 11. “Relationship between information and energy carried by extreme-ultraviolet photons: consideration from the viewpoint of sensitivity enhancement”, Takahiro Kozawa, Shinya Fuji, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
 12. “Negative-tone imaging with EUV exposure for 14 nm hp and beyond”, Hideaki Tsubaki, Wataru Nihashi, Toru Tsuchihashi, Toru Fujimori, Makoto Momota, Takahiro Goto (2015).
 13. “Novel ultra-high sensitive ‘metal resist’ for EUV lithography”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Shinya Minegishi, Takashi Kamizono and Toshiro Itani (2016).
 14. “Process development of ‘metal resist’ for EUV lithography”, Shinya Minegishi, Julius Joseph Santillan, Takashi Kamizono, Toru Fujimori and Toshiro Itani (2016).
 15. “Characterization of ‘metal resist’ for EUV lithography”, Toru Toriumi and Toshiro Itani (2016).

16. “Quantification of the resist dissolution process: an in situ analysis using high speed atomic force microscopy”, Julius Joseph Santillan, Motoharu Shichiri and Toshiro Itani (2016).
 17. “Study on stochastic phenomena induced in chemically amplified poly(4-hydroxystyrene-co-t-butyl methacrylate) resist (high-performance model resist for extreme ultraviolet lithography)”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2016).
- Fraunhofer IISB Lithography Simulation Workshop (1 件)
1. “A theoretical study on stochastic effects in chemically amplified resist process for extreme ultraviolet lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2014).
- 国内学会 (詳細)
- 応用物理学会 (1 件)
1. “In situ Observation of Photoresist Dissolution 6”, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2013).
- 光・量子デバイス委員会 特別講演会 (1 件)
1. “フォトリソグラフィの流れと最近の動向”, Toru Fujimori (2014).
- 次世代リソグラフィ技術研究会 (2 件)
1. “EUVレジスト関連”, Toru Fujimori (2014).
 2. “EUVレジスト関連”, Shinya Minegishi (2015).
- シリコンテクノロジー分科会 (1 件)
1. “SPIE Advanced Lithography 2015 特集「SPIEレビュー」”, Toru Fujimori (2015).
- リソグラフィ将来技術調査専門委員会 (1 件)
1. “高速 AFM によるレジスト現像過程の解析”, Julius Joseph Santillan (2015).
- 日本顕微鏡学会 走査型プローブ顕微鏡分科会 (1 件)
1. “高速原子間力顕微鏡を用いたレジスト現像課程の観察”, Motoharu Shichiri, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- 光ビームプラットフォーム報告会 (1 件)
1. “赤外自由電子レーザーによる EUV レジスト開発”, Minoru Toriumi (2016).

■ 査読付き論文一覧 (詳細)

筆頭(6 件)

1. J.J. Santillan and T. Itani: “In situ Analysis of the EUV Resist Pattern Formation during the Resist Dissolution Process”, J. Photopolym. Sci. Technol. 26, 611 (2013).
2. E. Shiobara: “Recent Progress of EUV Resist Technology in EIDEC”, J. Photopolym. Sci.

- Technol. 27, 589 (2014).
3. M. Toriumi and T. Itani: “Inhomogeneity of PAGs in Resist Film studied by Molecular Dynamics Simulations”, J. Photopolym. Sci. Technol. 27, 617 (2014).
 4. T. Fujimori, T. Tsuchuhashi and T. Itani: “Recent Progress of Negative-tone Imaging Process and Materials with EUV Exposure”, J. Photopolym. Sci. Technol. 28, 485 (2015).
 5. M. Toriumi and T. Itani: “Inhomogeneity of photoacid generators in methacrylate-type EUV resist film studied by molecular dynamics simulations”, Jpn. J. Appl. Phys. 54 (2015) 06FE02.
 6. M. Toriumi, Y. Sato, M. Koshino, K. Suenaga, T. Itani: “Metal resist for extreme ultraviolet lithography characterized by scanning transmission electron microscopy”, Appl. Phys. Express 9 (2016) 31601.

共著(18件)

1. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Relationship between Defects and Stochastic Effect in Chemically Amplified Resists Used for Extreme Ultraviolet Lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 076502 (2013).
2. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Acid Diffusion Length in Line-and-Space Resist Patterns Fabricated by Extreme Ultraviolet Lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 52, 076501 (2013).
3. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Stochastic effects in 11nm imaging of extreme ultraviolet lithography with chemically amplified resists”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 036503 (2014).
4. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Theoretical study on stochastic defect generation in chemically amplified resist process for extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 066504 (2014).
5. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Effects of effective reaction radius for neutralization on performance of chemically amplified resists”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 06JC02 (2014).
6. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Dependence of stochastic defect generation on quantum efficiency of acid generation and effective reaction radius for deprotection in chemically amplified resist process using extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 076502 (2014).
7. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Effect of molecular weight and protection ratio on line edge roughness and stochastic defect generation in chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 084002 (2014).
8. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Relationships between Stochastic Phenomena and Optical Contrast in Chemically Amplified Resist Process of Extreme Ultraviolet Lithography”, J. Photopolym. Sci. Technol. 27, 11 (2014).
9. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Feasibility study of sub-10-nm half-pitch fabrication by chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography: I. Latent image quality predicted by probability density model”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 106501 (2014).
10. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Effects of deprotonation efficiency of protected units on line edge roughness and stochastic defect generation in chemically amplified resist processes for 11nm node of extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 53, 116504 (2014).

11. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: "Feasibility study of sub-10-nm-half-pitch fabrication by chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography: II. Stochastic effects", *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 036507 (2015).
12. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: "Effect of thermalization distance on chemical gradient of line-and-space patterns with 7 nm half-pitch in chemically amplified extreme ultraviolet resists", *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 066501 (2015).
13. S. Fujii, T. Kozawa, K. Okamoto, J.J. Santillan and T. Itani: "Relationship between information and energy carried by photons in extreme ultraviolet lithography: Consideration from the viewpoint of sensitivity enhancement", *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 86502 (2015).
14. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: "Quencher diffusion in chemically amplified poly(4-hydroxystyrene-*co-t*-butyl methacrylate) resist", *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 118002 (2015).
15. S. Fujii, T. Kozawa, K. Okamoto, J.J. Santillan and T. Itani: "Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography", *Jpn. J. Appl. Phys.* 54, 116501 (2015).
16. H. Tsubaki, W. Nihashi, T. Tsuchuhashi, T. Fujimori, M. Momota and T. Goto: "Negative-tone Imaging with EUV Exposure", *J. Photopolym. Sci. Technol.* 28, 489 (2015).
17. J.J. Santillan and T. Itani: "Relationship between Thermalization Distance and Line Edge Roughness in Sub-10 nm Fabrication Using Extreme Ultraviolet Lithography", *J. Photopolym. Sci. Technol.* 28, 669 (2015).
18. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: "Effect of thermalization distance on stochastic phenomena in 7-nm-half-pitch line-and-space pattern fabrication using chemically amplified extreme ultraviolet resists", *Jpn. J. Appl. Phys.* 55, 026504 (2016).

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3)-(ii) レジストアウトガス高精度測定方法確立

【1】 研究開発の目標

本研究の前期においては、EB 照射方式(H23年度業務委託にて導入)によるレジストアウトガス評価手法を確立し、EUV光照射方式(兵庫県立大学への再委託)との相関を取得することで、EB 照射方式の妥当性を示した。また、レジスト材料の量産プロセスにおける使用条件を考慮したレジストアウトガス評価基準を構築し、評価技術の標準化に向けた提案を行った。

本研究の後期においては、さらに上記ハーフピッチ11nm対応のEUVレジストに対するアウトガス評価手法の高精度化を目的とし、以下の項目を実施した。

① EUVレジスト材料設計/材料評価への指針

化学増幅型レジストの構成成分である光酸発生剤(PAG)および溶解抑止基などのアウトガスへの寄与率を求める手法を確立し、アウトガスへの影響の大きい構成成分の材料設計に対する指針を示した。また構成成分の化学的特性を変えたレジスト(レジストファミリー)からのアウトガスによるコンタミ膜厚を評価し、さらなる評価数削減に関する提案をした。また、量産時を想定したEUV強度によるレジストアウトガス特性を評価した。

② レジストアウトガス・コンタミ形成のモデル構築

EIDECにて作成したモデルレジストを用いて各種パラメーターのフィッティングを行い、レジストからのアウトガス成分の発生からコンタミ膜生成までの過程をモデル化した。

③ 海外コンソーシアムとの共同評価

複数レジストを海外コンソーシアムと同時評価を行った。その結果、コンソーシアム間における評価結果の差異が明らかになったため、その要因解明と対応策を提案した。

④ 非化学増幅型レジストのレジストアウトガス評価

ハーフピッチ 11nm 対応の EUVレジストとして新たに非化学増幅型レジストの一つであるメタルレジストの開発が注力されて来たため、上記レジストに対応したレジストアウトガス評価手法を構築した。

【2】 研究開発の成果

[1] EUVレジスト材料設計/材料評価への指針

(a) コンタミ膜形成へのレジスト成分の寄与

レジストを構成する樹脂、光酸発生剤(PAG)、クエンチャーなどの成分において、主にアウトガスとなるのは樹脂の溶解抑止基(Protecting Unit)の分解物および PAG の分解物である。本評価では、本研究において既に確立されたレジストアウトガス評価手法であるウィットネスサンプル法を用いてこの 2 つのアウトガス成分のコンタミ膜形成への寄与率を評価した。評価に用いたサンプルレジストは、以下の4種類である。(表Ⅲ.2.1.3.-2-1)

Model Resist としては、レジスト樹脂として PHS と methacrylate のハイブリッド樹脂を、PAG として triphenylsulfonium nonafluorobutanesulfonate、クエンチャーには trin-octyl amine を用いた。Model Resist を基準として「PAG free」サンプルでは樹脂とクエンチャーのみとし、PAG を抜いた。「Protecting Unit (PU) free」サンプルでは、Model Resist の溶解抑止基に類似した酸安定置換基を樹脂に導入し、PAG の光分解によって発生する酸による脱保護反応が生じないようにした樹脂を用いた。「PAG and PU free」サンプルでは上記サンプルよりさらに PAG を抜いたものである。

これらのレジストから発生すると予想されるアウトガス成分は以下の通りとなる。(表Ⅲ.2.1.3.-2-2)

表Ⅲ.2.1.3.-2-1 化学増幅型レジストのコンタミネーション要因切り分け用サンプル

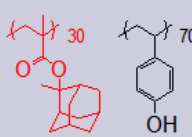
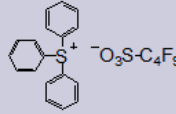

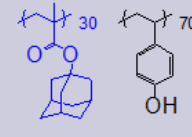
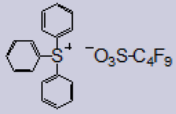
Sample	Polymer	PAG (20wt% of polymer)	Quencher (0.1mol of PAG)
A: Control			 Tri-n-octylamine
B: PAG free	Acid labile unit	none	
C: PU free			
D: Polymer	Acid stable unit	none	

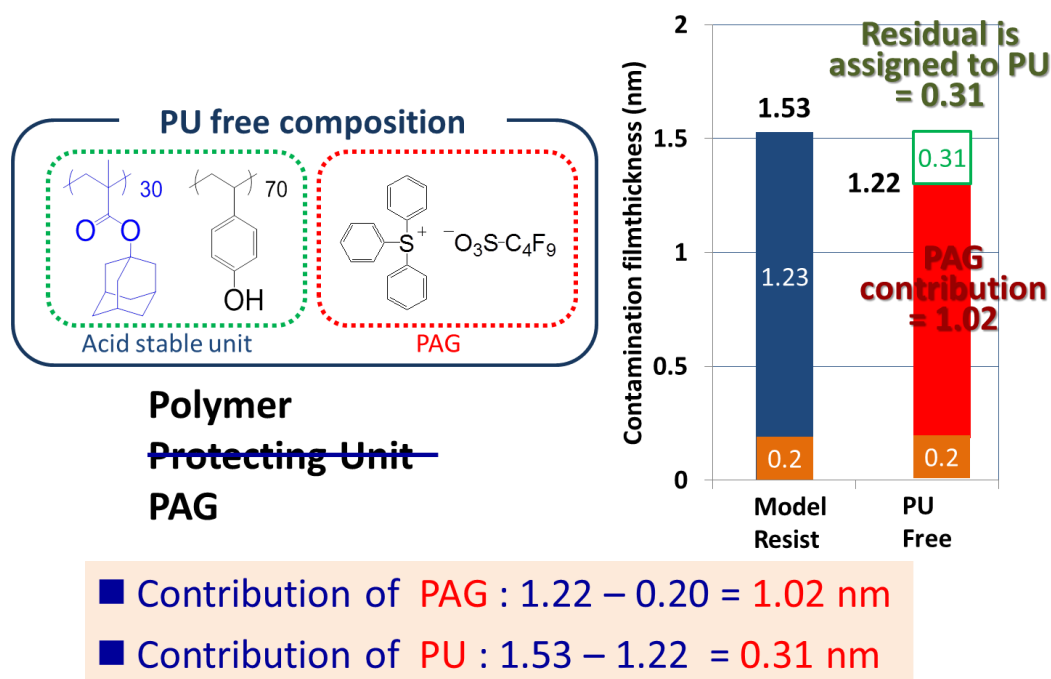
表2.1.3.-2-2 コンタミ膜寄与率を評価するためのレジストサンプルから予想されるアウトガス種

Sample Concept	Possible Source of Contamination
Model Resist	Polymer Protecting Unit PAG Background
PAG free	Polymer Directly decomposed Protecting Unit Background
PU free	Polymer PAG Background
PAG and PU free	Polymer Background

実験はつくば 産業技術総合研究所 スーパークリーンルーム棟に設置された電子線ベースのアウトガス評価装置を用いて行われた。また、兵庫県立大学の NewSUBARU ビームライン9に設置した EUV 光ベースとなるアウトガス評価装置との比較を行った。

① Model Resist からのアウトガスとコンタミ膜生成の評価方法

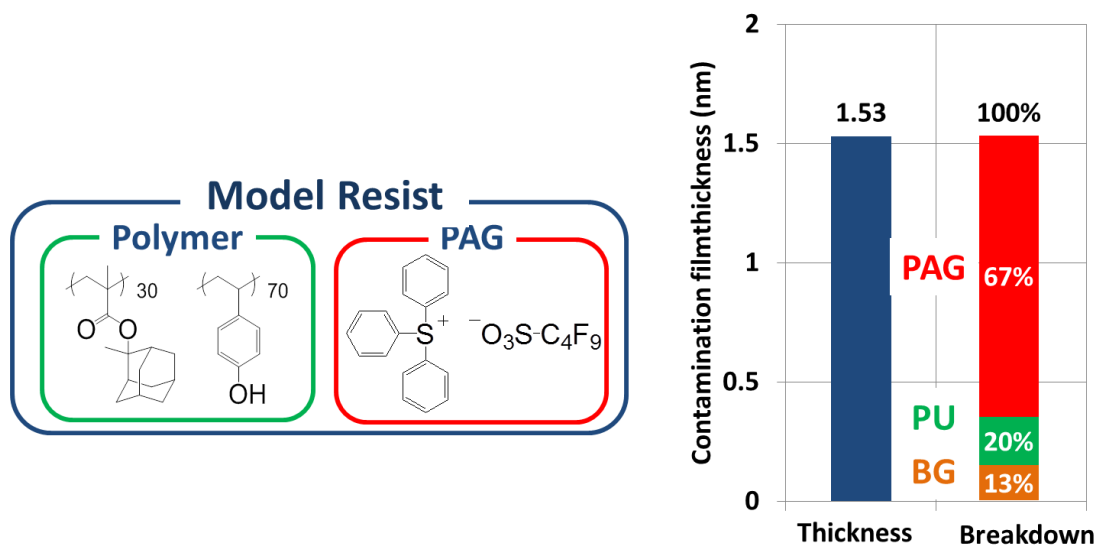
ここでは、レジスト成分のコンタミ膜形成の寄与率は Model Resist からそれ以外の3つのレジストサンプルから形成されたコンタミ膜の差分を取ることで求められる手法を説明する。例として EUV 方式のアウトガス評価装置により得られた結果を用いる。本実験における Model Resist によるコンタミ膜の膜厚は 1.53nm となった、また Background によるコンタミ膜は 0.2nm であった。一方、「PU and PAG free」と「PAG free」サンプルでは、Background 以上のコンタミ膜形成は認められなかった。このことはレジストの樹脂そのものの分解によるコンタミ膜形成がないこと、さらに PAG からの酸の発生が無い場合には溶解抑制基の脱保護反応が起こりえないことを示している。これに対し、「PU free」サンプルでは Model Resist のコンタミ膜厚 1.53nm に対し 1.22nm と比較的高いコンタミ膜を示した。「PU free」サンプルにおいては溶解抑制基のコンタミ膜形成への寄与は無いと考えられるため、Background の寄与分 0.2nm からコンタミ膜増加分である 1.02nm は PAG 分解物からの寄与と考えられる。また、Model Resist のコンタミ膜厚との差分である 0.31nm 分は溶解抑制基によるものと推測される。(図Ⅲ.2.1.3.-2-1)



図Ⅲ.2.1.3.-2-1 Model Resist と PU free サンプルのコンタミ膜と各レジスト成分の寄与

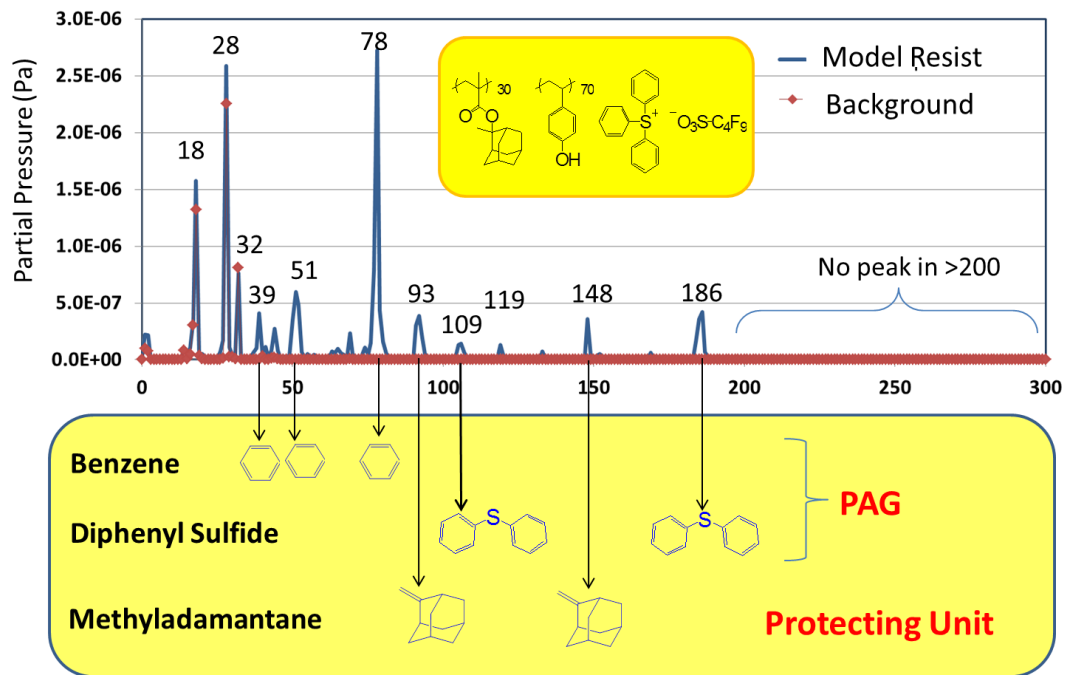
上記の結果より、本評価における Model Resist の各種レジスト成分によるコンタミ膜形成の寄与率は以下のように求められる。(図Ⅲ.2.1.3.-2-2) すなわちレジストの関与しない Background 成分が 13%、溶解抑制基からのアウトガスによる寄与率が 20%、残りの 67%が PAG の分解物であることが判明した。な

お、これまでの知見より、PAGの分解物の中でコンタミ膜形成に寄与するのはカチオン側であることが判っている。



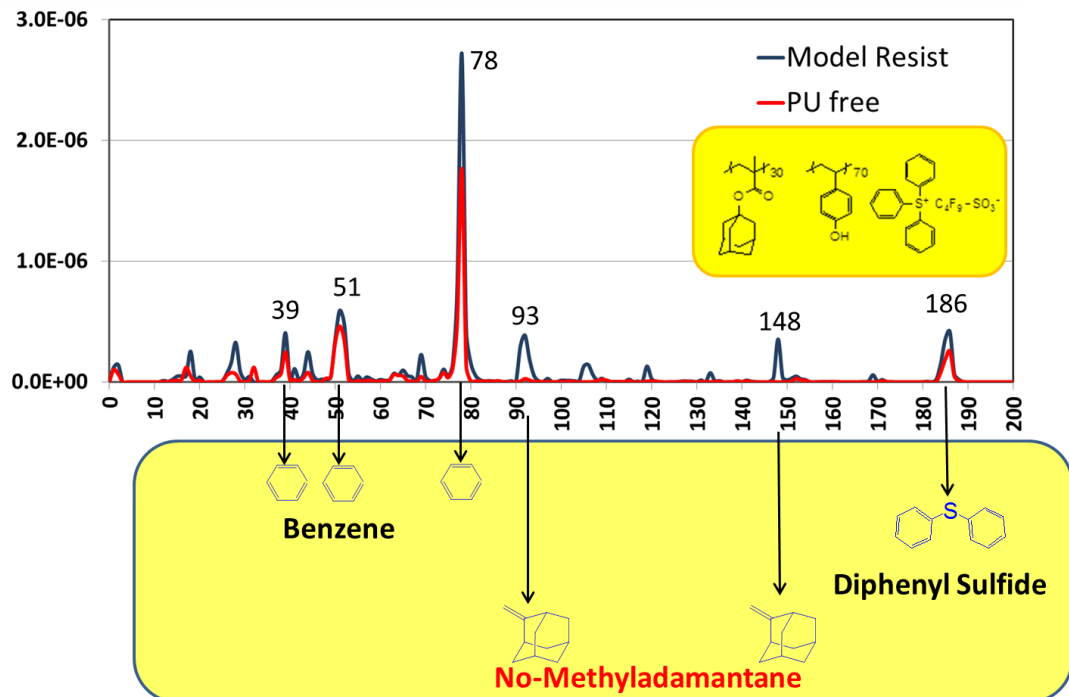
図Ⅲ.2.1.3.-2-2 Model Resist によるコンタミ膜の各種レジスト成分の寄与率

さらに、Model Resist からのアウトガスの質量分析結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-3) グラフの横軸は質量数、縦軸は質量分析器のイオンカウントを分圧に換算したものである。質量数 78 に PAG のカチオンの分解物である Benzene、質量数 186 に同じく PAG カチオンの分解物である Diphenyl Sulfide のピークが見られる。また、質量数 148 には溶解抑止基の脱保護分解物である Methyladamantane のピークが現れている。これらのピークのほかにも、各アウトガス種のサブピークが観測された。



図Ⅲ.2.1.3.-2-3 Model Resist のアウトガス質量分析結果とその同定

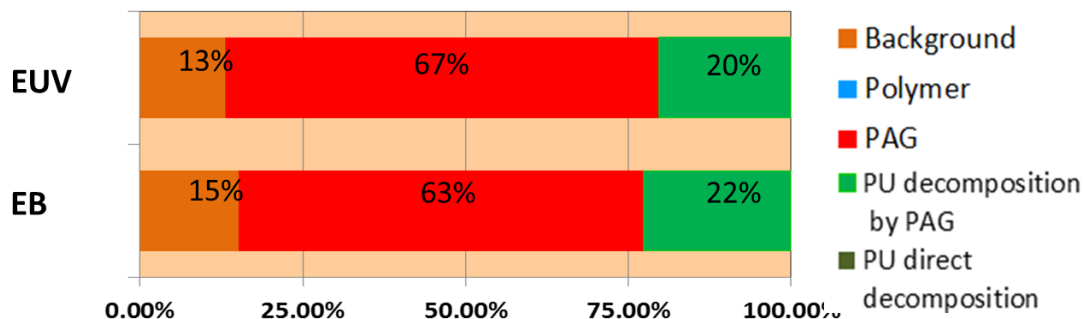
一方、「PU free」サンプルのアウトガス質量分析結果では脱保護分解物のピークが観察されなくなることが確認できた。(図Ⅲ.2.1.3.-2-4)



図Ⅲ.2.1.3.-2-4 Model Resist と「PU free」サンプルのアウトガス質量分析結果の比較

また、これら一連のサンプルレジスト郡を EB 方式のアウトガス評価装置にて評価を行った。(図)

III.2.1.3.-2-5) コンタミ膜厚に対するレジスト成分の寄与率はEUV方式で67%であり、一方のEB方式では63%とほぼ同じとなった。



図III.2.1.3.-2-5 コンタミ膜形成に対するレジスト各成分の寄与率の EUV 方式と EB 方式評価装置の比較

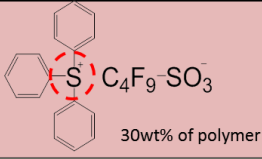
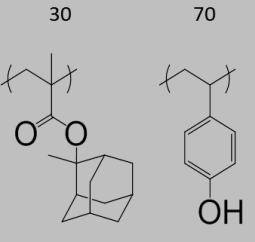
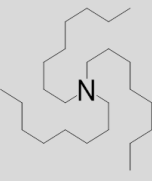
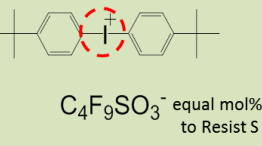
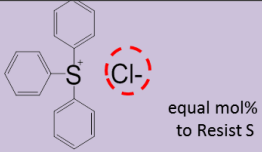
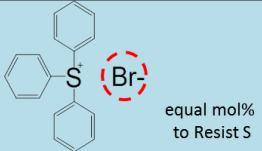
以上の評価結果より、本評価手法によりコンタミ膜形成への各種レジスト成分の寄与率を明確に求めることができることを示すことができた。さらには本手法を用いることで、アウトガス制御に対しレジストの材料設計の上で、どのレジスト成分を改善すべきであるかの明確な指針を求めることができることが判明した。

(b) ノンクリーナブルコンタミへのレジスト成分の寄与評価

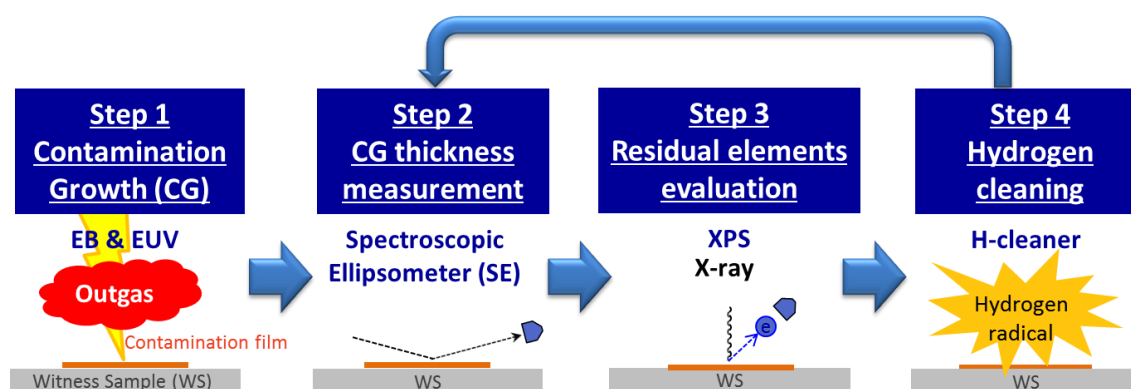
① 評価の背景と評価手法

レジストのアウトガス特性としては、主にハイドロカーボンより成るコンタミ膜とこのコンタミ膜を水素ラジカルによりクリーニング処理を行った後にもWS上に残留するノンクリーナブルコンタミと呼ばれるコンタミ成分の2種類がある。ノンクリーナブルコンタミの評価手法としてはWS上の残留コンタミをXPSにて元素分析を行い、表面元素組成比を求める手法が一般的である。主要なノンクリーナブルコンタミの発生源としてはハイドロカーボン以外の化合物を含むPAG分解物で、これまでは主に硫黄(S)が着目されていた。しかし、S以外の知見が乏しいため、今回、同一のポリマーおよびクエンチャーを用い、種々の元素(S, I, Cl, Br)を含むPAGを含むレジストサンプルを準備し、(表III.2.1.3.-2-3) 上記サンプルレジストにより形成されたコンタミ膜厚をレジスト成分のノンクリーナブルコンタミへの寄与を評価した。

表III.2.1.3.-2-3 レジスト成分のノンクリーナブルコンタミへの寄与評価のためのレジストサンプル

Sample Name (Containing element)	PAG* (equimolar)	Polymer	Quencher
Resist S (Sulfur)	 30wt% of polymer		 0.15 mol of PAG
Resist I (Iodine)	 equal mol% to Resist S		
Resist C (Chlorine)	 equal mol% to Resist S		
Resist B (Bromine)	 equal mol% to Resist S		

ノンクリーナブル評価の手法としては、WS 上にコンタミ膜を形成し、その中に含まれるノンクリーナブル成分(非カーボン元素)の元素組成比(Atomic %)を求め、それが水素ラジカルクリーニング処理によりどの程度減少するか(クリーニング可能か)を評価した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-6) WS 上には EUV ミラーを模して、Ru のキャッピング層が設けられている。XPS による元素組成比の解析において、C1s と Ru3 d のピークは共に結合エネルギー280から285eV 付近に存在する。このため、水素ラジカルクリーニングを始める前のコンタミ膜を10nm 程度と厚く形成し、下地となるRuのピークが検出されないようにし、その後クリーニングを繰り返すことで、C と Ru のピーク分離を行った。(図Ⅲ.2.1.3.-2-7)



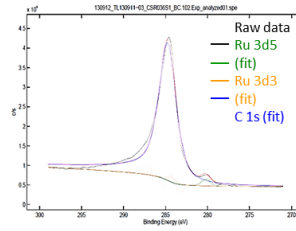
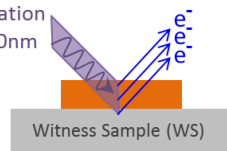
図Ⅲ.2.1.3.-2-6 レジスト成分のノンクリーナブルコンタミ寄与評価の評価方法

As deposited

Contamination thickness = 7~10nm

X-ray penetration depth = 8~10nm

C > 90 atomic%
Ru < 3 atomic%
O = 3~5 atomic%

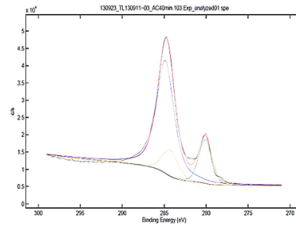
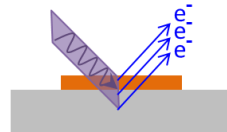


Ru / C separated

- (1) Ru3d5 fixed
- (2) Ru3d3 fixed (approximately 2/3 of Ru3d5)
- (3) C1s fixed
- (4) All peaks refixed

During Cleaning

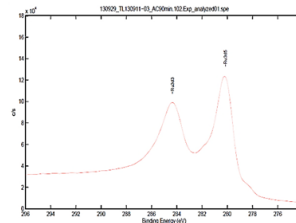
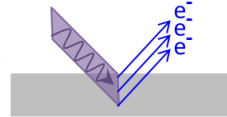
Contamination thickness = 0.3~9nm



Cleaning Finished

Contamination thickness < 0.1nm (SE limit)

Ru = 60~65 atomic%
O = 32~34 atomic%



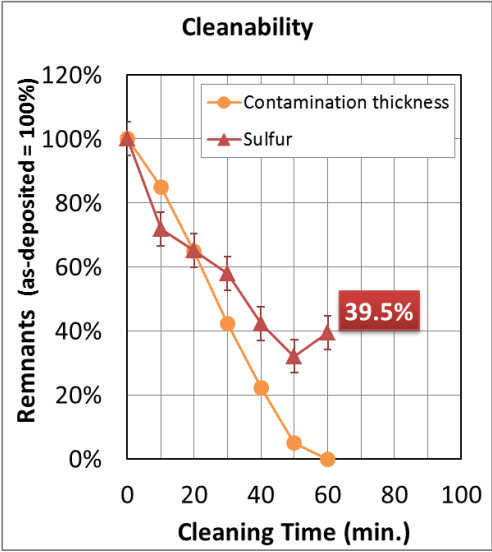
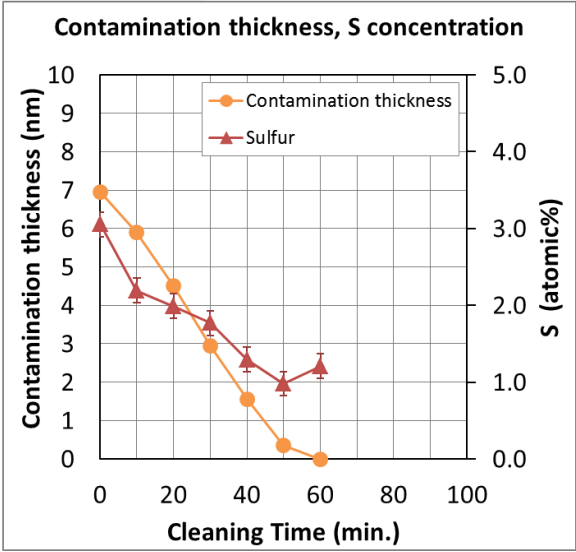
Ru / C not separated

counted as Ru only

図Ⅲ.2.1.3.-2-7 ノンクリーナブルコンタミ寄与評価の XPS 解析における Ru と C のピーク分離手法の例

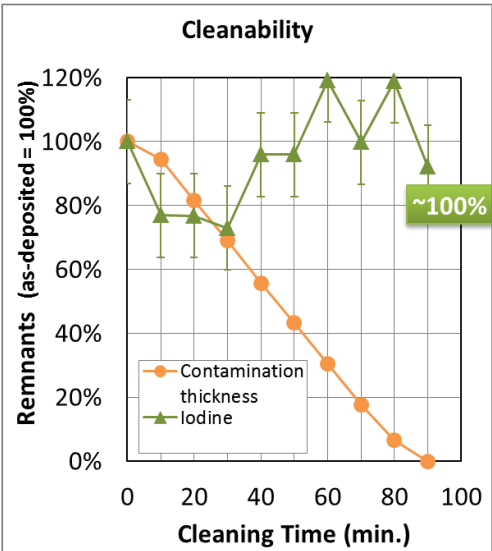
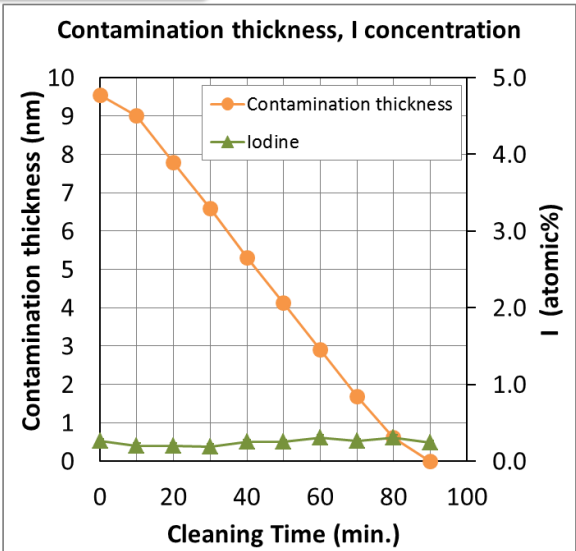
EB 方式アウトガス評価装置により作成したコンタミのノンクリーナブル評価結果と以下に示す。
(図Ⅲ.2.1.3.-2-8、9、10、11) 各図の左側のグラフは、それぞれ硫黄(Sulfur)、ヨウ素(Iodine)、塩素(Chlorine)、臭素(Bromine)を含んだPAGを含有するレジストサンプルの水素ラジカルクリーニング前から、約1nmステップでクリーニングを行い、各段階でのコンタミ膜と着目するノンクリーナブルコンタミ成分元素の元素組成比を示す。右側のグラフはクリーニング前の元素組成比を100%としたときの、各クリーニング段階での残存膜厚比率と残存元素組成比を示す。

Sulfur



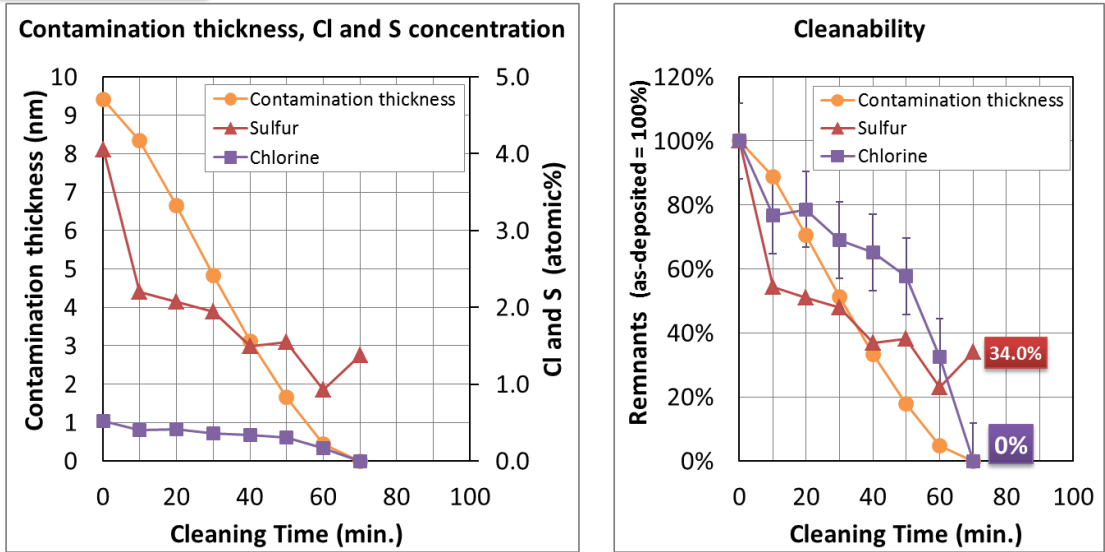
図Ⅲ.2.1.3.-2-8 硫黄コンタミのクリーニングによる膜厚と元素組成比の推移(左)と Cleanability(右)

Iodine



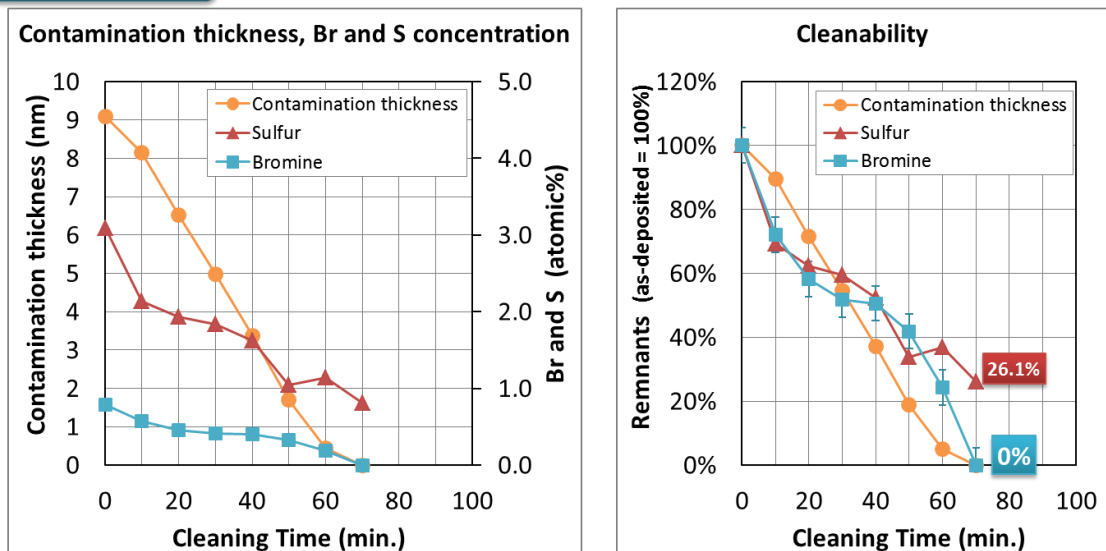
図Ⅲ.2.1.3.-2-9 ヨウ素コンタミのクリーニングによる膜厚と元素組成比の推移(左)と Cleanability(右)

Chlorine



図Ⅲ.2.1.3.-2-10 塩素コンタミのクリーニングによる膜厚と元素組成比の推移(左)と Cleanability(右)

Bromine



図Ⅲ.2.1.3.-2-11 臭素コンタミのクリーニングによる膜厚と元素組成比の推移(左)と Cleanability(右)

上記結果より、コンタミ膜が完全にクリーニングされた時に残っているノンクリーナブルコンタミ元素の残存比率を Non-cleanability と定義すると、硫黄、ヨウ素、塩素、臭素はそれぞれに 39.5%、100%、0%、0% となり、塩素、臭素は水素ラジカルクリーニングによりカーボンコンタミ膜とほぼ同時に除去できるが、硫黄とヨウ素はクリーニング後もミラー上に残留することを示唆する結果となった。この原因としては、以下の理由が考えられる。上記4元素の電気陰性度は $Cl > Br > S > I$ の順に大きく、またこれらの水素化物の沸点は $Cl < Br < S < I$ の順に低い。そのため塩素及び臭素は容易に水素化物を形成しやすく、また形成された水素化物は気化しやすいため、容易にコンタミ膜中より脱離すると思われる。(図 III.2.1.3.-2-12)

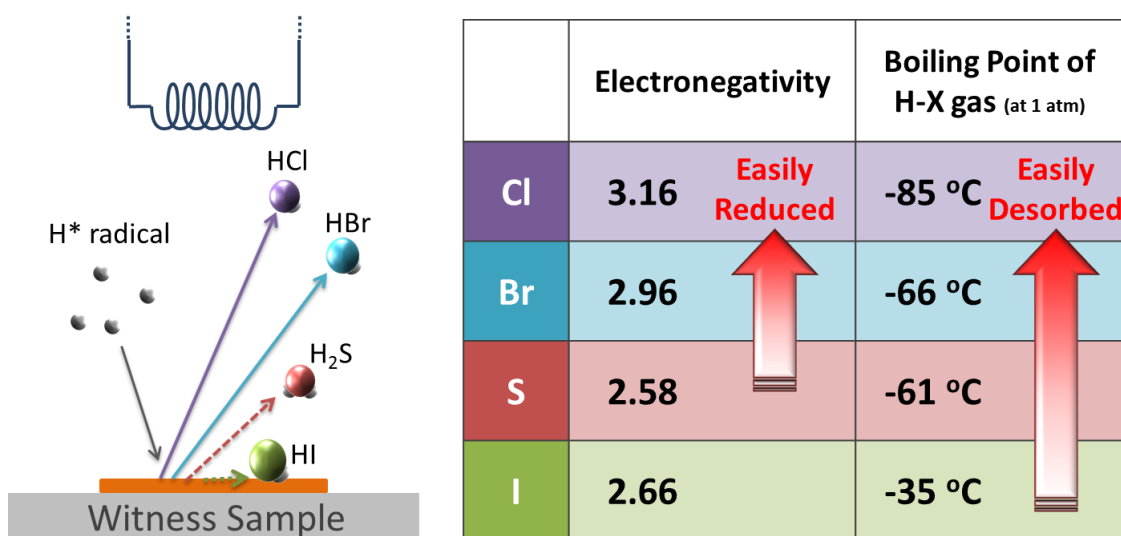
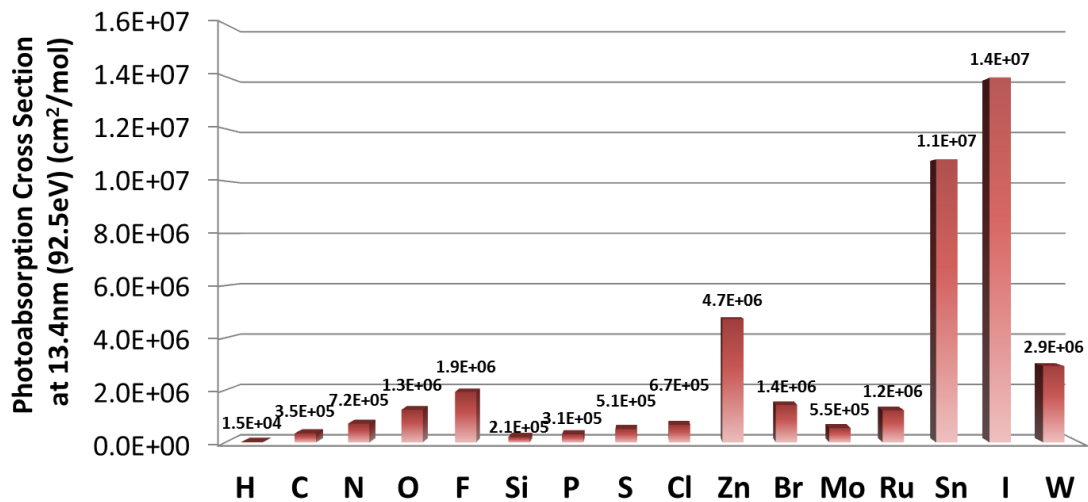


図 III.2.1.3.-2-12 各種クリーナブルコンタミの電気陰性度と水素化合物の沸点

ノンクリーナブルコンタミによる露光装置への影響としては、各残留コンタミ元素の EUV 光の吸収を考慮する必要がある。Henke らによる各ノンクリーナブルコンタミ元素の EUV 光 (13.5nm) における光吸収断面積を以下に示す。(図 III.2.1.3.-2-13) 断面積が大きい元素ほど EUV 光の吸収が大きく、ミラー上に残留した場合、EUV 光の反射率が低下することになる。各元素の吸収断面積は $S < Cl < Br < I$ の順に大きくなり、特にヨウ素は他の元素の 10 倍以上の吸収断面積を持つことがわかる。以上の考察から恒久的にミラーの反射率低下に寄与するパラメーターとして Permanent Reflectivity Loss (PRL) Criticality として以下のように定義し、これを求めた。

$$\text{PRL Criticality} = \text{Non-Cleanability} \times \text{Photoabsorption Cross Section}$$

(Permanent Reflectivity Loss) (at contamination thickness < 0.1nm) (relative to C = 1.00)



Relative Photoabsorption Cross Section (C = 1.00)	C	Si	P	S	Cl	Br	I
	1.00	0.60	0.89	1.48	1.95	4.13	40.39

Reference; B.L. Henke, E.M. Gullikson, and J.C. Davis. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92, Atomic Data and Nuclear Data Tables Vol. 54 (no.2), 181-342 (July 1993).

図Ⅲ.2.1.3.-2-13 各種ノンクリーナブルコンタミ元素の EUV 光における吸収断面積

以下に各ノンクリーナブルコンタミ成分元素のPRLを示す。なお、EUV方式のアウトガス評価装置においても同様の評価を行っており、その結果も合わせて記載する。(表Ⅲ.2.1.3.-2-4) EB方式およびEUV方式の両方式におけるアウトガス評価において、ヨウ素は共に高いPRL criticalityを示し、続いて硫黄となった。これらの結果は今度のEUVレジストの材料設計における指針となる。

表Ⅲ.2.1.3.-2-4 各種ノンクリーナブルコンタミ元素の EUV 光吸収とクリーニング特性

	Photoabsorption Cross Section	Non-Cleanability		PRL Criticality	
		EB	EUV	EB	EUV
S	1.48	0.33 (average)	0.2 (average)	0.49	0.25
I	40.39	1	0.5	40.4	20.2
Cl	1.95	0	0	0	0
Br	4.13	0	0	0	0

なお、EB 方式と EUV 方式の比較においては EUV 方式における Non-cleanability の方が低くなる結果となった。EB 方式と EUV 方式の評価におけるコンタミ膜のクリーニングレートを以下に示す。(表 III.2.1.3.-2-5) コンタミ膜のクリーニングレートは EUV 方式で作成したコンタミ膜のほうが速く、このことから EB 方式で形成されたコンタミ膜がより緻密であることが示唆される。そのため、EB 方式ではコンタミ膜中に取り込まれたノンクリーナブルコンタミ成分が脱離しにくいと考えられ、これが両者の Non-cleanability の違いとして現れていると考えられる。

表 III.2.1.3.-2-5 各種ノンクリーナブルコンタミを含むコンタミ膜の元素別クリーニング速度

	Cleaning Rate (nm/hour)	
	EB	EUV
S	8.4	14.5
I	7.2	10.4
Cl	9.6	10.1
Br	9.3	15.0

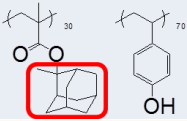
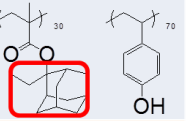
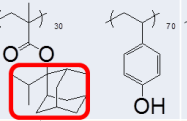
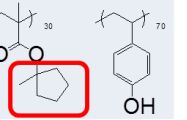
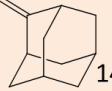
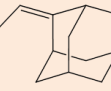
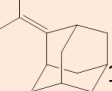
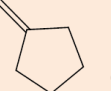
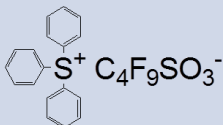
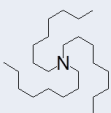
(c)レジストファミリーグルーピング

レジスト開発段階においては、同一組成物を用いながらも、その保護基の保護率や PAG、クエンチャーの添加量、並びにプロセス条件であるプリバーク、ポストエクスポージャーバーク(PEB:Post Exposure Bake)の最適化が行われる。しかし、これらの種々のパラメーター変更時のレジストアウトガスの挙動は、これまで十分に明らかになっておらず、パラメーター変更に伴い、全条件におけるレジストアウトガス評価が必要とされていた。本検討では、これまでに検討したレジスト組成変更となるレジストアウトガス特性の保護率および PAG 添加量依存性とプロセス条件変更となるクエンチャーおよび PEB 温度依存性に加え、以下に示すポリマーの溶解抑止基の脱保護反応の反応性の違いに着目し、そのレジストアウトガスの挙動を把握し、これをグルーピングする(レジストファミリーグルーピング)ことで、アウトガス評価の効率化につなげるものである。

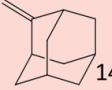
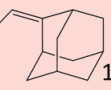
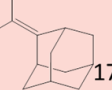
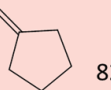
モデルレジストとしては、レジスト樹脂として PHS とのハイブリッド樹脂を、PAG として triphenylsulfonium nonafluorobutanesulfonate、クエンチャーには trin-octyl amine を用いた。溶解抑止基としては、以下のものを用いた。PAG 添加量は樹脂重量比率で 20%とし、クエンチャー添加量は各レジストの PAG 添加量に対し 0.1mol%とした。(表 III.2.1.3.-2-6) 図中に溶解抑止基の脱保護分解物の

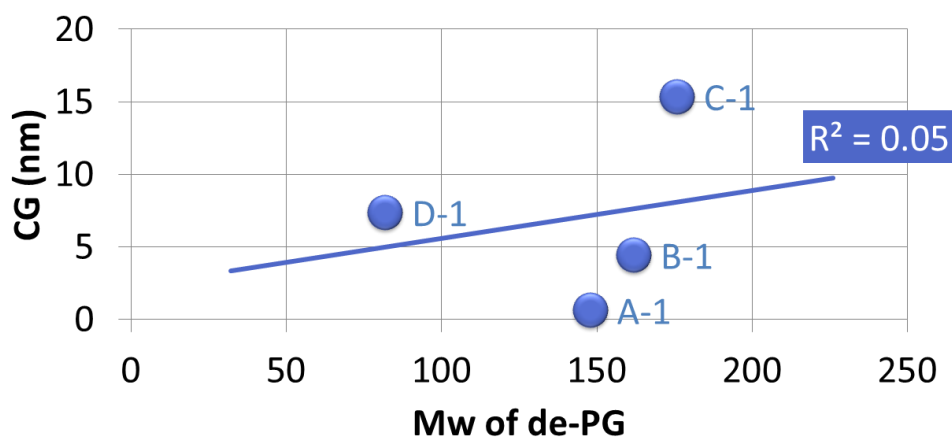
分子量(Mw)とレジストサンプル A-1 に対する溶解抑制基の酸分解反応の相対速度定数(k)を合わせて示す。なお k の大きいものほど反応性が高いことを示す。

表Ⅲ.2.1.3.-2-6 レジストファミリー評価において準備したレジストサンプル

Sample name	A-1	B-1	C-1	D-1
Base resin				
De-protection group (Mw)	 148	 162	 176	 82
Relative acid rate constant (k)	1.0	3.6	12.1	2.9
PAG	 *per hundred resin 20 phr*			
Quencher	 0.1 mol for PAG			

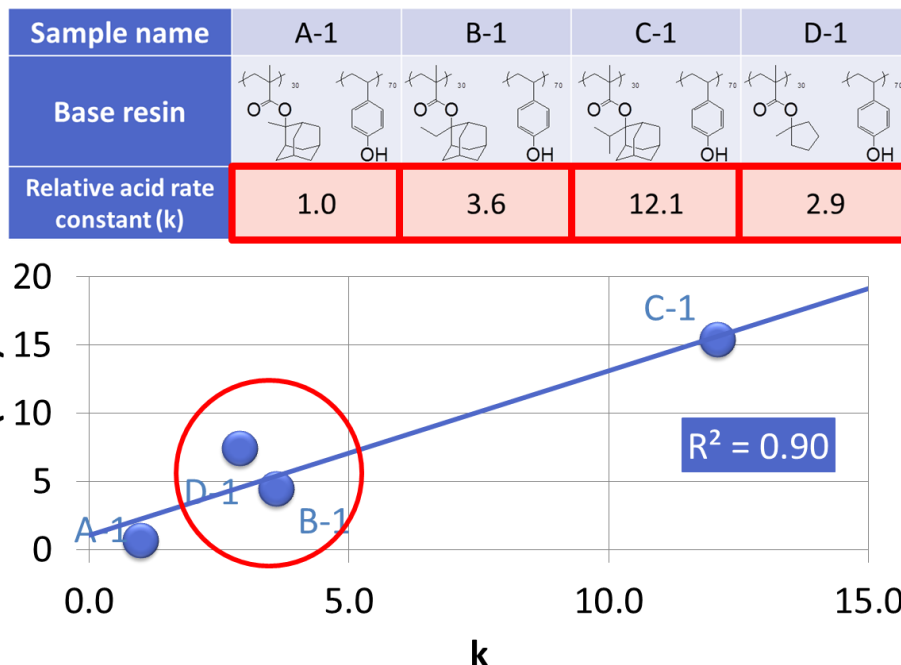
EB 方式アウトガス評価装置により作成したコンタミ膜厚の結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-14)

Sample name	A-1	B-1	C-1	D-1
De-protection group (Mw)	 148	 162	 176	 82



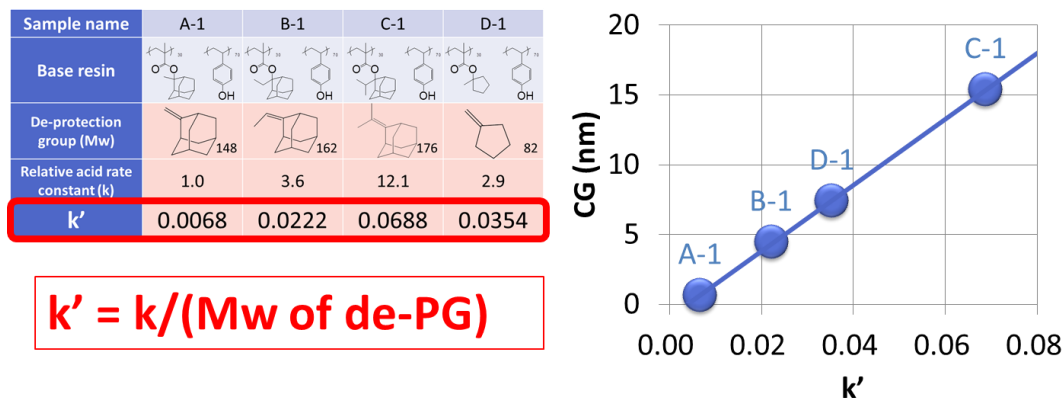
図Ⅲ.2.1.3.-2-14 レジストファミリー評価におけるレジストサンプルのコンタミ膜厚と分子量の関係

ここでは横軸に脱保護分解物の分子量を縦軸にコンタミ膜厚をプロットしたが、両者の間に相関は認められなかった。一方、横軸を相対酸分解速度定数とした場合コンタミ膜厚と良好な相関が得られた。(図Ⅲ.2.1.3.-2-15)しかし、サンプル B-1 と D-1 の間で逆転が生じていることがわかる。



図Ⅲ.2.1.3.-2-15 レジストファミリー評価におけるレジストサンプルのコンタミ膜厚と酸反応定数の関係

B-1 と D-1 では相対酸分解速度定数はほぼ同じであるが、一方で脱保護分解物の質量数は B-1 が 162 であるのに対し D-1 では 82 と小さい。PAG 分解物のコンタミ膜形成評価において、分子サイズの大きいものほどアウトガスしにくいことが判っている。そこで相対酸分解速度定数を脱保護分解物の分子量で割ったもの (k') を新たな指標として、これに対しコンタミ膜厚をプロットしたところ非常によい相関を得ることが出来た。(図Ⅲ.2.1.3.-2-16)



図Ⅲ.2.1.3.-2-16 レジストファミリー評価におけるレジストサンプルのコンタミ膜厚と k' の関係

以上の結果より、レジストの溶解抑止基の脱保護反応が低いほど、また脱保護反応生成物の分子量が大きいほどアウトガス量は少なくなるとの材料設計の指針を得ることができた。

(d) コンタミ膜形成への EUV 強度依存性

EUV リソグラフィーの量産時には、2000mW/cm² 程度の強度の EUV 光がレジスト上に照射されると考えられるが、従来のアウトガス評価においては、レジストの照射に用いられる EUV 光源として十分な強度を持つ評価装置が無かった。そこで実用化された際により近い環境下でアウトガス評価を実施し、アウトガス特性を確認する必要がある。そのために、High Power EUV 照射装置 (HPEUV 照射装置) を設計、試作し、これを用いたアウトガス評価実験を行った。(図 III.2.1.3.-2-17) HPEUV は EUV 露光装置に比較し、光源からウェハまでの間に使用するミラー枚数を少なくすることで、ミラーによる EUV 光の減衰を抑え、ウェハ上で量産時とほぼ同等の EUV 強度を得ることができる。(図 III.2.1.3.-2-18) また、装置内には2か所のウィットネスサンプルの設置場所があり、ウェハに対向した場所とウェハに並行した場所でのコンタミ膜の付き方を比較できるようにしてある。さらには、質量分析器を備えアウトガスの RGA (Residual Gas Analysis) を分析することも可能である。(図 III.2.1.3.-2-19) HPEUV の

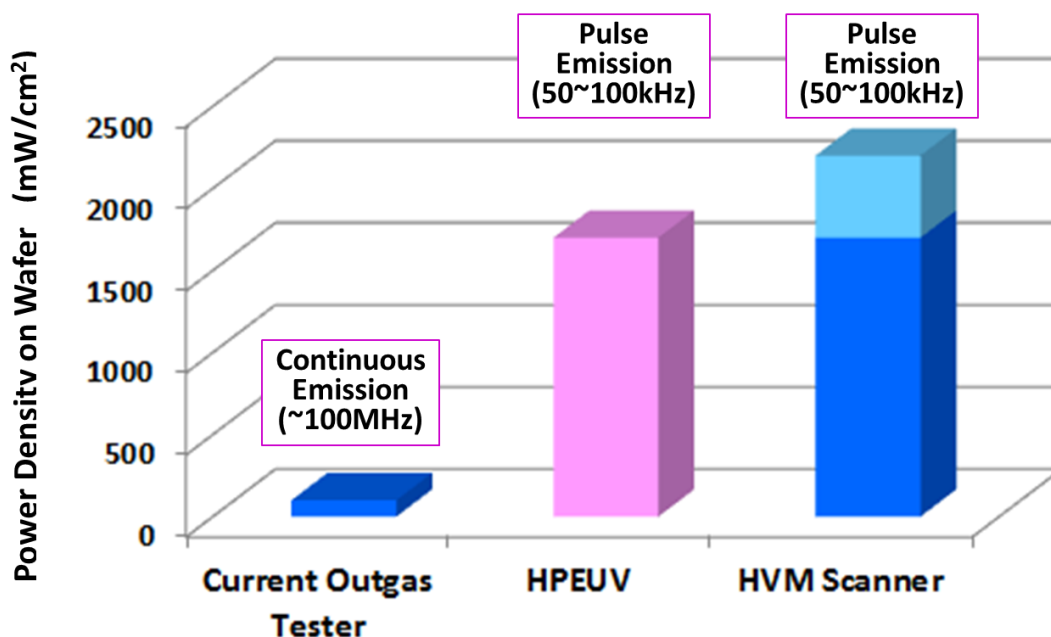
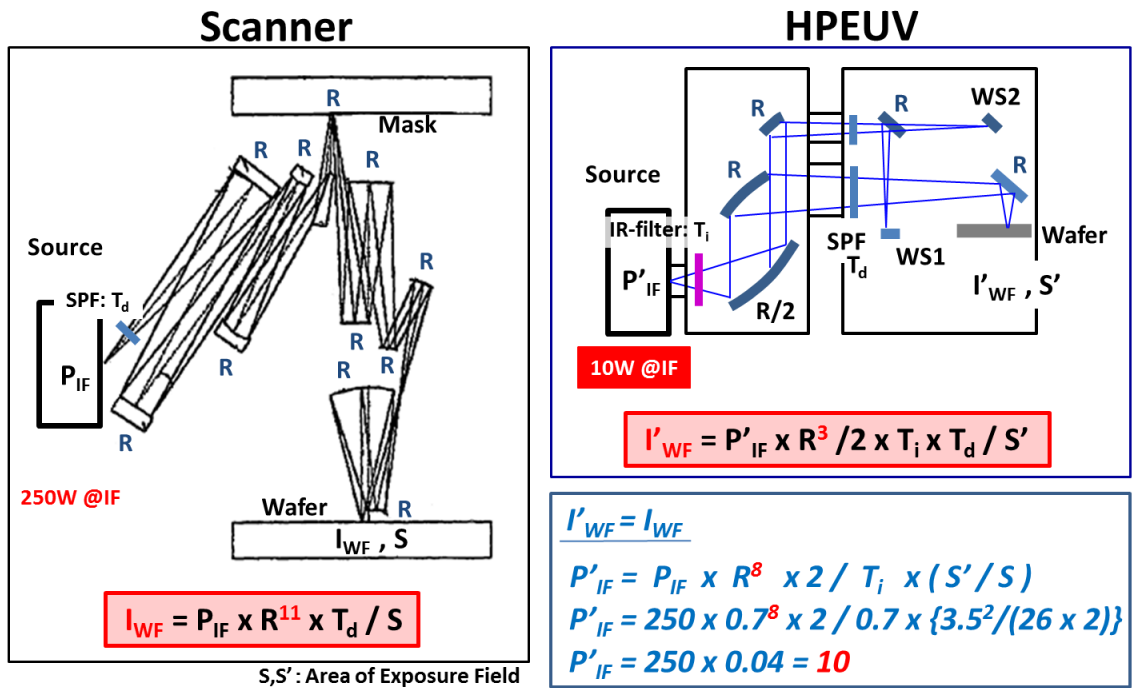
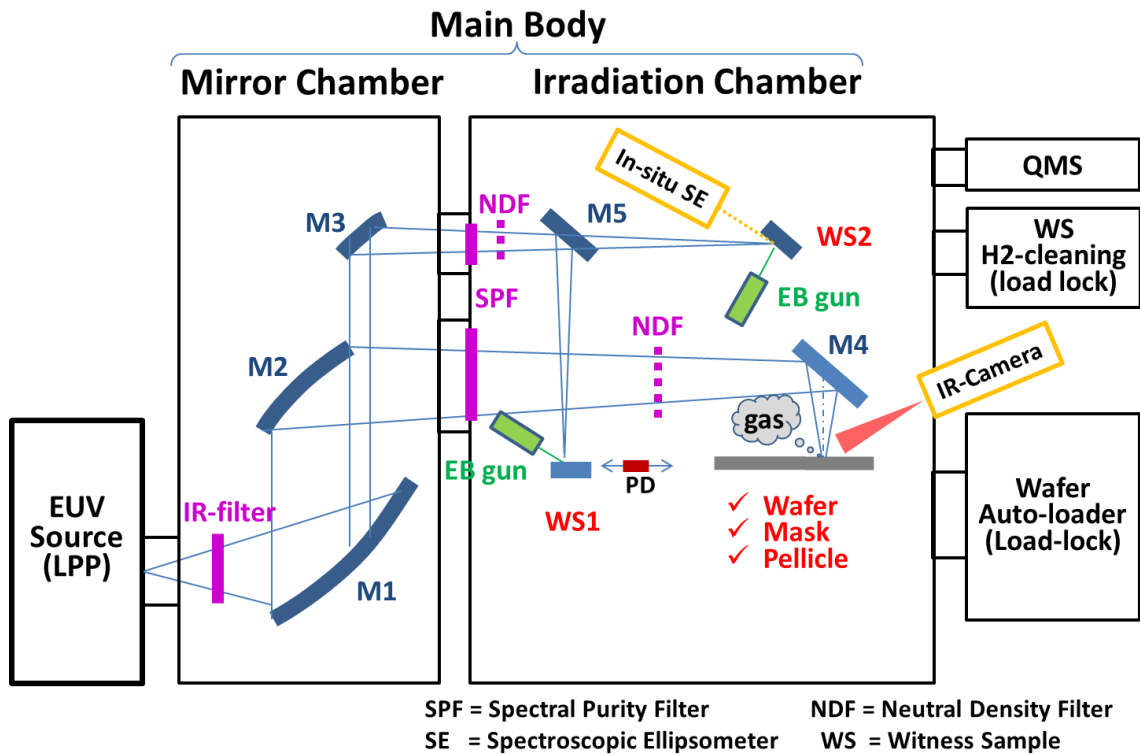


図 III.2.1.3.-2-17 EUV 量産露光装置と各種アウトガス評価装置の EUV パワー密度

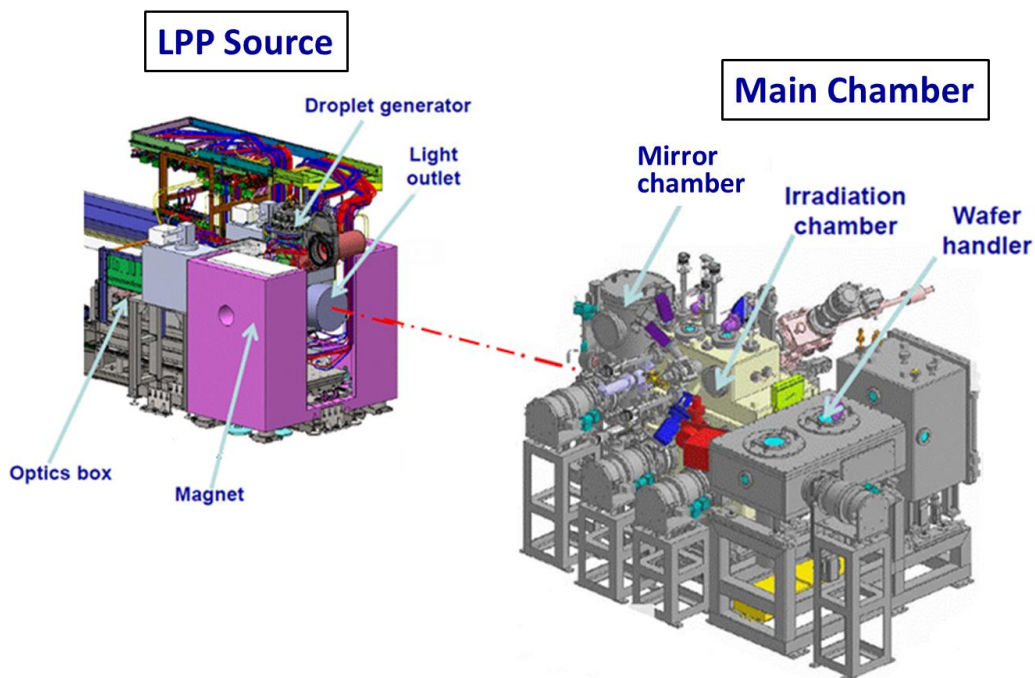


図Ⅲ.2.1.3.-2-18 EUV 露光装置と HPEUV 照射装置の光学系とウェハ面上の EUV 強度



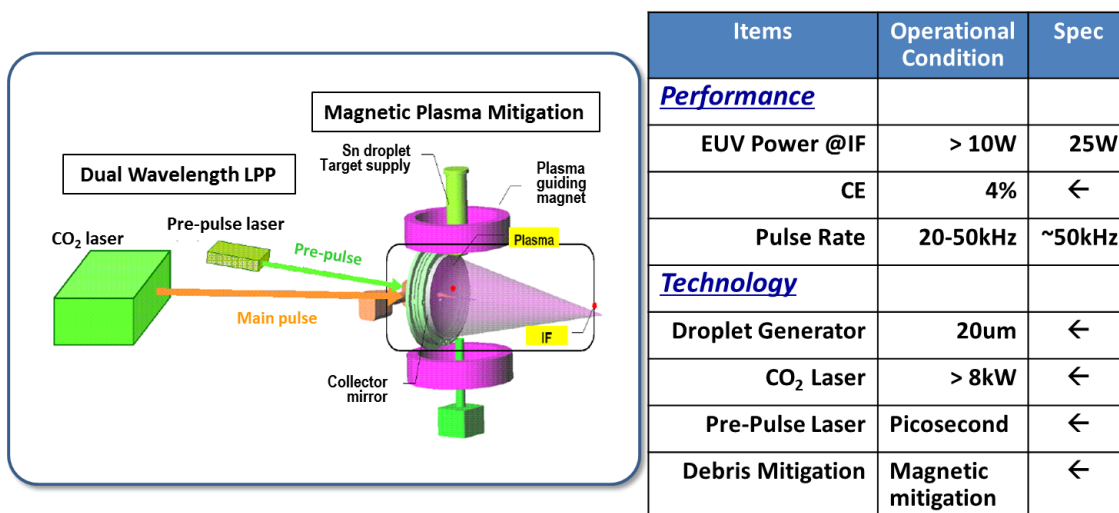
図Ⅲ.2.1.3.-2-19 HPEUV 照射装置の概要図

3次元 CAD 図面を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-20)



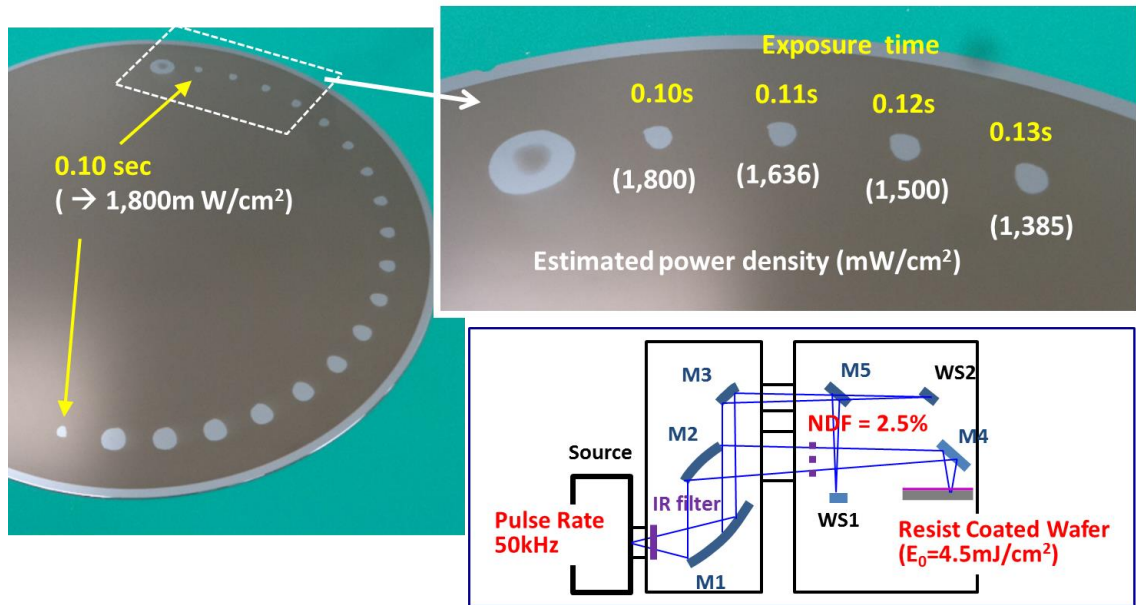
図Ⅲ.2.1.3.-2-20 HPEUV 照射装置の 3 次元 CAD 図面

光源にはプリパルス方式の LPP 光源を用いている。(図Ⅲ.2.1.3.-2-21)



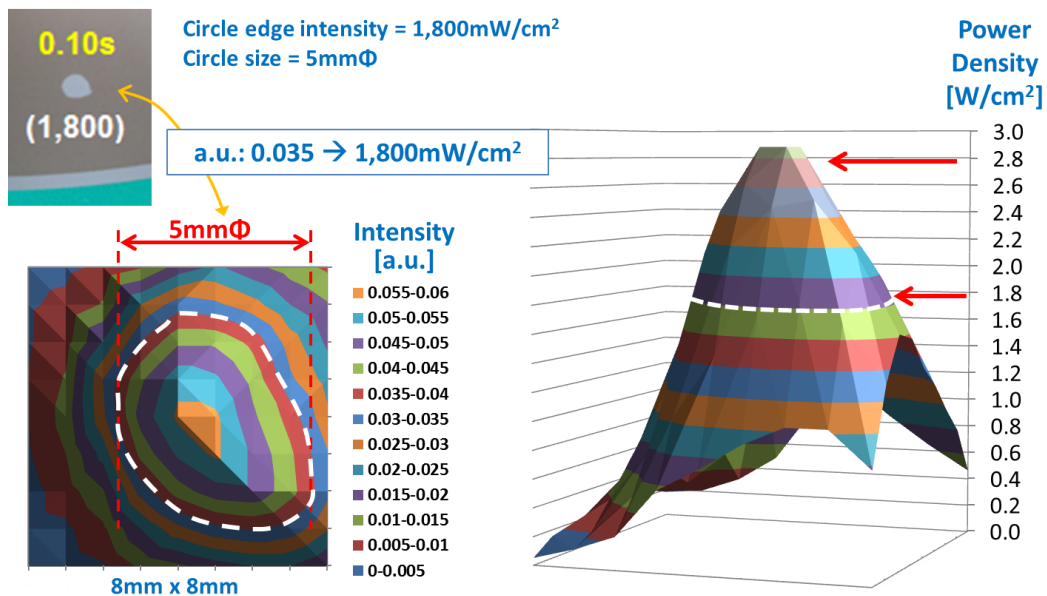
図Ⅲ.2.1.3.-2-21 LPP 光源の概略図と仕様

以下に同装置を用いてウェハ上の EUV 強度を用いた結果を示す。感度が既知のレジストを塗布したウェハに、露光時間を変えながら露光を行った。この時、露光時間 0.1 秒でレジストが感光していることが判る。(図Ⅲ.2.1.3.-2-22)



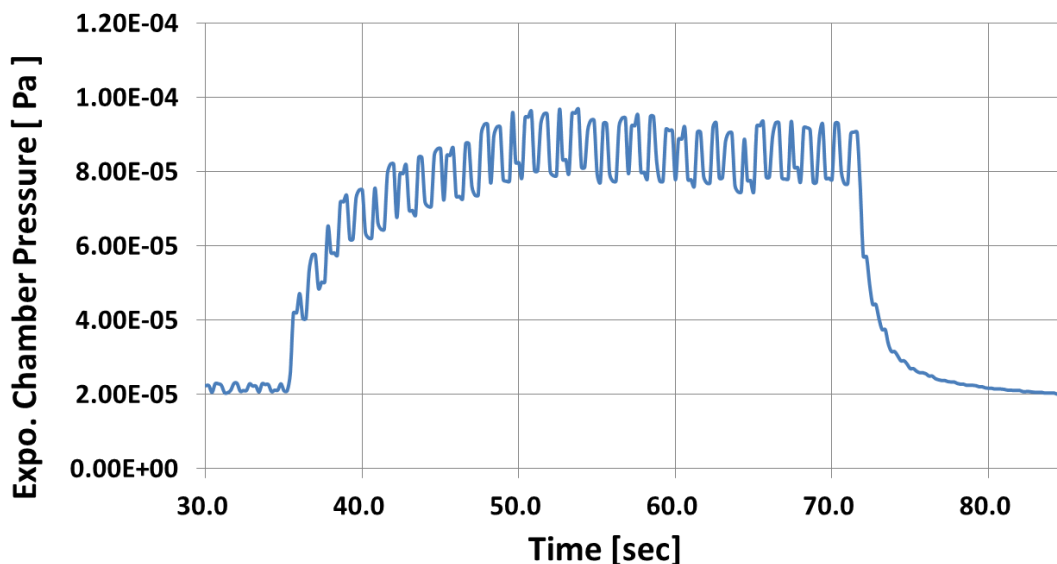
図Ⅲ.2.1.3.-2-22 レジストを用いた HPEUV 照射装置のウェハ上 EUV 強度評価

一方で、ウェハ上に照射された EUV 光の光強度プロファイルを、フォトダイオードを用いて計測した。0.1秒露光時のレジストの露光範囲は5mm φであり、その位置での EUV 強度は1800mW/cm²と換算することができた。一方、EUV 光プロファイルより最大 EUV 強度位置では2800mW/cm²が得られた。(図Ⅲ.2.1.3.-2-23)



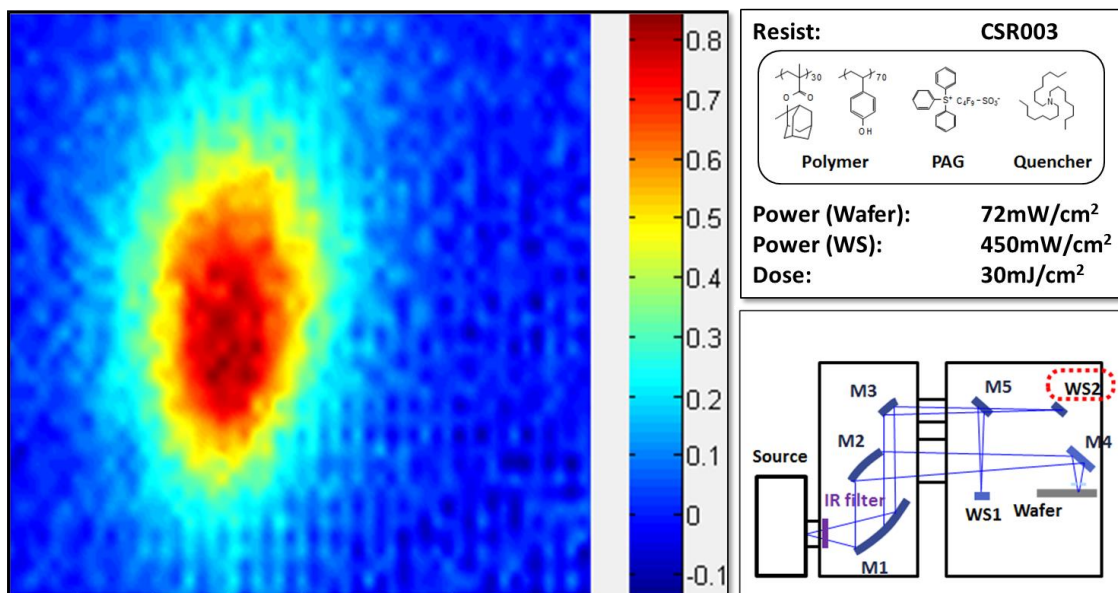
図Ⅲ.2.1.3.-2-23 フォトダイオードによる HPEUV 照射装置のウェハ上強度プロファイル

同装置によるアウトガス評価の際の圧力変化を示す。露光開始と同時にレジストからのアウトガスにより圧力が上昇していることが判る。(図Ⅲ.2.1.3.-2-24)



図Ⅲ.2.1.3.-2-24 HPEUV 照射装置のアウトガス実験におけるチャンバー内の圧力変化

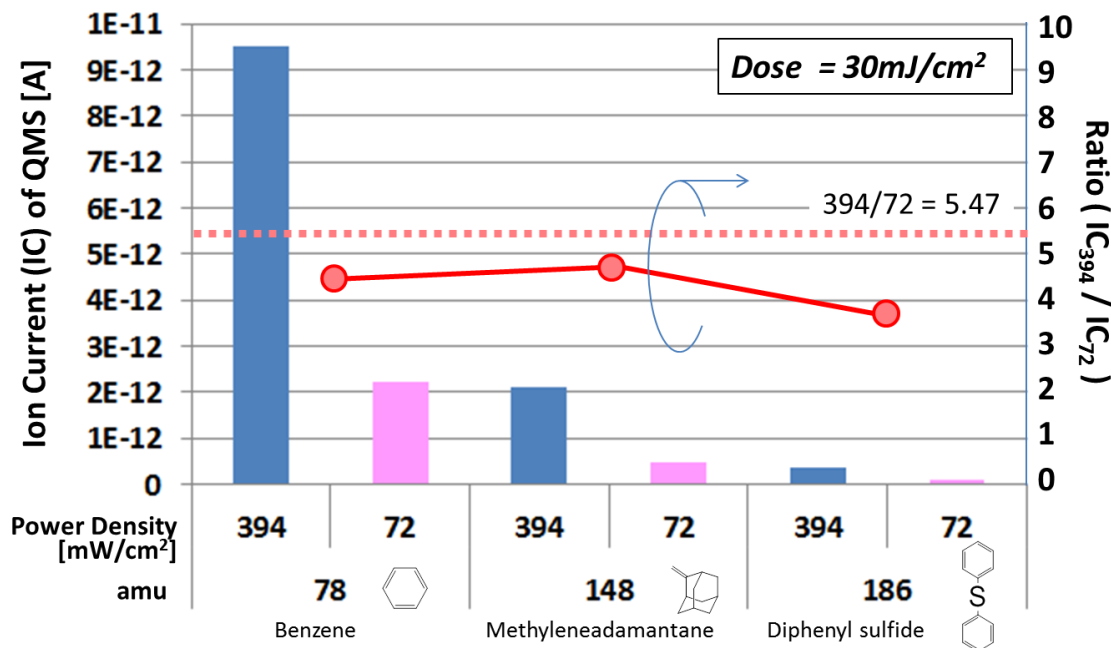
また、ウェハに対向した位置に配置したウィットネスサンプル上に形成された、化学増幅型モデルレジストによるコンタミ膜の 2 次元マップを以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-29)5



図Ⅲ.2.1.3.-2-25 HPEUV 照射装置のアウトガス実験により作成したコンタミ膜の膜厚 2 次元マップ

最後に HPEUV 照射装置を用いた EUV 強度のレジストアウトガスへの影響を評価した。(図

III.2.1.3.-2-26) 図は用いた化学増幅型モデルレジストのウェハ上 EUV 強度 394mW/cm²と72mW/cm²の時の質量分析器で得られたイオン電流量を比較した結果である。赤点線は両実験における EUV 強度の比で、赤点および赤実線は各アウトガス種のアウトガス量の比率を示している。

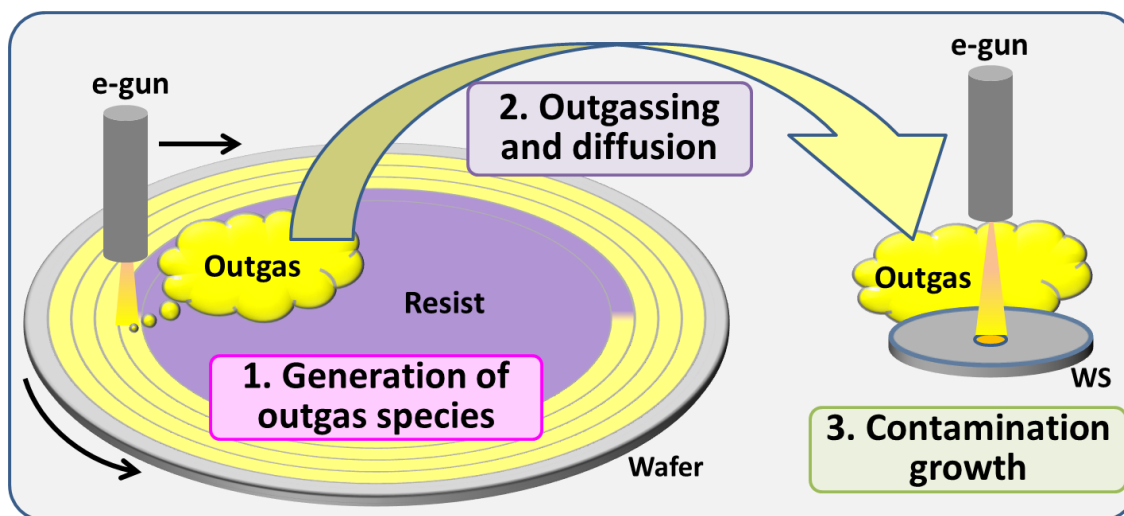


図III.2.1.3.-2-26 HPEUV 照射装置による各種アウトガス成分の EUV パワー依存性

[2] レジストアウトガス・コンタミ形成のモデル構築

(a) レジスト内におけるアウトガス成分発生

従来の露光装置メーカーの推奨するレジストアウトガス評価手法は各レジストの膜抜け感度に相当する露光量で、300mm ウェハ相当の面積のレジストに1時間掛けて照射し、その際放出されるアウトガスによって形成されるコンタミ膜を評価するという手法である。しかし、EUV レジストの量産適用時には種々のマスクパターンがレジスト上に転写される。その際の露光量は必ずしも膜抜け感度と同一ではない。これまで、上記評価手法は、アウトガス量は露光量に比例するという仮定の元に評価が行われていたが、上記過程が種々のレジストに当てはまるかどうかを、化学増幅型レジストをモデルとしてそのコンタミ膜形成過程を簡易シミュレーションにより検証した。以下に示す図はEB方式のアウトガス評価手法の概略図である。(図III.2.1.3.-2-27)レジストからのアウトガスによるコンタミ膜形成には次の3つの過程に分けることができる。露光によるレジスト内でのアウトガス成分の発生(ステップ1)、アウトガス成分のレジストからの放出と実験チャンバー内の拡散(ステップ2)、およびエネルギー線照射によるウィットネスサンプル上へのコンタミ膜の形成(ステップ3)である。実験に用いた化学増幅型モデルレジストを以下に示す。(表III.2.1.3.-2-7)

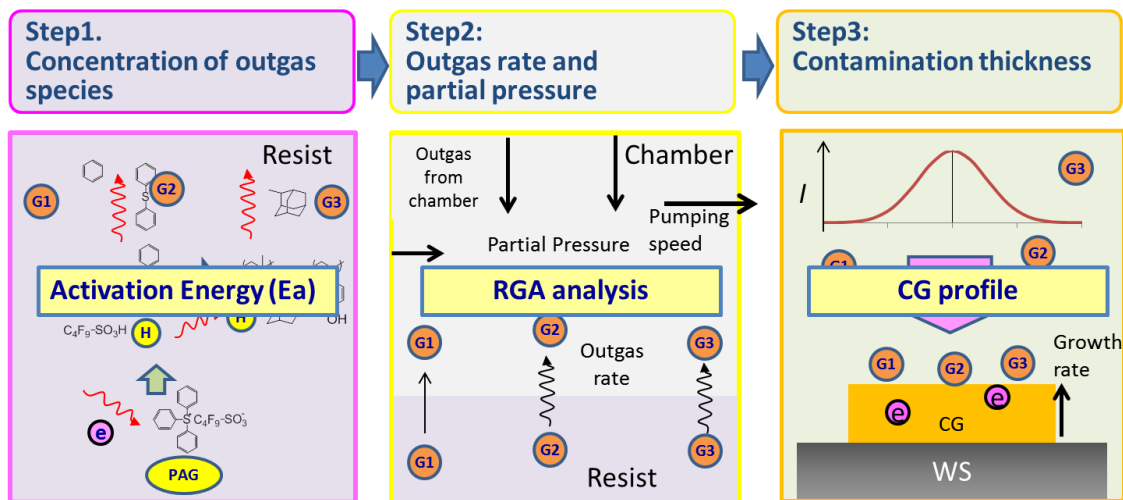


図Ⅲ.2.1.3.-2-27 アウトガス評価手法におけるアウトガス発生からコンタミ膜形成までの概要図

表Ⅲ.2.1.3.-2-7 未露光部ノンクリアブルコンタミの WS 位置依存性評価に用いたレジスト

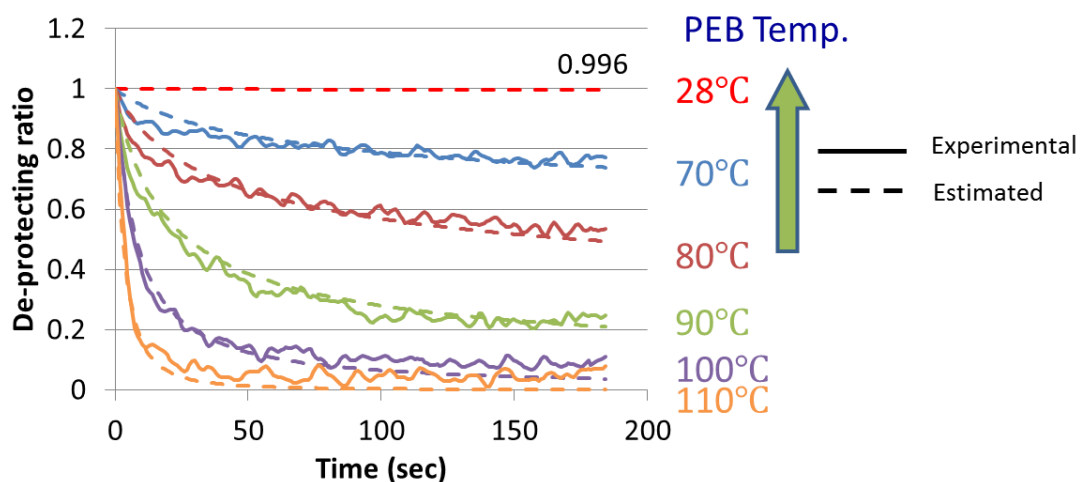
	PAG & Quencher (Q)	Polymer	Mw of PU	PU (mol%)	PAG (phr)	Q (mol of PAG)
Resist A			148	30	20	0.1/0.2

レジストの膜抜け感度を求める際には露光後にポストエクスポージャーバーク (PEB) 処理を行い、レジスト中での溶解抑止基の脱保護反応を促進させるのに対し、アウトガス評価においては露光時の室温での脱保護反応の進行具合を求める必要がある。ステップ1では種々の PEB 温度での溶解抑止基の脱保護反応の進行具合をフィッティングし、活性化エネルギーを求めた。その上で上記結果を元に室温 (28°C) におけるレジスト中のアウトガス成分濃度を求めた。ステップ2では、各種アウトガス成分の実験チャンバー内における分圧の時間変化をフィッティングした。このフィッティングにおいては、RGA 解析により得られた各アウトガス成分分圧の時間変化、ステップ1で得られたレジスト中のアウトガス成分濃度の時間変化および、実験チャンバーの排気速度測定の結果などを用いた。ステップ3においては、ステップ2で求めた各種アウトガス成分分圧の時間変化を元に、ウィットネスサンプル上の電子線プロファイルをガウシアンと仮定し、コンタミ膜の膜厚プロファイルをフィッティングした。(図Ⅲ.2.1.3.-2-28)



図Ⅲ.2.1.3.-2-28 アウトガス評価手法におけるアウトガス発生からコンタミ膜形成までのモデル図

上記モデルレジストを用いて脱保護反応のフィッティング結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-29)



図Ⅲ.2.1.3.-2-29 モデルレジストの脱保護反応のフィッティング結果

図の横軸は時間、縦軸は脱保護率である。PEB温度は70°Cから110°Cまでの5条件においてフィッティングした。実線が実験によって求めた脱保護率の時間変化で、点線がフィッティング結果である。フィッティング結果は実験をよく再現している。図には計算によって求めたアウトガス評価時の28°Cにおける脱保護反応の進行具合を合わせて示している。このモデルレジストにおいて脱保護反応は室温ではほとんど進行しないことが分かる。また、上記解析結果より、膜抜け感度におけるPAGの分解は添加量のおよそ1/10であることも計算より求めることができた。

(b) アウトガス成分の脱離と拡散

ステップ2では以下に示すアウトガスのRGA分析結果の3種類のアウトガス成分であるBenzene(質量

数: 78)、Methyladamantane (質量数: 148)、Diphenyl Sulfide (質量数: 186) に対して行った。(図 III.2.1.3.-2-30)

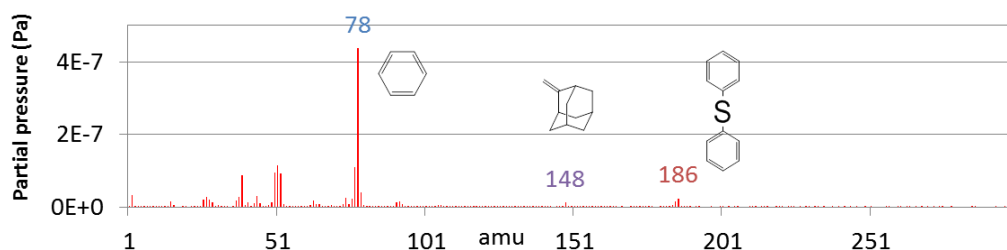


図 III.2.1.3.-2-30 モデルレジストの RGA

以下に各アウトガス成分分圧の時間変化のフィッティング結果を示す。(図 III.2.1.3.-2-31) 横軸は時間、縦軸は分圧である。各点が実験によって得られた分圧、実線が計算結果である。なお、本アウトガス評価では、露光中は排気速度を抑制し、露光終了と共に排気速度を上げるという手順を取っているため、露光終了と共に分圧は急速に落ちることになる。フィッティング結果は実験をよく再現することができた。

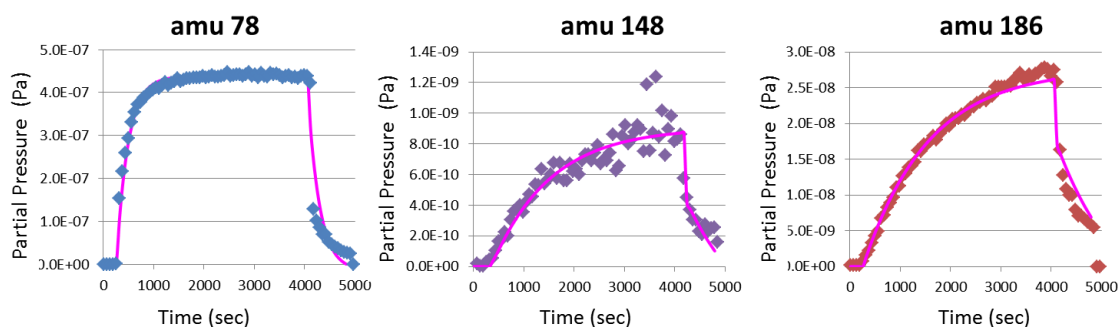


図 III.2.1.3.-2-31 モデルレジストの各種アウトガス成分の分圧変化のフィッティング結果

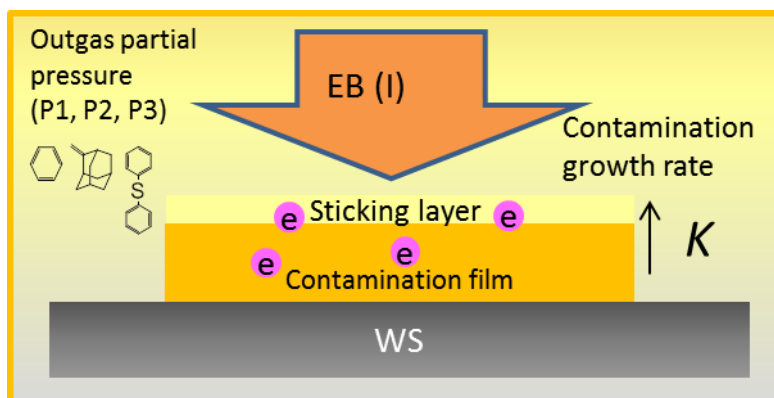
質量数 78 の Benzene においては露光開始と共に急激に分圧が上がり、その後ほぼ一定の値を示すのに対し、質量数 186 の Diphenyl Sulfide は徐々に徐々に分圧が上昇している。両者は共に PAG 分解により生成するアウトガス成分であるが、これらの違いは分子サイズの比較的小さい Benzene がレジスト中で発生した後、速やかにアウトガスとしてチャンバー内に拡散するのにに対し、Diphenyl Sulfide はレジストからのアウトガス速度が遅いためと考えられる。一方で質量数 148 の Methyladamantane は Diphenyl Sulfide と同様に分子サイズの大きさがアウトガス速度を遅くせしめるのと合わせて、露光されたレジスト内で脱保護反応が徐々に進行し、アウトガスを発生し続けるためと考えられる。

(c) コンタミ膜の形成

ステップ3ではステップ2までで求めた各アウトガス成分分圧を用いて、Bollerらの提唱するコンタミ膜成長速度モデルを元に以下の式に示す。

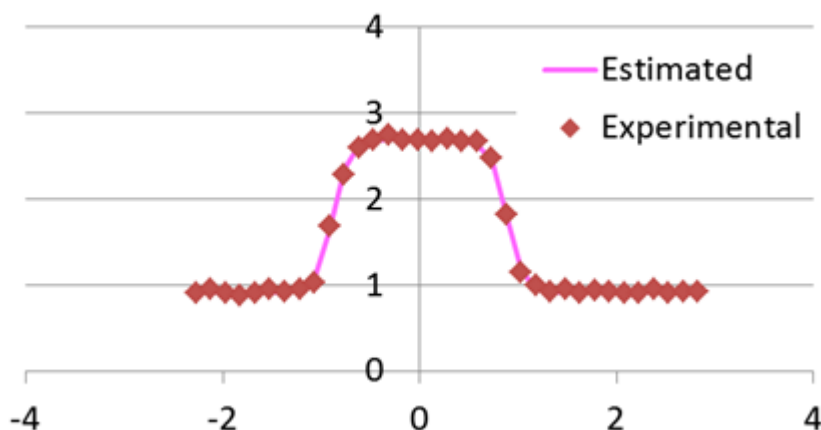
$$K_x = C_1 \times P_x \times I \div (C_2 \times P_x + C_3 \times I + C_4) \quad (x=1, 2, 3)$$

ここで、 K_x はコンタミ膜成長速度、 P_x は各アウトガス成分(3種類)の分圧、 I はウィットネス上に照射される電流量、 C_1 から C_4 はフィッティングパラメーターである。(図Ⅲ.2.1.3.-2-32)



図Ⅲ.2.1.3.-2-32 コンタミ膜形成のモデル図

フィッティング結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-33)

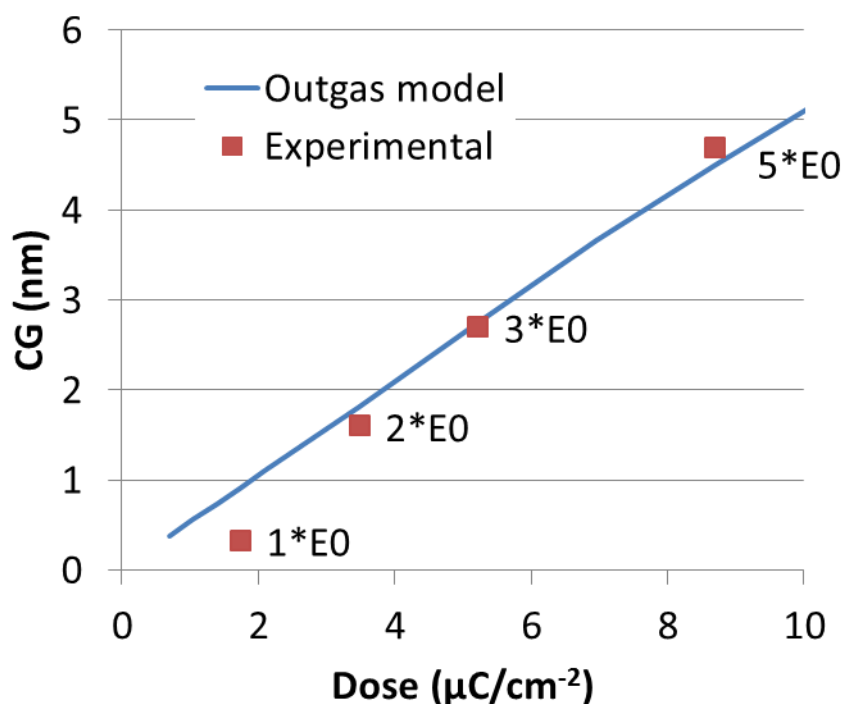


図Ⅲ.2.1.3.-2-33 モデルレジストのコンタミ膜プロファイルのフィッティング結果

図の横軸は WS サンプル上の座標、縦軸はコンタミ膜厚であり、点が実験から求めた各座標におけるコンタミ膜厚を示し、実線が計算により求めたコンタミ膜厚のフィッティング結果であり、フィッティング結果は実験結果とよく一致している。

以上のフィッティング結果を元に求めた各種パラメーターを用いて、モデルレジストによるコンタミ膜厚の露光量依存性を求めた。(図Ⅲ.2.1.3.-2-34) 横軸が露光量、縦軸がコンタミ膜厚である。点が実験に

より膜抜け感度(E0)の1から5倍の露光量で露光した際に形成されたコンタミ膜厚であり、実線が上記アウトガスモデルより求めたコンタミ膜厚の計算値となる。実験と計算はよく一致しており、モデルレジストの場合には、コンタミ膜厚は露光量にほぼ比例することが判明した。

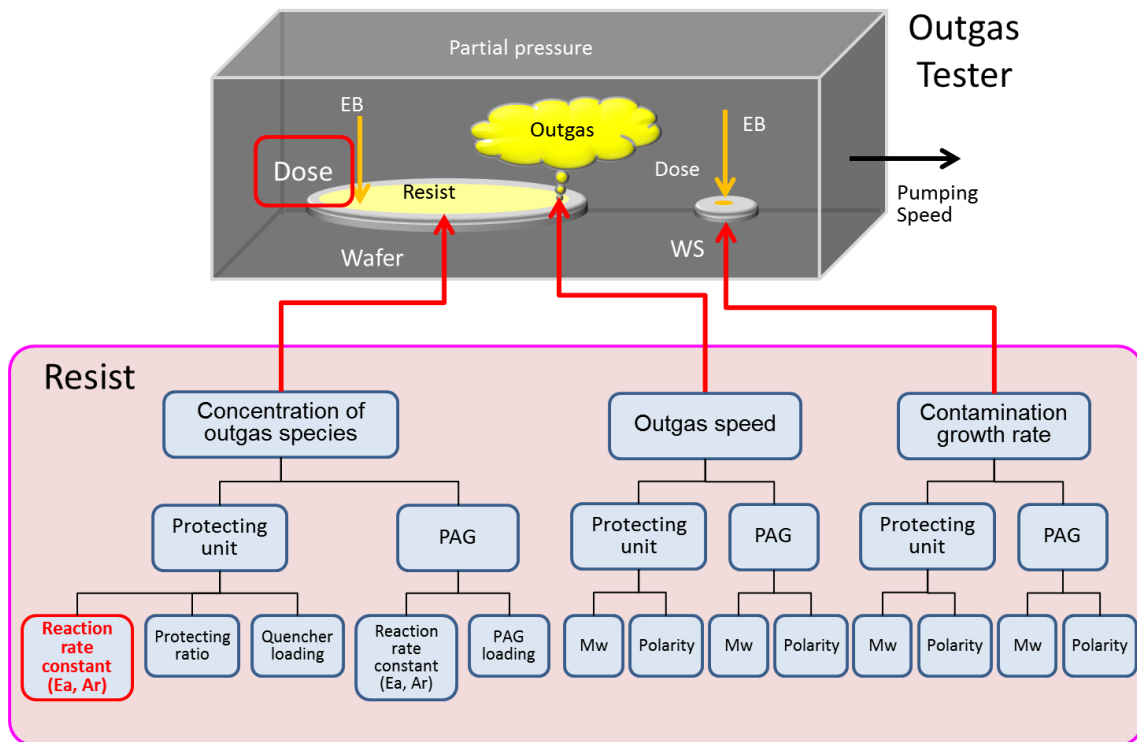


図Ⅲ.2.1.3.-2-34 モデルレジストによるコンタミ膜厚の露光量依存性の実験と計算の結果

(d) アウトガスシミュレーションの応用

上記検討によってアウトガス発生からコンタミ膜形成までの一連のアウトガスモデルを構築することができた。アウトガス挙動に関連するレジスト特性には様々なものが考えられる。(図Ⅲ.2.1.3.-2-35)

一例をあげると、レジスト中でのアウトガス成分の発生に関しては、ポリマーの溶解抑止基の保護率、溶解抑止基の脱保護反応速度、PAG 添加量、露光による PAG の分解速度、クエンチャー添加量などが関与する。また、レジストからのアウトガスの脱離、コンタミ膜の成長に関しては、アウトガス成分である脱保護分解物や PAG 分解物の分子量および極性が関与する。今回この中で、特にレジスト設計においてリソグラフィ性能に対する影響の大きい溶解抑止基の脱保護反応速度を変えた場合、アウトガス特性にどの様に変化するかを、上記アウトガスモデルを用いて検証した。特にレジストを実用化した際に懸念されるアウトガスの露光量依存性に着目した。



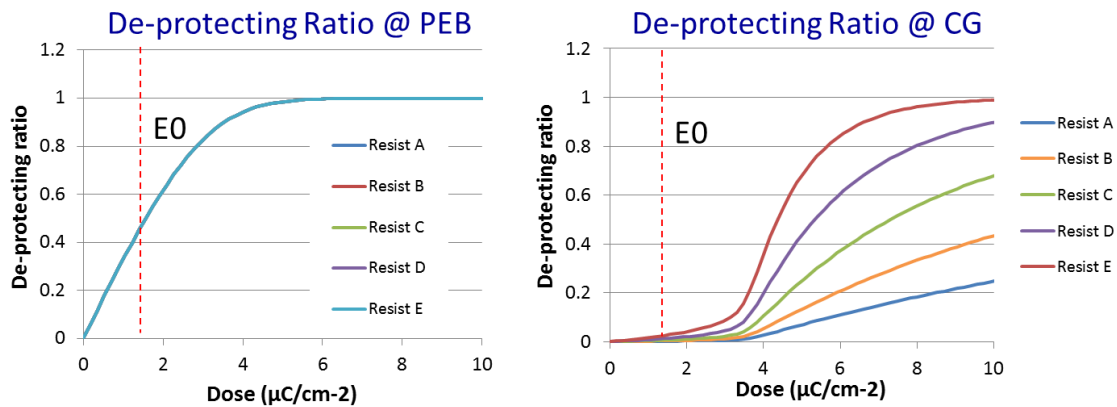
図Ⅲ.2.1.3.-2-35 コンタミ膜形成に関与する種々のレジストパラメーター

計算に用いたレジストパラメーターを以下に示す。(表Ⅲ.2.1.3.-2-8) レジストAは、本検討において実験によって求めたレジストパラメーターである。この内脱保護反応速度の関連する活性化エネルギー (E_a)と頻度因子 (A_r)をPEB時の反応速度は同じであるが、室温となるコンタミ膜形成時(CG)では2~16倍となるように活性化エネルギーと頻度因子の値を調整したレジストBからレジストEを仮定した。

表Ⅲ.2.1.3.-2-8 モデルレジスト(Resist A) のレジストパラメーターと計算モデル(Resist B~E)

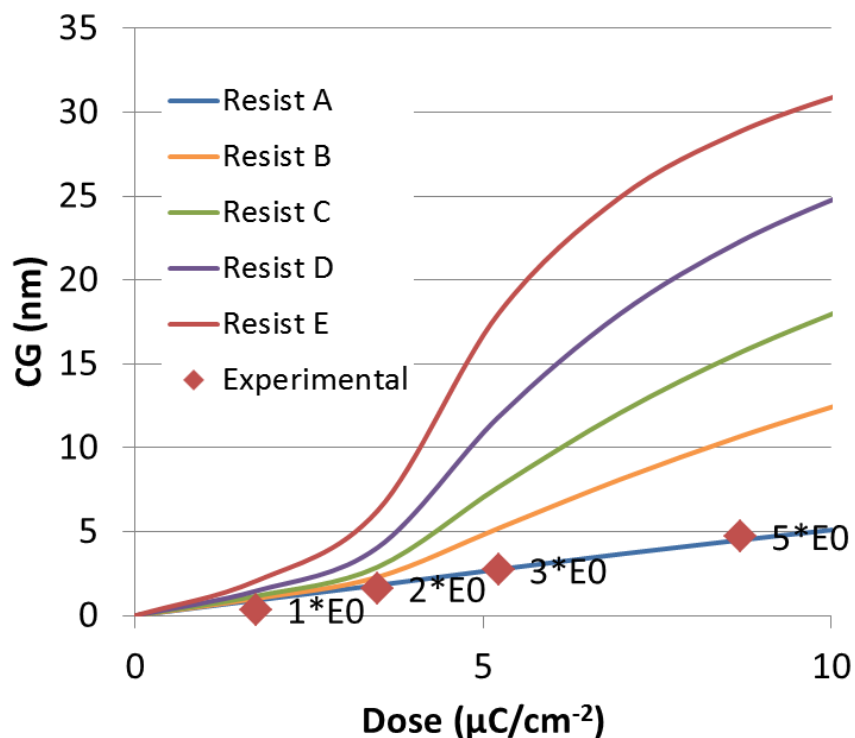
		Resist A	Resist B	Resist C	Resist D	Resist E
De-protection	E_a	24.2	22.0	19.9	17.7	15.6
	$\ln(A_r)$	32.8	29.9	27.0	24.1	21.2
Reaction rate constant	PEB	1.23	1.23	1.23	1.23	1.23
	CG	0.0005	0.0010	0.0020	0.0040	0.0081

上記レジストAからレジストEのPEB時およびコンタミ膜形成時の脱保護率の露光量依存性を以下に示す。左のグラフがPEB時の脱保護率を示し、右図がコンタミ膜形成時の脱保護率の変化である。(図Ⅲ.2.1.3.-2-36) 初期に設定した通りPEB時にはレジストAからレジストEの脱保護率は同一の露光量依存性を示す。従ってこれらのレジストの膜抜け感度(E_0)は同じ露光量となる。一方でコンタミ膜形成時には、レジストBからレジストEは、活性化エネルギーが小さくなると共に、露光量が増えるにつれて急激に脱保護率が增大することが分かる。



図Ⅲ.2.1.3.-2-36 計算モデルの膜抜け感度(E0)予測と脱保護率予測

これらの特性を元に各レジストのコンタミ膜の露光量依存性を計算した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-37) 図より当初実験に用いたレジスト A では、露光量に対してコンタミ膜はほぼ直線的に増加するのに対して、活性化エネルギーの小さい Resist E では膜抜け感度の露光量領域においてもコンタミ膜はレジスト A に比較し大きくなるが、膜抜け感度の2倍以上の露光量を与えるとさらに急激にコンタミ膜が成長することが分かる。



図Ⅲ.2.1.3.-2-37 計算モデルによるコンタミ膜の露光量依存性

これらアウトガスモデルを用いたアウトガス特性をまとめる。(表Ⅲ.2.1.3.-2-9)の溶解抑止基の脱保護反応の活性化エネルギーが高い場合、従来のアウトガス評価が行われる露光量が膜抜け感度でのコン

タミ膜形成は比較的low、そのコンタミ膜への寄与は主に PAG 分解物となる。この特性は露光量が膜抜け感度の2倍以上の領域においても大きくは変わらない。一方で活性化エネルギーが小さいレジストにおいては、露光量が膜抜け感度の場合にはコンタミ膜厚は活性化エネルギーの高いものより相対的に大きくなるが、コンタミ膜への寄与はまだ PAG 分解物の方が大きい。しかし、露光量が膜抜け感度の2倍以上となると、脱保護反応が加速し、コンタミ膜への脱保護分解物の寄与が急激に増大することでコンタミ膜は非常に大きくなる。そのため、コンタミ膜厚の露光量依存性は想定されていた線形ではなく、非線形の特性を示すことになる。以上の結果より、レジスト材料設計におけるアウトガス制御の観点から、重要な指針を得ることが出来た。

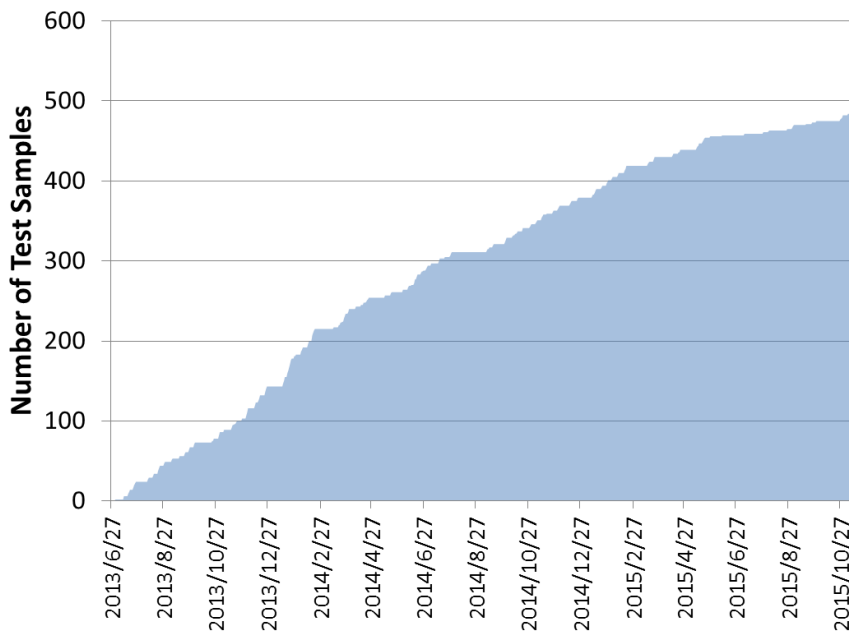
表Ⅲ.2.1.3.-2-9 レジストの特性とコンタミ膜形成の関係

Ea	High		Low	
	E0	> 2*E0	E0	> 2*E0
Dose	E0	> 2*E0	E0	> 2*E0
De-protection During CG	Low	middle	middle	Very High
CG contribution	PAG >> PU	PAG >> PU	PAG >> PU	PAG << PU
CG height	Low	middle	middle	Very high
Dose dependency	Proportional		Non-Proportional	

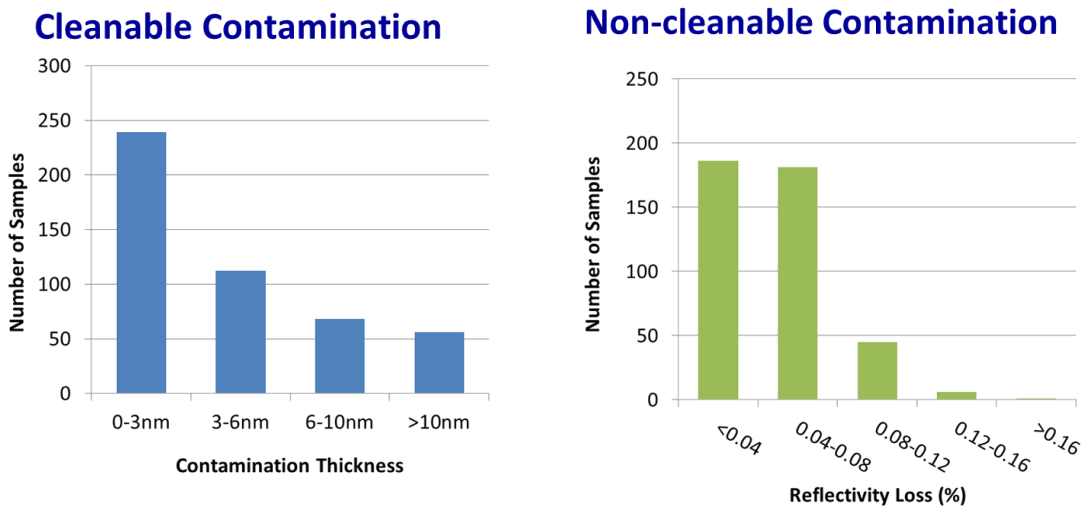
[3] レジストアウトガス評価サイトの比較

(a) EIDEC における EB 方式による EUV レジスト評価実績

2016 年 3 月までに、およそ 470 種類のコマーシャルベースのレジストサンプルを評価した。(☒ III.2.1.3.-2-38) その結果、クリーナブルコンタミにおいては、全レジストの約 80% が基準を満たした。一方、ノンクリーナブルコンタミにおいては、評価した全サンプルが基準を満たすという結果となった。(☒ III.2.1.3.-2-39) これら基準を満たしたレジストは、hp16nm 対応のため、EUV 露光装置におけるリソグラフィ性能評価に供され、EB 方式アウトガス評価装置はワールドワイドにおけるレジストアウトガス評価機関の一つとして、レジスト材料開発に対し、大いに貢献した。



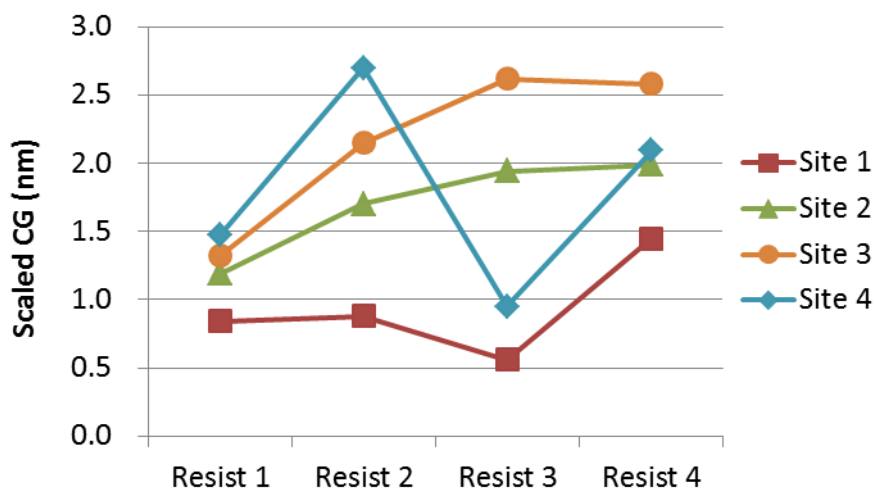
図Ⅲ.2.1.3.-2-38 EIDE プロジェクトにおける EUV レジストのアウトガス評価数の推移(実験サンプル含む)



図Ⅲ.2.1.3.-2-39 EIDE プロジェクトにおける量産対応 EUV レジストのアウトガス評価結果
クリーナブルコンタミ(右)とノンクリーナブルコンタミ(左)

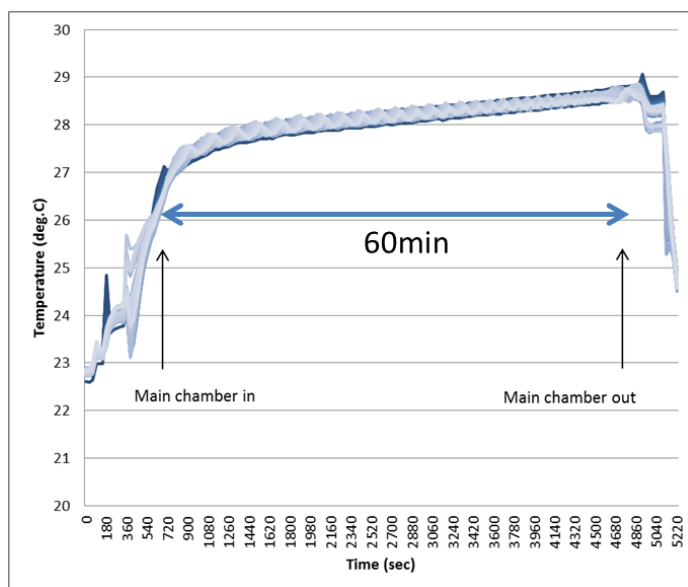
(b) レジストアウトガス評価サイト間比較

2013年末に各国のレジストアウトガス評価4サイト(EIDEC、imec、NIST、SEMATECH)において、同一レジストを用いたアウトガス評価の結果比較を実施した。同一ロットの市販 EUV レジスト 4 種類を用いて評価した各サイトにおけるコンタミ膜の結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-40) この時の比較結果よりサイト間に於いてアウトガス評価結果に大きな違いがあることが判明した。

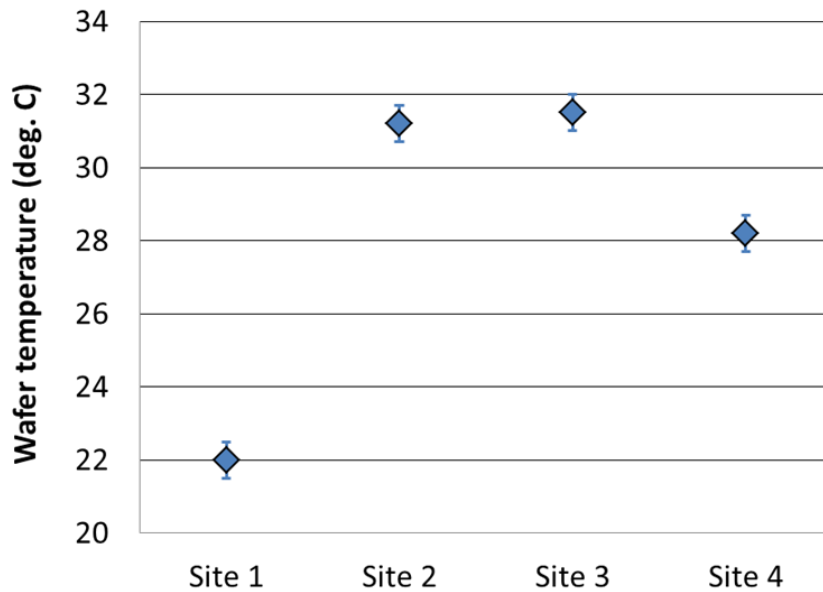


図Ⅲ.2.1.3-2-40 各レジストアウトガス評価サイトにおける同一レジストのアウトガス評価結果

EIDEC では各国評価サイトと協力し、評価結果違いの原因究明を鋭意進めた。その結果、以下に示す3つの要因が違いを生じさせることが判明した。一つ目は、サイト間における評価中のウェハ温度の違いである。これはNISTの貢献が大きく、彼らは3種類の市販レジストのアウトガス特性の温度依存性を評価した。その結果、レジストによってウェハ温度1°C当たりの温度変化に対するコンタミ膜厚変化が大きく違うことが判明した。そこで、EIDECにおける電子線方式アウトガス評価装置のアウトガス評価中におけるウェハ温度測定を行った。(図Ⅲ.2.1.3.-2-41) アウトガス評価中のウェハ温度は27°Cから29°Cであった。同様の測定を各サイトにおいても行った結果、各サイトにおけるウェハ温度は22°Cから32°Cの間で、バラツキがあることが判明した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-42)



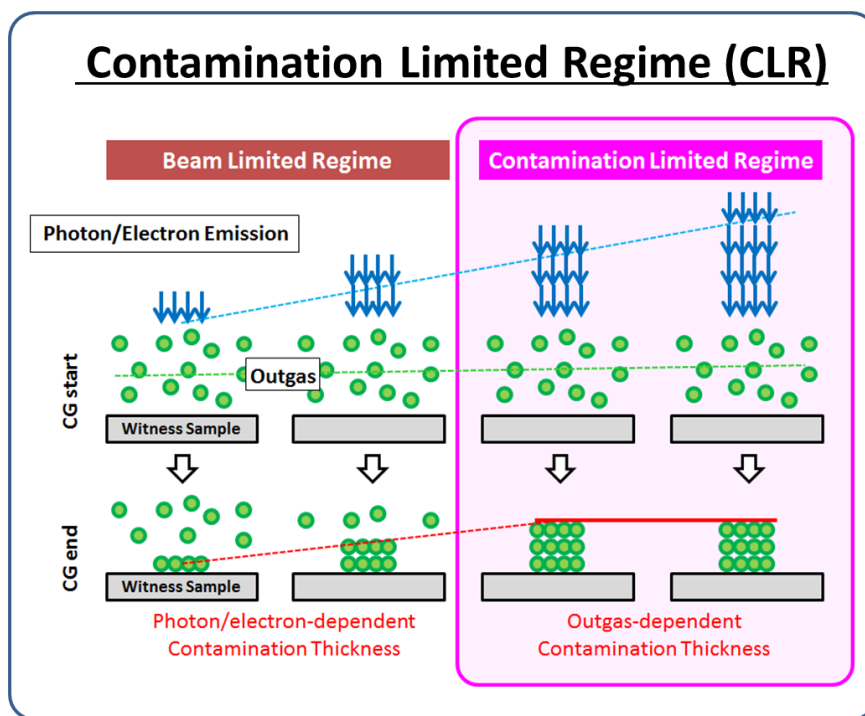
図Ⅲ.2.1.3.-2-41 EIDEC 電子線方式アウトガス評価装置の実験中のウェハ温度変化



図Ⅲ.2.1.3.-2-42 各サイトにおけるアウトガス評価時のウェハ温度

これら温度測定結果比較を元に、本来であればウェハ温度調整を行うべきではあるが、EIDEC の電子線方式アウトガス評価装置を含め、Site1を除く各サイトにおいては、評価装置にウェハ温度調整機構が具備されていないため、Site1 におけるウェハ温度を 29.5°Cと設定することで合意した。上記対策を持って温度要因に要るコンタミ膜厚差は約 1/3 になった。

2 番目の要因としては、アウトガス評価において Contamination Limited Regime (CLR) が達成されていないサイトがあることが考えられる。一般的にアウトガス評価におけるコンタミ膜の形成はレジストから発生するアウトガス量とウィットネスサンプル上に照射されるエネルギー量に依存する。ウィットネスサンプル上のエネルギー量が不十分な場合、表面に吸着したコンタミ分子がコンタミ膜として固定されない。そのため、コンタミ膜厚としては低めの膜厚となり、コンタミ膜厚はエネルギー量が増えるに従い大きくなる。逆にウィットネスサンプル上に十分なエネルギー量が照射された場合には、吸着コンタミ分子は全てコンタミ膜となるため、コンタミ膜厚は照射エネルギー量に依存せず、一定の値となる。後者の評価条件を CLR 条件と呼ぶ。(図Ⅲ.2.1.3.-2-43)



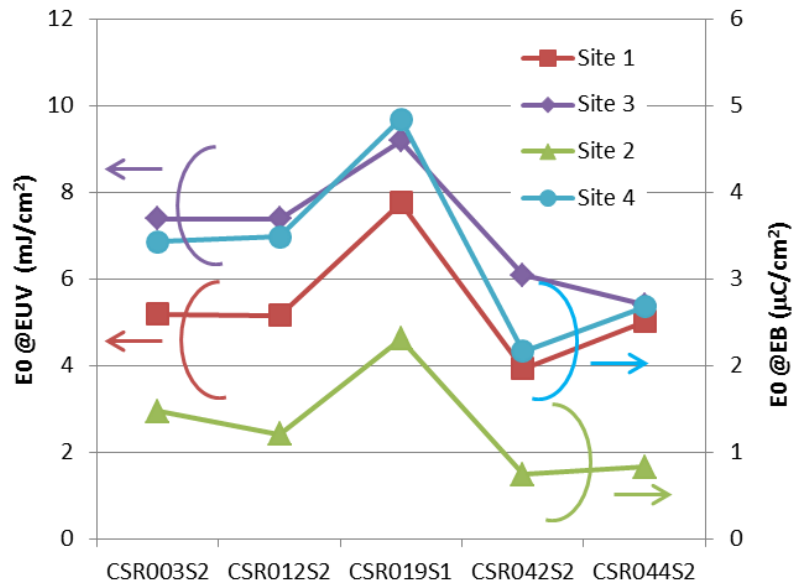
図Ⅲ.2.1.3.-2-43 Contamination Limited Regime (CLR)を説明する図

各サイトにおいて CLR 条件が達成できているかどうかをモデルレジストを用いて検証を行った。(表Ⅲ.2.1.3.-2-10) 使用したモデルレジストにおいては、溶解抑止基の保護率、PAG 添加量を変更したものに加え、活性化エネルギーの小さい保護基を持つレジストも準備した。

表Ⅲ.2.1.3.-2-10 CLR 評価のために準備したモデルレジスト

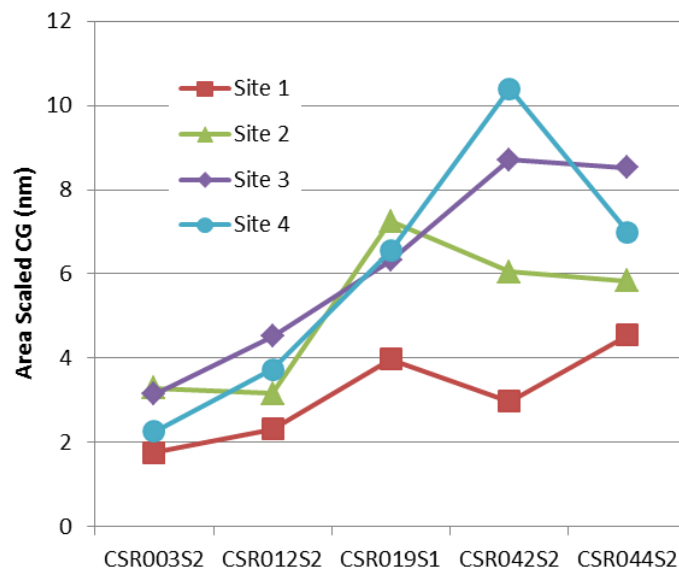
Resist	PAG & Quencher (Q)	Polymer	Ea (kcal/mol)	AMU of PU	PU (mol%)	PAG (phr)	Q (mol of PAG)
CSR003S2	 PAG	 Methyl Adamantyl	23.1	148	30	20	0.2
CSR012S2		 Methyl Adamantyl			30	30	0.2
CSR019S1		 Methyl Adamantyl			50	20	0.15
CSR042S2	 Quencher	 Methyl Cyclo Pentyl	9.80	82	30	20	0.2
CSR044S2		 Ethyl Adamantyl	8.05	162	30	20	0.2

各サイトにおけるレジストの膜抜け感度の比較結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-44) 各サイトにおいて、膜抜け感度の絶対値には差があるものの、相対的には膜抜け感度はよく一致した。



図Ⅲ.2.1.3.-2-44 EIDEC モデルレジストによる各サイトの感度比較

一方で、コンタミ膜厚を比較した場合は、活性化エネルギーの小さいモデルレジスト CSR042S2 においてサイト間差が顕著に現れた。(図Ⅲ.2.1.3.-2-45)



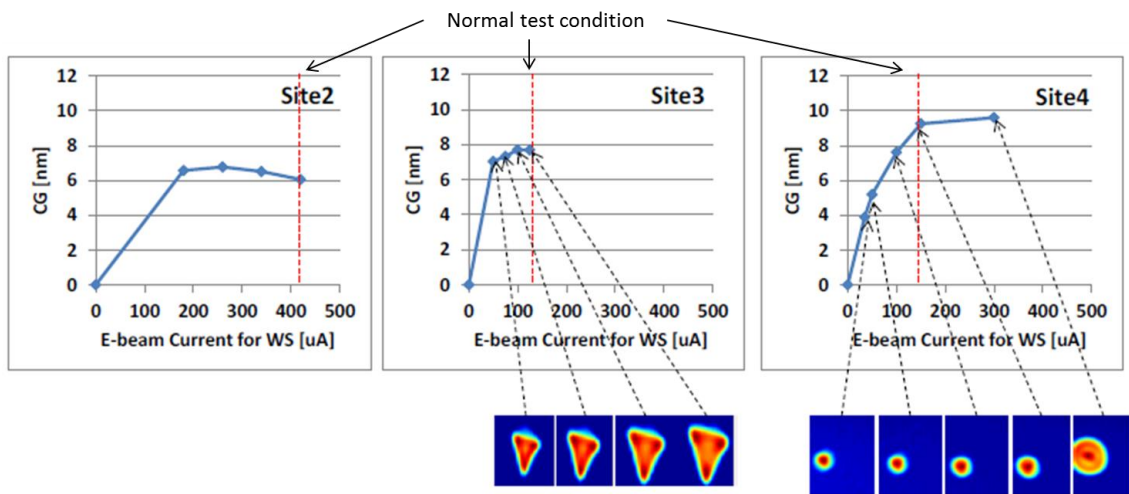
図Ⅲ.2.1.3.-2-45 EIDEC モデルレジストによる各サイトのコンタミ膜厚比較

この時の各サイトにおけるコンタミ膜のプロファイルを以下に示す。(表Ⅲ.2.1.3.-2-11) 一般的に CLR 条件下においては、コンタミ膜厚はウィットネスサンプル上に照射されるエネルギー量に依存しないため、コンタミ膜プロファイルは表面が平坦な形状となる。図より活性化エネルギーの低い CSR042S2 において、コンタミ膜表面が平坦となっていないことが判る。

表Ⅲ.2.1.3.-2-11 各サイトにおける EIDEC モデルレジストによるコンタミ膜のプロファイル

		CSR003S2	CSR012S2	CSR019S1	CSR042S2	CSR044S2
Site 1	CG spot (Top View)					
	CG profile					
Site 2	CG spot (Top View)					
	CG profile					
Site 3	CG spot (Top View)					
Site 4	CG spot (Top View)					
	CG profile					

そこで各サイトにおける CSR042S2 のコンタミ膜の WS 照射エネルギー依存性を評価した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-46) Site1 においては WS 上のエネルギー量が可変でないため、上記評価を実施できなかった。残りのサイト(Site2~4)においては、コンタミ膜形成に際し電子線が用いられている。WS 上のエネルギー量は電子線の電流量により制御されている。横軸にはこれをプロットした。縦軸はコンタミ膜厚である。また、各サイトにおけるアウトガス評価時の電流値を合わせて示してある。図より Site2~Site4 においては、CLR 条件を満たしていることが確認できた。一方、Site1においては、CLR を満たしていない可能性が示唆された。

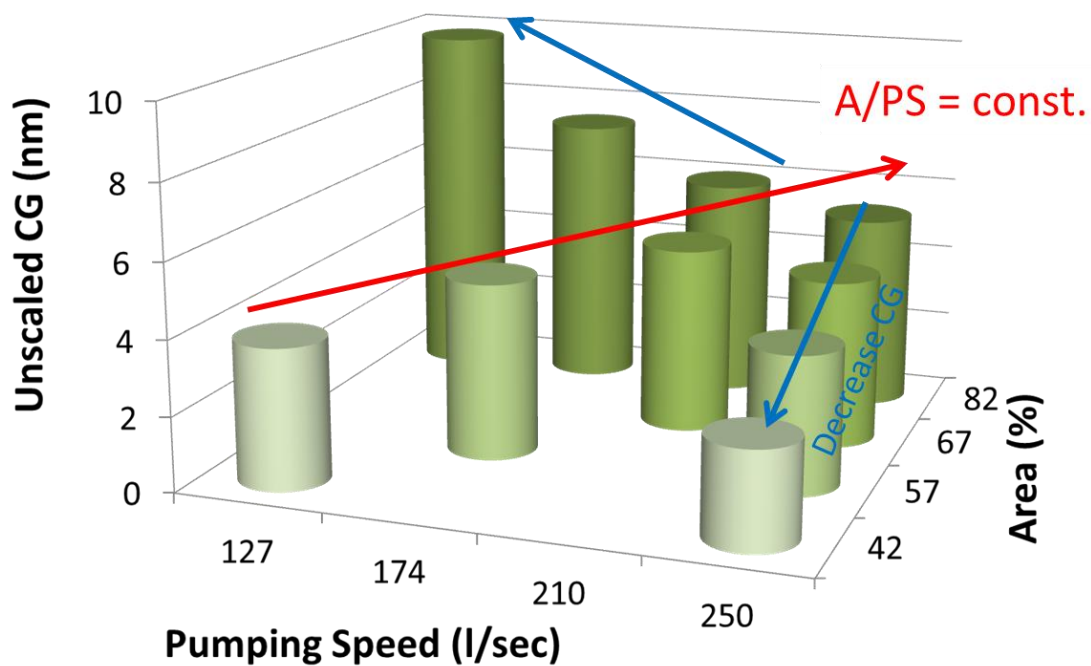


図Ⅲ.2.1.3.-2-46 各サイトにおける EIDEC モデルレジストによるコンタミ膜の WS 上電流量依存性

コンタミ膜厚のサイト間差を生じさせる三番目の要因としては、評価におけるレジスト露光面積と排気速度の比率の違いが挙げられる。(図Ⅲ.2.1.3.-2-47) WS 上のアウトガス成分密度は実験チャンバーの排気速度とレジストからのアウトガス発生速度によりほぼ決まる。各サイトにおけるアウトガス評価の露光時間は全て 1 時間、またレジスト露光量は膜抜け感度と固定であるため、単位時間におけるレジスト露光によりアウトガス発生量が決まる。それまでの各サイトにおいては排気速度 (Pumping Speed:PS) と露光面積 (Area:A) は統一化されておらず、Site4と比較した場合 Site1および Site2では露光面積が小さいため露光面積と排気速度の比である A/PS は Site4に比較し小さく、また Site3では排気速度が小さいため、Site4と比較して A/PS は大きいという状態となっていた。 A/PS が大きい場合、すなわち排気速度に比較してアウトガス発生量が多い場合には、コンタミ膜厚は大きくなり、逆にアウトガス発生量に対して排気速度が大きい場合にはコンタミ膜厚は小さくなると予想される。EIDEC ではモデルレジストを用いて、種々の排気速度および露光面積 (300mm ウェハ全体の面積を 100%としたときの比率) におけるコンタミ膜厚を評価した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-48) その結果、排気速度の低下に伴い (A/PS が大きくなる)、コンタミ膜厚は大きくなり、一方、露光面積を小さくするに従い、コンタミ膜厚が小さくなることが確認できた。さらに排気速度を下げ、かつ露光面積を小さくし A/PS を一定に保った場合、コンタミ膜厚はほぼ変化しないことが確認できた。以上の結果より、アウトガス評価サイト間の評価結果の差異の要因とその対策に対する指針を示すことができた。

A/PS	PS	Outgas Density on WS	A
2	0.5	2	1
1	1	1	1
1	0.5	1	0.5
0.5	1	0.5	0.5

図Ⅲ.2.1.3.-2-47 露光面積および排気速度とコンタミ膜厚の関係を説明する図



図Ⅲ.2.1.3.-2-48 コンタミ膜厚と排気速度、露光面積の関係(モデルレジストを用いた実験結果)

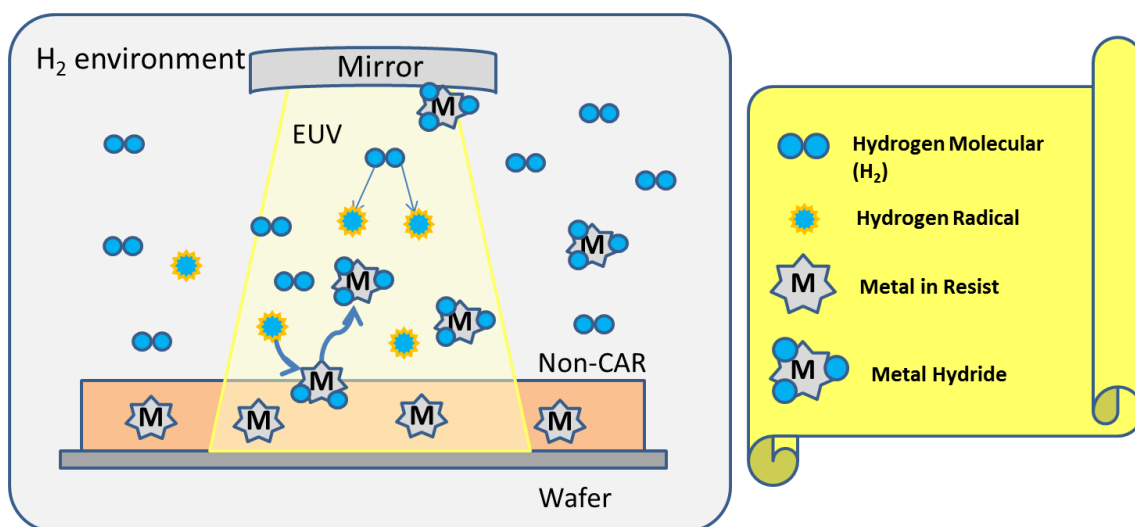
[4] 非化学増幅型レジストのアウトガス評価手法

(a) 評価の背景

EIDEC および各サイトにおけるアウトガス研究・評価によって得られた成果を持って、平成27年3月に露光装置メーカーは従来の化学増幅型レジストのアウトガススペックを撤廃し、従来の構成元素である炭素、水素、酸素、窒素、硫黄およびフッ素のみからなる化学増幅型レジストに関するアウトガス評価は不要との判断を示した。

一方で、EUV レジストとしては化学増幅型レジストに替わる高感度、高解像性レジストとして期待の高まっている非化学増幅型レジスト、特に金属元素を含有したメタル系レジストに注目が集まっており、その実用化が望まれている。しかし、メタル系レジストのアウトガスに関する知見はこれまでほとんどなかった。

メタル系レジストのアウトガス発生機構としては、従来のレジスト分解物のアウトガスの他に、以下の発生機構が考えられる。レジストはEUV露光装置内で水素環境に置かれているが、この水素にEUV光が照射されると水素ラジカルが発生する。一部のレジスト中の金属元素は水素ラジカルと反応し金属水素化物を形成する。金属水素化物は揮発性の高いものが多く、これらは容易にレジスト中から脱離し、アウトガスとして発生するというものである。(図Ⅲ.2.1.3.-2-49)

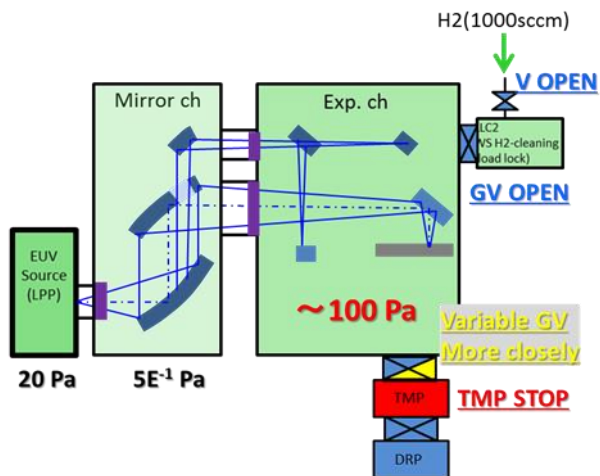


図Ⅲ.2.1.3.-2-49 メタル系レジストのアウトガス発生とコンタミ付着を説明する図

現在、開発が進んでいるメタル系レジストで使用されている金属元素の多くは、高感度化の目的から炭素に比べEUV光吸収のおおきいものが好んで用いられている。上記アウトガスとして発生した金属水素化物がEUVミラー上に堆積しコンタミを形成した場合、それらのコンタミ膜は hidrocarbon よりなるコンタミ膜に比較しより急激な反射率低下を生じされると考えられるため、その早期評価手法の確立が急務であった。

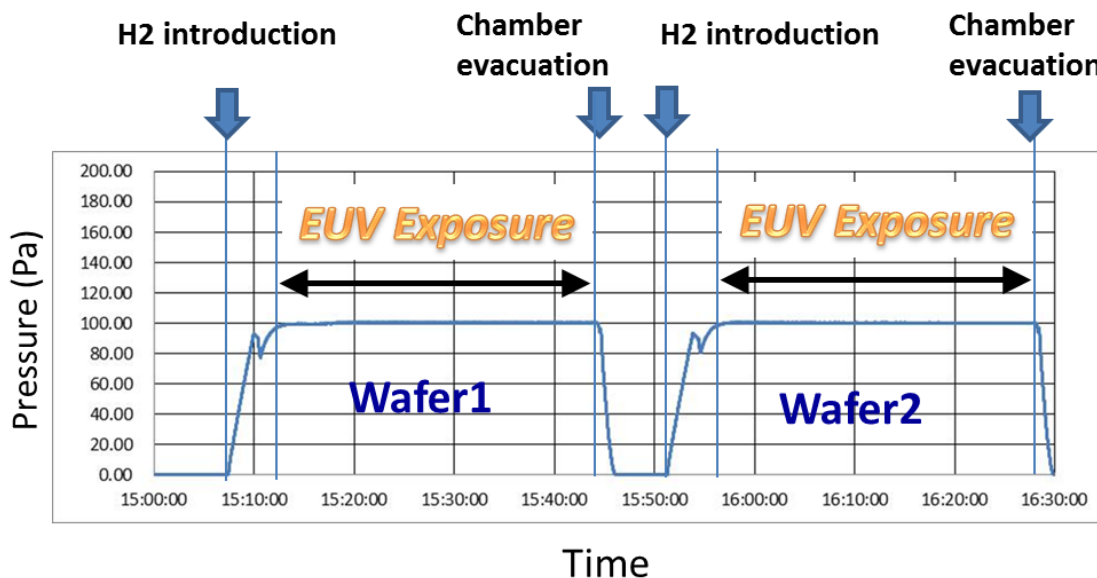
(b) 評価装置構成と評価手法

メタル系レジストのアウトガス評価においては、上述のように EUV 露光装置内でレジストの置かれた水素雰囲気に近い環境を実現することが重要である。露光装置内の水素分圧は 100Pa であり、EIDEC では前述した HPEUV 照射装置に水素ガス導入機構を設け、上記水素環境におけるアウトガス評価装置を実現した。(図Ⅲ.2.1.3.-2-50)



図Ⅲ.2.1.3.-2-50 HPEUV 照射装置への水素導入を説明する図

実際に水素導入を行った場合の実験チャンバー内の圧力変化を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-51) 横軸は時間、縦軸は圧力を示している。水素導入と共に圧力が100Pa まで上昇していることが判る。本装置においてはウェハの連続処理が可能であり、図中ではウェハを2枚連続で処理した場合を示している。図より連続処理においても、再現性良く水素圧力が得られていることが判る。

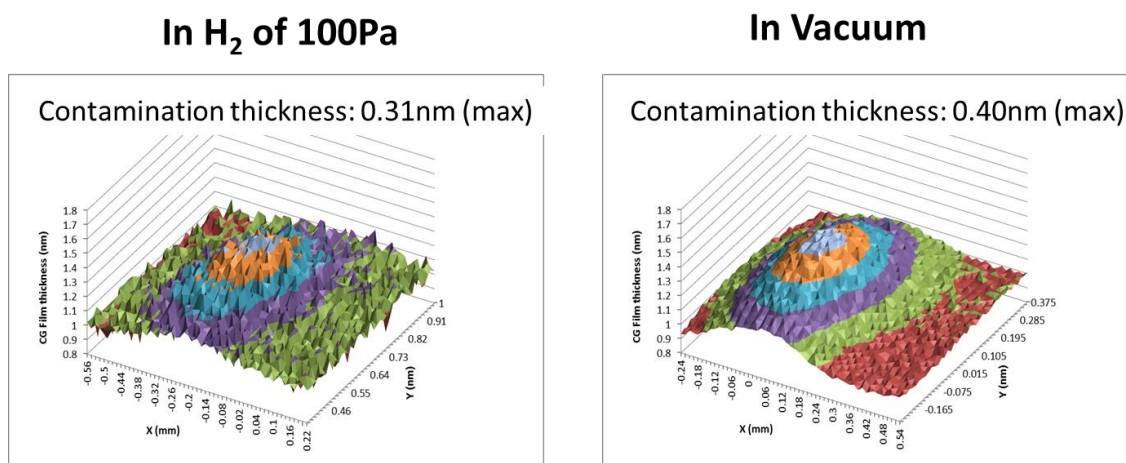


図Ⅲ.2.1.3.-2-51 HPEUV 照射装置への水素導入時の圧力変化

(c) 評価結果

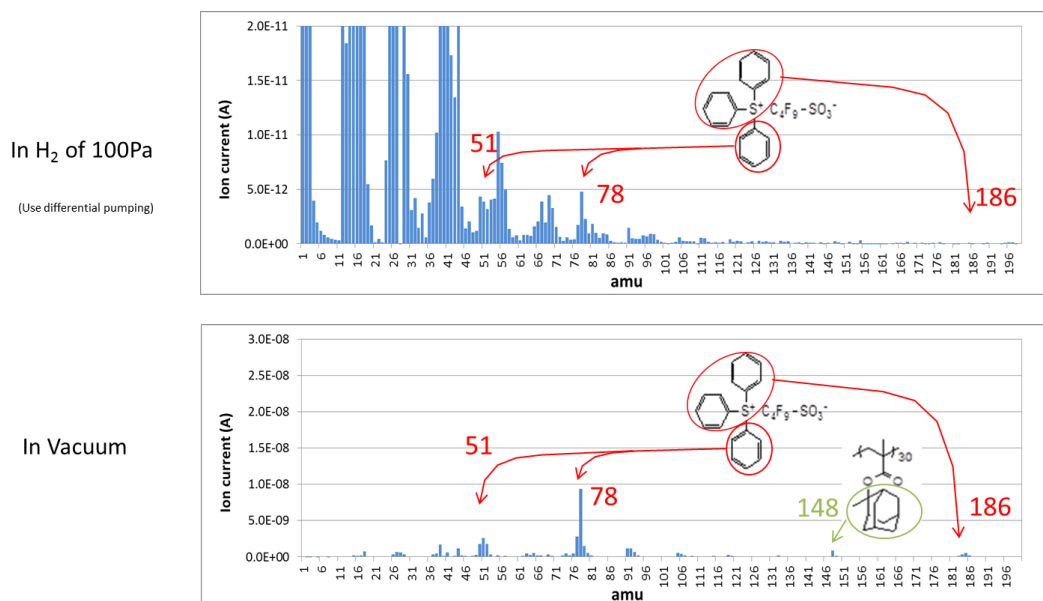
水素環境下における化学増幅型レジストのアウトガス評価結果を以下に示す。用いたレジストは EIDEC モデルレジストである。水素環境下および真空中で共にコンタミ膜が形成されていることが判る。

(図Ⅲ.2.1.3.-2-52)



図Ⅲ.2.1.3.-2-52 HPEUV 照射装置による化学増幅型モデルレジストのコンタミ膜、水素環境下(左)と真空中(右)

同じく、HPEUV 照射装置における化学増幅型レジストのアウトガスの RGA 評価結果を示す。RGA は水素環境下では差動排気機構を使用し、希釈された実験チャンバー内のガスを分析している。(図Ⅲ.2.1.3.-2-53) 水素環境下では低分子量のガスが多く検出されているが、真空中で検出された化学増幅型レジストの PAG からの分解物であるピークと同様のピークが観測することができた。

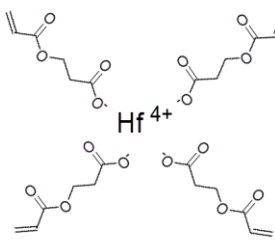


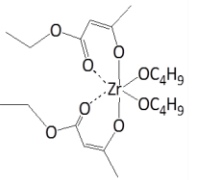



図Ⅲ.2.1.3.-2-53 HPEUV 照射装置による化学増幅型モデルレジストの RGA、水素環境下(上)と真空中下(下)

上記結果を踏まえて、EDIEC において下記のメタル含有モデル材料を準備し、アウトガス評価を行った。用いた金属元素はメタル系レジストでも多く検討されているハフニウムおよびジルコニウムである。

(表Ⅲ.2.1.3.-2-12)

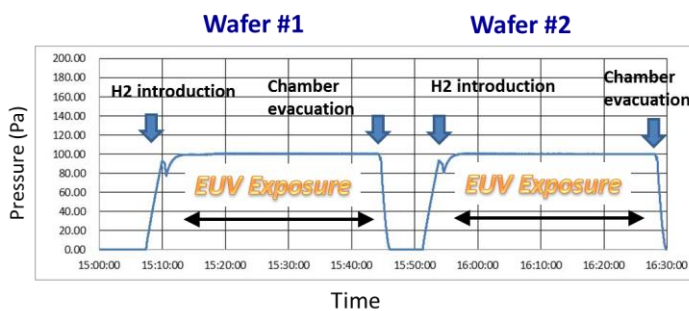
表Ⅲ.2.1.3.-2-12 メタル元素含有モデル化合物

Sample	Metal Compounds	PAG	Solvent
A	 Hf 4+	No PAG	Butanol, PGMEA, PGME
B		PAG1: TPS-nonaflate  11 wt% (13mol%)	
C		PAG2: Naphtyl-nonaflate  12 wt% (13mol%)	
D	 Dibutoxy Zirconium bis(ethylacetoacetato)	No PAG	Butanol, PGMEA, PGME
E		PAG1: TPS-nonaflate  5 wt% (4.4mol%)	

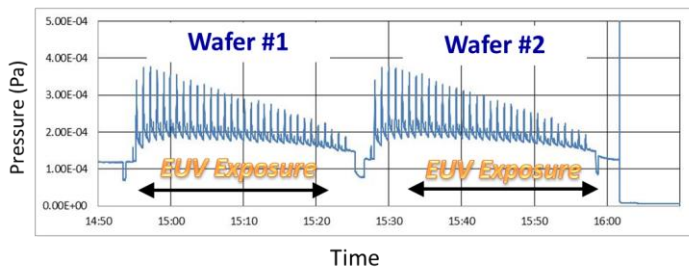
上記モデル材料の内、サンプル B のアウトガス評価を行った時の圧力変化を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-54) 水素環境下では水素分圧が高いため、アウトガスに由来する圧力変化は観察できなかったが、真空中においては、ウェハ露光のタイミング(ウェハを同心円状に15回露光)と合わせて、圧力が上昇していることが判る。

Sample B

In H₂ of 100Pa

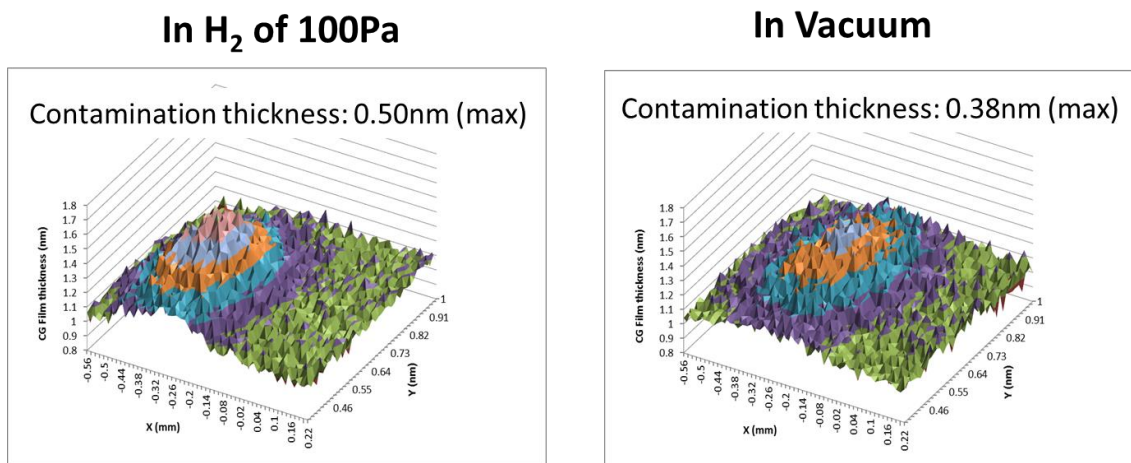


In Vacuum



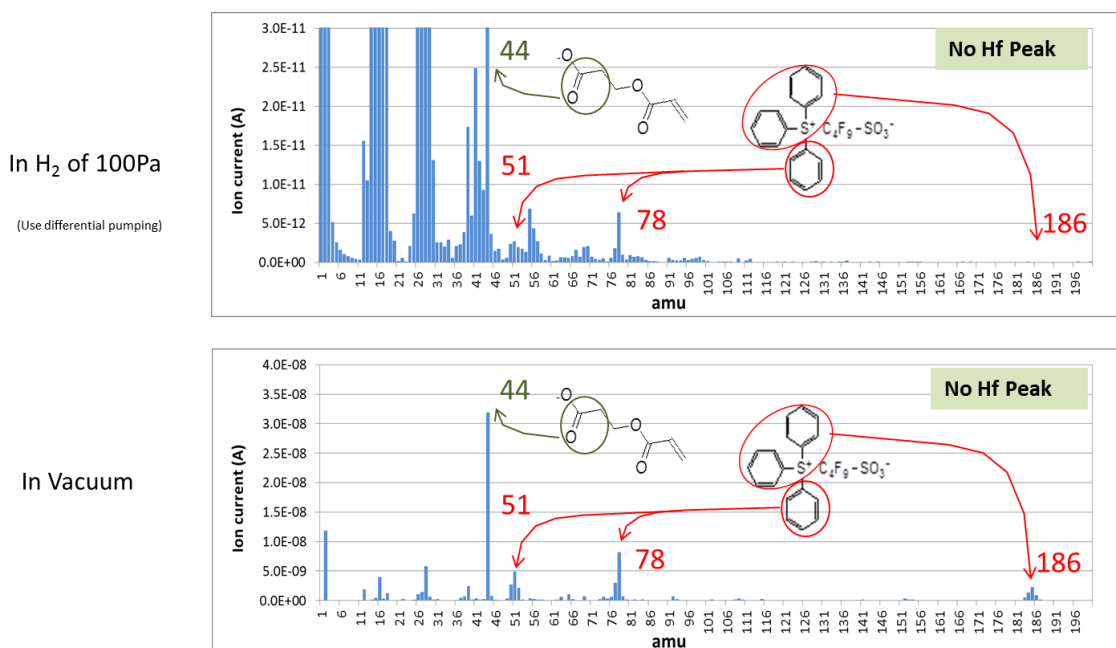
図Ⅲ.2.1.3.-2-54 HPEUV 照射装置によるメタル元素モデル(Model B)のアウトガス評価時の圧力変化

サンプル B による水素環境下と真空中でのコンタミ膜の様子を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-55) 水素環境下においても、真空中と同様にコンタミ膜が形成されることが判った。



図Ⅲ.2.1.3.-2-55 HPEUV 照射装置によるメタル元素含有モデル材料のコンタミ膜、水素環境下(左)と真空中下(右)

サンプル B のアウトガスの RGA 評価結果を示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-56) 水素環境下では化学増幅型レジストの評価時と同様に低分子量のガスが多く検出されているが、PAG 分解物の他にモデル材料由来と思われるピークが質量数 44 に観測された。このことは低分子のメタル含有材料をレジストとして用いた場合、従来の樹脂を主成分としたレジスト異なり、低分子成分のアウトガスが増加する可能性があることを示していると思われる。



図Ⅲ.2.1.3.-2-56 HPEUV 照射装置によるメタル含有モデル材料の RGA、水素環境下(上)と真空中下(下)

さらに、メタル含有モデル材料を用いたアウトガス評価を水素雰囲気の有無の環境下で実施した。この時の水素圧力は 100Pa である。用いたモデル材料はスパッタ膜の酸化スズ (SnO_2) である。なお、酸化スズは、現在主流となっているメタル系レジストで用いられているメタル化合物の一つである。上記モデル材料に HPEUV 照射装置にて、ウェハ上の 1 点におよそ 1 時間 EUV 光を照射した。この時の露光量は 360 J/cm^2 であった。この時のコンタミ膜厚のプロファイルと RGA 解析結果を以下に示す。(図 III. 2. 1. 3. -2-57、58) RGA 解析においては、水素環境の有無による優位な違いは観察されなかった。

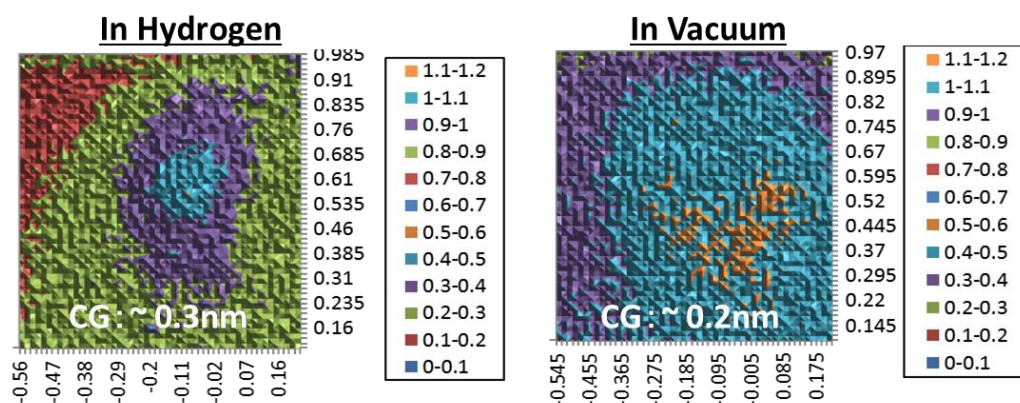


図 III.2.1.3.-2-57 HPEUV 照射装置による酸化スズの水素環境下(左)と真空下(右)のコンタミ膜厚

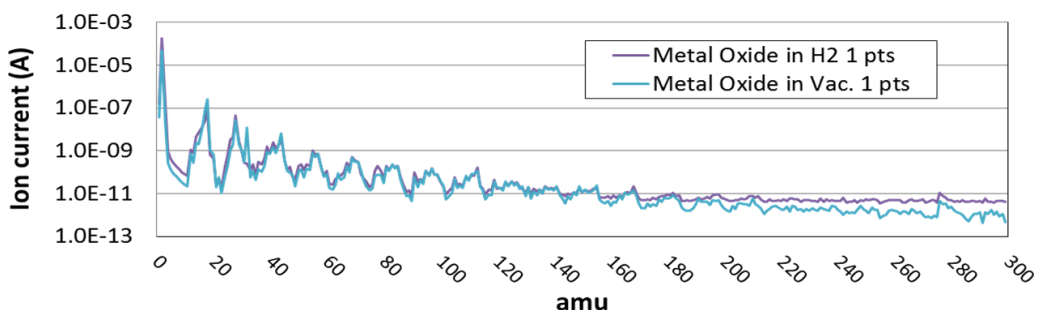
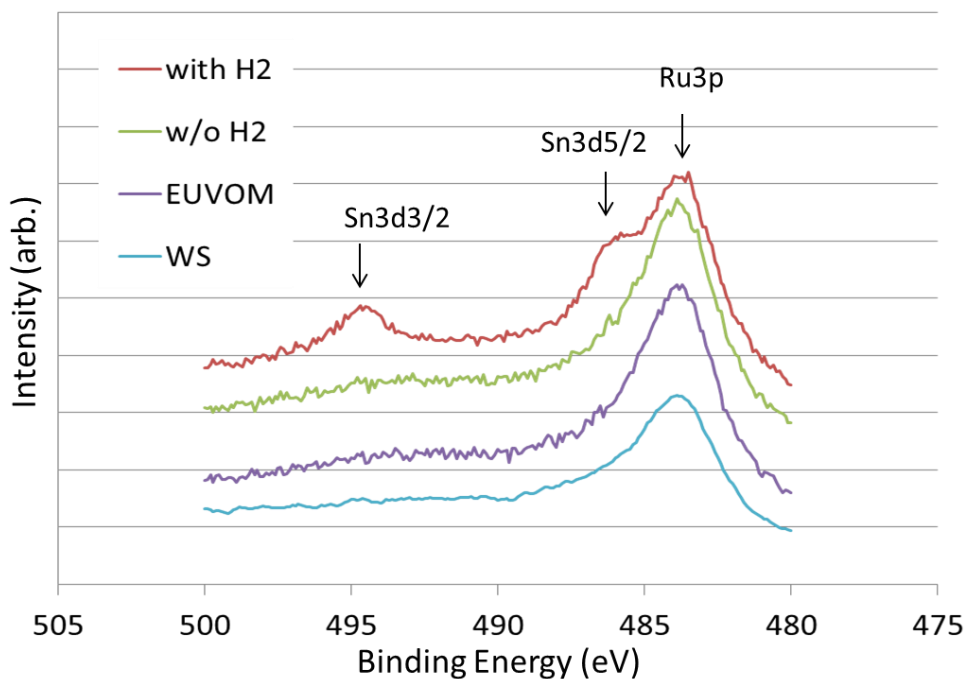


図 III.2.1.3.-2-57 HPEUV 照射装置による酸化スズの水素環境下(紫)と真空下(青)の RGA

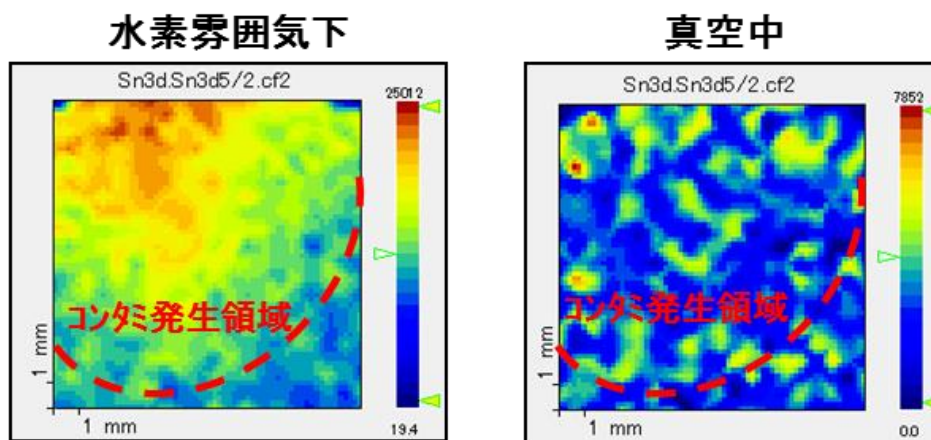
一方、上記アウトガス評価におけるコンタミ膜の水素ラジカルクリーニング後のノンクリーナブルコンタミの XPS 解析結果を以下に示す。(図 III. 2. 1. 3. -2-59) 横軸は Sn3d 結合エネルギー領域を示す。結合エネルギー 486eV 付近のピークは WS のキャッピング層である Ru のものである。図より水素雰囲気下においてのみ Sn のピークが観測されていることがわかる。このことから水素雰囲気下においてのみ酸化スズよりノンクリーナブルコンタミを生じさせるアウトガスが発生していたことが示唆され、前述のメタル系レジストのアウトガス発生モデルを支持する結果となった。また、上記 HPEUV 照射装置における参加スズのアウトガス評価における水素雰囲気下と真空下の XPS の 2D マッピング結果を示す。(図 III. 2. 1. 3. -2-60) 図中の赤線より左上の領域が WS 上の EUV 光照射領域となる。Sn は WS 上の EUV 光の照射領域においてのみ、顕著に観察されており、メタ

ル系のノンクリーナブルコンタミは EUV 光照射領域にのみ形成されることが判明した。なお、これらのノンクリーナブルコンタミは従来のアウトガス評価条件である 20mJ/cm²程度の露光量では、優位なピークは観測できなかった。



図Ⅲ.2.1.3.-2-59 HPEUV 照射装置による酸化スズのノンクリーナブルコンタミのXPS解析結果。
水素雰囲気化(赤)、真空下(緑)、電子線方式(緑: EUVOM)およびWS単体(青)

コンタミ発生領域におけるSn3dのXPSマッピング結果



図Ⅲ.2.1.3.-2-60 HPEUV 照射装置による酸化スズのノンクリーナブルコンタミのXPSマッピング

[4] 総括

EB 方式アウトガス評価装置によるレジストアウトガス評価手法の高精度化を達成し、475 サンプルの EUVレジストのアウトガスを評価した。その結果、クリーナブルコンタミでは約 88%、ノンクリーナブルコンタミでは全レジストがアウトガス判定基準に合格することが判明した。さらにレジストの溶解抑止基の酸反応定数と分子量の比に着目し、新たなアウトガス判定基準を提案し、レジストアウトガス評価の効率化に貢献した。また、レジスト内のアウトガス成分発生からコンタミ膜形成までの簡易モデルを提唱し、簡易的なレジストアウトガスシミュレーションを構築した。上記知見を踏まえて海外コンソーシアム間でのレジストアウトガス評価結果の差異に関し、要因解明を行い対応策の提案を行った。加えてハープピッチ 11nm 対応レジストとして期待されているメタルレジストのアウトガス評価手法を構築した。これらの知見は、今後のアウトガス評価手法の更なる高精度化に大いに貢献するものである。

[7] 学会発表/論文 件数

学会発表

国内件数：6 件、海外件数 22 件

論文発表 (Proceeding 含む)

9 件

特許提案

2 件

以上

研究発表・講演 一覧

Date(発表日)	Meeting Title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
10/6/2013	IEUVI Resist TWG @ EUVL symposium 2013	EIDEC outgas testing update	Soichi Inoue
10/10/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Study of the relation among resist components, outgassing species and contamination	Yukiko Kikuchi, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Isamu Takagi Kazuhiro Katayama, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
10/10/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Resist outgassing characterization of PAG-blended and PAG-bound systems	Kazuhiro Katayama, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Isamu Takagi Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
10/10/2013	2013 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Cleanability of resist-outgas non-carbon contamination using hydrogen radical cleaning	Toshiya Takahashi, Kazuhiro Katayama, Isamu Takagi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
1/27/2014	兵庫県立大学 EUV リソグラフィ技術ワークショップ	EUV リソグラフィ技術ワークショップ EIDEC	Eishi Shiobara,
2/23/2014	IEUVI Resist TWG @ SPIE 2014 AL	EIDEC outgas testing update	Eishi Shiobara , Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Kazuhiro Katayama, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
2/25/2014	SPIE 2014 Advanced Lithography	Correlation study on resist outgassing between EUV and E-beam irradiation	Yukiko Kikuchi, Kazuhiro Katayama, Isamu Takagi, Norihiko Sugie, Toshiya Takahashi, Hiroyuki Tanaka,

			Eishi Shiobara, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada and Hiroo Kinoshita
2/26/2014	SPIE 2014 Advanced Lithography	Contribution of EUV Resist components to the non-cleanable contamination	Eishi Shiobara, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Kazuhiro Katayama, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Tetsuro Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita
3/10/2014	兵庫県立大学 高度産 業科学技術研究所 EUVL 産業利用報告会 2014	EUVレジスト組成物のノンクリーナ ブルコンタミへの影響	Eishi Shiobara, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Kazuhiro Katayama, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Tetsuro Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita
7/11/2014	The 31th International Conference of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress of EUV Resist Technology in EIDEC	Eishi Shiobara,
10/26/2014	IEUVI Resist TWG @ EUVL symposium 2014	EIDEC outgas testing update	Eishi Shiobara , Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
10/28/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Relationship between resist outgassing and activation energy for EUV and EB	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
10/28/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	High Power EUV Irradiation Tool (HPEUV) Equipped with LPP Source	Soichi Inoue Isamu Takagi Shinji Mikami

			Hiroyuki Tanaka
10/28/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Study of the Carbon Growth Mechanism in Varying Dose and Surface Conditions of Witness Sample under EUV and EB Exposures	Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Takeshi Sasami, Isamu Takagi, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
10/28/2014	2014 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	The initial performance data of a LPP-source equipped High Power EUV Irradiation Tool (:HPEUV)	Hiroyuki Tanaka Isamu Takagi Shinji Mikami Soichi Inoue
12/3/2014	ISSM2014	Effective proposal for the outgassing test on the EUV lithography	Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Yukiko Kikuchi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue
2/22/2015	IEUVI Resist TWG @ SPIE 2015 AL	EIDEC Outgas Testing Update	Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi Toru Fujimori, Soichi Inoue
2/25/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Analysis of EUV Resist Outgassing Depended on the Dosage	Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
2/25/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Collaborative Work on Reducing the Inter-site Gap of Outgassing Qualification	Soichi Inoue, Eishi Shiobara, Takeshi Sasami, Isamu, Takagi, Yukiko Kikuchi, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Robert Berg, Thomas Lucatorto, Shanonn Hill,

			Charles Tarrío, Ivan Pollentier, Yen-Chih Lin, Yu-Jen Fan, Dominic Ashworth
2/25/2015	SPIE 2015 Advanced Lithography	Feasibility Study on the Impact of Higher Power EUV Irradiation on Key Lithographic Elements	Soichi Inoue Shinji Mikami Eishi Shiobara Isamu Takagi Hiroyuki Tanaka
3/5/2015	兵庫県立大学 高度産 業科学技術研究所 EUVL 産業利用報告会 2015	EIDEC における EUV レジストのアウト ガス評価	Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Takeshi Sasami, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Eishi Shiobara, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
6/24/2015	The 32th International Conference of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress in EUV Resist Outgas Research at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Isamu Takagi, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita
10/4/2015	IEUVI Resist TWG @ EUVL symposium 2015	Update of Resist Outgas Testing at EIDEC	Eishi Shiobara
10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Recent Progress in Resist Outgas Testing for the New Platform at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Takashi Kamizono, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Satoshi Tanaka
10/5/2015	2015 International Symposium on Extreme Ultraviolet Lithography	Comparison of EUV resist outgassing between organic and inorganic materials	Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Takashi Kamizono, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Shinji Mikami, Eishi Shiobara Takeo Watanabe, Tetsuo Harada and Hiroo Kinoshita
2/21/2016	IEUVI Resist TWG @ SPIE 2016 AL	Update of Resist Outgas Testing at EIDEC	Eishi Shiobara

2/23/2016	SPIE 2016 Advanced Lithography	EUV resist outgassing analysis for the new platform resists at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Takashi Kamizono, Shinya Minegishi, Takakazu Kimoto, Toru Fujimori, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, Satoshi Tanaka
2/23/2016	SPIE 2016 Advanced Lithography	High-power EUV irradiation tool setup for resist outgas evaluation	Shinji Mikami, Eishi Shiobara, Satoshi Tanaka

論文発表 一覧 (Proceeding 含む)

学会誌名	論文名	著者名	巻(号)
Proceedings of SPIE	Contribution of EUV Resist components to the non-cleanable contamination	Eishi Shiobara, Toshiya Takahashi, Norihiko Sugie, Yukiko Kikuchi, Isamu Takagi, Kazuhiro Katayama, Hiroyuki Tanaka, Soichi Inoue, Tetsuro Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita	Vol. 9048, 904819-1, 2014
Proceedings of SPIE	Correlation study on resist outgassing between EUV and E-beam irradiation	Yukiko Kikuchi, Kazuhiro Katayama, Isamu Takagi, Norihiko Sugie, Toshiya Takahashi, Hiroyuki Tanaka, Eishi Shiobara, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada and Hiroo Kinoshita	Vol. 9048, 90482W-1, 2014
Journal of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress of EUV Resist Technology in EIDEC	Eishi Shiobara,	Vol. 27, No.5, 589, 2014
Proceedings of SPIE	Analysis of EUV Resist Outgassing Depended on the Dosage	Eishi Shiobara, Isamu Takagi, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Soichi Inoue Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita	Vol. 9422, 942210-1 2015
Proceedings of SPIE	Collaborative Work on Reducing the Inter-site Gap of Outgassing Qualification	Soichi Inoue, Eishi Shiobara, Takeshi Sasami, Isamu, Takagi, Yukiko Kikuchi, Toru Fujimori, Shinya Minegishi, Robert Berg, Thomas Lucatorro, Shanonn Hill, Charles Tarrio, Ivan Pollentier, Yen-Chih Lin,	Vol. 9422, 942212-1 2015

		Yu-Jen Fan, Dominic Ashworth	
Proceedings of SPIE	Feasibility Study on the Impact of Higher Power EUV Irradiation on Key Lithographic Elements	Soichi Inoue Shinji Mikami Eishi Shiobara Isamu Takagi Hiroyuki Tanaka	Vol. 9422, 94221W-1 2015
Journal of Photopolymer Science and Technology	Recent Progress in EUV Resist Outgas Research at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Shinya Minegishi, Toru Fujimori, Isamu Takagi, Soichi Inoue, Takeo Watanabe, Tetsuo Harada, Hiroo Kinoshita	Vol. 27, No.1, 103, 2015
Proceedings of SPIE	EUV resist outgassing analysis for the new platform resists at EIDEC	Eishi Shiobara, Shinji Mikami, Yukiko Kikuchi, Takeshi Sasami, Takashi Kamizono, Shinya Minegishi, Takakazu Kimoto, Toru Fujimori, Tetsuo Harada, Takeo Watanabe, Hiroo Kinoshita, Satoshi Tanaka	To be published
Proceedings of SPIE	High-power EUV irradiation tool setup for resist outgas evaluation	Shinji Mikami, Eishi Shiobara, Satoshi Tanaka	To be published

以上

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3) –(iii) DSA 技術開発

[0] 緒言

(a) 背景

ブロック共重合高分子 BCP (Block Copolymer)を用いた誘導自己組織化 DSA (Directed Self-Assembly)リソグラフィは、hp (half pitch) 15 nm 以細レベルの LSI (Large Scale Integration)パターンを低コストで解像できる NGL (Next Generation Lithography)の一つとして注目されている。従来からの 193 nm 液浸リソグラフィや EUV (Extreme Ultra-violet)リソグラフィのように、露光光源の短波長化によってレジストパターンの微細化を実現するトップダウン型のアプローチとは異なり、DSA リソグラフィは高分子の自発的で規則的な配列を制御することによって微細化を実現するボトムアップ型のアプローチである。BCP の分子量と組成比に応じてパターンサイズとパターン形状がシングルディジットナノメートル (Single Digit Nanometer)のオーダーで制御できることや、現在の半導体量産工場のリソグラフィ工程やエッチング工程で使われている露光装置、レジスト塗布装置、エッチング装置などの継続利用が可能なことから、hp 15 nm 以細レベルの次世代 LSI デバイスを低コストで製造できるプロセスとして期待されている微細加工技術である。

1990年代から、BCPのマイクロ相分離現象を利用した微細パターン形成技術の研究開発が始まっている。**図 III.2.1.3-3-1** に BCP を用いた自己組織化モデルを示す。図中では親水性セグメント(Hydrophilic)と疎水性セグメント(Hydrophobic)の2成分の高分子ブロックが共有結合したBCPを例として、お互いのセグメント間に働く斥力あるいは引力に応じて、BCP がアニール処理などの熱エネルギーにより自己組織化する様子を示している。高分子溶液の熱統計力学理論である Flory-Huggins の平均場理論における高分子間の相互作用を表す無次元パラメーター χ (chi)が大きい BCP は、お互いのセグメント間に働く斥力あるいは引力が非常に強いいため、より微細なパターン形成が可能となる。したがって、hp 10 nm レベルのパターン形成技術開発に向けて高 χ BCP 開発が活発化している。

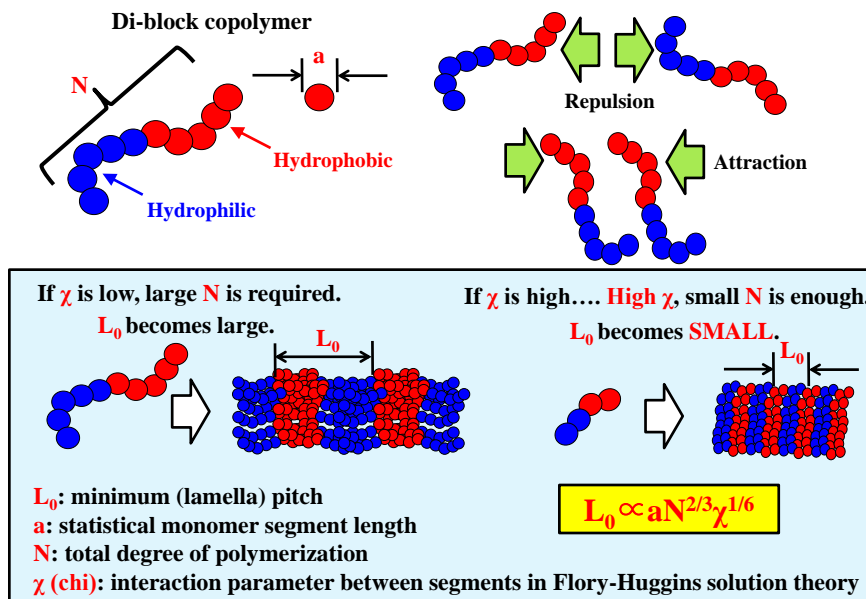
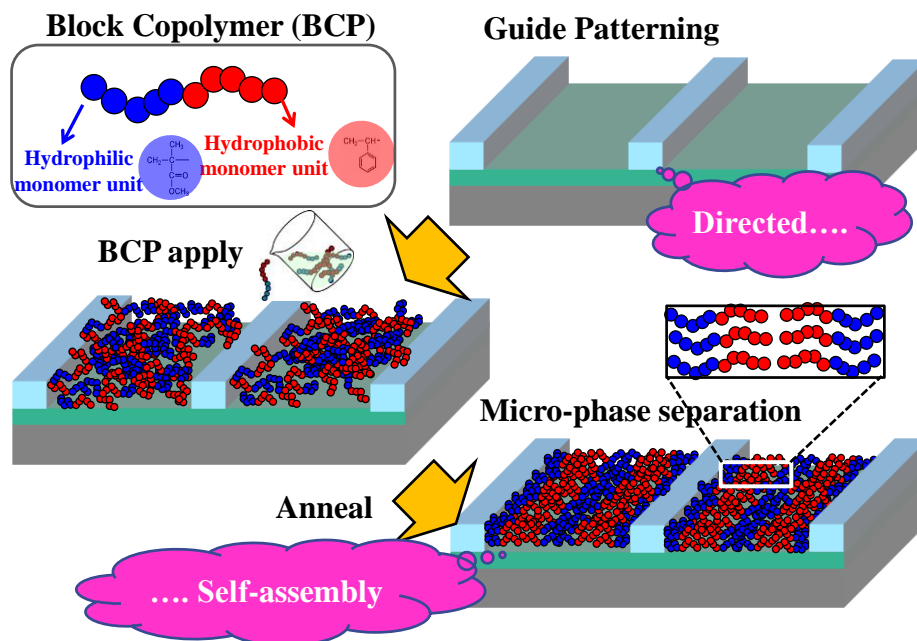


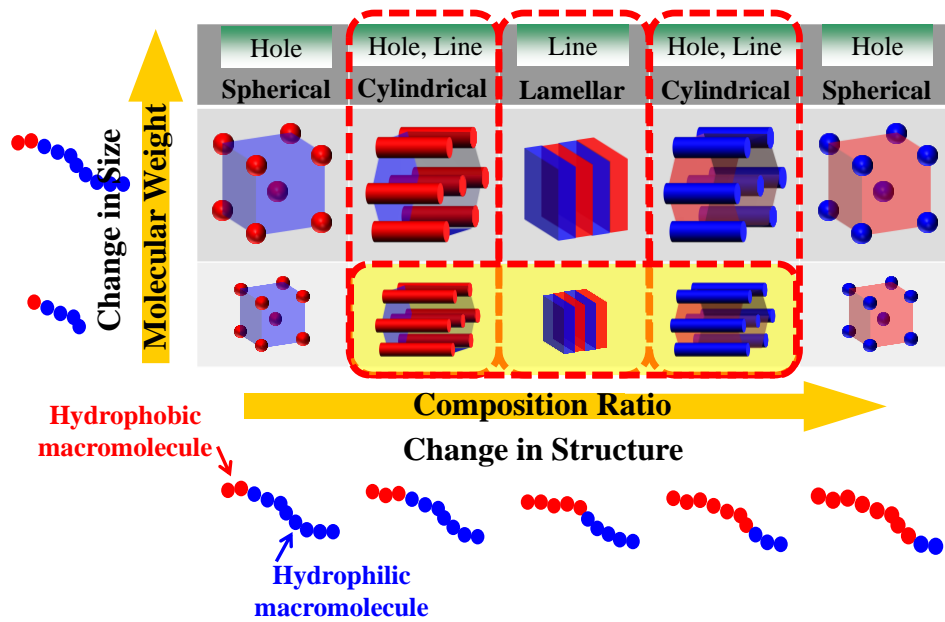
図.Ⅲ.2.1.3-3-1 BCP を用いた自己組織化モデル

物理ガイドを利用した DSA プロセスを図Ⅲ.2.1.3-3-2 に示す。リソグラフィ工程やエッチング工程で使われている露光装置、レジスト塗布装置、エッチング装置などを使って、物理ガイドと呼ばれる基板表面の溝を形成後、レジスト塗布装置を使って溝の中に BCP 溶液を塗布し、アニール処理により物理ガイドの溝に沿って BCP のマイクロ相分離現象を利用した自己組織化を誘導する。ガイドパターンを利用した DSA リソグラフィプロセスは、実用化に向けて現在までに多数報告されており、基板表面の物理的な溝を利用する物理ガイド(Physical epitaxy、あるいは Grapho-epitaxy)と、基板表面の化学的な標識を利用する化学ガイド(Cheical epitaxy、あるいは Chemo-epitaxy)が広く知られている。化学ガイドでは基板表面の特定の位置に BCP の特定のセグメントが配列するように制御する方法として、BCP と同じ成分がランダムに共有結合した中性化膜 RCP (Random Copolymer)を使って基板表面を処理することが多い。



図Ⅲ.2.1.3-3-2 物理ガイドを利用した DSA プロセス

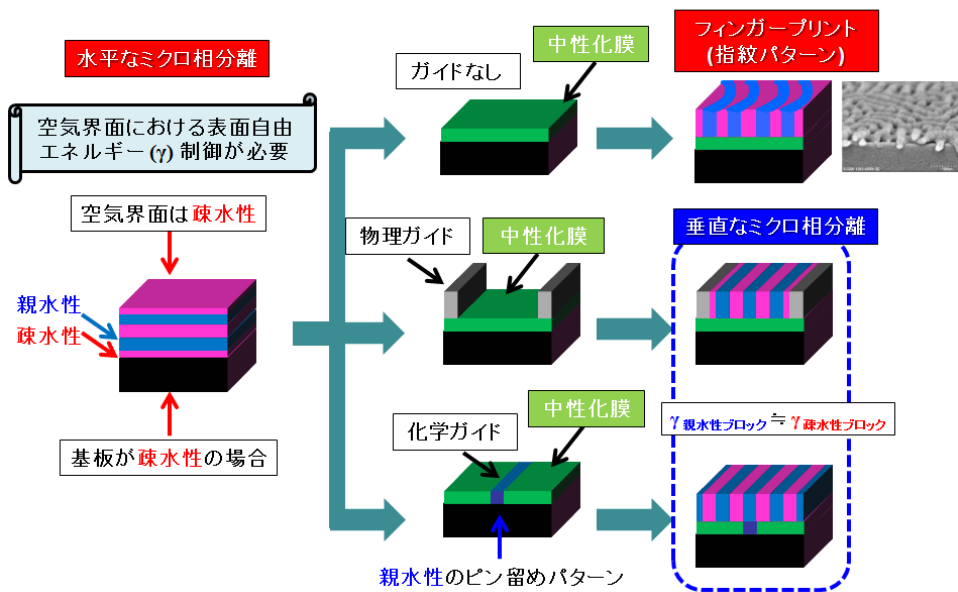
図Ⅲ.2.1.3-3-3 に 2 成分の BCP における DSA モルフォロジーを示す。縦軸に示すように、BCP の分子量に応じてパターンサイズを制御することができる。ハーフピッチサブ 10 nm レベルの微細パターン形成には、BCP の分子量を小さくするとともに、分子量分布も高精度に制御する必要がある。しかし、BCP の分子量が小さい場合には、お互いのセグメント間に働く斥力あるいは引力が強くなければ安定したマイクロ相分離を発現させることができなくなるため、hp sub-10 nm レベルの微細パターン形成には高 χ BCP が必要と考えられている。近年の BCP 合成技術の進展が hp sub-10 nm レベルの微細パターン形成を可能にしつつある。一方、横軸に示すように、BCP の組成比に応じてマイクロ相分離で発現する規則的な構造を制御することができる。2 成分の BCP のお互いのセグメントの組成比が 1 対 1 の場合にはラメラ Lamella (層) 構造となる。2 成分の BCP のお互いのセグメントの組成比を 1 対 1 から変化させることで、シリンダー Cylinder (円柱) 構造やスフィア Sphere (球) 構造のマイクロ相分離を発現することができる。しかしながら、BCP の組成比に応じてマイクロ相分離で発現できるのは規則的な構造だけで、任意の構造を発現することはできない。一般的に、コンタクトホールパターン形成プロセスには垂直形状のシリンダー構造が利用され、ライン&スペースパターン形成プロセスには垂直形状のラメラ構造や水平形状のシリンダー構造が利用されることが多い。



図Ⅲ.2.1.3-3-3 2成分のBCPにおけるDSAモルフォロジー

図Ⅲ.2.1.3-3-4 にラメラ構造のBCPを用いたDSAリソグラフィ戦略を示す。本研究では主に垂直形状のラメラ構造のBCPを利用したDSAリソグラフィ戦略を検討する。したがって、DSAプロセス開発には以下のような技術開発を検討する必要がある。(1)空気界面との表面自由エネルギーが制御されたBCPの開発、(2)BCP界面との表面自由エネルギーの制御された中性化膜の開発、(3)物理ガイドプロセスあるいは化学ガイドプロセスの開発である。

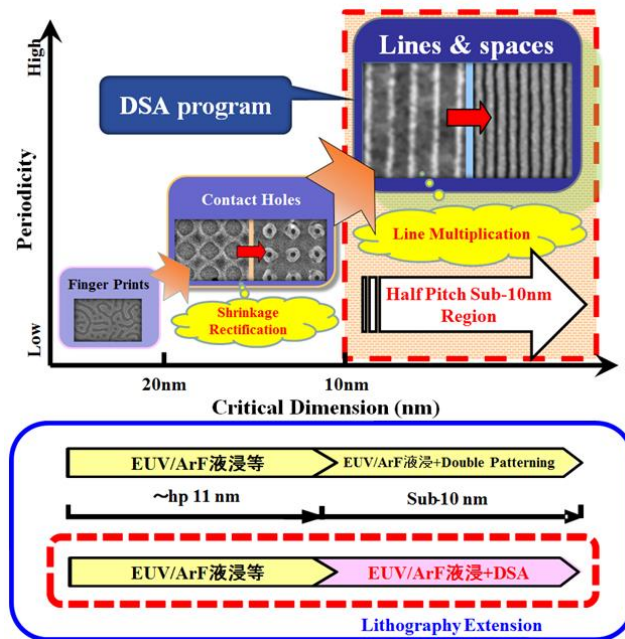
リソグラフィに必要な垂直な相分離を実現するには？



図Ⅲ.2.1.3-3-4 ラメラ構造のBCPを用いたDSAリソグラフィ戦略

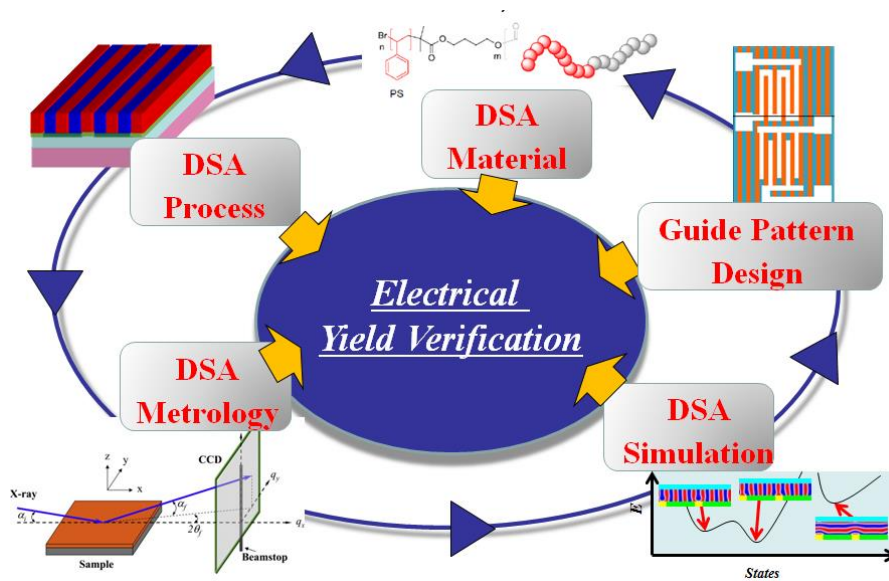
(b) 開発内容と目標

DSA 材料を用いて、ArF 液浸露光装置や EUV 露光装置の解像限界以下にパターンサイズの縮小を可能にするレジストプロセス技術を開発し、ArF 液浸レジストや EUV レジストと組み合わせることにより、hp 11 nm 以細のパターンが形成できる材料・プロセス技術を実現する(図Ⅲ.2.1.3-3-5)。パターンサイズの微細化を可能にする材料開発を加速するには、分子設計のシミュレーション技術の高度化が必須である。また、パターンサイズが微細なため、プロセスにおける寸法ばらつきや欠陥発生などを計測器で観測することは容易でなく、プロセス開発には計算機上でシミュレーションできることが必須である。このため、DSA プロセスにおける寸法のばらつき、欠陥やラフネス(LER や LWR)の発生などの挙動を、高精度かつ高速に予測できるシミュレーション技術を開発する。また、開発されたシミュレーション技術を用いて、高精度で低欠陥のパターンサイズ縮小レジストプロセスの構築に向けた材料開発ならびにプロセス技術を確立する。



図Ⅲ.2.1.3-3-5 DSA プロセスによる hp sub-10 nm パターン形成

DSA 技術開発のイメージ全体像を図Ⅲ.2.1.3-3-6 に示す。DSA 技術を次世代 LSI デバイス量産へ展開するには電気特性評価の検証が必須である。2015 年度までに電気特性取得を目指し、材料、プロセス、検査・計測、シミュレーションの各要素技術を開発し、DSA 技術を確立していく。



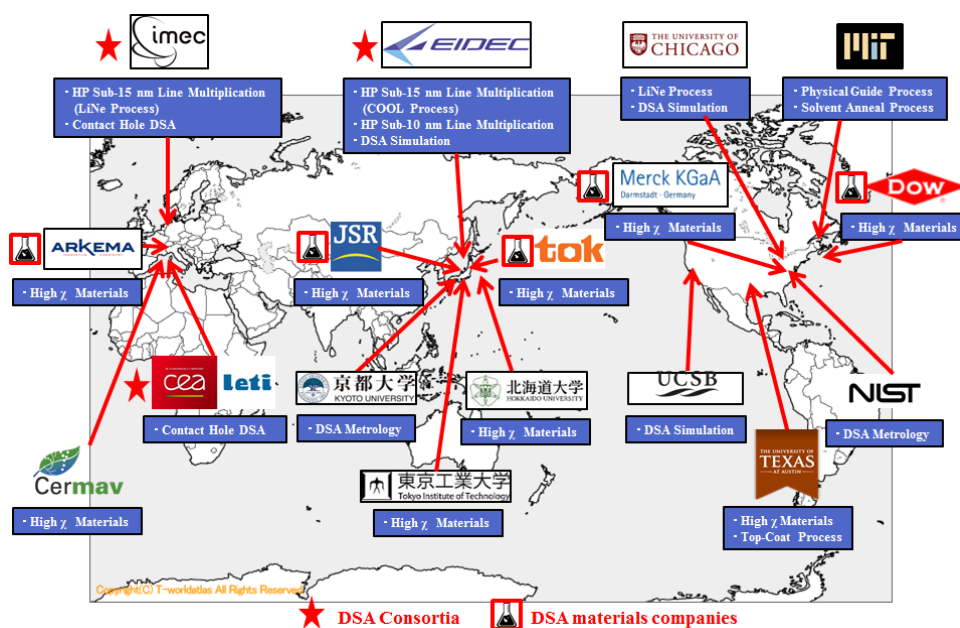
図Ⅲ.2.1.3-3-6 DSA 技術開発の全体像(イメージ図)

[1] DSA 技術開発ベンチマーク

世界における DSA 技術開発ベンチマークを図Ⅲ.2.1.3-3-7 に示す。DSA 技術開発は、1990 年頃から、BCP の精密合成技術開発が進み、BCP を使った DSA による微細加工技術の本格検討が Princeton University 等で開始された。1990 年代前半から、BCP を使った DSA による微細加工技術が、主にビットパターンメディア向けに IBM、Seagate、Western Digital、日立、東芝等で開始された。1990 年後半から、半導体リソグラフィ向けにも、BCP を使った DSA による微細加工技術開発が IBM、U. Mass、UT Austin、Wisconsin University、東芝等で開始された。2010 年前後から、IBM が DSA によるラインピッチ分割技術開発、東芝が DSA によるコンタクトホール縮小プロセス技術開発を開始した。2011 年からは、imec が Chicago University の Prof. P. Nealey グループ (当時 Wisconsin University) から、PS-b-PMMA を使った DSA によるラインピッチ分割技術移管を受け、hp 12-14 nm ラインピッチ分割技術実用化を目指した DSA プログラムを開始した。2012 年からは、CEA-LETI が DSA によるコンタクトホール縮小技術開発を目指した DSA プログラム(プログラム名 ideal)を開始した。2013 年からは、EIDEC が hp sub-10 nm DSA 技術開発を目標とする DSA プログラムを開始して 2016 年 3 月に終了している。更に、2014 年からは米国で NIST (米国立標準技術研究所) が運営する MGI (Material Genome Initiative) の中核を担うプロ

プロジェクトとしてスタートした革新的素材を開発設計するための次世代コンピューティングツールや実験手法の開発と産業界への導入を目指した ChiMad (Center for Hierarchical Design)の重要な研究アイテムの一つとして、DSA 技術開発が Chicago University の Prof. P. Nealey グループを中心に進められている。

コンソーシアムにおける DSA 技術開発状況は、世界的には欧州では imec や CEA-LETI、日本では EIDEC において、それぞれ半導体デバイスメーカー、DSA 材料メーカー、DSA 装置メーカー、大学・研究機関をメンバーとする産学官共同技術開発体制で DSA 技術開発を推進している。DSA 技術開発において最も重要な開発項目のひとつである DSA 材料は、米国では Merck や Dow、欧州では ARKEMA、日本では JSR や東京応化工業が有力 DSA 材料メーカーとして DSA 材料開発を進めている。



図Ⅲ.2.1.3-3-7 世界における DSA 技術開発ベンチマーク

[2] DSA 技術開発項目と計画

第一段階として、2013年度から2014年度にかけて hp 15 nm DSA プロセスを構築する。ここで DSA プロセスとは、ハードマスク層の成膜工程、ガイドパターン形成工程、中性化膜塗布工程、DSA 材料塗布工程、DSA 材料のマイクロ相分離を引き起こすアニール工程、パターン転写用ハードマスク層のエッチング工程等から構成されるプロセスを総称して指す。これらの中から、最も重要な開発項目である DSA 材料や中性化膜の塗布工程およびエッチング工程の開発を推進するために、東京エレクトロン製 DSA 関連材料対応プロセス処理装置(図 III.2.1.3-3-8)および東京エレクトロン製 DSA 用エッチング装置(図 III.2.1.3-3-9)を新規に導入する。

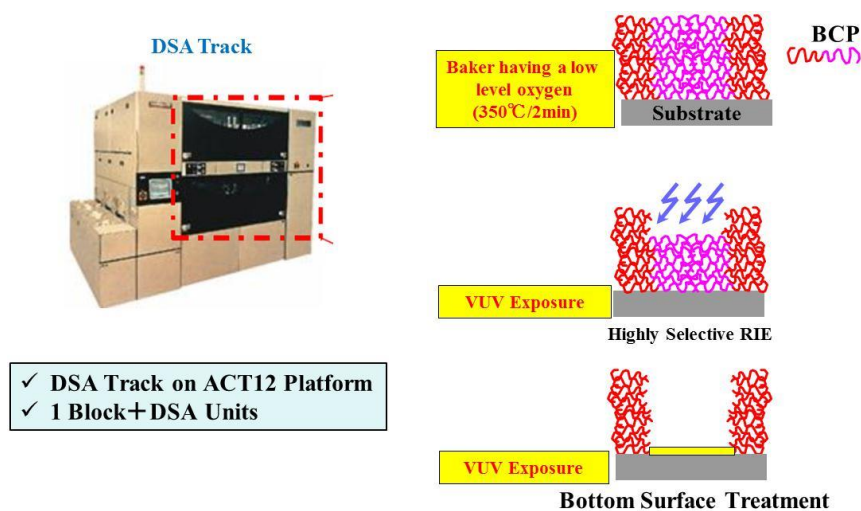
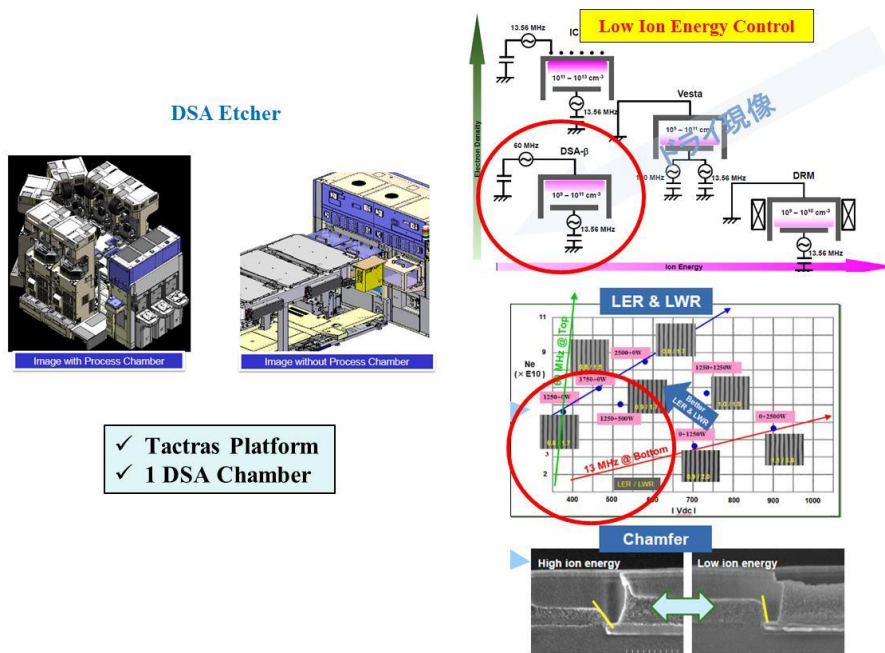


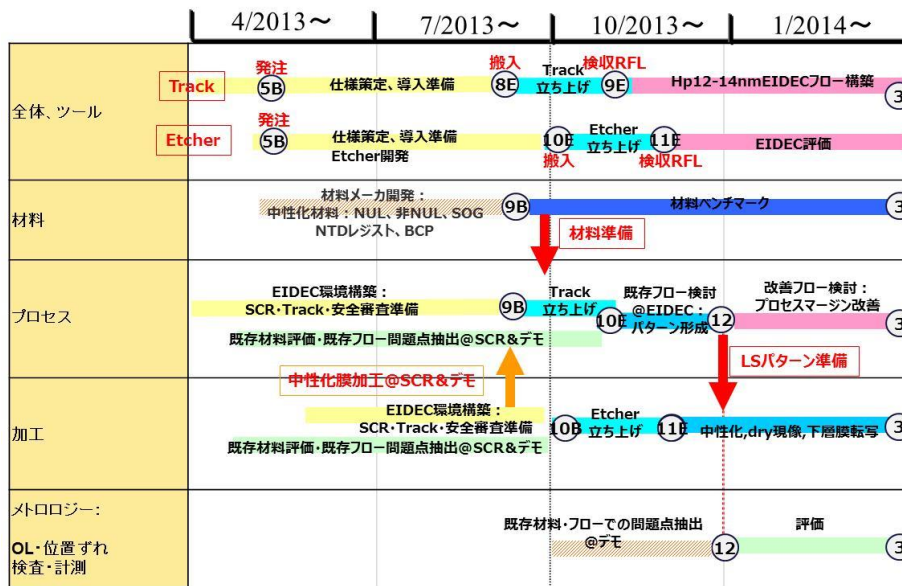
図 III.2.1.3-3-8 DSA プロセス処理装置



図Ⅲ. 2. 1. 3-3-9 DSA レジスト用エッチング装置

DSA プロセス構築に際しては、DSA 材料起因の不確実性を取り除くために、hp 15nm レベルのマイクロ相分離が検証されているポリスチレン・ポリメチルメタクリレートブロック共重合高分子(PS-*b*-PMMA)を BCP 材料として用いる。構築された DSA プロセスは、DSA 技術の実用化に向けた最大の課題である欠陥をメトリックとして評価を実施する。また、DSA プロセス技術開発と並行して、hp sub-10 nm 対応 DSA 材料候補のベンチマークを実施し、第一次評価を行う。これらの開発および評価を通じて得られる実験データは、後述するシミュレーションモデルの検証に活用する。また、DSA プロセスにおける下地基板層への重ね合せ(オーバーレイ: Overlay)に関する誤差要因解析(オーバーレイバジェット解析)を行い、高精度な重ね合せを実現するための第一次設計方針を決めるため、DSA 位置ずれに関する評価も実施する。

図Ⅲ.2.1.3-3-10 に以上の DSA 材料・プロセス技術開発の計画表を示す。



図Ⅲ.2.1.3-3-10 DSA 材料・プロセス技術開発の計画表

第二段階として、2014年度から2015年度にかけてhp sub-10 nm DSAプロセスを構築する。hp sub-10 nm DSAプロセス構築に際しては、新たに高 χ BCP材料を開発する必要がある。hp 15 nm DSAプロセスで用いるPS-*h*-PMMA単独ではhp 12 nmレベルのマイクロ相分離が微細化の限界であり、hp sub-10 nm DSAプロセスに用いることができない。したがって、第一段階で実施したベンチマークに基づき、高 χ BCP材料の選定を行う。また、高 χ BCP材料のベンチマークと並行して、東京工業大学、京都大学、産総研、北海道大学への共同研究や再委託研究を通じて高 χ BCP材料の設計指針に関する知見を得る(図Ⅲ.2.1.3-3-11)。構築されたDSAプロセスは、DSA技術の実用化に向けた最大の課題である欠陥をメトリックとして評価を実施する。これらの開発および評価を通じて得られる実験データは、後述するシミュレーションモデルの検証に活用する。また、DSAプロセスにおける下地基板層への重ね合せ(オーバーレイ:Overlay)に関する誤差要因解析(オーバーレイバジェット解析)を行い、高精度な重ね合せを実現するための第一次設計方針を決めるため、DSA位置ずれに関する評価も実施する。最終的にはDSA技術が半導体リソグラフィにおける微細加工技術として実用的であることを総合的に検証するために、hp 15 nmとhp sub-10 nmのそれぞれで構築されたDSAプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特性評価を実施する。DSAプロセスを用いてインテグレーションした金属配線回路の電気特性評価はこれまで世界的にも前例がなく、金属配線の電氣的動作にすれば画期的な成果となる。図Ⅲ.2.1.3-3-12に以上のDSA材料・プロセス技術開発の計画表を示す。

DSA シミュレーションは、hp 15 nm と hp sub-10 nm のそれぞれで構築された DSA プロセスの開発および評価を通じて得られる実験データをシミュレーションモデルの検証のために活用する。DSA シミュレーションは計算規模が比較的大きくなるため、EWS (Engineering Workstation) を導入し開発環境を整備する必要がある。大規模な計算を高精度かつ現実的な時間内で行う必要があるという観点から EWS に要求される性能を決定する(図Ⅲ.2.1.3-3-13)。

Required Performance of EWS for DSA Simulation

MD Calculation Model	Required cores/ 1 job	Calculation Time / 1 job/10000 molecules
SCF (Self-consistent Field Theory)	96	10-15 min
DPD (Dissipative Particle Dynamics)	32	10-15 min

↓

Core	Memory	Cost
64-128	512GB以上	~10万円

EWS for DSA Simulation



【System】

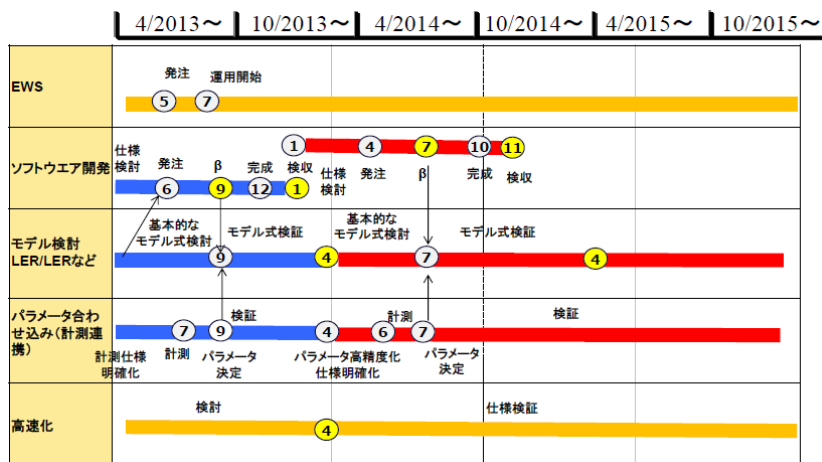
1. Calculation Node
CPU 8 sets式 (16 cores * 8 sets=128 cores)
Memory 8 sets (64 GB * 8 sets=512GB)
2. Login Server, Control Server, NIS Server 1 set
3. Network Switch (Internal Network) 2 sets
4. Network Switch (Control Network) 1 set
5. Uninterruptible Power Supply
6. Console
7. Server Rack
8. Compiler

図Ⅲ.2.1.3-3-13 DSA シミュレーション用 EWS の概要

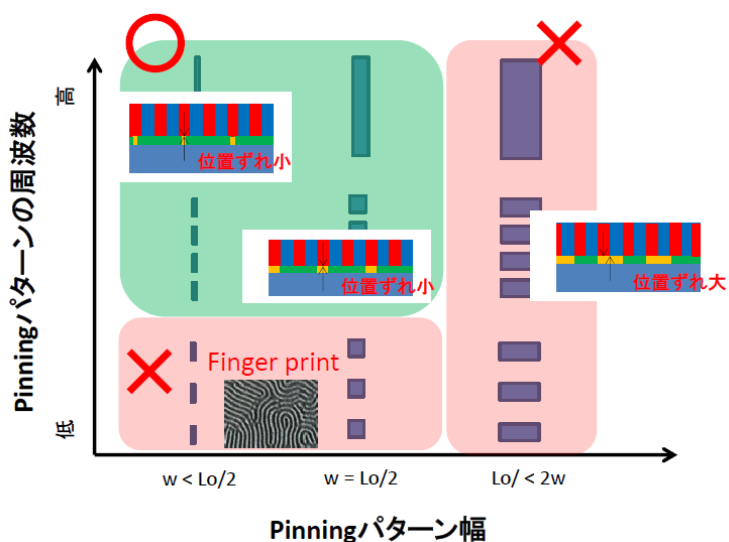
本開発環境を用いて、hp 15 nm と hp sub-10 nm のそれぞれで構築された DSA プロセスにおいて生じる寸法ばらつきや欠陥・LWR(Line Width Roughness)の原因を解明するためのシミュレータを構築する。具体的には、材料の分子量分布・組成比分布・溶媒濃度、処理工程の雰囲気・温度、ガイドパターンの表面エネルギー・形状(ラフネス・テーパー角度・寸法ばらつき・デューティー比)等を表現するシミュレーションのモデル式を検討し、実測データとの比較を通して構築したモデルの確からしさを検証する。

図Ⅲ.2.1.3-3-14 に DSA シミュレーション開発の計画表を示す。計算精度の高精度化を実現するためには、実験により得られる DSA 相分離挙動の三次元的な解析結果との比較と合わせ込みが不可欠で

ある。シミュレーションは無次元で計算されるため、長さの概念は存在しない。したがって、材料に関する知見および情報量の多さから hp 15 nm DSA 材料をモデル材料として実測を行い、シミュレータパラメータの合わせ込みを行う。また、化学ガイド方式の DSA プロセスにおいて重要な工程であるピンニングパターンのスリミング工程におけるプロセスマージンを予測する(図Ⅲ.2.1.3-3-15)。



図Ⅲ.2.1.3-3-14 DSA シミュレーション開発の計画表



図Ⅲ.2.1.3-3-15 ピンニングパターンのプロセスマージン(イメージ図)

また、材料の分子量分布・組成比分布、処理工程の温度、ガイドパターン・の表面エネルギーや形状（ラフネス・テーパ角度・寸法ばらつき・デューティ比）等を入力とし、DSA レジスト材料の相分離過程を出力とする DSA シミュレータを作製する(図 III.2.1.3-3-16)。シミュレーションにより得られる出力データと実験により得られる実測データとの比較を通して、シミュレータの確からしさを検証する。構築したシミュレータを用いて、DSA により作成されるパターンの系が持つ自由エネルギーを評価することにより、プロセスマージンを予測し、hp sub-10 nm DSA プロセスへ向けた開発の指針を得る。

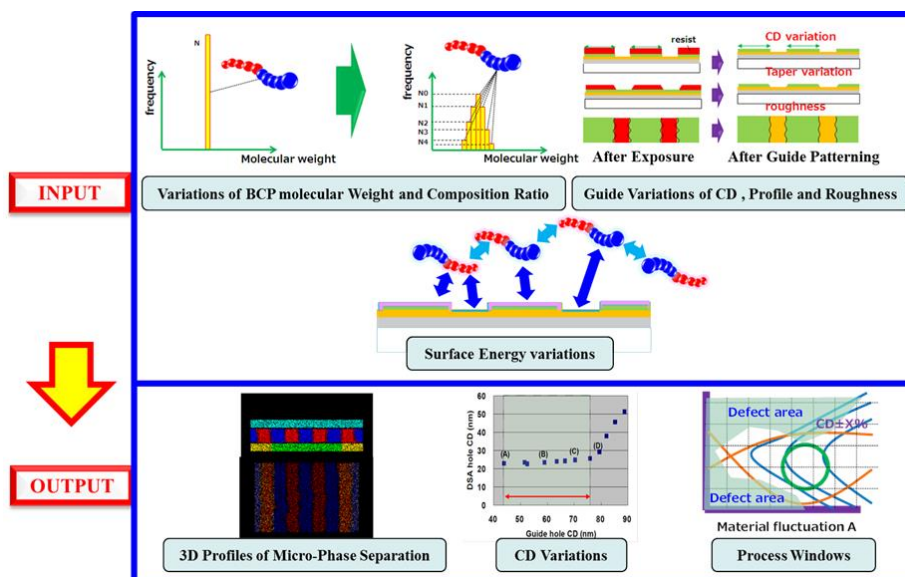


図 III.2.1.3-3-16 DSA シミュレータの入出力データの概要

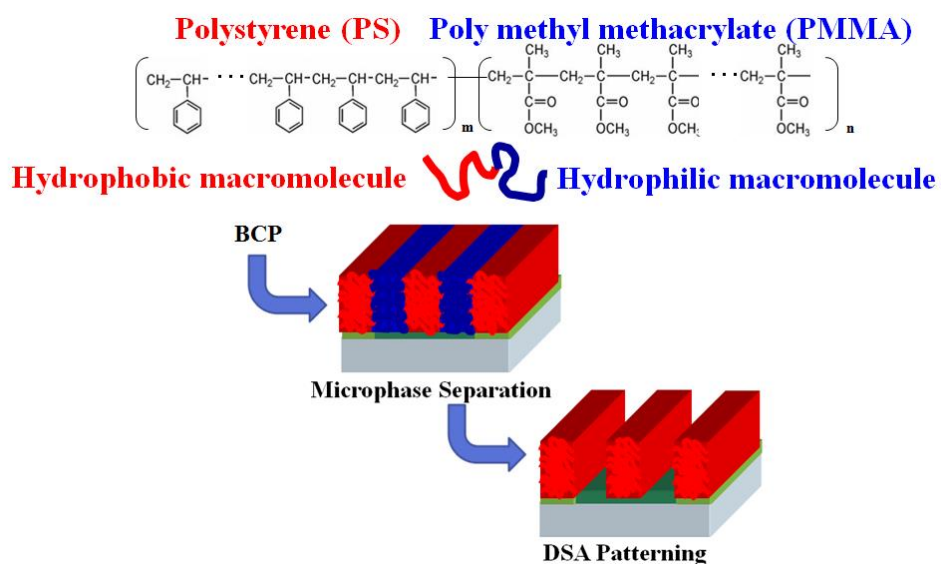
[3] hp 15 nm DSA プロセス技術開発

(a) hp 15 nm DSA プロセス

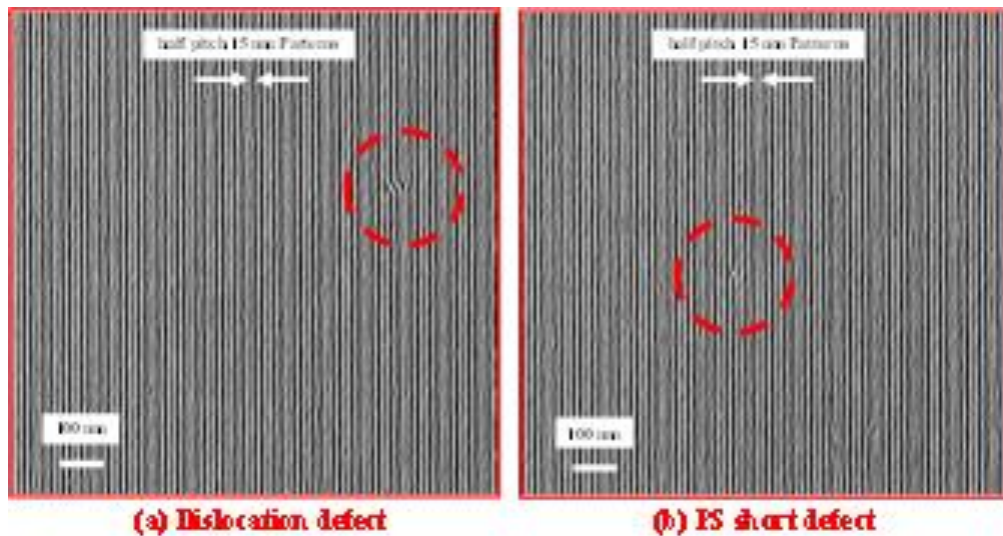
現在、hp 15 nm レベルの DSA プロセスにおいて最も実用化に向けた技術開発が進んでいる BCP は PS-*b*-PMMA である。図 III.2.1.3-3-17 はラメラ構造の PS-*b*-PMMA を使った化学ガイドによるライン&スペースパターン形成プロセスを示す。このプロセスでは垂直形状のラメラパターンを形成するために、PS-*b*-PMMA と同じ成分がランダムに共有結合した中性化膜 PS-*r*-PMMA を使って基板表面を処理し

ている。エッチング装置により垂直形状のラメラパターンの PMMA 部分を選択的に除去することで、hp 15 nm PS ライン&スペースパターンを形成する。

DSA プロセスの実用化に向けた最大の課題は、LSI デバイス製造プロセスとして許容可能なレベルまで欠陥を低減することと、基板表面の特定の位置に BCP の特定のセグメントが高精度に配列するように位置ずれを改善することである。図Ⅲ.2.1.3-3-18 に典型的な DSA パターン欠陥を示す。図中に示すような欠陥や位置ずれの改善には、DSA 材料やプロセスなどのトータル性能の向上が必要である。



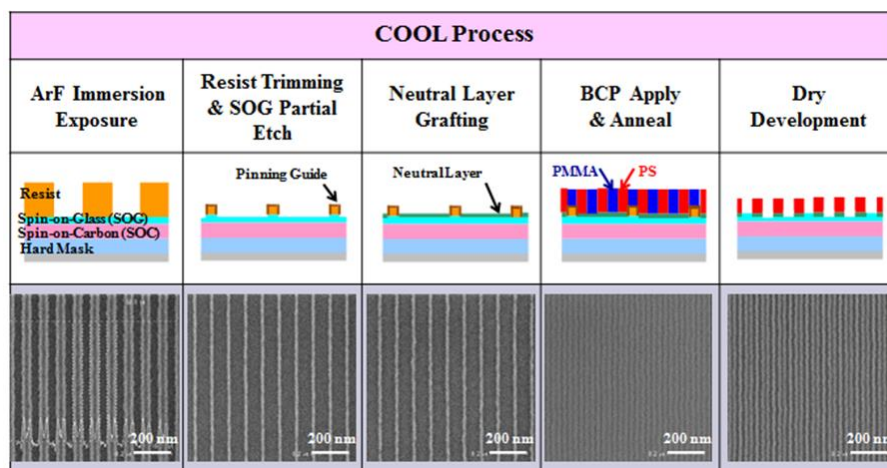
図Ⅲ.2.1.3-3-17 ラメラ構造の PS-*h*-PMMA を用いた化学ガイドによるライン&スペースパターン形成プロセス



図Ⅲ.2.1.3-3-18 DSA パターン欠陥, (a)転位欠陥, (b)PS ショート欠陥

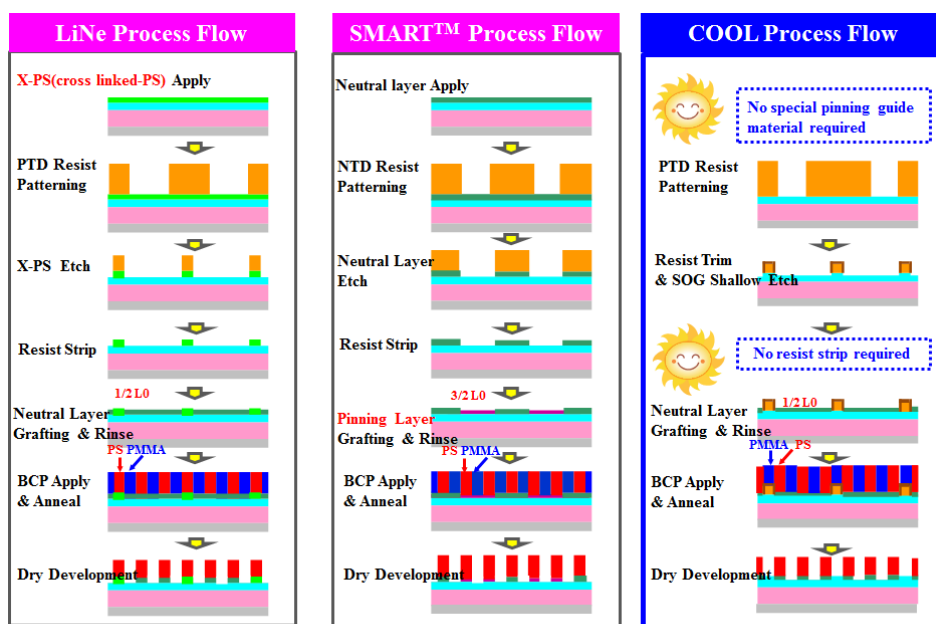
PS-*b*-PMMA を使った hp 15 nm レベルの DSA プロセスは世界中で最も実用化に向けた技術開発が進んでいる。世界に先駆けて報告された PS-*b*-PMMA を用いた hp 15 nm レベルの DSA プロセスは、Chicago University の Prof. P. Nealey グループ(当時 Wisconsin University)が開発した化学ガイド方式を使った DSA によるラインピッチ分割技術(LiNe プロセス)である。また、Merck KGaA(当時 AZ Electronics Materials)は、更に実用的な化学ガイド方式を使った DSA によるラインピッチ分割技術(SMART プロセス)を報告している。

本研究では、化学ガイド方式と物理ガイド方式の両方の利点を兼ね備えたハイブリッドガイド方式の COOL プロセス(COOrdinated Line epitaxy process)を独自に開発した。図Ⅲ.2.1.3-3-19 に示すように、COOL プロセスは ArF 液浸露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターンを下地基板上の下層膜(COOL プロセスの場合は SOG 膜)と同時に、所望の hp サイズまでスリミングエッチングした後に中性化膜を塗布した上で、BCP 塗布およびアニール処理することで hp 15 nm レベルのラインピッチ分割を可能にする。



図Ⅲ.2.1.3-3-19 COOL プロセスフロー

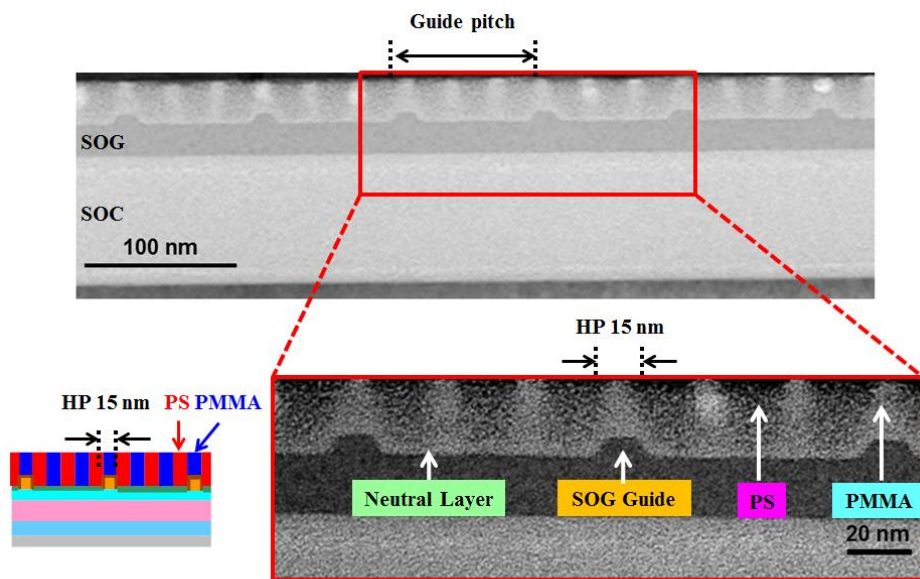
図Ⅲ.2.1.3-3-20 に LiNe プロセス、SMART プロセス、COOL プロセスのフロー比較を示す。LiNe プロセスは、架橋型ポリスチレン(X-PS)を成膜した下地基板の上に、ArF 液浸露光装置(本研究では、産総研スーパークリーンルームのニコン製 ArF 液浸露光装置 S610C を使用)や EUV 露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターンを、下地基板の上に X-PS 膜と同時に所望の hp サイズまでスリミングエッチングした後にレジストだけを剥離した上で中性化膜を塗布し、BCP 塗布およびアニール処理することで hp 15 レベルのラインピッチ分割を可能にする。すなわち、所望の hp サイズまでスリミングエッチングされた X-PS 膜を化学的標識とする化学ガイドプロセスである。一方、SMART プロセスは、中性化膜を成膜した下地基板の上に、ArF 液浸露光装置や EUV 露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターンを、下地基板の上に中性化膜と同時に所望のサイズ(通常は hp の 1.5 倍)までスリミングエッチングした後にレジストだけを剥離した上で X-PS 膜を塗布し、BCP 塗布およびアニール処理することで hp 15 レベルのラインピッチ分割を可能にする。すなわち、所望のサイズまでスリミングエッチングされた中性化膜を化学的標識とする化学ガイドプロセスである。しかし、COOL プロセスは、化学的標識として X-PS 膜や中性化膜を利用せず、通常のパターン転写膜の SOG 膜とレジストを同時に、所望の hp サイズまでスリミングエッチングした後に中性化膜を塗布した上で、BCP 塗布およびアニール処理することで hp 15 nm レベルのラインピッチ分割を可能にするプロセスであり、あらかじめ X-PS 膜や中性化膜を成膜する必要がなく、しかもレジスト剥離工程を省略できるコスト的な利点がある。



9

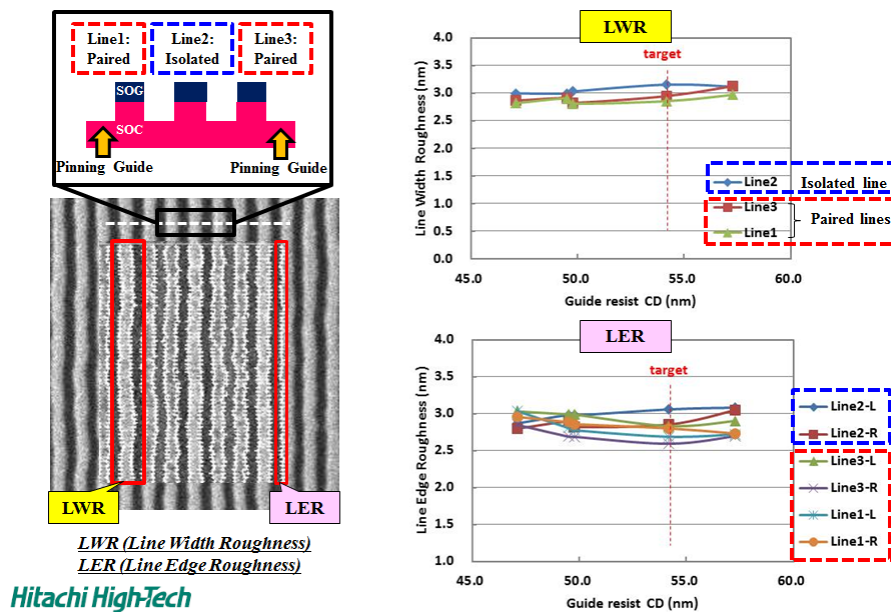
図Ⅲ.2.1.3-3-20 LiNe プロセス、SMART プロセス、COOL プロセスのフロー比較

図Ⅲ.2.1.3-3-21 に COOL プロセスにおける BCP 塗布およびアニール処理後の hp 15 nm ラインピッチ分割パターンの断面 TEM(Transmission Electron Microscopy)像を示す。一般に、PS-b-PMMA を用いたラインピッチ分割パターンの場合には、PS と PMMA のそれぞれの構成元素に大きな違いがないことから、ラインピッチ分割パターンの断面 TEM 像にコントラストが付きにくい問題がある。本研究では、ラインピッチ分割パターンの断面構造解析が DSA プロセスの実用化に向けて最も重要である欠陥低減の観点からも必須であるとの認識から、様々な高コントラスト断面 TEM 像取得の検討を実施した。図Ⅲ.2.1.3-3-21 は四酸化ルテニウムにより PS 領域を染色した断面 TEM 像である。図中から、SOG 膜の hp 15 nm サイズの小突起部分が物理ガイドパターンとなり、しかも小突起部分上部に残るレジストスリミング残渣が PMMA 領域と親和性の高い化学ガイドパターン(ピンニングパターン)となることがわかった。



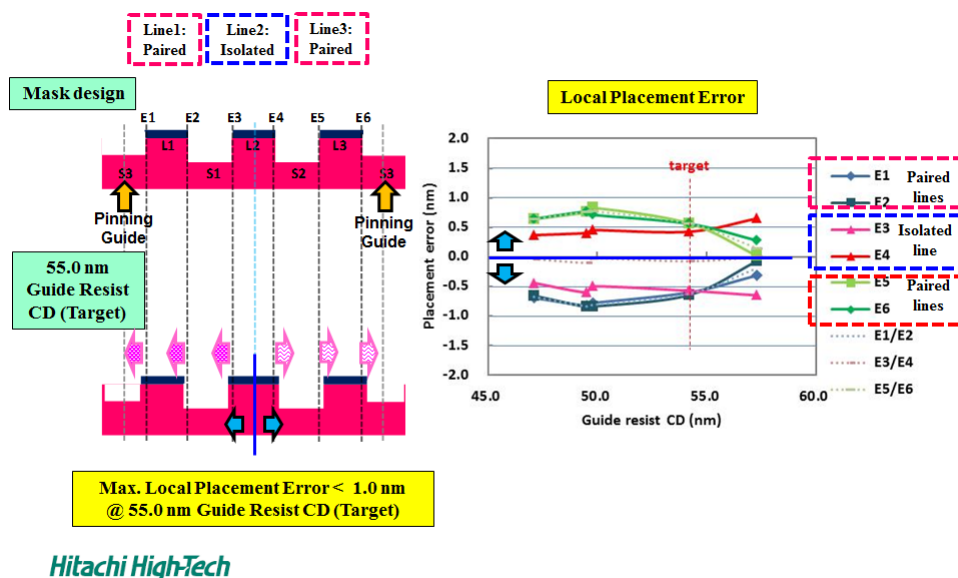
図Ⅲ.2.1.3-3-21 COOL プロセスにおける hp 15 nm ラインピッチ分割パターン断面 TEM 像

図Ⅲ.2.1.3-3-22 に COOL プロセスにおける hp 15 nm PS ラインパターンのラフネス(LWR、LER)のレジストガイドパターン寸法依存性を示す。日立ハイテクノロジーズ製 CD-SEM CG5000 を使って、COOL プロセスにおける BCP 塗布およびアニール処理後の PMMA 領域をドライエッチング装置で除去(ドライ現像)した PS ラインパターンの寸法(Critical Dimension: CD)を多点測定した結果、ほぼすべてのレジストガイドパターン寸法において LWR と LER とともに 3.0 nm 以下となった。COOL プロセスの場合、PS ラインパターンは SOG ピンニングパターンに接する PS ラインパターンが 2 本と孤立する PS ラインパターンが 1 本で構成される 1 組が繰り返す構造となっているが、LWR と LER に関しては SOG ピンニングパターンに接する PS ラインパターンと孤立する PS ラインパターンに大きな違いは認められなかった。DSA プロセスの実用化に向けて、hp 15 nm レベルの次世代 LSI デバイス量産へ展開するには、LWR と LER とともに少なくとも 1.0 nm 以下に改善する必要がある。LWR と LER の更なる改善にはガイドパターンのスリミングエッチング寸法精度、断面プロファイルやラフネスの向上に加えて、BCP や中性化膜材料の改良が必要と考えられる。



図Ⅲ.2.1.3-3-22 COOL プロセスにおける hp 15 nm PS パターンのラフネスのガイドパターン寸法依存性

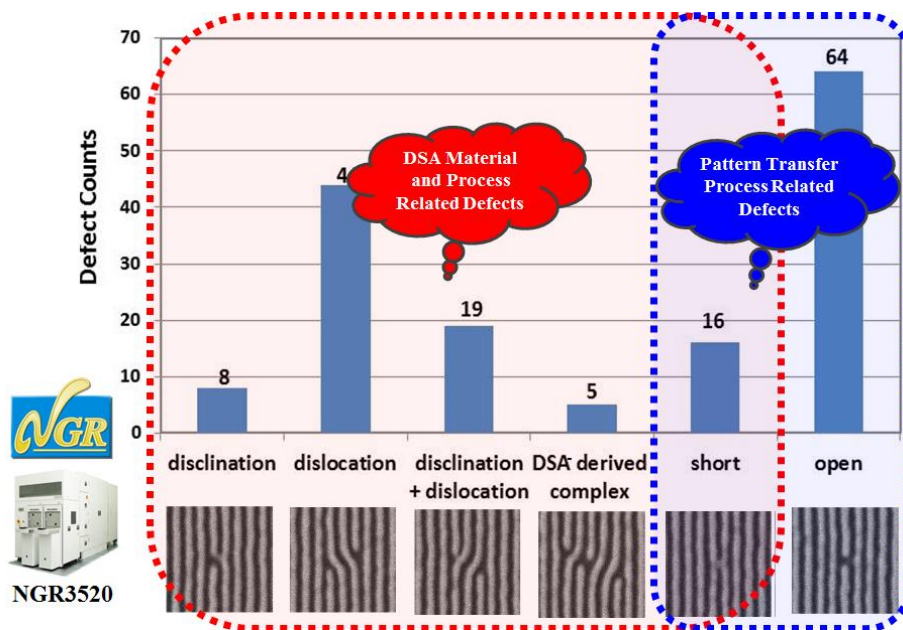
図Ⅲ.2.1.3-3-23 に COOL プロセスにおける hp 15 nm PS ラインパターンの局所的位置ずれ(Local Placement Error)のレジストガイドパターン寸法依存性を示す。日立ハイテクノロジーズ製 CD-SEM CG5000 を使って、COOL プロセスにおける BCP 塗布およびアニール処理後の PMMA 領域をエッチング装置で除去(ドライ現像)した PS ラインパターンの寸法を多点測定した結果、ターゲットのレジストガイドパターン寸法において局所的位置ずれは ± 0.5 nm 以下となった。一方、ターゲットのレジストガイドパターン寸法以外において局所的位置ずれは ± 1.0 nm 以下となった。COOL プロセスの場合、PS ラインパターンは SOG ピンニングパターンに接する PS ラインパターンが 2 本と孤立する PS ラインパターンが 1 本で構成される 1 組が繰り返す構造となっており、PS ラインパターンの局所的位置ずれ測定では、各 PS ラインパターン端を E1 から E6 とし、SOG ピンニングパターン中心位置からのそれぞれの PS ラインパターン端との距離を測定することで算出した。DSA プロセスの実用化に向けて、hp 15 nm レベルの次世代 LSI デバイス量産へ展開するには、局所的位置ずれは少なくとも ± 1.0 nm 以下に改善する必要がある。局所的位置ずれの更なる改善にはガイドパターンのスリミングエッチング寸法精度、断面プロファイルやラフネスの向上に加えて、BCP 材料の改良が必要と考えられる。



図III.2.1.3-23 COOLプロセスにおけるhp 15 nm PSパターンの局所的な位置ずれのガイドパターン寸法依存性

(b) hp 15 nm DSAプロセスにおける欠陥評価

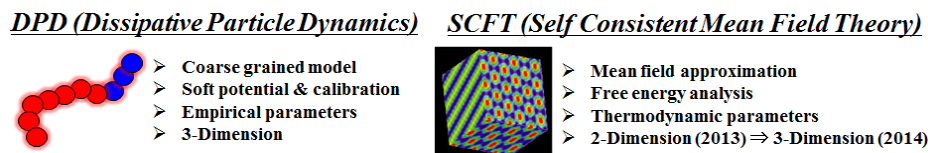
COOLプロセスにおけるhp 15 nm PSラインパターンの欠陥分類を図III.2.1.3-24に示す。NGR製電子ビーム欠陥検査装置NGR3520を使って、COOLプロセスにおけるBCP塗布およびアニール処理後のPMMA領域をエッチング装置で除去(ドライ現像)したPSラインパターンの欠陥検査分類した結果、PSラインパターンのオープン欠陥(open)、転位欠陥(dislocation)、転位欠陥と回位欠陥(disclination)の組み合わせ、ショート欠陥(short)の順で発生頻度が多いことがわかった。欠陥発生メカニズムを考えた場合、オープン欠陥はドライ現像などのパターン転写工程起因の可能性が高く、転位欠陥や転位欠陥と回位欠陥の組み合わせやショート欠陥はDSAプロセス起因の可能性が高い。DSAプロセスの実用化に向けて、hp 15 nmレベルの次世代LSIデバイス量産へ展開するには、欠陥密度(1cm²あたりの欠陥数)は開発段階でも少なくとも1個/cm²以下に改善する必要がある。欠陥密度の更なる改善にはガイドパターンのスリミングエッチング寸法精度、断面プロファイルやラフネスの向上に加えて、BCP材料の改良が必要と考えられる。



図Ⅲ.2.1.3-3-24 COOL プロセスにおける hp 15 nm PS パターンの欠陥分類

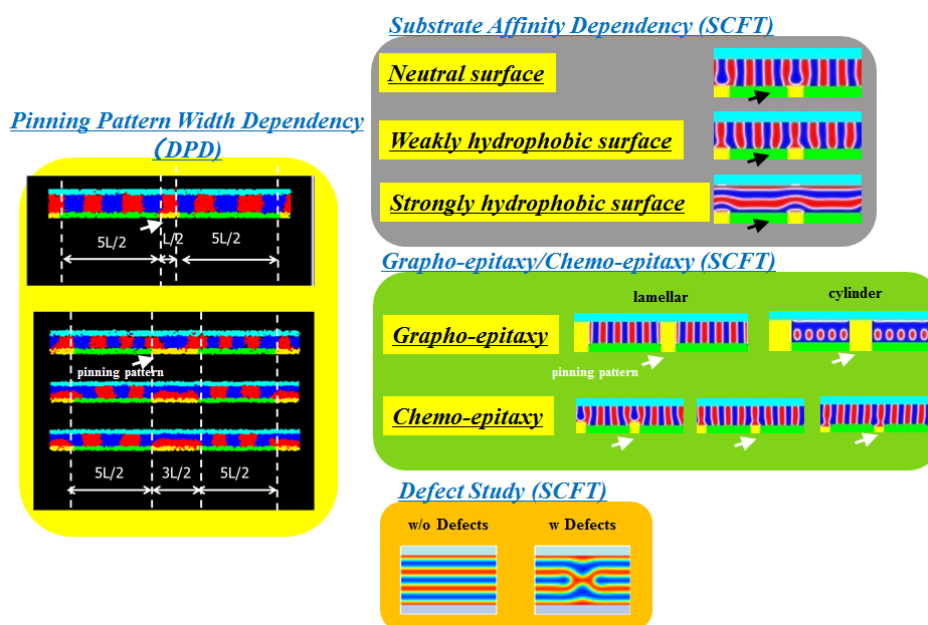
(c) DSA プロセスにおける欠陥シミュレーション

DSA プロセスのようなソフトマテリアルのシミュレーションには、経済産業省による産学官連携プロジェクトで開発された統合的シミュレータである OCTA(非 General Public License: 非 GPL)が有効である。OCTA はソフトマテリアルのマイクロな分子特性とマクロな材料特性を仮想実験技術によって結びつけることができる。本研究では、OCTA において COGNAC と呼ばれる粗視化粒子動力学(Dissipative Particle Dynamics: DPD)と SUSHI と呼ばれる自己無撞着場理論(Self-Consistent Mean Field Theory: SCFT)を主に使用する(図Ⅲ.2.1.3-3-25)。



図Ⅲ.2.1.3-3-25 OCTA における粗視化粒子動力学(DPD)と自己無撞着場理論(SCFT)

DPD と SCFT を使った DSA プロセスのシミュレーション例を [図 III.2.1.3-3-26](#) に示す。図中では、DSA パターン断面形状のピンニングパターン幅依存性に関する DPD シミュレーション例、DSA パターン断面形状の下地基板親和性依存性や物理ガイドあるいは化学ガイド依存性や欠陥に関する SCFT シミュレーション例を示す。これらのシミュレーション結果から、DSA プロセスにおける BCP のマイクロ相分離現象を 3 次元内部微細構造として予測可能となる。したがって、DSA プロセスの実験結果とシミュレーション結果を対比することにより、様々な BCP のマイクロ相分離現象を効率的かつ高精度に制御することが可能となる。



[図 III.2.1.3-3-26](#) DPD と SCFT を使った DSA プロセスのシミュレーション例

COOL プロセスにおける hp 15 nm PS ラインパターンの欠陥検査結果から、[図 III.2.1.3-3-27](#) に示すような周期的な欠陥が数多く観察されることがわかった。これらの欠陥は井桁状の周期的な特徴を示すことから、井桁欠陥(Grid Defect)と呼ばれる。井桁欠陥には、(1) BCP のマイクロ相分離後の PMMA ラインパターンのドライ現像直後の欠陥検査では井桁欠陥は顕著に観察されない、(2) PMMA ラインパターンのドライ現像後の下地 SOG 膜を浅くドライエッチング(SOG Shallow Etching)した場合に井桁欠陥が顕著に観察されるようになる、(3) 下地 SOG 膜を深くドライエッチングした場合は井桁欠陥が減少する、(4)ガイ

ドパターンを使わない場合に BCP のマイクロ相分離後に観察される指紋パターン(Fingerprint)でも井桁欠陥が観察される、というような特徴がある。したがって、井桁欠陥は PMMA パターンの底部に PS セグメントが回り込んだ埋め込み欠陥であると考えられる。更に、いくつかの水の接触角の異なる中性化膜を使った井桁欠陥の中性化膜依存性を検討したところ、水の接触角が高い中性化膜(PS 親和性の高い中性化膜)ほど井桁欠陥が減少する傾向があることから、井桁欠陥の発生原因はガイドパターンではなく中性化膜であると考えられる。すなわち、井桁欠陥の改善には BCP 界面との表面自由エネルギーが厳密に制御された中性化膜が必要である。

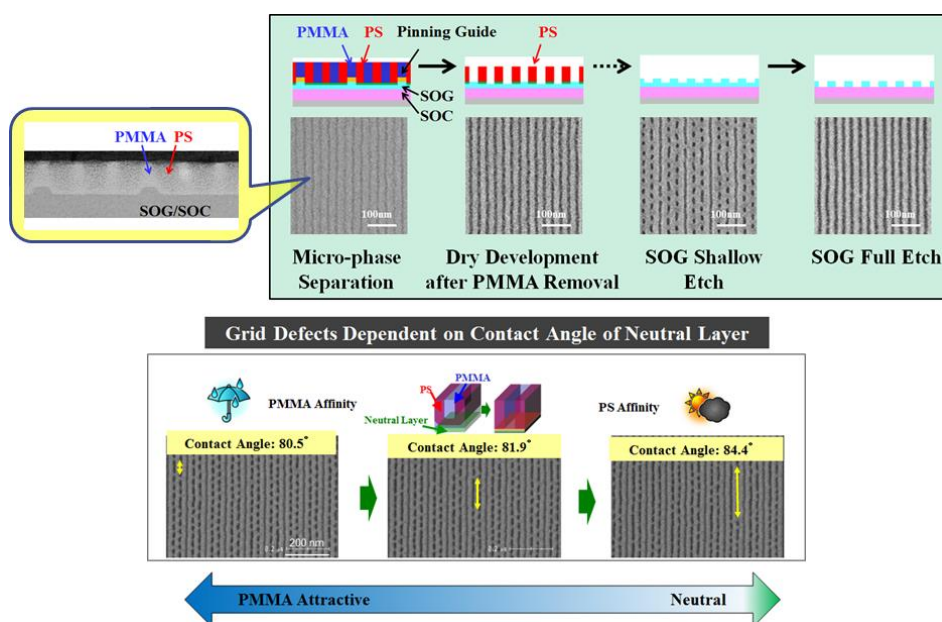
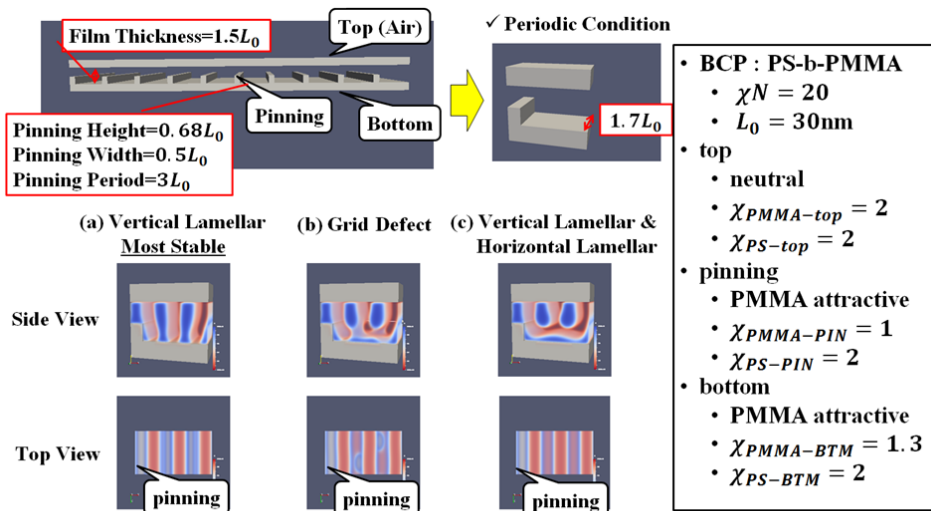


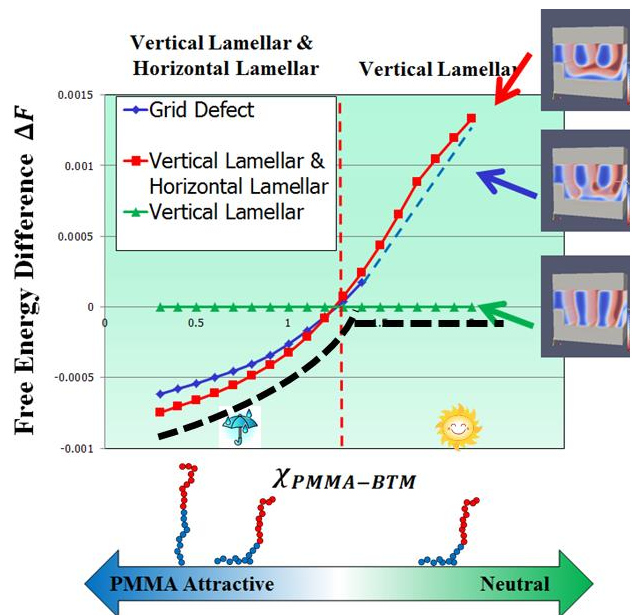
図 III.2.1.3-3-27 COOL プロセスにおける井桁欠陥

図 III.2.1.3-3-28 に COOL プロセスにおける井桁欠陥の SCFT シミュレーション条件を示す。これらの SCFT シミュレーション条件を使って、COOL プロセスにおける井桁欠陥の中性化膜依存性シミュレーションを実施した(図 III.2.1.3-3-29)。図中の縦軸の自由エネルギー差が小さいほど安定状態であり、自由エネルギー差が大きいほど準安定状態となる。したがって、COOL プロセスにおける井桁欠陥の中性化膜依存性は図中の黒点線カーブに沿って安定状態となることから、SCFT シミュレーション結果からも PS 親和性の高い中性化膜ほど井桁欠陥が減少する傾向を確認することができた。



SCFT (Self-Consistent Mean Field Theory)

図Ⅲ.2.1.3-3-28 COOL プロセスにおける井桁欠陥の SCFT シミュレーション条件



図Ⅲ.2.1.3-3-29 COOL プロセスにおける井桁欠陥の中性化膜依存性シミュレーション

一方、COOL プロセスにおける hp 15 nm PS ラインパターンの欠陥検査結果から、図Ⅲ.2.1.3-3-30 に示すような転位欠陥が数多く観察されることもわかった。図中に示すように、観察される転位欠陥はいずれも 180° の点対称でいくつかのモードで発生頻度に差があり、ガイドパターン CD 依存性があることが

わかった。これらの実験結果から、ガイドパターン CD が局所的に小さくなる場合を想定した SCFT シミュレーションを実施したところ、**図 III.2.1.3-3-31** に示すようなガイドパターン CD の局所的変動がきっかけとなり、本来 PMMA ラインが配列するべきガイドパターン上を局所的に PS ラインが跨ぐようになり、結果的に転位欠陥が発生するメカニズムを再現することができた。図中では、局所的な CD 変動があったガイドパターン上の転位欠陥発生領域で個々の BCP 鎖がどのような挙動を示した場合に転位欠陥が発生するかを予測している。すなわち、2 本の BCP 鎖の PS セグメントの末端どうしが局所的な CD 変動があったガイドパターン上で接近しやすくなった場合にお互いの末端どうしの引力により転位欠陥が発生することがわかった。したがって、転位欠陥の改善にはガイドパターン CD を高精度に制御することが必要である。

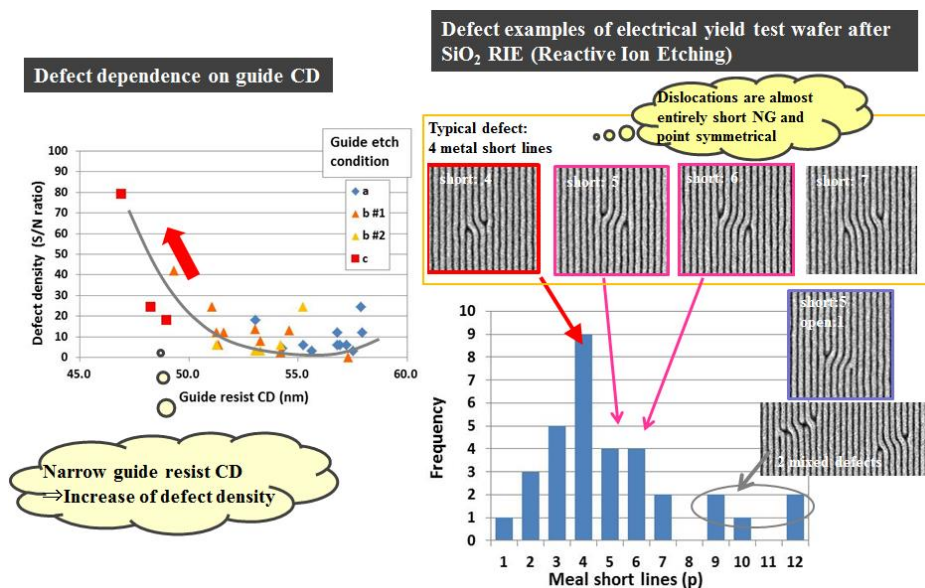
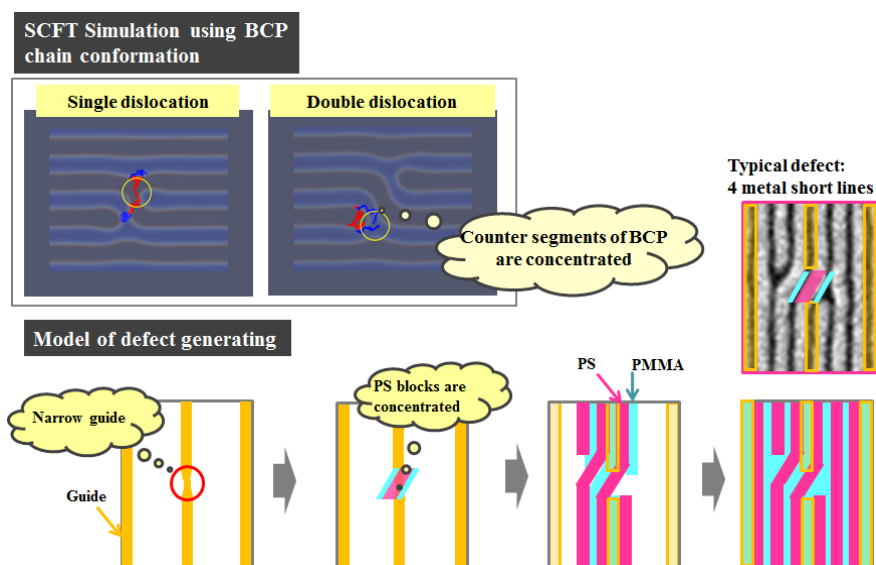


図 III.2.1.3-3-30 COOL プロセスにおける転位欠陥

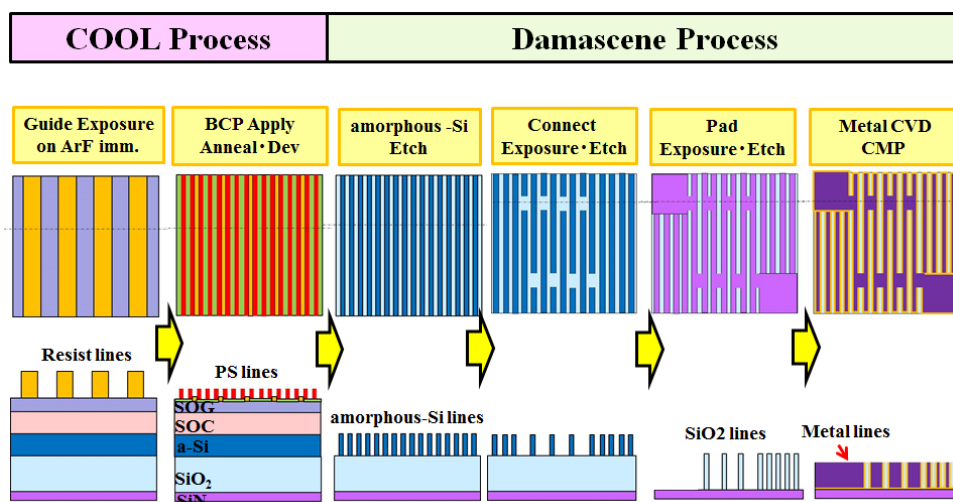


図Ⅲ.2.1.3-3-31 COOL プロセスにおける転位欠陥の発生メカニズムシミュレーション

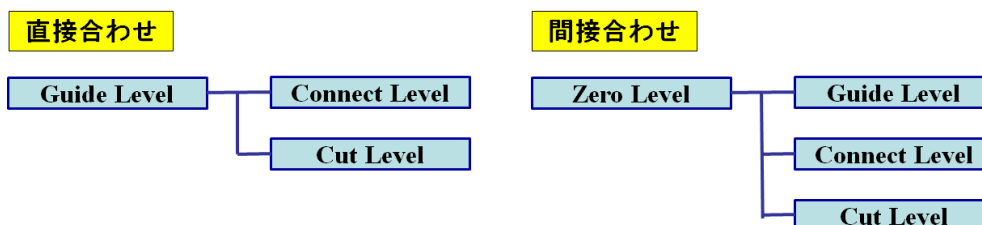
(d) hp 15 nm 金属配線回路の電気特性評価

産総研スーパークリーンルームにおいて、COOL プロセスによる hp 15 nm パターンを使って hp 15 nm 金属配線回路を試作した。hp 15 nm 金属配線回路に製造には、図Ⅲ.2.1.3-3-32 に示すように、COOL プロセスとダマシンプロセス(Damascene Process)を組み合わせたプロセスを使った。ダマシンプロセスは、主に LSI デバイスの金属配線回路の製造に広く使われている反転パターンプロセスである。したがって、COOL プロセスにおける PMMM パターン領域が、ダマシンプロセスにおいては金属配線回路パターンとなる。一般に、DSA 技術で実現できるパターン種は 1 次元のライン&スペースパターン、ホールパターン、ピラーパターンなどである。LSI デバイスの金属配線回路のような 2 次元のライン&スペースパターンを実現するために、本研究では、産総研スーパークリーンのニコン製 ArF 液浸露光装置 S610C を使って、ガイドレジストパターン露光工程、所望のライン&スペースパターンどうしを連結させるコネクtpパターン(Connect Pattern)露光工程、最終的に金属配線回路の導通検査をするためのパッドパターン(Pad Pattern)露光工程の 3 回の露光を実施した。通常、重ね合わせ露光において重ね合わせ精度を向上させるためには、ある露光工程の直前の露光工程と直接合わせが必要である。本研究では、図Ⅲ.2.1.3-3-33 に示すような直接合わせと間接合わせの両方を比較検討したところ、重ね合わせ精度の観点から、間接合わせを採用することとした。直接合わせの場合、ガイドパターンを使った BCP のマイクロ相分離後の合わせマーク内にフィンガープリント(指紋パターン)が形成され、パターン転写後の合わせ

マーク形状にダメージが生じることがわかった。合わせマーク形状のダメージは合わせマーク情報の検出誤差や重ね合わせ精度の劣化につながる。しかし、重ね合わせ精度の向上には直接合わせが必要であり、合わせマークのダメージ回避策は今後の重要な課題である。



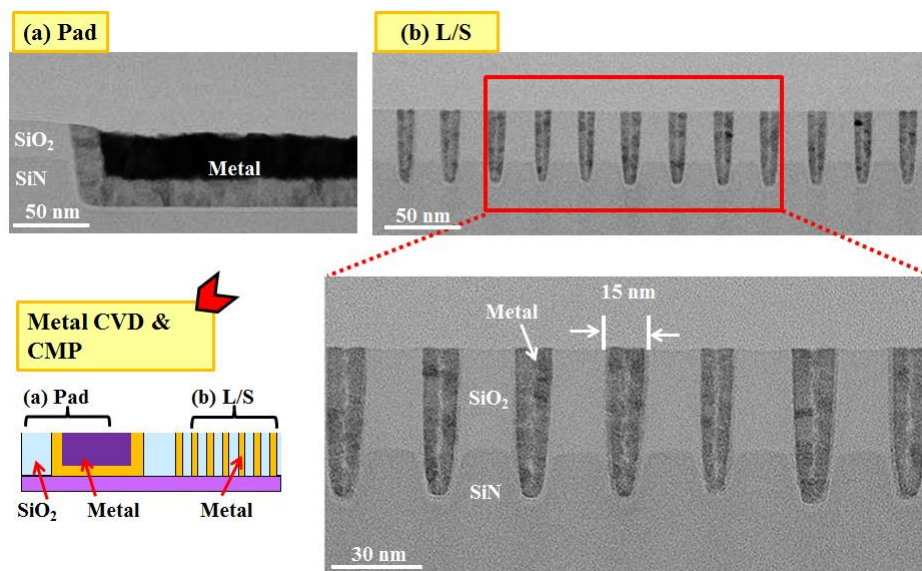
図Ⅲ.2.1.3-3-32 COOL プロセスによる hp 15 nm 金属配線回路製造プロセスフロー



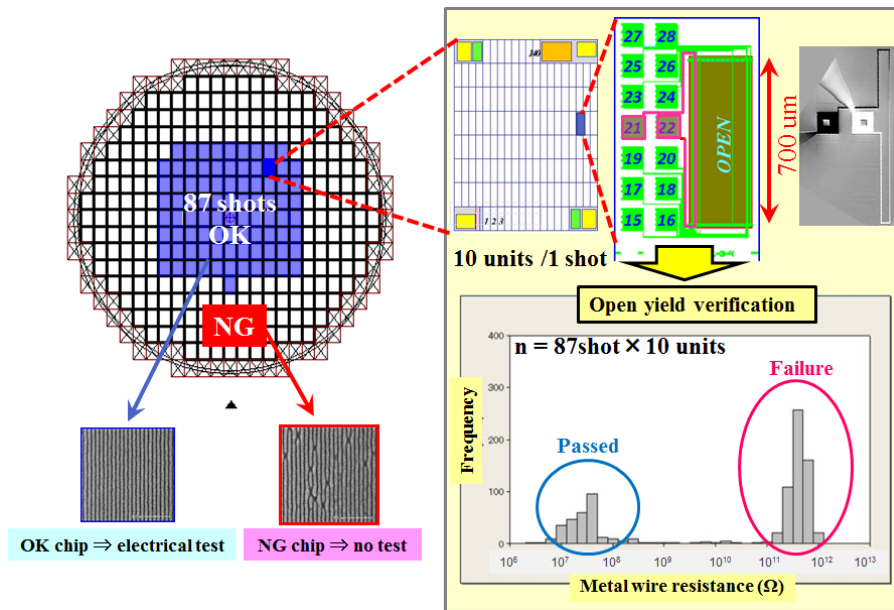
図Ⅲ.2.1.3-3-33 hp 15 nm 金属配線回路製造プロセスにおける重ね合わせ露光のアライメントツリー

図Ⅲ.2.1.3-3-34 に COOL プロセスによる hp 15 nm パターンを使って形成された金属配線回路の断面 STEM 像を示す。図中から hp 15 nm 金属配線回路が良好に形成されていることがわかる。DSA プロセスインテグレーション検証としての hp 15 nm 金属配線回路の試作は過去に例がなく世界初の試みである。図Ⅲ.2.1.3-3-35 に COOL プロセスによる hp 15 nm パターンを使った hp 15 nm 金属配線回路のウエハマップおよびチップレイアウトを示す。図中に示すように、チップ内には 10 ユニットの hp 15 nm 金

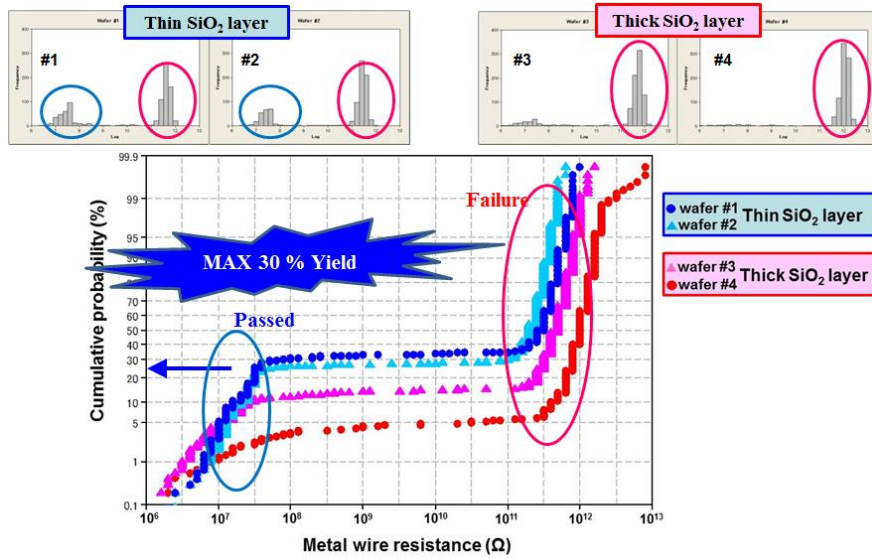
属配線回路が配置されており、金属配線長は 700 μm 、7700 μm 、70700 μm 、1120700 μm の 4 種類が配置されており、最も短いオープン/ショート TEG は 700 μm である。本研究では、hp 15 nm 金属配線回路の金属配線長が 7700 μm 以上の TEG は正常な動作が確認されなかった。各ユニットにおいて、21 番と 22 番のパッド間の電気抵抗を検出することで hp 15 nm 金属配線回路の導通検査を実施した。本研究では、300 mm ウエハ中心領域の 87 チップが hp 15 nm 金属配線回路の導通検査を実施することができた。300 mm ウエハ外周領域はパターン転写プロセス条件の最適化が十分でなく、hp 15 nm 金属配線回路の導通検査対象チップから除外した。合計 870 個の hp 15 nm 金属配線回路の導通検査をしたところ、金属配線の断線などの欠陥により高電気抵抗値を示す hp 15 nm 金属配線回路と理論値から導き出される低電気抵抗値を示す hp 15 nm 金属配線回路も二峰性の実験結果を得た。☒ III.2.1.3-3-35 に hp 15 nm 金属配線回路の電気特性歩留りを示す。本研究では、ダマシンプロセスにおける酸化膜(SiO_2)厚を 2 条件のパラメーターとした 4 枚のウエハについて hp 15 nm 金属配線回路の導通検査を実施したところ、酸化膜厚の薄い条件の 2 枚のウエハの平均で最大 30% の導通が確認できた。すなわち、BCP の規則配列だけから形成された hp 15 nm 金属配線回路が長さ 700 μm にわたって欠陥もなく、つながっていることを実験的に示すことができた。これらの一連の実験結果は、hp 15 nm レベルの DSA 技術の実用化に向けた非常に大きな前進である。



☒ III.2.1.3-3-34 hp 15 nm 金属配線回路の断面 STEM 像



図Ⅲ.2.1.3-3-35 hp 15 nm 金属配線回路のウエハマップおよびチップレイアウト

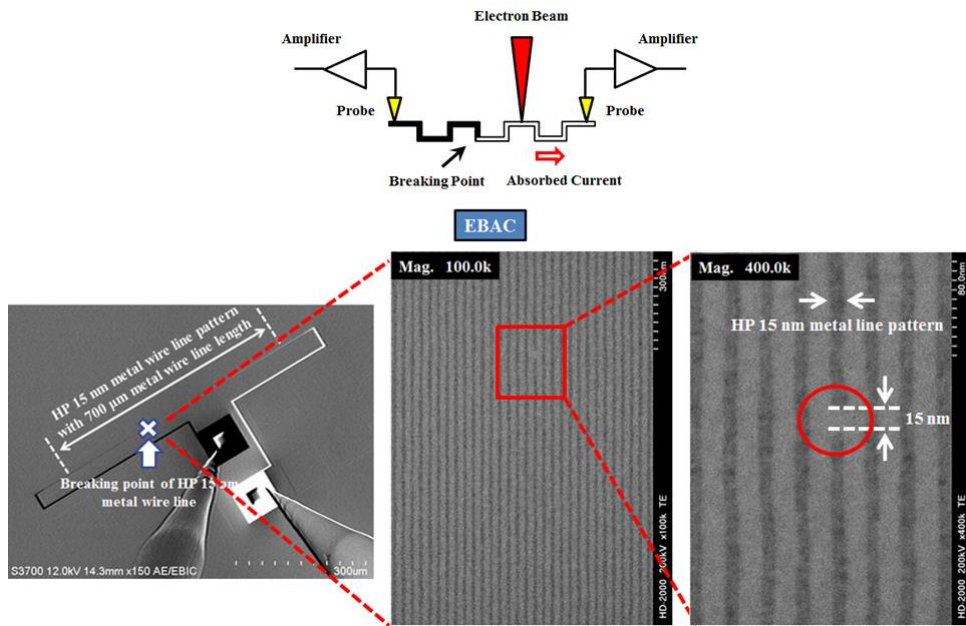


図Ⅲ.2.1.3-3-36 hp 15 nm 金属配線回路の電気特性歩留り

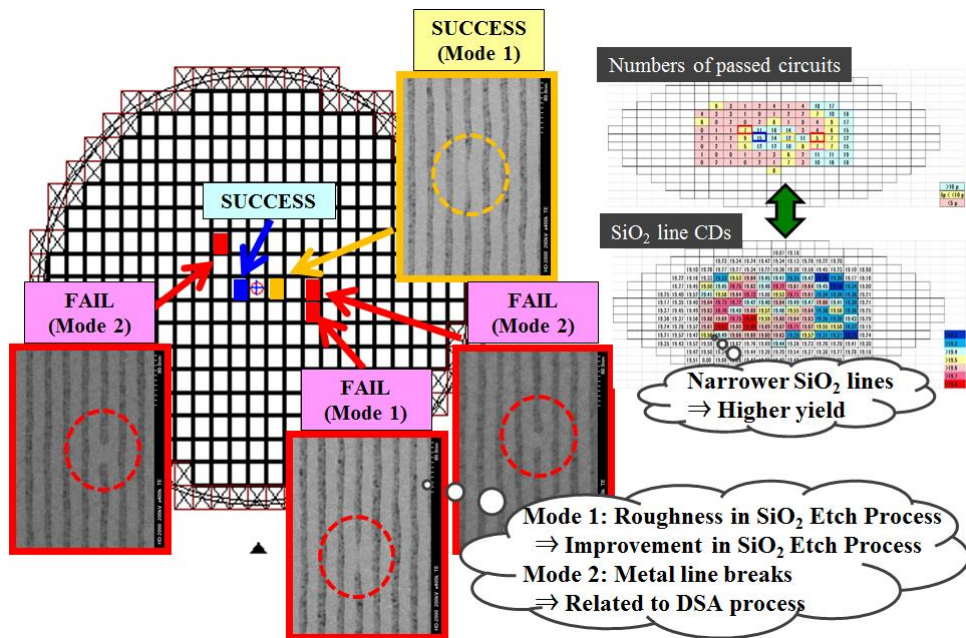
(e) hp 15 nm 金属配線回路の欠陥物理解析

COOL プロセスによるhp 15 nm 金属配線回路の試作と電気特性評価は、DSA プロセス単独の実用性評価ばかりではなく、ダマシンプロセスを通じたパターン転写性能を含めたリソグラフィ性能の総合的な実用性評価ができるという大きな利点がある。したがって、hp 15 nm 金属配線回路の電気特性歩留りが確認できたという結果は非常に重要であるが、一方で良好な導通結果が得られなかった金属配線回路の不良原因を調査することは今後の DSA プロセスの改善には更に重要である。図Ⅲ.2.1.3-3-37 はhp 15 nm 金属配線回路の欠陥物理解析を示す。本研究では、hp 15 nm 金属配線回路の欠陥物理解析に EBAC (電子ビーム吸収電流: Electron Beam Absorbed Current)解析手法を使って、良好な導通結果が得られなかった金属配線回路の不良原因を調査した。図中には EBAC 解析手法の原理図と欠陥物理解析結果の例を示している。EBAC 解析はhp 15 nm 金属配線回路の両端のパッドにそれぞれアンプに接続されたプローブを接触させ、hp 15 nm 金属配線回路に電子ビームを照射することで流れる電流を測定しながら断線箇所を特定することができる。長さ 700 μm の hp 15 nm 金属配線回路のどこかで断線箇所があれば、両端のパッドに接続されたアンプを調節することで断線箇所のコントラストを強調して正確な断線位置を特定する。図中では、長さ 15 nm 程度の断線箇所を特定できることを示している。この断線原因はおそらく井桁欠陥であろうと考えられる。図Ⅲ.2.1.3-3-38 はhp 15 nm 金属配線回路の欠陥分類を示す。300 mm ウエハマップ中には、hp 15 nm 金属配線回路が良好に導通していることから低電気抵抗値を示すチップ(SUCCESS)と、hp 15 nm 金属配線回路のどこかで断線箇所があることから高電気抵抗値を示すチップ(FAIL)を示している。hp 15 nm 金属配線回路が高電気抵抗値を示す場合の hp 15 nm 金属配線回路の平面 TEM 像には 2 種類のモードがあり、hp 15 nm 金属配線回路の線幅が徐々に細くなるモード(Mode 1)と、hp 15 nm 金属配線回路に長さ 15 nm 程度の断線箇所があるモード(Mode 2)があることがわかった。Mode 1 の原因はおそらくパターン転写工程におけるラフネス制御不足と考えられ、ガイドパターンプロセスやエッチングプロセスにおけるラフネス制御の改善が必要である。一方、Mode 2 の原因はおそらく井桁欠陥であると考えられ、BCP 界面との表面自由エネルギーが厳密に制御された中性化膜の最適化が必要である。また、ダマシンプロセスにおける酸化膜エッチングの酸化膜ライン寸法(CD)が細かい条件で hp 15 nm 金属配線回路が良好に導通しているチップが多いことから、ダマシンプロセスにおける寸法(CD)制御が重要であることがわかった。

これらの結果から、hp 15 nm DSA プロセス技術の総合的な実用化検討として、hp 15 nm DSA プロセスをインテグレーションした hp 15 nm 金属配線回路の電気特性評価を通じて、hp 15 nm DSA プロセス技術の実用化に向けた達成度と課題を明確に把握することができた。更に、これらの結果は、最終目標である hp 10 nm DSA プロセスをインテグレーションした hp 10 nm 金属配線回路の電気特性評価の成功にむけて大きく貢献した。



図Ⅲ.2.1.3-3-37 hp 15 nm 金属配線回路の EBAC による欠陥物理解析



図Ⅲ.2.1.3-3-38 hp 15 nm 金属配線回路の欠陥分類

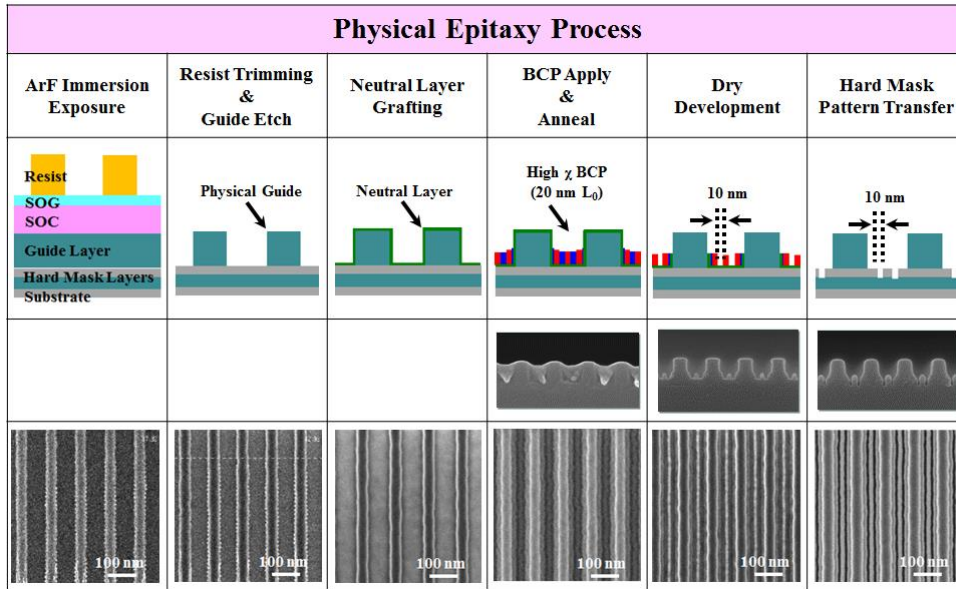
[4] hp 10 nm DSA プロセス技術開発

(a) hp 10 nm DSA プロセス

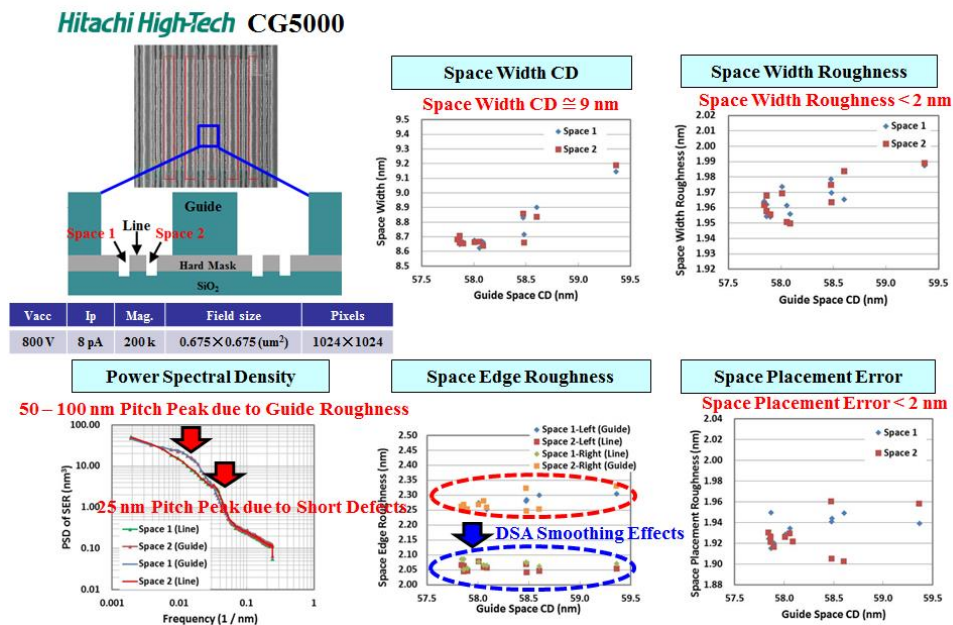
現在、hp 15 nm レベルの DSA プロセスにおいて最も実用化に向けた技術開発が進んでいる PS-*b*-PMMA は、高分子溶液の熱統計力学理論である Flory-Huggins の平均場理論における高分子間の相互作用を表す無次元パラメーター χ はアニール温度 150°C で $\chi=0.03$ 程度であり、お互いのセグメント間に働く斥力あるいは引力が十分に強くないため、PS-*b*-PMMA 単独ではせいぜい hp 12 nm レベルがマイクロ相分離限界である。したがって、hp 12 nm より微細なパターン形成に向けて高 χ BCP 開発が必要となる。本研究では、新規開発した hp 10 nm レベルのマイクロ相分離が可能な高 χ BCP と中性化膜を使って hp 10 nm DSA プロセスを開発した。PS-*b*-PMMA を使った hp 15 nm レベルの DSA プロセスは世界中で実用化に向けた技術開発が進んでいるが、高 χ BCP を使った hp 10 nm レベルの DSA プロセスは世界的にも未だに確立されていない。

本研究では、新規開発した hp 10 nm レベルのマイクロ相分離が可能な高 χ BCP と中性化膜を使った hp 10 nm DSA 物理ガイドプロセスを世界に先駆けて独自に開発した。図 III.2.1.3-3-39 に示すように、hp 10 nm DSA 物理ガイドプロセスは ArF 液浸露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターン(100 nm ピッチのライン&スペースパターン)を下地基板のガイドパターンにパターン転写した後に中性化膜を塗布した上で、BCP 塗布およびアニール処理することで hp 10 nm レベルのラインピッチ分割を可能にする。PS-*b*-PMMA を使った hp 15 nm レベルのラインピッチ分割である LiNe プロセス、SMART プロセス、COOL プロセスは共に、ArF 液浸露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターンを所望のサイズまでスリミングエッチングする必要があるが、hp 10 nm レベルまでスリミングエッチングした場合には寸法(CD)制御性やラフネス制御性が非常に困難となる。本研究においても、新規開発した hp 10 nm レベルのマイクロ相分離が可能な高 χ BCP と中性化膜を使った hp 10 nm COOL プロセスを初期検討として実施したが、スリミングエッチングした場合の寸法(CD)制御性やラフネス制御性に十分なプロセスマージンを得ることができなかった。一方、物理ガイドプロセスはラインピッチ分割の程度に応じて ArF 液浸露光装置のような既存のリソグラフィ装置を用いて露光されたレジストパターンを下地基板のガイドパターンにパターン転写するだけで、必ずしもレジストパターンを hp 10 nm レベルまでスリミングエッチングする必要はないという利点がある。

図Ⅲ.2.1.3-3-40に hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおけるスペースパターンラフネス(SWR、SER)と局所的な位置ずれのガイドパターン寸法依存性を示す。日立ハイテクノロジーズ製 CD-SEM CG5000 を使って、hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおける BCP 塗布およびアニール処理後にドライエッチング装置で除去(ドライ現像)したスペースパターン寸法(CD)を多点測定した結果、スペースパターン寸法は 9.0 nm、スペースパターン寸法ラフネス(SWR)と局所的な位置ずれはほぼすべてのガイドパターン寸法において 2.0 nm 以下であった。また、スペースパターン寸法ラフネス(SER)はほぼすべてのガイドパターン寸法において 2.1 nm 以下であった。スペースパターン寸法ラフネス(SER)はガイドパターンに近接する Space 1-Left (Guide)と Space 2-Right (Guide)のグループ、ガイドパターンに近接しない Space 1-Right (Line)と Space 2-Left (Line)にグループに分類した場合、両方のグループの差は約 0.25 nm 程度あることがわかった。これは、ガイドパターンに近接するグループはガイドパターンのラフネスの影響を直接受ける一方で、ガイドパターンに近接しないグループはガイドパターンのラフネスの影響を受けにくく、DSA 本来のマイクロ相分離によるセグメント界面のスムージング効果と考えられる。更に、スペースパターン寸法(CD)の多点測定データをパワースペクトル密度(Power Spectral Density)解析を実施したところ、50 nm から 100 nm ピッチ領域に特徴的なピークと 25 nm ピッチ領域に特徴的なピークが観察された。前者は比較的長周期のピークであることからガイドパターンのラフネスが原因と考えられる。後者は比較的短周期のピークであることから井桁欠陥のような埋め込み欠陥が原因と考えられる。DSA プロセスの実用化に向けて、hp 10 nm レベルの次世代 LSI デバイス量産へ展開するには、SWR と SER ともに少なくとも 1.0 nm 以下に改善する必要がある。SWR と SER の更なる改善にはガイドパターン寸法精度、断面プロファイルやラフネスの向上に加えて、BCP や中性化膜材料の改良が必要と考えられる。



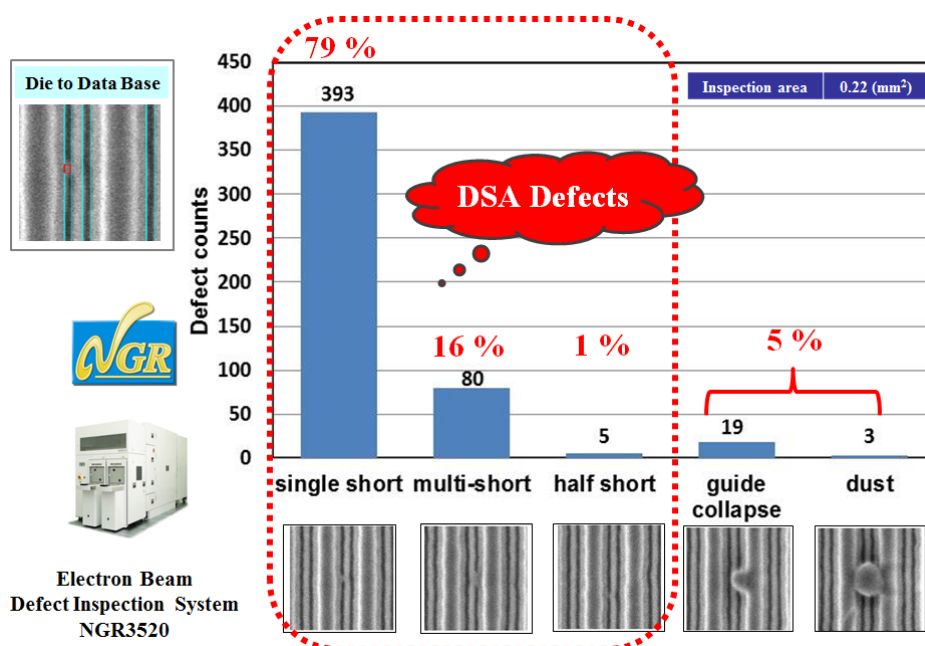
図Ⅲ.2.1.3-3-39 hp 10 nm 物理ガイドプロセスフロー



図Ⅲ.2.1.3-3-40 hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおけるラフネスと局所的な位置ずれのガイドパターン寸法依存性

(b) hp 10 nm DSA プロセスにおける欠陥評価

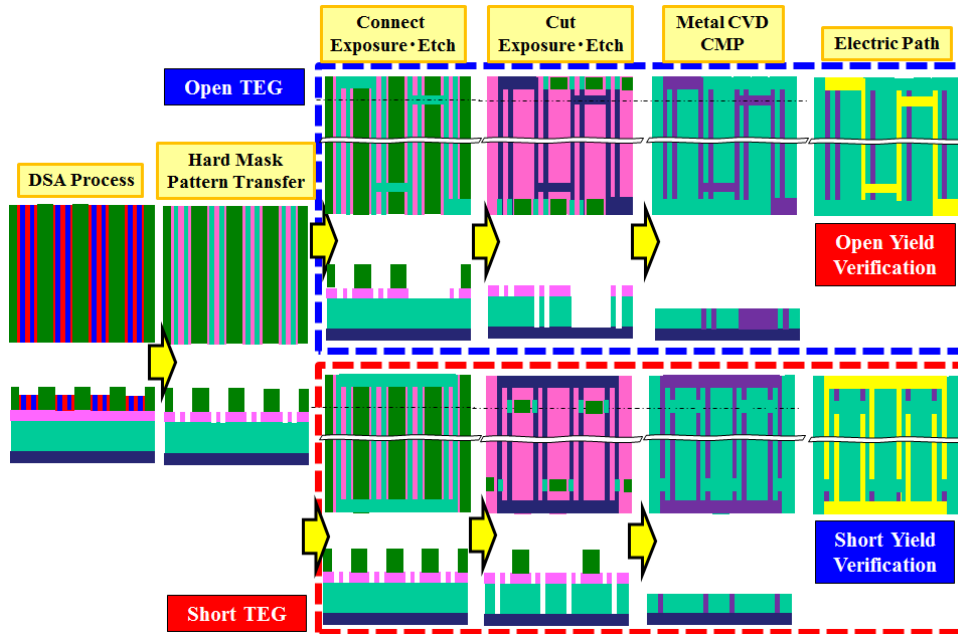
hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおけるドライ現像後の hp 10 nm スペースパターンの欠陥分類を Ⅲ.2.1.3-3-41 に示す。NGR 製電子ビーム欠陥検査装置 NGR3520 を使って、hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおける BCP 塗布およびアニール処理後にドライエッチング装置で除去(ドライ現像)したスペースパターンの欠陥分類をした結果、単一ショート欠陥(single short)、複数ショート欠陥(multi-short)、ガイド倒れ欠陥(guide collapse)、半分ショート欠陥(half short)、ダストの順で発生頻度が多いことがわかった。欠陥発生メカニズムを考えた場合、ショート系欠陥は DSA プロセス起因の可能性が高い。DSA プロセスの実用化に向けて、hp 10 nm レベルの次世代 LSI デバイス量産へ展開するには、欠陥密度(1cm²あたりの欠陥数)は開発段階でも少なくとも 1 個/cm²以下に改善する必要がある。欠陥密度の更なる改善にはガイドパターン寸法精度、断面プロファイルやラフネスの向上に加えて、BCP や中性化膜材料の改良が必要と考えられる。



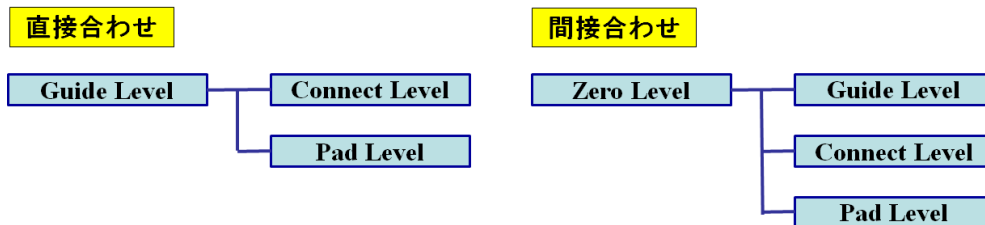
Ⅲ.2.1.3-3-41 hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおけるドライ現像後の hp 10 nm スペースパターンの欠陥分類

(c) hp 10 nm DSA 金属配線回路の電気特性評価

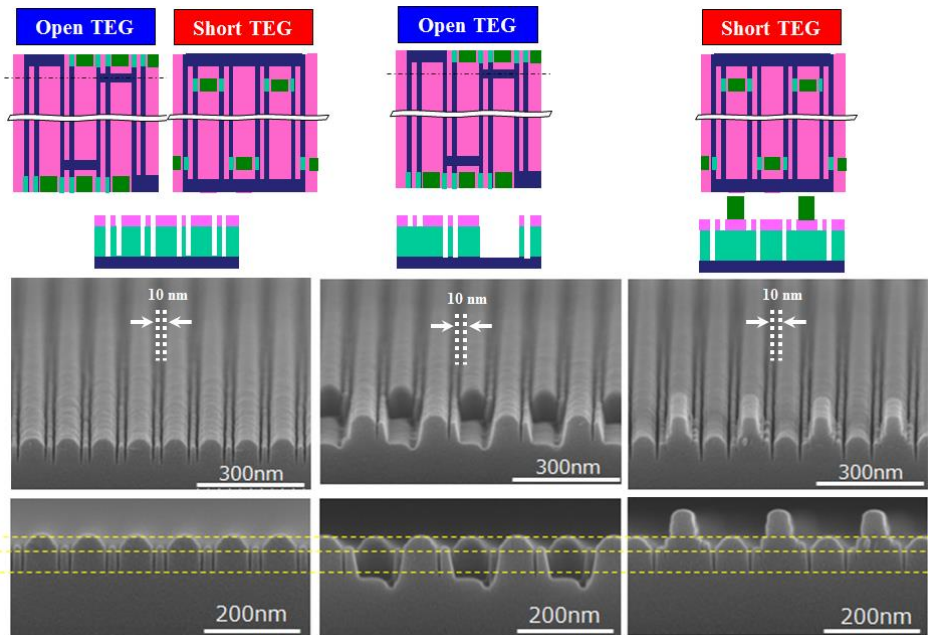
産総研スーパークリーンルームにおいて、物理ガイドプロセスによる hp 10 nm パターンを使って hp 10 nm 金属配線回路を試作した。hp 10 nm 金属配線回路に製造には、[図Ⅲ.2.1.3-3-42](#) に示すように、hp 10 nm 物理ガイドプロセスとダマシンプロセス(Damascene Process)を組み合わせたプロセスを使った。ダマシンプロセスは、主に LSI デバイスの金属配線回路の製造に広く使われている反転パターンプロセスである。したがって、hp 10 nm 物理ガイドプロセスにおいてドライエッチング装置で除去(ドライ現像)したスペースパターン領域が、ダマシンプロセスにおいては金属配線回路パターンとなる。一般に、DSA 技術で実現できるパターン種は 1 次元のライン&スペースパターン、ホールパターン、ピラーパターンなどである。LSI デバイスの金属配線回路のような 2 次元のライン&スペースパターンを実現するために、本研究では、産総研スーパークリーンのニコン製 ArF 液浸露光装置 S610C を使って、ガイドレジストパターン露光工程、所望のライン&スペースパターンどうしを連結させるコネクtpパターン(Connect Pattern)露光工程、所望のライン&スペースパターンを切断するカットパターン(Cut Pattern)露光工程(最終的に金属配線回路の導通検査をするためのパッドパターン(Pad Pattern)露光工程を含む)の 3 回の露光を実施した。通常、重ね合わせ露光において重ね合わせ精度を向上させるためには、ある露光工程の直前の露光工程と直接合わせが必要である。本研究では、[図Ⅲ.2.1.3-3-43](#) に示すような直接合わせと間接合わせの両方を比較検討したところ、重ね合わせ精度の観点から、間接合わせを採用することとした。直接合わせの場合、ガイドパターンを使った BCP のマイクロ相分離後の合わせマーク内にフィンガープリント(指紋パターン)が形成され、パターン転写後の合わせマーク形状にダメージが生じることがわかった。合わせマーク形状のダメージは合わせマーク情報の検出誤差や重ね合わせ精度の劣化につながる。しかし、重ね合わせ精度の向上には直接合わせが必要であり、合わせマークのダメージ回避策は今後の重要な課題である。[図Ⅲ.2.1.3-3-44](#) に hp 10 nm 金属配線回路製造プロセスフローにおけるカットプロセス工程の断面 SEM 像を示す。図中に示すように、オープン TEG 用のコネクtpパターンとショート TEG 用のカットパターンが良好に形成できていることがわかった。



図Ⅲ.2.1.3-3-42 hp 10 nm 物理ガイドプロセスによる金属配線回路製造プロセスフロー



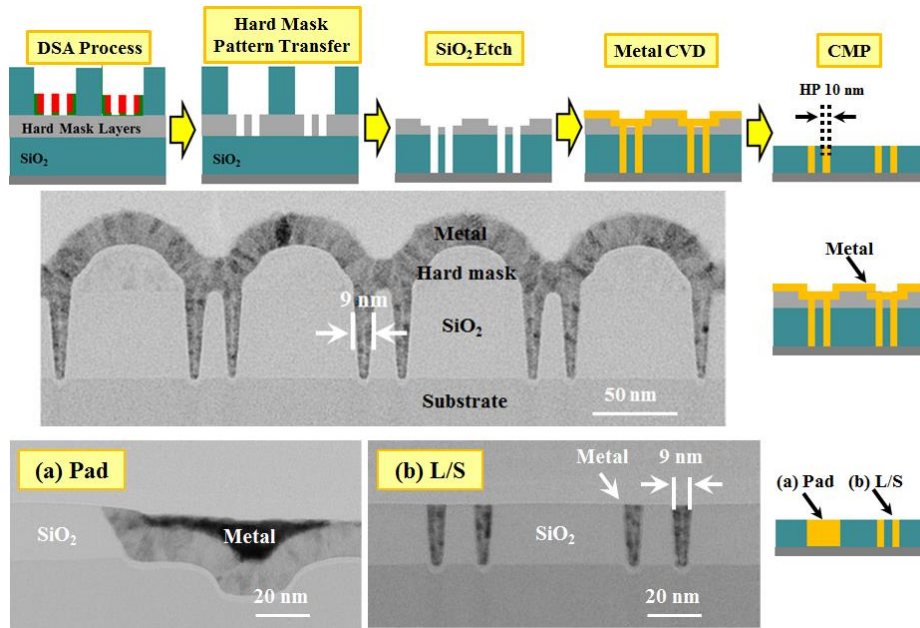
図Ⅲ.2.1.3-3-43 hp 10 nm 金属配線回路プロセスフローにおける重ね合わせ露光のアライメントツリー



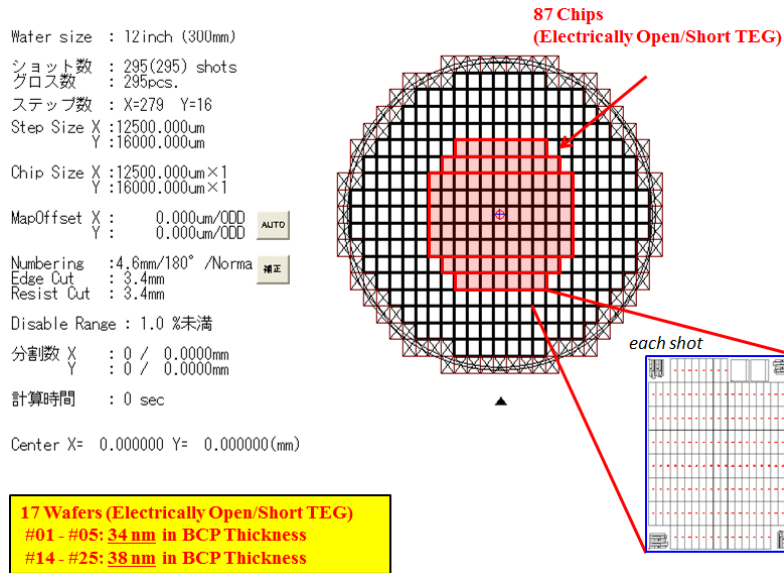
図Ⅲ.2.1.3-3-44 hp 10 nm 金属配線回路製造プロセスフローにおけるカットプロセス工程の断面 SEM 像

図Ⅲ.2.1.3-3-45 に hp 10 nm 物理ガイドプロセスによる hp 10 nm パターンを使って形成された金属配線回路の試作プロセスのメタル CVD 後と CMP 後のそれぞれの断面 STEM 像を示す。図中から金属配線幅 9 nm の金属配線回路が良好に形成されていることがわかる。DSA プロセスインテグレーション検証としての金属配線幅 9 nm の金属配線回路の試作は過去に例がなく世界初の試みである。図Ⅲ.2.1.3-3-46 に hp 10 nm 物理ガイドプロセスによる hp 10 nm パターンを使った hp 10 nm 金属配線回路のウエハマップを示す。本研究では、合計 17 枚の 300 mm ウエハ中心領域の 87 チップが hp 10 nm 金属配線回路の導通検査を実施することができた。300 mm ウエハ外周領域はパターン転写プロセス条件の最適化が十分でなく、hp 10 nm 金属配線回路の導通検査対象チップから除外した。合計 17 枚の 300 mm ウエハのうち、#1 から#5 の 5 枚の 300 mm ウエハは BCP 膜厚が 34 nm、#14 から#25 の 12 枚の 300 mm ウエハは BCP 膜厚が 38 nm の条件であった。図Ⅲ.2.1.3-3-47 に hp 10 nm 金属配線回路のチップレイアウト (オープン/ショート TEG) を示す。図中に示すように、チップ内には 142 ユニットの hp 10 nm 金属配線回路が配置されており、金属配線長は 700 μm 、7000 μm 、70000 μm 、1120000 μm の 4 種類が配置されており、最も短いオープン/ショート TEG は 700 μm である。各ユニットにおいて、それぞれ対応するパッド間の電気抵抗を検出することで hp 10 nm 金属配線回路の導通検査を実施した。図Ⅲ.2.1.3-3-48 に hp 10 nm 金属配線回路のチップレイアウト (ガイドピッチデザインレイアウト) を示す。

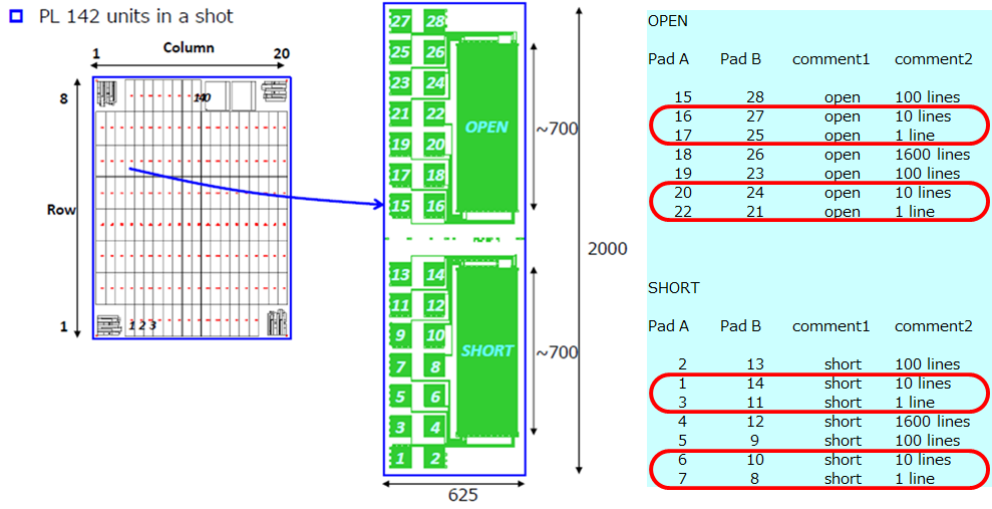
図中の R06C03 サイトはガイドパターンピッチが 100 nm (45 nm ライン& 55 nm スペース)、R06C04 サイトはガイドパターンピッチが 101 nm (45 nm ライン& 56 nm スペース)、R06C05 サイトはガイドパターンピッチが 102 nm (45 nm ライン& 57 nm スペース)の条件であった。図Ⅲ.2.1.3-3-49 に hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m オープン TEG の導通検査結果を示す。金属配線の断線などの欠陥により高電気抵抗値を示す hp 10 nm 金属配線回路と理論値から導き出される低電気抵抗値を示す hp 10 nm 金属配線回路も二峰性の実験結果を得た。図Ⅲ.2.1.3-3-50 に hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m ショート TEG の導通検査結果を示す。金属配線間の一部接続などの欠陥により低電気抵抗値を示す hp 10 nm 金属配線回路と理論値から導き出される高電気抵抗値を示す hp 10 nm 金属配線回路も二峰性の実験結果を得た。hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m オープン/ショート TEG の両方が正常に動作していることを確認するためには、hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m オープン TEG の導通検査で理論値から導き出される低電気抵抗値を示すと同時に、hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m ショート TEG の導通検査で理論値から導き出される高電気抵抗値を示す組み合わせを特定する必要がある。本研究では、hp 10 nm 金属配線回路の金属配線長が 7700 μ m 以上の TEG は正常な動作が確認されなかった。図Ⅲ.2.1.3-3-51 に hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 100 nm オープン TEG の導通検査ウエハマップを、図Ⅲ.2.1.3-3-52 に hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 101 nm ショート TEG の導通検査ウエハマップを、図Ⅲ.2.1.3-3-53 に hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 102 nm ショート TEG の導通検査ウエハマップをそれぞれ示す。これらの中から、hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m オープン/ショート TEG の両方が正常に動作していると判断できるオープン TEG を特定したところ、それぞれの図中の表に示すようなウエハマップとなった。また、hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μ m オープン TEG が正常に動作しているオープン TEG のチップ数は BCP 膜厚が 38 nm とガイドパターンピッチは 101 nm の条件で最も多いことがわかった。すなわち、これらのオープン TEG では BCP の規則配列だけから形成された hp 10 nm 金属配線回路が長さ 700 μ m にわたって欠陥もなく、つながっていることを実験的に示すことができた。これらの一連の実験結果は、hp 10 nm レベルの DSA 技術の実用化に向けた非常に大きな前進である。



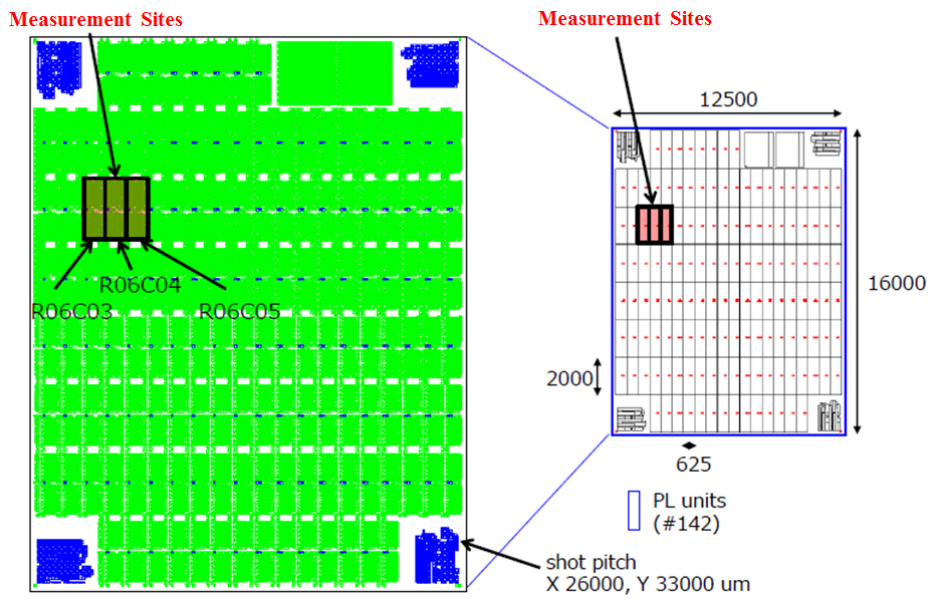
図Ⅲ.2.1.3-3-45 hp 10 nm 金属配線回路の断面 STEM 像



図Ⅲ.2.1.3-3-46 hp 10 nm 金属配線回路のウエハマップ



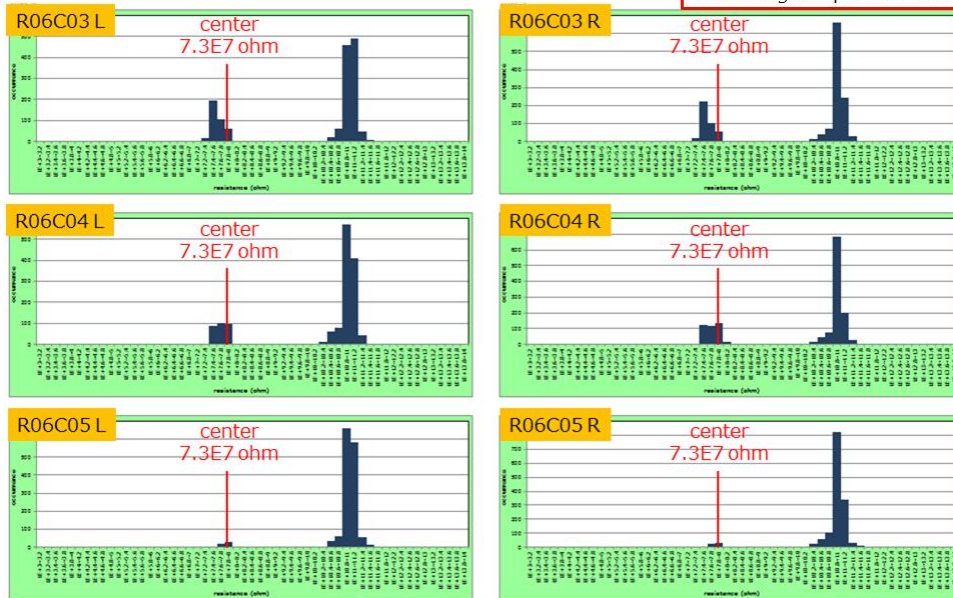
図Ⅲ.2.1.3-3-47 hp 10 nm 金属配線回路のチップレイアウト (オープン/ショート TEG)



図Ⅲ.2.1.3-3-48 hp 10 nm 金属配線回路のチップレイアウト (ガイドピッチデザインレイアウト)

Open TEG in 700 μm Length

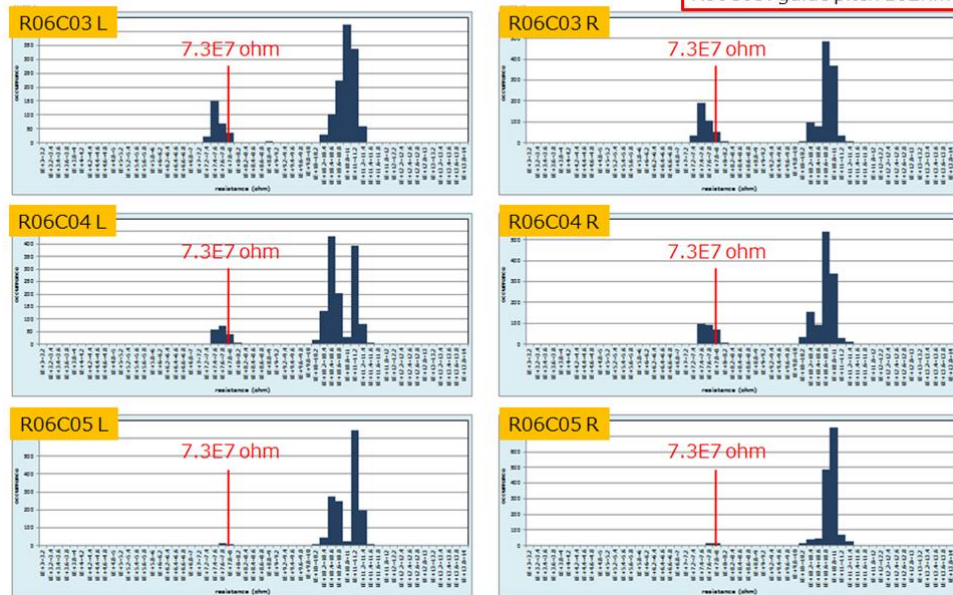
R06C03: guide pitch 100nm
R06C04: guide pitch 101nm
R06C05: guide pitch 102nm



図Ⅲ.2.1.3-3-49 hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μm オープン TEG の導通検査結果

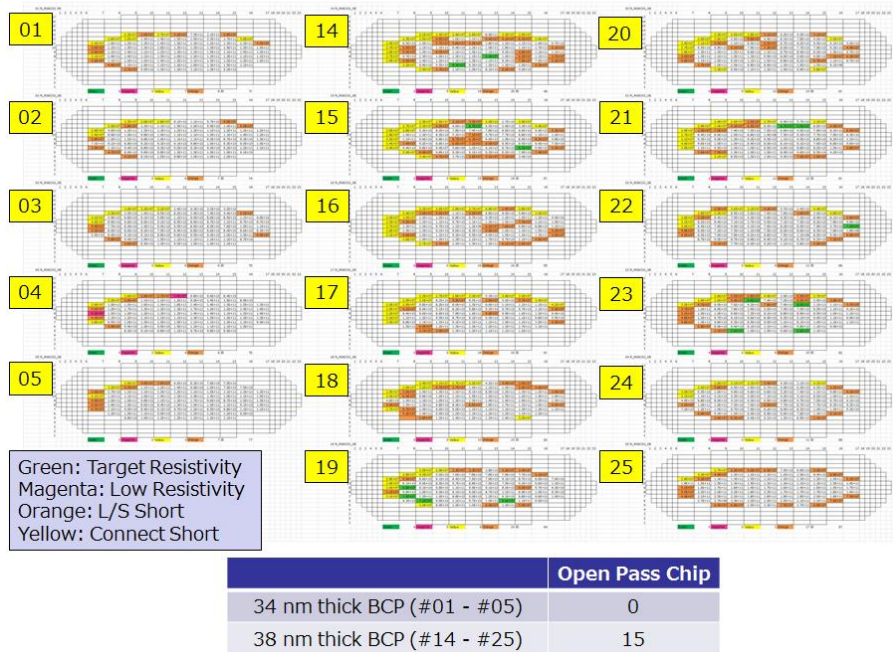
Short TEG in 700 μm Length

R06C03: guide pitch 100nm
R06C04: guide pitch 101nm
R06C05: guide pitch 102nm



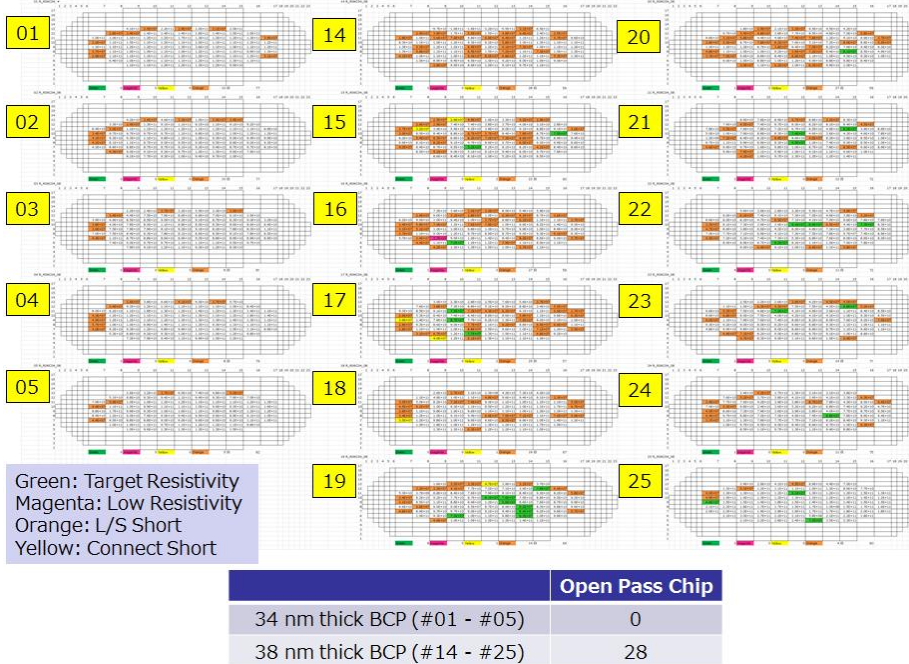
図Ⅲ.2.1.3-3-50 hp 10 nm 金属配線回路の長さ 700 μm ショート TEG の導通検査結果

Open TEG in 700 μm Length with 100 nm Guide Pitch

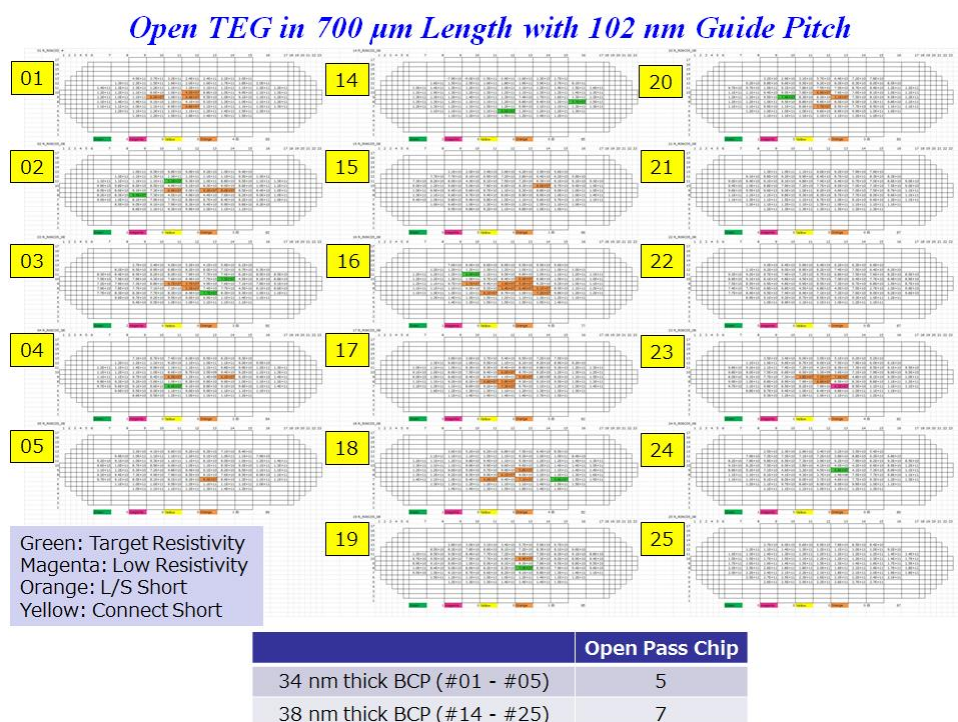


図Ⅲ.2.1.3-3-51 hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 100 nm オープン TEG の導通検査ウエハマップ

Open TEG in 700 μm Length with 101 nm Guide Pitch



図Ⅲ.2.1.3-3-52 hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 101 nm ショート TEG の導通検査ウエハマップ



図Ⅲ.2.1.3-3-53 hp 10 nm 金属配線回路のガイドパターンピッチ 102nm ショート TEG の導通検査ウエハマップ

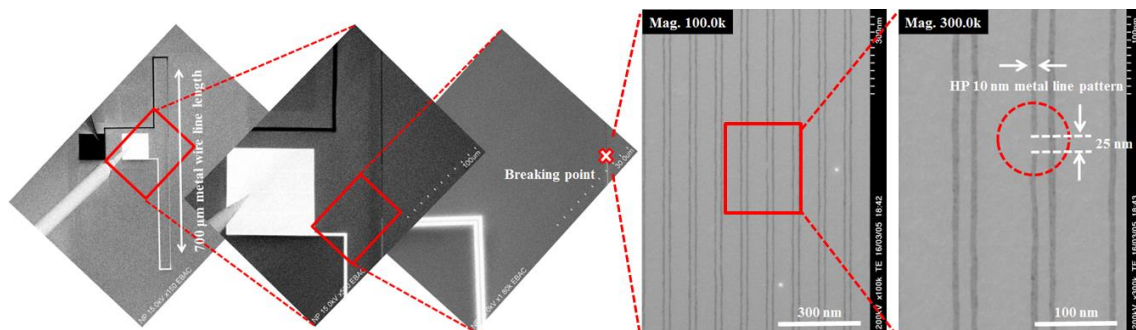
(d) hp 10 nm 金属配線回路の欠陥物理解析

hp 10 nm 物理ガイドプロセスによるhp 10 nm 金属配線回路の試作と電気特性評価は、DSA プロセス単独の実用性評価ばかりではなく、ダマシンプロセスを通じたパターン転写性能を含めたリソグラフィ性能の総合的な実用性評価ができるという大きな利点がある。したがって、hp 10 nm 金属配線回路の電気特性歩留りが確認できたという結果は非常に重要であるが、一方で良好な導通結果が得られなかった金属配線回路の不良原因を調査することは今後の DSA プロセスの改善には更に重要である。☒

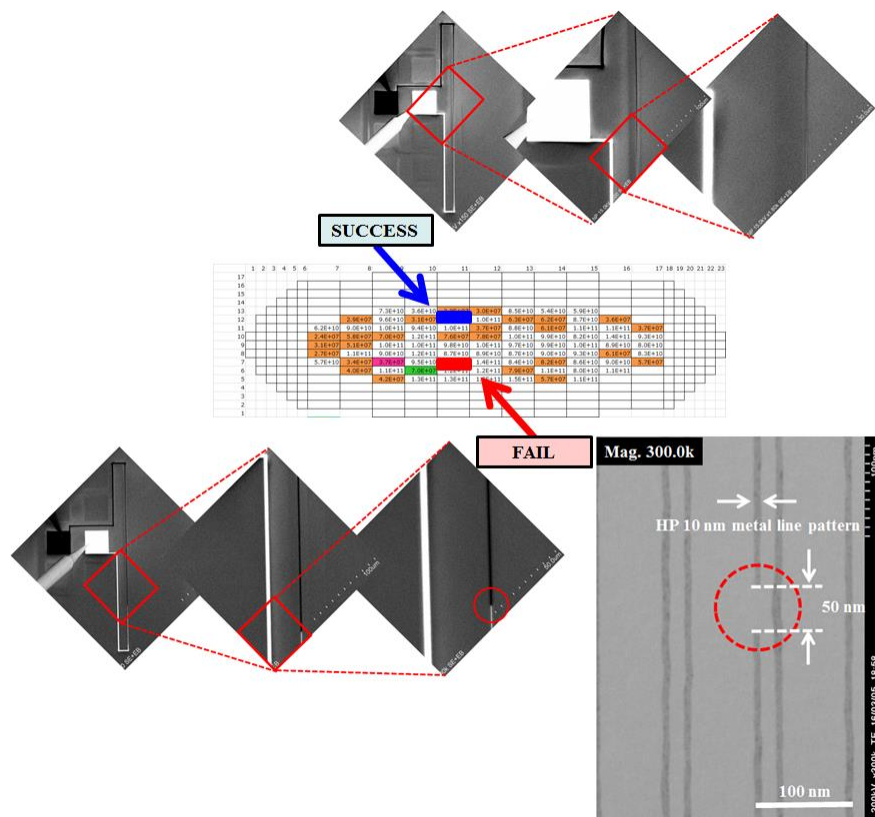
Ⅲ.2.1.3-3-54 はhp 10 nm 金属配線回路の欠陥物理解析を示す。本研究では、hp 10 nm 金属配線回路の欠陥物理解析に EBAC 解析手法を使って、良好な導通結果が得られなかった金属配線回路の不良原因を調査した。EBAC 解析はhp 10 nm 金属配線回路の両端のパッドにそれぞれアンプに接続されたプローブを接触させ、hp 10 nm 金属配線回路に電子ビームを照射することで流れる電流を測定した

が断線箇所を特定することができる。長さ $700 \mu\text{m}$ の hp 10 nm 金属配線回路のどこかで断線箇所があれば、両端のパッドに接続されたアンプを調節することで断線箇所のコントラストを強調して正確な断線位置を特定する。図中では、長さ 25 nm 程度の断線箇所を特定できることを示している。この断線原因はおそらく図Ⅲ.2.1.3-3-40 に示したパワースペクトル密度(Power Spectral Density)解析の結果から、25 nm ピッチ領域に特徴的なピークが観察される比較的短周期の井桁欠陥のような埋め込み欠陥が原因と考えられる。図Ⅲ.2.1.3-3-55 は hp 10 nm 金属配線回路の欠陥分類を示す。300 mm ウエハマップ中には、hp 10 nm 金属配線回路の長さ $700 \mu\text{m}$ オープン TEG が良好に導通していることから低電気抵抗値を示すチップ(SUCCESS)と、hp 10 nm 金属配線回路の長さ $700 \mu\text{m}$ オープン TEG がどこかで断線箇所があることから高電気抵抗値を示すチップ(FAIL)を示している。hp 10 nm 金属配線回路の長さ $700 \mu\text{m}$ オープン TEG が良好に導通しているチップ(SUCCESS)では EBAC 解析によって断線箇所を特定することができなかった。すなわち、hp 10 nm 金属配線回路が長さ $700 \mu\text{m}$ にわたって欠陥もなく、つながっていることを実験的に示している。一方、hp 10 nm 金属配線回路の長さ $700 \mu\text{m}$ オープン TEG がどこかで断線箇所があるチップ(FAIL)では、EBAC 解析によって断線箇所を特定することができた。この断線原因はおそらく図Ⅲ.2.1.3-3-40 に示したパワースペクトル密度(Power Spectral Density)解析の結果から、50 nm から 100 nm ピッチ領域に特徴的なピークが観察される比較的長周期のガイドパターンのラフネスが原因と考えられる。

これらの結果から、hp 10 nm DSA プロセス技術の総合的な実用化検討として、hp 10 nm DSA プロセスをインテグレーションした hp 10 nm 金属配線回路の電気特性評価を通じて、hp 10 nm DSA プロセス技術の実用化に向けた達成度と課題を明確に把握することができた。これらの結果からは、hp sub-10 nm DSA プロセスの実用化に向けた数多くの課題を抽出することができた。



図Ⅲ.2.1.3-3-54 hp 10 nm 金属配線回路の EBAC による欠陥物理解析



図Ⅲ.2.1.3-3-55 hp 10 nm 金属配線回路の欠陥分類

[5] 総括

DSA 材料を用いたhp 11 nm以細のパターン形成材料・プロセス技術開発において、本研究で開発したhp 15 nmの DSA プロセスによる hp 15 nm の金属配線回路の試作を実現し、hp 15 nm の金属配線回路の電気特性検証により DSA プロセスにおける欠陥発生機構の解明を実施した。更に、本研究で開発したhp 10 nmの DSA プロセスによる hp 10 nm の金属配線回路の試作を実現し、hp 10 nm の金属配線回路の電気特性検証により DSA プロセスにおける欠陥発生機構の解明を実施した。また、hp 15 nm の金属配線回路と hp 10 nm の金属配線回路のそれぞれの電気特性検証を通じて、DSA プロセスの実用化に向けた数多くの課題を抽出することができた。DSA プロセス開発では、東京工業大学や北海道大学の hp sub-10 nm に向けた DSA 材料研究、京都大学の 3 次元 DSA 欠陥解析研究、産総研の

DSA シミュレーション研究の成果を大いに有効活用した。これらの知見は、今後の hp sub-10 nm レベルの DSA 技術の実用化に向けて大いに貢献するものである。

[6] 学会発表一覧

学会発表

国内件数：17 件、海外件数 25 件

論文発表 (Proceeding 含む)：19 件

特許提案：19 件

以上

研究発表・講演 一覧

Date(発表日)	Meeting Title (発表先)	Presentation title (タイトル)	Presenter (発表者)
2/25/2014	SPIE 2014 Advanced Lithography @ San Jose	Process optimization for directed self-assembly lithography using dissipative particle dynamics and self-consistent field theory	K. Kodera et al.
2/25/2014	SPIE 2014 Advanced Lithography @ San Jose	Dry development of high- χ block copolymers for directed self-assembly	Y. Kasahara et al.
2/26/2014	SPIE 2014 Advanced Lithography @ San Jose	Sub-10nm patterning process using directed self-assembly with high- χ block copolymers	N, Kihara et al.
5/22/2014	NGL Meeting of JSAP @ Tokyo Institute of Technology	SPIE Advanced Lithography 2014 Report	H. Sato
5/27/2014	The 58 th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication (EIPBN 2015) @ Washington D. C.	A Novel sub-10 nm Half Pitch Pattern Transfer Process using Directed Self-Assembly Lithography	K. Kobayashi et al.
7/9/2014	The 33 rd International Conference of Photopolymer Science and Technology @ Chiba Univ.	Process Evaluation for Directed Self-assembly Lithography using Simulation Method based on Self-consistent Field Theory	K. Kodera et al.
7/17/2014	NGL 2014 Workshop of JSAP @ Tokyo Institute of Technology	Sub-10 nm Line Patterning using Directed Self-assembly Lithography	T. Azuma et al.
9/17/2014	JSAP Autumn 2014 @ Hokkaido Univ.	Sub-10 nm Patterning using Directed Self-assembly Lithography	T. Azuma et al.
9/24/2014	40 st Micro and Nano Engineering (MNE 2015) @ Lausanne	A novel simple sub-15 nm line and space patterning process using directed self-assembly	Y. Seino et al.
9/25/2014	Polymer Meeting of SPS @ Nagasaki Univ.	Directed Self-assembly Lithography using Block Copolymer	T. Azuma et al.

11/7/2014	27 th International Microprocesses and nanotechnology Conference (MNC 2015) @ Fukuoka	300mm Wafer Performance of a Coordinated Line Epitaxy (COOL) Process using Directed Self-assembly	Y. Seino et al.
11/25/2014	4 th French Brazilian Meeting on Polymers @ Florianopolis	Directed Self-assembly (DSA) Lithography for Half Pitch (HP) Sub-15 nm Patterning using Block Copolymer (BCP)	T. Azuma et al.
11/27/2014	36 th International Symposium on Dry Process @ Yokohama	Sub-10nm Directed Self-assembly Lithography using High χ (chi) Block Copolymers	H. Sato et al.
12/3/2014	2014 Material Research Society Fall Meeting @ Boston	A Simulation Study for Defects in Sub-15 nm Line-Space using Directed Self-assembly	H. Kanai et al.
12/3/2014	2014 Material Research Society Fall Meeting @ Boston	Directed Self-assembly Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern Fabrication Process	H. Sato et al.
12/4/2014	SEMI Technology Symposium 2014 @ Tokyo Big Sight	Directed Self-assembly Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern fabrication Process	T. Azuma
2/24/2015	SPIE Advanced Lithography 2015 @ San Jose	Sub-10nm Fine Lines and Spaces Patterning using Directed Self-assembly	H. Sato et al.
2/24/2015	SPIE Advanced Lithography 2015 @ San Jose	A Simulation Study for 3D-Defects in Directed Self-assembly Lithography	H. Kanai et al.
2/25/2015	SPIE Advanced Lithography 2015 @ San Jose	RIE Challenges for Sub-15 nm Lines and Spaces Patterning using Directed Self-assembly Lithography with Coordinated Line (COOL) Epitaxy Process	Y. Kasahara et al.
2/26/2015	SPIE Advanced Lithography 2015 @ San Jose	Directed Self-assembly Lithography using Coordinated Line (COOL) Epitaxy Process	Y. Seino et al.
4/24/2015	The Technical Association of Photopolymers, Japan @ Tokyo University of Science	Directed Self-assembly Lithography	T. Azuma
5/5/2015	International Forum for Industries 2015 (Nano-electronic	Directed Self-assembly (DSA) Lithography for Half Pitch (HP) Sub-15 nm Patterning using Block	T. Azuma et al.

	Biomaterials) @ Grenoble	Copolymer (BCP)	
5/27/2015	The 59 th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication (EIPBN 2015) @ San Diego	Electrical Yield Verification of Half Pitch 15 nm Patterns using Directed Self-assembly of PS- <i>b</i> -PMMA	T. Azuma et al.
5/27/2015	The 59 th International Conference on Electron, Ion and Photon Beam Technology & Nanofabrication (EIPBN 2015) @ San Diego	Defect Annihilation dynamics in Directed Self-assembly Lithography using Simulation method Based on Self-consistent Field Theory and Dissipative Particle Dynamics	K. Kodera et al.
6/1/2015	Japan-France Joint Symposium 2015 @ Hokkaido Univ.	Directed Self-assembly Lithography using Block Copolymer	T. Azuma et al.
6/25/2015	The 32 nd International Conference of Photopolymer Science and Technology @ Makuhari Messe	Challenge to the Micro-phase Separation Limit of PS- <i>b</i> -PMMA by doping with hydrophilic materials	Y. Kawamonzon et al.
6/26/2015	The 32 nd International Conference of Photopolymer Science and Technology @ Makuhari Messe	Simulation Study on Defectivity in Directed Self-assembly Lithography	K. Kodera et al.
6/26/2015	The 32 nd International Conference of Photopolymer Science and Technology @ Makuhari Messe	Vertical Oriented Lamellar Formation of Fluorine- and Silicon-containing Block Copolymers without Neutral Layers	T. Hayakawa et al.
7/6/2015	NGL 2015 Workshop of JSAP @ Tokyo Institute of Technology	Sub-15nm line patterning using DSA with coordinated line epitaxy (COOL) process	Y. Kasahara et al.
7/6/2015	NGL 2015 Workshop of JSAP @ Tokyo Institute of Technology	Simulation studies on embedded defects in lamellar nanostructures	H. Kanai et al.
9/15/2015	Polymer Meeting of SPS @ Tohoku Univ.	Fabrication of Half Pitch 15 nm Semiconductor Device Circuit Patterns using Directed	T. Azuma et al.

		Self-assembly (DSA) Lithography	
9/22/2015	41 st Micro and Nano Engineering (MNE 2015) @ Hague	Characterization of Half Pitch 15 nm Metal Wire Circuit fabricated by Directed Self-assembly of PS-b-PMMA	Y. Kasahara et al.
10/26/2015	1 st International Symposium on DSA @ Leuven	Half pitch 15 nm metal wire circuit fabricated using directed self-assembly of PS-b-PMMA	Y. Seino et al.
10/27/2015	1 st International Symposium on DSA @ Leuven	Directed Self-assembly (DSA) Lithography for Half Pitch (HP) Sub-15 nm Patterning using Block Copolymer (BCP)	K. Kodera et al.
11/12/2015	28 th International Microprocesses and nanotechnology Conference (MNC 2015) @ Toyama	Investigation of the micro-phase separation limit of PS-b-PMMA doped with organic acid compounds for sub-10 nm line density multiplication	Y. Kawamonzen et al.
2/23/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	Fabrication of Half Pitch Sub-15 nm Metal Wire Circuits using Directed Self-Assembly of Block Copolymers with Line Density Multiplication	T. Azuma et al.
2/23/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	Simulation study of defective states analyzing polymer chain conformations in direct self-assembly lithography	K. Kodera et al.
2/23/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	Grapho-epitaxial sub-10nm line and space patterning using lamellar-forming Si containing block copolymer	H. Sato et al.
2/23/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	Sub-10 nm lines and spaces patterning using grapho-epitaxial directed self-assembly of lamellar block copolymers	Y. Seino et al.
2/23/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	RIE Challenge for Fabrication of Half Pitch Sub-10 nm Lines and Spaces Pattern using Directed Self-Assembly	Y. Kasahara et al.
2/24/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @ San Jose	Advanced CD-SEM Metrology for Qualification of Lamellar DSA Patterning	T. Kato et al.
2/24/2016	SPIE Advanced Lithography 2016 @	Carbohydrate-based block copolymer self-assemblies: Sub-10	T. Gomez et al.

	San Jose	nm highly nanostructured thin films and DSA patterning	
--	----------	---	--

論文発表 一覧 (Proceeding 含む)

学会誌名	論文名	著者名	巻(号)
Proc. SPIE	Defect-aware process margin for chemo-epitaxial directed self-assembly lithography using simulation method based on self-consistent field theory	K. Kodera et al.	9049 904926 2014
J. Photopolym. Sci. Technol.	Process Evaluation of Directed Self-assembly Lithography using Simulation Method based on Self-consistent Field Theory	K. Kodera et al.	27 (1) 31 2014
Proc. 2014 Material Research Society Fall Meeting	A simulation study for defects in sub-15 nm line-space using directed self-assembly	H. Kanai et al.	1750 2014
Proc. 2014 Material Research Society Fall Meeting	Directed Self-assembly Lithography for Half Pitch Sub-15 nm Pattern Fabrication Process	H. Sato et al.	1750 2014
Proc. SPIE	RIE challenges for sub-15 nm line-and-space patterning using directed self-assembly lithography with coordinated line epitaxy (COOL) process	Y. Kasahara et al.	9428 94280S 2015
Proc. SPIE	Directed self-assembly lithography using coordinated line epitaxy (COOL) process	Y. Seino et al.	9423 9423-41 2015
Microelectron. Eng.	A novel simple sub-15 nm line-and-space patterning process flow using directed self-assembly technology	Y. Seino et al.	134 27-32 2015
J. Vac. Sci. Technol. B	Electrical Yield Verification of Half Pitch 15 nm Patterns using Directed Self-assembly of PS- <i>b</i> -PMMA	T. Azuma et al.	33 (6) 06F302-1 2015

J. Vac. Sci. Technol. B	Simulation study on defect annihilation dynamics in directed self-assembly lithography	K. Kodera et al.	33 (6) 06F303 2015
J. Micro/Nanolith. MEMS MOEMS	Sub-10-nm patterning process using directed self-assembly with high χ block copolymers	N. Kihara et al.	14 (2) 023502 2015
J. Photopolym. Sci. Technol.	A Challenge for Micro-phase Separation Limit of PS- <i>b</i> -PMMA by Doping with Hydrophilic Materials	Y. Kawamozonzen et al.	28 (5) 617 2015
J. Photopolym. Sci. Technol.	A Simulation Study on Defectivity in Directed Self-assembly Lithography	K. Kodera et al.	28 (5) 683 2015
J. Photopolym. Sci. Technol.	Vertical Oriented Lamellar Formation of Fluorine- and Silicon-containing Block Copolymers without Neutral Layer	T. Hayakawa et al.	28 (5) 649 2015
Microelectron. Eng.	Characterization of half-pitch 15-nm metal wire circuit fabricated by directed self-assembly of polystyrene-block-poly(methyl methacrylate)	Y. Kasahara et al.	159 21 2016
Proc. SPIE	Simulation study of defective states analyzing polymer chain conformations in direct self-assembly lithography	K. Kodera et al.	9777 9777-62 2016
Proc. SPIE	Grapho-epitaxial sub-10nm line and space patterning using lamellar-forming Si containing block copolymer	H. Sato et al.	9777 9777-63 2016
Proc. SPIE	Sub-10 nm lines and spaces patterning using grapho-epitaxial directed self-assembly of lamellar block copolymers	Y. Seino et al.	9777 9777-64 2016

Proc. SPIE	RIE Challenge for Fabrication of Half Pitch Sub-10 nm Lines and Spaces Pattern using Directed Self-Assembly	Y. Kasahara et al.	9782 9782-24 2016
Proc. SPIE	Advanced CD-SEM Metrology for Qualification of Lamellar DSA Patterning	T. Kato et al.	9778 9778-40 2016

以上

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3) - (iv) アウトガスデータベースの構築 (兵庫県立大学への再委託)

1) 開発内容と目的

本研究では、レジスト材料の組成とEUV照射によるアウトガスコンタミネーションの関係を多様な材料構成において調査し、レジスト材料選択の指針となるデータベースを構築することを目的とする。

上記目的を達成するために、以下の項目を実施する。

(a) 化学増幅型レジストの組成とカーボンコンタミネーションの要因解析

化学増幅型レジストは、樹脂、保護基、光酸発生剤(PAG)の3要素から構成されている。それらが、カーボンコンタミネーションにそれぞれどの程度の寄与率を与えているのか、モデルレジストを用いた切り分け実験を行う。

(b) 化学増幅型レジストの構造とカーボンコンタミネーションの関係調査

化学増幅型レジストにおいて重要な構成要素であるPAGは、通常イオン性のものが多く用いられるが、樹脂に混合するタイプと、樹脂に結合するタイプがあり、樹脂に結合するタイプはさらに、アニオンを結合するタイプとカチオンを結合するタイプがある。それらの構造のちがいによってカーボンコンタミネーションに差があるかどうかを調査する。

(c) メタル含有材料によるアウトガスコンタミネーションの評価

2015年2月に、露光装置メーカーのASMLは、従来型レジスト(主として化学増幅型レジスト)のアウトガススペックを撤廃すると発表した。一方、化学増幅型レジストの解像限界により、10nm以下のパターン形成には、新しいコンセプトのレジストが必要となると考えられており、EUVの吸収が大きなメタルを導入したハイブリッド材料に注目が集まっている。メタルを含有したレジストにEUVが照射された場合にどのようなアウトガスが発生し、どのようにコンタミとなるかは未知であるため、緊急に調査を開始する必要がある。しかし、メタルレジスト自体、開発の初期段階であり、アウトガス評価のために入手できるものはない。そのため、今回は、文献等から得られる情報に基づき、金属錯体をメタルレジストの代わりとして用いてアウトガスの評価を行った。

2) 化学増幅型レジストの組成とカーボンコンタミネーションの要因解析

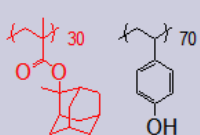
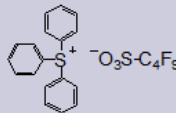

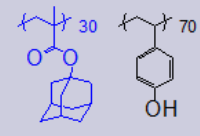
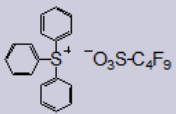
表III.2.1.3-4-1は、化学増幅レジストにおけるカーボンコンタミネーションの要因解析を行うために用いたサンプル群である。Aは、化学増幅レジストとして典型的な樹脂(Polymer)、保護基(PU)、光酸発生剤(PAG)からなるサンプルである。BはポリマーはAと同じであるがPAGを含まないもの、CはPAGは含むが脱保護しないポリマー、Dは脱保護しないポリマーのみ、という4種のサンプルの組み合わせである。解析の最終目標は、サンプルAにEUV光を照射した場合のカーボンコンタミ量(CG:Witness基板上に堆積するカーボン膜の膜厚)を、その膜厚に占める、PAGからのアウトガスによる寄与分、保護基(PU)からのアウトガスによる寄与分、ポリマーからのアウトガスによる寄与分に分離することである。それは次のように行った。

$CG(\text{サンプルA}) = CG(\text{PAG}) + CG(\text{PU}) + CG(\text{Polymer}) + CG(\text{バックグラウンド})$

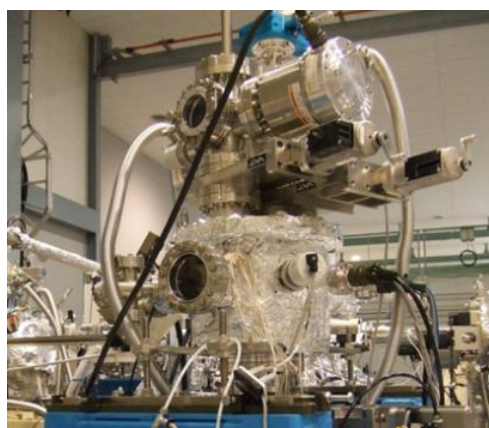
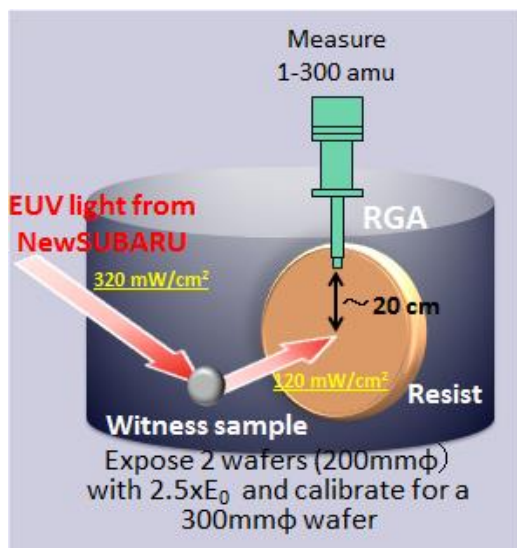
とすると、サンプルCの露光ではCG(PAG)を得ることはできるが、サンプルBの露光でCG(PU)を得ることはできない。なぜなら、CG(PU)はPAGの存在によっては始めて発生する分が大部分と考えられるからである。つまり、 $CG(\text{PU}) = CG(\text{PU by PAG}) + CG(\text{PU by EUV})$ であり、

サンプル B の露光で得られるのは CG (PU by EUV) の部分のみである。

表Ⅲ.2.1.3-4-1 化学増幅型レジストのコンタミネーション要因切り分け用サンプル

Sample	Polymer	PAG (20wt% of polymer)	Quencher (0.1mol of PAG)
A: Control			
B: PAG free	Acid labile unit	none	
C: PU free			Tri-n-octylamine
D: Polymer	Acid stable unit	none	

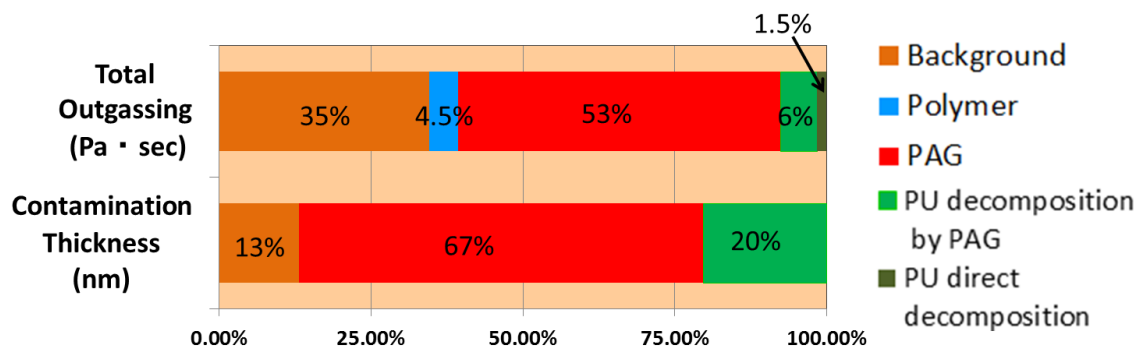
CG (PAG)はサンプル C の露光から、CG (バックグラウンド)は、レジストを用いないアウトガス実験から得られる。CG (PU by PAG)は、CG (サンプル A)から、それらを全部引いて残った分として求めることができる。そのような方法で Witness 法による EUV 照射実験を行った。実験に用いた装置の構成と写真を図Ⅲ.2.1.3-4-1 に示す。



図Ⅲ.2.1.3-4-1 アウトガス要因切り分け実験を行った HERC analysis tool

図Ⅲ.2.1.3-4-1 の装置構成図にも示されているが、実験中に発生したアウトガスは、ウェハ直上に配置した RGA (Residual Gas Analyzer) で、分子量分析も行った。また、露光中の真空計の値から、放出ガスの圧力を測定した。それらの結果から、カーボンコンタミにおける組成の要因比率が図Ⅲ.2.1.3-4-2 のように得られた。サンプル A においては、カーボンコンタミにおける PAG の要因比率が 67%と、最も大きいことが分かった。次は PAG によって分解する

保護基 (PU)からの寄与で 20%であった。発生するアウトガスの圧力 (分子数) は、PAG からが 53%、保護基からが 6%であり、保護基はガス分圧に比べてコンタミの寄与が大き一方、バックグラウンドは、分圧が 35%でもカーボンコンタミへの寄与は 13%と少なく、ポリマーはガス分圧として 4.5%あってもコンタミへの寄与はほとんどないことが分かった。



図Ⅲ.2.1.3-4-2 モデルレジスト A におけるカーボンコンタミの要因切り分け実験の結果

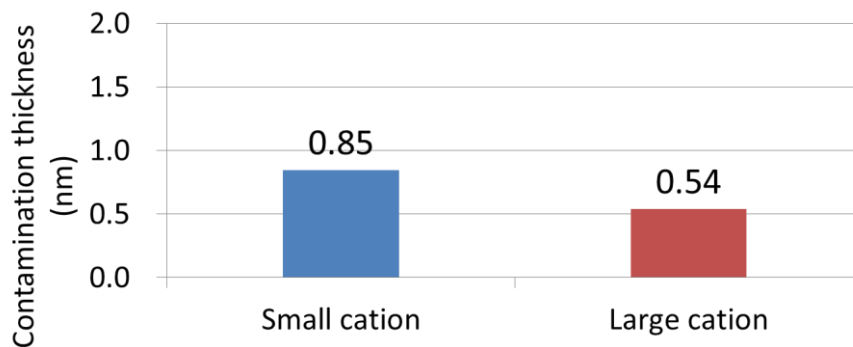
3) 化学増幅型レジストの構造とカーボンコンタミネーションの関係調査

コンタミ膜形成におけるレジスト成分寄与率の解析より、コンタミ膜形成には PAG 分解物の影響が大きいことが判明した。そこで、種々の PAG のアウトガスに対する影響を評価した。PAG 分解物の内、コンタミ膜形成に寄与するのは PAG カチオンである。まず、カチオンサイズの異なる 2 種類の PAG を準備した。(表Ⅲ. 2. 1. 3. -2-2)

表Ⅲ.2.1.3.-2-2 カチオンサイズの異なる 2 種類のアウトガス評価用レジストサンプル

Blended / Bound	Cation size	Polymer	PAG (equimolar)	E0 (mJ/cm ²)
Blend	Small			2.31
	Large			3.78

上記 2 種のレジストサンプルのアウトガス評価結果を以下に示す。(図Ⅲ.2.1.3.-2-3) カチオンサイズの小さいレジストのコンタミ膜厚は 0.82nm だったのに対し、カチオンサイズの大きいレジストでは 0.54nm と約 35%のコンタミ膜厚の減少が観察された。このことからカチオンサイズの大きい PAG を用いることでアウトガスを抑制できることが判った。



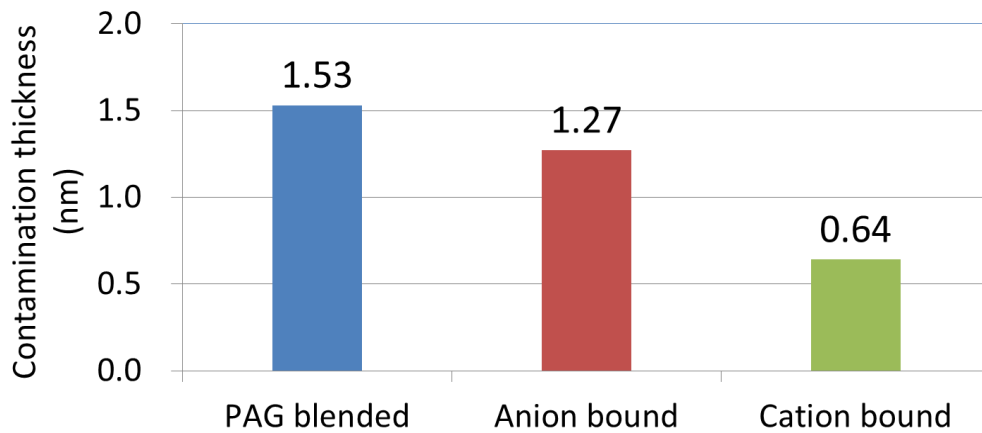
図Ⅲ.2.1.3-2-3 カチオンサイズの異なる2種類のレジストサンプルのアウトガス評価結果

表Ⅲ.2.1.3-4-3 は、化学増幅型レジストの PAG の構造とカーボンコンタミネーションの関係を調べるために用いたサンプルである。PAG Blend タイプのサンプルは、2) の要因切り分け実験で用いたサンプル A と同じである。PAG Bound タイプでは、TPS-nonaflate PAG の anion 部をメタクリル酸に結合した Anion-bound タイプと、cation 部を結合した Cation-bound タイプを用いた。Eo は、それぞれのレジストの HERC 露光装置における Dose-to-clear (感度) である。

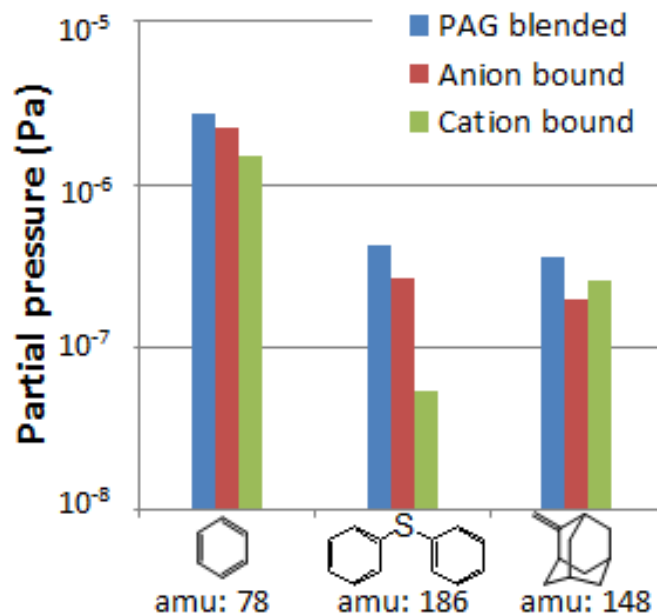
表Ⅲ.2.1.3-4-3 化学増幅レジストにおける PAG の構造とカーボンコンタミの関係を調査するためのサンプル

Blended / Bound	Sample Concept	Polymer	PAG(equimolar)	E0 (mJ/cm ²)
Blended	PAG blended			3.28
Bound	Anion bound			3.29
	Cation bound			4.28

図Ⅲ.2.1.3-4-4 に、EUV で露光したサンプルによる Witness 法でのカーボンコンタミの膜厚を示した。Blend タイプのサンプルでのカーボン膜厚は 1.53nm であったが、bound タイプは 2 種とも、Blend タイプよりは膜厚が少ないことがわかった。特に、cation bound タイプは、blend タイプの半分以下であった。図Ⅲ.2.1.3-4-5 に RGA でのアウトガス分子量分析の結果を示すが、このグラフが示すように、cation bound タイプ では、PAG の cation 成分のアウトガスである、diphenyl sulfide が特に少ないことが分かる。このことから、PAG の cation が TPS の場合は、diphenyl sulfide によるカーボンコンタミネーションが大きな比率を占めており、cation bound によってこの分子の放出が抑制されるので、カーボンコンタミの量が減少すると考えられる。

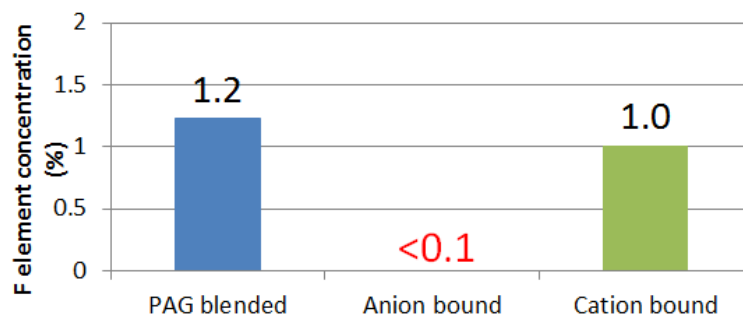


図Ⅲ2.1.3-4-4 PAGの構造のちがいとカーボンコンタミネーションの評価結果



図Ⅲ2.1.3-4-5 PAGの構造のちがいと主要なアウトガス成分の量

一方、未露光部におけるコンタミとしては、フッ素を含むPAGアニオンからなるアウトガス成分によるコンタミがこれまでに確認されている。図Ⅲ2.1.3-4-6に示すように、Witness基板へのフッ素の付着量(%)をXPSで測定すると、PAG blendタイプとCation boundタイプは同等であるのに対して、Anion boundタイプは検出限界以下であった。これは、Anionに多く含まれるF原子のboundによる放出抑制効果があることを示している。このように、boundタイプは、boundされた基に含まれる分子や元素のアウトガスを抑制する効果が期待できることが分かった。



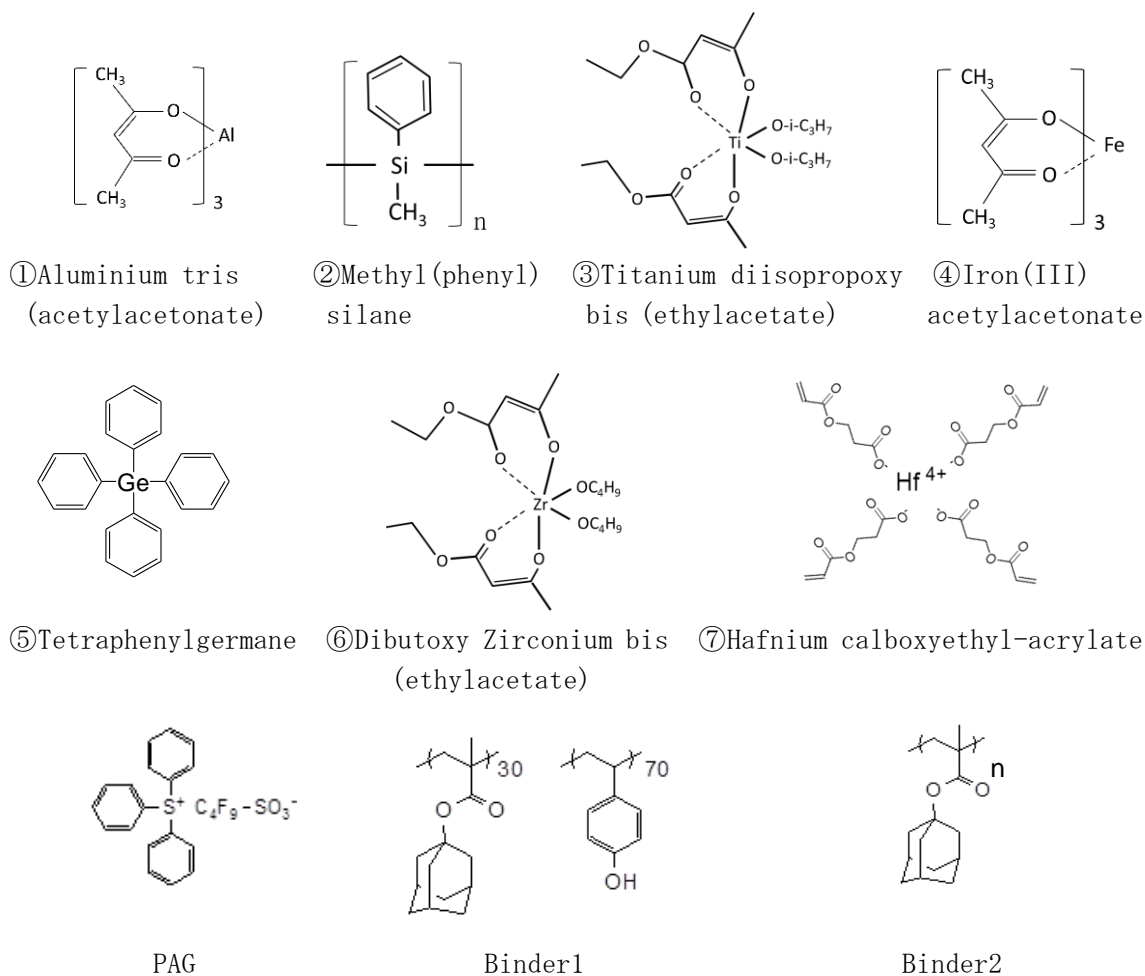
図Ⅲ2.1.3-4-6 XPSによるWitness基板上のFの付着量 (non-exposed area)

4) メタル含有材料によるアウトガスコンタミネーションの評価

表Ⅲ2.1.3-4-4および図Ⅲ2.1.3-4-7は、メタル含有材料によるアウトガスコンタミネーションの評価に用いた材料の一覧である。いくつかのサンプルでは、PAGを入れたものと入れないものの比較を行っているが、使用したPAGは、TPS-nonafplateである。また、サンプル① Aluminium tris (acetylacetonate)および⑤Tetraphenylgermaneでは、材料単体の溶媒への溶解性が悪いため、バインダーとして、化学増幅型レジストのポリマーを重量比1:1の割合で混合した。EUV露光は、化学増幅型レジストで行ったWitness法を用いたが、化学増幅型レジストでは、まずE₀ (Dose-to-clear)をもとめ、その2.5倍、または5倍のドーズでウェハを露光したのに対して、メタル含有サンプルではE₀を決めることができなかった (EUVに対する感光性が得られなかった) ため、すべてのサンプルについてウェハ1枚を25minで露光して (露光量: 25mJ/cm²) 得られた結果を比較した。

表Ⅲ2.1.3-4-4 メタル材料アウトガス評価サンプル

Name of Complex Compound	Chemical Formula	Other Components	Metal	Metal wt% (w/o PAG)	Thickness (nm)
① Aluminum tris (acetylacetonate)	Al(C ₅ H ₇ O ₂) ₃	Binder1 (100wt% to complex) w/wo PAG (5wt% to complex for w/)	Al	4	60
② Methy (phenyl) silane	C ₇ H ₁₀ Si	-	Si	23	55
③ Titanium diisopropoxy bis (ethylacetoacetate)	Ti(O-i-C ₃ H ₇) ₂ (C ₆ H ₉ O ₃) ₂	w/wo PAG (5wt% to complex for w/)	Ti	11	60
④ Iron (III) Acetylacetonate	Fe(C ₅ H ₇ O ₂) ₃	w/wo PAG (10wt% to complex for w/)	Fe	16	50
⑤ Tetraphenylgermane	Ge(C ₆ H ₅) ₄	Binder2 (100wt% to complex)	Ge	10	-
⑥ Dibutoxy Zirconium bis (ethylacetate)	Zr(OC ₄ H ₉) ₂ (C ₆ H ₉ O ₃) ₂	w/wo PAG (5wt% to complex for w/)	Zr	18	65
⑦ Hafnium calboxyethyl-acrylate	Hf(CH ₂ CHCO ₂ (CH ₂) ₂ CO ₂) ₄	w/wo PAG (10wt% to complex for w/)	Hf	26	65

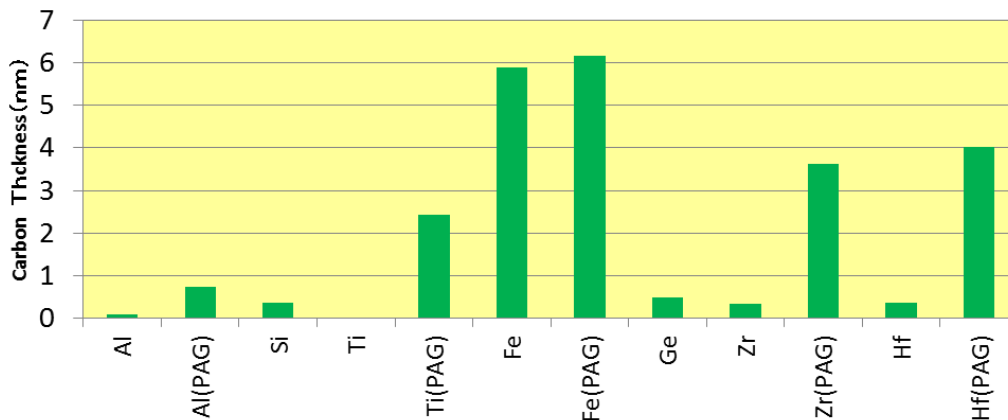


図Ⅲ2.1.3-4-7 メタル材料アウトガス評価サンプルの構造式

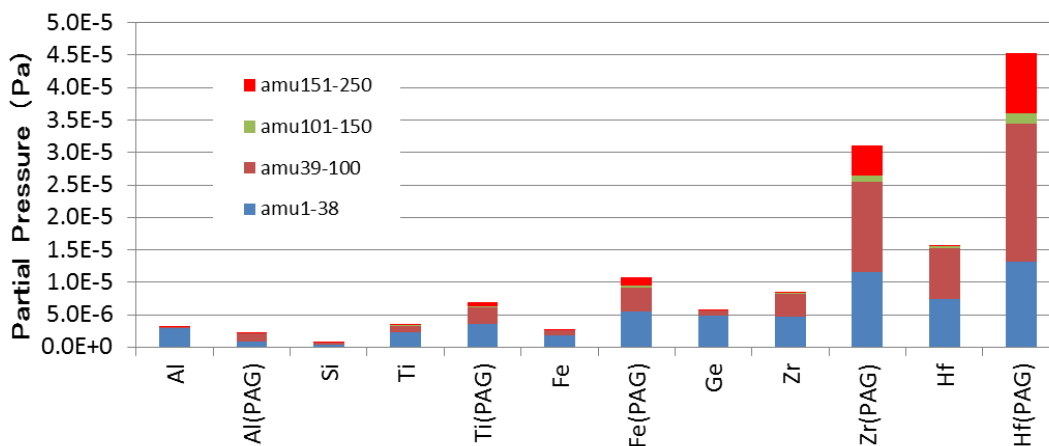
図Ⅲ2.1.3-4-8 は Witness 基板に付着したカーボンコンタミ膜厚の測定結果である。結果から、Iron(III)Acetylacetonate 以外は、PAG なしのカーボンコンタミは少なく、PAG を添加すると、化学増幅型レジスト並みのカーボンが Witness 基板上に成長することが分かった。

図Ⅲ2.1.3-4-9 は、露光中のアウトガスの分子量分布を RGA で解析し、分子量領域で区切った分圧で色分けして示したものである。棒グラフの高さ（全アウトガス量）が高いものは概ねカーボンコンタミネーションの膜厚も多いが、定量的な関係を見出すことは難しい。特に、Iron (III) Acetylacetonate が PAG のありなしにかかわらず大きなカーボンコンタミネーションを示した原因は、もともと昇華性のある材料であることが一因と考えられるものの、それだけでは十分な説明が困難であり、検討が必要である。

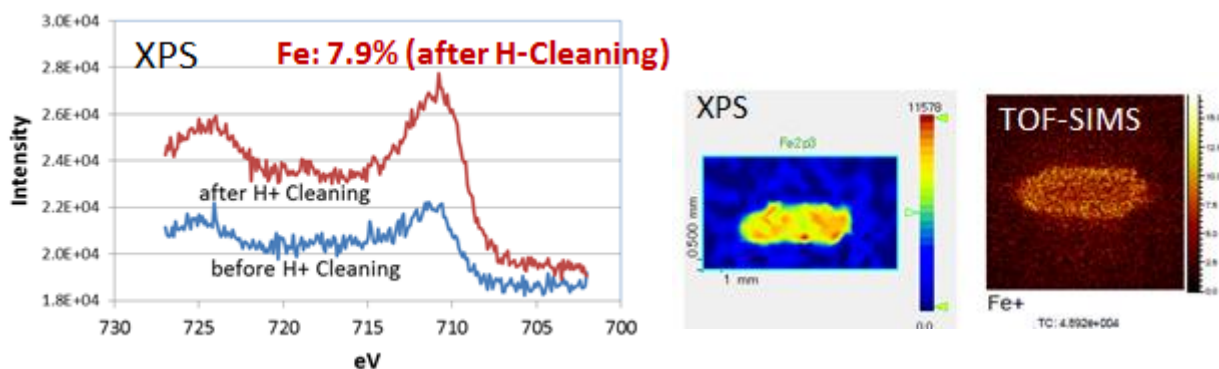
メタル含有材料に対しては、カーボンコンタミネーションの量以上に、メタルそのものの、真空部材（特に露光機のミラー）への付着が問題である。今回のサンプルでは、Fe、Ge、Si の Witness 基板への付着が認められた。Fe に関しては、図Ⅲ2.1.3-4-10 に示すように H-cleaning でクリーニングされないことが確認された。Ge も H-cleaning でクリーニングされない徴候があり、メタルの付着は今後詳細に調査する必要があることが分かった。



図Ⅲ2.1.3-4-8 メタル含有サンプルへの EUB 照射による Witness 基板のカーボンコンタミ膜厚



図Ⅲ2.1.3-4-9 メタル含有サンプルへの EUB 照射によるアウトガスの分子量分布



図Ⅲ2.1.3-4-10 EUV 露光した Iron(Ⅲ)Acetylacetonate による Witness 基板上的 Fe の検出結果
 (左 : H-cleaning 前後の XPS によるピーク強度、右 : H-cleaning 前の Witness 基板 EUV 露光領域の Fe マッピング)

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3)-(v) 材料設計(大阪大学への再委託)

レジストのテスト露光パターンからレジスト内に形成される潜像を推定し、スループットと歩留りの最適化を行えるアルゴリズムを確立する。最適化された潜像を得るための、解像度・LER・感度・EL間の最適化及び、そのための材料設計指針を得る。さらに、レジストパラメーターから解像度・LER・感度・ELおよびレジスト欠陥の発生確率の予測を可能にするアルゴリズムを開発する。

[1] RLS及び欠陥と潜像との関係の解析手法高度化

本研究で取り扱う解像度・LER・感度・ELおよびレジスト欠陥の発生確率のうち、通常のレジスト評価で得られるSEM画像から、実用レベルでレジスト欠陥の発生確率を予測するためには、レジスト反応機構に忠実なシミュレーションを高精度に行うことが必要である。そのため、EIDEC から提供される露光結果(SEM画像)の解析を行い、解析手法の高度化、特に高精度化を行った。

高精度化の一環として、光学コントラスト及び熱化距離の確率統計効果に与える影響を評価するとともに、効果の定量化を可能とした。光学コントラストの劣化によりLERが増加することが知られているが、光学コントラストの劣化はレジスト欠陥の発生確率も増加させ、その影響はLERの場合よりも大きいことが明らかになった。熱化距離に関しては、パターンサイズに応じて最適な熱化距離があることがこれまでに報告されていたが、最適熱化距離は解像度だけではなく、酸発生剤濃度と感度にも依存することを明らかにした(図 III.2.1.3-5-1)。

さらに、高精度化の一環として、サブ10nm加工の理論予測を行い、サブ10nm実現のためには二次電子による感光点、つまり、酸発生剤の増加が必須であることを明らかにした(図 III.2.1.3-5-2)。酸発生剤濃度の増加は通常レジスト性能の劣化を伴うため、性能劣化を誘起しない酸発生剤の添加技術が今後の重要な開発課題となる。

解析手法の高度化に関して、EIDEC 標準レジストの露光後パターンのSEM解析を行い、SEM解析によって得られる潜像と現像その場観察によって得られる現像中の表面形状の揺らぎを比較可能とした(図 III.2.1.3-5-3)。

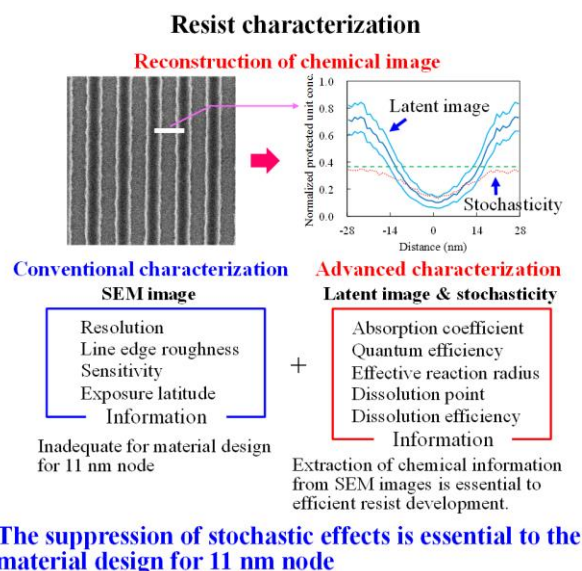


図 III.2.1.3-5-1:レジスト高解像度化のためのパラメーター検証

Dependence of LER on half-pitch

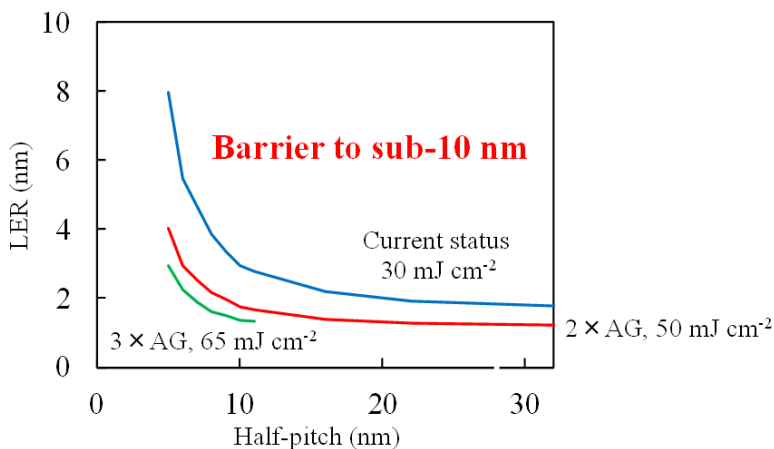


Fig. Dependence of LER on half-pitch. The proportionality constant f_{LER} was 0.2. The optical contrast was 1.0. The effective reaction radius for deprotection was 0.1 nm.

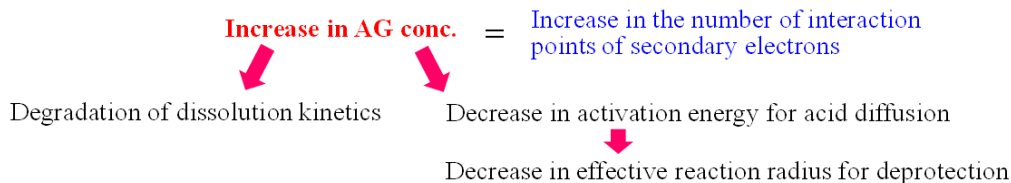
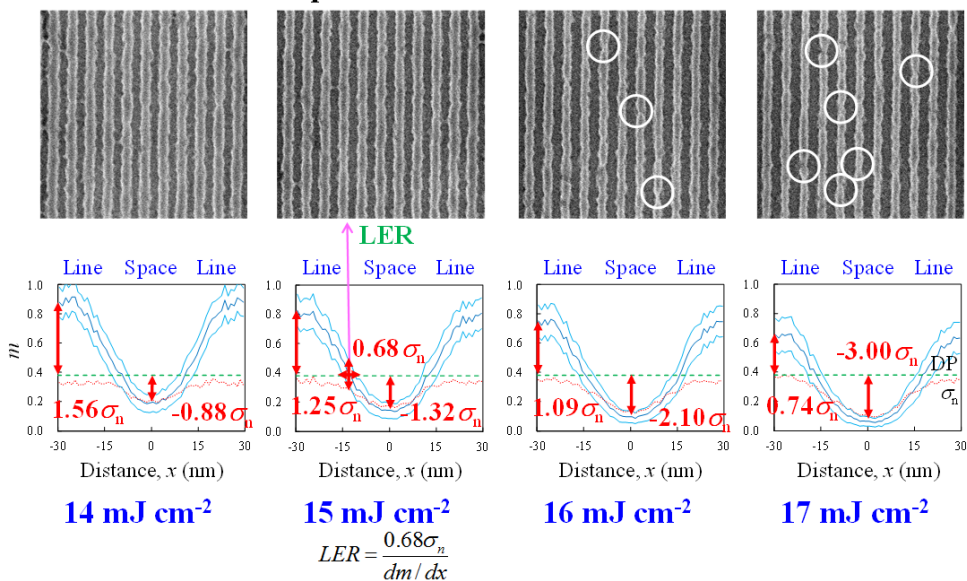


図 III.2.1.3-5-2: sub10nm パターン解像のための材料設計

Relationship between stochastic effects and protected unit fluctuation



Pinching started to appear.
Bridges were eliminated.

図 III.2.1.3-5-3: SEM 画像と潜像との関係

[2] RLS 及び欠陥発生確率の予想を可能とするアルゴリズム開発

シミュレーション高精度化の一環として、電子の熱化距離の取り扱いを可能とし、サブ 10nm 加工の理論予測を行った(図 III.2.1.3-5-4)。サブ 10nm 実現のために必要と考えられる二次電子による感光点についての詳細について検討を行った。サブ 10nm における LER、レジスト欠陥の発生確率と電子の熱化距離の関係を解明し、サブ 10nm の量産を実現するためには、熱化距離の短縮が求められ、熱化距離の短縮のためには金属等の添加によるレジストの高密度化が必要になると考えられることを明らかにした(図 III.2.1.3-5-5)。

感光点を増加させるためには、酸発生剤濃度の増加が必要になるが、酸発生剤濃度の増加は、排除体積効果により、レジスト性能の劣化を伴う。この問題を避けるためには、感光剤に複数の機能を持たせることにより、排除体積効果を軽減する必要がある。ここでは、感光剤にクエンチャーの機能を持たせた光分解性塩基の効果を検討し、13~16 nmノードにおける効果を解明した(図III.2.1.3-5-5, 図 III.2.1.3-5-6)。

Analysis of resist patterns

Monte Carlo method is useful for the study on stochastic effects.
However, Monte Carlo method is not suitable for accurate calculation.

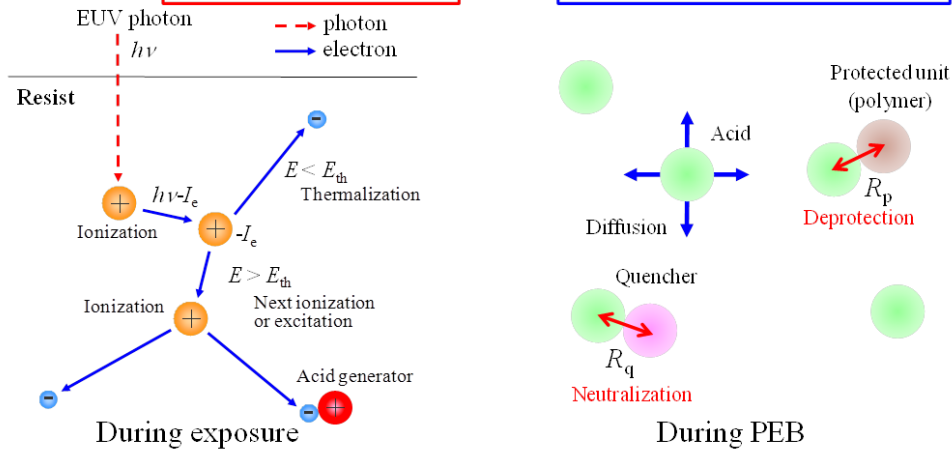
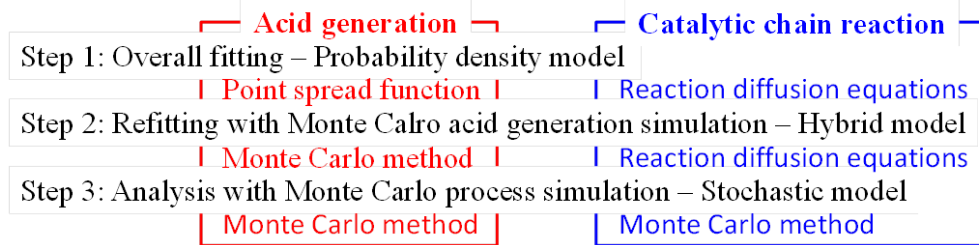


図 III.2.1.3-5-4:レジストパターンの計算アルゴリズム

$$LER = \frac{a\sigma_n}{dm/dx}$$

Dissolution factor $a = 1.54 (0.77 \times 2)$

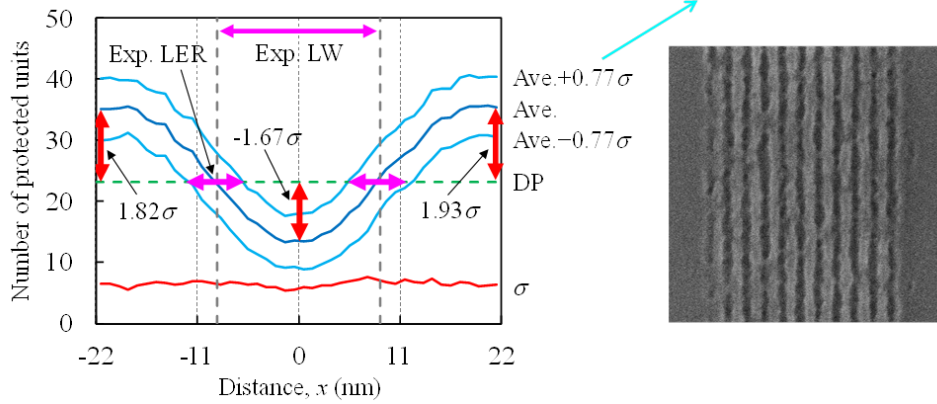


図 III.2.1.3-5-5:レジストラフネス (LER) について

Stochastic bridge generation

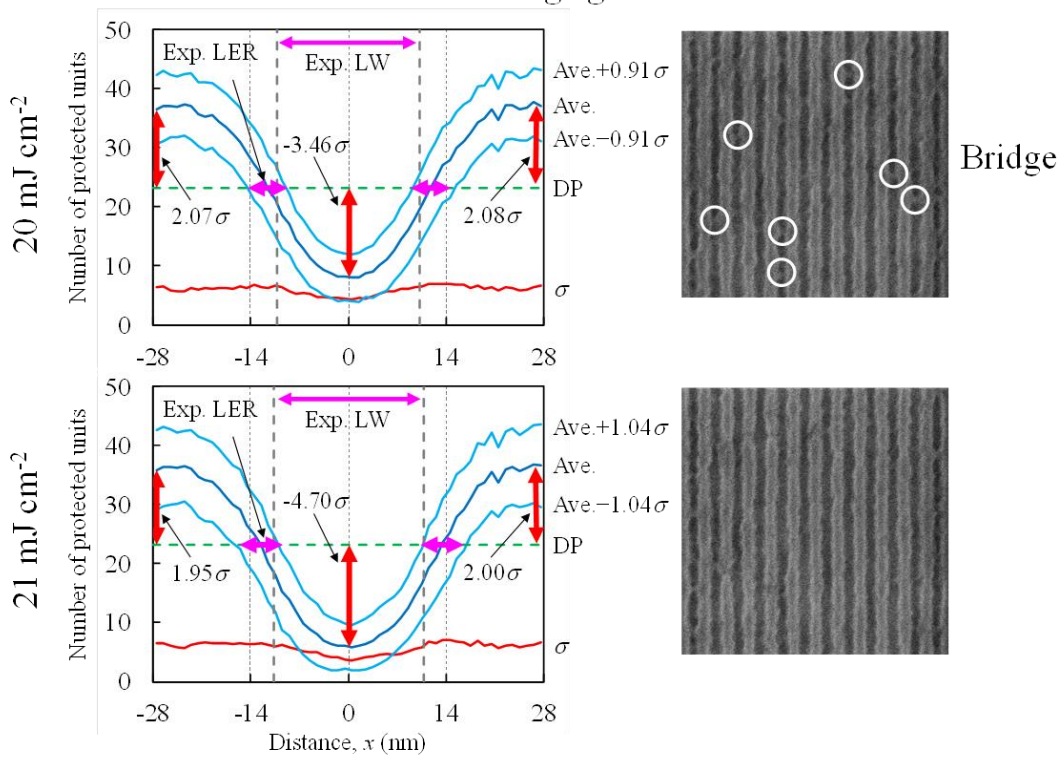


図 III.2.1.3-5-6:ブリッジ欠陥発生挙動

Stochastic pinching

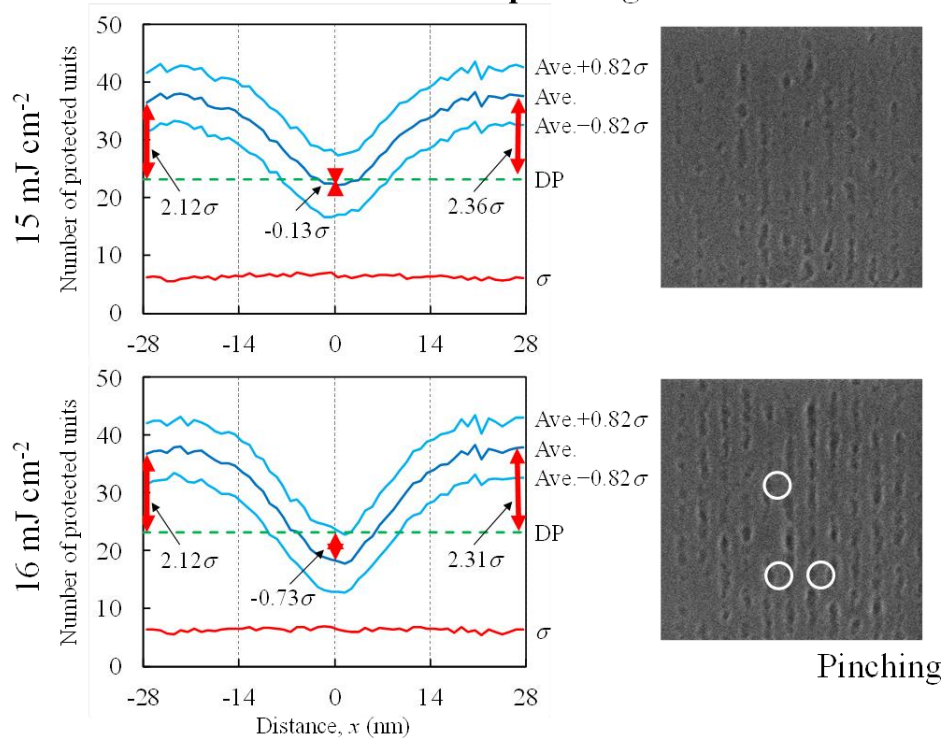


図 III.2.1.3-5-7:ピンチング欠陥発生挙動

BCP の構成ポリマーはシリコン含有 PMAPOSS とフッ素含有 PTFEMA とした。PMAPOSS と PTFEMA は同程度の表面自由エネルギーを持ち、また大きなドライエッチング耐性比を示すことを予備実験にて知見として得た。これまでの実績を踏まえて、目的とする PMAPOSS-*b*-PTFEMA の合成はアニオン重合による検討を重ねた。しかしながら、活性アニオン種の失活、あるいは水素引き抜きを伴う副反応により、DSA 材料として適応可能となる精密な一次構造制御されたポリマーの合成が困難であることがわかった。そこで本研究では、ラジカルを活性種とする可逆的付加開裂連鎖移動 (RAFT) 重合による PMAPOSS-*b*-PTFEMA の精密合成に取り組んだ。目的の BCP の合成に先立ち、RAFT 重合によるホモポリマー合成の重合条件について最適化を図った。得られた知見を基に BCP の合成を行った。ガラス製重合管に 2,2'-Azobis(isobutyronitrile) (AIBN)、2-Cyano-2-propyl dithiobenzoate (CPDB)、POSS メタクリレートモノマー (MAPOSS)、トルエンを量り取り、60℃にて 16 時間攪拌することで重合を行い、PMAPOSS を得た。得られた PMAPOSS をマクロ開始剤として用い、同様に AIBN、PMAPOSS、トルエン、1,1,1,3,3,3-Hexafluoro-2-propanol (HFIP) を量り取り、60℃にて 12 時間攪拌することで目的物である PMAPOSS-*b*-PTFEMA を得た(図 III.2.1.3-6-2)。以上の重合条件の下、分子量の異なる 10 サンプルの BCP の合成を行った。得られたポリマーの分子量は計算値と良い一致を示し、すべてのポリマーにおいて分子量分布は 1.2 以下であった。また、一次構造解析の結果、アニオン重合で見られた副反応は起こらず、所望の BCP が得られたことがわかった。

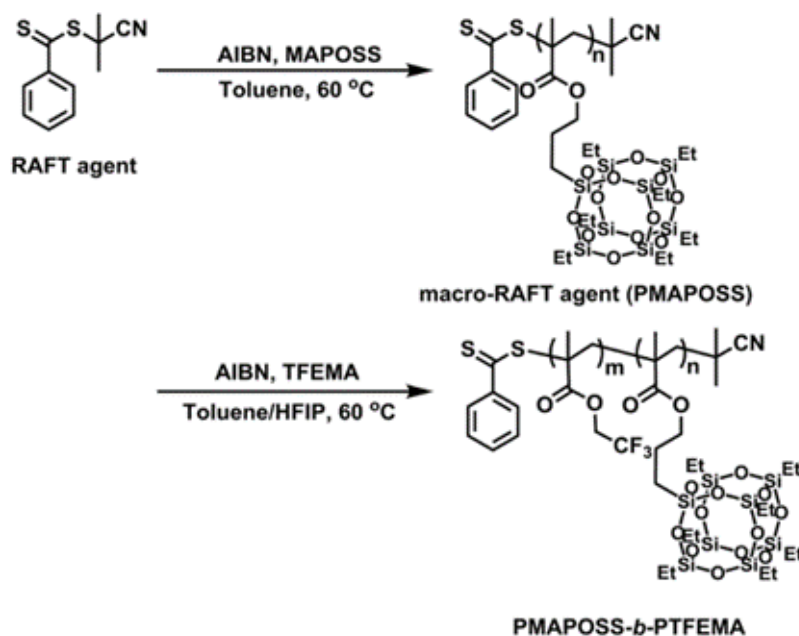


図 III.2.1.3-6-2 PMAPOSS-*b*-PTFEMA の合成

マイクロ相分離構造に関する知見を得るために、得られたBCP (M_n :15,600, PDI:1.1) の 1wt%クロロホルム溶液から常温常圧下にて溶媒を揮発させることでバルクサンプルを作製し、小角 X 線散乱 (SAXS) 測定による構造解析を行った。図 III.2.1.3-6-3 にバルクサンプルの SAXS プロファイルを示す。2 本の散乱ピークが見られ、そのピーク位置比が整数倍となっていることからラメラ構造の形成が示唆された。1 次散乱ピーク位置から算出した恒等周期長は 16 nm 程度であり、線幅 8 nm のパターンの創製が可能なポリマーであることがわかった (恒等周期長: 16.4 nm、図 III.2.1.3-6-3 の SAXS プロファイルより算出)。

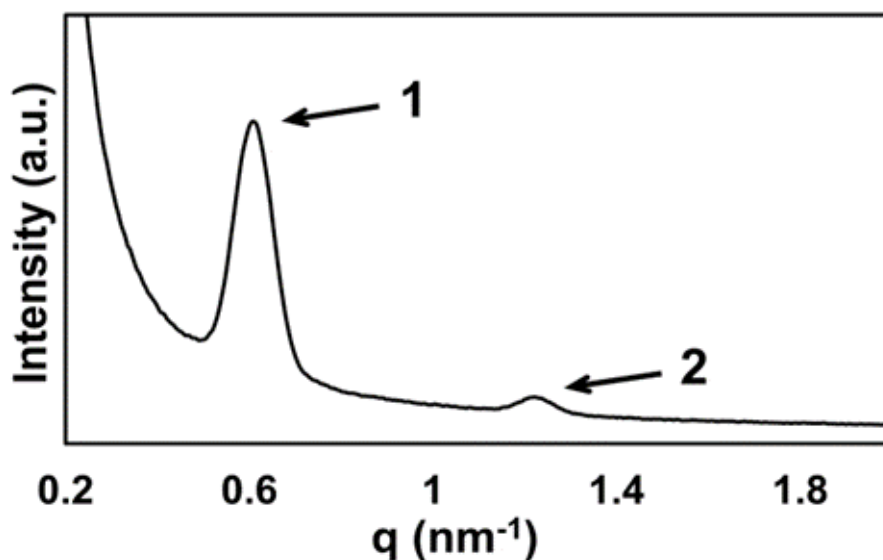
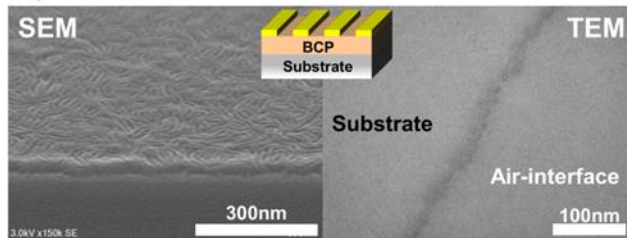


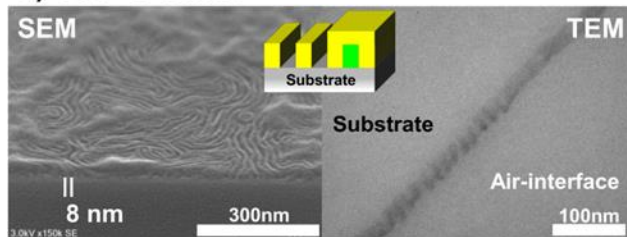
図 III.2.1.3-6-3 PMAPOSS-*b*-PTFEMA バルクサンプルの SAXS プロファイル

バルク構造解析における知見を基に、薄膜形成および構造解析を行った。薄膜はスピんキャスト法によって作製した。得られた薄膜の熱処理による構造制御を試みるために、それぞれ 110°C で 3 分、130°C で 3 分、110°C で 24 時間の条件にて大気下ホットプレート上で加熱処理を行った。その後、酸素プラズマエッチングを行い、PTFEMA 成分を除去した後、走査型電子顕微鏡 (SEM)、透過型電子顕微鏡 (TEM) を用いて薄膜の構造観察を行った。図 III.2.1.3-6-4 に薄膜の構造観察結果を示す。SEM 像は薄膜の斜め位置から、TEM 像は断面からの観察像である。130°C の温度条件において、高い周期性を有した 8 nm の線幅をもった直線状構造が形成されていることがわかった。しかしながら、一部の領域において薄膜表面を PMAPOSS が覆っている様子が観察された。これは、過剰な熱処理によって僅かながら疎水性の高い PMAPOSS が表面に偏析したことによると考えられる。より温和な 110°C にて長時間となる 24 時間にて熱処理を行ったところ、PMAPOSS の表面偏析を伴わず、ラメラ構造の垂直配向構造から誘導された線幅 8 nm の直線状パターンを得ることに成功した。

1) 110° C-3min



2) 130° C-3min



3) 110° C-24h

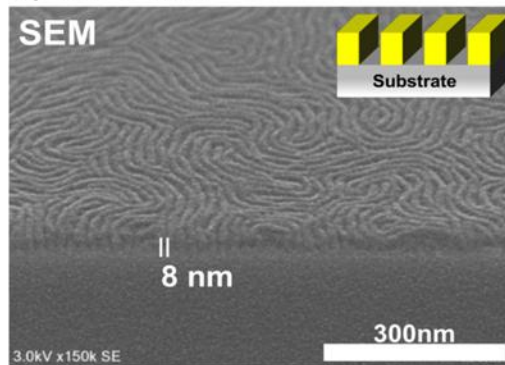


図 III.2.1.3-6-4 薄膜の SEM および TEM 像

Sub-10 nm パターニングを目指した次世代 DSA 材料の開発を目的に、高 χ BCP の分子構造設計と合成、および薄膜配向制御について取り組んだ。その結果、温和な条件における熱処理と選択的エッチングのみによって線幅 8 nm の直線状パターンが形成されることが明らかとなった。本研究で新規に開発された PMAPOSS-*b*-PTFEMA は、到達線幅、および垂直配向制御を達成するための簡便な熱処理プロセスにおいて、世界でも報告例のない興味深い材料であると言える。これらの知見を基にした DSA プロセスにおける精微な条件検討を重ねることによって、信頼性の高い sub-10 nm パターンの創出が期待される。

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3) –(vii) DSA 欠陥解析評価機構解明(京都大学への再委託)

[1] 時分割小角 X 線散乱(GI-SAXS)法による欠陥構造生成のアニール温度依存性の解明

DSA プロセスにおける欠陥を低減させるためには熱履歴によって欠陥構造がどのように異なるのかを明らかにすることは重要な課題である。この課題においては、アニール過程におけるポリスチレン-ポリメタクリル酸メチルジブロックコポリマー (PS-b-PMMA) 薄膜の自己組織化過程を時分割 GI-SAXS 法によりその場観察することによって、アニール温度によって欠陥構造がどのように異なるのかを明らかにすることを目的とする。

サンプルとしては図 III.2.1.3-7-1 に示すような中性化膜上の PS-b-PMMA 薄膜の試料を用いた。このサンプルに対して、110°C で 1 分、250°C で 2 分アニールしたものと 110°C で 1 分、270°C で 30 分アニールしたものを準備して、これらを 240°C から室温への温度ドロップした過程を時分割 GI-SAXS 法によって観察した。

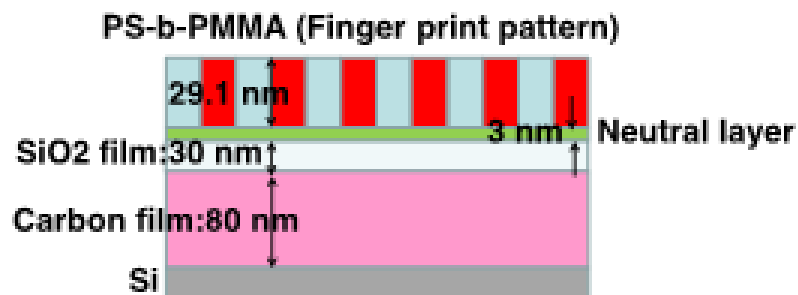
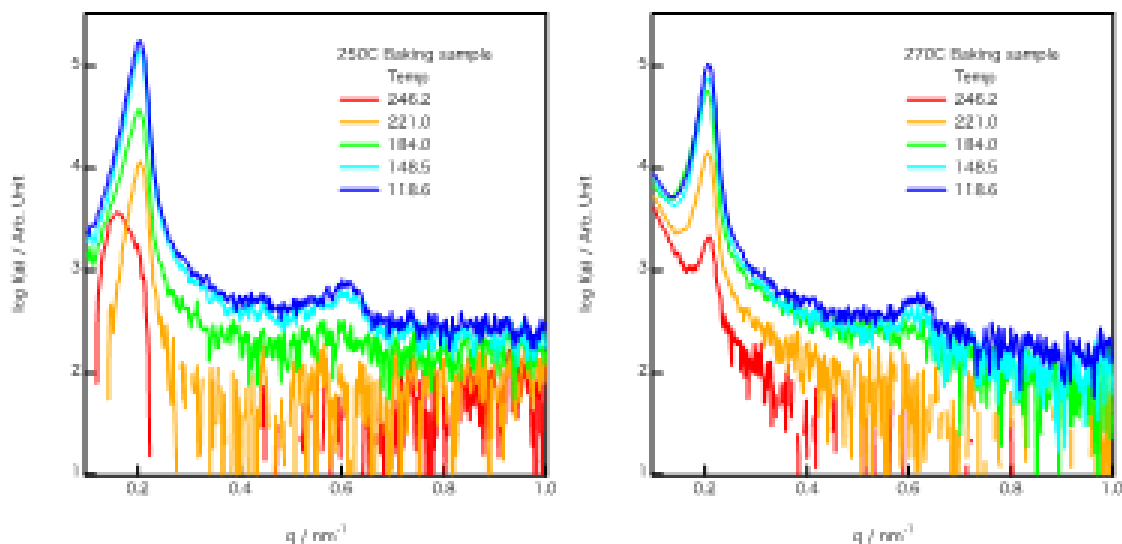
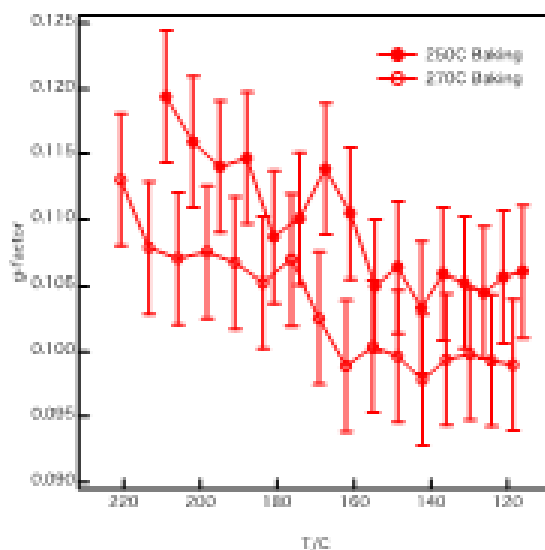


図 III.2.1.3-7-1 実験資料の断面図

時分割 GI-SAXS 法によって得られた散乱関数の時間変化を図 III.2.1.3-7-2 に示す。散乱関数の時間発展より、構造の形成が 220°C から 160°C で起こることが確認された。また、この散乱関数を Paracrystal 法によって解析を行い、この構造の欠陥の指標である g-factor の時間変化を求めた。その時間変化を図 III.2.1.3-7-3 に示す。この比較より温度の高いものの方が欠陥の低いものが形成させられることがわかった。



図Ⅲ.2.1.3-7-2 時分割 GI-SAXS の散乱プロファイル



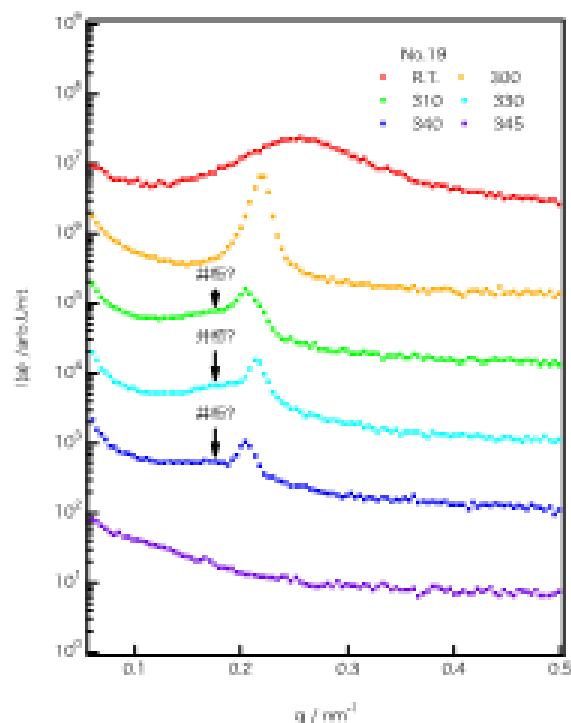
図Ⅲ.2.1.3-7-3 g-factor の時間変化

[2] 時分割 GI-SAXS 法による欠陥構造のアニール温度依存性の解明

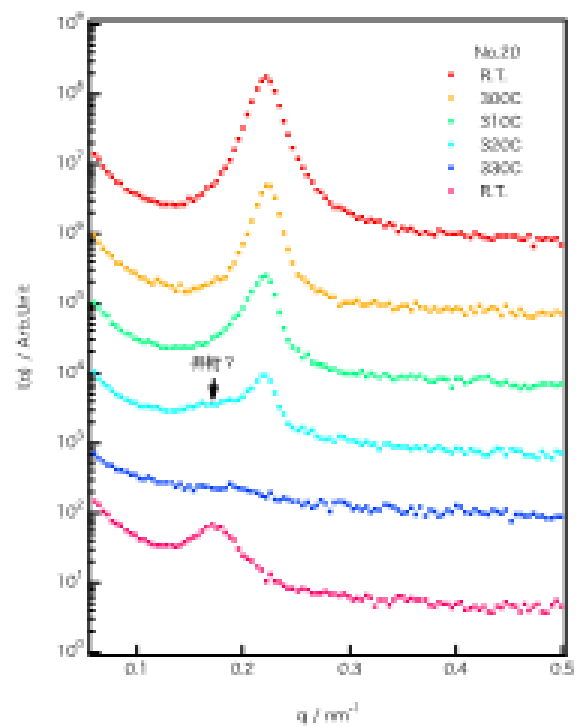
アニール温度によって異なる欠陥が確認されたが、その欠陥の原因を明らかにするために、GI-SAXS 法によるその場観察を用いて、降温過程において自己組織化前の状態にのサンプル構造解析を行い、欠陥の原因となる構造を明らかにすることを目的とする。

サンプルとして、[図Ⅲ.2.1.3-7-1](#)に示すような中性化膜上の PS-b-PMMA 薄膜を用いた。このサンプルに対して、110°Cで1分アニールした条件(サンプル A)、250°Cで2分アニールした条件(サンプル B)、270°Cで30分アニールした条件(サンプル C)を準備して、これらを室温から320°Cまで温度を変化させて3次元構造の温度依存性をGI-SAXS法によって観察した。

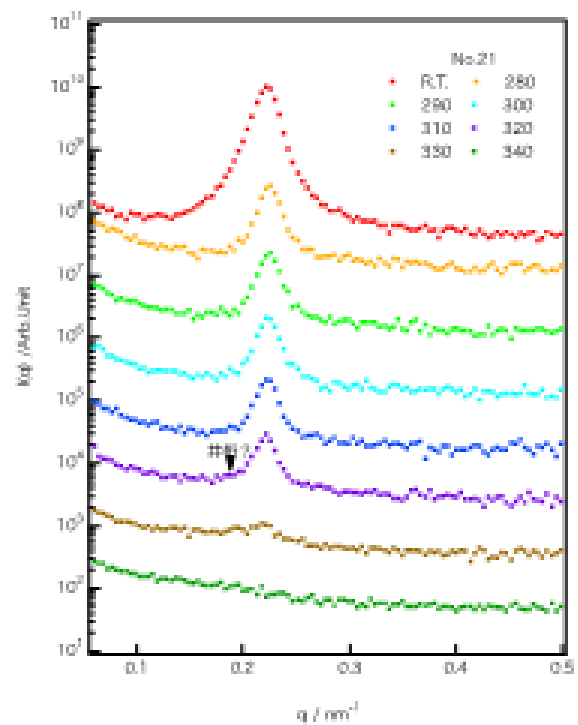
図Ⅲ.2.1.3-7-4に110°Cで1分アニールした条件(サンプル A)のGI-SAXS 膜面の平行方向の3次元構造に由来する In-plane 散乱プロファイルの温度依存性を示す。室温では成膜時に形成された等方的な共連続構造に由来するブロードなピークが観測される。300°Cでは基板に垂直に配向したラメラ構造に由来するピークが現れているが、より高温ではラメラ構造より大きい周期を持つ構造のピークが顕著になってくる。これは基板界面にある欠陥構造である井桁構造に由来する散乱であると考えられる。図Ⅲ.2.1.3-7-5に250°Cで2分アニールした条件(サンプル B)のGI-SAXS の In-plane 散乱プロファイルの温度依存性を示す。図Ⅲ.2.1.3-7-4にも320°Cにおいて欠陥構造に由来する散乱が観測されている。一方、図Ⅲ.2.1.3-7-6に示すように、270°Cで30分アニールした条件(サンプル C)の In-plane 散乱プロファイルの温度依存性はわずかに観測されるだけで、欠陥構造が少ないことがわかる。これらの結果から、欠陥構造は基板界面の中性化膜との間に形成されており、その秩序無秩序転移温度はPS-b-PMMA のラメラ構造の転移温度より高いということがわかった。また、その欠陥構造は高温での長時間アニールにより低減できるということが確認された。



図Ⅲ.2.1.3-7-4 サンプル A の GI-SAXS の散乱プロファイル



図Ⅲ.2.1.3-7-5 サンプル B の GI-SAXS の散乱プロファイル



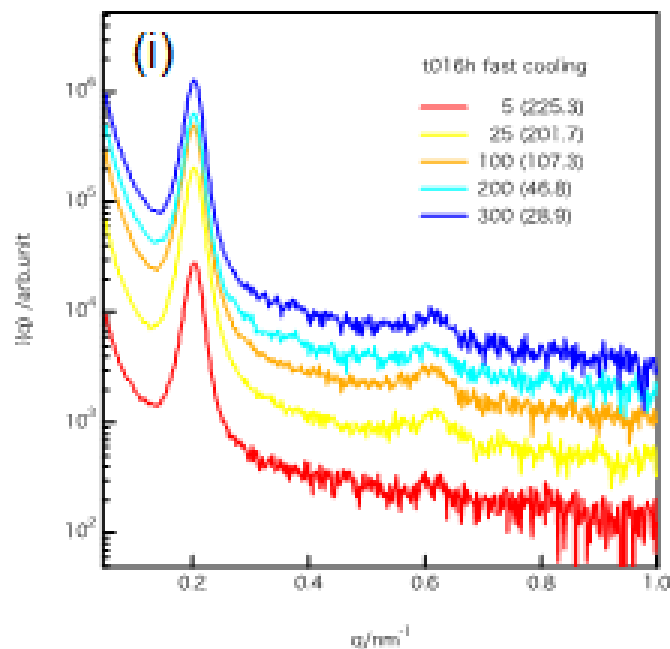
図Ⅲ.2.1.3-7-6 サンプル C の GI-SAXS の散乱プロファイル

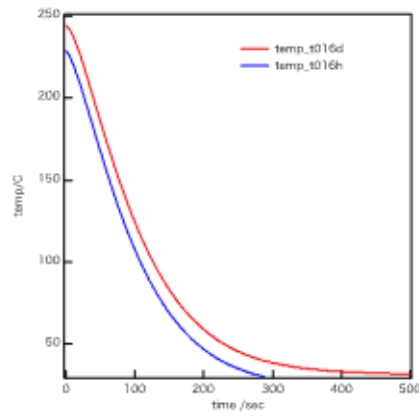
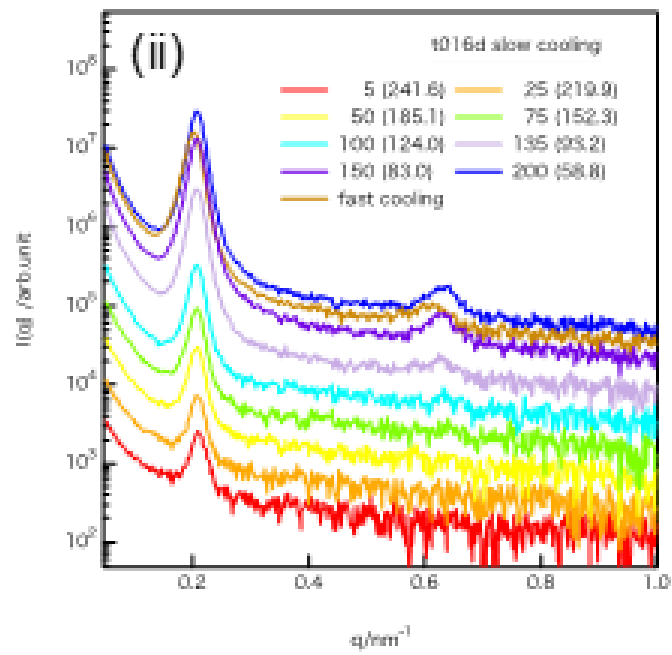
[3] 欠陥構造の冷却速度依存性の解明

時分割 GI-SAXS 法による欠陥構造生成のアニール温度依存性において、冷却過程の 220°C から 160°C でマイクロ相分離構造が形成されることが確認されているが、冷却速度の違いによっても欠陥構造の違いがあると考えられる。そこで、冷却速度を変化させて欠陥がどのように変化するかを、時分割 GI-SAXS 法により明らかにすることを目的とする。

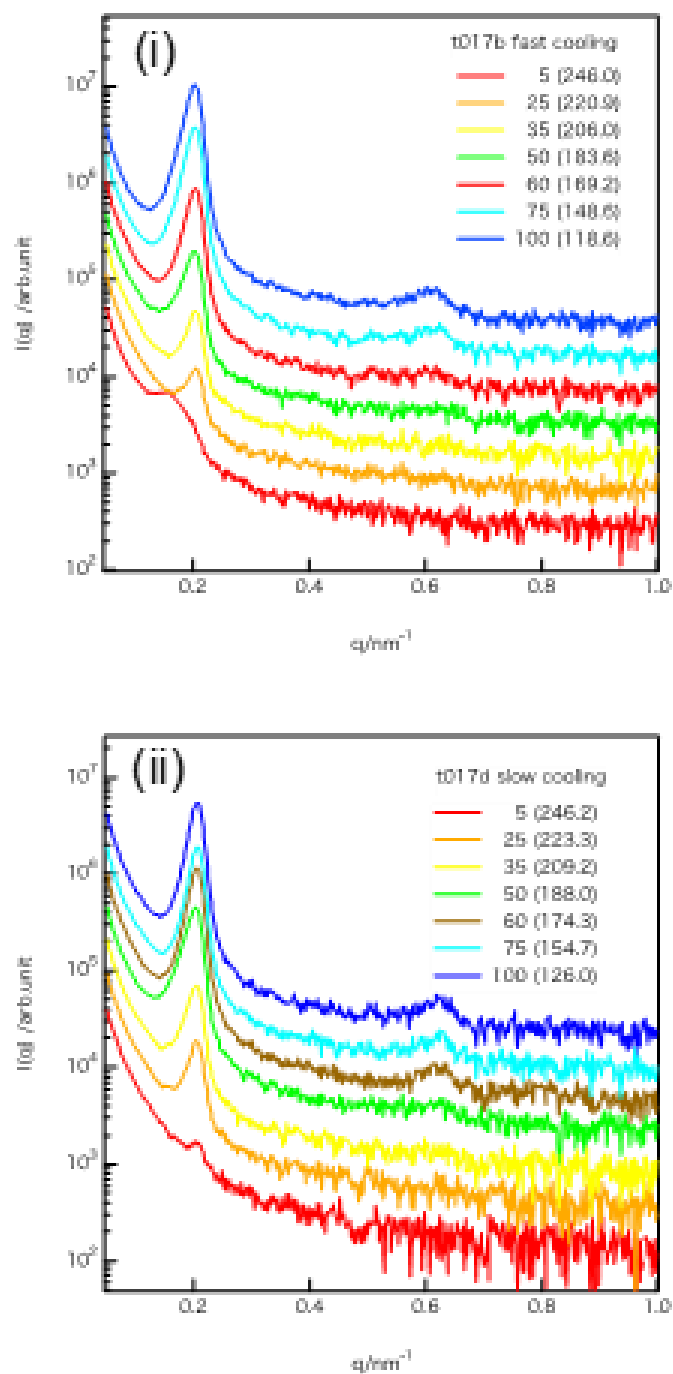
サンプルとして、[図 III.2.1.3-7-1](#) に示すような中性化膜上の PS-b-PMMA 薄膜を用いた。このサンプルに対して、110°C で 1 分アニールした条件(サンプル A)、250°C で 2 分アニールした条件(サンプル B)を、それぞれ 250°C 付近にアニールした後で冷却を行い、その自己組織化過程を時分割 GI-SAXS 法により観察を行った。冷却速度を図中に示す。

[図 III.2.1.3-7-7](#) にサンプル A の (i) 急冷条件と (ii) 徐冷条件での結果を示す。[図 III.2.1.3-7-8](#) にサンプル B の (i) 急冷条件と (ii) 徐冷条件での結果を示す。どちらにおいても徐冷条件で欠陥が少なくなることが確認された。





図Ⅲ.2.1.3-7-7 サンプル A の冷却過程における自己組織化過程の冷却速度依存性



図Ⅲ.2.1.3-7-8 サンプル B の冷却過程における自己組織化過程の冷却速度依存性

[4] ジブロックコポリマー薄膜の 3D-TEM 法による3次元構造観察法の開発

欠陥構造を可視化するために、PS-b-PMMA 薄膜の 3D-TEM 法による3次元構造の観察法を開発することを目的とする。

フッ酸により基板から剥離したサンプルを四酸化ルテニウムにより染色し、40℃から-40℃まで2軸方向にそれぞれサンプルを傾斜させ TEM 像を撮影し、その像から 3 次元構造を再構築した。

図 III.2.1.3-7-9 に示すように、薄膜中のラメラ構造の 3 次元構造を構築することができた。その褶曲や欠陥などを捉えることができた。

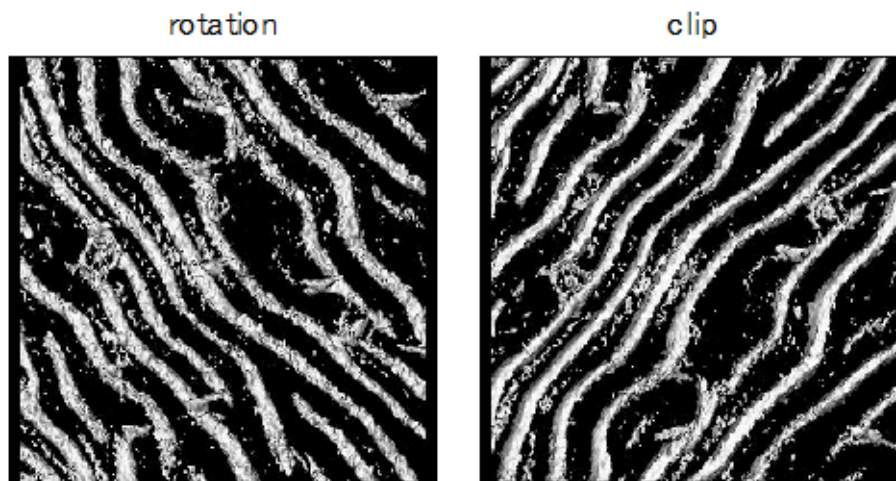


図 III.2.1.3-7-9 3D-TEM 法による PS-b-PMMA 薄膜の 3 次元構造

(3) EUVレジスト材料技術開発

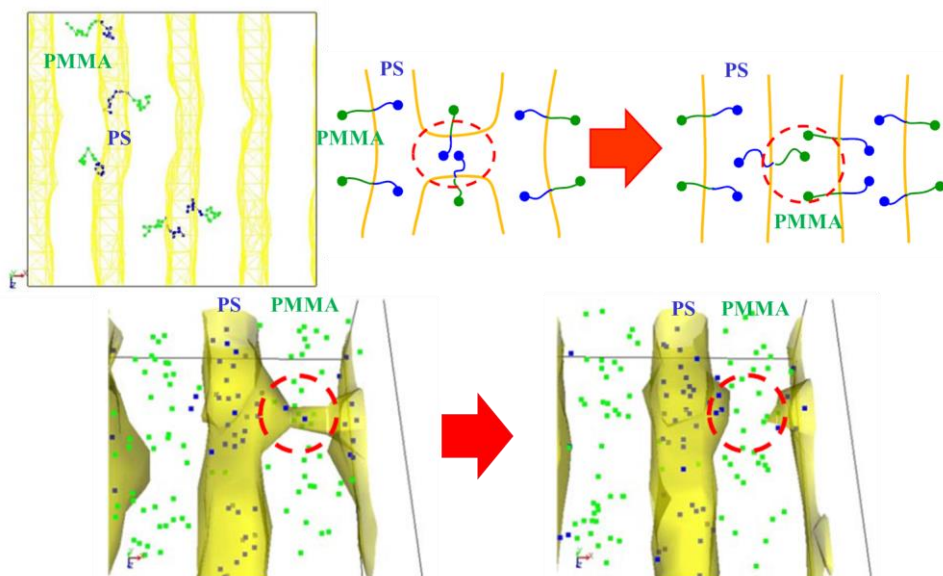
(3) –(viii) DSA プロセスシミュレーション技術開発(産総研との共同実施)

本研究では、DSAマイクロ相分離現象について、高精度かつ高速に処理できるDSAプロセスシミュレーション技術開発を行うことを目的とする。DSA プロセスシミュレーション技術開発は、入力情報として、ガイドパターン設定、ポリマー材料(BCP、中性化膜)設定、シミュレーション条件設定およびプロセス条件設定等を入力し、出力情報として、マイクロ相分離(過程)結果等を出力するマイクロ相分離シミュレーターの開発を行った。また、研究開発目標として、現実的な時間内の計算において、計算時間に対比して制度ができる限り高くなるような技術の開発を行った。更に、マイクロ相分離シミュレーションにより得られた出力結果から、界面構造等の構造解析を行うための技術開発も行った。

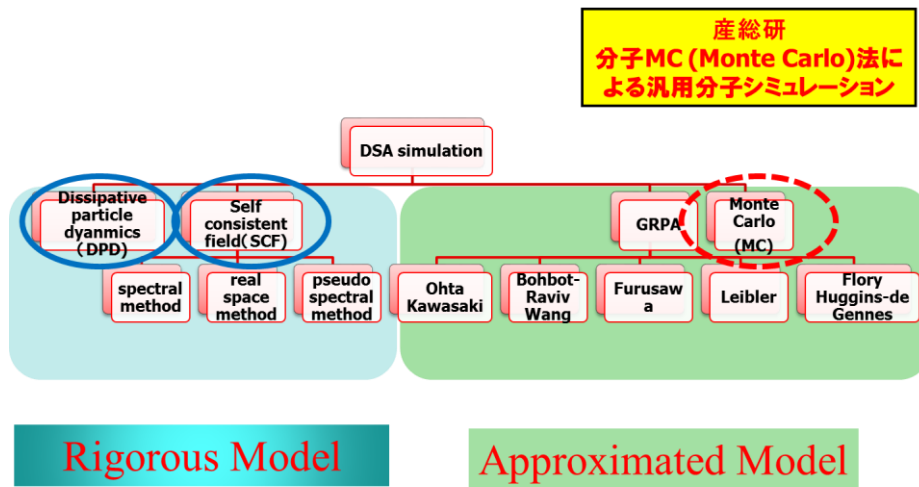
DSA プロセスシミュレーションの一例として、[図Ⅲ.2.1.3-8-1](#)に3次元DPD(Dissipative Particle Dynamics)シミュレーションによるPSショート欠陥発生機構を示す。図中から、最初に2つのPS-b-PMMA鎖のPSセグメントどうしがPMMA領域においてPSセグメント末端で近接することがPSショート欠陥を発生させる要因となっている様子が示され、次第にPMMA領域におけるPSセグメント末端が離れることでPSショート欠陥が消滅する過程を再現できることがわかった。

更に、高速に処理できるDSAプロセスシミュレーション技術開発として、分子MC(Monte Carlo)法による汎用分子シミュレーションC++プログラム(コード名:Spaghetti)を開発した([図Ⅲ.2.1.3-8-2](#))。

これらの高精度かつ高速に処理できるDSAプロセスシミュレーションを使って、hp 15 nm と hp sub-10 nm のそれぞれで構築されたDSAプロセスの開発および評価を通じて得られる実験データをシミュレーションモデルの検証のために活用した。



図Ⅲ.2.1.3-8-1 3次元DPDシミュレーションによるPSショート欠陥発生機構



図Ⅲ.2.1.3-8-2 分子 MC 法による汎用分子シミュレーション開発

(3) EUVレジスト材料技術開発

(3) - (ix) DSA 材料合成技術開発(北海道大学への再委託)

DSA 技術に用いられる BCP として、これまで専ら PS-*b*-PMMA が検討されてきたが、到達可能な最小 hp は 15 nm 程度にとどまる。その原因はブロック間の非相溶性(χ パラメータ)が比較的小さいために、低重合度の BCP ではマイクロ相分離が生じなくなるためである。このような背景から、非相溶性の大きな組み合わせの BCP (いわゆる高 χ BCP 材料) が注目されている。本研究では、高 χ BCP 材料の一成分としてオリゴ糖鎖に着目した。オリゴ糖は天然から入手可能であるという特徴に加え、多数の水酸基に由来して非常に高い親水性を示す。このことから、疎水性高分子との組み合わせからなる糖鎖含有 BCP は低重合度においてもマイクロ相分離すると強く期待される。本研究では、疎水性高分子セグメントとしてポリカプロラクトン(PCL)、オリゴ糖セグメントとしてマルトヘプタオース(MH)を有する新規 BCP (MH-*b*-PCL)の合成ならびにマイクロ相分離構造の検討を実施した。更に、分岐構造を導入した MH-*b*-PCL の合成も行い、分岐構造とマイクロ相分離構造との相関についても検討した(図 III.2.1.3-9-1)。

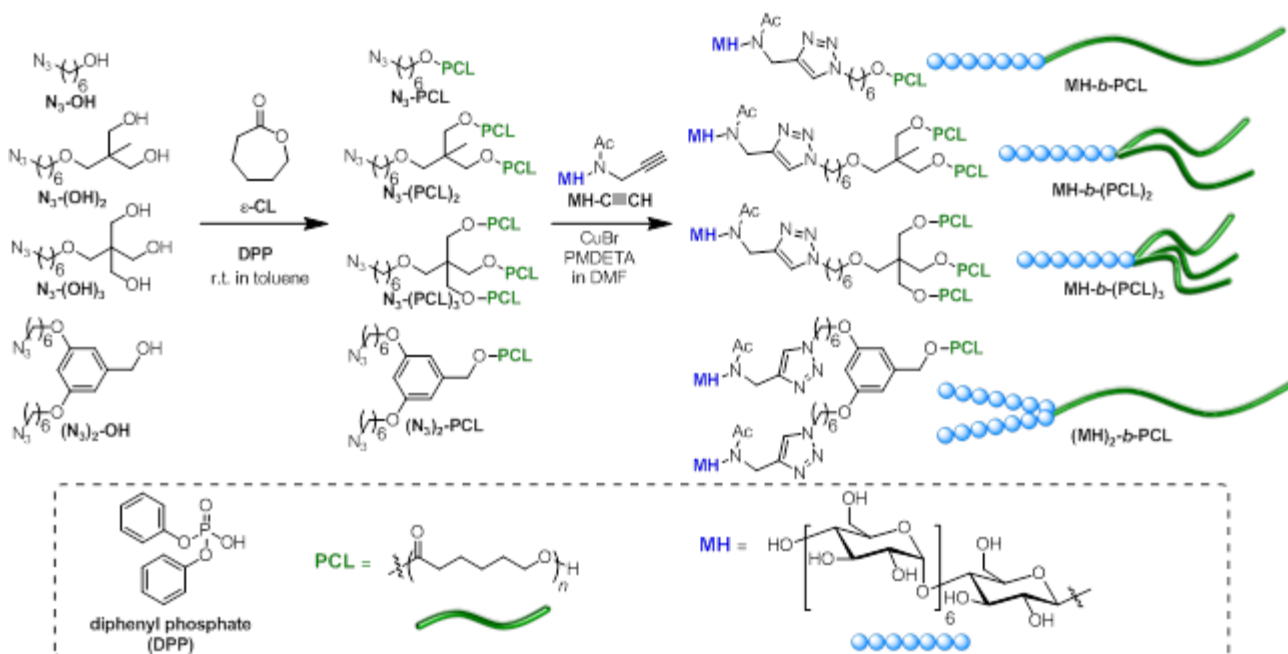


図 III.2.1.3-9-1 MH と PCL からなる新規 BCP の合成

図中に示すように、MH-*b*-PCL の合成は基本的に、(1)アジド基を有する開始剤を用いた ϵ -カプロラクトンのリビング開環重合と、(2)エチニル基を有する MH (MH-C≡CH) とのクリック反応の 2 段階により構成される。まず、北海道大学が開発したリビング開環重合系を用いることにより、末端アジド化 PCL (N₃-PCL) を調製した。続いて、N₃-PCL に対して 1.3 当量の *N*-マルトヘプタオシル-3-アセトアミド-1-プロピン(MH-C≡CH) を添加してクリック反応を行うことで、目的の MH-*b*-PCL を高収率で得ることができた。また、用いるアジド化開始剤の分子構造を工夫することで、同様の合成経路により分岐構造を有する BCP の合成を行った。すなわち、アジド基を有するジオールおよびトリオールを開始剤とすることで、鎖中央にアジド基を有する 2 分岐および 3 分岐 PCL を調製

し、クリック反応を行うことで MH-*b*-(PCL₂)₂ および MH-*b*-(PCL)₃ を得た。一方、アジド基を 2 つ有するアルコールを開始剤とすることで、鎖末端にアジド基を 2 つ有する PCL を調製し、続くクリック反応により (MH)₂-*b*-PCL を得た。PCL の分子量を調節することで、各 BCP の糖体積分率 (ϕ_{MH}) が 0.09、0.18、0.27 程度となるようにした。

各 BCP のマイクロ相分離構造を検討するため、バルク試料のシンクロトン小角 X 線散乱(SAXS)測定を行った。直鎖状の MH-*b*-PCL ($\phi_{\text{MH}} = 0.18$, $M_{\text{n,PCL}} = 5\text{k}$)は 160°C 以上でシリンダー相(Hex)へマイクロ相分離することが判明した。また、220°C 以上に加熱することで Hex から球状ドメイン構造(BCC)へと相転移することが確認され、相転移後のドメイン間隔(L_0)は 11.2 nm であった。この相転移現状の原因について明らかにするため、熱重量分析を行った。その結果、200°C 付近からオリゴ糖鎖の熱分解が始まることが判り、それにとまう実質的な糖体積分率の減少が相転移を起こしたと推察される。

直鎖状 BCP における PCL 分子量の影響を明らかにするため、異なる体積分率の MH-*b*-PCL ($\phi_{\text{MH}} = 0.09$, $M_{\text{n,PCL}} = 10\text{k}$; $\phi_{\text{MH}} = 0.27$, $M_{\text{n,PCL}} = 2.5\text{k}$)についても同様の SAXS 測定を行った。その結果、 $\phi_{\text{MH}} = 0.09$ の MH-*b*-PCL については BCC 構造($L_0 = 14.0$ nm)を、 $\phi_{\text{MH}} = 0.09$ の MH-*b*-PCL については Hex 構造($L_0 = 10.2$ nm)を形成することが明らかとなった。PCL 分子量が 2500 程度と非常に小さな MH-*b*-PCL においてもマイクロ相分離を発現したことは特筆すべき点である。以上より、MH-*b*-PCL は 10 nm 前後の極めて微細な領域でマイクロ相分離構造を発現できる高 χ BCP 材料であることが確認できた。

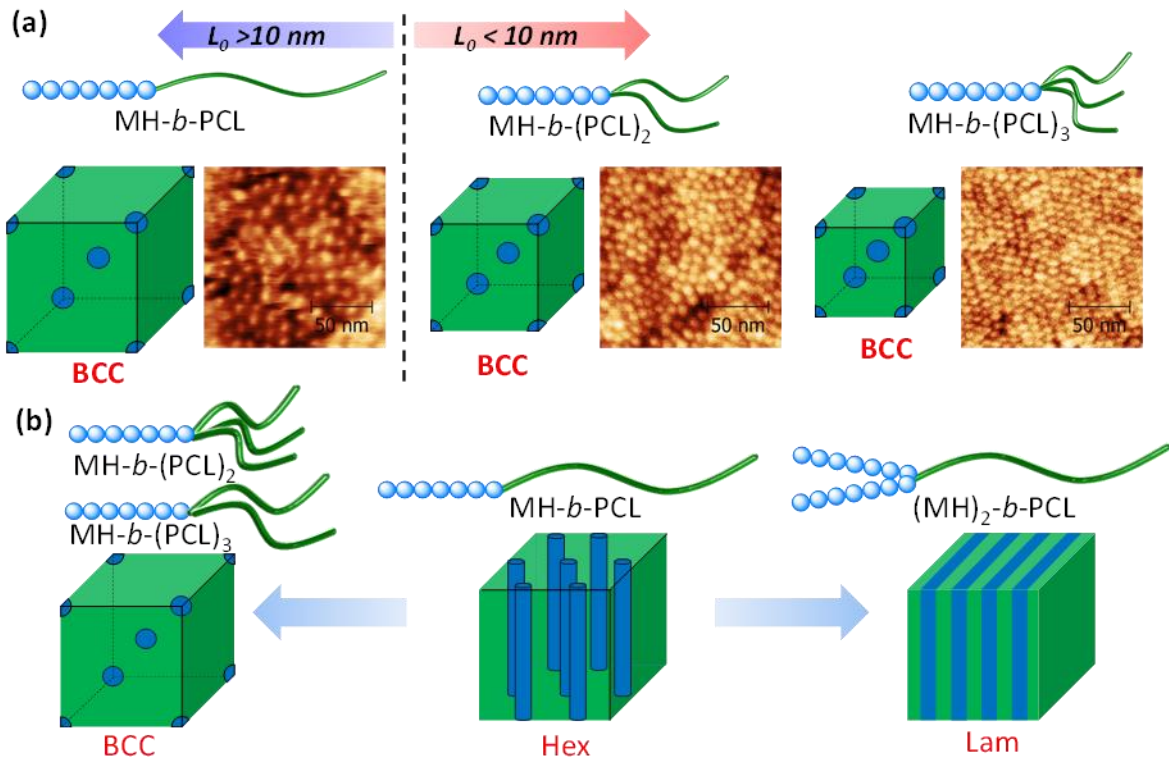
続いて、PCL ブロックを分岐させた構造を有する MH-*b*-(PCL)₂ および MH-*b*-(PCL)₃ についてマイクロ相分離構造を検証した。SAXS 測定を実施したところ、210°C 以上で MH-*b*-(PCL)₂ と MH-*b*-(PCL)₃ ($\phi_{\text{MH}} = 0.18$, $M_{\text{n,PCL}} = 5\text{k}$)はそれぞれ 9.8 nm および 8.8 nm の L_0 を有する BCC を形成した。同程度の分子量と ϕ_{MH} を持つ MH-*b*-PCL と比較すると、PCL の分岐数の増大に伴って L_0 が減少していることがわかる。また、この傾向は $\phi_{\text{MH}} = 0.09$ のサンプルにおいても確認された。このことは、PCL 鎖への分岐構造の導入によって重合度に依存せずに 10 nm 以下の超微細領域におけるナノ構造制御が可能であることを示唆している(図 III.2.1.3-7-2)。

最後に、末端に 2 つの MH を導入した (MH)₂-*b*-PCL ($\phi_{\text{MH}} = 0.16$, $M_{\text{n,PCL}} = 10\text{k}$; $\phi_{\text{MH}} = 0.27$, $M_{\text{n,PCL}} = 5\text{k}$) についてマイクロ相分離構造を検討した。同様の SAXS 測定を行った結果、前述の直鎖状 MH-*b*-PCL では観測されなかったラメラ相を形成することが明らかになった。直鎖状 MH-*b*-PCL では $\phi_{\text{MH}} = 0.27$ において Hex 構造を呈したのに対し、(MH)₂-*b*-PCL は $\phi_{\text{MH}} = 0.16$ においてもラメラ構造を呈した。このことは BCP の幾何学構造を設計することで L_0 だけでなく相構造も制御可能であることを示唆している(図 III.2.1.3-7-2)。

BCP の分岐構造とマイクロ相分離挙動の相関関係について、 $n_{\text{B}}/n_{\text{A}}$ 値($n_{\text{A}} = \text{MH}$ のアーム数、 $n_{\text{B}} = \text{PCL}$ のアーム数)を使うことで整理することが出来る。すなわち、 $n_{\text{B}}/n_{\text{A}}$ 値が増加するに従って曲率の大きな相構造へシフトするとともに L_0 が減少する傾向が確認できる。以上の検討から、BCP の幾何学構造の分子設計は 10 nm 前後のマイクロ相分離構造の精密制御手法として極めて有用であることが判明した。

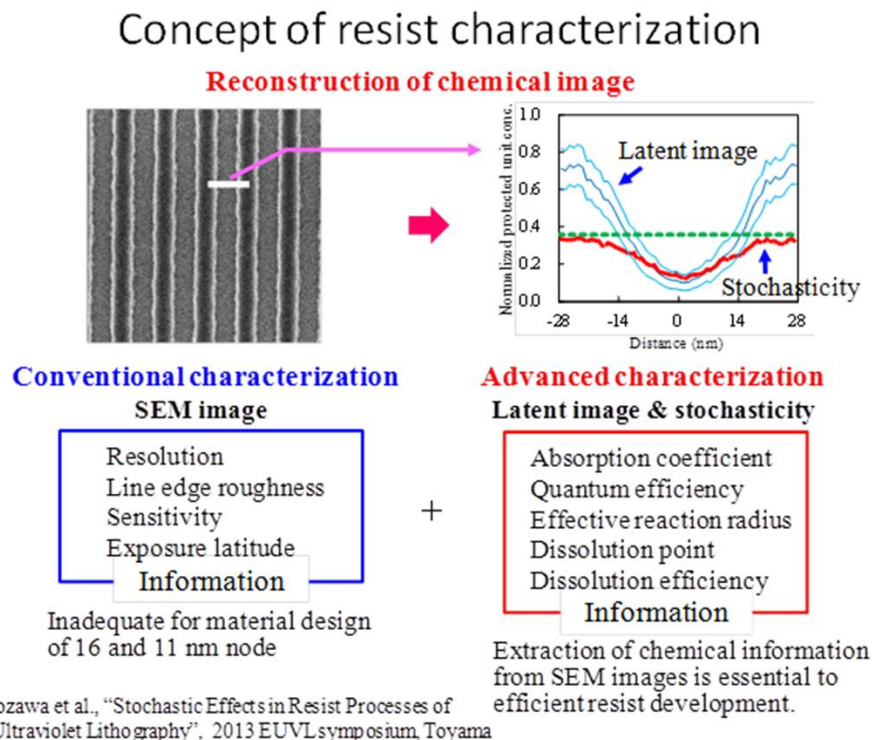
本研究では新たな高 χ BCP 材料として、MH と PCL からなる MH-*b*-PCL を開発し、そのマイクロ相分離に関する検討を実施した。その結果、MH-*b*-PCL は $L_0 = 10$ nm 程度(hp 5 nm 前後)の極めて微細なマイクロ相分離構造を形成することが明らかとなった。また、MH-*b*-PCL に対して分岐構造を導入することで、重合度を一定としたまま L_0 や相構造を制御できることを見出した。以上の知

見は DSA へ応用可能な高 χ BCP 材料の分子設計指針として極めて意義深く、この成果を基盤とした新規高 χ BCP 材料設計に興味を持たれる。よりエッチングコントラストが大きくなるような組み合わせの糖鎖含有 BCP の開発と DSA 技術への実装が今後期待される。



図Ⅲ.2.1.3-7-2 新規 BCP の分子構造とマイクロ相分離挙動の相関関係

率、実効反応半径等のChemical情報を抽出することができるようになった。更にこれまでの我々の研究で明らかになったリソグラフィにおける確率統計効果の概略を示す(図III.2.2-4-1-3)。図は光子のショットノイズを示しており、ハーフピッチ23nm、16mJ/cm²というEUV露光にとっては比較的大きなパターン条件においても、レジストの単位密度あたりに吸収される光子数の標準偏差が平均値を大きく上回っている(図III.2.2-4-1-3左図)。本結果がまさにショットノイズ問題による高感度高解像度パターンニングの困難性を示唆している。しかしながらレジスト中では、光子像が光(放射線)化学反応を経て酸像に変換されることによって、平均値に対する相対的な揺らぎ(標準偏差)が減少する(図III.2.2-4-1-3中央)。その後ポストバーク時の酸触媒反応を経て酸像が潜像(保護基の濃度分布)に変換されることによって、平均値に対する相対的な揺らぎ(標準偏差)が更に減少することが分かる(図III.2.2-4-1-3右図)。最終的には保護基の揺らぎが、現像・リンス過程を経て、ラインエッジラフネスとしてレジスト形状となる。現像過程においても、同様の揺らぎの抑制効果があることが報告されている。最終的な揺らぎ(ラインエッジラフネス)の主原因の一つは光子のショットノイズであるが、その効果がどのように現れるかは、材料に大きく依存している。基本的には現状のレジスト材料及びその反応系は未だ限界に達していないと考えられる。



図III.2.2-4-1-2 ショットノイズ及び確率統計効果を評価するために開発された先端レジスト評価技術

Stochastic effect – 23 nm LS pattern at 16 mJ cm⁻² exposure

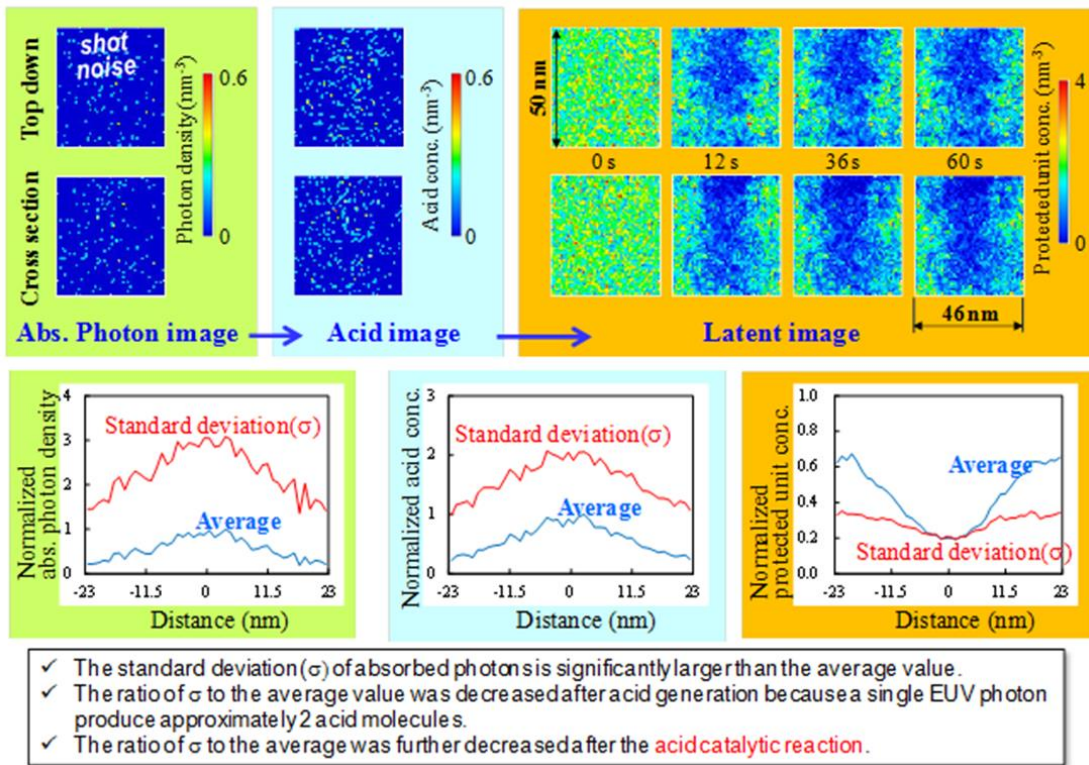
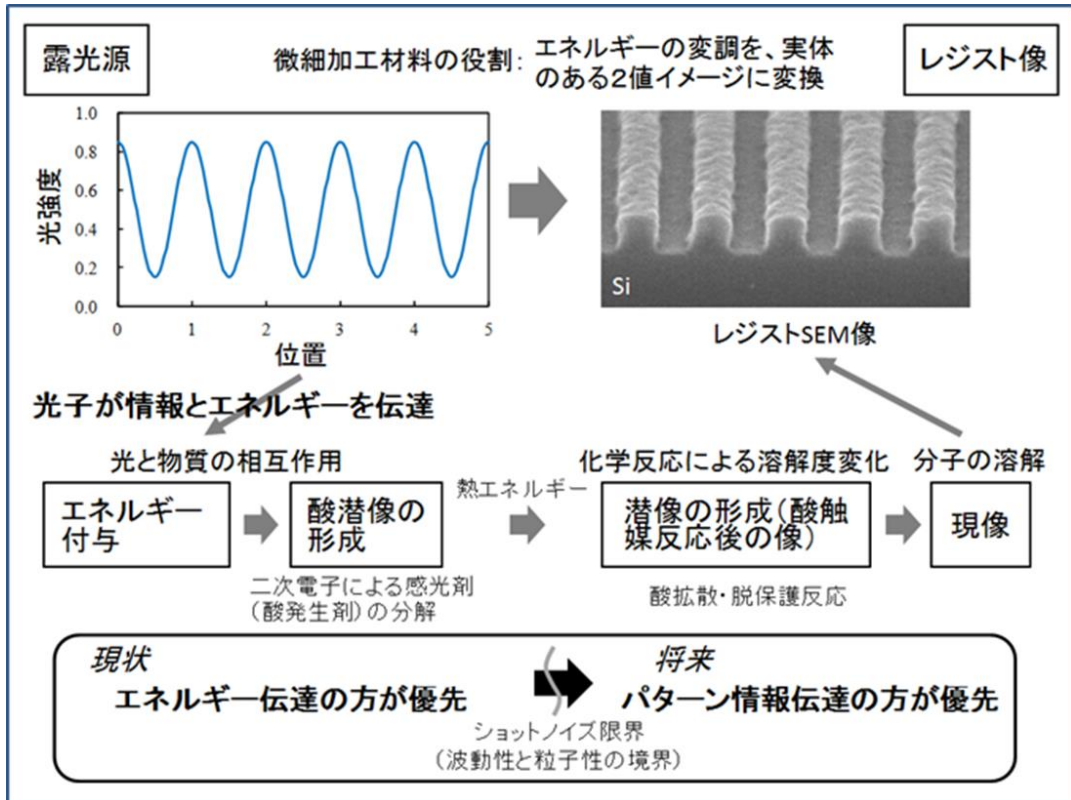


図 III.2.2-4-1-3 リソグラフィにおける確率統計効果 (EIDEC 成果)

化学増幅型レジストでは、量子ビームが担うエネルギー伝達を酸発生剤の分解に限定し、化学変化に必要なエネルギーを熱エネルギーという形で後から供給することにより、高感度化を実現している。現状の EUV リソグラフィにおいても化学増幅型レジストが適用されているが、現状目標とされる光源出力より小さい出力で EUV リソグラフィを実現するために、何等かの方法でエネルギーを補填することによって更なる高感度化を実現しようとする、更なるショットノイズによってパターン忠実性劣化が許容できないレベルに達してしまう(ショットノイズ限界)。これはいわば高感度化追求の為に、微細加工における露光媒体である光子の役割の1つである化学変化を材料に与えるためのエネルギー伝達の側面が強調されるあまり、必要光子数が減少してショットノイズ増大によってパターン忠実性が許容できない程劣化するため、光子のもう1つの役割であるパターン情報伝達の側面を優先せざるを得ない状況になるレベルである(図 III.2.2-4-1-4)。



図Ⅲ.2.2-4-1-4 露光媒体である光子の役割

本研究では、エネルギー伝達によりパターン情報伝達を優先せざるを得なくなる状況(ショットノイズ限界)を反応機構に基づいたシミュレーションにより明らかにした上で、光学像からレジスト像への変換プロセスを精査し、ハーフピッチ11nm以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にする。シミュレーション以外にも、必要に応じて酸定量等、シミュレーションパラメーター取得のための実験を実施する。

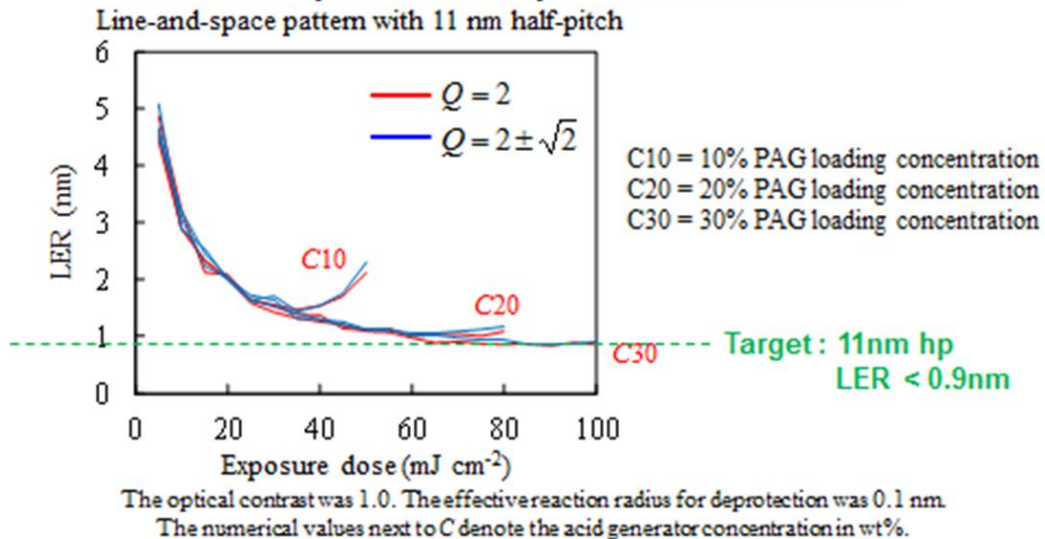
[1] ハーフピッチ11nm以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針明確化の検討

(1) 高感度化におけるショットノイズ限界を、吸収係数、量子収率、反応半径等の物理的指標を用い、定量的に現わすこと、(2) 現状レジストの各物理パラメーターからショットノイズ限界までのギャップを定量化し、各パラメーターの開発難易度を定量化すること、(3) 以上の結果をもとに、新規プロセスの可能性を含めハーフピッチ11nm以細の微細加工をより少ない光源出力で実現するEUVレジスト材料の設計指針を明確にすることを検討した。検討は、二次電子による解像度ボケを物理限界におさえた条件で、光子一個から発生する酸の個数揺らぎ有無において、確率統計効果(LER等)を計算し現実の系と比較することとした。その結果、露光量の増加により達成し得る最小のLERは酸発生剤濃度に依存し、ハーフピッチ11nmの加工に要求される0.9nm以下のLERを得るには少なくとも酸発生剤濃度が20wt%以下では困難であり、30wt%が必要であることが明確となった(図Ⅲ.2.2-4-1-5)。言い換えれば、他の条件にも依存するが、酸発生剤濃度が30wt%あれば、目標の0.9nm以下のLERを得る事が可能であることが明らかとなった。また、添加された酸発生剤の有効性(分解効率)もLERに効くことが想定されることから、酸量子収率についても検討した。酸量子収率のみが異なる条件において露

光量ごとに得られるLERをシミュレーションした結果、酸量子収率が高い場合(酸量子収率20)は、少ない露光量でもLERは急激に低減されるが、そのLER下限値が不十分である事、酸量子収率が低い場合(酸量子収率2)は、LER低減が緩やかかつ高露光量が必要であるもののLER下限値はより小さくなることが確認された(図III.2.2-4-1-6)。すなわち、0.9nm以下のLERを得ることは少なくとも酸量子収率10以上では困難であり、酸量子収率2では他の条件にも依存するが、0.9nm以下のLERを得る事が可能であることを示している(注:あまり酸量子収率が高すぎると、そこにある酸発生剤より勢いよく酸が発生してしまい、最終的な酸均一化状態にまでいきつかない、というイメージ)。ただし、この場合高露光量が必要となり、高感度化とのトレードオフ関係にあることを同時に示した結果となった。さらには、脱保護化の実効反応半径を拡大させるとLER低減に効果あるが、必要以上に拡大させると解像力が低下すること、露光前に高分子についている保護基数のばらつきを減少させることがLER低減に効果あることを明確にした。脱保護反応の実行半径を、0.1nm、0.2nm、1.0nmの場合において計算し、その時に用いるポリマーの保護基数がバラツキのないもの(標準偏差=0)をMono、バラツキの大きいもの(標準偏差= $\sqrt{12}$)をRandomとした時の、露光量とLERの関係から、露光量の増加により達し得る最小LERは、概ね実行反応半径0.2nm~0.3nmで最小値となり、それ以上に実行半径を拡大させても効果がわずかであることが明確となった(図III.2.2-4-1-7)。

Results 1 : Fluctuation of quantum efficiency (PAG loading concentration)

Relationship between exposure dose and LER

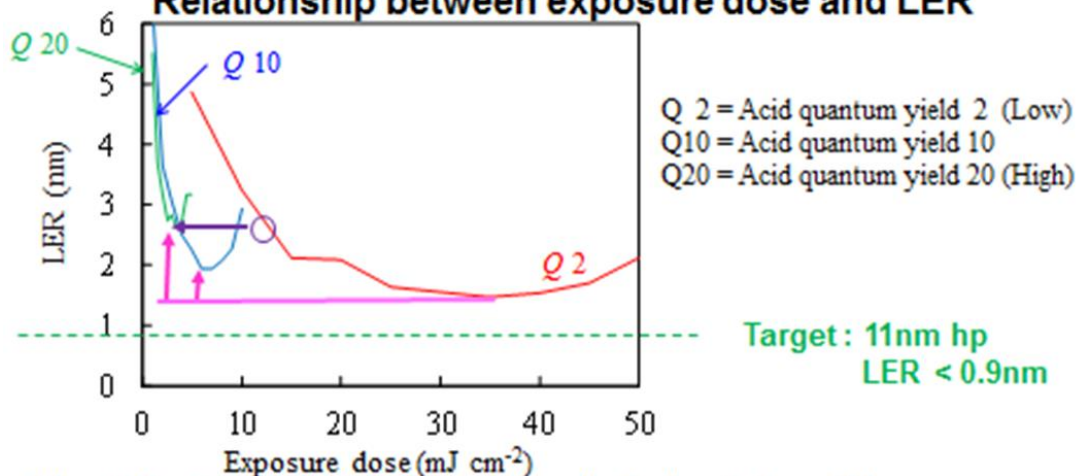


At least '30% PAG loading concentration' is necessary to achieve the target

図III.2.2-4-1-5 酸発生剂量依存による露光量とLERの関係

Results 2. Fluctuation of quantum efficiency (Generated acid quantum yield)

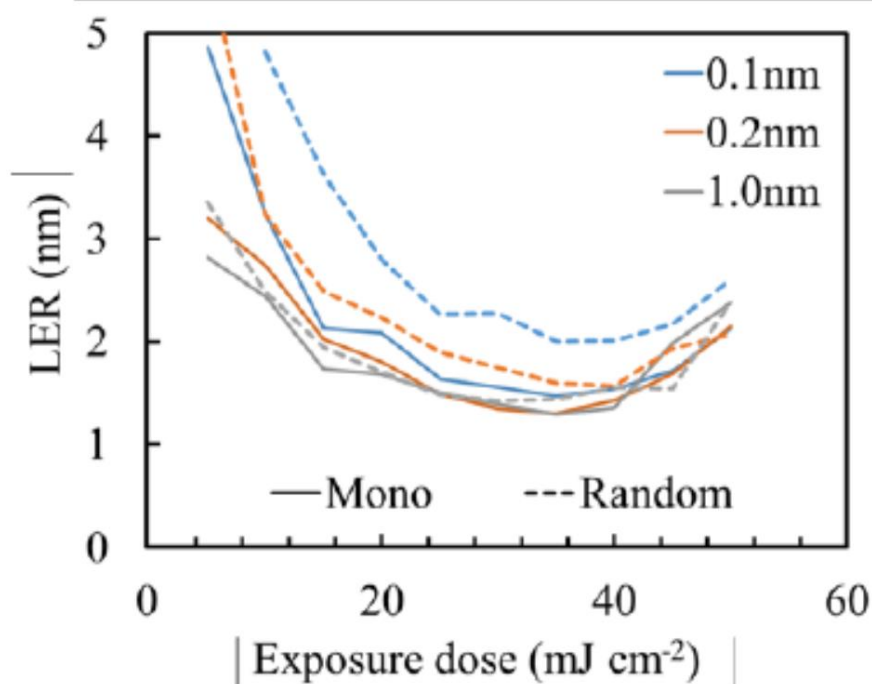
Relationship between exposure dose and LER



The optical contrast was 1.0. The effective reaction radius for de-protection was 0.1 nm.

Low acid quantum yield (Q2) can be achieved the target with high exposure dose.
High acid quantum yield (Q10) observed dramatically improve LER with low exposure dose, however, the leaching point of LER was worse than using low acid quantum yield one.

図Ⅲ.2.2-4-1-6 酸量子収率依存による露光量とLERの関係



図Ⅲ.2.2-4-1-7 実効反応半径依存による露光量とLERの関係

[2] 検討で用いたパラメーターを反映させた実材料を用いての露光検証およびその結果をもとにした再シミュレーションによる高感度化設計指針の確立

上述(i)の結果より、レジスト高感度化において、レジスト材料の潜在的な性能と要求仕様の関係から、エネルギー不足により到達しない領域と、情報不足により到達出来ない領域が存在することが明らかとなった(情報不足とは、レジストが十分にエネルギーをキャッチ出来ない状態のことである)。エネルギー不足の場合は、反応系の効率化や外部からエネルギーを供給することにより高感度化が可能である。一方、情報不足の場合は、本質的にレジスト吸収係数の増加(フッ素、メタルなどの高吸収材料の導入など)が求められる。そこで、本検討をさらに高度化するため、本検討で用いたパラメーターを反映させた実材料を用いての露光検証、およびその露光結果を元に再シミュレーションを実施すると共に、上記エネルギー不足の場合や情報不足の場合の計算などを実施した。より具体的には、Critical Dimension(CD)の10%のLine Width Roughness(LWR)の感度限界及び酸発生剤濃度依存性を明らかにするとともに、ポストリソグラフィプロセスを念頭に、LWR要求を緩和した場合に、感度限界がどの程度緩和されるかを明らかにした。また、高吸収レジストに関しては、メタルレジストの吸収係数を算出するための密度測定を実施し、さらには実材料をHSFETで露光した結果を解析した。

[3] まとめ

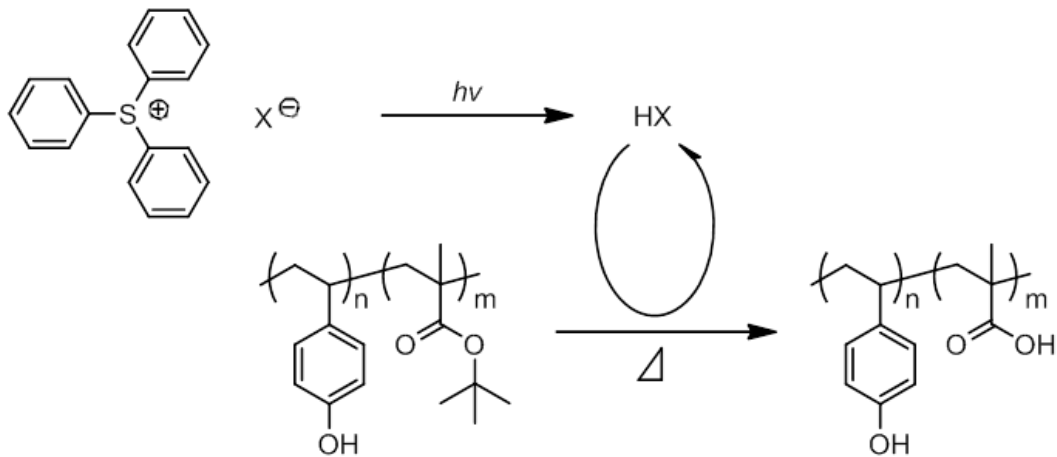
光子一個から発生する酸の個数揺らぎ有無において、酸発生剤濃度依存をシミュレーション計算した結果、ハーフピッチ11nmの加工に要求される0.9nm以下のLERを得るには、少なくとも酸発生剤濃度が30wt%必要であることを明らかにした。さらに、同様に酸量子収率依存についてもシミュレーション計算し、酸量子収率が高い場合(酸量子収率20)は、少ない露光量でもLERは急激に低減されるがそのLER下限値が不十分である事、酸量子収率が低い場合(酸量子収率2)は、LER低減が緩やかかつ高露光量が必要であるもののLER下限値はより小さくなることを明確にした。すなわち、0.9nm以下のLERを得ることは少なくとも酸量子収率10以上では困難であり、酸量子収率2では他の条件にも依存するが、0.9nm以下のLERを得る事が可能であることを明らかにした。実材料での露光実験を用いた検証も行い、シミュレーションの確からしさを検証した。

今回得られた結果は、化学増幅型EUV用レジスト全般に通ずるものであり、EUVリソグラフィ実現化へ向けたEUVレジスト材料開発、特に高感度化に極めて有効な知見として活用されることが期待される。

- (4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発
 (4)-(ii) 高感度化の為の酸増殖剤の開発(東京理科大への再委託)
 (0) 緒言

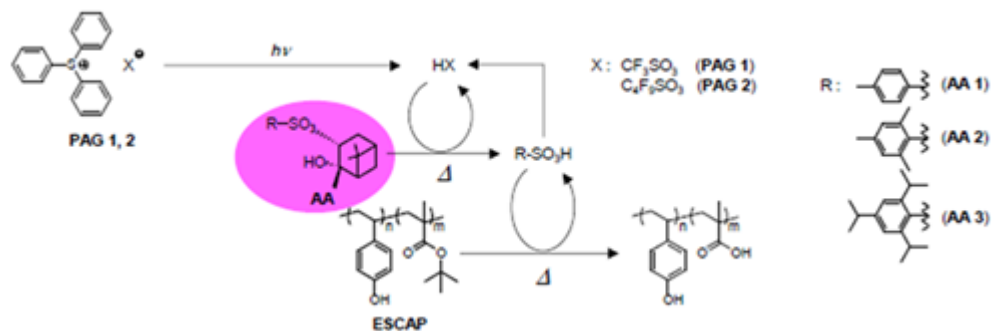
1) 開発目的と経緯、委託研究内容

EUV光による微細加工用レジストとして、従来から微細加工用レジストとして適用されている化学増幅型レジストが主流となっている(図III.2.2-4-2-1)。化学増幅型レジストは、1980年頃に開発されたシステムで光酸発生剤(PAG:Photo Acid Generator)と酸分解性ポリマーからなり、当時としては画期的な高感度化施策として導入された技術であり、KrF光およびArF光用に多くの実用化実績もち今なお使われている技術である。しかしながら、パターン微細化に伴い酸の拡散による解像度の低下を防ぐこと、エネルギー線源の強度不足を補うための高感度化などが課題となっている。



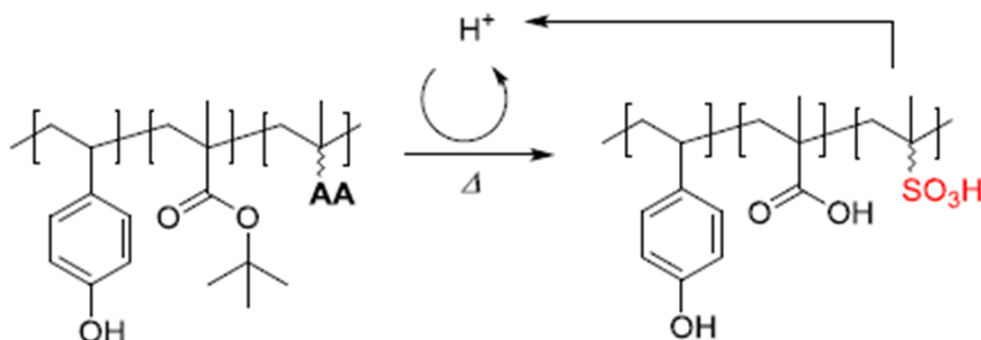
図III.2.2-4-2-1 化学増幅型レジスト反応スキーム

解像度低下を抑制しながら高感度化を達成する施策として、東京理科大学グループでは、PAGから発生した酸をトリガーとして自己触媒的に分解して新たな酸を発生する酸増殖剤(AA:Acid Amplifier)の開発を行い、化学増幅型レジストに組み込みことで高感度化に成功している(図III.2.2-4-2-2)。しかしながら、従来の酸増殖レジストでは、(1)酸増殖剤から発生した低分子量の酸(RSO₃H)が過度に拡散してしまい解像度を低下させる、(2)酸増殖剤を添加すればするほど高感度化が実現するものの、酸増殖剤が低分子化合物であるためにアウトガスが増大してしまう、といった問題点が指摘されていた。これらの理由から、低分子型の酸増殖剤を添加する方法では、高感度化と高解像性の両立は困難であった。



図III.2.2-4-2-2 従来の酸増殖レジスト 反応スキーム

そこで本研究では、上記の問題点を同時に解決するために、増殖する酸を高分子主鎖に化学結合させた高分子タイプの酸増殖ポリマーの設計および合成を行うこととした(図III.2.2-4-2-3)。このように酸増殖剤を高分子化すれば、増殖する酸の拡散は抑制され、酸増殖ユニットの添加量も共重合比で制御可能であり、酸増殖ポリマーがレジストのベース樹脂としても機能すると考えられる。この概念を導入することにより、高感度化を実現する。酸増殖ユニットのポリマーへの導入は過去に例がなく、合成が困難であることから、様々な共重合比の酸増殖ポリマーの合成法の確立、合成した酸増殖ポリマーの熱分解挙動などの物性を調べることにより高効率で酸増殖反応を引き起こし、保存安定性に優れた酸増殖ポリマーの構造を決定し、リソ性能評価実験による高感度化の検証、のステップで研究を実施することとした。



図III.2.2-4-2-3 ポリマー型酸増殖レジスト(本研究) 反応スキーム

[1] 材料開発 酸増殖ポリマーの合成

種々合成方法を検討した結果、下記に示す方法により酸増殖ポリマーの合成に成功した。本合成方法を用いることにより、添加量を調整するだけで酸増殖ユニット導入量を自在にコントロールすることが可能となり、様々な共重合比の酸増殖ポリマーを合成することが可能となった。

合成法: 四つ口フラスコにアセトキシスチレン(AS)、*t*-ブチルメタクリレート(*t*BMA)、酸増殖ユニット(AA)、アゾビスイソブチロニトリル(AIBN)(注: 重合開始剤)、テトラヒドロフラン(THF)(注: 重合溶媒)を入れて溶解させ、攪拌しながら30分間窒素バブリングした。70℃で12時間加熱攪拌した後、THFを良溶媒として大量の貧溶媒であるヘキサン中に滴下して再沈殿を3回行った。沈殿物をろ過して回収し、減圧乾燥することでポリ(AS-*t*BuMA-AA)を白色固体で得た。得られたポリ(AS-*t*BuMA-AA)をナスフラスコに移し、メタノール、THFを添加して溶解させ、28%アンモニア水を加えて6時間室温で攪拌した。溶媒を減圧留去した後、アセトンで良溶媒として大量の貧溶媒である水中に滴下、再沈殿を行った。再沈殿を三回繰り返した後、減圧乾燥し酸増殖ポリマーを白色固体で得た(図III.2.2-4-2-4)。

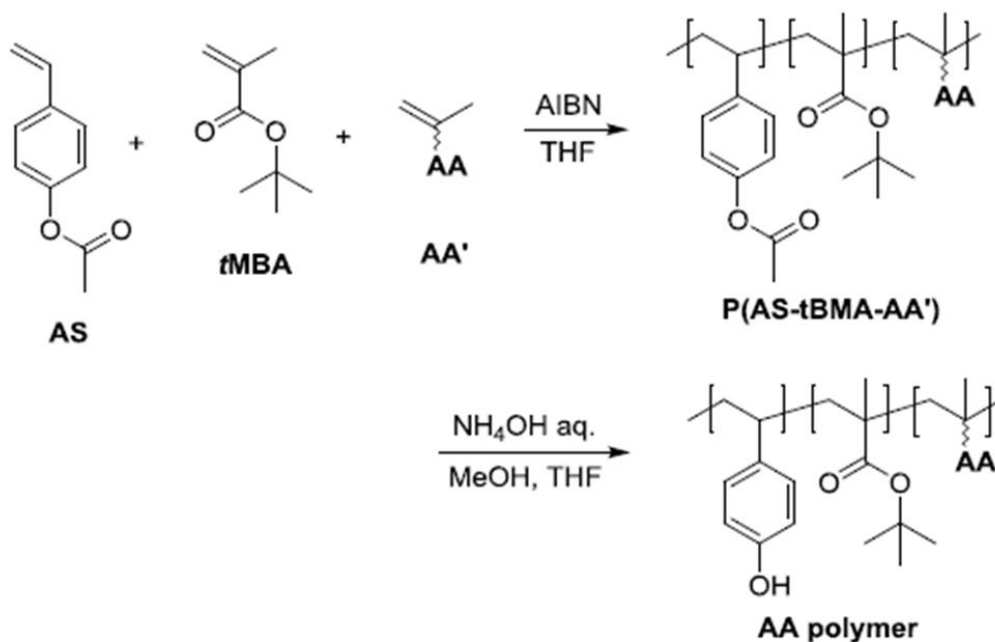
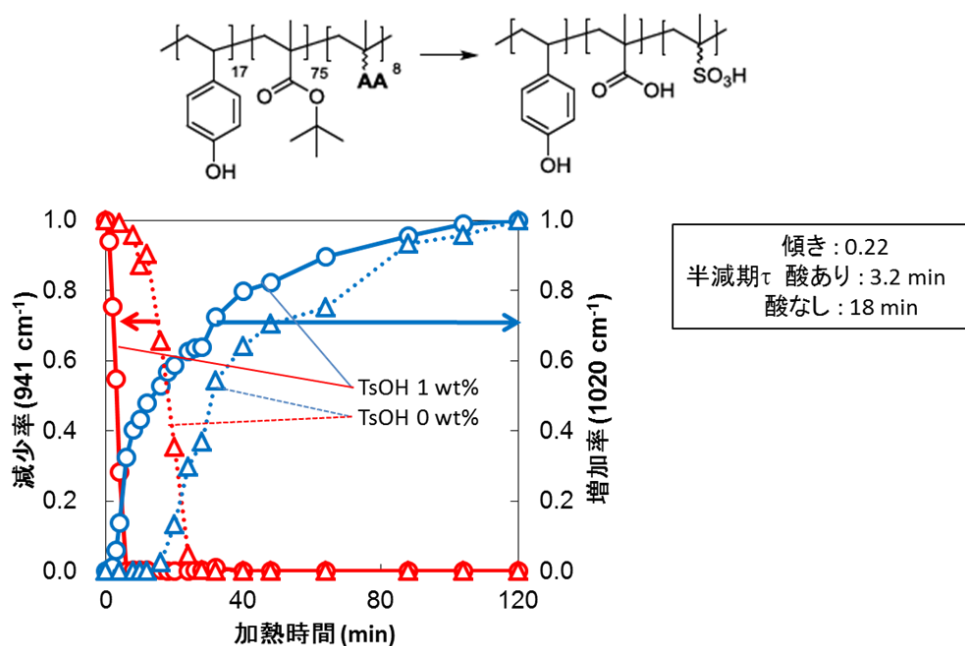


図 III.2.2-4-2-4 酸増殖ポリマーの合成

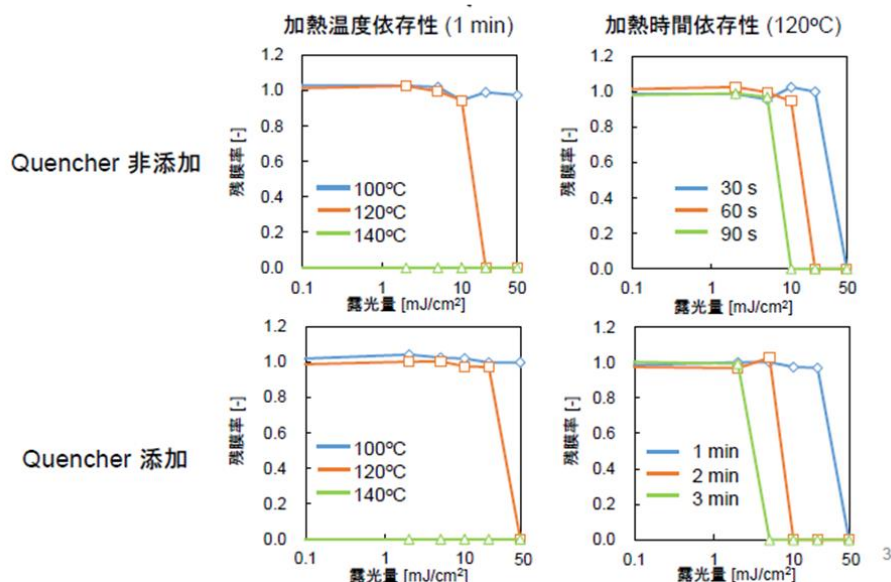
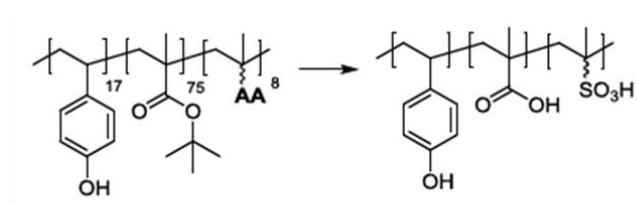
[2] 材料開発 酸増殖ポリマーの分解挙動

酸増殖ポリマーは、上述のとおり別途存在する酸の作用によって分解して酸を発生することが重要である。そこで、(i)で得られた酸増殖ポリマーの酸の作用による熱分解挙動を確認した。評価は、酸としてパラトルエンスルホン酸(TsOH)を適用し、TsOHを添加した酸増殖ポリマーをシリコンウェハ上に塗布し、得られた膜を120℃で加熱し分解挙動を、赤外分光測定装置(IRスペクトル)を用いて追跡した。その結果、941 cm^{-1} 付近に存在するスルホン酸エステル由来のS-O-C伸縮振動に基づくピークが減少し、1020 cm^{-1} 付近に存在するスルホン酸由来のS=O伸縮振動に基づくピークが増大した。加熱時間を延ばすことにより酸増殖ポリマーが分解することが確認され、酸(TsOH)を添加することでその速度が向上していることが確認された。このことにより、酸増殖ポリマーが目論み通り酸により分解していることが確認された(図III.2.2-4-2-5)。



図III.2.2-4-2-5 酸増殖ポリマーの酸添加有無による120°Cにおける熱分解挙動

また、リソグラフィ評価をするにあたり、酸増殖ポリマー自身の熱安定性を確認する目的で、加熱温度依存性(100°C、120°C、140°C)を、残膜測定による感度評価を実施し、140°Cでは酸増殖ポリマーが未露光でも分解してしまうことを確認。一方、100°Cでは分解が確認されず、120°Cが適度に分解して溶解ディスクリミネーションがとれる温度であることが確認された。さらに、適温である120°Cに関して加熱時間依存性を確認し、加熱温度により適度に感度を調整することが可能であることが確認された。同時に酸捕捉剤(Quencher)の作用による感度変動は小さく、同挙動であることが確認され、リソグラフィ評価を実施する際は、いずれの系でも検討であることが確認された(図III.2.2-4-2-6)。



図Ⅲ.2.2-4-2-6 酸増殖ポリマーの酸添加有無による120°Cにおける熱分解挙動

以上の結果より、露光により溶解ディスクリミネーションが十分取れることが確認でき、リソグラフィ評価に十分耐えうる材料である事、高感度化が期待できる系であることが確認された。

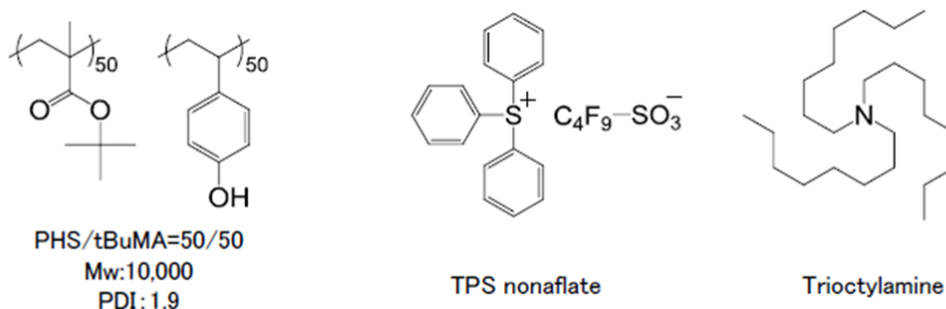
[3] 酸増殖ポリマーを用いたレジスト材料のリソグラフィ評価

上述で得られた種々の酸増殖ポリマーを用いたレジスト材料の高感度化効果を確認するため、酸増殖ポリマー含有レジスト液を調合し、次いでリソグラフィ評価をEIDEC所有のHSFET (High NA Small Field Exposure Tools) (EUV露光機)を用いて実施した。

1) 酸増殖ポリマー含有レジスト材料の調整

レジスト材料として機能させること、比較対象としての標準レジストの選定が非常に重要であることから、数多くの標準レジストおよび酸増殖ポリマー含有レジスト材料を調合し、上述のような一次評価(アルカリ現像液による溶解性試験など)をクリアした素材6種を選定した。また、比較対象としてヒドロキシスチレンユニットと酸分解性ユニットが同じ構造となるポリ(パラヒドロキシスチレン/タープチルメタクリレート(50/50))のポリマーを用いたレジストを調合した。いずれのレジストも光酸発生剤(PAG)として、トリフェニルスルホニウムナフレート(TPS nonaflate)、クエンチャーとしてトリオクチルアミンを用いた。PAG添加量、クエンチャー添加量によっても性能は著しく影響を受け、特にPAG添加量は重要な因子であるが、比較対象であるリファレンス(R-1)と同程度のPAGを添加すると、その後の酸増殖ポリマーによる酸増殖を鑑みると酸が多くなりすぎる懸念から、酸増殖ポリマーを用いた系でのPAG添加量は1%および5%と著しく抑制した系とした(図Ⅲ.2.2-4-2-7)。

レジスト	樹脂	PAG	クエンチャー
R-1(Ref)	PHS/tBuMA=50/50	TPS nonaflate (25wt%)	Trioctylamine(20 mol% of PAG)
ESV004	AA-a: PHS/tBuMA/AA=30/60/10	TPS nonaflate (1wt%)	↑
ESV005	AA-b: PHS/tBuMA/AA=50/40/10	↑	↑
ESV006	AA-c: PHS/tBuMA/AA=27/20/53	↑	↑
ESV007	AA-a: PHS/tBuMA/AA=30/60/10	TPS nonaflate (5wt%)	↑
ESV008	AA-b: PHS/tBuMA/AA=50/40/10	↑	↑
ESV009	AA-c: PHS/tBuMA/AA=27/20/53	↑	↑



図III.2.2-4-2-7 酸増殖ポリマー含有レジスト材料の材料およびレジスト組成

2) 酸増殖ポリマー含有レジスト材料のリソグラフィ評価

1) で得られた酸増殖ポリマー含有レジスト材料(ESV004～ESV009)および比較対象であるレジスト(R-1)を用いてリソグラフィ評価(パターン形成性評価)を実施した。上述のように、化学増幅型レジストおよび酸増殖レジストは、露光後、熱反応により脱保護反応を進行させる。一方で、加熱処理を施すと発生酸が拡散し解像力が低下することも分かっており、露光後の加熱処理(PEB: Post Exposure Bake)の温度が極めて重要となる。そこで、最初にPEB温度80℃、100℃、120℃と実施しパターン形成のPEB温度依存性を確認した。その結果、酸増殖ユニットの著しく多いESV006およびESV009は、いずれのPEB温度においてもパターン形成不可であることが分かった。過剰に発生した酸がパターン形成性を阻害したものと考えられる(言い換えると、酸増殖ユニットがうまく作用しているともいえる)。また、PAG添加量が少ないESV004(1wt%添加)に関しては、前述とは逆に作用する酸が少なすぎるせいか、パターン形成しないという結果を得た。一方、PAG添加量が少ないが酸発生を補助するユニットの含有量がESV004より多いESV005、および酸増殖ユニット含有量が適度で、かつPAG量が適度(5wt%)であるESV007とESV008がアルカリ現像液(テトラメチルアンモニウムヒドロキシド(TMAH)2.38%水溶液)での露光部/未露光部での溶解ディスクリミネーションがあることが確認された(図III.2.2-4-2-8)。

PEB	80°C60s	100°C60s	120°C60s
R-1(Ref)	パターン有り	パターン有り	パターン有り
ESV004	パターン無し	パターン無し	パターン無し
ESV005	パターン無し	パターン無し	パターン有り
ESV006	パターン無し	パターン無し	パターン無し
ESV007	パターン無し	パターン無し	パターン有り
ESV008	パターン無し	パターン有り	パターン有り
ESV009	パターン無し	パターン無し	パターン無し

露光量: 0.5-16.5mJ/cm²
 レジスト膜厚: 50nm
 PAB: 100°C60s
 基板: Siウェハ- /90C30s HMDS
 現像条件: 2.38%TMAH、30sLD
 露光機: HSFET(EUV露光機)

図Ⅲ.2.2-4-2-8 酸増殖ポリマー含有レジストのPEB温度依存性

上記よりアルカリ現像液での露光部／未露光部での溶解ディスクリミネーションがあることが確認された材料に対し、HSFETを用いてパターン形成性評価を実施した。酸増殖ポリマー含有レジスト材料は、まだ酸増殖ポリマー組成およびレジスト処方最適化が出来ていないため、線幅20nmといった微細領域を解像するのは困難であったことから、線幅40nm(ピッチ80nm)および線幅50nm(ピッチ100nm)でのパターン形成性および感度を比較した。EVS007は良好なパターン形成性を示すことが出来なかったが、ESV005およびESV008は比較対象レジストであるR-1に対して高感度化が確認され、特にESV008に至っては2～3倍の高感度化が確認された(図Ⅲ.2.2-4-2-9)。比較対象レジストであるR-1のPAG添加量が25wt%に対し、ESV008のPAG添加量は5wt%と1/5であるのも関わらず高感度化していることは画期的であり、レジストアウトガスの要因となりうる低分子化合物であるPAGの添加量が少ないことはレジストアウトガスの観点からも優位性が高い。パターン品質は、さらなる酸増殖ポリマーの組成最適化およびレジスト処方最適化をすることにより良化が期待できる。

レジスト	R-1 (Ref.)		ESV005	ESV007	ESV008	
樹脂	PHS/tBuMA ≈50/50		PHS/tBuMA/AA ≈50/40/10	PHS/tBuMA/AA ≈30/60/10	PHS/tBuMA/AA ≈50/40/10	
PAG量	25%		1%	5%	←	
PAB	100°C60s		←	←	←	
PEB	100°C60s	120°C60s	120°C60s	120°C60s	100°C60s	120°C60s
レジスト膜厚	50nm	←	←	←	←	←
40nmLS						
	15.0mJ/cm2	14.5mJ/cm2	13.5mJ/cm2	CD計測不良	9.5mJ/cm2	4.5mJ/cm2
50nmLS						
	14.5mJ/cm2	14.5mJ/cm2	15.5mJ/cm2	CD計測不良	8.5mJ/cm2	4.5mJ/cm2

図 III.2.2-4-2-9 酸増殖ポリマー含有レジストのリソ評価 (パターン形成性)

[4] まとめ

従来の酸増殖レジストでは困難であった高感度化と高解像性両立のため、増殖する酸を高分子鎖に化学結合させた新規高分子タイプ酸増殖ポリマーの合成に成功した。さらには、それを用いたレジスト材料が酸増殖ユニットを有さない通常の化学増幅型レジストに対して、2～3倍の高感度化となる画期的な結果を与えた。この結果は、EUVリソグラフィの実現化へ強力な後押しとなる。

- (4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発
- (4)－(iii) EUVレジスト高感度化の検証(産総研との共同研究)
- (0) 緒言

- 1) 開発目的と経緯、委託研究内容

EUVリソグラフィ用レジストとして現在主流となっている化学増幅型レジストにおいて、高感度化に大きく寄与する工程は、酸発生工程と脱保護工程である。特に酸発生工程は、光源からのエネルギーにより直接的に影響を受ける重要な工程であるため、光源出力不足を補うのに有効な手段を講じることができると考えられる。中でも、上記[2]で開発した増感剤である“酸増殖剤”は、EUVレジストに対して有望であると考えられる。また上記[1]の指針に従って開発されるEUVレジストは、これまでにない高感度なレジストとなることが期待される。

一般的には、高感度化すなわち少ない光源出力で多くの酸が発生しているか否かは、ある一定露光量での酸発生量の定量などで確認可能である。酸発生量の定量法としては、色素法や酸・塩基中和滴定法を用いることが可能である。しかしながら、EUVレジスト開発においては、解像度(Resolution)・ラフネス(Line Width Roughness)・感度(Sensitivity)という三つの要求項目に対してトレードオフの関係(いわゆるRLSトレードオフ)があり、これらを同時に満足させることが必要である。特にレジスト高感度化とラフネスの両立は大きな課題である。すなわち、ある一定露光量での酸発生量測定は必要条件ではあるものの、それだけでは十分でなく、EUVレジストとしてのリソグラフィ性能(RLS)を総合的に評価することが極めて重要となる。

そこでまず、(4)－(ii)にて開発された酸増殖剤のアイデア、基礎技術を元に、EIDECにてアイデアのブラッシュアップを行う。当該アイデアをベースとして、該酸増殖剤を“様々なEUVレジストプラットフォーム”と組合せてハーフピッチ11nm対応のプロタイプレジストを調合する。これらのプロタイプレジストを電子線直接描画装置やフルフィールド露光装置さらにはEIDECにて立ち上げたHSFET(High NA Small Field Exposure Tools)等を用いて基礎的な露光実験を行う。露光処理されたウェハを電子顕微鏡等の評価解析装置群にて評価し、レジスト感度に加えて、感度、解像度、ラフネスを総合的に評価する。これらの実験評価から、高分子樹脂を用いた従来の化学増幅型レジストの限界を明確化するとともに、その限界を打破する上記新規コンセプトによる高感度化とラフネス両立の妥当性を検証する。ラフネスの評価については、マスク欠陥がレジストパターン線幅に与える影響とレジスト材料に起因するラフネスとを識別するための評価解析を行うこととした。

また、以下背景から新たな高感度化施策が必要となり、新たに新規高感度化施策としてメタルレジストの検討が必要となった。EUVLの実用化の最大の課題はEUV光源の高出力化であるが、平成26年4月以降、光源出力40Wが安定して出るようになり、量産対応フルフィールド露光装置を導入したデバイスメーカーでは、10nm技術ノードロジックへの適用を目指したデバイス試作の本格的な検討が始まっている。しかし、量産に必要とされる250Wレベルの高出力化の達成には、なお懸念が残る中、少ない光源出力でも高い生産性を維持できる高感度レジストの開発が強く望まれていた。

このような状況下、新たな動きとして、平成26年7月に開催されたフォトポリマーコンファレンス(レジスト分野における最も権威ある国際学会の一つ)において、現行の高分子ポリマーをベースとした化学増幅型レジストに代わる新規コンセプトに基づく高感度レジストが海外研究機関より複数報告された。さらに、同じく10月開催のEUVLシンポジウムにおいても、化学増幅型レジストのさらなる開発を求める声の他、高感度化が可能な新規コンセプトレジストが海外から数多く発表された。本シンポジウムのクロージングアドレスにおいても、技術課題(Focus Area)として、最優先課題の高出力光源に続いてレジスト開発が前年の第4位から第2位に格上げされ、開発加速の必要性が報告された(Ⅲ.2.2-4-3-1)、(Ⅲ.2.2-4-3-2)。併せて新規レジスト研究の成果を早期にレジストメーカーにおける量産対応の開

発レベルに引き上げる必要性も指摘された。これら新規コンセプトの中で、最も有望と考えられているのが、メタル系レジストであり、そのEUV光に対する高吸光度を有する特性から、効率的にEUV光を吸収し反応を効率的に誘発、高感度化を実現することが期待されている。

2012 / 22hp	2013 / 22hp	2014 / 16hp
1. Long-term reliable source operation with a. 200 W at IF In 2014 b. 600 W-1,000 W In 2018	1. Long-term reliable source operation with a. 125 W at IF In 2014 b. 250 W In 2016	1. Reliable source operation with > 75% availability - 125 W at IF In 1H / 2016 (at customer) - 250 W at IF In 1H / 2018 (HVM entry at customer)
2. Mask yield & defect inspection/review infrastructure	2. Mask yield & defect inspection/review infrastructure	2. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously - Progress insufficient to meet 2016 introduction target
3. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	4. Keeping mask defect free - Availability of pellicle mfg HVM req't - Minimize defect adders during use	3. Mask yield & defect inspection/review infrastructure - Enable high yield defect free mask blank supply chain
4. EUVL manufacturing integration	4. Resist resolution, sensitivity & LER met simultaneously	3. Keeping mask defect free - Availability of pellicle mfg HVM req't : need integrated industry strategy for solution - Minimize defect adders during use

Ranked by 13th International EUVL Symposium Program Steering Committee, Washington, D.C., October 29, 2014

図Ⅲ.2.2-4-3-1 平成26年10月開催 EUVLシンポジウム クロージングアドレス 技術課題(Focus Area)

EUV Resist

EUVLシンポジウム クロージングより

- The general perception is that progress in resist materials improvement has stalled
 - There was little substantial progress over the last year
 - If not addressed, resist material readiness is at risk of quickly becoming a bottle neck for EUVL introduction
- A lot of excellent non-CAR materials research work is happening
 - This needs to quickly translate into supplier development of those new materials to drive them towards meeting manufacturing requirements

図Ⅲ.2.2-4-3-2 平成26年10月開催 EUVLシンポジウム クロージングアドレス

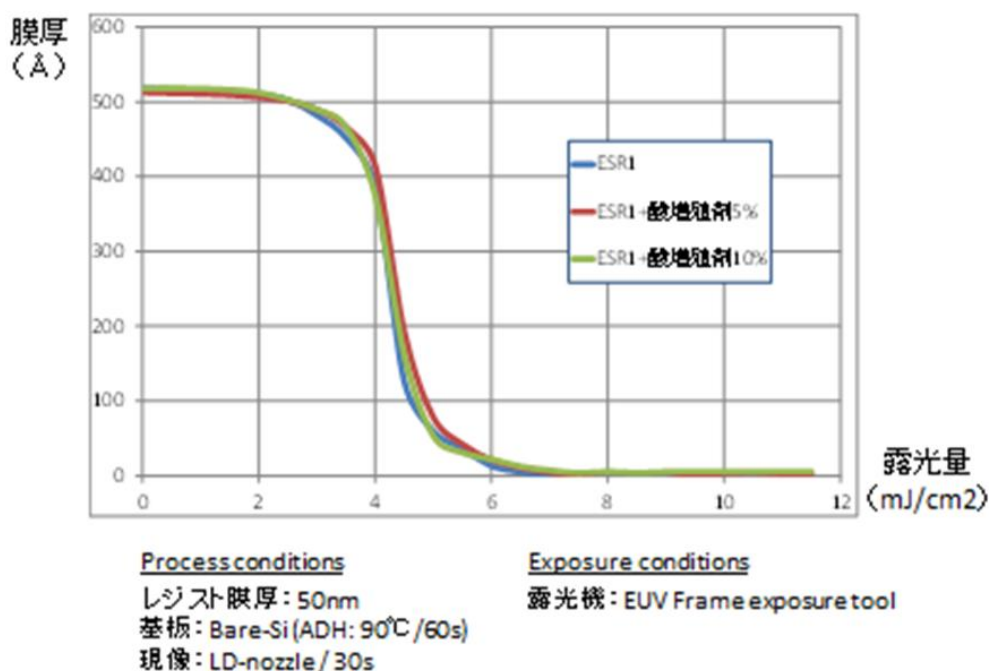
我が国は世界的に見てレジストメーカーの市場占有率が高く、また、国内大学も高い研究開発力があるため、産学共同研究を実施することにより、全く新しい革新的な高感度レジストを開発できるポテンシャルがある。しかし、手をこまねいていると本研究開発分野で諸外国に先行を許し、現在の国際競争力の優位性を失ってしまう可能性があり、早急に我が国での高感度レジスト、特にメタル系レジストの研究開発を加速する必要性が生じた。

[1] EUVレジスト高感度化の検証

1) 酸増殖ポリマーを用いた高感度化

(4) – (ii) で試作した新規高分子タイプ酸増殖ポリマーを用いて評価した結果、最終的には(4) – (ii) – [3] で示したように、通常の化学増幅型レジストに比し2～3倍の高感度化を達成した(図Ⅲ.2.2-4-2-9)。ここに到達するまでの過程を含めて記載することとする。

最初の合成にて得られたプロトタイプの新規高分子タイプ酸増殖ポリマーを通常の化学型レジストに添加する処方にて調整したレジスト材料は、オープンフレーム型EUV照射装置を用いた感度評価を実施した結果、高感度化は確認されなかった(図Ⅲ.2.2-4-3-3)。そこで、さらに処方の最適化さらにはプロセス条件の最適化を実施、EB描画装置を用いてリソグラフィ評価を実施した結果、EIDEC標準レジスト(ESR1:EIDEC Standard Resist1)に対して、目標の従来比30%以上の高感度化には届かなかったものの、10%の高感度化を達成した(図Ⅲ.2.2-4-3-4)。



図Ⅲ.2.2-4-3-3 酸増殖ポリマーを添加剤として用いたレジスト材料の感度評価

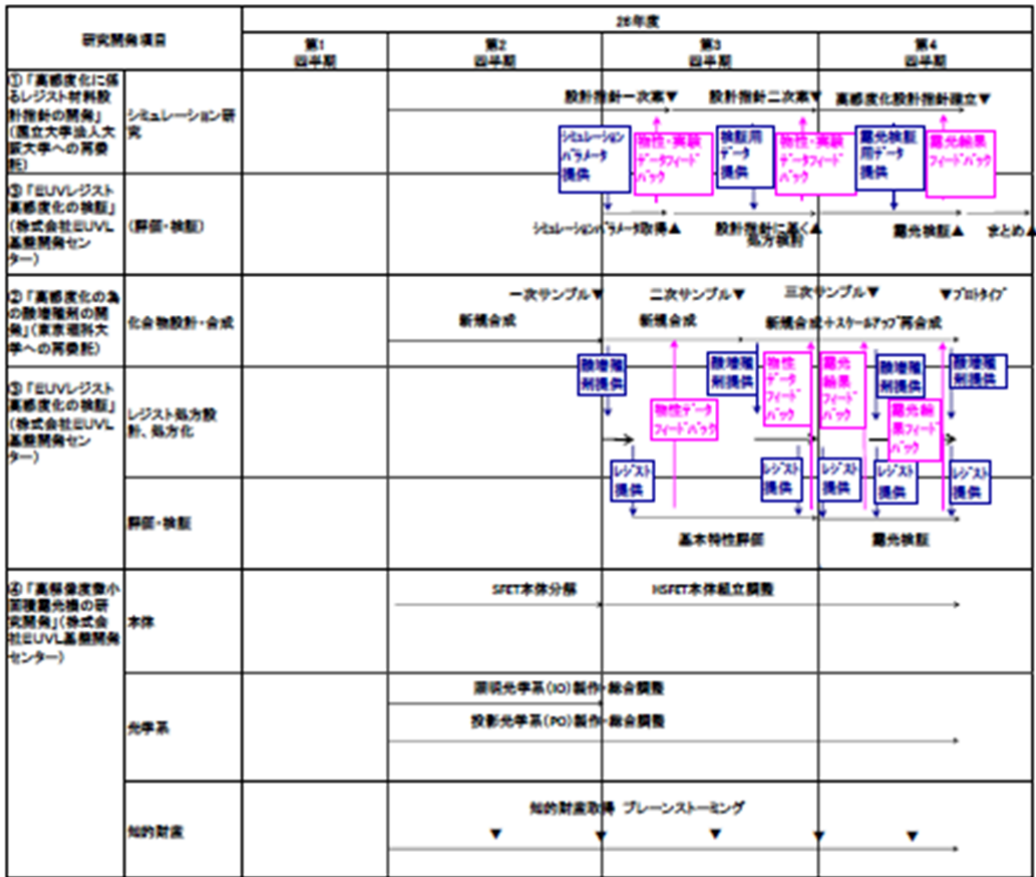
EB露光によるEIDEC標準レジスト1 (ESR1)との比較

	35nm 1:1 L/S	30nm 1:1 L/S
ESR1 (100K倍@SEM)		
Dose (uC/cm ²)	110.4	120.0
酸増殖剤含有 (100K倍@SEM)		
Dose (uC/cm ²)	105.6	115.2

図III.2.2-4-3-4 酸増殖ポリマーを添加剤として用いたレジスト材料の最適化処方 of 感度評価 (EB 描画機)

従来の化学増幅型レジストに対し有効性が確認されたため、さらなる処方検討、プロセス検討を実施し、ポテンシャルを引き出すとともに、その物性、有効性を(4) - (ii)の新規高分子タイプ酸増殖ポリマー設計にフィードバックし従来比30%以上の高感度化を目指した。限られた期間で成果を得るため、平成26年度および平成27年度それぞれ実験計画を明確にして進めた(図III.2.2-4-3-5)、(図III.2.2-4-3-6)。プロトタイプレジストの作成は酸増殖ポリマーの合成、レジスト調合、物性評価・露光評価、フィードバックを計画的(概ね4回)繰り返し、酸増殖ポリマーの合成に関しては、酸増殖ポリマーの共重合比を変化させて複数合成し、最適な共重合比を見出した。物性評価としては、主に熱に敏感な酸増殖ポリマー自身の耐熱性を評価すると共に、レジストに組み込んだ時の耐熱性を評価した(この評価結果に関しては、(4) - (ii)にて記載済み)。露光評価用として、合成された3種の酸増殖ポリマー含有レジストを、比較の酸増殖ポリマーを含まない従来型化学増幅型レジストを、PAG量、クエンチャー量をそろえて調整した(図III.2.2-4-3-7)。比較用の酸増殖ポリマーを含まないレジスト(R-1)が、パターン形成可能であったのに対し、酸増殖ポリマー含有レジストであるR-2、R-3、R-4は、いずれもパターン形成が出来ないという結果となった(図III.2.2-4-3-8)。酸増殖ポリマー含有レジストは、従来型化学増幅レジストよりも酸が多く発生することを期待していたが、その効果があり同条件ではパターン形成しなくなったものと考えられた。そこで、露光後の加熱条件であるPEB(Post Exposure Bake)温度を検討することとした。PEB温度は発生した酸の量や酸の拡散を制御することが可能な因子でパターン形成性に大きく寄与する因子である。検討の結果、R-2が低温PEB温度にてパターン形成することが確認された(図III.2.2-4-3-9)。想定通り、多くの酸が発生および拡散してしまってパターン形成が出来なかったと推察される。一方、R-3、R-4はいずれのPEB温度においてもパターン形成出来ないという結果となった。R-3に関しては、保護基が少ないこと、R-4に関しては酸増殖ユニットが多すぎるのが要因と考えられる。以上のように、新しい系である酸増殖ポリマー含有レジストは、ただポリマーを合成してレジストにすれば良いわけではなく、レジストへの調整方法、共重合比、プロセス温度など多くの因子がからみあって、良好な結果を与える事が出来る。したがって、ポリマーの合成だけでなく、上述のような高感度化の検証がいかに重要かということがあらためて確認された。

さらに、これら検討を繰り返して実験することにより、最終的に(4)－(ii)で示したように、酸増殖ユニットを有さない通常の化学増幅型レジストに対し、酸増殖ポリマー含有レジストが2～3倍の高感度化となる画期的な結果を与え、目標である従来比30%以上の高感度化を達成した(図III.2.2-4-2-9)。



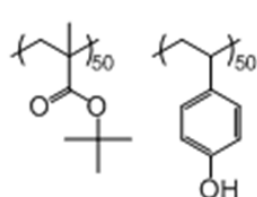
図III.2.2-4-3-5 平成26年度実験計画

研究開発項目		27年度			
		第1 四半期	第2 四半期	第3 四半期	第4 四半期
①「高感度化に 係るシミュレー ション研究」 (国立大 学法政大 学への再委託)	シミュレー ション 研究	高感度化 試験 → 設計データ一次集 → 高感度化設計データ 提供	設計データ二次集 → 高感度化設計データ 提供	高感度化設計データ 提供	
	②「SiLUVレ ジスト高感度化の 検証」(株式会 社JVLSI基盤研 究センター)	シミュレー ションデータ 提供	設計データに 基づく 電圧検証	電圧検証	まとめ
②「高感度化 のための増 強回路設計・ 検証」(東京 理科大学への 再委託)	化合物設計・ 検証	一次サンプル → 新調合成	二次サンプル → 新調合成	三次サンプル → 新調合成+スト ービド 再合成	▼7/15-1/7
	③「SiLUVレ ジスト電圧 特性の 検証、電圧 特性」 (株式会 社JVLSI基 礎研 究セン ター)	増強 回路 提供 → 電圧 特性 提供	増強 回路 提供 → 電圧 特性 提供	増強 回路 提供 → 電圧 特性 提供	まとめ
③「高感度化 に伴う 電圧特性 の検証、 電圧特性」 (株式会 社JVLSI基 礎研 究セン ター)	検証・ 検証 → 新調 リスト 提供	新調 リスト 提供	新調 リスト 提供	まとめ	
	④「高感度化 に伴う 電圧特性 の検証、 電圧特性」 (株式会 社JVLSI基 礎研 究セン ター)	新調 リスト 提供	一次サンプル → 新調 リスト 提供	二次サンプル → 新調 リスト 提供	▼7/15-1/7
④「高感度化 に伴う 電圧特性 の検証、 電圧特性」 (株式会 社JVLSI基 礎研 究セン ター)	検証		SP4に 関係 する 検証		
	化学系		SP4に 関係 する 検証		
	知能装置		知能装置 の 検証		

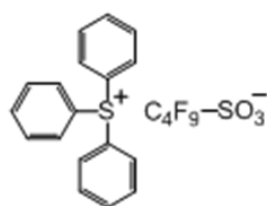
図Ⅲ.2.2-4-3-6 平成27年度実験計画

AAポリマーとレジスト組成

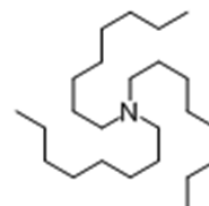
レジスト	樹脂	PAG	クエンチャー
R-1 (Ref)	FHS/tBuMA=50/50	TPS nonaflate (25wt%)	Trioctylamine(20 mol% of PAG)
R-2	AA-a:FHS/tBuMA/AA=30/60/10	↑	↑
R-3	AA-b:FHS/tBuMA/AA=50/40/10	↑	↑
R-4	AA-c:FHS/tBuMA/AA=27/20/53	↑	↑



PHS/tBuMA=50/50
Mw:10,000
PDI: 1.9



TPS nonaflate



Trioctylamine



EIDEC ERM Confidential

図III.2.2-4-3-7 共重合比を検討した酸増殖ポリマー含有レジストのサンプルリスト

レジスト評価その1: 露光量振り

AAポリマー系は全面解像。

露光量	0.2-1.8 mJ/cm ²	2-22 mJ/cm ²
R-1 (Ref)	パターン無し	パターン有り
R-2	パターン無し	パターン無し
R-3	パターン無し	パターン無し
R-4	パターン無し	パターン無し

露光量: 2-22mJ/cm²
レジスト膜厚: 50nm
PAB: 120°C60s
PEB: 110°C60s
基板: Siウエハー / 90C30s HMDS
現像条件: 2.38%TMAH, 30sLD
露光機: HSFET (EUV露光機)



EIDEC ERM Confidential

図III.2.2-4-3-8 共重合比を検討した酸増殖ポリマー含有レジストのリソ評価①

レジスト評価その2: PEB条件振り

PEB温度を下げて、酸増殖剤の効果を確認。

レジスト	PEB80°C60s	PEB100°C60s	PEB110°C60s
R-1(Ref)	パターン有り	パターン有り	パターン有り
R-2	パターン有り	パターン無し	パターン無し
R-3	パターン無し	パターン無し	パターン無し
R-4	パターン無し	パターン無し	パターン無し

露光量: 2~22mJ/cm²
 レジスト膜厚: 50nm
 PAB: 120°C60s
 基板: Siウエハー / 90C30s HMDS
 現像条件: 2.38MTMAH, 30sLD
 露光機: HSFET(EUV露光機)



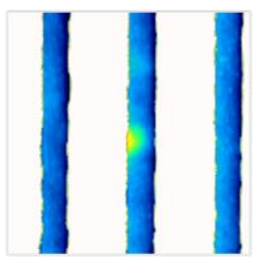
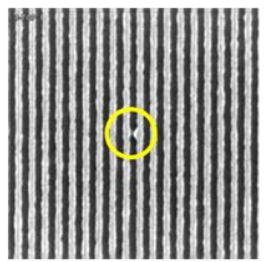
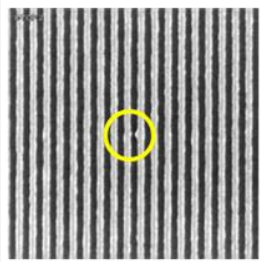
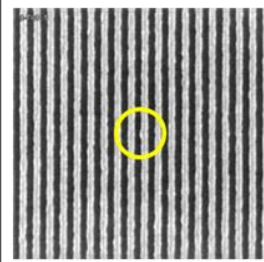
EIDEC ERM Confidential

図III.2.2-4-3-9 共重合比を検討した酸増殖ポリマー含有レジストのリソ評価②

2) マスク欠陥がレジストパターンに与える影響の解析

EUVリソグラフィを実現化させるためには、上述のレジスト材料の高感度化によるスループットの向上が重要であり、また高品質(良好なラフネス)のレジストパターンを作成することもまた重要である。高品質なレジストパターンを形成するためには、そのレジストパターンを形成させるためのマスクは、極めて高品質である必要がある。マスクの品質、すなわちマスク欠陥がレジストパターンへの程度影響を与えるかは極めて重要であり、その影響を解析した。また、マスク欠陥がレジストパターン線幅に与える影響とレジスト材料に起因するラフネスとを識別するための評価解析を行うこととした。

特に、EUVリソグラフィの欠陥制御において課題となる、EUVブランクス有位相欠陥のレジストパターンへの影響を、位相欠陥のAFM像を解析し、その位相欠陥が転写されたレジスト像を解析することにより解析した。AFMで位相欠陥を解析した結果、位相欠陥の高さは2.6nm、位相欠陥の幅は53nmであった。このとき、転写されたレジスト像はハーフピッチ27nmでピッチ54nmのパターンである。AFM像で解析された位相欠陥が、そのままレジストパターンに欠陥として転写されており、局所的に十分な露光量が得られなかったことが推定される。また、レジスト像形成時のフォーカスの影響も解析し、マイナスフォーカス側で影響が大きくなる傾向が確認された(図III.2.2-4-3-10)。

位相欠陥(AFM像)	レジスト像(Focus condition)		
2.6nm(H)/53nm(W)	-0.06um	Best focus	+0.06um
			

図Ⅲ.2.2-4-3-10 位相欠陥AFM像と転写レジスト像

以上の結果より、レジスト材料に起因するラフネスの他にマスク欠陥から転写される欠陥もラフネスに影響することが明らかとなった。すなわち、マスク自身の欠陥検査が非常に重要であることを裏付ける結果となった。

[2] メタルレジスト

1) レジスト構成剤の合成

EUV用に用いられている従来型化学増幅レジストは、EUV光により酸を発生する化合物(光酸発生剤:PAG(Photo Acid Generator))と発生した酸により極性変換され現像液への溶解性が変化する基を有する酸分解性樹脂および発生酸の拡散を抑制するクエンチャーから構成されている。化学増幅型レジストは、20年以上の歴史を有し熟成された技術であり、EUVの前々々世代であるKrFリソグラフィ、前々世代であるArFリソグラフィおよび前世代であるArF液浸リソグラフィで実用化されている技術である。最先端リソグラフィであるEUVリソグラフィ用にも実用化を目指して各レジストサプライヤーが鋭意検討中であるが、さらなるレジスト性能の飛躍が望まれることから近年非化学増幅型レジストにも期待が寄せられている。その中でも近年目覚ましい発展をとげているのが「メタルレジスト」である。メタルレジストは、基本元素構成を炭素元素、水素元素、酸素元素からなる従来型化学増幅レジストと異なり、金属元素を有している。炭素元素、水素元素、酸素元素はEUV光にわずかな吸収しかもたないため、EUV光を効率的に吸収することが出来ない一方、金属元素は、そのほとんどの元素が少なくとも炭素元素、水素元素、酸素元素よりも高いEUVに対する吸光度を有する。すなわち、メタルレジストは従来型化学増幅レジストに比し、効率的にEUV光を吸収することができ、その結果、後続反応へ効率よく活用され、EUVレジストで課題となっている高感度化を達成すること期待される。ただし、メタルレジストの検討例は少なく、最先端のEUVリソグラフィ材料としてこれまでの課題をブレイクスルー可能であることが期待できることから、EIDECでもメタルレジストの検討を開始することとした。

メタルレジストは、前述の化学増幅レジストと構成は異なるものの、化学増幅レジストの例にならって構成剤を鑑みると、最も単純には基本メタル材料(以降メタル基材という)と光酸発生剤およびその他添加剤から構成されるものと考えられる。光酸発生剤やその他添加剤は、基本的には従来型化学増幅レジストに適用されている材料の転用が可能であるが、メタル基材は新たに開発・合成が必要となる。そこで、メタル基材の合成に取り組んだ。メタル基材としては、コアとなるメタル元素誘導体と有機配位子からなるコアシェル型の材料を選択した。

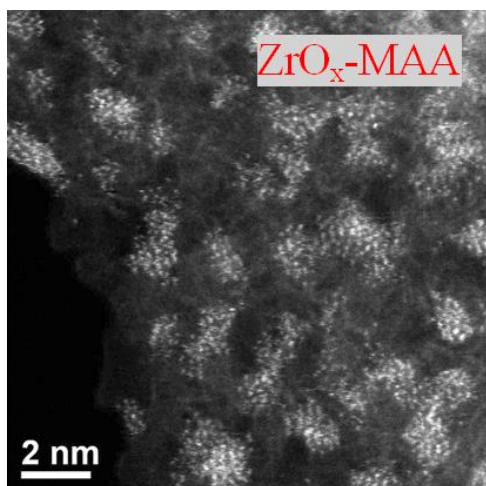
コアとなるメタル元素誘導体とシェルとなる有機物の構造を数種選択し、その組み合わせでメタル基材を合成外注した。さらに、コアとなるメタル元素誘導体に対するシェルとなる有機物のモル比の増減、コアのメタル元素誘導体の大きさの増減を合成方法の違いにより検討、合成外注した。合成されたメタル基材は、EIDECにて基板に塗布し塗布性を確認、ついで塗布膜の溶剤溶解性や塗り置き安定性(Post Coating Delay:PCD)評価などを実施し、メタル基材自身の性質を確認し、リソ性能評価へ進めるかどうかの評価を行った。また、そのとき塗布性が悪かったり、塗り置き安定性がわるかったりという、メタル基材自身に問題がある場合は、その性質を改善するような施策を施した案を盛り込み合成外注を進めるといったサイクルで進めた。また、メタル基材自身の性質が良好であった場合は再合成の依頼、さらにはスケールアップ合成まで実施し、各種リソ性能を確認するための量を確保し効率的に研究が進むようタイムリーに合成外注を実施した。

2) レジスト反応機構の分析

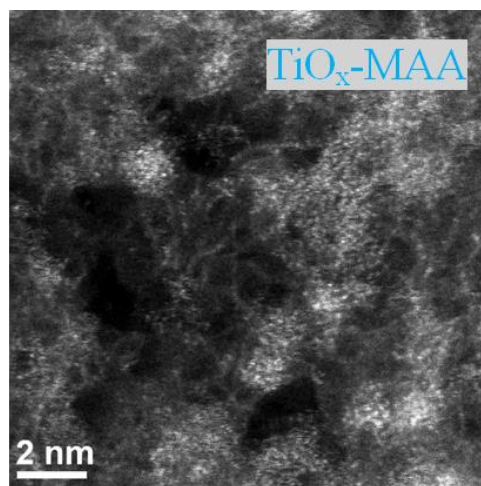
冒頭でも記載したとおり、メタルレジストは高感度化が可能であり、次世代EUVレジストとして注目されている。特に、リソグラフィ性能が先行しその高感度化に注目が集まっているが、その高感度化をもたらす反応機構が全く分からないという現状が一方で存在する。この高感度化の反応機構を分析すること、メタル基材を解析することで、さらなる性能向上につながることを期待できるため、メタルレジストの特性を種々の技術を用いて評価した。

2) - 1 メタルレジストの電子顕微鏡観察

メタルレジストの電子顕微鏡観察に関して、産業術総合研究所と共同研究を行った。メタルレジスト溶液を透過電子顕微鏡用メッシュに滴下し、乾燥させ、走査型透過電子顕微鏡(STEM)用試料とした。加速エネルギー60keVでメタルレジストをSTEMで観察した。ジルコニウム酸化物をコアとし、メタクリル酸をシェル分子とするメタルレジストのSTEM観察結果を示す(図III.2.2-4-3-11(a))。ジルコニウムを輝点として、孤立したジルコニウム酸化物を観察することができた。ジルコニウム酸化物の大きさは、約2nmでレジスト溶液中の光散乱で計測した寸法と一致した。これより、STEMを用いて、レジスト薄膜中のレジスト構成要素の分布を直接観察できることが明らかになった。チタニウム酸化物とメタクリル酸とからなるメタルレジストのSTEM観察結果を示す(図III.2.2-4-3-11(b))。コアがチタニウム酸化物になるとジルコニウム酸化物系メタルレジストとは異なり、コアが凝集していることが分かった。コア化合物同士の凝集力がシェル分子との相互作用よりも強いために、凝集していると考えられる。



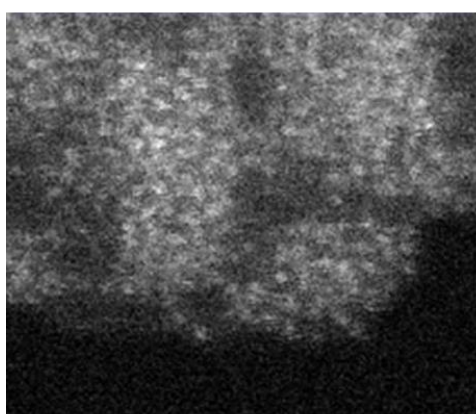
(a)



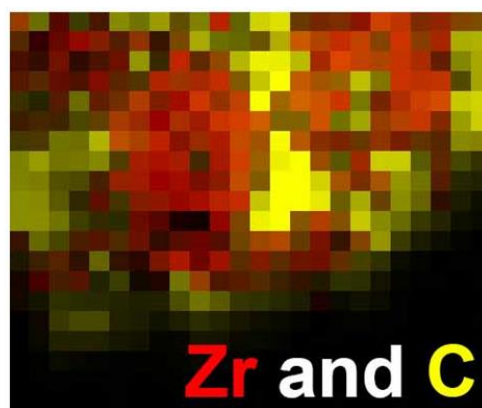
(b)

図III.2.2-4-3-11 メタルレジストの走査型透過電子顕微鏡の図
 (a)ジルコニウム酸化物/メタクリル酸 (b)チタニウム酸化物/メタクリル酸

更に、エネルギー分散型X線分光法と電子エネルギー損失分光法(EELS)を用いて、レジスト構成元素の同定を行った。ジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジストの6nm×4nmの領域をEELSで元素同定し、マッピングした結果を、STEM観察像と共に示す。STEM観察像の領域のEELS測定し、ジルコニウム原子と炭素原子の存在箇所をマッピングし、それぞれ赤色と黄色で示した(図III.2.2-4-3-12)。ジルコニウム原子がコアを作り、その周りをメタクリル酸のシエル分子が取り巻いていることが分かる。ジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジストはコアシェル構造を壊さずに、膜形成することが分かる。



(a)



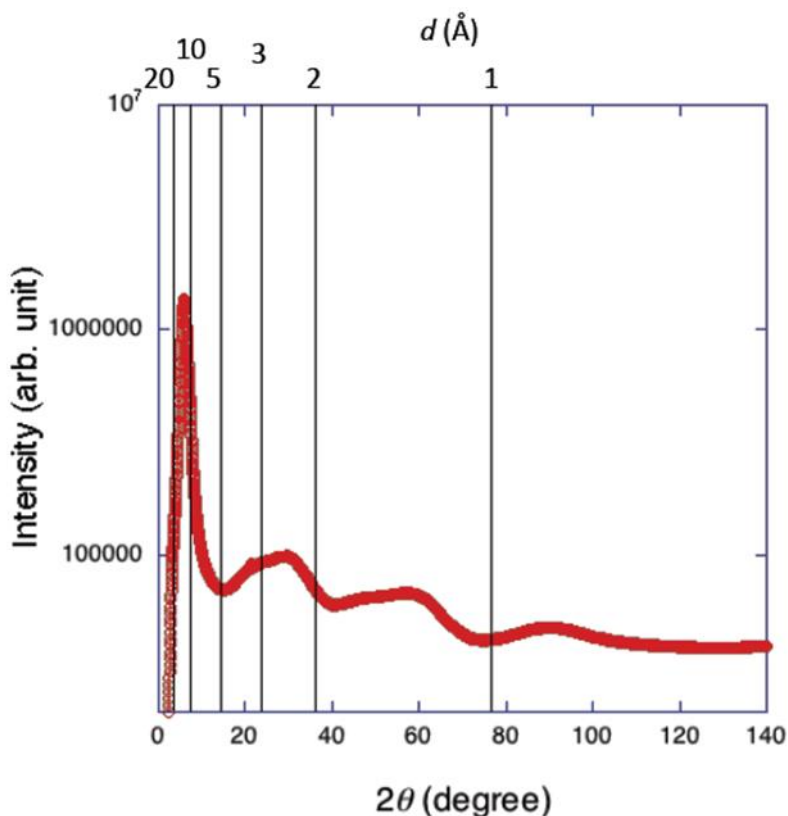
(b)

図III.2.2-4-3-12 ジルコニウム酸化物/メタクリル酸メタルレジストの走査型透過電子顕微鏡像(a) そのジルコニウムと炭素原子のマッピング図(b)

このように、STEMを用いて、レジスト薄膜の形態やレジストの構成成分の分布を直接観察することに成功した。

2) -2 メタルレジストのX線回折解析

メタルレジストのX線回折を高エネルギー加速器研究機構 物質構造科学研究所の放射光を用いて行った。ジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジストの粉体を用いて、粉末X線回折を測定した結果を示す(図III.2.2-4-3-13)。ブロードなピークが観測されたが、結晶由来の回折ピークは観測されなかったことから、ジルコニウム酸化物コアはアモルファス状態であることを確認した。ブロードなピークが15.2、3.6、2.4、1.3、0.9Åにあり、短距離の秩序性があることが分かったので、放射光を用いてX線吸収微細構造解析(XAFS)も試みたが、ブロードピークで表面構造の詳細な解析はできなかった。直径数nmの信号が各種のアモルファス構造の影響により、平均化されたことが原因と考えられる。

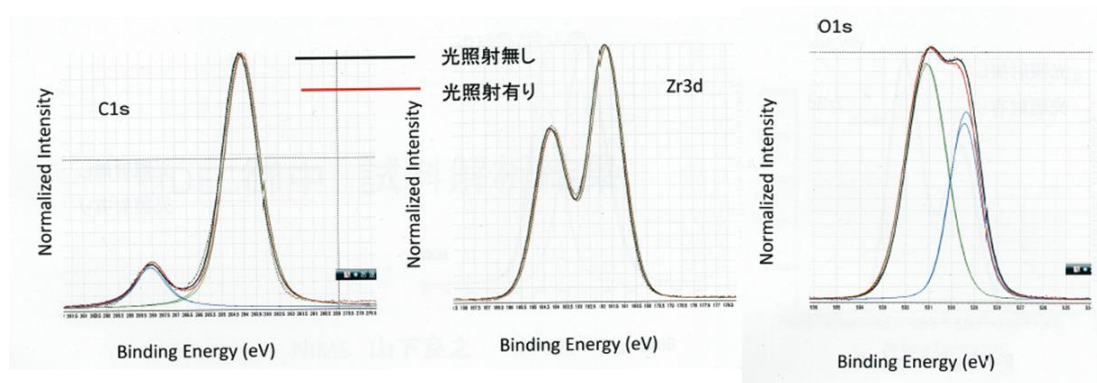


図III.2.2-4-3-13 ジルコニウム酸化物/メタクリル酸系のメタルレジストの粉末X線回折

2) -3 メタルレジストのX線光電子分光解析

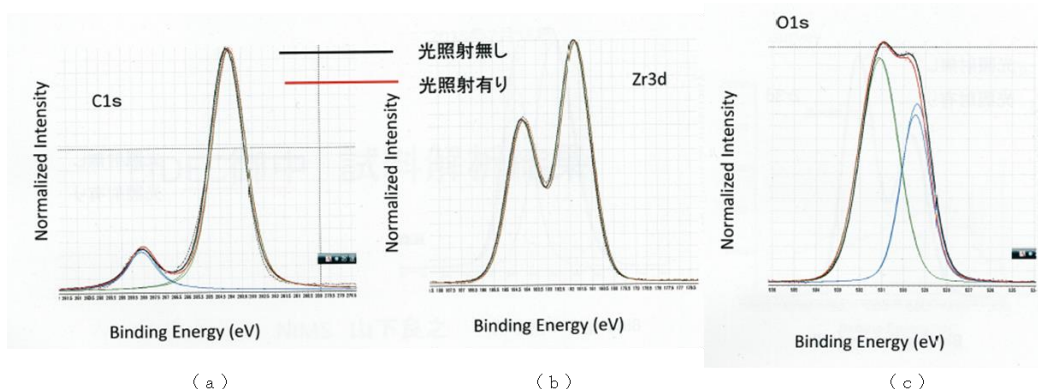
EUV 照射有無のメタルレジストに特性評価に関して、物質・材料研究機構と共同研究を行った。8.048keVのCu K α 線を用いてEUV照射有無のジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジスト試料に関して、粉末X線構造解析を行ったが、アモルファス構造に顕著な変化は見られなかった。そこでX線光電子分光(XPS)解析を行った。炭素原子の1s、ジルコニウム原子の3dと酸素原子1sのXPSスペクトルを示す(図III.2.2-4-3-14)。EUV光を照射することにより、炭素原子の1sとジルコニウム原子3dの両スペクトル共に低エネルギーシフトし、酸素原子の593eVの成分が減少することが認められた。

EUV 照射により、コアのジルコニウム酸化物とシェル分子のメタクリル酸との相互作用が弱くなったと考えられる。



図Ⅲ.2.2-4-3-14 ジルコニウム酸化物／メタクリル酸系のメタルレジストのX線光電子分光
(a)炭素原子1s、(b)ジルコニウム原子3d、(c)酸素原子1s

更に、SPring-8の5948eVのX線を用いて、総分解240meVで硬X線XPS測定を行った。EUV照射前後のジルコニウム酸化物／メタクリル酸系メタルレジストのXPS測定結果を示す(図Ⅲ.2.2-4-3-15)。SPring-8の高強度のXPS測定結果から、EUV照射によりカルボニルC=Oが分解し、ジルコニウムの酸化が進み、酸素原子に結合する水素原子O-Hも分解することが分かった。

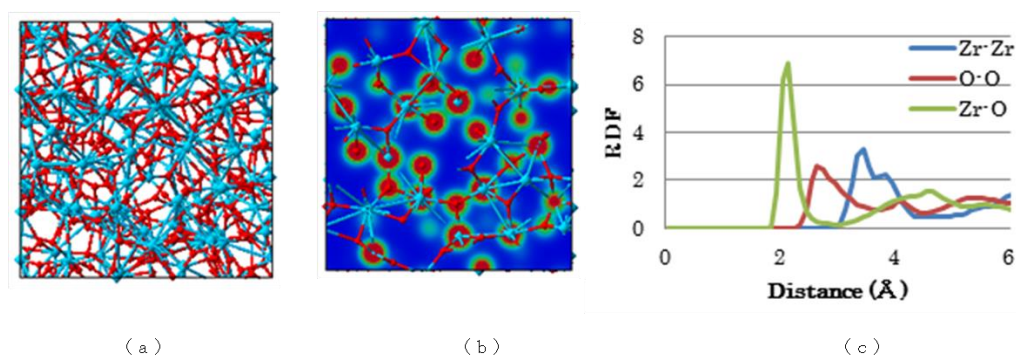


図Ⅲ.2.2-4-3-15 ジルコニウム酸化物／メタクリル酸系のメタルレジストの硬X線光電子分光
(a)炭素原子1s、(b)ジルコニウム原子3d、(c)酸素原子1s

2) -4 メタルレジストコアのシミュレーション

以上の解析から、メタルレジストコアがアモルファス状態であることを確認したが、第一原理計算の分子シミュレーション技術により、ジルコニウム酸化物／メタクリル酸系メタルレジストのコア構造を解析した。ZrO₂単結晶構造を基にして、直方格子をとったモデルにより分子動力学計算を実行し、第一原理計算プログラムVASP(Vienna Ab initio Simulation Package)によりアモルファス構造を推定した。シミュレーション結果であるジルコニウム酸化物コア構造、電子密度分布と動径分布関数を示す(図Ⅲ.2.2-4-3-16)。ジルコニウム原子と酸素原子がアモルファス構造で形成し、その電子密度分布も不

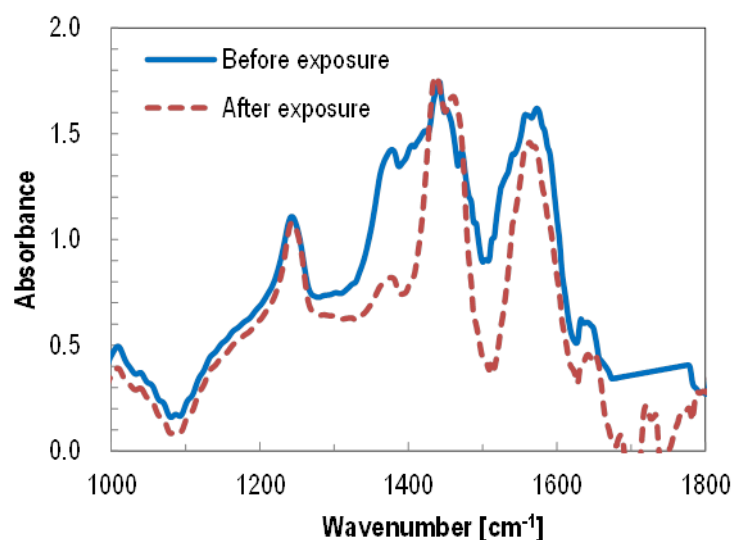
均一構造を示し、それにより動径分布関数が得られた。この結果から、Zr-O間距離は2 Å、O-O間距離は2.8 Å、Zr-Zr間距離が3.4 Å付近をピークとするブロードな分布を示すことが分かった。



図III.2.2-4-3-16 第一原理計算の分子シミュレーション(VASP)による計算結果
ジルコニウム酸化物のコア構造(a)、電子密度分布(b)、動径分布関数(c)

2) -5 メタルレジストのシェル分子の光応答性評価

メタルレジストのシェル分子の反応性を調べるために、東京理科大学 赤外自由電子レーザー施設を利用して、ジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジストのシェル分子を赤外レーザー光で励起し、赤外スペクトルの変化を測定した(図III.2.2-4-3-17)。青色の実線が赤外レーザーの照射前の赤外吸収スペクトルで、ジルコニウム酸化物コアと結合するメタクリル酸の固有の振動スペクトルが 1241cm^{-1} 、 1433cm^{-1} と 1556cm^{-1} に生じている。これらの波数でジルコニウム酸化物/メタクリル酸系メタルレジストを照射すると、 1241cm^{-1} と 1556cm^{-1} の照射では、赤外スペクトルは変化しなかったが、 1433cm^{-1} の照射では、図の赤色の破線に示すように、 1366cm^{-1} 付近のピークが減少した。この結果より、メタクリル酸シェル分子とコアとの結合は 1241cm^{-1} 、 1433cm^{-1} と 1556cm^{-1} に対応して、少なくとも3種類に分類することができ、その内、 1433cm^{-1} の振動モードは赤外励起でシェル分子がコアから外れることが分かった。

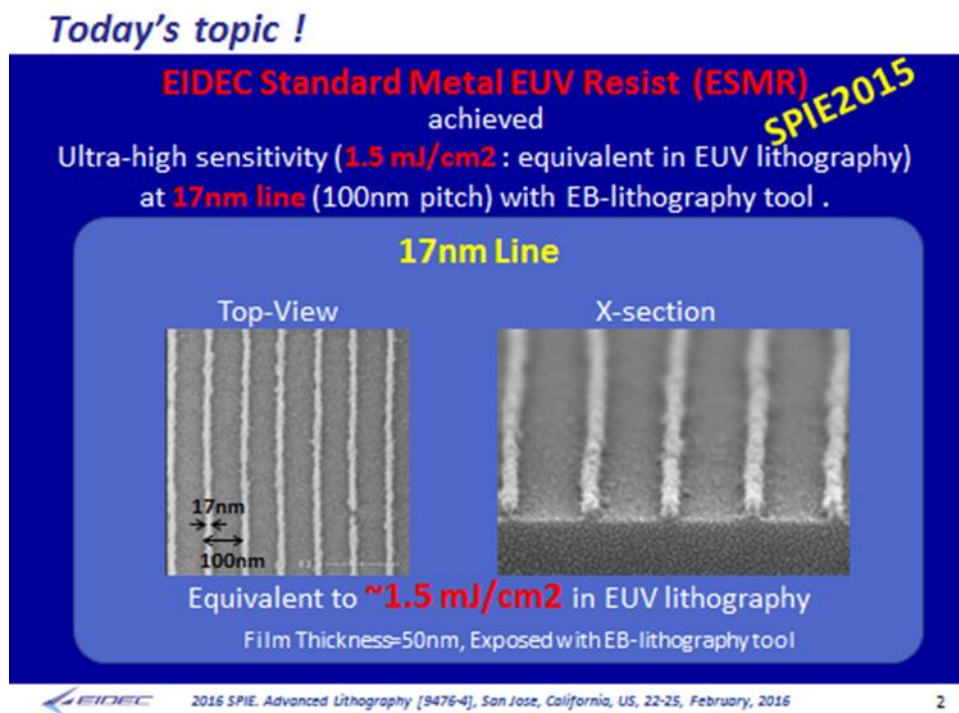


図III.2.2-4-3-17 メタルレジストの赤外レーザー光で励起した赤外吸収スペクトル

3) ウェハ加工委託

メタルレジストは、先述のようにメタル基材とその他成分からなる感光性組成物であり、その性能は露光評価(リソグラフィ評価)によって確認される。メタルレジストのメタル基材開発時は、EIDECの所有する微小面積露光機(Small Field Exposure Tool:SFET)は、後述のごとく高解像ツールへと改造中であったため、ウェハ露光が可能ないくつかの方法を開通させ、その露光評価を行った。通常の一次評価を国立研究開発法人 物質・材料研究所(NIMS)のNIMS微細加工プラットフォームを用いた電子線描画で、EUV露光は米国Lawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)のMicro Exposure Tool(MET)およびメンバーカンパニ所有のEUVフルフィールドスキャナー(NXE3100)を用い、それぞれウェハ加工委託にて露光評価を実施した。

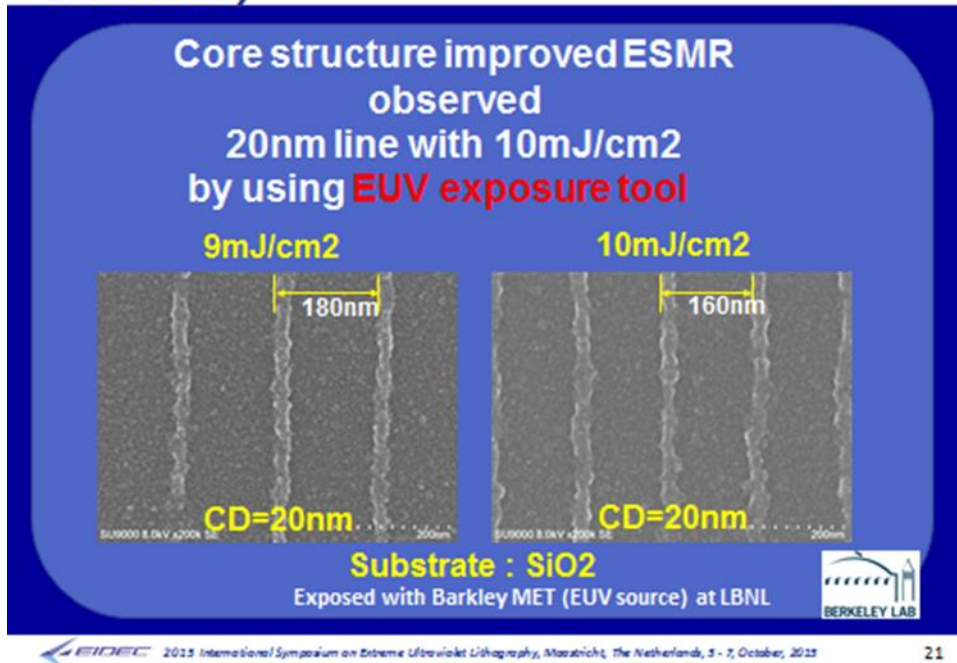
1)で得られたメタル基材を用い、EIDECにてその他成分(例えばPAG)を加え、固形分濃度を調節してレジスト溶液を調製した。一次評価としてNIMSにて電子線描画を実施することにより、リソグラフィ評価を確認し、条件検討・処方検討を経て超高感度で微細パターン形成可能なESMR(EIDEC Standard Metal EUV Resist)を開発した(図III.2.2-4-3-18)。



図III.2.2-4-3-18 電子線描画装置によるESMRのリソ評価結果

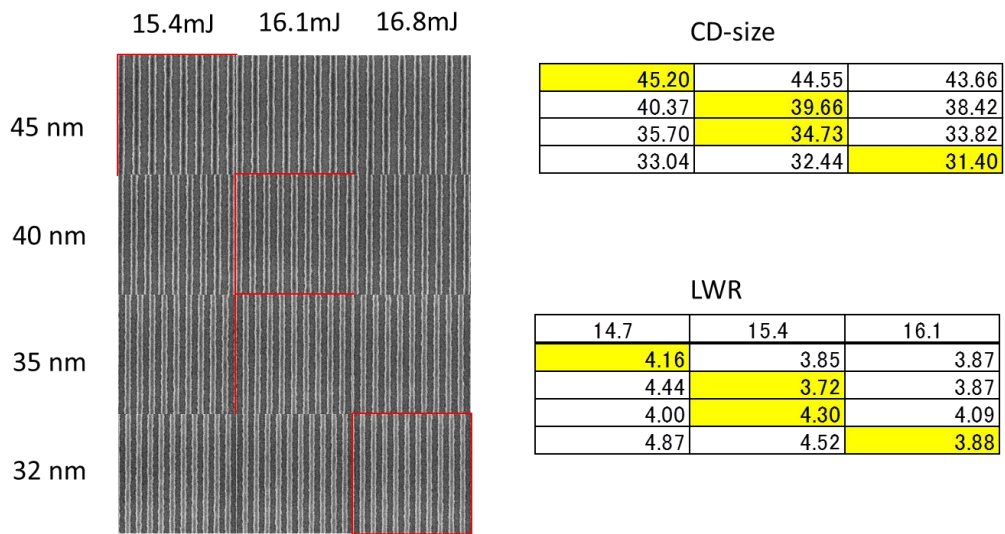
電子線描画装置でのリソグラフィ評価は、参考にはなるもののEUV露光での評価と同じになるとは限らないため、早期なEUV露光での確認が必要であった。そこで、米国Lawrence Berkeley National Laboratory(LBNL)のMicro Exposure Tool(MET)にアクセスし露光評価を行った。その結果、EUV露光でも高感度で微細パターン形成が可能であることが確認された(図III.2.2-4-3-19)。

3. Summary



図Ⅲ.2.2-4-3-19 米国LBNLのMETを用いたEUV露光評価結果

さらに、メンバーカンパニー所有のEUVフルフィールドスキャナー(NXE3100)をEUV露光機会としてアクセスした。EUVフルフィールドスキャナーは、量産適用を目論んだ装置であるため露光装置へ持ち込む材料に制限がある。残念ながら、メタルレジストを該装置に導入するには時期尚早であったため、通常の化学増幅レジストを評価することとした。微小面積露光機と異なり、ウェハ全面への露光が可能であるため、量産向けの様々な評価が可能となるツールである。一方で、頻繁にアクセスすることが困難である事、評価出来る材料に制限があることから、通常頻繁に評価可能な微小露光装置との相関取りも行えることから、このタイミングでの評価は非常に有意義であった。代表的なとしてESR1 (EID EC Standard Resist 1)の評価結果を示す(図Ⅲ.2.2-4-3-20)。CD-サイズおよびLWRもきちんとした数字として算出可能であり、これらデータを用いて、前述のシミュレーションへのフィードバックとして用いることが出来、より現実的なシミュレーションが可能となり、EUV実現化へ向けた道筋を作ることが出来た。



図III.2.2-4-3-20 メンバーカンパニーのフルフィールドスキャナー(NXE3100)を用いたEUV露光評価結果

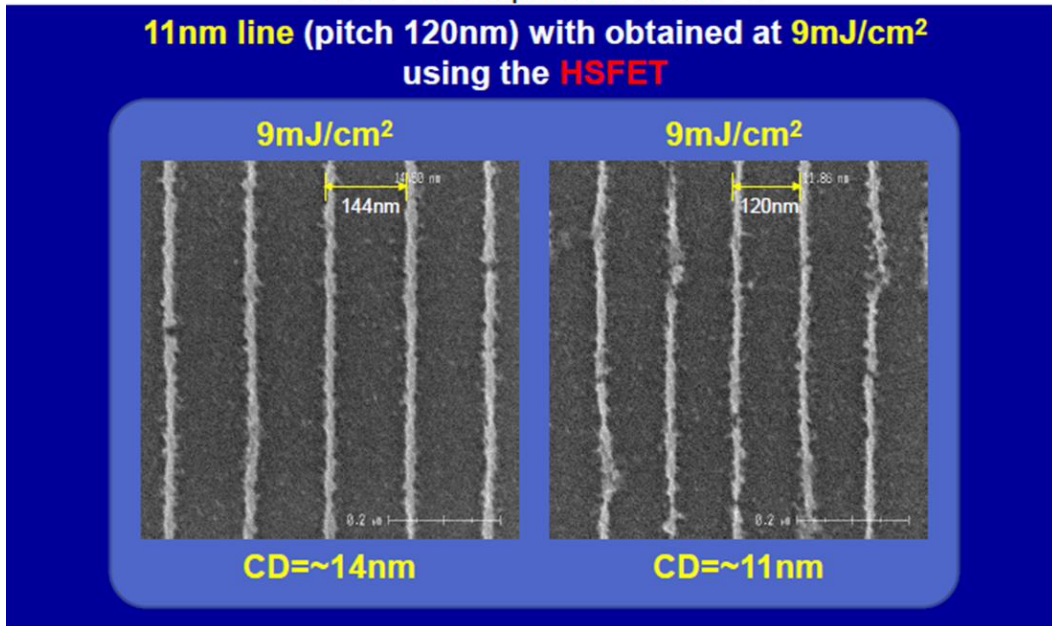
4) hp11nmパターン露光機会の増大

次項に示すとおり、EIDECにて高解像度微小面積露光機(High NA Small Field Exposure Tool : HSFET)が開発された。これまでは、前述のウェハ加工委託によって、外部での露光に依存してきたため、そのタイミングおよび露光材料の制限などもあり、露光評価は非常に限られていた。また、通常のレジスト開発で行われるような露光評価・結果考察・次水準の考案・露光評価というサイクルでの評価が困難であったため、開発速度が制限されがちであった。EIDECで自由にタイムリーに使用出来るEUV露光機が立上ったため、タイムリーにかつ頻繁に露光評価が可能となった。

そこで、これまで検討してきたメタルレジストをHSFETで露光しその性能を確認した(図III.2.2-4-3-21)。11nmラインが9mJ/cm²と高感度で解像することが確認され、ESMRのEUV露光でのポテンシャルが示されたと同時に、HSFETの有用性も同時に確認された。露光評価に伴い周辺装置整備を進めたためタイムリーに露光評価が可能となったため、メタル基材検討、それを用いた処方検討、プロセス検討などを露光評価、結果考察、さらなる水準作成、次の評価とサイクルを回しながら評価を行った。その結果、17nmラインをLWR=5.6nmで7mJ/cm²の高感度で、また24nmラインを33mJ/cm²の感度ながらLWR=3.8nmという性能を有する新ESMRを開発するに至った(図III.2.2-4-3-22)。メタルレジストが、高感度・高解像力・低LWRという高いポテンシャルを有することが確認された。さらに、膜厚、プロセス条件を鋭意検討した結果、膜厚20nmで約12nmのラインパターンが高感度で解像することが確認された(図III.2.2-4-3-23)。

ESMR: First exposures at HSFET

11nm line (pitch 120nm) with obtained at 9mJ/cm² using the HSFET

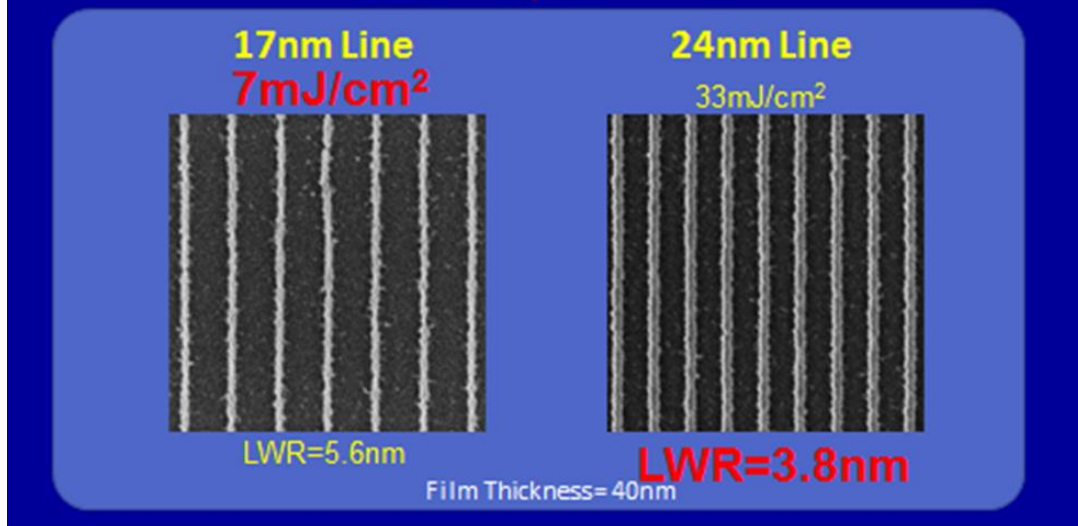


図Ⅲ.2.2-4-3-21 ESMRのHSFETを用いた最初の露光評価結果

Today's topic ! - Lithographic performance -

New EIDEC Standard Metal EUV Resist (ESMR) achieved

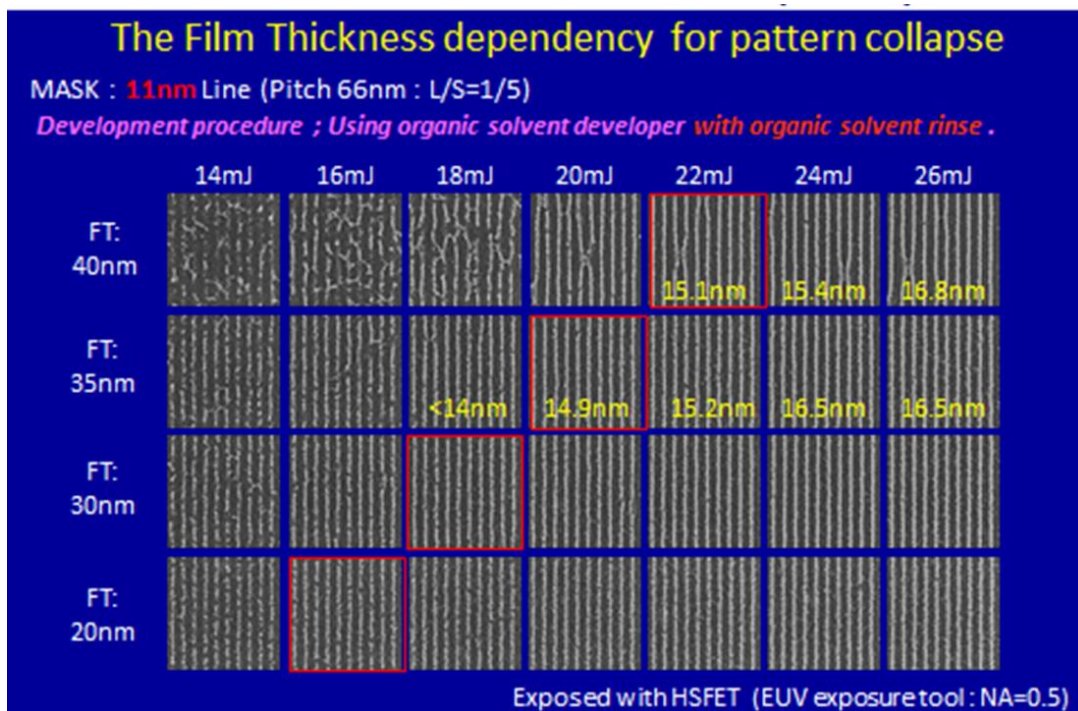
Ultra-high sensitivity and / or Excellent LWR performance with EUV exposure tool .



2016 SPIE. Advanced Lithography [9476-4], San Jose, California, US, 22-25, February, 2016

5

図Ⅲ.2.2-4-3-22 HSFETを用いた露光評価による新ESMRの評価結果



図III.2.2-4-3-23 薄膜・新プロセスによる新ESMRのパターン形成性

[3] まとめ

(4) - (ii) で得られた酸増殖ポリマーを用い、それをEIDECで処方化し検討した結果、従来の化学増幅レジストに対し2~3倍の高感度化を示すレジストを開発することに成功した。酸増殖剤は以前から知られていたが、今回それをポリマー型にすることでブレイクスルーすることに成功した。

また、新たに従来の化学増幅型レジストではない新規な反応機構を有するメタルレジストの研究に着手し、超高感度・高解像力のメタルレジストを開発した。EUV実現化の最大の課題である生産性をレジスト材料の高感度化により材料サイドからの課題解決に道筋をつける大変有意義な結果である。さらに、その反応機構解析を検討し、これまで確認する方法がなかったレジスト膜内部の構造まで解析を行い、その構造を明らかとした。この結果は、メタルレジストのさらなる性能向上に向けて分子設計を考える際、非常に有用な知見として用いられる。

2. 研究発表・講演、文献、特許等の状況

- 国際学会； 14 件
- 国内学会； 2 件
- 査読付き論文； 9 件
- 特許出願； 3 件

- 国際学会（詳細）
- Intl. Conf. on Photopolymer Science and Tech. (Photopolymer conf.) (1 件)
 1. “Relationship between Thermalization Distance and Line Edge Roughness in Sub-10 nm Fabrication Using Extreme Ultraviolet Lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Symp. on Extreme Ultraviolet Lithography (3 件)
 1. “Novel ultra-high sensitive non-CAR materials using EUV exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Julius Santillan, Shinya Minegishi, Takashi Kamizono and Toshiro Itani (2015).
 2. “Development of metal resist and underlayer”, Shinya Minegishi and Toshiro Itani (2015).
 3. “Suppression of stochastic effects in chemically amplified resist processes for extreme ultraviolet lithography”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Microprocesses and Nanotechnology Conf. (MNC) (3 件)
 1. “High-Sensitivity Metal-based Resists for EUV Lithography”, Julius Joseph Santillan, Toru Toriumi and Toshiro Itani (2015).
 2. “Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme-ultraviolet (EUV) lithography”, Shinya Fuji, Takahiro Kozawa, Kazumasa Okamoto, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
- Intl. Workshop on EUVL (1 件)
 1. “Recent Progresses in Negative-tone Imaging using EUV Exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
- SPIE Advanced Lithography (6 件)
 1. “Recent progress of negative-tone imaging with EUV exposure”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi and Toshiro Itani (2015).
 2. “Relationship between information and energy carried by extreme-ultraviolet photons: consideration from the viewpoint of sensitivity enhancement”, Takahiro Kozawa, Shinya Fuji, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2015).
 3. “Novel ultra-high sensitive ‘metal resist’ for EUV lithography”, Toru Fujimori, Toru Tsuchihashi, Shinya Minegishi, Takashi Kamizono and Toshiro Itani (2016).
 4. “Process development of ‘metal resist’ for EUV lithography”, Shinya Minegishi, Julius Joseph Santillan, Takashi Kamizono, Toru Fujimori and Toshiro Itani (2016).
 5. “Characterization of ‘metal resist’ for EUV lithography”, Toru Toriumi and Toshiro Itani (2016).
 6. “Study on stochastic phenomena induced in chemically amplified poly(4-hydroxystyrene-co-t-butyl methacrylate) resist (high-performance model resist for extreme ultraviolet lithography)”, Takahiro Kozawa, Julius Joseph Santillan and Toshiro Itani (2016).

■ 国内学会 (詳細)

○ シリコンテクノロジー分科会 (1 件)

1. “SPIE Advanced Lithography 2015 特集 「SPIE レビュー」”, Toru Fujimori (2015).

○ 光ビームプラットフォーム報告会 (1 件)

1. “赤外自由電子レーザーによる EUV レジスト開発”, Minoru Toriumi (2016).

■ 査読付き論文一覧 (詳細)

筆頭 (2 件)

1. T. Fujimori, T. Tsuchuhashi and T. Itani: “Recent Progress of Negative-tone Imaging Process and Materials with EUV Exposure”, J. Photopolym. Sci. Technol. 28, 485 (2015).

2. M. Toriumi, Y. Sato, M. Koshino, K. Suenaga, T. Itani: “Metal resist for extreme ultraviolet lithography characterized by scanning transmission electron microscopy”, Appl. Phys. Express 9 (2016) 31601.

共著 (7 件)

1. T. Kozawa, J. J. Santillan, and T. Itani: “Feasibility study of sub-10-nm-half-pitch fabrication by chemically amplified resist processes of extreme ultraviolet lithography: II. Stochastic effects”, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 036507 (2015).

2. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: “Effect of thermalization distance on chemical gradient of line-and-space patterns with 7 nm half-pitch in chemically amplified extreme ultraviolet resists”, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 066501 (2015).

3. S. Fujii, T. Kozawa, K. Okamoto, J.J. Santillan and T. Itani: “Relationship between information and energy carried by photons in extreme ultraviolet lithography: Consideration from the viewpoint of sensitivity enhancement”, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 86502 (2015).

4. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: “Quencher diffusion in chemically amplified poly(4-hydroxystyrene-*co*-*t*-butyl methacrylate) resist”, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 118002 (2015).

5. S. Fujii, T. Kozawa, K. Okamoto, J.J. Santillan and T. Itani: “Shot noise limit of sensitivity of chemically amplified resists used for extreme ultraviolet lithography”, Jpn. J. Appl. Phys. 54, 116501 (2015).

6. T. Kozawa, J.J. Santillan and T. Itani: “Relationship between Thermalization Distance and Line Edge Roughness in Sub-10 nm Fabrication Using Extreme Ultraviolet Lithography”, J. Photopolym. Sci. Technol. 28, 669 (2015).

7. T. Kozawa, J.J. Santillan, and T. Itani: “Effect of thermalization distance on stochastic phenomena in 7-nm-half-pitch line-and-space pattern fabrication using chemically amplified extreme ultraviolet resists”, Jpn. J. Appl. Phys. 55, 026504 (2016).

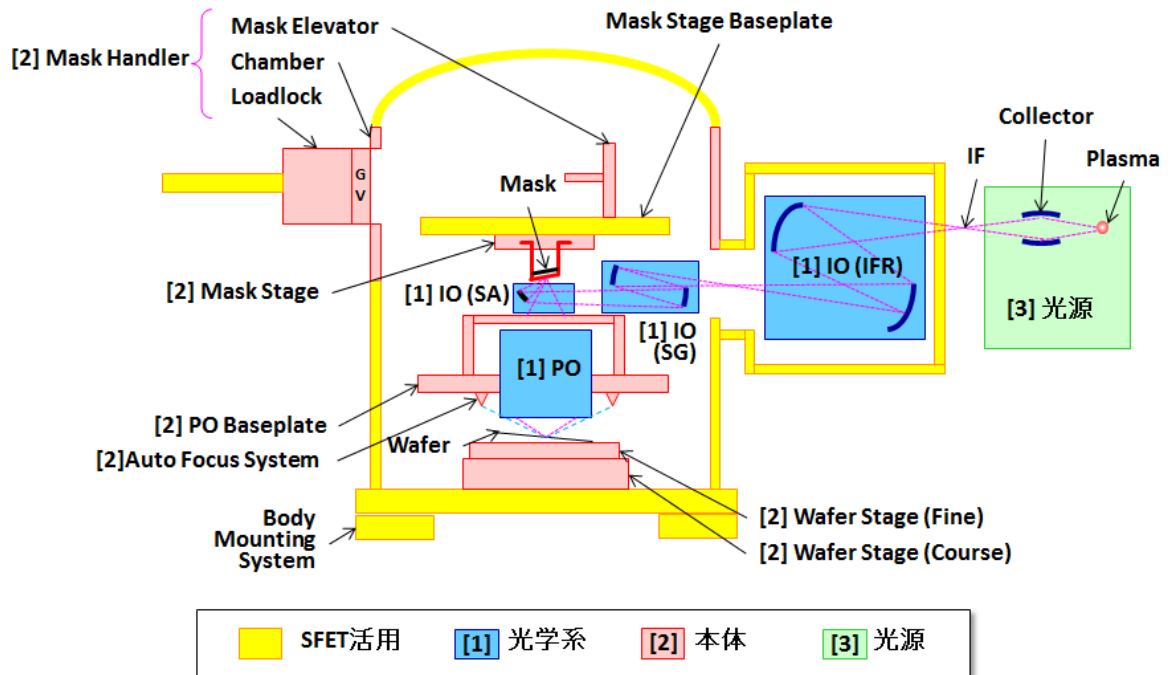
(4) EUVレジスト材料設計及び評価基盤技術開発

(4)-(iv)高解像度微小面積露光機の研究開発 (株式会社EUVLEUVL基盤開発センター)

平成23年度より国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構が実施している「次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発(超低電力デバイスプロジェクト) // 研究開発項目①「マスク検査・レジスト材料技術開発」では、最終目標として11nmの線幅で半導体回路を構成可能とする微細加工・評価基盤技術の確立を目指した研究開発を行ってきた。当該研究開発のうち、レジスト材料の開発・評価技術開発では、当該機構が所有する微小面積露光機SFET(Small Field Exposure Tool)を利用してレジスト材料の開発を実施してきたが、SFETはその仕様上、hp16nm程度の解像度での露光が限界である。そこでhp11nm以下の微細加工を実現するEUVレジスト材料の基盤技術開発に必要な高解像度微小面積露光機HSFETを開発することとなった。

[1] HSFET全体構成・仕様

HSFETの概略構成を示す。HSFETは、hp11nm以下の解像度での露光が可能な試験用EUV露光装置である。それぞれのモジュール名称と判別番号を記載した(図III.2.2.4-4-1参照)。



図III.2.2.4-4-1 HSFET 概略構成

光源[3]より発せられるEUV光はCollectorにて集光され、中間集光点(Intermediate Focus: IF)にて焦点を結ぶ。次にEUV光は[1]照明光学系(Illumination Optics: IO)にて[2]マスクステージ上のマスクホルダに載置されたマスクへと導かれ、マスクを入射角6度で照明する。不図示であるが、IOには照明絞り(Illumination Aperture)とスペクトル純化フィルタ(Spectral Purity Filter: SPF)が載置されており、EUV光は両者を通過する。照明絞り(Illumination Aperture)は部分コヒーレント光学系における二次光源の形状を規定するものであり、円形照明、輪帯照明、Quadrupole照明、Dipole照明など複数の照明絞りをターレットに保持しており、大気解放することなくプログラムによって自動変更できる。またジルコニウムなどの薄膜から

構成された SPF は光源より発せられる EUV 光以外の波長域の光をフィルタリングする機能を有しており、アウトオブバンド光が後段のマスク、ウェハに到達しないよう遮断する。マスクを照明した EUV 光はマスク上のパターン寸法、ピッチに応じた角度で回折され、[1]投影光学系 (Projection Optics: PO) によって、[2]ウェハステージ上に載置されたウェハ上に像を結ぶ。ウェハは[2]オートフォーカスシステムによって PO のベストフォーカス位置に導かれる。光源から IO、マスク、PO を介してウェハに至るすべての光路は、EUV 光が空気中で吸収されないように真空中に載置される。本構成の HSFET を開発するにあたって、開発コスト・期間の観点から SFET を極力活用することとした。黄色の部分が SFET を活用した部分である。HSFET の基本仕様を示す。参考として SFET の仕様も併せ示す(表Ⅲ. 2. 2. 4-4-1 参照)。

また NA 可変機能を有しているので、注目するデバイスのパターンサイズ、パターン種類に最適な NA でのレジストパターンニング評価が可能であるのが特徴である。

Items	SFET	HSFET
Resolution [nm] (L/S)	24 ~ 16	16 ~ < 11
NA	0.3	0.51 (可変)
Magnification	1/5	1/5
Illumination	Max $\sigma=0.7$ (可変)	Max $\sigma=1.0$ (可変)
Field Size [mm]	0.2*0.6	0.2*0.03
Source Power @ IF [mW]	25	62.5~

表Ⅲ. 2. 2. 4-4-1 HSFET 基本仕様

〔2〕 本研究開発までの経緯

上述した背景の下に、経済産業省の委託事業である平成 23 年度「低炭素社会を実現する超低電力デバイスプロジェクト (EUV (極端紫外線) 露光システムに必要な評価基盤技術構築)」が公募され、これを受託して、平成 24 年度及び平成 25 年度に HSFET 実現のための要素技術開発を行った。ここでは、HSFET 要求仕様書作成、光学系関連要素技術開発、本体の機構系開発、光源開発を行った。

平成 25 年度には、上記事業と併行して本プロジェクト (「次世代半導体微細加工・評価基盤技術の開発 (超低電力デバイスプロジェクト)」) の研究開発項目①EUV マスク検査・レジスト材料技術開発において、光学系の詳細設計、単体ミラーの開発、光学系の性能予測と調整指針の検討を行った。

〔3〕 研究開発の概要

本研究開発は上記の成果を基に実施した。実施内容の説明に関連して HSFET の光学系全体構成を示す(図Ⅲ. 2. 2. 4-4-2参照)。

(a) IOモジュール精密組立調整

IFR、SG、SAグループそれぞれ単独で大気中の調整用定盤上で精密光学調整した。さらに、それぞれのモジュールを一体として各グループ間のアライメントを調整した。本体搭載後の再現を迅速にするため、レーザトラッカーでアライメント後のグループそれぞれの要所の座標記録を行った。以降「グループ」も「モジュール」と呼ぶ。以下〔4〕章で詳述する。

(b) 光学系搭載前の本体組立

光学系搭載前の本体組立調整を実施した。SFETを分解した後、PO定盤を搭載し、ウェハ

ステージ・マスクステージ、マスク搬送系ユニットを取付けてシステム調整を行い、光源制御機能の調整を行った。以下[5]章で詳述する。

(c) IO光学系搭載、調整

次にSA以外のIOを本体内に設置、アライメントを行った。各モジュールを順次設置してゆく際に、記録された位置情報に基づいてレーザトラッカーによって位置決めを行った。第二に投影光学系 (P0) を設置する際に、P0のx, y, z位置を規定するための部材であるP0マウントリングを本体に設置した。またステージの発熱からP0を守るためのHeat Shieldを本体に設置した。以下[6]章で詳述する。

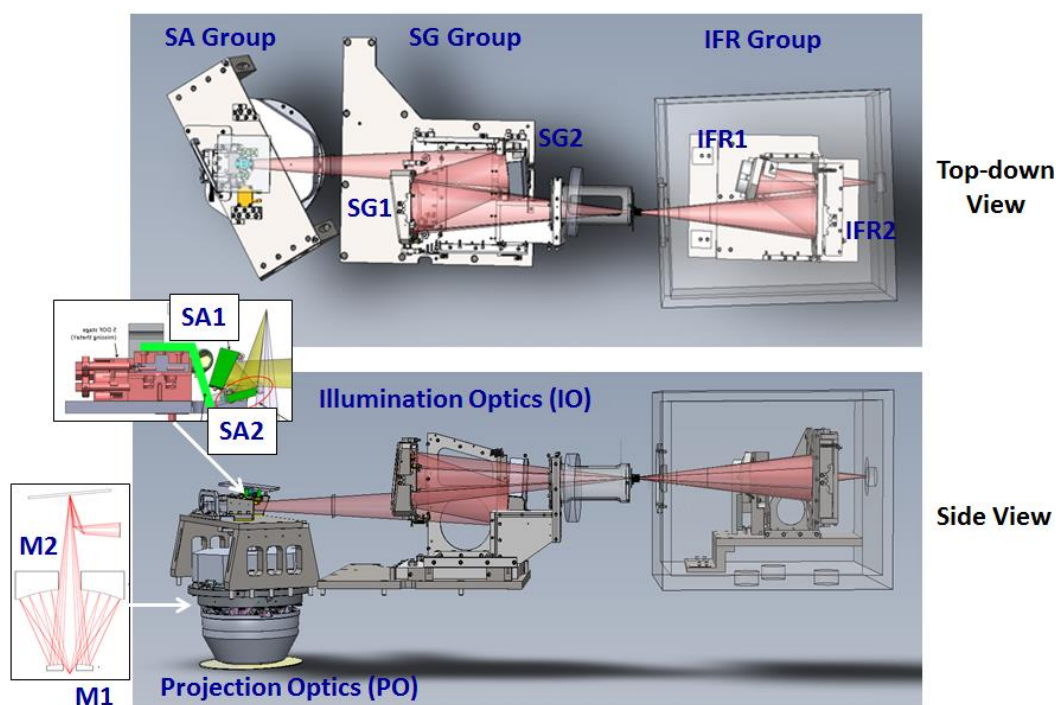
(d) P0精密組立調整

M1ミラー、M2ミラー、機構系部品単体からP0の精密組立て調整を経て、波面収差測定を行った。波面収差仕様0.6nmRMSを達成した。その後、本体搭載時に必要なP0の物点位置を記録した。以下[7]章で詳述する。

(e) P0のHSFET本体への搭載と照明光軸調整、露光条件出し

P0を本体に搭載した。先に記録した物点位置にマスク中心が一致するようにマスクホルダを調整した。NA可変機構を搭載した。照明光学系IOとP0の間に存在する折り曲げミラー群 (SA1、SA2) の光軸調整を実施した。

その後真空引き、ベストフォーカス条件出しなどを実施した。以下[8]章で詳述する。



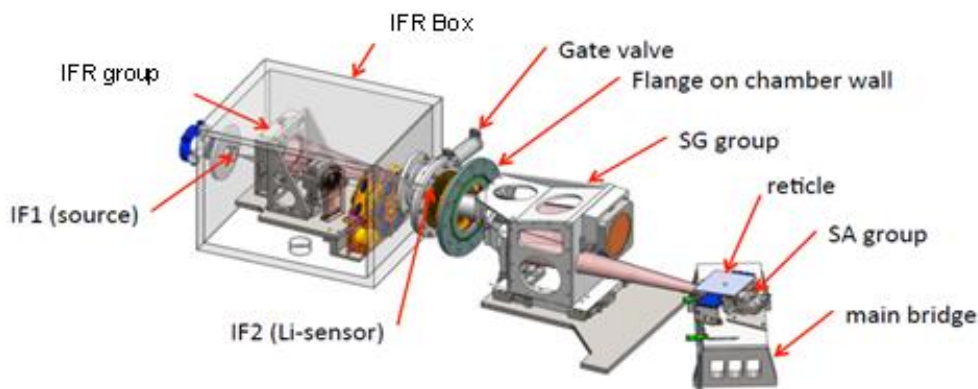
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-2 HSFET 光学系全体構成図

以下、研究開発内容を詳述する。

[4] IOモジュール精密組立調整

照明光学系の全体図を示す。(図Ⅲ.2.2.4-4-3 参照)

光源側から順に IFR、SG、SA の 3 つのモジュールから構成されている。最終的に SA、SG は HSFET メインチャンバー内の PO 定盤上にマウントされる。IFR はメインチャンバー外のアクチュエータ上に載置された独立したチャンバー内にマウントされる。IF1、IF2 に設置されたアパーチャは光源とメインチャンバー間の真空隔絶の役割を担っている。



図Ⅲ.2.2.4-4-3 照明光学系全体図

モジュールの調整は以下の手順で行われた。

1] IFR、SG、SA それぞれを単独で大気中の調整用定盤上で精密調整、アライメントした。以下[3]項に詳述する。

2] それぞれのモジュールを一体として各モジュール間のアライメントを調整した。本工程も調整用定盤上で実施された。本体搭載後の位置決めを高再現、迅速にするため、レーザトラッカー工具にてアライメント後のモジュールそれぞれの要所の座標記録を行った。以下4]項に詳述する。

各モジュールとも、それぞれのミラーを調整する機構と、モジュール全体を一体調整可能とするための6自由度の調整機構を有する。

3] 各モジュール内のミラー位置調整手法と結果

IFR、SG、SA各モジュールは、各2枚のミラーを有しているため、調整の手法は同様となる。調整の基準となるのは、SMR(Spherically Mounted Retroreflector)と呼ばれる反射球である。これらの目標位置は光学設計位置に、EUVミラーの製作誤差補正を加え計算される。その後3次元測定機上にてSMRの位置測定、目標位置への調整が行われる。SMRが設置された後のアライメントの手順の概略は以下のとおり。まず、干渉計を基準となる第一の共役点に配置されたSMRにアライメントする。次に、第2のSMRからの反射光による干渉計出力フリンジがベスト(1~2本)となるように第1のミラーの姿勢を調整する。また、第3、第4のSMRを用いてテレスコープを位置決めする。このとき、テレスコープ中の指標の反射像が元の像と一致するように行われる。さらに、第3のSMRからの反射光による干渉計出力フリンジがベスト(1~2本)となるように第2のミラーの姿勢が調整される。最後に、テレスコープ指標にアライメント用ターゲットが一致するように、物点共役位置と瞳共役位置にそれぞれのターゲットの取り付け位置調整が行われる。

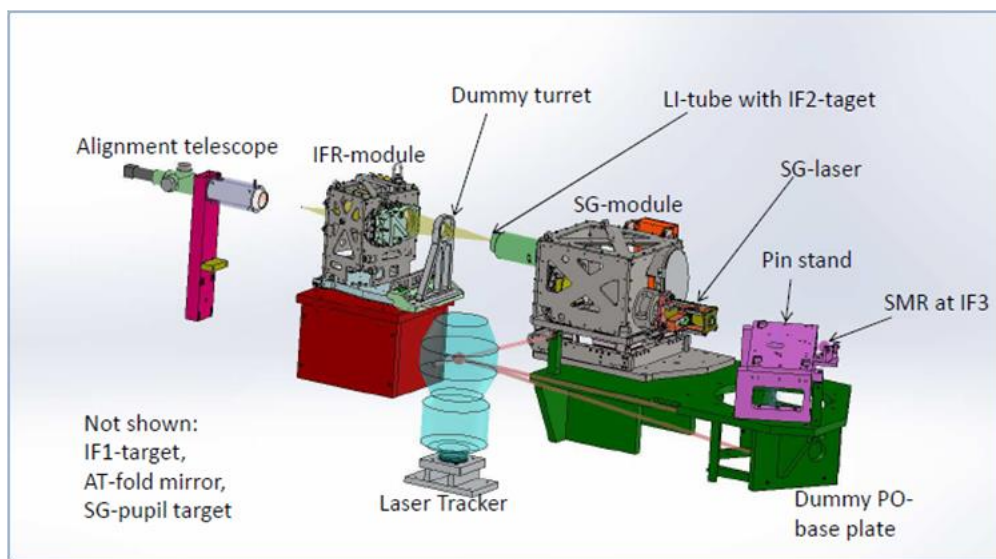
以上の手順に従って IFR、SG、SA 各モジュールのミラー位置を調整した結果、干渉計出力

フリンジによって示される光学調整誤差は、所定の許容値以下となっていることが確認された。

以上のミラー位置調整の終了後レーザトラッカーによるモジュールの主要点の計測、記録が行われた。レーザトラッカーとはレーザ光を用いた3次元の座標点計測装置であり、測定対象点にはレーザ光を反射するコーナキューブが設置される。精度は10um程度である。

共役点およびモジュールの主要点の相対座標の計測結果が4]項で延べられるモジュール間のアライメントに用いられる。モジュール間の位置合わせをするためには、モジュール間で共役点を一致させ光学的につなげていくことが必要となる。その時に共役点を直接見ることはできないが、共役点に設置されたコーナキューブ点の座標を頼りにモジュール間の共役点がつながるようにモジュールを設置することが可能となる。

4]各モジュール間の調整手法と結果



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-4 モジュール間の調整全体構成

モジュール間の調整を実施したときの全体構成を示す(図Ⅲ. 2. 2. 4-4-4 参照)。

前出のように、レーザトラッカーによる座標情報をもとに各モジュールが配置される。最終的にはモジュール内ミラー位置調整段階で設置位置調整のおこなわれた物点共役アライメントターゲット、瞳共役アライメントターゲットおよび、テレスコープを用いて調整が完了する。図にはSG-laserが示されているが、通常ははずされている。SG-laserについては後程言及される。

STEP1: Dummy PO base plate とは、HSFET 本体の PO baseplate を模したものであり、座標系の基準となる。Dummy PO baseplate を基準に、アライメントの出発点である IF3 に SMR を設置する。IF3 は設計データ上でマスク上の照明領域に対応した点である。

STEP2: SG モジュールの設置、IFR モジュールの設置を行う。設計上 IF3 を出発点として、つないでいくべき共役点の座標はわかっている。それにより前出のようにモジュール上のコーナキューブのあるべき位置もわかる。モジュール設置調整後の、あるべき位置と、レーザトラッカーによる計測値との差は、 $\pm 30\mu\text{m}$ 以下となった。

STEP3: テレスコープにて IF2 ターゲットと IF3 のアライメントを行う。すでにレーザトラッカーにてモジュールは配置されているので、これは微調である。テレスコープの十字線 (Cross-hair) を IF2 のターゲットに合わせ、それと IF3 コーナキューブ頂点との合わせを確認する。

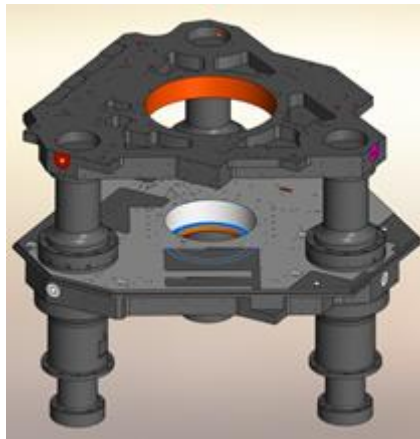
STEP4: テレスコープにて SG モジュールと IFR モジュールのアライメントを行う。すでにレーザトラッカーにてモジュールは配置されているので、ここでは微調である。具体的には SG モジュールと IFR モジュール間の物点共役位置のターゲットのアライメント、瞳共役位置のターゲットのアライメントを行う。

STEP5: 以上で光学調整が終了したので、レーザトラッカーにより各モジュールにとりつけられたコーナキューブの座標を読み取る。後に HSFET 本体上で各モジュールを配置するときの目標値として使われる。

STEP6: SG-laser ビームのアライメントを行う(前出図Ⅲ. 2. 2. 4-4-4)。SG-laser ビームを EUV 光源の方向に発する。EUV 光源が描かれていないが、最終的にテレスコープが描かれている位置に設置される。EUV 光源設置時に光源をビームにアライメントする。そのためにこの段階でビームを照明光学系の軸に合うように設置しておく。

[5] 光学系搭載前の本体組立

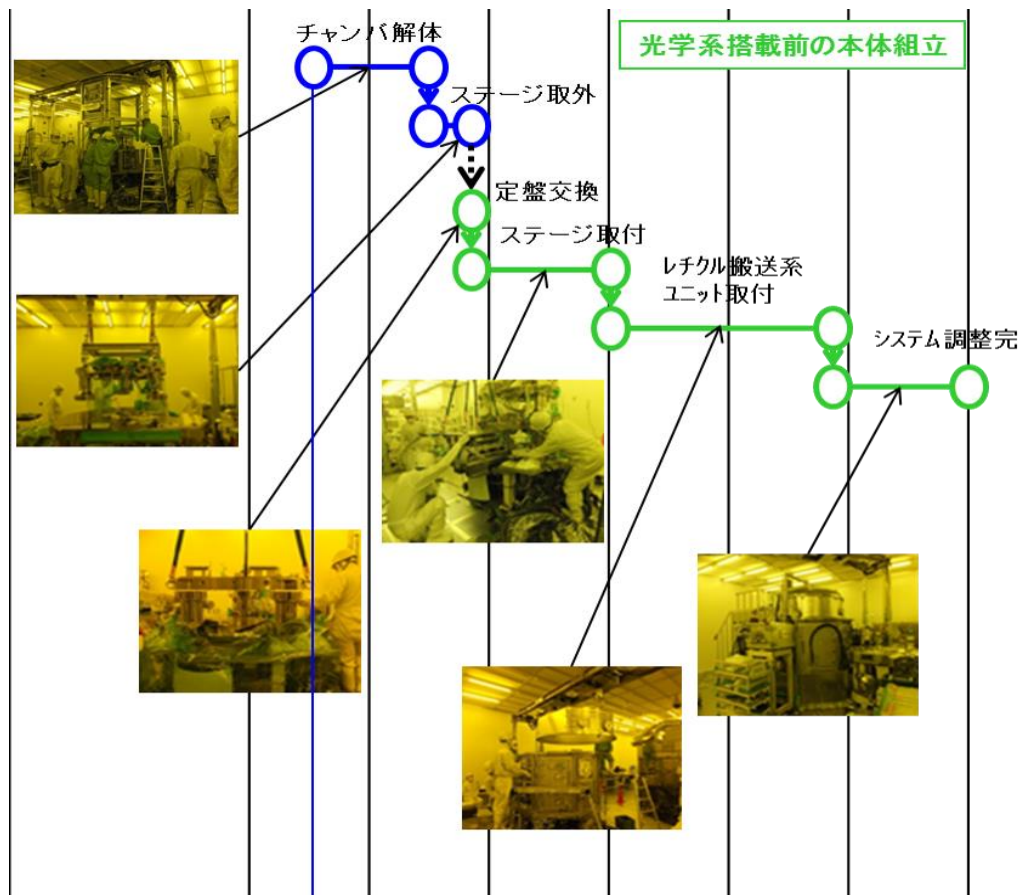
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-1および 図Ⅲ. 2. 2. 4-4-5に示される P0 Baseplate (P0定盤) の搭載を行う。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-5 P0 BaseplateおよびMask Stage Baseplate

P0定盤はBody Mounting System (図Ⅲ. 2. 2. 4-4-1) に締結された3本の支持柱の上に搭載される。P0定盤の上面平面およびP0定盤上に設置されるピンが、各ユニットを搭載して行く時の組み上げ基準となる。各種工具を使用して基準と各モジュールの相対位置が所定の値になるように組み付けを行う。以降マスクステージおよびMask Stage baseplate (マスクステージ定盤) の搭載、オートフォーカスユニットのP0定盤下面への搭載、ウェハステージの搭載を順次行う。配線、配管の接続も逐次、付随して行う。通电、機能精度チェック後さらに真空チャンバー、マスク、ウェハ搬送系の取り付け、チェックを行う。図Ⅲ. 2. 2. 4-4-6に工程全体の流れを示した。

HSFETの本体組立完了後、真空状態にて本体基本性能の確認を行った。本体基本性能項目(ウェハステージ及びマスクステージの各種精度および安定性、オートフォーカスの再現性および安定性、温度制御安定性など)のすべて項目において、所定性能を達成していることが確認された。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-6 光学系搭載前の本体組立の流れ

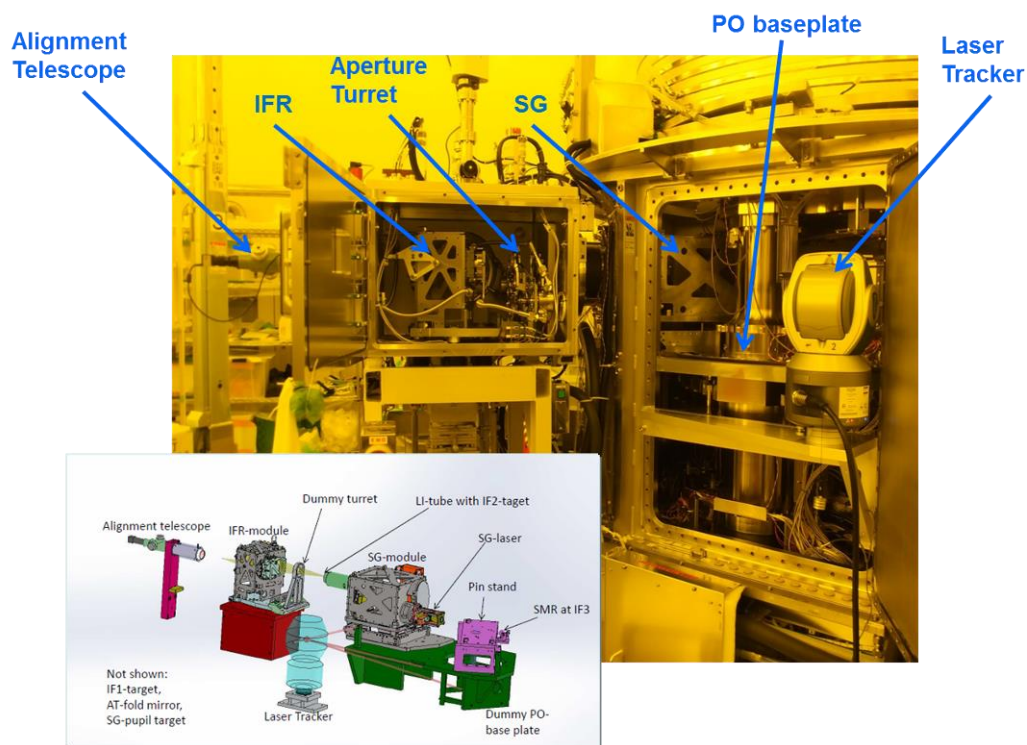
マスクの設置位置、姿勢に関して測定が行われた。HSFETの座標系はP0定盤上の3つのピンおよびP0定盤の表面にて規定される。HSFETに設置されたマスク中心の位置、姿勢角度の目標値からのずれは、いずれも十分小さい量であった。マスクが目標位置に設置されたことになる。[6]章で述べられるが、P0も同じ座標系に対して所望の位置に設置される。P0の物点がマスク中心の位置に一致するように設置される。その確認のため最終的には、P0搭載時にCTT (Conjugation Transfer Tower) と呼ばれる工具によりP0側からマスクの直接観測が行われ、P0から見たマスクのあるべき位置、姿勢と設置されているマスクの差が測定される。誤差が存在した場合はマスクホルダ([1]章参照)の調整により補正される。詳細は[7]章、[8]章で述べられる。

[6] IO光学系搭載、調整

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-7 に HSFET 本体に IO モジュールを組み込んだ状態を示す。各モジュールはモジュール間調整後に計測された座標値になるようにレーザトラッカー計測に基づき再現配置された。その後前出[4]-4]項と同様の手順を持って、光学的なアライメントの確認調整が行われた。光学調整後の各ターゲット間のアライメント結果は、許容誤差 $\pm 0.1\text{ mm}$ を下回る十分な精度で行われたことが確認された。

IO光学系モジュールの設置の後、EUV光源の設置、およびアライメントが行われた。アライメントは前出のSGレーザビームと光源が所定の位置関係になるように行われる。アライメント点はIF1位置とカソード位置の2点である。それぞれの場所にアライメント用のCCDカメラの搭

載が行われる。CCDを観察しながら光源全体の位置微調が行われ、ターゲットに対して0.1mm以下でアライメントが達成された。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-7 IOモジュール組み込み状態

P0を搭載する前段階としてHeat Shieldと呼ばれる部材を搭載した。Heat ShieldはP0を下からカバーする構造となっている。その目的の第1はP0内の高真空度を維持するための真空隔壁である。下面の光通過するための数mmの開口を設けてある。第2の目的はP0下方に存在する熱源（ウェハステージ、オートフォーカス）からの熱の遮断およびP0定盤への伝熱である。P0定盤には水による温調が施こされており、余分な熱の回収が行われる。この目的のためP0そのものには直接接触しない形でP0定盤へ取り付けられる。図Ⅲ. 2. 2. 4-4-8は装置内へ搬入されるHeat Shieldである。



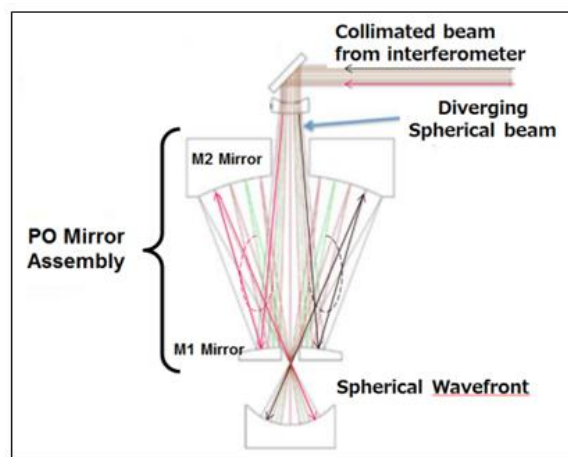
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-8 HSFET本体へ搬入中のHeat Shield

次に、P0を搭載する前段階としてP0マウントリングと呼ばれる部材を搭載した。P0とP0定盤の間のインターフェースとなるものである。数10kgのP0をP0定盤上にクレーンダウン後、所定の位置に直接精密位置決めするのは困難である。従ってP0の代わりに、P0マウントリングを正確に位置決めしておく方式を採る。P0とP0マウントリングの間は、キネマティックマウントという機械構造で固定される。キネマティックマウントはP0側に装着された3つの球とP0マウントリング側に装着された3つのV型パッドにより構成される。P0キネマティック球とP0マウントリングの位置関係は予め測定されている。キネマティック球はP0の座標基準である。P0をクレーンダウンしていくにつれ、キネマティック球がV型パッドに収まってゆき、P0はその唯一の位置におのずと位置決めされる。従ってP0マウントリングをP0定盤の所定の位置に取り付けることにより、P0はP0定盤に所定の位置関係で設置される。P0マウントリング位置決め用の治具と結合された状態で搭載される。位置決め用の治具がP0定盤上面の基準ピンにアライメントされる。その状態で下方にあるP0マウントリングはP0定盤の構造にボルト締結される。P0マウントリングの設置が完了し、位置決め用の治具が取り除かれた後、温調用のジャケットがP0定盤上、P0用穴の周囲に設置される。

[7] P0波面収差測定、物点位置記録

1] 波面収差目標の達成

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-9の模式図に示された光学系を有する波面収差測定装置を用いて、P0光学系の調整が行われた。ミラーの姿勢調整と波面収差計測が繰り返し行われた。



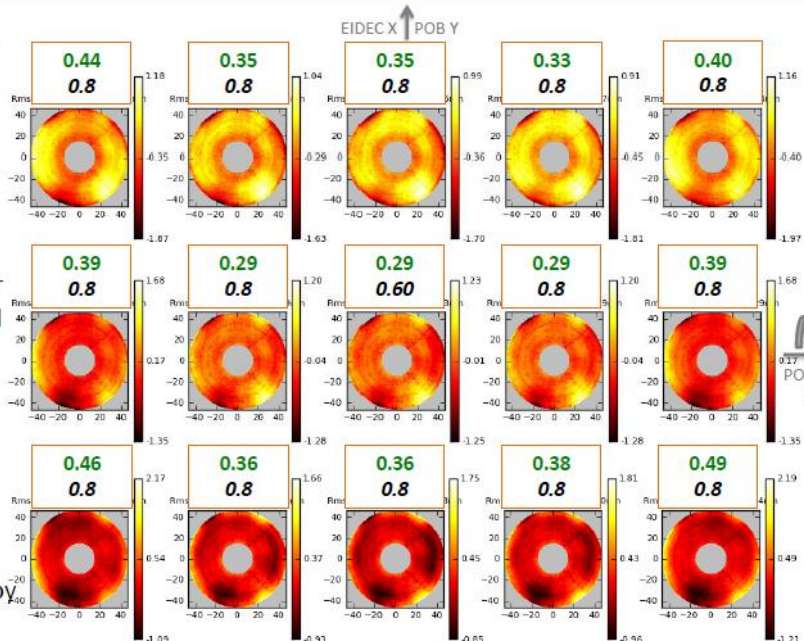
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-9 波面収差測定装置の光学系模式図)

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-10に波面収差の最終測定結果を示す。ウェハ上でX方向30um, Y方向200umの露光フィールドにおいて、X方向3点、Y方向5点の計15点である。各場所に測定結果が記載されている。目標値センター<0.6nmRMS, センター以外<0.8nmRMSをクリアできた。センター以外の波面収差の増分の主な要因は、マスクを6度あまり意図的に傾けてある（照明光のマスクへの導入、P0側への反射のため）ことにより原理的に発生する球面収差である。上段、下段に分布形状が逆で、量が0.19nmRMS程度の球面収差(Z9)が原理上付加されている。図Ⅲ. 2. 2. 4-4-11に、本P0の測定における波面収差の計測再現性が示される。8回の測定でばらつき標準偏差は0.004nmRMSであった。

POB Wavefront Error over the field

Wavefront error at 30 cycles/aperture for NA 0.51

Key: Achieved
Spec
Units: nm RMS



Wavefront error over the field represented as a grid of WFE maps.

- Location on the 3x5 grid represents the location on the reticle plane within $\pm 0.5\text{mm}$ by $\pm 0.075\text{mm}$

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-10 波面収差調整、測定結果

Wavefront data: *Center field* measurement repeatability

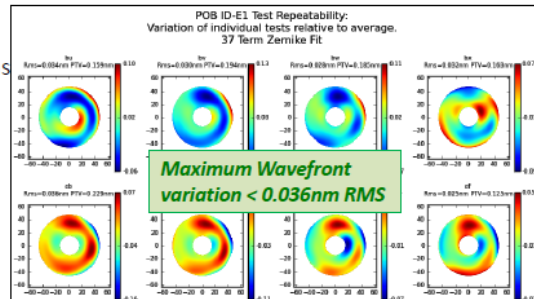
- For FAT center wavefront data, the POB was measured 8 times.
 - Measured WFE RMS variation is less than 0.004 STD, 0.009nm RMS P-V
- The difference from each individual measurement, relative to the average of all measurement is also evaluated.
 - Max difference from the average wavefront error is 0.036nm RMS

Date	Test Iteration name	WFE	Units
8/6/15	ae1bu		0.292 nm RMS
8/6/15	ae1bv		0.286 nm RMS
8/6/15	ae1bw		0.286 nm RMS
8/6/15	ae1bx		0.286 nm RMS
8/10/15	ae1cb		0.291 nm RMS
8/10/15	ae1cd		0.292 nm RMS
8/10/15	ae1ce		0.294 nm RMS
8/10/15	ae1cf		0.295 nm RMS
	Average		0.290 nm RMS
	Standard Deviation		0.004 nm RMS

- Difference between measurements has small impact on wavefront due to the RSS addition of error.

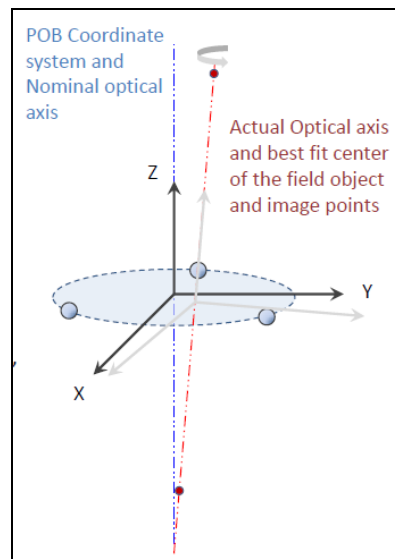
$$\sqrt{0.290^2 + 0.036^2} = 0.292\text{nm RMS}$$

i.e. only 0.002nm RMS more on the actual wavefront.



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-11 波面収差計測再現性

2] 物点位置の記録



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-12 物点(object point)と像点(image point)

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-12において赤色で示される点がP0の物点と像点である。これらの点は干渉計測定装置上で、光学的に位置が測定される。図には3つの青い球が示されるが、これは前出[6]で言及されたP0をHSFET本体に搭載するときのインターフェースとなるキネマティック球である。キネマティック球によりP0の座標系が定義される。キネマティック球の中心が原点であり、Z軸はキネマティック球の3点で定まる平面に垂直である。光学的な測定と機械的な3次元測定器のコンビネーションでP0の座標系上で物点と像点の座標が決定される。実際に測定された物点と像点の座標は以下である。

物点の座標 $X=-0.0073\text{mm}$, $Y=0.0000\text{mm}$, $Z=284.049\text{mm}$

像点の座標 $X=0.0103\text{mm}$, $Y=0.0071\text{mm}$, $Z=-190.115\text{mm}$

P0物点の位置($<10\mu\text{m}$)、P0のZ軸と光軸(物点と像点を結ぶ軸)の傾き差($<37\text{urad}$)は、きわめて小さい値であった。

物点位置の記録には、CTT(Conjugate Transfer Tower)とよばれる工具が用いられる。以下の2つの局面でP0に搭載される。P0とCTTのインターフェースは、再現性確保のためにパッドと台座球によるキネマティック機構となっている。

(a) P0の波面収差調整、物点の計測の後、物点、マスクのあるべき角度をCTT工具上に記録する時。

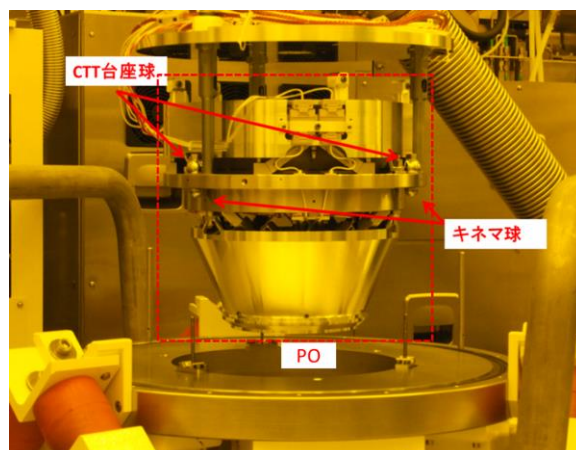
(b) P0をHSFET本体に搭載後、物点と本体上に設置されたマスクの、マスク中心の差、マスクの角度差を測定する時。

ここでは(a)について詳述する。(b)は次[8]章で詳述する。CTTの上部に配置された4つの静電容量センサーと2つのCCDにより、マスクの位置を測定することができる。CCD測定用には、マスク上に2つのマークが用意されている。測定に先立ってはP0、CTT、マスクホルダ、マスクの一式が3次元計測機上にセットされる。前述のようにキネマティック球と物点の関係はわかっているため、物点とマスク中心が一致するようにマスクホルダ上のマスクの位置調整が行われた。また光軸に対するマスクの角度の調整も行われた($T_x=0$ 度、 $T_y=6.243$ 度)。その状態で4つの静電容量センサーと2つのCCDにより、マスクの位置をそれらのセンサーの読み値として記録した。

[8] P0のHSFET本体への搭載と照明光軸調整、露光条件出し

1] P0の搭載

図Ⅲ. 2. 2. 4-4-13はクレーンによって、P0の搭載を開始したところである。P0には、クレーン用の治具が締結されている。P0の運搬台車の防振座から数10cmほど持ち上げられたところである。この後、HSFET真上まで搬送され、P0定盤上のマウントリングへとクレーンダウンされ、固定された。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-13 P0クレーンアップ

2] マスクと物点の合わせ

クレーンによりP0上にCTTを設置した。続いて、マスクホルダを上方より設置した。クレーンではなく、露光のシーケンスでも使用されるマスクホルダのエレベータ機構を使用した。

CTTによる計測、調整結果を表Ⅲ. 2. 2. 4-4-2に示す。2つのマスクホルダの調整を行った。4つの静電容量センサー値からマスクの高さ(Z)、マスクの傾き(Tx, Ty)のずれを計算したものを示している。これらの値に基づきマスクホルダのメカニカルな調整が行われる。2つのCCDの読み値からマスクX、Y方向ずれ、回転ずれ(Tz)を計算したものを示した。これらの値に基づきマスクホルダ上のマスクの位置、回転の調整が行われた。いずれも満足できる結果を得ている。Zの目標値は $\pm 10\mu\text{m}$ 以内である。10 μm の誤差で球面収差0.28nmRMSを発生する。この場合でも、前出図Ⅲ. 2. 2. 4-4-10の波面収差結果においてセンターの0.29nmRMSは0.4nmRMSとなり、周辺の0.49nmRMSは0.56nmRMSとなるが、まだスペックに対して十分余裕がある。

Tx, Tyに関しては、ウェハ面において露光フィールドの長手方向において幅10nmの像面誤差を生じる量は0.25mradである。X、Y、Tzに関しては、マスク上150 μm *1000 μm の露光フィールドに関してマスク位置とP0がどれくらいずれているかを示す指標である。設計上の露光フィールド外での収差の劣化はゆるやかであり、この数 μm のずれであり全く問題無い。

マスクホルダ1

	Z(um)	X(um)	Y(um)	Tx(mrad)	Ty(mrad)	Tz(mrad)
1回目	-35.31	-3.88	16.20	0.03	0.13	-0.32
調整後	3.21	-6.93	3.42	0.04	0.14	0.03

マスクホルダ2

1回目	-46.31	21.41	15.53	0.02	0.14	0.05
調整後	18.64	7.28	-2.30	0.03	0.16	0.15
再調整後	-3.28	4.23	-0.42	0.04	0.14	0.13

表Ⅲ. 2. 2. 4-4-2 CTT計測結果

3]NA可変機構の搭載

CTTを除去の後、P0上部にNA可変機構が搭載された。中央に配置されたパルスモータにより、絞り穴を複数設けてある回転盤の所定位置への位置決めを行う。現状設定可能なNAは0.51, 0.5, 0.42, 0.33, 0.3である。NA0.5とNA0.33の絞りはアダプター方式になっている。工事が必要になるが将来必要であれば交換可能である。

4]光軸調整

マスク、P0が所望の位置に設置された。その前の段階で照明光学系が所望の位置に設置されている([6]章)。両者の間に2枚の折り曲げミラーSA1、SA2を有するSAモジュールを搭載し、光軸をつなげる微調整を行った(前出[3]-(e)項参照)。

P0の上から、P0室カバー、SAブリッジを取り付けた。P0室カバーは、P0まわりの高い真空度を確保するために専用の真空ポンプで引く空間を限定する。SAブリッジはP0室カバーをまたぐ形で設置され、その上にSAモジュールが搭載される。

SAモジュールの光学的アライメントは、SAモジュールを間にはさんだ像面共役の2点(IF2とマスク中心)、瞳共役の2点間(SGモジュールとP0の瞳)の観測により行われる。観測結果に従いSAモジュールの位置、姿勢調整(モータによる駆動)が行われる。

(a) 像面共役の調整にはIF2位置(図Ⅲ. 2. 2. 4-4-3参照)に設置されたターゲットとマスク中心位置に描画されたターゲットが用いられる。IF2位置には最終的にLiセンサー(露光量制御用センサー)が置かれるが、光軸アライメント時にはターゲット治具と交換可能なようになっている。

(b) 瞳共役の調整にはSGモジュールの瞳位置に設置されたターゲットとP0内の瞳位置に設置されたターゲットが用いられる。SG瞳ターゲットはSGレーザと交換で設置される(前出の図Ⅲ. 2. 2. 4-4-4参照)。P0はもともと瞳中央エリアに中心遮蔽部分を有している(前出の図Ⅲ. 2. 2. 4-4-2参照)。瞳中心位置に光束を遮らない形でターゲットパターンを描いた小さなターゲット板が予め設置されている。

ターゲットを観測するためのテレスコープを設置する。前出[6]章のI0光学系の調整時には光源ドッキングの前だったためテレスコープをIFR BOXの入口に取り付けることができた(図Ⅲ. 2. 2. 4-4-7参照)。SAモジュールのアライメントの段階ではすでに光源がドッキングされているので同じ位置にとりつけることができないため、折り曲げミラーをIFR BOX内に設置しテレスコープをIFR側方に取り付けた。

[7]-2]物点位置記録の際に用いたマスクが装着されたマスクホルダを搭載した。
 瞳共役位置、像面共役位置それぞれに順次テレスコープのピントを合わせ、ずれ量を把握しそれぞれのターゲット中心が一致するようにSAモジュールを調整した。結果を示す。

(a) 像共役

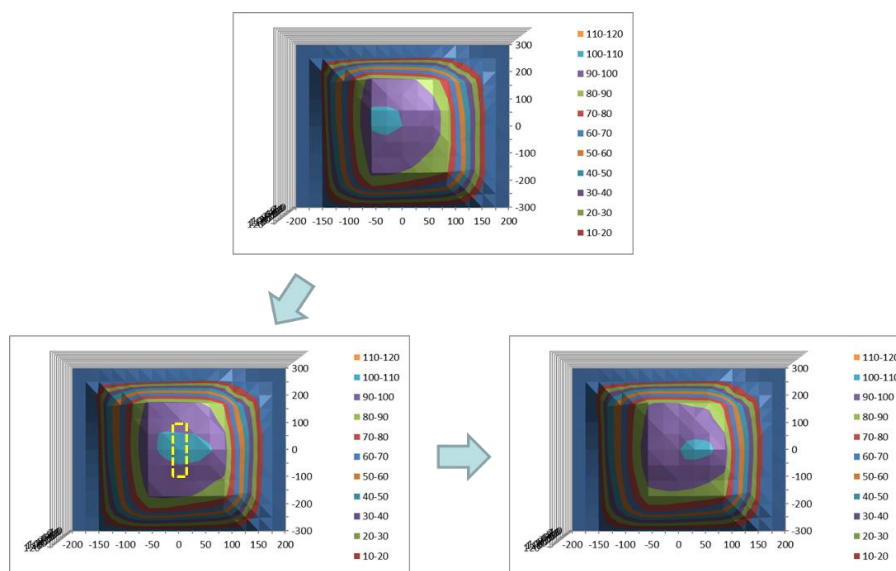
ターゲットのずれ量はマスク上換算でX,Yとも0.05mm。目標は0.05mm以内である。これはマスク上のパターンエリア(0.15mm*1mm)に対して照明エリア(1mm*2mm)が0.05mmずれていることを意味する。問題無い量である。

(b) 瞳共役

ターゲットのずれ量はP0の瞳上換算でX,Yとも0.3mmである。NA0.51、 $\sigma=1$ の瞳径は約80mmである。0.3mmは角度(いわゆるテレセン性)にして3.8mrad相当である。目標は10mradである。量産装置においても典型的な量であり、重ね合わせ機能の関係無い本装置としては十分良い値である。

5] 照明均一性調整

図Ⅲ.2.2.4-4-14は光源の集光ミラー(コレクター)の位置調整により照度均一性が変化する様子を示す。照明均一性のグラフはウェハステージ上のセンサーによって測定した強度分布である。HSFETは限界照明を採用しているため、光源プロファイルがそのままウェハ上の強度分布に反映する。そのためコレクターの位置によりピーク位置が動いているのがわかる(この場合は、コレクターを上下方向に移動した結果、照度ピーク位置が左右方向に移動している)。2番目がベストの状況である。黄色破線が露光パターンエリア(ウェハ上で30um*200um)を示す。設計時のモデリングでは均一性 $\pm 3\%$ であったが、このデータでは露光パターンエリア内で $\pm 3.5\%$ であった。これはモデリング時の光源プロファイルとの違いによる。

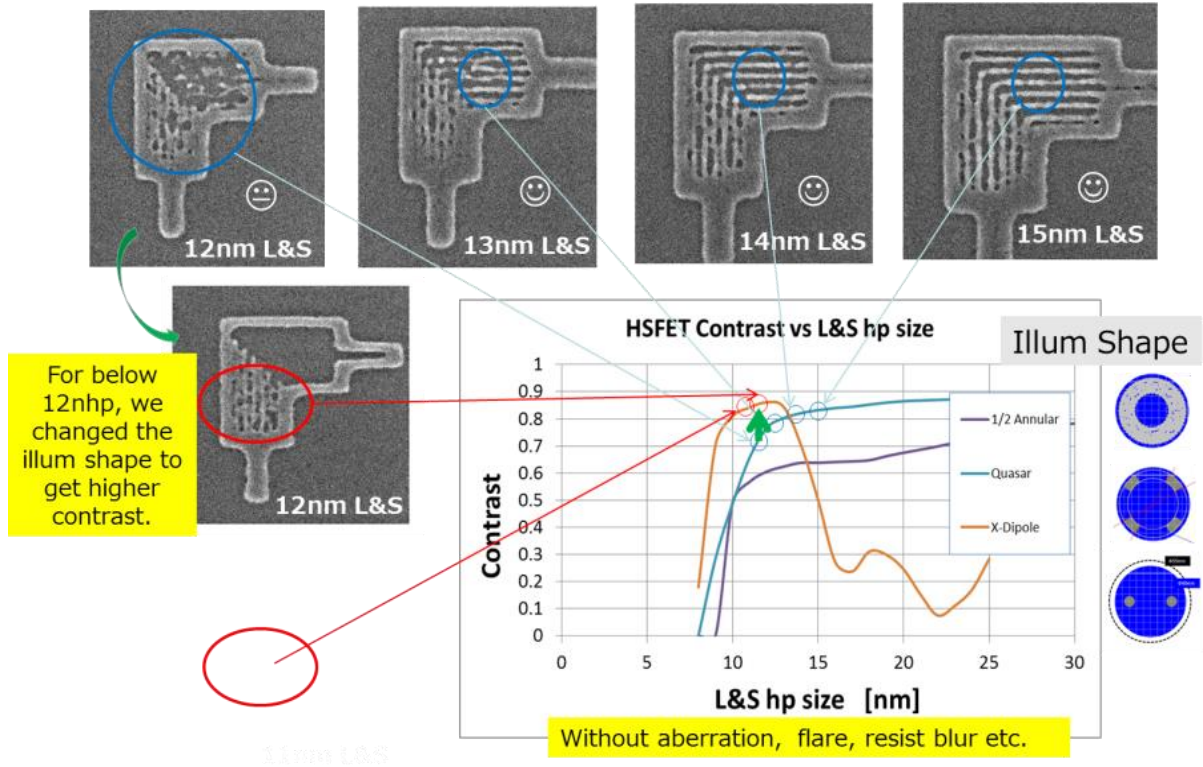


図Ⅲ.2.2.4-4-14 照度均一性調整

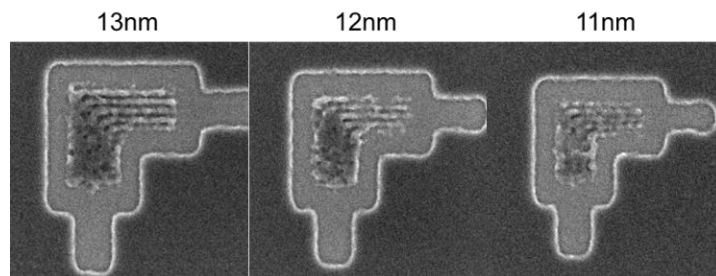
6] 微細パターン露光評価

代表的な照明条件(Illumination Shape)毎に、L字 L&S(Line and Space)パターンを露光した際に得られる像コントラストを計算した結果及び、対応する露光結果を纏めたものを

示す（図Ⅲ.2.2.4-4-15）。縦線と横線で解像力に差が生じているのは、シャドウイング効果（マスクへの照明光入射方向とパターン方向が直交する配置の場合にマスクパターンの影ができることで実効的な反射量が変わることに起因）及び、XY非対称照明（Dipole）の影響によるものである。Dipoleの照明配置を90度回転して露光した結果を次に示す（図Ⅲ.2.2.4-4-16）。解像するパターン方向が照明の非対称性によりV線（Vertical Line）からH線（Horizontal Line）に切り替わることがわかる。

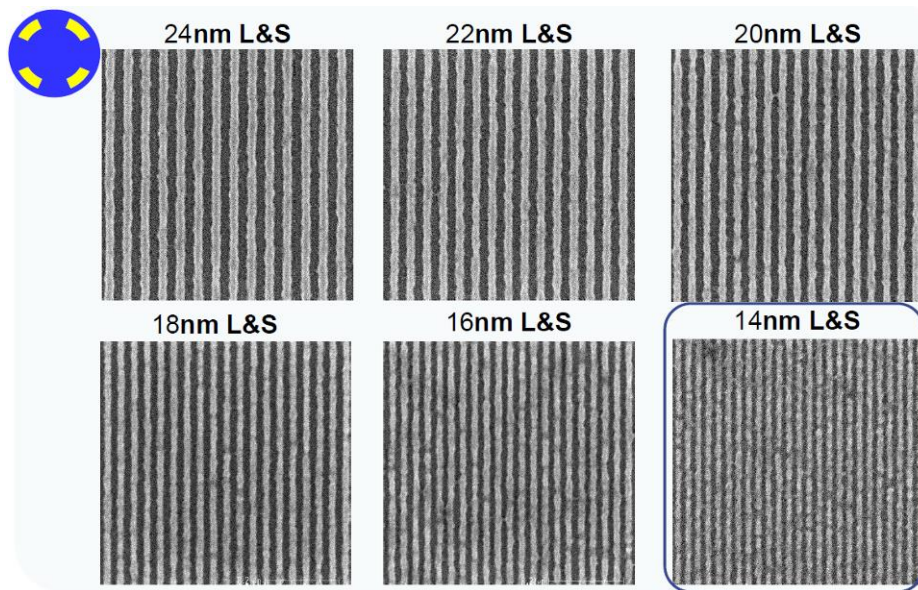


図Ⅲ.2.2.4-4-15 解像力評価結果



図Ⅲ.2.2.4-4-16 V-Dipole（図Ⅲ.2.2.4-4-15のDipole照明を90度回転）露光結果

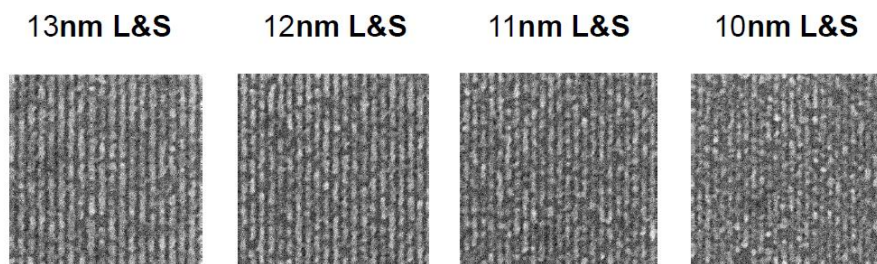
次に、図Ⅲ.2.2.4-4-17, 18にL&Sパターンを露光した結果を示す。4つ目照明（Quadropole）にて、14nmL&S迄のパターン形成を確認できた（図Ⅲ.2.2.4-4-17）。さらに、2つ目照明（Dipole）にて、10nmのパターンモジュレーションの確認と、11～12nmL&Sのパターン形成を確認できた（図Ⅲ.2.2.4-4-18）。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-17 L&S 露光結果 (黒枠のパターン評価用レジスト膜厚は20nm、他は30nm)

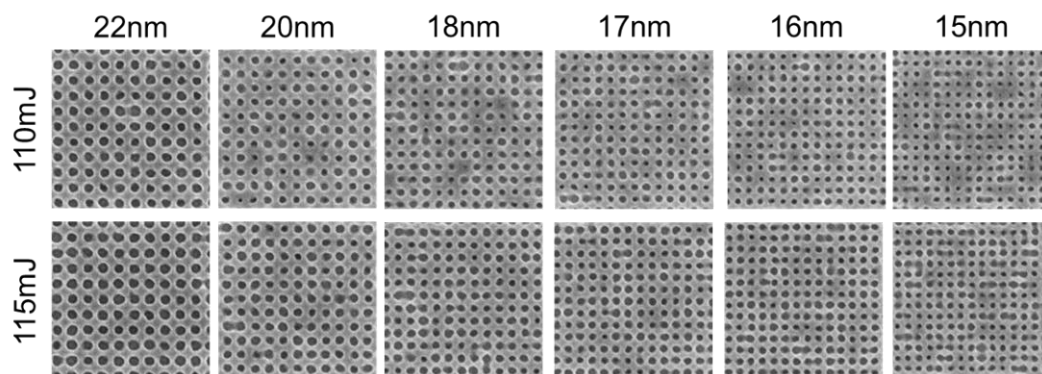


Dipole



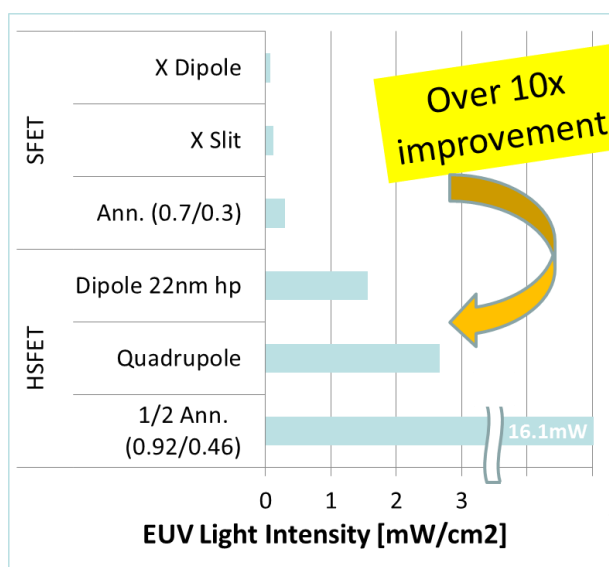
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-18 L&S 露光結果 (レジスト膜厚 20nm)

次にコンタクトホールパターン (マスクHole Size:Hole間隔=1:1) の露光結果を示す (図Ⅲ. 2. 2. 4-4-19) 照明条件は前記Quadrupole照明を使用した。15nmのコンタクトホール解像が確認できた。



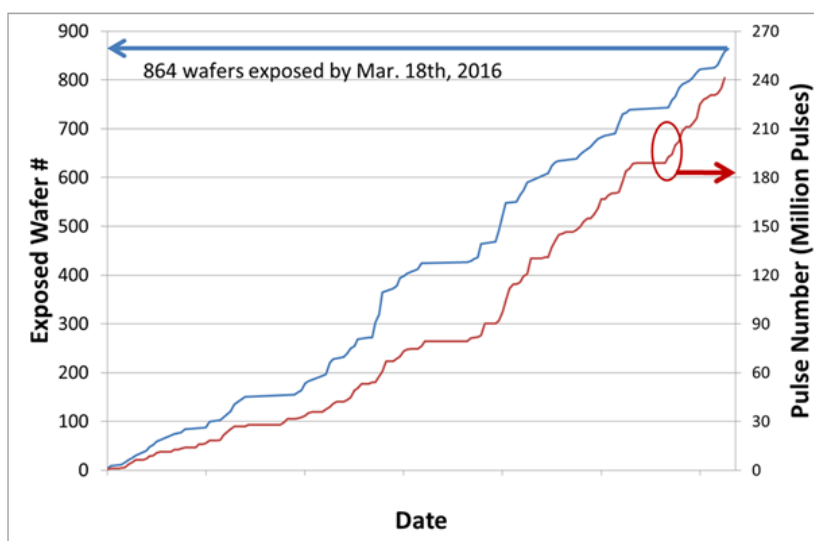
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-19 コンタクトホール露光結果

次にHSFETによるウェハ上でのEUV光強度を評価した結果を示す（図Ⅲ. 2. 2. 4-4-20）。比較のために、SFETにて得られていたEUV光強度を合わせて示す。SFET、HSFETそれぞれ3種類設定した代表的な照明形状に対して、SFET時の光強度の約10倍を超えるEUV光強度を得ることができた。これはIF点での光強度の増大に加え、照明光学系設計、及び投影光学系透過率の総合的な効果により達成したものである。なお、本計測結果はEUV光源の集光光学系が新しい状態での測定結果であることを付記するものである。



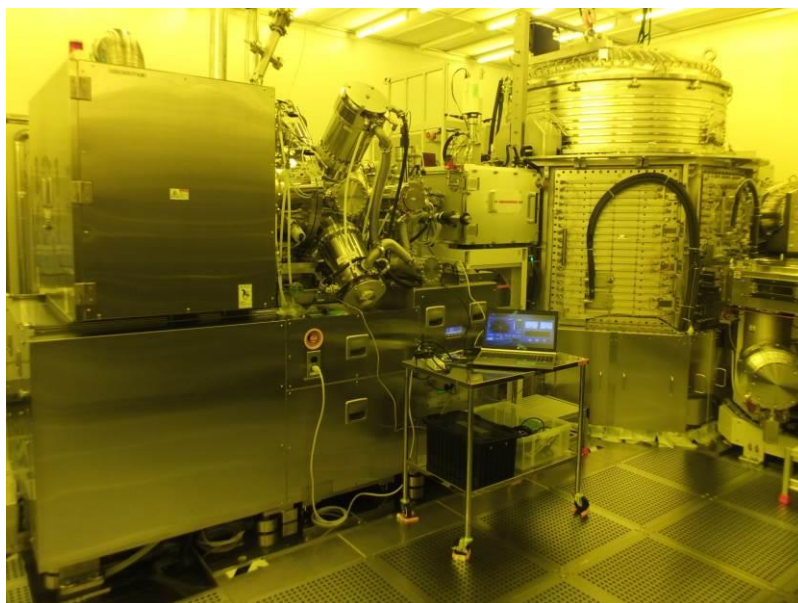
図Ⅲ. 2. 2. 4-4-20 ウェハ上EUV光強度比較結果

次にHSFETによるウェハ露光処理実績について纏めた結果を示す（図Ⅲ. 2. 2. 4-4-21）。図中左縦軸は露光ウェハ積算枚数を、図中右縦軸は露光時の発光パルス積算数をそれぞれ示している。プロジェクト終了期日迄に積算枚数で864枚露光処理を実施することができた。



図Ⅲ. 2. 2. 4-4-21 HSFETによるウェハ露光処理積算枚数結果

本節の最後にあたり、HSFETの外観写真を示す（図Ⅲ.2.2.4-4-22）



図Ⅲ.2.2.4-4-22 HSFET外観写真

備考：

以下の図はZygo Corporationより提供された。

図Ⅲ.2.2.4-4-2 図Ⅲ.2.2.4-4-3 図Ⅲ.2.2.4-4-4 図Ⅲ.2.2.4-4-9
図Ⅲ.2.2.4-4-10 図Ⅲ.2.2.4-4-11 図Ⅲ.2.2.4-4-12

IV 成果の実用化・事業化に向けた取り組み及び見通しについて

半導体デバイスの微細化の目的は、デバイスの高性能化(高速化、低消費電力化)とデバイス製造の低コスト化である。EUVLはhp16nm以下の微細化技術の主流であり、他の技術(Double Patterning、DSA、ML2: Mask-less Lithography)との組合せで更なる微細化も見込むことができる。

リソグラフィ技術は、数多くの要素技術から構成される総合技術であり、すべての構成要素が実用化レベルに到達して初めて実用化がなされる。EUVLも例外ではない。

EUVLの実用化を阻んできた最大の要因は、EUV光源開発の遅れにあったが、2013年以降、光源の開発に確実な進展が見られ、2014年下半年以降、半導体業界全体の認識として、EUVLの実用化が確実視されるようになった。

EUV露光装置については、2013年上半期から量産対応装置(NXE:3300B、ASML社)の出荷が始まり、2015年には、さらに性能を向上させたNXE:3350Bが出荷された。現在、NXE:3300Bが8台、NXE:3350Bが3台、合わせて9台の量産対応露光装置がデバイスメーカーにおいて稼動しており、量産適用を見据えた各種の要素技術の検証やプロセス開発、およびデバイス試作が行われている。

本格的にEUV露光装置を用いた半導体デバイス生産が開始されるのは、2018年と予測される。最初にEUVLが適用されるデバイスは、7nmノードロジック(N7)と認識されており、続いて1XnmDRAMに適用されることが見込まれている。本プロジェクトに参加したサプライヤ企業(ブランクメーカー、マスクメーカー、レジスト材料および関連メーカー、装置メーカー)もデバイスメーカーの量産開始に対応すべく、事業化の準備を進めている。

開発テーマ毎の実用化・事業化の見通しについて述べる前に、プロジェクト遂行期間中に実施した成果の実用化・事業化に向けた取り組みについて述べる。

プロジェクト参加企業における実用化・事業化開発のためには、参加企業とプロジェクト推進者との連携が極めて重要である。プロジェクト成果はもとより、研究開発の進捗状況を参加企業に迅速に伝えるプロジェクト運営の一環として、定期的な研究開発進捗状況及び成果の報告を、月次、ならびに四半期報告として行った。また、参加企業との連携を深める場として、四半期毎に、開発テーマ毎にプログラムコミッティ、およびテクニカルコミッティを開催して、進捗状況の報告だけでなく、開発方針の討議・見直しを行った。

プロジェクト遂行期間中から参加企業各社における実用化・事業化に向けた開発を支援すべく、以下の施策を実施した。

マスク欠陥検査技術開発では、hp16nm対応装置、及びhp11nm対応装置、それぞれについて、欠陥検査装置の仕様に関する徹底的な討議を行い、参加企業の要望を反映させた。装置評価の段階では、プロジェクト推進者による評価だけでなく、参加企業の個別評価枠を設定して参加企業毎に異なる視点からの評価を可能とした。

EUVレジスト材料・プロセス開発においては、微小面積露光機SFET及びHSFETによる基盤の評価に続くフルフィールド露光による実用化評価をシームレスに行えるよう、国内のフルフィールド露光機を

利用できる体制を構築した。

レジストアウトガス評価においては、参加企業各社のサンプルレジストを個別に評価できる枠を設定し、各社の事業化に寄与できる運営体制を構築した。

DSA 材料・プロセス技術開発では、開発成果である DSA シミュレータをプロジェクト期間中に参加企業に移管し、参加各社における事業化に向けた独自開発に貢献できる施策を行った。

次に、開発テーマ毎に実用化・事業化の見通しについて述べる。

(1) EUV マスクブランク欠陥検査技術開発

[1] 実用化の階層構造

本プロジェクトにおいて開発された EUV マスクブランク欠陥検査技術は、直接には共同実施者であるレーザーテック株式会社により、EUV マスクブランク欠陥検査装置として商品化され販売されることにより実用化がなされる。しかし、本開発による成果の恩恵を受けるのは、装置の販売者となるレーザーテックだけではなく、各参加企業であり、それぞれの業種に応じた利得がある。以下に、本プロジェクト参加企業における実用化との関わりを記載する。(表 IV.-1)

・EIDEC:

本プロジェクトを通じて、量産対応 EUV マスクブランクの品質保証に必要な EUV マスクブランク欠陥検査装置の仕様を明確にする。得られた仕様に基づいてレーザーテックと共同で EUV マスクブランク欠陥検査装置を開発し、その装置が必要な仕様を満たしていることを確認する。

・欠陥検査装置メーカー:

EIDEC より装置の要求仕様を受け、EUV マスクブランク欠陥検査装置を EIDEC と共同で開発する。開発が終了した後に、EUV マスクブランク欠陥検査装置を製造し販売を行う。目に見える形での事業者となる。

・ブランクメーカー:

本プロジェクトにより開発され、欠陥検査装置メーカーにより製品化され上市される EUV マスクブランク欠陥検査装置を導入し、同装置によって EUV ブランクの欠陥検査を行い、品質保証された EUV マスクブランクを販売する。本プロジェクトの成果である EUV マスクブランク欠陥検査装置を使用することで、より品質の高い EUV マスクブランクを供給することが可能となる。

・マスクメーカー、およびデバイスメーカーのマスク製造部門:

EUV マスクブランク欠陥検査装置により品質保証された EUV マスクブランクをブランクメーカーより購入し、EUV マスクを製造して、これをマスクメーカーは顧客に販売する。デバイスメーカーのマスク製造部門は、これを自社の半導体製造部門に供給する。マスクの製造過程において、ブランクメーカーより得られる EUV マスクブランクの品質情報を利用することで、より品質の高い EUV マスクを高収率で製造し、低価格で供給することが可能となる。

・デバイスメーカー:

本プロジェクトにより開発され実用化された EUV マスクブランク欠陥検査装置により高度に品質保証

された EUV マスクブランクを使用する EUV マスクを使用して、半導体デバイスを製造し、これを販売する。高品質の EUV マスクの入手は、半導体デバイス製造工程における収率の改善へとつながる。開発の成果である EUV マスクブランク欠陥検査装置そのものを直接販売する事業を行うわけではないが、本プロジェクトに関わる業種の中では、最終、かつ、最大の受益者となる。

表 IV-1 成果物実用化の階層構造

	業種	実用の内容
EIDEC	ABI技術開発	ABIに必要な仕様の決定, 装置開発, 検証
装置メーカー(レーザーテック株式会社)	ABI装置製造	ABI装置開発, 装置製造・販売
ブランクメーカー(AGC, HOYA)	ブランク製造	ABI装置により品質保証されたブランクの製造・販売
マスクメーカー(DNP, TPN), デバイスメーカーのマスク製造部門	マスク製造	ABI装置により品質保証されたブランクを購入しマスクを製造・販売
デバイスメーカー	LSI製造	ABI装置により品質保証されたブランクを用いて作られたマスクを購入しLSIを製造

[2] 成果の実用化見通し

EUVL を用いた半導体デバイス生産が開始されるのは 2018 年と予測されるが、本プロジェクトの成果である EUV マスクブランク欠陥検査技術の実用化も、この予測に対応した時期に行われると考えられる。以下に、プロジェクト成果の実用化の見通しについて業種毎に記載する。

・欠陥検査装置メーカー:

欠陥検査装置メーカーは、本プロジェクトにおいて EIDEC と共同で、EUV マスクブランクの量産に必要な検査性能(欠陥検出感度および処理能力)と安定性・信頼性を持つ装置の開発を終了した。事業化においては、さらに、量産装置に必要となるさらなる長期安定性の向上のための実証が必要となることから、製品として上市を行う時期は、2018 年以降となる見通しである。

・ブランクメーカー:

マスクメーカー、あるいは、デバイスメーカーのマスク製造部門に対して EUVL の実用化開発に必要な EUV マスクブランクの供給を既に行っている。これまでは、ブランクの欠陥品質保証は、DUV 光(紫外線)を用いたブランク欠陥検査装置により行ってきた。本プロジェクトにより、EUVL による半導体デバイスの量産には、EUV マスクブランク欠陥検査装置によるブランクの品質保証が必須であることが共通の認識となっていることから、ブランクメーカーは、デバイスメーカーにおける EUVL の実用化状況を睨みながら EUV マスクブランク欠陥検査装置の導入時期を検討している。前述した欠陥検査装置の上市の時期を考慮すると、同装置の導入、および、同装置により品質保証された EUV マスクブランクの供給が開始されるのは、2018 年以降となるものと思われる。なお、導入される装置の台数は、EUVL の実用化の進捗状況と、デバイスメーカー各社の EUVL を用いたデバイスの生産数量により決定されることになる。

・マスクメーカー、およびデバイスメーカーのマスク製造部門:

EUVL の実用化開発に必要な EUV マスクの供給を既に行っている。また、本プロジェクトにおいて開発された EUV マスクブランク欠陥検査装置を使用しての欠陥緩和技術(正確な欠陥位置を確認し、これを避けるように回路パターンレイアウトを配置する)に関して検討を開始している。本プロジェクトの開発に係る EUV マスクブランク欠陥検査装置により品質保証がなされたブランクの使用は、ブランクメーカーによる供給が開始されたその時点から始まることになる。

・デバイスメーカー:

現在、EUV マスクブランク欠陥検査装置の評価を行い、装置の性能の確認を行っている状況にある。半導体デバイスの量産において、DUV 光を利用するブランク欠陥検査装置に比較した優位性(EUV マスクブランクの品質向上によるデバイス収率の向上が見込まれること)を確認し、EUV マスクブランク欠陥検査装置により品質保証されたマスクブランクをデバイスの生産に適用することが、広義の本プロジェクト成果の実用化となる。2018 年以降が実用化の時期になるものと予想される。

(2) EUV マスクパターン欠陥検査技術開発

[1] 実用化の階層構造

本プロジェクトにおいて開発された EUV マスクパターン欠陥検査技術は、開発の共同実施者である株式会社荏原製作所により、EUV マスクパターン欠陥検査装置として商品化され販売されることにより実用化がなされる。しかし、本開発による成果の恩恵を受けるのは、装置の販売者である荏原製作所だけではなく、各参加企業であり、それぞれの業種に応じた利益が得られる。以下に、本プロジェクト参加企業における実用化との関わりを記載する。(表 IV-2)

・EIDEC:

本プロジェクトを通じて、量産対応 EUV マスクの品質保証に必要な EUV マスクパターン欠陥検査装置の仕様を明確にする。得られた仕様に基づいて荏原製作所と共同で EUV マスクパターン欠陥検査装置を開発し、その装置が必要な仕様を満たしていることを確認する。

・欠陥検査装置メーカー:

EIDEC より装置の要求仕様を受け、EUV マスクパターン欠陥検査装置を EIDEC と共に開発する。開発の終了後、開発成果に基づいて EUV マスクパターン欠陥検査装置を製造して販売を行う。目に見える直接の事業者となる。

・マスクメーカー:

EUV マスクを製造し、開発の成果となる EUV マスクパターン欠陥検査装置により品質保証することで、品質の高い EUV マスクをデバイスメーカーに対して供給することが可能となる。

・デバイスメーカー:

本プロジェクトにより開発され実用化された EUV マスクパターン欠陥検査装置により高度に品質保証された EUV マスクを使用して、半導体デバイスの製造と販売をおこなう。高品質の EUV マスクの使用は、半導体デバイス製造工程における収率の改善へとつながる。開発の成果そのものである EUV マスクパターン欠陥検査装置を直接製造・販売する事業を行うわけではないが、本プロジェクトに関わる業種においては、最終で、かつ、最大の受益者となる。

表 IV.-2 成果物実用化の階層構造

	業種	実用の内容
EIDEC	PI技術開発	PIに必要な仕様の決定, 装置開発, 検証
装置メーカー(株式会社荏原製作所)	PI装置製造	PI装置開発, 装置製造・販売
マスクメーカー(DNP, TPN), デバイスメーカーのマスク製造部門	マスク製造	PI装置により品質保証された マスクを製造・販売
デバイスメーカー	LSI製造	PI装置により品質保証されたマスクを購入し LSIを製造

[2] 成果の実用化見通し

EUVL を用いた半導体デバイス生産が開始されるのは 2018 年と予測されるが、本プロジェクトの成果である EUV マスクパターン欠陥検査技術の実用化も、この予測に対応した時期に行われると考えられる。以下に、プロジェクト成果の実用化の見通しについて業種毎に記載する。

・欠陥検査装置メーカー:

欠陥検査装置メーカーは、本プロジェクトにおいて EIDEC と共同で、EUV マスクの量産に必要な欠陥検出性能を持つ EUV マスクパターン欠陥検査装置の基盤技術開発を終了した。事業化においては、さらに、量産装置として必要な機能の開発と装置の安定性・信頼性の向上が必要となることから、製品として上市を行う時期は、2018 年以降となる見通しである。

・マスクメーカー:

EUVL の実用化開発に必要な EUV マスクの供給を既に行っている。現時点で、EUV 露光マスクのパターン品質の保証は、DUV 光を用いたマスクパターン欠陥検査装置により行われている。本プロジェクトの開発に係る EUV マスクパターン欠陥検査装置により品質保証がなされた EUV マスクの供給は、装置を導入した後、マスクのユーザーとなるデバイスメーカーとの間での仕様の確定と認定作業が必要となるため、実用化として本開発により品質保証された EUV マスクの供給が実際に始まるのは、2018 年以降になるものと予測される。

・デバイスメーカー:

EUV マスクパターン欠陥検査装置を用いることでデバイス収率の向上が見込まれることを確認し、同装置により品質保証された EUV マスクを半導体デバイスの生産に適用することが、広義の本プロジェクト成果の実用化となる。実用化の時期は、EUVL 用いて半導体デバイスの量産を行う時期となるが、欠陥検査装置の上市と整合のとれる 2018 年以降になるものと予測される。

(3)-(i) EUVレジスト材料技術開発

[1] 実用化の定義

本プロジェクトの成果の実用化は、基本的に参加企業において行われる。以下に、本プロジェクトと参加企業における実用化の関わりを記載する。(図 IV-1)

・材料メーカー:

本プロジェクトで得られた成果(主に材料検討から得られた情報及び基盤開発で得られた設計指針、コンセプト)を用いて、デバイスメーカーに販売する材料(EUVレジストや下層膜等)を生産する。EUVレジストや下層膜は、それを使用するデバイスメーカーの製品(メモリー系やロジック系等)や使用するレイヤー(配線パターンやサイズ違い)によって、要求されるリソグラフィ性能が異なるため、材料メーカーによって最適化し商品化されて実用化がなされる。

・デバイスメーカー:

本プロジェクトで得られた成果(主にプロセスに関する成果)、及び、上記のように材料メーカーにおいて最適化された材料を用いて半導体デバイスの生産(リソグラフィ工程において)を行う。デバイスメーカー毎に固有の基盤技術が存在するため、得られた成果は、デバイスメーカーによって自社用に最適化した材料を半導体デバイス生産に適用することにより実用化が実現される。

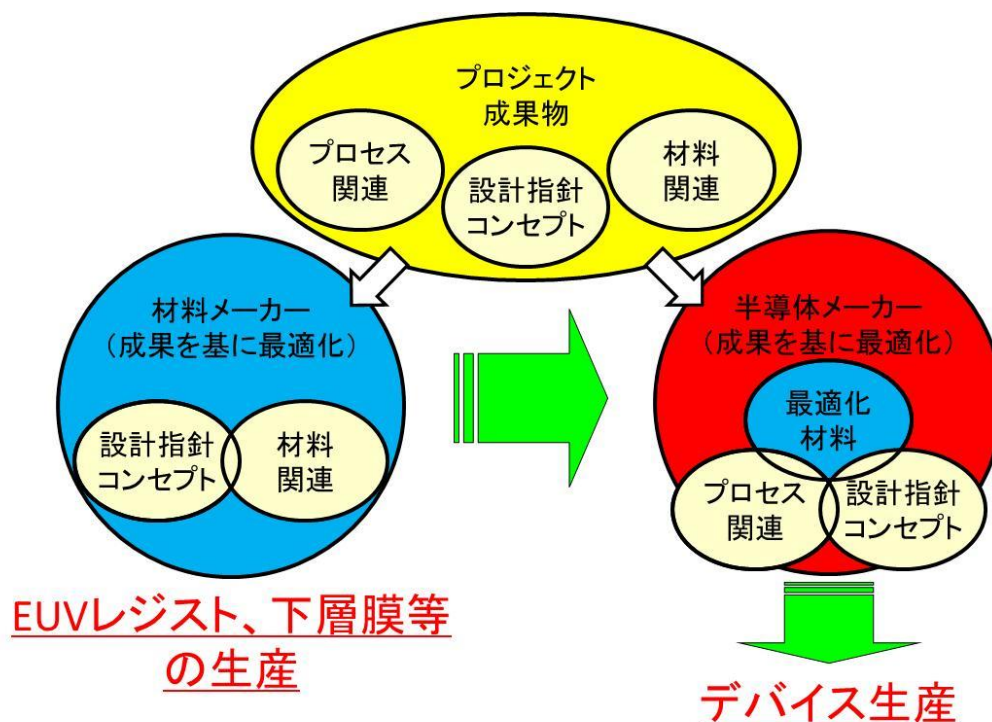


図 IV.-1 成果物の実用化概念図

[2] 成果の実用化見通し

EUVL を用いた半導体デバイス生産が開始されるのは 2018 年と予測されるが、本プロジェクトの成果である EUV レジスト材料技術の実用化も、この予測に対応して行われると考えられる。以下に、プロジェクト成果の実用化の見通しについて記載する。

化学増幅レジストについては、材料メーカーからデバイスメーカーへのサンプル出荷が行われており、各デバイスメーカーからの要求に応じた最適化開発が行われている状況である。デバイスメーカーでは、材料メーカーからレジスト材料および下層膜等の関連材料の供給を受けて、EUVL の量産への適用を見据えたプロセス開発、ならびにデバイス試作への適用が行われている。図 IV-2 に、実用化へのマイルストーンの概要を示す。この図では、材料メーカーでの事業化の開始は、デバイスメーカーでの半導体デバイス生産への EUVL 適用がなされる 2018 年に先立って行われる必要があることを示している。

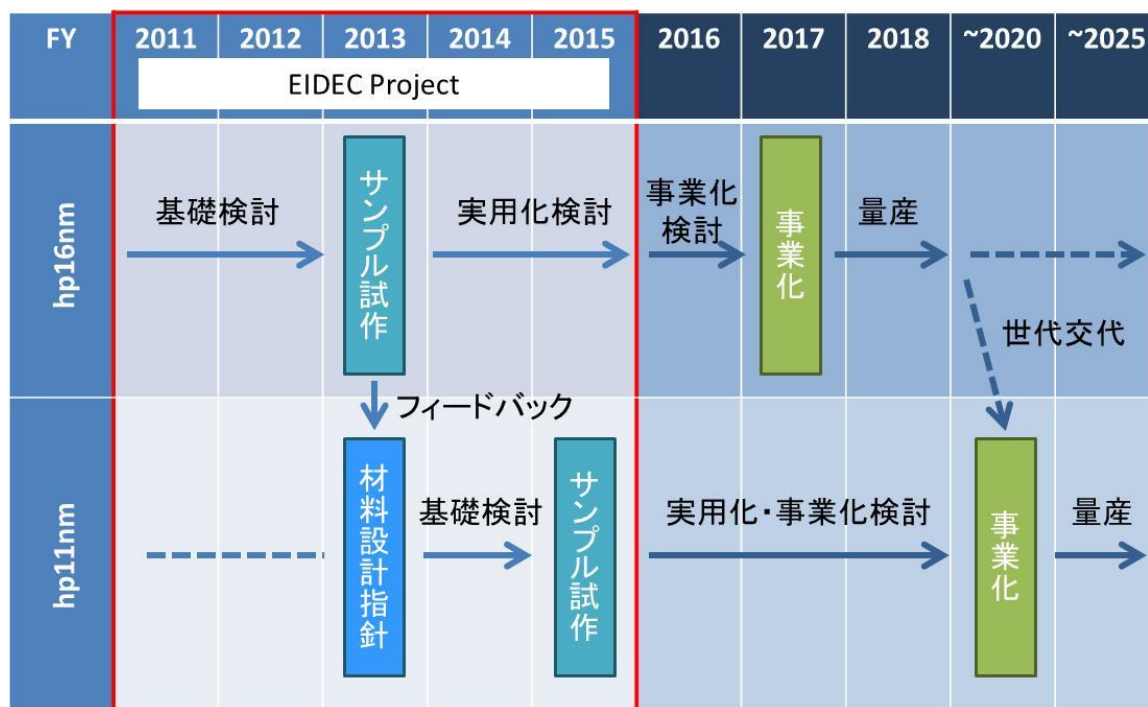


図 IV.-2 実用化へのマイルストーン

(3)-(ii) レジストアウトガス高精度測定方法の確立

本技術の成果の実用化については、以下のように認識している。

本プロジェクトにおけるレジストアウトガス計測技術開発の目的は、レジストからのアウトガスが露光装置内のミラー光学系を汚染してその寿命を短くしてしまうため、レジストの使用可否判定ができる高精度測定手法を確立することにあった。プロジェクト開始当初は、手法が確立した時点以降、材料メーカーが個別に測定装置を保有しレジスト材料開発に活用するという実用化シナリオを想定していたが、以下

の事情により、想定していたシナリオは変更する必要があると認識している。

「Ⅲ.研究開発成果について」の項に記載したように、プロジェクト開始後、ほぼ 4 年で高精度測定手法を確立し、その間、400 個を超える多数のレジストを評価した。その結果、評価したレジストすべてのノンクリーナブル成分(クリーニング後にも残存する汚染成分)が判定基準値以下であることが検証された。

こうした研究開発成果を受け、2015 年 3 月に、アウトガス計測手法を提案し開発を牽引してきた ASML から、可否判定そのものの撤廃が提案され、業界全体も合意する結果となった。EUVL の実用化の観点から見ると、開発成果の実用化は、この時点で完了しており、好ましい決着をみた。ただし、対象となるレジストは、KrF エキシマレーザーリソグラフィの時代から使われてきた化学増幅型コンセプトに基づいたレジストに限定されたもので、近年、急速に注目されているメタル系レジスト等の非化学増幅型レジストについては、アウトガスが引き起こすミラー汚染のメカニズムが化学増幅型レジストとは異なることが予測できるため、引き続き可否判定手法の開発を継続することが提案され、併せて、メタル系レジスト等非化学増幅型レジストのアウトガス計測手法については、露光装置内の雰囲気と同一の H₂ 雰囲気下で評価を行う必要性が指摘された。本プロジェクトで導入した HPEUV 照射装置が世界で最も早く H₂ 雰囲気下での実験環境が実現できることが判明したため、本プロジェクトの最終年度は、この手法確立に注力した。その結果、メタル系レジストのアウトガスによる汚染メカニズムを裏付ける成果を得た。

非化学増幅レジストを実用化するためには本測定技術は不可欠なものであるが、参加企業が個々に測定装置を導入して実用化開発をしなければならないというのではなく、今後 1~2 年程度の期間で本技術開発の方向性を見定めるべく、コンソーシアムが核となって業界全体で取り組むべき課題と認識している。次期プロジェクトで引き続き研究開発を行い、材料メーカーが開発成果を実用化することが望ましい。

(3)-(iii) DSA 技術開発

[1] 実用化の定義

本プロジェクトの成果の実用化は、基本的に参加企業において行われる。以下に、本プロジェクトと参加企業における実用化の関わりを記載する。(図 IV-3)

・材料メーカー:

本プロジェクトで得られた成果(主に材料検討から得られた情報及び基盤開発で得られた設計指針、コンセプト)を用いて、デバイスメーカーに販売する DSA 材料(ブロック共重合高分子 BCP や中性化膜材料等)を生産する。BCP や中性化膜材料は、それを使用するデバイスメーカーの製品(メモリー系やロジック系等)や使用するレイヤー(配線パターンやサイズ違い)によって、要求されるリソグラフィ性能が異なるため、材料メーカーによって最適化して商品化されて実用化が達成される。

・装置メーカー:

本プロジェクトで得られた成果(主に露光装置やプロセス装置に関する成果)、及び、上記のように材料メーカーにおいて最適化された DSA 材料を用いて、デバイスメーカーに販売する半導体デバイス製造装置を生産する。装置メーカー毎に固有の基盤技術が存在するため、得られた成果は、装置メーカ

一によって自社用に最適化された装置をデバイスメーカーに対して供給することにより実用化される。

・デバイスメーカー：

本プロジェクトで得られた成果(主にプロセスに関する成果)及び、上記のように材料メーカーにおいて最適化された DSA 材料を用いて半導体デバイス生産(リソグラフィ工程において)を行う。デバイスメーカー毎に固有の基盤技術が存在するため、得られた成果は、半導体メーカーによって自社用に最適化された材料、および、装置を半導体デバイス生産に適用することにより実用化される。

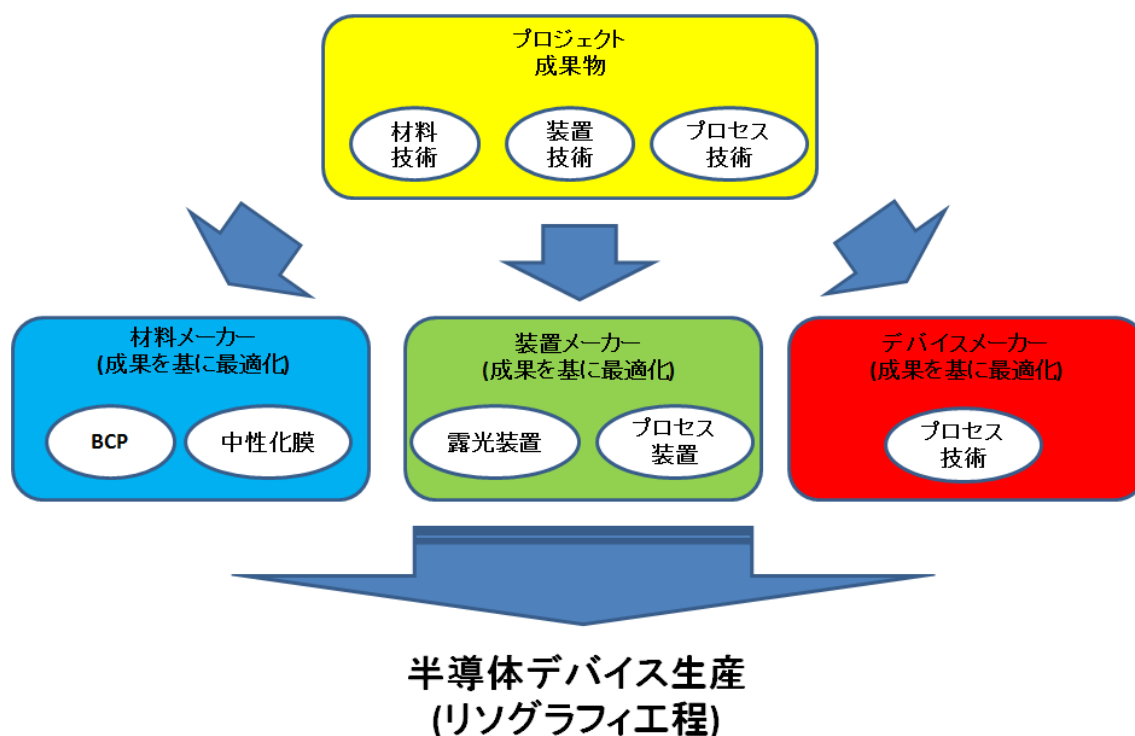


図 IV.-3 成果物の実用化概念図

[2] 成果の実用化見通し

DSA 技術を用いた半導体デバイス生産が開始されるのは 2020 年と予測されるが、本プロジェクトの成果である DSA 材料技術、装置技術、プロセス技術の実用化も、この予測に対応して行われると考えられる。以下に、プロジェクト成果の実用化の見通しについて記載する。

DSA 材料については、hp sub-15 nm 用の PS-b-PMMA などは材料メーカーからデバイスメーカーへのサンプル出荷が行われており、各デバイスメーカーからの要求に応じた最適化開発が行われている。デバイスメーカーでは、材料メーカーから BCP および中性化膜材料等の関連材料の供給を受けて、DSA 技術の量産への適用を見据えたプロセス開発、ならびにデバイス試作への適用が行われている。図 IV-4 に、実用化へのマイルストーンの概要を示す。この図では、材料メーカー、並びに装置メーカーでの事業化の開始は、デバイスメーカーでの半導体デバイス生産への DSA 適用がなされる 2020 年に先立って行われることが必要であることを示している。

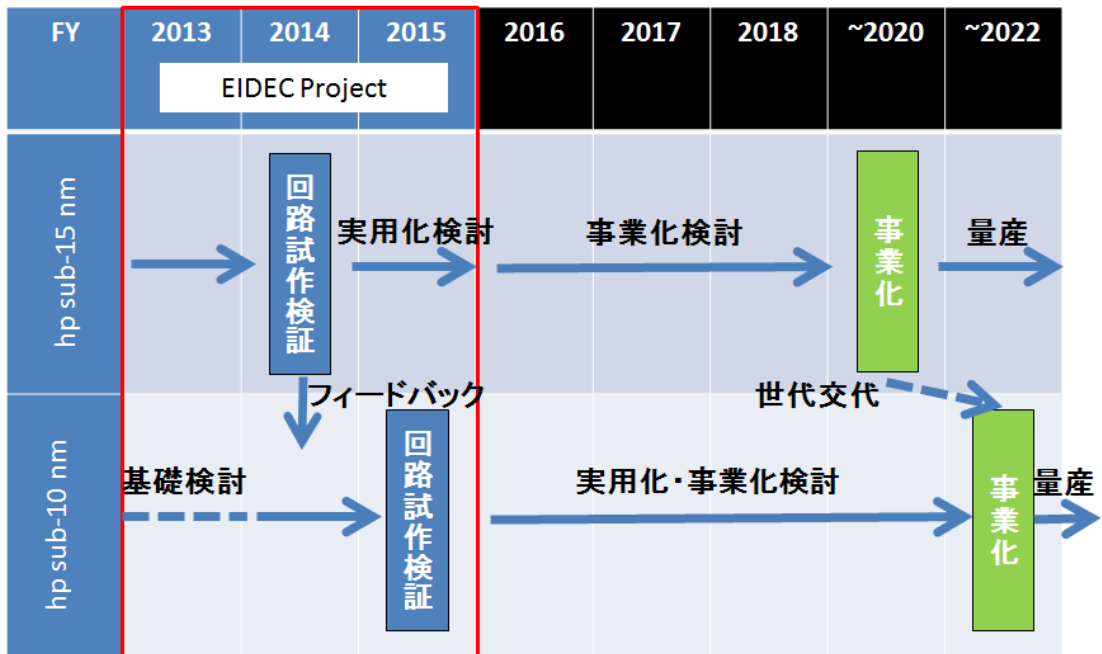


図 IV.-4 実用化へのマイルストーン