

「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」  
事後評価報告書

平成 22 年 2 月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

平成22年2月

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
理事長 村田 成二 殿

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会 委員長 西村 吉雄

NEDO技術委員・技術委員会等規程第32条の規定に基づき、別添のとおり  
評価結果について報告します。

## 目次

はじめに	1
分科会委員名簿	2
審議経過	3
評価概要	4
研究評価委員会におけるコメント	7
研究評価委員会委員名簿	8
第1章 評価	
1. プロジェクト全体に関する評価結果	1-1
1. 1 総論	
1. 2 各論	
2. 個別テーマに関する評価結果	1-17
2. 1. 1 MEMS/ナノ機能の複合技術の開発 (委託事業)	
2. 1. 2 MEMS/ナノ機能の複合技術の開発 (助成事業)	
2. 2. 1 MEMS/半導体の一体形成技術の開発 (委託事業)	
2. 2. 2 MEMS/半導体の一体形成技術の開発 (助成事業)	
2. 3. 1 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (委託事業)	
2. 3. 2 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (助成事業)	
2. 4 高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備 (委託事業)	
2. 5 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発 (委託事業)	
3. 評点結果	1-43
第2章 評価対象プロジェクト	
1. 事業原簿	2-1
2. 分科会における説明資料	2-2

参考資料 1 評価の実施方法  
参考資料 2 評価に係る被評価者意見

参考資料 1-1  
参考資料 2-1

## はじめに

独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構においては、被評価プロジェクトごとに当該技術の外部専門家、有識者等によって構成される研究評価分科会を研究評価委員会によって設置し、同分科会にて被評価対象プロジェクトの研究評価を行い、評価報告書案を策定の上、研究評価委員会において確定している。

本書は、「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」の事後評価報告書であり、第 18 回研究評価委員会において設置された「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」（事後評価）研究評価分科会において評価報告書案を策定し、第 24 回研究評価委員会（平成 22 年 2 月 5 日）に諮り、確定されたものである。

平成 22 年 2 月  
独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構  
研究評価委員会

「高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト」

事後評価分科会委員名簿

(平成 21 年 10 月現在)

	氏名	所属、役職
分科 会長	おおわだ くにき 大和田 邦樹	帝京大学 理工学部 情報科学科 教授
分科 会長 代理	いしだ まこと 石田 誠	豊橋技術科学大学 工学部 副学長 / 電気・電子工学系 教授
委員	あさの たねまさ 浅野 種正	九州大学 大学院 システム情報科学研究院 電子デバイス工学部門 教授
	いわた あつし 岩田 穆	株式会社エイアールテック 代表取締役 / 広島大学大学院 先端物質科学研究科 特任教授
	しょうじ しゅういち 庄子 習一	早稲田大学 理工学術院 基幹理工学部 電子光システム学科 教授
	みなみ かずゆき 南 和幸	山口大学 大学院 医学系研究科 応用医工学系学域 教授
	むろ ひでお 室 英夫	千葉工業大学 工学部 電気電子情報工学科 教授

敬称略、五十音順

## 審議経過

### ● 第1回 分科会（平成21年10月5日）

#### 公開セッション

1. 開会、分科会の設置、資料の確認
2. 分科会の公開について
3. 評価の実施方法について
4. 評価報告書の構成について
5. プロジェクトの概要説明

#### 非公開セッション

6. プロジェクトの詳細説明（助成）

#### 公開セッション

7. プロジェクトの詳細説明（委託）
8. 全体を通しての質疑
9. まとめ・講評
10. 今後の予定、その他、閉会

### ● 現地調査会（平成21年7月31日）

マイクロナノ2009—第20回マイクロマシン／MEMS展  
（東京ビックサイト）

### ● 第24回研究評価委員会（平成22年2月5日）

## 評価概要

### 1. 総論

#### 1) 総合評価

本プロジェクトは、革新的な高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発する事業であり、「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する重要事業である。また、今後の製造業における国際競争力を左右する可能性のある MEMS 技術についての高度な研究開発は公共性が高く、民間単独では取り組み困難なテーマであることから、本プロジェクトは NEDO 事業としての妥当性がある。さらに、MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 テーマについて高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し各種デバイスを試作するなど、各研究テーマでの目標は達成されている。成果の中には、「世界初」や「世界最高レベル」の技術も多く含まれ、成果の意義も高い。

今後は、海外、特にアジアの国の追い上が急であるので、高い技術を開発し、差別化できる製品にすることが重要である。また、開発した技術をいかに産業化していくか、また大きなマーケットへ展開していくかを現存の自社製品に限らず、広く開拓していくことを望む。

#### 2) 今後に対する提言

委託事業は各々、要素技術において先進的な成果を達成しているが、その成果の受取手が明確に想定できていないものが散見される。今後のフォローアップによる支援を継続して行い、本成果が我が国の MEMS 産業競争力の維持発展に真に貢献することを望む。

知識データベースと設計プラットフォームについては、価値を高めるために、グローバル戦略の一環として、世界から MEMS の知見が集約されるセンターのようなものに発展させることなどを検討して頂きたい。

今後は、市場として中国を意識したプロジェクト課題設定や材料、部品、システム、応用という幅を持った事業の実施も望まれる。

最後に、本プロジェクトの成否は実用化・事業化の達成に掛かっているので、実用化、事業化をより推進するための組織的・体制的な工夫がもっと必要であり、NEDO としても今後の活動を強力にフォローアップして頂きたい。

### 2. 各論

#### 1) 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、革新的な高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発す



る事業であり、新しい機械の創造およびその計測技術の確立を図ることを目的とする「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する事業である。また、MEMSはポスト半導体産業の重要な有力候補であり、自動車、通信、医療などで需要が増加していること、欧米・アジア諸国での研究開発の動きが活発化していることから、我が国の産業競争力を維持、発展させるために本プロジェクトを実施することは妥当であり、公共性が高い。さらに、MEMSはその基礎となる要素技術の範囲が多く分野にまたがるため、単独の企業による研究開発のみでは革新的な技術開発を実施し難い。そのため、NEDOの支援によって大学や公的研究機関の知恵と人材を活用し、系統的、総合的な取組を実施することが必要と認められる。

なお、アジアの国々の技術動向の把握がやや不足しており、これらの国の追い上げに対して優位を確保するため、特に製造技術ではコストに対してデバイスの性能の点での優位性を意識したプロジェクト設定が望まれる。

## 2) 研究開発マネジメントについて

目標設定は戦略マップの2009年時点を目安に定量的に設定されている。また、我が国が技術的優位にある技術についてバランス良く網羅して集積化複合化に取り組んだ点は評価される。テーマ構成として、さらに、個々の研究開発においては適切な研究チームが編成され、PLとSPLの2名で行うきめ細かい研究指導体制が研究遂行上機能しリーダーシップが発揮されていたことは評価できる。

一方、個別テーマ内の各サブテーマが、必ずしも関連性の高いものになっておらず、全体としての方向、成果が見え難い。特に、助成事業については、我が国全体の技術力アップ及び高集積・複合MEMSを製造するための製造技術自体を実用化に持っていくことが必要と考えられる。これらは本プロジェクトの枠組みの中で全体として達成すべき課題であり、組織的・体制的な工夫が望まれた。また、委託研究については特に、成果の受取手が見え難いものも散見される。

## 3) 研究開発成果について

それぞれの研究・開発においては世界初、世界最高水準と言える成果が多く、目標を十分達成している。また、成果発表や特許出願、一般に向けての情報発信なども十分成されていると評価できる。

一方、委託研究による基礎的・基盤的研究開発の役割は、先進技術開発で得た確実な知見を残すと共に、実用化の観点をもっと強く意識して解決すべき課題を正確に見定めて伝えることが重要である。その点で、委託事業の成果が見え難い。また、全体に総花的であり、MEMS集積加工技術としての独創技術へ

の絞り込みが弱いことは改善すべきである。

#### 4) 実用化、事業化の見通しについて

助成事業については、産業技術としての見極めや実用化に向けた課題の明確化は出来ている。助成事業の一部には、NEDO の別事業で実用化に向けた研究開発に取り組んでいるものもあり高く評価できる。また、委託事業の知識データベースと設計プラットフォームは当該分野の研究開発に有益であり、技術領域形成、産学協同の人材育成ができたことの意義は大きい。

一方、MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 テーマの委託事業については、実用化に向けた課題の明確化の段階までは到達していないものも散見される。今後の共同開発企業や設備メーカーとの活動の中で達成することを望む。また、実用化がうまくいくためにはコスト競争力が極めて重要だが、その見通しや個々の製品におけるベンチマークが十分には明確になっていないものも有る。

今後は、出口の製品をさらに深く考え、製品化まで結びつけることを念頭に、世界に対する差別化し優位な製品を市場、ユーザに結びつけて頂きたい。

## 研究評価委員会におけるコメント

第24回研究評価委員会（平成22年2月5日開催）に諮り、了承された。  
研究評価委員会からのコメントは特になし。

## 研究評価委員会

委員名簿（敬称略、五十音順）

職 位	氏 名	所 属、役 職
委員長	西村 吉雄	学校法人早稲田大学大学院 政治学研究科 (科学技術ジャーナリスト養成プログラム) 客員教授
委員長 代理	吉原 一紘	オミクロンナノテクノロジージャパン株式会社 最高顧問
委員	安宅 龍明	オリンパス株式会社 新規中核事業企画本部 ヘルスケア事業開発部 企画グループ コーディネーター
	伊東 弘一	学校法人早稲田大学 理工学術院総合研究所 客員教授（専任）
	稲葉 陽二	日本大学 法学部 教授
	大西 優	株式会社カネカ 顧問
	尾形 仁士	三菱電機エンジニアリング株式会社 取締役社長
	小林 直人	学校法人早稲田大学 研究戦略センター 教授
	小柳 光正	国立大学法人東北大学大学院 工学研究科 バイオロボティクス専攻 教授
	佐久間一郎	国立大学法人東京大学大学院 工学系研究科 精密機械工学 精密機械工学専攻 教授
	菅野 純夫	国立大学法人東京大学大学院 新領域創成科学研究科 メディカルゲノム専攻 教授
	富田 房男	放送大学 北海道学習センター 所長
	架谷 昌信	愛知工業大学 工学機械学科 教授・総合技術研究所所長
宮島 篤	国立大学法人東京大学 分子細胞生物学研究所 教授	

## 第 1 章 評価

この章では、分科会の総意である評価結果を枠内に掲載している。なお、枠の下の「○」「●」「・」が付された箇条書きは、評価委員のコメントを原文のまま、参考として掲載したものである。

## 1. プロジェクト全体に関する評価結果

### 1. 1 総論

#### 1) 総合評価

本プロジェクトは、革新的な高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発する事業であり、「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する重要事業である。また、今後の製造業における国際競争力を左右する可能性のある MEMS 技術についての高度な研究開発は公共性が高く、民間単独では取組み困難なテーマであることから、本プロジェクトは NEDO 事業としての妥当性がある。さらに、MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 テーマについて高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し各種デバイスを試作するなど、各研究テーマでの目標は達成されている。成果の中には、「世界初」や「世界最高レベル」の技術も多く含まれ、成果の意義も高い。

今後は、海外、特にアジアの国の追い上が急であるので、高い技術を開発し、差別化できる製品にすることが重要である。また、開発した技術をいかに産業化していくか、また大きなマーケットへ展開していくかを現存の自社製品に限らず、広く開拓していくことを望む。

#### <肯定的意見>

- 本プロジェクトは、「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する重要技術であること、公共性が高く、民間単独では取組み困難なテーマであることから NEDO 事業としての妥当性がある。また、自動車、通信、医療などで需要が増加していること、欧米・アジア諸国での研究開発の動きが活発化していることを考慮すると高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発するという事業目的は妥当性がある。目標設定は戦略ロードマップの 2009 年時点を目安に定量的に設定されていて妥当性がある。目標達成のためのスケジュールと予算は全体のバランスを考えるとほぼ妥当である。実用化研究と基礎的・基盤的研究のバランスも取れている。テーマ構成として、バルクマイクロマシンやナノテクノロジーなど日本が技術的優位にある技術について集積化複合化に取組んだ点は評価される。MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 分野について高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し各種デバイスを試作し、各研究分野での目標は達成されている。成果の中には、「世界初」や「世界最高レベル」の技術も多く含まれ、成果の意義も高い。知的財産権の取得や学会発表・論文発表、展示会等成果の普及は適切に行なわれている。知的基盤の整備については、知識データベースの整備、MEMS 設計プラットフォームの開発など、一般に向けて広く情報発信がなされ、供給・維持体制も整備されている。

- 日本の MEMS 技術のアドバンテージを確保する上で、必要不可欠なプロジェクトであり、More than Moore の具体例としての期待が大きい。
- 今後の情報、医療、環境などの分野で、安全、安心な社会の実現を目指した基盤技術として新しい MEMS の製造技術について、特徴のあるアイデアの発案と実際に試作評価に基づく実用性、有用性が検証されている。多くの企業も参画し、技術の応用、製品化、ビジネス展開の道筋もできているので、日本の産業力の強化にも貢献できると考えられる。
- 総合的に高い技術を開発できている。
- 総じて数値目標の達成率は高いと評価できる。委託研究については、大学、独法を中心に、基礎的、基盤的研究に相応しい先駆的な研究成果を挙げている。助成事業については、実施各社とも各々の特長ある技術開発に取り組み、技術の高度化、新技術の開発で多くの成果を上げている。
- 全ての課題について基本計画の目標をクリアし、殆どの課題については実用化の明確な方向性を持って実施されたことを高く評価します。
- 今後の製造業における国際競争力を左右する可能性のある MEMS 技術について NEDO が中心になって研究プロジェクトを推進することは非常に意義のあることだと考える。

#### <問題点・改善すべき点>

- 応用システムの促進、技術開発の原動力となる応用面からのニーズの獲得、革新的技術研究方針、開発戦略などへの反映が、プロジェクト全体として、システムティックに実施されるような、体制と進め方には改善が必要である。企業の技術ビジネス戦略の機密の守秘、知的財産権などよく留意された事業になっているが、これを重視しすぎると、システム化も含めた大学、複数企業のチームが形成することの阻害になる面がある。これらは今後改善すべき点と思われる。
- 開発した技術をいかに産業化していくか、また大きなマーケットへ展開していくかを現存の自社製品に限らず、広く開拓していくことを望む。
- 海外、特に日本以外のアジアの国の追い上が急であるが、波及効果の速度を考慮したテーマの設定が要求される。
- このような研究開発プロジェクトにおいては数多くの要素技術が含まれ、極めて広範な内容になる傾向があり、実用化には結びつかないことが懸念される。もう少し的を絞って実用化を重視したほうがよいように思われる。

#### <その他の意見>

- ・高い技術を開発し、差別化できる製品にすることが重要。

## 2) 今後の提言

委託事業は各々、要素技術において先進的な成果を達成しているが、その成果の受取手が明確に想定できていないものが散見される。今後のフォローアップによる支援を継続して行い、本成果が我が国の MEMS 産業競争力の維持発展に真に貢献することを望む。

知識データベースと設計プラットフォームについては、価値を高めるために、グローバル戦略の一環として、世界から MEMS の知見が集約されるセンターのようなものに発展させることなどを検討して頂きたい。

今後は、市場として中国を意識したプロジェクト課題設定や材料、部品、システム、応用という幅を持った事業の実施も望まれる。

最後に、本プロジェクトの成否は実用化・事業化の達成に掛かっているので、実用化、事業化をより推進するための組織的・体制的な工夫がもっと必要であり、NEDO としても今後の活動を強力にフォローアップして頂きたい。

### < 今後に対する提言 >

- ・本プロジェクトの成否は実用化・事業化の達成に掛かっているため、NEDO としても今後の活動を強力にフォローアップして頂きたい。このためには、事業体制として、実用化、事業化をより推進するための組織的・体制的な工夫がもっと必要と考える。知識データベースと設計プラットフォームについては、システムの完成とその利用自体は評価できるが、これが、開発環境の整備による新規参入者の拡大や多様な MEMS 製品の開発加速等の波及効果を本当にもたらすのかどうか追跡調査が必要と考える。
- ・革新的な MEMS を核とする部品製造技術は日本の強い分野として強化すべき方向付けであり、本事業の意義は大きく、評価できる。  
また、材料、部品技術は直接的なターゲット以外にも波及効果が大きく、材料、加工などの製造技術は世界トップであっても、産業として大きな利益をもたらすのは、部品よりもソフトを含めたシステムとしての価値であり、従来、日本はここが弱いために、システム化には欧米に先行されて、大きな利益に結びつかないという傾向がある。本事業でもこのような観点からは基本的な枠組みとして改善の余地があると考え、今後は材料、部品、システム、応用という幅を持った事業の実施が必要である。技術応用のタイムスパンとして、早期にビジネスのなるものと、長期戦略に基づくものと区別した計画立案が望ましい。
- ・高い技術を開発し、差別化できる製品に結びつけて行くためには、会社のトップが適切な判断をできるか、リスクを持ってしても挑戦していく判断を下すかによる。そのためにもこの会議にトップが参加し、今後の展開について一緒に考えることが望ましい。開発者にのみにすべての責任を負わずことに



なっていないか。

- 委託事業は各々、要素技術において先進的な成果を達成しているが、その成果の受取手が明確に想定できていないものも多いように思われる。今後のフォローアップによる支援を継続して行い、成果が日本の MEMS 産業競争力の維持発展に真に貢献するようご尽力をお願いしたい。助成事業については、出口イメージが必ずしも明確になっていないものも見受けられる。成果の利用によって付加される価値が最大化される応用、あるいは付加すべき価値を見極めて実用化製品を創出できるように引き続き取り組んでいただきたい。多数の機関が参画した分、得られた成果が散漫になりがちであるので、今後、各機関どうしの共同開発や技術体系としての整理を支援する体制の構築を検討いただきたい。知識データベースや設計プラットフォーム構築の価値を高めるために、グローバル戦略の一環として、それらを利用して世界から MEMS の知見が集約されるセンターのようなものに発展させることなどを検討して頂きたい。
- 今回の事業はシーズ開発を中心に進められましたが、大方の基本的なシーズは出そろっているものと考えられます。したがって今後は今回のようなシーズ・オリエンテッドよりも、ターゲット・オリエンテッド、あるいはアプリケーション・オリエンテッドの研究開発が必要と考えられます。ターゲットに適した設計・製造ソリューションを提供するために、製造や設計シーズの「すり合わせ」、あるいはシーズ同士を有効に結びつける橋渡しのなシーズ開発が有効と考えられます。そのために、将来的に本当に必要で、かつハードルの高いアプリケーションを掲げて、企業、研究機関の間でのシーズの複合化、すり合わせが行える体制による研究開発事業の実施を考えていただければいかがと思います。1社だけでやることは、最適ソリューション、競争力のあるソリューション開発の近道ではないと考えられます。「餅は餅屋」という言葉もありますし、自動車業界をはじめ多くの業界で成されているように、関連会社、系列会社に見るような「すり合わせ」による連携と分担が重要と考えられます。その過程で、本当に将来必要となる基本的なシーズも見えてくるものと考えられます。
- 今回のプロジェクトでは高集積・複合 MEMS ということで様々な分野で多数の研究が行われ、数多くの成果が得られた反面、全体に総花的な印象も受けた。  
リスクテイクしていくつかのデバイスに絞込み、日本が優位に立つ可能性があるような”killer contents”を明確にした方が有効ではないかと思われる。
- 国の方針を考慮して環境負荷（ローエミッション）を意識したプロジェクトの策定が必要と思われる。また、市場として中国を意識したプロジェクト課

題設定も今後不可欠となると考える。

<その他の意見>

- ・国のプロジェクトが開発した技術を有効に活用され、製品化まで繋がっているのか、その問題点、課題を考える場が必要と思う。

## 1. 2 各論

### 1) 事業の位置付け・必要性について

本プロジェクトは、革新的な高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発する事業であり、新しい機械の創造およびその計測技術の確立を図ることを目的とする「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する事業である。また、MEMS はポスト半導体産業の重要な有力候補であり、自動車、通信、医療などで需要が増加していること、欧米・アジア諸国での研究開発の動きが活発化していることから、我が国の産業競争力を維持、発展させるために本プロジェクトを実施することは妥当であり、公共性が高い。さらに、MEMS はその基礎となる要素技術の範囲が多く分野にまたがるため、単独の企業による研究開発のみでは革新的な技術開発を実施し難い。そのため、NEDO の支援によって大学や公的研究機関の知恵と人材を活用し、系統的、総合的な取組を実施することが必要と認められる。

なお、アジアの国々の技術動向の把握がやや不足しており、これらの国の追い上げに対して優位を確保するため、特に製造技術ではコストに対してデバイスの性能の点での優位性を意識したプロジェクト設定が望まれる。

#### <肯定的意見>

- 高集積・複合 MEMS は、新しい機械の創造およびその計測技術の確立を図ることを目的とする「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目標達成に寄与する重要技術であること、公共性が高く、民間だけでは取組みにくいテーマであることから NEDO 事業としての妥当性がある。また、自動車、通信、医療などで需要が増加していること、欧米・アジア諸国での研究開発の動きが活発化していることを考慮すると高集積・複合 MEMS 製造技術を 3 年間で開発するという事業目的は妥当性がある。
- (1)NEDO の事業としての妥当性については、ロボット・新機械イノベーションプログラムの目標達成のために寄与できる、革新的な MEMS の製造技術は開発されている。大学や公的研究機関の知恵と人材が活用され、民間活動のみでは改善できないような成果が達成されており、NEDO 事業としての妥当性はある。開発費と効果は、まずまずと思われる。(2)事業目的の妥当性については、内外の技術開発動向、国際競争力の状況から見ると、日本の先行する省エネルギー、低エミッション技術として、自動車、運送システム、製造プラント技術では世界をリードする必要がある、本事業のねらいは妥当性が高い。
- データベースなどのこの分野のすそ野を広げるのに役立っている。
- MEMS の高度化はセンシング機能の高度化によるロボット・機械の今後の進

化に不可欠なものであり、我が国の産業競争力を維持、発展させるためにも重要な技術開発テーマである。MEMSはその基礎となる要素技術の範囲が多くの分野にまたがるため、単独の企業による研究開発のみでは革新的な技術開発を実施し難い。そのため、NEDOの支援によって系統的、総合的な取組を実施することが必要と認められる。MEMSの市場規模は今後年率約10%の成長が見込まれ、数年後には国内だけで1兆円を超えることが期待される産業分野である。したがって、今回の事業は十分な費用対効果が見込める。日、欧、米に加えて最近では台湾等アジアでの研究開発が活発化しており、その技術水準も高くなっている。この中、日本は高度化、高付加価値化の技術開発を総合的に実施することは喫緊の課題であったと言える。

- 米国・欧州に対する優位性を確保するという点で、NEDOが主体的に関与すべきであり、日本が得意とする分野の技術に関して適切な目標設定されたことが高く評価できる。
- MEMS分野は応用分野が広く、戦略的な強化も必要である。また試作による検証も必要であり、高額な試作コストを考慮すると何らかの公的助成が不可欠である。したがってNEDOの事業として重要であると判断される。
- MEMSはポスト半導体事業の重要な有力候補であり、日本の製造業の国際競争力を左右する可能性もあるのでNEDOのプロジェクトとして実施することは妥当であると考えられる。

#### <問題点・改善すべき点>

- プロジェクトで出された成果を産業の発展に寄与できるか。研究開発のみで終わっていないか。大きな市場に分野に結びつくように期待する。
- 応用技術としての検証もできているものもあるが、加工技術として数値目標は達成されているものが多いが、その意味はあまり明確にはなっていない。また、バイオ、医療などは欧米に先行されている分野でも、産業としても重要ではあるが、国民の安全、健康を守るという意味で、政策的に手を抜けないものを含んでいる。事業計画として、これらの分野の産業指導力、牽引力という意味ではやや弱いと思われる。
- 日本以外のアジアの国々の技術動向の把握がやや不足しており、これらの国の追い上げに対して優位性を確保するため、特に製造技術ではコストに対してデバイスの性能の点での優位性を意識したプロジェクト設定が重要と思われる。

#### <その他の意見>

- ・日本の企業が強く発展していくことに直結できればよいが、そうでない場合は

何が不足しているのかがこのプロジェクトを通して見えると良い。

## 2) 研究開発マネジメントについて

目標設定は戦略マップの 2009 年時点を目安に定量的に設定されている。また、我が国が技術的優位にある技術についてバランス良く網羅して集積化複合化に取り組んだ点は評価される。テーマ構成として、さらに、個々の研究開発においては適切な研究チームが編成され、PL と SPL の 2 名で行うきめ細かい研究指導体制が研究遂行上機能しリーダーシップが発揮されていたことは評価できる。

一方、個別テーマ内の各サブテーマが、必ずしも関連性の高いものになっておらず、全体としての方向、成果が見え難い。特に、助成事業については、我が国全体の技術力アップ及び高集積・複合 MEMS を製造するための製造技術自体を実用化に持っていくことが必要と考えられる。これらは本プロジェクトの枠組みの中で全体として達成すべき課題であり、組織的・体制的な工夫が望まれた。また、委託研究については特に、成果の受取手が見え難いものも散見される。

### <肯定的意見>

- 目標設定は戦略マップの 2009 年時点を目安に定量的に設定されていて妥当性がある。目標達成のためのスケジュールと予算は全体のバランスを考えるとほぼ妥当である。実用化研究と基礎的・基盤的研究のバランスも取れている。テーマ構成として、バルクマイクロマシンやナノテクノロジーなど日本が技術的優位にある技術について集積化複合化に取り組んだ点は評価される。
- MEMS の加工技術としての目標数値は妥当性なものと思われる。しかし、数値の意味は専門家以外には理解できないものがある。計画、スケジュール、研究開発フローは妥当と思われる。実施体制は MEMS 製造技術の開発としては妥当であるが、応用に関する体制が弱い。リーダの人選も妥当であり、リーダーシップが発揮されている。企業、実施者についても技術基盤があり、事業化への道筋が見える。事業進行中に事後内容を追加したことは評価できる。
- 今後成長が期待される市場を考え、そこで必要となる技術を開発することを目的としている。また新規参入しやすいようにデータベースを充実させている。
- MEMS/半導体集積化技術、MEMS/MEMS 集積化技術などロボット・新機械の基幹部品技術の高度化、設計プラットフォームという標準化への取組、ナノ機能の融合という先進的な取組までバランス良く網羅して計画の元に実施されたプログラムと評価できる。3 年間という短期間にもかかわらず、個々の技術についての数値目標の達成度は高い。
- 2 名の PL および SPL で行うきめ細かい研究指導体制が研究遂行上機能してい

たことが評価できる。また、当初目標をある程度フレキシブルに捕らえ、実用化の面から優れた結果を得られるように指導が行われたケースも見られた。

- 必要で明確な数値目標が設定されているので高く評価できる。
- 個々の研究開発においては適切な研究チームが編成され、しっかりとした計画が立案されて、それがフォローされたと思われる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 開発した技術を実用化に持っていく体制の強化が強く求められる。
- 極めて難しいことではあるが、研究開発目標自体が妥当なのかどうか今ひとつ明確にはなっていないような印象を受けた。
- 目標数値の意味は専門家以外には不明であるので、応用面で何ができるようになるかを分かるように説明する必要がある。研究費については委託、助成ともに内容が分かるようにする必要がある。
- 例えば MEMS/ナノ機能などの技術区分内の各テーマが、必ずしも関連性の高いものになっておらず、単に各々の実施者の研究開発内容の納まりの良いところに属した感があり、大きなプロジェクトならではの幹となるべき知見が見え難い。各技術区分の中のテーマについて、PL および SPL がスーパーバイズするテーマが入り組んでおり、全体としての方向、成果が見え難い。助成事業についても、このプロジェクトの枠組みの中であるからこそ達成できた成果が見え難いと感じる。委託研究については特に、成果の受取手が見え難い。研究計画と実施体制、成果の関係がわかり難い。一例を挙げる。研究開発項目①の中の4つの具体的内容の内の一つ(1)選択的ナノ機械構造体形成技術の達成目標として「L/S：50nm、縦方向：80nm 以上、・・・に選択的に形成できる技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。さらに・・・」が掲げられている。一方、成果報告資料の中では、「直接描画を用いた・・・L/S:50nm・・・」や、「スタンピング転写とセルフアライメントを用いた・・・配置精度 1 ミクロン・・・」となっている。これら基本計画の達成目標の記述と成果の整理にある基本計画の目標との関係がわかり難い。しかも、成果の例として「フレキシブル基板上にハンダの自己整合効果を使って LED を配置」した例があるが、これが「ナノ機能を発現することを示す」ことにどのように関係しているかがわかり難い。達成目標と実施内容の関係がわかり難いものも散見される。一例を挙げる。①の(4)ナノ機能を組み込んだ MEMS デバイスの製造技術の助成事業で実施した内容と成果の中でナノ機能が何を意味するのかが明確でない。
- 世界情勢の変化および国の方針を意識したプロジェクト運営が必要と思われる。例えば、環境負荷に対する意識をプロジェクトに取り込むなどの努力が

必要と感じた。

- 高集積・複合 MEMS を製造するためには、製造技術自体の集積化、複合化が必要と考えられる。従って、テーマにも依存するが 1 機関、1 社での実施には疑問を感じる。レーザー総研と東北大の共同研究や、研究の進行に従って委託先と助成先の連携があるものの全体としては十分とは言えず、研究の進行に従って研究グループの参加企業等を増やすなど、ダイナミックな研究体制拡充などの工夫があっても良いと考えられる。

<その他の意見>

- ・事業体制として、実用化、事業化をより推進するための組織的・体制的な工夫がもっと必要と考える。
- ・設計プラットフォームを追加したことは評価できるが、期間が十分であったのか、また十分に成果まで達成できたのか。
- ・大学や独法へは全て NEDO からの委託で研究開発が実施されているが、融合的技術開発の一層の推進や産学連携を活かした技術競争力向上のためには、一部に民間企業からの再委託等の体制で臨む研究チーム構成があっても良かったものと感じている。



### 3) 研究開発成果について

それぞれの研究・開発においては世界初、世界最高水準と言える成果が多く、目標を十分達成している。また、成果発表や特許出願、一般に向けての情報発信なども十分成されていると評価できる。

一方、委託研究による基礎的・基盤的研究開発の役割は、先進技術開発で得た確実な知見を残すと共に、実用化の観点をもっと強く意識して解決すべき課題を正確に見定めて伝えることが重要である。その点で、委託事業の成果が見え難い。また、全体に総花的であり、MEMS 集積加工技術としての独創技術への絞り込みが弱いことは改善すべきである。

#### <肯定的意見>

- MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の3分野について高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し各種デバイスを試作した点で目標は達成されている。知的基盤の整備については、知識データベースの整備、MEMS 設計プラットフォームの開発など、一般に向けて広く情報発信がなされている。
- ほとんどの研究テーマについて当初目標が達成され、数多くの特許出願や学会発表がなされ、その点では十分な成果を上げられたと思う。
- 全体的にはほぼすべての項目で目標が達成されている。
- 一部進行中のところがあるが世界的にも優位な技術開発がなされている。投資された予算に見合った成果と考えられる。
- 基本計画および自主目標に掲げた数値目標は、ほぼ完全に達成していると評価できる。個々の技術においては世界初、世界最高水準と言える成果が多い。
- それぞれの研究・開発においては最新成果が得られており、目標を十分達成している。委託研究のいくつかは将来実用化に結びつく研究となると思われる。また、受託研究に関しては、いずれも製品化のキーテクノロジーとして有効な成果が得られている。
- 一部、自主目標に達していない項目があるものの、基本計画の目標は達成しているので高く評価できる。成果発表や特許出願なども十分成されていると評価できる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 論文や賞のアカデミックな発表も必要と考えるが、それよりも実用化の観点をもっと強く意識した成果の評価が必要か。
- 委託研究による基礎的・基盤的研究開発の役割は、個別の数値目標の達成よりはむしろ、先進技術開発で得た確実な知見を残すと共に、解決すべき課題を正確に見定めて伝えることが重要と認識している。その観点で、委託事業の成果が見え難いのは残念である。

- ほぼすべての項目で目標達成度されていることは、目標が低く挑戦度の低いものになっていた可能性がある。非専門家には基本目標の意味が不明であるので、わかりやすい応用や例で説明することが望ましい。横方向配線技術、実装技術については、MEMS 技術プロジェクトとしての独自性が無いものがある。全体に総花的であり、MEMS 集積加工技術としての独創技術への絞り込みが弱いことは改善すべきである。成果の普及については、事業全体としては格別の方策は採られておらず、参加企業まかせというやり方は NEDO として改善の余地ある。
- 社会状況の変化により目標設定をフレキシブルに変更する必要があり、成果の現実的な波及効果および即効性を考慮した研究開発が求められる。

#### <その他の意見>

- ・これらの成果が社内に於いてどのように評価され、製品と考えられているのか。一般に向けた情報発信以前に重要と考える。
- ・知識データベースや設計プラットフォーム構築の価値をさらに高めるための取組として例えば、それらを利用して世界から MEMS の知見が集約されるセンサーのようなものに発展させることなども検討していただきたい。
- ・企業への助成事業の成果は基本非公開ということで日本全体の技術力アップという点で十分ではないような気もする。

#### 4) 実用化、事業化の見通しについて

助成事業については、産業技術としての見極めや実用化に向けた課題の明確化は出来ている。助成事業の一部には、NEDO の別事業で実用化に向けた研究開発に取り組んでいるものもあり高く評価できる。また、委託事業の知識データベースと設計プラットフォームは当該分野の研究開発に有益であり、技術領域形成、産学協同の人材育成ができたことの意義は大きい。

一方、MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の3テーマの委託事業については、実用化に向けた課題の明確化の段階までは到達していないものも散見される。今後の共同開発企業や設備メーカーとの活動の中で達成することを望む。また、実用化がうまくいくためにはコスト競争力が極めて重要だが、その見通しや個々の製品におけるベンチマークが十分には明確になっていないものも有る。

今後は、出口の製品をさらに深く考え、製品化まで結びつけることを念頭に、世界に対する差別化し優位な製品を市場、ユーザに結びつけて頂きたい。

#### <肯定的意見>

- 助成事業については、産業技術としての見極めや実用化に向けた課題の明確化は出来ている。委託事業については、産業技術としての見極めや実用化に向けた課題の明確化の段階までは到達していない。共同開発企業や設備メーカーとの今後の活動の中で達成すべき課題となっている。
- 個々の研究開発については問題も明らかになっており、方向性も明確化されている。また、高度な技術を含む成果も多く、設定された分野以外への波及効果もあると思われる。
- 明確な事業化計画を持っているテーマがあり、高く評価できる。
- どの研究テーマについても実用化、商品化の計画が立案されていて、NEDO のフォローもある程度行われている印象を受けた。
- データベースなど当該分野の研究開発に有益なものがある。新しい技術開発ができていますので実用化への期待は大きい。
- 助成事業については、実施各社とも具体的なアプリケーション、あるいは事業化までの社内での取組について明確な計画をもって臨んでいる。助成事業の一部には、NEDO の別事業で実用化に向けた研究開発に取り組んでいるものもあり高く評価できる。
- 新しい技術が確立できているので、製品を明確にして実用化課題を解決すれば、実用化の可能性のあるものは多数ある。技術領域形成、産学協同の人材育成ができたことの意義は大きい。

<問題点・改善すべき点>

- 出口の製品をさらに深く考え、製品化まで結びつけることを念頭に、世界に対する差別化し優位な製品を市場、ユーザに結びつく努力が求められる。
- 実用化可能性はあるものが多いが、実用化課題の明確化は製品を具体的にしないと明確にならないので、現在、実用化判断するのはやや早く、時間がかかる。事業化シナリオは報告書に書いてはあるが、まだ、具体性のあるものはそう多くななく、コストダウンなど経済効果の見通しも明確ではない。
- 個々の技術は素晴らしく、優位性を持つものであるが、集積化 MEMS としての基盤技術を網羅しているとは言いがたい。特に競合相手に対する優位性がもう少し明確に示される必要がある。今後さらに広く応用分野で求められる技術課題の調査・分析の必要性を感じる。
- 一方で、事業化が明確でないテーマもあった。他機関、他社との共同研究が有効な例と考えられる。
- 実用化がうまくいくためにはコスト競争力が極めて重要だが、その見通しや個々の製品におけるベンチマークが十分には明確になっていない。

<その他の意見>

- ・ 本プロジェクトの成否は実用化・事業化の達成に掛かっているため、各機関において、今後、課題の解決や適用アプリケーションの絞込みを進め、NEDOとしても今後の活動を強力にフォローアップしていただきたい。知識データベースと設計プラットフォームについては、システムの完成と利用自体は評価できるが、これが、開発環境の整備による新規参入者の拡大や多様な MEMS 製品の開発加速等の波及効果を本当にもたらすのかどうか追跡調査が必要と考える。
- ・ 実用化に当たっての壁は何なのかを明確にすることが、本プロジェクトの重要な仕事と考える。
- ・ 委託事業の成果を今後の研究開発戦略に活かせるような成果の普及に関する支援に取り組む必要があるように思われる。

## 2. 個別テーマに関する評価結果

### 2. 1. 1 MEMS／ナノ機能の複合技術の開発（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

我が国が国際的な競争力を獲得する上で極めて重要な分野である分バイオセンサやナノ材料において、基盤的要素技術として新たな取り組みを行い、総合的に目標を達成できている。特に、CNT-MEMS については世界初の成果が得られ、新たな技術領域を開拓することが期待できる。

一方、学術的な位置づけは明確であるが、代替技術との比較、さらに応用面での技術の位置づけ、目的を明確にした研究計画と協力体制をより強化すべきである。

実用化の見通しについて、バイオ材料においては助成先との共同開発の中で実用化の進展が期待できる。一方、CREST のプロジェクト参加による開発を継続するナノ材料においては、実用化に向けた企業との連携を図って頂きたい。また、企業との共同開発が決まっていないテーマにおいては、実用化に向けた企業との連携を図って頂きたい。

#### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、市場の拡大或いは市場の創造につながるかどうかは現時点では判断できない。CNT-MEMS については世界初の技術であり、新たな技術領域を開拓することが期待できる。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。実用化の見通しについて、東大と産総研（バイオ材料）については助成先との共同開発の中で実用化の進展が期待できる。一方、CREST のプロジェクト参加による開発を継続する産総研（ナノ材料）については、製品化に向けた企業との連携が課題である。
- 目標達成度は、すべての基本計画目標が達成されており、一部、目標以上のが達成されている。成果の意義は、企業と共同で技術を応用した新規のセンサなどの試作により、技術の意義を検証、提案していることは高く評価できる。各種センサなどで、市場を形成できる可能性を持っている。世界最高水準の優位性を持った成果を含んでおり、産業として重要な市場創成につながると思われる。知財権獲得や情報発信は平均レベルである。成果の普及目標達成度は、技術を応用して新規のセンサなどの試作により、意義を検証、提案していることは高く評価できる。実用化可能性は基盤技術として明確にされている。波及効果という意味で、産学協同の新技术領域形成、新技术開拓できる人材育成でも成果があがっている。
- 当初目標を十分達成しており、項目によっては目標以上の成果を上げている。

実施者が得意とする技術をさらに引き上げた点で、非常に効果的であったと思われる。

- 目標を十二分に達成している。その成果の波及効果は大きく、今後の発展・展開が期待されるので高く評価できる。
- MEMS 技術の基盤的要素技術として新たな取り組みをおこない、総合的に目標値を達成できている。またそれらの成果を広く発表し、この分野の技術のすそ野を広げるのに大いに期待される。
- (1)選択的ナノ機械構造体形成技術開発では、表面プラズモン共鳴現象を利用した化学物質の検知器への応用を例題に、要素部品の加工技術を開発し所定の目標を達成した。(2)バイオ材料の選択的修飾技術開発では、本プロジェクトで選定した特定分子を認識する素子、それらを基板上に固定化する技術を開発し、概ね目標を達成している。(3)ナノ材料の選択的形成技術開発では、炭素ナノチューブの成長を制御して構造体を作製する技術を開発し、数値目標を達成すると共に、世界初の炭素ナノチューブを部材とするカンチレバー構造を作製した。これらは、新たな MEMS の領域を開拓するために先駆的研究と位置付けられる。
- バイオセンサやナノ材料は日本が国際的な競争力を獲得する上で極めて重要な分野であり、今回その要素技術についていくつかの成果が得られたことは高く評価される。

#### <問題点・改善すべき点>

- 同じ助成事業のプロジェクトと関連付けを行なうと、連携を通じた有機的発展が期待される。
- それぞれ優れた技術であり世界レベルの成果を上げているが、応用の範囲がやや限定的で汎用性等についての検討が今後必要と思われる。
- 一方で、実用化イメージが狭いものがある。応用拡大、市場刺激を考慮すると、もう少しイメージを拡げて提案することも必要と考えられる。
- 学術的な位置づけは明確であるが、代替技術との比較、さらに応用面での技術の位置づけ、目的を明確にした研究計画と協力体制をより強化すべきである。プロジェクト成果の実用化可能性は高いと思われるが企業としての実用化の課題の明確化とその解決による事業化判断には時間が必要である。特に、バイオ MEMS 融合技術の実用化には、かなり時間がかかると思われるが、最終ターゲットに至る前の途中段階での産物の実用化も意図的に取り組むべきである。事業化に向けた後継プロジェクトでコストダウンなど経済効果の見通しなどの、企業での事業化にも関わる情報も把握が必要である。波及効果としての関連領域形成、人材育成において基盤が形成されたと考えられるの

で、これを発展させるべく、今後の研究を期待する。

<今後に対する提言>

- ・CNT-MEMS について、デバイス化した場合のメリット、他の技術に対する優位性を明確にして欲しい。企業との共同開発が決まっていないテーマについては、製品化に向けた企業との連携を図って欲しい。
- ・バイオセンサやナノ材料については実用化までしっかりと国のプロジェクトで推進することが必要であると思う。
- ・成果技術の体系化、広範な応用に関して、引き続き強化した研究体制の構築に努力してほしい。事業化に向けた後継プロジェクトでコストダウンなど経済効果の見通しなどの、企業での事業化にも関わる情報も把握ことにより、実用面での研究課題も取り組めるようにしてほしい。波及効果としての関連領域形成、人材育成において基盤が形成されたと考えられるので、これを発展させるべく、今後の研究を期待する。
- ・このプロジェクト期間にどこまで進展したのか、また世界的な水準から目標がどのように位置づけているのかもわかると良い。
- ・事業原簿を見る限りにおいては、全体的に、加工技術の開発に留まっている感じを受ける。開発した技術によってもたらされる効果も世の中にアピールしていただきたい。開発した技術の実用化、産業化にあたっての課題を見極めて世に提示することでプロジェクトの価値をさらに向上していただきたい。
- ・個々に開発した技術は優れているが、今後当該グループに得意分野を持つ研究者・技術者加えての有機的連携が進めばさらに優れた成果が上げられたように感じた。今後、キラーアプリケーションの探査が引き続き必要と考えられる。

<その他の意見>

- ・それぞれのプロジェクトの予算が明らかになっていると評価もし易い。

## 2. 1. 2 MEMS/ナノ機能の複合技術の開発（助成事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

基本計画目標および自主目標をいずれも達成している。成果では特に、**RF-MEMS** スイッチへの適用技術で世界最高レベルの耐電力性を実現したのは評価できる。また、製品化を意識した上で到達目標を設定しており、製品化につながる非常に実践的な研究である。

一方、社内の応用に着眼するのはまず良いとしても、市場の大きな分野への応用を戦略的に計画することが望ましい。また、差別化をはかるため、最新の海外研究動向の把握が望まれる

事業化の見通しについては、信頼性向上やデバイス高機能化などの課題を着実に解決して実用化を実現して頂きたい。

今後は、加速度センサ、検査プローブ針等へのデバイス応用も期待が大きいのでこれらについても技術の展開を図って頂きたい。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、世界最高レベルの耐電力性を実現したのは評価できる。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、コスト面の制約が厳しくない衛星通信用に適用を目指すのは適切な方針である。事業化までの道筋は、企業内での研究開発を進めることで明確になっている。また、本技術は適用可能デバイスが複数あり適用可能機器が幅広いので、その波及効果は大きい。
- CNTの**RF-MEMS** スイッチへの適用技術を確立できたことは重要であると思う。
- 基本目標は達成度されている。CNTを組み込んだメッキ技術はユニークであり、着実に技術を確立しており、実用性も高いと思われる。成果を用いた**RF** スイッチの性能は世界最高水準であり、汎用性もある基本技術としての意義は明確であり、既存市場でシェアを獲得できる。応用展開により市場創成も期待できる。技術の汎用性、優位性は高い。知財権獲得と活用の道筋は平均レベルである。直接ターゲットとしている**RF** スイッチについては性能面での差別化の達成により実用化可能性は高いと思われる。事業化判断には競合技術との比較検討による優位性の確立が必要である。今後、競合技術との比較評価による実用化課題の明確化と特徴の活用。
- 日本発の技術開発がなされている点は、大いに評価される。
- 金メッキによるスイッチ部材を作製する際、金メッキ原料液にカーボンナノチューブ(CNT)を混入させ、スイッチの耐性を向上させる独創性の高い研究である。基本計画目標および自主目標をいずれも達成している。特に、スイッチの耐電力性能では目標値を上回る世界最高性能を達成している。実用化ま



での最大の課題がコンタクトの長寿命化にあることが明確になっており、それに対する解決の方法も想定されている。

- 新しいナノ材料を添加した金属接点構造により接点の長寿命化の可能性を開いた意味で意義がある。また、製品化を意識した上で到達目標を設定しており、製品化につながる非常に実践的な研究である。
- 目標値を実用可能なレベルでクリアしており高く評価できる。

#### <問題点・改善すべき点>

- 知財権獲得と活用の道筋は戦略性を持って強化すべきである。成果の普及、事業化については、成果の広範な領域への普及は今後の課題であり、時にシリコン系あるいは化合物系のアクティブ素子との集積化を進めないと、競争力が不足すると思われる。領域形成、人材育成は企業としても積極的に進める必要がある。
- 社内の応用に着眼するのはまず良いとしても、市場の大きな分野への応用を戦略的に計画することが望ましい。
- 高機能化のための回路の集積化の道筋を明確にするなど今後の展開について明らかにすべきと思われる。また、生産性・コストの問題が残り、差別化をはかるため、最新の海外研究動向の把握が必要である。
- この RF-MEMS スイッチがどの程度競争力があるか明確になっていない。

#### <今後に対する提言>

- RF-MEMS スイッチについては信頼性向上やデバイス高機能化などの課題を着実に解決して実用化を実現して欲しい。また、加速度センサ、検査プローブ針等へのデバイス応用も期待が大きいのでこれらについても技術の展開を図って欲しい。
- 事業化シナリオについては、技術応用戦略を企業グループおよびアライアンスで構築して進める必要がある。
- 開発した新技術を新たな応用分野への展開を望む。
- 試作結果は良好で目標数値を達成しているものの、現在では CNT の分散は多くの方法で実施できるようになってきていることなども考えると、競争力を増すために例えば、損失低減と長寿命の双方を満足する最適 CNT 密度などに関わる科学的知見などを確固たるものにして進歩性を高めてもらいたい。
- 回路集積化・パッケージングを意識した構造および環境負荷を意識した製造技術を実現する必要がある。
- 他社との連携による用途拡大を期待します。
- プロジェクトとしては RF-MEMS スイッチ一点だけでなく、RF モジュールを

実現できるような周辺部品を含む広範なものにした方が実用化のためには有効ではないかと思う。

<その他の意見>

## 2. 2. 1 MEMS／半導体の一体形成技術の開発（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

一部の自主目標を除いて目標を達成している。成果では特に、世界最小クラス MEMS 機械量センサ、世界初の多チップ一括実装、乗り越え配線技術を用いたマルチチップモジュール試作、世界初のアスペクト比 1 を持つインクジェットフレキシブル微細配線を実現したのは評価できる。

一方、MEMS／半導体の一体形成技術の優位性をさらに明確化する必要があり、世界の研究・開発動向との比較の観点がやや不足している。また、本テーマのような実装の基本技術は信頼性が重要であり、デバイスとして実用化する際には、使用目的に応じた信頼性の評価（例えば温度サイクル試験）を実施することが望まれる。

実用化の見通しについて、MEMS－半導体横方向配線－1 と MEMS－半導体横方向配線－2 においては、出口イメージが明確であり、メーカーとの共同研究開発体制が進められ、実用化への課題と対応が明確になっている。一方、MEMS－半導体プロセス統合モノリシック製造技術においては出口イメージが明確でない。

今後は、基本的加工技術として普及を目指して、有用な技術については企業と連携した具体的アプリケーション開発の積極的な実施を望む。また、MEMS－半導体横方向配線－2 においては医療用カテーテル、医療用マイクロカプセル、太陽電池パネル、FDP など幅広い分野への適用を図って頂きたい。また、シリコンナノワイヤーの電気機械係数については科学的理解に向けて引き続き研究を進めて頂きたい。

### <肯定的意見>

- 研究成果は一部の自主目標を除いて目標値を達成している。成果の意義として、世界最小クラス MEMS 機械量センサ、世界初の多チップ一括実装、乗り越え配線技術を用いたマルチチップモジュール試作、世界初のアスペクト比 1 を持つインクジェットフレキシブル微細配線を実現したのは評価できる。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。実用化の見通しについて、MEMS－半導体横方向配線－1（東北大学）と MEMS－半導体横方向配線－2（産総研）の場合は、出口イメージが明確であり、メーカーとの共同研究開発体制が進められ、実用化への課題と対応が明確になっている。一方、MEMS－半導体プロセス統合モノリシック製造技術（立命館大学）の場合は出口イメージが明確でなく、実用化への課題と対応がはっきりしない。波及効果としては、MEMS－半導体横方向配線－2（産総研）の場合は医療用カテーテル、医療用マイクロカプセル、太陽電池パネル、FDP など幅広い分野へ

の適用が期待できる。

- チップ間配線技術は将来の超小型実装を実現する上で重要であり、今回その要素技術について成果が得られたことは評価できる。
- 新たな基盤技術の開発をしている。このような基盤技術がこれからの MEMS / 半導体の一体化形成技術を進展させるものと思う。
- 目標達成度、新たな MEMS センシング原理の探索については、特性解析法の検証、可能性が見いだされたが、実用化に向けた実験的検証は初期段階である。横方向配線技術はセルフアSEMBリによるウエハレベル実装における加工精度と規模では基本計画以上の数値を達成している。インクジェットによる配線技術では従来の限界を超える微細化とアスペクトを実現して基本目標を達成している。成果の意義としては、センシング原理の探索は特徴的な研究であり、実用に至ればその意義は大きい。その場合、大きな市場創成の可能性はある。一部は世界最高水準であり、一部はキャッチアップレベルである。技術領域開発は多岐にわたっており、汎用性が高く、研究費投入効果、優位性、知財権獲得、情報発信はよく行われている。装置開発を必要とする加工技術については、企業と協力した開発が計画されている。
- (1)MEMS / 半導体プロセス統合モノリシック製造技術開発では、シリコンナノワイヤーの電気機械係数がバルクに比べて 10 倍大きくなること、LSI の配線材にもなり得るタングステンシリサイドの機械定数の測定などを実施し、概ね当初の目標を達成している。(2)MEMS / 半導体横方向配線技術-1 では、液体の性質を利用して自動的に位置合わせができるチップの積層技術を開発した点は高く評価できる。自主的に設定した目標の内、一部は未達のものがあるが、概ね達成していると言える。(3)MEMS / 半導体横方向配線技術-2 では、インクジェット技術による配線形成にレーザを援用する技術、それにより段差のある基板表面に配線する技術、また円錐バンプの製造技術、ブリッジメッキによる配線形成技術などを開発し、当初設定した目標を達成している。
- 機能性材料を用いた新しいセンシング原理、半導体配線技術ともにオリジナリティのある研究を展開しており、目標を十分クリアしている。一部研究グループ内の連携も実施されており、技術開発の効率化が見られた。
- 自主目標を完全に達成していない項目もあるが、基本計画の目標を達成しており、評価できる。今後の実用化が大きく期待される成果であり、高く評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- 自主目標を一部達成できていない点があるが、この一体化形成技術開発にどの程度重要なものであるかが不明。このプロジェクト期間にどこまで進展し

たのか、また世界的な水準から目標がどのように位置づけているのかもわかると良い。

- 「新たな MEMS 測定原理の探索」が研究項目に含まれているが、この観点での研究がどのように進められたかが不明である。
- 個々の研究は申し分ないが、MEMS/半導体の一体形成技術のキーテクノロジーをさらに明確化する必要があり、世界の研究・開発動向との比較の観点がやや不足している。
- 産総研のテーマに関しては、実用化における既存の技術に対する優位性が明確でない。
- このような実装の基本技術は信頼性が重要であり、目標に信頼性項目（例えば温度サイクル試験）が含まれていないのは十分ではないように思う。
- 目標達成度は、非専門家には基本目標の意味が不明であるので、わかりやすい応用や例で説明することが望ましい。成果の意義については、横方向配線技術、実装技術は本プロジェクトでの独自性のある意義は大きくない。総花的であり、MEMS 集積加工技術としての独創技術への絞り込みが弱いことは改善すべきである。成果の普及については全体的には格別の方策は採られていない。実用化課題の明確化、事業化シナリオ、コストダウンなど経済効果の見通しについては今後の課題である。

#### <今後に対する提言>

- ・MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術（立命館大学）については、Si ナノワイヤーをピエゾ抵抗素子として用いた MEMS 機械量センサのデバイスとしての特徴を生かしたアプリケーションを探索し、企業との共同研究開発により実用化を進めて欲しい。MEMS-半導体横方向配線-1（東北大学）については、企業との共同研究開発体制を進めて、明確になっている課題を解決して実用化を図って欲しい。MEMS-半導体横方向配線-2（産総研）については、民間企業との共同研究開発体制を進めて本技術を製品化し、医療用カテーテル、医療用マイクロカプセル、太陽電池パネル、FDP など幅広い分野への適用を図って欲しい。
- ・MEMS/半導体の一体形成技術の系統的整理と世界的技術動向調査による研究・開発の方向性の明確化が求められる。
- ・企業との連携による優位性を主張できる具体的アプリケーションの明確化を期待します。
- ・全体の整合性から「MEMS/半導体の一体形成技術」としているが、内容としては実装技術とナノスケール・ピエゾ抵抗効果であり、タイトルとの整合が取れていないように思う。よりわかりやすいタイトル設定が望ましい。
- ・予算的な配分も明らかにされると評価がし易い。
- ・シリコンナノワイヤーの電気機械係数が、計算ではバルクの 10 倍に達するの

に対し、実験では2倍余りに留まるという知見は今後の応用、実用化可能性を見極める上で重要であると思われる。科学的理解に向けて引き続き研究を進めていただきたい。

- ・基本的加工技術として普及を目指して、有用な技術については企業と協力した装置開発は積極的に実施してほしい。

<その他の意見>

## 2. 2. 2 MEMS／半導体の一体形成技術の開発（助成事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

目標を達成している。成果では特に、世界最高の高アスペクト比貫通孔配線形成技術や世界に先駆けた3次元貫通配線技術を実現した点や他社製品を圧倒する圧力センサを開発した点は評価できる。

一方、開発された成果において実用化を想定しているデバイスが全て明確になっているとは言い難い。特に、MEMS－半導体横方向配線技術については、本技術でないと達成できないアプリケーションを明確にし、実用化を進めて頂きたい。また、デバイスとして実用化する際には、使用目的に応じた信頼性の評価（例えば温度サイクル試験）を実施することが望まれる。

事業化の見通しについて、実用化に向けた課題や課題解決の方針は明確になっている。

今後は、応用を想定して利点・欠点の整理を行い、次世代一体形成技術としての汎用性を明確化することが望まれる。また、長期信頼性の確保など実用化に向けた課題を解決した上で、ばらつき、量産性なども評価し、実用化を推進して頂きたい。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、世界最高の高アスペクト比貫通孔配線形成技術（オムロン）や世界に先駆けた3次元貫通配線技術（フジクラ）を実現したのは評価できる。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、実用化に向けた課題や課題解決の方針は明確になっている。事業化までのシナリオは、会社間で差異があるが、ほぼ企業内での研究開発を進めることで明確になっている。波及効果については、MEMS－半導体モノリシック統合技術（日立）の場合は、ファンダリーで実現可能な技術を目指しているので完成度が高まれば、他社への波及効果が期待できる。MEMS－半導体縦方向配線技術（オムロン）の場合は超小型パッケージレス構造としてMEMS全体に波及効果が期待できる。MEMS－半導体縦方向配線技術（フジクラ）とMEMS－半導体横方向配線技術（東芝）の場合は本当にこの技術が必要なのかどうかの見極めが必要で、現時点で波及効果は評価しがたい。
- 4社のそれぞれの成果は特徴ある良いものである。これらの個々の技術水準は高いといえる。
- 基板貫通配線技術、擬似SOC技術は将来の実装の超小型化のために重要な技術であり、その要素技術検討において多くの成果が得られたことは評価できる。

また CMOS コンパチ配線 MEMS 用プロセスを開発できたことも MEMS 戦略において有効であると思う。

- ②-(1) MEMS モノリシック集積技術（日立）では集積回路の配線技術を積層して MEMS を形成する技術を研究して、MEMS 構造の寸法、加工精度の目標を達成している。実際に圧力センサを設計、試作して特性評価まで行っていることは評価できる。②-(2) 縦方向配線技術（オムロン）では微細高アスペクトのビアを実現しており、縦型集積のためのキー技術として MEMS 集積に独自性を出せるものである。センシングモジュールの試作に適用しており、積極的な研究を実施した。②-(2) 縦方向配線技術（フジクラ）ではユニークなビア加工技術に挑戦して、加工技術の基本計画目標を達成している。加工寸法は大きく改善の余地が多いが、新たな可能性を示したことは評価できる。②-(3) MEMS 疑似 SOC 製造技術（東芝）では、MEMS を含むマルチチップの平面実装する技術で 1 $\mu$ m のチップ間配線を実現して基本計画目標を達成している。
- (1) MEMS/半導体プロセス統合モノリシック製造技術開発では、LSI の配線中に MEMS 機能を組み込む技術開発を行い、基盤となる配線中への空洞形成技術、MEMS に適した配線材料、静電的な外乱信号の除去技術など多くの新技術を開発し、小型、低消費電力、分解能、適用範囲の大きさなどの項目で他社製品を圧倒する圧力センサを開発した点は高く評価できる。同一の半導体ウェハの中で仕様の異なるセンサを製造可能である点、また一般的なファブでの製造が可能であることを確認している点は生産技術の観点でも高い価値をもつと見込まれる。開発した技術は他の種類のセンサの機能高度化にも応用可能であると見込まれ、その技術的価値は高い。(2) MEMS/半導体縦方向配線技術開発の一つでは、穴径が 5 ミクロン、アスペクト比が 50 の貫通電極をシリコンウェハ中に開けて銅配線で埋め込む技術を開発しており、これば世界的にみて従来技術をはるかに凌駕するものであると高く評価できる。その応用製品として、RF スイッチや種々のスマートセンシングモジュールの開発に既に取り組んでいることも高く評価できる。(2) MEMS/半導体縦方向配線技術開発のもう一つの実施者は、シリコンウェハ中に縦横自在の穴開け加工ができる独創的な技術を開発した。穴径も 60 ミクロンまで縮小することが可能で、目標を上回った数値を達成している。(3) MEMS-半導体横方向配線技術では、横方向に並べて配置した LSI や MEMS チップをあたかも半導体ウェハのようにして配線プロセスを適用できる独創性の高い新技術を開発して点が高く評価できる。
- MEMS 技術を応用したセンサを含む新しい配線構造、微小縦方向配線を利用したウエハレベルパッケージング、自由度のある 3 次元配線を実現できる 3



次元配線、既存デバイスの再構築が可能な実用的な実装技術とそれぞれ特徴ある技術であり、設定目標を十分達成している。

○実用化が明確で、完成度の高い成果であり、高く評価します。

<問題点・改善すべき点>

- 開発された成果が具体的なデバイスにすべて繋がっているとは言い難い。実用化するデバイスシステムを明確化し、応用分野をより明確化していただきたい。
- それぞれユニークな技術であり海外研究機関との差別化が図られているが、汎用性の点でやや問題が残る。また、製造単価・スループット等実用化上欠かせない点の評価が十分とは言えない。
- このような実装の基本技術は信頼性が重要であり、目標に信頼性項目（例えば温度サイクル試験）が含まれていないのは十分ではないように思う。
- ②-(1) MEMS モノリシック集積技術（日立）は、欧米で研究されている技術と基本的には同じ発想であり、独自性が高いとはいえない。②-(2) 縦方向配線技術（オムロン）の微細高アスペクトのビア加工技術は独自性のあるものである。実用技術として、ばらつき、量産性などを評価し、経済性を明確にする必要がある。②-(2) 縦方向配線技術（フジクラ）の研究で独自のフレキシブルな貫通配線の可能性は示されたが、レーザ描画による加工であるので、生産性を向上させるという大きな課題が残されている。また、配線の特性とそれを活用する配線設計方法、信頼性など継続検討が必要である。②-(3) MEMS 疑似 SOC 製造技術（東芝）は、MEMS 技術としての独自性が低い。平面構造では、機械的、電氣的に性能を実現しにくいと思われる。縦方向の集積による三次元構造を本命として研究すべきであったと思う。

<今後に対する提言>

- ・MEMS—半導体モノリシック統合技術（日立）については、実用化に向けた課題を解決した上で、気圧計測や自動車、ロボット等への実用化を推進して欲しい。MEMS—半導体縦方向配線技術（オムロン）については、実用化に向けた課題として貫通配線の断線モードを解決した上で、小型・低コストが期待できる RF スイッチやマイクロフォン、種々のスマートセンシングモジュール等への実用化を推進して欲しい。MEMS—半導体縦方向配線技術（フジクラ）については、実用化に向けた課題として孔径の微細化、狭ピッチ化、充填材料を解決した上でユーザからの要求の強いアプリケーションについて実用化を推進して欲しい。MEMS—半導体横方向配線技術（東芝）については、本技術でないと達成できないアプリケーションを明確にした上で、樹脂充填・金属

配線・MEMS 封止等における長期信頼性の確保という実用化に向けた課題を解決して欲しい。

- ・事業化の範囲が限定的、あるいは明確ではないテーマもあるので、今後の応用分野の拡大と具体化に期待します。他社との連携にも期待いたします。
- ・全体の整合性から「MEMS／半導体の一体形成技術」としているが、内容としては実装・配線技術が主であり、タイトルとの整合が取れていないように思う。よりわかりやすいタイトル設定が望ましい。
- ・インパクトのある商品化、事業化を強く望む。
- ・提案されている一体化技術はそれぞれ特徴があるので、実用化に関しては応用を想定して利点・欠点の整理を行い、次世代一体形成技術としての波及効果を明確化することが望まれる。

#### <その他の意見>

- ・日本の産業の強化に結びつけてほしい。プレゼンのさらなる努力が必要なところもあった。
- ・(2) MEMS/半導体縦方向配線技術開発の中で行われた、シリコンウェーハ中に縦横自在の穴開け加工する技術は、他の方法では成しがたい特長をもつが、一方でインターポーザ応用としては、微細配線が可能であるというシリコンインターポーザの特長を活かせない可能性がある。そのため、別の応用に向けての検討も望まれる。(3) MEMS-半導体横方向配線技術で開発した擬似 SOC ウェーハ技術は高度な技術である一方、通常のインターポーザ技術に比べてコスト高は必須であると思われるため、競争力の発揮できる適切な応用先を見極めることが重要のように思われる。
- ・それぞれ特徴ある内容を一括で評価するのは難しい。評点には個別の評価を加えることが望ましい。

## 2. 3. 1 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

開発されたレーザ・ダイシング技術はシリコン/ガラス接合ウェハのダイシングに有効であり、ステルスダイシング（SD 技術）とは違う新しい知見が得られた点は評価でき、当初の目標を達成している。

実用化の見通しについては、既存装置が適用できないアプリケーションに特化して差異化を図る必要がある。

今後は、MEMS では多種多様な層構造の切断が要求される可能性があるので、本技術の適用範囲、適用範囲拡大のための課題などを提示できるよう、引き続き研究を進めて頂きたい。

（注記）ステルスダイシング

ステルスダイシングは浜松ホトニクスが開発した新しいレーザダイシング技術。

<肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。
- 多層ウェハレベルダイシング技術は本プロジェクトとして必至なものと思われる。基本目標は達成されている。成果は世界的に独自性、有用性が最高であるかどうか正確にはわからないが、汎用性の高い技術であるので、個々の製品への適用性を評価する必要があるが、実用性から市場創成にもつながることが望めると思う。加工装置を大学に設置してユーザに提供し、評価してもらうのはよい方法である。
- 異なる波長のレーザを組み合わせた新たなダイシング手法を開発。
- 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術開発では、短パルスレーザによる部材内部の改質手法を応用して、シリコンとガラスの多層構造体のダイシング技術を開発し、当初の目標を達成している。
- 多層構造の低ストレスダイシング技術を系統的に検討し、目標を達成できる技術開発が実現されている。
- 実用的な技術であり、高く評価できます。加工装置を開放してユーザの評価を得る取り組みを継続している点も評価できます。
- 今回開発されたレーザダイシング技術はシリコン/ガラス接合ウェハのダイシングに有効であり、ステルスダイシングとは違う新しい知見が得られた点は高く評価できる。

<問題点・改善すべき点>

- 浜松ホトニクス社から類似のステルスダイシング装置が販売されており、細かい相違点はあるにせよ、NEDO の開発テーマとして妥当だったか若干の疑いがある。実用化の場合は、既存装置が適用できないアプリケーションに特化して差別化を図る必要がある。その出口イメージがはっきりしないと波及効果も見えてこない。
- 基本目標は達成されているが、学問的、理論的な検討が少なく、機械的な加工技術の条件だしという感じがするので、理論的裏付けをとるべきである。加工技術としての評価方法は製造するものの材料、構造、機能に依存すると思われるので、一般的に適用可否を判断するのは難しいように思われる。適用条件の明確化が必要である。
- 実デバイスの製造に応用するためのコスト・スループット等に関する利点・欠点を明確化し、定量的評価をすべきと思われる。
- シリコン／ガラス以外の接合ウェハについても幅広く検討して、より汎用性のあるダイシング技術に育てていく必要があると思う。
- すでに市場に出ている技術との差別化を明確にし、なぜこの技術開発がこのプロジェクトで必要であったのかを明確化されると良い。

#### <今後に対する提言>

- ・お試し加工のための装置を活用して得られるユーザの評価をもとに、既存装置が適用できないアプリケーションに特化した装置コンセプトを明確にした上で、実用化を進めて欲しい。
- ・差別化できる具体的特徴を比較しながらアピールされることを望む。
- ・提案技術の環境負荷の観点を実用化のためのポイントとして加えるべきと考える。
- ・広く、技術評価を行い、適用性を高めてほしい。そのための積極的な産学協同開発を進めてほしい。
- ・MEMS では多種多様な層構造の切断が要求される可能性がある一方で、本技術の適用範囲、適用範囲拡大のための課題などを提示できるよう、引き続き研究を進めていただきたい。

#### <その他の意見>

## 2. 3. 2 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発（助成事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

目標を達成している。成果では特に、世界最高レベルの機能化 MEMS ウエハ形成技術・接合技術、世界初のビルドアップ型ウエハレベルパッケージング、世界最速のレーザ連続波長掃引速度を実現した点や SPR センサを試作してバイオセンシングを実証している点は評価できる。

一方、特定のデバイス開発に集中しているため、今回成果として得られた MEMS 製造技術を多様なデバイスへ展開可能であるか明確でない。MEMS 製造技術の多様なデバイスへの展開は低コスト化に不可欠であり、特定のデバイスに限定されることなく、他のデバイス応用においても優位性を確保できる MEMS 製造技術の汎用化への対応が望まれる。

事業化の見通しについて、実用化に向けた課題や課題解決の方針は明確になっている。事業化までのシナリオは、会社間で差異があるが、ほぼ企業内での研究開発を進めることで明確になっている。

今後は、技術の普及、事業化の計画は自社のみでなく、多くの企業と共同して、ニーズやシーズを組み合わせた新しい製品開発、市場開拓が望まれる。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、世界最高レベルの機能化 MEMS ウエハ形成技術・接合技術、世界初のビルドアップ型ウエハレベルパッケージング（パナソニック電工）、世界最速のレーザ連続波長掃引速度（横河電機）を実現したのは評価できる。オリンパスの場合は、個々の技術自体には新しさはなく、従来技術の組み合わせという要素が強い。知的財産権の取得や論文の発表は適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、実用化に向けた課題や課題解決の方針は明確になっている。事業化までのシナリオは、会社間で差異があるが、ほぼ企業内での研究開発を進めることで明確になっている。波及効果について、オリンパスの場合は適用できる基板種・基板厚範囲の拡大や製造技術としての低コスト化が実現すればある程度の波及効果が開ける。パナソニック電工の場合は、照明デバイス、センサネットワーク、光デバイスなどに広く波及効果が期待できる。横河電機の場合はデバイスの特長を生かせる応用の検討が進めばある程度の波及効果は期待できる。
- 基板をビルトアップすることで SPR センサや可変波長レーザなど実際のデバイスをコンパクトに実現できたことは将来の MEMS 開発の布石として意義があることだと思う。
- これからのセンサ/MEMS/LSI の積層チップを開発していく新技術を 3 社

のそれぞれの開発目標デバイスに対してユニークな技術開発ができていて高く評価できる。

- (1) 異種材料多層 MEMS 集積化技術開発においては、異種材料をウェハレベルで多層に接合する技術を開発するとともに、実装精度 1 ミクロンでチップを実装する技術、1 ミクロンの分解能で応力を評価する顕微ラマン技術など、異種材料の積層が要望される今後の MEMS 開発に先駆ける技術を開発した点は高く評価できる。また、開発した技術を応用して、別途委託研究で開発を進めた表面プラズモン検出を原理とするバイオセンサーモジュールを試作した点は、本技術の先進性を示すものとして高く評価できる。(2) ビルドアップ型多層 MEMS 集積化技術開発では、異種材料ウェハの接合、接合ウェハの研磨・加工、ウェハへのチップ実装を要素とするビルドアップ手法による多層 MEMS 技術を開発した。貫通電極を放熱経路として用いたシリコンインターポーザの放熱性能は世界最高水準を達成しており、また加工したウェハの接合精度も 1 ミクロンと世界最高水準を達成している。また、開発した技術の実用化に向けた見極めも適切に進められており、LED 照明へ向けた技術開発に取り組んでいる点は実用化・事業化に関する観点からも高く評価できる。(2) ビルドアップ型多層 MEMS 集積化技術開発におけるもう一つの開発課題で実施した面発光レーザを用いた MEMS 共振器波長可変レーザの開発では、多層の可動ミラーの開発と高精度積層実装技術を開発し、可変範囲 55nm にわたって出力がほぼフラットな波長可変性を実現した点は高く評価できる。本開発の成果をもとに具体的な応用を目指して NEDO の他事業に採択されたことも高く評価できる。
- バイオセンシングのための実装、光学機能を集積化した MEMS ビルドアップ実装、光化合物半導体-MEMS の多層集積化を目的としてそれぞれ技術目標を達成しており、製品化に向けての実用的な高集積結合技術開発を実現している。
- 複雑な構造を作りながら目標を達成していることを評価します。具体的な製品イメージが明確であることも高く評価できます。
- ③ 異種材料多層 MEMS(オリンパス)では、基本計画の目標を十分に達成している。東大の技術も導入して開発技術を集積化し SPR センサを試作してバイオセンシングを実証していることは高く評価できる。また、従来と同等の性能を小型で大幅な経済化可能性を提案している。世界最高の水準といえる。大学と協同研究の関係を構築し、実績をあげたことも評価できる。③-(2) ウェハレベルパッケージ技術(パナソニック電工)では、保有するウェハレベルの積層実装技術をベースにして MEMS 実装に拡張するアプローチで、基本計画の目標を達成している。光学ミラーや LED を実装する材料および加工技術

を LED 照明用パッケージとして試作し、特徴を実証していることは評価できる。汎用性は非常に高い。③-(2) 異種材料高精度接合技術(横河)では、基本計画の加工精度目標を達成しており、さらにそれをレーザとミラーとの組み合わせ実装に適用して、連続波長を高速可変できる特徴あるデバイスは世界最高レベルであり評価できる。知財権は波長可変レーザについて取得できており、事業化の際に有効と思われる。

#### <問題点・改善すべき点>

- ③ 異種材料多層 MEMS(オリンパス)に関しては、異種材料の多層化技術は機械的精度を追求した機構的な小型化の着実なアプローチであるが、より小型化を図るには材料と性質や各デバイスのより高度は集積技術に挑戦すべきであると思う。実用化、事業化の計画は戦略機密事項であると思われるが、学問、技術への貢献も考えて、独自性の高い高機能な MEMS デバイスを具体性に提案させるよう発展させるべきである。③-(2) ウエファレベルパッケージ技術(パナソニック)では、そのために社内用の照明への適用はメインストリームとしてビジネス化するのみでなくのみでなく、開発技術の汎用性が非常に高いので、情報通信、制御などに積極的な展開を図ってほしい。そのため、他社との提携、協同開発など進めるため、パナソニックグループとしての戦略をたてるべきである。③-(2) 異種材料高精度接合技術(横河)では、計測技術に適用できる。非常に高性能な計測装置、高度なセンサに適用性は高いものである。技術の普及、事業化の計画は自社のみでなく、多くの企業と共同した製品開発を進めるべきである。
- これらの成果を実用的事業が明確になることを期待する。一部世界初となっている積層が、他に開発をしているものとの違いを明確にしていきたい。
- 実用化を想定したデバイスでの集積化技術に関しての達成度は高いが、今後さらに異種機能を持った基板の組み合わせの自由度が要求されることが予想され、技術の汎用化への対応が必要である。
- 一方で、具体的なデバイスの開発に集中しているため、今回得られた成果である製造ノウハウの展開可能性が明確ではありません。1 デバイスに限定されることなく、他の応用においても優位性を確保できる戦略性が必要と思われます。
- 今回の作製プロセスは全体にそのデバイス専用近く、低価格の商品化に不可欠な広範な製品展開のシナリオにはなっていないように思われる。より汎用性を実現する技術に育てていく必要があると思う。

<今後に対する提言>

- ・オリンパスについては、適用できる基板種・基板厚範囲の拡大や製造技術としての低コスト化を進め、実用化に向けた要素技術のブラシアップを行なった上で、バイオセンサの実用化を進めて欲しい。パナソニック電工については、社内用 LED 照明への応用を目指し、LED パッケージの実用化を進めて欲しい。横河電機については、開発技術を多成分レーザ分光計用光源に適用して実用化を図るとともに、光ファイバセンサ、OCT、光通信等に幅広く展開して欲しい。
- ・成果を実用化する製品となることを期待。
- ・多様な実装への対応が必要となると思われ、得意技を持つ実施者間の技術交流が求められる。
- ・技術の普及、事業化の計画は自社のみでなく、多くの企業と共同して、ニーズやシーズを組み合わせた新しい製品開発、市場開拓を行ってほしい。

<その他の意見>

- ・異種材料の接合技術開発においては、接合のメカニズムを併せて明らかにし、科学的知見に基づいた競争力につなげていただきたい。最近、アジアからの学術論文で、異種材料の接合をきちんとした科学的知見の探究とそれに基づいた材料開発に関する論文が増えてきているように感じる。これらの動きに対して競争力を失わないようにしていただきたい。波長可変面発光レーザについては、共振器ミラーを駆動するための駆動電圧を、通常の CMOS プロセスによるデバイスで発生可能な電圧範囲まで下げることが実用化に向けて極めて重要なように思われる。共振器構造や駆動方式に関するさらなる検討を進めていただきたい。
- ・それぞれ特徴ある内容を一括で評価するのは難しい。評点には個別の評価を加えることが望ましい。ただし、本開発項目についてはすべての受託者の達成レベルが高かった。



## 2. 4 高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

目標を達成しており、HP 上での一般公開や、成果発表会により成果の普及は適切に行なわれている。また、データベースはユーザに利用されることで意味があるが、利用しやすいようにする工夫が成されているため、アクセス数も多く今後の波及効果が期待される。

一方、情報ソースがやや限定的で、分野・項目間の情報量のバランス等も考慮することが望まれる。

今後は、さらに MEMS の研究者・技術者が利用できるよう、データベースの蓄積と拡大を進めて頂きたい。また、構築したデータベースを元に、世界的な情報発信基地としての地位構築に向けた取組の検討が望まれる。そのためには、海外の情報ソースを取り込む方法を探索することが必要であり、今後海外からのアクセスや情報インプットに対応することが重要と考えられる。

なお、Wikipedia のように最初に辞書的解説があり、そこから個別アイテムへリンクが張られていると検索が容易になるので検討頂きたい。また、現在マイクロマシンセンターでは MEMS 関連の技術用語の国際標準化も行っているためデータベースはそれともリンクする形で進めて頂きたい。さらに、初めて情報を得ようとするメーカーの管理職、技術職の人が、MEMS の市場動向や利点などの情報の概要を簡単に取得できる入門的なページを新設も望まれる。

### （注記）Wikipedia

ウィキペディア（Wikipedia）はウィキメディア財団が運営するオンライン百科事典。コピーレフトなライセンスの下、誰でもが無料で自由に編集に参加できる。世界各国の言語で展開されている。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、研究者・技術者がインターネットを介して自由に DB にアクセスでき公開性が確保されている。知的財産権の取得は無く、HP 上での一般公開や、成果発表会により成果の普及は適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、整備した知的基盤についての利用は多く行なわれ、公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されている。知的基盤の利用によりある程度の波及効果はある。
- 目標を達成しており評価できます。
- 短期間でこれだけ大量のデータベースを構築できたことは評価に値すると思う。このようなデータベースは技術調査やベンチマークに有効であると考え

- る。
- 有益な知的財産として評価できる。新たにこの分野に参入する人に有益である。
  - 研究開発で得た知見のデータベース化するとともに知識の体系化を進めており、当初の目標は達成できていると評価できる。
  - 目標件数を達成しており MEMS 分野の実用的 DB として評価できる。アクセス数も多く今後の波及効果が期待される。
  - MEMS データベース整備は計画通り進んだと評価できる。ユーザに利用されることで意味があるが、利用しやすいようにする努力が成されている。

#### <問題点・改善すべき点>

- データベースの評価において、データ量とアクセス件数は容易であるが、真に有用であるかどうかという質の評価は容易ではない。データの維持、発展がユーザの力も含めて進むようにする必要がある。
- 期間的が短いので十分なデータベースとなったか。
- 情報ソースがやや限定的と思われ、分野・項目間の情報量のバランス等も考慮する必要性を感じる。特に海外の最新情報の取り込みが必要と思われる。
- キーワード検索すると関連資料が単に羅列される出力となっている。Wikipedia のように最初に辞書的解説があり、そこから個別アイテムへリンクが張られていると検索が容易になるので検討すべきだと考える。

#### <今後に対する提言>

- ・今後、さらに MEMS の研究者・技術者が利用できるよう、データベースの蓄積と拡大を進めて欲しい。
- ・さらに拡充していくことを望む。
- ・構築したデータベースを元に、世界的な情報発信基地としての地位構築に向けた取組を検討していただきたい。MEMS の産業規模が大きくなると特にアジア地域のファウンダリーが台頭してくると思われるが、その時代の知的価値創出に向けた環境作りにもとり組むべきと思われる。
- ・事業化にあたっては海外の情報ソースを取り込む方法を探索することが必要である。また、今後海外からのアクセスや情報インプットに対応することが重要と思われる。
- ・初めて情報を得ようとするメーカーの管理職、技術職の人が、MEMS の市場動向や利点などの情報の概要を簡単に取得できる入門的なページを新設されることを期待します。

- ・MEMS の分野においても必ずしも用語の統一は図られていないように思う。  
現在マイクロマシンセンターではMEMS 関連の技術用語の国際標準化も行っている  
のでデータベースはそれともリンクする形で進めた方がよいと思う。
- ・データの維持、発展がユーザの力も含めて進むような仕掛けを実現してほしい。

<その他の意見>

## 2. 5 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

目標を達成している。本テーマはこれまで MEMS 分野で抜け落ちて部分であり、本開発に取り組んだ着眼点が大いに評価できる。また、当初計画に無かった MEMS 設計プラットフォームを極めて短期間で開発し、MEMS 機構開発者と回路設計者の共通言語として、MEMS システム全体の設計が可能となったことは評価に値する。このような等価回路解析は振動ジャイロなど複雑なメカトロニクスでは非常に有効であると考えられる。

一方、使用方法が多少複雑な印象を受けた。いろいろなパラメータ入力が必要であり、普及させるためにはそれらをデフォルト設定して簡単に使えるようにして頂きたい。

今後は、さらに MEMS の研究者・技術者が利用できるよう、設計プラットフォームの普及、改良を進めて頂きたい。ただし、汎用性を目指した設計プラットフォーム開発は重要であるがすべてを満足するシステムは難しい。今後、実用性（使い勝手）・精度等の評価システムの構築が必要である。また、既存の LSI 設計ツールとの互換性を考慮した開発を望む。

なお、まだ線形解析だけのようであり、今後は非線形解析や過渡解析にも拡張すればプルーイン現象など MEMS 固有の幅広い現象解析に対応でき、等価回路解析の国内標準になる可能性もある。また、実際に使うと問題がでることを考えて、システムのサポート体制の実質化を図って頂きたい。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、MEMS 機構開発者と回路設計者の共通言語として、MEMS システム全体の設計が可能となった。知的財産権の取得があり、また、成果の普及は学会発表や展示会により適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、整備した知的基盤についての利用はある程度行なわれ、公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されている。学会の研究会での反響も大きい。知的基盤の利用によりある程度の波及効果はある。
- 短期間で目標を達成し、利便性の高い開発成果をあげたことを高く評価します。
- MEMS 機構開発者と回路設計者の共通の設計ツールとして重要。
- 電気回路でのモデル化を主とする目標を達成できていると評価できる。
- これまで MEMS 分野で抜け落ちて部分であり、本開発に取り組んだ着眼点が大いに評価できる。

- 極めて短期間でこれだけの MEMS 設計プラットフォームを開発したことは評価に値する。このような等価回路解析は振動ジャイロなど複雑なメカトロニクスでは非常に有効であると考ええる。
- 当初計画に無かった MEMS のモデル化、シミュレーション技術からなる設計プラットフォームの開発を追加したことは評価できる。短期間で実用性のある設計システムを構築し、ライブラリの整備したことにより、目標達成ができたことは評価できる。ユーザの意識を統合したシステムになっており、ユーザの実績も上がっており、有効な事業であったと考えられる。

#### <問題点・改善すべき点>

- ・これまでは使って勉強してみるというフェーズはいいが、実際に使うと、問題がでることを考えて、システムのサポート体制の実質化を図ってほしい。
- ・これまで開発されてきたツールとの有為点が明確にわかるように。
- ・汎用性を目指した設計プラットフォーム開発は重要であるがすべてを満足するシステムは難しい。今後、実用性（使い勝手）・精度等の評価システムの構築が必要である。
- ・使い方が多少複雑な感じがした。いろいろなパラメータ入力が必要であり、普及させるためにはそれらをデフォルト設定して簡単に使えるようにすべきと思った。

#### <今後に対する提言>

- ・今後、さらに MEMS の研究者・技術者が利用できるよう、設計プラットフォームの普及、改良を進めて欲しい。
- ・設計支援プラットフォームのユーザ会、情報提供、などを積極的に行えるような方向付けを行ってほしい。
- ・今後さらに充実したものにされることを望む。
- ・既存の LSI 設計ツールとの互換性を考慮した開発を期待する。
- ・今後も拡充していくことを期待します。
- ・まだ線形解析だけのようであり、今後は非線形解析や過渡解析にも拡張すればプルイン現象など MEMS 固有の幅広い現象解析に対応でき、等価回路解析の国内標準になる可能性もあると思う。

#### <その他の意見>

- ・この設計プラットフォームの出口が見え難い。回路モデル化するということは、既に世界標準と言える米国ベンダーの CAD ツールに登載することが容易である分、そのツールの価値は高まるが、国内産業の発展にも役立てるための長期

戦略をもつことが必要なように思われる。

## 2. 5 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発（委託事業）

成果に関する評価 実用化、事業化の見通しに関する評価 今後に対する提言

目標を達成している。本テーマはこれまで MEMS 分野で抜け落ちて部分であり、本開発に取り組んだ着眼点が大いに評価できる。また、当初計画に無かった MEMS 設計プラットフォームを極めて短期間で開発し、MEMS 機構開発者と回路設計者の共通言語として、MEMS システム全体の設計が可能となったことは評価に値する。このような等価回路解析は振動ジャイロなど複雑なメカトロニクスでは非常に有効であると考えられる。

一方、使用方法が多少複雑な印象を受けた。いろいろなパラメータ入力が必要であり、普及させるためにはそれらをデフォルト設定して簡単に使えるようにして頂きたい。

今後は、さらに MEMS の研究者・技術者が利用できるよう、設計プラットフォームの普及、改良を進めて頂きたい。ただし、汎用性を目指した設計プラットフォーム開発は重要であるがすべてを満足するシステムは難しい。今後、実用性（使い勝手）・精度等の評価システムの構築が必要である。また、既存の LSI 設計ツールとの互換性を考慮した開発を望む。

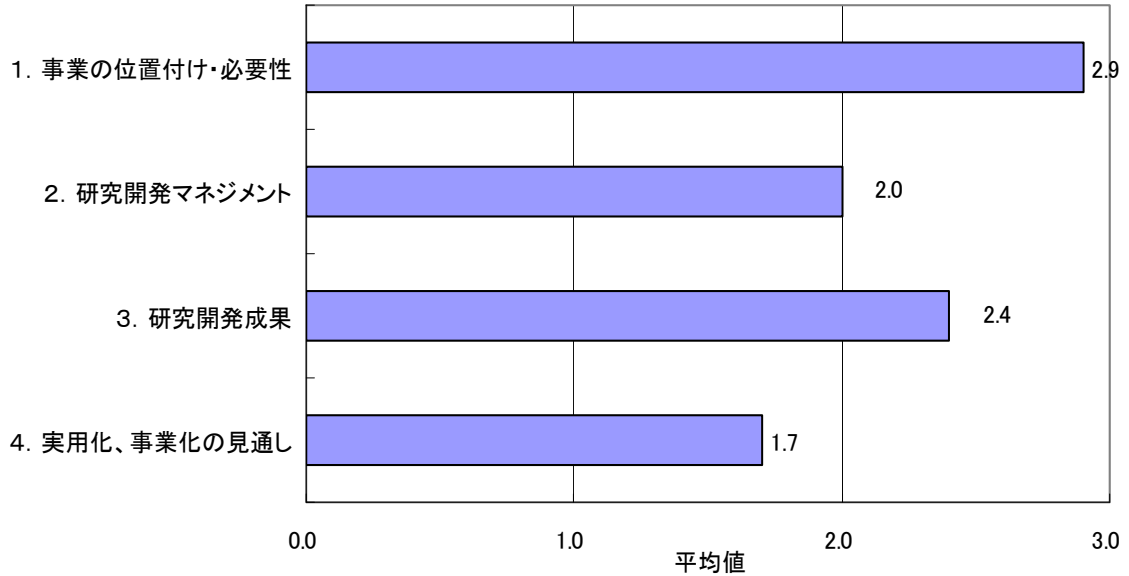
なお、まだ線形解析だけのようであり、今後は非線形解析や過渡解析にも拡張すればプルーイン現象など MEMS 固有の幅広い現象解析に対応でき、等価回路解析の国内標準になる可能性もある。また、実際に使うと問題がでることを考えて、システムのサポート体制の実質化を図って頂きたい。

### <肯定的意見>

- 研究成果は目標値を達成している。成果の意義として、MEMS 機構開発者と回路設計者の共通言語として、MEMS システム全体の設計が可能となった。知的財産権の取得があり、また、成果の普及は学会発表や展示会により適切に行なわれている。実用化事業化の見通しについて、整備した知的基盤についての利用はある程度行なわれ、公共財として知的基盤を供給、維持するための体制は整備されている。学会の研究会での反響も大きい。知的基盤の利用によりある程度の波及効果はある。
- 短期間で目標を達成し、利便性の高い開発成果をあげたことを高く評価します。
- MEMS 機構開発者と回路設計者の共通の設計ツールとして重要。
- 電気回路でのモデル化を主とする目標を達成できていると評価できる。
- これまで MEMS 分野で抜け落ちて部分であり、本開発に取り組んだ着眼点が大いに評価できる。

### 3. 評点結果

#### 3. 1 プロジェクト全体



評価項目	平均値	素点 (注)							
		B	A	A	A	A	A	A	A
1. 事業の位置付け・必要性について	2.9	B	A	A	A	A	A	A	A
2. 研究開発マネジメントについて	2.0	B	B	B	A	C	B	B	B
3. 研究開発成果について	2.4	B	A	B	A	A	B	B	B
4. 実用化、事業化の見通しについて	1.7	B	C	B	B	B	B	B	C

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

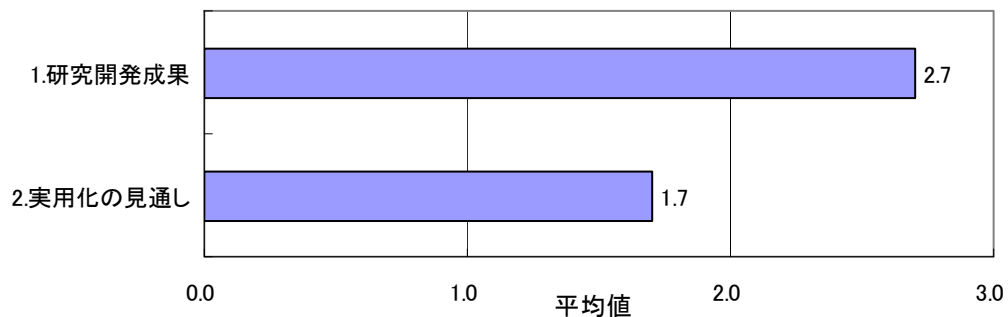
#### <判定基準>

- |                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| (1) 事業の位置付け・必要性について | (3) 研究開発成果について      |
| ・非常に重要 →A           | ・非常によい →A           |
| ・重要 →B              | ・よい →B              |
| ・概ね妥当 →C            | ・概ね妥当 →C            |
| ・妥当性がない、又は失われた→D    | ・妥当とはいえない →D        |
| (2) 研究開発マネジメントについて  | (4) 実用化、事業化の見通しについて |
| ・非常によい →A           | ・明確 →A              |
| ・よい →B              | ・妥当 →B              |
| ・概ね適切 →C            | ・概ね妥当であるが、課題あり →C   |
| ・適切とはいえない →D        | ・見通しが不明 →D          |

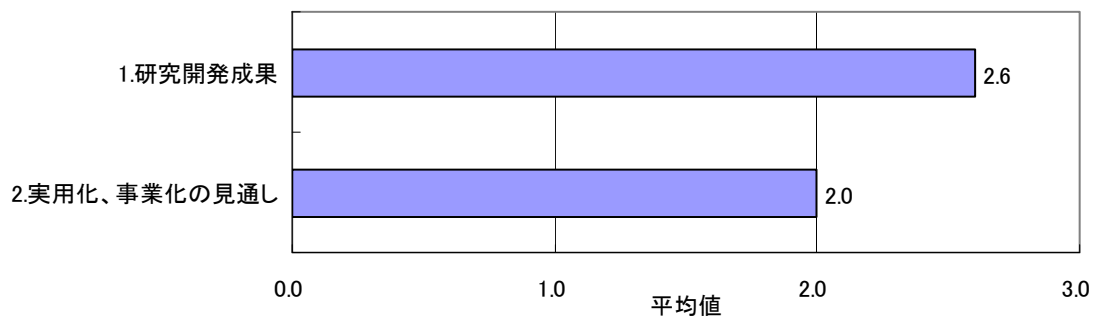


3. 2 個別テーマ

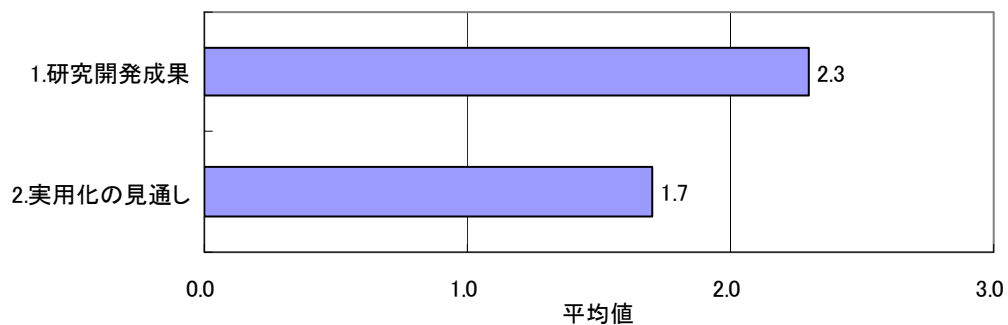
3. 2. 1. 1 MEMS／ナノ機能の複合技術の開発（委託事業）



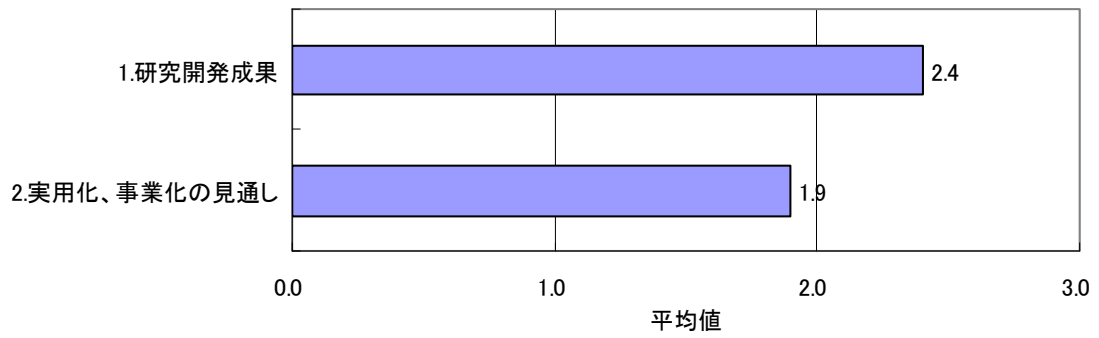
3. 2. 1. 2 MEMS／ナノ機能の複合技術の開発（助成事業）



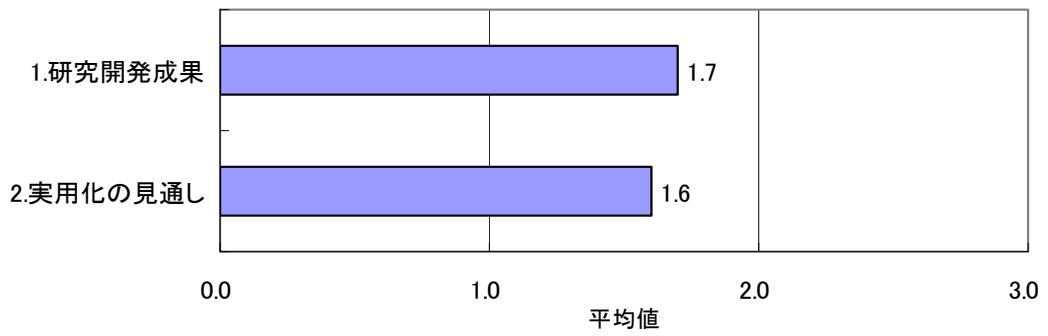
3. 2. 2. 1 MEMS／半導体の一体形成技術の開発（委託事業）



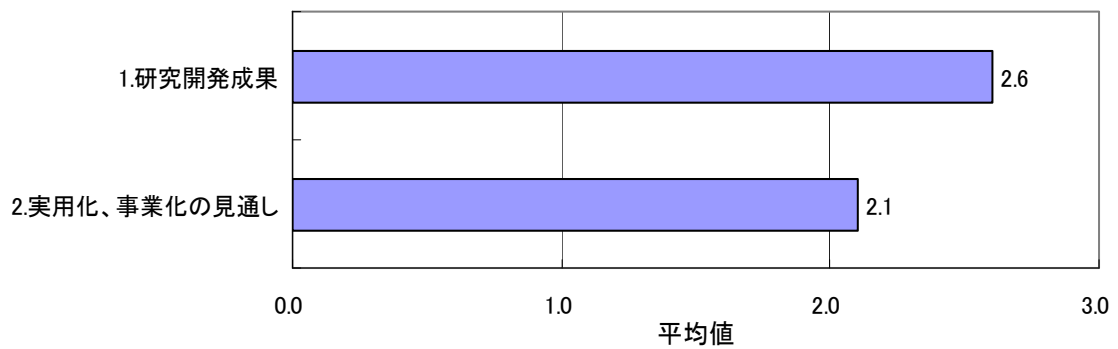
3. 2. 2. 2 MEMS／半導体の一体形成技術の開発（助成事業）



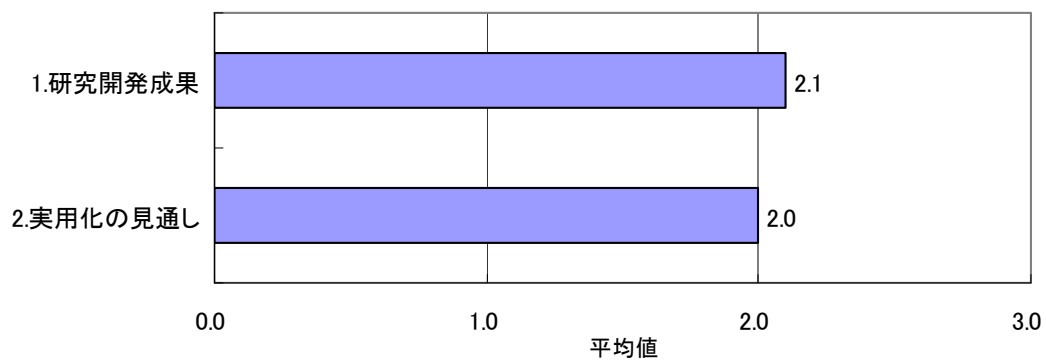
3. 2. 3. 1 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (委託事業)



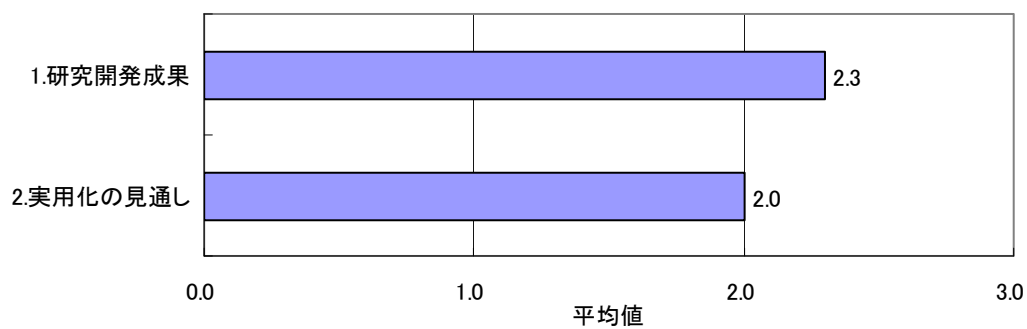
3. 2. 3. 2 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (助成事業)



3. 2. 4 高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備 (委託事業)



3. 2. 5 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発（委託事業）



個別テーマ	平均値	素点(注)							
3. 2. 1. 1 MEMS/ナノ機能の複合技術の開発 (委託事業)									
1. 研究開発成果について	2.7	B	B	A	A	A	A	A	A
2. 実用化の見通しについて	1.7	C	B	C	B	B	B	B	B
3. 2. 1. 2 MEMS/ナノ機能の複合技術の開発 (助成事業)									
1. 研究開発成果について	2.6	B	A	B	A	A	B	B	B
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.0	B	A	B	B	B	B	B	B
3. 2. 2. 1 MEMS/半導体の一体形成技術の開発 (委託事業)									
1. 研究開発成果について	2.3	B	B	B	A	A	B	B	B
2. 実用化の見通しについて	1.7	C	B	C	A	B	B	B	C
3. 2. 2. 2 MEMS/半導体の一体形成技術の開発 (助成事業)									
1. 研究開発成果について	2.4	B	A	A	A	A	B	C	C
2. 実用化、事業化の見通しについて	1.9	B	C	B	B	B	B	B	B
3. 2. 3. 1 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (委託事業)									
1. 研究開発成果について	1.7	C	C	B	B	B	A	C	C
2. 実用化の見通しについて	1.6	C	C	C	B	A	B	C	C
3. 2. 3. 2 MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発 (助成事業)									
1. 研究開発成果について	2.6	B	A	A	A	B	B	A	A
2. 実用化、事業化の見通しについて	2.1	B	B	B	A	B	B	B	B
3. 2. 4 高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備 (委託事業)									
1. 研究開発成果について	2.1	C	B	A	A	B	B	B	B
2. 実用化の見通しについて	2.0	C	B	B	B	A	B	B	B
3. 2. 5 高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発 (委託事業)									
1. 研究開発成果について	2.3	C	B	A	A	A	B	B	B
2. 実用化の見通しについて	2.0	C	B	C	B	A	B	A	A

(注) A=3, B=2, C=1, D=0 として事務局が数値に換算し、平均値を算出。

〈判定基準〉

1. 研究開発成果について

・非常によい

・よい

・概ね適切

・適切とはいえない

2. 実用化の見通しについて

・明確

・妥当

・概ね妥当であるが、課題あり

・見通しが不明

→A

→B

→C

→D

## 第2章 評価対象プロジェクト

1. 事業原簿

次ページより、当該事業の事業原簿を示す。

# 「高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクト」

## 事業原簿

公開版

作成者	新エネルギー・産業技術総合開発機構 機械システム技術開発部
-----	----------------------------------

— 目 次 —

概要	3	
I. 事業の目的・政策的位置付けについて		
1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性	21	
1.1 NEDO が関与する意義	21	
1.2 実施の効果（費用対効果）	24	
2. 事業の背景・目的・位置づけ		
2.1 事業の位置付け・必要性	26	
2.2 国のプログラムとの関連性	27	
II. 研究開発マネジメントについて		
1. 事業の目標	29	
2. 事業の計画内容	31	
2.1 研究開発の内容	31	
2.2 研究開発の実施体制	36	
2.3 研究開発の運営管理	39	
3. 情勢変化への対応	40	
4. 中間評価結果への対応	41	
5. 評価に関する事項	41	
III. 研究開発成果について		
1. 事業全体の成果	42	
2. 各テーマの成果まとめ	46	
IV. 実用化の見通しについて		55



## V. 委託テーマの成果詳細

### V-1. 研究開発項目① MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

- (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術 (東京大学) . . . . . 57
- (2) バイオ材料 (タンパク質など) の選択的修飾技術 (産業技術総合研究所) . . . 201
- (3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所) . . . . . 243

### V-2. 研究開発項目② MEMS /半導体の一体形成技術の開発

- (1) MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術  
    －新たなセンシング原理の探索－ (立命館大学) . . . . . 271
- (2) MEMS－半導体横方向配線技術
  - (2)-1. MEMS－半導体横方向配線技術の研究開発 (東北大学) . . . . . 344
  - (2)-2. MEMS /半導体の一体形成技術の開発－MEMS-半導体横方向配線技術－  
    (産業技術総合研究所) . . . 364

### V-3. 研究開発項目③ MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

- (1) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術  
    (レーザー技術総合研究所/東北大学) . . . . . 460

### V-4. 研究開発項目④ 高集積・複合MEMS 知識データベースの整備

(マイクロマシンセンター) . . . . . 504

### V-5. 研究開発項目⑤ 高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発

(マイクロマシンセンター) . . . . . 532

#### (添付資料)

- 1. 「ロボット・新機械イノベーションプログラム」基本計画 . . . . . 651
- 2. (新製造技術プログラム)「高集積・複合MEMS 製造技術開発プロジェクト」基本計画 . 657
- 3. 技術戦略マップ . . . . . 670
- 4. 事前評価関連資料 . . . . . 701
- 5. 特許論文リスト . . . . . 706

概 要

	作成日	平成 21 年 9 月 17 日	
制度・プログラム名	ロボット・新機械イノベーションプログラム		
プロジェクト名	高集積・複合MEMS製造技術 開発プロジェクト	PJコード	P06022
担当推進部・担当者	機械システム技術開発部 犬塚肇		
0. 事業の概要	<p>我が国のMEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) 産業の国際競争力を確保することを目的として、MEMSデバイスの高集積化・高密度化を実現する高度で先進的な製造技術を開発する。上記の目標を達成する為、①MEMSとナノ機能との融合、②MEMSと半導体との一体化及び、③異なるMEMSの結合といったMEMSの集積・複合化に向けた技術課題に取り組むと同時に、開発成果の産業界への普及促進に向けた環境整備の為、④成果の知識データベース化と⑤高集積・複合MEMS用設計開発ツールの開発を並行して行う。</p>		
I. 事業の位置付け・必要性について	<p>我が国には、材料産業や機能性部品産業といったものづくり産業を基盤とした「高度部材産業集積」があり、これが、我が国の製造業の国際競争力を支えてきた。新産業創造戦略にも指摘があるように、我が国がこうした高度部材産業集積を形成していることが、ものづくりに不可欠な要素技術（精密微細加工や特殊素材合成等）のネットワーク化を通じた、迅速かつ高度な摺り合わせを実現してきたといえる。また、川下（最終製品）、川中（材料・部品・装置）、川上（素材、原材料）の分厚い産業集積に育まれた摺り合わせのネットワークが、新技術の素地となり、次のイノベーションにつながってきたのである。他方、近年、韓国、中国、台湾を初めとする東アジア諸国の技術力向上を背景として、製造技術における国際競争が、ますます激化している。こうした中、経済面では、我が国の景気は、100年に一度と言われる昨年来の世界同時不況により、多くの企業で業績の急激な低下が見られたものの政府による一連の景気対策や在庫調整の一巡などの効果により緩やかに回復しつつあり、エコカー関連など一部の製造業は生産を伸ばしてきている。しかしながら、製造業の中核の一つである電子部品・デバイス産業は、その業績が半導体や液晶の景気サイクルに左右されがちであるとともに、先端技術であるが故に国際的開発競争が熾烈であり、先行きが不透明等、予断ならない状況にある。その一方で、電子部品・デバイス産業は高性能機械の重要な構成要素であることから、同産業の業績が、我が国製造業の今後の業況に大きな影響を及ぼしうると考えられる。</p> <p>近年の電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している技術が、MEMSである。MEMSとは、微細な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ部品をいい、半導体製造技術やレーザー加工技術等各種の微細加工技術を用いて製造される。情報通信、医療・バイオ、自動車など多様な分野における小型・高精度で省エネルギー性に優れた高性能のキーデバ</p>		

	<p>イスとして期待されている。このため、我が国の製造業の競争力維持・強化を目指す経済産業省の「ロボット・新機械イノベーションプログラム基本計画」においても、MEMSは、我が国製造業の「川中」の一角をなす基幹部品の国際競争力強化等の観点から、重要な分野と位置づけられている。</p> <p>現在、MEMSが既に実用化されている自動車用のセンサやインクジェットプリンタヘッドでは日本企業が健闘しているものの、光MEMSやバイオMEMSの分野では欧米企業が一部先行しており、今後成長が期待されるMEMS産業の国際競争力を確保するためには、製造技術の一層の高度化（高集積化・複合化）によりMEMSの更なる小型化・高性能化を図ることが必要である。実際、欧米の一部では、既に、従来型のMEMSにLSI演算処理回路を集積したり、MEMS間を結合する高集積・複合MEMSの開発が着手されており、研究開発促進の時期を逸すると、MEMS関係市場（2015年で国内市場2.4兆円）を海外メーカーに席卷されるおそれがある。</p> <p>このため、MEMSの「技術戦略マップ」を踏まえ、ロボット・新機械イノベーションプログラムの一環として、次世代の基幹部品を支える高集積・複合MEMSを開発すべく、重要な技術課題に対して、選択的・集中的に取り組むべく、本事業を行う。さらに、本事業の成果に基づき、高集積・複合MEMSの新たな産業化を促進するための環境整備を行う。</p>
--	--

## II. 研究開発マネジメントについて

<p>1. 事業の目標</p>	<p><b>【全体の目標】</b></p> <p>今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合MEMSデバイスを製造する技術を開発する。また、上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する。</p> <p><b>【研究開発項目別の目標】</b></p> <p><b>研究開発項目① 「MEMS／ナノ機能の複合技術の開発」</b></p> <p>(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術</p> <p>L/S：50nm以下、縦方向：80nm以上、可動部を擁する場合は150nm以下のギャップを保持するナノ機械構造体を所定の領域（位置精度：±1μm以下）に選択的に形成できる技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。さらに、構造体の形状・寸法やその動きと発現するナノ機能の関係も明確にする。</p> <p>(2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術</p> <p>2種類以上のバイオ材料（改変されたタンパク質など）を、その配向性が制御された状態で、複雑構造体の所定の領域に選択的に形成する技術を確立するとともに、そのバイオ材料が生体機能を模倣したメカニズムで疾患</p>
-----------------	--

関連などの生体物質を認識できることを示す。

(3) ナノ材料 (CNTなど) の選択的形成技術

サイズ直径:  $1\ \mu\text{m}$ 以下或いは厚み精度:  $0.1\ \mu\text{m}$ 以内のナノ材料を所定の領域 (位置精度:  $\pm 1\ \mu\text{m}$ 以下) に選択的に形成する技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。特に、CNTの選択的形狀制御においては、高アスペクト比 (1:10以上)、高密度充填 (充填率: 50%以上)の数 $\mu\text{m}$ から数百 $\mu\text{m}$ スケールのMEMS向け配向CNT構造体を製造するCNT成長技術を開発する。直線形状で架橋させた場合には、架橋率: 70%以上を目指す。また、その機械的、化学的特性を評価、改善し、具体的デバイスへの適応を目指す。

(4) ナノ機能を組み込んだMEMSデバイスの製造技術

少なくとも、プロセス温度が $400^\circ\text{C}$ 以下で、ナノ機能を所定の領域に選択的にウェハレベルで形成し、かつナノ機能形成プロセスによりMEMSが損傷を受けることなく、逆にMEMS形成プロセスによりナノ機能が劣化することがないMEMS一貫プロセスを確立するとともに、MEMS一貫プロセスにより試作されたナノ機能付加MEMSデバイスが、従来よりも優れた性能を発揮することを示す。

**研究開発項目②「MEMS/半導体の一体形成技術の開発」**

(1) MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造技術

MEMS製造プロセスとして、 $180\text{nm}$ 技術ノードCMOS・LSI材料プロセス互換を目指す。MEMS製造技術ロードマップに基づく統合プロセスによるMEMSの加工目標として、最小加工寸法:  $0.5\ \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比: 20以上、残留応力:  $0.1\text{GPa}$ 以下 (膜厚:  $0.1\sim 10\ \mu\text{m}$ )、MEMSと複数種類の異なった機能要素 (電子回路、受動素子など) の多層・モノリシック集積化を目指す。

半導体センサの微細化により発現する新たなMEMSセンシング原理の探索については、製造プロセスは問わないが、1つ以上の新たなMEMSセンシング原理を見出すことを目指す。

(2) MEMS - 半導体縦方向配線技術

将来の $65\text{nm}$ ルールまでのCMOS・LSIとMEMS (バルク型も含む) を多層に集積するために、穴径:  $5\ \mu\text{m}$ 以下、アスペクト比: 50以上の貫通孔配線を形成するとともに、CMOS・LSIとMEMSを3層以上に渡って接合し、確実な電氣的接続を実現する。

インターポーザルについては、インターポーザル内の貫通配線構造に従来のない分岐構造を導入し、インターポーザル内部での三次元インターコネクションを実現する。そのサイズとしては、インターポーザル厚: 30

0  $\mu\text{m}$ 以下で、貫通配線（穴径：100  $\mu\text{m}$ 以下）の横方向へのシフト量：500  $\mu\text{m}$ 以上を達成する製造技術を目指す。

(3) MEMS - 半導体横方向配線技術

L/S：1  $\mu\text{m}$ /1  $\mu\text{m}$ 以下の微細配線を形成し、CMOS・LSIとMEMSの間の確実な電氣的接続を実現する。さらに、横方向集積型MEMSパッケージの薄型化（厚さ：100  $\mu\text{m}$ 程度）を目指す。

この他、三次元表面上への高密度配線パターンの低温で高速な直接微細描画技術と受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。高密度配線パターンとして、垂直乗り越え段差：100  $\mu\text{m}$ 以上、パターン寸法：5～10  $\mu\text{m}$ 、成膜温度：400℃以下、成膜速度：10  $\mu\text{m}/\text{min}$ 以上および描画速度：1  $\text{cm}/\text{min}$ 以上を目指す。

**研究開発項目③「MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発」**

(1) 異種材料多層MEMS集積化技術

ウェハサイズ：直径100mm以上、3層以上、異種材料（シリコン、ガラス、樹脂など）をウェハレベルで接合し、面方向： $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め精度、垂直（z）方向： $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられることを目指す。

(2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

各ウェハ（直径100mm以上）の接合精度および加工精度は、面方向： $\pm 1 \mu\text{m}$ を目指すとともに、各ウェハ接合工程の間に加工工程（エッチング、実装、機能部材・異種材料形成、など）を設けながら、ダメージを与えることなくウェハ3層以上を順次接合できることを目指す。

化合物半導体チップの高精度位置決め接合技術については、位置決め精度： $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下、傾き精度：0.05 deg以下を目指す。

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシングについては、異種材料で構成される3層以上のウェハレベル接合体（直径100mm以上）に対して、チップング、層間剥離およびMEMS可動部破損などの破損率について、トータルで1%以下を目指す。

**研究開発項目④「高集積・複合MEMS知識データベースの整備」**

高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見（文献情報、特許情報及び特に委託事業を中心としたプロジェクトの研究成果も含めて）を系統的に蓄積してデータベース化するとともに、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトで開発が行われているMEMS用設計解析支援システムに付加する。

**研究開発項目⑤ 「高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発」**

研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積化MEMS設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。また、MEMS用設計解析支援システムの回路シミュレーション・モデルを高集積・複合MEMSに適用される等価回路モデルに拡張し、その内容をWeb閲覧システムに掲載する。

2. 事業の計画内容	主な実施事項		平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	備 考
	①MEMS /ナノ機能の複合技術の開発				→	
	②MEMS /半導体の一体形成技術の開発				→	
	③MEMS /MEMS の高集積結合技術の開発				→	
	④高集積・複合MEMS 知識データベースの整備				→	
	⑤高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発				→	平成 19 年度より開始
【開発予算】 助成事業の助成率：1/2	(単位:百万円)		平成 18 年度	平成 19 年度	平成 20 年度	
	一般会計	助成	451	518	352	
		委託	626	598	410	
	特別会計		0	0	0	
	総予算額 2,956		1,077	1,116	762	
【開発体制】	経済省担当原課	製造産業局産業機械課				
	運営機関	新エネルギー・産業技術総合開発機構				
	プロジェクトリーダー	東京大学 大学院情報理工学系研究科 研究科長 教授 下山 勲				

	<p>委託先/助成先        (* 委託先が        管理法人の場        合は参加企業        数も記載)</p>	<p>&lt;委託先&gt;        国立大学法人東京大学、独立行政法人産業技術総合研        究所、学校法人立命館大学、国立大学法人東北大学、        財団法人レーザー技術総合研究所、財団法人マイクロ        マシンセンター</p> <p>&lt;助成先&gt;        三菱電機株式会社、株式会社日立製作所、オムロン株        式会社、株式会社フジクラ、株式会社東芝、オリンパ        ス株式会社、パナソニック 電工株式会社、横河電機株        式会社</p>
<p>【情勢変化への        対応】</p>	<p>プロジェクト開始後、米国を中心として設計プラットフォームを用い        た表面集積化の動きが活発化し、MEMSに関わる製造技術、設計技術        の両面を備えたトータルな研究開発により、MEMS製品の成功事例が        増加して来た。しかしながら、高集積・複合MEMS製造技術の研究開        発項目であるMEMS/ナノ機能の複合、MEMS/半導体の一体形成        技術、MEMS/MEMSの高集積結合技術に共通する統一的な設計手        法の開発はほとんど行われていなかった。高集積。複合MEMSの開発        から実用化までの期間を大幅に短縮し、国内市場の更なる活性化と国際        的な優位性の確保する為、MEMS構造体と異種材料との複合化や集積        化に対応する高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームに        関する開発を平成19年度より開発項目に加えた。</p>	

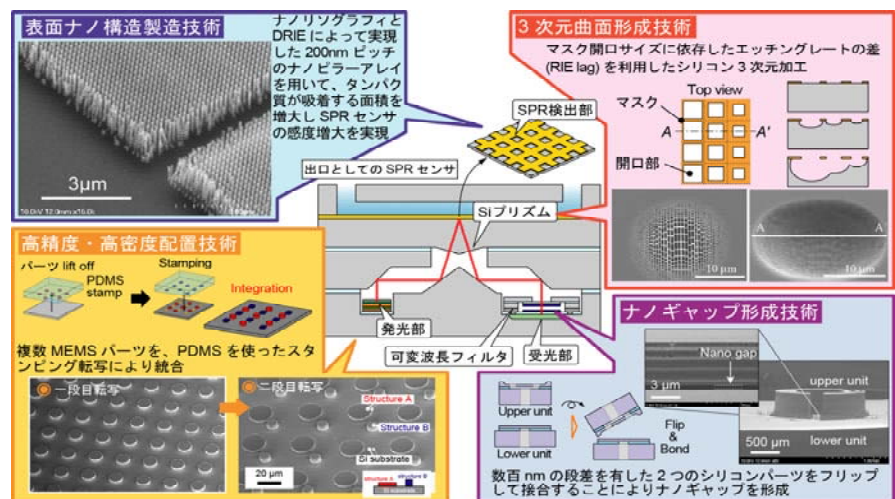


Ⅲ. 研究開発成果について

①MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

(1) 選択的ナノ機械構造体形成技術(東京大学)

SPR センサを構成する要素として、3 つのナノ構造形成技術、および、センサパーツ配置技術の開発を行った。まず、金膜ナノ格子構造を最小 50nm の線幅で構成し、SPR センサの光学系の設計自由度を高め、センサの小型化をはかる基礎技術を確立した。次に、マスク開口面積依存性のシリコンエッチングレート差を利用して、最大 51° のスムーズな斜面を形成する技術を確立した。また、スタンピング技術を用いて、シリコンのナノギャップ構造を形成し、近赤外光用 Fabry-Perot 干渉器を開発した。さらに、スタンピング技術を応用し、複数の MEMS パーツを集積対象の基板に高精度に配置する技術を開発した。



(2) バイオ材料(タンパク質など)の選択的修飾技術(産総研)

①MEMS 基板上において、癌細胞の増殖・転移、更には種々の生活習慣病と密接に関係する血管内皮細胞増殖因子 (VEGF) などの疾病関連マーカータンパク質、ヒドロキシリノール酸 (HODE) などの酸化傷害バイオマーカーなどの生体分子を特異的に認識し、光学特性の変化といった物理的シグナルを用いて検出するための分子認識素子の構築、②MEMS 基板などの担体上への分子認識素子の固定化法の開発および③微細加工プロセスと融合し、MEMS の技術を利用したバイオセンサーへの適応の可能性を示した。

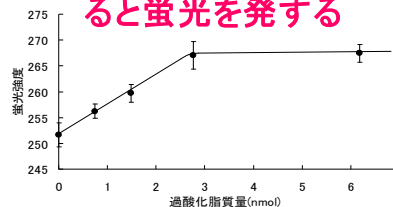
### ①分子認識素子の開発

#### 血管内皮細胞増殖因子(VEGF)と過酸化脂質の検出を実証



分子認識素子 + VEGF

生体関連物質と反応すると蛍光を発する

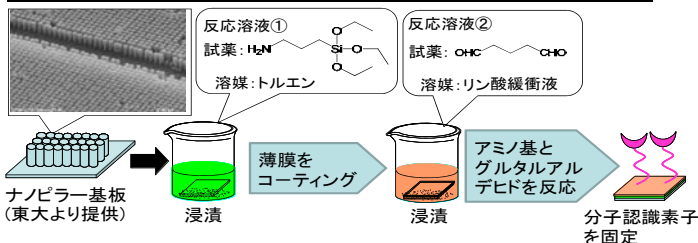


過酸化脂質検出の検量線

### ②固定化方法の開発

#### 分子認識素子を基板に固定する技術

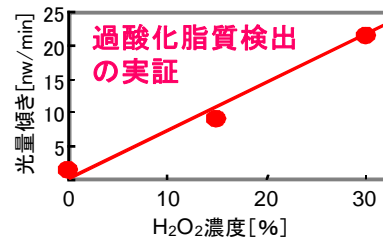
#### VEGF検出用分子認識素子のナノピラー基板上への固定化



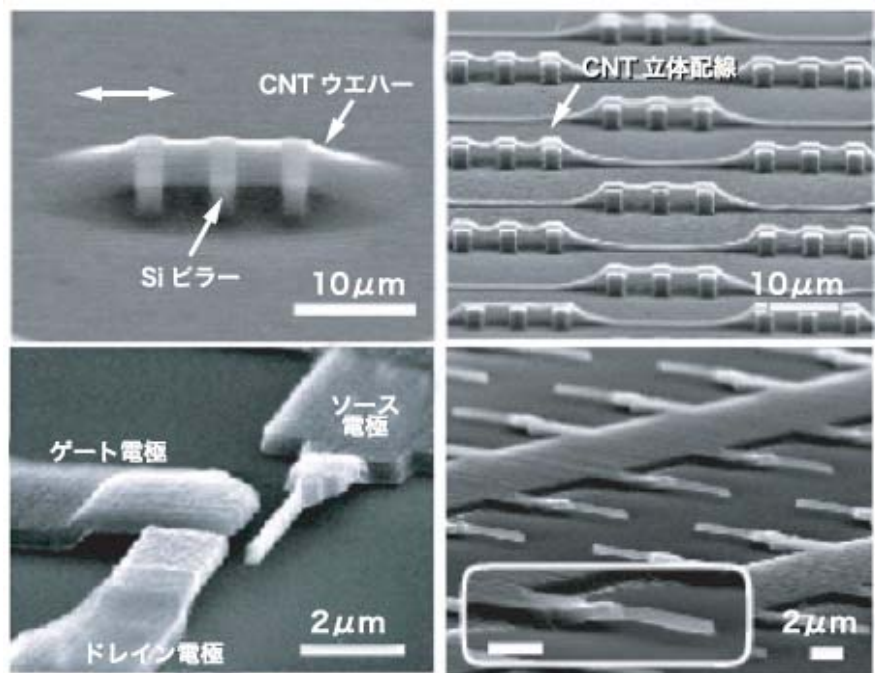
### ③バイオMEMSセンサへの適用



光学式バイオセンサ



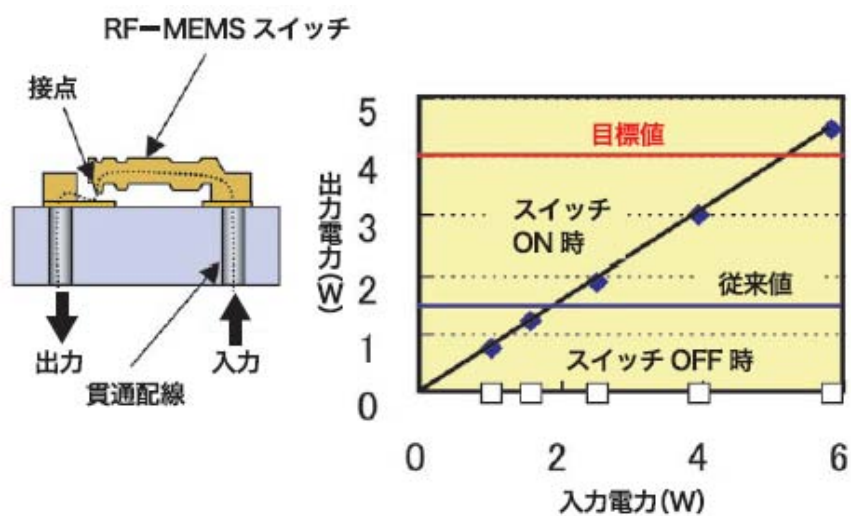
(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所) カarbonナノチューブ (CNT) の持つ優れた電気、機械的特性に注目し、MEMS デバイスへの応用展開が可能な CNT ウエハーの作製と微細加工技術を開発した。基板上に CNT が多数配向集合したバルク材料 (CNT ウエハー) を作製し、この素材から微細加工技術により、CNT のカンチレバー、立体配線、リレーを作製することに成功した。



(4) ナノ機能を組み込んだMEMS デバイスの製造技術

(三菱電機株式会社)

本開発では新たな接点材料としてカーボンナノチューブ(CNT)に着目し、CNT が均一に分散された金メッキ膜を形成する技術の開発に成功した。CNT 分散金メッキ膜を貫通配線が形成されたRF-MEMS スイッチの接点に適用することで、電力が常に印加された状態でのスイッチング試験において当社従来比3倍となる4.5Wでのスイッチ開閉動作を実現した。



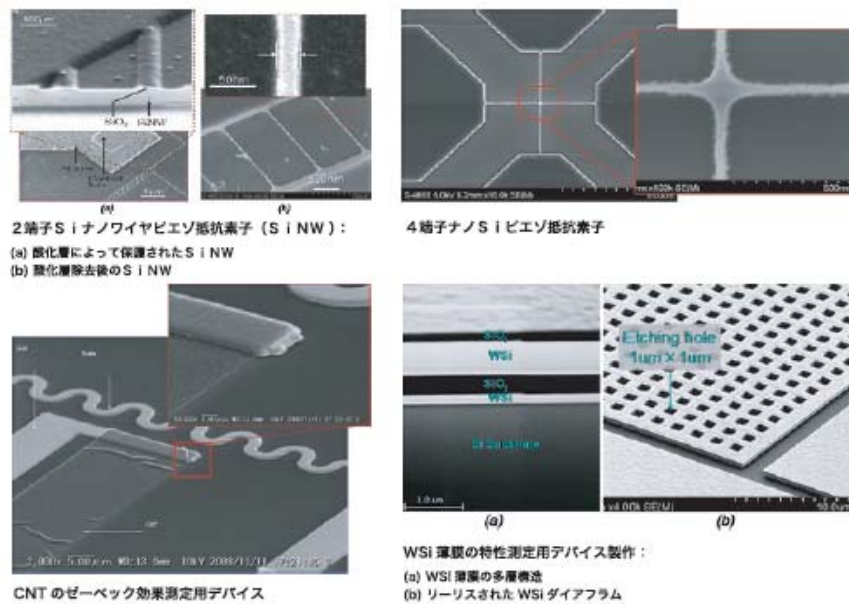
CNT を用いた RF-MEMS スイッチの耐電力性試験結果

## ②MEMS /半導体の一体形成技術の開発

### (1)MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術

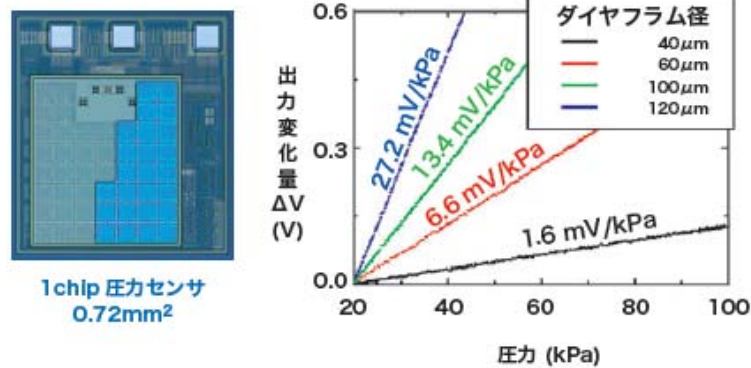
#### ・新たなセンシング原理の探索(立命館大学)

LSI 素子材料の Si、LSI 配線材料の WSi、さらには、カーボンナノチューブに着目し、超微細加工技術で形成したナノスケール構造体について、センサとしての機能・特性を解明した。WSi ナノメカニカル構造の機械的性質(ヤング率、高サイクル疲労特性)、ナノスケール Si やカーボンナノチューブのピエゾ抵抗効果などを実験的に明らかにして試験デバイスを製作したほか、電子状態計算に基づくピエゾ抵抗物性解析理論により、ナノスケール Si のピエゾ抵抗効果面方位依存性を予測した。



#### ・半導体モノリシック集積化基盤技術開発(日立製作所)

LSIの配線層にMEMSを集積化する“配線MEMS技術”を開発し、圧力センサのプラットフォームを構築した。開発成果を基にMEMSをLSIの配線上に集積化した1chip超小型圧力センサを試作した。



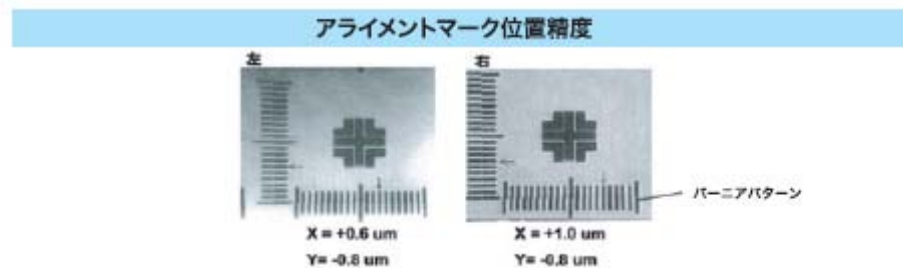
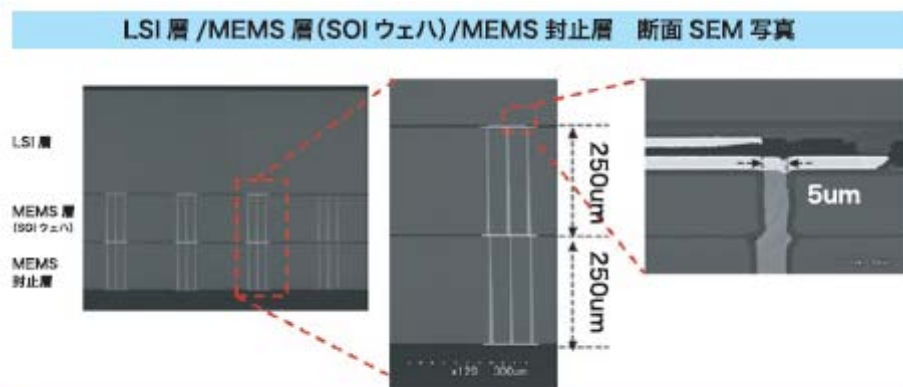
チップ写真および圧力応答特性

(2) MEMS-半導体縦方向配線技術

・縦方向集積MEMS デバイス製造技術の開発 (オムロン)

次世代MEMS の高集積化技術として、高アスペクト TSV (Through Silicon Via) 形成 と高精度ウェハ接合に取り組み、下記の仕様を実現した。

- ① TSV :  $\phi 5\mu\text{m}$  アスペクト比 50
- ② ウェハレベル接合 : 常温接合、位置精度  $\pm 1\mu\text{m}$



・配線の自由度を向上できる 3次元配線構造を持つ高信頼性インタポーザル技術の開発 (フジクラ)

3次元貫通配線を実現するために、フェムト秒レーザー改質/ ウェットエッチングによる微細孔形成技術と、熔融金属吸引法による金属充填技術を開発した。本技術により、厚さ 300 μm の石英基板内部に、クランク形状及び Y 字分岐形状を有する 3次元貫通配線を世界に先駆けて作製することに成功した。



### (3)半導体横方向配線技術

#### ・高集積MEMS 擬似 SOC 製造技術の研究開発(東芝)

異種デバイス集積を実現するハイパーシステムインテグレーション技術を開発した。

##### 1) ウェハ再構築技術

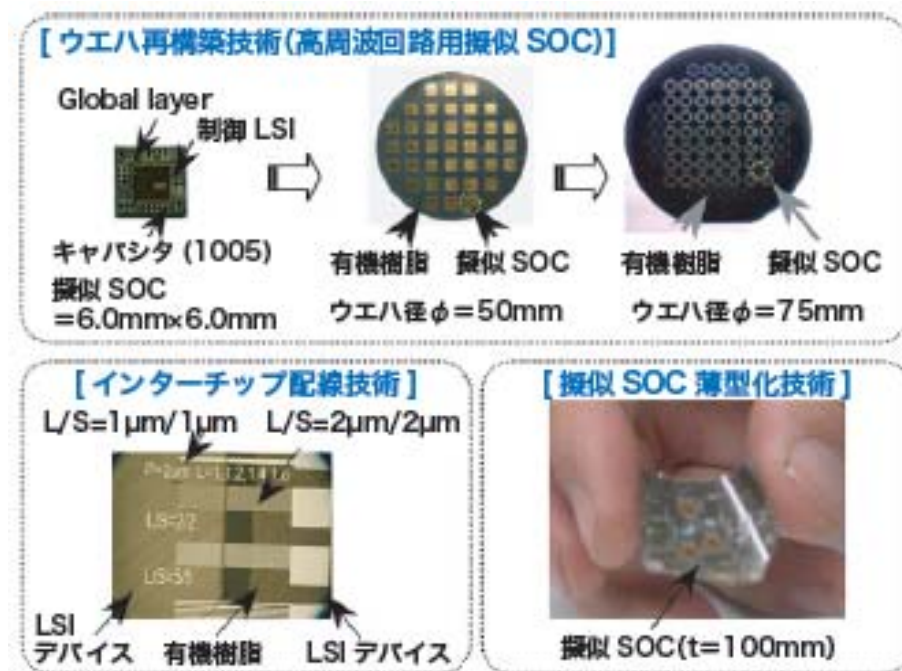
再構築ウェハの大口径化を異種デバイスを精密再配置して、全体に有機樹脂を充填することを真空印刷技術により達成(擬似 SOC ウェハ径  $\phi = 75\text{mm}$ )

##### 2) インターチップ配線技術

グローバル配線の微細化を有機樹脂表面の凹凸制御技術により達成(配線幅 Line/Space= $1\mu\text{m}/1\mu\text{m}$ )

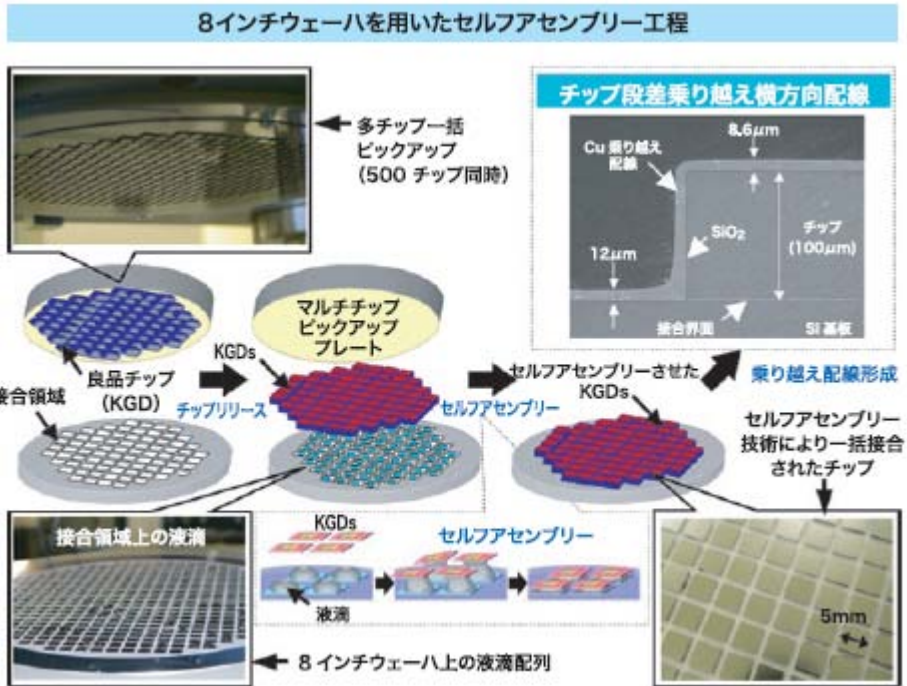
##### 3) 擬似 SOC 薄型化技術

擬似 SOC 薄型化をMEMS 薄膜封止により実現(デバイス厚  $t=100\mu\text{m}$ )



#### ・MEMS - 半導体の低温高密度一体化実装技術(東北大学)

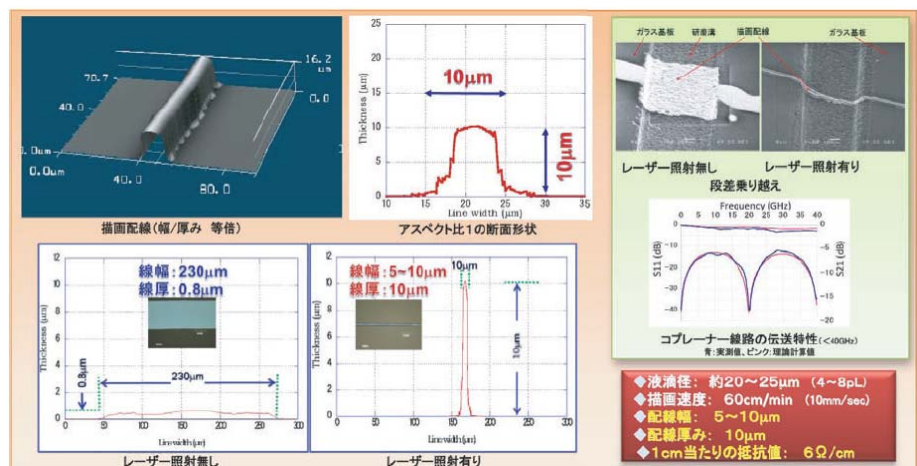
液体の表面張力を利用して、500 個以上のチップを 8 インチウェーハ上へ一括搭載するための自己組織化実装装置を開発した。また、平坦化リフトオフ法を用いて、フレキシブル基板上に  $5\mu\text{m}$  角のマイクロバンプを狭ピッチで形成する技術を開発した。さらに、チップ上にコンデンサやインダクタ等の受動素子を形成する技術を開発し、Cu 配線間に磁気ナノドットを充填することにより、自己インダクタンスを約 20% 増大させた。また、キャビティ構造の導入により、周波数特性を大幅に改善させた。



・高速微細配線描画技術(産業技術総合研究所)

フレキシブルな樹脂部材や低コストな金属部材上とチップの3次元的表面上に高密度な配線や膜状受動部品を積層一体化できる高速実装プロセス実現の為、下記の技術を開発した。

- 1) レーザー援用インクジェットによる高速微細配線描画技術
- 2) ガスデポジション法で形成した錐形バンプによる低ストレス実装技術
- 3) ケミカル・フリップチップ接続法による低温・無加圧ウェハスケール実装技術

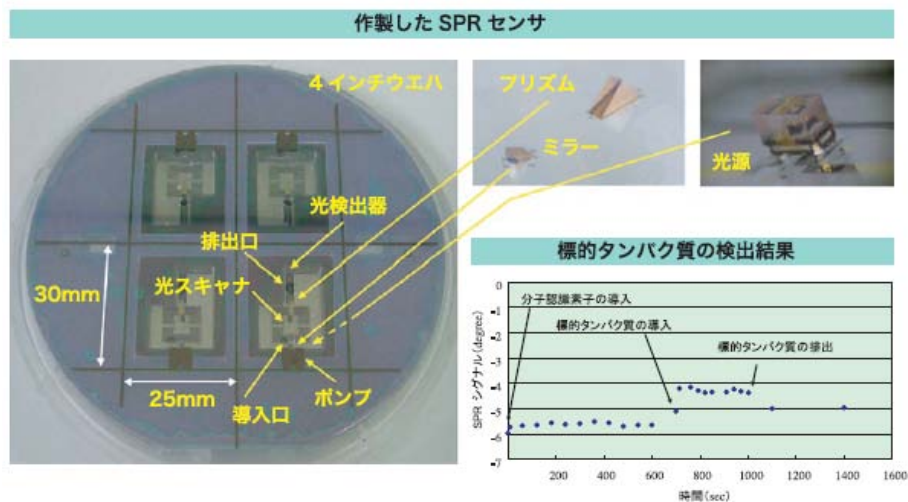


レーザー援用インクジェットによる高速微細配線描画技術

### ③ MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

#### (1) 異種材料多層MEMS集積化技術(オリンパス)

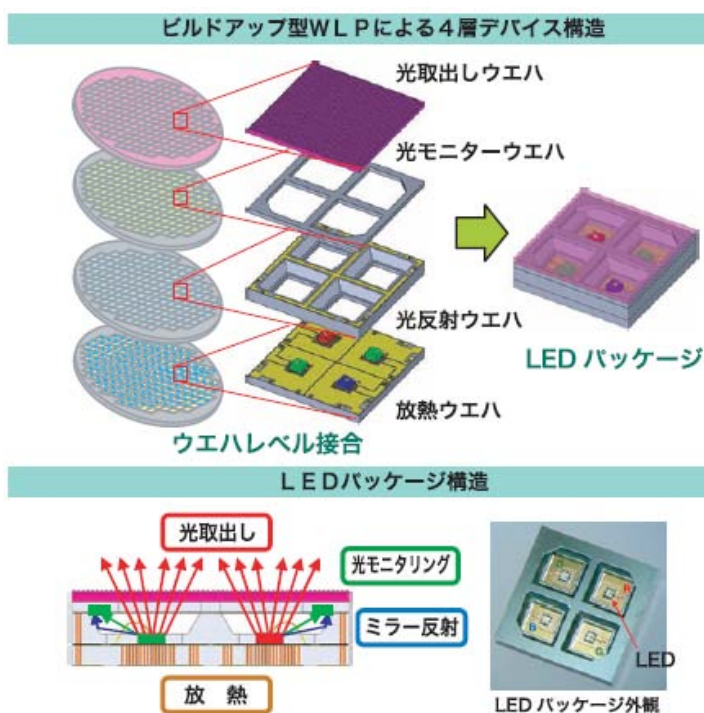
チップレベル接合とウエハレベル接合を組み合わせ、電気、流体、光学等の機能を搭載した SPR センサを開発した。



#### (2)ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

##### ・機能集積化MEMS デバイスを実現するビルドアップ型ウエハレベルパッケージング技術の開発(パナソニック電工)

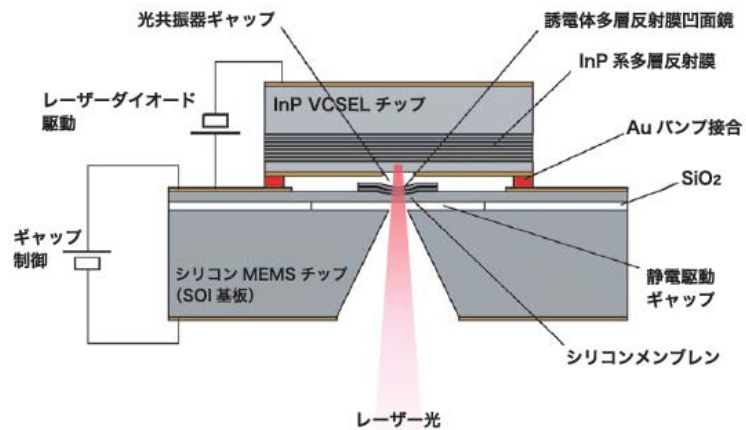
ウエハ接合→ 3次元加工→ 研磨→ チップ実装などを繰り返すビルドアップ型ウエハレベルパッケージングを実現し、半導体 I C (電子回路)、MEMS (センサ、光)、インターポーザ (配線、放熱) をウエハレベルで積層薄型集積化することに成功した。





・光化合物半導体の高精度接合技術(横河電機株式会社)

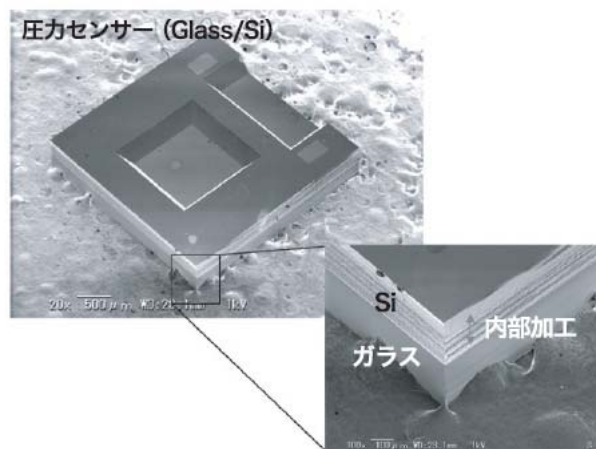
開発した波長可変 VCSEL (面発光レーザー) の構造を示す。InP 系の化合物半導体チップとメンブレンを形成したシリコン MEMS チップを Au バンプで高精度に接合した構造となっている。静電駆動ギャップにギャップ制御電圧を印加することによりメンブレンを動かし波長を変化させることができる。波長可変幅が約 50nm と広く、1 個の電圧による単純な波長制御と、高速に連続波長掃引が可能であることが特長である。



(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所／東北大学)

MEMS 素子は内部に可動機構やダイヤフラムなどの脆弱構造を有しており、半導体集積回路の様に水を掛けながら回転刃でウェハを切断すると素子が破損しやすい。そこで、パルスレーザーによるウェハの内部加工に着目し、工業的に広く用いられている高繰り返し Nd:YVO4 レーザーやファイバーレーザー、CO2 レーザー等を用いて低コストにドライで切削粉の出ないダイシング技術を開発した。従来のダイシング技術に比べて、製造工程の簡素化、歩留まりの向上を可能とする。



#### ④ 高集積・複合MEMS 知識データベースの整備(マイクロマシンセンター)

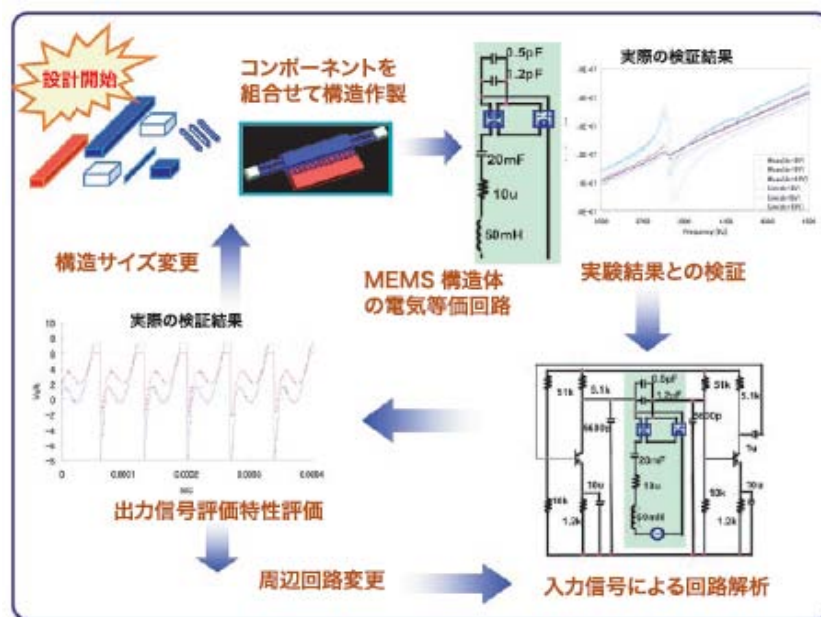
ファインMEMS 開発・製造に係わる研究者・技術者の支援、裾野拡大を図ることを狙いとして、ファイン MEMS プロジェクトの一環として整備したファインMEMS知識データベースを、ウェブを通じてわが国産業界に広く公開した。



#### ⑤ 高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発

(マイクロマシンセンター)

コンポーネントで構成されるMEMS 構造体の電気等価回路抽出方法を世界に先駆けて開発、実験的に検証した。成果は、Web ライブラリーシステムとして、サービスの提供を開始した。



	【発表・特許出願、その他の指標】				
		論文	口頭発表	特許出願	学会賞
	①MEMS／ナノ機能の複合技術の開発	7	32	19	2
	②MEMS／半導体の一体形成技術の開発	18	95	48	9
	③MEMS／MEMSの高集積結合技術の開発	7	33	41	2
	④高集積・複合MEMS知識データベースの整備	0	2	0	0
	⑤高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発	8	3	1	0
	合計	40	165	109	13
IV. 実用化、事業化の見通しについて	<p><u>①実用化研究（助成）</u>  本プロジェクトの開発成果を応用したデバイスを各社の事業戦略に沿って2011～2015年を目処に量産化する計画である。例えば、横河電機は、今回、開発した可変波長レーザーを用いた多成分分析計の開発がNEDOのイノベーション推進事業に採択され、その製品化を目指している。</p> <p><u>②基礎的・基盤的研究（委託）</u>  。東大ー産総研ーオリンパスの3者によるSPRセンサ開発に代表される様に、主として、今回のプロジェクトで培われた関係を活かし、共同開発を継続し、実用化を目指す。また、東北大学のセルフアセンブリー技術の様に設備メーカーとの共同開発による設備としての実用化の動きも有る。</p> <p><u>③知的基盤・標準整備などの研究開発（委託）</u>  知識データベース、設計プラットフォームともに09年6月よりマイクロマシンセンターのホームページにて公開を開始した。知識データベースはマイクロマシンセンターの自主事業としてデータ更新等を継続する。設計プラットフォームは、日本機械学会と電気学会に関連研究会を発足し、成果の普及と今後の開発ニーズの把握を行う。</p>				
V. 評価に関する事項	事前評価	平成17年11月			
	評価予定	平成21年度 事後評価実施予定			
VI. 基本計画に関する事項	策定期期	平成18年3月 策定			
	改訂履歴	平成19年5月 及び 平成20年7月 改訂			

# I. 事業の目的・政策的位置付けについて

## 1. NEDO の関与の必要性・制度への適合性

### 1.1 NEDO が関与する意義

規格品の工業製品の製造が大きく中国へシフトしているなか、我が国の製造業は研究開発型産業への転換が求められている。これらの新しい製造業の1分野としてMEMS (Micro Electro Mechanical System: 微小電気機械システム) の産業の牽引役としての役割が期待されている。現在、MEMSが既に実用化されている自動車用のセンサやインクジェットプリンタヘッドでは日本企業が健闘しているものの、光MEMSやバイオMEMSの分野では欧米企業が一部先行しており、今後成長が期待されるMEMS産業の国際競争力を確保するためには、製造技術の一層の高度化(高集積化・複合化)によりMEMSの更なる小型化・高性能化を図ることが必要である。

これまでのMEMSは機械部品の小型化・低コスト化による置き換え需要が中心であったが、今後は自動車のインテリジェント化による安全性向上に向けたセンサへの機能向上や小型・低コスト化への要求、情報通信端末の小型・高機能化に向けたRFデバイスの小型化・高機能化・長寿命化の要求、更には、健康志向と医療費の抑制を背景とした医療分野へのセンサニーズの高まりが予想される。(図1)



図1. 今後、成長が期待される市場とMEMSへのニーズ(プロジェクト立案時の資料)

MEMS と LSI やバイオ・ナノ材料など異種分野との融合或いは異種の MEMS を組み合わせることにより既存の MEMS を凌駕する高機能・新機能を有する MEMS（第2世代 MEMS）を実現することで、これらの市場の要求に応え、MEMS の市場拡大が実現できると期待される。（図2）

## 既存のMEMSの枠を超えたデバイスで新規市場を開拓

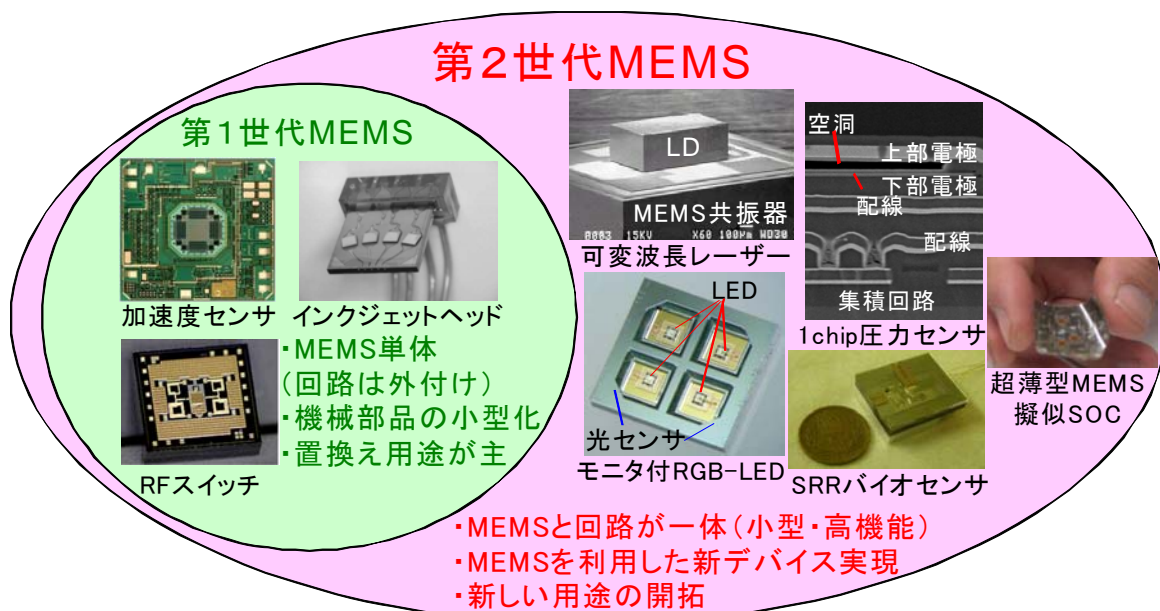
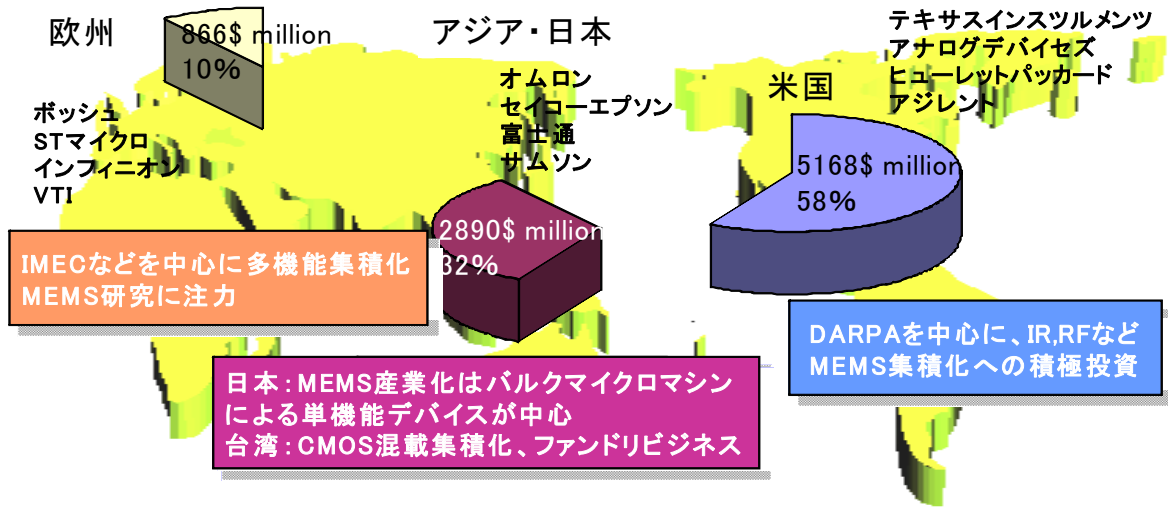


図2. MEMS の高集積化・複合化による適用範囲拡大の可能性

海外においては、米国及び台湾は半導体技術の延長上による MEMS の集積化を指向し、大規模な投資によるファブリービジネスが立ち上がっている。一方、欧州では、多機能集積による MEMS の高度化を指向しており、IMEC や LETI などに開発拠点を活用し、ハイブリッド化を主体とした MEMS 集積の研究開発が進められている。（図3） その為、欧米の一部では、既に、従来型の MEMS に LSI 演算処理回路を集積したり、MEMS 間を結合する高集積・複合 MEMS の開発が着手されており、研究開発促進の時期を逸すると、MEMS 関係市場（2015 年で国内市場 2.4 兆円）を海外メーカーに席卷される恐れがある。

我が国における MEMS 開発は微小三次元構造的加工による単機能 MEMS デバイスを中心として発展してきた。また、ナノ機能研究は世界のトップレベルで、今後は、その活用先として MEMS への期待が高まっている。従って、我が国が成長市場である MEMS の市場を確保する為には、ナノ材料を始めとする MEMS の複合化や集積化で勝機を見出すのが戦略的に望ましいと考えられる。（図4）

第2世代 MEMS の市場は多種多様であり、各企業が個別に市場参入するのを待っている、IMEC や DARPA などを中心に大規模な開発を進めている欧米に日本が後れを取る可能性が高いため、NEDO 技術開発機構は、これまで育ててきた MEMS 産業基盤を発展させて、日本の強みを生かした MEMS 産業育成の為、高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトに着手することにした。



欧米やアジア諸国ではMEMSの集積化の動きが活発化  
→市場獲得に向け、日本もMEMSの集積・複合化が急務

図3. MEMS の集積化に向けた各国の動き(プロジェクト立案時の資料)

**取り組むべき方向**

次ステップとして、新たな機能複合と集積化によるMEMS産業強化が不可欠  
注力すべきMEMS基盤技術の方向は、3次元化の強化と異種材料の活用による機能・知能の集積化

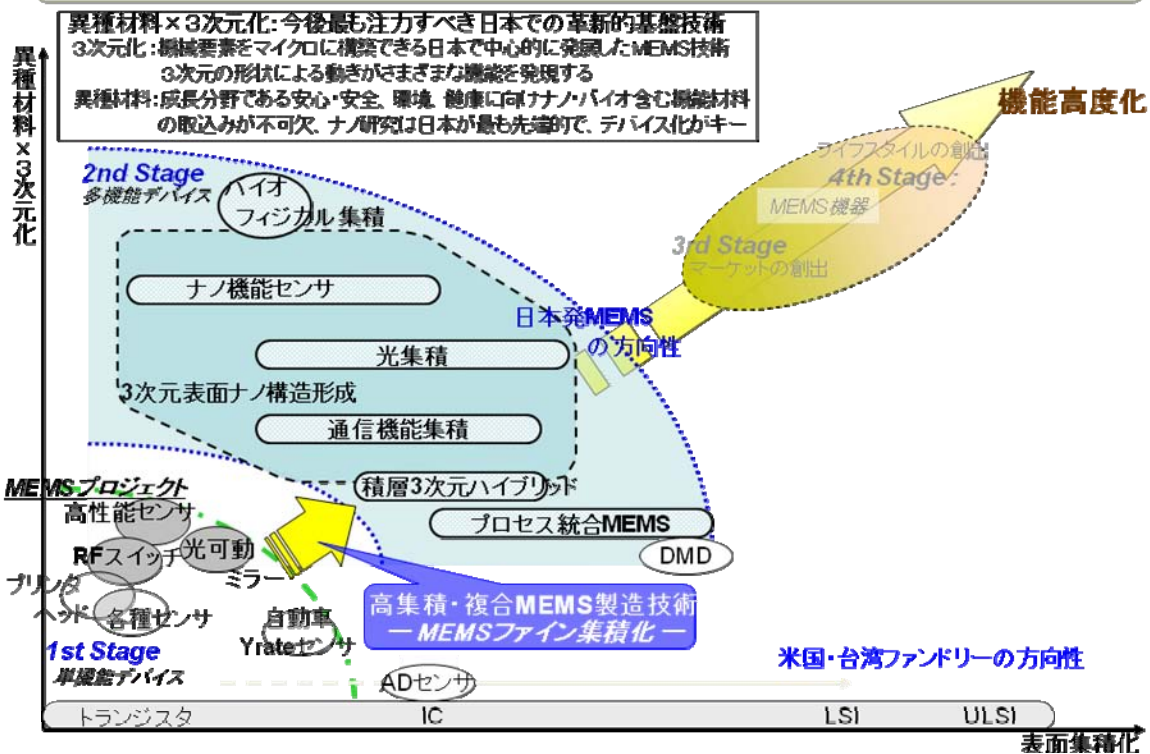


図4. 我が国が目指すべき方向性

## 1.2 実施の効果(費用対効果)

図5に2005年から2015年に掛けての我が国におけるMEMS関連市場の予測を示す。

2010年から2015年に掛けて、自動車や情報通信機器、医療福祉などの分野を中心に我が国のMEMS関連市場は約1.2兆円の伸びが期待されている。この新市場の獲得には、MEMSの集積化や複合化による新規デバイスの実現とその製品化がキーとなる。

高集積・複合MEMS製造技術に立脚した産業を育成するに当たり、次の観点が重要である。すなわち、一定規模の市場有する高集積・複合MEMS応用製品の早期具現化、広範囲の応用分野の開拓、製造基盤技術と関連産業の育成、の3点である。これらの観点に対応する企業群も、類別ができる。第2世代MEMSである高集積・複合MEMSの事業化において、早期の応用製品具現化を目指すのはMEMS技術にある程度の経験を持つ企業に対応する。一方、この技術にはあまりなじみがないが、その企業固有の応用対象にMEMS技術を導入して、新たな製品展開を模索していきたいと考えている企業は、広い範囲で応用分野を開拓する役割を果たす。最後に、製造技術に関連するのは、製造装置産業、解析設計ツール産業、エンジニアリング産業、コンサルティング産業、設計・製造代行産業、などハードウェア・ソフトウェアに関係する企業である。

NEDOが本プロジェクトを実施する効果として、以下の3つが挙げられる。

### (1) 我が国の高集積・複合MEMS市場の早期具現化

MEMSの集積化・複合化による応用範囲の拡大が期待されているが、その可能性は多岐に渡っており、どの市場から立ち上がって行くのか具体的な形は見えていない。自然発生的に市場が立ち上がるのを待っているのは、欧米に出遅れ、市場を席卷される恐れが有る。本プロジェクトでは、助成事業による実用化研究にMEMS分野で実績の有る企業のプロジェクト参画により高集積・複合MEMSの市場を早期に具現化し、国内企業のこの分野への参入を促進することを狙っている。

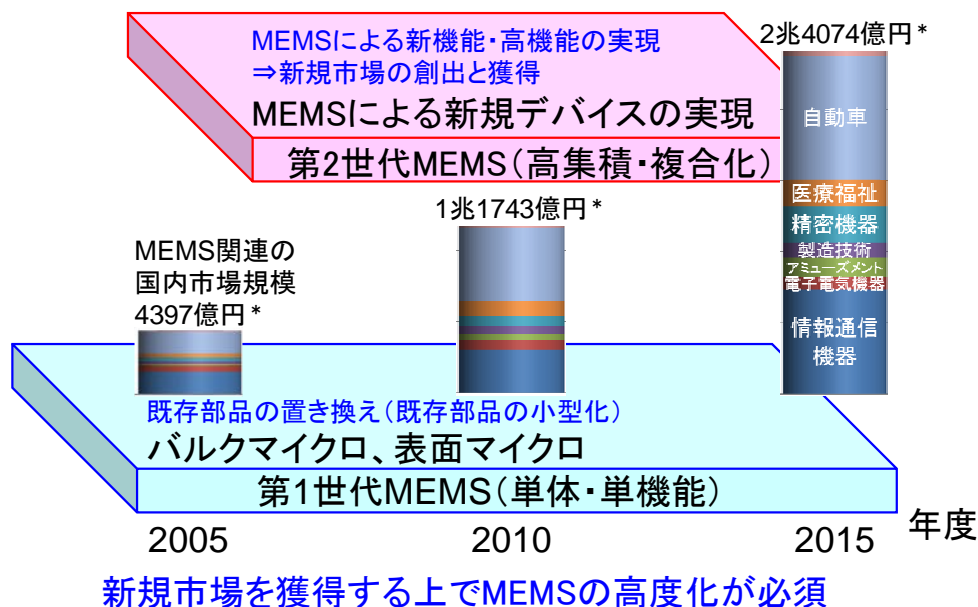
### (2) 高集積・複合MEMS製造技術の国際競争力の向上

本プロジェクトにより高集積・複合MEMSの製造技術が進展し、することにより、我が国の競争力の強化が図られる。本プロジェクトでは、委託研究は原則、成果を公開することになっている為、大学や公的研究機関と装置メーカーとの共同研究により、装置産業の高集積・複合MEMSに関する裾野を拡大する効果も期待できる。

### (3) 新規参入者の拡大と多様な高集積・複合MEMS製品の開発加速

本プロジェクトでは、開発成果のデータベース化と高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発を行い、その成果を広く公開することでMEMSに経験の少ない企業でも参入し易い環境を構築する。これにより、新規参入者の拡大とプレイヤーの増加による多様な高集積・複合MEMS製品の開発加速が期待できる。

本プロジェクトの総実績額は約 30 億円であるが、上述の 6 つの分野への効果が期待でき、MEMS の高集積・複合化により今後、生まれる予想される 1 兆円余りの国内市場獲得に貢献できれば、費用に対する効果は妥当であると考ええる。



\* 市場規模は、平成18年 MEMS の技術戦略マップのローリングに関する調査報告書  
(マイクロマシンセンター、日鉄技術情報センター)より引用

図5. MEMS関連国内市場の予測とMEMSの高集積・複合化の必要性



## 2. 事業の背景・目的・位置付け

### 2.1 事業の位置付け・必要性

我が国には、材料産業や機能性部品産業といったものづくり産業を基盤とした「高度部材産業集積」があり、これが、我が国の製造業の国際競争力を支えてきた。新産業創造戦略にも指摘があるように、我が国がこうした高度部材産業集積を形成していることが、ものづくりに不可欠な要素技術（精密微細加工や特殊素材合成等）のネットワーク化を通じた、迅速かつ高度な摺り合わせを実現してきたといえる。また、川下（最終製品）、川中（材料・部品・装置）、川上（素材、原材料）の分厚い産業集積に育まれた摺り合わせのネットワークが、新技術の素地となり、次のイノベーションにつながってきたのである。他方、近年、韓国、中国、台湾を初めとする東アジア諸国の技術力向上を背景として、製造技術における国際競争が、ますます激化している。

こうした中、製造業の中核の一つである電子部品・デバイス産業は、その業績が半導体や液晶の景気サイクルに左右されがちであるとともに、先端技術であるが故に国際的開発競争が熾烈であり、先行きが不透明等、予断ならない状況にある。また、電子部品・デバイス産業は高性能機械の重要な構成要素であることから、同産業の業績が、我が国製造業の今後の業況に大きな影響を及ぼしうると考えられる。

近年の電子部品・デバイスの小型化・高性能化に大きく寄与している技術が、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems : 微小電気機械システム) である。MEMS とは、微細な電気要素と機械要素を一つの基板上に組み込んだ部品をいい、半導体製造技術やレーザー加工技術等各種の微細加工技術を用いて製造される。情報通信、医療・バイオ、自動車など多様な分野における小型・高精度で省エネルギー性に優れた高性能のキーデバイスとして期待されている。このため、「技術戦略マップ」においても、MEMS は、我が国製造業の「川中」の一角をなす基幹部品の国際競争力強化等の観点から、重要な分野と位置づけられている。

そのため、図6に示す様に NEDO 技術開発機構は、「MEMS プロジェクト」（平成15～17年度）及び「MEMS-ONE プロジェクト」（平成16～18年度）を通じて、日本国内の MEMS 産業の環境整備を行って来た。MEMS の複合化や集積化により、これまで育ててきた MEMS 産業基盤を欧米に後れをとることなく発展させて、日本の強みを生かした MEMS 産業を育する為、高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトに着手することにした。

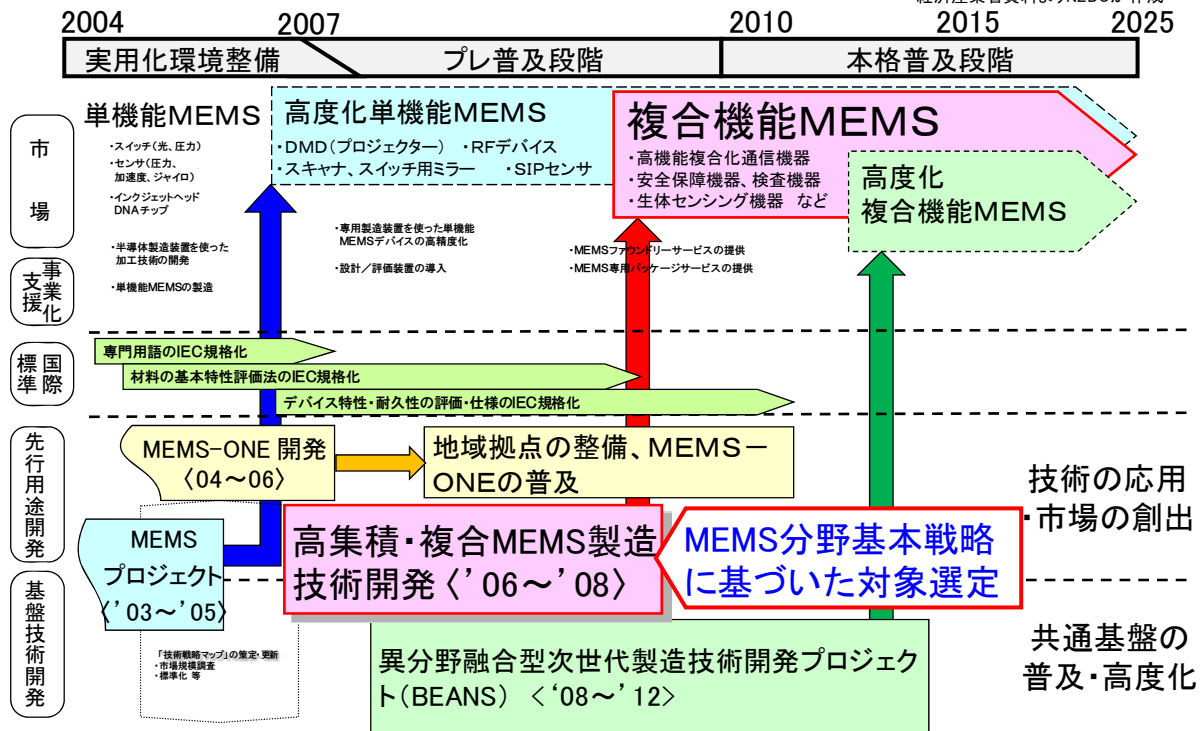


図6. 我が国における MEMS 開発の基本戦略と流れ

## 2.2 国のプログラムとの関連性

高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトは経済産業省の「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の下で実施されている。「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目的は、ロボット技術・機械技術を基盤とし、IT技術目的の一つとして、IT技術・知能化技術など先端の要素技術との融合を促進することにより、家庭、医療・福祉、災害対応など幅広い分野で活躍する次世代ロボットや新機械技術の開発・実用化を促進し、生産性の向上と人間生活の質の向上を実現するとともに、我が国経済社会の基盤である製造業の競争力の維持・強化を目指すことにある。図7に示す様に本プログラムの目的達成に向け、NEDOでは終了したものを含め、10以上のプロジェクトを実施して来た。

本イノベーションプログラムでは機械分野の達成目標は次の様に設定されている。

「(1) 我が国製造業の高度化に必要不可欠な基盤技術である機械分野においては、バイオ技術やIT技術などの異分野技術を活用した従来の機械の概念を超えた新しい機械の創造及びその計測技術の確立を図ることを目標とする。例えば、2015年頃に革新的MEMSの本格普及を目指すこと

により、安全・安心な社会の構築に貢献する。」

新機械技術の1つとして位置付けられるMEMSをナノ材料や半導体、異種MEMSなどの先端的要素技術と融合させることで、MEMSの高機能化、高集積化を実現し、産業や医療など幅広い分野へのMEMSの応用展開を実現し、市場を広げると共に、開発成果のデータベースや半導体集積回路などの周辺回路とMEMSデバイスをシームレスに設計できる設計プラットフォームをWeb上で無償公開することでMEMSの事業化に関わるプレーヤの底辺を拡大し、我が国の製造業の競争力の維持・強化を目指すものであり、「ロボット・新機械イノベーションプログラム」の目的と合致している。

また、高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトは、図6に記載されている様に先行用途開発に比重をおいたプロジェクトであり、助成事業を基本として早期に成果を実用化することを目指していることから、イノベーションプログラムで一例として示された2015年頃に革新的MEMSの本格普及にも貢献できるものと考えている。

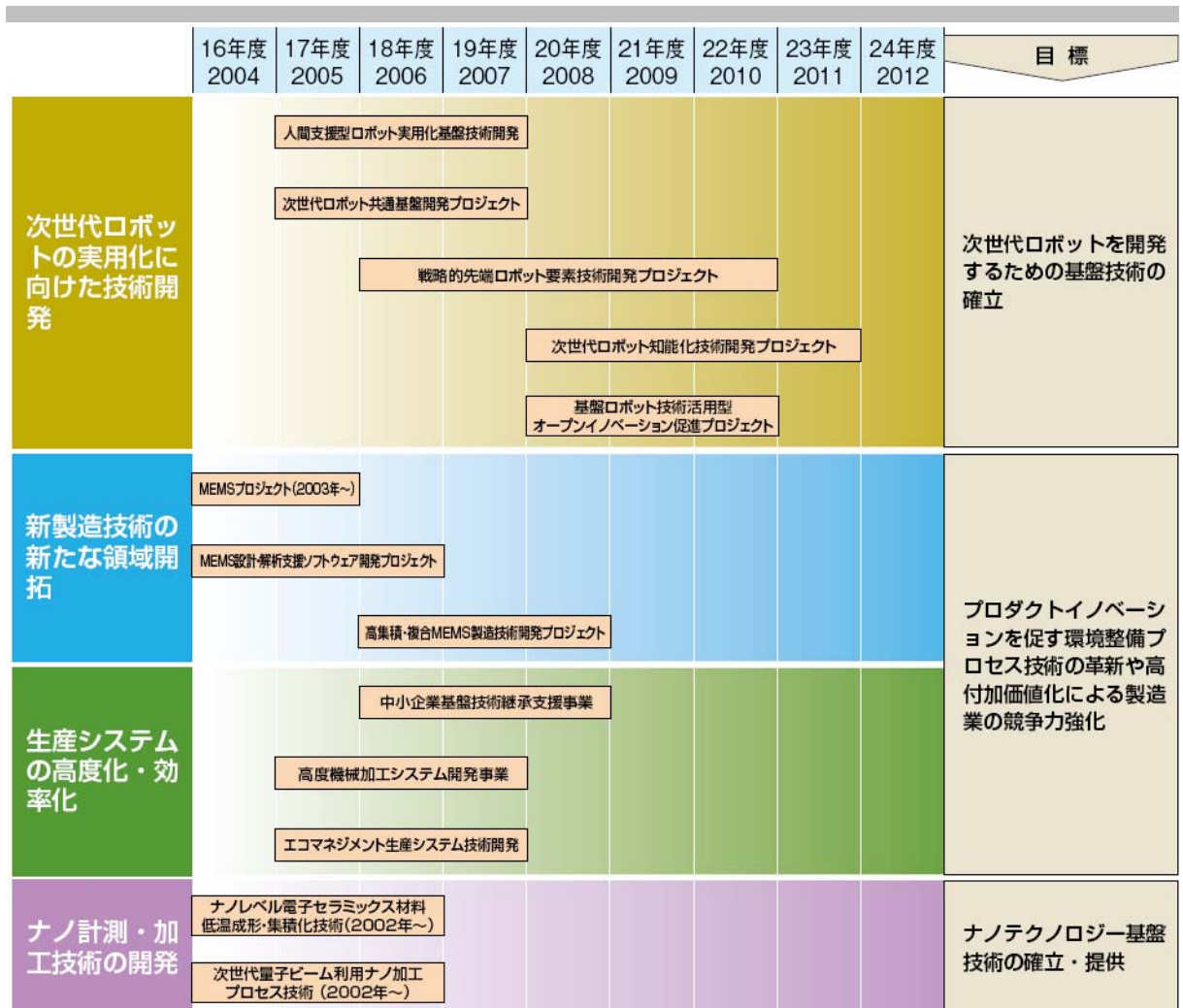


図7. NEDOの「ロボット・新機械イノベーションプログラム」関連プロジェクト

## II. 研究開発マネージメントについて

### 1. 事業の目標

#### 高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトの目標

今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合MEMSデバイスを製造する技術を開発する。また、上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する。

上記の目標を達成に向け下記の①～③の3分野に渡る製造技術開発とそれらの成果を集約し、広く普及を図るための2つの基盤整備事業（④⑤）に取り組んだ。

- ①MEMS / ナノ機能の複合技術の開発
- ②MEMS / 半導体の一体形成技術の開発
- ③MEMS / MEMS の高集積結合技術の開発
- ④高集積・複合MEMS 知識データベースの整備
- ⑤高集積・複合MEMS システム化設計プラットフォームの開発

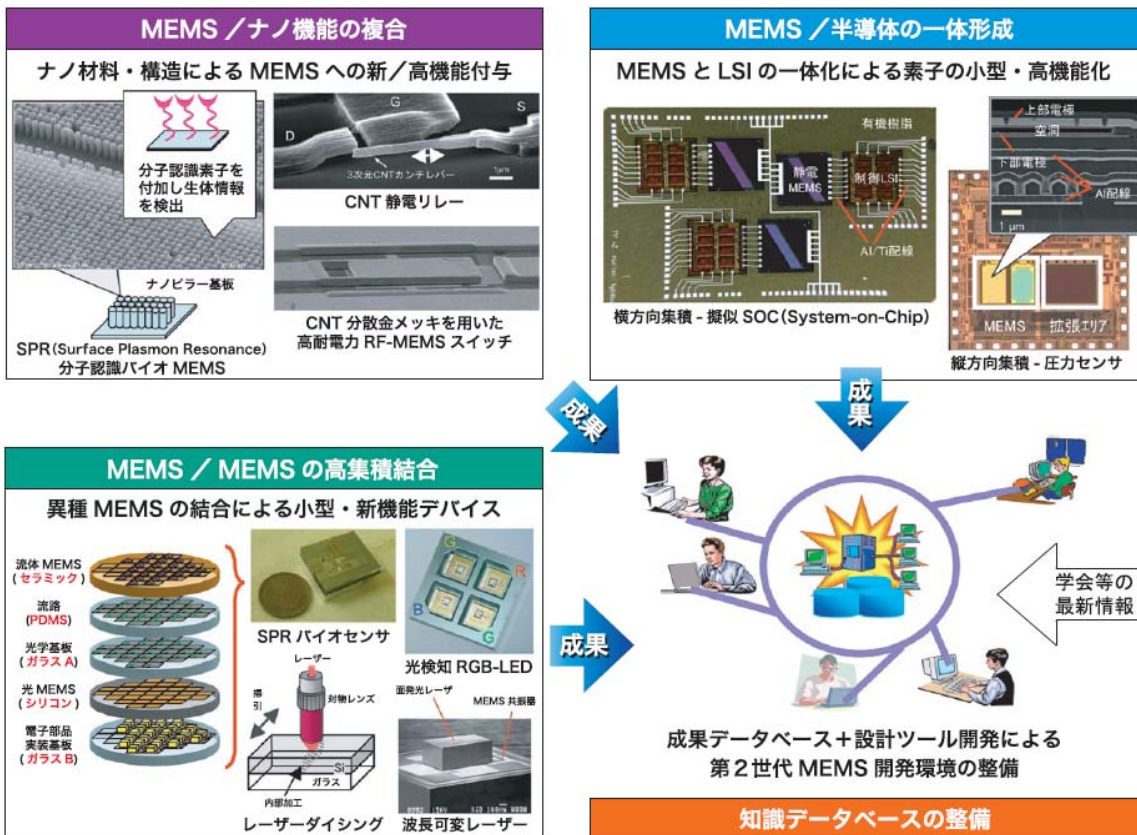


図8. 高集積高集積・複合MEMS製造技術開発プロジェクトの構成

研究開発項目①～⑤はプロジェクト終了時における達成目標を設定し、その目標値を基本計画に織り込んだ。

研究開発項目①～⑤の目標の詳細に関しては、本事業原簿に添付された本プロジェクトの基本計画をご参照頂きたいが、目標値の設定に当たってはMEMS分野のロードマップで将来動向が予測されている技術に関しては、図9に示す様に、助成テーマに関しては、実現間近の要素技術を使って、プロジェクト期間中にデバイスの形に仕上げられる様に目標を設定した。委託テーマに関しては、助成テーマが狙うに較べて数年先に実現が予想される要素技術に焦点を当て、目標を設定した。また、全くの新規分野で定量的な数値が予想されていない項目に関しては定性的な目標設定に留めた。

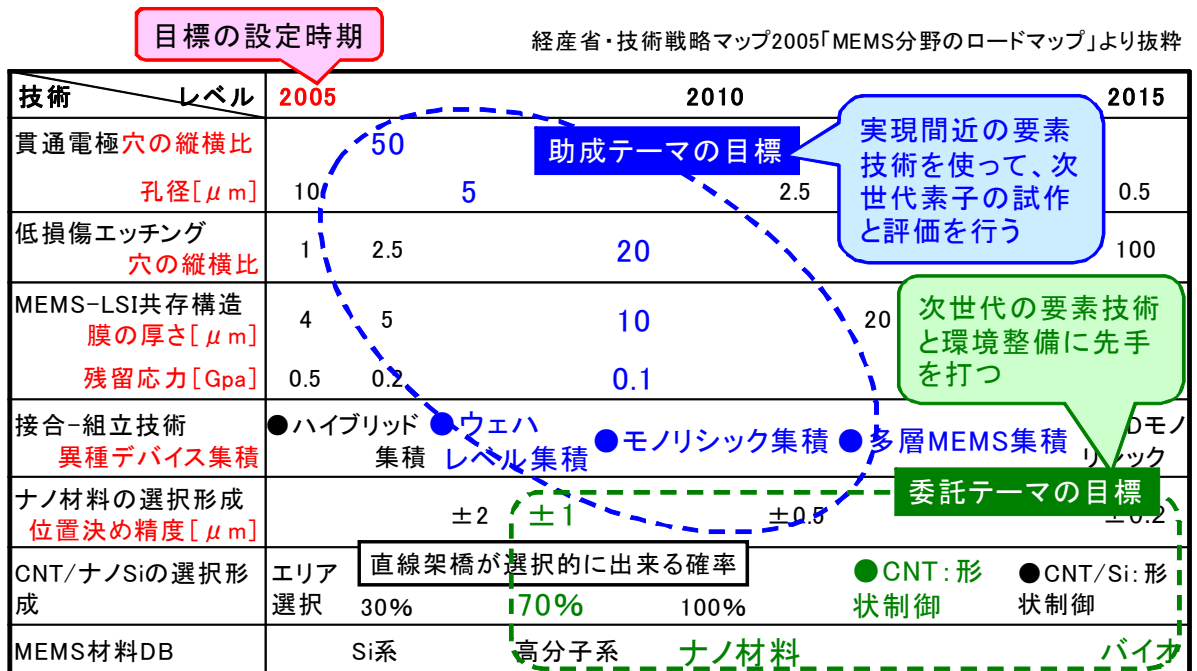


図9. 研究開発項目の目標値設定の考え方

## 2. 事業の計画内容

### 2.1 研究開発の内容

#### 2.1.1. 研究開発項目①「MEMS／ナノ機能の複合技術の開発」

##### (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術

リソグラフィー、エッチングや表面修飾などによってできる、波長オーダー以下のナノ機械構造体やその動きが、MEMSの光学的な特性を大きく変える可能性があるため、センサや表示デバイスとしての利用が期待されている。機能を発揮するに十分な加工精度と低加工損傷性をもつナノ機械構造体を所定の領域に選択的に形成する技術、ナノ機械構造体の解析および発現した特性を評価する技術を研究開発するとともに、MEMSデバイスへの適用の可能性を示す。

##### (2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術

MEMS基板上において、生体を利用、または模倣したセンシング技術の実現を目指し、改変されたタンパク質などのバイオ材料を所定の領域に選択的に修飾する技術および微細加工プロセスとの融合技術を研究開発するとともに、MEMSセンシングデバイスへの適用の可能性を示す。

##### (3) ナノ材料（CNTなど）の選択的形成技術

CNTに代表されるナノ材料の持つ柔軟性、導電性、耐摩耗性、耐食性、低摩擦係数、強靱性などの優れた機能をMEMSデバイスに応用することを目的に、構造制御されたナノ材料（CNTなど）の形成技術、それを所定の領域に選択的に形成する技術および欠陥制御技術を研究開発するとともに、MEMSデバイスへの適用の可能性を示す。

##### (4) ナノ機能を組み込んだMEMSデバイスの製造技術

従来よりも優れた機能を発揮するRF-MEMS等のMEMSデバイスを実現するために、上記(1)、(2)または(3)の選択的にナノ機能を発現する修飾、形成プロセスも含めたMEMSデバイス製造の一貫プロセスを開発する。

#### 達成目標

##### (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術

L/S：50nm以下、縦方向：80nm以上、可動部を擁する場合は150nm以下のギャップを保持するナノ機械構造体を所定の領域（位置精度：±1μm以下）に選択的に形成できる技術を確認するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。さらに、構造体の形状・寸法やその動きと発現するナノ機能の関係も明確にする。

##### (2) バイオ材料（タンパク質など）の選択的修飾技術

2種類以上のバイオ材料（改変されたタンパク質など）を、その配向性が制御された状態で、

複雑構造体の所定の領域に選択的に形成する技術を確立するとともに、そのバイオ材料が生体機能を模倣したメカニズムで疾患関連などの生体物質を認識できることを示す。

### (3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術

サイズ直径:  $1\ \mu\text{m}$  以下或いは厚み精度:  $0.1\ \mu\text{m}$  以内のナノ材料を所定の領域 (位置精度:  $\pm 1\ \mu\text{m}$  以下) に選択的に形成する技術を確立するとともに、それがナノ機能を発現することを示す。

特に、CNT の選択的形狀制御においては、高アスペクト比 (1 : 10 以上)、高密度充填 (充填率: 50% 以上) の数  $\mu\text{m}$  から数百  $\mu\text{m}$  スケールのMEMS 向け配向CNT 構造体を製造するCNT 成長技術を開発する。直線形状で架橋させた場合には、架橋率: 70% 以上を目指す。また、その機械的、化学的特性を評価、改善し、具体的デバイスへの適応を目指す。

### (4) ナノ機能を組み込んだMEMS デバイスの製造技術

少なくとも、プロセス温度が  $400^\circ\text{C}$  以下で、ナノ機能を所定の領域に選択的にウェハレベルで形成し、かつナノ機能形成プロセスによりMEMS が損傷を受けることなく、逆にMEMS 形成プロセスによりナノ機能が劣化することがないMEMS 一貫プロセスを確立するとともに、MEMS 一貫プロセスにより試作されたナノ機能付加MEMS デバイスが、従来よりも優れた性能を発揮することを示す。

## 2.1.2. 研究開発項目②「MEMS / 半導体の一体形成技術の開発」

### (1) MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造技術 【助成事業、委託事業】

CMOS・LSI 材料互換プロセスを用いて、先端CMOS・LSI とセンサを始めとした様々なMEMS デバイスをモノリシックに集積化可能なMEMS 製造プロセスを開発する。先端LSI との混載メリットを最大限活かした高感度化・低電圧化・小型化を実現するため、最小加工寸法 (ギャップ) サブ  $\mu\text{m}$  ~  $\text{nm}$  レベル + 高アスペクト比の低損傷エッチング技術、低ストレス成膜技術、大面積のオンチップ空洞形成封止技術、MEMS と異なった機能要素 (電子回路、受動素子など) の多層・モノリシック集積技術および外部との電気接続技術などが含まれる。さらに、集積化センサ試作、オンチップ機械特性広範囲制御により、本手法の有効性の実証なども行う。

この他、ナノ半導体セラミックセンサ、ナノワイヤ圧電体等、半導体センサの微細化により発現する新たなMEMS センシング原理の探索を行う。

### (2) MEMS - 半導体縦方向配線技術

上記CMOS 互換プロセス統合技術に加え、MEMS の搭載自由度を上げることも重要である。これに対応する製造技術として、別々に製造されたCMOS・LSI とMEMS をウェハレベル

で多層に接合する技術が必要となる。そのために、将来の65nmルールまでのCMOS・LSI ウェハやバルク型も含めたMEMS ウェハに対して、小径で、高アスペクトな貫通孔配線を形成し、多層にCMOS・LSI とMEMS を電氣的に接続する技術を開発する。

また、配線の自由度を飛躍的に向上できる3次元配線構造を持つ高信頼性インターポーザル技術の開発も縦方向への集積化に重要な要素として開発する。

### (3) MEMS - 半導体横方向配線技術

上記と同様の目的で、以下のMEMS - 半導体横方向配線技術を開発する。別々のウェハ上に製造されたMEMSデバイスとCMOS・LSI を検査選別した後、それらをチップレベルで隣接して配置し、ウェハ状に再配列する。このMEMS - CMOS・LSI 一体疑似ウェハに対して、集積化したいチップ間を、半導体プロセスにより微細配線で電氣的に接続する。この横方向配線技術により、従来技術のSIP (System In Package) では達成できない小型化と、従来技術のSOC (System On Chip) では達成できない高性能化とを実現できる。

この他、フレキシブルな樹脂部材や低コストな金属部材上とチップの3次元的表面上に高密度な配線や膜状受動部品を積層一体化できる高速実装プロセスの開発も必要となる。そのため、絶縁層と導電層、バンプおよび高誘電体層や抵抗体層を、低温で高速に直接微細描画することにより、チップの垂直段差への配線等の3次元表面上への高密度配線、高精度フリップチップ接続やコンデンサ、抵抗などの受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。

## 達成目標

### (1) MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造技術

MEMS製造プロセスとして、180nm技術ノードCMOS・LSI材料プロセス互換を目指す。MEMS製造技術ロードマップに基づく統合プロセスによるMEMSの加工目標として、最小加工寸法：0.5 $\mu$ m以下、アスペクト比：20以上、残留応力：0.1GPa以下(膜厚：0.1~10 $\mu$ m)、MEMSと複数種類の異なった機能要素(電子回路、受動素子など)の多層・モノリシック集積化を目指す。

半導体センサの微細化により発現する新たなMEMSセンシング原理の探索については、製造プロセスは問わないが、1つ以上の新たなMEMSセンシング原理を見出すことを目指す。

### (2) MEMS - 半導体縦方向配線技術

将来の65nmルールまでのCMOS・LSI とMEMS (バルク型も含む) を多層に集積するために、穴径：5 $\mu$ m以下、アスペクト比：50以上の貫通孔配線を形成するとともに、CMOS・LSI とMEMS を3層以上に渡って接合し、確実な電氣的接続を実現する。

インターポーザルについては、インターポーザル内の貫通配線構造に従来にない分岐構造を導入し、インターポーザル内部での3次元インターコネクションを実現する。そのサイズとしては、インターポーザル厚：300 $\mu$ m以下で、貫通配線(穴径：100 $\mu$ m以下)の横方向へのシフト量：500 $\mu$ m以上を達成する製造技術を目指す。



### (3) MEMS - 半導体横方向配線技術

L/S :  $1\ \mu\text{m}/1\ \mu\text{m}$ 以下の微細配線を形成し、CMOS・LSIとMEMSの間の確実な電氣的接続を実現する。さらに、横方向集積型MEMSパッケージの薄型化(厚さ:  $100\ \mu\text{m}$ 程度)を目指す。

この他、三次元表面上への高密度配線パターンの低温で高速な直接微細描画技術と受動部品の高密度な低温積層一体化実装技術を確立する。高密度配線パターンとして、垂直乗り越え段差:  $100\ \mu\text{m}$ 以上、パターン寸法:  $5\sim 10\ \mu\text{m}$ 、成膜温度:  $400\text{°C}$ 以下、成膜速度:  $10\ \mu\text{m}/\text{min}$ 以上および描画速度:  $1\ \text{cm}/\text{min}$ 以上を目指す。

## 2.1.3. 研究開発項目③「MEMS/MEMSの高集積結合技術の開発」

### (1) 異種材料多層MEMS集積化技術

MEMS - MEMSの高集積結合技術においては、多層の異種材料ウェハレベル接合技術が基本となる。具体的には、異種材料(シリコン、ガラス、樹脂など)のウェハを、平面方向に高精度に位置決めするばかりでなく、垂直(Z)方向にも高精度に組立ができる技術を開発するとともに、機能を損なうことのない、例えば低温、低応力の接合技術を開発する。

### (2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

上記のようにさまざまな異種材料ウェハ上にMEMSを形成した後、それらを順次または一括でウェハレベル接合するだけでなく、エッチング、機能部位形成・異種材料形成、実装など各種加工を施したMEMSウェハを、別のMEMSウェハと接合し、さらにこれらの工程を繰り返すことで、さらに高密度な多層MEMSを実現できる。そのために、接合するウェハ状態にあわせた機能損傷がない各種ウェハレベル接合手法と接合されたウェハ状態にあわせた各種加工方法を開発する。

なお、発光素子等の高価な化合物半導体素子を実装する場合は、チップレベルで接合する必要があり、さらに、発光素子においては所望の光軸方向を保持した接合が求められるため、チップレベルの高精度接合技術も必要に応じて開発する。

### (3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体には、Siのみならず、酸化物、金属、化合物、樹脂、等、種々の材料が混在し、かつ積層界面はウェハ母材より低強度である場合が多い。またチップサイズに対してチップ厚さ比が大きくなり、ダイシング時のチップング等損傷の影響がより大きくなる。したがって、できるだけ低ストレスで多層ウェハレベル接合体を切断できるダイシング技術を開発する。

### 達成目標

#### (1) 異種材料多層MEMS集積化技術

ウェハサイズ：直径100mm以上、3層以上、異種材料（シリコン、ガラス、樹脂など）をウェハレベルで接合し、面方向：±1μm以下の位置決め精度、垂直（z）方向：±0.5μm以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられることを目指す。

#### (2) ビルドアップ型多層MEMS集積化技術

各ウェハ（直径100mm以上）の接合精度および加工精度は、面方向：±1μmを指すとともに、各ウェハ接合工程の間に加工工程（エッチング、実装、機能部材・異種材料形成、など）を設けながら、ダメージを与えることなくウェハ3層以上を順次接合できることを目指す。

化合物半導体チップの高精度位置決め接合技術については、位置決め精度：±1μm以下、傾き精度：0.05deg以下を目指す。

#### (3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシングについては、異種材料で構成される3層以上のウェハレベル接合体（直径100mm以上）に対して、チップング、層間剥離およびMEMS可動部破損などの破損率について、トータルで1%以下を目指す。

### 2.1.4. 研究開発項目④高集積・複合MEMS知識データベースの整備

高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見を系統的に収集・蓄積し、データベース化する。

#### 達成目標

高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目①～③にかかわる新たな知見（文献情報、特許情報及び特に委託事業を中心としたプロジェクトの研究成果も含めて）を系統的に蓄積してデータベース化するとともに、MEMS用設計・解析支援システム開発プロジェクトで開発が行われているMEMS用設計解析支援システムに付加する。

### 2.1.5. 研究開発項目⑤「高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームの開発」

高集積・複合MEMS製造技術開発の研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積・複合MEMSに適した設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。さらに、CADモデルと等価回路モデル間の相互生成技術に関して調査を行う。

#### 達成目標

研究開発項目①～③及びその周辺に関わる高集積化MEMS設計プラットフォームとしての等価回路モデルに関する情報を整理し、Web閲覧システムとして構築する。また、MEMS用設計解析支援システムの回路シミュレーション・モデルを高集積・複合MEMSに適用される等価回路モデルに拡張し、その内容をWeb閲覧システムに掲載する。

## 2.2 研究開発の実施体制

本研究開発はNEDO技術開発機構が、単独ないし複数の原則、本邦の企業、研究組合、公益法人等の研究機関から公募によって研究開発実施者を選定し実施した。

図10に本プロジェクトのテーマ及び事業者の構成を示す。本プロジェクトは市場化に向けた産業界の具体的な取り組みを支援する実用化研究開発に主眼をおいている為、助成（助成率1/2）を基本としているが、NEDO技術開発機構が主体となっていくべき基礎的・基盤的研究開発或いは知的基盤・標準整備等の研究開発であると判断される研究開発内容の事業は委託により実施した。

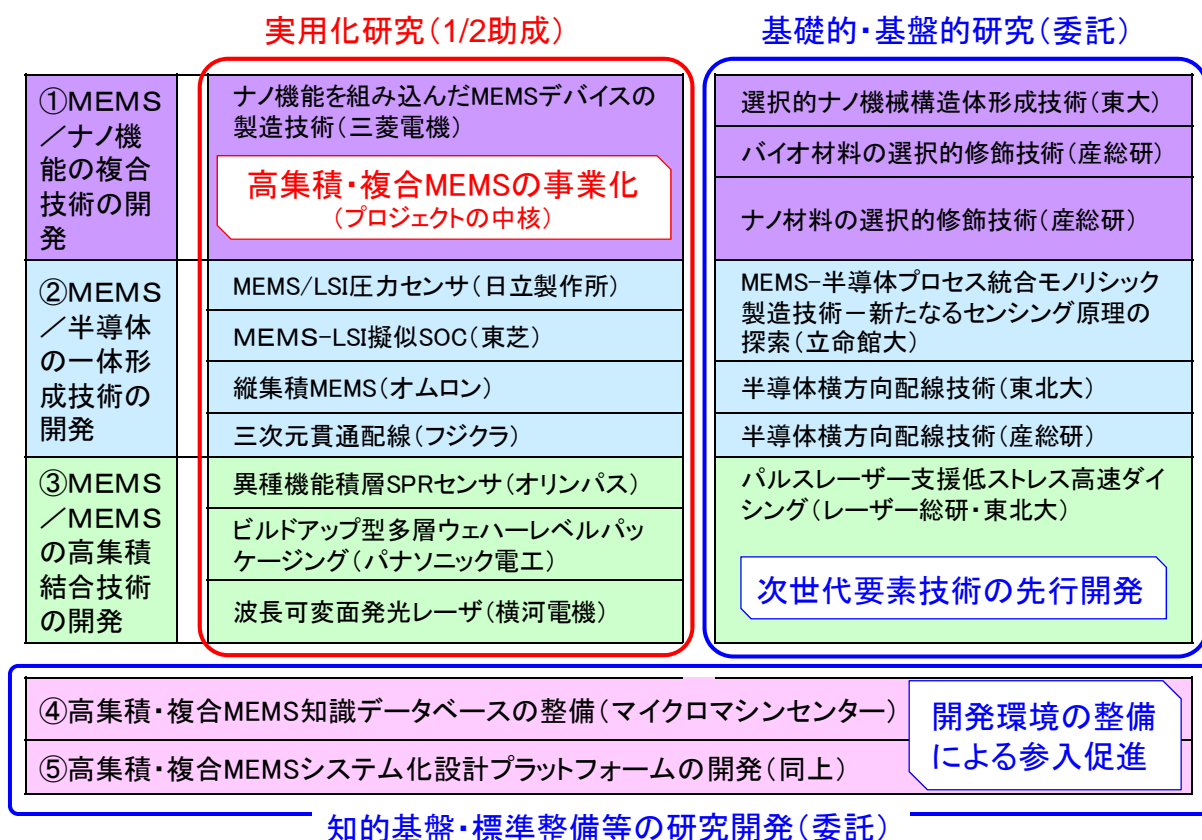


図10. プロジェクトのテーマ構成

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技術開発機構が委託先決定後に指名する研究開発責任者（プロジェクトリーダー）を置き、その指導の下に個別テーマの開発を進めると共に事業者を可能な限り連携して効果的な研究開発を実施した。

プロジェクト開始直後及び08年5月以降の実施体制をそれぞれ図11及び図12に示す。本プロジェクトは研究開発課題が互いに関連し合うものであることから、全体を統括するプロジェクトリーダーは、東京大学の下山勲教授に委嘱し、プロジェクトサブリーダーとして立命館大学の杉山進教授を委嘱した。本プロジェクトはテーマ数が多いことから、下山PLと杉山サブPLがテ

一まごとに分担し、研究進捗シートのチェックや個別指導を行うこととした。

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">NEDO</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">プロジェクトリーダー : 下山 勲 東京大 教授</div>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">サブプロジェクトリーダー: 杉山 進 立命館大 教授</div>	
大項目	中項目	助成先	委託先
MEMS/ナノ	ナノ機械構造体		東大
	選択的バイオ修飾		産総研
	選択的ナノ材料修飾		産総研
	ナノ機能デバイス	三菱電機	
MEMS/半導体	プロセス統合モノリシック	日立	
			立命館大
	縦方向配線	オムロン	
		フジクラ	
	横方向配線	東芝	
			産総研
		東北大学	
MEMS/MEMS	異種材料多層集積	オリンハス	
	ビルドアップ多層集積	ハナソニック電工	
		横河電機	
	低ストレスダイシング		レーザー総研・東北大
知識データベース			マイクロマシンセンター

青字：下山PL担当、赤字：杉山サブPL担当

図11. プロジェクト開始直後の運営体制(06年7月)

<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">NEDO</div>		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">プロジェクトリーダー : 下山 勲 東京大 教授</div>	
		<div style="border: 1px solid black; padding: 2px; display: inline-block;">サブプロジェクトリーダー: 杉山 進 立命館大 教授</div>	
大項目	中項目	助成先	委託先
MEMS/ナノ	ナノ機械構造体		東大
	選択的バイオ修飾		産総研
	選択的ナノ材料修飾		産総研
	ナノ機能デバイス	三菱電機	
MEMS/半導体	プロセス統合モノリシック	日立	
			立命館大
	縦方向配線	オムロン	
		フジクラ	
	横方向配線	東芝	
			産総研
		東北大学	
MEMS/MEMS	異種材料多層集積	オリンハス	
	ビルドアップ多層集積	ハナソニック電工	
		横河電機	
	低ストレスダイシング		レーザー総研・東北大
知識データベース			マイクロマシンセンター
設計プラットフォーム			マイクロマシンセンター

青字：下山PL担当、赤字：杉山サブPL担当

図11. 変更後のプロジェクトの運営体制(08年5月～設計プラットフォームを追加)

## 実施者間の連携体制

実施者間の連携による相乗効果を期待し、共同開発の可能性を検討した。

### 1. SPRバイオセンサ開発

産総研（選択的バイオ修飾）－東大（ナノ機械構造体）－オリンパス（異種材料多層集積）の3者によるSPRバイオセンサの開発を行った。この取り組みで、①選択的バイオ修飾の出口イメージの具体化、②東大が開発した液体プリズムの新規用途開拓などの成果が得られた。

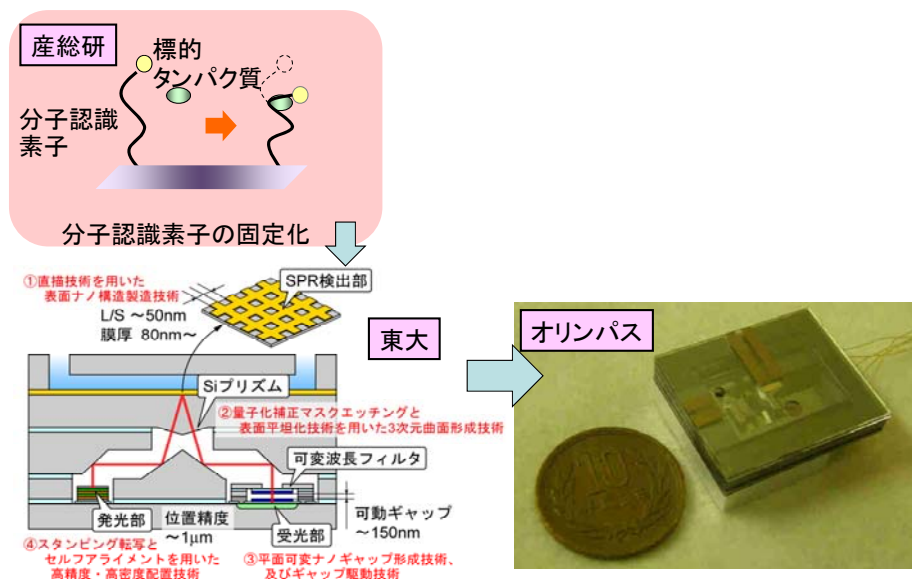


図12 SPRバイオセンサ開発における役割分担

### 2. レーザーアシストインクジェット配線技術の擬似SOCプロセスへの適用検討

産総研の開発したレーザーアシストインクジェット配線技術を東芝の擬似SOCウェハの配線に適用した。企業の視点で評価することで実用化に向けた課題を抽出することが出来た。

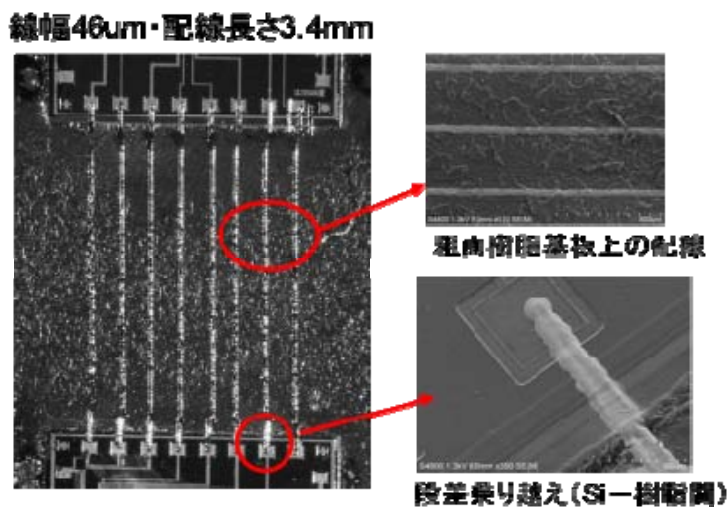


図13 擬似SOCウェハへのレーザーアシストインクジェット配線例

## 2.3 研究開発の運営管理

本プロジェクトの目的・目標達成に向け、プロジェクトを円滑に推進するために、表1に示すような運営体制を設けた。

### ①プロジェクト推進連絡会

進捗状況の把握と指導、情報の共有化による新規アイデアの醸成と実施者間の共同研究の推進を目的として、3か月に一回（原則として、3月、6月、9月、12月）の頻度で実施者全員が一堂に会して、進捗報告（IPに係る部分は除外）などを行うプロジェクト推進連絡会を全11回開催した。

尚、プロジェクト推進連絡会の開催に当たっては、マイクロマシンセンターに事務局を依頼し、開催案内の送付や議事録の作成などにご協力を頂いた。

### ②個別指導会

プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーの担当テーマに関し、NEDO同行の下で進捗・実施内容を個別に指導（0.5～1回／年・実施者）を行った。開発現場で設備を前に議論をすることで詳細な進捗状況を把握することが出来、IPに係る部分まで報告を受けることで推進連絡会の場よりも詳細な指導が可能になった。

### ③次年度予算などの検討会議

プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー、NEDOから成るメンバーで年度末に開催し、テーマの進捗や情勢の変化などを基に予算配分の見直し、加速予算の申請などの審議を行った。

表1. 運営体制の一覧

プロジェクト推進連絡会	・全体の進捗管理（IPに係る部分は除外） ・テーマの進捗・実施内容の指導 ・普及関連、環境整備関連 ・必要に応じて外部の有識者にアドバイスを頂く
個別指導会	・プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダーに担当テーマを割り当て、NEDO同行で進捗・実施内容を個別に指導（0.5～1回／年・実施者）
次年度予算などの検討会議	・プロジェクトリーダー、サブプロジェクトリーダー、NEDOから成るメンバーで年度末に開催し、予算配分の見直し、加速予算の申請などの審議

### 3. 情勢変化への対応

#### 3.1 新規テーマの追加

プロジェクト開始後、米国を中心として設計プラットフォームを用いた表面集積化の動きが活発化し、高集積MEMSに関わる製造技術、設計技術の両面を備えたトータルな研究開発により、高集積MEMS製品の成功事例が増加して来た。しかしながら、高集積・複合MEMS製造技術の研究開発項目であるMEMS／ナノ機能の複合、MEMS／半導体の一体形成技術、MEMS／MEMSの高集積結合技術に共通する統一的な設計手法の開発はほとんど行われていなかった。高集積・複合MEMSの開発から実用化までの期間を大幅に短縮し、国内市場の更なる活性化と国際的な優位性の確保する為、MEMS構造体と異種材料との複合化や集積化に対応する高集積・複合MEMSシステム化設計プラットフォームに関する開発を平成19年度より開発項目に加えた。テーマ追加前後の体制は図10及び図11を参照願います。

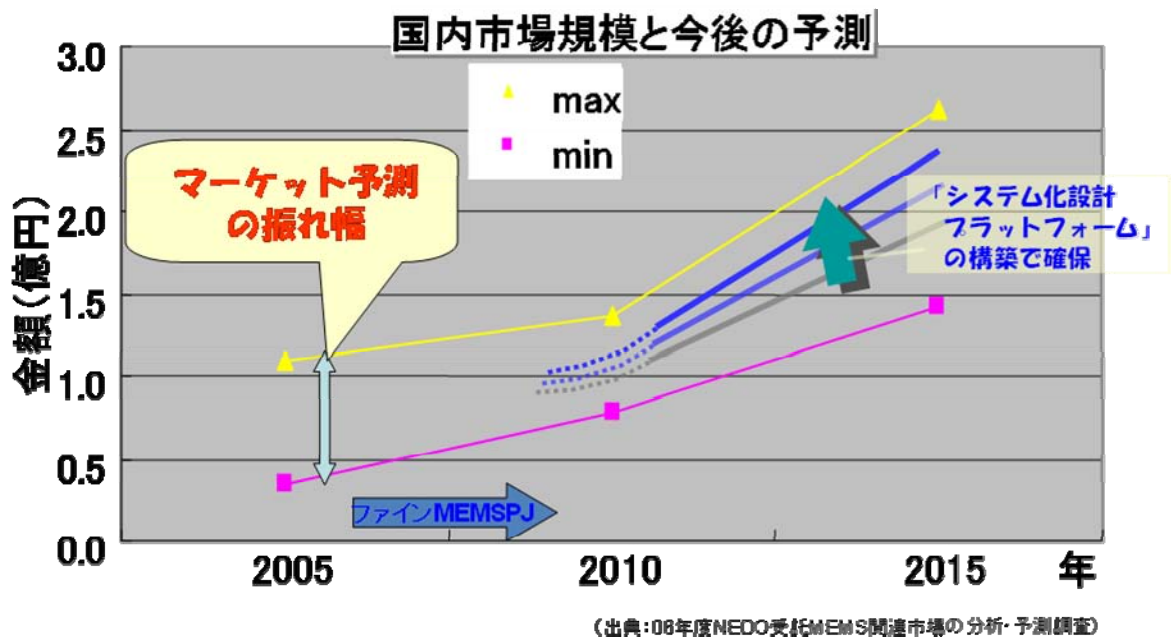


図12. MEMS市場規模予測と設計プラットフォーム開発の必要性

#### 4. 中間評価結果への対応

本事業は、開発期間が3年間のため中間評価は実施していない。

#### 5. 評価に関する事項

NEDOは技術的及び政策的観点から見た技術開発の意義、目標達成度、成果の技術的意義並びに将来の産業への波及効果等の観点から、外部有識者による技術開発の事後評価を平成21年度に実施する。



### Ⅲ. 研究開発成果

#### 1. 事業全体の成果

##### (1) 成果概要

高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクト（通称：ファイン MEMS プロジェクト）を平成 18 年度から平成 20 年度の 3 年間に渡って実施した。本プロジェクトでは、センサや通信など異種の MEMS や LSI の一体化と MEMS へのナノ機能付与による第 2 世代 MEMS の実現を目指して、大学・研究機関・企業の連携の下、「MEMS/ナノ機能の複合」、「MEMS /半導体の一体形成」、「MEMS / MEMS の高集積結合」の 3 分野に渡る製造技術開発と、開発成果の活用を支援するための「知識データベースの整備」及び「設計プラットフォームの開発」に取り組んだ。

全体目標に対する目標達成状況を表 2 に示す。第 1 の目標である高集積・複合 MEMS デバイスの製造技術開発に関しては、図 1-3 に示す様に様々な高集積・複合 MEMS デバイスを試作し、当初、計画した性能を実現できたことで目標を達成できたと判断する。また、プロジェクトで得られた知識を集約する件に関しては、知識データベースが 09 年 6 月よりマイクロマシンセンターのホームページで一般公開されたことから同様に達成できたものと判断する。

表 2. 高集積・複合 MEMS 製造技術開発プロジェクトの目標達成状況

目 標	結 果	判 定
今後成長が期待される市場である自動車、情報通信、安全・安心、環境、医療等において必要不可欠となる、小型・省電力・高性能・高信頼性の高集積・複合 MEMS デバイスを製造する技術を開発する	・MEMS/ナノ、MEMS/半導体、MEMS/MEMS の 3 分野について高集積・複合 MEMS 製造技術を開発し、それぞれ SPR センサ、圧力センサ、可変波長レーザーなどを試作した。	○
上記技術開発を通じて得られた製造技術に関わる知識を集約し、データベースを整備し公開する	09 年 6 月より、マイクロマシンセンターホームページにて、知識データベース及び設計プラットフォームの公開を開始した。	○

個別テーマの目標達成に関しては、詳細は各テーマの成果詳細の項を参照して頂きたいが、基本計画の目標はすべて達成し、自主目標に関しても、一部条件付きでの達成が有るものの概ね目標を達成できた。

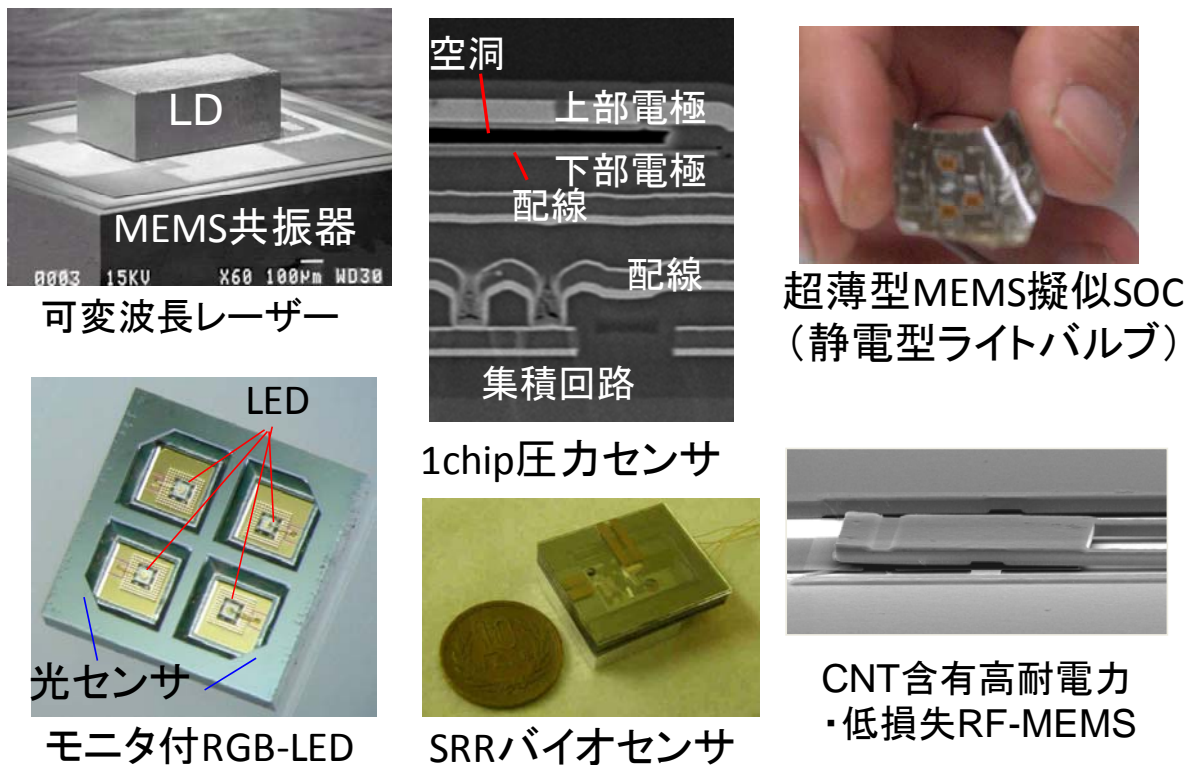


図13. 本プロジェクトで開発された複合 MEMS デバイスの例

(2) 成果の意義

本プロジェクト全体の意義としては、次の4つを上げることが出来る。

- ①複合化・集積化による MEMS の高機能化や新機能の発現をデバイスの形で提示し、高集積・複合 MEMS 実用化の可能性を示した。
- ②高集積・複合 MEMS の更なる高度化に向けた要素技術（図 1 4 参照）を開発し、一層の高集積・複合化に布石を打った。
- ③知識 DB や設計プラットフォームの整備により第 2 世代 MEMS への新規参入を支援する環境を整備した。
- ④オリンパスと東大、産総研の協力による SPR センサの実現に代表される様に、プロジェクト活動を通して、企業や大学、公的研究機関の連携が行われたことで、MEMS の研究者・技術者と異分野の研究者との協力関係から新たに展開の可能性が芽生えた。

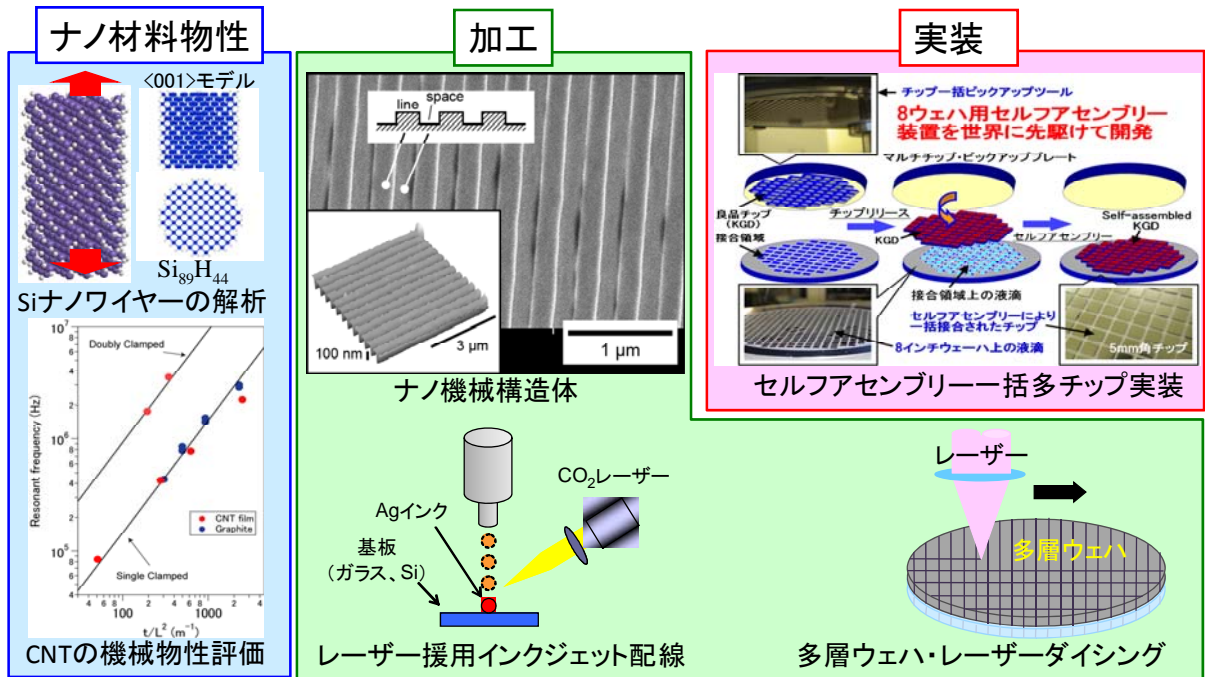


図14. 本プロジェクトで開発された要素技術の例

### (3) 特許の取得

本プロジェクトでは、25件の海外出願を含め、計109件の特許を出願した。特許の内訳については添付資料5-1をご参照願いたい。

### (4) 論文発表・成果の普及

#### ① 論文発表

表3に本プロジェクトに関する論文、口頭発表、学会賞の件数をまとめた。詳細については添付資料5-2をご参照願いたい。

本プロジェクトでは、39件の論文発表、166件の口頭発表を行い13件の学会賞を受賞した。

表3. 論文、口頭発表、学会賞の件数

研究開発項目	論文	発表	学会賞
①MEMS／ナノ	7	32	2
②MEMS／半導体	18	95	9
③MEMS／MEMS	7	33	2
④知識データベース	0	2	0
⑤設計プラットフォーム	8	3	0
合計	40	165	13

②成果普及

マイクロマシン MEMS 展及び Nanotech で計5回のプロジェクト成果展示と3回のプロジェクト成果発表会を行い、成果普及に努めた。また、成果広報用の広報ビデオとパンフレットを作成し、展示会などで配布した。また、これらのビデオやパンフレットは NEDO のホームページにも掲載されており、でもした。また、実施者分を含めて、プレス発表や雑誌、新聞などのメディアへの発表・取材は約20回行われている。

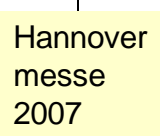
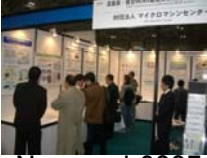






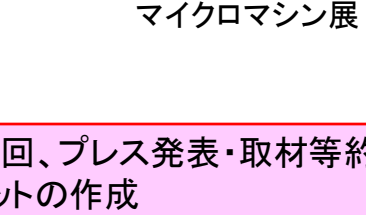

2006年～2007年	2008年	2009年
 Hannover messe 2007	 Nanotech2007	 Nanotech2008
 Hannover messe 2008	 第19回 マイクロマシン展	 第20回 マイクロマシン展
 第17回 マイクロマシン展	 第18回 マイクロマシン展	 第20回 マイクロマシン展
 広報ビデオ パンフレット		
<p>成果展示8回、成果発表3回、プレス発表・取材等約20回、広報ビデオ、パンフレットの作成</p>		

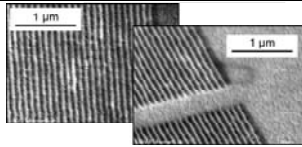
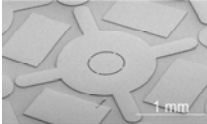
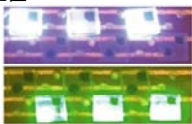
図15. 広報活動

## 2. 各テーマ成果まとめ

達成度の判定基準 ×:目標未達成、△:条件付で目標達成、○:目標達成、◎:目標を大幅に上回る成果

### ①MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

#### (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術 (東京大学)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	直描技術を用いた表面ナノ構造製造技術	①L/S: 50nm ②アスペクト比 1:2 ③面積: 5mm x 5mm	①L/S: 50nm ②アスペクト比 1:2 	○
	3次元曲面形成技術	①傾斜角: 45° ②表面粗さRa: 50nm ③Peak-Valley値: 250nm	①傾斜角: 51° ②Ra: 平面で10 nm、斜面で35 nm ③Peak-Valley値: 200nm 	◎
	平面可変ナノギャップ形成技術、及びギャップ駆動技術	①ギャップ間隔: 80nm ②平面範囲: 50μm x 50μm ③Peak-Valley値: 20nm	①ギャップ間隔: 80nm以下 ②駆動ミラー直径: 500 μm ③Peak-Valley値: 20nm ミラーを静電駆動することによりギャップ間隔変化800 nmを実現。 	○
	スタンピング転写とセルフアライメントを用いた高精度・高密度配置技術	①多種構造の利用 ②配置精度1μm以下 ③面積: 2cm x 2cm	①多種類のMEMS/パーツを同一基板に配置 ②位置精度標準偏差0.6μm ③面積: 5cm x 5cm 低融点ハンダを用いたセルフアライメントを融合し、LEDチップのフレキシブル基板上へのアライメントを実現。 	◎

#### (2) バイオ材料 (タンパク質など) の選択的修飾技術 (産業技術総合研究所)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	分子認識素子の構築	血管内皮細胞増殖因子(VEGF)および過酸化脂質を検出するための分子認識素子の開発	標的物質と特異的に反応し、蛍光を発する分子認識素子の開発に成功  分子認識素子	○
	固定化方法の開発	・分子認識素子を基板上に精密に固定化 ・シグナルの検出を確認	Au基板、ナノピラー基板、ガラス基板上に有機薄膜を介して分子認識素子の固定化に成功。シグナルの検出を確認	○
	MEMS基板の作製および評価	・MEMS構造体中の基板上に分子認識素子を固定化 ・シグナルの検出を確認	東京大学及びオリンパスが作製したMEMS基板上に分子認識素子を固定化→シグナルの検出を確認  オリンパス製バイオセンサ	○
自主目標	検出方法	2種類以上の光学的検出方法に対応した素子の構築	SPR法、蛍光検出法、エバネッセント励起法に対応した素子を開発し、その特性を評価した。	○

(3) ナノ材料 (CNT など) の選択的形成技術 (産業技術総合研究所)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	CNT 選択形成	①サイズ直径：1 $\mu$ m以下或いは厚み制度：0.1 $\mu$ m以内 ②所定の領域（位置精度： $\pm$ 1 $\mu$ m以下）に選択的に形成 ③ナノ機能を発現する	①厚み：70nm以上で100nm精度 ②位置精度： $\pm$ 50nm ③ナノリレーとして動作確認（サイズ：40nm精度）	○
	CNT 構造体 作製	①高アスペクト比（1：10以上） ②高密度充填（充填率：50%以上） の数 $\mu$ mから数百 $\mu$ mスケールの配向CNT構造体	①アスペクト比10 ②充填率：50% サイズ：40nm-100 $\mu$ m（ビームでは1 $\mu$ m-30 $\mu$ m。 （サイズ：40nm精度）	○
	CNTの 架橋率	・架橋率：70%以上	・架橋率：100%	◎
自主	CNT 評価技術	・機械的、化学的特性を評価	・ヤング率、熱拡散率、抵抗率の評価技術を開発し、特性を評価した	○

(4) ナノ機能を組み込んだ MEMS デバイスの製造技術 (三菱電機株式会社)

	項目	目標	評価	備考
基本計画の目標	低温でのナノ材料形成技術	400 $^{\circ}$ C以下	◎	50 $^{\circ}$ C~60 $^{\circ}$ Cで実現
	低損失貫通配線	0.2dB以下	○	0.1dB @15GHzを実現
	スイッチ耐電力性	4W以上	◎	4.5Wを実現 (世界最高レベル)
自主目標	スイッチ 通過損失	0.5dB以下	○	0.5dBを実現
	スイッチ アイソレーション	20dB以上	○	30dBを実現
	貫通配線形成温度	400 $^{\circ}$ C以下	○	210~230 $^{\circ}$ Cで実現

②MEMS /半導体の一体形成技術の開発

(1) MEMS-半導体プロセス統合モノリシック製造技術

・新たなセンシング原理の探索 (立命館大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	半導体センサの微細化により発現する新たなMEMSセンシング原理の探索	製造プロセスは問わないが、1つ以上の新たなMEMSセンシング原理を見出す	第一原理計算によるバンド構造を用いて、任意のキャリア濃度・温度でのピエゾ抵抗効果のシミュレーションが可能な手法を確立。 <001>方位p型Siナノワイヤーで、バルクSiの約10倍のピエゾ抵抗係数が得られる予測を得た。	○
	ナノメカニカル構造の実現とナノ弾性特性の解明	① LSI材料として用いられる厚さ300nm以下の金属シリサイド(WSi)のセンシング素子構造材料としての定量的評価。 ② CNT(産総研)でナノメカニカル構造を形成しその機械・電気特性を測定し、新たなセンシング素子としての可能性を実験的に評価。	①様々な熱処理履歴のWSi薄膜を製作し、硬さ・ヤング率の測定、および、高サイクル疲労試験を実施。その結果、機械量センサとしてSiの3倍の感度が期待でき、繰返し数寿命も $N > 10^{11}$ 回と高く、センサ構造材料としてきわめて有望。 ②CNTは金属に近い特性を示し、ゲージ率は金属の約3倍高い結果を得た。	○
自主目標	ナノスケールシリコンのピエゾ抵抗効果の解明	面方位<100>、長手方向結晶方位<100>、<110>、伝導型p型、目標最小線幅100nmのSiナノワイヤーの製作とピエゾ抵抗特性の評価	集積化プロセス(EB直描)による幅30-500nmのp型Siナノワイヤーを製作(日立)し、I-V特性およびピエゾ抵抗係数の測定を行った。 <100>方位、幅60nmで丸の約2.4倍の縦方向ピエゾ抵抗係数を観測。	○

・半導体モノリシック集積化基盤技術開発 (日立製作所)

項目		目標	結果	評価	備考	
基本計画の目標	製造技術	大面積、狭ギャップ構造	500 $\mu$ m角、0.25 $\mu$ mギャップ	500 $\mu$ m $\times$ 700 $\mu$ m、0.25 $\mu$ mギャップ <sup>1)</sup>	○	1)ダイアフラム
		立体配線の可動構造	0.5 $\mu$ m以下	タマシMEMS 0.2 $\mu$ m幅	◎	
		プロセス封止技術	処理温度450°C以下、PCT試験耐性	450°C以下、PCT、熱衝撃、他	○	
		マルチセンサ混載技術	圧力、モーションセンサ	圧力、モーションセンサ	○	
自主目標	圧力センサ仕様	チップサイズ	2mm $\times$ 2mm以下	1.9 $\times$ 1.7mm 0.9 $\times$ 0.8mm <sup>2)</sup>	◎	2)圧力に機能限定
		消費電流	1.5mA以下	0.7mA(typ.)	◎	
		圧力測定範囲	50~150kPa	50~150kPa <sup>3)</sup>	○	3)サイズで範囲制御
		フオー検知(圧力計測)	分解能:5m以下	分解能:約1m	◎	

(2) MEMS-半導体縦方向配線技術

- ・縦方向集積 MEMS デバイス製造技術の開発 (オムロン)

開発項目	最終目標値	成果	達成度	
①-1 貫通孔形成技術	φ5um 深さ250um (=A/R 50)	・高アスペクト比貫通孔形成条件を確立 ・高アスペクト比貫通孔形成用エッチングマスクの採用 ・高アスペクト比貫通孔側壁への絶縁膜形成方法を確立	・φ5um 深さ250umの貫通孔形成を達成 ・φ5um 深さ250umの側壁絶縁膜形成を達成	○
①-2 貫通孔配線技術	φ5um 深さ250um (=A/R 50)	・高アスペクト比貫通配線形成する専用装置を開発し、高アスペクト貫通配線形成技術を確立	・φ5um 深さ250um の貫通配線形成を達成。2Ω/本の電気抵抗を達成。	○
② ウェハレベル 接合技術	3層電氣的 精度 <±1um	・接合界面として、Si/Si、Si/TEOS、メタル/メタル 等の種々のバリエーションを持つ接合技術を確立 ・装置的工夫とパターン工夫によって高精度アライメント接合技術を確立	・LSIを含む3層ウエハの積層を行い、電氣的導通を達成。 ・最大ズレ量0.8umを確認。	○
	気密封止	・貫通配線付きウエハを用いた封止構造を作製し、接合による気密性を確認	・MIL規格に基づいた試験実施し、リーク量< 5x 10 <sup>-9</sup> Pa・m <sup>3</sup> /sを達成。	◎

- ・配線の自由度を向上できる 3 次元配線構造を持つ高信頼性インターポザル技術の開発

(フジクラ)

	項目	目標	実績	達成度	
基本計画の目標	成微細孔形	孔径	100 μm以下	60 μm	◎
		横方向シフト量	500 μm以上	600 μm	○
		基板厚	300 μm以下	200 μm	○
	導体充填	屈曲(クランク形状)孔	完全充填	完全充填	○
		分岐(Y字形状)孔	完全充填	完全充填	○
		気密性(リークレート)	5 × 10 <sup>-9</sup> Pa・m <sup>3</sup> /sec 以下	1 × 10 <sup>-10</sup> Pa・m <sup>3</sup> /sec以下	◎
	電気特性	抵抗値(クランク孔:径 100 μm、長さ800 μm)	50m Ω 以下	29.4m Ω	◎
ビア間絶縁		1M Ω 以上	10M Ω 以上	◎	
自主目標	電気特性	高周波特性	貫通配線の高周波特性を評価する	40GHzまでの伝送特性を評価した	◎
	試作	インターポザルの試作	インターポザルを試作し、機能を実証する	MEMSデバイスを実装して動作を確認	◎



(3) 半導体横方向配線技術

・高集積 MEMS 擬似 SOC 製造技術の研究開発 (東芝)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	インターチップ配線	配線幅: Line/Space=1 $\mu$ m/1 $\mu$ m	配線幅: Line/Space=1 $\mu$ m/1 $\mu$ m	○
	MEMSデバイス薄型化	デバイス厚: t=100 $\mu$ m	デバイス厚: t=100 $\mu$ m	○
自主目標	ウエハ再構築	ウエハ径: $\phi$ =75mm	ウエハ径: $\phi$ =125mm	◎
	3-D混載MEMS擬似SOC	MDW技術*と段差配線技術の擬似SOC応用検証	産総研・東北大学との共同研究にて実証	○
	加速度センサ	中空封止による動作確認	社内製MEMSチップとのモジュール化	○
	ライトバルブ	要素技術確認	形状確認 動作未検証⇒再チャレンジ	△

・MEMS - 半導体の低温高密度一体化実装技術 (東北大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	セルフアセンブリーを用いたMEMS-LSI一括実装	高密度な低温積層一体化実装技術を確立する	①常温で400 $\mu$ m厚、1mm厚MEMSチップの合わせ精度 $\pm$ 1 $\mu$ m、100 $\mu$ m厚の半導体チップで同 $\pm$ 0.5 $\mu$ m ③8インチウエハ用セルフアセンブリー装置開発 ④8インチウエハに500個以上のチップを一括接合。	◎
自主目標	高密度マイクロバンプ形成	①バンプ寸法: 5 $\mu$ m $\square$ 、厚さ2 $\mu$ m、間隔10 $\mu$ m ②セルフアセンブリーによるマイクロバンプ接合(合わせ精度 $\pm$ 1 $\mu$ m)	①インプリント技術により8インチウエハ上にマイクロバンプを一括形成。5 $\mu$ m $\square$ 、厚さ2 $\mu$ m、間隔10 $\mu$ m ②合わせ精度 $\pm$ 1 $\mu$ mで10,000対のマイクロバンプを一括接合。寸法5 $\mu$ m $\times$ 5 $\mu$ m	○
	チップ乗り越え配線形成	①厚さ400 $\mu$ m以上のMEMSへの乗り越え配線形成 ②100 $\mu$ m厚の半導体チップへの乗り越え配線形成(配線幅: 10 $\mu$ m、配線間隔: 10 $\mu$ m)	①TSV付Siキャップを用いて、400 $\mu$ m厚、1mm厚のMEMSチップに乗り越え配線形成 ②100 $\mu$ m厚の半導体チップへCu乗り越え配線形成(配線幅: 10 $\mu$ m、配線間隔: 15 $\mu$ m)。	△
	チップ上への受動素子形成	①磁性ナノ粒子充填シリコン酸化膜と埋め込みCu配線を用いたインダクタ形成(インダクタンス値増大: 30%) ②High-K膜を用いたキャパシタ形成	①Co磁気ナノドット膜とCuダマシ法を用いてキャビティ付インダクタ作製。(インダクタンス値増大: 約20%) ②HfO <sub>2</sub> 膜を用いてキャパシタ作製形成。	△
	テストモジュール作製	MEMS、LSI、インダクタ、キャパシタ各チップを一体化したテストモジュールの試作	MEMS、LSI、インダクタ、キャパシタ各チップを搭載したテストモジュールを試作し、基本特性を確認。	○

・高速微細配線描画技術（産業技術総合研究所）

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	マテリアル・ダイレクト・ライティング (MDW) 技術の開発	直描線幅: 5~10 $\mu$ m 成膜厚み: 5~10 $\mu$ m 描画速度: 1cm/min以上 成膜速度: 10 $\mu$ m/min以上	線幅: 7~10 $\mu$ m 配線厚み: 5~16 $\mu$ m (重書き無し) 描画速度: 60cm/min 最小配線間隔: 30 $\mu$ m (複数平行配線のギャップ間隔) @Si、ガラス、ポリイミド、セラミックス基板上、粗面基板上への描画も可能、密着強度増	◎
	段差乗り越え直接描画配線技術の開発	段差: 100 $\mu$ m以上 配線プロセス温度: 400°C以下 (以下は自主目標) 段差傾斜角度: 80° 以上 配線表面粗さ: 表皮深さの値の1/10 (Ra=0.1mm以下: 3GHz相当)	段差: 500 $\mu$ m 最大傾斜角度: 84° @ヘッドは基板面に対し垂直固定状態 体積抵抗率: $3 \times 10^{-6} \Omega \cdot \text{cm}$ @ポストアニールなし Ra=60nm以下、コプレーナ型伝送路 (50 $\mu$ m線幅) で40GHzまでの伝送特性を確認。	○
自主目標	低温複合組み立て実装技術の開発	フリップチップ実装接合技術 接合形成温度: 150~200°C 接合寸法: 10~30 $\mu$ m シエアー強度測定 位置合わせ制御条件の最適化	30 $\mu$ m径円錐バンブにより1/80低荷重 無電解めっき法のブリッジ接続により、無加圧かつ60°Cで低温形成 フリップチップ実装精度2 $\mu$ m達成	◎

③MEMS/MEMS の高集積結合技術の開発

(1) 異種材料多層 MEMS 集積化技術 (オリンパス)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	1. 異種材料多層MEMS集積化 (ウエハレベル接合)	基板サイズ: 直径100mm以上、3層以上、異種材料 (シリコン、ガラス、樹脂など) を基板レベルで接合し、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め精度、垂直 (z) 方向: $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下の組立精度で、複数回の接合に耐えられる異種材料多層MEMS集積化技術を開発する。	基板サイズ: 直径100mm、5種の材料で、7層接合、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下、垂直 (z) 方向: $\pm 0.5 \mu\text{m}$ 以下	◎
	2. 機能MEMS基板集積化 (チップレベル接合)	直径100mm以上の基板にその体積が0.5mm <sup>3</sup> 以下の微小な異種部材を2種類以上、面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下の位置決め精度で、実装できる高機能MEMS異種基板集積化技術を開発する。	チップサイズ: 2種の材料を実装 電子部品 (半田付け)、ガラス光学部品 (接着) 面方向: $\pm 1 \mu\text{m}$ 以下 45 $\mu\text{m}$ 狭ピッチ実装	◎
	3. 異種材料多層MEMS集積化の評価技術	10 $\mu\text{m}$ 以下の分解能で局所応力を評価・解析できる異種材料多層MEMS集積化の評価・解析技術を開発する。	分解能: 1 $\mu\text{m}$ 以下	○
	4. 異種材料多層MEMS集積化によるモジュール開発	①~③の技術を応用して、少なくとも3層の異種材料基板を積層・集積化して成る、総厚5mm以下のSPRセンサモジュールと、総体積1cm <sup>3</sup> 以内の大きさの蛍光センサモジュールを作製する。	・SPRセンサ 総厚: 5.9mm (7層) で動作実証。 ・蛍光センサ 総体積: 1cm <sup>3</sup> で動作実証。	◎

(2) ビルドアップ型多層 MEMS 集積化技術

- 機能集積化 MEMS デバイスを実現するビルドアップ型ウエハレベルパッケージング技術の開発 (パナソニック 電工)

	項目	目標	成果	達成度
基本計画の目標	(2)機能化MEMSウエハ接合技術開発	①電子デバイスに機能損傷ない接合、ウエハ接合精度 $\pm 1 \mu m$	①電子デバイスに機能損傷なし、ウエハ接合精度:0.2~1.0 $\mu m$	○
	(3)ビルドアップ型ウエハレベルパッケージー貫工程開発	③研磨、開口加工、チップ実装を繰り返しながらウエハ3層以上を積層集積	③BU-WLP一貫工程プロセスにより4層構造MEMS-LEDパッケージを実現	○
自主目標	(1)機能化MEMSウエハ開発 (熱伝導/光配向/光検知の機能を有するMEMSウエハの開発)	LEDパッケージに必要な下記機能ウエハの開発 ①熱伝導機能ウエハ ②光配向機能ウエハ ③光検知機能ウエハ	①低熱抵抗基板の実現 ②必要な反射率を確保するミラー構造を形成 ③高分解能光検知機能の確認	○
	(2)機能化MEMSウエハ接合技術開発 (素子機能損傷を抑えたウエハレベル高精度接合技術開発)	②ウエハへの低機能損傷LEDチップ実装 ③ポリマーウエハの低温形成	②LEDチップに機能損傷のないウエハレベル実装を実現 ③シリコン3次元加工部へポリマー凹凸形状を低温でミクロンレベル精度で形成	○
	(3)ビルドアップ型ウエハレベルパッケージー貫工程開発 (放熱/光学/光検知機能を集積化したMEMS-LEDパッケージ設計と試作による検証)	①超小型LED/パッケージの設計 ②・低熱抵抗パッケージ設計 ・高分解能光モニタリングパッケージの設計	①超小型/薄型の設計及び試作完了 ②・高放熱パッケージ設計と試作による検証 ・必要な低ノイズ光モニタの試作検証	◎

- 光化合物半導体の高精度接合技術 (横河電機株式会社)

	項目	目標	結果	評価
接合	XY位置合わせ精度	$\pm 1 \mu m$ 以下	$\pm 0.7 \mu m$ 以下	◎
	傾き精度	$\pm 0.05 \text{deg}$ 以下	$\pm 0.05 \text{deg}$ 以下	○
	ギャップ精度	$\pm 0.2 \mu m$ 以下	$\pm 0.2 \mu m$ 以下	○
	接合強度	50gf 以上	100gf 以上	◎
特性	レーザー出力	2mW 以上	2.2mW 以上	○
	波長可変幅	40nm 以上	50nm 以上	◎
	スペクトル線幅	10MHz以下	10MHz以下	○
	偏波特性	偏波方向のジャンプ無し	設計マージンの把握が不十分。今後の課題。	△

(3) 多層ウェハレベル接合体の低ストレスダイシング技術

(レーザー技術総合研究所／東北大学)

	研究項目	目標	成果	達成度
基本計画	多層MEMS構造の切断技術開発	多層構造3種類以上についてレーザダイシング試験を行い、試料の破損率1%以下を達成する。	多層構造3種類以上についてレーザダイシング試験を行い、試料の破損率1%以下を達成。	○
自主目標	MEMS構成材料のレーザ加工・改質特性調査	Siとガラスにおいて1～2μmの波長帯域で、Siにおいて10ns～200nsのパルス幅範囲でレーザ加工・改質特性を確認	広範囲な波長域、パルス幅領域でレーザ加工・改質特性を確認することにより、ガラス/Si積層体に対して新たなダイシング手法を見いだした。	◎
	分割支援構造の評価・設計・製作・検討	破損率を定義・評価できる試料を製作	破損率評価に適宜サンプルを提供	○

④高集積・複合 MEMS 知識データベースの整備 (マイクロマシンセンター)

	目標	達成度	備考
基本計画目標	全研究開発項目に係わる知見のDB化	○	1500件超の知識データをDB化 特許情報4500件超をDB化
	MemsONE知識DBに実装	○	全データをMemsONEデータとして統合
自主目標	知識の体系化	○	ファインMEMS/MemsONEカテゴリの相関マトリックスを構築
	知識データ収集用システム構築	○	Wikiベースの知識データ収集用システムをマイクロマシンセンターに構築
	DB入力・表示機能開発	○	データ入力初期設定・全文検索機能、各種ランキング・新着知識表示を実装
	公開用DBシステムの構築	○	一般ユーザーの利用規約、ユーザーアカウント作成機能等を実装し、マイクロマシンセンターに構築
	MemsONEデータ入力形式に変換	○	変換スクリプトを作成し、全データをMemsONEデータに変換

⑤高集積・複合 MEMS システム化設計プラットフォームの開発（マイクロマシンセンター）  
平成 19 年度の目標

研究項目	19年度目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	生成データ(ネットリスト)を利用した回路計算結果が実デバイスの動作や機械形状の依存性を的確に表現し特性の変化を評価できること	デバイスモデル化終了。CNTカンチレバー及び櫛歯角速度センサ完了。 MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
2. MEMS等価回路モデルの収集・登録	範囲：櫛歯(角速度センサ、アクチュエータ3種類)、梁2種類、平行平板2種類、磁気回路、振動子等価回路モデルコンテンツの数：10件	等価回路モデル化終了。MEMS同士の練成のモデル化について方策を検討H20年度の取り組み課題とした。	○
3. MEMS等価回路モデル閲覧用Webライブラリの構築	等価回路モデルの閲覧及び汎用電子回路シミュレータで利用可能なデータ(ネットリスト)でダウンロード可能なこと	Webライブラリ構築終了。	○
4. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルの検討	Webライブラリシステムに掲載された等価回路モデルの汎用電子回路シミュレータで利用可能なリスト生成に必要なばね定数などの機械構造の特性値を抽出できること	終了。櫛歯角速度センサについて実装含め完了。	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互生成技術調査	3次元CADシステムと等価回路システム間の形状データの相互変換技術に関する課題を明確化できていること	技術課題を抽出しを完了し、相互変換処理の検討を終了した。H20年度の取り組み課題とした。	○

平成 20 年度の目標

研究項目	H20年度開発目標	成果	達成度
1. ファインMEMS等価回路モデルの構築	外力を扱えるモデル3件、および基本的MEMS-MEMS接続モデルを開発し、モデルの検証を完了する。新規MEMS等価回路モデルとして圧電デバイス、音響デバイスの2件開発する。	①櫛歯・平行平板・磁気回路デバイスに関しコンポネント化想定の外力等価回路モデルを開発 ②それらの外力端子を活用した接続モデルを開発 ③櫛歯とバネなどの接続モデル実験的に検証 ④圧電・音響デバイスの外力を扱える等価回路モデルを追加	○
2. MEMSデバイスモデルの等価回路導出と登録、及び文献調査	MEMSデバイスの等価回路導出に関する定式化手法を開発し、等価回路モデルの定式化を完了する。MEMS2008およびセンサシンボを調査し、基礎データを収集、開発対象とするMEMSデバイスコンポーネントを決定する。	①上記に相当する等価回路モデルの定式化と理論的検証を終了。導出法として、特許一件出願。 ②定式化手法は、特許化するとともに、Sensor Symposium08で報告した。 ②MEMSデバイスに関する基礎データを収集、随時開発内容に取り込んだ	○
3. 単位要素モデル、MEMS構成要素モデルによる機械パラメータ等抽出の検討	Webシステムに登録されたMEMS等価回路モデル、およびMEMS-MEMS接続モデルを対象として、その回路定数を決定する為に必要な機械パラメータ、及び電気パラメータのモデル仕様を確定し、パラメータ抽出ソフトの実装およびテストを完了する。	①各デバイス・コンポーネントに対応した各機械パラメータ抽出ソフトを開発した ②この成果の一部は、Sensor Symposium08で報告した。	○
4. 電氣的特性および機械的特性抽出機能の開発	H19年度構築したWebシステムに項目1のMEMS等価回路の生成と周辺回路の接続機能、電気回路シミュレーションの実行環境、および電気・機械的特性抽出機能の実装を完了し、Webシステムを一般に公開する。	①等価回路モデルおよび入力システム、機械等パラメータ抽出ソフト、3DCAD中間データ取り込み、およびSPICEを活用した電気・機械的特性解析モジュールをWebシステムとして作成 ②全体としての、解説書を合わせて収録。 ③H19年度版と合わせ、Web公開を6月末に完了	○
5. 等価回路モデル・3次元CADモデル相互変換の開発	3次元CADシステム(MemsONE)とWebシステム間の形状データ、および材料物性データの相互変換機能の実装を完了し、システム間の連携を確認する。	3次元CADモデルの形状データ・材料物性値の生成とその逆システムを中間ファイルとして扱う方式を開発(MemsONE CADを利用)	○

## IV. 実用化、事業化の見通しについて

### (1) 成果の実用化可能性

#### ① 実用化研究(助成)

各実施者共、目標とした製造技術を開発し、高集積・複合MEMSデバイスを作製し、当初の目標とする性能を得た。 今後は、各社の事業計画に沿って、2011年～2015年の市場投入を目標に開発を継続する。

一例として、横河電機は本プロジェクトで開発された可変波長レーザーを用いた多成分分析計の開発がNEDOのイノベーション推進事業に採択され、今後は分析計のシステム開発として製品化に向けた開発を行う。

#### ② 基礎的・基盤的研究(委託)

基礎的・基盤的研究開発は、次の3つの方向性で実用化を進める。

- 1) 助成先との共同研究継続による要素技術の移管
- 2) 装置メーカーとの共同研究による製造設備としての実用化
- 3) デモ機による加工受託や新規プロジェクトへの参画によるアプリケーションの開拓と応用技術開発

研究開発項目	テーマ名	助成先と共同開発	企業との設備開発	応用技術開発
①MEMS/ナノ	選択的ナノ機械構造体形成技術	○		
	バイオ材料(タンパク質など)の選択的修飾	○		
	ナノ材料(CNTなど)の選択的形成技術			○
②MEMS/ 半導体	MEMS - 半導体プロセス統合モノリシック製造	○		
	MEMS-半導体横方向配線技術-1	○	○	○
	MEMS-半導体横方向配線技術-2		○	
③MEMS/MEMS	多層ウエハレベル接合体の低ストレスダイシング		○	○

### ③知的基盤・標準整備などの研究開発(委託)

知識データベース、設計プラットフォーム共に09年6月よりマイクロマシンセンターのホームページで公開を開始した

#### 1. 知識データベース

- ・9月12日時点でアクセス件数：9万6千件（約1000件／日）
- ・マイクロマシンセンターの自主事業としてデータ更新等を継続

#### 2. 設計プラットフォーム

- ・日本機械学会と電気学会に関連研究会を発足した。(09年9月までの研究会開催：3回)
- ・マイクロマシンセンター内にMEMS等価回路ジェネレータ普及検討委員会を立ち上げ、継続的な普及を進める

## V. 委託テーマの成果詳細

### V-1. 研究開発項目① MEMS/ナノ機能の複合技術の開発

#### (1) 選択的ナノ機械構造体形成技術(東京大学)

##### 1. 研究の概要

###### 特徴

SPR センサを構成する要素として、3つのナノ構造形成技術、および、センサパーツ配置技術の開発を行った。まず、金膜ナノ格子構造を最小 50nm の線幅で構成し、SPR センサの光学系の設計自由度を高め、センサの小型化をはかる基礎技術を確立した。次に、マスク開口面積依存性のシリコンエッチングレート差(RIE-lag)を利用して、最大 51°のスムーズな斜面を形成する技術を確立した。また、スタンピング技術を用いて、シリコンのナノギャップ構造を形成し、近赤外光用 Fabry-Perot 干渉器を開発した。さらに、スタンピング技術を応用し、複数の MEMS パーツを集積対象の基板に高精度に配置する技術を開発した。

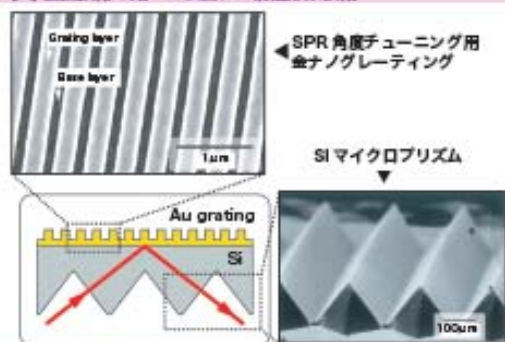
###### 技術内容・特性

金膜上にナノサイズの回折格子を作り、格子間隔の調整によって SPR 角を任意の角度に配置可能であることを確認した。これにより、プリズムの角度や光源・センサの配置における自由度を増やした。RIE-lag 特性を利用した曲面形成の製作ステップは、ボッシュプロセスによる DRIE エッチングと、反応ガスによる等方性エッチングの組み合わせからなる。DRIE エッチングの開口面積とエッチレートの関係を解析し、希望の 3次元構造の CAD データから、開口マスクパターンを自動生成するプログラムを構築した。配置精度の向上と、電気配線の構成を目的として、低融点ハンダを用いたセルフアライメント技術をスタンピング技術に盛り込んだ。

###### 用途・目的

今回開発した3つのナノ機械構造体形成技術とスタンピング配置技術は、タンパク質などの分子をラベルフリー・高感度検出可能な小型 SPR センサを構成するための基礎技術としての活用を想定している。小型 SPR センサを実現することができれば、体調管理のためのヘルスケアチェックを、病院などの特別な機関を利用することなく、家庭で簡易に行うことが可能となる。本事業で開発した技術を用いることで、センサ面である金膜のナノ加工による高機能化、曲面加工による小型プリズムのワンチップ化、さらに、光源 LD や受光部などの素子のスタンピング転写による高精度配置を行い、SPR センサシステムの小型ワンチップ化をはかる。

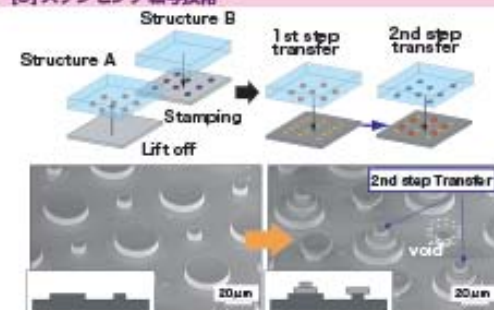
###### [A] 直描技術を用いた表面ナノ構造形成技術



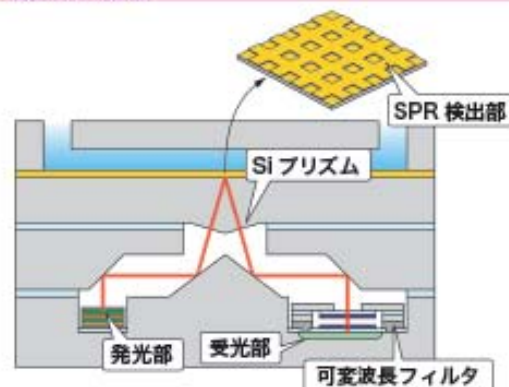
###### [B] 3次元曲面形成技術



###### [C] スタンピング転写技術



###### 環境センサ概要図





## 2. 成果の詳細

### 2-1 直描技術を用いた表面ナノ構造製造技術

#### 2-1-1 研究の目的

SPR 検出部はプリズム底面に 50nm 程度の金属膜 (Au、Ag 等) を真空蒸着で成膜したものである。金属膜表面に計測ターゲットとなる分子を何らかの方法で固定し、その裏面にプリズムを介して光を全反射させると、ある特定の入射角 (共鳴角) で反射光が減衰する。この共鳴現象を SPR と呼ぶ。SPR は、金属のナノオーダの構造によって影響を受けることが知られており、我々の予備的な実験においてもナノ構造による影響が示されている。こうした応答は、金属表面のナノ構造に由来する特徴的なナノ機能といえ、こうした応答を利用することでセンサのさらなる高機能化が見込まれる。そこで、SPR に適したナノ金属膜構造を SPR 検出部に形成するためのコア技術として「① 直描技術を用いた表面ナノ構造製造技術」を研究・開発する。

#### 2-1-2 電子線描画を用いた表面ナノ構造の形成

電子線描画装置を利用し、DRIE エッチング時の条件を最適化することによって、50 nm L/S の製作を実現した。最終的なアスペクト比として、約 2:1 を実現した。

電子線直描により、50 nm L/S の実現をはかるために、高解像ポジレジストである、ZEP520A を用いた。電子線描画によって可能な分解能はレジスト膜厚に依存するため、ZEP520A をアニソール (ZEP520A 用シンナー) と 1:1 の割合で混合し、成膜厚さを 100 nm 程度となるようにした。スピコート直前にシリコンウェハの 1% HF へのディッピングを行い、シリコンウェハ表面に生じる自然酸化膜を除去し、清浄面を保ったままスピコーティングを行った。スピコーティング時のコーティング条件は 5000 rpm x 60 sec とした。電子線直描は、東京大学の描画装置 F5112+VD01 (アドバンテスト、加速電圧 50kV) を用いて行った。その際のドーズ量は  $110 \mu\text{C}/\text{cm}^2$  とした。現像条件を一定にするために、現像液の温度を 20°C に保って現像を 60 秒行った。これにより、再現性よく 50 nm L/S のレジストパターンニングが可能となった。

このパターンをマスクとして用いて、DRIE エッチングを行った。使用した DRIE は、住友精密社の MCU-21 である。DRIE はエッチングとパッシベーションの二つのサイクルを交互に行うことによって、アスペクト比の高い異方性エッチングを実現する装置である。ただし、エッチング時には、シリコンの側壁が等方性エッチングを受けるため、ある程度のスキヤロッピング (えぐれ) が発生する。50 nm L/S のように、エッチングされずに残るべきパターンの幅が微小である場合には、スキヤロッピングによってパターンが破壊されてしまうという問題が生じる (図 1-1)。そこで、DRIE の条件を最適化することによって、スキヤロッピングを低減し、50 nm L/S パターンの製作をはかった。まず、エッチングの異方性を高めるために、パッシベーション用の反応ガスである  $\text{C}_4\text{F}_8$  を当初の 50 sccm

から 80 sccm に増量した。また、パッシベーションガスをエッチングのステップ時にも導入した。また、反応時のチャンバ内の圧力を、当初の 1.2 Pa から 1.0 Pa に下げた。これは、圧力を下げて、反応ガスの平均自由行程を長くすることをはかったものである。圧力が高い場合には反応ガスの平均自由行程が短いために、反応チャンバ内の電場に沿って運動する反応ガス分子が反応直前で周囲の気体によって散乱する。このため、反応ガスがシリコンの側壁をエッチングしてしまう効果が存在し、異方性を悪くする効果がある。しかし、圧力が低い場合には平均自由行程が長くなり、反応ガスは異方性を保ったままシリコンのエッチングに作用することができる。

以上のような手段を講じた結果により実現した、シリコンの 50 nm L/S パターンを図 1-2 に示す。図 1-1 に見られたようなスキヤロッピングがなくなり、垂直性のよい L/S パターン得られた。アスペクト比も 2:1 を達成し、SPR のナノ機能を実現する上での基盤技術となる、表面ナノ構造の製作技術を確立したといえる。

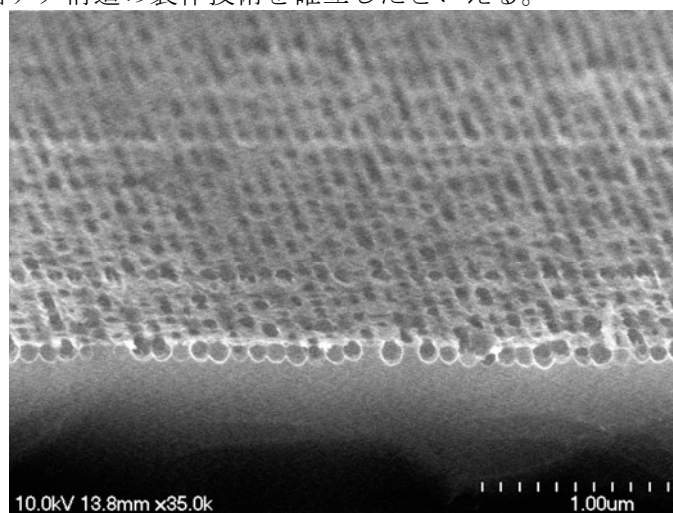


図 1-1 スキヤロッピングによる L/S パターンの崩れ

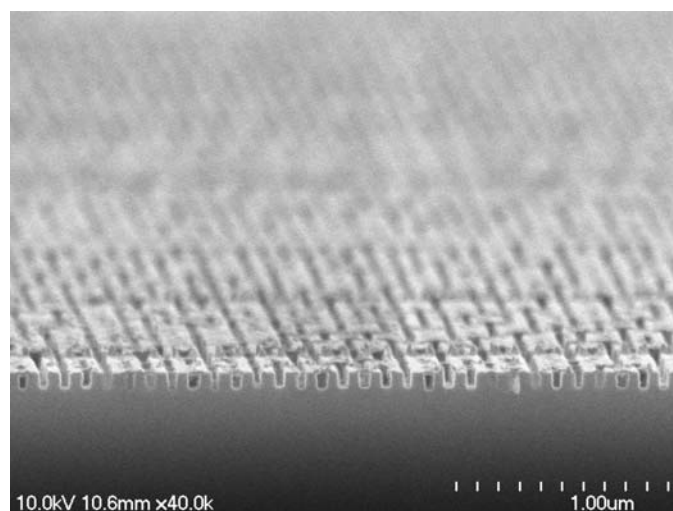


図 1-2 直描技術を用いた 50nm L/S 構造、アスペクト比 2:1

### 2-1-3 シリコンプリズムと金回折格子構造を有した SPR センサ

本項では MEMS(Micro Electro Mechanical Systems)技術を用いて SPR センサを小型・高機能化することを目的として、シリコンプリズムと金回折格子構造を有した SPR センサを試作し、ナノ構造が果たす機能の有効性を検討する。具体的には、シリコンプリズムと近赤外光を使用し、金膜表面にナノ構造を形成した。従来はガラス製であったプリズムを、MEMS プロセスとの親和性が高いシリコンで製作することは、将来的には発光・受光部を含め、システム全体を一体化できる可能性を持つ。さらに、金膜表面にナノ構造を形成することは、SPR 角を任意に決定できるという意味を持ち、これにより設計時の制約が軽減されるだけでなく、マルチチャンネル計測への応用が可能となる

SPRセンサは、金薄膜を蒸着したプリズム上に試料を置き、プリズムを通して金膜に入射した光の反射強度を計測して試料の分析を行う。デバイスのモデルを図1-3(a)に示す。シリコンは可視光に対しては不透明であるが近赤外光は透過するため、近赤外光SPRではプリズムとしてシリコンを用いることが可能となる。金膜の表面に回折格子構造が存在すると、平面の場合のSPR(0次SPR)に加えて新たなSPR( $n$ 次SPR)が生じる。 $n$ 次SPR角は回折格子のピッチを変化させることによって制御可能であり、これを利用するとセンサの高機能化が可能になる。表面プラズモンは金属表面における電荷密度の共鳴であり、金属表面に沿って伝播する。SPRが発生する場合の周波数 $\omega$ と波数 $k_{sp}$ の関係(分散関係)は以下の式(1-1)で表される。

$$k_{sp} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\epsilon_m} \left( \frac{\omega^2 - \omega_p^2}{(\epsilon_m + 1)\omega^2 - \omega_p^2} \right)^{1/2} \quad (1-1)$$

ここで、 $\epsilon_m$ は試料の誘電率、 $c$ は真空中の光速である。また、 $\omega_p$ はプラズマ振動数と呼ばれ、各金属に固有の値である。

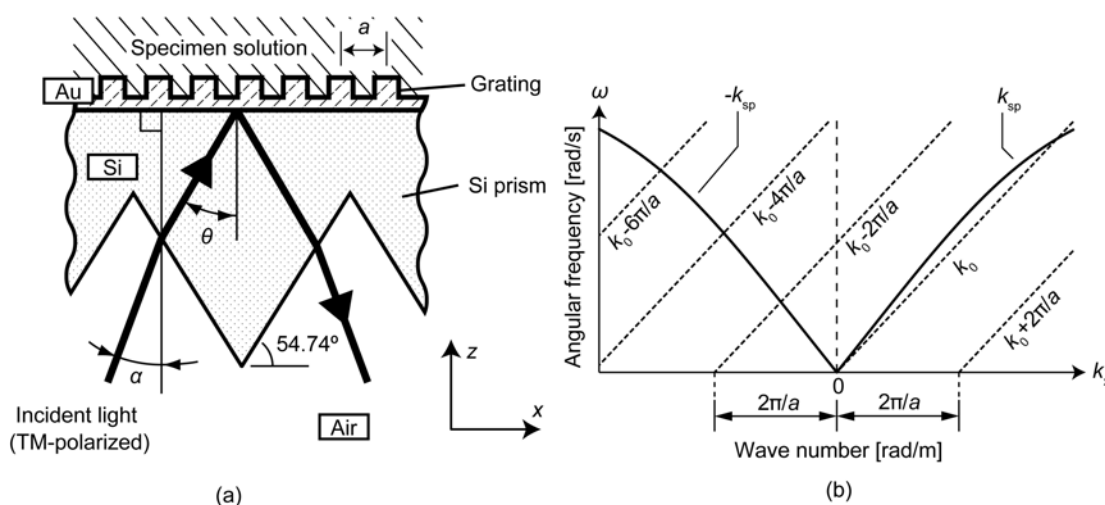


図1-3 (a) デバイスのモデルと (b) SPR分散曲線

SPRを励起するためには、入射光の波数の金膜表面に沿った方向成分 $k_x$ と $k_{sp}$ が一致すればよい。誘電率 $\epsilon_p$ のプリズムを通り、入射角  $\theta$  で入射する光の分散関係は

$$k_x = (c/\omega)\sqrt{\epsilon_p} \sin\theta \quad (1-2)$$

となる。入射光の周波数を $\omega$ とし、 $k_{sp} = k_x$ とすると、式(1-1) 式(1-2)より SPR角 $\theta$ が求まる。

金膜表面に周期 $a$ の回折格子が存在する場合、入射光の分散関係は

$$k_x = (c/\omega)\sqrt{\epsilon_p} \sin\theta + (2\pi n)/a \quad (n=0, \pm 1, \pm 2 \dots) \quad (1-3)$$

となる。例えば式(1-3)で  $n = -1$ におけるSPRが-1次SPRであり、周期 $a$ を変化させることにより、任意の $\theta$ で励起できる (図1-3 (b)参照)。図1-3 (b)に示すように、金膜表面の回折格子によって、平面の場合に生じる0次SPRに加えて-1、-2、-3次のSPRが発生可能であることがわかる。水とエタノール、そして空気が試料として存在する場合の周期 $a$ とSPRディップ位置の関係を図1-4 (a)に示す。以上により、表面ナノ構造によってSPR角を任意に設定できるため、光学系の設計自由度を高めることができる。

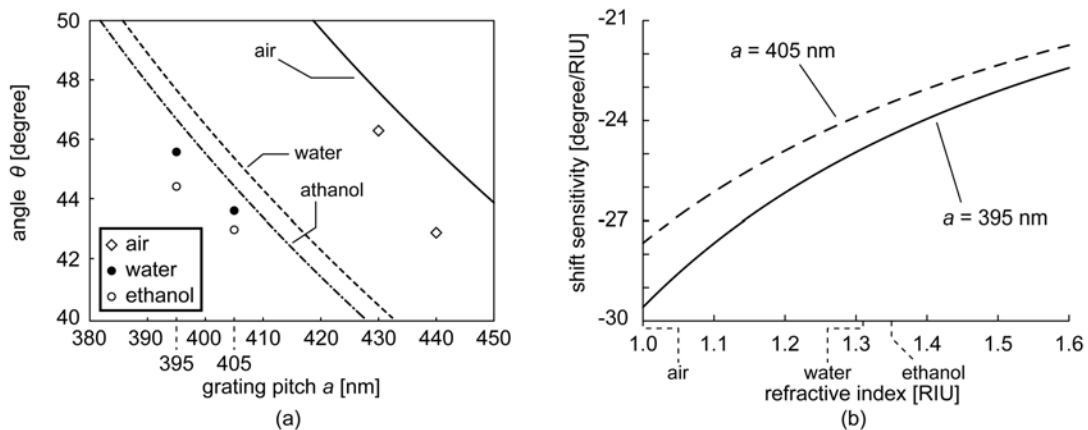


図 1-4 (a)水、エタノール、空気を試料とした場合の本デバイスにおける SPR ディップ角度とグレーティングの周期の関係、(b)一定のグレーティング周期のときの屈折率と角度シフト感度量の関係

MEMS プロセスによって小型のシリコンプリズム SPR センサを製作し、性能評価実験を行った (図 1-5)。両面研磨(100)シリコンウェハを結晶異方性エッチングすることによって、(111)面をシリコンプリズムの斜面としたプリズム形状を作製した。その際に、異方性エッチングには、TMAH (テトラメチルアンモニウム) によるウェットエッチングを利用した。TMAH のエッチングマスクとして利用するために、シリコンウェハの表面には、あらかじめ熱酸化処理による 280 nm 厚さの  $\text{SiO}_2$  膜を形成している。シリコンのエッチング終了後、エッチング面とは反対側の面に金を真空蒸着した。さらにその上に電子線直描技術を用いてレジストにナノパターンニングをほどこし、レジストパターンをリフトオフマスクとして用いることによって、シリコンプリズムと回折格子構造を有する SPR センサを製作し

た。このとき、金膜の厚さは 30 nm、グレーティングの高さは 100 nm とした。

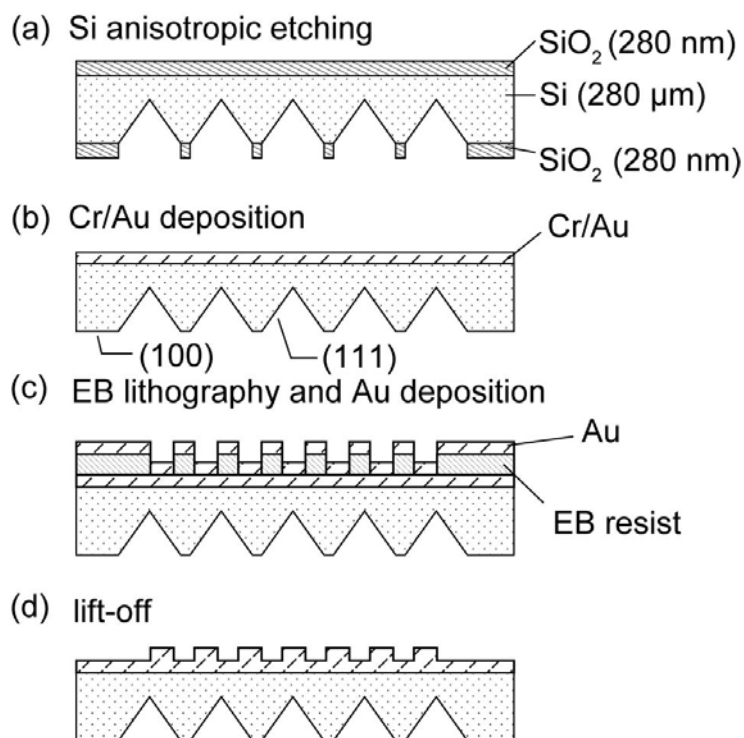


図 1-5 デバイスファブリケーション

製作したシリコンプリズムの SEM 写真を図 1-6 (a)に示す。異方性エッチングによって滑らかな斜面が形成されていることが確認できる。(100) 面に対する (111) 面を利用したため、斜面の角度は図 1-3 (a)に示すように、 $54.74^\circ$ を示す。また、回折格子構造の SEM 写真と AFM で計測した表面プロファイルを図 1-6 (b)(c)に示す。回折格子の凹凸構造がシリコン基板上に正確に形成されていることがわかる。今回の試作では、ピッチ  $a$  が 400 nm 程度の回折格子を製作した。

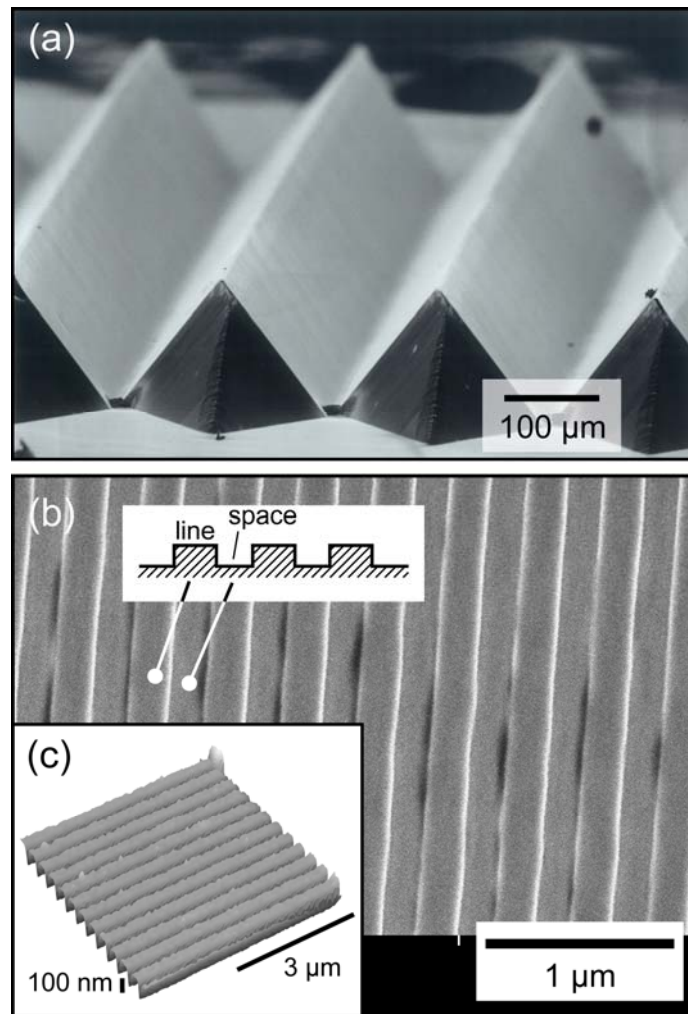


図 1-6 (a)シリコンプリズム SEM 画像、(b)金回折格子構造の SEM 画像、(c)金回折格子構造の AFM 計測による表面プロファイル

製作したセンサを用いて SPR 計測を行うためのセットアップを図 1-7 (a)に示す。SPR センサには近赤外線でありシリコンに対して透過する波長である、1550 nm のレーザー光を照射した。なお、レーザーとセンサの間に偏光子を挟み、センサに入射する光が TM 偏光となるようにしている。センサを分解能 0.05°で回転するステージの上に載せ、SPR 角度計測を行った。計測対象の試料として、水とエタノールを流すための小型流路をセンサに組み込んだ (図 1-7 (b))。

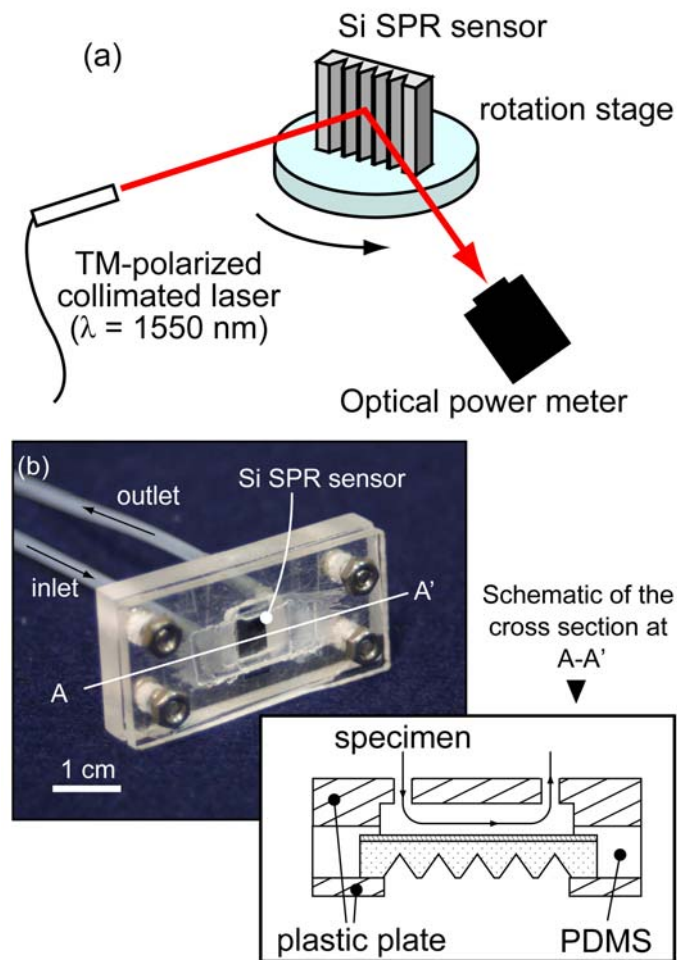


図 1-7 (a) SPR 計測セットアップ、(b)SPR 反応面に形成したマイクロ流路構造

製作したシリコンプリズム SPR センサの金膜表面に回折格子構造を形成し、-1 次 SPR の計測を行った。まず、空気を試料として実験を行い、-1 次 SPR を狙った場所に生成可能かどうかを調べて。このときの格子のピッチは 430 nm、440 nm の 2 種類とした。図 1-8 (a-1) に示すように、 $2.0^\circ$ 異なる位置にディップが生じた。これを RCWA によるシミュレーション結果 (図 1-8 (a-2)) と比較すると、角度の差が 1.9 であり、ほぼ同じ角度差であることがわかった。さらに、ディップが生じた角度位置もほぼ同じであり、回折格子のピッチをコントロールすることによって、狙った位置に SPR ディップを持つてくることが可能であることを確かめた。次に、試料液体を変えて SPR のディップ位置を計測した。このときは、395 nm と 405 nm の回折格子ピッチのデバイスを用いた。その結果、屈折率の違いによる、SPR 位置の違いが計測できることを確認した。(図 1-8 (b))

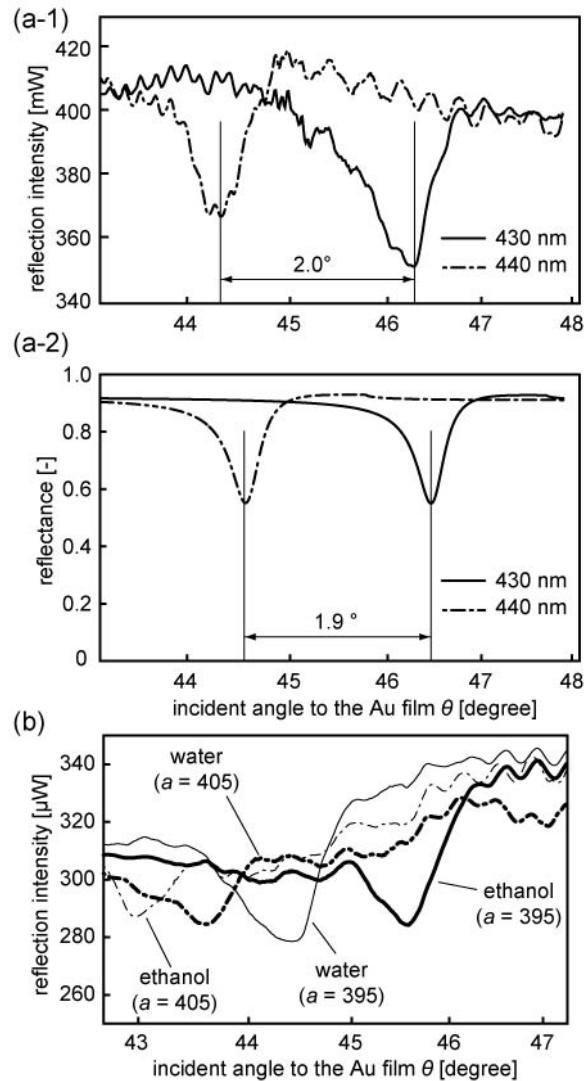


図 1-8(a-1) 空気に対するシリコンプリズム SPR デバイスが示す SPR 角度、(a-2)同一の条件で RCWA シミュレーションを行った結果の SPR 曲線、(b)水とエタノールに対する SPR 曲線

以上により、回折格子構造を付与することによって、SPR のディップが生じる入射角度を自由に設定できることが確認された。SPR センサは光源、流路、ミラーなどの受動光学素子、光検出回路などのさまざまな機能素子が集積して機能を発現するセンサである。したがって、これらの素子の配置を調整し、デバイスの小型化・高密度化をはかる上で、光路の決定に自由度がはかれることは、SPR センサの小型化を実現する上で非常に有効である。このことから、表面ナノ構造の形成によって生じる回折効果を利用して、有効なナノ機能を実現できていると結論することができる。



#### 2-1-4 フレキシブル膜回折格子による可変 SPR センサ

2-1-3では SPR を発生させる金膜上に回折格子構造を構成することによって、SPR 角をチューニングすることが可能であることが判明した。この回折格子構造を、フレキシブルな膜状に形成して、SPR のセンサ面として利用することにより、SPR 角を動的にチューナブルとするセンサを実現することが可能となる。これにより、SPR 計測において、入射光角度を走査することなく、入射角度を固定した状態で、実質的に Angular-Interrogation モードの計測が可能となるので、SPR 計測をセンサ構成の小型化において有用であると考えられる。

フレキシブル SPR センサは、図 1-9 に図示するように、フレキシブル薄膜がシリコンのフレームを差し渡ししているダイアフラム構造を有する。フレキシブル薄膜上には、金の回折格子が構成されており、2-1-3で述べたように、回折格子の波数増大効果によって、適当な角度で SPR 励起可能なデザインとする。この状態で、薄膜にダイアフラムの下側から圧力を加えることで、薄膜部分が膨張方向に力を受ける。そのとき、薄膜上の回折格子は引っ張り方向の力を受けるので、格子ピッチが拡大する。これにより、回折格子による波数増大効果の影響が変化するので、SPR 角をスキャンすることが可能となる。これにより、光の入射角を変える機構を必要とすることなく、Angular-Interrogation モードでの計測と同様に、金膜表面の角度が変わったときの SPR 角を走査して探索することが可能となる。

この構造を構成するために、フレキシブル薄膜によるダイアフラム構造を構成する技術と、フレキシブル薄膜上に金膜を蒸着した回折格子構造を構成する技術を確立する必要がある。このとき、フレキシブル薄膜は、数 10 kPa 程度の低圧力でも十分変形し、弾性域が広い、ポリマー薄膜を利用することとした。また、ポリマー薄膜が、金などの蒸着によって生じる熱によって変化しない、十分な熱耐性を持つことを条件とした。

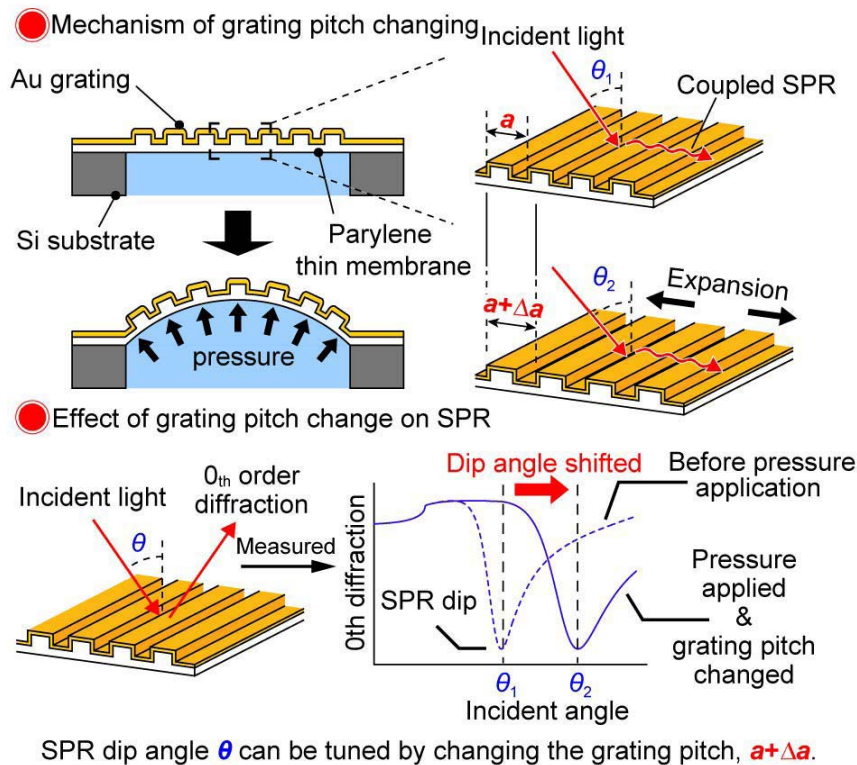


図 1-9 フレキシブル SPR センサの概念図

金薄膜に凹凸をつけて回折格子とするには、あらかじめポリマー薄膜上にサブミクロンサイズのピッチを有する L/S 構造を形成しておき、そこに金を蒸着すればよい。ポリマー薄膜は基本的に絶縁膜であるので、電子線直描には不向きである。これは、熱伝導性が低いためポリマー表面が熱ダメージを受けやすいということ、チャージアップの影響を受けやすいという理由のためである。そこで、ポリマー薄膜上の L/S の整形には、レプリカ法を用いた。図 1-10 に示すように、まずポリマー薄膜用の鋳型となる構造をあらかじめシリコン基板上に電子線直描で形成しておき、その上にポリマーを流し込むことでそのネガパターンを得る手法である。こういった転写の用途にしばしば利用される材料として、PDMS (Polydimethylsiloxane)があるが、PDMS は熱耐性が低いためこの次の製作ステップである真空蒸着による金膜形成時のダメージを乗り越えられないという問題がある。そこで、今回は、Parylene 薄膜を用いて転写を行うこととした。Parylene は電子部品の封止などに利用される材料である。気相中でのコンフォーマルな表面成膜を特徴としており、細かい隙間にも入り込みやすい特徴を有する、今回の用途には適当な成膜特性を有している。金の蒸着などの熱程度であれば、変形などを生じず、十分な耐性を示す。図 1-10 (1)に示すように電子線直描で製作した、電子線レジストの凹凸パターンの上に Parylene 薄膜を成膜し、基板から Parylene を Peel off することで得た構造を図 1-10 (3)に示す。同心円 400 nm L/S (Line and space)パターンを、パリレン上に構成した。パターンに欠損なく、転写可能

であることを確認した。Peel off の際の剥離ダメージを低減するために、今回は、レジストパターンをアセトン中で溶解させた上での Peel off を行った。この方法は、鋳型の繰り返し利用ができないという難点を有するが、鋳型の表面化学組成や凹凸パターンの側壁のなめらかさなどの点を改善することで、鋳型を壊すことなく Peel off をさせる方法が実用化されているポリマーも存在しており、条件探索により鋳型の繰り返し利用は今回の方法に関しても可能であると考えられる。

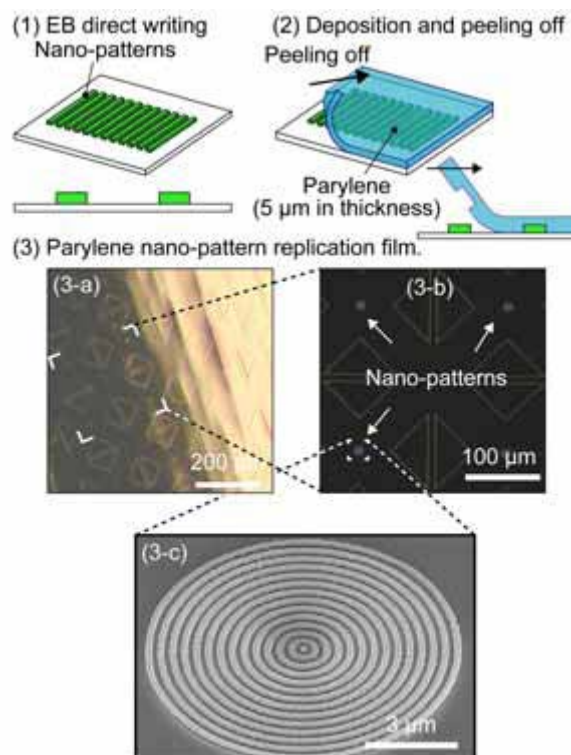


図 1-10 フレキシブル膜へのナノパターンの構成方法

SPR 用の回折格子に適用する前に、パリレン転写法のパターン転写特性を評価した。電子線直描によって製作した、単純なレジスト L/S パターン上（レジスト膜厚 75 nm）に Parylene-C を 5 μm 成膜し、Peel off を行い、転写パリレンパターンを得た。その後、鋳型パターン（Master）と転写後パリレンパターンの形状の誤差を、SEM 画像をもとに画像処理によって算出し、評価指標として用いた。図 1-11 にそのときの評価に用いたパターンのパラメータと、実際の鋳型パターンとパリレンパターンの SEM 画像を示す。今回は、パラメータとして、L/S のピッチとそのときの Line と Space の比率（Duty 比）をパラメータとした。ピッチは 400~2000 nm の範囲とし、Duty 比は 1/4~5/8 まで 4 パターン用意した。鋳型とパリレンパターンでは、凹凸のネガポジが反転するので、この場合の Duty 比の定義に用いる Line と Space は、それぞれパリレンパターンにおいて凸、凹となるべき箇所の幅のことである。

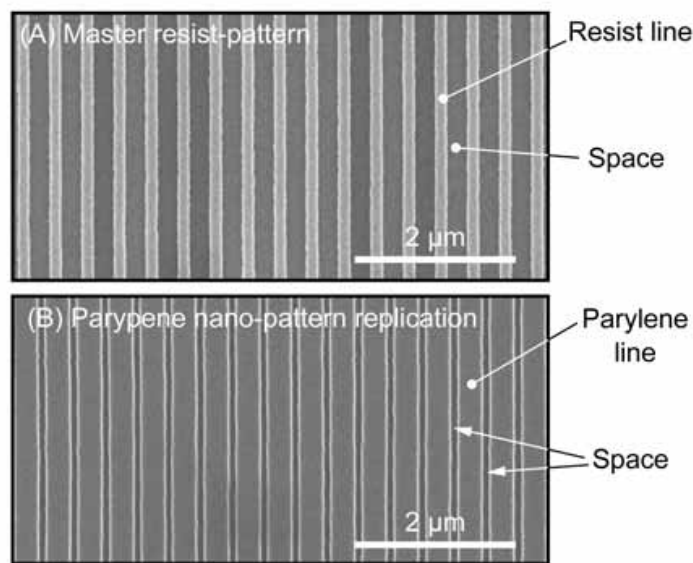
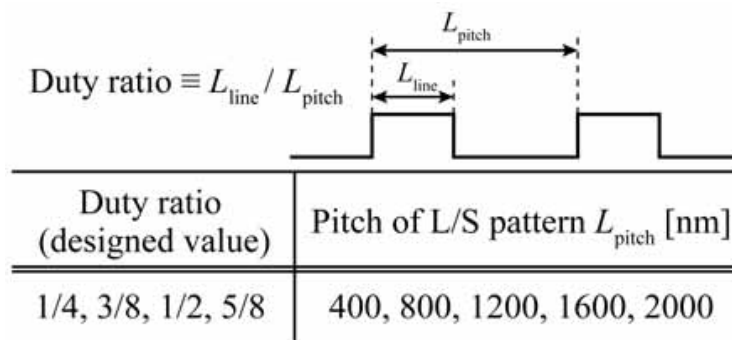


図 1-11 転写性能の評価

SEM 画像を用いた転写評価の結果を図 1-12 と図 1-13 に示す。図 1-12 は、鑄型パターンとパリレンパターンの転写前後におけるピッチの変化を示すグラフで、図 1-13 は転写後の L/S 幅がどのように変わるかという点を示したものである。図 1-12 の点線は、転写前後でピッチが変化していない場合を意味する。すべてのラインがその線よりも上側に存在しており、転写によってパリレンパターンは鑄型よりも Line の部分が太くなる、もしくは Space 部分が細くなるという傾向を有することがわかる。また、ピッチが小さいほど Duty 比の変化が大きいことが伺える。さらに、図 1-13 は、横軸にパターンのピッチ、縦軸に鑄型とパリレンパターンの Line の幅の差を取ったものである。これを見ると、図 1-12 に見られたような、ピッチによる変動は存在せず、むしろパターンによらず、ほぼ 50~70nm 程度の一定の値をとることがわかる。この結果から、Line 部分の膨張は単位幅あたりの長さに対して生じるのではなく、パターンによらず、ほぼ一定の値膨張していることが示唆される。これは、例えばエッジ部分での局所的な膨張が作用していることが、可能性として考えられる。

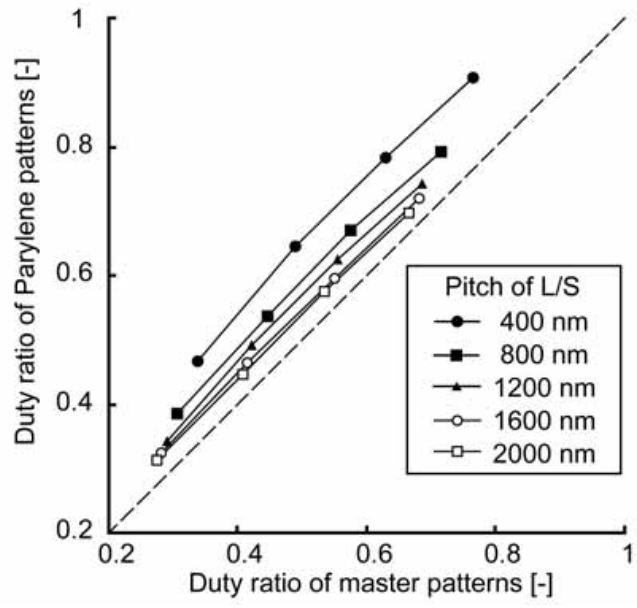


図 1-12 転写後のピッチの変化

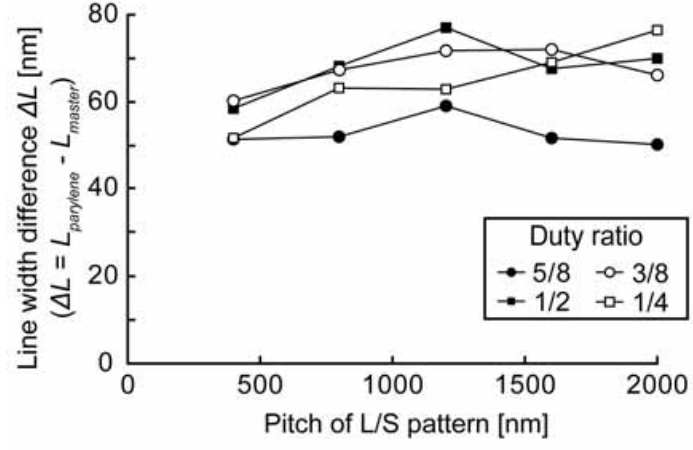


図 1-13 転写後の L/S 幅の変化

また、高さ方向のパターンの変化に関して、AFM を用いたトポグラフィーの評価による検証を行った。前述したように、今回用いた鋳型レジストパターンのレジスト厚さは 75 nm である。Duty 比 1/4 の L/S 200, 250, 300 nm の 3 パターンの鋳型パターンから転写したパaryleneパターンの AFM 断面トポグラフィーを図 1-14 に示す。横幅方向のピッチに関しては鋳型との誤差が見られたパaryleneパターンであるが、高さ方向に関しては、鋳型とほぼ同じ、75 nm 程度のパターン高さを示すことがわかった。

以上の評価により、パarylene転写法によるパターン誤差の程度が判明したので、以下のフレキシブル SPR センサの製作においてはこの知見を利用した。

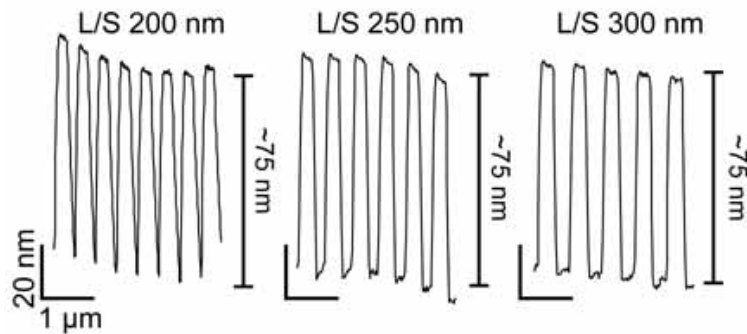


図 1-14 異なる L/S 転写パターン of AFM 断面プロファイル

今回、Parylene を利用したのは、PDMS などの材料と比較して、Parylene が金蒸着などの際に生じる熱に耐性を有することが理由であると述べたが、実際にどの程度金属膜の蒸着によって表面の形状が影響を受けるかについて、簡易的な比較評価を行った。図 1-15 は同心円状のナノパターンが 4 つの矢印パターンに囲まれている形状のパリレンと PDMS パターンの上に金の抵抗加熱による蒸着を行ったものである。PDMS には幅  $50\ \mu\text{m}$  程度の皺が、左上から右下に向かってジグザグに走っているのが見て取れる。一方で、パリレンパターンの方は、フラットな表面がフラットなまま維持されており、金の蒸着を行っても、表面が熱によって変形するといった問題が生じないことがわかる。この簡易的比較評価からも、パリレンを用いることの有効性がわかる。

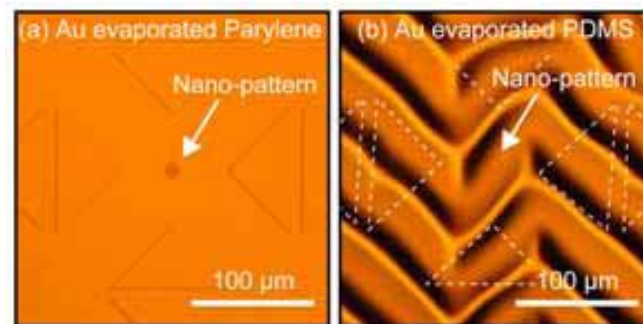


図 1-15 金蒸着による Parylene と PDMS における熱耐性の比較

次に、Parylene ナノパターン上に金膜を蒸着したときに、実際にこのデバイス上で SPR を発生可能かどうかということと、ディップ位置を回折格子の格子定数によって狙った位置に配置可能かどうかという点について評価した。図 1-16 に金を EB 蒸着によって  $225\ \text{nm}$  蒸着したパリレン回折格子の光学写真と SEM 写真を示す。ピッチによって異なる波長の回折光を明瞭に見ることができ、反射率が十分高い回折格子が形成できていることがわかる。

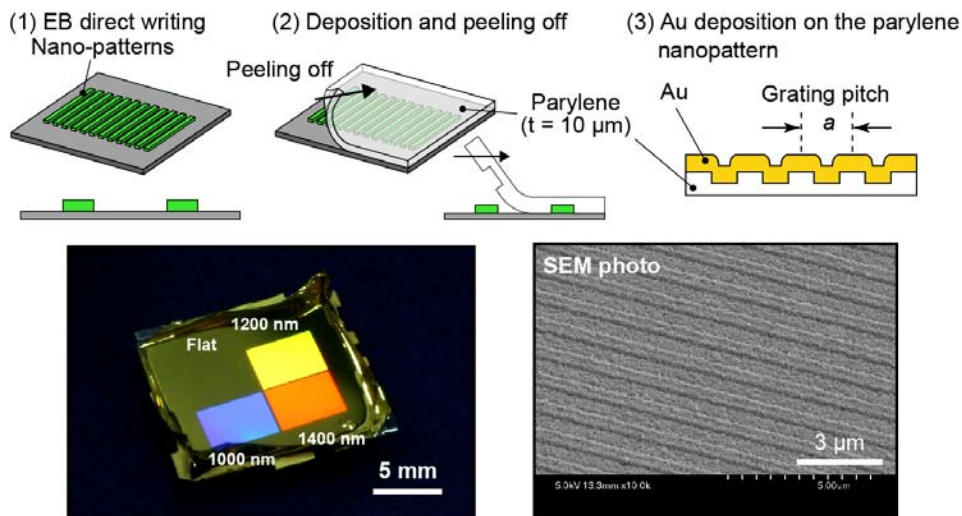


図 1-16 パリレン転写法により製作した金膜回折格子構造

SPR 計測の手順と、その結果を図 1-17 に示す。SPR 計測は、図 1-16 の回折格子を図 1-17(a)に示す計測セットアップに組み込んで行った。回折格子を回転ステージ上に設置し、TM 偏向したレーザダイオード ( $\lambda = 675 \text{ nm}$ ) を回折格子の上に照射して、デバイスを回転させながら、そのときの反射光を光パワーメーター (ADVANTEST, Q82214) で計測した。レーザダイオードの入射強度は、アパーチャーを光路中に入れて光スポットサイズを小さくしたこともあり、ほぼ  $200 \mu\text{W}$  程度の弱めの強度であった。なお、このときのデバイスは、回折格子を構成する Line が図 1-17 の紙面を垂直に貫くように配置している。このとき得られた典型的な SPR カーブを図 1-17 (b)に示す。横軸が光入射角度で、縦軸がそのときの正規化された反射光強度である。このときの回折格子のピッチは、 $1500 \text{ nm}$  であった。角度が浅いほうから、 $10^\circ$ 、 $20^\circ$ 、 $40^\circ$ 、そして  $50^\circ$  の近辺にディップが計 4 つ観察できた。この結果から、パリレン転写法による回折格子を用いて、SPR を励起することが可能であるといえる。

さらに、2-1-3 の回折格子の格子定数と波数の関係の議論を用いて、回折格子のピッチとそのときの SPR が発生する角度位置の関係を算出した。そして、上述の  $1500 \text{ nm}$  の回折格子に加えて、 $1000 \text{ nm}$ 、 $1100 \text{ nm}$ 、 $1200 \text{ nm}$ 、 $1300 \text{ nm}$ 、 $1400 \text{ nm}$  のピッチの回折格子を製作し、そのそれぞれの SPR カーブにおける SPR 角を実験的に求めた。その両者を同一のグラフにプロットしたものを図 1-17 (c)に示す。実験的に求められた SPR 角の位置が、理論的に予測された位置と、高い整合性を持っていることがわかる。なお、各理論線上の  $n$  の数は、その SPR 角を生み出している回折格子の次数を表している。 $1200 \text{ nm}$  ピッチの回折格子に関しては、 $n = -2$  に対応する SPR 角のプロットが存在しないが、これは SPR 計測時のスキャンレンジが  $7^\circ \sim 55^\circ$  程度であったため、SPR 角度がそのレンジ外になってしまったためである。さらに  $1300 \text{ nm}$  ピッチの回折格子に関してプロット点がないのは、このピッチに関しては、 $n = 1, -3$  の二つの SPR 角度がほぼ同じであるため、二つの SPR カー

ブが重なり合い、両者の SPR 角を実験値から算出することができなかつたためである。

以上により、パリレン転写法を用いて製作した回折格子を利用することにより、理論的に予測された位置に精度よく SPR 角を配置することができることが判明した。

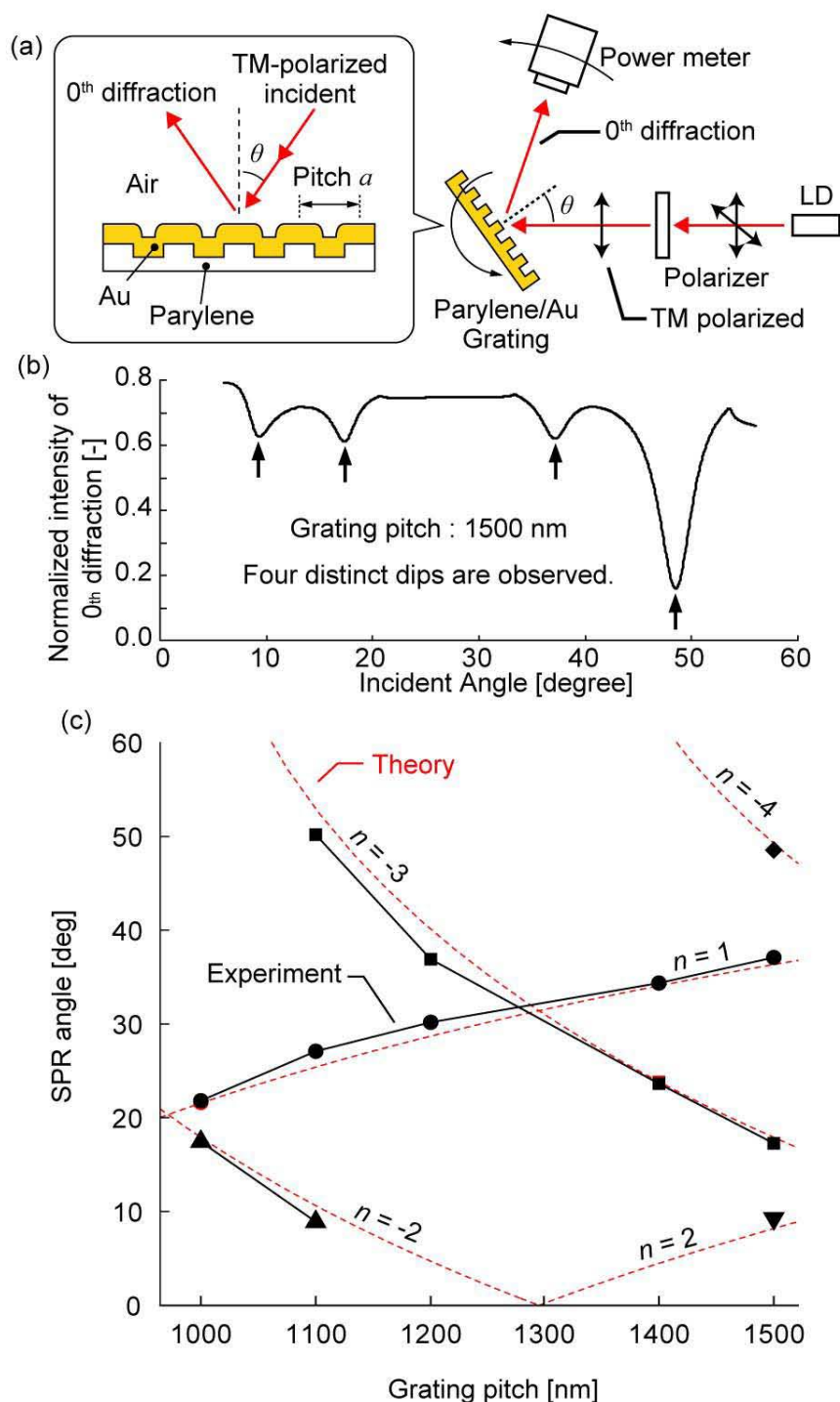


図 1-17 パリレン転写法で製作した金膜回折格子構造における SPR 角度位置の検出



パリレン上へのナノパターン構成方法が確立し、SPR 計測に利用可能であることが判明したので、当初の目標である、フレキシブル薄膜によるダイアフラム構造の製作に移る。ナノパターンを持つフレキシブル薄膜を直接的に差し渡し構造状に構成するのは難しいので、2段階に分けて製作を行った。まず、パリレン上への転写法による回折格子パターンの形成で、これは上記のパリレン転写プロセスをそのまま用いる。そして、2つ目のステップとして、回折格子薄膜をダイアフラム構造とするために、パリレン熱ボンディングの手法を用いる。パリレンがコーティングされた表面同士を、圧力と熱を加えて一定時間密着した状態を保てば、パリレンが接着剤となって二つの表面がボンディングされる現象が知られている。これを利用して、図 1-18 に示す手順で、フレキシブル回折格子薄膜を用いたダイアフラム構造を形成する。まず、ダイアフラムのフレームとなる構造を DRIE によりシリコン貫通穴構造によって作成し、その表面をパリレンでコーティングしておく。なお、シリコンとパリレンの密着性は良くないため、シリコン表面にシランカップリング剤のコーティングを行い、密着性の向上をはかった。次に、すでに用意していた、リリース前のパリレン転写基板（図 1-18 の 2.A）のパリレン側を、シリコン貫通穴構造と密着させる。密着のためにボンディング専用のジグを用いてボンディング面に約 1.5 MPa の圧力をかけ、酸化を防ぐためにアルゴン雰囲気下でホットプレート上に置き、160℃で 1 時間加熱してボンディングを行った。ボンディング完了後に、鋳型パターンのレジストを溶解するために、アセトンにデバイスを数時間程度浸漬し、リリースを行うことで（図 1-18 (4)）ダイアフラム構造のデバイスを得た。図 1-18 (4)右の写真にあるように、グレーティングがシリコンフレーム上に配置されており、問題なく回折光を出していることがわかる。

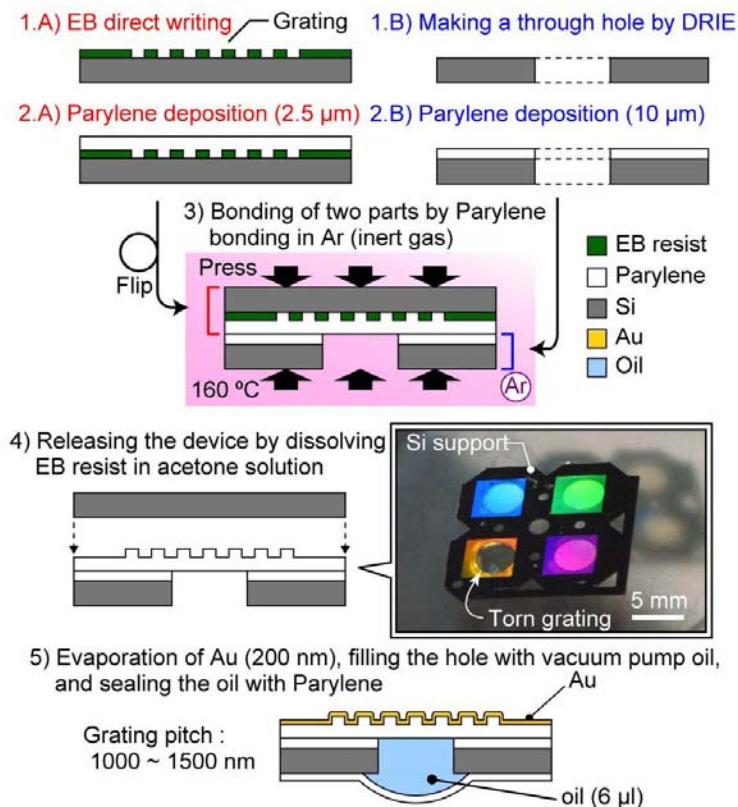


図 1-18 フレキシブル SPR センサの製作プロセス

図 1-19 は、図 1-18 で製作したグレーティング上に、金薄膜を真空蒸着によって成膜した図である。金蒸着後もダイアフラム構造は特にたわんだりする問題は見られなかった。図中で示しているように、回折格子の部分のみが回折光を出していることが見て取れる。

このフレキシブル薄膜を用いたダイアフラム構造を用いて、フレキシブル薄膜に圧力をかけたときの膜中央部の高さ変位を計測した。ダイアフラムのデザインは、図 1-19 のものとは異なり、上面から見たときのダイアフラム形状は一辺 8 mm の正方形形状である。ダイアフラムのフレキシブル膜の膜厚は、パリレンの成膜パリレンの分量を変えることで、3 種類のものを用意した。それぞれ、図中の■が 2.5 μm、●が 4.5 μm、○が 8.5 μm に相当する膜厚を有する。このパリレンのダイアフラムに対して空気圧を加え、そのときの変位をレーザ 3 次元形状計測機 (Keyence, VK-9700) で計測した。図 1-20 の Displacement が 450 μm のときに、3 者とも破断した。フレキシブル膜は、圧力に対して単調増加の傾向を示し、20 kPa 程度の圧力コントロールにより、変位量を制御可能であることが判明した。

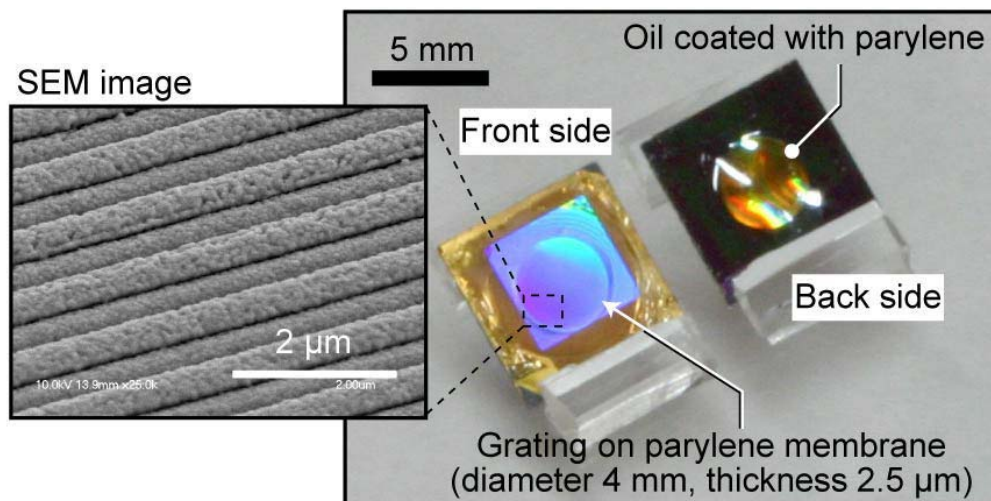


図 1-19 フレキシブル SPR センサの写真

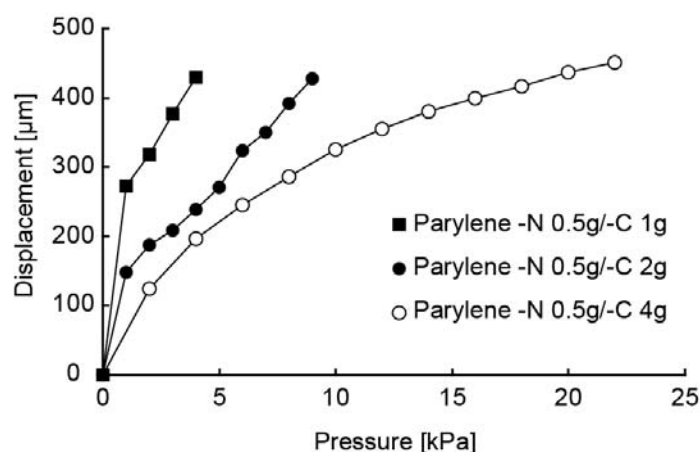


図 1-20 フレキシブル SPR センサのに圧力を加えたときの膜中央の変位

最終的なデバイス評価実験として、圧力を印加した状態での SPR 計測を行った。圧力を変化させ、そのときの SPR 角度の変化を計測した。実験は、図 1-17 とほぼ同様の実験セットアップを利用して行った。このときの SPR カーブを図 1-21 に示す。グラフからわかるように、圧力を印加することによって、膜が膨張し、SPR 角がシフトしていることがわかる。このとき用いたのは、膜のデザインが一边 8 mm のタイプのフレキシブル膜であり、膜厚は 8.5  $\mu\text{m}$  のものを用いた。17 kPa の圧力を印加することで、SPR 角を 0.2°程度シフトさせることに成功した。これは、タンパク質などの付着による変位量と同程度のレンジの走査が可能となることを意味しており、十分 SPR 計測において実用的な値であるといえる。なお、このとき、圧力印加によって膜のスフェリカルな変形によって光の当たり方が変化する現象が見られたので、その効果を防ぐために光路中にアパーチャーを置

いて光スポット直径を 300  $\mu\text{m}$  程度に絞り、変形の効果を最小化した。また、膜の膨張にともなって、光が膜の中心部に当たらないおそれがあるので、各圧力印加値それぞれにおいてデバイスの位置を微調整し、各計測圧力印加時において、デバイスが角度回転しても、光スポットが必ずデバイスの膜中心を貫くようにした。

以上により、SPR 計測におけるナノ構造の有効性と、その構造をフレキシブル膜上に構成することの有効性を確認した。今回のデバイス構成では、膜の膨張に応じて、デバイスの位置微調整を必要としたが、回折格子ピッチをコントロールすることによって、SPR 角を  $0^\circ$  に配置することも可能である。そうすれば、膜膨張時においても、光と膜中心の位置関係は変化しないので、微調整を必要とせず走査機能を有した SPR デバイスを構成することが可能となる。

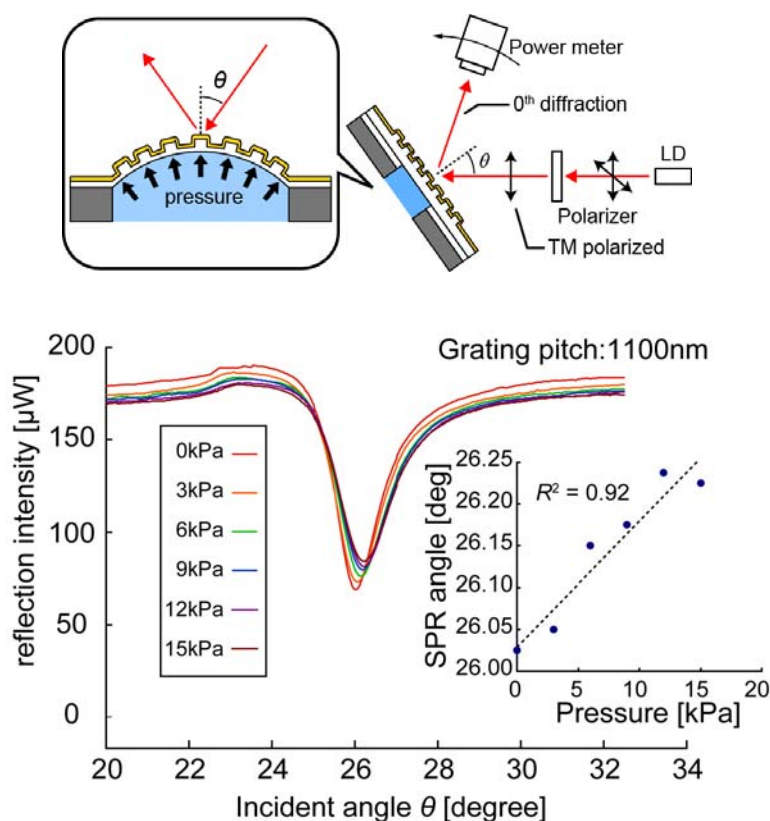


図 1-21 圧力印加時の SPR 角度の変化

### 2-1-5 ナノピラー構造による感度増大効果を用いた SPR センサ

SPR センサは金薄膜に照射した光の反射光強度をもとに、物質を検知する。その際、光によって金膜近傍に生じる電場領域中のタンパク質が検出される。検出対象のタンパク質を電場領域中に捕捉するために、抗体膜を金膜上に成膜してタンパク質を吸着するなどの手法が用いられている。通常、抗体膜の厚さは 10 nm 程度であるため、SPR センサは金

膜面上のせいぜい数 10 nm 程度の厚さを持つ領域の屈折率変化のみを計測している。ところが、SPR は金膜表面から数 100 nm の遠方まで届く電磁場であり、従来の SPR センサでこの電磁場全体を有効に活用してきたとはいえない。近年では、さらに電磁場の到達距離が 1  $\mu\text{m}$  と長い、長距離 SPR と呼ばれる高感度な計測方法が注目されており、従来の方法では折角の高感度なセンシング手法を十分に活用できないという恐れが存在する。

そこで、従来のような金膜表面だけでなく、電場領域全体をタンパク質の補足領域として利用する方法を着想した (図 1-22)。SPR 電場領域と同程度の厚みを持つ MEMS ナノピラー構造を構成し、その壁面をタンパク質吸着面として利用する。図 1-22 (b) に示すように、ナノピラー壁面に抗体分子を配置した状態で、ピラー間にタンパク質を含む試料溶液を流すことで、抗体へのタンパク質の吸着をはかる。このときに、ナノピラーを微細かつ高密度に構成することによって、単位 SPR 面積において補足するタンパク質の量を、通常の平面型の SPR センサと比べ数倍程度へと飛躍的な増量をはかることが可能である。

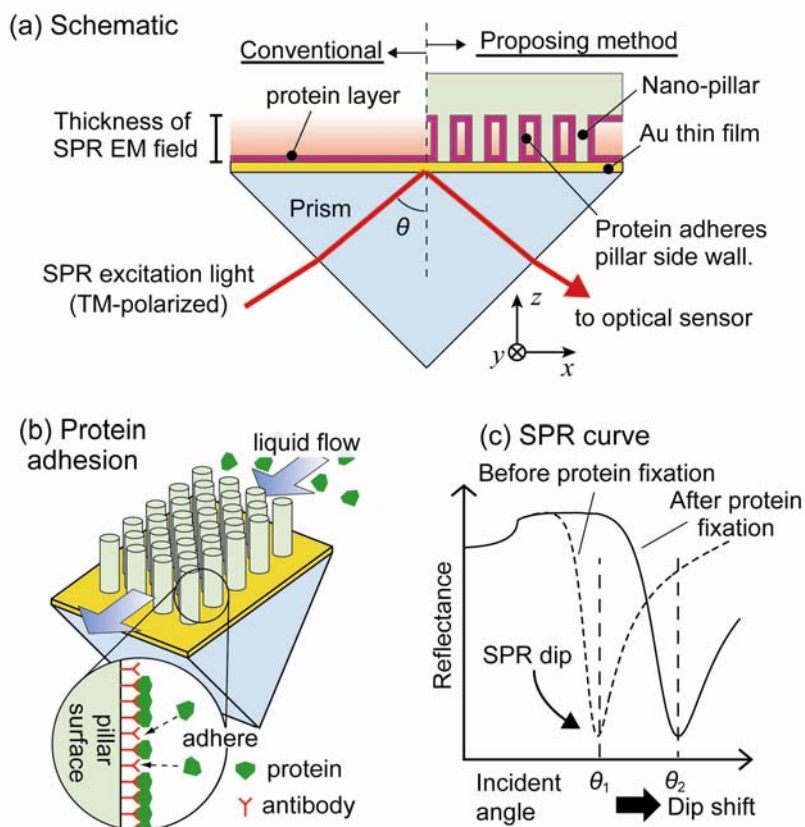


図 1-22 ナノピラー構造による感度増大の模式図

この方法の検証用としては、プリズムに直接金膜を成膜しただけの従来型の SPR センサを用いる。まず、RCWA シミュレーションによって、金膜表面からどの程度の距離までが屈折率変化に対して感受性のある領域かを検証した。検証に用いたシミュレーションモデル図 1-23 (a) に示す。プリズムとして、今回は SF11 という高屈折率硝材を用いた。光源

の波長も実験に用いた 675 nm を採用した。プリズム上に厚さ 40 nm の金膜を形成し、周囲が水である場合において、タンパク質（屈折率 1.5）の厚さを変えたときの SPR 曲線をシミュレーションした。これにより、どの程度のタンパク質厚さまで SPR 角度のシフトが生じるかを調べた。その結果を図 1-23 (b)に示す。これを見ると、SPR 角度はタンパク質厚さの増大によって大きなシフト量の変化を見せることがわかる。しかし、50 nm 以降は厚みの増大に対して、それまでと比較すると変化量が徐々に低減していることがわかる。しかし、それでもタンパク質膜厚 200 nm 程度においても、依然として SPR 角がタンパク質量の増大によって変化することが示されており、金膜表面から数 100 nm の電場領域の活用が、SPR 角度変化量を増大する上で有効であることが確認できる。

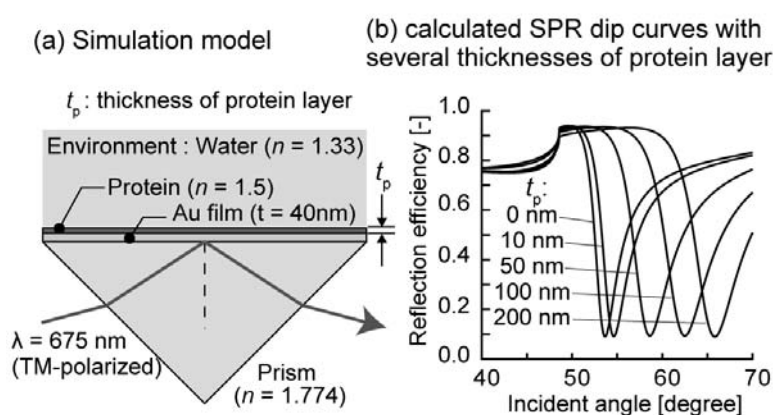


図 1-23 SPR の感度域のひろがり

上記のシミュレーションは 2 次元 RCWA によるものであったが、図 1-22 に示したような金膜平面にアレイ状に並ぶピラーの効果を検証するためには、3 次元シミュレーションを行う必要がある。そこで、3 次元 RCWA のシミュレーションモデルを図 1-24 のように構成した。後述する、実験的に製作したナノピラー構造にあわせて、ナノピラーアレイのピッチを 200 nm に設定し、ナノピラーの断面形状を 100 nm x 100 nm の矩形形状、ピラーの高さを 500 nm とした。また、ナノピラーの材質は SiO<sub>2</sub> とし、ナノピラー表面をタンパク質が覆う構造とした。ナノピラーの材質を SiO<sub>2</sub> としたのは、予備的な計算からピラー構造が誘電体でなければ SPR が生じないという理由と、シリコンのナノ構造を熱酸化処理して完全にガラス化することにより SiO<sub>2</sub> が得られるからである。ピラーはシリコンウェハ表面にナノ加工を施して製作することを考えているため、製作後ピラーを金膜面に押し付けて使用することを前提とした。そのため、ナノピラーの上部は SiO<sub>2</sub> の薄膜を介してシリコンに接続している。

以上のようなシミュレーションモデルを用いて、通常の SPR センサと比較した場合の SPR 角度のタンパク質付着前後におけるシフト量の変化を計算した。その結果を図 1-25 に示す。計算においては、金膜表面を水が覆った状態で、金膜表面に屈折率が 1.5 のタン

パク質が 10 nm 成膜されたときの SPR カーブを計算した。この結果、当初の予想と整合した、ナノピラーSPR デバイスの方が、角度シフト量が 2 倍程度に増大しているという結果が得られた。この結果から、ナノピラーSPR のアプローチが、感度増大に対して有効であることが確認された。なお、従来型の SPR センサと比較して、ナノピラーSPR の角度位置が若干高い角度のところにあるのは、 $\text{SiO}_2$  の屈折率が水と比較すると高いため (1.54 程度)、金膜表面の平均的な屈折率がピラー無しの状態と比較すると高めにあるからである。

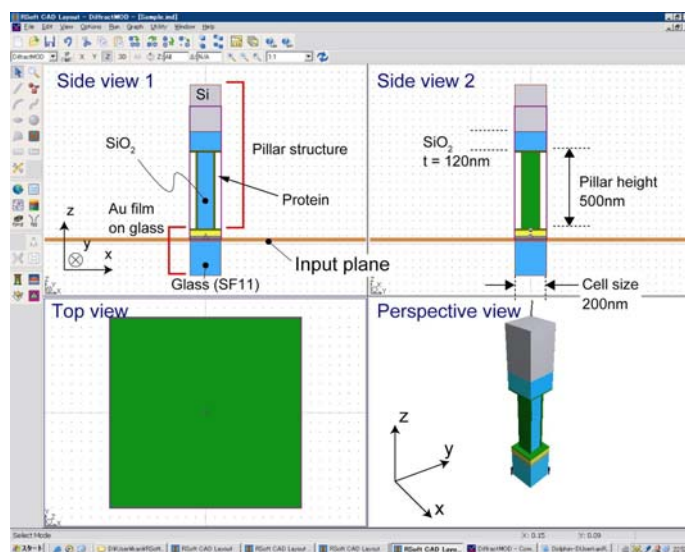


図 1-24 ナノピラーシミュレーション用 3 次元 RCWA モデル

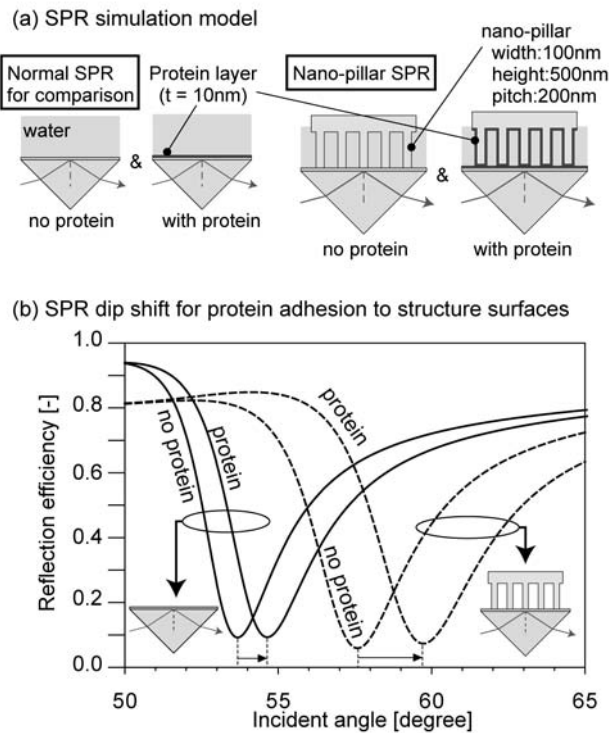


図 1-25 通常の SPR センサとナノピラー-SPR センサのタンパク質付着前後における SPR カーブの比較

以上を踏まえて、実際のナノピラー構造の製作を行った。ナノピラーチップのデザインを図 1-26 に示す。ナノピラーチップは、約 1.5 cm x 1.3 cm のサイズを有する。ナノピラー領域のサイズは、2 mm x 8 mm であり、この領域にピッチ 200 nm、高さ 1  $\mu$ m のナノピラー構造がアレイ状に存在する。ナノピラー構造中にタンパク質溶液が流れる必要があるため、ピラー構造を有するチップには流路構造を作り込み、さらに溶液の注入・排出を可能とするためのウェハ貫通穴を流路の両末端に形成した。製作したナノピラーチップの SEM 画像を図 1-27 に示す。白く示された部分がナノピラー領域である。ナノピラーだけで流路を構成すると、流路抵抗が大きくなりすぎることと、ナノピラー全体に試料が行き渡らないおそれがあったので、ナノピラーの間には 10  $\mu$ m 幅程度の流路を 250  $\mu$ m 間隔で組み込んでいる。材料にはシリコンウェハを用いたが、表面ナノ加工を行った後、シリコンに熱酸化処理を加えることで、ピラー部分を完全に SiO<sub>2</sub> 化した。



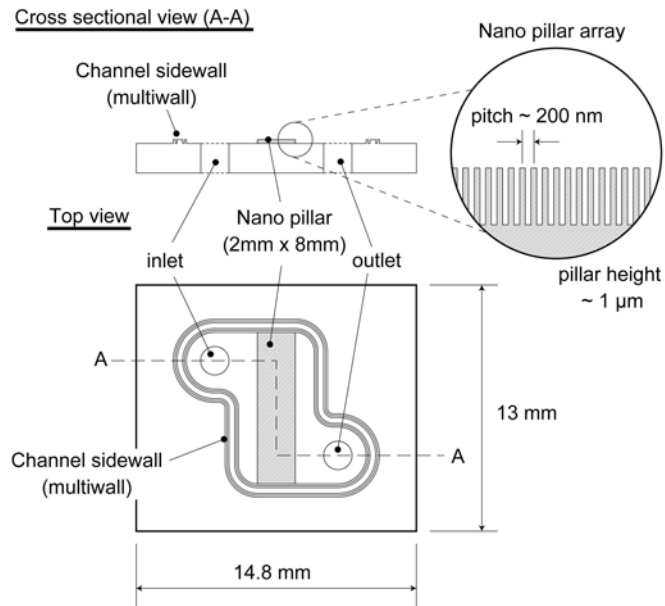


図 1-26 ナノピラーチップのデザイン

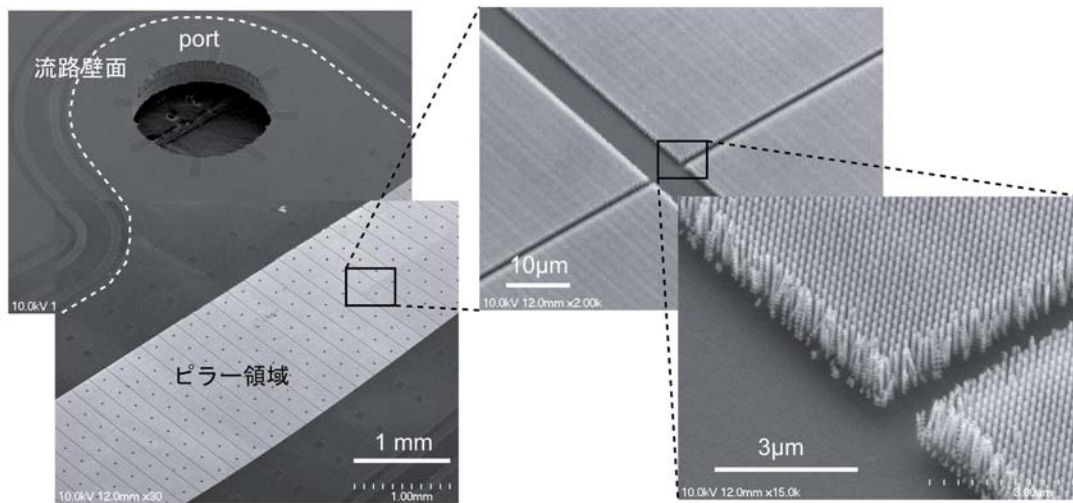


図 1-27 ナノピラーチップの SEM 画像

ナノピラー部分の断面 SEM 画像を図 1-28 に示す。左上の画像は、シリコンに表面ナノ加工を施した状態のナノピラーアレイの状態を示す。ピラーが 100 nm 以下の間隔を隔てて、200 nm ピッチでアレイ状に存在しているのがわかる。ピラーの側壁に規則的な凹凸形状が見られるが、これはシリコンを DRIE でエッチングする際についたスキヤロップの跡である。このデバイスに対しては、パッシベーション・エッチングのサイクルを 5 サイクル繰り返したが、その繰り返回数に対応する数のくびれが認められる。また、

この構造を熱酸化してガラス化した後に、表面にパリレンコーティングを施したものが右下の図である。ピラーの根元部分からさらに 200 nm 程度熱酸化されているのが認められた。ピラー一本の太さが 100 nm 程度なので、ピラーが完全に熱酸化されていることが、これからも推測される。

なお、パリレンコーティングは、構造表面をコンフォーマルに覆う、ポリマーの気相コーティングの手法である。ナノの隙間にも入り込む性能に優れているため、擬似的なタンパク質膜として、後述の予備実験に用いた。この図でも、ピラーの根元部分まで、むらなくコーティングしていることが見て取れる。このとき、パリレンには Parylene-N を用いた。

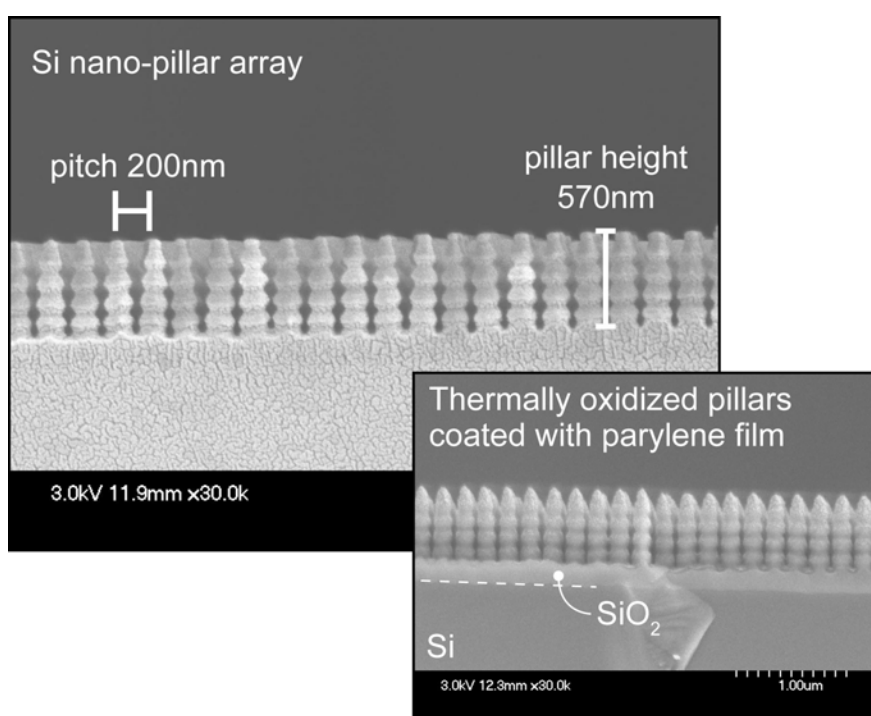


図 1-28 ナノピラー部分の断面図 SEM 画像

ナノピラーチップをプリズムとアセンブルするために、ジグを開発した。本デバイスでは、ナノピラーが金膜面と密着する必要があるため、プリズムを固定してナノピラーに圧力をかけるためのジグが不可欠である。図 1-29 にジグと、それを用いたアセンブルの様子を示す。プリズム硝材には、高屈折率ガラスである SF11 を用いた。これは、ナノピラーを用いると、金膜面近傍における平均的な屈折率がナノピラーの SiO<sub>2</sub> の分だけ高くなってしまったため、BK7 といった一般的な 1.5 程度の屈折率を持つプリズムを利用すると、SPR 角度が高くなりすぎるために計測に支障をきたすためである。したがって、SPR 角度をなるべく低く計測しやすい角度に抑えるために、高屈折率ガラスを用いている。プリズムには、EB 蒸着装置で金を 40 nm 成膜した。金を成膜したプリズムを、45° の陵をはさん

で固定するジグで固定し、その金面に密着するようにピラーをアルミのプレートで押し付ける。SPR 実験のときの溶液付与のために、アルミのプレートには、ナノピラーチップの inlet/outlet に対応した位置にネジが切っており、図 1-29 の右下図にあるようにテフロンチューブを接続可能とした。今回は、溶液がナノピラーを横切って流れる流路構成をとっているため、溶液にかける圧力を非常に高くする必要があった。そのため、液漏れを防ぐために機密性を高めておくことが必要であり、テフロンチューブと inlet/outlet の接続部にはパッキン付きの接続ポートを利用している。

ナノピラー部分と金の密着の度合いは、どの程度アルミプレートのネジをしめるかに依存している。密着の判断は、金膜越しにナノピラー部分を見たときの、干渉膜の消失を確認することで行った（図 1-30）。密着が不十分の場合には、ナノピラー部分と金の間に干渉膜が存在する。可視光の場合、ナノピラーと金膜の間隔が約 130 nm を切るあたりで干渉膜が消失するので、この消失を確認して十分密着の良好性を確認してから実験を行った。この方法により、再現性よくナノピラーによる SPR 実験を行うことが可能となった。

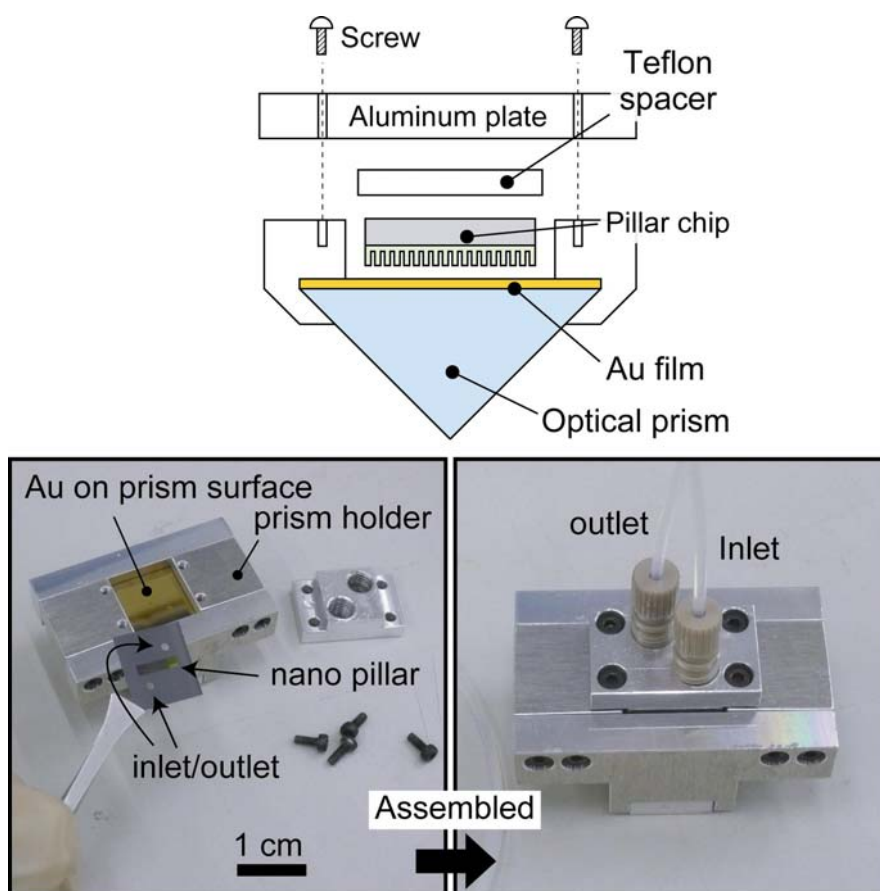


図 1-29 ナノピラーチップのプリズムとのアセンブル

まず、ピラーによって実際に感度が増大するかどうかを、タンパク質を用いて実験する前に前述のパリレン膜による、擬似的なタンパク質膜形成によって確かめた(図 1-31)。単純にプリズム上に金膜をつけた従来型の SPR センサと、ナノピラーを有する SPR センサに関して、Parylene-N 膜の成膜前後における SPR ディップ角度位置を計測して比較を行った。SEM による観察では、Parylene-N の成膜厚さは 15 nm 程度であった。

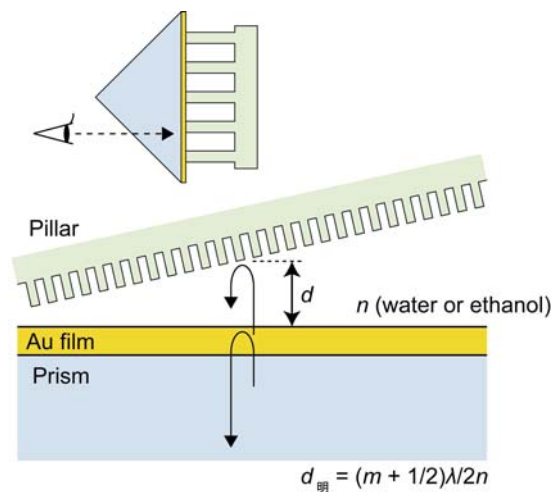


図 1-30 干渉膜観察による密着性の確認

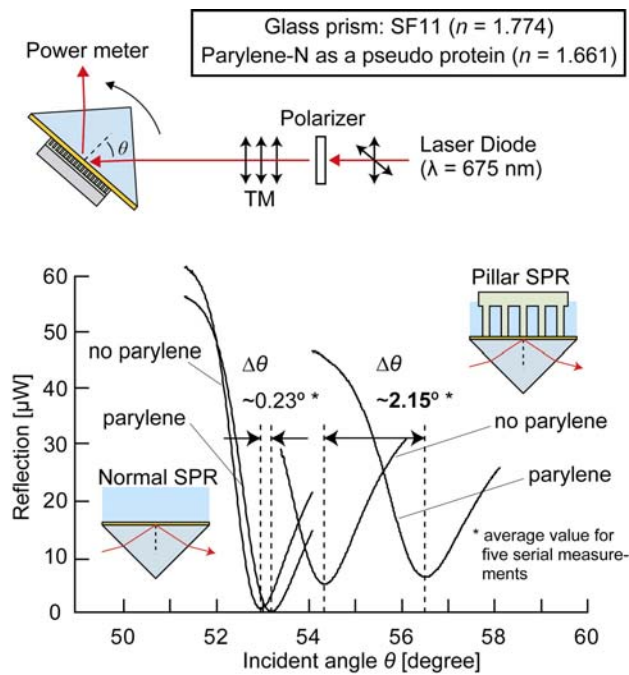


図 1-31 擬似タンパク質膜による SPR 感度増大検証実験

ナノピラー以外の部分に関しては、プリズムの材料、金膜の条件などの条件は揃えて行った。Parylene-N 成膜前後ともに、実験においては金膜表面を水に浸した条件で行った。このときには、流路を使わず、金膜表面に水が保持される状態で実験を行った。さらに、実験に際しては、Parylene-N の成膜前後で従来型 SPR センサのプリズムは継続して従来型の SPR 計測に用い、ナノピラー用に用いたプリズムは継続してナノピラー計測用に用いた。これは、プリズムと金膜の個性による計測への影響を避けるためである。結果を見ると、Parylene-N 成膜前後で、従来型 SPR センサの角度変化量は  $0.23^\circ$  であったのに対して、ナノピラー-SPR の角度変化量は  $2.15^\circ$  と、10 倍近い増大を示した。この結果から、ナノピラー-SPR のアプローチの有効性を基本的に確認することができた。

次に、液体をピラーチップに流しながら、液体を交換しつつ計測を行った。液体の駆動にはシリンジポンプを用いた。液体の駆動時には  $3 \mu\text{l}/\text{min}$  程度の流量で送液を行い、SPR 計測時には送液をストップすることとした。これは、液体を流した状態で SPR を計測すると、計測値にノイズが入ることがわかったための措置である。この原因としては、ナノピラーの流路抵抗が高いために、液体を流すとナノピラーの前段部分に滞留する液体の圧力がナノピラーとプリズムを引き離す方向に作用し、SPR 角度が低角度方向にシフトしてしまうからだと推測される。さらに、この状態で液体を流し続けると、シーリング圧の閾値を越えることに起因する液体の流出に起因すると思われる、急激な圧力の低下により、再びナノピラーとプリズムが密着し、SPR 角度が元に戻るという現象が見られる。この解決のためには、ナノ流路におけるスムーズな送液技術の確立が必要となるが、現段階ではこの解決は難しいため、送液を一時的にストップする方法によって暫定的な解決をはかっている。

タンパク質を用いた計測に移る前に、ナノピラー-SPR センサの屈折率感度を調べた。屈折率調整液として、NaCl 濃度を変化させた水溶液を用意し、この溶液に対する SPR 角度の変化を計測することで、感度の算出を行った。なお、これらの実験はすべて  $24^\circ$  の条件下で行った。また、先ほどの計測とはことなり、継続的に SPR の角度位置をモニタリングして実験を行う必要があるため、Visual C++を用いて、経時的にディップ角度をトラッキングするプログラムを作成した。その結果を図 1-32 に示す。水からスタートして、1 w% NaCl から 4 w% NaCl まで、1 w% 刻みで SPR 角度を計測した。この結果を、横軸を屈折率、縦軸を角度シフト量としてプロットしたグラフを図 1-33 に示す。左側のグラフが RCWA シミュレーションによるもの、右側のグラフが実測の値である。実験のグラフが示すように、ナノピラー-SPR センサの角度シフト量は屈折率変化に対して線形に変化していることがわかる。

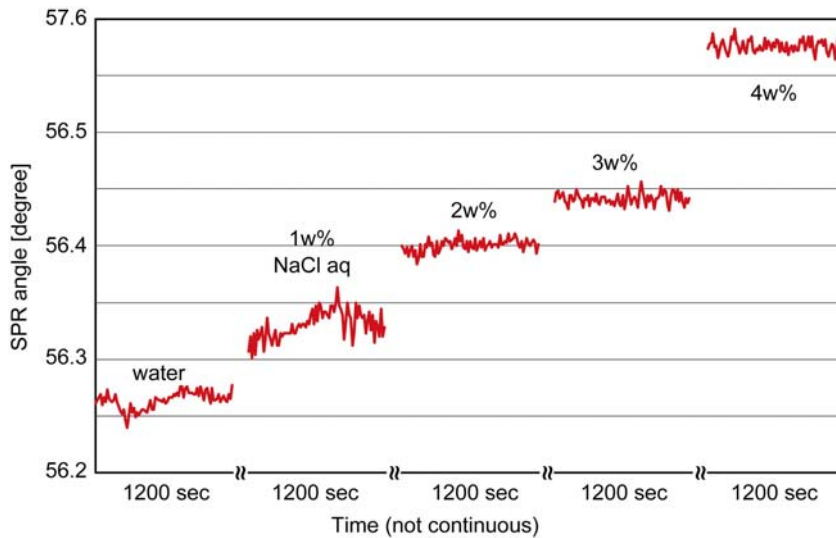


図 1-32 NaCl aq に対するナノピラーSPR のディップ位置の変化

シミュレーションから、バルクの溶液交換を行った場合の屈折率変化は、ナノピラー SPR センサの方が従来の SPR と比較すると若干低くなることが示唆される。これは、ナノピラーが存在する場合には、ナノピラーが金膜表面を占める体積の分だけ液体の交換がなされないことから説明可能である。例えば、ナノピラーが金膜表面の体積の 50%を占めていた場合、金表面の溶液が水から塩水に代わったとき、SPR は 50%の体積については屈折率変化が生じているが、残り 50%に関しては屈折率が変化していないと感ずることになる。したがって、ナノピラーが存在する分だけ、バルクの溶液変化にともなう屈折率変化は低く感じられることとなる。一方で、従来型の SPR センサの場合には、ナノピラーが存在しないので、溶液の変化にともなう屈折率変化は 100%の割合で感受することになる。この直感的な解釈は、実験データでも裏付けられる。図 1-33 の右グラフに示されるように、実験的にもナノピラーSPR の方が低い感度を示していることがわかる。これは、ナノピラーが SPR の電場領域に存在していることによって生じる現象であるため、ナノピラーが有効に機能していることを示すデータである。

シミュレーションと実験結果を比較すると、従来型 SPR に関しては、シミュレーションによる屈折率変化に対する角度変化の感度は  $62.49 \text{ degree RIU}^{-1}$  であるのに対し、実験値は若干高く  $66.20 \text{ degree RIU}^{-1}$  を示している。ただしその差は絶対値の 1 割未満であるため、実験値とシミュレーションの整合性は高いといえる。一方、ナノピラーSPR に関しては、シミュレーションの値が  $55.34 \text{ degree RIU}^{-1}$  であるのに対し、実験値はやや低い  $36.15 \text{ degree RIU}^{-1}$  となっている。これは、シミュレーションのモデルが、図 1-24 に示すように、単純矩形型の形状を採用しており、実際の形状をモデル化するのが難しい点に起因すると考えられる。実際のデバイスでは、ピラーが空間を占める密度がモデルよりも高くなっているため、シミュレーションの方の感度が高めに示されている可能性がある。ただし、シミュレーシ

ョンが示すような、屈折率変化に対する角度変化の線形的な変化が、従来型、ナノピラー型ともに実験的に確認できているため、計測値は有意義な結果を示しているといえる。

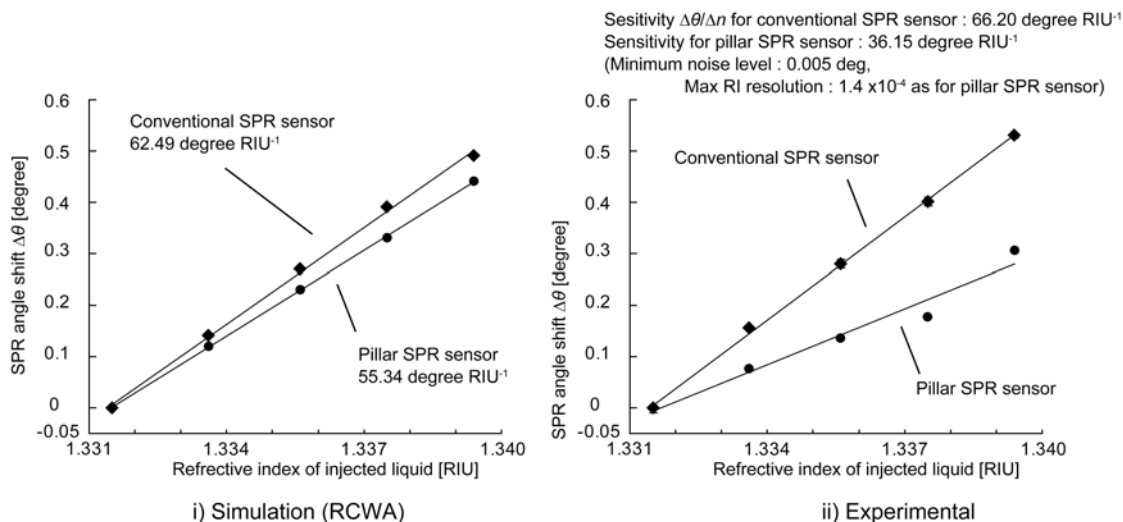


図 1-33 SPR センサの屈折率感度のシミュレーションと実測値

タンパク質を用いた計測を行うために、ナノピラー表面へのタンパク質修飾を行った (図 1-34)。今回使用するタンパク質は **Avidin** である。検出ターゲットの反応として、広く用いられている **Avidin・Biotin** による特異性吸着を選択した。ナノピラーの基板に **Parylene** の一種である **DixAM** を成膜し、その後基板をアミノ基修飾用の **Biotin** 溶液に 1 時間浸漬することによって、**DixAM** 表面を **Biotin** 修飾した。**DixAM** は表面にアミノ基を持つタイプの **Parylene** であり、下地の材料にかかわらず、デバイス表面をアミノ基でコーティングすることを可能である材料である。ナノピラー-SPR センサのように、**SiO<sub>2</sub>** と金 が混在する表面組成の際には有用な材料である。これを用いることで、チオール類とシランカップリング剤双方で金表面、**SiO<sub>2</sub>** 表面を順次修飾する必要なく、一度にアミノ基修飾可能となる。**Biotin** 修飾を行った後に、**HEPES** バッファで基板を洗浄し、次に **FITC** (蛍光色素) タグのついた **Avidin** 溶液に基板を浸漬して **Biotin-Avidin** 反応による特異的吸着が生じるのを待つ。5 分程度浸漬した後に **HEPES** バッファで再び洗浄し、余分な **Avidin** を除去した後の蛍光画像が図 1-34 右上の画像である。明るい蛍光を発する領域が、くっきりと斜め線で二分されていることがわかる。明るい部分がナノピラーの存在する領域であり、暗い部分はナノピラーが存在しない領域である。双方とも、表面の材質組成に違いは存在せず、異なるのはナノピラーによるタンパク質吸着面積の増大の有無のみである。この写真から、ナノピラーの表面積増大によって、タンパク質の単位チップ面積あたりの吸着量が飛躍的に増大していることがわかる。蛍光強度を比較したところ、タンパク質の吸着量として約 6 倍の差が生じるのがわかった。これは、図 1-28 をもとにして見積もっ

た面積増大量である 3~4 倍という値と整合性を持つ値であり、ナノピラー構造が基本的に表面積の増大効果によって、タンパク質の吸着量を増やしていることが示唆される。

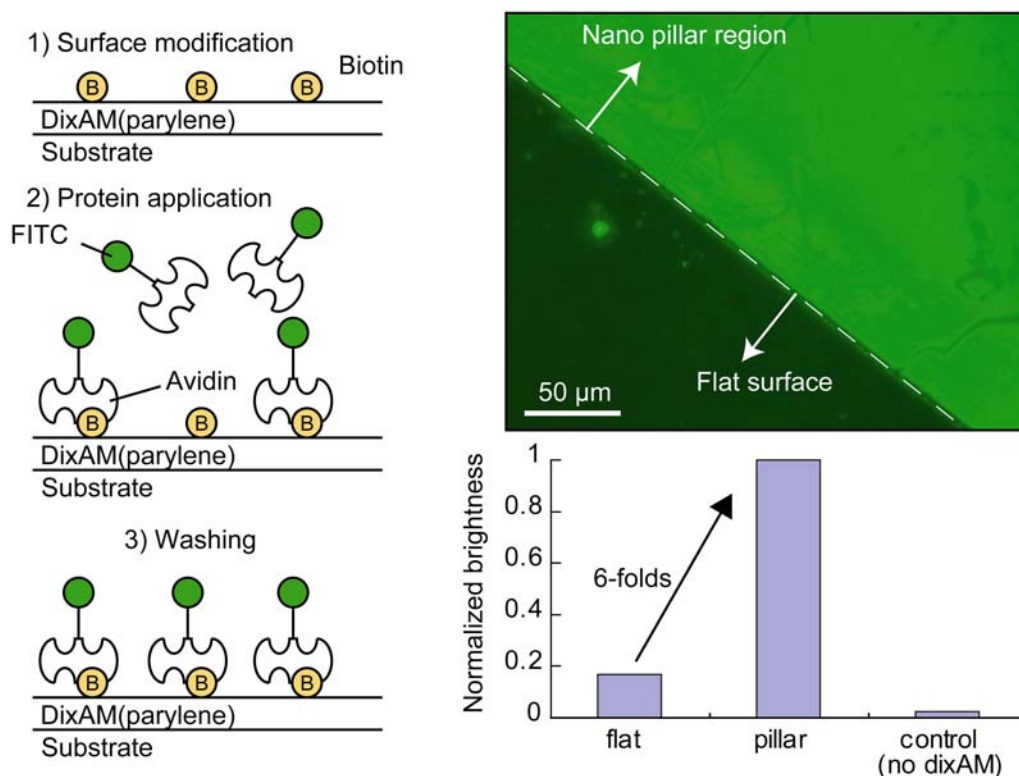


図 1-34 ナノピラー表面へのタンパク質修飾

さらに、最終的なタンパク質の検出感度向上実験を行う前に、今回実験で用いるタンパク質修飾方法と同様の方法を用いて、金膜上と  $\text{SiO}_2$  膜上のどちらがタンパク質修飾に体して親和性が高いかを検証した (図 1-35)。これは、仮に最終的な実験を行って、その結果タンパク質の検出感度が向上したとしても、その結果はピラーの面積増大効果によるのではなく  $\text{SiO}_2$  膜の方が金膜よりも Avidin タンパク質に対する親和性が高かったからではないかとする解釈に対して検証を加えておくためである。そのため、ナノピラーの製作に用いたものと同じシリコン基板に対して熱酸化処理を加え、そこにプリズムに成膜したものと同様の金膜を形成した。その金膜を市松模様にエッチングすることによって、ナノピラー SPR センサと同様の金膜と  $\text{SiO}_2$  膜が混在する基板を作製した。この基板の上に DixAM を成膜し、先ほどと同様の手順によって FITC-Avidin を生成することで、蛍光法により親和性を確かめた。なお、基板と Avidin の非特異吸着を除去するために、基板は界面活性剤である Tween20 を 0.05% 含んだ HEPES バッファで洗浄を行っているため、得られた結果は Biotin-Avidin の特異的結合が支配的であると考えられる。得られた結果は、 $\text{SiO}_2$  膜よりもむしろ金膜の方が、4 割ほど蛍光が強くなっており、金膜の方が高い親和性を示すとい



うことがわかった。

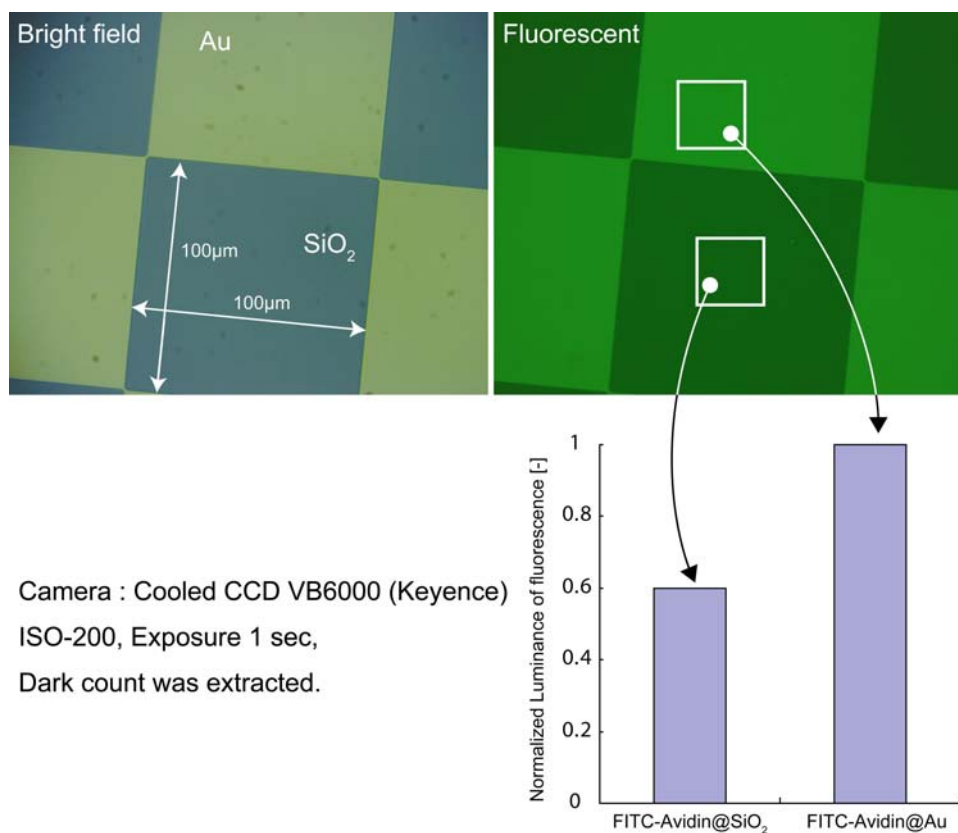


図 1-35 Au 膜と SiO<sub>2</sub> 膜上におけるタンパク質固定量の差

このタンパク質修飾技術をもとにして、流路にタンパク質を流し、タンパク質濃度を変えたときの SPR 角度の変化量を計測した。実験手順とその結果を図 1-36 に示す。Biotin-Avidin の特異的結合はほぼ不可逆なので、低濃度の溶液を先に流し、次に高濃度の溶液を流すというシーケンスで実験を行った。その結果、タンパク質濃度を 100 nM から 500 nM に増加させたときに、ナノピラー SPR センサにおいても、比較実験として用いた従来型 SPR センサにおいても、SPR シフト量の増大が計測された。その増大量はナノピラー型 SPR が、従来型 SPR よりも 10 倍程度高く、Parylene-N を用いた予備実験と整合的な結果が得られた。この結果は、ナノピラーの面積増大効果によって、センサの感度向上をはかることが可能であることを示し、表面ナノ構造の形成によって、有効なナノ機能を実現できたことを意味する。以上により、表面ナノ構造によって、SPR センサの小型化および高感度化をはかることが可能となることがわかった。

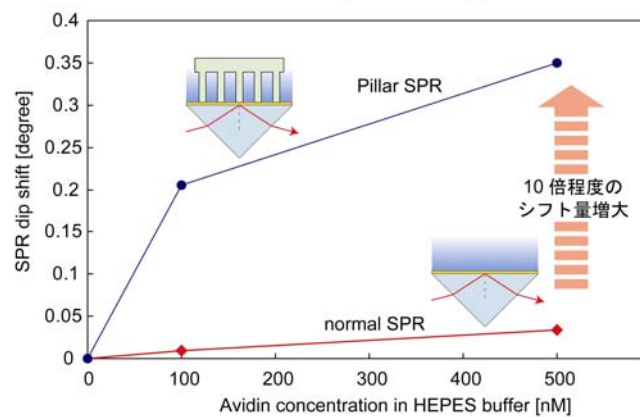
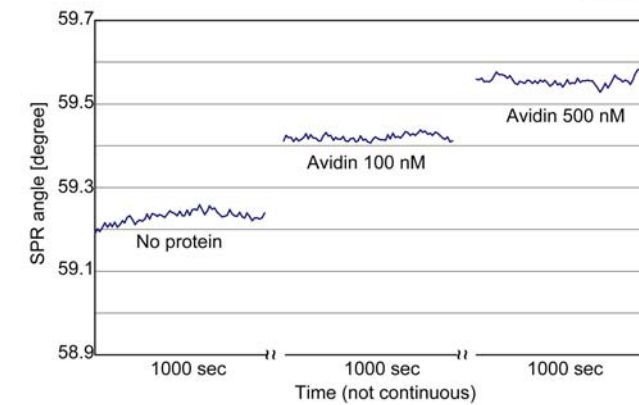
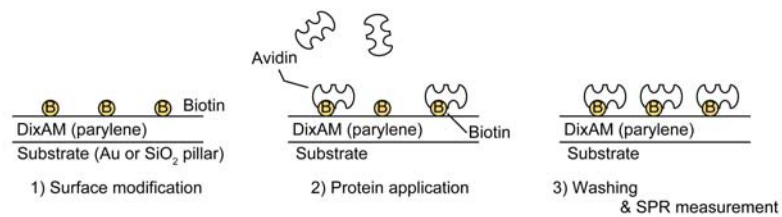


図 1-36 タンパク質による角度変化

## 2-2 量子化補正マスクエッチングと表面平坦化技術を用いた 3 次元曲面形成技術

### 2-2-1 研究の目的

本研究の目的は、マスクの開口面積に依存したシリコンエッチングレートのラグ (RIE-lag) を利用した、45°の斜面形成技術の確立である。また、斜面形状を製作する際のプロセス条件が形状の正確さ、表面粗さへ与える影響を明らかにする。

### 2-2-2 RIE-lagについて

斜面形状の製作にはRIE-lag (reactive ion etching lag)を利用する。RIE-lagとはプラズマエッチングにおいて、開口面積によりエッチング速度が異なるという現象である。そのエッ

チング速度の差は数 $\mu\text{m}$ 以下の開口の場合に大きい。マスクレイアウトとして数百 $\text{nm}$ から数 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの開口が多数並んだものを用いることで、**RIE-lag**を利用して3次元形状が得られる。この手法を斜面形状の製作に利用するには、斜面の角度の制御性、表面粗さが求められる。従ってマスクレイアウト・エッチングのプロセス条件の違いによるエッチング深さ・表面粗さ・形状への影響を知っておく必要がある。**RIE-lag**による3次元斜面形状の製作は従来研究において提案されているが、**RIE-lag**による斜面の角度制御性や表面粗さについて研究した例はない。本研究ではマスクレイアウト・エッチングのプロセス条件による斜面形状への影響を調べる。それをもとに最適な条件を求める。

#### ・ **RIE-lag**の原理

**RIE-lag**とは開口の幅によりエッチング速度が異なるという現象である。ここでいう開口とは、一方向にのみ長さが有限で、それに垂直な方向には長さが無限のものである。長さが有限の方の幅を開口の幅と呼ぶことにする。幅の狭い開口ほどエッチング速度が遅くなることを正のラグ、逆に狭い開口ほどエッチング速度が速くなることを負のラグと呼ぶ。本研究では前者の正のラグを用いる。**RIE-lag**の結果、開口幅に応じた深さの溝が得られる。正のラグではエッチング速度は溝のアスペクト比(溝の幅に対する深さの比)に依存する。以下でそのメカニズムについて説明する。**RIE-lag**の主な原因はアスペクト比の増加とともに溝の底面へのイオンの到達量が減少することである。ここでのイオンの働きは底面のエッチングであるので、到達量の減少はエッチング量の減少を示している。イオンの底面への到達量の減少は溝の側壁が負に帯電しているために、イオンが側壁に静電的に偏向するために生じる。側壁に向かったイオンは側壁の保護膜をエッチングする。

#### ・ **RIE-lag** を利用した3次元形状の製作

**RIE-lag**は開口面積によるエッチング速度の不均一性から従来はプロセスにおける問題点として考えられていた。本研究では、これを積極的に利用することにより3次元斜面形状を製作する。製作原理と3次元斜面形状を製作するにあたって重要であるマスクレイアウトの設計方法について述べる。

・3次元斜面形状製作方法

RIE-lagを利用した3次元斜面形状の製作方法を図2-1に示す。最初に様々な大きさの開口をパターニングする(図2-1(a))。開口の大きさはエッチングしたい深さによって決まる。開口の大きさは一辺が数百nmから数 $\mu\text{m}$ 程度がよい。開口は大きくなるほど、開口の大きさの変化に対するRIE-lagによる深さの変化は小さくなる。それゆえ、開口の大きさがそれ以上大きいと次のプロセスのDRIE (deep reactive ion etching)の際に、深さの差はほとんど得られない。次にマスクされた部分のシリコンがそのまま残るように垂直に異方性エッチングする(図2-1(b))。この時、RIE-lagによりマスク開口の大きさや形状に応じて様々な深さの溝が得られる。マスクを取り除いた後(図2-1(c))、最後に等方性エッチングによりDRIE後に形成

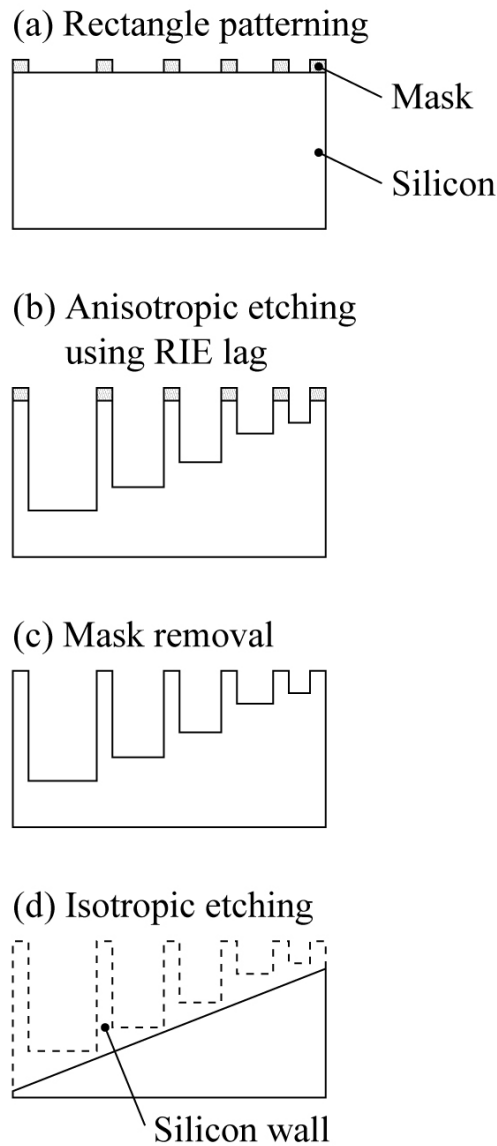


図 2-1 3次元形状製作方法

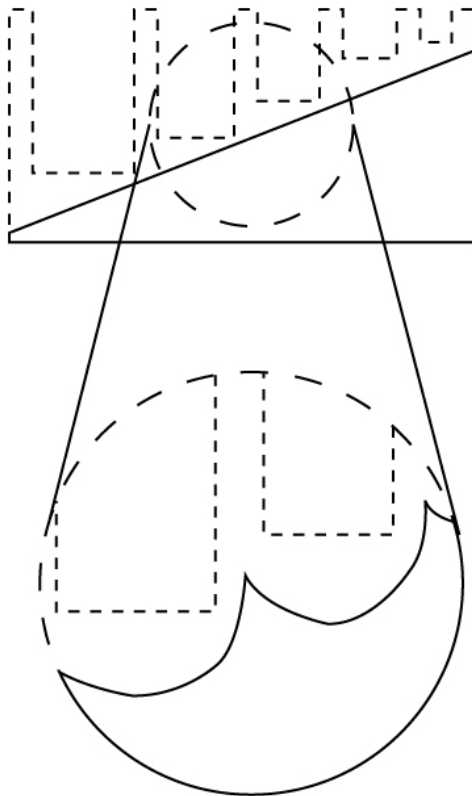


図 2-2 等方性エッチング後の表面形状

されたシリコンの壁の部分をエッチングする(図2-1(d))。この時、溝の底面やDRIEの時にマスクで覆われていた上面も同時にエッチングされる。この後の表面は実際には図2-2に示すように壁があった部分が突起となってあらわれる。この突起は形状の表面粗さに影響する。等方性エッチングの時間が長いほど表面粗さは小さくなる。突起形状を等方性エッチングする場合、頂点の部分の方がエッチングされやすいので十分な時間等方性エッチングを行うことで表面粗さは小さくなる。しかし等方性エッチングでは横方向へのエッチングも進むので等方性エッチングをしすぎると全体の形状が崩れてしまう。表面粗さと形状の制御性がトレードオフの関係にあるので、等方性エッチングの時間は製作したい形状の要求に合わせて適切に決めなければならない。

#### ・マスクレイアウト設計方法

3次元斜面形状を製作するためのマスクレイアウトは様々な大きさの開口が多数並んだものである。開口面積によりエッチング深さが変わるのでマスクレイアウトを設計する際にはマスクの開口面積が重要である。以下にマスクレイアウトの設計方法を示す。

まず、開口面積とエッチング深さの対応関係を知る必要がある。

深さ $d$ 、開口面積 $S$ として、 $d=f(S)$ と深さは面積の関数として表される。 $f(S)$ の形はプロセス条件により異なる。プロセス条件は製作したい形状の深さや表面粗さによって決まる。

実際に製作したい形状とマスクについて $x$ 軸、 $y$ 軸、 $z$ 軸を図2-3に示すとおり取る。製作したい形状の位置 $(x, y)$ における深さが $z(x, y)$ と表される時、マスク上の位置 $(x, y)$ における開口面積 $S(x, y)$ は先に求めた式の関係を利用して

$$S(x, y) = f^{-1}(z(x, y))$$

と表される。この式を用いて、マスクの各位置 $(x, y)$ における開口面積を順次決めていけば3次元形状を製作するためのマスクが完成する。

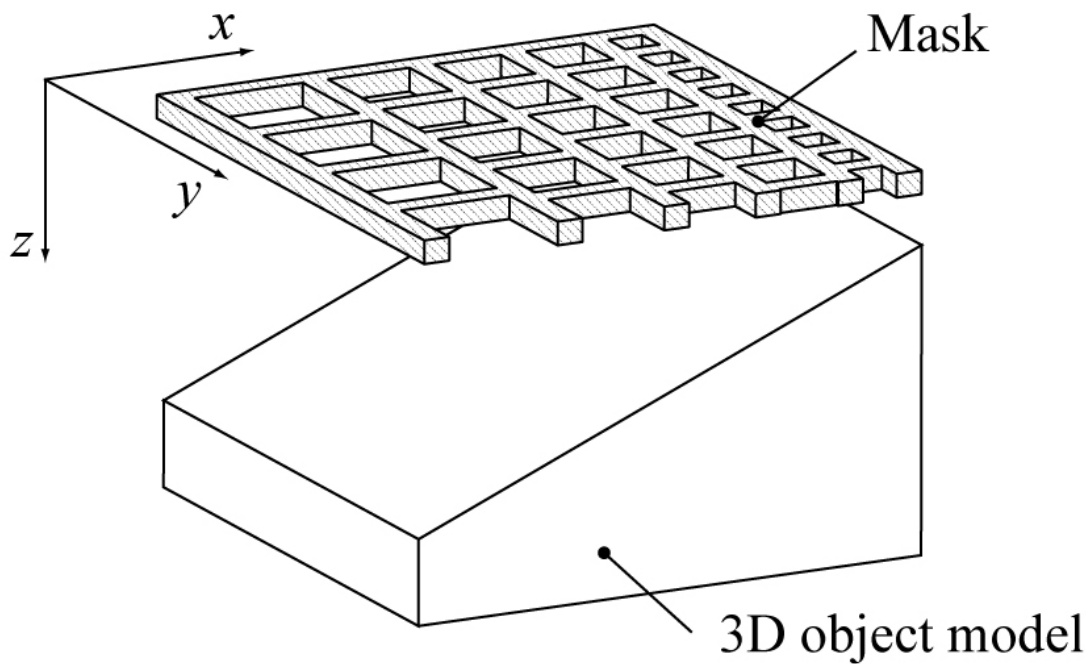


図 2-3 マスク設計時の座標の定義

### 2-2-3 斜面形状作成のための基礎実験

本章ではマスクレイアウト(マスク幅、開口の縦横比)・DRIEのプロセス条件(プロセスレシピ、エッチング時間)・等方性エッチングのエッチング時間の違いによる表面粗さ・形状への影響を調べる。またこれら条件の違いによる開口面積とエッチング深さの関係や最大エッチング深さの変化についても計測する。最後にこれら基礎実験の結果をもとに斜面形状製作のための設計指針を定める。

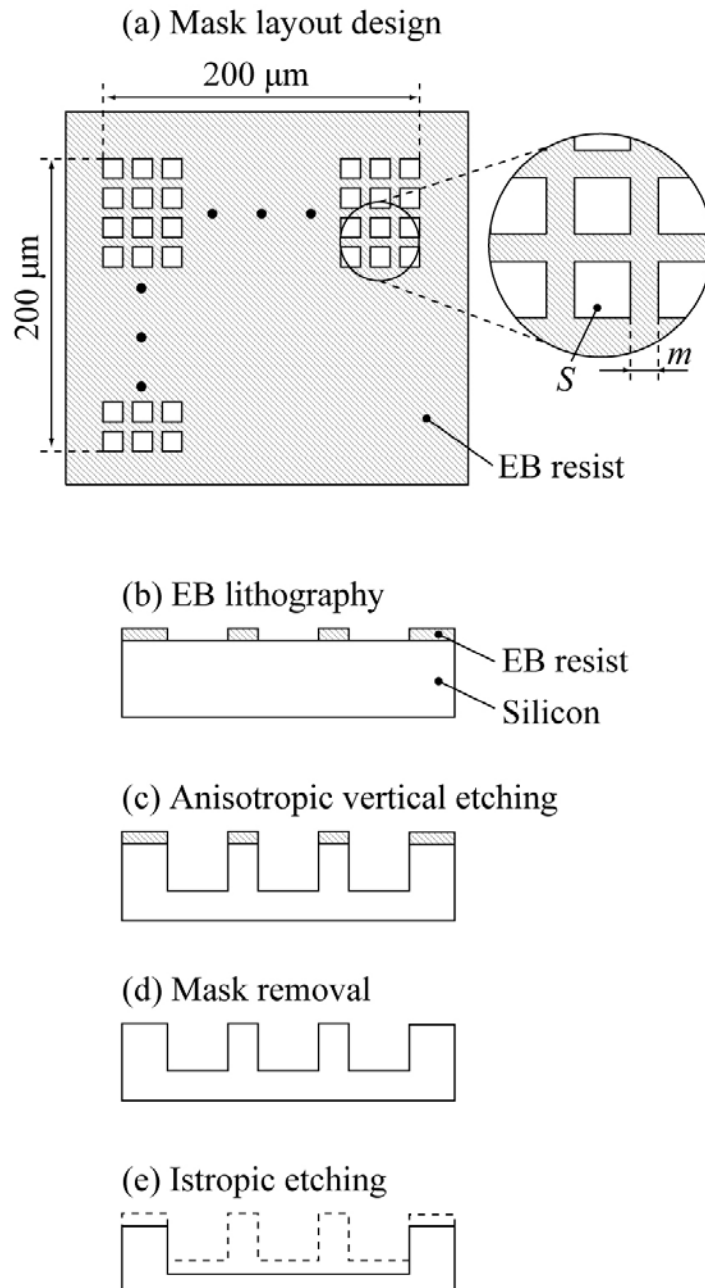


図 2-4 プロセス図

本章の基礎実験で用いたマスクレイアウトを図2-4(a)に示す。200  $\mu\text{m}$ 四方の中に同じ開口形状の四角を一定の間隔で並べた。この時の開口と開口の間のマスク部分の幅をマスク幅 $m$ と定義する。また開口面積を $S$ と定義する。

同じ開口形状の四角を多数並べたマスクを用いた理由は、シリコン側壁の厚さつまりマスク幅が等方性エッチング後の深さへ与える影響も調べる必要があるからである。3次元形状を製作する場合には多数の開口が並んだマスクを用いる。等方性エッチング後の深さはシリコン側壁の厚さも影響していると考えられる。つまりマスク幅も等方性エッチング後の深さに影響していると考えられる。3次元形状を製作する際に必要なのは開口面積と等方性エッチング後の深さの関係であるので、その関係を調べるためには多数の開口が並んだマスクを用いる必要がある。

#### ・マスクパターニング

シリコンエッチングのマスクとして電子線レジストを用いた。利用した電子線レジストはZEP520A (日本ゼオン)である。電子線露光装置(F5112+VD01、アドバンテスト)を用いて数百  $\text{nm}$ から数 $\mu\text{m}$ 程度の大きさの開口を描画した(図2-4(b))。現像後のレジスト膜厚は390  $\text{nm}$ であった。

#### ・開口面積に応じた深さの溝の形成

マスクされた部分のシリコンがそのまま残るようにBoschプロセスにより垂直に異方性エッチングした(図2-4 (c))。シリコンエッチングにはICP-RIE (inductive coupled plasma reactive ion etching)装置(A601E、Alcatel)を用いた。DRIEのプロセスレシピとして異なるものを二つ用いた。以降、本論文ではそれぞれのレシピをDRIE1、DRIE2と呼ぶことにする。プロセス条件を表2-1に示す。500 $\mu\text{m}$ 四方の正方形開口をエッチングした時のエッチングレートはDRIE1、DRIE2でそれぞれ9 $\mu\text{m}/\text{min}$ 、0.8 $\mu\text{m}/\text{min}$ であった。



表 2-1 DRIE プロセス条件

		DRIE1	DRIE2
Gas flow rate [sccm]	SF <sub>6</sub>	500	130
	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	150	75
Duration time [sec]	SF <sub>6</sub>	7	3
	C <sub>4</sub> F <sub>8</sub>	2	3
Regulation mode		Position	Position
Position [%] <sup>a</sup>		25	45
Power [W]	Source	1900	500
	Substrate	60	40
Temperature of substrate [ °C ]		0	0

- a. プロセス中の圧力の計測値：  
 DRIE1: SF<sub>6</sub>/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 5.7/1.3 Pa  
 DRIE2: SF<sub>6</sub>/C<sub>4</sub>F<sub>8</sub> 1.9/0.20 Pa

・レジストの除去

レジストマスクを取り除く。アセトンとエタノールで超音波洗浄を行った

・等方性エッチングによるシリコン壁部分の除去

等方性エッチングによりDRIE後に形成されたシリコンの壁の部分をエッチングする。壁部分を除去しきれないと表面粗さを大きくする原因となる。

・プロセスの選定

3次元形状を製作する際に平坦化プロセスに求められる条件は、形状をいかに正確に作れるかと表面粗さを小さくすることである。形状を正確に作るための条件をさらに分けると、エッチングレートの制御性、形状転写の正確さ、再現性である。形状転写の正確さとは図2-5(a)に示すようなDRIE後に得られた溝をどれだけ正確に転写して3次元形状を得られるかである。図2-5 (b-1)に示すようにシリコンの壁部分のみを除去し、それ以外の部分はエッチングしないようなプロセスが望ましい。しかし実際には横方向へのエッチングが進むことや頂点部分の方がエッチングされやすいという理由により、図2-5 (b-2)に示すように、垂直壁が倒れたものになってしまう。

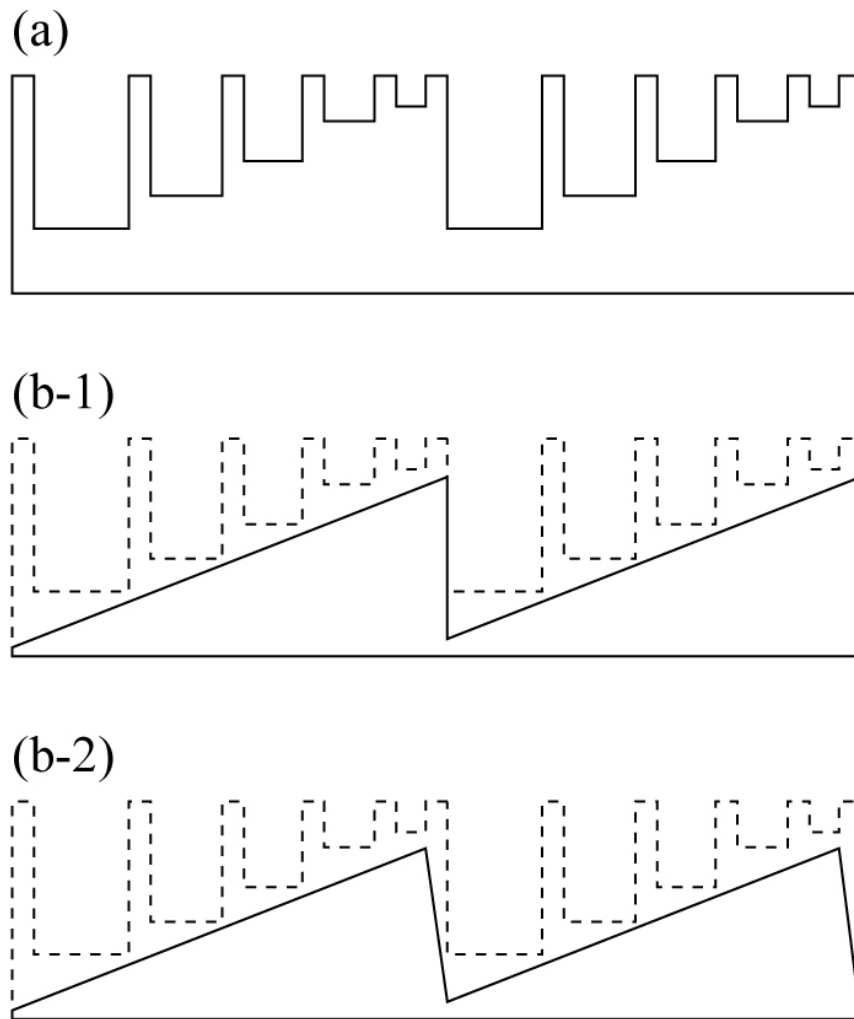


図 2-5 形状への影響

等方性エッチングの方法として、表2-2に示す方法が考えられる。ドライエッチング、ウェットエッチングの代表的なものとしてそれぞれSF<sub>6</sub>ガスによるプラズマエッチングとフッ硝酸(HNA: フッ酸 hydrofluoric acid、硝酸 nitric acid、酢酸 acetic acidの混合物)を掲載する。

表 2-2 等方性エッチングの方法

方法	エッチングレートの制御	形状転写の正確さ	再現性	表面粗さ
ドライエッチング (SF <sub>6</sub> )	○	△	○	○
ウェットエッチング (HNA)	混合比による	混合比による	×	混合比による
熱酸化	×	○	○	×

表 2-3 SF<sub>6</sub>エッチングプロセス条件

Gas flow rate [sccm]		130
Regulation mode		Position
Position [%] <sup>a</sup>		45
Power [W]	Source	500
	Substrate	40
Temperature of substrate [°C]		0

a. プロセス中の圧力の計測値 : 0.99 Pa

SF<sub>6</sub>ガスによる方法ではガスの流量・圧力などを適切に選ぶことによりエッチングレートの制御が可能であり、高い再現性を得ることができる。この方法では頂点部分の方がエッチングされやすいので形状は若干崩れてしまう。十分な時間エッチングをすれば表面粗さは小さくできる。

フッ硝酸は濃度・温度・混合比によりエッチングレートや表面粗さが大きく変わってしまう。溶液中で反応している時でも、例えば反応が進むウェハ近くとそれ以外の場所では濃度が変わってしまい、均一な濃度を得ることは難しい。また温度を一定に保ちながら反応させるという事も困難である。そのため高い再現性を得ることは難しい。

熱酸化後、形成された酸化シリコンをフッ酸で取り除く方法は、形状の制御性や再現性では優れているものの、数μmの酸化シリコンを形成するには熱酸化に多くの時間がかかってしまう。また一度の熱酸化では壁の部分が十分取り除けないため表面粗さが大きくなってしまう。

形状転写の正確さではやや劣るものの、それ以外の条件で平坦化プロセスにおける要求を満たすので、本論文では平坦化プロセスとしてSF<sub>6</sub>ガスによるドライエッチングを選択した。そのプロセス条件を表2-3に示す。

・エッチング深さ計測に用いた装置

エッチング深さの計測には触針式表面形状測定器(Dektak3ST、アルバック)とSEM (S-4700、日立ハイテク)を用いた。触針式表面形状測定器は計測前処理がいらす計測時間も

SEMと比較して短いという利点がある。DRIE後の溝は水平方向の幅が数 $\mu\text{m}$ 以下であり、触針先端半径以下大きさである。そのため、触針式表面形状測定器で計測できないのでSEMを用いて計測した。SEMで深さを計測する場合の手順を以下に示す。溝の断面が見えるようにウェハを割り、それを真横からSEMで観察する。この時、なるべく高倍率でかつ溝全体が見えるように観察する。得られた画像から溝部分の画素数を計測することにより深さを決定した。

・表面粗さの定義

表面粗さは平坦化プロセス後の表面を計測した。表面粗さの評価指標として主なものに算術平均表面粗さ(Ra: JIS B0601)や最大高さ(Rz: JIS B0601)がある。本章では表面粗さの評価指標としてRaを用いた(図2-6)。

・表面粗さ計測に用いた装置

表面粗さは3次元形状測定レーザ顕微鏡(VK-9700、キーエンス)を用いて計測した。この装置ではレーザ光の反射光量を検出することにより物体の3次元形状データを得ることができる。レーザ光は水平方向にスキャンされ、それをさらに高さ方向にステージを動かしつつ繰り返すことで3次元的な反射光量情報が得られる。得られた3次元形状データは専用のソフトウェアを用いて断面プロファイルの確認、表面粗さの計測、データの補正など様々な処理が可能である。本章ではこれらの機能のうち表面粗さを計測する機能を用いた。

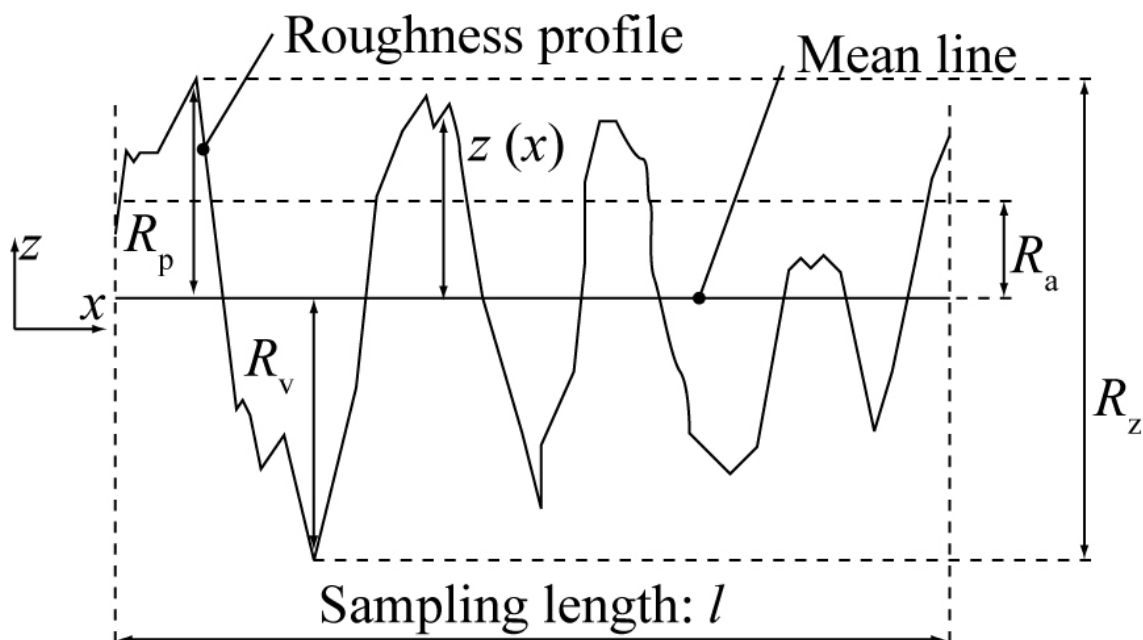


図 2-6 表面粗さの定義

表面粗さ計測時の開口形状の最小ピッチは400 nmである。また表面粗さは数十nmから数百nmになると考えられる。このため表面粗さ計測時には水平方向分解能は400 nm以下、垂直方向誤差は数十nm以下である必要がある。これら要件を満たすレンズとして150倍の対物レンズを用いた。150倍の対物レンズで計測すると90  $\mu\text{m}$   $\times$  67  $\mu\text{m}$ の領域の3次元データが得られる。

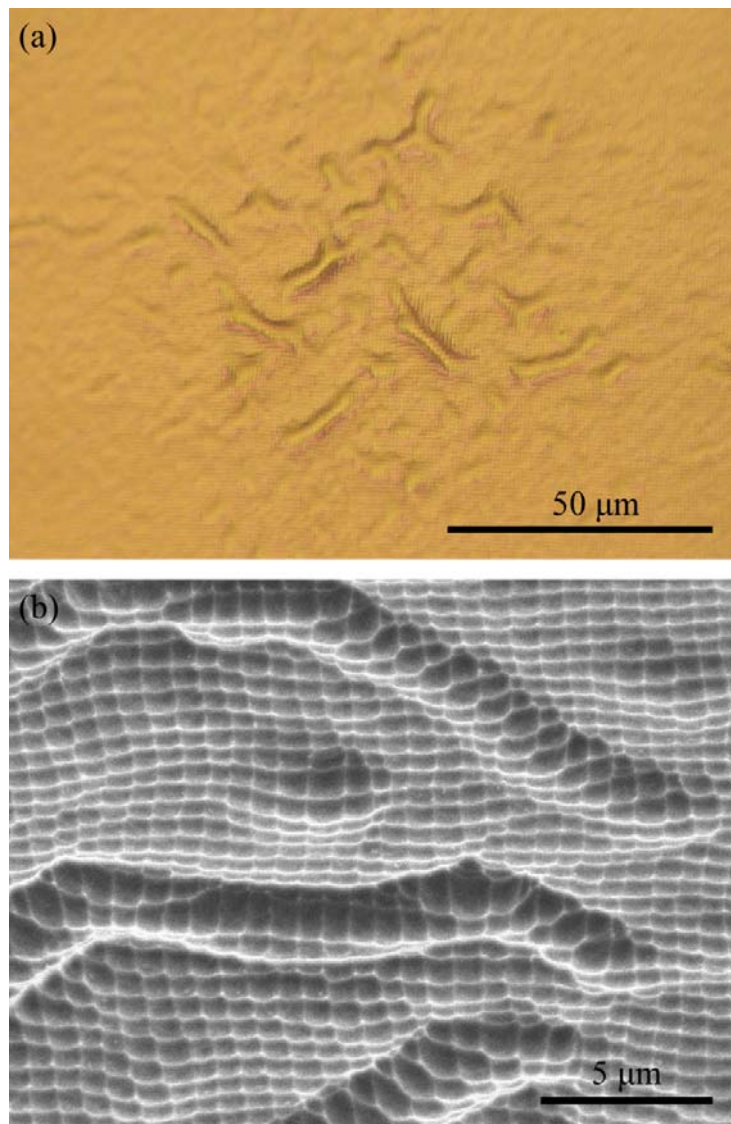


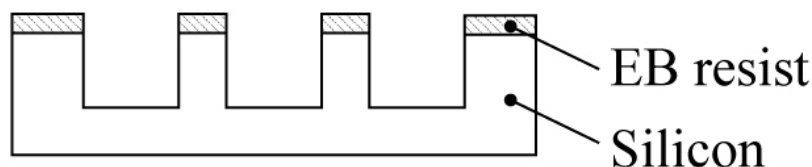
図 2-7 マスク幅が小さすぎる時の問題. (a)顕微鏡写真(b)SEM 画像

・マスクレイアウトの違いによるエッチング深さ・表面粗さへの影響

本節ではマスクレイアウトが深さ、表面粗さに与える影響について述べる。マスクレイアウトとは具体的にはマスク幅と開口形状の縦横比のことを指す。

マスク幅についてはDRIEの際シリコンの壁の部分がなくなる程度の幅を最小の値とした。垂直異方性エッチングといっても完全に垂直ではなく、サイドエッチングによりシリコンの壁の部分もエッチングされてしまうためである。DRIE時にシリコンの壁の部分がなくなってしまうと図2-7に示すような問題が生じる。これは同じ深さにエッチングされるように設計したものであるが、全体としてでこぼこな不均一な形状になってしまっている。図2-8に示すようにサイドエッチングの結果、壁が倒れてしまいレジストで覆われる部分が不均一にできてしまうためであると考えられる。レジストで覆われた部分はそれがマスクとなりシリコンはエッチングされなくなる。マスクされた部分とそれ以外の部分とでエッチング量に差が出てしまい不均一な形状になってしまったと考えられる。上記のような問題点を回避するため、DRIEプロセスレシピごとにマスク幅を変えてDRIEをし、最小のマスク幅を決定した。最小のマスク幅はDRIEエッチング時間にも依存する。本章ではDRIE1については最大4分、DRIE2については最大8分エッチングをする。そこでマスク幅の最小値を求める実験においてはDRIEエッチング時間をDRIE1、DRIE2でそれぞれ4分、8分とした。

### Remained silicon sidewalls after DRIE



### Fallen silicon sidewalls after DRIE because of side etching

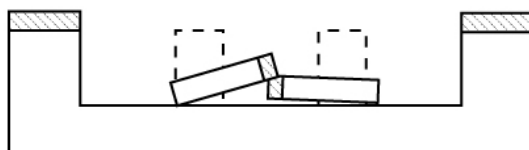


図 2-8 エッチングが不均一になる問題の原因

またマスク幅については $0.2\ \mu\text{m}$ を最小値として $0.1\ \mu\text{m}$ ごとに変化させて計測した。マスク幅の $0.2\ \mu\text{m}$ は本研究での電子線レジスト現像条件においてパターニング可能な最小の値である。

表 2-4 マスク幅最小値実験での条件

	DRIE1	DRIE2
プロセス条件		
DRIE エッチング時間 [min]	4	8
マスクレイアウト		
開口形状	正方形	正方形
最小マスク幅 [ $\mu\text{m}$ ]	1.5	0.2

表 2-5 マスク幅計測での条件

	DRIE1	DRIE2
プロセス条件		
DRIE エッチング時間 [min]	3	7
SF <sub>6</sub> エッチング時間 [min]	6	1.5
マスクレイアウト		
開口形状	正方形	正方形

シリコンの壁が倒れないようにするにはDRIE1、DRIE2についてマスク幅の最小値をそれぞれ1.5  $\mu\text{m}$ 、0.2  $\mu\text{m}$ とする必要があることがわかった。また、DRIEのエッチング時間の増加とともにシリコン側壁は薄くなっていることが確認できた。

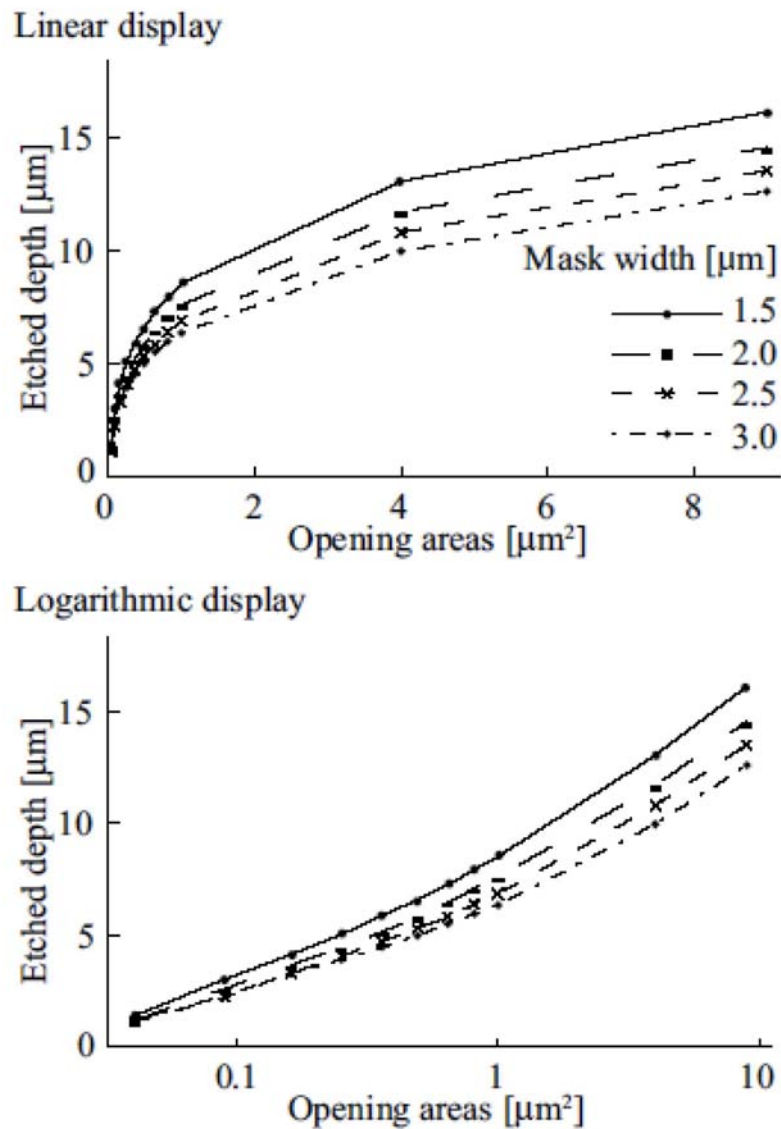


図 2-9 マスク幅とエッチング深さ (DRIE1)

・深さへの影響

マスク幅の違いによる深さへの影響を計測した。表2-5にプロセス条件とマスクレイアウトを示す。エッチング深さを計測した結果を図2-9、図2-10に示す。横軸を対数とした場合の結果も合わせて示す。

マスク幅が狭いほど深さは深いという結果が得られた。マスク幅が狭いと等方性エッチングの際、シリコンの壁の部分のエッチングする量が少なくすむので、その分深さ方向へのエッチングが進むと思われる。深さは等方性エッチング後に計測しているの以上記のような結果が得られたと考えられる。

そこでDRIE後の深さと等方性エッチング後の深さを比較した。DRIE後の深さはSEMで観察することにより計測した。等方性エッチング後の深さは触針式表面形状測定器で計測



した。その結果、DRIE後の深さは開口の大きさが同じならば、マスク幅によらずほぼ同じであった。一方、等方性エッチング後には開口面積が同じでもマスク幅が狭い方が深いという結果が得られた。マスク幅によるエッチング深さの違いはRIE-lagが直接影響しているわけではなく、平坦化プロセスの際の等方性エッチングが影響しているということが確認できた。

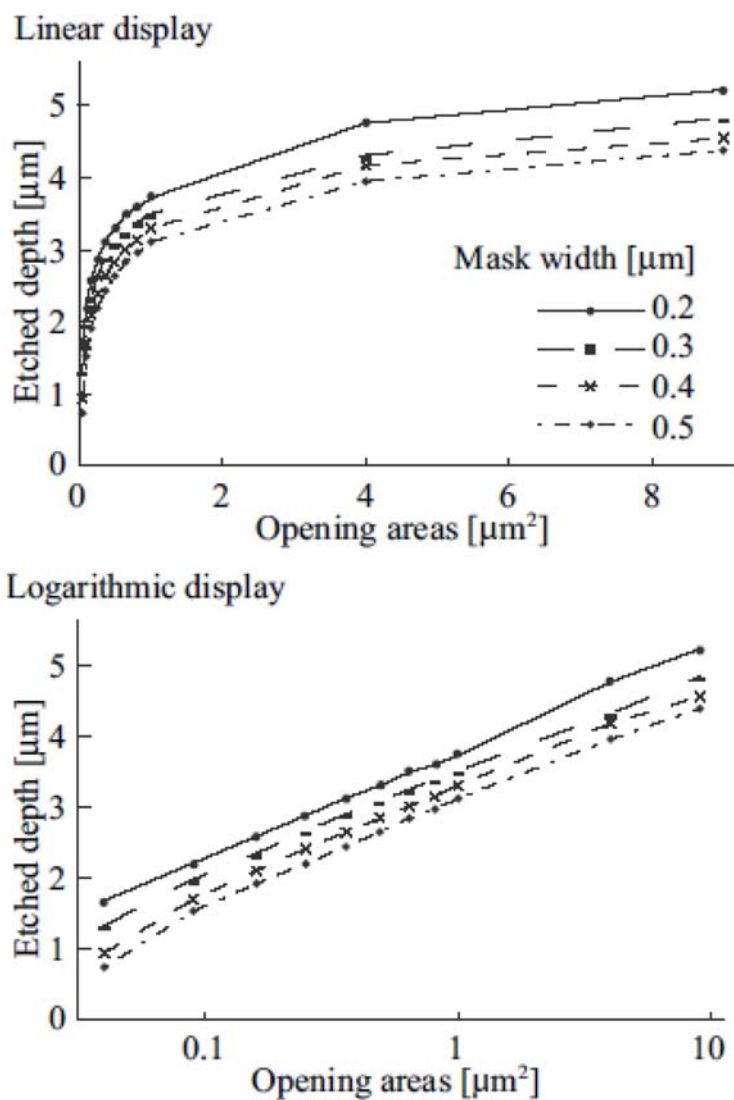


図 2-10 マスク幅とエッチング深さ (DRIE2)

・表面粗さへの影響

マスク幅と表面粗さの関係を計測した。プロセス条件とマスクレイアウトを表2-6に示す。結果を図2-11、図2-12に示す。

**DRIE1、DRIE2**どちらの場合もマスク幅が広いほど表面粗さは大きくなる傾向があった。等方性エッチング後の壁部分は図2-13に示すように尖った形状である。これが表面粗さに影響する。マスク幅が狭いほうが、壁部分が早くなる分、この形状の高さも小さくなると考えられる。よってマスク幅が狭いほうが表面粗さは小さくなったと考えられる。

表 2-6 プロセス条件

	DRIE1	DRIE2
プロセス条件		
DRIE エッチング時間 [min]	3	7
SF <sub>6</sub> エッチング時間 [min]	6	1.5
マスクレイアウト		
開口形状	正方形	正方形

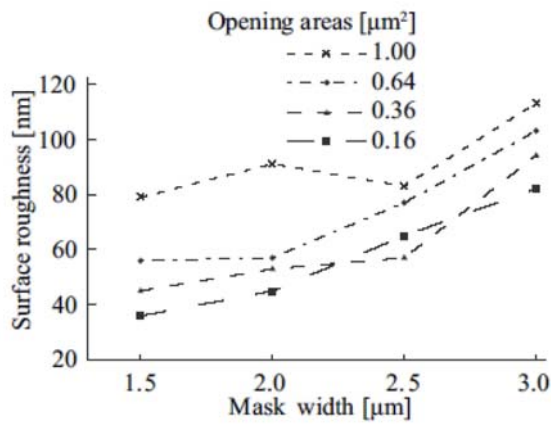


図 2-11 マスク幅と表面粗さ (DRIE1)

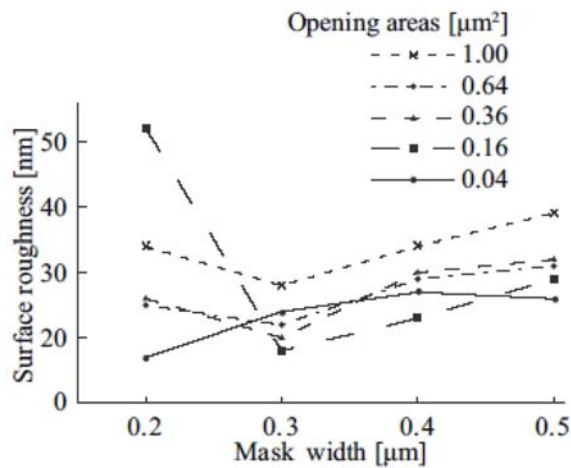


図 2-12 マスク幅と表面粗さ (DRIE2)

以上マスク幅に関する実験より、より深くエッチングするためにはマスク幅を狭くし、表面粗さを小さくするためにはマスク幅を狭くするという指針が立った。また、同じ開口面積でもマスク幅により深さは異なる。そこでマスク幅は一定とすることにした。

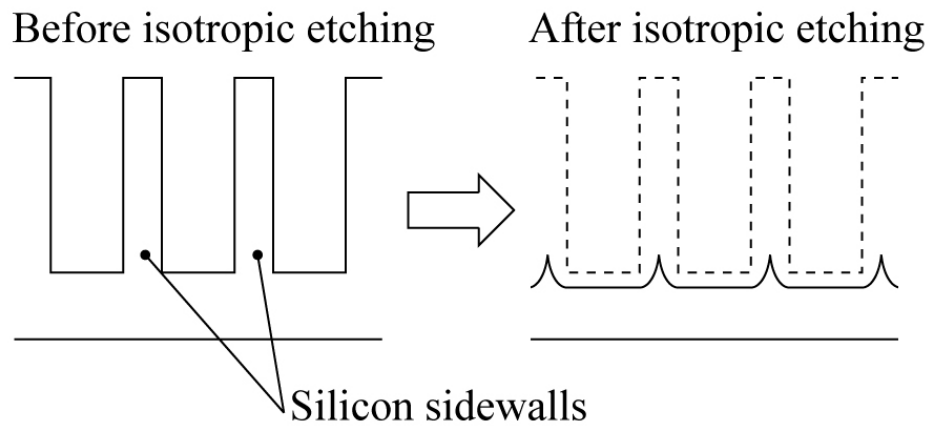


図 2-13 等方性エッチング後の形状

表 2-7 縦横比計測での条件

	DRIE1	DRIE2
プロセス条件		
DRIE エッチング時間 [min]	3	7
SF <sub>6</sub> エッチング時間 [min]	6	1.5
マスクレイアウト		
開口形状	長方形	長方形
マスク幅 [μm]	1.5	0.2

・開口形状の縦横比

開口形状が深さに与える影響について調べた。開口面積が大きいほど深さは深くなるということが知られているが、同じ面積でも形状が違えば深さは異なることが予想される。例えば、同じ面積でも正方形と長方形とでは深さは異なると考えられる。そこで、同じ開口面積である四角について、長方形の縦横比(長方形の短辺を長辺で割った値)による深さの変化を調べた。

プロセス条件とマスクレイアウトを表2-7に示す。結果を図2-14、図2-15に示す。同じ面積で比較した場合、正方形に近い形状の方が深くエッチングされることが分かった。RIE-lagの主な原因はイオン偏向であること前述の通りである。正イオンが静電気力により負に帯電した側壁に引き付けられるため、イオンが偏向する。この時の引力は距離の2乗に反比例するため、長方形のように側壁までの距離が小さい時はこの引力は正方形の時と比べて大きくなる。その結果、細長い長方形では底面まで到達するイオンが減少し、保護膜の除去が進まないためエッチング速度が遅くなったと考えられる。

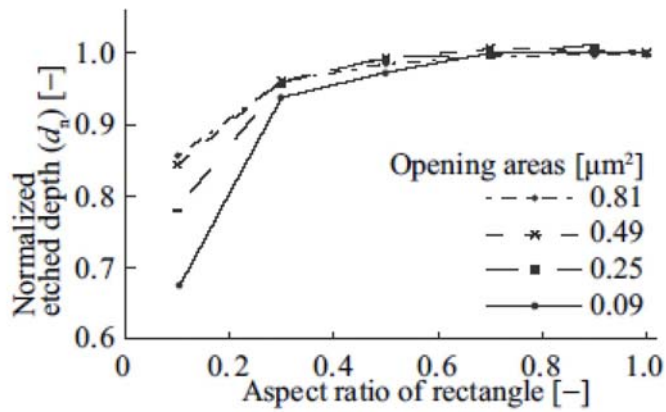


図 2-14 開口縦横比とエッチング深さ (DRIE1)

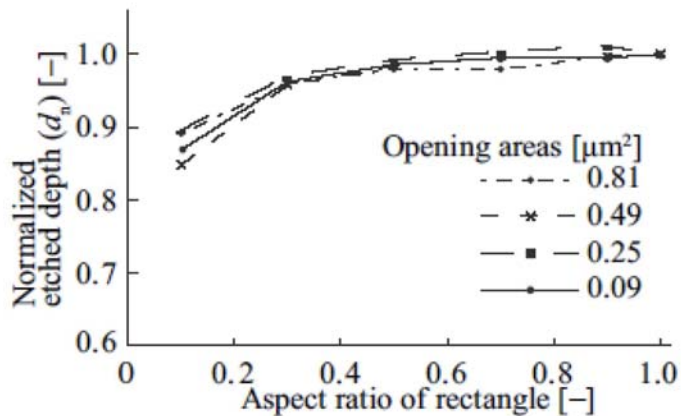


図 2-15 開口縦横比とエッチング深さ (DRIE2)

図2-14、図2-15では縦横比が0.1のところでは面積が小さいほどエッチング深さがより小さくなっている。これは開口が小さいほどレジストの現像速度が遅いため、実際の開口面積は設計値より小さな開口になっていたためと考えられる。

図2-14、図2-15の結果を読み替えると、同じ深さを得るためには長方形よりも正方形の方が、小さい開口面積ですむ。正方形を用いた方が一定の領域内により密に開口を敷き詰められることを示している。密に開口を敷き詰められる方が深さの制御は細かくできると考えられる。そこで開口形状については縦横比1である正方形を用いることとした。

・マスキレイアウトについてのまとめ

マスク幅については一定の幅とし、可能な限り狭くすることとした。マスク幅の最小値はDRIEプロセスにより異なり、DRIE1、DRIE2の場合でそれぞれ1.5 μm、0.2 μmであった。開口形状は正方形を用いることとした。

#### ・ DRIEプロセス条件によるエッチング深さへの影響

DRIEのプロセス条件がエッチング深さに与える影響を調べた。具体的にはガス流量・圧力などのDRIEレシピによる違いと、エッチング時間によるエッチング深さの変化を調べた。DRIE1とDRIE2のそれぞれの条件について開口面積に応じて、どの程度の深さが得られるかを確認した。はDRIE1の条件における最大の深さは、DRIE2の条件のときと比べて約3倍であった。どちらの場合も開口面積が大きくなるにつれて曲線の傾きは小さくなっている。DRIE1の場合、開口面積が1  $\mu\text{m}^2$ のあたりまでで開口面積の変化に応じて深さは急激に変化するが、それ以上の開口面積では深さの変化は緩やかであった。一方DRIE2の場合、開口面積が0.25  $\mu\text{m}^2$ のあたりまでで開口面積の変化による深さの変化が大きかった。角度をつけた形状のように深い形状を製作したい時にはDRIE1が適しており、緩やかな斜面でもよいので深さを細かく制御したい時にはDRIE2の方が適している。

#### ・ DRIEのエッチング時間

DRIEのエッチング時間を変化させて深さの変化を計測した。DRIEのエッチング時間が長いほどエッチング深さは深くなるが、その増加量はエッチング時間に対してほぼ線形の関係があった。

#### ・ DRIEプロセスのまとめ

深い形状を製作したい時にはDRIE1が適しており、深さを細かく制御したい時にはDRIE2の方が適している。

#### ・ 等方性エッチング条件による表面粗さ・形状への影響

平坦化プロセスの際の $\text{SF}_6$ ガスによる等方性エッチングが表面粗さ・形状に与える影響について調べた。 $\text{SF}_6$ エッチング時間と表面粗さの関係を調べた。

エッチング時間が長いほど表面粗さは小さくなった。図2-17と図2-18を見ると分かるようにそれぞれのSEM写真に格子状の様相が見える。これはもともとシリコンの壁があった部分で、等方性エッチングした後も山となって見えている。エッチング時にはこの山の頂点の部分ほどエッチングされやすいので、エッチング時間が長くなるほど表面粗さが小さくなったと考えられる。表面粗さを小さくするためには $\text{SF}_6$ エッチング時間を長くするという指針が定まった。

#### ・ 形状への影響

$\text{SF}_6$ ガスによる等方性エッチングはシリコンの壁の部分を取り除くために行うが、エッチング時には同時に溝の底面の部分もエッチングされる。また横方向へもエッチングされる。長い時間の等方性エッチングは、表面粗さが小さくなるというメリットがあるが、形

状は全体としてなだらかになってしまう。プロセス条件選択時には、等方性エッチングにおいて形状が崩れるという点も考慮しなければならない。そこで $\text{SF}_6$ エッチング時における溝の底面と横方向へのエッチング量を計測した。

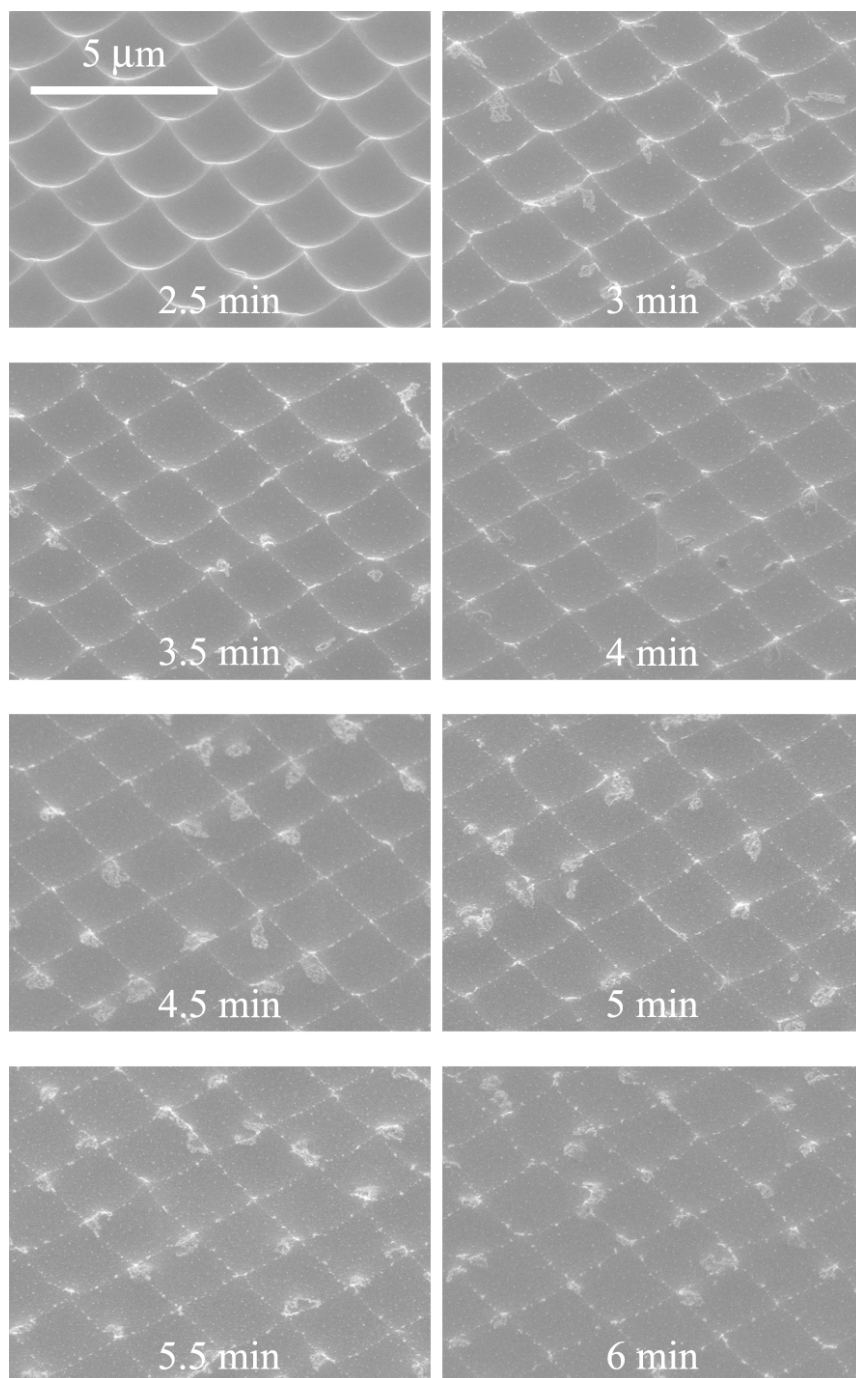


図 2-16 等方性エッチング後の表面 (DRIE1)

開口パターンとして一辺が $0.4\ \mu\text{m}$ から $0.9\ \mu\text{m}$ の正方形を用いた。これまでの実験で用いたマスクレイアウトのように開口を多数並べたものではなく、開口同士の間隔は十分大き

くしたマスクレイアウトを用いた。これは一つの溝形状に対する等方性エッチングの影響を調べるためである。

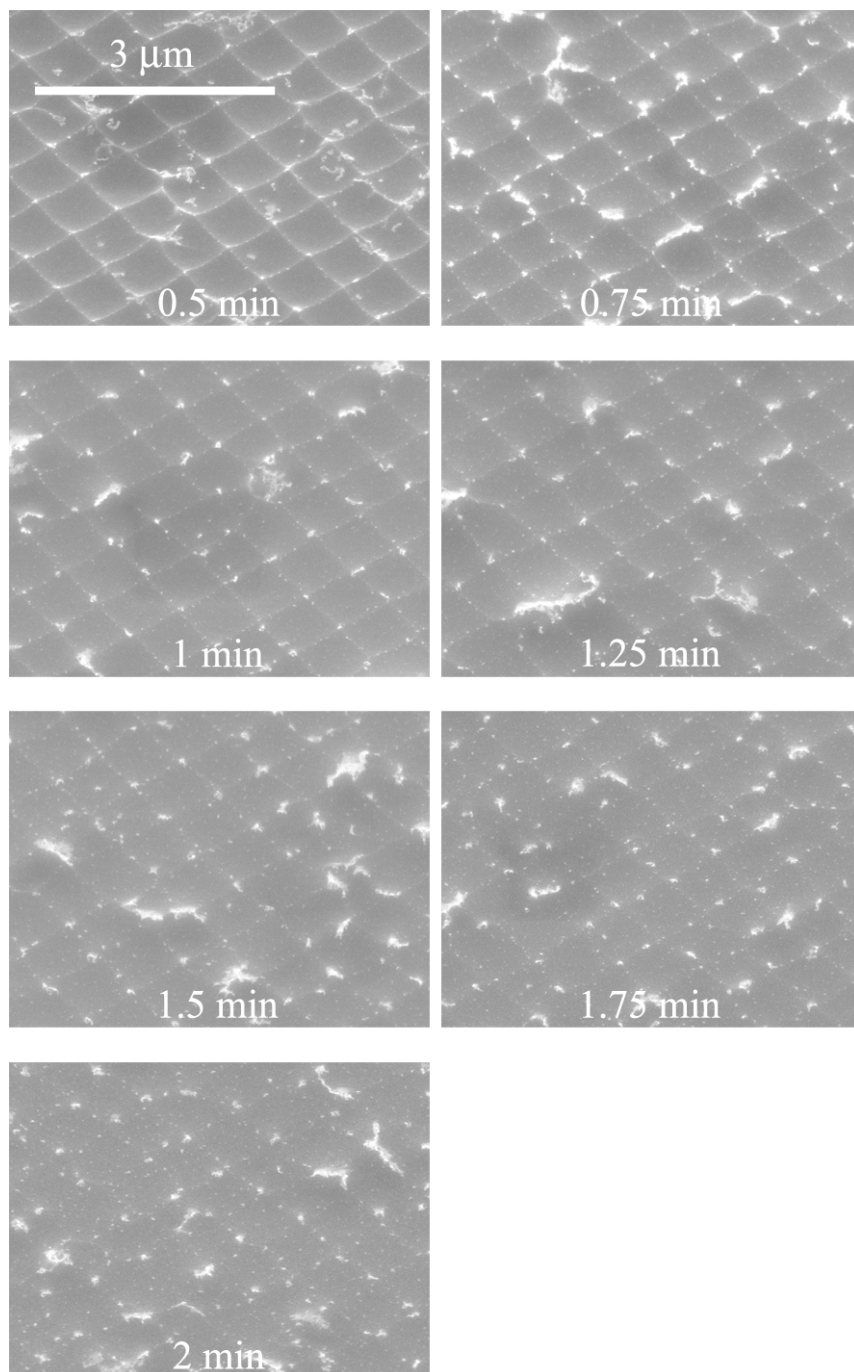


図 2-17 等方性エッチング後の表面 (DRIE2)

このマスクレイアウトを電子線露光によりレジストにパターンニングした後、一定時間 DRIE装置でエッチングした。エッチング後の溝の深さと横幅をSEM画像から計測した。その後SF<sub>6</sub>でエッチングした後、同様にSEM画像から深さと横幅を計測した。上面のエッチン



グ量は触針式表面形状測定器で計測した。これらの値から溝形状を $\text{SF}_6$ エッチングした時の深さ方向と横方向へのエッチング量を計算した。計測に用いたDRIE後、等方性エッチング後の溝のSEM写真の一例を図2-18、図2-19に示す。等方性エッチングにおける深さ方向と横方向へのエッチング量はSEMの観察から直接計測することはできないので計算により求めた。各変数の定義を図2-20に示す。DRIE後の深さと横幅をそれぞれ $E_{1, \text{depth}}$ 、 $E_{1, \text{width}}$ 、等方性エッチング後の深さと横幅をそれぞれ $E_{2, \text{depth}}$ 、 $E_{2, \text{width}}$ 、等方性エッチングにおける上面のエッチング量を $E_{\text{top}}$ とする。これらの値はSEMの観察から計測可能な値である。開口の大きさに関わらず深さ方向、横方向のエッチング量はほぼ同じであった。エッチングレートは平均で深さ方向、横方向でそれぞれ $1.25 \mu\text{m}/\text{min}$ 、 $0.85 \mu\text{m}/\text{min}$ であった。上面のエッチングレートは $1.80 \mu\text{m}/\text{min}$ であったので上面のエッチングレートに対する底面のエッチングレートの比はおよそ0.69であった。

深さ方向へのエッチング量は開口面積によらずほぼ一定なので、これについては形状への影響はないと考えられる。横方向へのエッチングは例えば図2-21(a)に示す形状を製作したいと考えた時、等方性エッチングの影響により図2-21 (b)のようになってしまうと考えられる。形状を正確に製作しようと考えた場合には等方性エッチング時間は短いほうが良い。

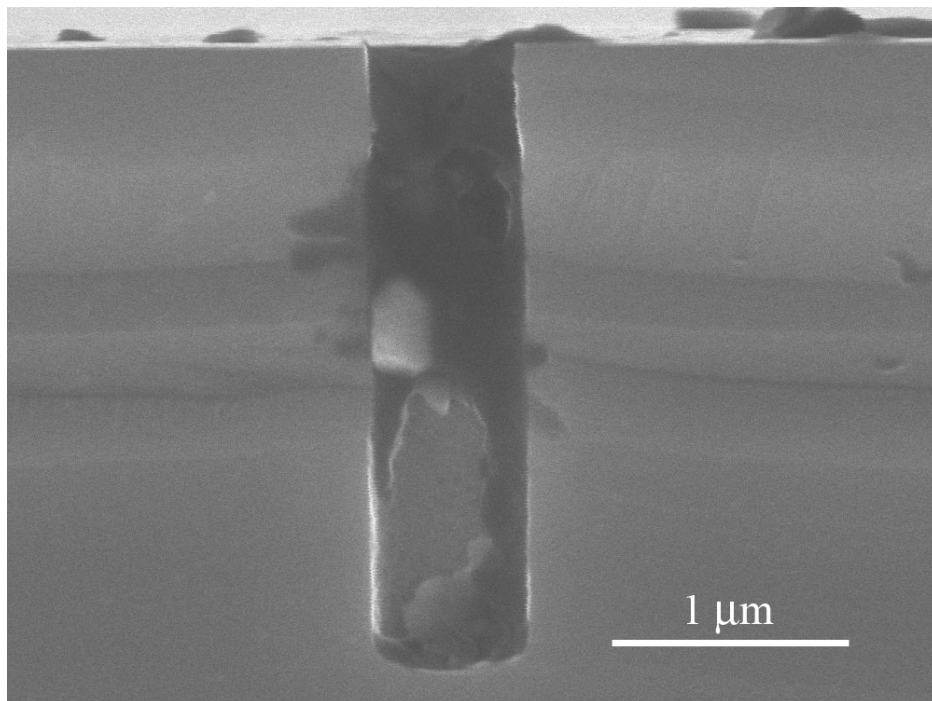


図 2-18 DRIE 後の溝形状

・等方性エッチングについてのまとめ

表面粗さ小さくすることと形状の制御性とはトレードオフの関係にあるので、等方性エッチング時間を適切に選択する必要がある。等方性エッチング時の形状を崩す原因は横方向へのエッチングであり、そのエッチングレートは $0.85 \mu\text{m}/\text{min}$ であった。

・基礎実験のまとめ

本節で行ったマスクレイアウト・DRIEプロセス・等方性エッチングプロセスに関する実験結果をもとに、ミラー機構用斜面形状を製作する際の指針を下記の通り定めた。

マスク幅については一定の幅とし、可能な限り狭くすることとした。マスク幅の最小値はDRIEプロセスにより異なり、DRIE1、DRIE2の場合でそれぞれ $1.5 \mu\text{m}$ 、 $0.2 \mu\text{m}$ であった。開口形状は正方形を用いることとした。

DRIE プロセスレシピについては製作したいミラー機構用斜面の角度により決める。本章で行ったプロセス条件のもとでは DRIE1・DRIE2 それぞれについて、高低差は最大でそれぞれ  $20.6 \mu\text{m}$ 、 $6.9 \mu\text{m}$  得られた。

等方性エッチング時間については表面粗さと形状の制御性から適切に選択する。等方性エッチング時の形状を崩す原因は横方向へのエッチングであり、そのエッチングレートは  $0.85 \mu\text{m}/\text{min}$  であった。

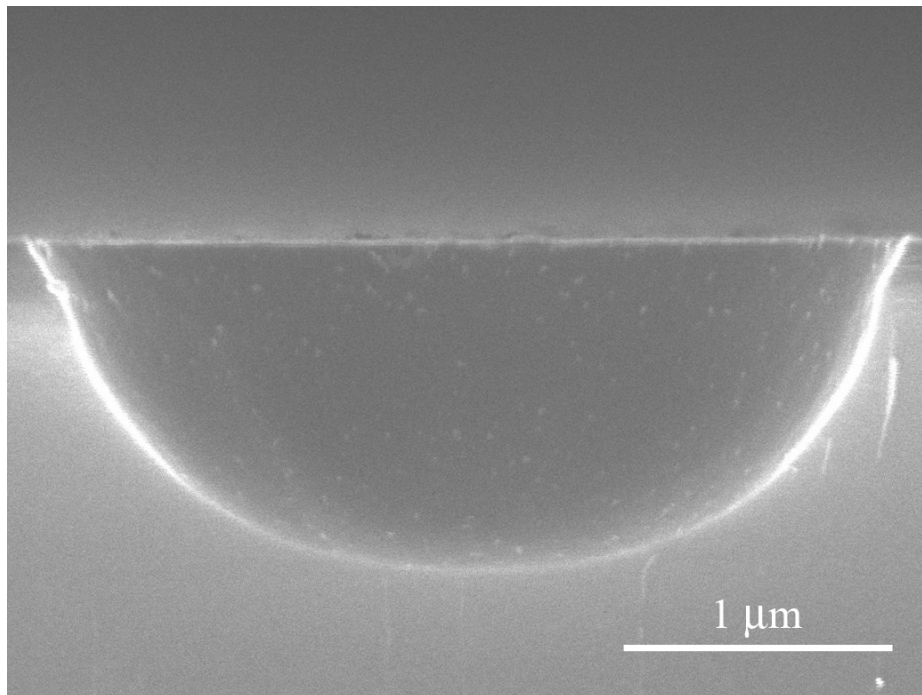


図 2-19 等方性エッチング後の溝形状

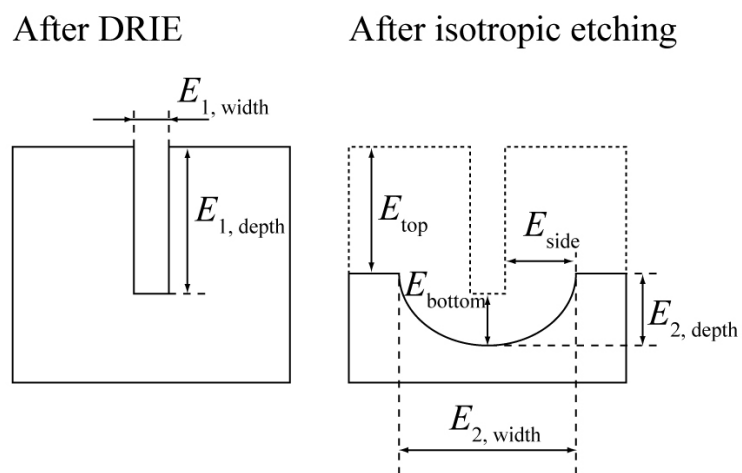


図 2-20 エッチング後の深さと幅の定義

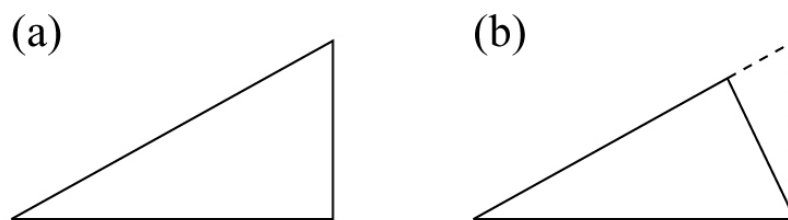


図 2-21 等方性エッチングによる形状への影響

#### 2-2-4 45° 斜面形状製作

本節では、前述の2種類のDRIEプロセスによる、開口面積とエッチング深さの関係をもとに直描マスクを設計し、斜面形状の製作を行なった。数値目標として、深さ10 $\mu$ m、斜度45°、算術平均表面粗さRa50nm、PV250nmの斜面をRIE-lagによって製作することを目指す。

##### ・DRIE プロセス

前節までで、DRIE1とDRIE2というエッチングガスパラメータの異なる2種類のプロセスによる条件だしを行ってきたが、本節で使用するDRIEプロセスは、目標とする構造がエッチング深さ10 $\mu$ mと深いため、エッチング速度の速いDRIE1を用いることとした。

##### ・マスクの設計

前節までの、マスク開口面積とエッチング深さの検証に基づいた、斜面形成のための直描マスクの設計について述べる。図2-22に、45°斜面製作のための直描マスクパターンを示す。青で塗りつぶされている部分が、後述のICP-RIEプロセスでエッチングされる部分となる。本研究では、45°斜面形成のために、様々なマスクデザインを検討した結果、図2-22に

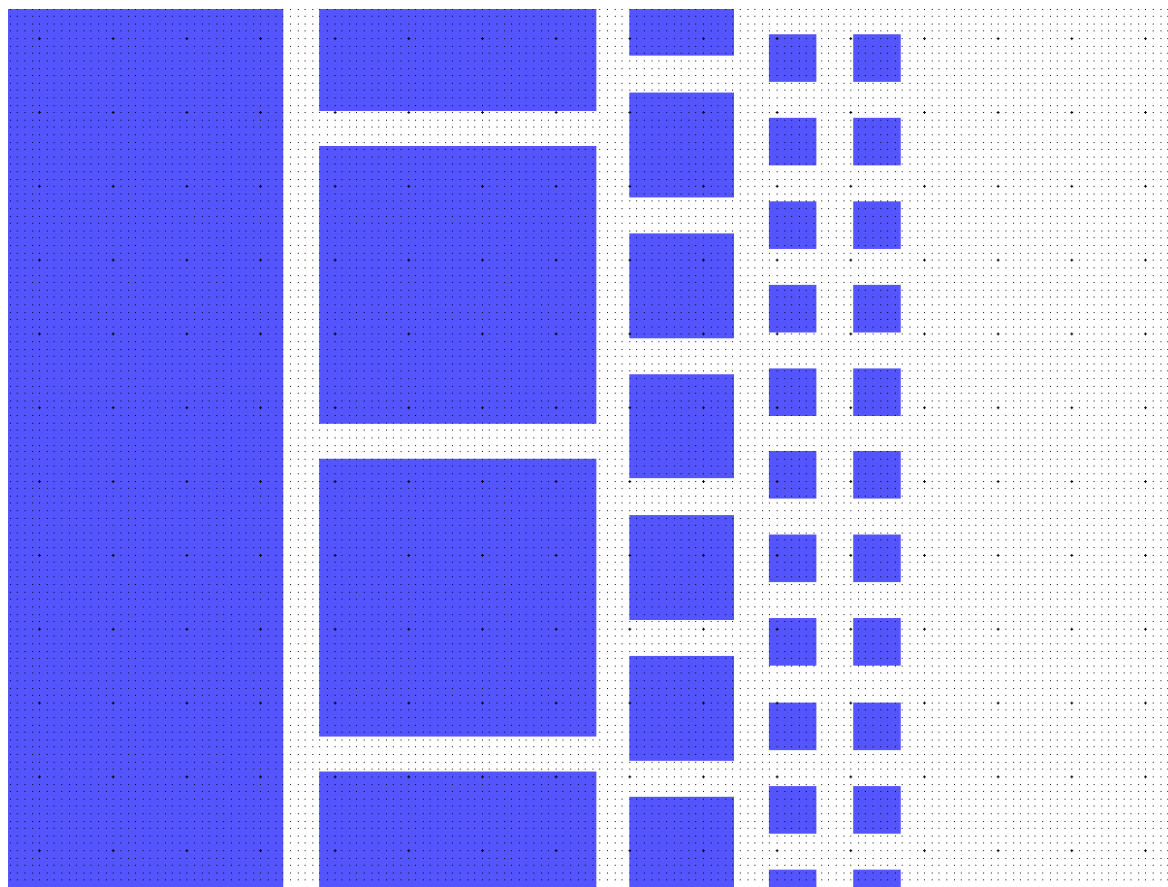


図 2-22 45°斜面形成のための直描マスクパターン

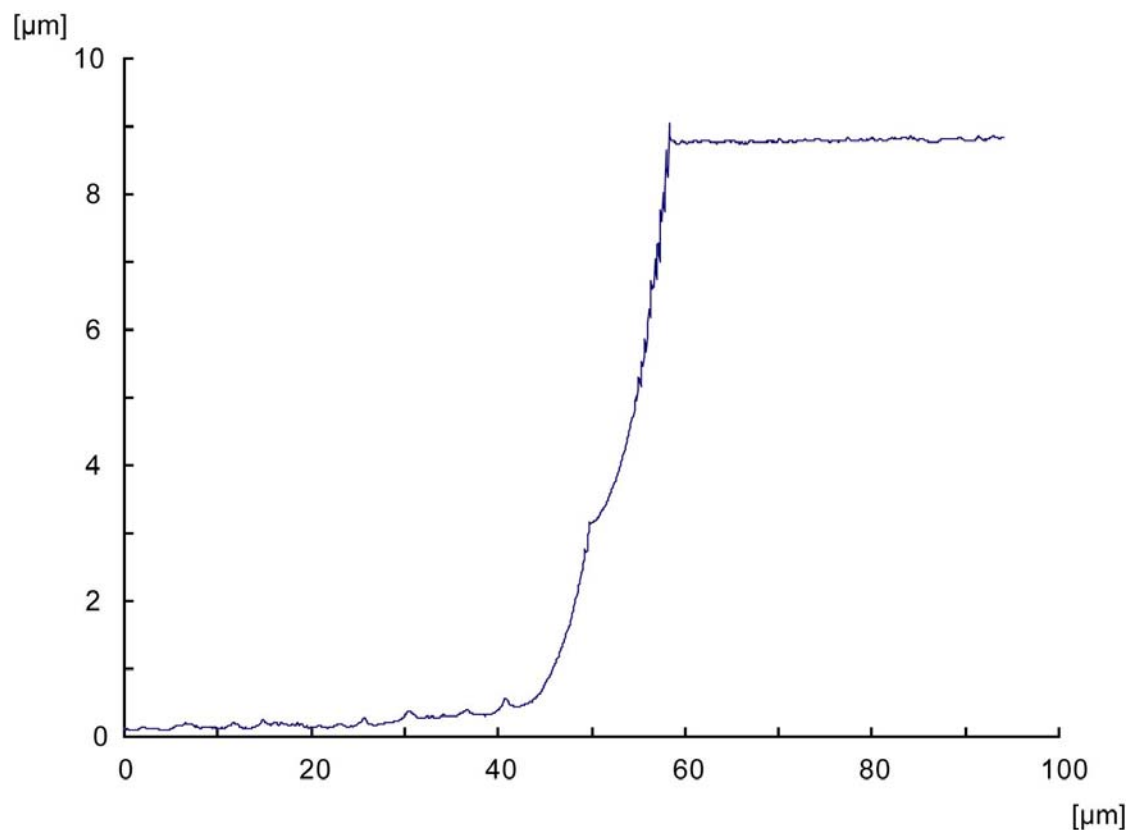


図 2-23 45°斜面プロファイル

示したような、5段の階段状のステップからなるデザインが、ICP-RIEによる等方性エッチングの際の斜面の表面粗さに関して、もっとも滑らかに製作できることから5段のデザインを採用した。デザインには、付録に示した、CADデザインをマスクデータに変換するプログラムを用いた。

・直描条件、プロセスなど詳細

EBによる、Siウェハ上へのパターン直描および、Siの異方性エッチング、等方性エッチングなどプロセスの詳細を述べる。

まず、切り出したSiウェハの自然酸化膜除去のために、46%HFにて洗浄を行なう。ウェハを110°Cのホットプレートで2分間乾燥させた後、電子線レジスト塗布プロセスへと移る。ウェハとレジストの密着性を向上させるために、OAPを挟み、その後電子線レジストZEP520Aをスピコートする。スピコートのプロファイルは以下の通りである。500rpm x 5sec、4000rpm x 60sec。塗布後は、ホットプレートで180°C、15分メインベークを行う。

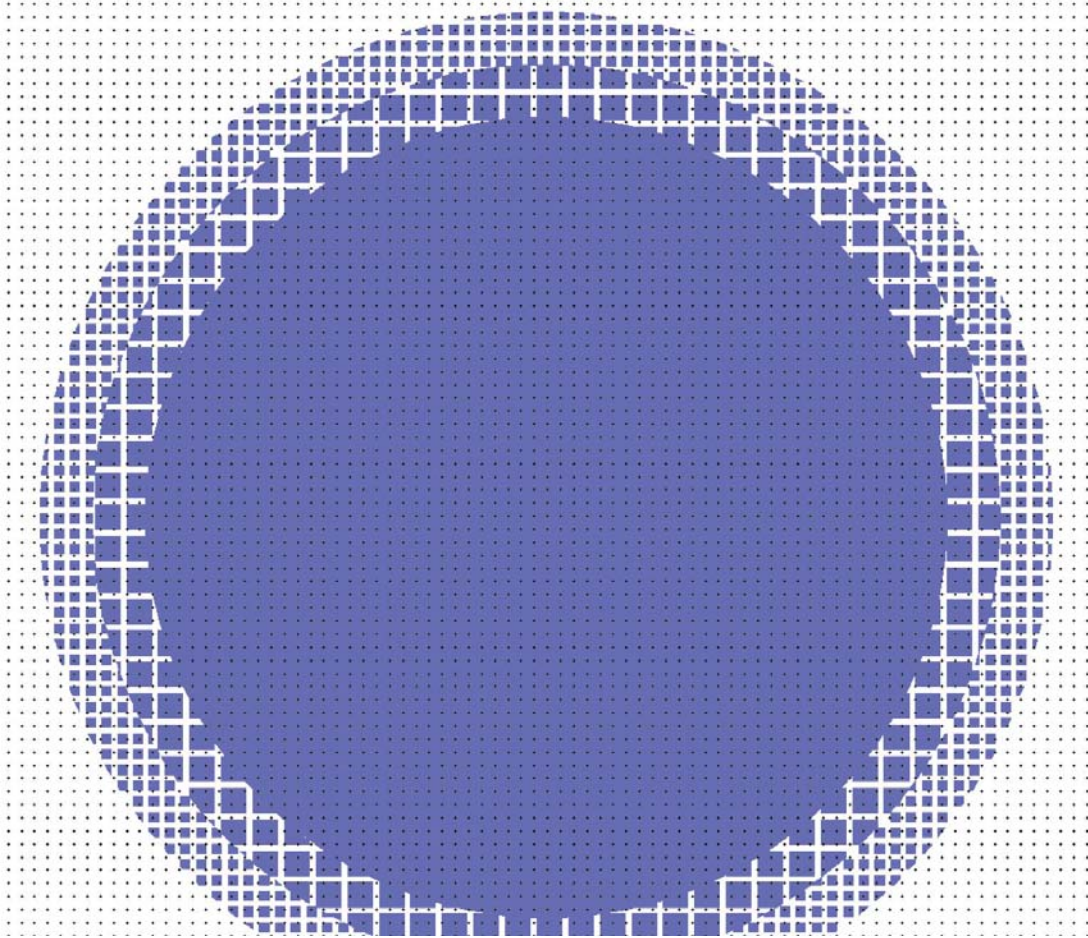


図 2-24 凹構造製作のための直描マスクパターン  
(ドット間距離 10 $\mu$ m)

パターンのEB直描は、電子線露光量120 $\mu$ C/cm<sup>2</sup>で行なった。現像は、1)ZMD-N50、160sec、2)ZMD-B、5sec、3)IPA、5secの順に行なっていく。

ICP-RIEエッチングは、上述のDRIE1プロセスを用いてエッチングを行なった。エッチング条件は、SF<sub>6</sub>:500sccm、7sec C<sub>4</sub>F<sub>8</sub>:150sccm、2sec Regulation mode: Position、Position 25%、出力：1900W/60W、温度0°Cで、エッチング時間は10minとした。

ICP-RIE後、レジストを除去するために、O<sub>2</sub>プラズマエッチングを5分行なった後に、アセトンとエタノールで超音波洗浄を行なった。

その後、ICP-RIEを用いて等方性エッチングで側壁をエッチングし、加えて、表面を平滑化する。SF<sub>6</sub>:130sccm、 Regulation mode: Position、Position 45%、出力：500W/40W、温度0°Cで、エッチング時間は15minとした。

・レーザ3次元段差計による評価

レーザ 3次元段差計で計測を行なった。断面図、斜度、表面粗さ評価。SEM による観

察も行なった。図 2-23 に、図 2-22 のマスクデザインで製作したシリコン基板上の 45°斜面の断面プロファイルを示す。設計値どおりの 45°斜面が得られたことがプロファイルから分かる。数パターンの斜面設計を行い、プロセスを行なった結果、**最大斜度 51°、算術平均表面粗さ : Ra : 10nm (平面)、Ra : 35nm (斜面)、Peak-Valley 値 : 200nm** を達成した。

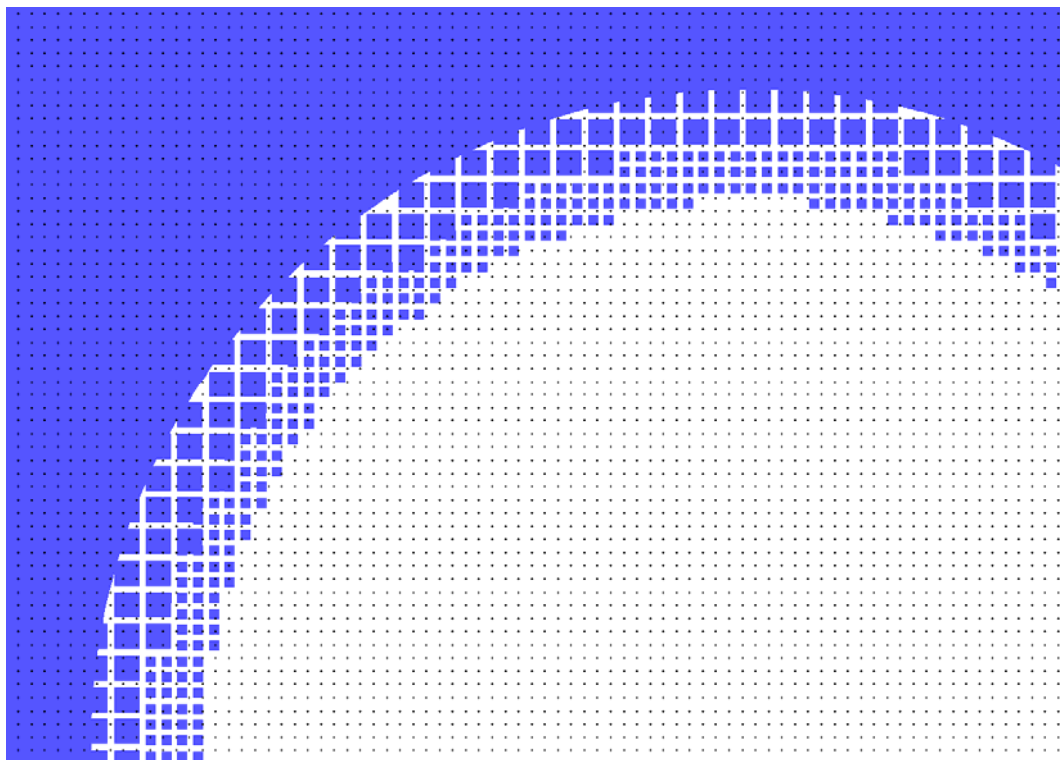


図 2-25 凸構造製作のための直描マスクパターン  
(ドット間距離 10 $\mu$ m)

・斜面以外の形状試作

RIE-lagによる、3次元凹凸形状設計の有効性を検証するため、45°斜面以外に凹凸形状を試作した。図2-24に、凹形状のマスクデザイン、図2-25に凸形状のマスクデザインを示す。図2-22同様に、青で塗りつぶされている部分が、後述のICP-RIEプロセスでエッチングされる部分となる。図2-26に、凹凸形状のSEM画像を示す。

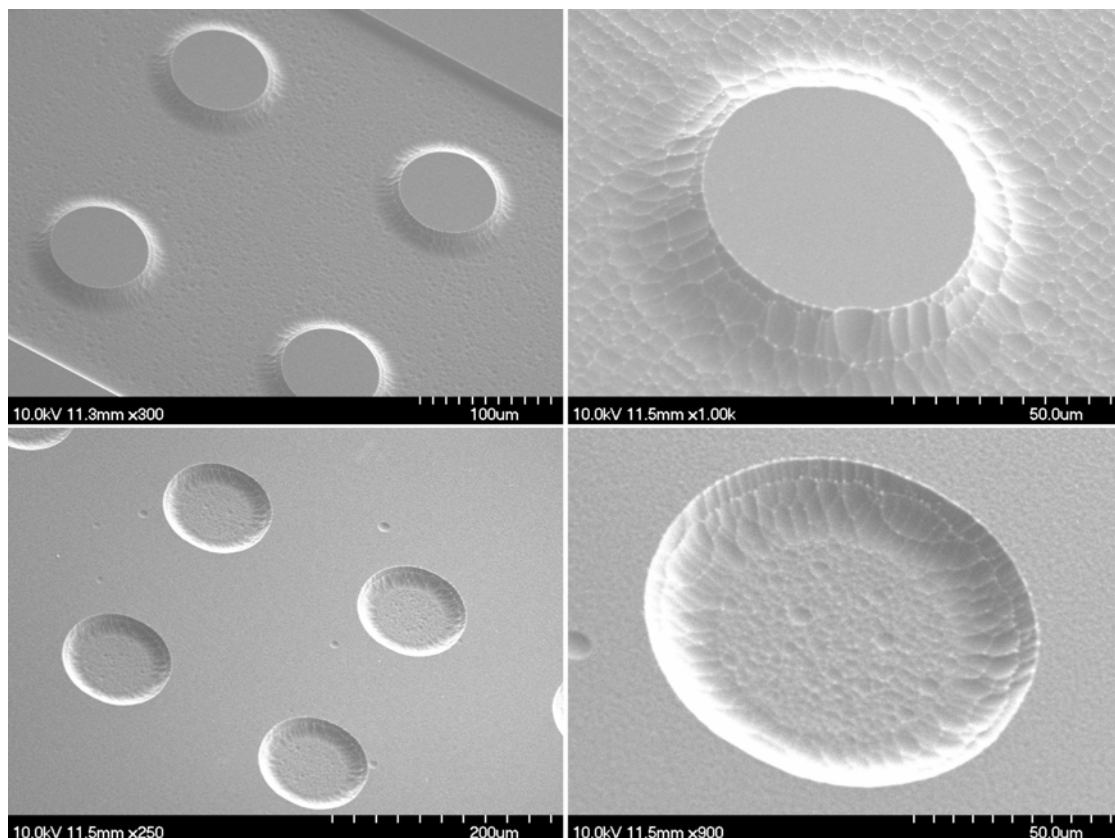


図 2-26 凹凸形状の SEM 画像

#### 2-2-5 まとめ

量子化補正マスクエッチングと表面平坦化技術を用いた3次元曲面形成技術では、マスクの開口面積に依存したシリコンエッチングレートのラグ (RIE-lag) を利用して、シリコン表面に45°の斜面形成技術を確立した。このために、開口面積とエッチング深さの関係を実験データとして蓄積し、そのデータをもとに、凹凸形状のCADデザインを入力すると、RIE-lag用のエッチングマスクパターンを生成するプログラムを作成した。このマスクを用いてDRIEの異方性エッチングを行い、その直後にマスクの側壁をSF<sub>6</sub>ガスによる等方性エッチングを行うことで除去し、目的の凹凸形状を製作した。このとき、異方性エッチングと等方性エッチングのプロセスの間に、HFディッピングを挟むことで、構造表面に付着したデポガスを除去し、スムーズな等方性エッチングを得られることを発見した。これにより、最終的に、最大51°の斜面形成に成功し、表面粗さRaを平面で10 nm、斜面で35 nmを達成した。また、このときのPeak-Valley値は200 nmであり、目標とした数値目標の達成に成功した。



○付録

斜面を製作するためのマスク書き出しプログラムを下記に示す。

```
(*単位はすべてnm*)
ew = 300000; (* 1つの電極の横幅*)
ei = 50000; (*電極と電極の間隔*)
el = 1000000; (* 電極の縦幅*)
wx = ew; (*描画領域のx幅*)
wy = el; (*描画領域のy幅*)
thi = 1500; (*マスク部分の壁の厚さ*)
SiO2 = 150; (*熱酸化膜の厚さ*)
z0 = 960; (*最小エッチング深さ*)
q = 1.2 Degree; (*斜面の角度*)

Area[depth_] := ; (*開口面積の関数*)

x1 = ew/2;
x2 = x1 + ei;
x3 = x2 + ew/2;
x4 = x3 + ew/2;
x5 = x4 + ei;
x6 = x5 + ew;

(*描画領域の最大値*)
xmax = x6;
ymax = wy;

(*斜面の関数*)
Slope[x_] :=
  If[0 <= x <= x1, z0 + SiO2,
    If[x2 <= x <= x3, z0,
      If[x3 <= x <= x4, Tan[θ]*(x - x3) + z0,
        If[x5 <= x <= x6, Tan[θ]*(x - x3) + z0 + SiO2, 0]]];

(*斜面グラフの表示*)
g1 = Plot[-Slope[x], {x, 0, x1}];
g2 = Plot[-Slope[x], {x, x2, x4}];
g3 = Plot[-Slope[x], {x, x5, x6}];
Show[{g1, g2, g3}, PlotRange -> Automatic]

(*出力を書き出すファイルを開く*)
stream1 = OpenWrite["outfile.tlc"];

(*tlcファイルのヘッダ書き込み*)
WriteString[stream1, "=L¥n"]
WriteString[stream1, "1¥n"]
WriteString[stream1, "Openings 1¥n"]
WriteString[stream1, "=H¥n"]
WriteString[stream1, filename, "¥n"]
WriteString[stream1, "7.0.0.8¥n7.0.0.8¥n"]
```

```

WriteString[stream1, "1000¥num¥n"]
WriteString[stream1, "00/00/00¥n00:00:00¥n"]
WriteString[stream1, "1 0 0 100000 100000¥n"]
WriteString[stream1, "0 0 0 0¥n¥n"]

(*開口面積の計算とファイルへの書き込み*)
ycur = 0;
xcur = 0;
If[0 <= xcur <= x1 || x2 <= xcur <= x4 || x5 <= xcur <= x6,
{
  x1 = Sqrt[Area[Slope[xcur]]];
  px = x1 + thi;
  ycur = ymin;

  While[ycur < ymax,
  {
    y1 = x1;
    py = y1 + thi;

    x0 = Round[xcur + px/2 - x1/2];
    x1 = Round[xcur + px/2 + x1/2];
    y0 = Round[ycur + py/2 - y1/2];
    y1 = Round[ycur + py/2 + y1/2];
    ycur = ycur + py;

    WriteString[stream1, "=B¥n", "1 ", x0, " ", y0, " ", x1, " ", y1,
      " ", "¥n¥n"];
  }];
  xcur = xcur + px;
}, If[x1 < xcur < x2, xcur = x2,
If[x4 < xcur < x5, xcur = x5, Break[[]]]];

Close["outfile.tlc"];

```

## 2-3 平面可変ナノギャップ形成技術、及びギャップ駆動技術

### 2-3-1 研究の目的

本研究の目的は **SPR** バイオセンサにおいて、波長スキャンによる方法で検出する際の微小分光器を実現するために、ナノ～マイクロスケールのギャップを有した高精度可動平行平板の形成方法を確立することである。さらにその微小な可動平行平板の応用として、2枚の薄膜間の干渉を利用して分光を行うファブリペロー干渉計の2枚の薄膜ミラーとして利用することで、可変波長の光フィルタ機能実現し、その性能を評価することである。

#### 2-3-1-1 研究の背景

近年、医療の分野において **MEMS** 技術を用いた微小センサによる生体情報の計測や、医療デバイスの小型化などが注目を集めている。**MEMS** 技術によってセンサが微小化するこ

とによって、より微小な領域に絞って計測可能であり、より細胞という生命の本質的な基本素子に迫っての医療行為が可能となるためである。また、現在の医療のキーワードである低侵襲・非侵襲治療という観点からも、MEMS 技術による医療機器の小型化が望まれている。医療分野において行われる生体情報の有効な取得方法の一つに光を用いたものがある。呈色反応を用いた吸光スペクトル解析で血液内の化学成分計測や、X 線 CT (ComputerTomography, コンピュータ断層撮影) で体内を観察することが可能である。光を用いた生体情報の取得は低侵襲・非侵襲のニーズに良く適合し、今後も発展が望まれる。そのような光学計測は MEMS 技術の得意とする分野でもある。ナノ～マイクロスケールのデバイスは光の波長を制御する上で適合性が非常に高く、光学計測以外でも光通信技術などで様々な分野のキーテクノロジーとなっている。以上の背景から、MEMS 技術を用いた医療用光学計測デバイスの実現を目標としており、その中でも体内・体外の環境情報を取得するための SPR センサで利用可能な分光デバイス製作技術の実現が期待されている。

#### 2-3-1-2 マイクロファブリペロー干渉計

MEMS 技術は医療分野において幅広く適用可能であるが、MEMS 技術が有効と考えられるもののひとつに体内埋込型センサがあげられる。手術後の患部の経過確認や人工臓器の動作確認、内視鏡手術における局所的な生体情報の取得など、体外からの計測が困難かつ連続的な生体情報の取得が必要な場合に求められている。実際に胎児治療の治療後の経過確認や、心疾患における詳細かつ継続的な病態確認への適用の報告がされている。このように埋込型センサの要望は幅広く、実現は意義深い。MEMS 技術を用いれば、微小な光学計測デバイスを作成し、それを生体適合性に優れたカプセル内に格納することで、カプセル内から低侵襲・非侵襲な生体情報の光学計測が実現可能である。以上を踏まえ、医療用埋込型光学計測センサとしての利用も目指し、その具体的なセンサとしてマイクロファブリペロー干渉計を提案する。ファブリペロー干渉計とは、2枚の薄膜間で光が干渉することを利用して、任意の波長に感度を持つようにギャップを制御することで可変波長光フィルタとして機能する。様々な分光法の中でも、構成がシンプルであるために MEMS 技術で作成可能な構造であり、小型化によって埋込型センサへの応用が可能であると考えられる。SPR における波長スキャンや生体組織の吸収スペクトル解析を行うことで、その組織の状態や成分などの様々な生体情報が取得できるという意味でも、直接的に生体内で機能する小型化可能な分光器のニーズは強い。

#### 2-3-1-3 マイクロファブリペロー干渉計

埋込み型センサとしてファブリペロー干渉計を MEMS 技術で小型化し、マイクロファブリペロー干渉計を製作する上での問題点がある。それは MEMS で扱う微小領域において、ギャップを制御可能な向かい合う 2枚の平行平板を精度良く製作することが難しいということと、その制御で平行性を維持することが難しいということである。これは、従来平行

な 2 平板を MEMS で作成しようとした場合、2 枚のミラーを間に犠牲層を挟んだ形で形成し、後からその犠牲層を取り除くという方法が取られていた。これは、2 枚の平面を予め準備しておいてそれを平行に貼り合わせようとするには、貼り合わせる際の位置合わせが困難であり、また、そもそも貼り合わせた構造同士を接合に至らせる手段が限られていたことが背景にあった。しかし、犠牲層を用いて 2 枚の平行平板を形成する場合には、その犠牲層とミラー層に必ず生じてしまう内部応力によって、ミラー全体が歪んでしまうというファブリペロー干渉計にとっては致命的な問題があった。さらに、2 枚の平行平板のギャップを制御する場合、MEMS ではその平行平板間に電圧を印加して、平板をコンデンサとした静電気力によってお互いを引き合わせるのが一般的だが、この方法では原理的に平板間の初期ギャップの 1/3 までしか絶対にギャップを狭くできないという制限があった。医療で実用的に使えるマイクロファブリペロー干渉計の製作には以上のような障壁が存在している。マイクロファブリペロー開発の上で最大の障壁となっているこの 2 点

- (1)犠牲層を用いた平行平板の歪み
- (2)初期ギャップ 1/3 を超えられない

に対して、これらを解決するための方法は MEMS において未だ確立されておらず、解決のための手法が求められている。本研究ではこれらを解決する全く新しい平行平板製作プロセスを提案する。これらの技術はまだ MEMS において確立されておらず、実現するための手法が求められる。

#### 2-3-1-4 研究の目的

以上より本研究の目的を、従来のプロセスでは実現不可能であった、高い平坦度・平行度を持った 2 枚の可動平板の新しい形成方法を開発し、その精度及びギャップ制御性能を検証することとする。また、その平行平板のマイクロファブリペロー干渉計としての分光性能を評価する。新しい形成方法とは具体的には、2 枚のミラーを別々に製作し、PDMS (Poly-dimethyl Siloxane) と呼ばれるシリコンゴムを用いた構造の転写技術を用いて、2 枚のミラー構造を貼り合わせる。ミラー間のギャップは TMAH (Tetramethyl Ammonium Hydroxide) による異方性エッチング、あるいは Si の部分的熱酸化による手法で形成する。TMAH による異方性エッチングの場合には、そのエッチング速度を制御することで正確な大きさのギャップを形成する。さらに、従来のようにミラー間に電圧をかけてお互いを引き合わせるのではなく、一方のミラーをもう一方のミラーとは反対側から静電気力で引っ張ることでミラー同士を遠ざける方向に動かすようにすることで、ミラー間の初期ギャップ 1/3 の可動制限を無くした。

以上より本研究では、提案するマイクロファブリペロー干渉計の製作プロセス技術の確立を行い、さらに製作技術の改善をおこなうことで、最終的に 100 nm 以下のギャップ間隔を有するナノギャップの形成を行い、ギャップ間隔変位量 800 nm を実現することを目的とする。製作プロセス技術の確立では、「2-3-2 平面ナノギャップ構造の設計」をもとに

「2-3-3 製作」を行い、さらに試作デバイスを評価するための「2-3-4 実験・考察」を行う。さらに、「2-3-5 製作技術の改善」を行うことで、従来実現が困難であった、可視～近赤外の幅広い波長範囲で透過波長を変化できる可変型ファブリペロー干渉計の製作プロセス技術を実現する。

### 2-3-2 平面ナノギャップ構造の設計

本節では、ファブリペロー干渉計の原理を述べ、一般的なマイクロファブリペロー干渉計についてその問題点を述べる。その上で問題点を解決するための新しいマイクロファブリペロー干渉計を提案し、キーとなる要素技術及び制約条件を踏まえたデザインについて述べる。最後に、そのデザインでの機械特性・光学特性のシミュレーションを行い、本研究で提案する新しいマイクロファブリペロー干渉計の実用性について述べる。

#### 2-3-2-1 ファブリペロー干渉計の原理

ファブリペローの基礎的な特性について述べる。図 3-1 左図に示すように、ファブリペロー干渉計は 2 枚の半透過鏡を光の波長と同程度のギャップをおいて平行に配置されており、このギャップを調節することができる。ギャップの変化によって透過する光の波長を変化させたり、コヒーレントな光の透過率・反射率を変化させられるハーフミラーとして利用されている。

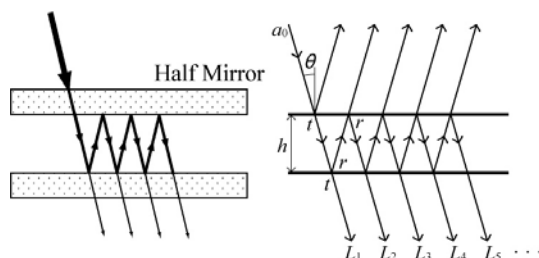


図 3-1 Principle of Fabry-perot interferometer

図 3-1 右図にファブリペロー干渉計の模式図を示す。ここでは簡単のために半透膜は理想的な厚さ 0 の薄膜とし、薄膜内での干渉は考えない。ファブリペロー干渉計に入射角  $\theta$  で振幅  $a_0$ 、波長  $\lambda$  の光が入射する場合を考える。半透過鏡の振幅透過率を  $t$ 、振幅反射率を  $r$  とすると、図に示す透過光  $L_1, L_2, L_3, \dots$  の振幅はそれぞれ  $a_0 t^2, a_0 t^2 r^2, a_0 t^2 r^4, \dots$  となる。ここで隣接する透過光間の位相差  $\delta$  は

$$\delta = \frac{4\pi h \cos \theta}{\lambda} \quad (3-1)$$

となることを考えて、透過光の複素振幅  $a_t$  は

$$a_t = a_0 t^2 + a_0 t^2 r^2 e^{i\delta} + a_0 t^2 r^4 e^{i2\delta} + \dots \quad (3-2)$$

と表せる。これは Stokes の定理より  $t^2 = 1 - r^2$  を用いて、

$$a_t = \frac{a_0(1-r^2)}{1-r^2 e^{i\delta}} \quad (3-3)$$

とまとめられる。よってファブリペロー干渉計を透過する光の透過率  $T$  は、入射光強度を  $I_a$ 、透過光強度を  $I_t$ 、強度反射率を  $R = r^2$  として以下のようになる。

$$T = \frac{I_t}{I_a} = \frac{|a_t|^2}{|a_0|^2} = \frac{1}{a_0^2} \cdot \frac{a_0^2(1-r^2)^2}{1+r^4-2r^2 \cos \delta} = \frac{1}{1 - \frac{4R \sin^2(\delta/2)}{(1-R)^2}} \quad (3-4)$$

この結果に基づき、ミラー間隔  $h = 1000$  [nm] において強度反射率が  $R = 0, 0.1, 0.5, 0.9$  のときの透過率と波長の関係を図 3-2 に示す。

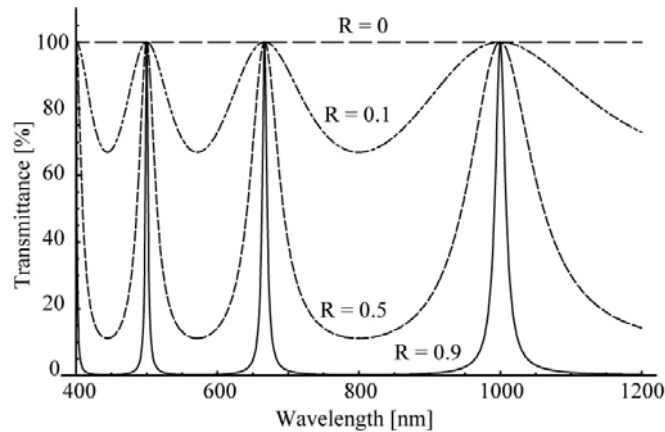


図 3-2 Transmittance change with reflectance ratio

簡単のため入射角  $\theta$  は  $0^\circ$  とした。図 3-2 から、反射率が高いほど透過光のピークが鋭くなり、波長の選択性が高まることが分かる。また、ピークは式(3-4)において  $\sin(\delta/2) = 0$  のとき、即ち、

$$\lambda = \frac{2h \cos \theta}{m} \quad (m = 1, 2, 3, \dots) \quad (3-5)$$

の場合である。

## 2-3-2-2 構造の設計

本節では、従来の典型的なマイクロファブリペロー干渉計の問題点を述べ、それを解決するための本研究での新しいマイクロファブリペローのコンセプトと、そのためのキーとなる要素技術について述べる。

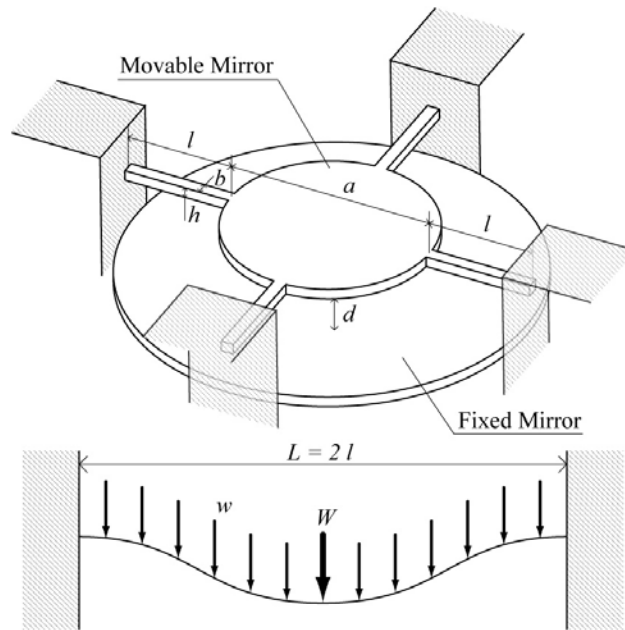


図 3-3 Mechanical model of typical micro Fabry-Perot interferometer.

図 3-3 に典型的なマイクロファブリペロー干渉計のモデルを示す．2 枚のミラー間に電圧をかけることで，生じる静電気力を利用してギャップを狭くすることが可能である．まずはこのモデルで材料力学計算を行い，機械特性を明らかにすると共に，その限界を示す．尚，2 枚のミラーの材質は，本研究で用いるミラーの材質と同じく単結晶シリコンとして計算する．始めに，可動ミラー電極に加わる力と変形量を求める．可動ミラーは図 3-3 に示すように，広い円形ミラーが幅の細い 4 本の梁によって支えられた構造になっている．また，その下にギャップをもって十分に広い面積の平坦な固定ミラーが配置されている．このとき，4 本の梁と円形ミラー中心部分での断面 2 次モーメントはそれぞれ，

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

$$I' = \frac{1}{12}ah^3$$
(3-6)

となっている．ここで，円形の中心部の径  $a$  は 4 本の梁  $b$  よりも 10 倍程度太く，また，円形ミラーは 4 方向から支えられているために 2 方向から支えられている梁よりも変形しにくいと考えられる．そのため実際の断面 2 次モーメントは梁の 10 倍以上であるので，ミラー部分では変形しないと仮定して計算を行う．この仮定の下では図 3-3 下のように，中心部分に集中加重  $W$  が加わり，それ以外の梁の部分に分布加重  $w$  が加わっているとモデル化できる．このときの中心部分のたわみ  $v$  は次式となる．

$$v = \frac{WL^3}{192EI} + \frac{wL^4}{384EI}$$
(3-7)

ここで  $E$  はシリコンのヤング率  $190 \times 10^9$  [Pa] である。続いて 2 枚のミラー電極に加わる力から集中加重  $W$  と分布加重  $w$  を求める。表面積が  $S$  の 2 枚の電極が距離  $d$  で置かれていて、電圧  $V$  [V] が印加された場合の力  $F$  [N] は

$$F = \frac{1}{2} \frac{\varepsilon_{air} \varepsilon_0 S}{d^2} \cdot V^2 \quad (3-8)$$

で表される。 $\varepsilon_0$  は真空中の誘電率、 $\varepsilon_{air}$  は空気の比誘電率である。式(3-8)より  $W$  と  $w$  はそれぞれ、

$$W = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_{air} \varepsilon_0 \cdot \pi(a/2)^2}{(d-v)^2} \cdot V^2$$

$$w = \frac{1}{2} \cdot \frac{\varepsilon_{air} \varepsilon_0 \cdot b}{(d-v)^2} \cdot V^2 \quad (3-9)$$

と求められる。これを式(3-6)と共に式(3-7)に代入すると最終的に次式が得られる。

$$v = \frac{\varepsilon_{air} \varepsilon_0}{(d-v)^2} \cdot \frac{\pi(a/2)^2 l^3 + bl^4}{4Ebh^3} \cdot V^2 \quad (3-10)$$

これが印加電圧  $V$  とたわみ  $v$  の関係式である。ここから、 $v$  の挙動を調べるために、式(3-10)の両辺を  $V$  で微分すると、

$$\frac{d}{dV} \{v(d-v)^2\} = 2CV$$

$$\leftrightarrow \frac{dv}{dV} = \frac{2CV}{(3v-d)(v-d)} \quad (3-11)$$

と変形できる。ここで  $C$  は構造の寸法に依存する定数

$$C = \varepsilon_{air} \varepsilon_0 \cdot \frac{\pi(a/2)^2 l^3 + bl^4}{4Ebh^3} \quad (3-12)$$

である。式(3-11)が示すところは、 $v \rightarrow d/3$  でたわみの電圧に対する変位が無窮大となり、ギャップがゼロになる方向に可動ミラーが引き込まれることを意味している。つまり、原理的にこの構造ではミラーのギャップを初期ギャップの 1/3 までしか制御することができない。

本研究では以上の問題点を解決するための新しいマイクロファブリペロー干渉計の製作方法を提案する。本研究で提案する新マイクロファブリペローで最も画期的な点は、ミラーに電圧をかけることで近づけるのではなく、遠ざける設計にしたことである。これにより、ミラーの初期ギャップまでの可動域制限を無くすことが可能となった。SOI (Silicon on Insulator) と呼ばれる薄膜単結晶 Si、絶縁層(SiO<sub>2</sub>)、基板 Si の三層構造ウェハ 2 枚を製作に用い、2 枚のミラーを別々に製作、最後に貼り合わせて接合する。このように別々にミラーを製作することで、犠牲層を用いた場合に比べて格段に小さな応力でミラー平面を形成できる。しかし一方で、別々に製作してしまったことで、平行度を高く張り合わせるための方法・工夫が求められる。この方法として、SOI 表面の研磨された極めて平坦な平面同士を、



水酸基同士の接合力を利用して直接的に接合させ、さらにその平坦な SOI 表面に対して、ミラー面を高さは異なるが平行に製作しておくことで、それらを貼り合わせたときにミラー同士も十分に平行であるという手法を提案する。

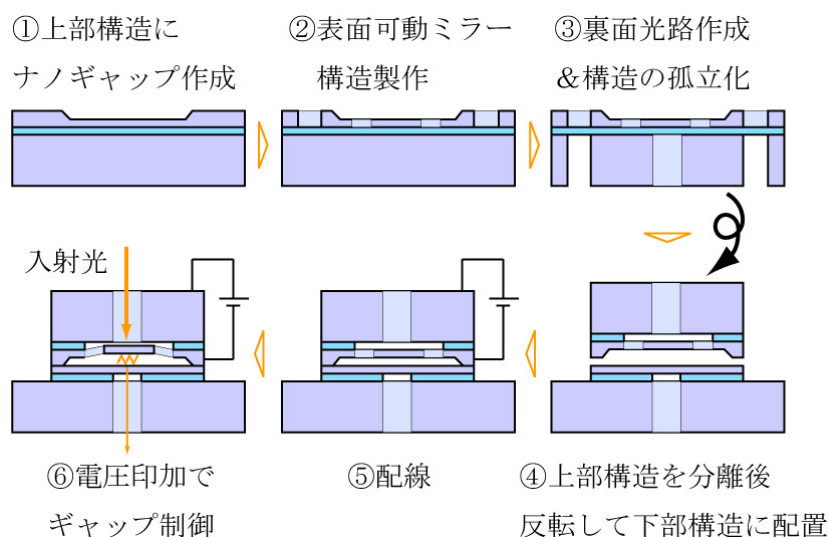


図 3-4 Schematic fabrication flow

図 3-4 に製作方法の概要を示す。まず可動ミラーを有する上部構造 SOI 表面の単結晶 Si 層を TMAH (Tetramethyl Ammonium Hydroxide) による異方性エッチングにより、元の Si 表面から極めて高い平坦性を維持したままナノギャップを形成する(図 3-4 ①)。続いて上部構造の表面・裏面を加工し、分離可能な状態にする(図 3-4 ②~③)。別のプロセスにて製作した、固定ミラーを有する下部構造に上部構造を PDMS を用いたスタンピング技術を用いて転写し、直接接合とシリコンフュージョンボンディングの技術を用いて接合力を強固なものにする(図 3-4 ④)。最後に上部構造に電圧を印加できるようにアルミワイヤで配線を行う(図 3-4 ⑤)。以上のプロセスを経て、新マイクロファブリケーターによる分光が可能となる(図 3-4 ⑥)。

#### 2-3-2-4 製作時の各プロセスに応じた境界条件

##### 2-3-2-4-1 TMAH

単結晶シリコンは、結晶性のために、TMAH (Tetramethyl Ammonium Hydroxide)や KOH といった強アルカリ溶液に対して、特定の結晶方向に向かって優先的にエッチング（異方性エッチング）が進行する。中でも TMAH は MEMS プロセスにおいて異方性エッチングに良く用いられており、温度や濃度を変えることで、エッチングレートを制御することが出来る。またそのエッチング面は平坦を良く維持し、そのために本研究では初期ギャップとして TMAH によるエッチングを利用しながらも、その面をミラーとして利用することが可能となる。

#### 2-3-2-4-2 PDMS スタンプング

上部構造と下部構造を張り合わせる際に、シリコンゴムの一種である PDMS (Poly-dimethyl Siloxane) を用いた。PDMS は任意の型に成型可能であり、また、その表面に適度な粘着性を持っていることを利用して、上部構造の把持が可能である。図 3-5 に PDMS を用いた上部構造の、下部構造へのスタンプング方法を示す。

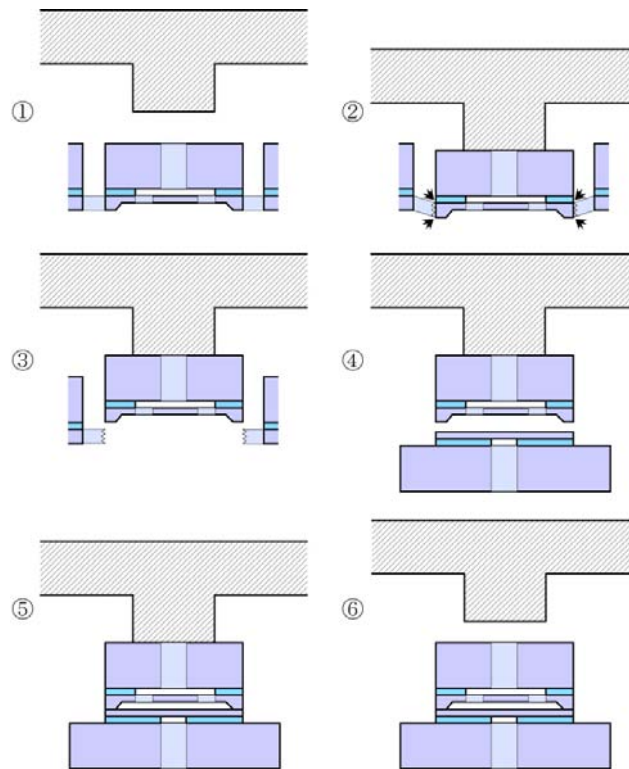


図 3-5 Schematic stamping flow

まず、円柱形に成型した PDMS を、反転させた上部構造の上から押し付ける(図 3-5 ①). そのままゆっくりと押し下げていくと、上部構造を保持していた僅かな架橋構造が破壊され、PDMS 表面の粘着性によって上部構造は PDMS に把持される(図 3-5 ②). そのまま引き上げ(図 3-5 ③), 下部構造に接地させる(図 3-5 ④～⑤). ここで、次項で述べる直接接合が接地表面に生じる。PDMS の粘着力よりもこの直接接合の接合力の方が勝るために、PDMS を引き上げると上部構造は下部構造に残される(図 3-5 ⑥). 下部構造への転写で PDMS スタンプングを使うことによるメリットを以下に挙げる。

- (1) 上部構造の裏面のみを用いた把持のために、構造を傷つけることが無い
- (2) PDMS が透明なため、下部構造を透かして確認しながら正確な位置合わせが可能
- (3) 常に上部構造の表面が下を向いているため、表面に汚れが付着しにくい

特に(1)と(3)が重要である。構造を傷つけるときに発生する微小な飛沫や、空気中に存在する塵が接合平面に僅かでも存在すると、それが妨げとなって、水酸基の結合が進まず、直

接合にとっての致命的な障害となるため、細心の注意を払って接合面を保護しなければならない。

#### 2-3-2-4-3 直接接合

前述した PDMS スタンプングが成功するためのキーとなる直接接合について述べる。貼り合わされる 2 枚のシリコン平面が以下の条件を満たすとき、接合面には速やかに直接接合が進行する。

- (1) 接合平面が極めて平滑であること
- (2) 接合面に塵が全く無いこと
- (3) 接合面に水酸基が存在すること

本研究では、SOI ウェハの研磨面を 2 枚の接合面に用いることで(1)を満たし、製作プロセス中に十分な洗浄を行い、可能な限り表面を清浄に保ち続けることで(2)を満たした。また、(3)に関しては、プロセスの最後に O<sub>2</sub> プラズマを表面にかけることで、表面を水酸基を持った親水性にすることが可能である。それ以外でも、RCA-SC1 洗浄を行うことで表面を親水性にすることが出来る。しかし、リリース後の SC-1 洗浄は、高い確率でスティクションを生じてしまい、詳細は後述するが、その場合は、針でつつくなどしてスティクションを解消しなければならない。このときにミラー構造を破壊、もしくは構造を削ってしまうことで細かい粉塵が表面についてしまう恐れがある。ただ、一方の O<sub>2</sub> プラズマも、構造を破壊する可能性が少なからずある。5 μm のミラー厚であれば何とか耐えられるが、3 μm だと破壊される確率が格段に上がってしまうことを確認した。上記の条件を満たした平面を貼りあわせると、その間には室温でも水素結合が生じることが直接接合の実体である。実際には、表面に水酸基が無い場合でも直接接合が生じたと報告されているが、この場合の接合は水素結合によるものではなく、van der Waals によるものであると示唆されている。本研究ではこの後のアルミワイヤによる配線時に、構造に相応の力がかかり、その力には水素結合による接合力では耐えられない。そこで配線の前に、さらにシリコンフュージョンボンディングを行うことで、結合力を強化し、配線を安全に行えるようにする。シリコンフュージョンボンディングには水素結合が必要であるため、van der Waals 力による直接接合は利用できない。つまり、破壊の危険性があっても、O<sub>2</sub> プラズマか RCA-SC1 洗浄による接合表面の親水性修飾の必要がある。

#### 2-3-2-4-4 シリコンフュージョンボンディング

図 3-6 にシリコンフュージョンボンディングによる接合表面での変化を示す。直接接合でシリコン平面間には水素結合が生じている場合、これをさらに加熱 (200~400°C) すると、脱水縮合が生じる。これをさらに熱すると残った酸素が拡散し、Si 間の直接的な結合に至ると考えられている。この加熱は窒素雰囲気下よりも酸素雰囲気下の方がより強固な結合が生じると報告されているが、本研究では、シリコン表面の必要以上の酸化を防ぐために、

窒素雰囲気下で行った。

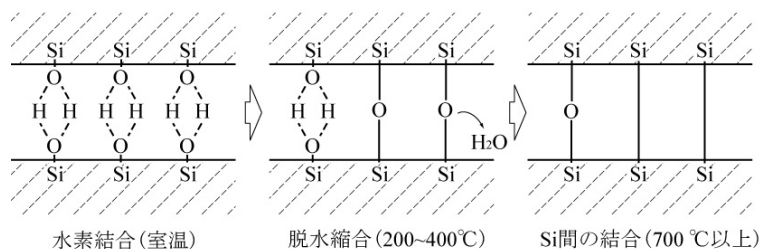


図 3-6 Model of Silicon fusion bonding

### 2-3-2-5 SOI ウェハの制約条件

本研究では、既に述べたように SOI ウェハを用いることで多くのメリットを得ている。その一方で、SOI ウェハを用いることによるデメリットも存在する。本節では、そのようなデメリットを述べると共に、それに対処するために避けられない制約条件について述べる。対処法はマイクロファブリペローの要求仕様に反する部分もあり、それに対する本研究の限界についても触れる。

SOI ウェハは MEMS プロセスにおいて極めて有効な材料だが、問題点も存在する。その一つが SOI ウェハに内在する残留応力である。SOI ウェハは、その工業的な製法上、表面の薄膜シリコン層と中間の SiO<sub>2</sub> 層に圧縮応力がかかっている。図 3-7 ①にその様子を示す。SiO<sub>2</sub> 層の応力は薄膜シリコン層の応力よりも強い。これは、シリコンの熱膨張係数の方が、SiO<sub>2</sub> の熱膨張係数よりも高いので、熱した状態で張り合わせられると冷えた場合により強く圧縮されるためである。そのために、SOI ウェハの基板を裏から掘って表面の 2 層だけが残るような状態になると、図 3-7 ②に示すように、SiO<sub>2</sub> の応力が開放されて SiO<sub>2</sub> 側に大きく歪んでしまう。このときに歪む力はとても大きく、表面の薄膜シリコンが歪みに耐えられずに SiO<sub>2</sub> もろとも破壊されてしまう場合がある。本研究の製作プロセスではこの図 3-7 ②の状態を必ず経なければならず、この応力に耐えるための対策が必須である。本研究でとった対策は大きく二つある。一つが、次章で詳説するが、表面 2 層だけになる間はその上にレジストを保護膜として使うことで、破壊を防ぐことである。もう一つが、表面の薄膜シリコン層が 5 μm, SiO<sub>2</sub> 層が 2 μm, 基板シリコン層が 450 μm の SOI を使うことである。5 μm の薄膜シリコンは 2 μm の SiO<sub>2</sub> の応力に耐えられることが確認された。

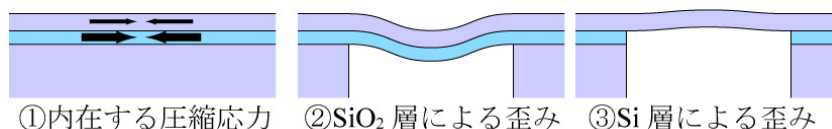


図 3-7 Skew by remaining stress

接合面を最終的に親水性に修飾するために、 $O_2$  プラズマか RCA-SC1 洗浄を行わなければならない。しかし、これらのプロセスは構造に一定の圧力が加えられるものであり、それに耐えうる強度が求められる。本研究のマイクロファブリペローのデザインにおいては、表面薄膜シリコン層が  $5\ \mu\text{m}$  の場合では耐えられて、 $3\ \mu\text{m}$  の場合は破壊されてしまうことが確認された。

以上の制約条件により、薄膜シリコン層が  $5\ \mu\text{m}$  の SOI ウェハを利用する必要があることが分かった。しかし、これは即ちマイクロファブリペロー干渉計のミラーの厚さが  $5\ \mu\text{m}$  程度になることを意味している。マイクロファブリペローの光学特性の検証によれば、材質が単結晶シリコンで厚さが  $5\ \mu\text{m}$  のミラーの場合、ミラー内での薄膜干渉によって分光性能が著しく下がってしまう。しかしながら、確かに  $5\ \mu\text{m}$  のミラーだけでは優れた分光特性には期待できないが、ミラー表面への金属薄膜の多層蒸着やその他構造の改良によって、分光性能は改善が可能であると考えられる。また、製作プロセスの高精度化や、SOI ウェハ残留応力の改善・解消によって、将来的には十分に薄い薄膜シリコンミラーを用いた製作は可能であろう。現段階においては、ミラー厚以外の、ミラーの平坦性や平行性もマイクロファブリペロー干渉計には重要な要素であり、これらを高い精度で製作可能であるということは、極めて意義深いことであると考え、本研究では表面の薄膜シリコン層が  $5\ \mu\text{m}$ 、 $\text{SiO}_2$  層が  $2\ \mu\text{m}$ 、基板シリコン層が  $450\ \mu\text{m}$  の SOI を用いた製作を行うこととした。

#### 2-3-2-6 応力を考慮した初期ギャップの調整

前項までで、製作中に  $\text{SiO}_2$  層の応力での破壊を防ぐことが可能であると述べた。しかし、もう一つ無視できない応力が残っている。 $\text{SiO}_2$  層が無くなってもなお残る、表面シリコン層の残留応力である。図 3-7③に示すように、 $\text{SiO}_2$  層が除かれて、表面一層だけになったシリコン層は、逆に表面方向に反る。表面シリコン層に生じていた残留圧縮応力は、 $\text{SiO}_2$  層のそれと比べると遥かに小さいものであり、その歪みで破壊されるということはない。しかし、ミラー表面の平坦性が必要とされるマイクロファブリペロー干渉計において、この僅かな歪みですら致命的である。図 3-8 に  $5/2/450\ \mu\text{m}$  の SOI ウェハの裏に直径  $500\ \mu\text{m}$  の円形の穴を掘り、表面のシリコン層だけにしたときの状態を図示する。このとき厚さ  $5\ \mu\text{m}$  の表面シリコンは歪み、その大きさは最大で  $600\ \text{nm}$  にも達していた。

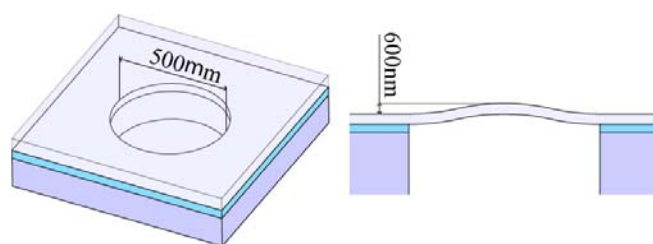


図 3-8 Large skew without beams

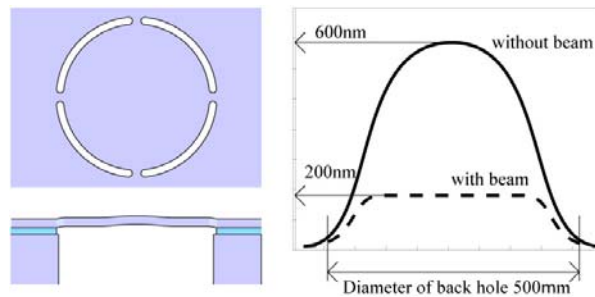


図 3-9 Improvement skew with beams

本研究でのマイクロファブリペロー干渉計の下部構造は図 3-4 で示したように、表面のシリコン層のみを残した、図 3-8 と同じ構造なのだが、このように歪んでしまうのでは、ミラーの高い平坦度は望めない。そこで、図 3-9 左図に図示するように、単に裏面に穴を製作するだけではなく、ミラー部を上下左右の 4 箇所を梁で支えるような構造にすると、図 3-9 右図のグラフのように梁部分ではやはり歪んでしまうものの、ミラー部は高い平坦性を維持できることが分かる。また、ミラー周辺の溝部分にミラーが膨張することで応力の大部分が開放されるために、全体の歪む大きさも軽減される。とは言うものの、やはり歪みはゼロには出来ない。これは同様に梁構造でミラーが支えられているマイクロファブリペロー干渉計の上部構造についても全く同様である。ただし、歪みの大部分は梁の部分で生じ、ミラー平面は平坦を保っている。むしろ積極的に梁を歪ませて、ミラーの平面を確保することが出来るという点が特筆できる。この歪みは、2 枚のミラー間の初期ギャップを狭める方向に生じているので、どの程度歪みが生じているのかを予め計測し、それに応じて改めて TMAH で形成する段差の大きさを決定すれば良いことが分かる。

#### 2-3-2-7 機械特性を考慮したデザインの決定

以上までを踏まえて、本研究で用いるマイクロファブリペロー干渉計の上部構造・下部構造のデザインを図 3-10 に示す。図 3-10 左図が可動ミラーを持つ上部構造である。四隅にある台形部分が、初期ギャップを形成するための段差である。図 3-10 右図が固定ミラーを持つ下部構造である。左右の図に四隅に突起部があるが、この部分は二つの役割を担っている。一つは、配線端子としての役割である。上部構造の可動ミラーのある層は、下部構造に張り付けた後は配線可能な部分がこの突起部だけになる。恐らくは、下部構造と接地することで下部構造固定ミラー部分と導通するのであろうが、シリコンフュージョンボンディングによって接合面が酸化されている可能性もあるため、念のために端子としてデザインした。もう一つの役割は、PDMS スタンプングの際に正確な位置合わせをするためのアライメントマークである。上部構造と下部構造のアライメントが不十分で、ずれて張り合わされてしまった場合、通常であれば可動ミラーに遮られて静電気が殆ど及ばない固定ミラーにまでも力が働いてしまう恐れがある。そうすると、固定ミラーまでもが動いて

しまい、ギャップの制御が出来なくなるため、上部構造と下部構造の位置合わせは重要である。

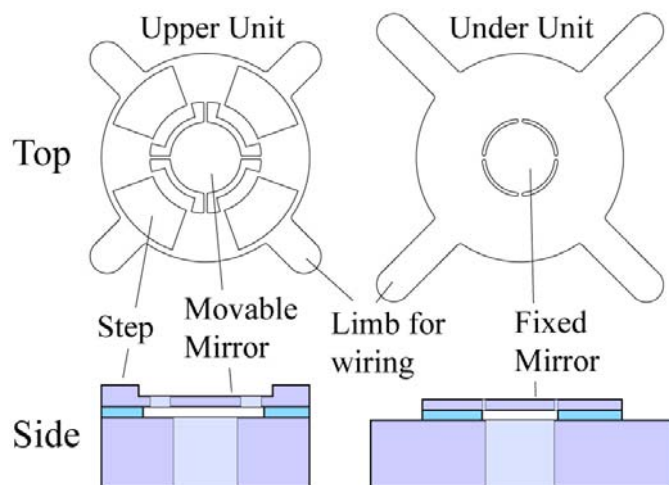


図 3-10 Upper and under unit design

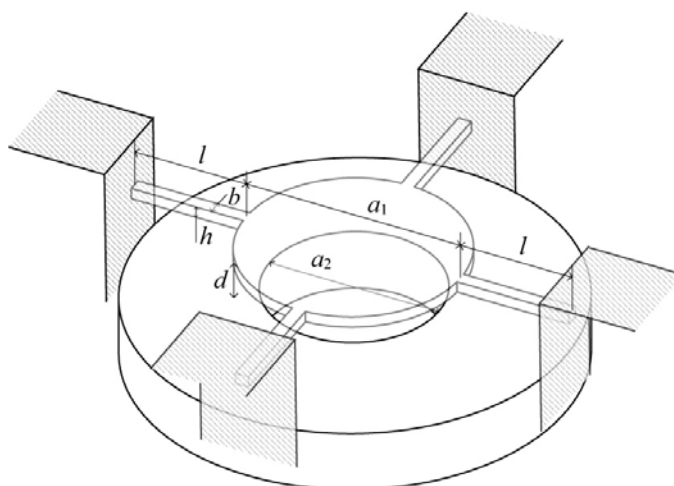


図 3-11 Model for dynamic mechanical property

次に、図 3-10 に示した上部構造のデザインに従い、梁及びミラーの寸法を決めるために、その機械特性を検証する。基本的には図 3-3 に示したモデルとほぼ同様に考える。異なるのはミラーを引き込む電極に光を通すための穴があることである。そのモデルを図 3-11 に示す。開いている穴の分、可動ミラーとコンデンサとして重なる部分が少ない。実際には重なっていない部分も力を及ぼすのだが、ここでは寸法を決めるための大まかな傾向を掴むために、重なっている部分だけが力を及ぼすと仮定して計算する。その場合、式(3-10)より、

$$v = \frac{\varepsilon_{air} \varepsilon_0}{(d-v)^2} \cdot \frac{\pi \left\{ (a_1/2)^2 - (a_2/2)^2 \right\} l^3 + bl^4}{4Ebh^3} \cdot V^2 \quad (3-13)$$

となる。ここで、式(3-13) よりミラーの高さの変位にもっとも影響を与えるのは梁の長さ  $l$  であり、次に大きな影響を与えるのがミラーの厚さ  $h$  であることが分かる。これらと比較して、梁の幅  $b$  が変位に与える影響は少ないことが分かる。ただし、ミラーの厚さは使用する SOI ウェハの薄膜シリコン層の厚さから TMAH でエッチングする深さを引いたものになり、本研究では制約上  $5/2/450 \mu\text{m}$  の SOI を使用することは前項で述べた。つまり、ミラーの厚さ  $h$  はミラー間の初期ギャップをいくつにするかによって自動的に決まる値であり、ここでは変更できない。また、梁の幅  $b$  及び、ミラー径  $a_1$  と裏の穴の径  $a_2$  の差  $a_1 - a_2$  は、製作プロセスの最後で HF 蒸気リリースにかかる時間を決めるため、あまり大きくすることが出来ない。一方で  $a_1 - a_2$  を小さくしすぎると、プロセスの途中の DRIE でのエッチングの際に、 $a_2$  が設計よりも大きくなってしまふことがあるため、電極として重なる部分が少なくなってしまう。従って、ここで設計できる寸法は、主に梁の長さ  $l$  だけになる。この  $l$  を決めるために、式(3-13)を用いて  $l$  をパラメータとした印加電圧とミラーの変位との関係を求める。その上でその他の寸法を制約条件を考慮しながら決定しておく。

まず、ミラー直径は大きければ大きいほど干渉部分に入射できる光量が増え、感度が増す。しかし、大きくしすぎるとミラー面の応力によって歪みも大きくなってしまふ。そこで、ミラー径は十分に大きく確保しながらも、歪みを許容範囲に抑えることができると考えられる、

ミラー直径  $a_1$  :  $500 [\mu\text{m}]$

に決定した。次に裏面の穴径だが、これは前述したように、HF 蒸気でのリリースに要する時間を決める重要な寸法である。HF リリースの時間が増えるということは、余計な部分の  $\text{SiO}_2$  までリリースされてしまふことを意味し、それによって表面薄膜シリコン層の応力が余計に解放されてしまふ。そのため、リリース時間は最小限に抑える必要がある。ただし、 $a_1 - a_2$  はある程度の幅が無いと、電圧が印加される面積が狭くなってしまふことと、製作プロセスの誤差で裏の穴の位置が表のミラーに対して僅かでもずれてしまふと、光がミラーを透過せずに入ってしまう。これらのような、原理と、実際のプロセスを行う上での技術と経験に基づいた判断の結果、

裏の穴の径  $a_2$  :  $450 [\mu\text{m}]$

に決定した。つまり、HF 蒸気リリースが必要な幅は、

$$\frac{500[\mu\text{m}] - 450[\mu\text{m}]}{2} = 25[\mu\text{m}] \quad (3-14)$$

となる。同様に HF 蒸気リリースの制限を受けるのが梁の幅  $b$  であるが、これも式(3-14)と同程度にして、

梁の幅  $b$  :  $20 [\mu\text{m}]$

とした。ミラーと下の電極との高さ  $h$  は、これも SOI の  $\text{SiO}_2$  層の厚さがそのまま  $h$  となるので、

ミラーと電極の間の高さ  $h$  :  $2 [\mu\text{m}]$



である。以上の値を用いて、式(3-13)より、現実的な電圧で十分な変位を得るための梁の長さを求める。を 100 [μm], 150 [μm], 200 [μm], と変えたときの印加電圧とミラーの変位の関係を図 3-12 に示す。

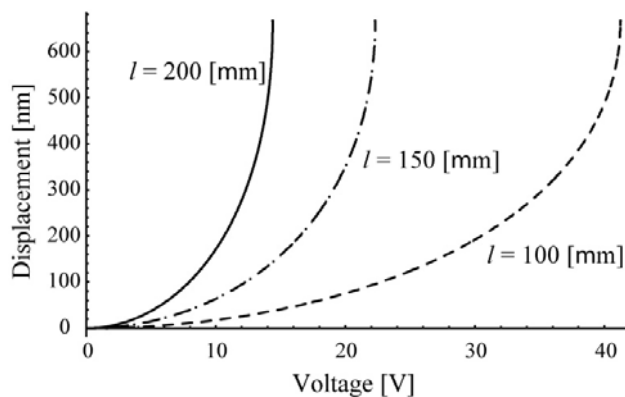


図 3-12 Relationship between the displacement of the gap and applied voltage.

これを見ると分かるように、最大印加電圧 40 [V] 程度で 3 つの梁の長さ全てで、変位上限値である初期ギャップ 2 [μm] の 1/3 の 650 [nm] まで変位できている。低電圧駆動という意味では、梁の長さが 200 [μm] の場合が最も良いが、梁が長すぎると応力によって歪む量も増えてしまう。逆に短すぎた場合、技術的な制約ではあるが、ミラーがスティクションした場合に修復させにくいというデメリットがある。そこで、

梁の長さ  $l$ : 150 [μm]

として製作することにした。

### 2-3-3 製作

設計したマイクロファブリペローの具体的な製作方法と、その際の注意点などを述べる。

#### 2-3-3-1 上部構造の製作

本節では段差構造とミラー部を持つ上部構造の製作方法について述べる。詳細なプロセス条件に関しては後述する。設計の部分で述べた理由により、本研究では 5/2/450 μm の SOI ウェハを利用する。ウェハは表面の結晶方向が <100> で、ダイシングソーにより 1 inch 四方に切り出して用いる。研磨されていない SOI ウェハの裏面には自然酸化膜がついているので、HF に浸けてこれを除去する。注意すべきは、ダイシングソー及び HF に浸けるプロセスの際にウェハが汚れることがあるので、常に顕微鏡でウェハ表面の状態を確認しながら、必要に応じて適宜アセトン+超音波洗浄や RCA-SC1 洗浄を行う。汚れが残っているままランプヒータで高温に熱してしまうと、不純物がシリコン内部に拡散してしまう恐れがある。

### 2-3-3-1-1 TMAH による段差構造の製作

TMAH を用いてシリコンを均一にエッチングし、段差構造を製作する。前処理で洗浄したウェハをランプヒータで 1100°C 45 min 酸化し、表面に熱酸化膜を形成する。熱酸化した表面にレジストを塗布し、フォトリソグラフィーでこのレジストをパターンニングした後、さらに BHF (Buffered HF)により熱酸化で形成した酸化膜をパターンニングする。この酸化膜をマスクとして SOI ウェハの表面シリコンをエッチングする。このとき、酸化膜の上にはレジストが付きにくいので、OAP(東京応化、表面改質親水)をスピコートで塗布して表面を疎水性にしてからレジストを塗布する必要があることに注意する。この BHF でウェハの裏面に形成されていた酸化膜も除去される。TMAH はエッチングレートを低くするために 50 °C で使用する。50 °C におけるエッチングレートは約 80 nm/min 程度であるが、TMAH の濃度によっても多少エッチングレートは上下する。そのため、こまめに蝕針段差計で深さを測定しながら、目標の深さまでエッチングする必要がある。本研究では 1000 nm の段差を目標としていたので、12~13 min を要した。図 3-13 に TMAH でエッチング後の顕微鏡写真を載せる。この過程で熱酸化によって形成した酸化膜には、TMAH に対するマスクという役割以外にも段差部分の保護膜としての重要な役割を持っている。TMAH のエッチングを終えて、段差構造部分にのみ残っている酸化膜は、プロセスの最後に構造全体をリリースするまで残して、この後のプロセスの間、構造の表面を保護する膜として機能させる。この段差構造表面を如何にして清浄に保ったまま下部構造と張り合わせるかが、接合が成功するか否かのキーポイントとなる。

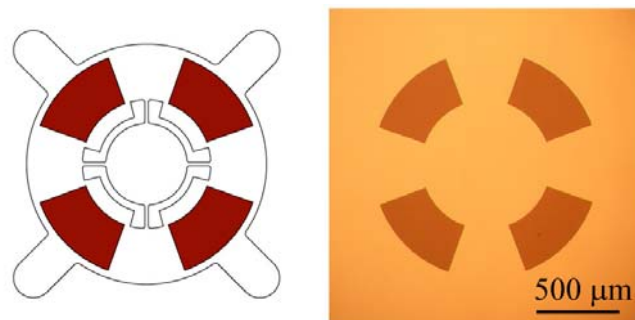


図 3-13 Etch 4 Steps of upper unit by TMAH

### 2-3-3-1-2 表面可動ミラー構造の製作

段差構造の酸化膜を残したまま、再度表面にレジストをスピコートして、表面可動ミラー構造をパターンニングする。シリコンのエッチングには Deep Reactive Ion etching (DRIE)を用いる。エッチング後、IPA (イソプロパノール) に浸けて超音波洗浄を行い、DRIE の際に使用したオイルとレジストをまとめて除去する。この超音波洗浄でほとんどの汚れが除去できるはずだが、もしこれで汚れが残るような場合には、ピラニア洗浄( $H_2SO_4 : H_2O_2 = 3 : 1$ )や RCA-SC-1 洗浄を行い、完全に汚れを取り除いておく。図 3-14 に表面可動ミラー

構造をエッチングした状態の顕微鏡写真を載せる。上下左右にある梁部分は、次のプロセスで裏面をエッチングしたときに構造がウェハから外れないようにするための架橋部分である。PDMS スタンピングの際に、この架橋部分が破壊されることになる。

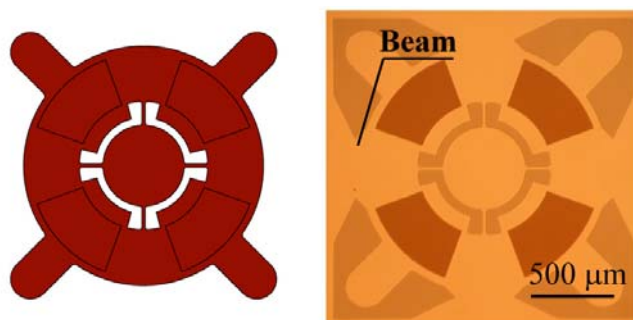


図 3-14 Etch movable mirror layer of upper unit by DRIE

### 2-3-3-1-3 裏面構造の製作

裏面のマスクを作成する前に、これまでで製作した表面にレジストを塗布しておく。この塗布には、この後のプロセスから表面構造を保護するという意味以外にも、SOI ウェハの  $\text{SiO}_2$  絶縁層の応力に抵抗する保護膜としての役割がある。レジストを塗布しないと、裏面を DRIE で絶縁層まで  $450 \mu\text{m}$  のエッチングを進めた瞬間に、絶縁層の応力が開放されて、表面のミラー構造ごと破壊されてしまう。そのため、塗布するレジストは粘性が高く保護力の大きな OFPR-100cp（東京応化）を用いた。表面をレジストで保護した後は、裏面にアルミを蒸着する。裏面のエッチング深さは  $450 \mu\text{m}$  と深いので、レジストだけでは DRIE のマスクとして耐えられない。そこでレジストマスクでアルミをパターンニングし、改めてアルミをマスクとして DRIE でエッチングする。DRIE でエッチングを終えた後は、通常ならば IPA に浸しつつウェハを、DRIE でウェハを固定していたアルミ板から剥がし、さらに IPA に浸けてディフュージョンオイルやレジストを除去するのであるが、ここでは前述の通り、レジストを剥がしてしまうとガラスの応力で表面のミラー構造が高い確率で破壊されてしまう。そのため、IPA に浸けつつ慎重にウェハをアルミ板から剥がした後は、そのまま HF 蒸気で絶縁層の  $\text{SiO}_2$  を除去する。HF 蒸気で絶縁層の除去が進むと、 $\text{SiO}_2$  の応力で膨らんで見えていた表面のミラー部分が平らになるので、除去終了のタイミングを目で見て確認できる。裏面のエッチングが終了した時点から、構造が非常に脆くなっているので、決して超音波洗浄や  $\text{O}_2$  プラズマ洗浄にかけてはいけない。僅かな振動でも上部構造が枠から壊れ落ちてしまうので、操作には細心の注意を払う必要がある。絶縁層の除去が終了した時点では表面全体にレジスト OFPR-100cp が付いているので、これを注意深くアセトンに入れて、ある程度除去する。完全に除去するのは難しいので、続いてピラニア洗浄を行う。この過程で裏面に残っていたアルミのマスクも除去される。最後に RCA-SC1 洗浄を行う。この際、

攪拌しながらだと水流で構造が破壊される恐れがあるので、ウェハを入れている間は攪拌子の回転を止めておく。また、SC-1 洗浄で生じる大量の気泡でウェハが持ち上がってしまうことがあるので、ウェハはディッパーにしっかりと固定しておく。泡で構造が破壊されることは殆ど無かった。ここまでで、上部構造の表面に汚れがほとんど無い状態になっているはずである。もしもまだ残っているようならば、再度ピラニア洗浄を試す。アセトン洗浄、ピラニア洗浄、SC-1 洗浄の3つで落ちないゴミはこのプロセスでは殆ど生じない。

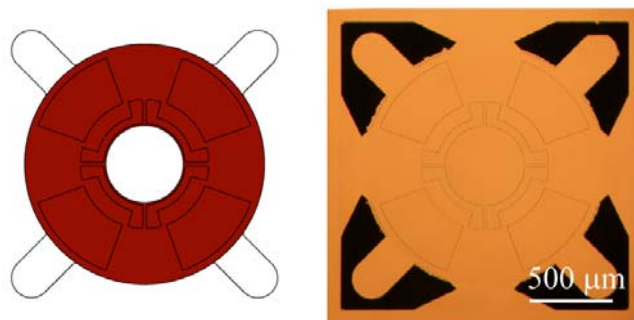


図 3-15 Etch bottom layer of upper unit by DRIE

#### 2-3-3-1-4 リリース

裏面をエッチングして洗浄した後可動ミラーのすぐ裏にある  $\text{SiO}_2$  は、HF 蒸気によって既に除去されているが、図 3-16 左図のように、ミラーの縁やミラーを支える 4 本の梁の裏にはまだ  $\text{SiO}_2$  が残っているのでこれを HF で除去し、可動ミラーが宙に浮いた構造にする。リリースで注意すべきは図 3-16 右図のように、構造が歪んだまま張り付いてしまうスティクションである。HF で  $\text{SiO}_2$  を除去する時に水滴が生じるのだが、この水滴の表面張力によって構造が歪み、そのまま分子間力などで張り付いてしまうことが原因である。一度スティクションが生じてしまうと、針でつつく等して解消する以外に方法はない。本研究ではスティクションを避けるために、ホットプレートを用いた、常温よりも高い温度雰囲気下での HF 蒸気リリースを行った。高温雰囲気下では、HF により生じた水滴が大きくなる前に蒸発し、表面張力を及ぼさない。この方法でスティクションが生じる割合を劇的に減少させることが出来た。具体的には、ホットプレートにウェハをテフロンテープで固定し、ホットプレートごと逆さにして、HF 原液を入れてあるシャーレの上に固定する。ホットプレートの温度は  $30^\circ\text{C}$  で行う。温度が高いほど、HF 蒸気が  $\text{SiO}_2$  を溶かす際に生じる水滴が付きにくいのでスティクションが生じにくい。一方で水滴が全く付かない場合だとリリースも全く進まない。 $40^\circ\text{C}$  程度でリリースがほとんど進まなくなる。リリースの進行具合は赤外線顕微鏡で逐一確認する。過度にリリースしてしまうと、その分、開放された表面シリコンの応力でミラーが歪んでしまうので注意する。

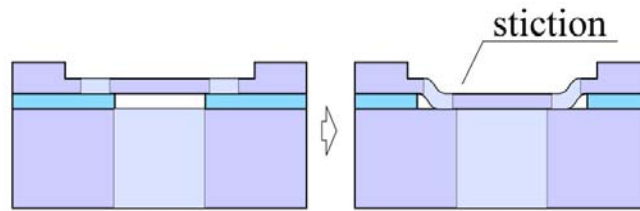


図 3-16 Schematic of the HF release process.

#### 2-3-3-1-5 接合表面の親水性修飾

上部構造の最終プロセスとして、下部構造との接合のために表面を親水性にする必要がある。この時点では、HF リリースによって表面は水酸基の無い疎水性になってしまっているため、 $O_2$  プラズマを 5 sccm, 50 W で数秒かけることで表面を親水性修飾する。このプロセスは本研究で利用している SOI ウェハの表面薄膜シリコン層が 5  $\mu\text{m}$  と比較的厚いからこそ実現出来ることは既に述べた。

#### 2-3-3-2 下部構造の製作

本節では固定ミラー部を持つ下部構造の製作方法について述べる。上部構造よりも容易なプロセスであり、重複する部分も多いので、概略のみを述べる。詳細な条件に関しては後述する。

##### 2-3-3-2-1 表面の固定ミラー製作

SOI ウェハは上部構造同様にダイシングソーで切り出した 1 inch のものを用いる。HF 原液で裏面酸化膜を除去した時点で、表面を十分に洗浄することも同様である。その後、表面にレジストを塗布してフォトリソグラフィーでパターンニング、DRIE でエッチングを行う。エッチング終了後は IPA でディフュージョンオイルを落とし、アセトン・エタノール超音波洗浄を行い、レジストを除去する。

### 2-3-3-2-2 裏面製作・リリース・親水性修飾

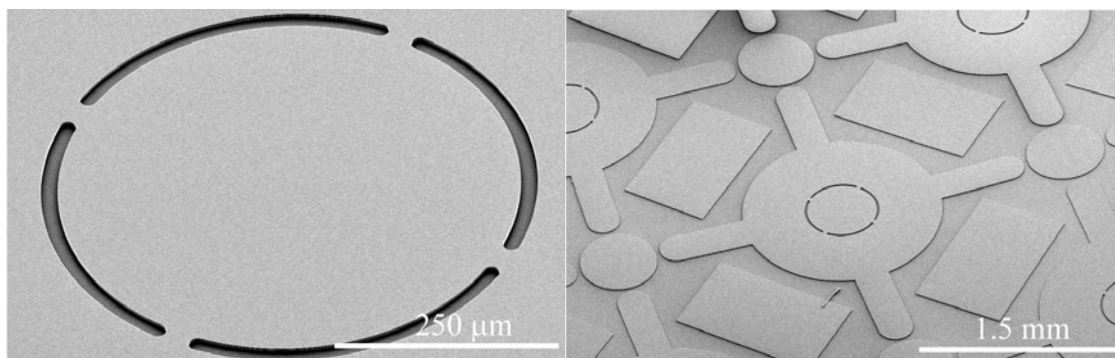


図 3-17 SEM image of under unit

上部構造と同様に，DRIE でのエッチング終了時に，絶縁層の応力からミラー部分を保護するために，粘性の高い OFPR-100cp を表面に塗布する．その後，裏面にアルミをパターンニングし，DRIE でエッチングを行う．オイルを除去する前に HF の蒸気でミラーの裏にある絶縁層を除去し，応力を可能な限り消す．その後アセトン・ピラニア・RCA-SC1 洗浄を十分に行ってから，ホットプレート 30 °C でリリースしてから O<sub>2</sub> プラズマで親水性修飾を行うのは上部構造と全く同じである．図 3-17 に完成した下部構造の SEM 写真を載せる．図 3-17 上図が下部構造の全体像で，図 3-17 下図が中心のミラー構造である．SOI ウェハ表面には下部構造以外にも配線などで使えるように円形と四角形の電極用パターンも製作した．

### 2-3-3-3 PDMS スタンピングによる転写と PDMS スタンプの成型

スタンピングに用いたセットアップの概略を図 3-18 に示す．製作した上部構造は，接合面に汚れが付着しないように十分に注意しながら，PDMS のスペーサで X-Y-Z-θ Stage に固定した．PDMS の上にある顕微鏡で，PDMS を透かして上部構造及び下部構造を見ながら Stage を動かして高精度な位置合わせが可能である．

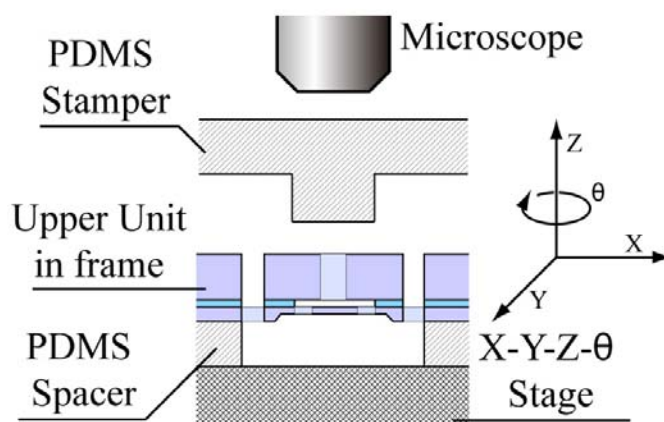


図 3-18 Schematics of the PDMS stamper.

次に上部構造を把持するための、円柱突起構造を持つ PDMS スタンプを成型する。成型のための鋳型にはアクリルの板を用いた。円柱の直径を大きくすると上部構造との接着面積が増え、把持力が増す。しかし、下部構造との直接接合力を超えてしまうと、転写できない。PDMS の把持力は、上部構造を落とさないために必要十分なだけの力が望ましい。また、円柱の高さは上部構造を押し込み、枠から破壊して取り出すためにある程度必要である。以上を考慮して、把持のための突起部分は直径 1 mm、高さ 2 mm の円柱とした。

このセットアップの下で、上部構造の PDMS へのハンドリングと下部構造へのスタンピングを行った。図 3-19 に、PDMS に接着している上部構造の様子を載せる。

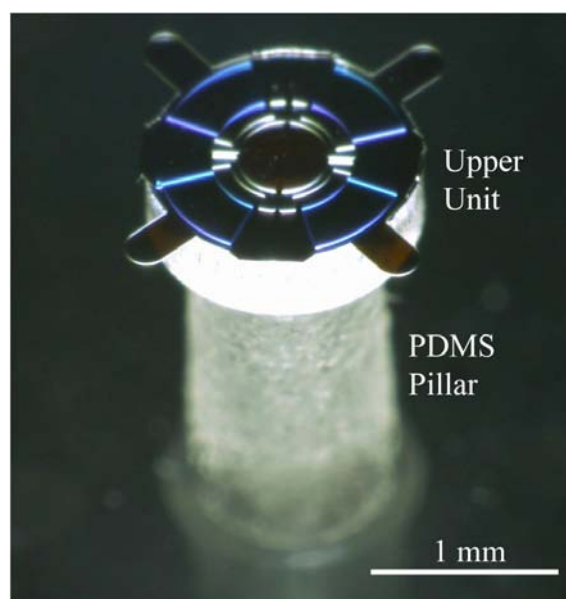


図 3-19 Upper Unit on PDMS Stamper

#### 2-3-3-4 シリコンフュージョンボンディングによる接合力の強化

次にシリコンフュージョンボンディングを行った。ランプヒータに入れ、300°C 5 min、700°C 10 min の加熱を行った。また、ミラー表面の酸化を防ぐために完全に窒素雰囲気下であった。このプロセスで確実に接合力は強化されることを確認し、次のワイヤボンディングの際の衝撃に耐えられる強度を実現した。

#### 2-3-3-5 ワイヤボンディングによる配線

製作プロセスの最後は、アルミワイヤによる配線作業である。この際に上部構造に配線時の衝撃が加えられるが、シリコンフュージョンボンディングの高い結合力によって安全に配線を行うことが可能である。配線の詳細を図 3-20 に示す。2 枚のミラー構造と下部構造の土台を全て GND とし、電圧印加の際に、この 3 層の構造間に力が働かないようにした。留意すべき点の一つ、ワイヤボンディングは繋ぐ 2 点で、接合対象に与える衝撃が異なるということである。図 3-21 に図示するように、ワイヤを 1 点目に接合するときと、2

点目に接合して引き離すときとは、後者の方が大きな衝撃を対象物に与える。そのため、1点目を上部構造に接合し、2点目を外部電極に接合した方がよい。シリコンフュージョンボンディングによって十分な強度が得られてはいるものの、衝撃によって内部のミラーが破壊されるようなことも考えられるためである。

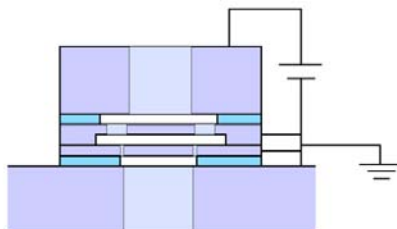


図 3-20 wiring map

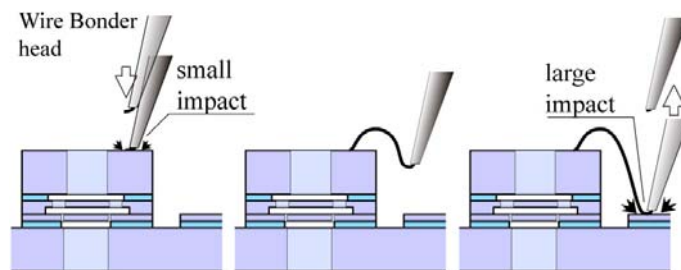


図 3-21 wire bonding steps of a procedure

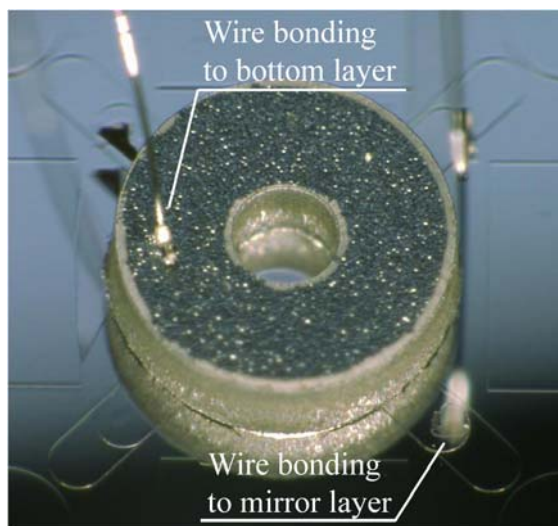


図 3-22 Photograph of the wired structure.

ワイヤボンディングを行ったマイクロ FPI の顕微鏡写真を図 3-22 に載せる。また、完成したマイクロファブリペロー干渉計の SEM 写真を図 3-23 に載せる。



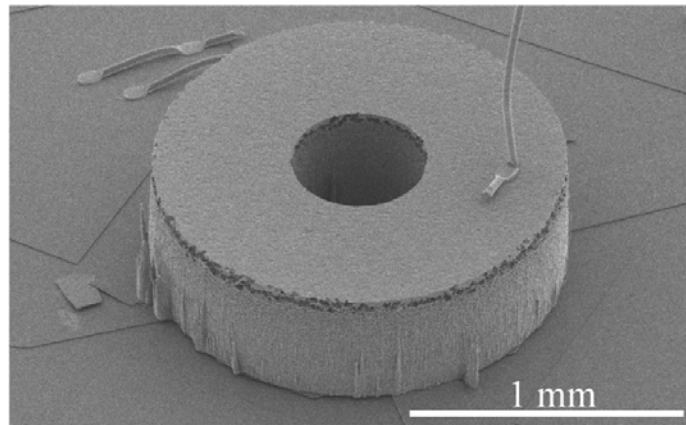


図 3-23 SEM Image of Micro Fabry-Perot Interferometer

#### 2-3-3-6 ミラー平行度確認用構造の製作

本研究の目的の一つが、マイクロファブリペロー干渉計の 2 枚のミラーの平行度を高精度に製作することである。しかし、前節までで製作したマイクロファブリペロー干渉計では、図 3-24 左図に示すように上下構造の穴から覗き見ることができる領域は各ミラーの面のみであり、2 枚がどれだけ平行に配置されているのかは、直接計測することが出来ない。そこで、上下構造を張り合わせたときに、2 枚のミラーがどのように配置されているのかを確認するために、図 3-24 右図のように上部構造の穴の径を大きくした仕様のマイクロファブリペロー干渉計を製作した。張り合わせた後で、ミラーを覗き見ることが可能である。ただし、穴が大きいため上部電極は機能しないので、電圧を印加した際の挙動は保障されない。そのため、電圧を印加しないときのみの平行性確認に留まる。上部構造裏面のマスクが異なること以外は、通常のマイクロファブリペロー干渉計の製作プロセスと全く同じである。製作した平行度確認用マイクロファブリペロー干渉計の SEM 写真を図 3-25 に載せる。

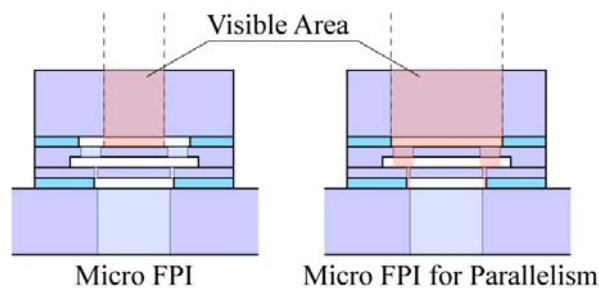


図 3-24 Difference of Visible Area between two types of Micro FPI

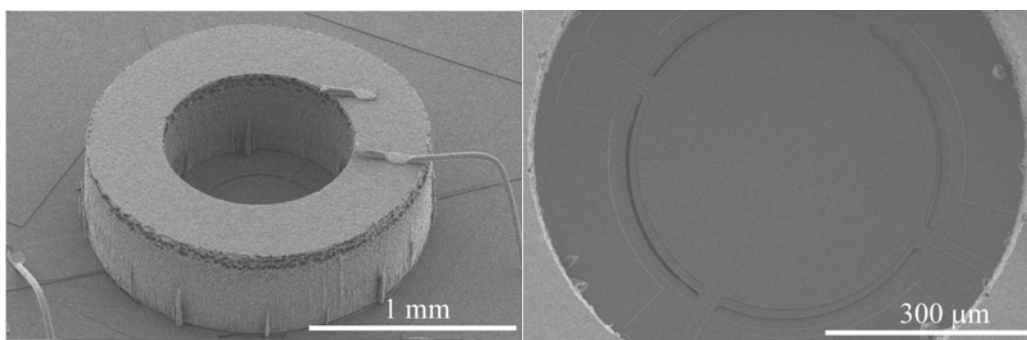


図 3-25 SEM Image of Micro Fabry-Perot Interferometer for parallelism measurement

### 2-3-3-7 ギャップ確認用構造の製作

前節で述べた平行度を真上から確認するための構造とは別に，ミラー間のギャップを確認するための構造をさらに製作した．これは，前節のミラー平行度確認用構造では，構造の真上から覗くことは可能だが，ギャップを確認するために斜め上から覗き見るには構造の壁が邪魔だったためである．SEMでの確認の際には，観察物から放射される2次電子が多いほど鮮明な画像が得られるが，この構造の壁が邪魔をして，電子の検出精度が悪い，という問題であった．そこで，前節の平行度確認用構造に，さらに壁の部分に切れ目を入れて，ゆるい角度で斜め上から2枚のミラーを除けるようにした．ただし，このように構造を変更するほどに，元々のマイクロFPIの特性から離れたものになってしまう．そのため，このギャップ確認用の構造は，あくまでもギャップの有無をSEM写真で定性的に確認するためのものではない．

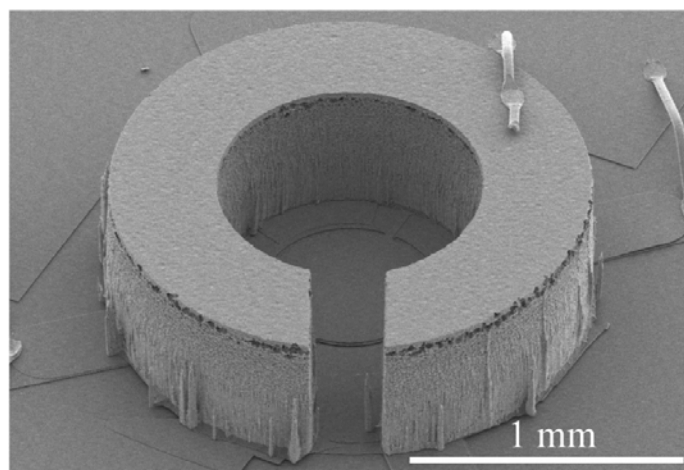


図 3-26 SEM Image of Micro Fabry-Perot Interferometer for mirror gap confirmation

### 2-3-3-8 製作プロセスの詳細

これまで述べてきた製作プロセスの詳細なレシピを図 3-27，および図 3-28 に示す．

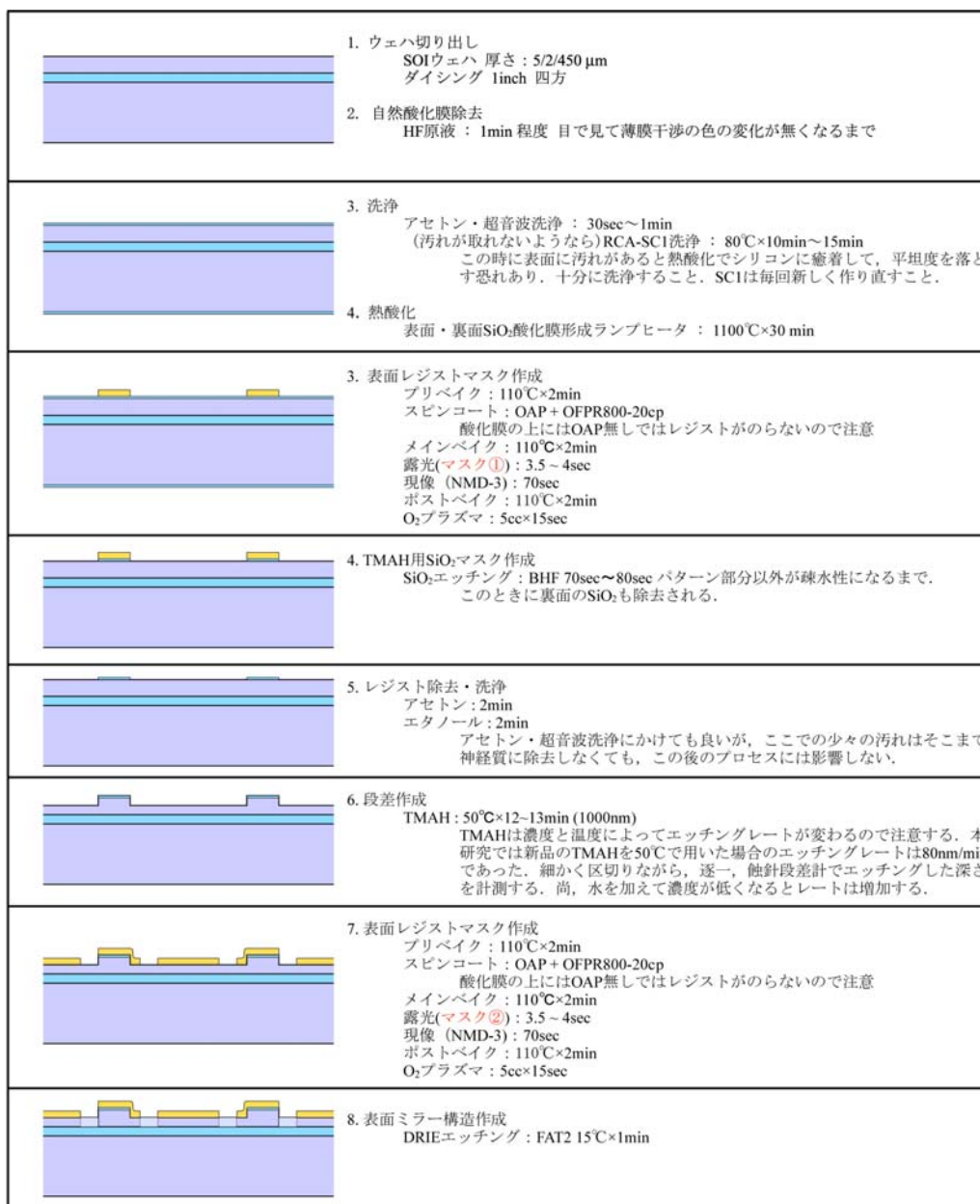


図 3-27 Fabrication process of a tunable sub-micrometer planar gap.

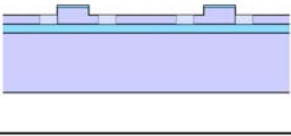
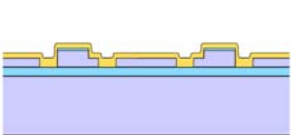
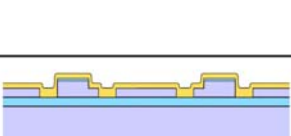
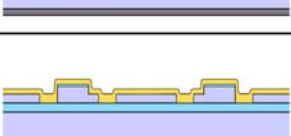
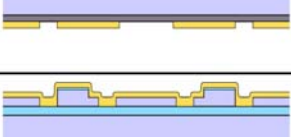
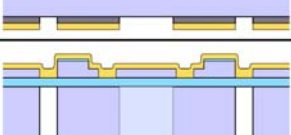
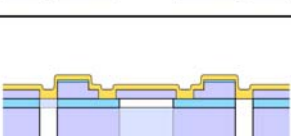

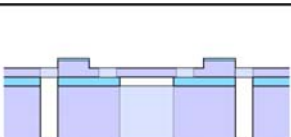
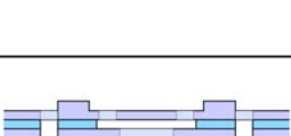

	<p>9. レジスト除去・洗浄  IPAでウェハをアルミ板から剥がす: 浸しながら十分に時間をかけてゆっくりと。  IPA+超音波洗浄: 4~5min 残っているオイルとレジストをまとめて除去  アセトン: 2min  エタノール: 2min  (汚れが取れないようなら)ピラニア洗浄: 十分な時間  (それでも汚れが取れないようなら)RCA-SC1洗浄: 80°C×10min~15min</p>
	<p>10. 表面レジスト保護  プリベイク: 110°C×2min  スピンコート: OAP+OFPR800-100cp  酸化膜の上にはOAP無しではレジストがのらないので注意  メインベイク: 110°C×2min  裏面に回りこんでいるレジストをベンコット+アセトンで拭く  ポストベイク: 110°C×4min以上  本論でも述べたように、このレジスト保護には応力からの保護という重要な役割があるので、十分にベイクしておく。</p>
	<p>11. 裏面酸化膜除去(裏面に酸化膜がまだ残っている場合のみ)  BHF: 70sec~80sec</p>
	<p>12. 裏面アルミ蒸着  小真空蒸着: アルミの膜厚は適宜</p>
	<p>13. 裏面アルミ用レジストマスク作成  プリベイク: 110°C×2min  スピンコート: OAP+OFPR800-20cp  酸化膜の上にはOAP無しではレジストがのらないので注意  メインベイク: 110°C×2min  露光(マスク③): 3.5~4sec  現像 (NMD-3): 70sec  アルミの上のレジストパターニングは、レジストが残りやすいので注意。  ポストベイク: 110°C×2min</p>
	<p>14. アルミマスク作成  アルミエッチャント: 65°C×15~30sec程度 気泡が消えるまで  生じる気泡でディッパーから外れやすいので注意。  流水洗浄: 十分な時間  アルミエッチャントは粘度が高いため十分に流水洗浄する。</p>
	<p>15. 裏面構造作成  DRIEエッチング: FAT2 15°C×50~60min (450µm)  エッチング中に、アルミの上についていたレジストはほとんど無くなる。  本論でも述べたように、DRIEによる裏面構造作成が終わり、表面の構造だけが残る部分には、SiO<sub>2</sub>層による応力が強く生じ、壊れやすくなっている  ので注意する。</p>
	<p>16. アルミ板から剥がす  アルミ板ごとIPAに十分な時間に浸した後、僅かに滑らせながら剥がす  アルミ板から剥がす際のせん断応力で、ミラーが壊れてしまう可能性がある  ので、IPAでオイルを十分に溶かしてから、ゆっくりと剥がす。</p> <p>17. 応力の一部除去  HF蒸気リリース: HF原液 10~15min (2µm)  リリース前にレジストを除去してしまうと、SiO<sub>2</sub>層による応力でミラーが  壊れてしまう可能性があるため、HF蒸気で先にミラーの裏部分など一部の  SiO<sub>2</sub>を除去しておく。除去が進むに従って、肉眼でも見えていたミラーの  応力による歪みが無くなっていき平坦になるので、リリースの終了を確認  できる。  洗浄: HF原液 10sec程度  HF原液に少し浸けることで、表面レジストの上ののっているオイルが除去  される。</p>
	<p>18. レジスト除去・洗浄  アセトン: 1min程度  構造が壊れやすいので、ピンセットで掴んだまま、ディスプレイザブルカッ  プに入れたアセトンに浸ける。揺るする必要はない。  エタノール: 1min程度  アセトンと同様に、ディスプレイザブルカップに入れて浸けるだけ。  ピラニア洗浄: 15min以上  裏面に残っているアルミも同時に除去される。  RCA-SC1洗浄: 80°C×30min以上  (汚れが取れないようなら)再度ピラニア洗浄とRCA-SC1洗浄を繰り返す</p>
	<p>19. リリース  HF蒸気: ホットプレート30~35°C雰囲気下  温度を上げる程スティクションしにくくなるが、進行が遅くなる。35°Cが  限界。5~10minおき程度で赤外線顕微鏡によりリリース状況を確認しなが  ら進める。</p>
	<p>20. 表面親水性修飾  O<sub>2</sub>プラズマ: 5cc×15sec</p>

図 3-28 Fabrication process of a tunable sub-micrometer planar gap.