

- ． 2 低環境負荷型プロセス技術開発
- ． 2. 1 低環境負荷ポリマー・センサ融合プロセス技術開発

(1) 研究の目的

低環境負荷・生体適合性ポリマーを用いたデバイスとして、例えば人体の内外に設置し、生体情報、環境情報などを高精度にセンシングする高機能モジュールなどが求められている。ポリマー材料は、電子デバイスにおいて近年シリコンに替わる材料として、生体適合性やリサイクルのし易さの観点から、人に優しい、低環境負荷材料として注目されている。また、機械特性を示すヤング率はSiの約1/50程度(例としてSi:130~188GPa、PMMA:3.4GPa)と非常に軟らかく、例えばMEMS材料としてシリコンを遥かにしのぐ優れた特性が期待される。

本研究開発項目では、低環境負荷ポリマーとセンサを融合させたプロセス技術開発として、アクチュエータMEMSデバイスの試作を行い、シミュレーション技術を用いて、その製造プロセスとシリコンMEMSより優位に立つと言われている特性の検証を行う。

(2) ポリマー化プロセスの検討

将来のMEMSデバイスのポリマー化に向け、アクチュエータMEMSについて、性能予測が可能なシミュレーション技術及びナノインプリントによる製造プロセスを開発する。

(2) -1 ポリマーMEMSの設計・シミュレーション技術開発

ポリマー化に向けてはシミュレーションによる性能予測が重要となる。しかしながら、シリコンと比較して機械特性などのデータの蓄積は道半ばである。今回の技術開発では、シミュレーションソフトMemsONEやCODE Vを有効活用し、ポリマーMEMSとしての光学特性などを予測し、実デバイスの要素試作データとの比較検証を行う。取得したデータは将来のデータベース化をにらみシミュレーションソフトの機械特性データに逐次反映する。

● ポリマー材料検討

本プロジェクトではポリマーの柔軟性を活かして、ポリマー静電型マイクロミラーデバイスの開発を行う。将来的にマイクロレンズやマイクロプリズムなど他のポリマーMEMS光学デバイスへの展開を鑑みて、本プロジェクトで製作するポリマー静電型マイクロミラーデバイスの材料として、透過性の高いポリマー材料であるアクリル樹脂(poly(methyl methacrylate); PMMA)、ポリカーボネート(polycarbonate; PC)、およびポリ乳酸(poly(lactic acid); PLA)を候補に挙げて材料特性を比較検討し、本プロジェクトで実際に使用する材料を決定した。

各ポリマーの材料特性を表V.2.1.2-1に示す。同じポリマーでもグレードや充填剤(ガラス繊維など)の違いによって材料特性値も大きく異なり、表V.2.1.2-1に掲げた特性値は一般グレードにおける数値である⁽³⁻⁵⁾。

表V.2.1.2-1 ポリマーMEMS材料の熱特性、力学特性、光学特性

	PMMA	PC	PLA
融点(°C)	160	267	170
ビカット軟化温度(°C)	80~100	150~155	59
ガラス転移温度(°C)	72~105	145~150	57~60

密度 (g/cm ³)	3.2.19	1.20	1.25
線熱膨張係数 ($\times 10^{-5} \text{K}^{-1}$)	6~8	7~8	9
成形温度 (°C)	165~290	280~300	150~200
成形圧力 (MPa)	70~140	100~180	
引張り強さ (MPa)	50~75	50~65	57
引張り伸び (GPa)	2~10	100~130	4
曲げ弾性率 (%)	3.0	2.4	4.3
曲げ強さ (MPa)	90~120	98	102
ヤング率 (GPa)	3.2	2.5	4~6
屈折率 (波長 589nm)	1.49~1.54	1.59	1.4
光線透過率 (厚さ 3mm) (%)	92~93	87~90	88

PMMA および PC は非晶性のポリマーであり^(3,4)，軟化温度（≒熱変形温度）とガラス転移温度が同程度と見做してよい。PLA の熱変形は PMMA より低い温度で起こるが，PLA は白濁した結晶性のもと透明の非晶性のものであり，57~60°C のガラス転移温度を示すのは非晶性の PLA である⁽⁵⁾。融点やガラス転移温度の高い PC は成形温度も高く設定する必要があるが，比較的低温でも熱変形が生じる PLA は成形温度も低めに設定する。

これらのポリマー材料の機械特性についてはほとんどの項目で互いによく似た特性値をもっており，ヤング率の大きさはそれぞれシリコンの約 30 分の 1~約 70 分の 1 と非常に小さい。したがって，同じ大きさの応力に対して得られる変位はこれらのポリマー材料がシリコンよりも桁違いに大きくなる。また，引張り伸びにおいて PC の数値が格段に大きいことが特筆される。

表 V.2.1.2-1 に掲げた材料特性を比較検討した結果，とくに成形加工条件を重視して，PC よりも成形温度が低い PMMA を本プロジェクトで実際に使用する材料として選択した。PLA は汎用プラスチックである PMMA やエンジニアリングプラスチックとして扱われている PC と比べて成形加工条件に関する情報が少ないだけでなく，加水分解が進行しやすく PMMA よりも耐久性が劣るため，本プロジェクトでの使用は見送った。但し，この PLA の加水分解性（生分解性・生体吸収性）はポリマー MEMS デバイスの応用範囲を広げる特性として，今後の研究において積極的に展開できるものである。

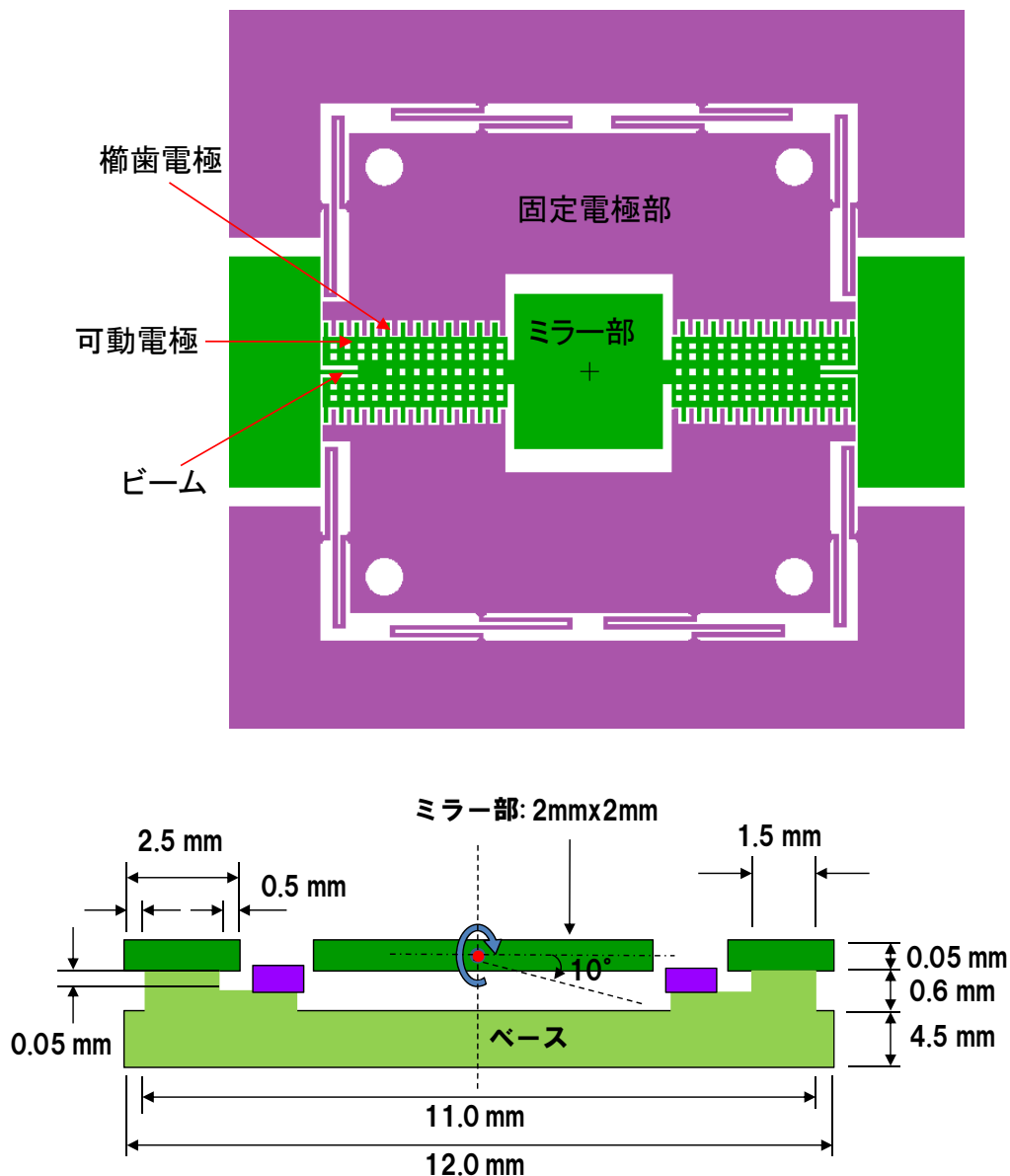
● 静電型ミラーデバイスの設計検討

ポリマー材料を PMMA に決定したので，PMMA の材料データを用いた MemsONE によるシミュレーションをもとに製作するミラーデバイスの設計を行った。ミラーデバイスの性能目標は，駆動電圧：30V 以下，ミラー部反射率：90%以上，ミラー部表面粗さ：100nm 以下，の 3 点である。また，ポリマー材料の特徴を活かし，ミラーの最大振れ角度を 10 度程度に設定した。

当初は従来からよく用いられているミラー片に櫛歯がある構造を採用し，比較的大きなミラーサイズ（4mm 角程度）で 15 度程度の振れ角度を加えても過度の局所応力が加わらず，ミラーの平面性がほぼ保持され，且つ，ミラー最小共振モードがミラー回転方向になるようにミラー部の設計を進めていたが，この構造では 30V の駆動電圧では 3 度程度のミラー回転角しか得られず，ミラーを大きく振れさせるには，非常に大きな駆動電圧が必要になることがわかった。

そこで，独自アイデアによるミラー部構造の設計を新たに行い，本プロジェクトで製作するミラーデバイスに採用した。静電駆動ミラーデバイスの構造を図 2.1.2-1 に示す。デバイス構造はミラ

一部、駆動用の垂直静電アクチュエータ部、およびトーションビームから構成される。可動電極部（可動櫛歯）と固定電極部（固定櫛歯）からなる垂直静電アクチュエータはミラー部の両側に対称に配置し、固定櫛歯を押し下げて、可動櫛歯と固定櫛歯の間に段差がつくように設計した。この段差によって、電圧を印加することで可動電極部と固定電極部の間に静電引力が発生し、ミラー部がトーションバーを軸に回転運動することで反射光の向きを変えることができる。また、アクチュエータ部とミラー部の間にはスリットがあるため、大きなミラー振れ角度が実現できるほか、駆動時におけるミラー部のたわみ変形も防ぐことができ、振れ角度が大きい場合でもミラーの平面性がほぼ保持される。ミラー平面性の詳細は別項で報告する。



図V.2.1.2-1 静電型ミラーデバイスの構造：上図はトップビュー図，下図は断面図

ミラーデバイスの全体寸法は、これまでオリンパス（株）が開発したシリコン製ミラーとの性能比較や評価を行えるように、オリンパス（株）のシリコン製ミラーデバイス寸法と等しい12mm × 12mmとした。ミラー部の面積は2mm × 2mmに決定した。

これまでの製作プロセスの経験上、最小のL/S（ラインアンドスペース）5μm/5μmであり、ミラーデバイスの櫛歯の幅と櫛歯間のギャップを5μm/5μmにした。また、製作プロセスの確立を考慮

し、アスペクト比を 10，デバイスの厚みを 50 μm に設定した。さらに，目標①を達成するためのビーム寸法を以下の数値解析により決定した。

可動電極部と固定電極部の間に電圧 V を印加すると(1)式で表される静電引力が発生する。

$$F_{\text{静電}} = n \times \epsilon_r \epsilon_0 \frac{l_{\text{ovl}}}{g} V^2 \quad (1)$$

但し， n は可動電極の櫛歯数， ϵ_0 は真空の誘電率， ϵ_r は空気の比誘電率， l_{ovl} は固定櫛歯と可動櫛歯のオーバーラップ長， g は櫛歯間ギャップ長であり，下記の値を使用した。

$n = 233$ (アクチュエータの寸法と櫛歯幅・ギャップの寸法から計算)；

$\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12}$ (F/m)； $\epsilon_r = 1$ ； $l_{\text{ovl}} = 140$ (μm)； $g = 5$ or 7 (μm)

得られた静電力および表 V.2.1.2-2 に示す機械特性パラメータを用いて構造解析を行った。構造解析モデルを図 V.2.1.2-2 に示す。駆動電圧，ビーム寸法振れ角度，共振周波数の相関関係を表 V.2.1.2-3 にまとめた。数値解析で得られた駆動電圧と振れ角度の対応は図 V.2.1.2-3 に示す。

表 V.2.1.2-2 ポリマー材料 (PMMA) とシリコンの機械的特性

	ヤング率 (GPa)	ポアソン比	密度 (g/cm^3)
PMMA	3.0	0.35	1.2
Si (3.2.10)	169	0.065	2.33

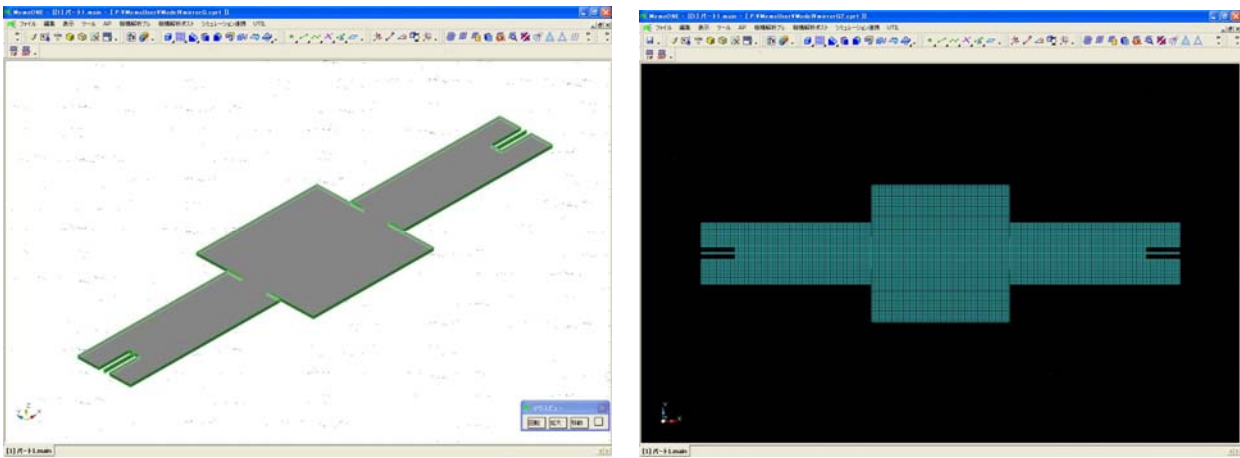


図 V.2.1.2-2 ミラーデバイスの解析モデルとソリッドメッシュ

表 V.2.1.2-3 構造解析結果

	ビーム寸法(μm) (長さ \times 幅 \times 厚み)	櫛歯幅/ギャップ (μm)	駆動電圧 (V)	振れ角度 (deg)	共振周波数 (Hz)
PMMA	500 \times 15 \times 50	5/5	27	5	244
		5/5	38	10	244
		7/7	38	5	244
Si	500 \times 15 \times 50	5/5	203	5	1266

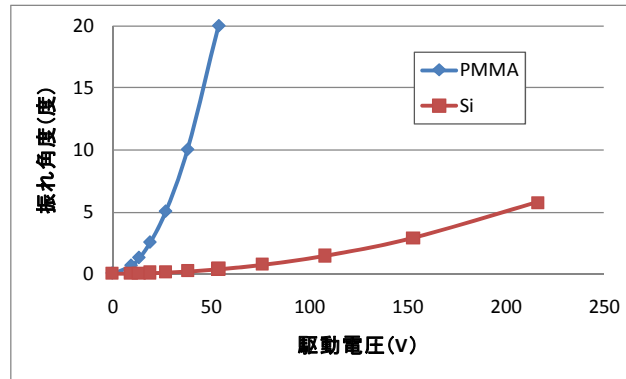


図 V.2.1.2-3 解析結果：駆動電圧と振れ角度の対応

垂直静電アクチュエータでは可動電極の櫛歯と固定電極の櫛歯の垂直変位が一致すると、垂直方向にそれ以上動かなくなり、その時のミラー部の振れ角度が最大角度となる。デバイスの厚み（櫛歯の厚み）は $50\mu\text{m}$ なので、今回のミラーの最大振れ角度は 5 度である。表 V.2.1.2-3 に示すように、同じ寸法のシリコンミラーにおいて同じ振れ角度を実現しようとする、その駆動電圧は PMMA ミラーの駆動電圧より 7.5 倍大きくなる。しかし、共振周波数についてはシリコンミラーの方が PMMA ミラーよりも 5 倍大きい。

- ミラー部平坦度解析

ポリマーは柔軟性に富むため、PMMA 製の静電駆動ミラーとして従来からよく用いられているミラー片に櫛歯がある構造を採用すると、比較的大きなたわみ変形が観察される。しかし、本プロジェクトにおけるデバイス構造（図 V.2.1.2-4）ではアクチュエータ部とミラー部の間にあるスリットの効果によって、駆動時におけるミラー部のたわみを防ぐことができ、最大振れ角度（5 度）においてもたわみによるミラー中央部の凹み d はわずか $0.3.2.12\mu\text{m}$ である。ミラー幅 $W = 2\text{mm}$ より曲率半径 R を計算すると、 $R = 4.45\text{m}$ ときわめて平坦性が高いことがわかる。（従来の構造における曲率半径はたかだか数十 cm である。）

さらに振れ角が 5 度のミラー平面を 4 次までの多項式展開で表現し、光学解析ソフトウェア CODE V を用いてミラー特性を解析した。ミラーの反射光路を図 V.2.1.2-4 に示す。反射光はレンズのように焦点を結ぶわけではないので、少しでも歪みがあると点像関数は図 V.2.1.2-5(b) のようにブロードに分布する。また、横収差プロット（図 V.2.1.2-6）は典型的なデフォーカス状態を示しているが、図 V.2.1.2-6 の X 方向（回転軸に沿う方向）・Y 方向（回転軸からミラー端に向かう方向）ともにほぼ直線であり、OPD（光路差）収差（図 V.2.1.2-7）もミラー中央部できわめて小さく、図 V.2.1.2-8 に示したディストーショングリッドのようにほとんど歪みのない反射像が得られる。歪みが非常に小さいため図 V.2.1.2-8 ではわかりにくいですが、反射像の動径方向ディストーションの比率は +Y 方向のミラー端で 1.0029（わずかに拡大）、-Y 方向のミラー端で 0.9968（わずかに縮小）である。

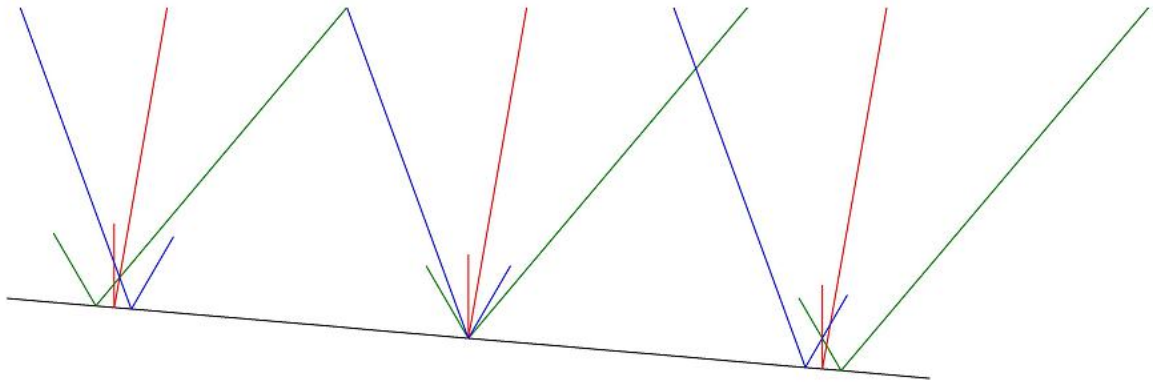
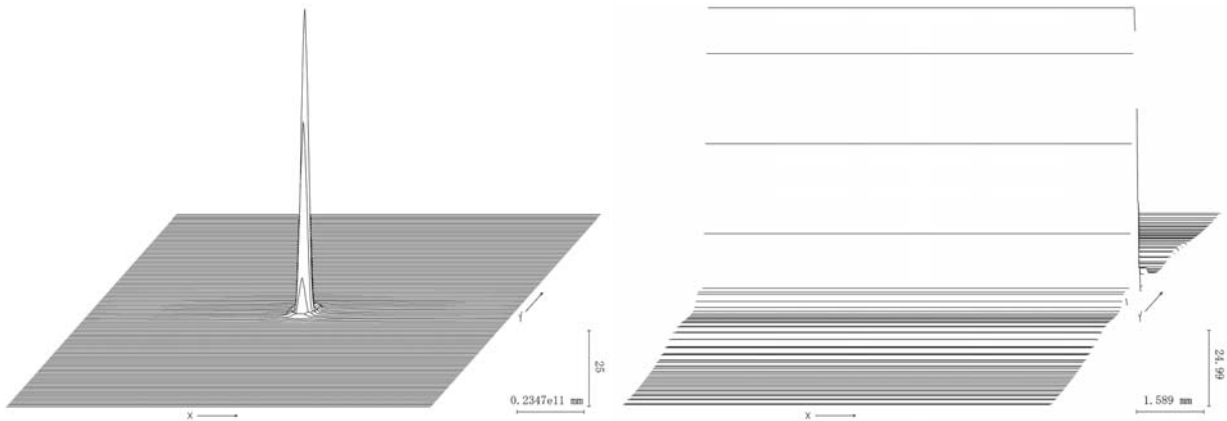


図 V.2.1.2-4 ミラー振れ角 5 度での反射光路 (赤 : 入射画角 0 度、青 : +30 度、緑 : -30 度)
短い線が入射光、長い線が反射光



(a)

(b)

図 V.2.1.2-5 入射画角 0 度の白色光*における点像関数プロット

((a) ミラー振れ角 0 度 ; (b) ミラー振れ角 5 度)

*ウェイトは 643nm:0.07; 591nm:0.36; 542nm:0.42; 500nm:0.13; 466nm; 0.02

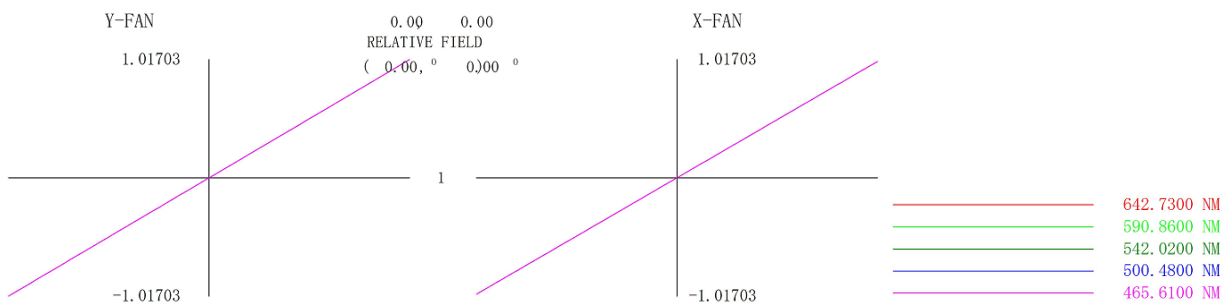


図 V.2.1.2-6 ミラー振れ角 5 度での白色光横収差プロット (入射画角 0 度)

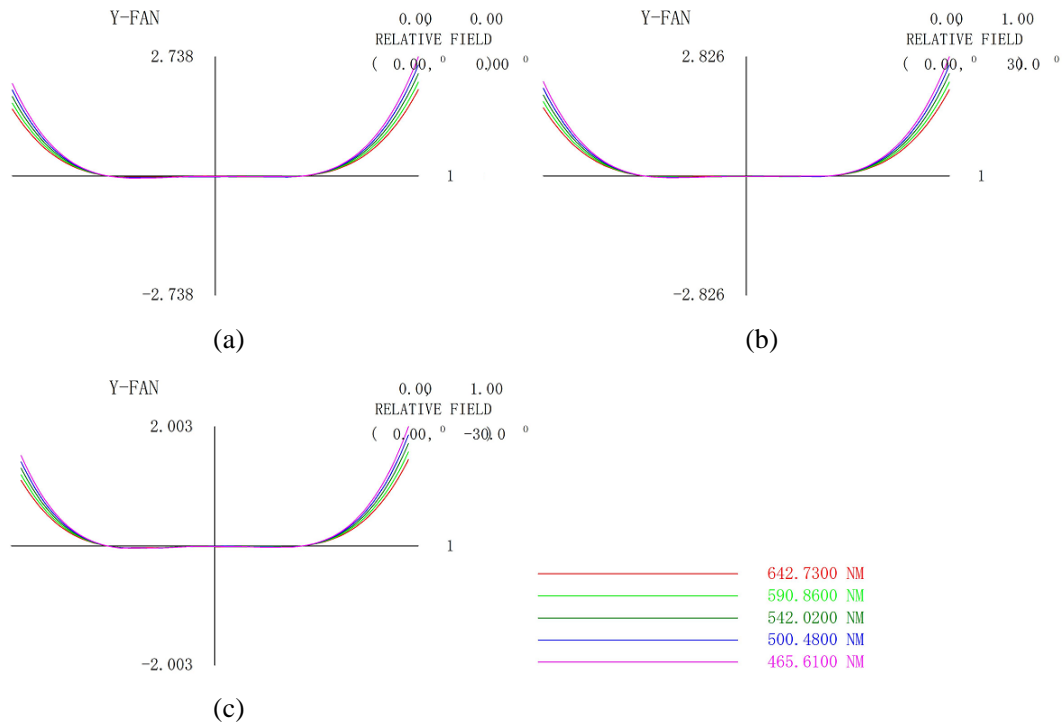


図 V.2.1.2-7 ミラー振れ角 5 度での Y 方向白色光 OPD 収差プロット ()
 ((a) 入射画角 0 度 ; (b) 入射画角+30 度 ; (c) 入射画角-30 度)

Anamorphic Ratio (Y/X) = 1.01533

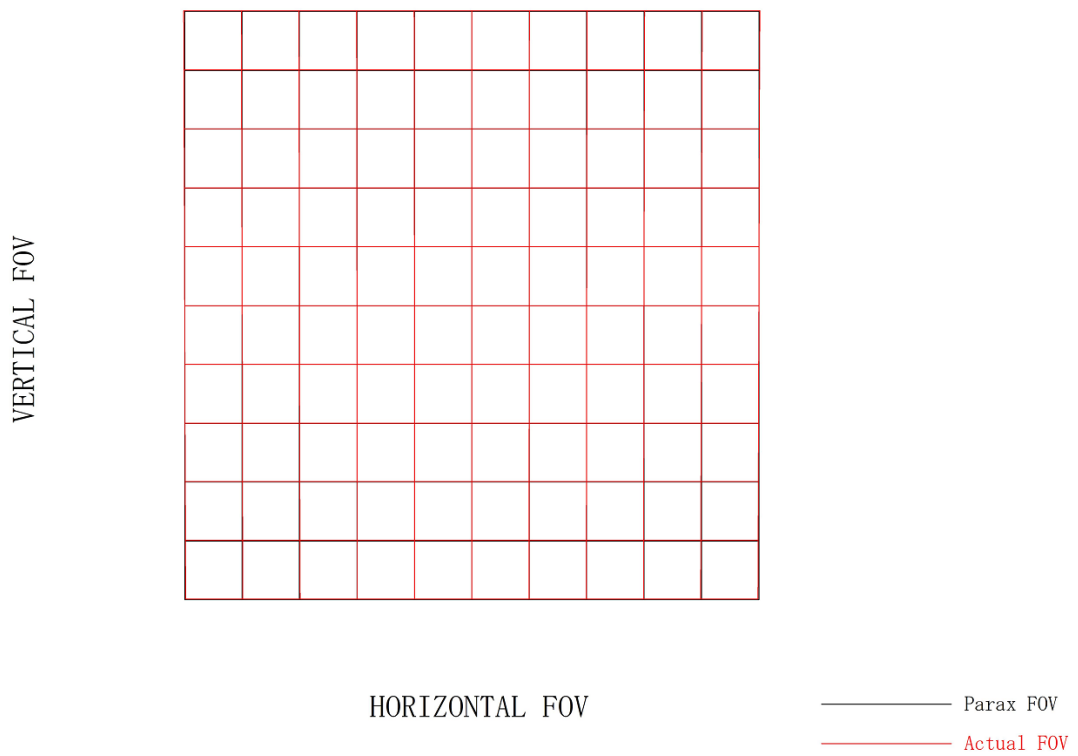


図 V.2.1.2-8 ミラー振れ角 5 度での反射像ディストーショングリッド

(2) -2 ポリマー化プロセスの要素検討 (試作ラインの整備)

ポリマー化の製造プロセスでは、シリコン型を用いてアクチュエータなど構造体を加工する。シリコン型は温室効果ガスであるSF₆やC₄F₈によるエッチング技術により形成するため環境負荷も大きく、型としての寿命も短い。今回の開発では、電鍍成型金型による製造プロセスを確立し、より高精度な構造体の加工と温室効果ガスの削減を目論む。金属型はスタンパーとして100ショット以上可能であり、製造プロセスとしての温室効果ガスの使用量は3.2.100となる。

本プロジェクトで開発したポリマーMEMS製作プロセスを図 2.1.2-9 に示す⁽¹⁾。ホットエンボス用の金型を製作し、デバイス構造とベース構造をホットエンボスにより成形した(第1工程)。金型製作については次項で説明する。成形サンプルとベースは表面活性化法によって接合し(第2工程)、接合後のサンプル上面にあるホットエンボス後に残る残膜を研磨加工によって除去した(第3工程)。研磨加工を用いることにより、多数のデバイスを同時に加工することが可能となる。研磨加工後のデバイス表面にAuをスパッタリングすることによってコーティングした(第4工程)。垂直静電アクチュエータの機能をもたせるため、可動歯と固定歯の間に段差がつくように固定歯を押し下げた。なお、コーティング時の短絡を防止するため、デバイス側面にはアンダーカットを設けている。次節より各工程の詳細および実験結果を示す。

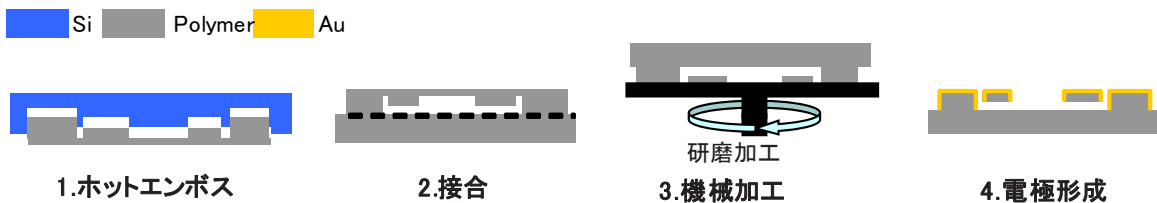


図 V.2.1.2-9 ポリマーMEMS 製作プロセス

また、これまでは20×20mmサイズの試作ラインであったが、本プロジェクトにおいて、成型装置、接合装置及び研磨装置を新設し、4インチ試作ラインを構築した。整備したラインを図 2.1.2-10 に示す。

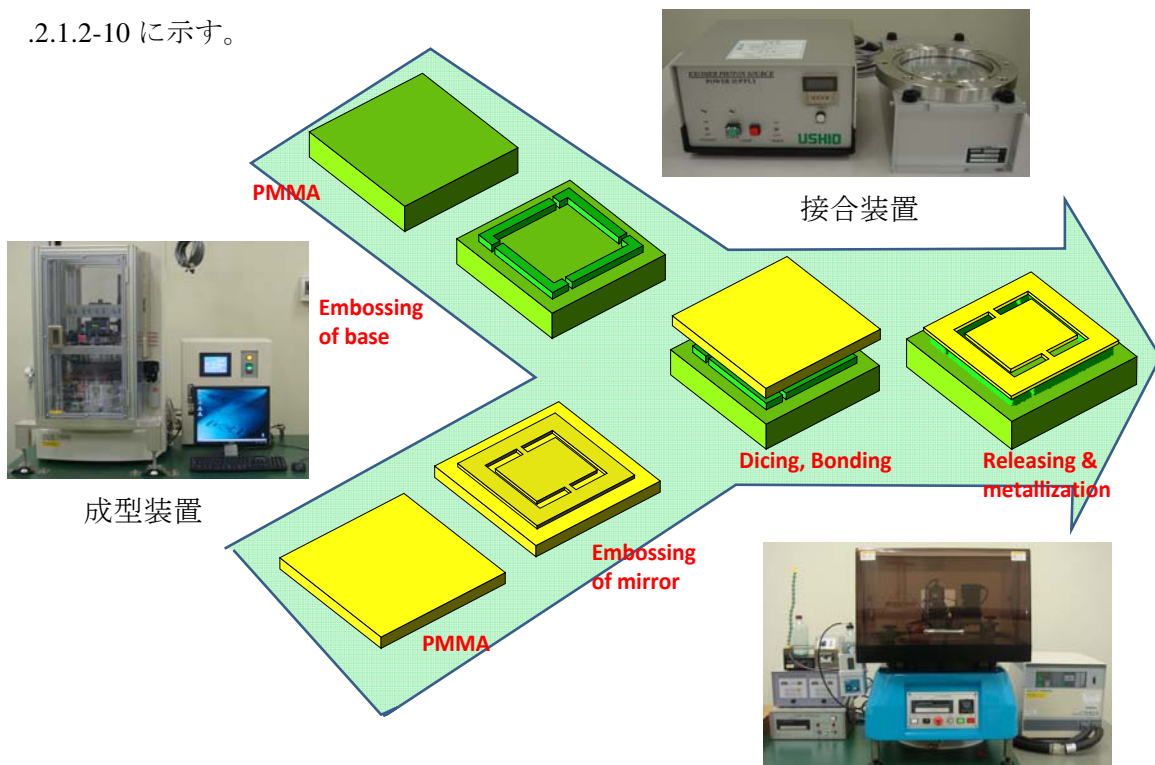


図 V.2.1.2-3.2.1 4インチ試作ライン 研磨装置

● ポリマー成型用型製作プロセスおよび製作結果

ポリマーの成型用型として、ミラーはシリコン及び Ni 電鍍で製作し、ベースはモールド用型材として良く知られている NAK55 を採用した。シリコン型は、シリコンとガラスを接合したタイプ、MEMS デバイスで良く使われる SOI (Silicon On Insulator) タイプとベアシリコンタイプの 3 種類を検討した。それぞれ製作したシリコン型を図 V.2.1.2-12~17 に、ベース用金型を図 V.2.1.2-18 に示す。

シリコン型は、当初ミラーの厚みを $100\mu\text{m}$ としていたためエッチング深さも $100\mu\text{m}$ としていた。しかしながら、目標とする駆動電圧を達成するため櫛歯部の L/S を $5/5\mu\text{m}$ としたため、アスペクトとしても 20 程度と大きく、離型時において櫛歯部の型が破損に至るという問題があった。特に接合タイプや SOI タイプは強度的にも弱いことから、ミラーの厚みを再設計し型のエッチング深さも $50\mu\text{m}$ と浅くし、試作には最も強度の高いベアシリコンタイプを採用した。また、型の深さ方向の傾斜角度や側壁形状も離型のし易さを大きく左右するため、櫛歯部は順テーバーで側壁のいわゆるスキヤロップの大きさが最小となるエッチング条件を採用した。

一方、シリコン型は耐久性に乏しく都度製作する必要があるため、多くの温室効果ガスを使う。そこで我々は、耐久性があり半永久的に使用可能な低環境負荷である電鍍金型の検討を行った。材質としては電鍍では一般的な Ni を採用した。図 V.2.1.2-19 に Ni 電鍍の製作フローを示す。Ni 電鍍プロセスは、狭ピッチで深さのある櫛歯部を考慮し、シード層形成は Ni 無電解めっき工法とした。また、実際の製作においては櫛歯部の L/S に水準を設けた。図 V.2.1.2-20~23 に製作した Ni 電鍍金型の SEM 像とレーザー顕微鏡によるパターン高さの評価結果を水準別に示す。評価結果より、パターンとしては $20\mu\text{m}$ L/S までは問題なく形成できていることがわかる。しかしながら、 $10/10\mu\text{m}$ L/S までのパターン形成は難しいため、本静電型ミラーデバイスの目標構造である $5/5\mu\text{m}$ L/S への Ni 電鍍金型の適用は見送ることとした。製作にあたっては数社検討を行ったが、安定的に製作できるレベルは $50/50\mu\text{m}$ L/S である。

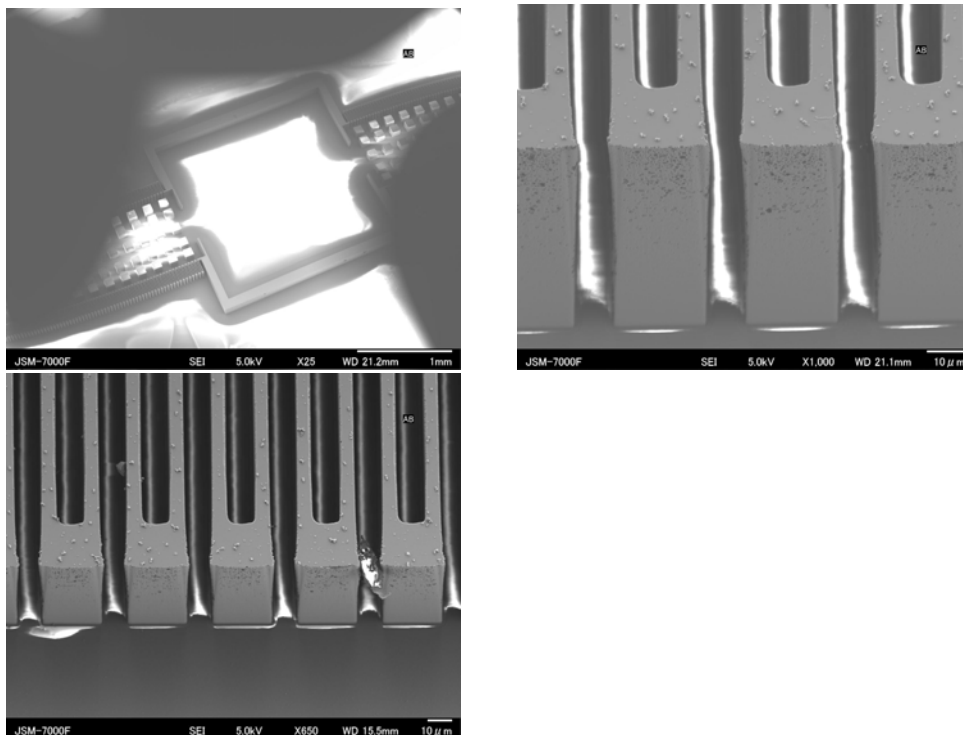


図 V.2.1.2-12 シリコン/ガラス接合タイプ (L/S $8\mu\text{m}$)

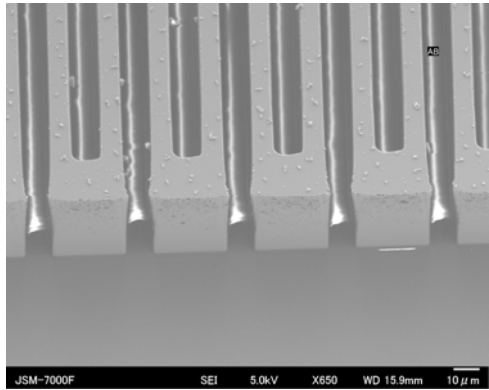
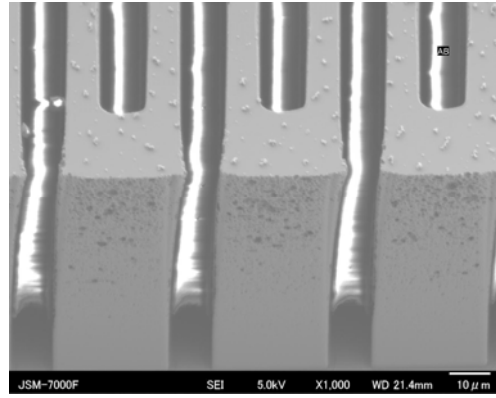
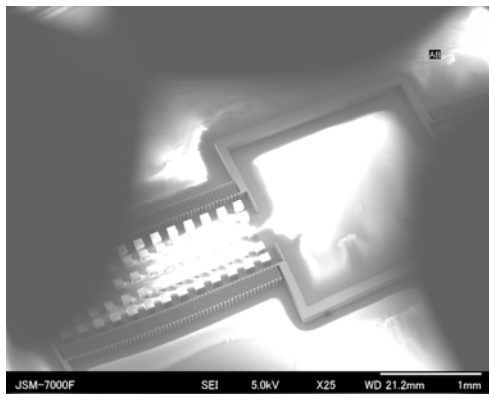


図 V.2.1.2-13 シリコン/ガラス接合タイプ (L/S 10 μ m)

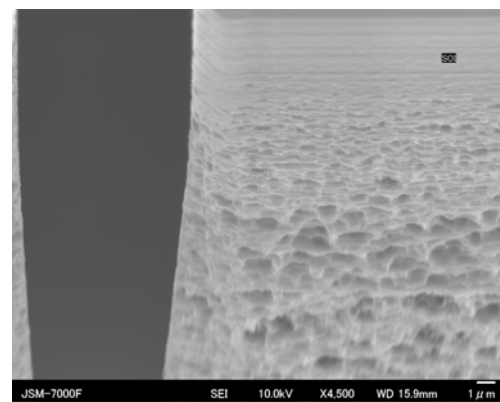
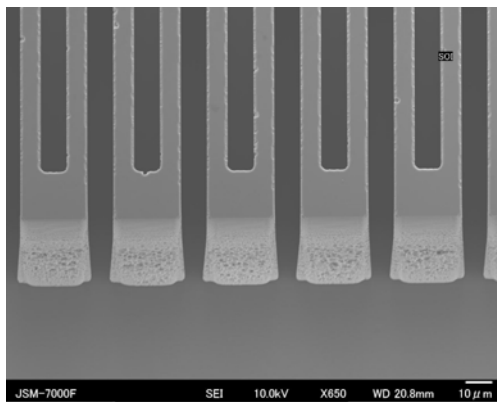
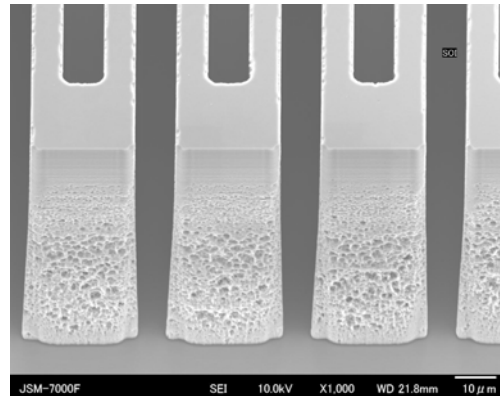
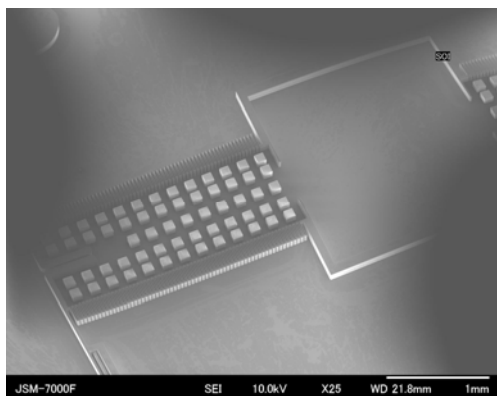


図 V.2.1.2-14 SOI タイプ (L/S 8 μ m)

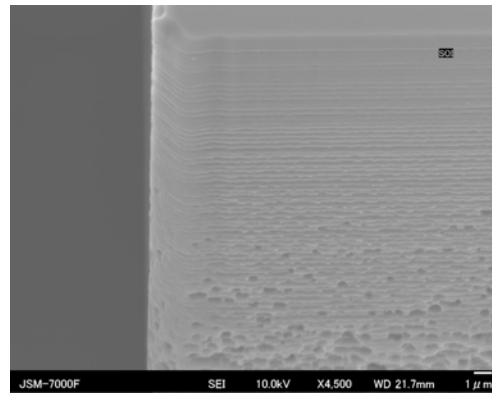
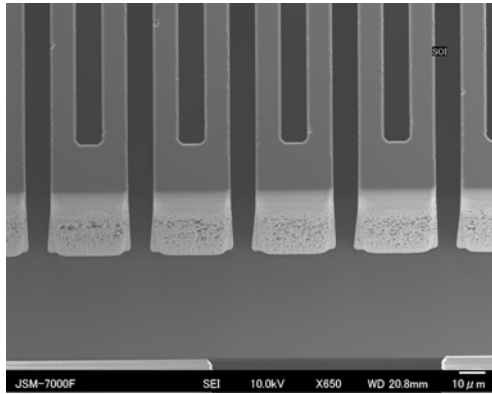
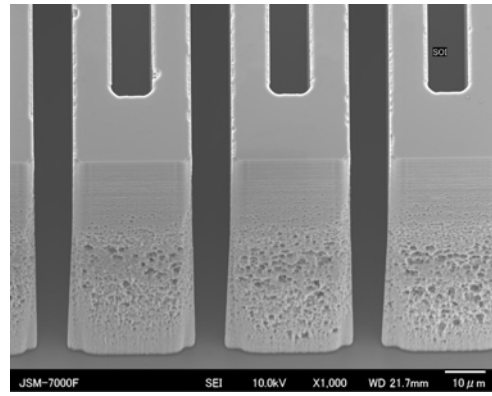
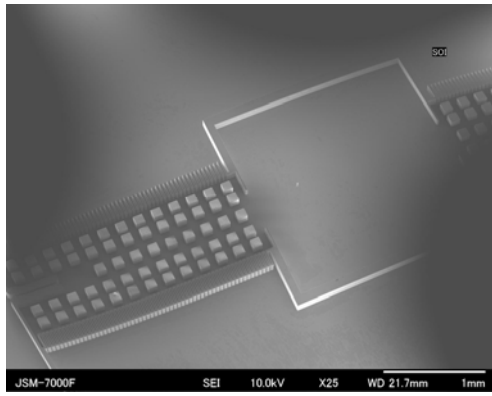


図 V.2.1.2-15 SOI タイプ (L/S 10 μ m)

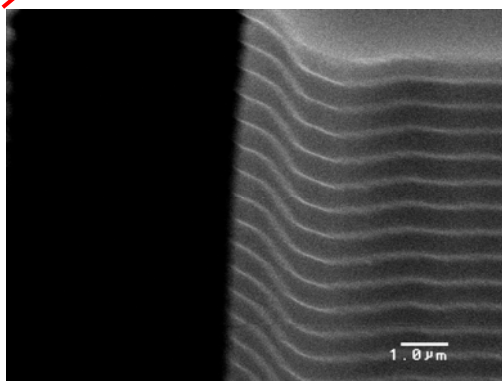
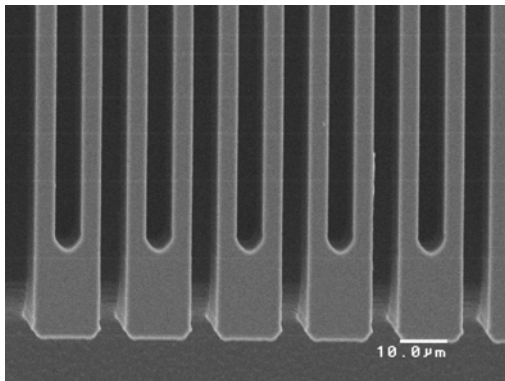
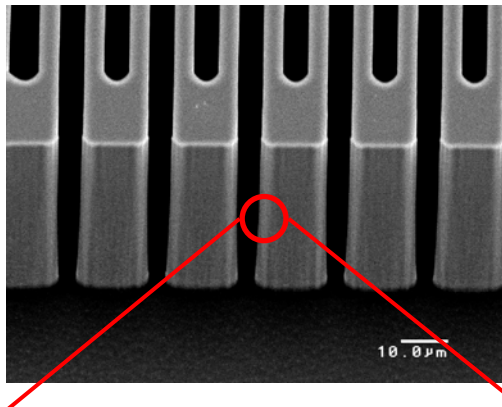
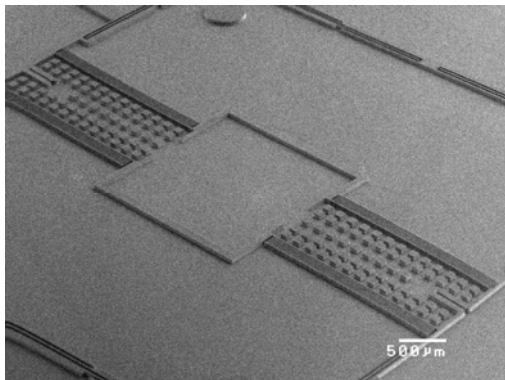
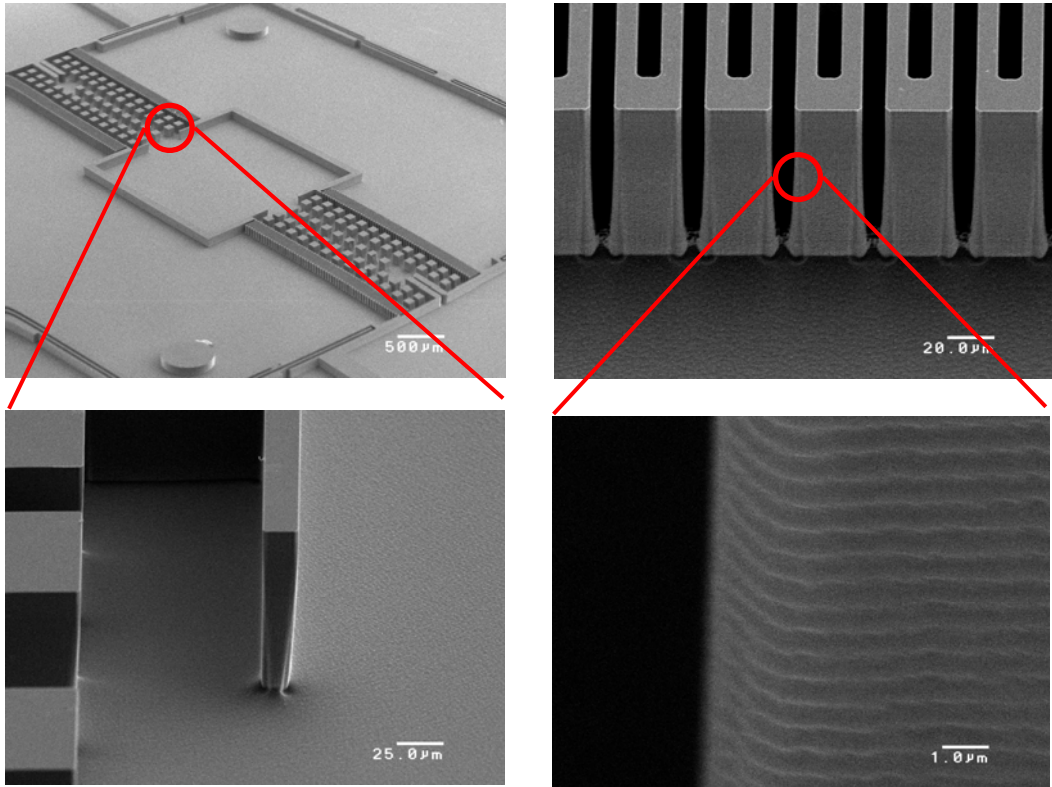


図 V.2.1.2-16 ベアシリコンタイプ (L/S 5 μ m)



図V.2.1.2-17 ベアシリコンタイプ (L/S 10μm)



図V.2.1.2-18 ベース基板成型用金型

Ni 電鍍成型金型製作フロー

シリコン原版製作

②シリコン表面親水性処理 (アッシング)

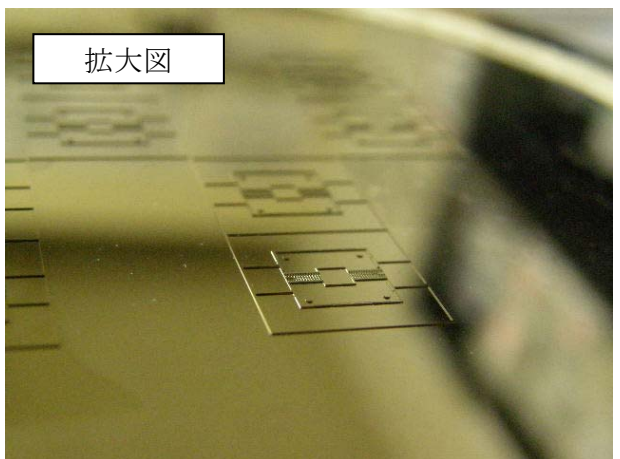
③シード層形成 (Ni 無電解めっき)

Ni 電鍍造 (0.3mmt)

⑤シリコン溶解 (22%TMAH)



シリコン溶解前のウエハ



シリコン溶解後のウエハ

図 V.2.1.2-19 Ni 電鍍成型金型製作フロー

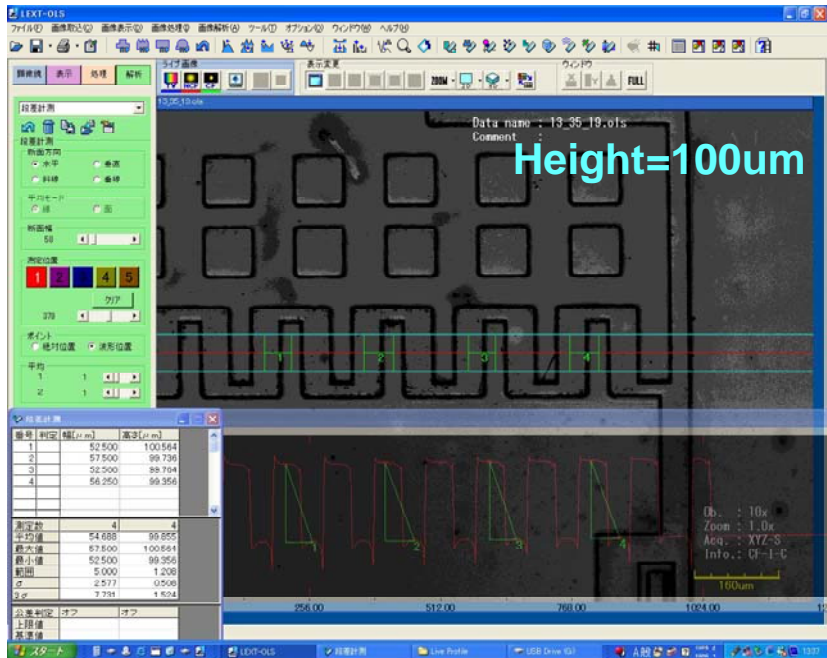
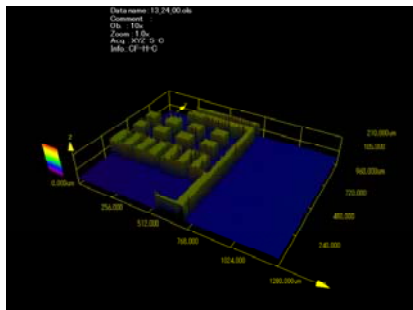
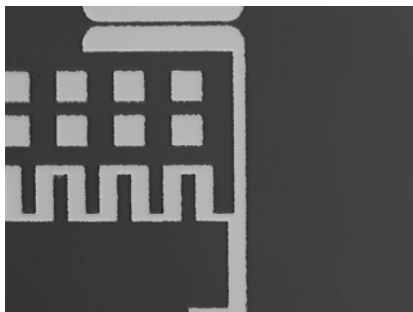
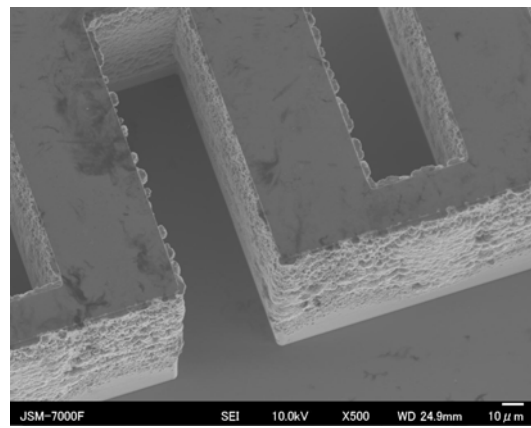
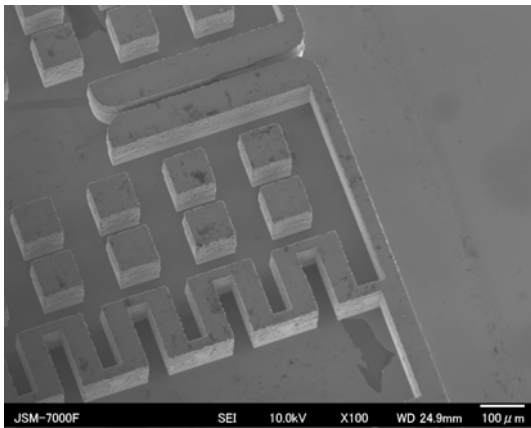
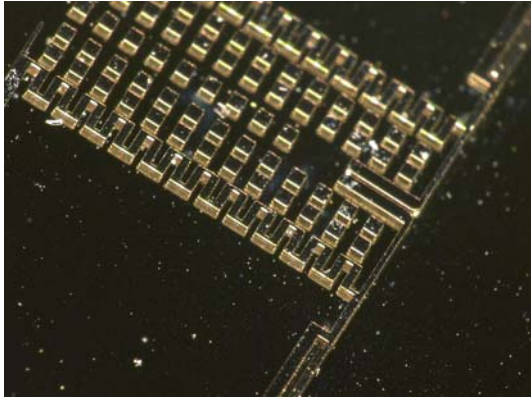


図 V.2.1.2-20 Ni 電鍍 50/50μm L/S パターン評価結果

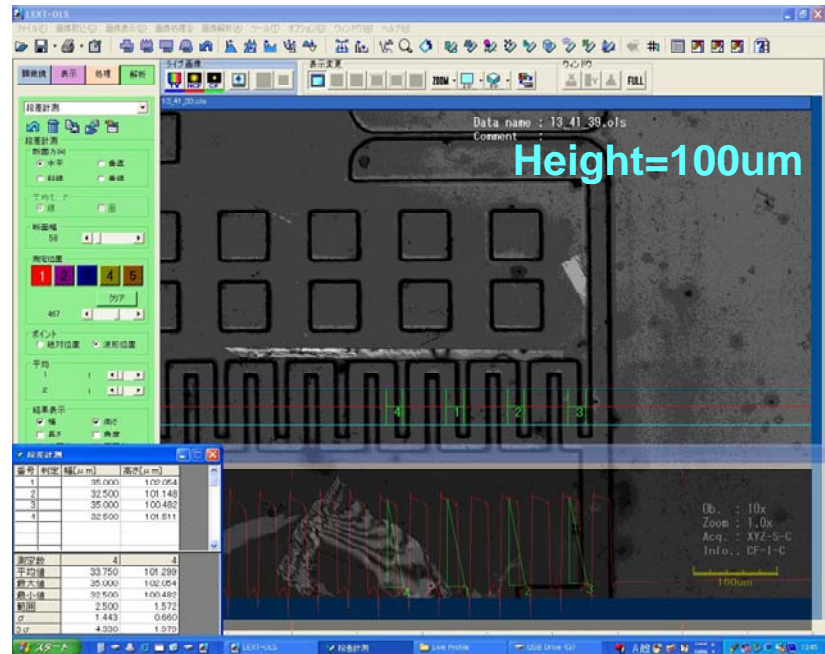
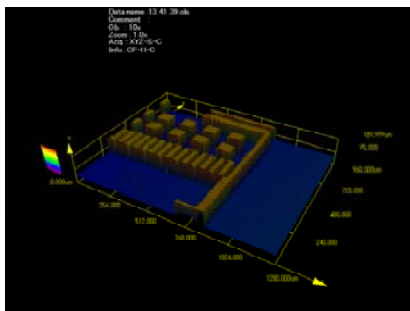
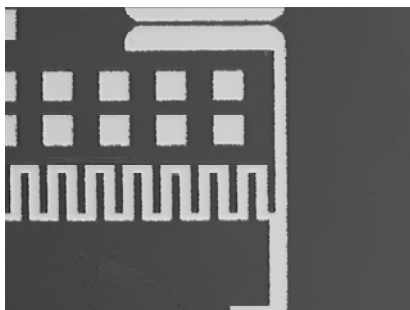
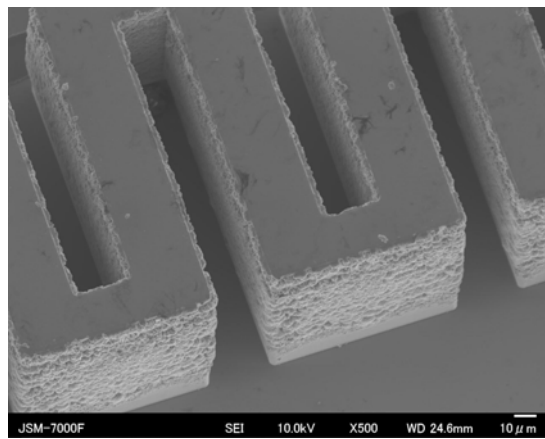
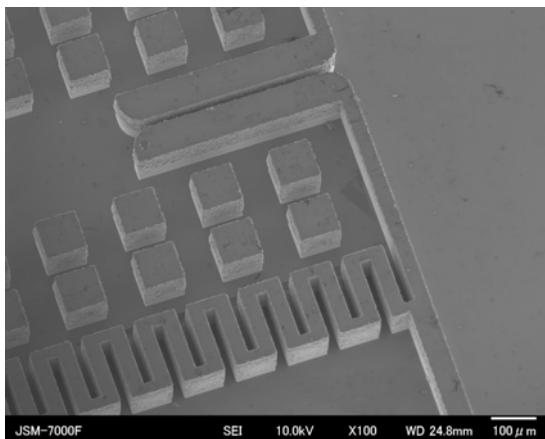
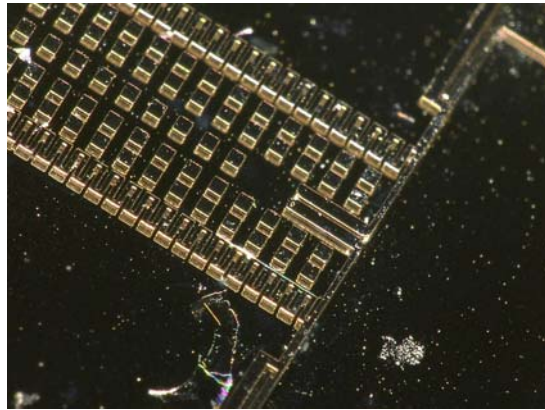


図 V.2.1.2-21 Ni 電鍍 30/30μm L/S パターン評価結果

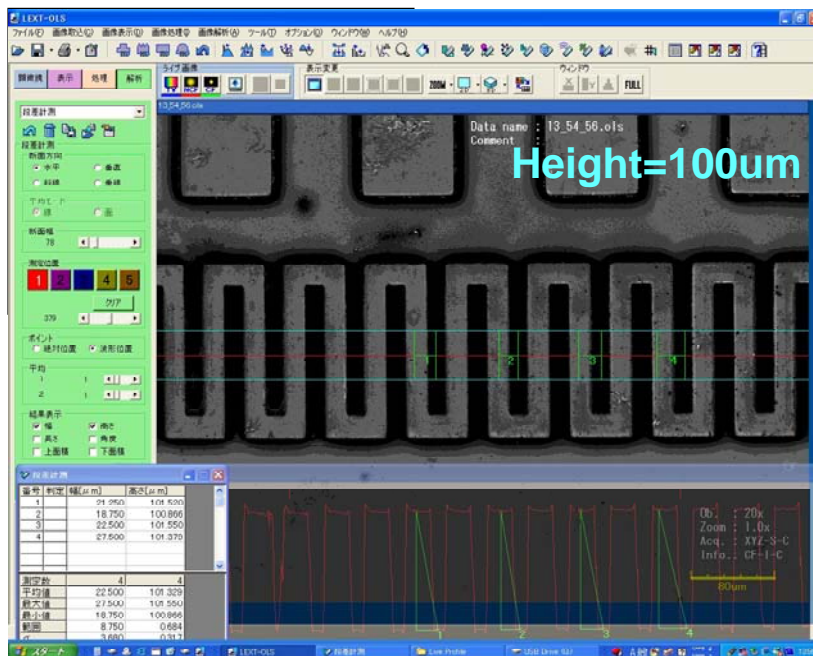
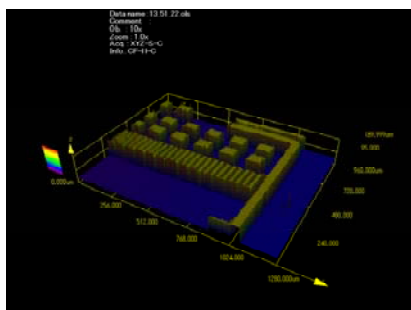
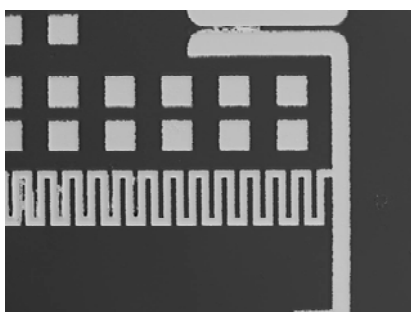
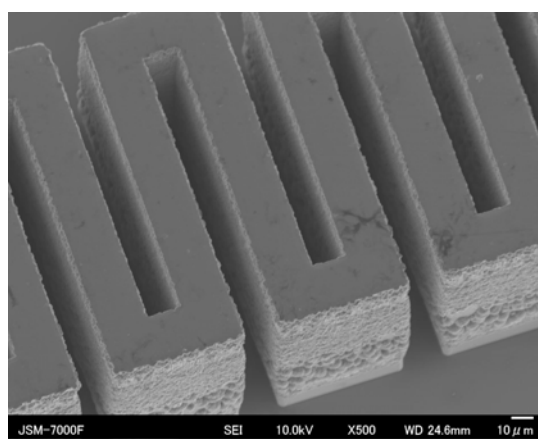
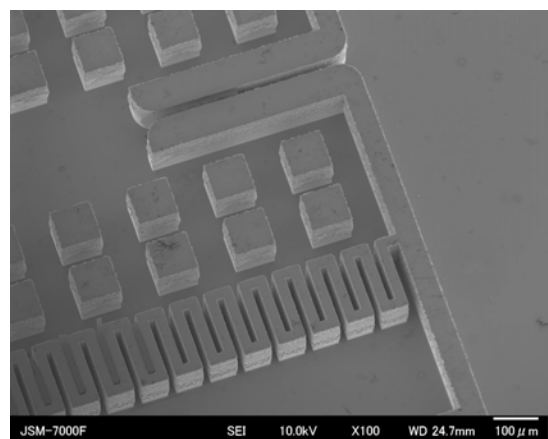
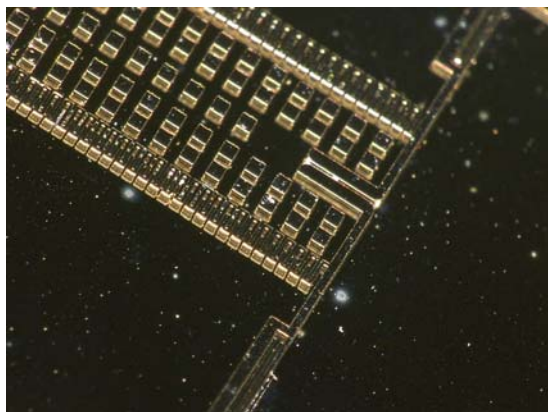


図 V.2.1.2-22 Ni 電鍍 20/20μm L/S パターン評価結果

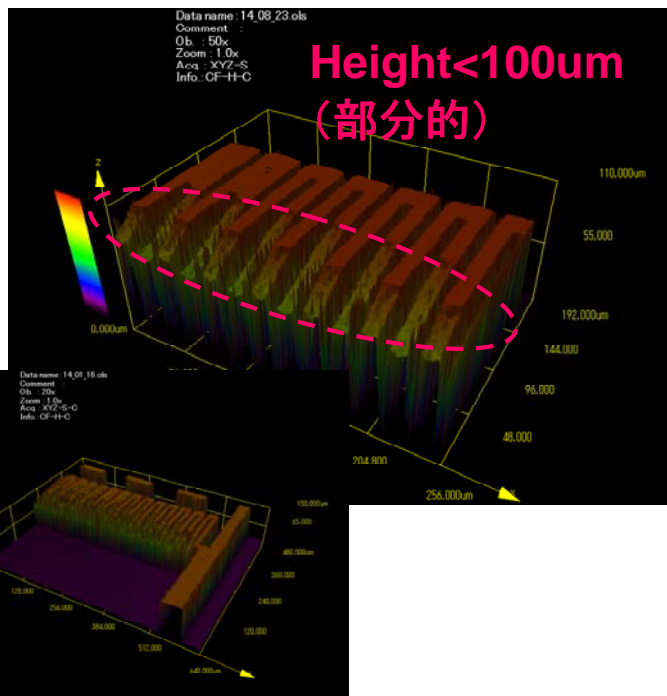
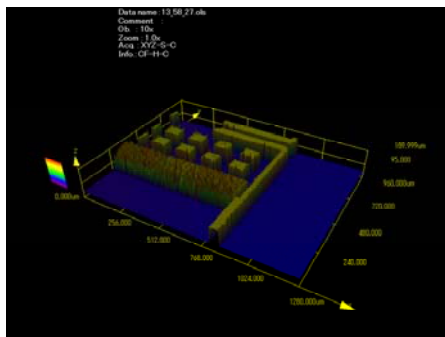
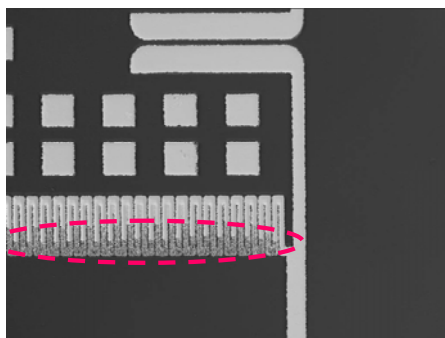
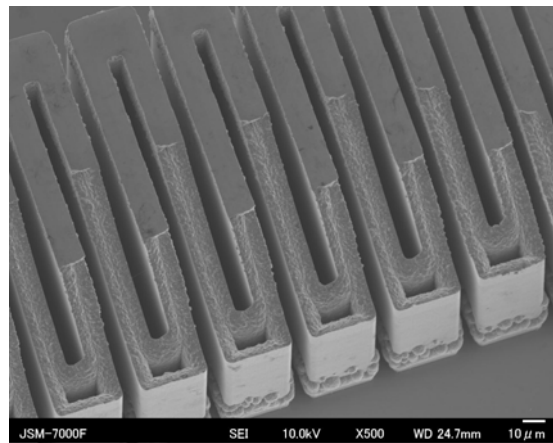
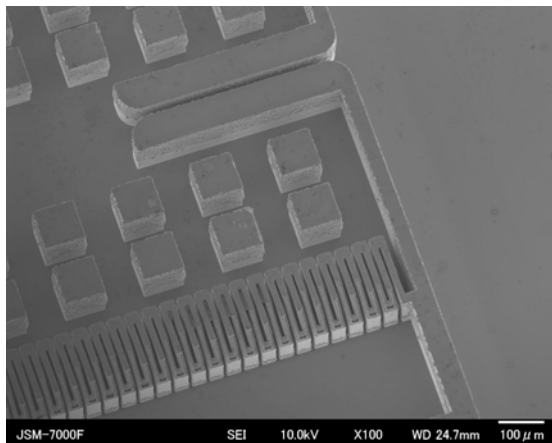
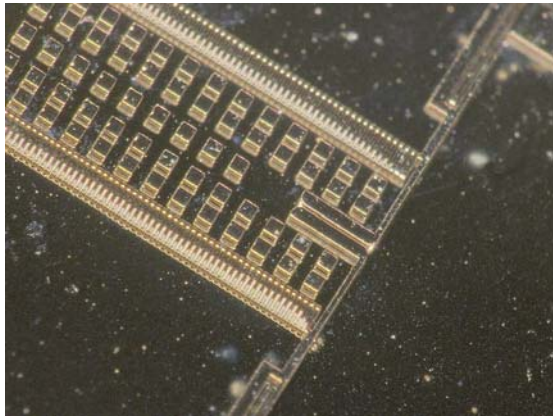


図 V.2.1.2-23 Ni 電鍍 10/10μm L/S パターン評価結果

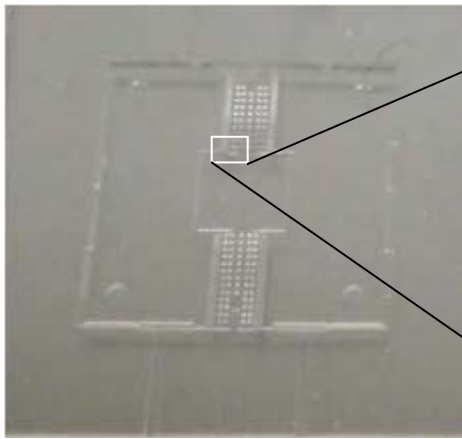
- ホットエンボス実験結果

ホットエンボスは、材料試験機（島津製作所：AG-10kNIS）と本プロジェクトで導入した4インチウエハ用真空プレスチャンバーから構成され、0.001～1000mm/minの範囲で移動速度を制御可能である。このチャンバーには加熱・冷却用の流路を設けた金属プレートを上下に配置した。加工するPMMAには、クラレックス S（日東樹脂工業製）を使用した。

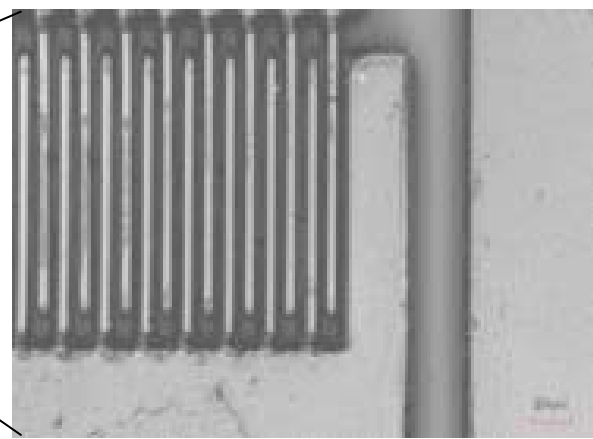
成形条件および手順は以下の通りである。

- 1.樹脂および金型を180℃に加熱
- 2.180℃に到達後、0.1mm/minの速度で加圧していき、2000Nで15分間保持（金型サイズ：15mmx15mm）
- 3.圧力を2000Nに保持したまま冷却開始
- 4.樹脂のガラス転移温度105℃に到達後、加圧を終了
- 5.80℃まで冷却した後、0.01mm/minの速度で離型

成形結果を図V.2.1.2-24、25に示す。



図V.2.1.2-24 ミラーデバイス全体



図V.2.1.2-25 櫛歯部拡大

- 表面活性化による接合結果

接合は、真空紫外線（波長：172nm）を用いた表面活性化による常温接合を行った⁽²⁾。本手法を用いることにより、従来の熔融接着や接着剤の使用で問題となるデバイスの変形および微細パターンの埋没を回避でき、低温での接合が可能となる。

ホットエンボスサンプルとPMMAベースに真空紫外線を10分間照射し、その後サンプルを重ね合わせて70℃に加熱した状態で、4.4MPaで10分間加圧した。

接合後のサンプルを図V.2.1.2-26に示す。変形することなく接合できていることが確認できた。

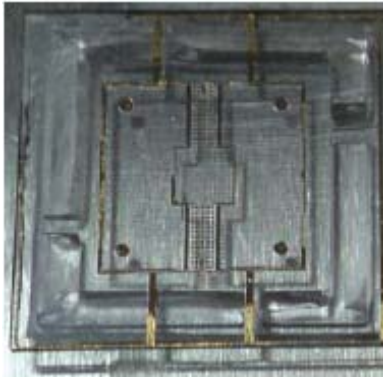


図 V.2.1.2-26 接合後のサンプル

● 研磨加工による残膜除去結果

可動構造を得るため、図 V.2.1.2-9 (ポリマーMEMS 製作プロセス概略図) のようにデバイス層上部にホットエンボス後に残る残膜を除去する必要がある。本研究では、残膜を研磨加工により除去した。

研磨加工は、研磨剤に BAIKALOX(粒度 $3.0\mu\text{m}$, $0.05\mu\text{m}$)を使用し、 1.3kg の荷重をかけながら実施した。粒度 $3.0\mu\text{m}$ で粗加工を行った後、粒度 $0.05\mu\text{m}$ にて仕上げ加工を行った。加工時間は全工程で 40 分程度であった。研磨加工後、デバイス表面に電極用薄膜としてスパッタにて Au をコーティングした。

図 V.2.1.2-27 に示したように、製作したデバイスは残膜が完全に除去されていることが確認できた。また、数 μm 以下程度のバリが発生していたものの、デバイスの破損およびスクラッチ痕などは観察されず、良好な表面状態にて残膜を除去できていることが確認できた。レーザー顕微鏡にて表面粗さを測定した結果、測定値は 30nm (R_a)であった。

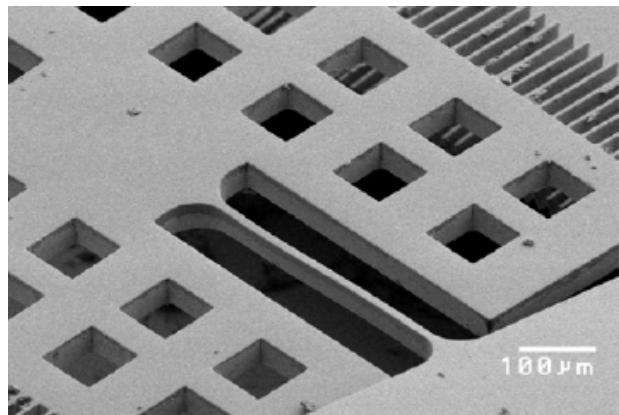
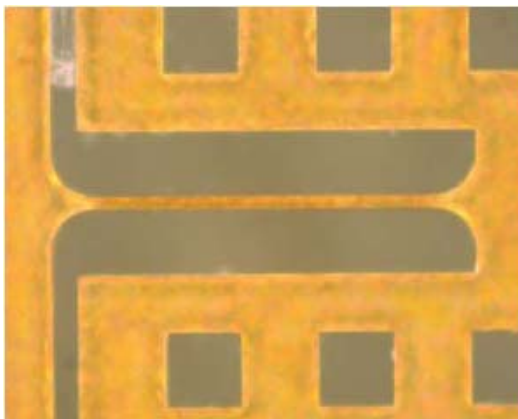


図 V.2.1.2-27 リリースした PMMA ミラーデバイス

(3) 静電ミラーデバイスの要素試作及び性能評価

ポリマーMEMS は、同一形状、同一印加電圧でシリコンに比べてセンサ感度 10 倍以上、アクチュエータ変位 10 倍以上 (根拠: ヤング率が Si に比べ約 $1/50$ 程度)、構造物の可視光域における光透過率が 80%以上 (根拠: PMMA の光学特性から) とシリコンをしのぐ特性が期待される。今回は、アクチュエータ MEMS デバイス(ミラーデバイス)を 2 回に渡り製作し、シミュレーションによ

る性能予測と以下の目標性能数値の比較検証を実施した。合わせて、生体適合性への課題を抽出した。

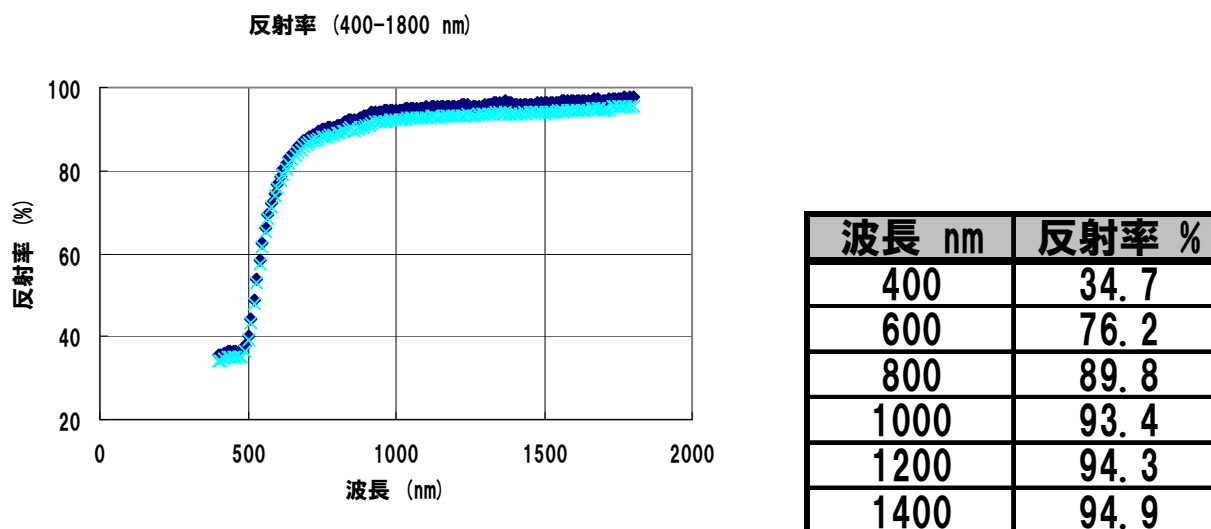
- a.ミラー素子アクチュエータ駆動電圧：30V 以下（参考：シリコン製アクチュエータ 100V）
- b.ミラー素子ミラー部反射率：90%以上（参考：シリコン製ミラー 95%）
- c.ミラー素子ミラー部表面粗さ Ra：100nm 以下（参考：シリコン製ミラー 5nm）

● 駆動電圧評価

ミラーの振れ角を5度とした場合、約28Vで駆動することが確認された。計算結果とは概ね合致しており、同構造のシリコンミラーの約1/3程度となっている。設計時に設定した触れ角10度とした場合の駆動電圧は約38Vとなっており、アクチュエータ部などさらなる構造最適化が必要である。

● ミラー部反射率評価

静電ミラーデバイス全面に、反射膜としてAu200nmの成膜を実施し、ミラー部の反射率測定を行った。各波長における反射率を図V.2.1.3-1に示す。スキャナなどでよく使われる波長1000nm以上で90%以上の反射率となっていることがわかる。



図V.2.1.3-1 ミラー部の反射率測定結果

● ミラー部表面粗さ評価

表面粗さはミラーデバイスのS/N感度に大きく影響する。表面粗さが大きい場合、レーザー光などの乱反射が大きくなり、戻り光の減衰や隣接ミラーへのクロストークなどの要因となる。シリコンミラーデバイスでは、ウエハの初期表面状態を維持しており数nmレベルである。ポリマーミラーデバイスのプロセスでは、残膜を研磨することで構造体をリリースするが、レーザー顕微鏡による評価ではRa=30nmと予想以上の良好な結果であった。

● 生体適合性への課題抽出

ポリマーMEMSセンサやデバイスをバイオ・医療分野へ応用するにあたっては、ポリマー材料そのものの物理的・化学的性質だけでなく、血液適合性や細胞・組織適合性など生体側の反応性を精査する必要がある⁽⁶⁻¹²⁾。医療機器・用具においては、表V.2.1.3-1に示すように生体適合性の評価項目ごとに国際規格（ISO 10993シリーズ）があり、また、米国薬局方（United States Pharmacopeia）でも材料の生体適合性がクラス分けされている。

表V.2.1.3-1 ISO10993 シリーズ

ISO10993-1	リスクマネジメントプロセスにおける評価及び試験
ISO10993-2	動物の保護の要求事項
ISO10993-3	遺伝子毒性，発がん性及び生殖毒性の試験
ISO10993-4	血液との相互作用の試験の選択
ISO10993-5	インビトロ細胞毒性試験
ISO10993-6	埋込後の局所的影響の試験
ISO10993-7	酸化エチレン滅菌処理残留物
ISO10993-9	潜在的な分解生成物の同定及び定量化の枠組み
ISO10993-10	炎症及び皮膚感作性の試験
ISO10993-3.2.1	組織毒性の試験
ISO10993-12	試料調製及び標準物質
ISO10993-13	高分子医療機器からの劣化生成物の同定及び定量化
ISO10993-14	セラミックスからの分解生成物の同定及び定量化
ISO10993-15	金属及び合金からの分解生成物の同定及び定量化
ISO10993-16	分解生成物及び浸出物の毒性動態の試験計画
ISO10993-17	溶出物質の許容限度値の設定
ISO10993-18	材料の化学キャラクタリゼーション

PMMA は医療用として血液浄化器，吸着剤，眼内レンズ，コンタクトレンズ，人口歯・義歯などに幅広く使用されており，これらに使われる PMMA の材料グレードは，発がん性，血液との相互作用，インビトロ細胞毒性，埋め込み後の局所的影響，酸化エチレン滅菌処理，炎症・皮膚感作性などそれぞれ該当する国際規格をクリアしている。また，多くの学術論文において PMMA の各種生体適合性が実証・報告されており，エンボス加工ができるポリマー材料の中では最も生体適合性の優れた材料の 1 つである。

PC も生体適合性に優れた材料であり，とりわけ血液適合性に優れ，中糸空型人工透析器の材料として広く使用されている。また，高密度ポリエチレンは人工弁・人工関節（ソケット部），低密度ポリエチレンやポリプロピレンは人工肺・血漿分離器に用いられるなど，ポリマー材料それぞれの生体適合性の高い項目について適材適所で使用されており，さらに生体内でもつくられている成分（乳酸）のポリマーである PLA も，縫合・接着材料などの加水分解性を利用した医療材料に使われている。これらの流れから，生体適合性ポリマー材料を用いて製作した MEMS デバイスは，体内取り付けや皮膚埋め込み，内服使用などの適所における医療・バイオ分野での応用が考えられ，今後の技術展開が大いに期待される。

実際にポリマーMEMS デバイスをこれらの分野で使用するときには成形後の耐久性評価が課題となる。信頼性試験のほか，成形前後の特性値変化の様子で生体適合性に関する耐久性もある程度予測できると思われる。本プロジェクトにおける成形プロセスでは，表 V.2.1.3-2 に示したように成形前後の特性値変化が小さいことが明らかになっている。

表 V.2.1.3-2 成形温度 180°C, 成形圧力 20MPa における成形プロセス前後の PMMA 特性値

		成形プロセス前	成形プロセス後
物理特性	密度 (g/cm ³)	1.20	1.20
	吸水率 (%)	0.66	0.78
機械特性	ヤング率 (GPa)	2.90	2.93
	ポアソン比	0.36	0.37
熱特性	熱伝導度 (W/mK) 厚さ方向	0.21	0.21
	熱伝導度 (W/mK) 面内方向	0.21	0.21
	比熱 (J/kg·K)	1.40	1.43
	線膨張係数 (× 10 ⁻⁵ K ⁻¹)	8.8	3.2.1.6
光学特性	屈折率	1.489	1.491
	全光透過率 (%)	93	90

(4) まとめ

PMMA による静電型ミラーデバイスは、概ね目標特性をクリアした。また、生体適合性ポリマー材料を用いて製作した MEMS デバイスは、体内取り付けや皮膚埋め込み、内服使用などの適所における医療・バイオ分野での応用は十分考えられることが確認された。

一方、Ni 電鍍成型金型を用いたホットエンボスによるポリマープロセスは、CO₂ 排出の削減においても有効である。表 V.2.1.4-1 にシリコンプロセスと比較して 4 インチウエハ 1 枚あたりの CO₂ 排出量の試算結果を示す。Ni 電鍍金型によるポリマーデバイスでは、シリコンデバイスに対して約 98% 以上の CO₂ 削減となる。これは、SF₆ や C₄F₈ など温室効果ガスの大幅な使用量削減による。特に Ni 電鍍金型の場合は、最初にシリコン原版の製作は必要となるが、型としては半永久的に使えるため、シリコン型によるポリマーデバイスより CO₂ の排出量はさらに小さくなる。

表 V.2.1.4-1 4 インチウエハ 1 枚あたりの CO₂ 排出量 (対象：静電型マイクロミラーデバイス)

単位：CO₂-kg

	プロセス	温室効果ガス	合計	対 Si 削減率 (全体)
シリコン	142.3	7,098.1	7,240.4	
ポリマー (シリコン型)	121.0	354.9	475.9	93.4%
ポリマー (Ni 電鍍金型)	121.0	3.5	124.5	98.3%

※温室効果ガスついて現状は、排ガス処理装置にて対処

※ポリマー (シリコン型) の温室効果ガス排出量は、20 ショット以上使用可能として算出

※ポリマー (Ni 電鍍金型) の温室効果ガス排出量は、シリコン型に対し 100 ショット以上使用可能として算出

※温室効果ガス排出量を除いた場合の CO₂ 削減率は約 15%

(5) 参考文献

- (1) Satoshi Amaya, Dzung Viet DAO, Susumu Sugiyama, "Development of an Efficient and Low Cost Fabrication Process for Polymer MEMS Devices Using Hot Embossing and Polishing Processes", Proceedings of the 27th Sensor Symposium, (IEEJ), 14-15 October 2010, Matsue, Japan, pp. 251-254.
- (2) T. Suzuki, F. Kitagawa, H. Shinohara, J. Mizuno, K. Otsuka and S. Shoji, "Polymer Microchip for Electrophoresis-Mass Spectrometry Fabricated by Hot Embossing and Low Temperature Direct Bonding", Tech. Digest Transducers'07, pp. 1617-1620.
- (3) 「プラスチック成形加工データブック第2版」(社)日本塑性加工学会編 (日刊工業新聞社、2002).
- (4) 松谷守康:「プラスチック技術マニュアル 原料・設計・加工」(理工学社、1989).
- (5) 辻秀人:「ポリ乳酸 植物由来プラスチックの基礎と応用」(米田出版、2008).
- (6) 堀内孝、村林俊:「医用材料光学」(コロナ社、2006).
- (7) 片岡一則、岡野光夫、由井伸彦、桜井靖久:「生体適合性ポリマー」(共立出版、1988).
- (8) 石原一彦:「ポリマーバイオマテリアル 先端医療のための分子設計」(コロナ社、2009).
- (9) 「生体適合材料」筏義人編 (日本規格協会、1993).
- (10) 「バイオマテリアル 材料と生体の相互作用」田中順三、角田方衛、立石哲也編 (内田老鶴圃、2008).
- (3.2.1) 「医療材料・医療機器 その安全性と生体適合性への取り組み」土屋利江編 (シーエムシー出版、2009).
- (12) 「医療用高分子材料の展開」中林宣男監修 (シーエムシー出版、2003).

． 2. 2 スマートプロトタイプング技術開発

8インチ MEMS プロセスラインにおいて、センサを中心とした多機能デバイスの創出や異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果を用いた新規デバイスの製造検討を実施するに当たり、開発・製造コスト上昇の要因となる製造歩留り、性能ばらつき、ファブでの生産性と効率を向上させることが重要な課題となる。生産性・経済性を向上させる手段として大口径ウエハへの移行として新設した8インチ MEMS プロセスラインにおいて各種想定デバイスのテストエレメントグループ (TEG) 試作を実施することにより上記の基盤技術を構築した。

想定デバイスとして、自動車分野を中心に MEMS デバイス (圧力、加速度、ジャイロ) の採用が本格的に始まり、現在では情報通信分野の民生機器である、携帯電話、デジタルカメラ、モバイル PC、ゲーム機器向けに (加速度、ジャイロ、Si マイク、Si 発振子) が採用され、既存用途の市場拡大および新規市場開拓のキーデバイスとなっていることを踏まえて5種類選定し、試作した。

また、異分野融合型次世代デバイス製造技術開発の研究開発項目②「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」の成果を踏まえて2種類の検討を実施した。

これらの試作に先立って、あるいは相前後して、8インチラインに導入したプロセス装置の性能・特性を把握し、要素プロセス開発および面内均一性 (欠陥・ばらつき) 評価を行い、プロセスレシピ、各プロセスの歩留まり、材料、検査・計測・装置制御に関わる情報、知見・ノウハウの収集・整理を行った。

． 2. 2. 1 シリコンベースセンサ TEG の試作

(i) 加速度センサ・ジャイロセンサ・シリコン振動子 TEG の設計・試作

(i) -1.1 設計の原理

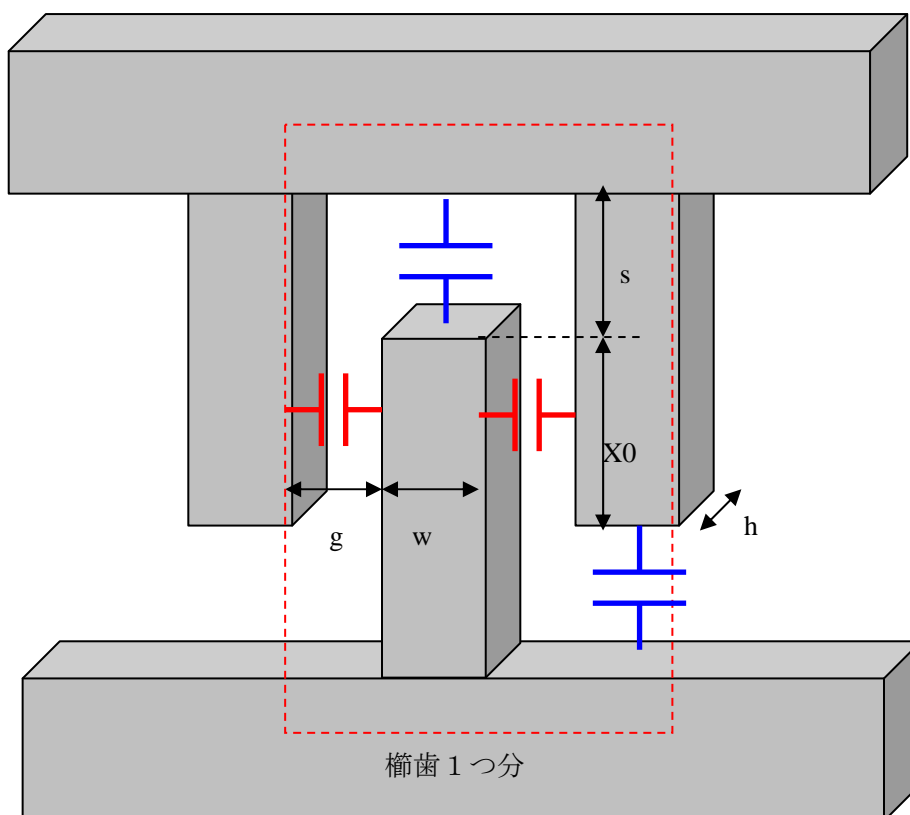
加速度センサ、ジャイロセンサを設計する指針として設定したのは、共振周波数 f_0 の値である。今回作製する MEMS デバイスの設計では、数 kHz オーダーの共振周波数で設計を行った。これは、どのような測定機器を用いても計測が可能な範囲であること、デバイスの駆動が容易な範囲であることが理由である。

共振周波数の設計において必要なパラメータは、質量 m とバネ定数 k である。この2つさえ決まれば、下記の式より計算できる。

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}$$

理論上、バネ定数を大きくすればするほど、質量を小さくすればするほど共振周波数は大きくなり、結果としてセンサデバイスの感度は良くなる傾向にある。ただし、実際に作製して動くものを作るには、駆動力や空気の粘性などの影響を大きく受けるため、一概には言えない。また、駆動力を大きくする為にアクチュエータを多く作りこむと、質量が増加し、結果として共振周波数が大きくなっていく。駆動力、質量、バネ定数をど

のようなバランスで設計するかは、各パラメータのトレードオフによって決まる為、最適な値はその目的によって異なる。



図V.2.2.1(i) -1.1-1 歯歯アクチュエータの設計モデル

今回の設計では、1チップの大きさの制限を設け、そこから駆動力と質量を概算し、バネ定数、共振周波数を決定した。歯歯アクチュエータの駆動力は、図V.2.2.1(i) -1.1-1 のようなモデルを考え、計算した。 g は歯歯間のギャップ、 h はSOIの活性層の厚さ、 X_0 は歯歯の重なり長さ、 w は歯歯の幅、 s は歯歯のストローク、 ϵ_0 は真空の誘電率、 n は歯歯数、 x は微小変位となっている。全体の静電容量は、歯歯の可動側の静電容量と、対向側の静電容量を足し合わせ、下記のような式となる。

$$C = 2n\epsilon_0 \left(\frac{w}{s-x} + \frac{X_0 + x}{g} \right) h$$

静電容量は変位の関数として表すことができるので、駆動力も同様に変位によって表すことができる。変位と力の関係を求めることができれば、それはバネ定数が求まることを表している。この図V.2.2.1(i) -1.1-1 の場合、力の式は下記のようなになる。 F は駆動力、 V は電圧、 C は静電容量、 x は微小変位である。

$$F = \frac{1}{2} \frac{dC}{dx} V^2$$

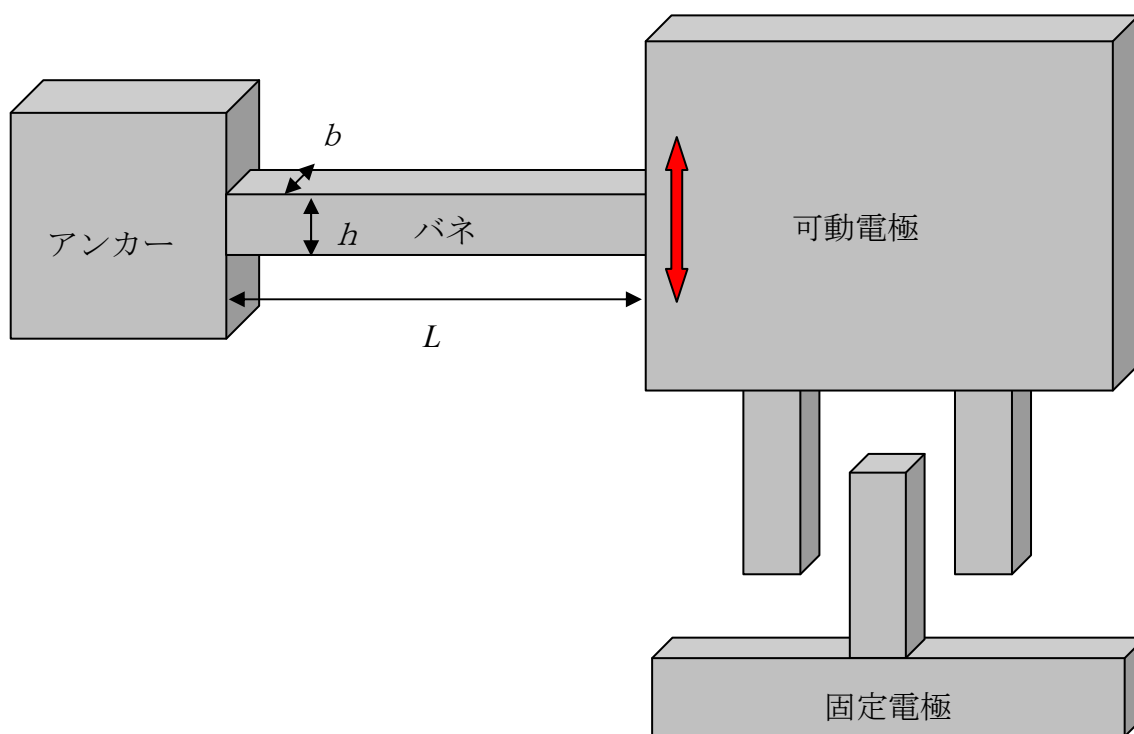
また、材料力学の梁のたわみの式より、構造の寸法からバネ定数を求めることも出来る。カンチレバーのようなデバイスであれば片持ち梁、今回作製するような両端に質量がある

デバイスだと両端支持梁のモデルを用いる。梁の断面形状より、断面二次モーメントを計算し、バネ定数を算出する。

今回の場合、横方向からの力を受けて駆動するので、モデルは図V.2.2.1(i) -1.1-2のようになる。下記は、断面二次モーメント I と両端支持の場合のバネ定数 k の算出式である。

$$I = \frac{bh^3}{12}$$
$$k = \frac{12EI}{L^3}$$

ここで、 b は SOI の活性層の厚さ、 h はバネの幅、 E はヤング率、 L はバネの長さである。この式から分かるとおり、横方向から力を受けるデバイスの場合、バネ定数はバネの幅の 3 乗に比例するため、フォトリソ工程や Si エッチング工程の寸法ばらつきの影響を大きく受ける。そのため、加工装置の面内ばらつきやウエハ間ばらつきを把握し、それを軽減することは非常に重要である。



図V.2.2.1(i) -1.1-2 バネの設計モデル

(i) -1.2 加速度センサ TEG の検討

今回試作する加速度センサ TEG は、図 V.2.2.1(i) -1.2-1 のよう構造となっている。この加速度センサは楕歯型アクチュエータを用いた静電容量型加速度センサとして設計されており、固定電極間に可動電極を有する構造となっている。可動電極は、4つの板バネで支持されている。可動電極はメッシュ構造になっており、活性層側から BOX 層をエッチングすることで、構造体がリリースできるようになっている。固定電極、可動電極には、それぞれアルミ電極パッドを設けており、このパッドにプローバーの針を当てて電氣的測定を行う。アルミパッドは、プローバーの針とデバイスの接触抵抗を軽減する役割がある。

1チップの大きさは、 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ になっており、その中に加速度センサが2つ設けられている。電極パッドの数は合計6つで、加速度センサ1つに対して3つの電極を有する。

この「1チップ $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ の大きさで、電極が6つ」という設計に基づいて、ジャイロセンサ TEG、シリコン振動子 TEG も設計されている。

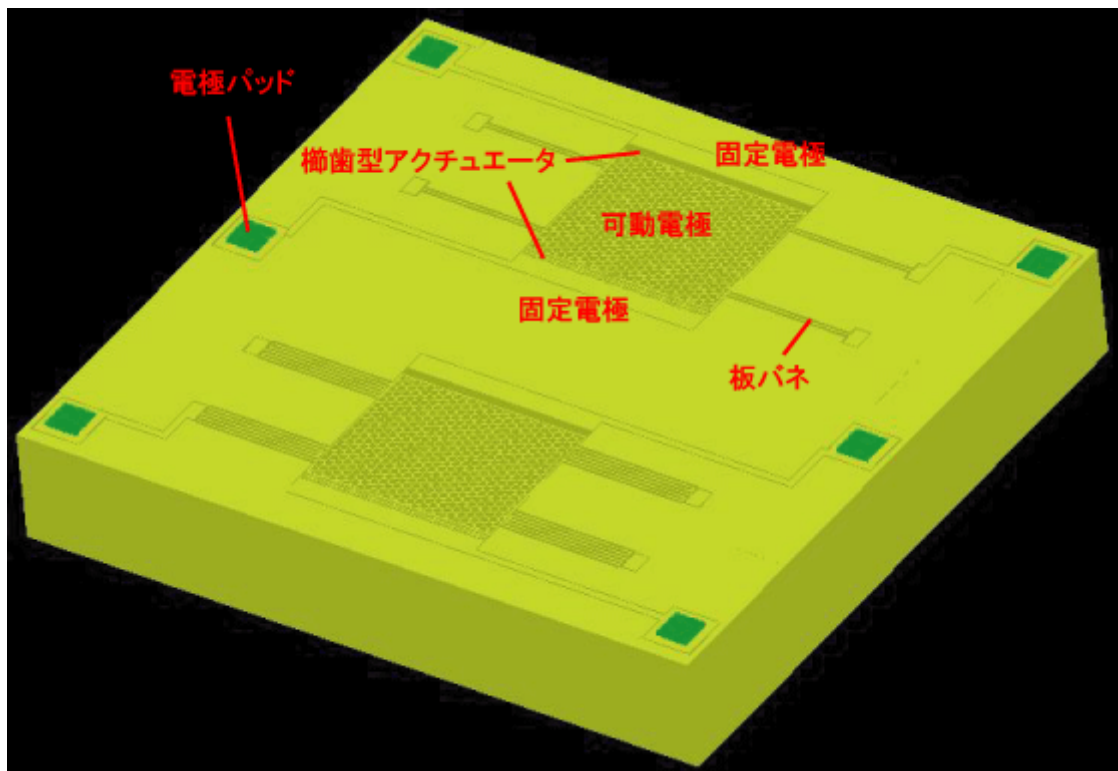


図 V.2.2.1(i) -1.2-1 加速度センサ TEG

具体的な設計値を、表 V.2.2.1(i) -1.2-1 に示す。バネ構造が異なる2種類の TEG を設計・試作している。今回の試作では、共振周波数が数 kHz オーダーのものを狙って設計している。今回設計したデバイスは、 8.0kHz と 5.5kHz の2種類である。この値とした理由は、前項に記述した数 kHz での設計指針を立てたためである。また、他のメーカーの加速度センサにならない、今回試作する TEG についても、楕歯アクチュエータを用いた静電駆動

型とした。

2種類の構造の違いとしては、バネ構造を板バネと折り返しバネにしたことで、バネ定数と質量が異なり、共振周波数が変化した。静電容量は同じ設計にした。

表 V.2.2.1(i) -1.2-1 加速度センサ TEG の設計値

	櫛歯 Gap [μm]	櫛歯数	マス構造	バネ構造	バネ定数 [N/m]	質量 [kg]	静電容量 [F]	共振周波数 [kHz]
A	2	50	メッシュ	板バネ	25.6	1.02×10^{-8}	1.26×10^{-13}	8.0
B	2	50	メッシュ	折り返し バネ	14.9	1.23×10^{-8}	1.26×10^{-13}	5.5

(i) -1.3 ジャイロセンサ TEG の検討

今回作製するジャイロセンサ TEG は、図 V.2.2.1(i)-1.3-1 のような構造となっている。設計はリングジャイロを想定している。構造は加速度センサと似ているが、可動電極がリング形状となっており、さらにセンシング電極が追加されている。リングを駆動させるための電極は、リングの両端に固定電極が 2 箇所あり、ここに交流電圧を印加する。リングには直流電圧を印加し、電気機械結合係数を大きくする。リングを支持するバネは折り返し構造になっており、リングの 4 箇所を支持している。この支持している点は、リングが定常状態で駆動しているときに変位がゼロの点を狙って設計した。リング振動中に回転する力が生じたとき、バネと垂直な方向に振動方向がズレ、センシング電極とバネとのギャップが変化する。このときの静電容量の変化が回転力に比例した値となるので、それを読み取りジャイロセンサとする。

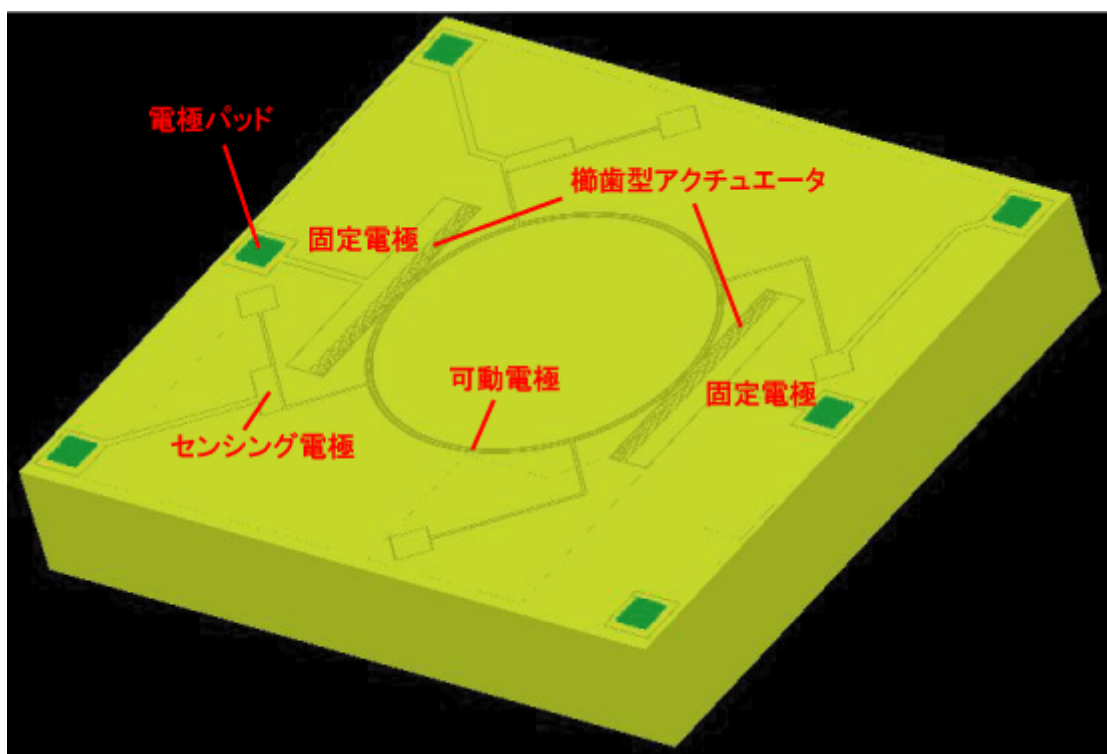


図 V.2.2.1(i) -1.3-1 ジャイロセンサ TEG

具体的な設計値は、表 V.2.2.1(i) -1.3-1 のようになっている。固定電極と可動電極の構造は楕歯アクチュエータとなっており、そのギャップは $2\mu\text{m}$ とし、その数は 62 とした。電極間の静電容量は、 $7.6 \times 10^{-13}\text{F}$ とした。可動電極のリング半径は $500\mu\text{m}$ で、その質量は $2.43 \times 10^{-9}\text{kg}$ 、バネ定数は 2.1N/m とした。このバネ定数は、あくまでリング部分のみのバネ定数なので、支持バネの値は含まれていない。リングのみが駆動したと仮定した場合の共振周波数は 4.6kHz という設計値にした。この設計値についても、加速度センサと同様

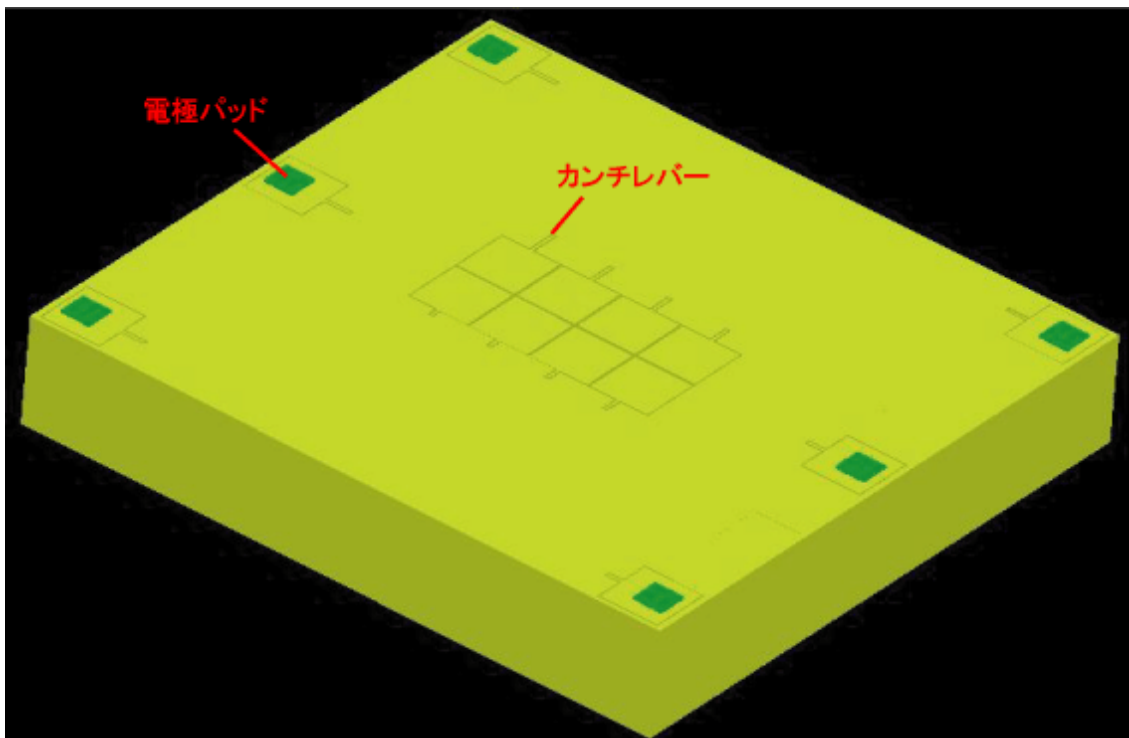
に、一般的なジャイロセンサの動作周波数を参考にした。

表V.2.2.1(i) -1.3-1 ジャイロセンサ TEG の設計値

櫛歯 Gap [μm]	櫛歯数	マス構造	バネ構造	バネ定数 [N/m]	質量 [kg]	静電容量 [F]	共振周波数 [kHz]
2	62	リング	折り返しバネ	2.1	2.43×10^{-9}	7.6×10^{-13}	4.6

(i) -1.4 シリコン振動子 TEG の検討

シリコン振動子の概観図は、図V.2.2.1(i) -1.4-1 のようになっている。長さの異なる 8 つのカンチレバーが並んだ構造となっている。



図V.2.2.1(i) -1.4-1 シリコン振動子 TEG

8つのカンチレバーの設計値で、共通の設計値を表V.2.2.1(i) -1.4-1 にまとめた。このカンチレバーの長さを $30\mu\text{m}$ から $100\mu\text{m}$ まで、 $10\mu\text{m}$ ずつ変更したものを設計した。そのときのカンチレバー長さと共振周波数の関係が図V.2.2.1(i) -1.4-2 のようになる。共振周波数が約 3.4MHz から 38.3MHz までの範囲となっている。この値を設定した理由としては、一般的な水晶振動子の周波数範囲 ($1\sim 20\text{MHz}$) を参考にした。

表V.2.2.1(i) -1.4-1 シリコン振動子 TEG の設計値

カンチレバー厚さ [μm]	カンチレバー幅 [μm]	密度 [kg/m^3]	ヤング率 [GPa]	振動モード定数
25	8	2330	169	1.876

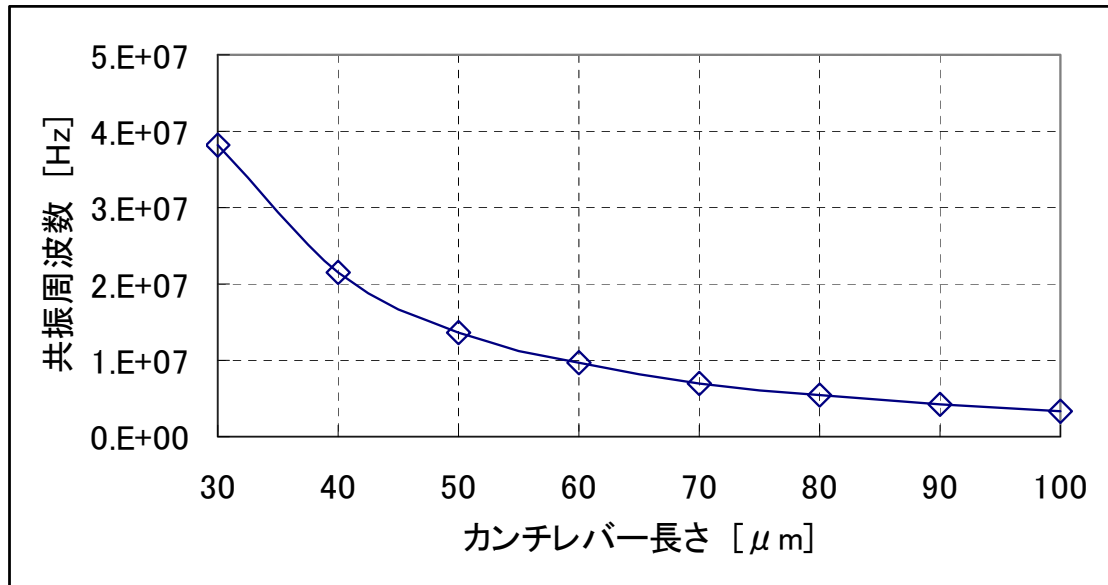


図 V.2.2.1(i) -1.4-2 カンチレバー長さ と共振周波数の関係

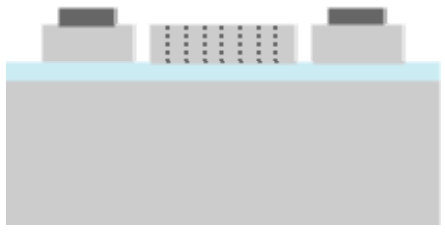
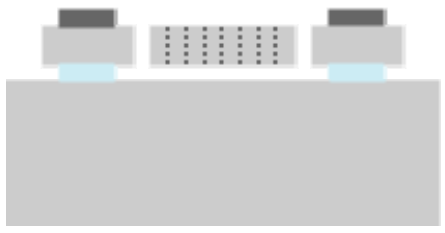
(i) -1.5 センサ TEG のプロセスフロー

今回試作するセンサ TEG は、静電容量型加速度センサ、静電容量型ジャイロセンサ、シリコン振動子の 3 種類とする。本項では、その作製プロセスフローについて説明する。なお、3 種類の TEG の作製プロセスは同じであるため、同ウエハに 3 種類の TEG を一括して作製している。使用するウエハは低抵抗 (0.02 cm 以下) の SOI ウエハとし、活性層 25 μm、BOX 層 1 μm、基盤層 725 μm とした。下記の表 V.2.2.1(i) -1.5-1 は、加速度センサ TEG のプロセスフローである。

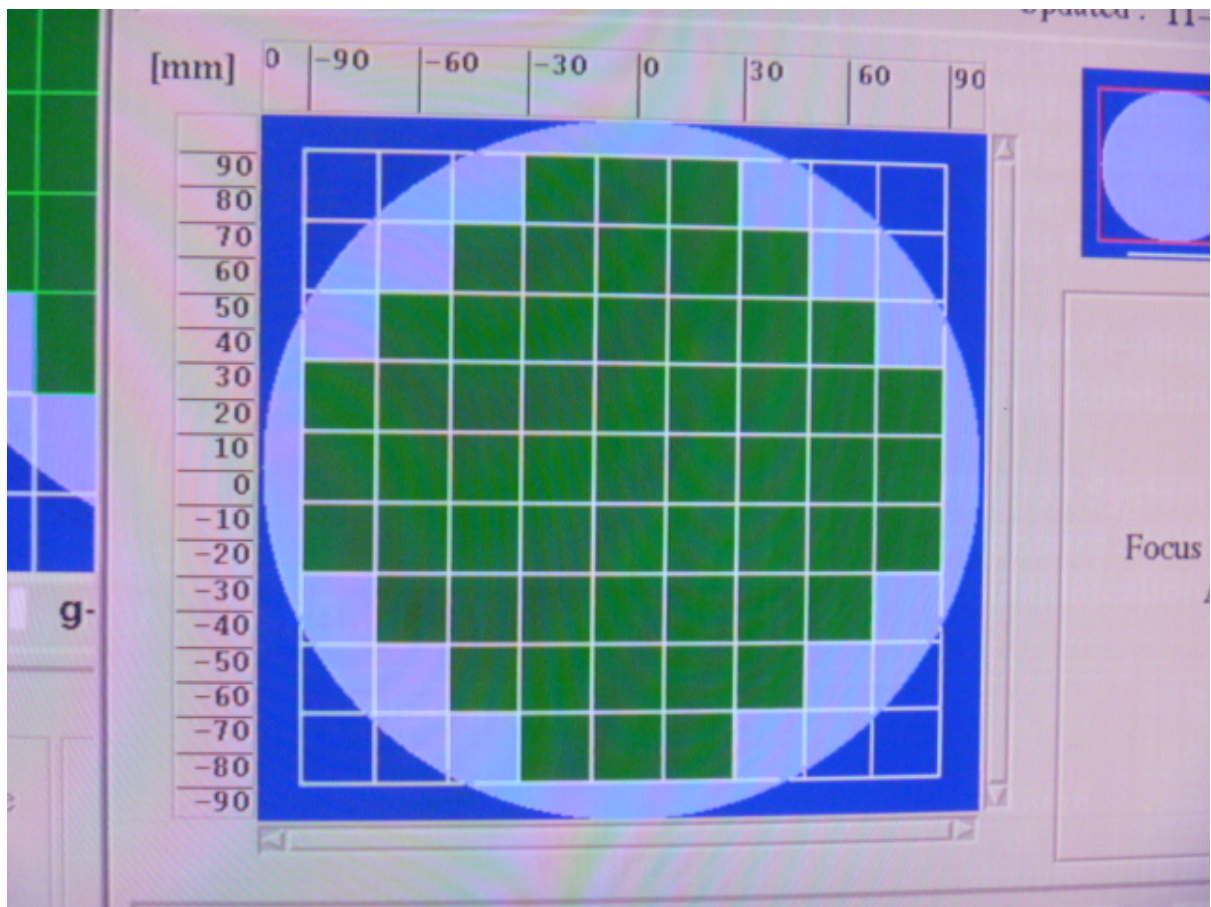
表 V.2.2.1(i) -1.5-1 センサ TEG のプロセスフロー

工程	内容	使用装置	条件等	図
1	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> コーターデベロッパ [ACD-12802C-3H] (ジャパנקリエイト製) ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer1	
2	Si エッチング (アライメント加工)	<ul style="list-style-type: none"> Deep-RIE [MUC-21 ASE-Pegasus] (住友精密工業製) 	150nm	
3	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> アッシャー [PC-1100] (samco 製) ウエハ洗浄装置 		
4	アルミ成膜	<ul style="list-style-type: none"> スパッタ [SME-200E] (ULVAC 製) 	2 μm	

5	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> ・コーターデベロッパー [ACD-12802C-3H] (ジャパנקリエイト製) ・ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer2	
6	アルミエッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・無機ドラフト 	2 μm	
7	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> ・アッシャー [PC-1100] (samco 製) 		
8	アルミ熱処理	<ul style="list-style-type: none"> ・ボロン拡散炉 [VF-3000] (光洋サーモシステム製) 	400 30min	
9	レジストパターンニング	<ul style="list-style-type: none"> ・コーターデベロッパー [ACD-12802C-3H] (ジャパנקリエイト製) ・ステッパー [NSR-2205i11D] (ニコン製) 	Layer3	
10	Si エッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・Deep-RIE [MUC-21 ASE-Pegasus] (住友精密工業製) 	25 μm	

11	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> ・アッシャー [PC-1100] (samco 製) 		
12	BOX層エッチング	<ul style="list-style-type: none"> ・犠牲層エッチャー (memsstar 製) 	4 μm	

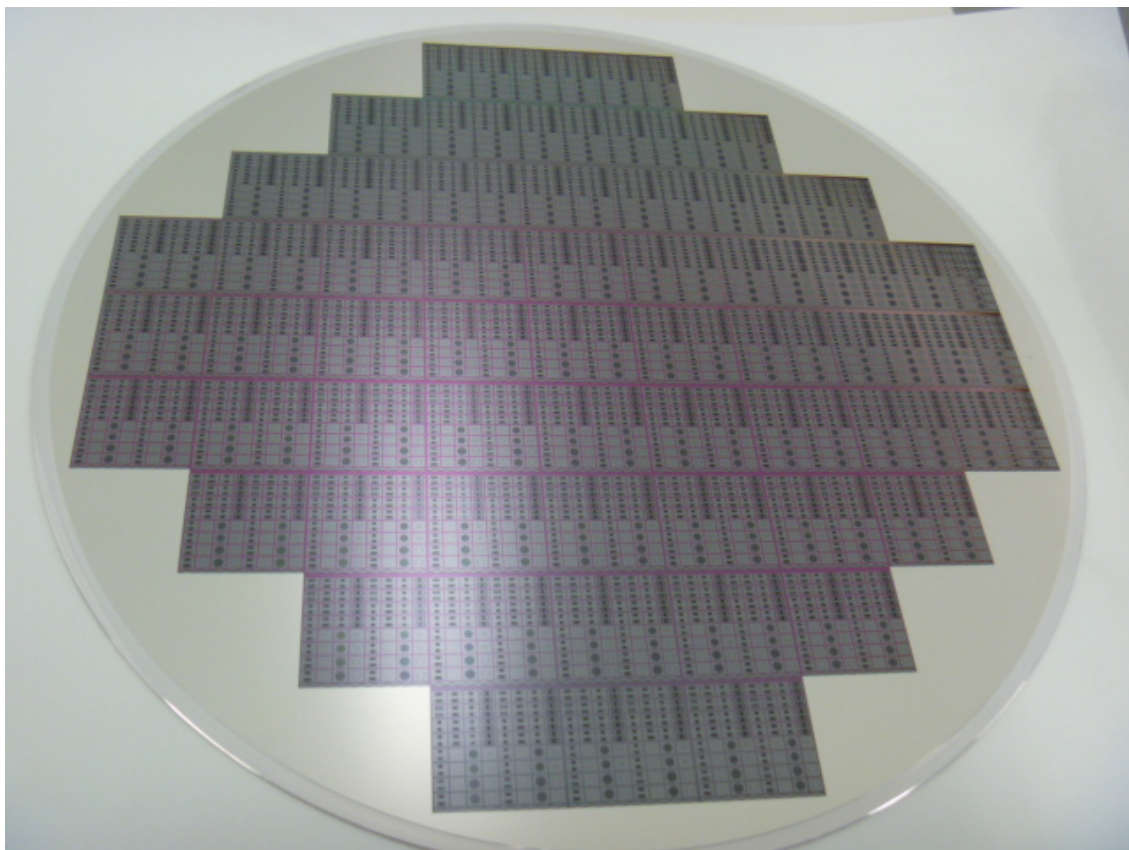
ステッパーによるショットマップを、図V.2.2.1(i) -1.5-1に示す。1ショットが20mm × 20mmのパターンを、200mm ウエハ上にパターンニングしている。ウエハ全体を9 × 9に区切り、190mmの円よりはみ出るショットは除外した(エッジカット5mm設定)。



図V.2.2.1(i) -1.5-1 ステッパーのショットマップ

(i) -2.1 処理条件の評価

まず、試作したウエハ全体の写真を、図V.2.2.1(i) -2.1-1に示す。1ショットが20mm×20mmのパターンを、面内に57ショット分作製した。1ショットの中には、加速度センサ TEG、ジャイロセンサ TEG、シリコン振動子 TEG が含まれている。



図V.2.2.1(i) -2.1-1 センサ TEG ウエハ全体写真 (BOX 層剥離前)

加工に用いた装置のレシピを、下記に示す。表V.2.2.1(i) -2.1-1、(i) -2.1-2は、ジャパントリエイト製のコーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト塗布レシピおよび現像レシピである。このレシピは、工程 1、5、9 の処理に用いた。処理時間は、レジスト塗布の場合、1枚あたり約5minほどで、現像処理の場合、1枚あたり約8minである。

表V.2.2.1(i) -2.1-1 コーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト塗布レシピ

COT-8inchi 1.0micron IP3650 5CP
SUB Recipe 1

Program STEP	回転 RPM	回転 時間sec	アーム 1 レジスト				アーム 2 リンス			バック リンス	表面 リンス	蓋	終了 モード
			モード	速度	液	流量 ml	モード	速度	液				
1	0	0.0	2	4	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
2	0	0.0	0	0	1	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
3	0	0.0	1	4	0	4.5	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
4	800	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
5	3000	5.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	続行
6	3000	8.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	ON	OFF	無	続行
7	0	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
8	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
9	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
10	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
11	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
12	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
13	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
14	0	3.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了
15	0	0.0	0	0	0	0.0	0	0	OFF	OFF	OFF	無	終了

塗布の量
加速時間
加速時間
持続時間

メイン レジセット名		1	
ローダー	処理1	処理2	処理3
BINCHI CST	レジスト	HP2	CP
	sec	sec	°C
	72	1	120
		レシビ	110
			60

アンローダー
8 INCHI CST

表V.2.2.1(i) -2.1-2 コーターデベロッパー[ACD-12802C-3H]のレジスト現像レシピ

DEV-8inchi-1micron-ip3650 5cp/NMD3
SUB Recipe 19

Program STEP	回転 RPM	回転 時間sec	アーム 1 現像液				アーム 2 リンス			バック リンス	カップ	終了 モード
			モード	速度	液		モード	速度	液			
1	500	4.0	0	0	0	2	4	OFF	OFF		下降	続行
2	500	20.0	0	0	0	7	0	ON	OFF		下降	続行
3	800	3.0	0	0	0	1	4	OFF	OFF		下降	続行
4	800	5.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
5	0	2.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
6	20	1.0	2	4	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
7	20	3.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
8	20	8.0	7	0	1	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
9	0	1.0	1	4	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
10	0	48.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
11	0	0.0	0	0	0	2	4	OFF	OFF		上昇	続行
12	600	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		上昇	続行
13	600	0.0	0	0	0	7	0	ON	OFF		上昇	続行
14	600	0.0	0	0	0	1	4	OFF	ON		上昇	続行
15	1800	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
16	1800	3.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	続行
17	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
18	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
19	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了
20	0	0.0	0	0	0	0	0	OFF	OFF		下降	終了

メイン レジセット名		9	
ローダー	処理1	処理2	処理3
BINCHI CST	HP2	CP	現像
	sec	°C	レシビ
	90	110	60
			195
			19
			60
			80
			60

アンローダー
8 INCHI CST

表V.2.2.1(i) -2.1-3 は、工程 2 及び 10 で用いた、住友精密工業製の Deep-RIE[MUC-21 ASE-Pegasus]の処理レシピの内容である。工程 2 はエッチング量 150nm、工程 10 はエッチング量が 25 μ m である。このレシピについては詳細に条件出しを行ったので、後に記述する。

表V.2.2.1(i) -2.1-3 Deep-RIE[MUC-21 ASE-Pegasus]の処理レシピ

工程 2

レシピ名: PPS-Align

	SF6 [sccm]	C4F8 [sccm]	RF [W]	LF [W]	Press. [Pa]	Time [sec]
エッチング1	400	0	1500	90	3	1.2
エッチング2	400	0	1500	20	3	0.4
パッシベーション	0	400	1500	0	6	1

Total	5	cycles
	13	sec

工程 10

レシピ名: PPS-L2-25um-2

	SF6 [sccm]	C4F8 [sccm]	RF [W]	LF [W]	Press. [Pa]	Time [sec]
エッチング1	400	0	1500	90	3	1.2
エッチング2	400	0	1500	20	3	0.4
パッシベーション	0	400	1500	0	6	1

Total	290	cycles
	754	sec

表V.2.2.1(i) -2.1-4 は、samco 製のアッシャー[PC-1100]を用いたときのアッシングレシピである。この処理は、工程 3、7、11 で用いた。一度に処理できる枚数は、最大で 4 枚である。このアッシャーは RIE モードと PE モードを切り替えることができ、それぞれでレートが異なる。表V.2.2.1(i) -2.1-4 の処理は RIE モードのときで、アッシングレートは 143nm/min である。PE モードの場合だと、同じ条件で 45.4nm/min のアッシングレートであった。PE モードは、イオンアタックを防ぐ処理になっており、静電ダメージが軽減されるが、その分レートも低くなる。

表V.2.2.1(i) -2.1-4 アッシャー[PC-1100]の処理レシピ

レシピ 1

O2 [sccm]	Press [Pa]	Power [W]	time [min]
50	6	500	15

表V.2.2.1(i) -2.1-5 は、ULVAC 製のスパッタ装置[SME-200E]でのアルミ製膜レシピである。アルミ膜厚は2 μ m で、1枚あたりの処理時間は約50minである。

表V.2.2.1(i) -2.1-5 アルミ製膜レシピ

レシピ名:P4Al-1k50m-2um-2

STEP	time [sec]	Ar [sccm]	シャッター	Power [W]
1	15	0	Close	0
2	10	70	Close	0
3	10	70	Close	1000
4	10	50	Close	1000
5	10	50	Open	1000
6	3000	50	Open	1000
7	10	0	Close	0

スパッタ時間

アルミの熱処理は、光洋サーモシステム製の拡散炉[VF-3000]にて実施し、処理レシピは表V.2.2.1(i) -2.1-6のとおりである。この処理レシピは、工程8にて使用した。今回使用した拡散炉は、一度に100枚のウエハを処理することができる。1回あたりの処理時間は、約80minほどであった。

表V.2.2.1(i) -2.1-6 アルミ熱処理レシピ

工程	step	time	動作
1	STANDBY		
2	ALOG	9m40s	カセット→ポート
3	BLOAD	9m	ポート→炉
4	BRCV	10m	N2=3LSM、400°C
5	WAIT	30m	N2=3LSM、400°C
6	BULD	9m	炉→ポート
7	ALDCG	9m40s	ポート→カセット
8	END		

(i) -2.1.1 露光条件評価

今回試作する各センサ TEG は、ステッパーにて露光を行う。その為、ステッパーの露光条件を最適化する必要がある。今回使用するレジストは、THMR iP3650HP（東京応化製）とした。膜厚は $1\mu\text{m}$ とし、そのときの露光条件を求めた。

図 V.2.2.1(i) -2.1.1-1 のようなパターンを、ウエハ全面にステッパーを用いてパターンニングした。これは、ドットパターンと Line and Space が、 $0.3\mu\text{m}$ から $1\mu\text{m}$ まで描かれたパターンで、写真の数値が、その寸法を示している。今回使用したステッパーは $0.35\mu\text{m}$ の分解能を有する装置であるため、評価寸法は $0.35\mu\text{m}$ 、 $0.5\mu\text{m}$ 、 $1\mu\text{m}$ の 3 条件にて評価を行った。

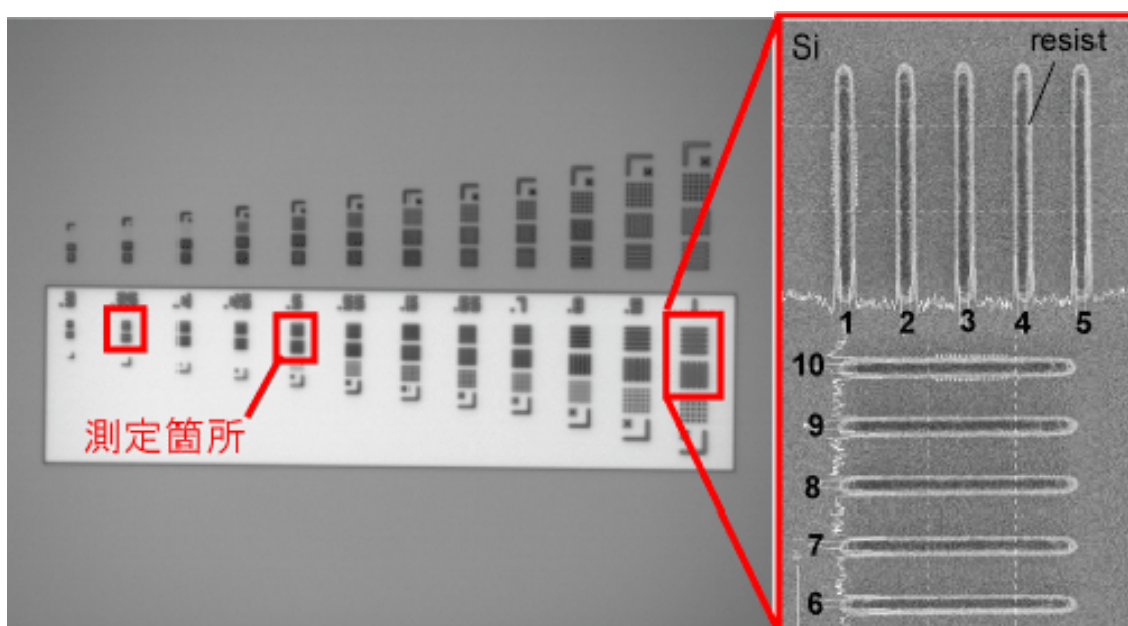
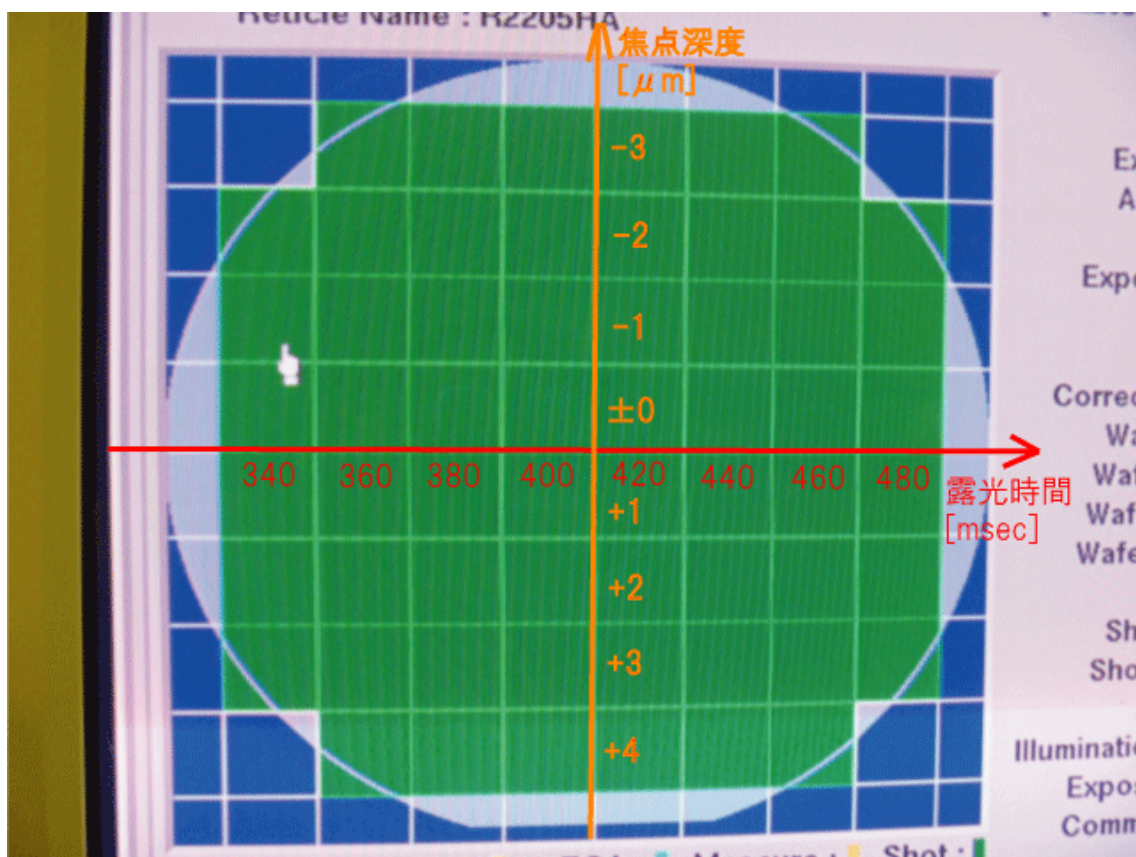


図 V.2.2.1(i) -2.1.1-1 露光条件評価用パターン

ステッパーの設定で、ウエハ面内で露光時間を振って露光し、設計寸法に最も近い露光時間を求め、最適値とした。露光時間は、 400msec を基準に、 20msec 刻みで振った。具体的なショットマップは、図 V.2.2.1(i) -2.1.1-2 のようにした。



図V.2.2.1(i) -2.1.1-2 露光条件評価用ショットマップ

露光条件を振ってみた結果を、図V.2.2.1(i) -2.1.1-3に示す。横軸が露光時間で、縦軸がパターン線幅である。パターン線幅は、 $0.35\ \mu\text{m}$ 、 $0.5\ \mu\text{m}$ 、 $1.0\ \mu\text{m}$ の線幅に対し、実際にパターンニングされた寸法を測長SEMにて測定した値を示している。測定値は $n=10$ として、その平均値と分散値を求めた。この結果、実寸法に最も近い露光時間を最適条件とし、試作の条件とする。今回の結果から、その最適条件は 460msec とした。このときの分散値は、 $5\sim 15\text{nm}$ 程度であった。

ステップ露光時間とパターン線幅 (Step=20msec)

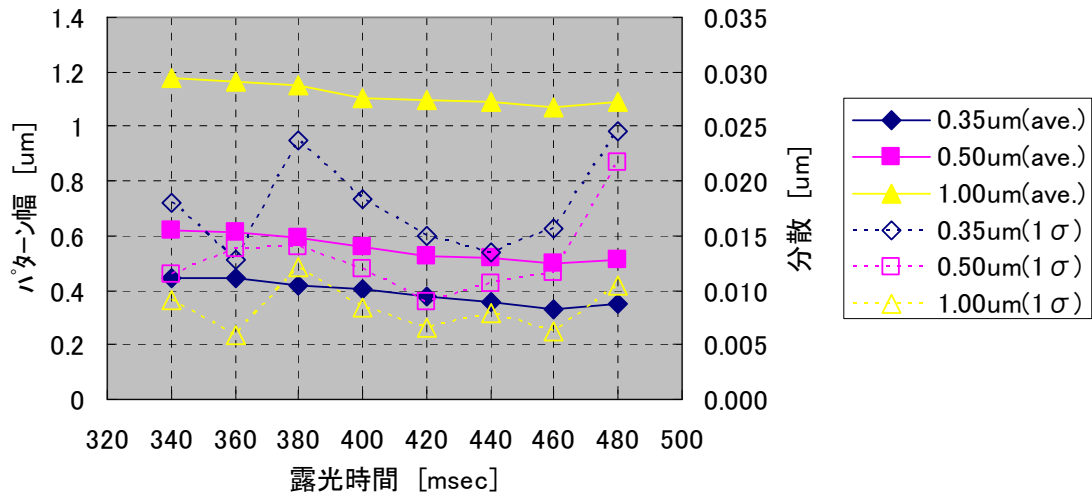


図 V.2.2.1(i) -2.1.1-3 露光時間とパターン線幅

(i) -2.1.2 Deep-RIE 加工条件評価

センサ TEG の試作に関して、最重要装置である Deep-RIE の条件出しを事前に実施した。狙いとする条件は、活性層 $25\mu\text{m}$ の SOI ウエハのエッチングでの形状重視のエッチングとし、テーパ角度、スキヤロップ、ノッチングなどができるだけ少ない条件を見出す。テーパ角度、スキヤロップ、ノッチングの定義については図 V.2.2.1(i) -2.1.2-1 に示す。テーパ角度はエッチング溝の Top と Bottom より算出し、算出式は下記のようにした。

$$\theta = \tan^{-1}\left(\frac{2D}{X-Y}\right) \times \frac{180}{\pi}$$

ノッチングは溝底面部分のスキヤロップからのえぐれ寸法とした。

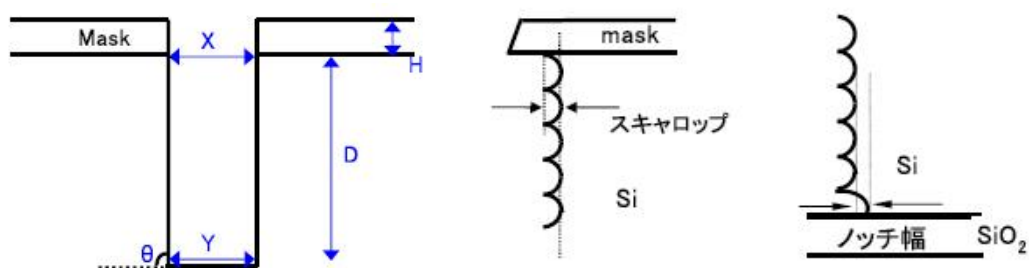


図 V.2.2.1(i) -2.1.2-1 テーパ角度、スキヤロップ、ノッチの定義

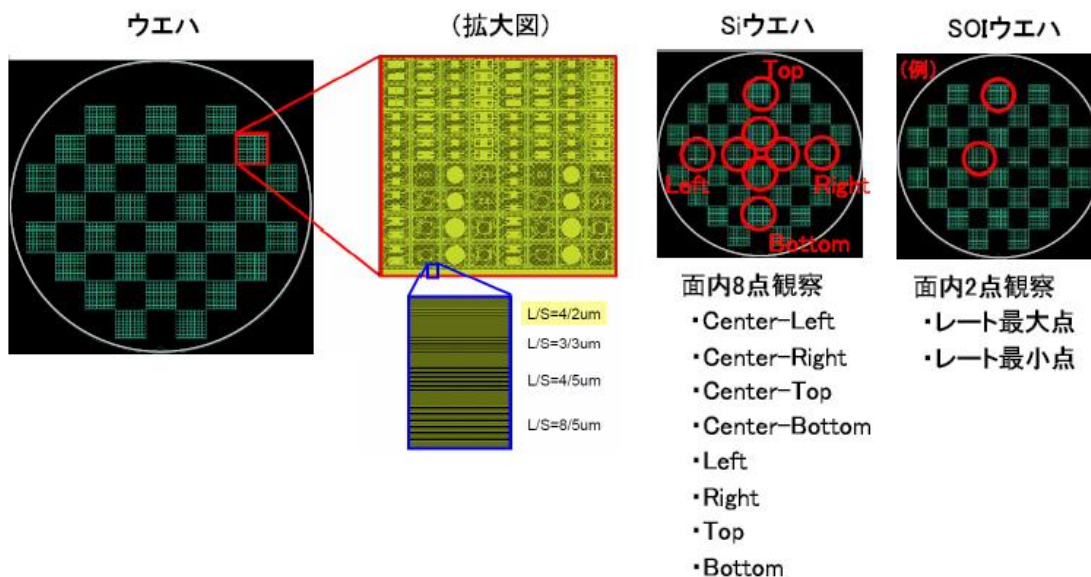


図 V.2.2.1(i) -2.1.2-2 ウエハ面内測定箇所

用意したサンプルは、8 インチの Si ウエハと SOI ウエハの 2 種類。どちらもレジスト 1 μm を塗布し、パターニングしたサンプルとした。パターンは、センサの実パターンと Line and Space が混合したものとなっている。この Line and Space の寸法は、作製するセンサ TEG の静電アクチュエータ部分と同じ寸法としている。

	Center-Left	Center-Right	Center-Top	Center-Bottom
断面SEM 全体 ($\times 3k$)				
断面SEM 上部 ($\times 25k$)				
断面SEM 下部 ($\times 25k$)				
エッチング深さ	24.1 μm	24.3 μm	24.0 μm	24.5 μm

	Left	Right	Top	Bottom
断面SEM 全体 ($\times 3k$)				
断面SEM 上部 ($\times 25k$)				
断面SEM 下部 ($\times 25k$)				
エッチング深さ	24.3 μm	24.3 μm	24.3 μm	24.7 μm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-3 エッチングレート測定結果 (L/S 部分)

条件出しのウエハ面内測定箇所を図 V.2.2.1(i) -2.1.2-2 に示す。まずは Si ウエハにてウエハ面内のエッチングレートの分布を測定し、エッチングレートが最も高いところと低いところを割り出した。面内の測定箇所は 8 箇所 (Center-Left, Center-Right, Center-Top, Center-Bottom, Left, Right, Top, Bottom) とし、断面形状観察は、Line and Space の

Line=4 μm、Space=2 μm の部分と、実パターンの最大開口箇所 (30 μm 開口) とした。エッチングレート算出のために行った処理時間は 10min とした。

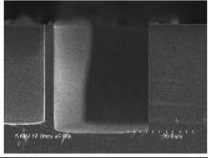
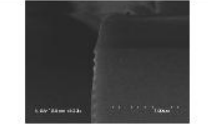
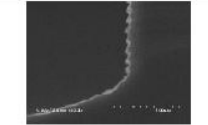
実パターン(Center-Top)	
断面SEM 全体 (×3k)	
断面SEM 上部 (×50k)	
断面SEM 下部 (×50k)	
エッチング深さ	29.3 μm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-4 エッチングレート測定結果 (30um 開口部分)

Si ウエハを用いたエッチングレート測定結果を図 V.2.2.1(i) -2.1.2-3 と図 V.2.2.1(i) -2.1.2-4 に示す。Line and Space のエッチングレートは $2.43 \mu\text{m}/\text{min} \pm 1.4\%$ となり、エッチングレートが一番低いところに合わせるよう $25 \mu\text{m}$ のエッチングに必要な時間 (Just time) を算出した。このとき、実パターン (30 μm 開口部分) のエッチングレートは $2.93 \mu\text{m}/\text{min}$ であり、Line and Space の $2 \mu\text{m}$ 開口部分とは約 20% の差が生じた。これより、実パターンエッチングにおいては、 $2 \mu\text{m}$ のエッチングを狙った条件においては、最低でも Just time+20% のエッチングが必要であると分かる。

算出した Just time (10min47sec) を基準とし、SOI ウエハを Just time、Just time+15%、Just time+30%、Just time+50% のエッチングを行った。面内の観察箇所は、エッチングレート最大点と最小点の 2 箇所とした。断面形状観察は、エッチングレート算出のときと同様、Line and Space の Line=4 μm、Space=2 μm の部分と、実パターンの最大開口箇所 (30 μm 開口) とした。

SOI ウエハをエッチングした結果を、図 V.2.2.1(i) -2.1.2-5 から図 V.2.2.1(i) -2.1.2-8 に示す。スキヤロップの大きさについては、Just time から Just time+50% にかけて変化は無い。これは同じレシピを用いているため、当然の結果といえる。このときの Line and Space 部分のノッチングの大きさは、Just time から Just time+50% とオーバーエッチングを実施したにもかかわらず、30~80nm 程度となり増加傾向は見られない。実パターン (30 μm 開口部分) については、ノッチング量はゼロであった。これは、開口が大きいほど側壁の保護膜が生成されやすいためと推測される。そのため、テーパ角度もオーバーエッチング時間に寄らず、Line and Space 部分では 89.8 度、実パターン部分においては 90.0 度と一定であった。

この条件出しの結果より、最先端 8 インチライン試作における Deep-RIE の処理条件は Just time+30% (13min22sec) とする。

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.17 μm	2.17 μm	29.77 μm
Bottom幅	2.03 μm	1.98 μm	29.77 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	79nm	75nm	0nm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-5 Just time 処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.18 μm	2.21 μm	29.77 μm
Bottom幅	2.03 μm	2.01 μm	29.77 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	44nm	52nm	0nm

図 V.2.2.1(i) -2.1.2-6 Just +15%処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.20 μm	2.20 μm	29.87 μm
Bottom幅	2.01 μm	1.99 μm	29.87 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	67nm	52nm	0nm

図V.2.2.1(i) -2.1.2-7 Just +30%処理時の SOI 断面 SEM 写真

	Bottom	Center-Top	実パターン(Center-Top)
断面SEM 全体(×3k)			
断面SEM 上部(×25k) (×50k)			
断面SEM 下部(×25k) (×50k)			
Top幅	2.22 μm	2.22 μm	29.96 μm
Bottom幅	2.08 μm	2.00 μm	29.96 μm
テーパ角度	89.8°	89.8°	90.0°
スキヤロップ	28nm	28nm	32nm
ノッチング	32nm	40nm	0nm

図V.2.2.1(i) -2.1.2-8 Just +50%処理時の SOI 断面 SEM 写真

(i) -2.2 加速度センサ TEG の評価

加速度センサ TEG を試作した結果を、図 V.2.2.1(i) -2.2-1 に示す。これは光学顕微鏡で撮影した写真で、設計通りの形状になっていることがわかる。次に、静電容量、共振周波数、 Q 値を測定した。共振周波数と Q 値測定時の出力波形を図 V.2.2.1(i) -2.2-2 に示す。デバイスにインパルス波形を入力し、そのときの出力電圧を取得したものである。矩形波にオーバーシュートが見られるが、これは可動電極が振動したときの慣性力により生じる応答で、この波形が減衰していく様子から共振周波数と Q 値を算出している。

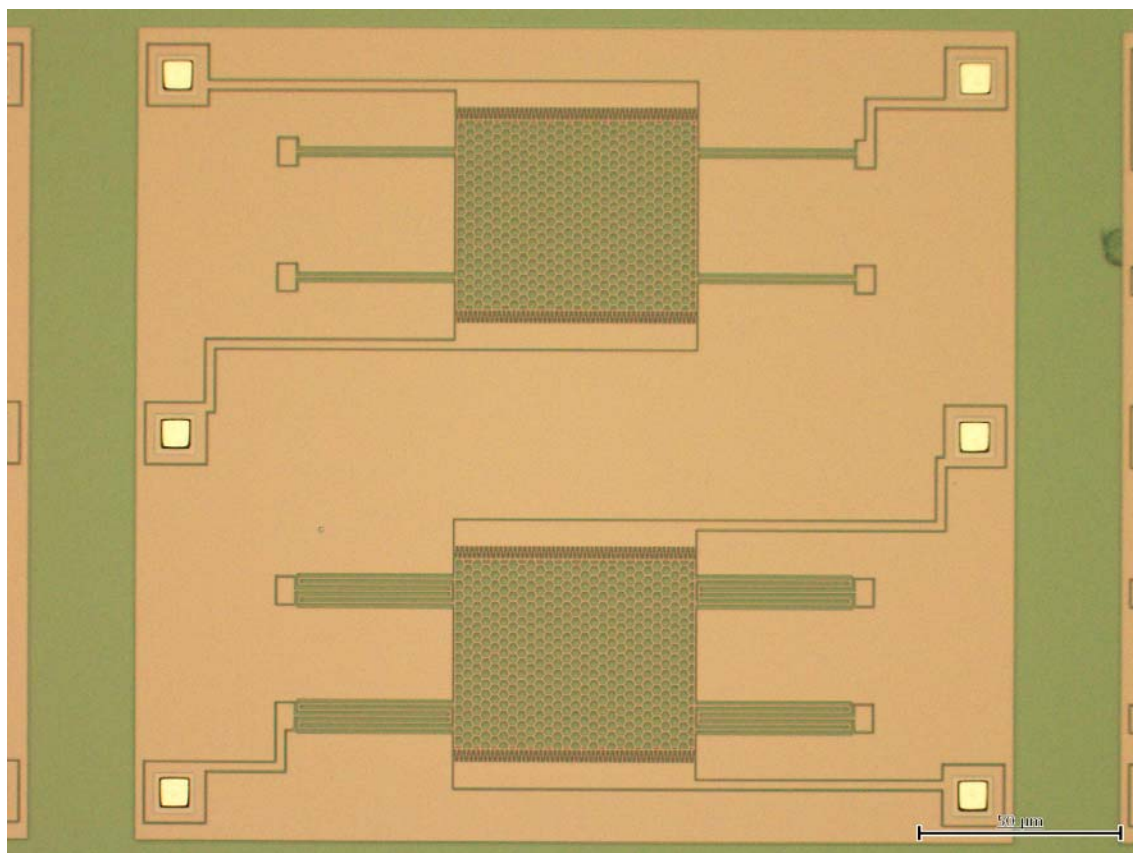


図 V.2.2.1(i) -2.2-1 加速度センサ TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

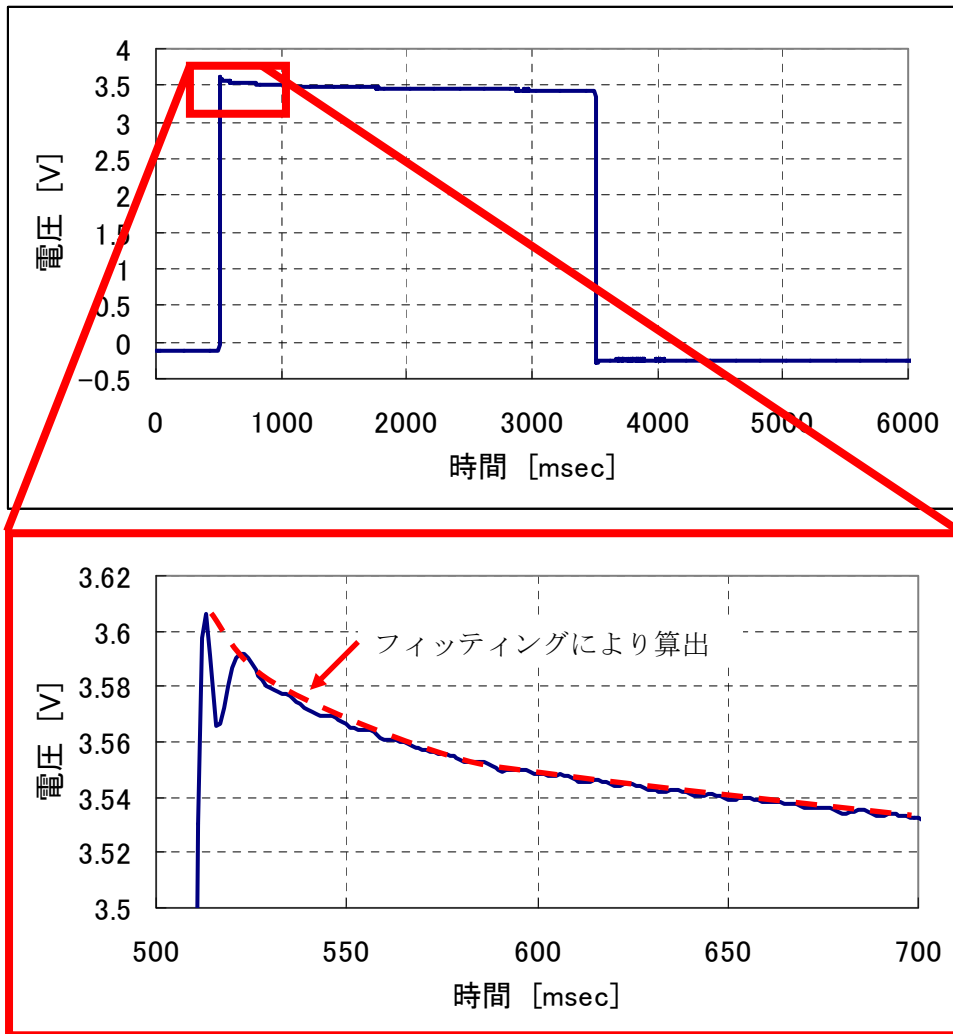


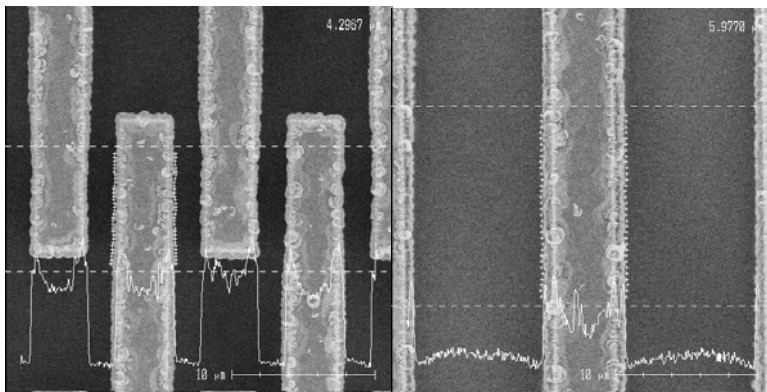
図 V.2.2.1(i) -2.2-2 共振周波数と Q 値測定時の出力波形

デバイスの性能に大きく影響する寸法を、設計値と測長 SEM の測定結果を比較したものが表 V.2.2.1(i) -2.2-1 であり、そのときに撮影した SEM 画像を図 V.2.2.1(i) -2.2-3 に示す。静電容量については、設計値より小さめの値が計測されたが、共振周波数にその傾向は見られなかったため、この測定結果が確からしいかどうかの議論の余地があると考えられる。Q 値についても、今回は大気中での測定であるため、今回設計した周波数だと数十という値に落ち着くと予想していたため、157 という値については疑問が残る。

寸法を比較した箇所は、櫛歯アクチュエータの寸法、ギャップ、バネの幅である。測定結果が設計値より大きな寸法となっているが、これは加工面が荒れているためである。荒れの原因としては、レジスト/シリコンの選択比が悪く、レジストパターンがもたなかったことが挙げられる。あとはアルミ熱処理時に、表面に残っていた残渣成分が荒れの原因として考えられる。

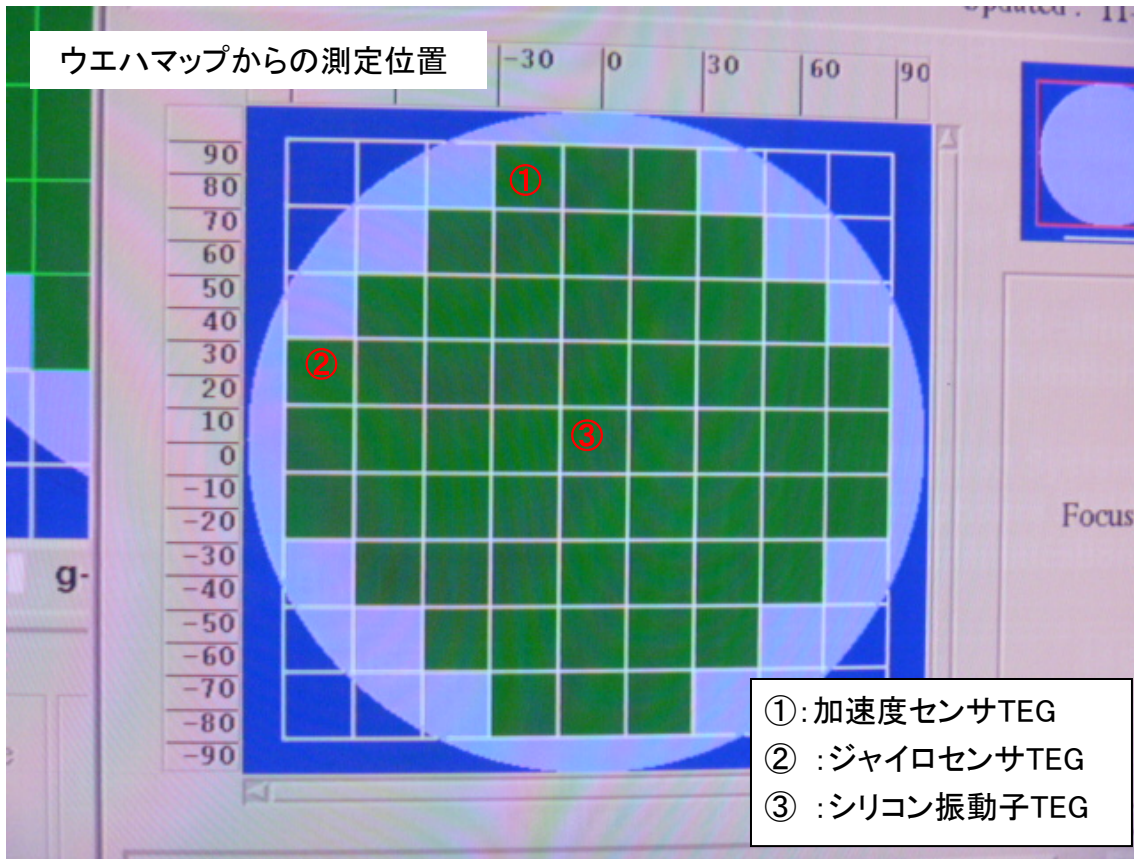
表V.2.2.1(i) -2.2-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (加速度センサ TEG)

	静電容量 [fF]	共振周波数 [kHz]	Q 値	櫛歯 (Line) [μm]	櫛歯 (Space) [μm]	バネ [μm]
設計値 A	126	8.0	-	4.00	2.00	5.00
測定値 A	86	6.8	157	4.30	1.69	5.98
設計値 B	126	5.5	-	4.00	2.00	5.00
測定値 B	108	6.4	51	4.30	1.69	5.98



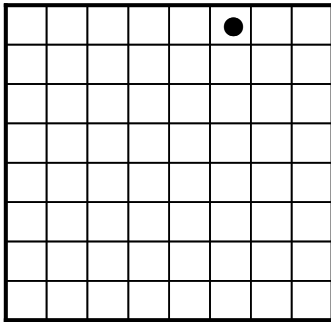
図V.2.2.1(i) -2.2-3 櫛歯アクチュエータ (左) とバネ (右) の SEM 写真

試作したウエハにおける測定箇所を図V.2.2.1(i) -2.2-4 に示す。このウエハ内には 3 種類のセンサ TEG が作製できている。1 ショットは 8×8 チップからなり、1 ショット内の測定箇所については、図V.2.2.1(i) -2.2-5 に示す。①は加速度センサ TEG、②はジャイロセンサ TEG、③はシリコン振動子の配置を示している。

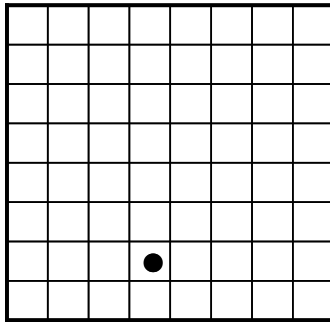


図V.2.2.1(i) -2.2-4 測定箇所 (ウエハ内)

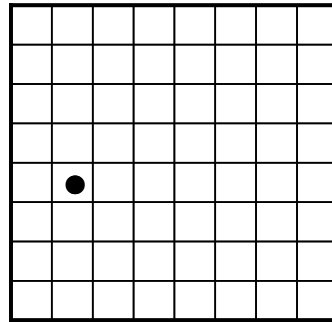
① 加速度センサ



② ジャイロセンサ



③ シリコン振動子



図V.2.2.1(i) -2.2-5 測定箇所 (1ショット内)

(i) -2.3 ジャイロセンサ TEG の評価

8 インチラインで試作したジャイロセンサ TEG の光学顕微鏡写真を、図 V.2.2.1(i) -2.3-1 に示す。外観は設計図どおりにできていることが確認できた。

設計値と寸法測定の結果を、表 V.2.2.1(i) -2.3-1 に示す。測定箇所は、楕歯アクチュエータの寸法、ギャップ、バネの幅、リングの幅とした。寸法は設計値に近いものができるものの、共振周波数の値が設計よりかなり大きな値が測定された。これは、Q 値が低すぎて正しく測定できなかつたためである。Q 値の下限は 0.5 で、これ以上 Q 値の小さいデバイスは計測が非常に困難であることがわかった。設計時に Q 値を算出することは難しいが、今回の設計を参考にすることで、より良いデバイスの設計する指標になると思われる。図 V.2.2.1(i) -2.3-2 に測長時の SEM 画像を示すが、表面や断面が荒れていることが確認できる。

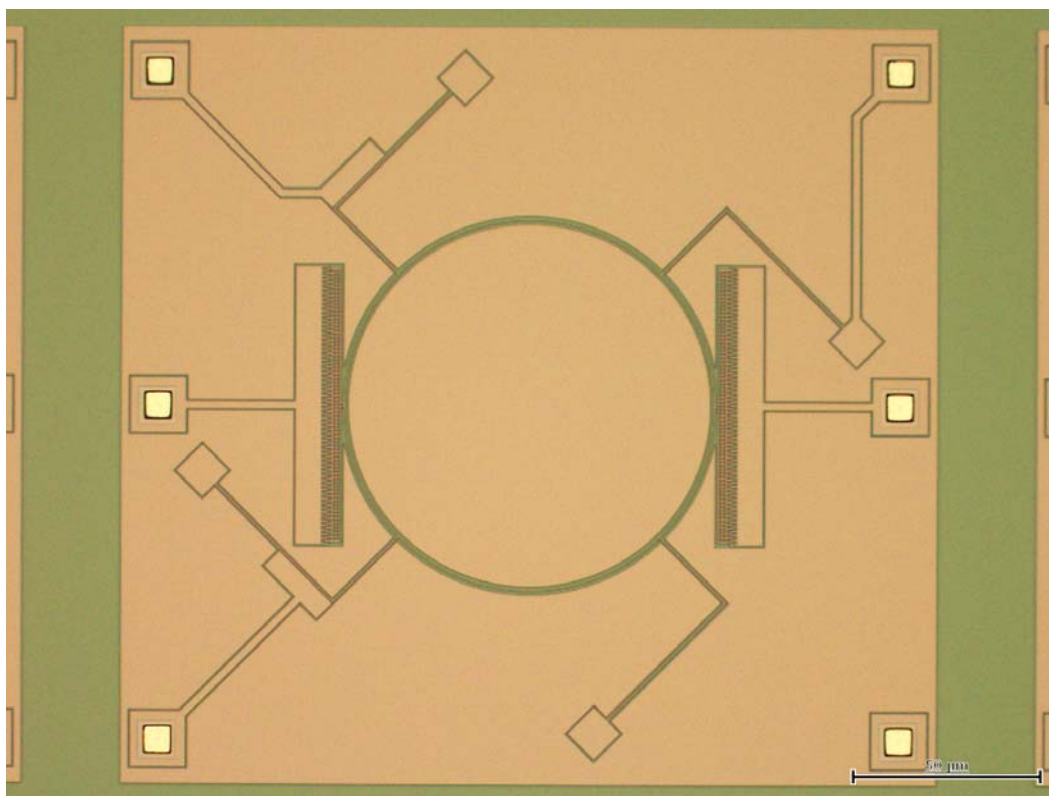
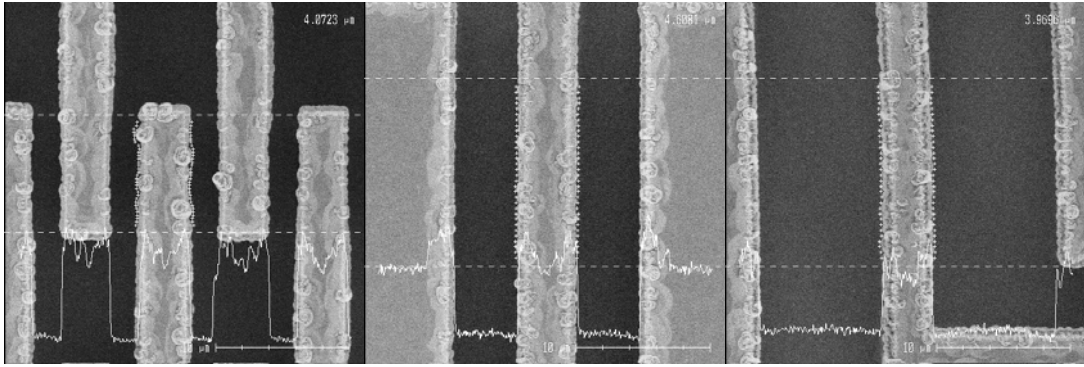


図 V.2.2.1(i) -2.3-1 ジャイロセンサ TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

表 V.2.2.1(i) -2.3-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (ジャイロセンサ TEG)

	静電容量 [fF]	共振周波数 [kHz]	Q 値	楕歯 (Line) [μm]	楕歯 (Space) [μm]	バネ [μm]	リング [μm]
設計値	77	4.6	-	4	2	4	3
測定値	51	15.5	0.5	4.07	1.86	4.60	3.97



図V.2.2.1(i) -2.3-2 櫛歯アクチュエータ (左)、バネ (中央)、リング (右) の SEM 写真

(i) -2.4 シリコン振動子 TEG の評価

試作したシリコン振動子 TEG の光学顕微鏡写真を、図 V.2.2.1(i) -2.4-1 に示す。チップ中央に長さが異なる 8 種類の振動子が作製できていることが確認できた。測長 SEM では、カンチレバーの幅 1 箇所と長さ 8 箇所を測定し、その結果を表 V.2.2.1(i) -2.4-1 にまとめた。カンチレバー 8 種類の、長さが短いもの (30 μm) から順に A,B とナンバリングした。測定結果は、カンチレバーの幅は設計値より少し大きい結果となっているが、長さはほぼ設計どおりの寸法となっていた。測定時の SEM 写真を図 V.2.2.1(i) -2.4-2 に示す。加速度センサ TEG、ジャイロセンサ TEG に比べると表面の荒れが少ないように見える。

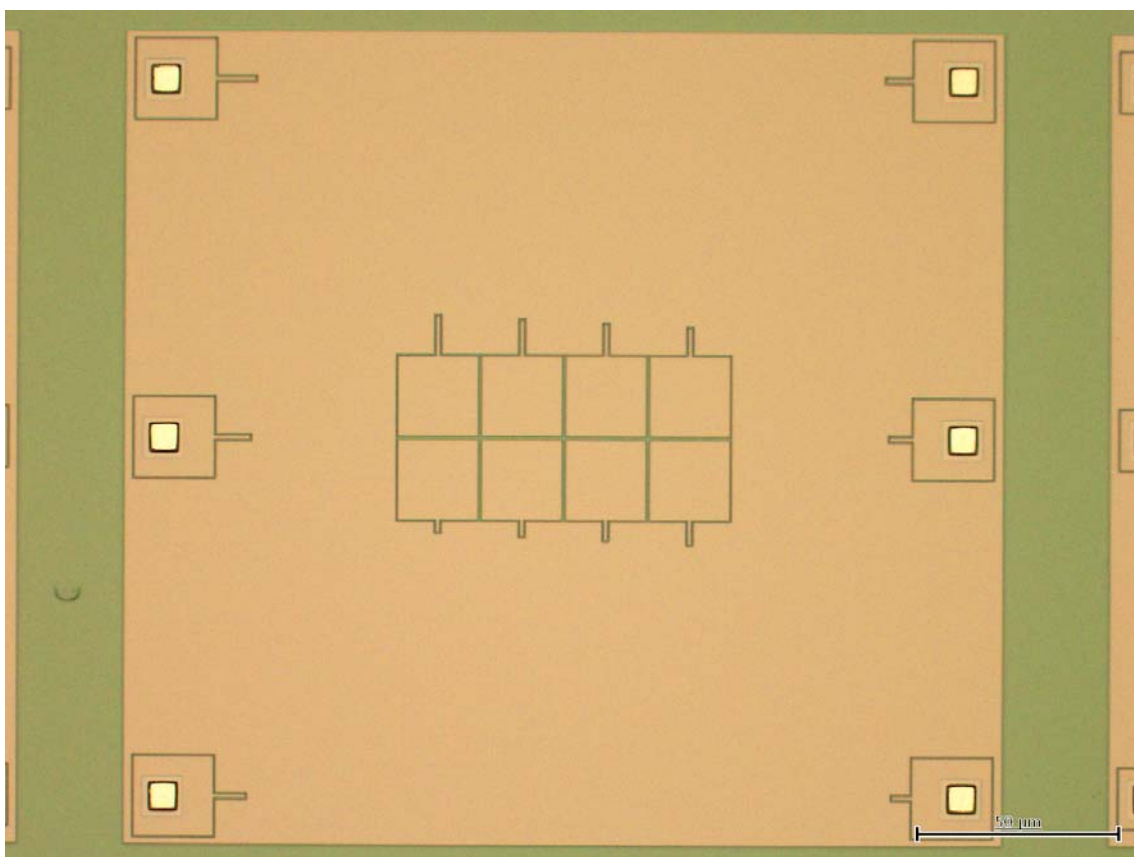
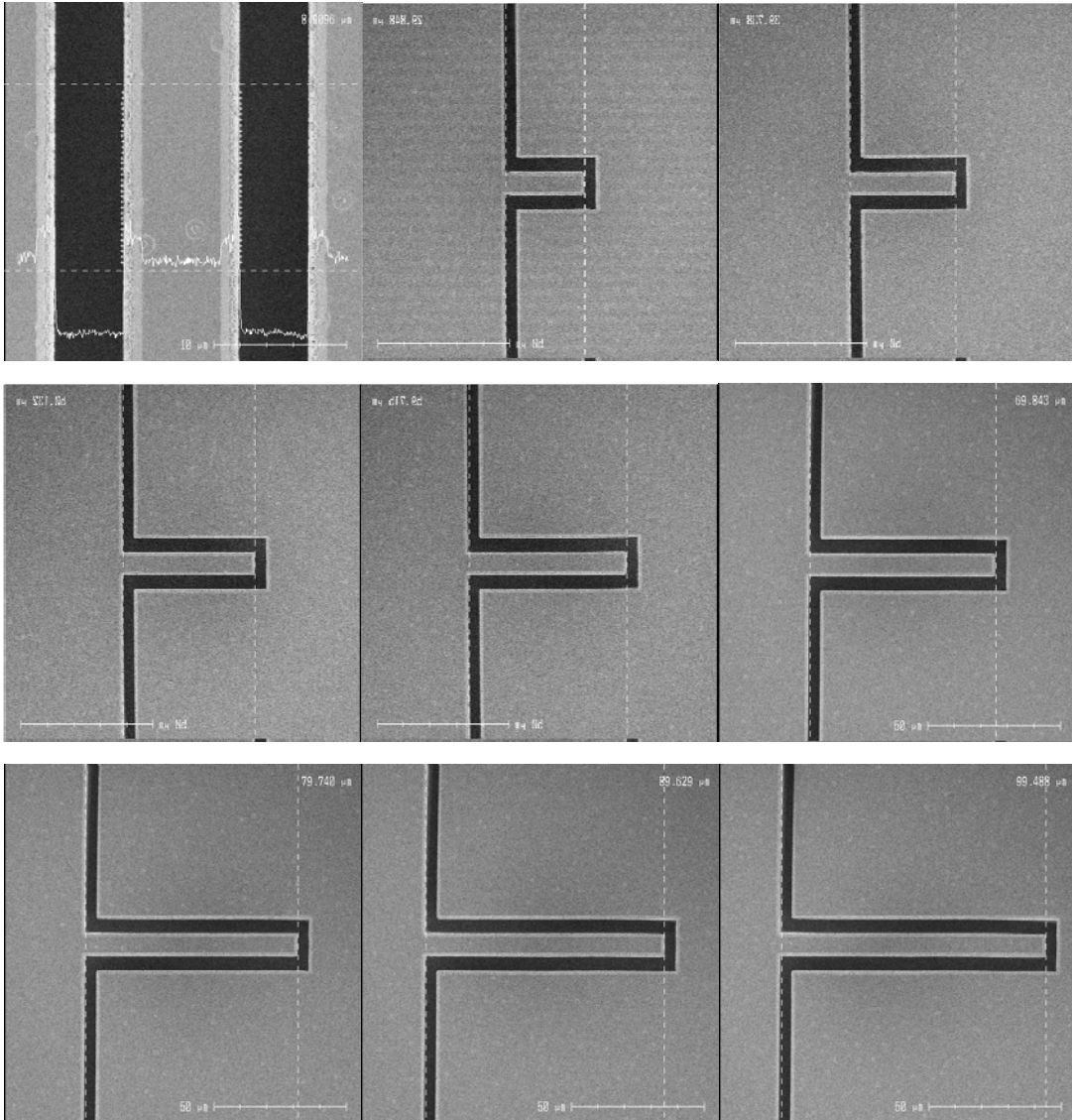


図 V.2.2.1(i) -2.4-1 シリコン振動子 TEG の光学顕微鏡写真 (BOX 層剥離前)

表 V.2.2.1(i) -2.4-1 設計値と測長 SEM の測定結果 (シリコン振動子 TEG)

	幅 [μm]	A [μm]	B [μm]	C [μm]	D [μm]	E [μm]	F [μm]	G [μm]	H [μm]
設計値	8	30	40	50	60	70	80	90	100
測定値	8.91	29.85	39.74	50.13	59.72	69.84	79.74	89.63	99.49



図V.2.2.1(i) -2.4-2 バネの幅 (左上) と各カンチレバーの SEM 写真

設計値と測定値から共振周波数のグラフを描いたものが図V.2.2.1(i) -2.4-3になる。設計値と測定値がよく一致しており、設計どおりのシリコン振動子が作製できたといえる。

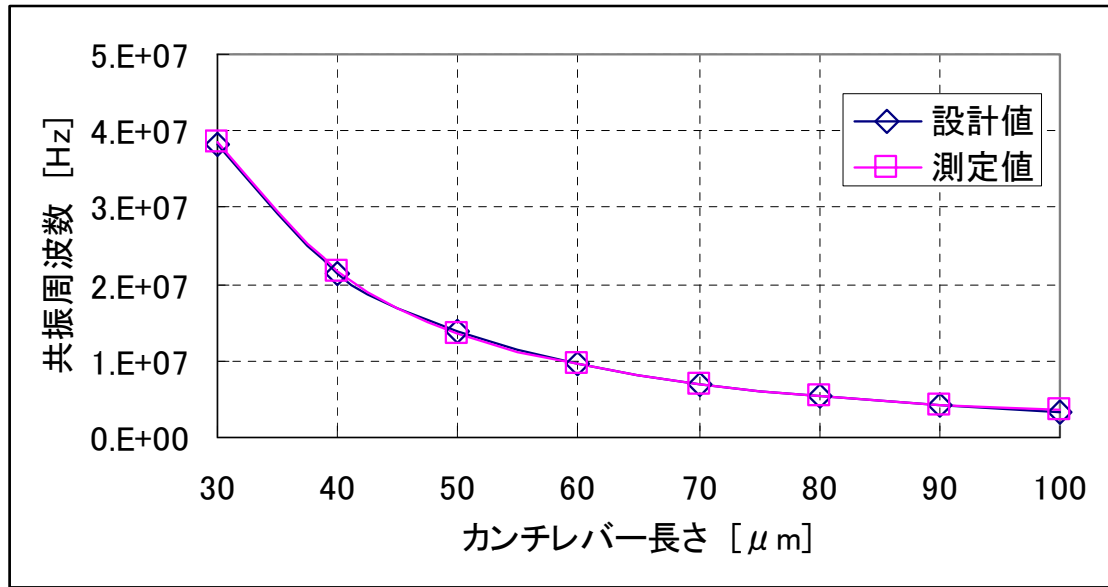


図 V.2.2.1(i) -2.4-3 カンチレバー長さ と共振周波数の関係 (設計値と測定値の比較)

(i) -3 まとめ

8 インチラインで試作するためのセンサ TEG (加速度センサ、ジャイロセンサ、シリコン振動子) を設計した。設計指標は、一般的な加速度センサ、ジャイロセンサ、シリコン振動子を参考にして決定した。

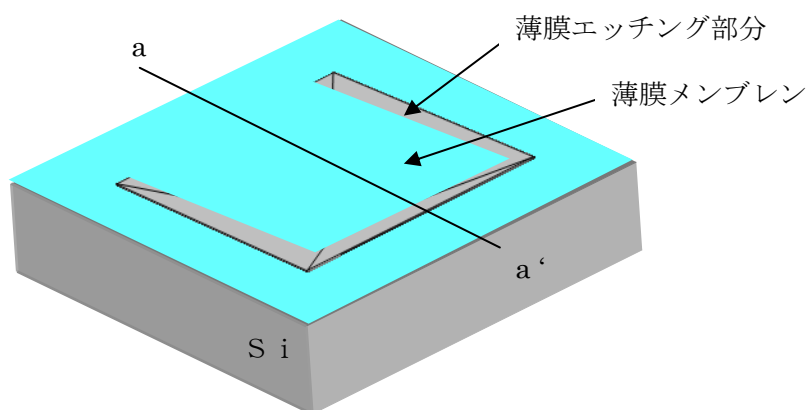
8 インチラインを用いて、センサ TEG を作製した。加速度センサは、動作確認はできたものの、その測定値については議論の余地がある。今回作製したデバイスだと、測定時のフィッティングの再現性を評価する必要がある。測定原理上、Q 値が高いデバイスほど測定の高確度が高くなるので、共振周波数をもう少し上げる設計にするか、真空中での測定を実施する必要があると考えられる。また、デバイスの歩留まりや完成度は高いとはいえないので、プロセスの改善を実施していく必要もある。ジャイロセンサは、動作確認時において、Q 値が低すぎたために正しく測定できていない。これは設計段階で Q 値を見積もることができないため、測定器のレンジを外れた設計になってしまった為である。ただし、外観から判断すると、加速度センサと同等の出来栄であると予想できる。シリコン振動子は、上記 2 つのセンサと比較すると外観も良く、測定結果も設計値に近い値であった。

今回の試作では 3 種類のセンサ TEG を試作し各装置で様々なレシピを作成したが、今後はそのレシピを元により良い条件を見出していく必要がある。

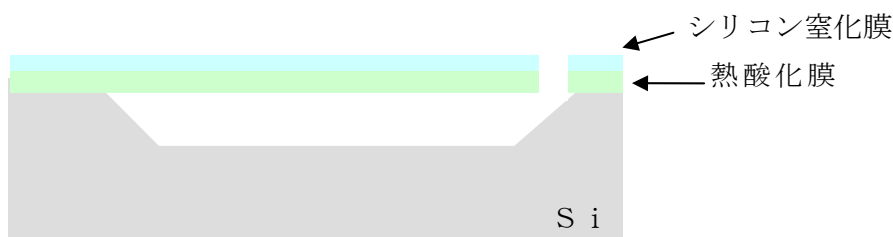
(ii) 薄膜メンブレンTEGの設計・試作

()-1 薄膜メンブレンTEG設計試作の概要

今回設計・試作する薄膜メンブレンTEGは、図V.2.2.1-1-1、図V.2.2.1-1-2 に示すように、シリコン基板上に形成した、薄膜メンブレンの片持ちの構造体TEGであり、構造としてはシリコン基板上に熱酸化膜、シリコン窒化膜の薄膜が成膜してあり、その薄膜をエッチング除去した部分からシリコンの異方性エッチングを行い、シリコンのキャビティ構造を形成したものである。



図V.2.2.1-1-1 薄膜メンブレンTEG概念斜視図

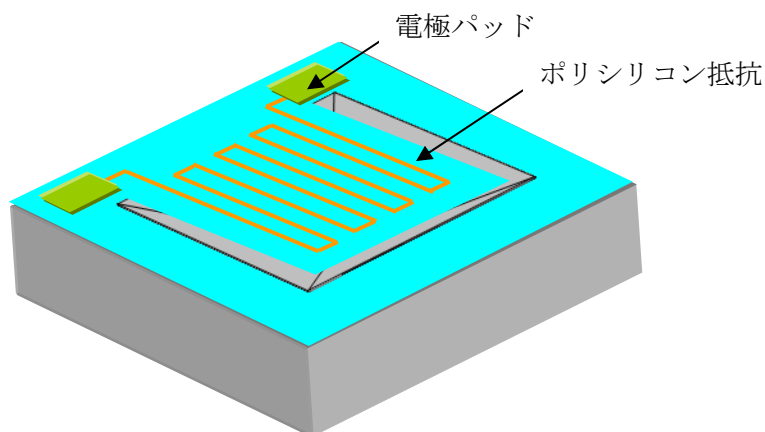


図V.2.2.1-1-2 薄膜メンブレンTEG a-a'断面概略図

この薄膜メンブレンTEGの応用展開としては、圧力センサ、フローセンサ、温度センサ等に展開可能であり、センサとして機能させる例として、図V.2.2.1-1-3にあるように、薄膜メンブレン上にポリシリコンで形成した抵抗配線を形成し、薄膜メンブレンの変位を、抵抗変化の電気信号として検出する方法がある。

そうしたセンサとして機能する上で、薄膜メンブレンTEGの出来栄がセンサ特性に大

大きく影響を及ぼす。その為、今回のTEG設計・試作は、重要となるシリコン基板上への薄膜メンブレン構造の形成を主として取り組むものである。



図V.2.2.1-1-3 センサとしての検出方法例

今回の設計・試作の取り組みのポイントとして、片持ちの薄膜メンブレンTEGの反りをコントロールする為の、二層薄膜の応力制御である。今回用いる薄膜は、半導体製造で一般的に用いられる熱酸化膜と、保護膜として用いられるシリコン窒化膜を用いる。その為、熱酸化膜の圧縮応力と、シリコン窒化膜の引っ張り応力の、二層の膜の応力コントロールを行い、薄膜メンブレンTEGの反りをいかに制御するかが、試作の重要なポイントである。その手段としてシリコン窒化膜の低応力化や、薄膜メンブレンTEGの膜構成の最適化について取り組んだ結果について報告するものである。又、TEG試作で用いたラインの特性評価も実施したので合わせて報告する。今回の報告の項目を下記に示す。

- ・ ()-2 薄膜メンブレンTEGのマスク設計
- ・ ()-3 プロセスフロー
- ・ ()-4 ラインの特性評価結果
- ・ ()-5 シリコン窒化膜の低応力化検討結果
- ・ ()-6 薄膜メンブレンTEGの最適化検討
- ・ ()-7 まとめ

()-2 薄膜メンブレンTEGのマスク設計

薄膜メンブレンTEG上に形成したポリシリコンの検出抵抗の目標値を 24K、12K、4K に設定した。また、ポリシリコン配線のデザインルールを以下の通り設定した。

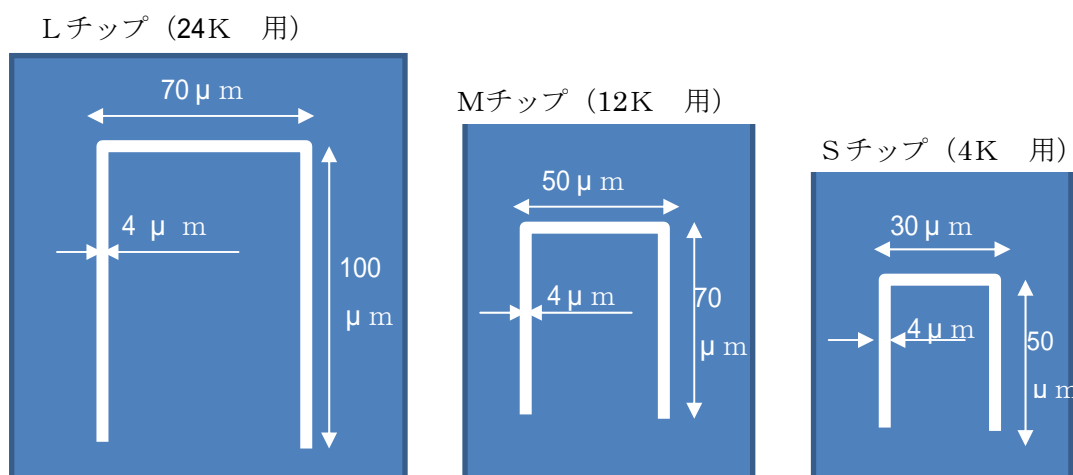
- ポリシリコンのシート抵抗：30 /

- ポリシリコンの配線幅：2 μm
- ポリシリコンの配線間隔：2 μm

図V.2.2.1-1-3に示すポリシリコン配線の配置を仮定すると、目標の抵抗値を実現する為に以下の薄膜メンブレンTEG面積が必要である。

- 24K 用のLチップ：70 μm ×100 μm
- 12K 用のMチップ：50 μm ×70 μm
- 4K 用のSチップ：30 μm ×50 μm

エッチングのスリット幅は、全てのチップ4 μm 、薄膜メンブレンTEGの端からポリシリコンまでの間隔は、2 μm として、図V.2.2.1-2-1に示す3種類のチップを設計した。



図V.2.2.1-2-1 チップの基本設計

作製するチップは、図V.2.2.1-2-2にある、L、M、Sの基本設計3種類のチップに3種類のコーナー部の形状を変えた、9種類のチップをレイアウトした。

1ショットのレチクルデータは、図V.2.2.1-2-3にあるような配置にして、その一部分に、膜厚評価、エッチング終点判定等の工程評価用のTEGを配置している。

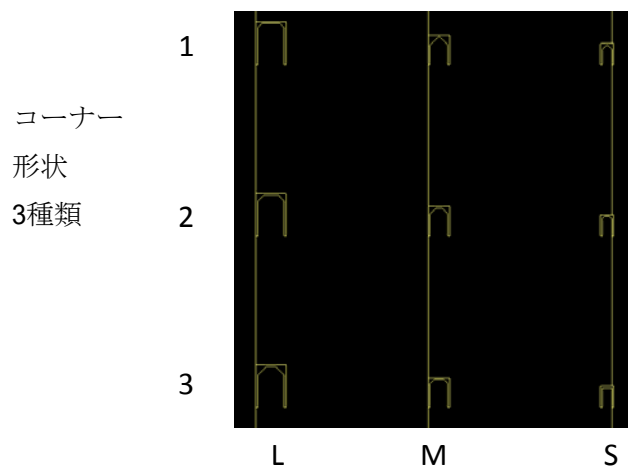


図 V.2.2.1-2-2 作製チップ内容

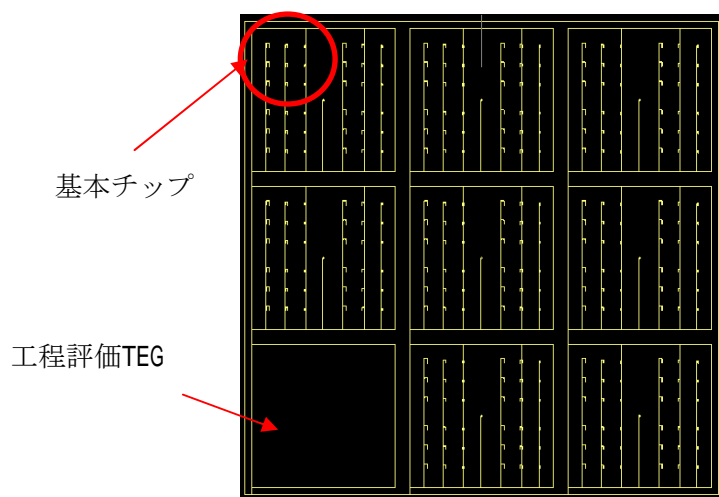


図 V.2.2.1-2-3 レチクルデータ

()-3 プロセスフロー

今回試作する薄膜メンブレンTEGの作製プロセスフローについて説明する。表 .2.2.1-3-1は、薄膜メンブレンTEGのプロセスフローである。

工程1でウェハの表面洗浄を枚葉式のウェハ洗浄装置でSC1洗浄を行い、工程2で酸化炉を用いて、熱酸化膜を成膜する。その時の条件は、パイロ酸化で、温度1100℃、時間50分で、5000程度の熱酸化膜を形成する。工程3では、その膜の上にLPCVD-SiN装

置によってシリコン窒化膜を形成する。条件は、温度 780℃、時間 30 分であり、1000 程度の成膜を行う。工程 4 では、エッチングを行う部分を除去する為のレジストパターニングを行う。使用したレジストは住友化学㈱製のスミレジスト PFI-38A9 8cp で、レジスト厚は、後工程の SiO₂/SiN エッチング工程で、厚膜をエッチングする場合を考慮し、1.4 μm とした。露光はステッパーを用いて、225mj/cm² の露光量である。工程 5 では、ドライエッチング装置にて、熱酸化膜とシリコン窒化膜のエッチングを行い、シリコン基板へのダメージを抑える為に 5% 程度のオーバーエッチとした。工程 6 では、アッシング装置を用いてレジスト除去を行い、工程 7 では、硫酸過水での SPM ウェット洗浄を実施し、その後、自然酸化膜除去の為に、希 HF での DiP エッチを 60sec 実施する。工程 8 で、TMAH を用いたシリコンのウェットエッチングを行う。条件は TMAH 濃度 25%、温度 85 時間 60min で実施する。工程 9 のエッチング後の乾燥として、スティクションを防止する為に IPA ベーパー乾燥装置を用いる。

表 V.2.2.1-3-1 薄膜メンブレン TEG のプロセスフロー

工程	内容	使用装置	条件等	断面図
1	受け入れ 洗浄	・枚葉ウェハ洗浄装置 (ETS 製)	SC1	
2	パイロ酸化	・酸化炉 (光洋サーモ製)	温度： 1100 時間： 50min 膜厚： 5000	
3	LPCVD -SiN 成膜	・LP-CVD (光洋サーモ製)	温度： 780 時間： 30min 膜厚： 1000	

4	レジストパターニング	<ul style="list-style-type: none"> コーターデベロッパー (ジャパン クリエイト製) ステッパー (ニコン製) 	レジスト : 住友化学 PFI-38A9 8cp 厚み : 1.4 μm 露光 225mj/cm2	
5	SiO2/SiN エッチング	<ul style="list-style-type: none"> 酸化膜エッチャー (パナソニック F 製) 	O E : 5%	
6	レジスト除去	<ul style="list-style-type: none"> アッシャー (sumco 製) 	R F : 500w 圧力 : 10Pa 時間 : 20min	
7	S P M 洗浄 & D i P エッチ	<ul style="list-style-type: none"> バッチ式ウェハ洗浄 (セミコン クリエイト製) 	時間 : 15min 温度 : 120 ° D i P 1 : 100 60sec	
8	シリコン ウェット エッチング	<ul style="list-style-type: none"> ウェットエッチング装置 (カナメックス製) 	温度 : 85 °C 時間 : 60min 濃度 25wet%	

9	乾燥	<ul style="list-style-type: none"> IPAベーパー乾燥装置 (ETS製) 	温度： 85℃	
---	----	--	------------	--

()-4 ラインの特性評価

今回の設計試作で使用する設備のライン特性評価を実施した。

ラインに用いる主な装置は、ウェットエッチング装置、酸化炉、高品質成膜装置 (LPCVD-SiN)、IPAベーパー乾燥装置の 4 装置であり、全ての装置で仕様を満足する結果を得られた。下記に各装置の評価結果を示す。

()-4.1 ウェットエッチング装置のライン特性評価

まずは、(株)カナメックス社製のシリコンのウェットエッチング装置における、シリコンのウェットエッチング深さ精度の評価を行った。実施した条件は次の条件である。

<エッチング条件>

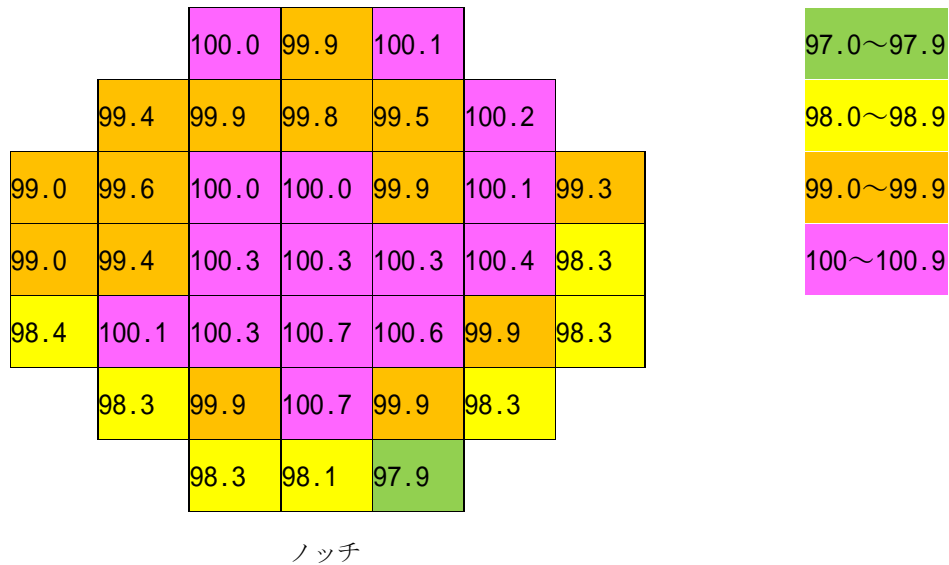
- ・使用薬液：TMAH 濃度 25wet%
- ・エッチング液温：85
- ・エッチング時間：3hour 20min
- ・ウェハ：8インチ N [100] 10~50 ・cm²

評価は KLA Tencor 製 P-16 の段差測定装置を用いて、工程評価 TEG 部のエッチング深さを評価した。評価した結果を表 V.2.2.1-4.1-1 に示す。エッチング深さ精度は ±1.4% であり、検収条件である ±3% をクリアしている。エッチングレートは 0.5 μm/min 程度である。

エッチング深さバラツキのウェハ面内分布としては、図 V.2.2.1-4.1-2 で示しており、下側のウェハ外周付近 (エッチング時の上側) が、やや浅くなっていることが判った。

表V.2.2.1-4.1-1 エッチング深さ評価結果

	評価結果
エッチング深さ平均	99.6 μ m
	0.8 μ m
MAX	100.7 μ m
MIN	97.9 μ m
R	2.8 μ m
加工精度	±1.4%



図V.2.2.1-4.1-2 エッチング深さバラツキのウェハ面内分布

マスク材であるシリコン窒化膜の膜減り量は、図V.2.2.1-4.1-2 に示すように、シリコンを 100 μ m エッチングする場合、膜減り量が 78 Å 程度で、膜減りレートが 0.4 / min 程度と小さく、シリコンエッチング加工上問題の無いレベルであった。

表V.2.2.1-4.1-2 シリコン窒化膜の膜減り量の評価結果

エッチング前膜厚	エッチング後膜厚	膜減り量	膜減りレート
5254	5176	78	0.4 /min

()-4.2 酸化炉のライン特性評価

シリコン基板に熱酸化膜を形成する、(株)光洋サーモ社製酸化炉について、膜厚均一性及び、膜応力評価を行った。実施した条件は下記の条件である。

- ・ 酸化方式：パイロ酸化
- ・ 温度：1100
- ・ 時間：50min
- ・ ウェハ配置：図 V.2.2.1-4.2-1 の 25 枚間隔配置。

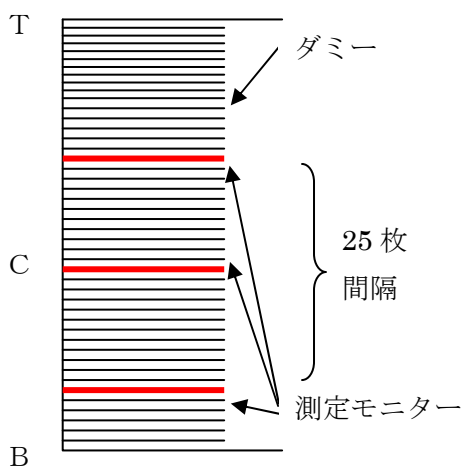


図 V.2.2.1-4.2-1 酸化炉でのウェハ配置

膜厚均一性を、大塚電子(株)社製 FE-3000 を用いて評価し、評価結果を、表() .4.2-1 に示す。それぞれのウェハに対し、面内 9 点の膜厚を測定した。ウェハ面内の膜厚均一性は $\pm 0.4\sim 0.7\%$ 程度、バッチ内の膜厚均一性は $\pm 1.7\%$ 程度で、検収条件である $\pm 3\%$ をクリアしている。

熱酸化膜の応力評価を、ヤマト化学(株)社製 F L X -2320 の薄膜応力評価装置を用い評価し、評価結果を図() .4.2-2 示す。応力は 337MP a であり圧縮応力であった。

表 V.2.2.1-4.2-1 膜厚評価結果

	TOP	CNT	BTM	バッチ内
A v e	4955	4964	4972	4964
	13	18	22	19
精度	$\pm 0.4\%$	$\pm 0.6\%$	$\pm 0.7\%$	$\pm 1.7\%$

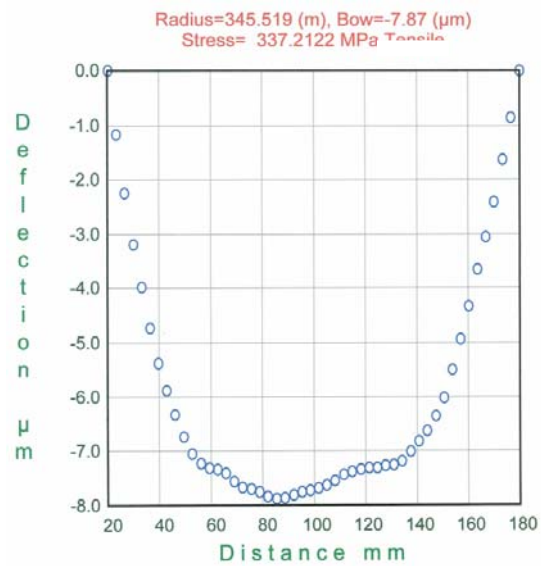


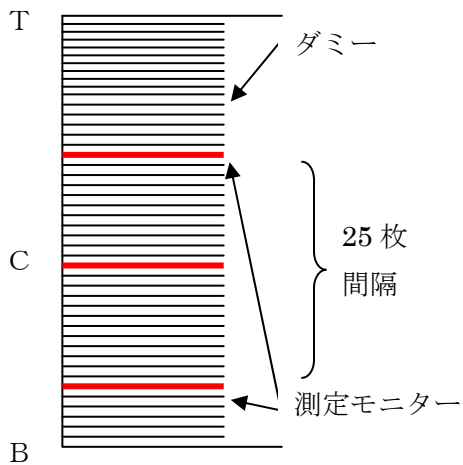
図 V.2.2.1-4.2-2 熱酸化膜の応力評価

()-4.3 高品質成膜装置 (LPCVD-SiN) のライン特性評価

シリコン基板にシリコン窒化膜を形成する、(株)光洋サーモ社製高品質成膜装置 (LPCVD-SiN) について、膜厚均一性及び、膜応力評価を行った。

実施した条件は下記の条件である。

- 温度 : 780
- 時間 : 30min
- ウェハ配置 : 図 V.2.2.1-4.3-1 の 25 枚間隔配置。



図V.2.2.1-4.3-1 LPCVD-SiNでのウェハ配置

評価は、大塚電子(株)製 FE-3000 膜厚測定装置を用いて評価し、評価結果を、表 .2.2.1-4.3-1 に示す。それぞれのウェハに対し、面内 9 点の膜厚を測定した。ウェハ面内の膜厚均一性は $\pm 1.8\sim 2.3\%$ 程度、バッチ内の膜厚均一性は $\pm 1.4\%$ 程度で、検収条件である $\pm 3\%$ をクリアしている。

シリコン窒化膜の応力評価を、ヤマト化学(株)製 F L X -2320 の薄膜応力評価装置を用い評価し、評価結果を図V.2.2.1-4.3-2 に示す。応力は -871MPa であり引っ張り応力であった。

表V.2.2.1-4.3-1 膜厚評価結果

	TOP	CNT	BTM	バッチ内
Ave	1048	1046	1064	1048
	17	13	22	20
精度	$\pm 2.2\%$	$\pm 1.8\%$	$\pm 2.3\%$	$\pm 1.4\%$

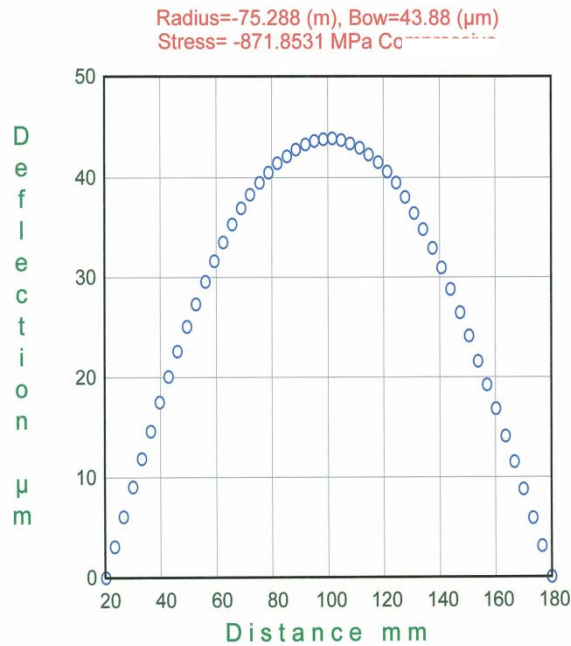
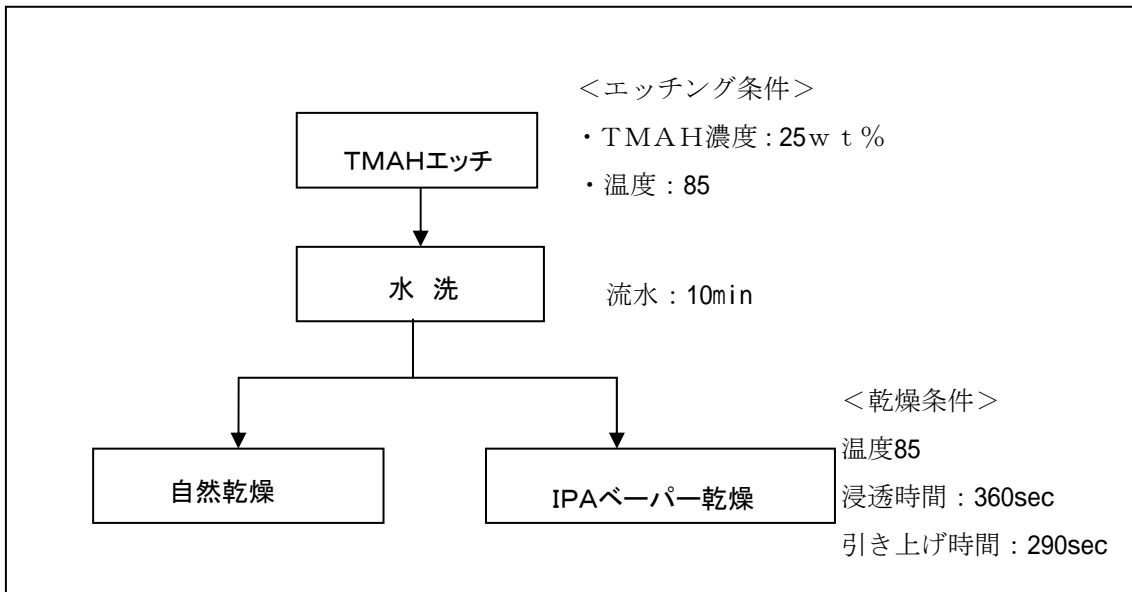


図 V.2.2.1-4.3-2 シリコン窒化膜の応力評価結果

()-4.4 IPAベーパー乾燥装置のライン特性評価

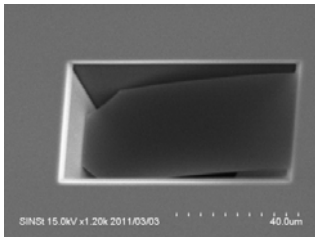
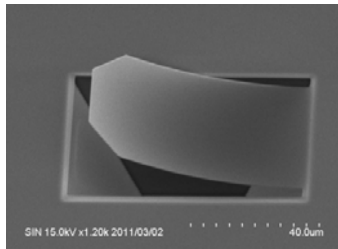
ウェットエッチング後の乾燥に用いる(株)ETS社製IPAベーパー乾燥装置に関し、乾燥性能の評価を行った。評価方法として、TMAHによるシリコンのウェットエッチング後の乾燥工程について、スティクションの発生度合いを確認する為に、自然乾燥とIPAベーパー乾燥でのスティクション発生状態の比較評価を行った。評価水準として、図 .2.2.1-4.4-1 に示す通り、TMAH液を用いてシリコンウェットエッチングを行い、水洗を行った後、自然乾燥する水準と、水洗後すぐにIPAベーパーで乾燥する水準である。チップは、今回設計したLチップを用いて比較評価を行う。膜構成は、シリコン窒化膜 1000、熱酸化膜 3000 とした。IPAベーパー乾燥装置の条件としては、温度 85°C、浸透時間 360sec、引き上げ時間 290sec とした。



図V.2.2.1-4.4-1 IPAベーパー乾燥の評価方法

スティクション評価は、ブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いた。ウェハ面内 15 点を評価した結果を表V.2.2.1-4.4-1 に示す。自然乾燥では、15 点中 14 点の薄膜メンブレンTEGがシリコンのエッチング側面にスティクションしているが、IPAベーパー乾燥では、15 点全ての薄膜メンブレンTEGがスティクションせずに乾燥できている。

表V.2.2.1-4.4-1 IPAベーパー乾燥スティクション評価結果

	自然乾燥	IPAベーパー乾燥
スティクション発生数	14/15	0/15
発生率	93%	0%
SEM観察写真		

()-5 シリコン窒化膜の低応力化検討結果

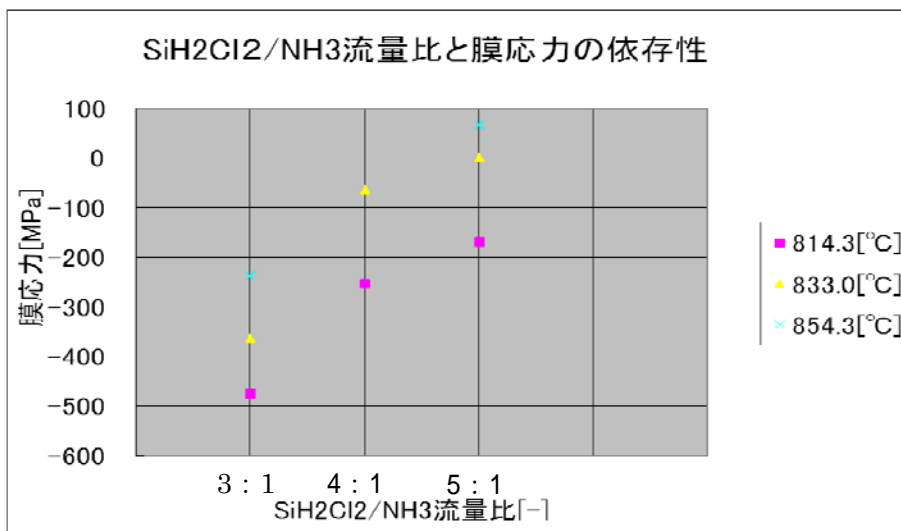
今回の設計・試作の取り組みにおいて、熱酸化膜の圧縮膜応力と、シリコン窒化膜の引っ張り膜応力の、二層膜の応力コントロールを行い、薄膜メンブレンTEGの反りをいかに制御するかが、試作の重要なポイントである。その手段としてシリコン窒化膜の低応力化について取り組んだ。

成膜時に SiH_2Cl_2 と NH_3 ガスを供給し減圧CVDで成膜する。低応力のシリコン窒化膜を成膜するには、ガス比を、 SiH_2Cl_2 の割合を増やす。これによりシリコンリッチで低応力のシリコン窒化膜が成膜可能である。その為に、 SiH_2Cl_2 と NH_3 ガス比、及び、成膜温度を条件設定し、膜応力との依存性を把握する実験を行った。

実験水準としては、下記に示す。

- ・ガス比 ($\text{SiH}_2\text{Cl}_2 : \text{NH}_3$) = 3水準 3 : 1、4 : 1、5 : 1
 - ・成膜温度 = 3水準 815°C、830°C、850°C
- 上記3水準×3水準=計9水準

成膜後の応力評価は、ライン評価と同じくヤマト化学(株)製FLX-2320の薄膜応力評価装置を用いて行った。その結果について図V.2.2.1-5-1に示す。 SiH_2Cl_2 の割合を増やすことにより、膜応力が低減していることが確認出来た。又、成膜温度を高く設定すると、膜応力の低減効果が確認出来た。



図V.2.2.1-5-1 低応力の実験結果

()-6 薄膜メンブレンTEGの最適化検討

()-6.1 シリコン窒化膜低応力化検討試作結果

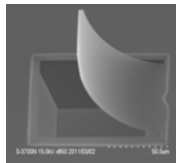
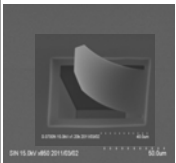
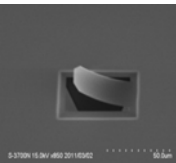
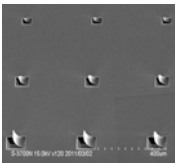
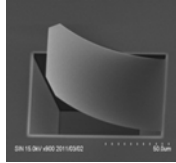
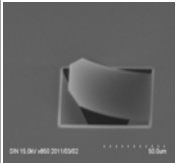
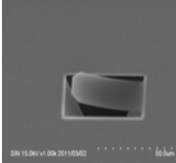
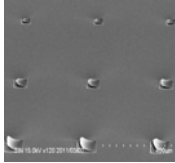
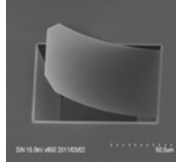
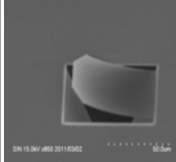
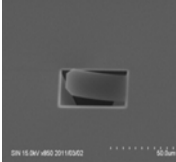
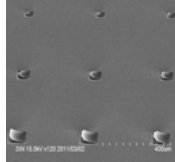
()-5 でシリコン窒化膜の低応力化検討で得られた結果を基に、下記成膜水準で試作した。試作の水準を、表V.2.2.1-6-1-1に示す。

表V.2.2.1-6-1-1 試作水準内容

	水準1	水準2	水準3
酸化膜厚(Å)	4800	4800	4800
SiN膜厚(Å)	500	500	500
SiN膜応力(MPa)	-871	-100	60

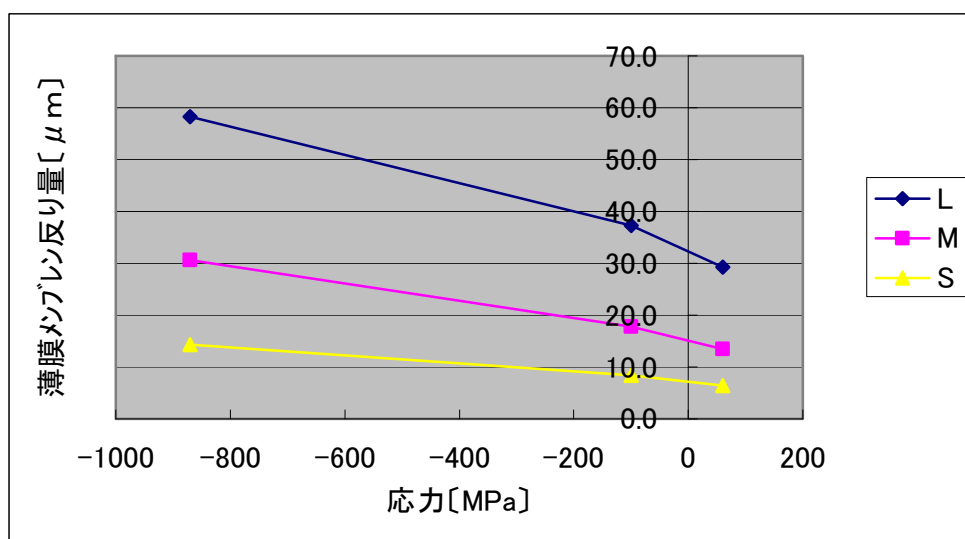
試作後薄膜メンブレンTEGの形状評価を、日立ハイテク(株)製の電子顕微鏡を用いて実施した。その結果を表V.2.2.1-6-1-2に示す。薄膜メンブレンTEGの反り量については、ブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いて評価した。その結果を表V.2.2.1-6-1-3、図V.2.2.1-6-1-1示す。水準1の標準条件に比べ、水準2から水準3と低応力になるにつれて、反りが低減しており、シリコン窒化膜応力と薄膜メンブレンTEGの反り量との依存性が確認出来た。水準1と水準3を比べると、Sチップでは14μm程度の反りが、6.5μmに低減されている。Lチップでは、60μm程度の反りが、半分程度の30μm程度に低減されているが、反り量はやや大きい。

表()-6-1-2 SEMによる薄膜メンブレンTEG形状観察結果

	Lチップ	Mチップ	Sチップ	全体
水準1 SiN-850MPa :500				
水準 SiN:-100MPa SiN:500				
60MPa SiN:500 SiO2 : 4800				

表V.2.2.1-6.1-3 薄膜メンブレンTEGの反り評価結果

		水準1	水準2	水準3
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800
SiN膜厚(Å)		500	500	500
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60
L	AVE(μm)	58.3	37.3	29.2
	(μm)	0.6	0.8	0.5
M	AVE(μm)	30.6	17.8	13.4
	(μm)	0.5	0.7	0.3
S	AVE(μm)	14.4	8.3	6.5
	(μm)	0.7	0.4	0.1



図V.2.2.1-6-1-1 シリコン窒化膜応力と、薄膜メンブレンTEG反りの依存性

()-6.2 薄膜メンブレンTEG膜構成の最適化検討試作結果

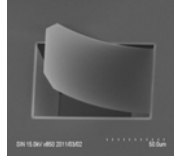
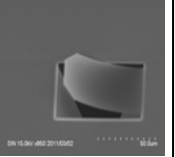
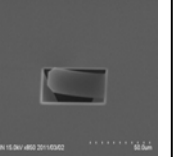
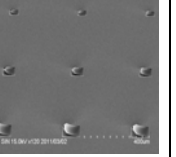
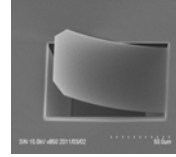
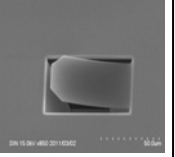
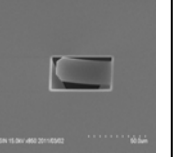
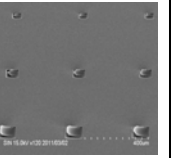
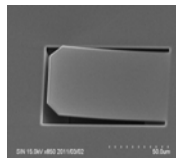
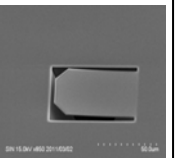
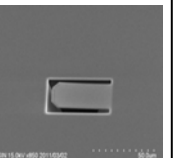
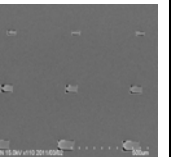
そこで、更なる薄膜メンブレンTEGの反り低減を狙い、薄膜メンブレンTEGの膜構成の検討試作を行った。反り発生の要因はシリコン窒化膜の引っ張り応力の残留が考えられる。その残留応力の影響度合いを少なくする為、熱酸化膜の厚みを厚くした。熱酸化膜の厚みと、薄膜メンブレンTEGの反りとの依存性を把握する為、表V.2.2.1-6.2-1 に示す水準の試作を実施した。

表V.2.2.1-6.2-1 実験水準内容

	水準3	水準4	水準5
酸化膜厚 (Å)	4800	5800	12000
SiN 膜厚 (Å)	500	500	500
SiN 膜応力 (MPa)	60	60	60

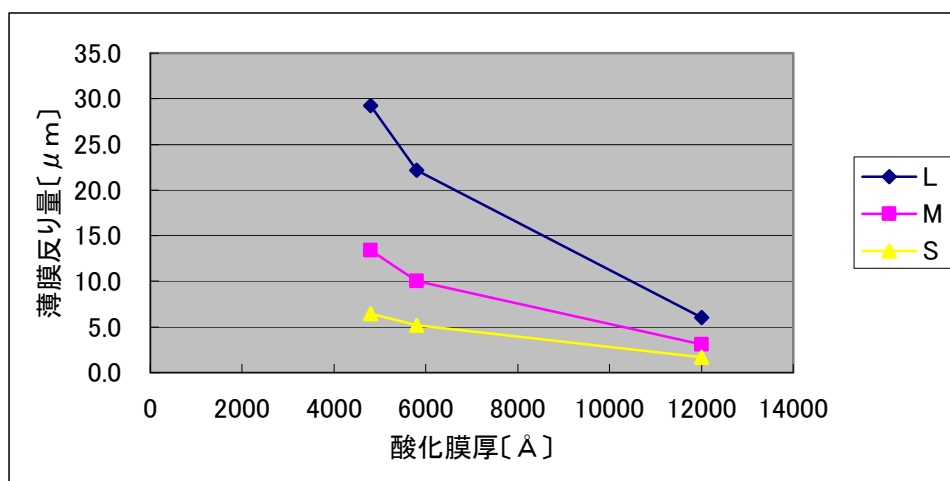
薄膜メンブレンTEGの形状評価結果を表V.2.2.1-6.2-2 に、薄膜メンブレンTEGの反り量の結果を表V.2.2.1-6.2-3、図V.2.2.1-6.2-1 に示す。水準3の標準条件と比べ、水準4、5の熱酸化膜が厚くなるにつれて、薄膜メンブレンTEGの反りが低減しており、依存性が確認出来た。水準3と水準5を比べると、Sチップでは6.5 μ m程度の反りが、1.7 μ mに低減されている。Lチップは、30 μ m程度の反りが、1/5程度の6 μ mに大きく低減されていることが確認できた。

表V.2.2.1-6.2-2 SEMによる薄膜メンブレンTEG形状観察結果

	Lチップ	Mチップ	Sチップ	全体
水準3 60MPa SiN:500				
水準4 60MPa SiN:500 SiO2 : 5800				
水準5 60MPa SiN:500 SiO2 : 12000				

表V.2.2.1-6.2-3 薄膜メンブレンTEGの反り評価結果

		水準3	水準4	水準5
酸化膜厚 (Å)		4800	5800	12000
SiN 膜厚 (Å)		500	500	500
SiN 膜応力 (MPa)		60	60	60
L	AVE (μm)	29.2	22.2	6.0
	(μm)	0.5	0.3	0.2
M	AVE (μm)	13.4	10.0	3.1
	(μm)	0.3	0.5	0.3
S	AVE (μm)	6.5	5.2	1.7
	(μm)	0.1	0.2	0.2



図V.2.2.1-6.2-1 熱酸化膜厚と、薄膜メンブレンTEG反りの依存性

(a)-()-6.3 試作ウェハのキャビティー加工形状評価結果

ここで、試作した 5 つの水準に関して、シリコンウェットエッチング加工形状の評価を行った。表V.2.2.1-6.3-1 に、TMAHでウェットエッチングされたキャビティーのエッチング深さをブルカー・エイエックスエス製のGT X-3 3次元表面評価装置を用いて評価した結果を示す。各ウェハの平均値が 28.5~29.7 μmの範囲内で、ほぼ 1 μmであり、ウェハ間の再現性が得られた。加工バラツキは、 が最大で 0.6 μmであり、問題ないレベルであった。

表V.2.2.1-6.3-1 エッチング深さ評価結果

		水準1	水準2	水準3	水準4	水準5
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800	5800	12000
SiN膜厚(Å)		500	500	500	500	500
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60	60	60
深さ	AVE(μm)	28.5	29.7	28.8	28.7	29.5
	(μm)	0.0	0.6	0.3	0.1	0.2

表V.2.2.1-6.3-2は、TMAHでウェットエッチングされたシリコン部分のTOP面のX、Yの開口寸法をブルカー・エイエックスエス製のGTX-3 3次元表面評価装置を用いて評価した結果である。

水準3、5について、ほぼ設計値の形状は得られているが、水準1、2、4では平均で2~3μm、MAXで10μm程度広がっている部位があり、原因究明が今後の課題である。

表V.2.2.1-6.3-2 XY形状評価結果

		水準1	水準2	水準3	水準4	水準5	
酸化膜厚(Å)		4800	4800	4800	5800	12000	
SiN膜厚(Å)		500	500	500	500	500	
SiN膜応力(MPa)		-871	-100	60	60	60	
L	X	AVE(μm)	74.5	75.5	72.5	75.6	73.0
		(μm)	2.9	3.0	0.3	2.7	0.5
	Y	AVE(μm)	103.8	105.0	102.9	105.0	102.6
		(μm)	2.3	2.3	0.3	2.2	0.4
M	X	AVE(μm)	54.5	55.4	52.6	55.2	52.6
		(μm)	3.2	2.7	1.1	2.6	0.4
	Y	AVE(μm)	73.9	74.9	72.6	75.2	72.4
		(μm)	2.3	2.7	0.4	2.8	0.4
S	X	AVE(μm)	34.0	35.5	32.8	35.6	32.9
		(μm)	2.4	2.8	0.2	2.7	0.5
	Y	AVE(μm)	54.1	54.7	52.6	54.7	52.4
		(μm)	2.7	2.3	0.2	1.9	0.3

表V.2.2.1-6.3-3は、水準5において、ウェハ間の加工バラツキを評価した結果である。ウェハ1とウェハ2を比較して、薄膜メンブレンTEGの反り、エッチングされたシリコン部分のTOP面のX、Yの開口寸法、エッチング深さとも、再現性良く加工されていることが確認出来た。

表V.2.2.1-6.3-3 ウェハ間のバラツキ評価結果

			水準5		
			ウェハ1	ウェハ2	
酸化膜厚(Å)			12000	12000	
SiN膜厚(Å)			500	500	
SiN膜応力(MPa)			60	60	
薄膜 メンブレン 反り量 〔μm〕	L	AVE(μm)	6.0	6.2	
		(μm)	0.2	0.1	
	M	AVE(μm)	3.1	3.1	
		(μm)	0.3	0.2	
	S	AVE(μm)	1.7	1.7	
		(μm)	0.2	0.2	
エッチング 深さ〔μm〕		AVE(μm)	29.5	29.2	
		(μm)	0.2	0.1	
XY形状 〔μm〕	L	X	AVE(μm)	73.0	72.4
			(μm)	0.5	0.3
		Y	AVE(μm)	102.6	102.6
			(μm)	0.4	0.2
	M	X	AVE(μm)	52.6	52.5
			(μm)	0.4	0.3
		Y	AVE(μm)	72.4	72.6
			(μm)	0.4	0.3
	S	X	AVE(μm)	32.9	32.5
			(μm)	0.5	0.5
		Y	AVE(μm)	52.4	52.7
			(μm)	0.3	0.3

()-7 まとめ

今回、薄膜メンブレンTEG設計・試作を行うことにより、圧力センサ、フローセンサ、温度センサ等のセンサ造出に不可欠であるシリコン窒化膜・熱酸化膜の形成条件のデータ蓄積が行えた。シリコン窒化膜の低応力化や、薄膜メンブレンTEGの膜構成の最適化により、薄膜メンブレンTEGの反りを十分に低減でき、安定した加工形状が得られることを確認した。

また、8 インチラインでのウェットエッチング装置・酸化炉・高品質成膜装置(LPCVD-SiN)・IPAベーパー乾燥装置のラインの特性を評価し、試作ウェハの面内バラツキ評価、ウェハ間のバラツキ評価を通じて、製造環境を評価した。これらにより、薄膜メンブレンTEGに用いるMEMSデバイス製造ラインの構築が図れた。

(iii) 圧電薄膜ジャイロ TEG の設計・試作

() -1.1 センサ構造

近年ジャイロセンサは、カメラ一体型 VTR やデジタルスチルカメラの手ぶれ防止用途、家庭用ゲーム機器のコントローラやスマートフォン等の携帯電話に採用が拡大している。

本センサは、MEMS 技術を用いて振動子をビームで保持する構造体上に圧電薄膜を成膜し、その上に駆動電極と検出電極を配置した構造である。駆動電極に交流電圧を印加することにより振動子（錘）を駆動し、角速度印加によるコリオリ力を検出電極に発生する電荷で検出する。この原理により 2 軸または 3 軸の角速度を検出だけでなく、3 軸の動的加速度の検出も可能である。また、圧電薄膜型モーションセンサの構造は、加速度センサの構造と全く同じなので圧電薄膜を成膜する前に piezo 抵抗素子を形成しておけば、静的加速度の検出も可能である。

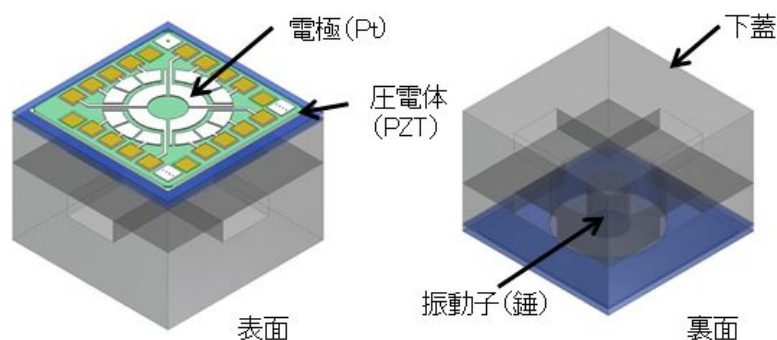


図 V.2.2.1-1.1 センサ概略図

() -1.2 検出原理と駆動方法

本センサは 1 個のセンサで駆動方法を変えることで、3 軸加速度&2 軸角速度検出（5 軸モーションセンサ）と 3 軸加速度&3 軸角速度検出（6 軸モーションセンサ）の 2 種類のセンサにすることができる。ここでは、3 軸加速度と 3 軸角速度の検出原理とそのときの駆動方法について説明する。

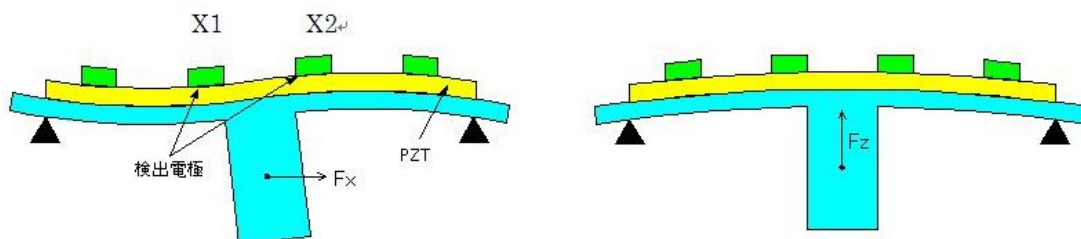
() -1.2.1 3 軸加速度の検出原理

圧電薄膜型モーションセンサの断面模式図を図 V.2.2.1-1.2.1-1 に示す。MEMS 技術で形成された Si ダイアフラムの上に PbTiO_3 と PbZrO_3 の固溶体である $\text{Pb}(\text{Zr,Ti})\text{O}_3$ 薄膜（以下 PZT 薄膜）を成膜し、その上に駆動電極と検出電極を配置した構造である。

PZT 薄膜の上には駆動電極、検出電極、駆動状態をモニターするためのフィードバック電極が形成されている。駆動電極と検出電極の配置は FEM 解析によって決定する。とくに検出電極の位置は重要であり、応力が集中する領域に配置する必要がある。

振動子に加速度が作用すると振動子に力 ($F=ma$) が加わり、振動板が変形する。X 軸方位の加速度が作用すると、振動板は図 V.2.2.1-1.2.1-1 の左図のように変形し、また、Z

軸方向の加速度が作用すると図V.2.2.1-1.2.1-1の右図のように変形する。この変形により、4つの検出電極(X1, X2, Y1, Y2)には表V.2.2.1-1.2.1-1に示す電荷が発生する。したがって、X軸方向の力 F_x はX軸上に配置された2つの検出電極(X1, X2)に発生する電荷の差で検出され、Y軸方向の力 F_y はY軸上に配置された2つの検出電極(Y1, Y2)に発生する電荷の差で検出され、また、Z軸方向の力 F_z は4つの検出電極(X1, X2, Y1, Y2)の和で検出される。



図V.2.2.1-1.2.1-1 断面模式図によるダイアフラムの変形

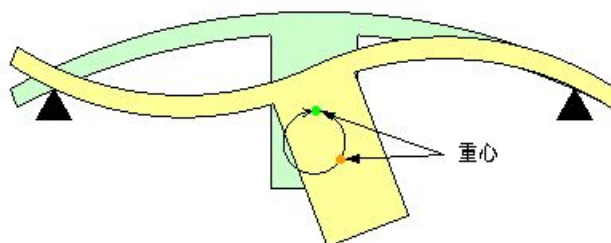
表V.2.2.1-1.2.1-1 各検出電極での電荷発生状況

	X1	X2	Y1	Y2
F_x	-	+	0	0
F_y	0	0	-	+
F_z	+	+	+	+

() -1.2.2 3軸角速度の検出原理

質量も持った物体がある速度をもって運動しているとき、その物体に角速度が作用すると、コリオリ力が発生する。角速度の検出にはこのコリオリの法則を利用する。

2軸角速度を検出する場合は振動子をZ軸方向に単振動させればよいが、3軸角速度を検出する場合は振動子を図V.2.2.1-1.2.2-1に示すようにX-Z平面で回転運動させる。この運動において、振動子はX軸方向の運動成分 V_x とZ軸方向の速度成分 V_z を持つことになる。



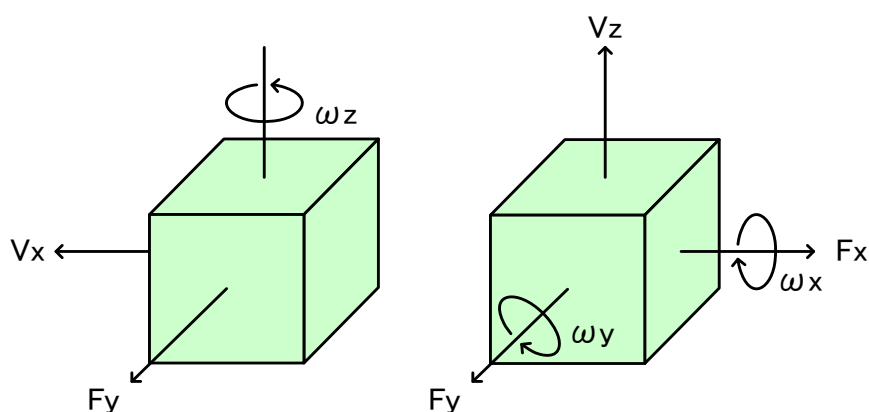
図V.2.2.1-1.2.2-1 振動子のX-Z平面での回転運動

図V.2.2.1-1.2.2-2に示す通り、振動子がZ軸方向の速度成分Vzを持って運動しているとき、X軸周りの角速度 ω_x が作用するとY軸方向のコリオリ力Fyが発生し、Y軸方向の角速度 ω_y が作用するとX軸方向のコリオリ力Fxが発生する。また、振動子がX軸方向の速度成分Vxを持って運動しているとき、Z軸周りの角速度 ω_z が作用するとY軸方向のコリオリ力Fyが発生する。

この関係を次式(1)に示す。

$$\begin{aligned} F_y &= 2mV_z \times \omega_x \\ F_x &= 2mV_z \times \omega_y \cdots \cdots (1) \\ F_y &= 2mV_x \times \omega_z \end{aligned}$$

この式は、振動子をX-Z平面で回転運動させることによって2軸方向の速度成分(Vx, Vz)を与え、2軸方向のコリオリ力(Fx, Fy)を検出することで、3軸の角速度成分(ω_x , ω_y , ω_z)を検出することができることを示している。振動子にコリオリ力Fxが作用すると振動板は図V.2.2.1-1.2.1-1の左図のように変形し、X軸方向のコリオリ力Fxは、加速度がX軸方向に作用したときと同じように検出される。Y軸方向のコリオリ力Fyも同様に検出される。



図V.2.2.1-1.2.2-2 コリオリ力の検出原理

() -1.2.3 振動子の駆動方法

ダイアフラム周辺部に配置された4つの駆動電極に位相の異なる交流信号を印加することで、図V.2.2.1-1.2.2-1のように振動子をX-Z平面で回転運動させることができる。具体的には、駆動電極(X1)と(X2)の駆動信号の位相差を180°、駆動電極(X1, X2)と(Y1, Y2)の位相差を90°に設定する。

() -1.3 信号処理方法

2軸角速度検出は、振動子をZ軸方向に単振動させX軸方向のコリオリ力からY軸周りの角速度 ω_y 、Y軸方向のコリオリ力からX軸周りの角速度 ω_x を検出する。3軸角速度検出は、振動子をX-Z平面で回転運動させることによってX軸方向とZ軸方向の速度成分を与え、X軸方向のコリオリ力 F_x からY軸周りの角速度 ω_y 、Y軸方向のコリオリ力 F_y からX軸周りの角速度 ω_x とZ軸周りの角速度 ω_z を検出する。2軸方向の力 (F_x , F_y) によって圧電薄膜に発生する電荷を、力に比例した電圧 (E_x , E_y) に変換する。

X軸上を通過する瞬間(速度成分 V_z)において、X軸方向とY軸方向のコリオリ力(F_x , F_y)を測定する。つまり、駆動信号 (D_x 又は D_z) で電圧 (E_x , E_y) を同期検波すれば、角速度 ω_x と角速度 ω_y を検出することができる。さらに、Z軸上を通過する瞬間(速度成分 V_x)において、Y軸方向のコリオリ力 F_y を測定する。つまり、駆動信号 (D_x , D_z) で電圧 (E_y) を同期検波すれば、角速度 ω_z を検出することができる。また、3軸加速度成分を検出する場合、3軸方向の力 (F_x , F_y , F_z) によって圧電薄膜に発生する電荷を電圧 (E_x , E_y , E_z) に変換し、ローパスフィルタに通すことで、3軸加速度成分 (A_x , A_y , A_z) を得ることができる。

() -2 8インチ TEG 設計

本センサの基板はSOI ウェハを用い、表面に下部電極(Pt)、PZT 薄膜、上部電極 (Pt) を積層し、裏面は Deep RIE により錘を形成する。

() -2.1 ジャイロセンサチップ

ジャイロセンサチップの概略図を図V.2.2.1-2.1-1の通りである。チップサイズ1.6mm角、検出・駆動電極サイズ160um角、錘は外径970um内径360,420,490umの3種類ある。チップには外径の種類や8インチウェハのチップ座標が分かるよう図V.2.2.1-2.1-2の示すように①~③のマークを設けた。

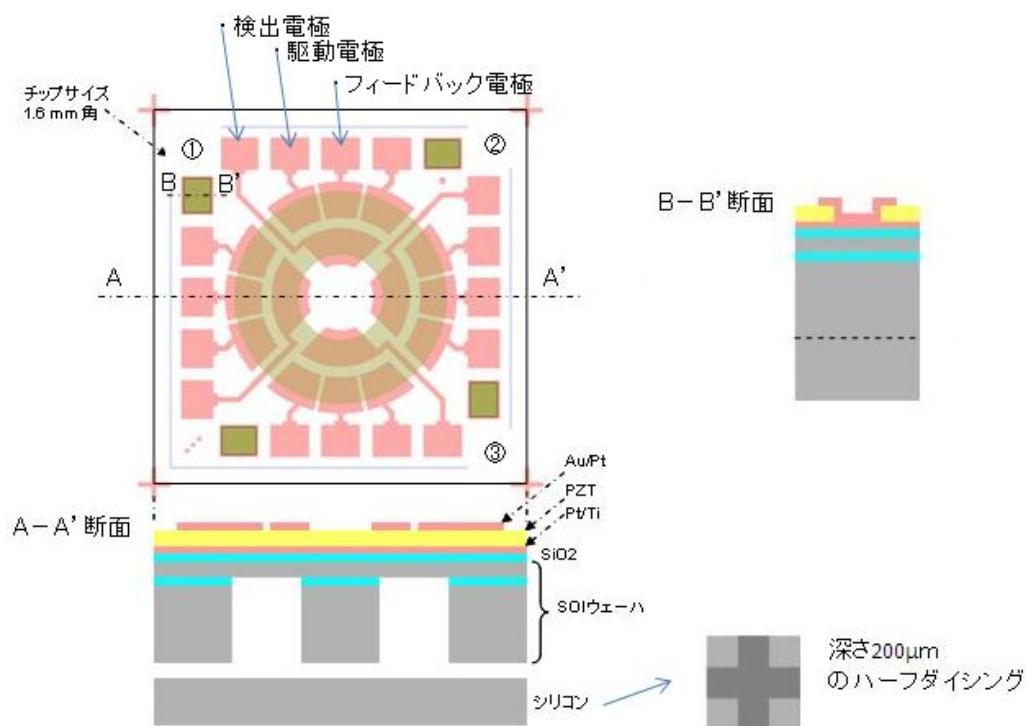
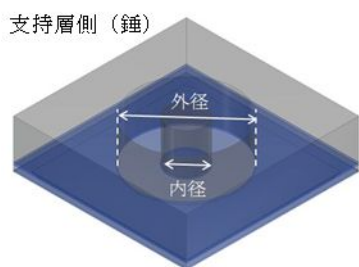


図 V.2.2.1-2.1-1 センサ概略図



①	錘内径	錘外径	座標	②:X	③:Y
	360	970	例		
	420		2進数	$\frac{2^7 \ 2^6 \ 2^5 \ 2^4}{2^3 \ 2^2 \ 2}$	
	490		10進数	198	57

単位 um

図 V.2.2.1-2.1-2 チップマーク

() -2.2 カンチレバー

8インチ面内 PZT 薄膜の圧電定数 d_{31} を測定できるように TEG 内に圧電マイクロカンチレバーを挿入した。図 V.2.2.1-2.2-1 にカンチレバー構造を示す。カンチレバーのサイズは、長さ 1mm 幅 300 μ m である。

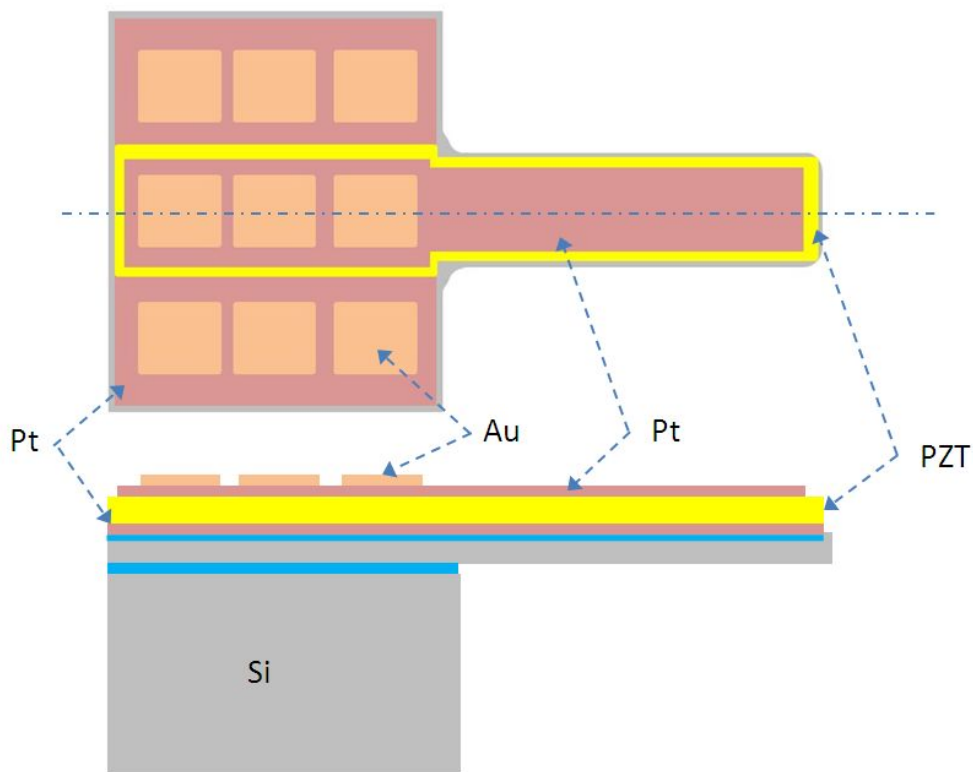


図 V.2.2.1-2.2-1 カンチレバー

(iii) -2.3 TEG 配置

8インチウェハ面内の TEG 配置図を図 V.2.2.1-2.3-1 に示す。カンチレバーは 6 個を 1 チップとして 8インチ面内に 19 箇所配置、その他薬液浸透用として貫通孔を約 10mm ピッチに配置した。

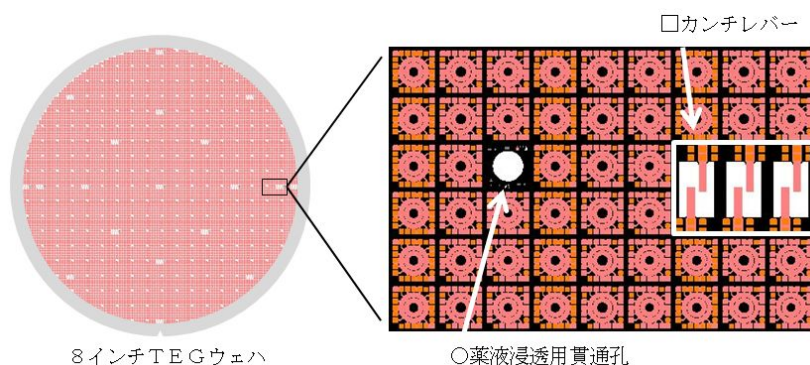


図 V.2.2.1-2.3-1 TEG 配置

(iii) -2.4 共振周波数の FEM 解析

共振周波数の FEM 解析結果を図 V.2.2.1-2.4-1 に示す。周波数は基本的に 20kHz~32kHz が望ましくこれらは、チップのサイズや振動子（錘）の厚みが周波数の大きさを左右する。解析結果では、PZT 膜厚 1μm で周波数 26~28kHz、離調度は 2%弱である。

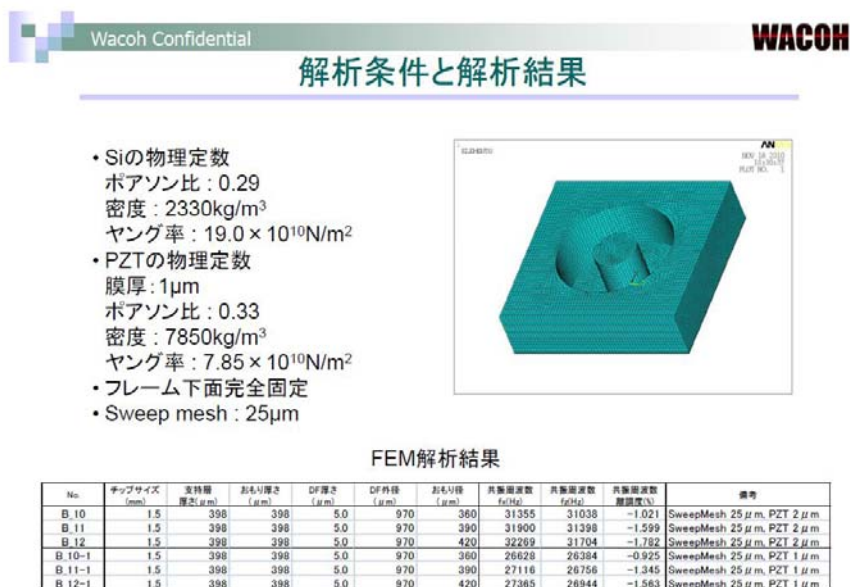


図 V.2.2.1-2.4-1 共振周波数シミュレーション結果

(iii) -2.5 指標

8 インチ TEG ウェハの試作目標および指標は表 V.2.2.1-2.5-1 の通りである。

表 V.2.2.1-2.5-1 指標

種類	項目	単位	目標値
強誘電特性	飽和分極量 Pm	μ C/cm ²	30
カンチレバー変位	圧電定数 d31	pm/V	-100
センサ特性	最大検出角速度	deg/sec	300
	検出感度	mV/deg/sec	0.7
8 インチ TEG ウェハ	面内分布	%	± 5

() -3 プロセス設計

圧電薄膜ジャイロセンサー 8 インチ TEG ウェハの基板仕様を表 V.2.2.1-3-1 に、試作工程を表 V.2.2.1-3-2,3,4 に示す。8 インチウェハ用 PZT 成膜装置は、来期導入予定の為今期は外部委託 (MO-CVD 法とスパッタリング法) とした。

表 V.2.2.1-3-1 基板仕様

	項目	MO-CVD法	スパッタリング法
SOI 基板	直径	200mm	→
	ノッチ	Vノッチ	→
	面仕上げ	片面ポリッシュ	→
	結晶面方位	{100}	→
	ノッチ方位	<011>	→
	厚さ 活性層	5um	→
	厚さ BOX層	2um	→
	厚さ 支持層	400um	→
成膜 加工	表面SiO ₂	120nm ±10nm	→
	Ti (密着層)	20nm ±10nm 成膜温度 RT	20nm ±10% ---
	Pt (上部・下部電極)	100nm ±10nm 成膜温度 RT	100nm ±10% ---
	PZT (圧電体)	800-1000nm	2000nm ±10%
		成膜温度 525℃	---

表 V.2.2.1-3-2 試作工程 1

No	1	2	3	4	5
工程	絶縁膜成膜	下部電極成膜	圧電体成膜	上部電極成膜	上部電極エッチング
仕様	TOx: 100nm	Pt: 100nm TEMP: RT &200℃	PZT: 1-2um	Pt: 100nm TEMP: RT	Resist: PFI 1.5um CL2/60.O2/40 2Pa,1000W/500W OE 50%
場所 装置	3D 拡散炉 or 酸化炉	3D スパッタリング	<外注> MO-CVD スパッタリング	3D スパッタリング	3D メタルエッチング
構造					

表 V.2.2.1-3-3 試作工程 2

No	6	7	8	9	10
工程	圧電体ウェットエッチング	下部電極エッチング	パッド成膜	パッドエッチング	シリコン深堀 (サポート基板剥離用穴加工)
仕様	Resist: PFI 1.5um BHF調合液	Resist: PFI 1.5um 上部電極同様	Au: 400nm TEMP: RT	Auエッチャント液	Resist: PFI 1.5um Recipe: High rate
場所 装置	2G ドラフト	3D メタルエッチング	3D スパッタリング	2G ドラフト	3D シリコン深堀り加工
構造	 	 	 	 	

表 V.2.2.1-3-4 試作工程 3

No	11	12	13	14
工程	シリコンポリッシュ	シリコン深堀 (錘加工)	ハーフダイシング (下蓋加工)	下蓋接合
仕様	絶縁膜剥離 Si 2um研磨 電極側サポート基板 貼り付け	Resist: CA1000 10um Recipe: High rate 電極側サポート基板		
場所 装置	外注	3D シリコン深堀り加工	2A ブレードダイシング	3B 低環境負荷ウエハ接合
構造		 	 	

() -4 PZT 成膜

強誘電体 (PZT) 薄膜の主な形成方法には、溶液塗布 (ゾルゲル法)、有機金属化学気相成長法 (MO-CVD :Metal-Organic Chemical Vapor Deposition)、スパッタリング法がある。いずれも強誘電体不揮発性メモリ FeRAM 開発のための膨大な研究成果によるところが大きい。しかし FeRAM で必要とする PZT 厚みは 100nm 前後と MEMS で必要とする 2~10um に遠くおよばない。一方バルクセラミックスは性能が安定化しており研磨加工して製造する手法も考えられるが機械加工による研磨は数十 um が限界である。現在主流となる成膜法はなくファブダリーや装置メーカーは MEMS 用途の為にゾルゲル・MO-CVD・スパッタリング法による PZT 厚膜化を個々に開発している。

() -4.1 外観

今回 PZT 薄膜は MO-CVD 法とスパッタリング法の 2 種類の方法で装置メーカーへ成膜委託した。図 V.2.2.1-4.1-1 は、成膜後の顕微鏡および断面 SEM 観察結果である。

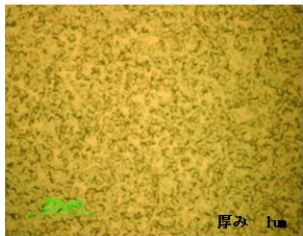
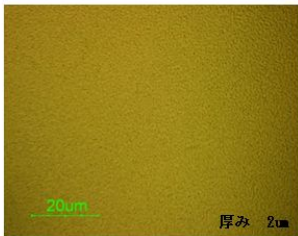
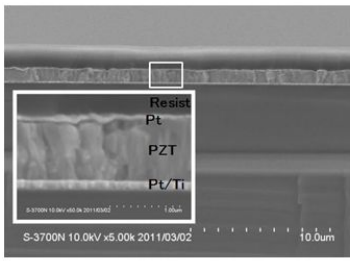
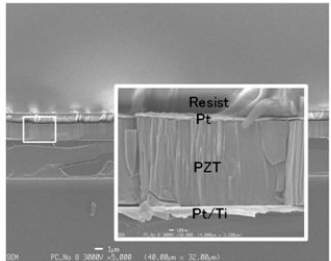
	MO-CVD法	スパッタリング法
顕微鏡		
SEM		

図 V.2.2.1-4.1-1 外観結果 (顕微鏡・SEM)

() -4.2 X線回折測定 (XRD)

MO-CVD 法およびスパッタリング法にて成膜した 8 インチ PZT 基板の面内 9 点の X 線回折測定を実施した。結果は図・表 V.2.2.1-4.2-1 の通りである。

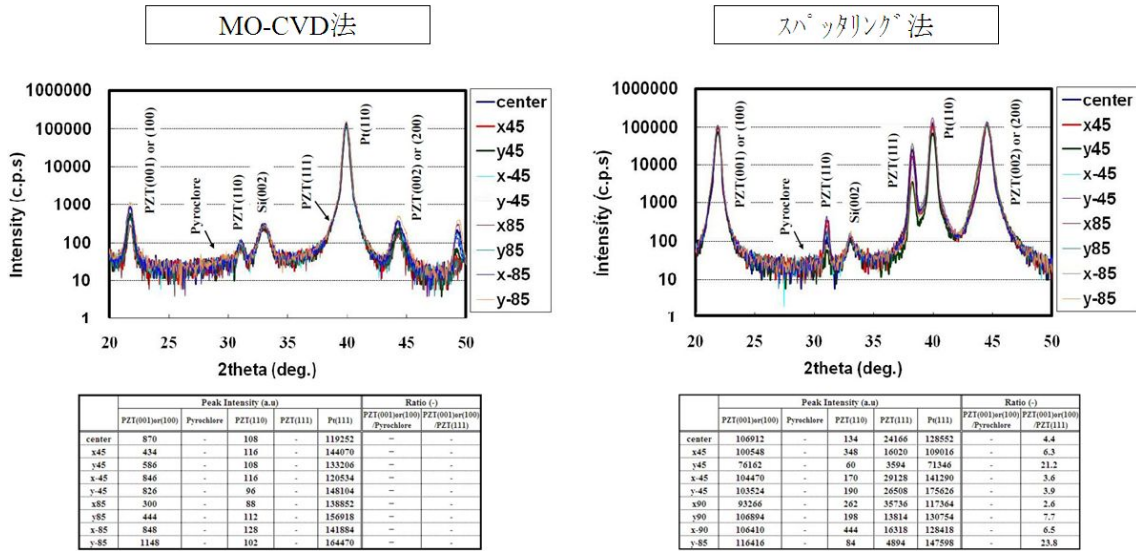


図 V.2.2.1-4.2-1 X線回折測定結果

ピーク強度		MO-CVD法	スパッタリング法
PZT(100)	平均	700	91270
	面内分布 ±%	41%	53%
PZT(111)	平均	---	18909
	面内分布 ±%	---	85%
PZT膜厚	平均 nm	980	2000
	面内分布 ±%	±2%	---

表 V.2.2.1-4.2-1 X線回折測定の 8 インチ面内バラツキ

配向性を比較すると MO-CVD 法では PZT(111)にピークはなく、また PZT(001)or(100)のピーク強度が弱いランダム配向であるのに対しスパッタリング法は PZT(111)より PZT(001)or (100)のピーク強度が強い Z 方向優先配向である。ピーク強度の面内バラツキは PZT(100)において MO-CVD は 41%、スパッタリング法は 53%で MO-CVD の方が小さいが膜厚分布±2%とは桁が異なる。圧電薄膜ジャイロ用としては Z 方向優先配向基板が望ましい。

() -5 8インチライン特性

圧電薄膜ジャイロセンサ TEG の試作において、表 V.2.2.1-5-1 の加工仕様を満たす条件評価および装置・環境特性評価を実施した。

表 V.2.2.1-5-1 加工装置と要求仕様

装置メーカー	型式	加工項目	要求仕様
ULVAC	SME-200E	電極成膜	Pt 100~120nm ±10%
Panasonic	E658-I	電極エッチング加工	選択比(Pt/Re) >0.1
住友精密工業	Pegasus-N	シリコン深堀加工	選択比(Si/Re) >45

() -5.1 電極成膜

ULVAC 製スパッタ装置 SME-200E にて Pt 成膜の膜厚測定および XRD 測定を実施した。

() -5.1.1 膜厚

ベアシリ基板上 3 点に油性ペンで印をつけ表 V.2.2.1-5.1.1-1 の条件（成膜温度=Heater Temp ; 25(RT),50,100,150,200 ）で成膜処理、マーク部をアセトンで剥離、膜厚を段差計 (KLA-tencor 製 P-16) で測定した。結果は図 V.2.2.1-5.1.1-1 の通り。温度依存はなく、3 分で平均約 1250Å ± 8% で要求仕様を満たすことから 1000Å 狙いで処理時間を 2 分 20 秒と決定した。

表 V.2.2.1-5.1.1-1 Pt 成膜条件

Item	Unit	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Step time	min	0	0	0	3	0
Step time	sec	15	10	10	0	10
DC Power	W	0	0	500	500	0
RF Power	W	0	0	0	0	0
Sub.Rotation Speed	Pa	10	10	10	10	10
Shutter Pos.	O/C	Close	Close	Close	Open	Close
MFC(Ar) Flow	sccm	0	50	50	50	0
MFC(O2) Flow	sccm	0	0	0	0	0
MFC(N2) Flow	sccm	0	0	0	0	0
Heater temp	℃	0	0	0	0	0
Gas Trigger time	sec	0	0	1	0	0

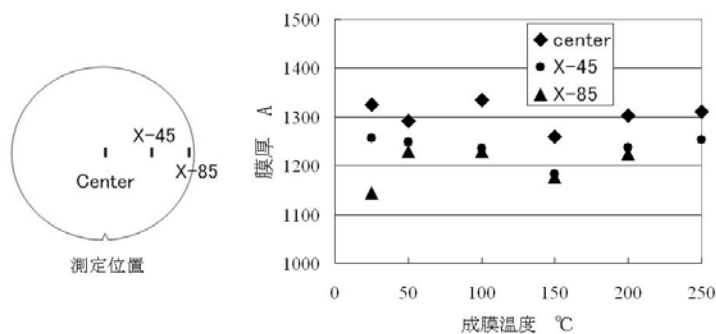
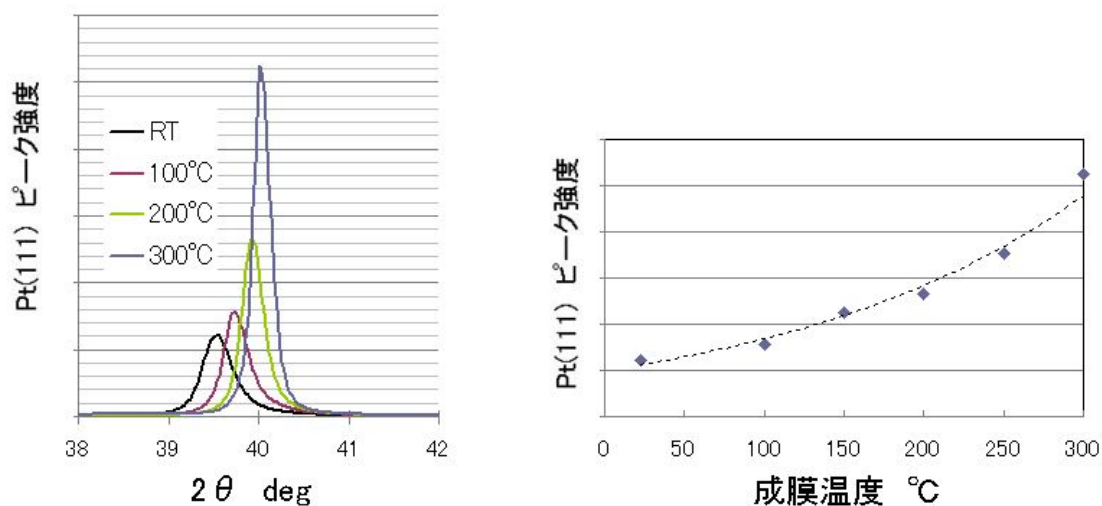


図 V.2.2.1-5.1.1-1 電極成膜(Pt)の温度特性

() -5.1.2 X線回折測定

成膜温度毎にX線回折測定（リガク製X線回折装置マルチフレックス）を実施した。結果は図V.2.2.1-5.1.2-1の通り、Pt(111)配向のピーク強度は温度が高くなるにつれて増加する。



図V.2.2.1-5.1.2-1 XRD測定結果

() -5.2 電極エッチング加工

Panasonic製メタルエッチング装置（E658-I）にてPtエッチング条件を評価した。Ptエッチング条件は表V.2.2.1-5.2-1および結果は図V.2.2.1-5.2-1の通り。印加安定性およびPt/Re選択比よりPtエッチング条件は2Paで決定した。

表V.2.2.1-5.2-1 Ptエッチング条件

Item	Unit	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4	Step 5
Step time	mm:ss	0:10	1:20	1:00	1:00	1:00
CL2	cm ³ /min	60	60	0	0	0
O2	cm ³ /min	40	40	0	0	0
Ar	cm ³ /min	0	0	100	100	100
Pressure	Pa	2	2	8	8	8
ICP Power	W	1000	1000	100	100	100
Bias Power	W	500	500	0	0	0
冷却He流量	cm ³ /min	15	8	1	0	0
冷却He圧力	Pa	1200	700	50	0	0
ESC使用		する	する	する	しない	しない
ESC電圧1	V	1000	500	-500	0	0
ESC電圧2	V	-1000	-500	500	0	0
除電突き上げ		しない	しない	しない	しない	する

圧力	0.5Pa	1 Pa	2 Pa	3 Pa	5 Pa
中心部 SEM Image × 50k					
X-85 SEM Image × 50k					
Etch-Rate nm/min	119	104	94	44	24
Uniformity	---	---	± 13%	± 27%	± 25%
Pt / Resist	---	---	0.14	0.06	0.03
Plasma Stability	△	△	○	○	○

図V.2.2.1-5.2-1 Pt エッチング加工結果

() -5.3 シリコン深堀加工

シリコン深堀加工装置(住友精密工業製 Pegasus-N)にて8インチ試作用途に合わせて、高速用、高データ率用、PPS用、TSV用 計4種類条件を作成、各々の特性を比較した。加工条件と基本特性は表V.2.2.1-5.3-1の通りである。

表V.2.2.1-5.3-1 シリコン深堀加工条件と基本特性

目的		高速用			高データ率用			PPS用			TSV用		
スペック		エッチレート ≥ 10um/min			データ率 >99% ブラックシリコン(跡)なし			BOX層止め ノッチなし			φ50um 深さ425um 保護層(AL)止め		
Item	Unit	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2	Depo	Etch 1	Etch 2
Step time	sec	2.5	1.5	2.5	1.2	1.5	0.5	1.2	1.2	0.4	1.2	1.8	1.2
SF6	sccm	0	400	400	0	400	400	0	400	400	0	400	400
C4F8	sccm	400	0	0	300	0	0	400	0	0	400	0	0
Pressure	Pa	6	4	20	6	3	3	6	3	3	10	4	12
Coil Power	W	2200	2200	2200	1200	1200	1200	1500	1500	1500	2600	2600	2600
Platen LF Power	W	0	150	30	0	100	20	0	90	20	0	120	20
Pulse Frequency	Hz	50			50			50			56		
Pulse On Duty	%	25			25			15			28		
エッチレート ^(*)	um/min	10			4			3			9		
面内分布	± %	18			4			2			7		

*1) Target 1mm エッチング時間 5分

() -5.3.1 ブラックシリコン

シリコン深堀加工では、図 V.2.2.1-5.3.1-1 のように(a)C4F8 プラズマにより CF_n ポリマーが側面・底面に形成される、(b)底面のポリマーがイオンにより除去される、(c)露出された底面のシリコンが SF₆ プラズマより生成される F ラジカルによりエッチングされる、を繰り返すことにより高アスペクトな形状が形成される。しかしウェハ面内のエッジ部において (d) シリコンのエッチングにより発生した反応生成物である SiO_x 等が被エッチング面に堆積する(e)堆積物の無い部分のみがエッチングされる、ことによりブラックシリコンと呼ばれる柱状の突起物が発生する場合があります。高速用、高データ率用、PPS 用条件にてポジ・ネガパターンのある TEG ウェハを使用し中心部とウェハエッジ部（中心より 85mm）を顕微鏡・SEM で観察した。結果は、図 V.2.2.1-5.3.1-2 の通り、高速用と PPS 用は程度の差はあるもののエッジ部+ネガパターン(高データ率)部にブラックシリコンが発生した。

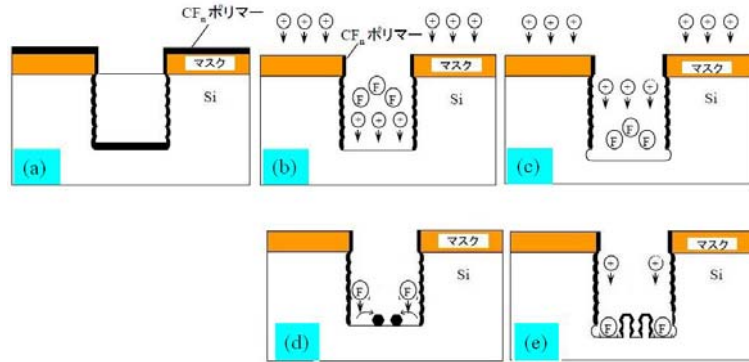


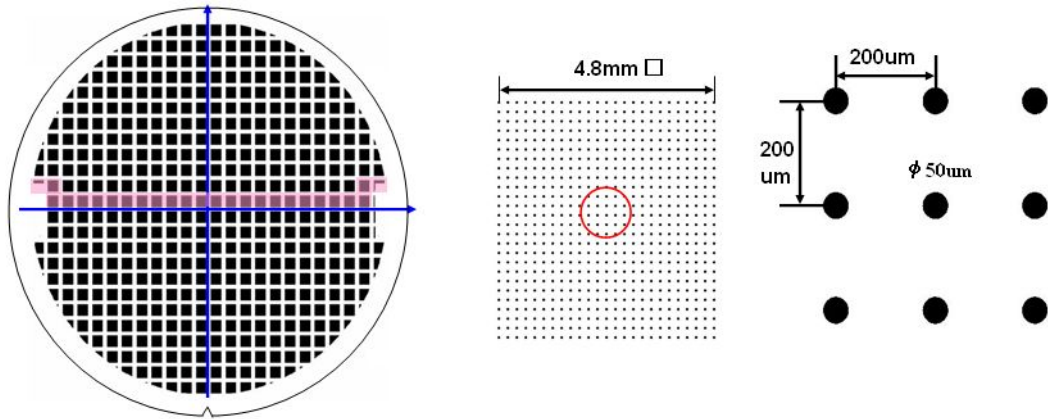
図 V.2.2.1-5.3.1-1 ボッシュプロセス

検査装置	条件		高速用	高データ率用	PPS用	
光学 顕微鏡	Center	低倍				
		X-85	低倍			
			高倍			
	SEM ポンプ	Center	低倍			
			高倍			
X-85		低倍				
		高倍				

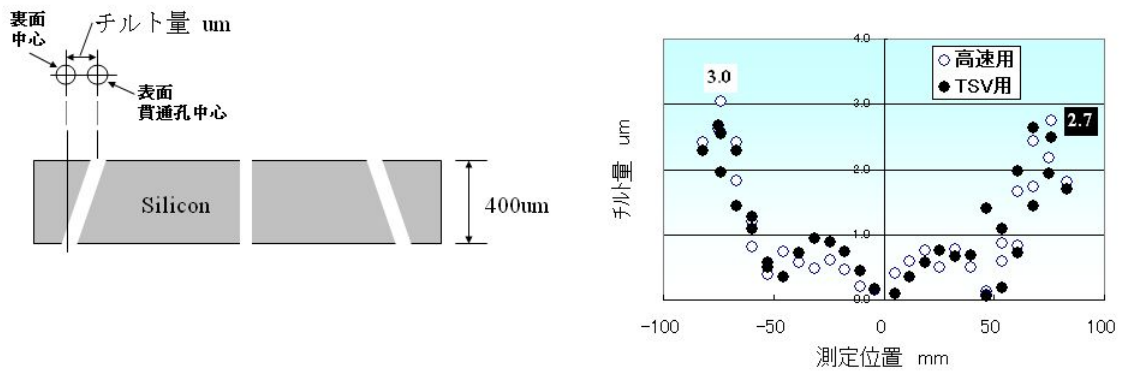
図 V.2.2.1-5.3.1-2 シリコン深堀加工特性

() -5.3.2 チルト特性

TSV (Through Silicon Via) 用、高速用条件にて図V.2.2.1-5.3.2-1 TSV-TEG を使用し8インチウェハ面内のチルト量を測定した (SUSS 製裏表測定器)。結果は図V.2.2.1-5.3.2-2 の通りである。中心部から50mm地点を境にチルト量が大きくなる傾向がある。2条件によるチルト差は小さく最外周部 (X-85mm) 地点で最大3 μm である。



図V.2.2.1-5.3.2-1 TSV-TEG



図V.2.2.1-5.3.2-2 チルト結果

() -5.4 装置内環境

本試作にかかわる 8 インチライン主要装置の装置内元素分析（理学製全反射蛍光 X 線装置 TXRF 3750W スィープ測定）を実施した。処理条件は表 V.2.2.1-54-1、結果は図

.2.2.1-5.4-1 の通りである。Metal-RIE は、PZT、Pt、Ti 等金属を塩素、フッ素ガスでエッチングしている為各種元素が検出された。拡散炉は通常処理の場合検出限界であるが AL 熱処理後に金属が検出された。

表 V.2.2.1-5.4-1 処理条件

装置	ウェハ処理条件	検査機・ウェハ情報
ダミー	ケース内保管	分析機種 :TXRF 3750W 理学/全反射蛍光X線分析装置 管電圧 :40kv 管電流 :40mA 試料基板 :Si ウェハ 試料サイズ:8インチ
HF ⁺ ウェハ	酸化膜エッチング (1分)	
Metal-RIE	酸素プラズマ (1分)	
Metal-RIE(Ash)	酸素プラズマ (1分)	
SiO ₂ -RIE	酸素プラズマ (1分)	
コーター	純水ブロー+スピン乾燥	
DRIE	酸素プラズマ (1分)	
拡散炉	熱処理 (1分)	
拡散炉(AL処理後)	熱処理 (1分)	

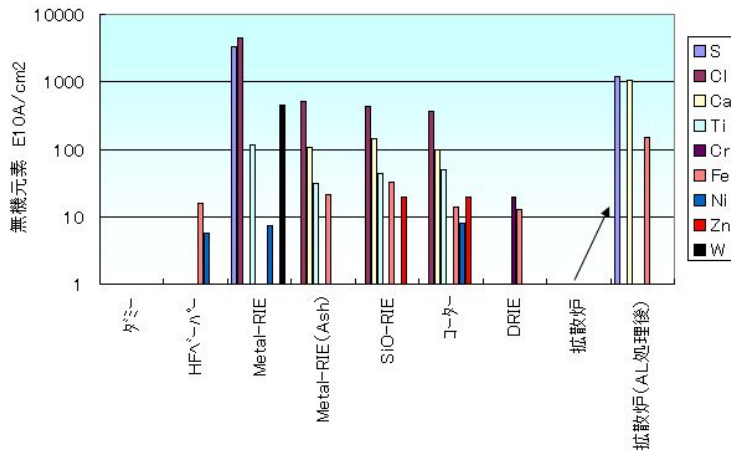
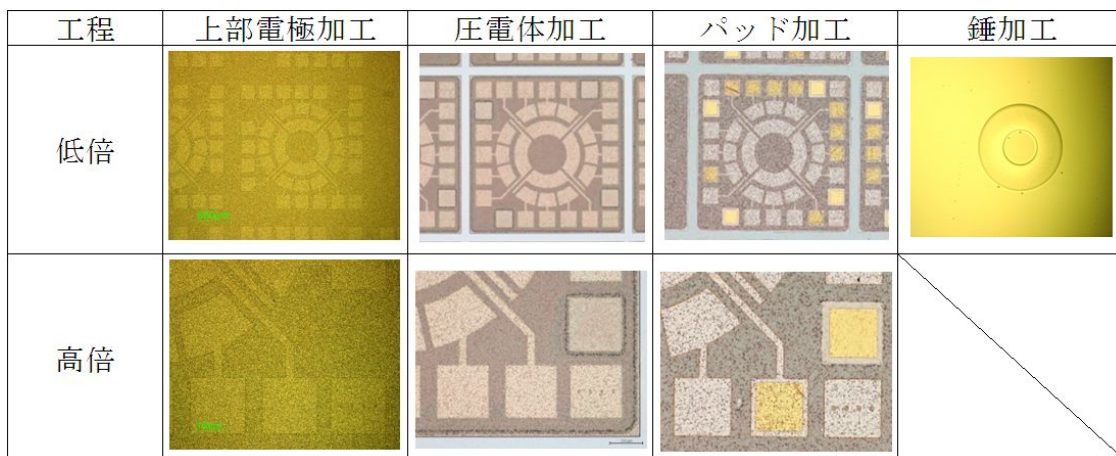


図 V.2.2.1-5.4-1 装置内環境測定

() -6 試作結果

() -6.1 外観

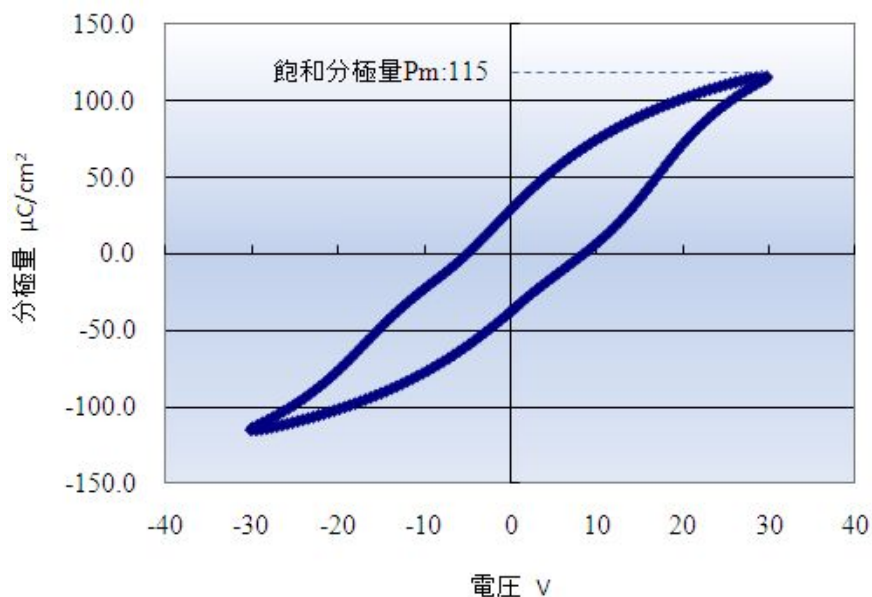
絶縁膜成膜からシリコン深堀（錘加工）までの工程を流動した。図V.2.2.1-6.1-1は各工程の顕微鏡写真である。



図V.2.2.1-6.1-1 各工程の顕微鏡観察

() -6.2 強誘電特性

錘加工前後において8インチ面内17点の分極量（東陽テクニカ製強誘電体特性評価装置 FCE）を測定した。図V.2.2.1-6.2-1は面内1点の分極量結果、図V.2.2.1-6.2-2 錘加工前後における飽和分極量8インチ面内分布である。



図V.2.2.1-6.2-1 分極量

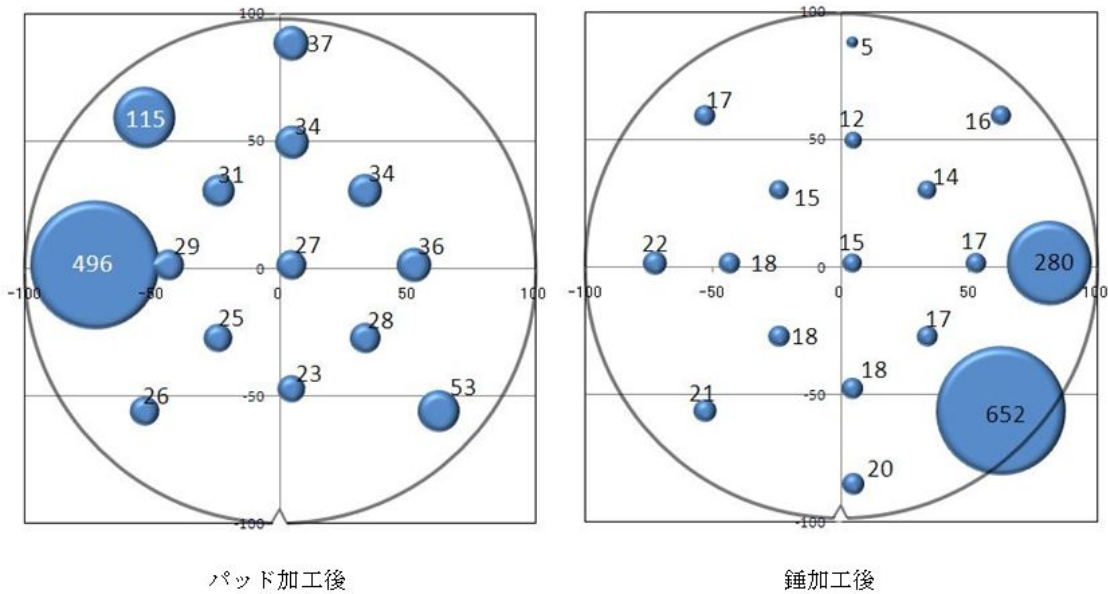


図 V.2.2.1-6.2-2 8 インチ分極量バラツキ

() -7 まとめ

8 インチラインを用いて PZT を用いた圧電薄膜ジャイロの試作を実施した。試作まとめは表 V.2.2.1-7-1 の通りである。試作当初より本試作の肝である PZT 成膜は研究所内で処理できない為、外部委託を検討した。選定は 8 インチ MEMS として実績のある外注先に絞ったが納期が長く、結果的に本試作における評価期間が十分に取ることができなかった。本試作結果で数値を取得できたのは、強誘電特性のみで、最終的なパッケージ形状およびセンサ特性評価はもちろんのこと、カンチレバーの製作ができなかった。今後、試作結果から要因分析を行いプロセス設計の見直しを実施する予定である。

表 V.2.2.1-7-1 試作まとめ

種類	項目	単位	目標値	結果
強誘電特性	飽和分極量	$\mu\text{C}/\text{cm}^2$	30	最大 652 最小 リーク
	カンチレバー変位	圧電定数	pm/V	---
センサ特性	最大検出角速度	deg/sec	300	---
	検出感度	$\text{mV}/\text{deg}/\text{sec}$	0.7	---
8 インチ TEG ウェハ	面内分布	%	± 5	---