

2. 2. 2 異分野融合型次世代デバイス製造技術を適用したデバイス作製

(i) 中性粒子ビームエッチングプロセスを適用したセンサ TEG の作製

(i) .1 概要

現代半導体デバイス製造の根幹として微細加工、表面改質、薄膜体積等のキープロセスで反応性プラズマが多く用いられており、今や原子層レベルの加工や体積精度が要求されている。しかしながら、今後の主流となるナノオーダの極微細デバイスにおいて、プラズマから照射される電子やイオンによる電荷蓄積や真空紫外光等の放射光による欠陥生成などのデバイス特性を劣化させるダメージがより深刻な問題となってきた⁽¹⁾⁽²⁾⁽³⁾⁽⁴⁾。ナノデバイスではわずかな欠陥でも大きくデバイスの特性を左右する。これらの問題を解決する手段として S.Samukawa らによって開発されたパルス変調プラズマを用いた中性粒子ビーム生成手法が注目を集めている。中性粒子ビームはプラズマからの荷電粒子や、放射光の基盤への放射を抑制し、運動エネルギーをもった中性粒子のみを照射することでダメージフリーの高精度プロセスが可能であるとして期待されている⁽⁵⁾。その実証として、 SF_6/Cl_2 中性粒子ビームにより加工したアンテナ MOS キャパシターは通常プラズマエッチングと比較し、絶縁膜である酸化膜の劣化が抑制され、ゲートリーク電流がおよそ一桁小さくなることが同じく S.Samukawa らから報告された⁽⁵⁾。また、BEANS プロジェクト「3次元ナノ構造形成プロセス技術開発」平成 21 年度の成果としてカンチレバー表面のダメージとその機械特性を評価する理論的手法を新たに考案し、中性粒子ビームでカンチレバーの厚みを加工することにより、機械特性が劣化しないことが実験的に確認された⁽⁶⁾。このように、中性粒子ビーム加工がダメージレスであることを、電氣的、機械的側面から確認されてきている。しかし、中性粒子ビーム生成手法の実用化には、エッチングレート、アスペクト比の向上、大口径化等、多くの問題が残されている。こうした背景から、本プロジェクトではカンチレバー表面のダメージとその機械的特性を評価する特性評価用素子(以下、TEG)を大口径(8インチ)ウェハ上に作製し、中性粒子ビームのウェハ内特性ばらつきを明確化し、中性粒子ビームエッチング技術の実用化に向けた取り組みを加速することを行った。以下に、平成 22 年度の取り組み内容について述べる。

(i) .2 設計理論

まず、平成 21 年度に考案したカンチレバー表面のダメージとその機械特性を評価する TEG の理論および作成方法について述べる。

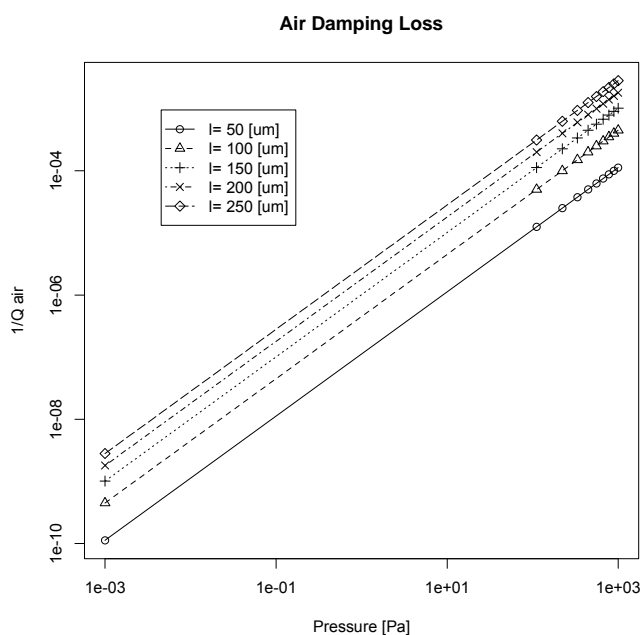
カンチレバーの機械特性は、その共振周波数における Q 値によって評価できる。Q 値とは振動計の減衰を示す数値であり、一般的に共振周波数で振動するカンチレバーの Q 値はいくつかの原因によるエネルギーロスの影響を受けて次のように表される。

$$Q_{Total}^{-1} = Q_{Air}^{-1} + Q_{TED}^{-1} + Q_{Support}^{-1} + Q_{Surface}^{-1} \quad (1)$$

ここで、 Q_{Air} 、 Q_{TED} 、 $Q_{Support}$ そして $Q_{Surface}$ は、それぞれエアダンピング・ロス、

熱弾性損失、サポート・ロス、サーフェース・ロスの各エネルギーロスが起因する Q 値を表す。このなかでサーフェース・ロスがカンチレバー表面の欠陥等を顕著に表すロスであり中性粒子エッチングのダメージレス効果を検証することが可能と考えた。それぞれのロスについて詳細に検討し、サーフェース・ロスが支配的になるようカンチレバーの厚み、長さ、幅、測定環境をそれぞれ適切に選択した。

(i) .2.1 エアダンピング・ロス



図V.2.2.2 (i) .2-1. エアダンピング・ロス の Q 値の逆数と圧力の関係。カンチレバーの長さがそれぞれ 50, 100, 150, 200[μm]の場合を計算した。

エアダンピング・ロスは空気中に存在する分子が振動するカンチレバー表面と衝突し発生する粘性抵抗を表したロスであり、カンチレバー雰囲気中の圧力に起因する。F.R.Blom らは理想気体の状態方程式等の理論的検討からエアダンピング・ロスを次式のよう導いた⁽⁷⁾。

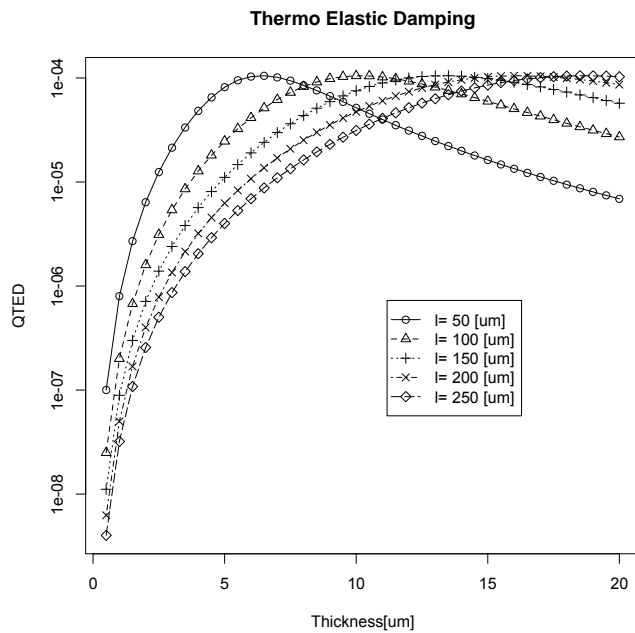
$$Q_{Air} = \frac{k_n}{k_{m,p}} \left(\frac{h}{l}\right)^2 \sqrt{\frac{\rho_{Si} E_{Si}}{12}} \quad (2)$$

ここで、 k_n はn次振動定数、 h 、 l はそれぞれカンチレバーの厚さと長さ、 ρ_{Si} はシリコンの密度、 E_{Si} はシリコンのヤング率、 p は雰囲気中の圧力を示し、 k_m は以下の式で導かれる。

$$k_m = \left(\frac{82M}{9\pi RT} \right)^{0.5} \quad (3)$$

ここで、 M 、 R 、そして T はそれぞれ雰囲気中の物質質量、気体定数、気体の熱力学温度である。空気中では、 $M = 28.96[g/mol]$ 、 $R = 8.314 \times 10^3[J/K]$ 、 $T = 300[K]$ であるとする。カンチレバーのパラメータを、 $\rho_{Si} = 2330[kg/m^3]$ 、 $E_{Si} = 169[MPa]$ 、そして厚みを $h = 2[\mu m]$ として、 Q 値と圧力の関係をカンチレバーの長さ l がそれぞれ50、100、150、200、250 $[\mu m]$ である場合を図 2.2.2 (i) .2-1 に示す。一般的に 0.1[Pa]以下の真空であれば、他の損失が支配的となることが知られている⁽⁸⁾。

(i) .2.2 熱弾性損失



図V.2.2.2 (i) .2-2. TED の Q 値と厚みの関係。カンチレバーの長さがそれぞれ 50, 100, 150, 200, 250 $[\mu m]$ の場合を計算した。

熱弾性損失(以下、TED。TED は Thermo elastic Energy Dissipation の略称)は、カンチレバーの厚みに対する上面と下面で発生した不可逆的熱流から発生するロスである。そのため、カンチレバーの構造と温度に関係し、T.V.Roszhart らは次式のように表現した⁽⁹⁾。

$$Q_{TED} = \frac{2\rho_{Si}C_p}{T\alpha_{Si}^2} \cdot \frac{1}{f_n/F_0} \quad (4)$$

ここで、 α_{Si} 、 C_p はそれぞれシリコンの熱拡散係数、比熱である。 f_n は共振周波数、 F_0 は

特性周波数であり、次式のように表現される。

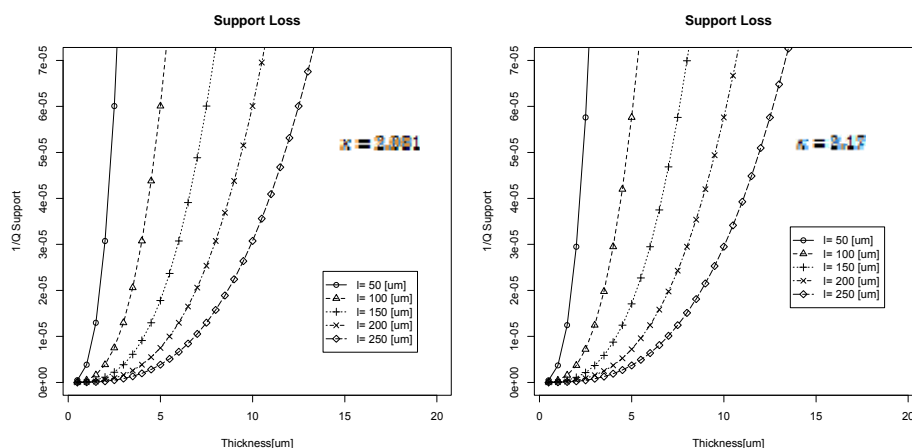
$$f_n = \frac{k_{Si}^2 h}{3\pi L^2} \sqrt{\frac{E_{Si}}{12\rho_{Si}}} \quad (5)$$

$$F_Q = \frac{\pi k_{Si}}{2\rho_{Si} C_p h^2} \quad (6)$$

k_{Si} は、シリコンの熱伝導率を示す。シリコンの熱伝導率を $k_{Si} = 150 [W/mK]$ 、熱拡散係数を $\alpha_{Si} = 2.6 \times 10^{-6} [K^{-2}]$ 、比熱を $C_p = 700 [J/kg K]$ 、として、 Q 値と厚みの関係をカンチ

レバーの長さ L がそれぞれ **50, 100, 150, 200, 250[μm]**である場合を図V.2.2.2 (i) .2-2 に示す。カンチレバーの厚みが $10[\mu m]$ 以下である場合無視できると言われているが、カンチレバーの長さによって熱弾性損失の編曲点が変わり、 $100[\mu m]$ 以下の長さでは無視できないことが予測される。しかし、厚みが大きなカンチレバーでも長さを正しく設計することで、その影響が支配的でない状況を作ることも可能である。

(i) .2.3 サポート・ロス



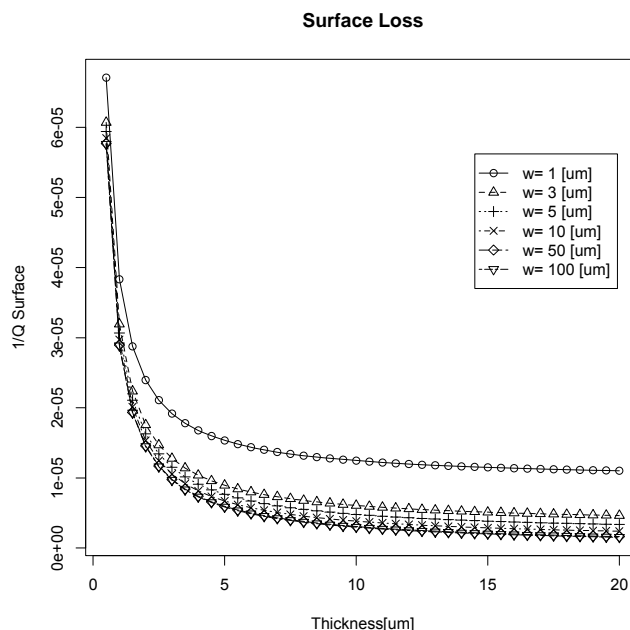
図V.2.2.2 (i) .2-3.サポート・ロスの Q 値と厚みの関係。カンチレバーの長さ L がそれぞれ 50, 100, 150, 200, 250[μm]の場合を計算し、 κ の値が 0.34, 2.081, 2.17 の場合を示す。

サポート・ロスカンチレバーの振動に大きな損失をもたらすロスの一つである。カンチレバーのサポート部分を半無限弾性体として考え、弾性エネルギーの減衰は厚さと長さの比の 3 乗に比例する。つまり、 $Q_{support} \propto (H/L)^3$ であり、次式となる。

$$Q_{support} = \kappa \left(\frac{L}{H}\right)^3 \quad (7)$$

κ はカンチレバーの Q 値について多くの論文による報告から算出すると、次のような値となっている $\kappa = 2.17^{(10)}, 2.081^{(11)}$ 。(10)の文献についてはナイトライド薄膜で作製したカンチレバーでの例であるため、やはり材質の依存がないロスであると思われる。それぞれの κ の値でサポート・ロスと厚みの関係を図V.2.2.2 (i) .2-3に示す。

(i) .2.4 サーフエース・ロス



図V.2.2.2 (i) .2-4. サーフエース・ロスの Q 値と厚みの関係。カンチレバーの幅がそれぞれ 1, 3, 5,10, 50,100[μm]の場合を計算した。

サーフェース・ロスは、カンチレバー表面層の吸着や欠陥が原因のエネルギーロスであり、カンチレバーの厚さが薄くなり表面層の厚みと幅の断面比が増すことにより支配的になる。次の式で表される⁽¹⁴⁾。

$$Q_{\text{Surface}} = \frac{E_{\text{SI}} \cdot w \cdot h}{\delta E_{\text{dis}} \cdot 2(3w+h)} \quad (8)$$

ここで w はカンチレバーの幅、 δE_{dis} はヤング率の損失と欠陥層の厚みを考慮した項であり表面層への分子の吸着、内部欠陥が起因すると考えられ、 δE_{dis} の値がカンチレバー表面の状態を表す項であると言ってよい。 Q_{Surface}^{-1} と厚みの関係を図V.2.2.2 (i) .2-4 に示した。欠陥のない表面状態に近づけば近づくほど、 δE_{dis} の値が小さくなり、欠陥が多く理想的な状態から離れれば δE_{dis} の値は大きくなる。サーフェース・ロスは表面の欠陥層を顕著に表すロスであるため、この影響が顕著になるようなカンチレバーの設計、測定環境を適切に選択すれば、表面欠陥層の定量的な比較が可能となる。

具体的に、カンチレバーの幅を 30[μm]長さを 150[μm]厚み 1.5[μm]以下で設計したカンチレバーを 0.1[Pa]以下の真空環境で測定を行うことと決定した。カンチレバー幅については、小さくすればするほどサーフェース・ロスの影響を選択的に大きくすることが可能であるが、計測装置の仕様から測定面積が 15 × 15[μm^2]以上必要であり、その効果も少ないため、計測に十分な幅を確保することとした。図V.2.2.2 (i) .2-4 に示したグラフをか

らわかるように、 $10[\mu\text{m}]$ 以上の幅であれば Q 値への影響は大きくはならず、 $h \ll 3W$ の条件を十分満たす状況であると考えられる。またカンチレバーの長さも、長ければ長いほど TED、サポート・ロスの影響は小さくなるが、エアダンピング・ロスの影響が大きくなること、経験的に作製時スティッキングによるデバイスの破壊が起こりづらい現実的な長さとして決定した。

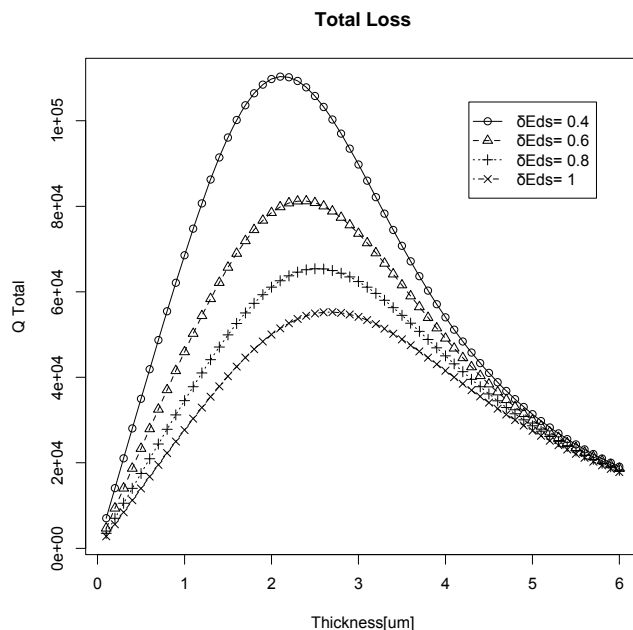
上記のカンチレバー設計値で式(1)に表した Q_{Total} の影響を計算したものを図 V.2.2.2 () .2-5 にて示す。エアダンピング・ロスについては測定環境が $0.1[\text{Pa}]$ 以下の真空であることを想定し、今回の報告で検討した以外のロスの影響は無視している。 δE_{ds} がそれぞれ $0.4, 0.6, 0.8, 1.0$ の時について Q 値とカンチレバーの厚みの関係を算出している。図 .2.2.2 () .2-5 からはサポート・ロスとサーフェース・ロスの支配的な状況が切り替わる地点で、 Q 値のピークを見ることができる。さらに、 Q 値の定量的な評価を行うため、次のような変換を行う。カンチレバーはサーフェース・ロスの式(8)に対して $h \ll 3W$ の条件を満たすと考えれば、次式のように書き換えられる。

$$Q_{\text{Surface}} = h \times \frac{1}{2} \frac{\partial Q}{\partial h} \quad (9)$$

次に、式(5)に示す共振周波数と Q_{Surface} との比を取ると、

$$Q_{\text{Surface}} / f_n = \frac{1}{2\pi} \frac{\partial \pi^2}{\partial h} \sqrt{\frac{\rho V \delta E_{\text{ds}}}{3}} = \text{Constant} \quad (10)$$

となり、厚みの影響はなくなる。そしてその値は δE_{ds} の大きさで上下することとなり表面の欠陥層を評価できる。以上の理論検討から、カンチレバーの共振周波数と Q 値の初期値を計測したカンチレバー表面へ中性粒子ビームエッチングを施し、その Q/f の特性評価をすることでダメージレスなエッチングが行えているかどうかを確認可能である。(i) .7 付録にグラフを取得するための計算プログラムソースを示す。



図V.2.2.2 (i) .2-5. カンチレバーの幅が 30[μm]、長さが 150[μm]の場合に、TED とサーフェース・ロス、サポート・ロスの影響を考慮した Q 値と厚みの関係。表面の欠陥量を表す係数 δE_{ds} が 0.4,0.6,0.8,1.0 の場合を計算した。

(i) .3 中性粒子 TEG 作製

この項では、中性粒子 TEG(カンチレバー)の作製プロセスフローについて述べる。今年度は3度の試作を行った。それぞれ、事前のプロセス条件出しとして行った4インチウェハを用いた産業技術総合研究所クリーンルームでの試作、外部ファウンダリでの試作、Gデバイスセンターつくば8インチラインでの試作である。これらのプロセスフローそして、完成した8インチウェハについて寸法精度の詳細な検討について報告する。実際の計測には外部完成したウェハ枚数等の関係から外部ファウンダリで試作した中性粒子 TEG を使用した。

(i) .3.1 4インチウェハでのカンチレバープロセスフロー

8インチウェハ上でカンチレバーを作製するにあたり、プロセス条件出しのために産業技術総合研究所(略称:AIST)2G-CRにて4インチウェハでのプロセスを行った。プロセスフローと完成したカンチレバーTEGの全体像を図V.2.2.2 (i) .3-1に示す。プロセスフローを説明する。まず、デバイス層が1.5[μm]のSOIウェハを用意する。一般的なウェハメーカーでは、厚みの公差がおおよそ±0.5[μm]で販売しており、カンチレバーの共振周波数に大きなばらつき(おおよそ90~70[kHz])が発生することが予想されるが、SOIウェハデバイス層を研磨で仕上げる工程上、これ以上の精密な公差を安価なウェハで実現するのは難しい。

4 インチウェハでのプロセスでは、デバイス層の厚み 1.15~2.39[um] 中間酸化膜層 0.48~0.51[um] 基盤層厚さ 520~521[um] の 4 インチ SOI ウェハを使用した。デバイス層にフォトリソグラフィ技術でマスクパターンを作製し、Deep-RIE でデバイス層をエッチングし、基盤層を裏側から同じく Deep-RIE エッチングを施しカンチレバー部分のリリースとデバイス把持部の形成を行う。その後、中間酸化膜をフッ酸で除去して完成である。図

.2.2.2 (i) .3-1 の右側の写真を見ればウェハ面内一様にデバイスが形成できていることがわかる。4 インチウェハでの試作による条件だしから様々な問題点が見つかった。まず、基盤層のエッチングには 520[um] 以上の深い長さをエッチングする必要がある。8 インチウェハでは十分な強度を確保するため、さらに基盤層の厚い(およそ 725[um])ウェハが一般的である。この基盤層エッチング行程には、時間と、エッチングガスを多量に使用し、寸法ばらつきから特性ばらつきを引き起こす。8 インチウェハを使用したプロセスでは、基盤層の裏抜きを行わないプロセスフローへ変更することとした。

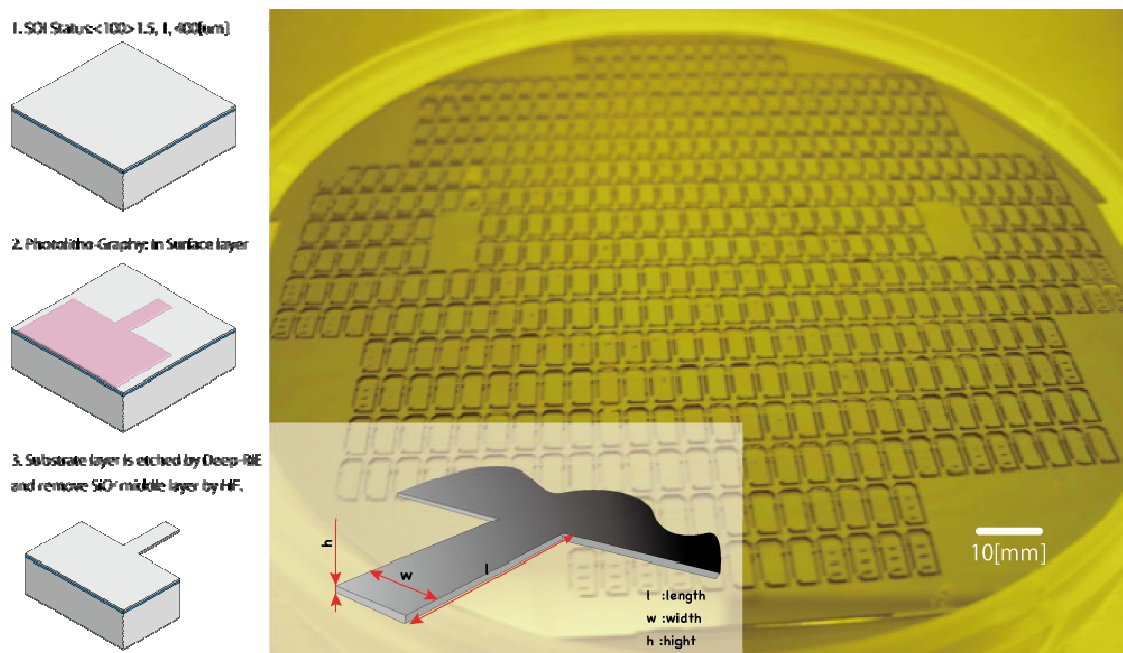


図 V.2.2.2 (i) .3-1. 中性粒子 TEG の 4 インチウェハを使用したプロセスフローと完成したウェハの全体像。

(i) .3.2 外部ファウンドリによる 8 インチウェハでの試作

大口径 8 インチウェハでのプロセスを行うため、プロセスを裏側からの基盤層加工によるカンチレバー部リリース行程から、カンチレバー直下の中間酸化膜層をフッ酸のサイドエッチングでリリースするものへと変更した。この変更によりプロセス時間の大幅な削減、プロセスの単純化による寸法ばらつきの低減が期待できる。

8 インチウェハを用いたカンチレバーの試作を外部ファウンドリへ委託した。ファウンドリでの試作プロセスフローを図 V.2.2.2 (i) .3-2. に示す。プロセスフローについて説明

する。デバイス層の厚み 1.5[um]中間酸化膜層 2.0[um]基盤層厚さ 725[um]の SOI ウェハを使用する。まず初めに LPCVD による酸化膜をおよそ 1um 形成し、フォトリソグラフィ技術によりマスクパターンを形成する。さきほど成膜した表面酸化膜をエッチングし、これをマスクとしてカンチレバーの形状にシリコンのデバイス層を加工する。最後に HF-Vapor 装置で約 15[um]カンチレバー下の中間酸化膜層をサイドエッチし、カンチレバーをリリースして完成である。HF-Vapor 装置を使用することで、カンチレバーと基盤層のスティッキング現象は起こらない。完成したカンチレバーの寸法ばらつき測定グラフ結果と SEM 画像を図 V.2.2.2 (i) .3-3.に示す。完成ウェハ 11 枚の面内 5 点 (上、中、下、左、右) での平均値と 3 値をグラフにした。設計値 30um であるカンチレバー幅についてすべての測定点での平均を計算すると 30.4um、3 値は±1.69um であった。3 値は正規分布に従う確率変数の観測値が平均値から 99.7%の区間に入ることを示し、デバイス設計する際の指針となる値である。HF-Vapor のサイドエッチ量でも同様の計算を行った。設計値 20um に対し、平均値は 23.84um、3 値は±17.53um であった。ウェハ面内分布を見てみると中心部分のエッチングレートが遅く、周辺部特に上右のレートが早いのがわかる。これは HF-Vapor 装置のガス導入口と関係がある。3 値が設計に対して大きすぎるので、正確な設計値を反映することが難しいプロセスであることがわかった。

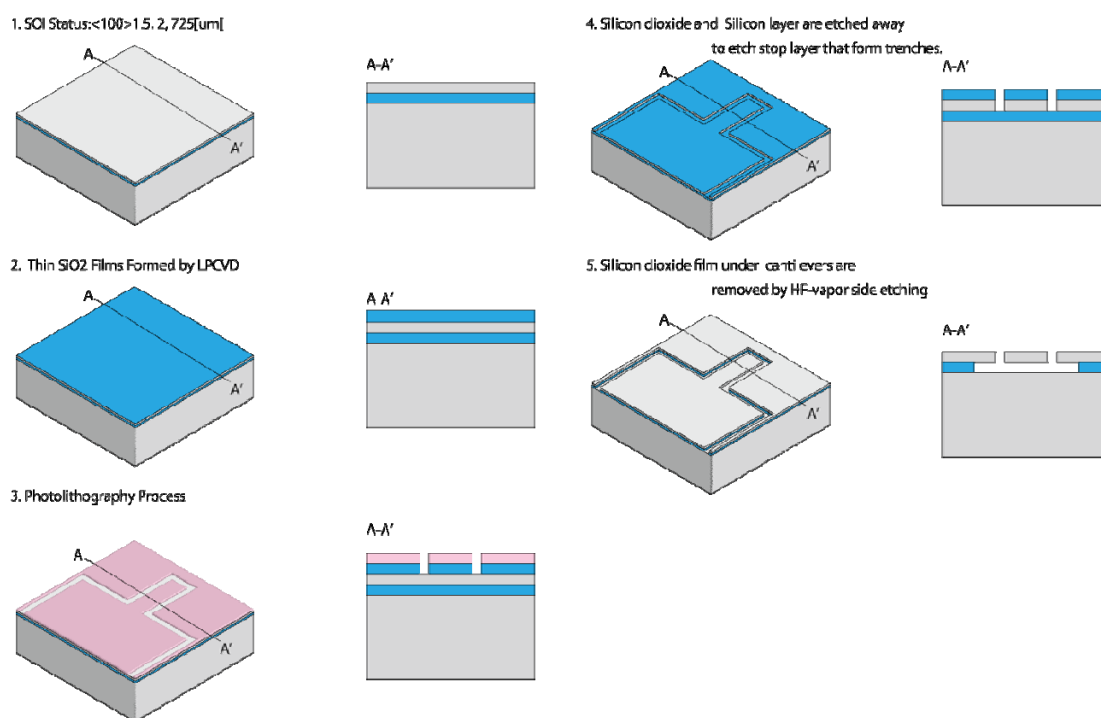
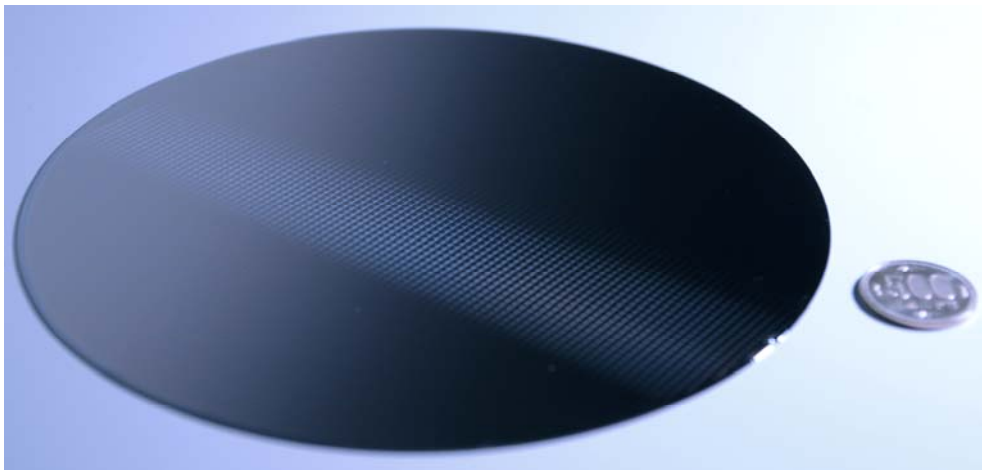
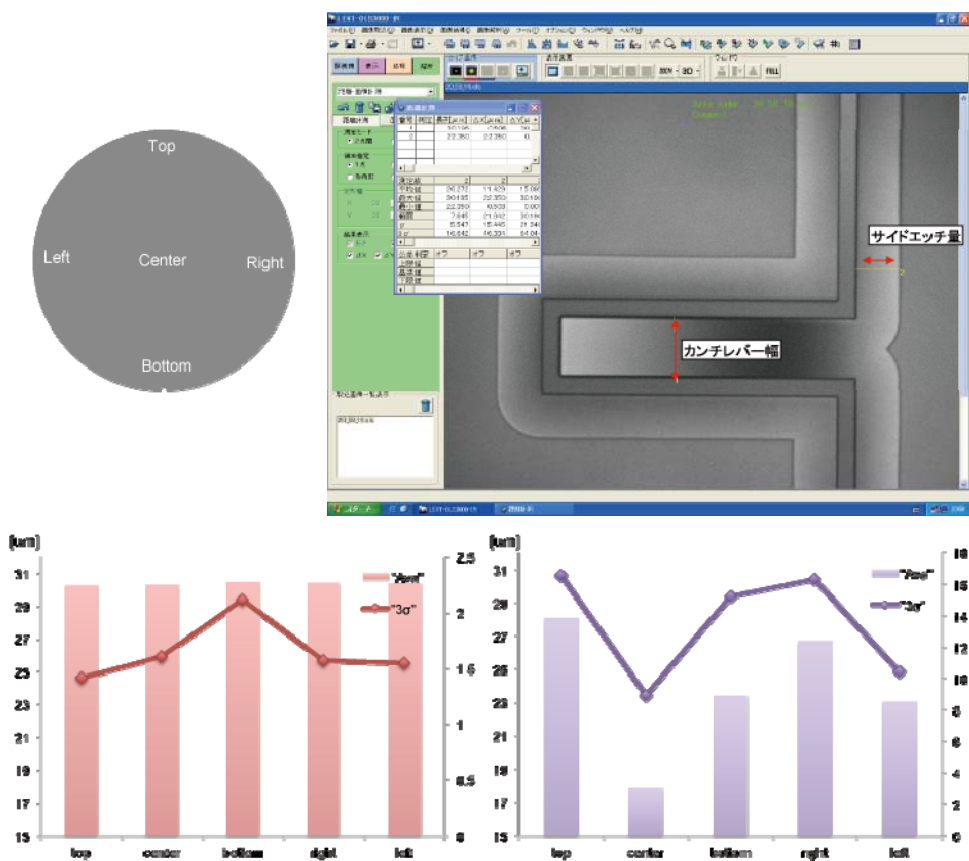


図 V.2.2.2 (i) .3-2. 中性粒子 TEG の 8 インチウェハを使用したファウンダリでのプロセスフロー



図V.2.2.2 (i) .3-3. ファウンダリで外注した中性粒子 TEG の全体像。8 インチウエハ面内一様に形成されている。



図V.2.2.2 (i) .3-4. ファウンダリで外注した 8 インチウエハ上に形成されたカンチレバーの SEM 画像と面内 5 点の完成ウエハ 1 枚の寸法比較結果 (下側のグラフ)。

(i) .3.3 G デバイスセンターによる 8 インチウェハでの試作

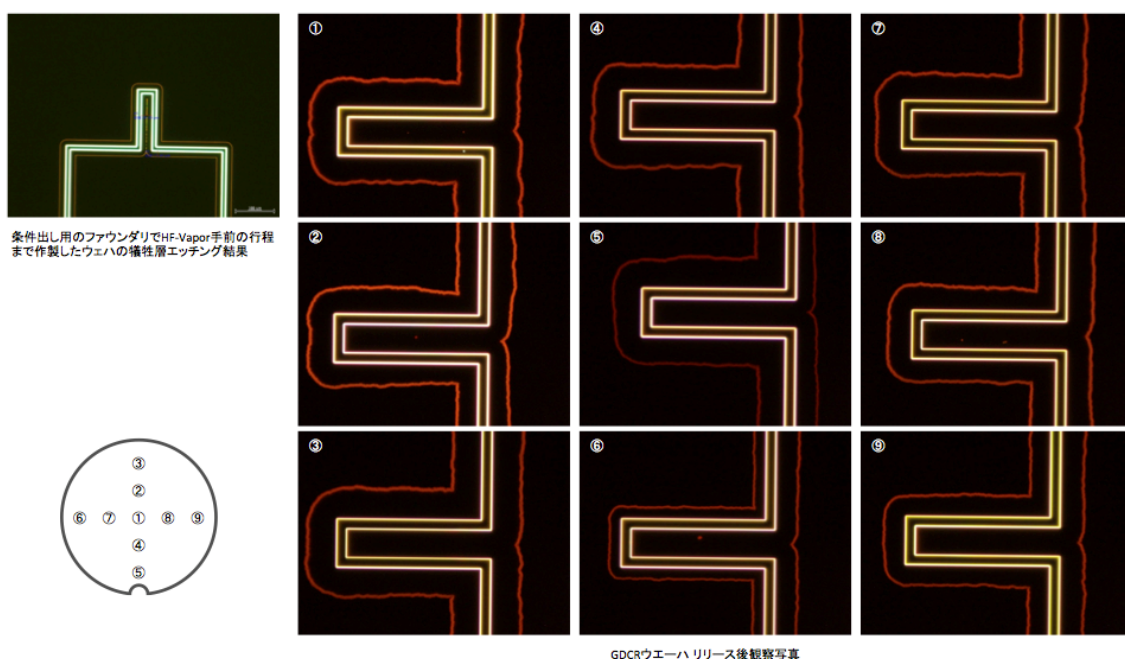
G デバイスセンタークリーンルームでも中性粒子 TEG(カンチレバー)の試作を行った。G デバイスセンタークリーンルームで実施したプロセスフローとコントロールカードを図

.2.2.2 (i) .3-5.に示す。G デバイスセンタークリーンルームでは CVD 装置が 12inch 対応のものしかないので、ファウンドリプロセスからフォトレジストのみでパターンを形成するプロセスへと変更した。完成したウェハは CR の立ち上げ遅延等の理由から 1 枚しか確保できなかったが、面内の加工精度について測長 SEM を用いて詳細に検討した。図

.2.2.2 (i) .3-6.に G デバイスセンタークリーンルームで試作した 8 インチウェハ、カンチレバーの寸法ばらつき測定結果を示す。カンチレバー幅の平均値は 30.24[um]、3 値は 0.5050[um]であった。中心からおよそ 20[um]左側に中心をシフトしたところから同心円上にカンチレバー幅が大きくなっている。次に HF-Vapor の加工精度について検討した。

図 V.2.2.2 (i) .3-7.に G デバイスセンタークリーンルームでの HF-Vapor 加工結果を面内 9 点での顕微鏡撮像結果を示す。暗視野モードで撮像することで、中間酸化膜のエッチング状況が明確にわかる。図 V.2.2.2 (i) .3-7.の左上で示すのが、条件出しのためにファウンドリで HF-Vapor 手前までの加工をしたものを G デバイスセンタークリーンルームの HF-Vapor 装置で加工した際の画像であるが、一様にエッチングされている様子がわかる。しかし、G デバイスセンタークリーンルームで初めからプロセスを流したウェハでは (図 V.2.2.2 (i) .3-7.右側 9 枚) いびつな形状でエッチングが進行してしまった。使用した SOI ウェハは同じメーカーから同条件で購入したものを使用しており、中間酸化膜の条件からおこったものであることは考えづらい。Deep-RIE で発生するデポ物が洗浄により取りきれいでなかったことが原因にあると考えられる。

チウエハ上のカンチレバー幅の測定結果。面内 4993 点について計測を行った。



図V.2.2.2 (i) .3-7. G デバイスセンタークリーンルームでの HF-Vapor 加工結果。8 インチ面内 9 点で顕微鏡暗視野モードでの撮像を行った。

(i) .4 計測

中性粒子 TEG(カンチレバー)の特性を評価するために、カンチレバーの共振周波数と Q 値の値を正確に測定しなければならない。又、計測環境として (i) .2.1 で説明したようにエアダンピング・ロスの影響を無視するため真空環境下での計測が必要不可欠である。さらに、面内特性分布の安定な計測のために、8 インチウエハも挿入可能な大型のチャンバーを必要とする。機械振動の測定方法は、レーザドップラー計測方を採用し、カンチレバーの加振にはシリコンでの吸収率が高い波長 405nm のレーザから熱拡散による曲げモーメントを発生させて振動させる加振法、光熱励振法を採用した⁽¹⁰⁾。この励振法ではピエゾ加振に比べ周波数のスプリアスが極めて少ない⁽¹¹⁾。以上のような環境、測定法を実施するために今回新たに測定装置の開発にも取り組んだ。この装置は、他のセンサ TEG デバイスの計測を行うために真空プローバとレーザドップラー計測を同時に実現可能なよう設計している。また中性粒子ビームエッチング装置、8 インチ対応化のためにアパーチャの設計に取り組みその妥当性を理論と実験から検証した。中性粒子ビームエッチング、ダメージレス効果面内分布測定のために、8 インチウエハ面内 52 点についてカンチレバーの共振周波数と Q 値の初期特性を計測し、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察した。

(i) .4.1 計測装置

今回、中性粒子ビームエッチング装置の面内特性分布を正確に測定するため、完成したウェハをチップ化後の計測では効率も悪く測定箇所も計測毎に大きく変化してしまう可能性がある。8インチオンウェハ状態で機械振動計測を行う装置は一般的に存在しない。専用の装置開発を行う必要があり、8インチウェハ上に存在するカンチレバーの共振周波数とQ値を容易に計測できるような計測装置を考案した。カンチレバーの振動を計測するにあたり、高周波数での計測が可能なレーザドップラー計測方法を採用した。レーザドップラー計測法とはドップラー効果と光ヘテロダイン法を利用して、振動速度、振動周波数を検出するものである。光の周波数は非常に高くドップラーシフトを直接検出するのは困難なため、フォトダイオード、アバランシュフォトダイオード(Avalanche Photo Diode : APD)などの二乗検波特性を持つ光検波器を使用する。周波数偏移する前の光を参照光として同時に入射し干渉させることにより周波数を検出する方法を、光ホモダイン検波という。参照光の周波数を音響光学変調器(Acoustic Optical Modulator : AOM)によりシフトしておき、周波数偏移の符号まで検出可能にしたものが光ヘテロダイン法である。カンチレバーの励振方法には光熱励振法を採用した。光熱励振法とはカンチレバーの梁にレーザ光をあてることで熱エネルギーを与え、カンチレバーの上面と下面に温度差を発生させる。レーザに当たった上面付近は熱膨張による伸長からたわみが生じるため、レーザ強度を変調させることによってカンチレバーを任意の周波数で加振することが可能となる。一般的に励振法に用いられるピエゾ励振はピエゾ接触面からカンチレバー先端までの機械的特性が付加される影響からスプリアスが多く発生するが、光熱励振では直接カンチレバーのみ振動エネルギーを与えるのでこの影響が少ない。これらの理由から光熱励振法を採用した。また励振レーザ波長はSiでの光吸収率が高い405nmの半導体レーザを使用した。図V.2.2.2(i).4-1.に装置の構成図、図V.2.2.2(i).4-2.に装置の全体像を示す。装置構成図について説明する。真空チャンバー内にはX、Y、Zのステージを内包する構造となっている。プローバはチャンバー上面からアプローチし、先端針把持部までの手の長さを極力短くできるように工夫した。また、プローバには押し圧センサを設けており、電極パッド等への押し当て状況を把握できるようになっている。センサ、XYZステージ、そして真空ポンプは専用ソフトによりPC上で一括制御できるようになっている。また、ウェハ上のデバイスアプローチ状況をTCP/IP接続により送受信することにより測定のオートメーション化を可能としている。

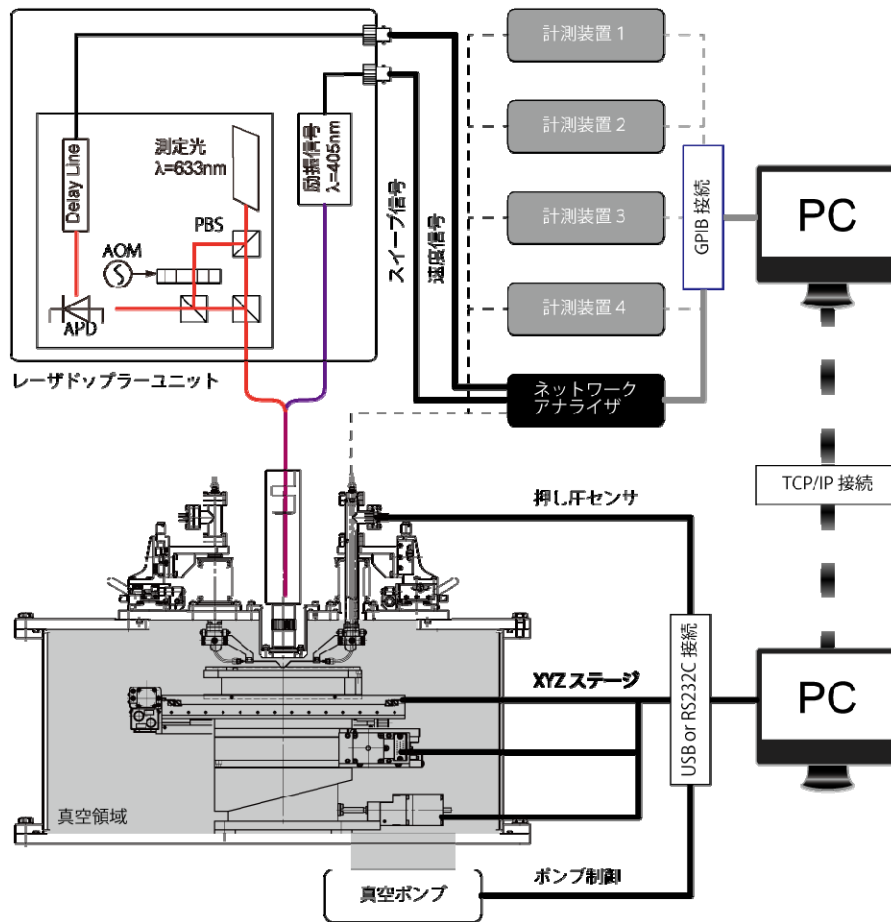


図 V.2.2.2 (i) .4-1. 計測装置の構成図

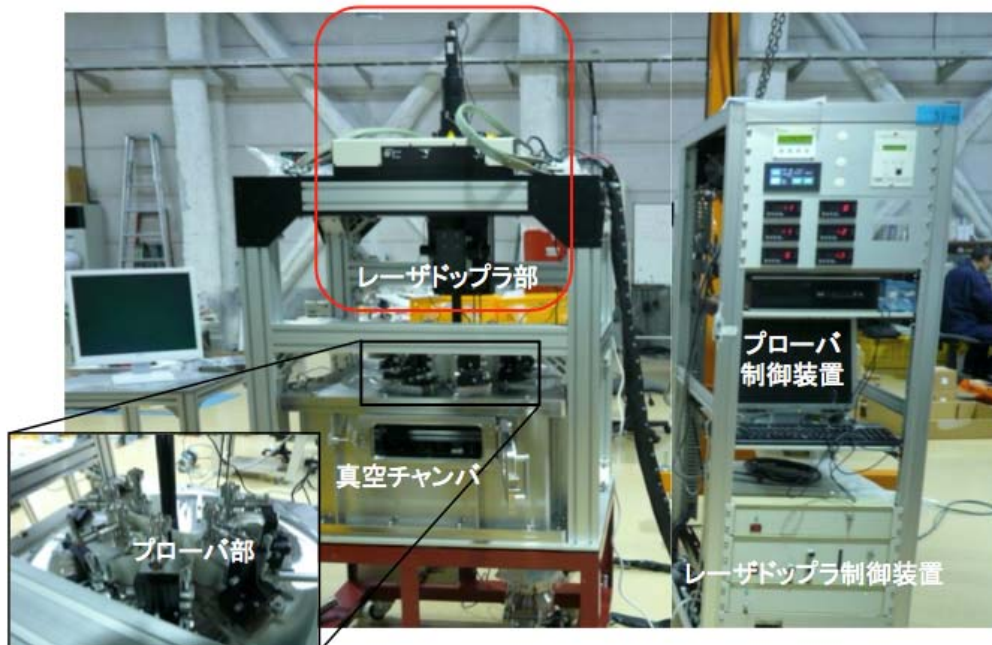


図 V.2.2.2 (i) .4-2. 計測装置の全体写真

(i) .4.2 中性粒子ビームエッチング装置 8 インチ用アパーチャ設計

8 インチ対応中性粒子ビーム装置を開発するに当たり、アパーチャの設計が重要なポイントとなる。まず、ガスの流れおよび圧力が大口径化によりどのように変化するかを理解し、制御すること。それから、大口径化した際の実際のエッチング特性 (エッチング形状、面内均一性) を調べ、最適化することが重要である。まず、8 インチ対応とするためには、アパーチャ上下の圧力をそれぞれ望ましい範囲にしなければならない。アパーチャ上下の圧力は主に、装置の真空ポンプの能力・アパーチャのコンダクタンス・ガス流量によって決まる。ここで、アパーチャ上側とは図 1 のプラズマ室で、プラズマが生成される空間、アパーチャ下側とは図 V.2.2.2 (i) .4-3. のプロセス室で、エッチング対象物が置かれ、アパーチャ上側で生成したプラズマからビームが引き出されてエッチング対象物の加工が起こる空間である。アパーチャ上側にはガス導入ラインとプラズマ生成のためのアンテナ、アパーチャ下側にはエッチング対象物のほかに真空ポンプへの接続が存在する。

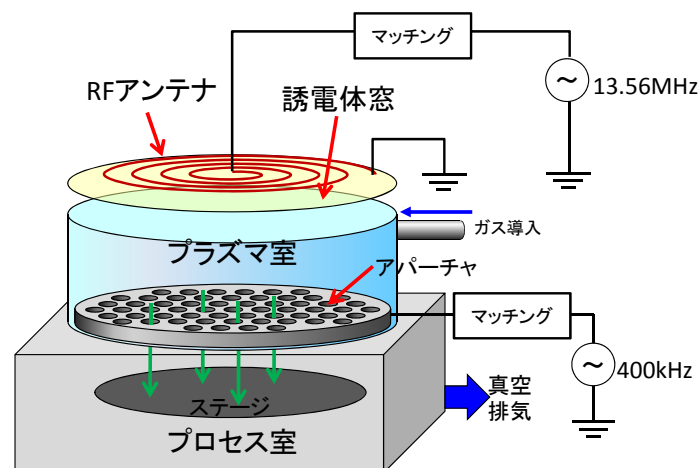


図 V.2.2.2 (i) .4-3. 中性粒子ビーム装置の概略図

次に、エッチング特性を維持することが必要である。アパーチャの開口率が低くなるとレートが低くなるばかりかエッチング特性に細かな分布が生じる恐れがある。極端な場合には、アパーチャの穴の形状や分布がそのまま被エッチング物に転写される恐れもある。これを防ぐには、アパーチャとステージとの距離 (20mm) とアパーチャアスペクト比、アパーチャの穴の分布を考慮して設計する必要がある。8 インチ全体でのマクロな均一性を維持するためには、プラズマそのものの均一性が達成されることが第一に必要となる。これについては平成 21 年度までに達成されている。また、アパーチャとステージの間の空間に圧力勾配が生じると均一性を損なう可能性がある。圧力勾配を生じさせないため、あるいは圧力勾配が生じてでも無視できるようにするためには、圧力を十分に下げる必要がある。中性粒子ビーム装置内の圧力を求めるに当たり、アパーチャを、多数の配管が並列につながったものとみなすことができると考えた。配管をガスが流れるとき、その流量 Q は両端

の圧力を P_1 、 P_0 として、

$$Q = C (P_1 - P_0) \quad (1)$$

と表現することができる。ここで、 C をコンダクタンスと呼ぶ。ガスの流れ方は、ガスの平均自由行程 と系のサイズ L の大小関係で大きく異なる。クヌーセン数 $K_n = \lambda / L$ を導入し、 K_n が小さいときを粘性流領域、大きい時を分子流領域という。粘性流領域と分子流領域ではコンダクタンスも異なる。ここで、アパーチャのサイズは mm サイズ、平均自由行程は cm サイズの領域を扱うので、分子流領域である。Knudsen によると、配管が短い極限、つまりオリフィスでは、コンダクタンスは以下の式で表される。

$$C_{om} = 11.43 (T / M)^{0.5} a^2 \quad (2)$$

ここで、ここで C_{om} は L/s 単位のコンダクタンスで、添え字 o はオリフィス、 m は分子流を意味している。T は温度でケルビン単位、M は分子量で g/mol 単位、 a は配管の半径で cm 単位である。配管が長い極限では、流量は

$$Q_{lm} = (8a / 3l) C_{om} (P_1 - P_0) \quad (3)$$

と表される。ここで l は配管の長さで cm 単位である。この式は真空技術の教科書などで広く紹介されているが、配管が短い場合は現実の値からずれてくる。そこで、透過係数 を導入し、

$$Q_m = C_{om} (P_1 - P_0) \quad (4)$$

と表現することを Clausing が提案した。この を求める数表や式は、Clausing 自身のものも含め、いくつか発表されている。ここでは、Santeler が提案した、簡単かつ正確な式を採用する。この式は、以下の通りである。

$$= 1 / (1 + 3l' / 8a) \quad (5)$$

ここで、 l' は以下の式で表される。

$$l' / l = \{4/3 + k(l/a)^e\} / \{1 + k(l/a)^e\} \quad (6)$$

ここで、 k と e は、 $k = 0.128089$ 、 $e = 1.10669$ のとき絶対誤差が最小となり（最大 0.001165）、 $k = 0.168958$ 、 $e = 0.935413$ のとき相対誤差が最小となる（最大 0.428%）。単純には、 $k = 1/7$ 、 $e = 1$ のとき、

$$l' / l = 1 + 1 / \{3 + 3l / 7a\} \quad (7)$$

と単純な形となり、相対誤差の最大値は 0.7% となる。

アパーチャを構成する 1 個の穴のコンダクタンスは、上記の式で求めることができる。アパーチャ全体のコンダクタンスは、これを穴の個数倍したものと考えられる。穴の個数 N は、穴の半径（たとえば 0.5mm）を a 、アパーチャ範囲の半径（たとえば 100mm）を r 、開口率（たとえば 0.5）を R とすると、

$$N = R (r/a)^2 \quad (8)$$

と求めることができる。これらから、アパーチャ全体のコンダクタンス C_{all} は

$$C_{all} = N C_{om} \quad (9)$$

と求められる。

アパーチャのコンダクタンスが求まると、アパーチャ上下の圧力を求めることができる。まず、定常状態では、アパーチャを通るガスの流量はガスの供給量と同じであることから、アパーチャ下側の圧力 P_b をまず決定できる。ガス流量を Q_0 、真空ポンプの排気能力を P とすると、

$$P_b = Q_0 / P \quad (10)$$

次に、ガス流量とアパーチャのコンダクタンスから、アパーチャ上側と下側の圧力差が求められる。アパーチャ上側の圧力を P_a とすると、

$$Q_0 = C_{all} (P_a - P_b)$$

$$P_a = P_b + Q_0 / C_{all} \quad (11)$$

と求められる。

口径 10cm タイプの中性粒子ビーム装置を用いて、アパーチャ上下の圧力を実測し、上記の計算式による計算結果と比較した。計算に当たっては、ポンプの排気能力とアパーチャ上側圧力を未知数とし、ガス流量（設定条件であり既知である）とアパーチャ下側圧力（通常の装置セットアップで測定可能である）を与えてアパーチャ上側の圧力を計算した。この計算値を、特別な装置セットアップで測定したアパーチャ上側圧力と比較した。図

.2.2.2 (i) .4-4. は、このときの、アパーチャ上側の圧力の計算値と実測値の比率をプロットしたものである。なお、このときのアパーチャは、穴径 1mm、厚さ 10mm、アパーチャ範囲 100mm、開口率 50% である。

この結果を見ると、計算は実測とよい一致を示していることが分かる。流量が低い領域では誤差が大きいが、これは非常に低い圧力を測定するため、測定値の誤差が大きいためだと考えられる。なお、このように、アパーチャを設計する上で重要な圧力の計算ができていることが示された。計算の有効性が証明されたことにより、この計算方法を用いて、様々なアパーチャを用いたときの上下圧力を予測することが可能となる。すなわち、圧力予測に基づいたアパーチャの設計が可能となる。

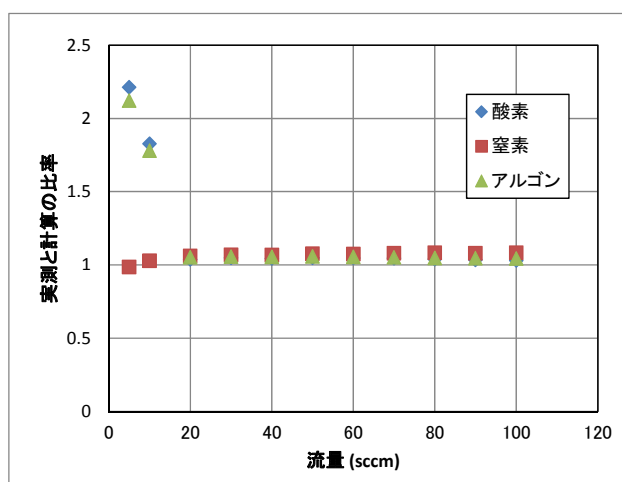


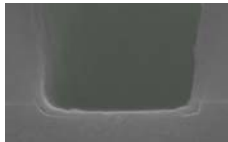




図 V.2.2.2 (i) .4-4. アパーチャ上側圧力の実測と計算の比率

平成 21 年度までは直径 120mm 範囲のアパーチャを用いていたが、直径 200mm 範囲のアパーチャを用いたエッチングの検討を行った。これまで標準で用いていた、穴径 1mm ・厚さ 10mm ・範囲 120mm ・開口率 50%のアパーチャを用い、塩素ガス 80sccm を流しアパーチャ下圧力が 0.29Pa のとき、アパーチャ上圧力は 3.22Pa であると求められる。ガス流量は多い方がエッチングレートの上昇につながることが分かっている。これはアパーチャ上側の圧力が高くなることでプラズマ密度が高くなり、ビームフラックスが向上するためだと考えられる。しかし、ガス流量を増やすとアパーチャ下側の圧力も上がってしまう。アパーチャ下圧力が 0.29Pa のとき、ビームの平均自由行程は約 2cm であり、これ以上圧力を上げると、アパーチャから放出されたビームが加工対象のウェハ（アパーチャから 2cm の距離に設置される）に到達するまでに減衰してしまうと考えられる。すなわち、アパーチャ下圧力が 0.29Pa となるようにガス流量を調節するのが最適と考えられる。

ここで、穴径・厚さ・開口率はそのままで、範囲を 200mm としたアパーチャを用いた。アパーチャ下の圧力はアパーチャのコンダクタンスに依存しないため、120mm の場合と同じく塩素ガス 80sccm、下圧力 0.29Pa とした。式(11)を用いて、このときのアパーチャ上圧力は 1.35Pa と求められた。およそ 1Pa 以上でプラズマが正常に生成すると考えられる。従って、この条件はアパーチャ上では正常にプラズマが生成し、かつアパーチャ下ではビームがほとんど減衰せずに基板に到達する条件であると考えられる。なお、塩素ガス流量を 60sccm としたとき、アパーチャ上下の圧力はそれぞれ 1.01Pa と 0.22Pa と計算される。すなわち、このアパーチャを用いた場合、ガス流量の調節可能範囲は 60sccm~80sccm であると予想される。

この条件でエッチングを行った結果を図 V.2.2.2 (i) .4-5.に示す。塩素 80sccm の条件では、 V_{pp} が高い条件では堆積が起こってしまうが V_{pp} を下げた条件ではエッチングが可能となった。エッチレートを上げるために、塩素を徐々にフッ素に置き換えていった。フッ素 6sccm+塩素 74sccm の条件では、エッチング形状が垂直なまま、エッチレートが上昇した。さらに、フッ素 40sccm+塩素 40sccm ではエッチレートが大きく上昇した。

Vpp	Cl ₂ +F ₂ (sccm)	80+0	74+6	40+40
	200V		hx280, 2.93nm/min a=0(垂直), r=0.727 	hx290, 4.6nm/min a=0(垂直), r=0.731 
500V		hx277, ---- nm/min depo, ----- 	hx288, 6.3nm/min a=0(垂直), r=0.852 	hx284, 36nm/min a=0.438, r=0.922 

図V.2.2.2 (i) .4-5. 200mm 範囲のアパーチャを用いたエッチング結果

エッチングレートの面内均一性については、以下のように考えることができる。本装置は市販の8インチエッチャーを元に構築したため、プラズマ源の面内均一性は非常によい。プラズマ粒子は容器の壁面に到達すると消滅するため、容器中央付近でプラズマ密度が高く、壁面付近で低くなる。そのため、市販の装置では、チャンバー中心付近でアンテナ密度を低く、周辺のアンテナ密度を高めるような仕組みとし、結果として面内均一性が得られるように設計されている。中性粒子ビーム装置では、装置内にアパーチャを導入するためにチャンバー壁面に改造を加えており、面内分布が変化する可能性がある。

エッチングレートの面内均一性を実際に評価するため、直径8インチの範囲のうち、中央と端付近（中央から8cmの位置）についてエッチングレートを比較した。その結果を、中央と橋付近におけるエッチングレートをそれぞれ ER_c と ER_e とし $r = ER_e / ER_c$ というパラメータで表現することとし、その値を図Vに記載した。いずれも r 値は1よりわずかに低い値で、中央付近の方が周辺部分と比較しエッチングレートがわずかに早い結果となっている。しかし、エッチングレートの面内均一性は±4%から、最大でも±15%以内となっており、問題のない値だと考えられる。

なお、エッチング形状（アスペクト比）向上のために、よりアスペクト比の高いアパーチャを用いる可能性がある。たとえば、穴径 0.5mm ・ 厚さ 10mm ・ 範囲 200mm ・ 開口率 50%のアパーチャを用いると、塩素 80sccm を流したとき、アパーチャ上下の圧力はそれぞれ 2.22Pa と 0.29Pa と予想される。さきほどの穴径 1mm のアパーチャと比較し、アパーチャ上下の圧力差が大きくなっている。これは、穴径を小さくすることでコンダクタンスが低下するためである（穴径を小さくするとアパーチャ1個あたりのコンダクタンスは穴径の3乗で低下し、穴数は穴径の-2乗で増加するため、全体としてコンダクタンス

は穴径に比例して低下する)。一方、塩素 36sccm を流したときはそれぞれ 1.00Pa と 0.13Pa と予想される。すなわち、ガス流量の調節可能範囲は 36sccm~80sccm となり、さきほどの穴径 1mm の場合と比較して広がった。これは、エッチング条件を最適化できる範囲(自由度)が広がったことを意味する。すなわち、エッチング形状向上のためにアパーチャのアスペクト比を向上させたことが、結果として、プロセスウインドウの拡大に貢献したと言える。

(i) .4.3 特性評価

カンチレバーの特性計測にはネットワークアナライザを使用し、周波数のスイープ信号で励振レーザの変調を行う。励振レーザはカンチレバーの根元付近に照射し、設計したカンチレバーの共振周波数付近(今回の設計では 50kHz~100kHz)の信号を送れば、一次の振動モードでカンチレバーを共振振動させることが可能である。振動の速度信号は、一次振動モードで速度が最大となるカンチレバー先端付近へ測定レーザをエイミングし計測可能する。ただ、測定信号が工学系へと還らないような荒れた表面や、測定レーザに対して垂直でない面に対しては計測することができない。レーザドップラーの FM 検波回路や、フィルター等を介して出力された速度信号をネットワークアナライザへ入力することで、共振周波数と Q 値を計測した。実際の測定画面を図 V.2.2.2 (i) .4-6. に示す。測定は、カンチレバーの初期特性を面内 52 点で計測したウェハで、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察する手法を取った。ウェハは外部ファウンドリで試作したウェハを使用した。外部ファウンドリで作製したウェハはプロセス途中でデバイス層への LP-CVD 酸化膜成膜を行っているため、表面へプラズマダメージが加わっている。そのため初期の表面欠陥状況は低い値を示した。しかし、その後中性粒子ビームエッチングを行った結果、表面状態が理論値へと近づいてく様子が観察できる。中性粒子ビームエッチングがダメージレスなエッチング方法であることが証明されたと考える。また、表面状態は 2 分間、およそ 100nm エッチング行ったところで特性のサチュレーションが起り、その後の更なる追加エッチングでは特性の状態がほぼ変化しない結果となった。表面状態の推移を図 V.2.2.2 (i) .4-7. に示す。

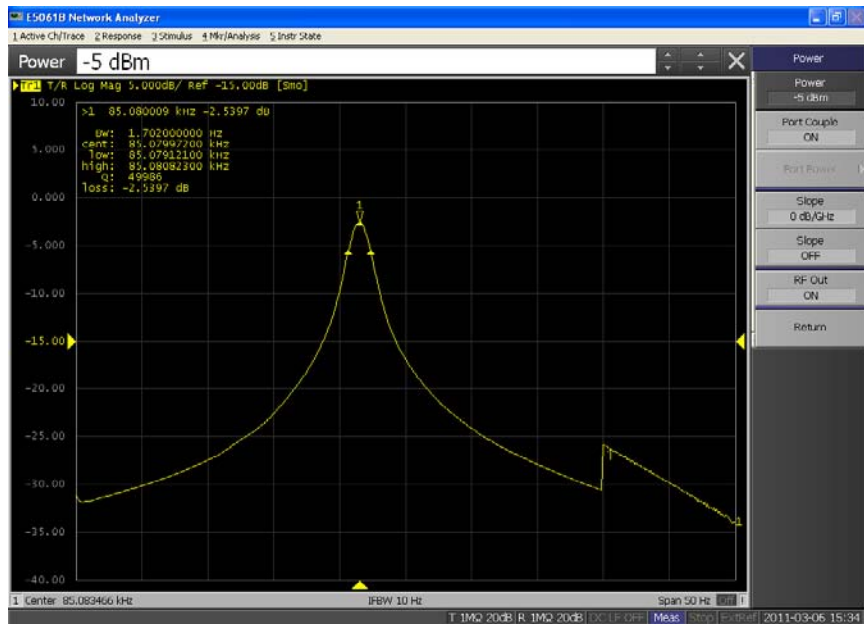


図 V.2.2.2 (i) .4-6. ネットワークアナライザでの測定画面

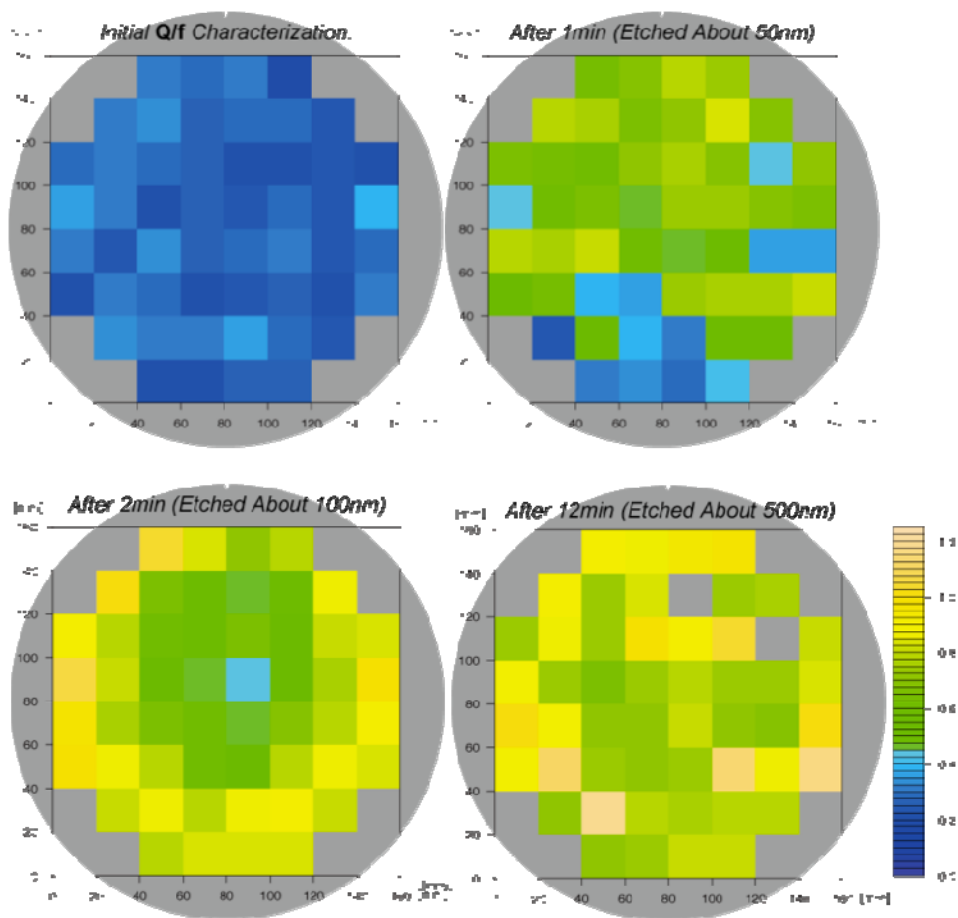
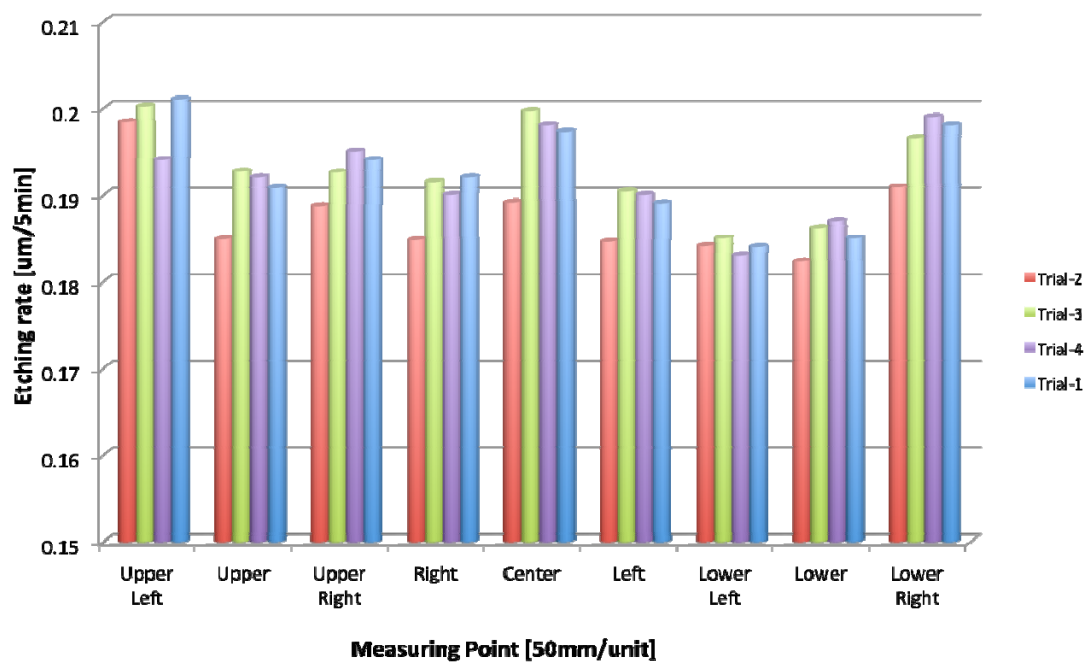


図 V.2.2.2 (i) .4-7. 中性粒子エッチング後の特性推移。

(i) .4.4 考察

中性粒子ビームエッチング装置のアーチャ上下の圧力を計算する方法について検討し、その妥当性を実験によって示した。さらに、大口径（範囲 200mm）アーチャを用いたエッチングの検討を行い、200mm 範囲でのエッチングが可能であること、エッチングレートの面内分布は中央付近が周辺部分より若干エッチングレートが高いものの、面内均一性の観点からは問題ないことが示された。図V.2.2.2 (i) .4-8.にエッチングレート分布を面内 9 点について計測した結果を示す。

ここで、図V.2.2.2 (i) .4-7.を今一度見てみると、中性粒子ビームエッチングのエッチングレートのみによる分布を表しているとは考えづらい。約 50nm エッチング後の特性分布のみを考えればおおよそエッチングレートとの相関だと思われるが、その後の 100nm エッチング後の特性分布は周辺部で表面特性が良く、中心部で表面特性はほぼ変化していない。中性粒子ビームエッチング、真の大口径化のためにはエッチングレートの平滑化のみではなくこれらのダメージレス効果の分布と合わせてアーチャの設計を行うことが必要であると思われる。



図V.2.2.2 (i) .4-8. 中性粒子エッチングの面内 9 点のエッチングレート分布

(i) .5 まとめ

カンチレバーのエネルギーロス理論について検討し、共振周波数で振動するカンチレバーの Q 値についてカンチレバー表面の欠陥状態を表す Q_{surface} が支配的な条件を測定環

境と設計値を適切に選択することにより実現した。カンチレバーの試作について平成22年度は3度の試作を行った。それぞれ、8インチウェハを使用するプロセス、事前の条件出しとして行った4インチウェハを用いた産業技術総合研究所クリーンルームでの試作、外部ファウンダリでの試作、G デバイスセンターつくば8インチラインでの試作である。また、完成した8インチウェハについては寸法精度等の詳細な検討を行った。カンチレバーの特性を評価するために、8インチウェハも挿入可能な大型の真空チャンバー内で、機械振動を測定するレーザドップラー測定機構、光熱励振機構、プローバによる電気特性評価機構、を同時に計測可能な世界で初めての測定装置開発を行った。そして、中性粒子ビームエッチング装置については8インチ対応化のために適切なアパーチャの設計に取り組みその妥当性を理論と実験から検証した。8インチウェハ面内に一様作製したカンチレバーを中性粒子ビームエッチング、ダメージレス効果面内分布測定のために、ウェハ面内52点についてカンチレバーの共振周波数とQ値の初期特性を計測し、中性粒子ビームエッチング後の特性推移を観察し、これからの中性粒子ビームエッチング装置開発に重要な指針となるデータを取得できた。

(i) .6 参考文献

- (1) H. Ootera: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33(1994) pp. 4276-4280.
- (2) K. P. Cheung and C. S. Pai: IEEE Device Lett. Vol. 16(1995) pp. 220-222.
- (3) J. R. Woodworth and B. P. Aragon: J. Vac. Sci. & Technol. A Vol. 17(1999) pp. 3209-3217.
- (4) T. Nozawa and A. Nakaue: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 34(1995) pp. 2107-2113.
- (5) S. Samukawa and M. Okigawa: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 40(2001) pp. L1346-L1348
- (6) S. Ueki, Y. Nishimori, G. Hashiguchi: Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 50(2011) pp. 026503
- (7) F. R. Blom and J. H. J. Fluitman: J. Vac. Sci. & Technol. B Vol. 10(1992) pp. 19-26
- (8) K. Y. Yasumura and D. Rugar: J. Microelectromech. Syst. Vol. 9(2000) pp. 117-125
- (9) T. V. Roszhart: Solid-State Sens. Actuator Workshop Hilton Head SC(1990) pp. 13-16
- (10) H. Hosaka and S. Kuroda: Sens. and Actuators A; Physical. Vol. 49(1995) pp. 87-95
- (11) Z. Hao and F. Ayazi: Sens. and Actuators A; Physical. Vol. 109(2003) pp. 156-164
- (12) S. Nishida, D. Kobayashi and H. Kawakatu: Rev. Sci. Instrum. Vol. 79(2008) pp. 123703
- (13) K. Nakagaawa, G. Hashiguchi and H. Kawakatsu: Rev. Sci. Instrum. Vol. 80(2009) pp.095104

(i) .7 付録

カンチレバーのQ値を総合的に計算するプログラムを下記に示す。このプログラムを実行することで、図V.2.2.2 (i) .2-5.のグラフが取得できる。なお、本プログラムはR言語を使用している。R言語は有名な統計言語『S言語』をオープンソースとして実装し直した

統計解析ソフトであり、さまざまなプラットフォーム（OS）に対応し、誰でも自由にダウンロードすることができる。それにもかかわらず、世界中の専門家が開発に携わり、日々新しい手法・アルゴリズムが付け加えられている。計算が速く、グラフィック機能も充実しているため数値計算などに最適な言語である。

```

#変数、定数宣言
Eds      <-seq(0.4,1, by=0.2)                #複素ヤング率
Esi      <-1.69*10^11#ヤング率
kn       <-1.875
Psi      <-2330
km       <-3.625*10^-3
kapa <-150
Cp       <-700
alpha<-2.6e-6
Temp<-300
Width    <-30e-6                            #カンチレバーの幅
Hight   <-seq(1e-7, 6e-6, by=1e-7)         #カンチレバーの厚み
Length  <-150e-6  #カンチレバーの長さ
Press   <-seq(1e-3, 1000, length=10)       #雰囲気中の圧力
#surface loss:関数の定義
Qsurface<-function(x,y){1/(x*Width/(2*(3*Width+x))*Esi /y)}
#support loss:関数の定義
Qsupport<-function(x,y){1/(2.081*(y/x)^3)}
#Air flow loss:関数の定義
Qair <-function(x,y){1/(kn^2/(km*x)*(2e-6/y)^2*sqrt(Psi*Esi/12))}
#F0
F0<-function(x)(pi*kapa/(2*Psi*Cp*x^2))
#resonant frequency
ResFreq <-function(x,y)(kn^2/2/pi*x/y^2*sqrt(Esi/12/Psi))
#Thermo elastic damping
QTED<-function(x,y)(1/(2*Psi*Cp/(alpha^2*Esi*Temp)*(1+(ResFreq(x,y)/F0(x))^2)/(2*ResFreq(x,y)/F0(x))))
#グラフのx座標とy座標の関数
X1      <-Hight*1e6

```

```

Y1      <-1/(outer(Hight, Eds, Qsurface)+Qsupport(Hight,Length)+QTED(Hight,
Length))
#X2      <-Hight*1e6
#Y2      <-outer(Hight, Length, Qsupport)
#X3      <-Press
#Y3      <-outer(Press, Length, Qair)
#X4      <-Hight*1e6
#Y4      <-outer(Hight, Length, QTED)
#plotプロパティの変数化
y1label  <-"Q Total"           #ylabプロパティに使用
y2label  <-"1/Q Support"
y3label  <-"1/Q air"
y4label  <-"QTED"
x1label  <-"Thickness[um]"     #xlabプロパティに使用
x2label  <-"Thickness[um]"
x3label  <-"Pressure [Pa]"
x4label  <-"Thickness[um]"

title1 <-"Total Loss"         #mainプロパティに使用
title2 <-"Support Loss"
title3 <-"Air Damping Loss"
title4 <-"Thermo Elastic Damping"

color    <-T                   #colプロパティに使用
plotline1 <-c(1:length(Eds))   #ltyプロパティに使用
plotline2 <-c(1:length(Length))
plotline3 <-c(1:length(Length))
plotline4 <-c(1:length(Length))
plotpoint1 <-1:length(Eds)     #pchプロパティに使用
plotpoint2 <-1:length(Length)
plotpoint3 <-1:length(Length)
plotpoint4 <-1:length(Length)
#グラフ作成
matplot(X1, Y1, type="o", ylab=y1label, xlab=x1label, col=color,
main=title1, pch=plotpoint1, lty=plotline1)
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定

```

```

legend(locator(1),pch=plotpoint1, lty=plotline1, col=color,
       legend=paste("δEds=", Eds))
#quartz()
#matplot(X2, Y2, type="o", ylab=y2label, xlab=x2label, col=color,
#main=title2, pch=plotpoint2, lty=plotline2, ylim=c(0,7e-5))
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint2, lty=plotline2, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))
#quartz()
#matplot(X3, Y3, type="o", ylab=y3label, xlab=x3label, col=color,
# main=title3, pch=plotpoint3, lty=plotline3, log="xy")
#凡例:locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint3, lty=plotline3, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))
#quartz()
#matplot(X4, Y4, type="o", ylab=y4label, xlab=x4label, col=color,
# main=title4, pch=plotpoint4, lty=plotline4, log="y")
#凡例           :locator(1)命令でマウスクリック箇所から座標の決定
#legend(locator(1),pch=plotpoint4, lty=plotline4, col=color,
# legend=paste("l=", Length*1e6,"[um]"))

```

(ii) μ プローブTEGの設計・試作

(ii) -1 背景

可動部位を有することは、従来の電気回路デバイスに対するMEMSデバイスの本質的な優位点の一つである。しかしその反面、MEMSデバイスの動作中に可動部位の摺動面や接点において生じる摩擦・摩耗、接触抵抗変動等のトライボロジ的な現象をいかに的確に把握し、管理するかという点もまた本質的な課題となる。

BEANS 研究所 3D-BEANS センターにて平成 20~21 年度にかけて開発されてきた、3次元構造物に対して機能性ナノ構造を位置選択的に配置した耐摩耗構造プローブに対して、この課題は同様に当てはまる。nm オーダの先端径を有するプローブ先端と接触面間において生じる摩擦・摩耗などの各種物理現象を的確に測定・評価し、物理モデルへとブレイクダウンすることは、所望の機能を実現する上では避けて通ることのできない重要項目の一つである。

以上のような背景から、3D-BEANS センターではプローブ先端におけるナノレベルの接触面間相互作用（摩耗現象・通電現象など）を測定しモデル化するナノトライボロジ評価技術の確立を目的とした研究活動を続けている。具体的には、平成 21 年度までにシングルプローブの先端と接触対象媒体の間の nN レベルの物体間作用力と、両者の電気的コンタクト特性を計測するナノトライボロジ評価系を立ち上げるとともに、シングルプローブ先端におけるナノサイズ領域の電気的コンタクト特性と物体間接触力との相関関係に着目し、媒体表面の洗浄処理有無やプローブ先端曲率半径などの各種条件が非摺動接触時の接触抵抗値及びそのばらつきに与える影響についての定量的な分析、等を実施してきた（図 2.2.2()1-1）。

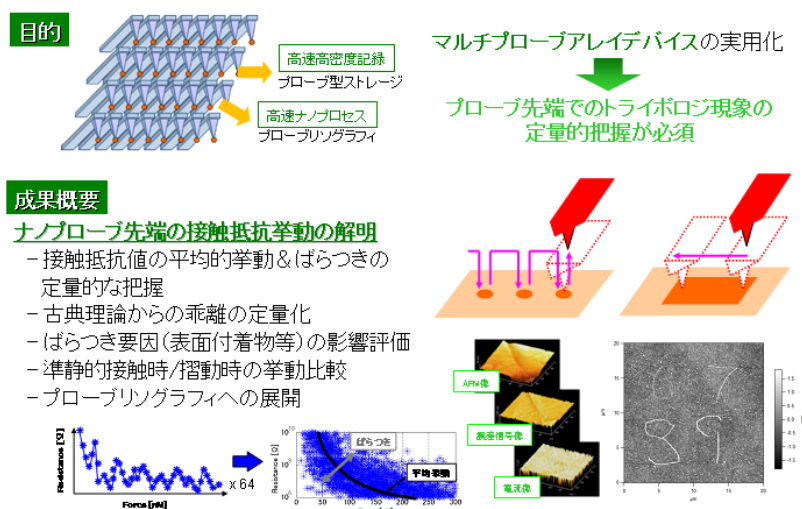


図 V.2.2.2()1-1 3D-BEANS センターにおけるナノトライボロジ研究

これを受け、Gデバイスセンターでは平成 22 年度、マルチプローブの特性バラツキの抑制に貢献するマルチ環境下での技術課題抽出と原因の分析を行い、各種センシングデバイス、新原理センサの産業的な実現性を判断する基礎データの構築にむけ以下の検討を行う。

- ・最先端 8 インチラインを活用して先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを試作し、マルチプローブ評価装置を導入してシングルプローブでの検出感度を維持しながら、ウェハ内、及びロット間の形状・特性のバラツキを評価する。

- ・また、作製したマルチプローブアレイが 8 インチラインの検査デバイスとして適用できるかの可能性を検討する。

(ii) -2 マルチプローブ評価装置

マルチプローブアレイデバイスにおける複数プローブの先端のナノトライボロジ現象計測（接触抵抗値計測など）は、今年度最先端 8 インチラインに導入されたマルチプローブ評価装置（住友精密工業）を用いて実施した（図 V.2.2.2().2-1）。マルチプローブ評価装置は、正式名称を **Scanning Multi-Probe Nano Lithography System** といい、高スループットのプローブリソグラフィを主目的として開発された装置であるが、マルチプローブ先端のナノトライボロジ現象の評価装置としても適用可能である。具体的には、最大 20 本のプローブに対して電圧一定、電流一定の各条件下で電圧を印加し、個々のプローブ先端に流れる電流値を個別に計測することができる。更に、2 式の光てこ機構を有し、マルチプローブアレイの両端のプローブカンチレバーの撓み量を計測することで、プローブアレイと摺動対象媒体が平行になるようチルトを調整し、全プローブの接触荷重がほぼ等しくなるように制御できる（図 V.2.2.2().2-2）。

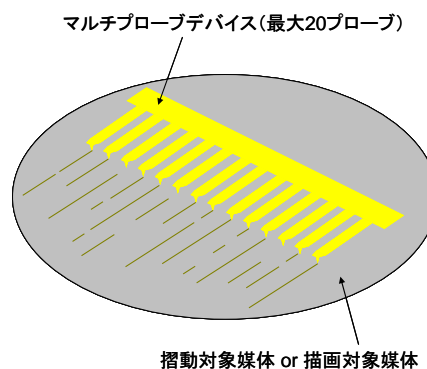


図 V.2.2.2().2-1 マルチプローブ評価装置と評価方法のイメージ図

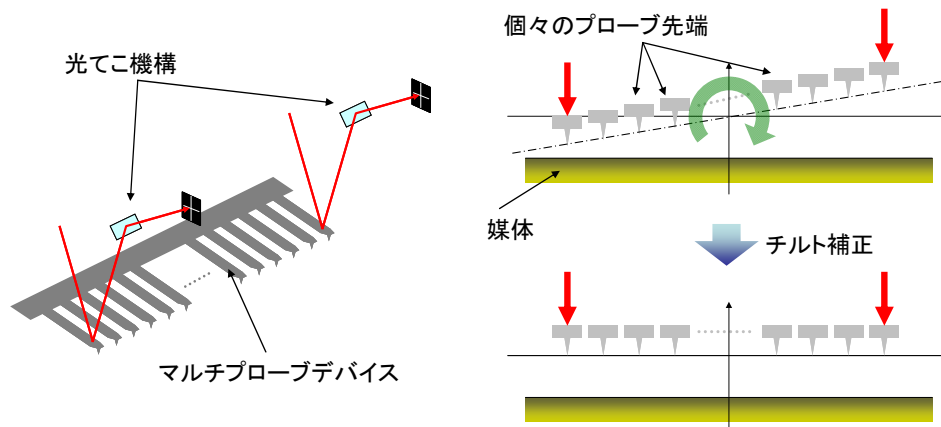


図 V.2.2.2().2-2 2式光てこによるチルト補正機構

(ii) -3 4インチラインによるプレ試作の実施

(ii) -3.1 プロセスフロー

マルチプローブアレイデバイスの最先端8インチラインでの試作を実施するに際し、プロセスフローの最適化及び各プロセスの条件出しを行う目的で、4インチラインでのプレ試作を実施した。試作に先駆けて立案されたプロセスフローは表V.2.2.2().3.1-1 に示す3種類である。

表V.2.2.2().3.1-1 4インチライン試作のプロセスフロー

プロセスフロー			
工程	プロセス①	プロセス②	プロセス③
1	マスク1リソ	マスク1リソ	マスク1リソ
2	SiNエッチング	DRIE	DRIE
3	TMAH	マスク2リソ	マスク2リソ
4	Wet酸化	DRIE	DRIE
5	マスク2リソ	マスク3リソ	Wet酸化
6	SiNエッチング	スパッタ	SiNエッチング
7	TMAH	リフトオフ	TMAH
8	Wet酸化	表面保護	SiO2エッチング
9	SiNエッチング	マスク4リソ(裏)	マスク3リソ
10	TMAH	DRIE	スパッタ
11	SiO2エッチング	SiO2エッチング	リフトオフ
12	マスク3リソ	洗浄	マスク4リソ
13	スパッタ		DRIE
14	リフトオフ		マスク5リソ(裏)
15	マスク4リソ		DRIE
16	DRIE		SiO2エッチング
17	マスク5リソ(裏)		洗浄
18	DRIE		
19	SiO2エッチング		
20	洗浄		

プロセス①は、SiN 膜および Wet 酸化膜をエッチマスクとした TMAH による異方性エッチングを 2 回使用することで、プローブの先端を半ピラミッド状に鋭利に尖らせることを狙ったプロセスである。プロセス①を用いてデバイスを完成させた場合のプローブ先端推定形状を図 V.2.2.2()3.1-1 に示す。しかし、本プロセスフローは難易度が高く、実際に 8 インチラインを駆使して試作する段階になって条件出し等の時間が十分に確保できないリスクがあったため、本プロセスを用いたプレ試作は実施を見送った。

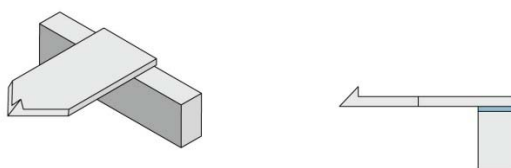


図 V.2.2.2()3.1-1 プロセス①によるデバイス完成予想図

プロセス②は、プローブの先端を 2 次元的に鋭利に加工することで先端を尖らせることを狙った、TMAH による異方性エッチングを用いない最も簡便なプロセスである。先端を鋭利に尖らせるために、先端部の加工を 2 枚のフォトマスクに分けて別々に行うという工夫をしている (図 V.2.2.2()3.1-2)。仮に本プロセスを用いて、先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブアレイを作成でき、なおかつシングルプローブでの検出感度を維持しながら個々のプローブのナノトライボロジ特性の評価を実施できるのであれば、8 インチラインでの試作は本プロセスを採用することが有望となる。

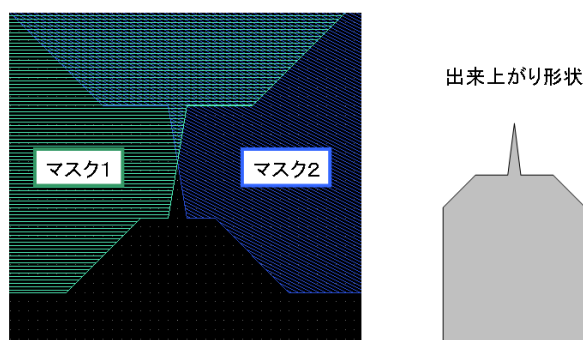


図 V.2.2.2()3.1-2 プロセス②③における先端 2 段加工法

プロセス③は、プロセス①と同様に、TMAH 異方性エッチングによりプローブ先端を 3 次元的に鋭利に尖らせることを狙っているが、プロセス②の先端部を 2 段加工するテクニックを併用することで、TMAH エッチングの回数を 1 回だけで済むように簡素化したプロセスである。

なお、プローブ先端に電流を印加するための電極材料には、Ti 膜(厚さ 20nm)を下地とした W 膜(厚さ 80nm)を使用した。W 膜はウェット加工が困難であり、またドライ加工の際にカンチレバー母材となる Si との選択比が取りづらいため、今回は W 膜の加工にはリフトオフプロセスを利用した。なお、プローブ先端から電流を流すために電圧を印加する電極とは独立して、プローブ先端摺動対象媒体との間に交流電圧を印加することでプローブを静電力で加振するための加振用の電極を設けている。これは、プローブをタッピングすることによるプローブ先端摩耗量の低減を狙ったものだが、今年度はこれを利用したプローブ加振試験は実施しなかった。

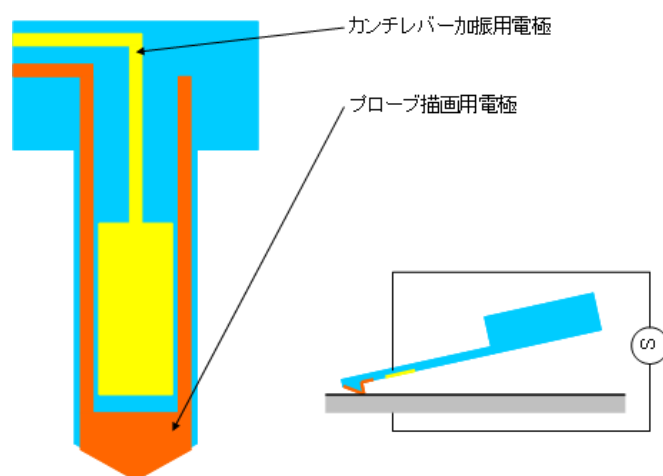


図 V.2.2.2().3.1-3 プローブ電極膜の分割

(ii) -3.2 作成されたデバイス

プロセス②及び③にて4インチラインで試作を行い、完成したデバイスの SEM 画像をそれぞれ図 V.2.2.2().3.2-1、図 V.2.2.2().3.2-2 に示す。いずれの試作においても、プローブ先端の尖り角度が鈍角なもの鋭角なものとの2種類のサンプルを作成したが、いずれにおいても先端が鋭利な、先端有効径がサブミクロンであるプローブを作成できている。また、プロセス③については、TMAH を用いてプローブ先端を3次的に尖らせることに成功している。但し、2枚のマスクの合わせずれにより、プローブが若干左右非対称な形状になっている点が課題である(図 V.2.2.2().3.2-3)。

リフトオフプロセスを用いた W 電極膜の加工についても、電極膜の剥がれなどを発生させることなく、良好なパターンニングを実施できていることが分かる。

なお、参考までに、完成したプローブを、最先端8インチライン検査工程に導入された X 線 CR スキャナ装置で観察した結果を図 V.2.2.2().3.2-4 及び図 V.2.2.2().3.2-5 に示す。十分な空間分解能を持って、デバイスの複雑な形状を3次的に計測できていることが分かる。また、W 電極部と Si カンチレバー部の材質の違いも明確に識別できている。後者のサンプルは、リフトオフプロセス時に W 電極膜剥がれが発生した NG 品であるが、こうし

た NG 品のスクリーニングにも使用できることを示唆している。

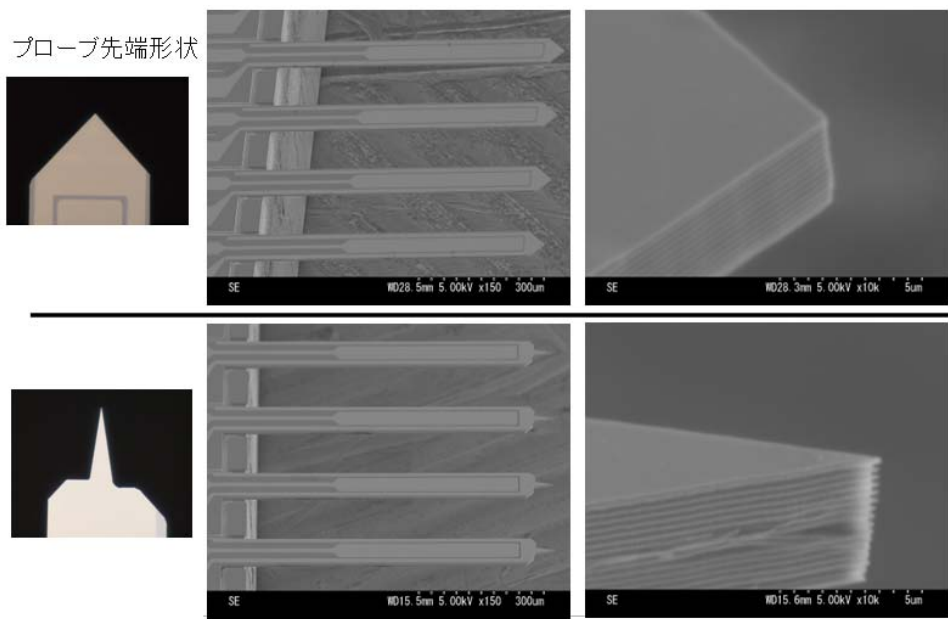


図 V.2.2.2()3.2-1 プロセス②完成サンプルの SEM 画像

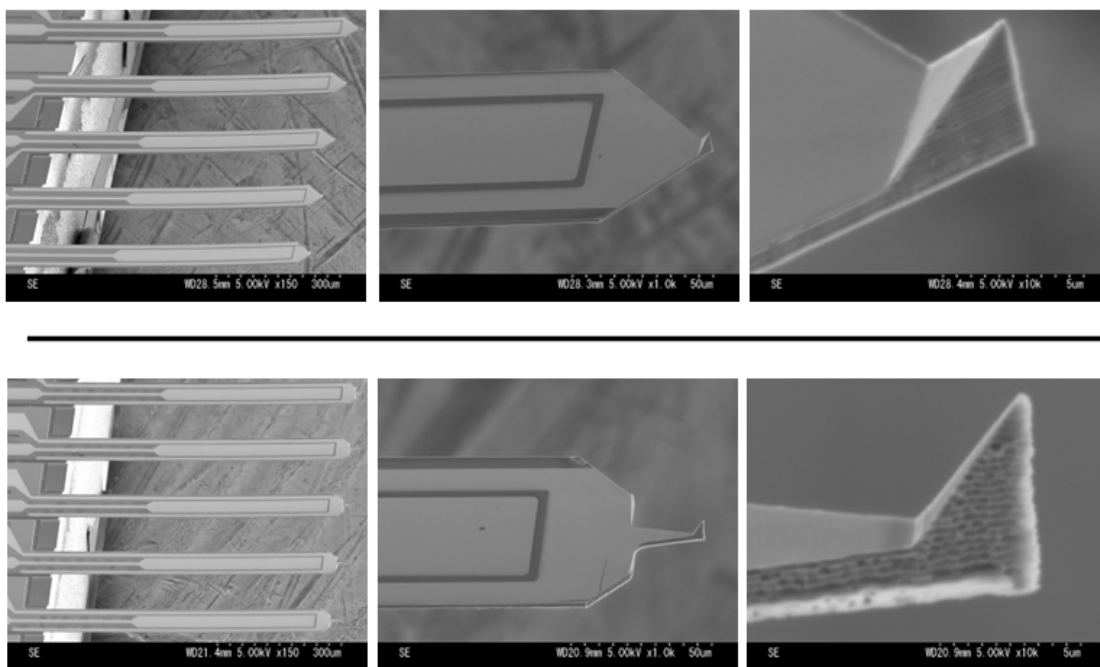
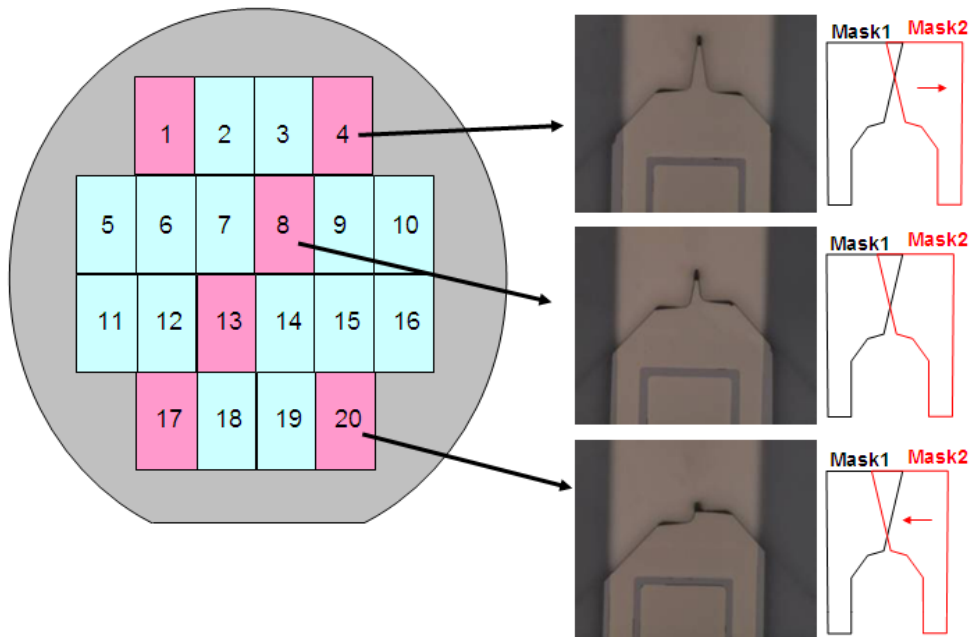
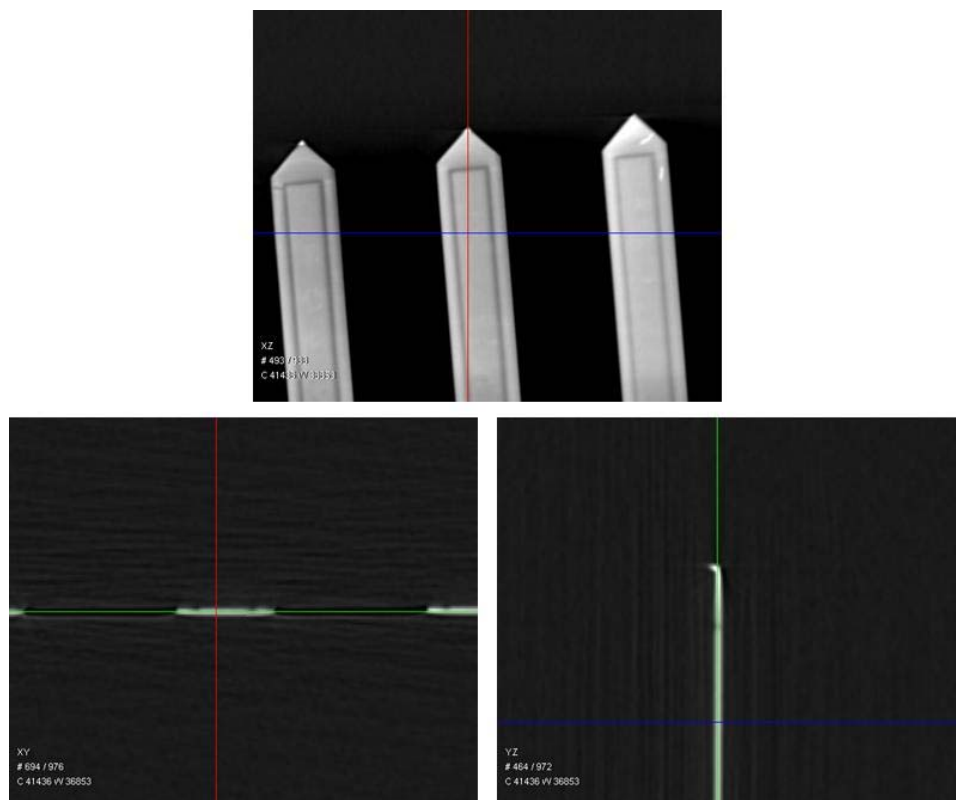


図 V.2.2.2()3.2-2 プロセス③完成サンプルの SEM 画像



図V.2.2.2().3.2-3 マスク合わせズレに起因する形状ばらつき



図V.2.2.2().3.2-4 X線CTスキャナによる形状測定（プロセス③：鈍角先端）

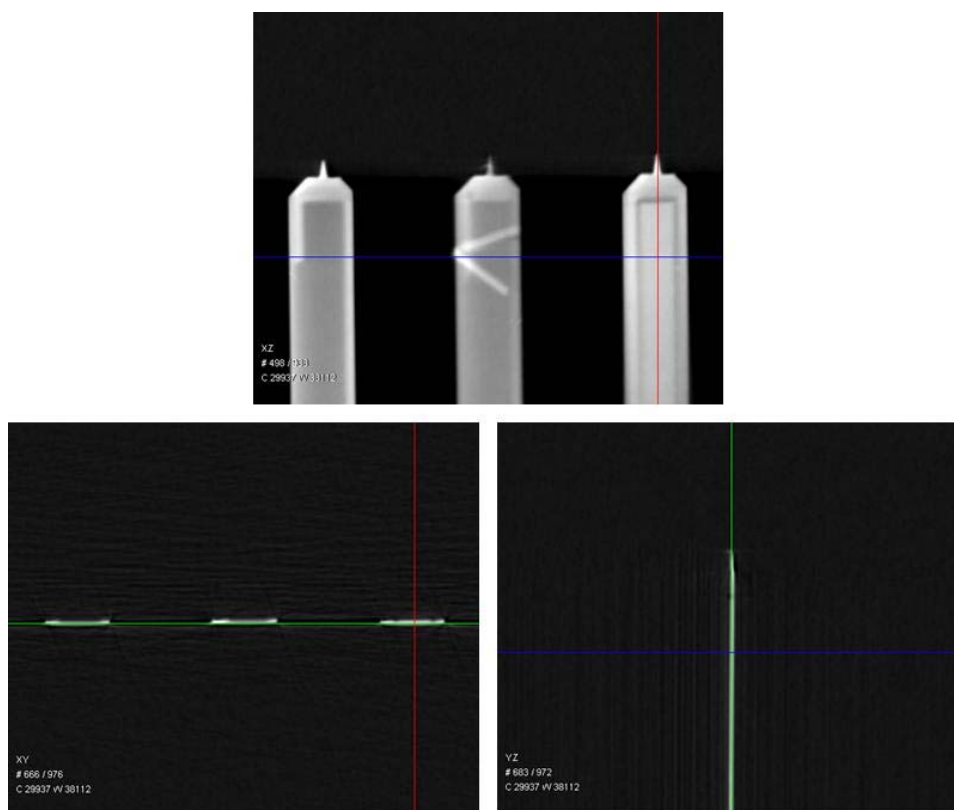


図 V.2.2.2()3.2-5 X線 CT スキャナによる形状測定（プロセス③：鋭角先端）

(ii) -4 4 インチラインサンプルの評価

(ii) -4.1 陽極酸化による描画実験

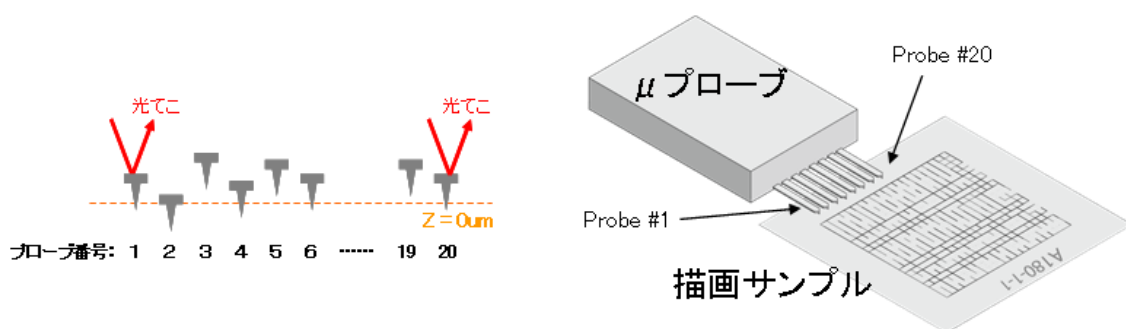
完成した4インチラインサンプルに対して、マルチプローブ装置を用いた評価を実施した。第一には、Si ウェハに対してマルチプローブデバイスの先端を摺動させながら、プローブ先端電極に電圧を印加することで Si ウェハ媒体に対して電流を流し、それによってウェハ上を局部的に陽極酸化させてパターンを描画する、所謂局所陽極酸化法（LAO: Local Anodic Oxidation）による描画試験を実施した。

描画に用いる Si ウェハは、事前に硫酸過水による洗浄を実施したのち、希フッ酸処理により表面酸化膜を除去する。これに対して表 V.2.2.2()4.1-1 に示した描画条件で、6つのパターンを描画する。“撓み量”は実際に光てこによる計測が可能な両端のプローブについてのものであり(図 V.2.2.2()4.1-1 参照)、仮にプローブ先端の高さにばらつきが発生し、一部のプローブが両端のプローブ高さより高い位置にいた場合、撓み量が小さい場合にはプローブ先端が Si 媒体と接触しないことがあり得るが、撓み量を増大するに伴って徐々に全てのプローブが媒体に接触するようになると考えられる。“摺動速度”は、プローブを媒体に対して摺動させる際の両者の相対速度を示している。プローブ先端に印加する電圧は全ての試行で 4V 一定とした。なお、各デバイスに 20 本ずつあるプローブのうち、#1~#10

に電圧を印加し、10本同時の描画を行った。

表V.2.2.2().4.1-1 描画条件

Trial	撓み量 [um]	印加電圧 [V]	摺動速度 [um/s]	描画形状
1	0.1	4.0	3.0	
2	0.6			
3	1.1			
4	1.6			
5			6.0	
6	9.0			



図V.2.2.2().4.1-1 光てことプローブ番号

描画が終了した後、Si ウェハを TMAH で軽く (60 40sec) エッチングし、陽極酸化で描画された SiO₂ パターンを顕在化させ、SEM での描画パターン観察が容易になるようにした。プロセス③で試作したデバイス、プロセス②で試作したデバイスのうち先端が鈍角のものと鋭角のもの、の計3サンプルについて描画試験を実施し、上記処理で顕在化させた描画パターンを SEM 観察した結果を図V.2.2.2().4.1-2 に示す。プロセス②、③のどちらのプロセスで作成したサンプルも、何らかのパターンを描画することが実現できている。しかし、それぞれのデバイスとも 10本のプローブで描画を行っているうち、実際に何らかの描画を実施できているものは2~4本程度となっている。また。描画の成否は表 .2.2.2().4.1-1 に示した描画条件に全く依存していなかった。

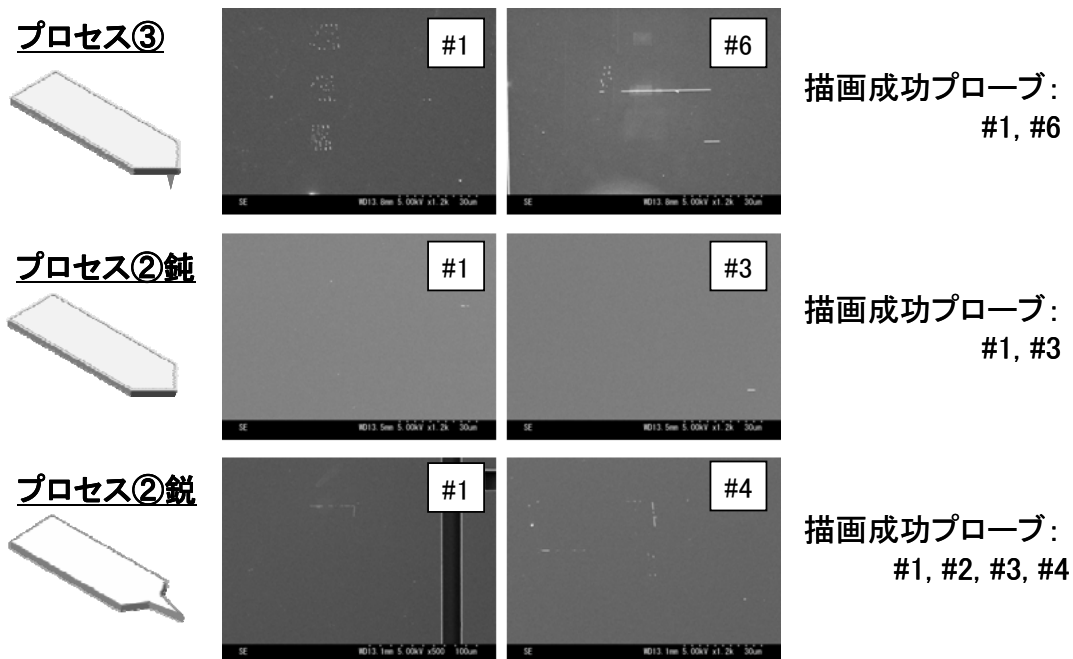


図 V.2.2.2().4.1-2 描画されたパターンの SEM 画像

(ii) -4.2 陽極酸化後のプローブ先端

(ii) -4.1 節にて、電圧を印加した 10 本全てのプローブでは描画が成功しなかったことの原因として、プローブ先端部分の出来栄が不十分だった可能性を検証するため、描画に用いたマルチプローブデバイスの先端 SEM 観察を実施した。結果を図 .2.2.2().4.2-1~3 にそれぞれ示す。

プロセス③のデバイスについては、描画に成功しなかったプローブ#2~#5において、表面の W 電極膜が剥離したような状態になっていることから、プローブ先端の状態と描画成否にある程度の相関関係を有していることがわかる。しかし、プロセス②で作成したデバイス 2 者については、各プローブともほとんど同様の形状を有しており、描画成否とプローブ先端状態の間に相関は見られなかった。

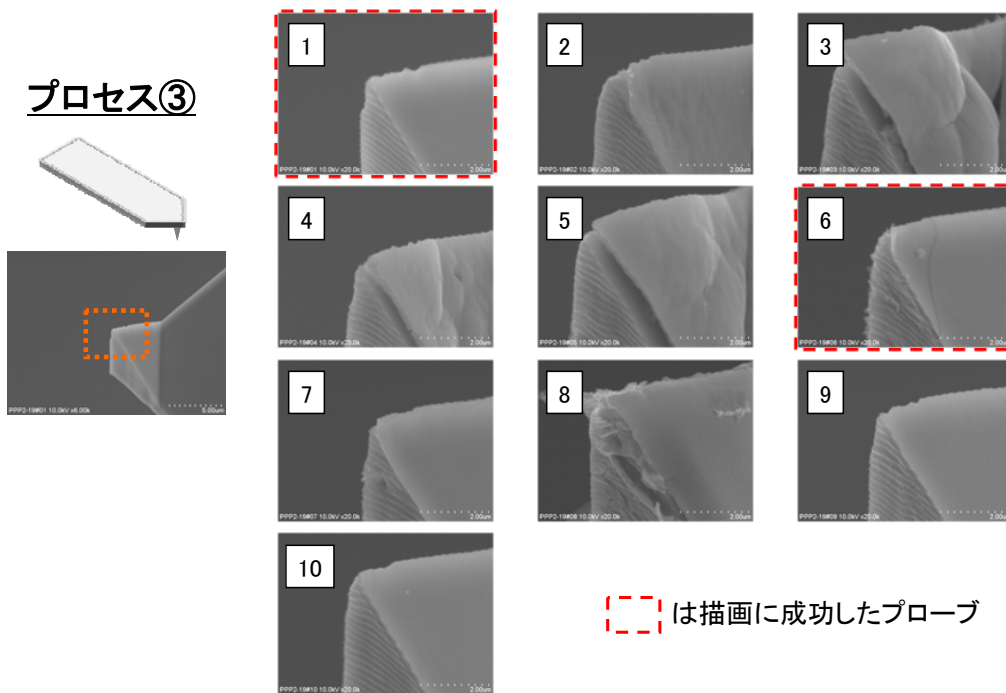


図 V.2.2.2().4.2-1 プローブ先端の SEM 画像 (プロセス③)

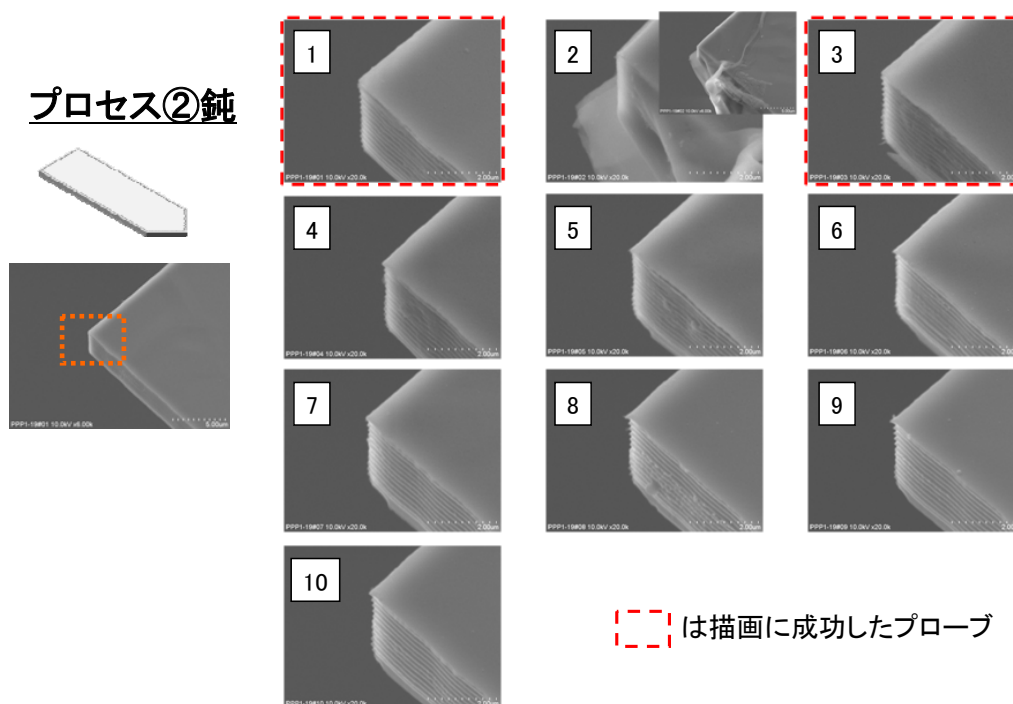
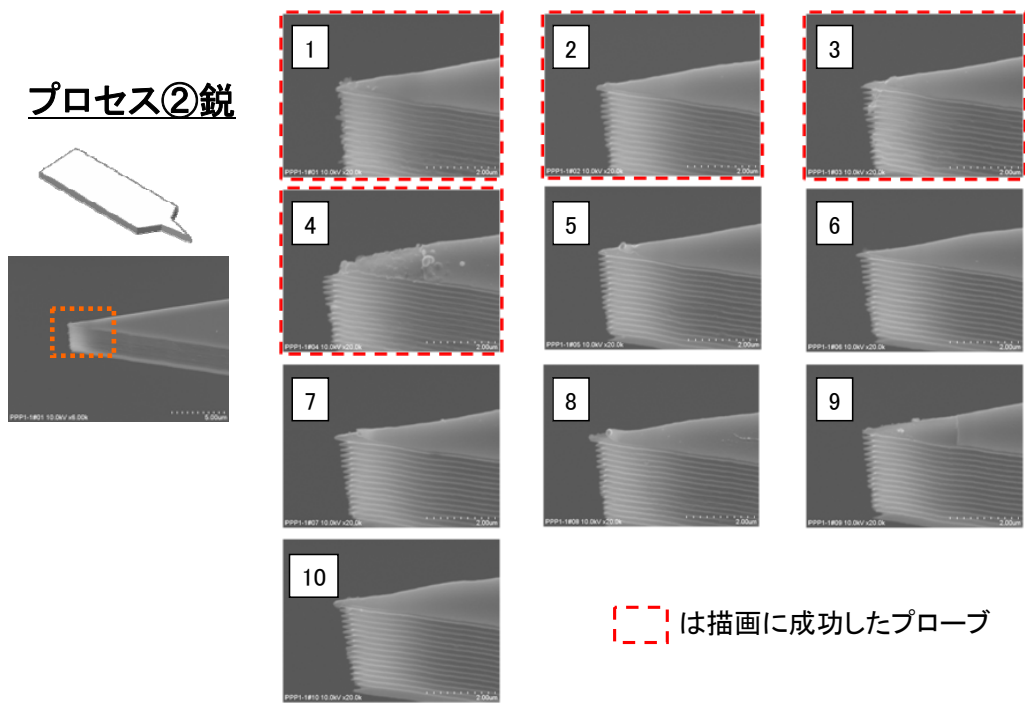


図 V.2.2.2().4.2-2 プローブ先端の SEM 画像 (プロセス② : 鈍角先端)



図V.2.2.2().4.2-3 プローブ先端の SEM 画像（プロセス②：鋭角先端）

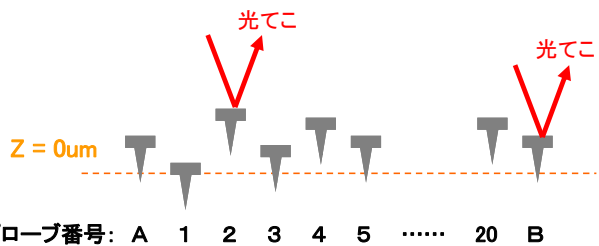
(ii) -4.3 両端付近プローブの先端高さ計測

個々のプローブの描画成否を支配している要因の可能性として、図V.2.2.2().4.1-1 に示したプローブ先端の高さばらつきが挙げられる。この可能性を検証するため、プローブ先端高さの直接測定を実施した。

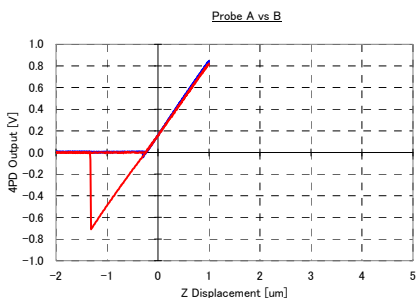
測定に用いているマルチプローブ評価装置は、図V.2.2.2().2-2 に示すように、プローブアレイ全体のチルトを補正するための2つの光てこ機構を有しているが、これを利用して、片方の光てこを意図的に両端以外のプローブに当てつつフォーカスを測定することにより、両端のプローブ高さから決まる平面に対してそのプローブがどのくらいの高さズレを有しているかを直接計測することができる（図V.2.2.2().4.3-1）。但し、この手法で計測できるのは、光てこの照射可能レンジ内に存在している、両端から2～5本程度のプローブに限られる。

描画を行った3つのデバイスについて、上述の方法でプローブ高さを測定した結果を図V.2.2.2().4.3-2～4にそれぞれ示す。

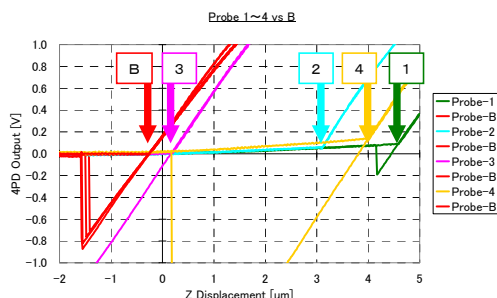
プローブAとBの高さを揃えた後で、
Aの光てこレーザスポットを
隣接するプローブ上に移動させ、
そのままフォースカーブを測定



↓
各プローブが接触するときのZ変位から
プローブ高さばらつきが計測可能
(但し両端からプローブ4~5本まで)



始めにAとBの高さを合わせた時のフォースカーブ



プローブ1~4とBのフォースカーブ同時測定

図 V.2.2.2().4.3-1 光てこによるプローブ先端高さ測定

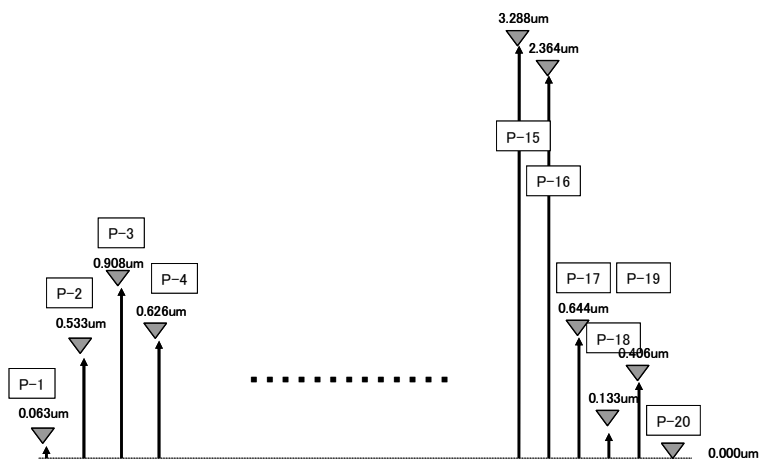


図 V.2.2.2().4.3-2 プローブ高さ計測結果 (プロセス③)

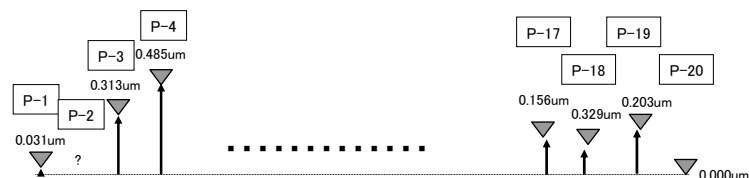


図 V.2.2.2().4.3-3 プローブ高さ計測結果 (プロセス②: 鈍角先端)

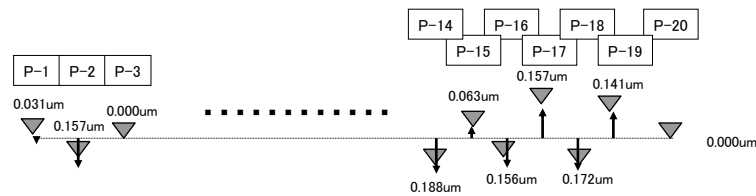


図 V.2.2.2() 4.3-4 プローブ高さ計測結果 (プロセス② : 鋭角先端)

プロセス③で作成したデバイスの場合、両端のプローブと比較して中央部分のプローブの高さが高くなる傾向が見られている。特に#15、#16は基準平面から1.6um以上離れていることから、最もプローブの撓み量が大きい試行(表V.2.2.2() 4.1-1のTrial 4,5,6)でもプローブ先端がSiウェハ表面に接触していないことになる。恐らく、プローブ#7~#10において描画が行われなかった原因は、こうした傾向からそもそもプローブ先端がSiウェハ表面に接触していなかったのではないかと推測される。

しかし一方で、プロセス②で作成したデバイス2つは、計測できたプローブ先端の高さばらつきが全て±0.5um以内に収まっており、極めてばらつきが小さい。こうした傾向から鑑みるに、恐らく少なくとも撓み量が最も大きい試行(Trial 4,5,6)では全てのプローブ先端がSiウェハ表面に接触していると推測される。よって、プローブ先端の接触/非接触を描画成否の主要因と判断することはできず、他の何らかの要因を推定する必要がある。

なお、こうした高さばらつきの傾向がプロセスによって異なる理由としては、まずプロセス③はTMAH異方性エッチングによりカンチレバーを厚さ方向にエッチングしているため、カンチレバー厚みにばらつきが生じやすいことが挙げられる。更にプロセス③で試作したデバイスではカンチレバー厚みがエッチングされて最終的に約2umになっているのに対し、プロセス②で試作したデバイスのカンチレバー厚みは約4umと倍近いため、曲げ剛性の弱いプロセス③のデバイスのほうが、W電極膜等の残留応力によるカンチレバー反りの影響を受けやすく、その分プローブ先端の高さがばらつき易いものと考えられる。

(ii) -5 8インチラインサンプルの試作

(ii) -5.1 プロセスフローの選択と変更

4インチラインにて試作評価を行ったサンプルでは、プロセス②、③のどちらのプロセスで試作したデバイスでも、同様に局所陽極酸化法によるパターン描画を実施することができた。このことから、どちらのプロセスでもプローブ先端から電流を流すという機能は問題なく発現させることができると分かった。一方、プロセス②はカンチレバー厚さ方向のエッチングを行わないためプローブ先端高さばらつきが小さく、また何よりTMAHを使用しないためプロセスが簡素なことから、条件出し作業負荷の低減と試作期間の短縮の観点も加味し、8インチラインにおける試作ではプロセス②を採用することにした。

一方、電極に用いる金属膜は、4インチライン試作における W 膜 (Ti 下地) から、Au 膜 (Cr 下地) に変更することにした。W 膜は硬度が高く耐摩耗性に優れるため、今回のデバイスのように微小コンタクト領域で激しい摺動摩耗に晒される用途には最適と考えたのが W を選定した理由であったが、一方で W は比較的酸化されやすく、大気中で膜表面に高抵抗の酸化膜が形成されてしまうという欠点がある。4インチラインサンプル試作評価において、電極が Si ウェハ表面に接触しているにもかかわらず描画ができなかったプローブが存在していた理由として、この表面酸化膜によってプローブ先端～Si ウェハ間の良好な電氣的導通が阻害された可能性を考え、代替として Au 膜を選択した。Au は極めて酸化されにくいいため表面に酸化絶縁層が構築されず、理想的な電気接点の電極材料としてよく使用されるものであるが、一方で硬度、ヤング率ともに金属としては低い部類であり、摺動により容易に摩耗してしまう。こうした欠点を補うため、Au の膜厚は4インチライン試作時 W 膜 (80nm) よりも厚く (>100nm) した。

なお、Au 膜は W 膜と異なり、Si との十分な選択比を取りながら Wet エッチングによるパターニングが可能である。しかし今回はプロセスフローを大きく変更することに伴うリスクを回避するため、8インチライン試作でも4インチと同様にリフトオフプロセスによる電極膜のパターニングを実施することとした。

(ii) -5.2 試作結果について

前節の方針に沿って8インチラインでの試作を行い、サンプルマルチプローブデバイスを完成させた。完成したサンプルの SEM 観察画像を図 V.2.2.2()5.2-1 及び図 .2.2.2()5.2-2 に示す。外形上は4インチライン試作時と同様のプローブが形成できていることが分かる。ただ、プローブの先端部分を拡大して観察すると、図 V.2.2.2()5.2-2 のようにプローブの先端が欠けてしまう現象が観測された。これは、図 V.2.2.2()3.1-2 に示す2段階加工を実施した段階までは4インチラインと同様に鋭利な先端が構成できていたものの、その後 Au 電極膜をリフトオフする段階で膜が W と同様に速やかに剥離しなかったため、やむなくウェハ全体を超音波洗浄することで膜の剥離を推進させたところ、その際にプローブ先端が欠けてしまったことが原因である。本結果については、次回以降の試作にフィードバックする予定である。

なお、これらのプローブは先端が欠けてはいるものの、実際に媒体とコンタクトする点は欠けたエッジの部分になると考えられるため、コンタクトする領域はサブミクロンサイズになると推測される。このことから、このような出来栄のデバイスでも評価への投入に値するものと判断した。なお、プローブの先端が確実に媒体に対してコンタクトするように、プローブは媒体に対してある程度の傾斜をもつ形で装置に取り付けられる。このため、プローブの先端欠けの長さばらつきは、媒体への接触点の高さばらつきとして計測されることになる。こうした点に着目しながら、サンプルの評価を行うこととした。

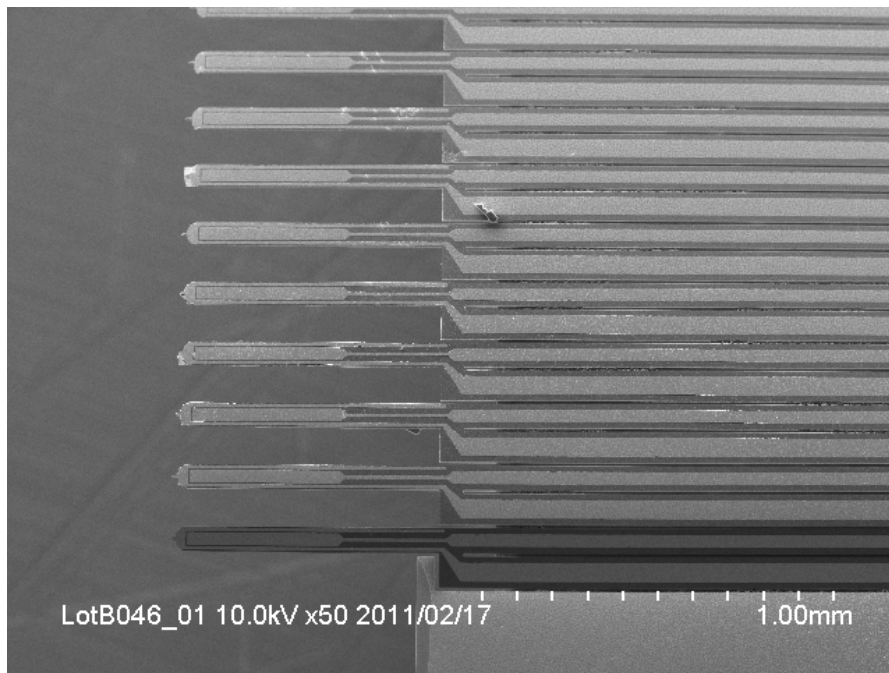


図 V.2.2.2().5.2-1 8 インチラインで試作したマルチプローブデバイス

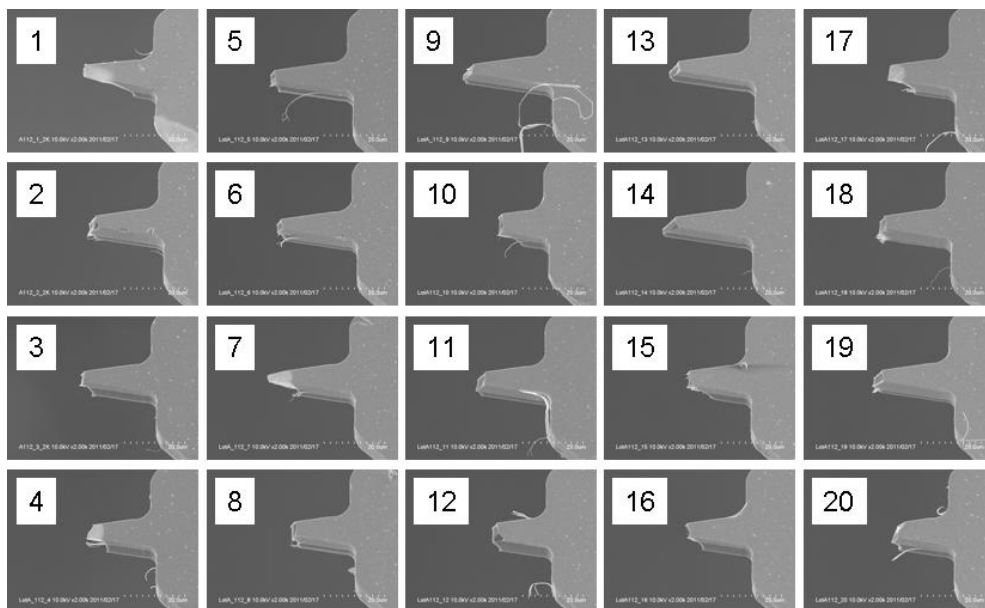


図 V.2.2.2().5.2-2 マルチプローブデバイスの先端部拡大図 (#A-112)

(ii) -6 接触時の電流値計測による形状ばらつき評価

(ii) -6.1 接触電流値の計測について

4インチラインのサンプルを評価する際には、プローブ先端に電圧を印加して Si に対する LAO 法描画を実施するという手段を採用したが、この手法では Si の陽極酸化という物理現象が介在するため、作成したデバイスのプロセス起因形状ばらつきを把握するために

は、描画条件や描画環境を最適化し、陽極酸化起因のばらつき要因を除外する必要があることが課題である。8インチラインサンプルの評価に当たっては、こうした介在要因を極力排除し、より直接的に形状要因ばらつきのみの抽出を行うため、プローブ先端に流れる電流値を計測する手法を採用することとした。

上記手法についての具体的な根拠として、昨年度までに 3D-BEANS センターにて実施した下記の評価結果が上げられる。資料台にバイアス電圧印加可能な AFM 装置を用いて、図 V.2.2.2().6.1-1 に示した実験系により、プローブの接触荷重と接触抵抗値の関係を調査した。具体的には、測定開始点や測定点の間隔、プローブ押付け&引離し速度、最大押込み変位などを指定し、図に示すように測定場所を少しずつ変えながらプローブの押付け→引離しを繰り返して実施できる測定モードを利用する。試料台に一定の電圧をかけた状態でこのモードによる測定を行い、プローブの押付け時のプローブ接触荷重と接触抵抗値の関係を計測した。得られたデータは1回1回の測定ごとに大きくばらつくため、一つの試験条件について64回の繰り返し測定を実施し、それを一つのグラフ上に重ね書きして、全体の傾向とばらつきを評価した(図V.2.2.2().6.1-2)。

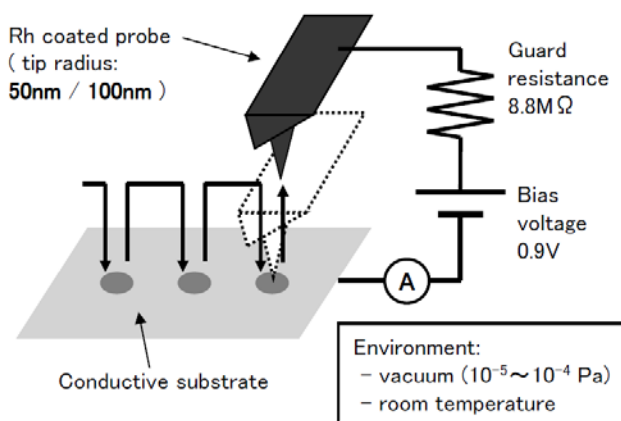


図 V.2.2.2().6.1-1 AFM を用いたシングルプローブの接触抵抗評価

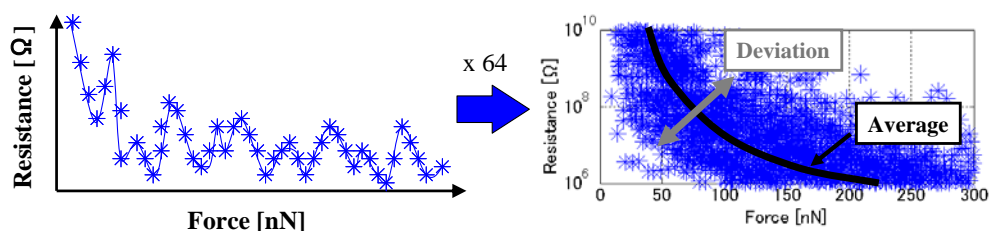
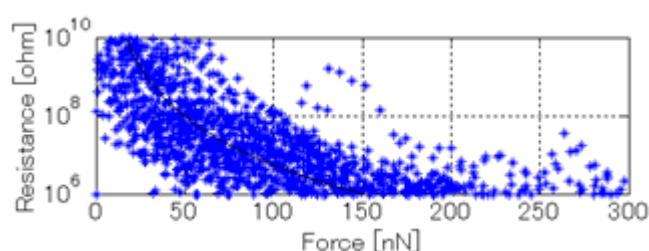


図 V.2.2.2().6.1-2 計測結果の平均的挙動とばらつき

上記の実験手法を用いて、先端半径約 50nm のプローブを、表面を超音波洗浄した Ru スパッタ膜に対して、1.4nN/ms の荷重増減速度で接触させた際の接触荷重と接触抵抗値の

値を評価した。結果を図V.2.2.2().6.1-3に示す。多少のばらつきはあるものの、概ね接触荷重が200nN以上の領域において、接触抵抗値が 10^6 以下まで安定して低下していることが分かる。8インチラインにて試作したマルチプローブデバイスの個々のカンチレバーのバネ剛性の設計値は約0.5N/mである。よって荷重200nNはカンチレバーの撓み量で約400nmに相当することになる。従って、同様にマルチプローブデバイスの先端を、非常に導電性の良好な貴金属媒体に対して接触させ、その際のプローブ先端電流値をリアルタイム計測することで、プローブ先端の接触有無を高さ400nmの分解能で計測できることになる。



図V.2.2.2().6.1-3 シングルプローブ接触抵抗値評価結果の一例

前述したように、マルチプローブ評価装置ではプローブ先端に電圧一定、電流一定のどちらかの条件で制御しつつ電圧を印加することができる。今回の実験のため装置にオプション改造を施し、電圧一定、電流一定の両条件下で、20本全てのプローブの先端に流れている電流値をリアルタイムで計測できるようにした。

次節以降で報告する実験は電圧一定、電流一定の両方の条件で実施したが、結果として電流一定条件下では、プローブ先端の接触有無を安定して計測することができなかつたため、本報告書では電圧一定条件下のみの測定結果を示す。なおこれは、(特に摺動条件下において) プローブ先端の接触荷重増減に起因する接触抵抗値の変化があまりに急峻すぎるがゆえに、電流値制御回路の制御系が追従しきれず、制御が発振してしまったことが原因と考えられる。制御回路のフィードバックゲインやパラメータを適切な値に変更することにより、電流一定モードにおいても同様の評価が可能になるものと推測される。これは次年度以降の課題である。

(ii) -6.2 プローブ押付け変位と接触電流値

前節で述べた手法を用いて、いくつかの試作デバイスの評価を実施した。試作した2枚のロットのうち、ロットAから1デバイス(サンプル番号#A112)、ロットBの同一ウェハ内からウェハのエッジ周辺(同#B007)及び中央付近(同B046)の2デバイスをピックアップし、3サンプルを評価することでデバイスのロット間ばらつき及びウェハ面内ばらつきを比較した。更に4インチラインで試作したデバイス(8インチラインサンプルと同じ

プロセス③にて試作し、先端形状も同様に鋭角のもの)を比較対象として評価に投入した。

具体的な手順としては、まず2式の光てこを用いて、マルチプローブアレイの両端プローブ(#1、#20)と接触対象媒体を平行に揃え、この両プローブで定まる平面を $Z=0$ の面とする。この上で、撓み量 Z を $-2\mu\text{m}\sim 4\mu\text{m}$ まで変化させながら、フォースカーブ測定を4点連続で行う。この際の個々のプローブ先端電流値をリアルタイム計測し、電流波形の立ち上がり位置に着目する。個々のプローブの波形が、#1や#20と比較して早く立ち上がっていればその分プローブ先端の高さは低く、逆に遅く立ち上がっていればプローブ先端の高さが高いことをそれぞれ意味することになる(図V.2.2.2().6.2-1)。

なお、接触対象媒体は超音波洗浄したRuスパッタ膜(表面粗さ $R_a=0.35\text{nm}$)を用いた。貴金属であるRuは膜表面に酸化膜が形成されにくく、また例え形成されたとしても酸化膜の抵抗率はそれほど高くないため、こうした接触抵抗値を評価する実験には適している。また、媒体表面粗さはプローブ高さばらつきオーダの数10～数100nmと比較して十分小さいため、本測定において媒体表面側の高さばらつきの影響は無視してよいと考える。電流経路内の保護抵抗値は 1M であり、印加電圧は 80mV と設定した。これにより計測される最大電流値は 80nA となる。計測環境は大気中とした。

4個のデバイスにおける評価結果を図V.2.2.2().6.2-1～図V.2.2.2().6.2-4にそれぞれ示す。評価に用いた全てのサンプルにおいて、プローブ番号#12～#15の4本については全く電流値が計測されなかった。この4本については測定系、もしくはデバイスマスク設計の不具合の可能性が懸念されるため、以降の考察の対象からは除外している。

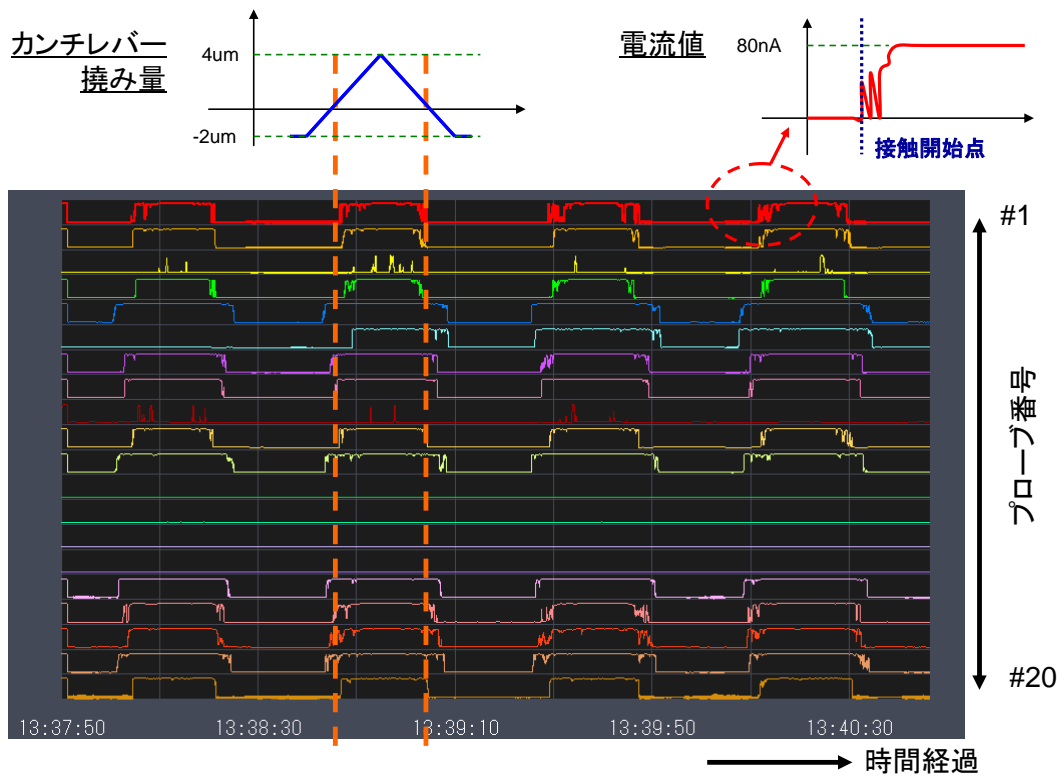


図 V.2.2.2().6.2-1 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#A112)

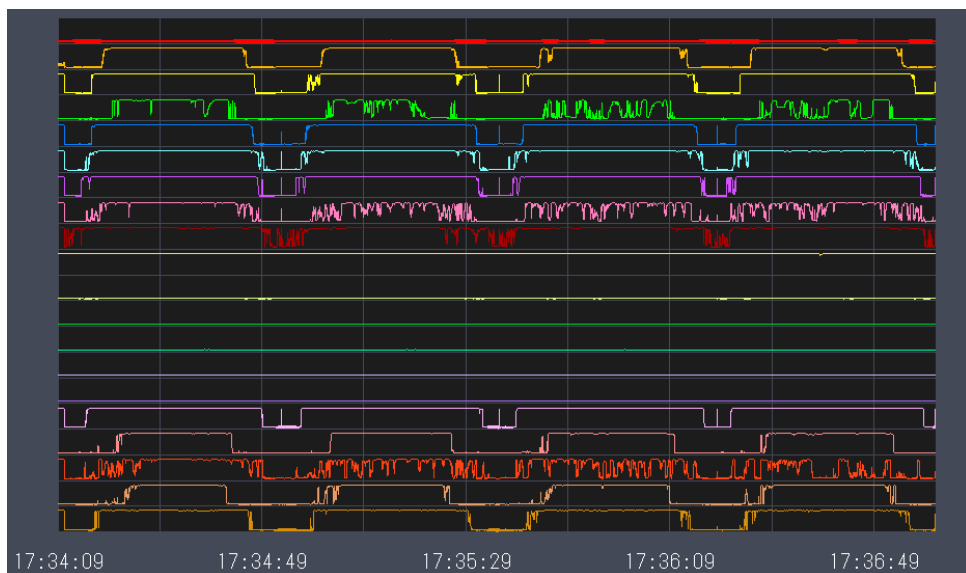
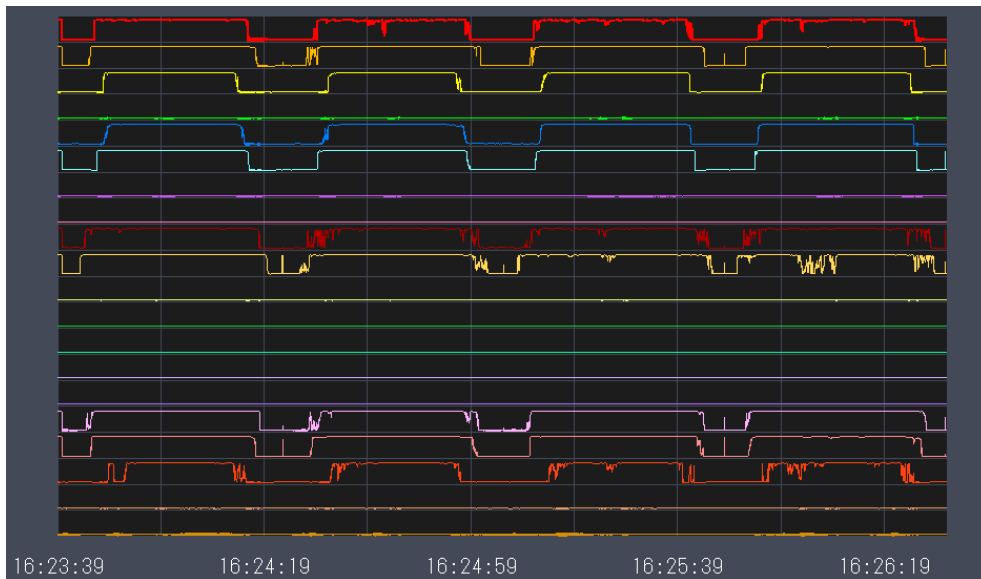
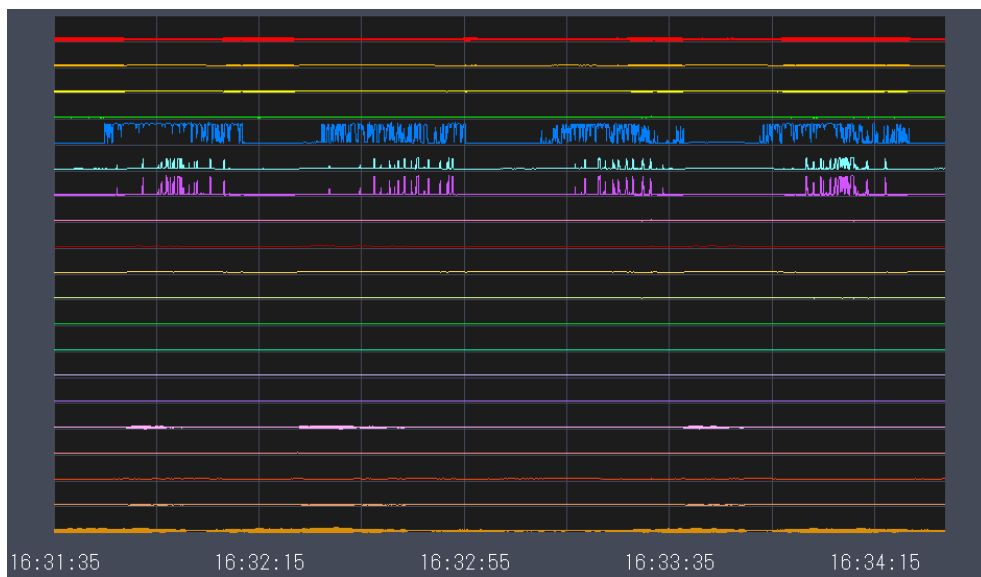


図 V.2.2.2().6.2-2 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#B007)



図V.2.2.2().6.2-3 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (#B046)



図V.2.2.2().6.2-4 マルチプローブの押付け変位と接触電流値 (4インチラインサンプル)

8インチラインサンプル3点に着目すると、いずれも両端のプローブ (#1、#20) と比較して中央付近のプローブのほうが早く媒体に接触していることから、図V.2.2.2().4.3-2の傾向とは逆に、中央付近のプローブ高さが低くなる傾向にあることを示唆している。一方、その高さばらつきの程度については3つのサンプル間で顕著な差は見られず、ロット間、ウェハ内の特性ばらつきはいずれも小さいことが分かる。また、サンプル#A112の測定結果(図V.2.2.2().6.2-1)とプローブ先端SEM観察結果(図V.2.2.2().5.2-2)を比較すると、欠けの位置が先端に近いものが必ずしも早く媒体に接触している訳ではないこ

とが分かる。このことから、プローブ先端高さばらつきの主要因は先端欠けではなく、電極膜の残留応力等に起因するプローブ反りであることが示唆される。

これに対し、同様の測定を4インチラインで行った結果を見ると、殆ど電流値が得られていないことが分かる（それでも一部のプローブには電流が流れているので測定系の不良ではない）。特に両端のプローブである#1、#20は間違いなく媒体に接触していることが光てこにより確認されているが、その両プローブについても電流は流れていない。このことから、電極材料であるWの表面に形成された高抵抗率の酸化膜が、接触箇所の良好な導電性を大きく阻害していることが分かる。4インチライン試作サンプルを用いて実施した描画実験において良好な描画が実現できなかったひとつの理由はこれであると考えられる。

なお、8インチライン試作サンプルについても、ロットBの一部のプローブでは同様に電流が計測されていない。これは、もちろんプローブの先端高さが+4 μm 以上大きく反り上がっているという解釈も成り立つが、プローブ先端に繋がる電極配線パターンなどに不良が生じている可能性も高い。ロットAでは（#12～15除く）全てのプローブで何らかの電流が計測されていることから、ロット間の電極膜形成プロセスの差異が計測されているものと考えられる。本評価手法は、こうした個々のプローブの不良を一括スクリーニングするのにも適していると言える。

(ii) -6.3 プローブ先端摺動時の接触抵抗分布

マルチプローブ装置が、8インチラインの検査装置として使用できるだけでなく、AFMシングルプローブ評価系と同等の検出感度でトライボロジ現象を計測するツールとして利用できるかを確認するため、プローブ先端の摺動接触時における接触抵抗値の同時計測を実施した。デバイスはサンプル#A112を用いた。摺動媒体は前節と同様に超音波洗浄したRuスパッタ膜を用いた。やはり前節同様、保護抵抗は1M Ω 、印加電圧は80mV（電圧一定モード）、計測環境は大気中とした。摺動速度は1 $\mu\text{m}/\text{s}$ 、総摺動距離は20 μm とし、摺動が行われる20秒間の個々のプローブ先端電流値を10 μsec 間隔で計測して得られた20sec/10 μsec = 2000点の計測結果から接触抵抗値の度数分布を求めた。更に、2式の光てこ機構を用いて両端のプローブの撓み量を0.5 μm 、1.0 μm 、1.5 μm 、2.0 μm の4水準に調整することで、接触荷重の依存性を評価した。

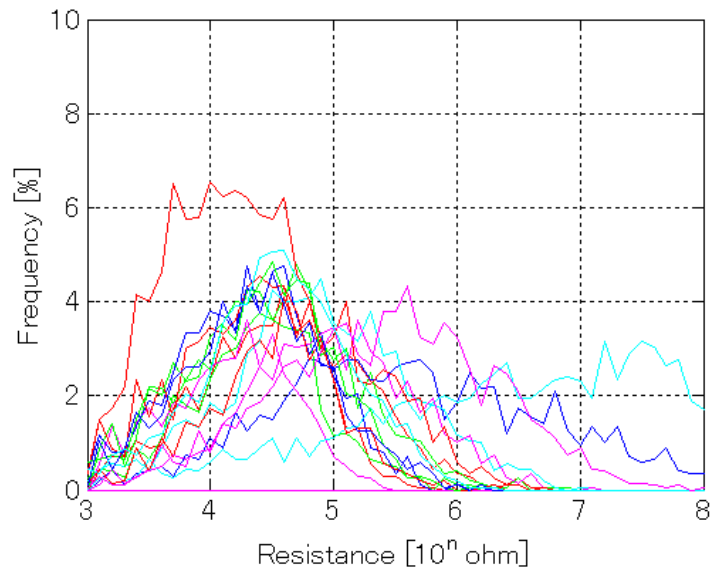


図 V.2.2.2().6.3-1 接触抵抗ばらつきの度数分布

同時計測された 20 本のプローブ先端接触抵抗値のばらつきを度数分布で表したものの例として、撓み量 2.0 μm における計測結果を図 V.2.2.2().6.3-1 に示す。昨年度までの 3D-BEANS センターでの研究により、摺動接触時のプローブ先端の接触抵抗値はワイブル分布を示すことが明らかになっているが、上記グラフに重ね書きされた 16 本のグラフ（プローブ #12~15 は除外）のいずれもほぼワイブル分布の形をしており、個々のプローブの挙動の傾向はシングルプローブの場合とほぼ変わらないことが分かる。また、接触抵抗値は $10^3 \sim 8$ のオーダで計測できており、従来 3D-BEANS センターで使用していた AFM の検出レンジと比較して遜色はない。

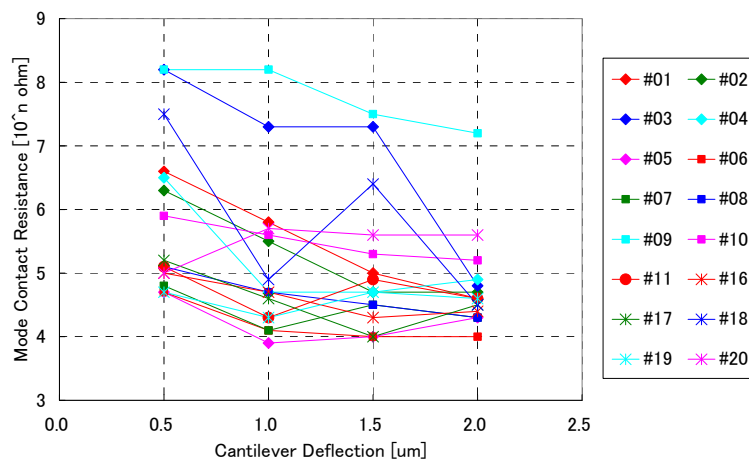


図 V.2.2.2().6.3-2 接触抵抗値の荷重依存性

更に、図V.2.2.2().6.3-1 のようにして得られた度数分布におけるピーク値（最頻値）に着目し、横軸をプローブ撓み量、縦軸を接触抵抗ピーク値としてまとめてプロットしたものを図V.2.2.2().6.3-2 に示す。全体として、撓み量（接触荷重に比例）の増加に伴って接触抵抗値が減少していくという、シングルプローブと同様の傾向が得られている。

(ii) -7 結論

今年度の実施計画に沿って、先端部の有効径・幅がサブミクロンであるマルチプローブデバイスのプロセスフローを立案し、4インチラインでの試作によりこれを実証した。同プロセスフローにより、最先端8インチラインを活用したマルチプローブアレイの試作を実施し、マルチプローブ評価装置を導入してこの評価を行った。

マルチプローブ評価装置を用いたマルチプローブデバイスの評価手法として、局所陽極酸化(LAO)法による描画、光てこを用いた直接高さ測定、プローブ先端接触電流値のリアルタイム計測の3つの手法を提案し、プローブ先端のSEM画像との相関を取ることで、これらの方法がデバイスの形状、特性ばらつきを検証するのに有効かどうかを検討した。結果として、電流値のリアルタイム計測法が最も直接的かつ容易にデバイスの特性ばらつき計測や不良スクリーニングをできることが分かった。

上記の電流値リアルタイム計測法を用いて、最先端8インチラインで試作したマルチプローブデバイスのロット間、及びウェハ内ばらつきを評価した。結果として、ロット間、ウェハ内での顕著な形状ばらつきは見られなかったものの、ロット間の電極配線形成プロセスの品質に差があることが示唆された。このことから、本デバイスを用いた手法が、最先端8インチラインの検査デバイスとして適用し得る可能性を示した。更に、電極材料の異なる4インチラインで試作したサンプルとの間で特性差が検出されたことから、電極材料の違いによる電氣的ナノトライボロジ現象の差異の検証についても本手法が有効であることを示した。

マルチプローブ評価装置の検出感度を検証するため、マルチプローブ先端摺動接触時の接触抵抗値評価を実施し、従来3D-BEANSセンターで活用していたAFMを用いたシングルプローブ評価系と同等の検出レンジでのナノトライボロジ現象評価が実現できることを確認した。

2.2.3 欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発

(1) 研究の目的

半導体の製造時には素子により製造ばらつきが生じる。MEMS デバイスにおいては、機械要素が含まれるため、この機械要素の大きさや形状のばらつきにより電気的特性や機械的な特性にばらつきを生じる。

半導体 LSI では、ウエハレベルの測定を行い、ばらつきを評価し設計にフィードバックをかけデバイス特性のばらつきを最小化している。MEMS デバイスにおいても製造ばらつきは歩留まりへ悪影響を与える要因であり、今後大口径化、デバイスの複雑化が進むとその影響はより大きくなる。SEM を用いて複数の素子構造を観察・比較することで、特性ばらつきの原因を解析することも可能であるが、SEM による観察は手間や時間がかかる。

そこで、本開発では電氣的・機械的特性よりばらつきの要因を容易に特定し、歩留まりの早期立ち上げを行い、設計工程の生産性・経済性を向上(スマート化)を目指した等価回路モデルパラメータによるばらつき評価手法の開発を行った。本開発では、

- 1.等価回路モデルを利用したばらつき要因を特定する手法開発
- 2.センサ TEG を用いた手法評価

の2つを実施した。以下で実施した内容について述べる。

(2) MEMS 等価回路モデルの概要とばらつき評価への応用

欠陥・ばらつき評価におけるモデリング・計測技術開発を行った。技術開発は MEMS 等価回路モデルを利用して行っている。以下に MEMS 等価回路モデルの概要とばらつき評価への応用について述べる。

(2) - 1 等価回路手法の一般

一般に運動方程式を電気等価回路で表し、回路シミュレーションを用いて解析をおこなう手法が行われてきた。この手法は、運動方程式以外にも、圧電や音響といった特性解析でも用いられる。等価回路手法の基礎となっているのは、系のアナロジーである。

簡単な例で説明する。図 V.2.2.3-1 に機械的な系、図 V.2.2.3-2 に電氣的な系を示す。

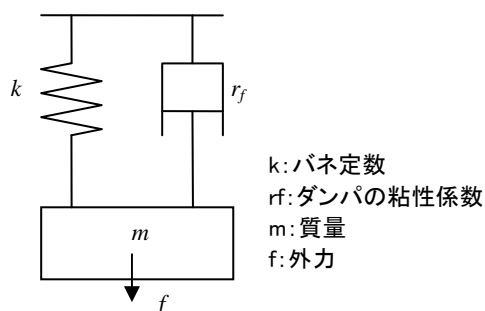


図 V.2.2.3-1 機械的な系

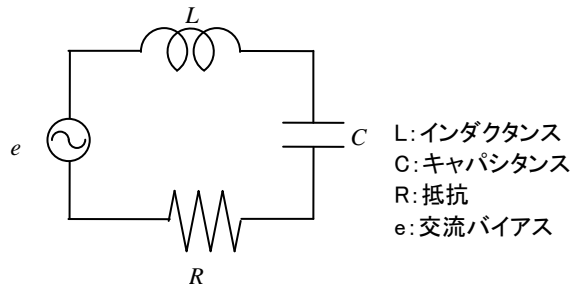


図 V.2.2.3-2 電気的な系

これらの系を表す基本方程式は、それぞれ、(数式 1-1)、(数式 1-2)のようになる。

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + r_f \frac{dx}{dt} + kx = f \quad (\text{数式 1-1})$$

$$L \frac{d^2 q}{dt^2} + R \frac{dq}{dt} + \frac{1}{C} q = e \quad (\text{数式 1-2})$$

x : 変位

q : 電荷

t : 時間

系の関係を表す基本方程式の形式が同じであり、係数間の対応や状態変数間の対応が得られる。対応のとり方は複数あるが、本MEMS等価回路モデルで採用している対応を表 V.2.2.3-1に示す。

表 V.2.2.3-1 機械系変数と電気系変数の対応

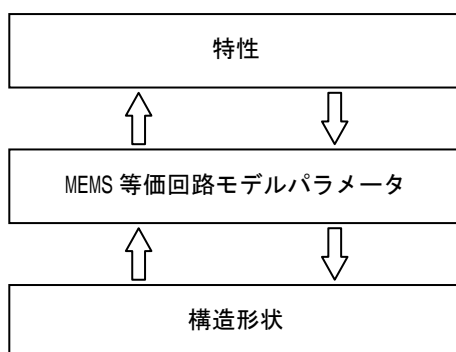
機械系変数	電気系変数
変移 x	電荷 q
速度	電流
質量 M	インダクタンス L
コンプライアンス k	キャパシタンス C
機械抵抗 r _f	電気抵抗 R

これらの対応により、運動方程式が与えられたときに、この方程式の解を回路シミュレーションで解くことができる。

(2) - 2 MEMS 等価回路モデル

MEMS 等価回路モデルは、前述の等価回路手法を基にしている。MEMS デバイスの微小振動の機械的特性を系のアナロジーにより等価回路で表すと共に、電気系と機械系のエネルギーの変換を含めた等価回路表現である。

機械的特性をアナロジーで等価回路表現した機械回路は、集中質点系モデルに近似したものに相当する。このため、不純物ドーピングをおこなわない場合など均一な材料とみなせる場合には、MEMS等価回路モデルのパラメータは形状にのみ依存するものとなる。よって、MEMS等価回路モデルパラメータは、形状との関連が明確であり、MEMSデバイスの特性値と形状とを見通しよく説明できる(図V.2.2.3-3)。



図V.2.2.3-3 等価回路モデルパラメータの位置付け

MEMS等価回路モデルは、回路シミュレータを用いて特性のシミュレーションをおこなう手法である。MEMS等価回路モデルと呼ぶものは、回路シミュレータへ入力データであるネットリストの形で表される。MEMS等価回路モデルは、回路素子の組み合わせ方とインダクタンスやキャパシタンスといった各回路素子の値からなる。各回路素子の種類と値の集合をMEMS等価回路モデルパラメータと呼ぶ。MEMS等価回路モデルパラメータの算出方法は、MEMSの形状から算出する方法と、MEMSの特性値から算出する方法がある。それぞれの関係を図V.2.2.3-4に示す。

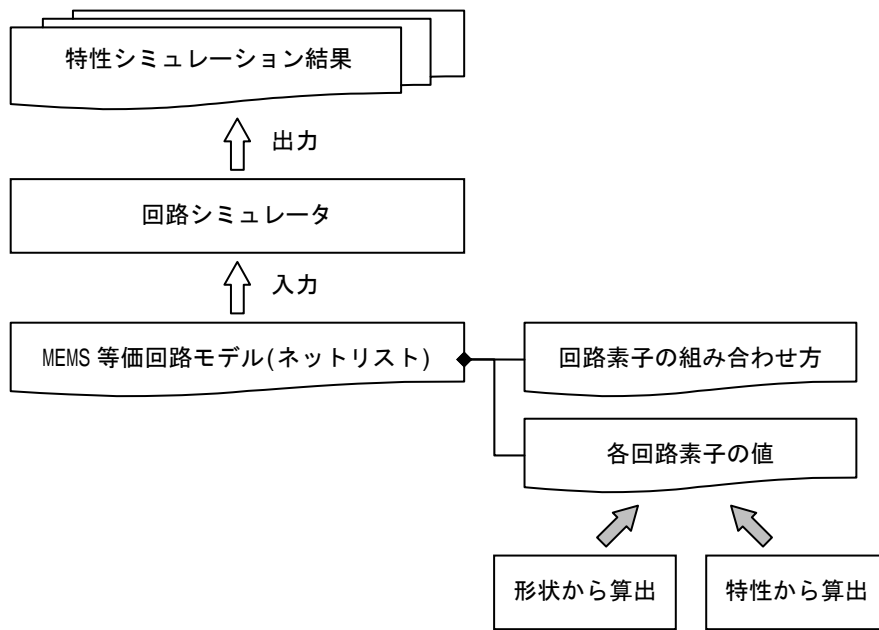


図 V.2.2.3-4 MEMS 等価回路モデルの構成

(2) - 3 等価回路モデルパラメータによるばらつき評価への応用

図 V.2.2.3-3 に示したように、形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出し、特性値をシミュレーションすることが可能である。また、逆に、測定で得られた特性値を再現するような MEMS 等価回路モデルパラメータを決定することができる。いわゆるパラメータ抽出である。MEMS 等価回路モデルパラメータを基本とし、パラメータ抽出をおこなうことによって以下のような応用が可能である。

回路設計への応用

周辺回路を含めた回路設計から見て、MEMS デバイスの動作特性を等価回路モデルで表現することにより、MEMS デバイスを通常の回路素子と同様に回路シミュレーションが可能となる。

作製した MEMS デバイスの特性から等価回路モデルパラメータを抽出することにより、プロセスの実力を考慮した等価回路モデルパラメータを回路シミュレーションで利用可能となる。よって、回路設計の精度が向上する。

加えて、形状ばらつきに起因する特性ばらつきを回路設計で考慮するためのマージン設定に応用することができる。特性ばらつきを等価回路モデルパラメータの分布としてモデル化し、統計的な回路設計手法に用いることができる。

ウエハプロセスへの応用

ウエハ上に作成した MEMS デバイスの評価指標として、従来は、測定した特性値や観察による測長値などが用いられてきた。MEMS 等価回路モデルパラメータのパラメータ抽出を評価指標に加えると、従来の評価指標である特性値と測長値の関連性を把握することができる。また、MEMS 等価回路モデルパラメータは、比較的直接的形状と結びついているので、抽出した MEMS 等価回路モデルパラメータでばらつき評価をおこなうことで、測長値の評価を代替できる可能性がある。

(3) ばらつき評価手法

(3) - 1 評価手法

製造時に素子により製造ばらつきが生じる。MEMS デバイスにおいては、機械要素が含まれるため、この要素の大きさや形状のばらつきにより電気的特性や機械的な特性にばらつきを生じる。この場合、SEM を用いて複数の素子構造を観察・比較することで、特性ばらつきの原因を解析することも可能であるが、SEM による観察は手間や時間がかかる。また、素子の内部構造を観察するためには、断面 SEM 等を用いる破壊検査が必要である。

今回開発した手法は、等価回路パラメータと構造寸法の相関関係を利用し、電気的・機械的特性から効率よくばらつきを評価する手法である。

図 V.2.2.3-5 に評価の流れを示した。電気的・機械的特性から等価回路パラメータを抽出し、等価回路パラメータでばらつきを評価する。等価回路パラメータと構造寸法の相関関係を利用して等価回路パラメータばらつき評価から、構造寸法のばらつき評価を行う。

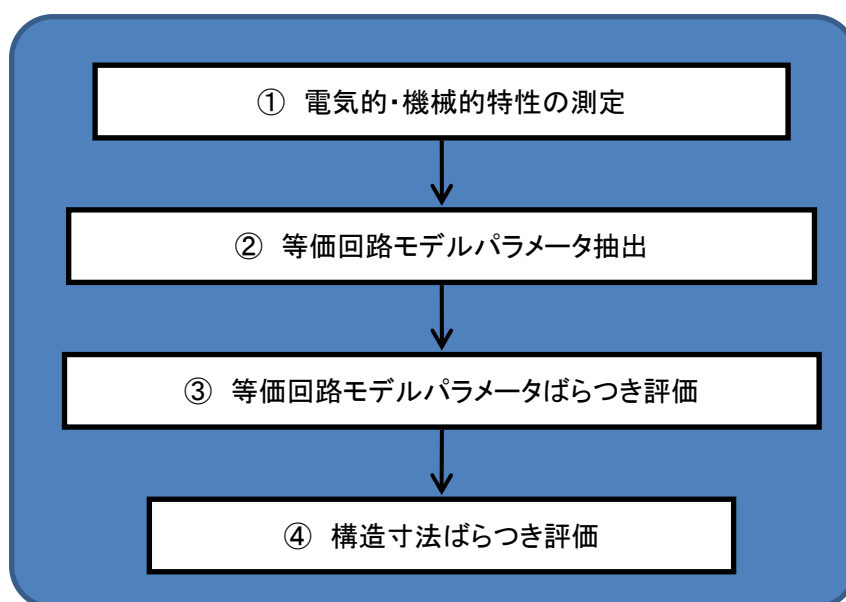


図 V.2.2.3-5 評価の流れ

以下、本評価手法で用いる要素技術について説明する。

(3) - 2 電氣的・機械的特性の計測技術

半導体 LSI では、ウエハレベルの測定を行い、ばらつきを評価し設計にフィードバックをかけデバイス特性のばらつきを最小化している。MEMS デバイスにおいても製造ばらつきは歩留まりへ悪影響を与える要因であり、今後大口径化、デバイスの複雑化が進むとその影響はより大きくなる。

しかし、MEMS デバイスの評価を行うためには半導体 LSI の評価にはない機能が求められる。MEMS デバイスは LSI と異なり機械的な構造をもつため機械特性を測定する必要がある。また、機械的な構造は構造スケールが小さなため空気による影響が大きく、真空パッケージがなされ場合がある。そのため、真空での特性を評価する必要がある。

まとめると、MEMS デバイスの評価を行う測定装置には以下の条件が求められる。

- 電気特性（電流値一周波数）と機械特性（振動速度一周波数）を同時に測定することができる。
- ウエハレベルで測定することができる。
- 真空状態での測定することができる。

現在、この条件を同時に満たす市販の装置がない。今回、これらの条件を満たす「MEMS デバイス特性評価装置」を新たに開発した。

本装置は電気特性（電流値一周波数）と機械特性（振動速度一周波数）を同時に測定ことができ、可動部をもつセンサの動きを直接測定できる。また、ウエハレベルで計測が可能であるため、ウエハ面内のばらつきを容易に測定することができる。測定を真空チャンバ内で行うため、大気状態の他に真空状態での計測が可能である。

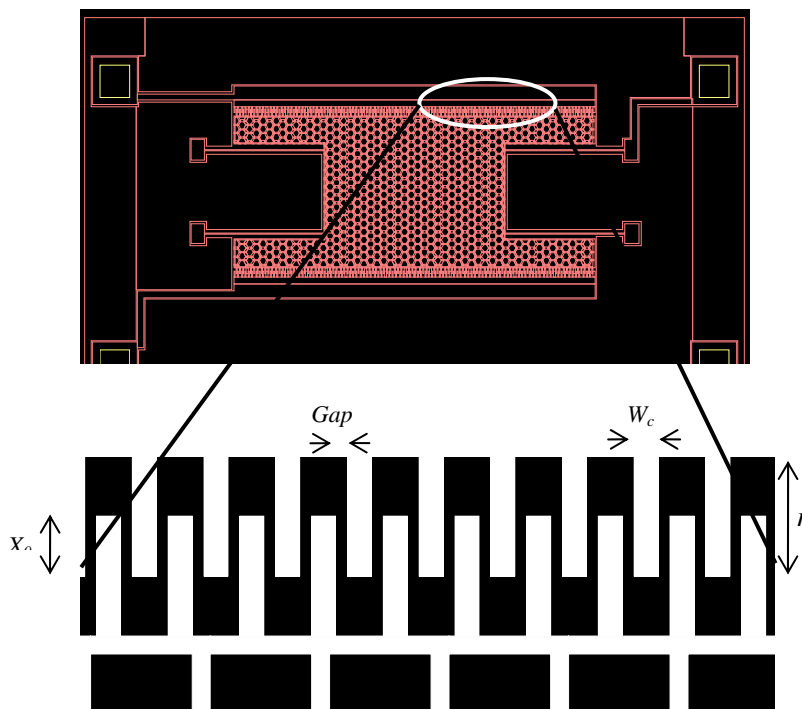
装置の外観を図 V.2.2.3-6 に示す。



図 V.2.2.3-6 MEMS デバイス特性評価装置

(3) - 3パラメータ抽出

図V.2.2.3-5に示した評価の流れの中の②の等価回路モデルパラメータ抽出手法を以下に述べる。図V.2.2.3-7に示す3端子の静電型櫛歯加速度センサのMEMS等価回路モデルパラメータを出力特性から解析的に求める方法を検討した。



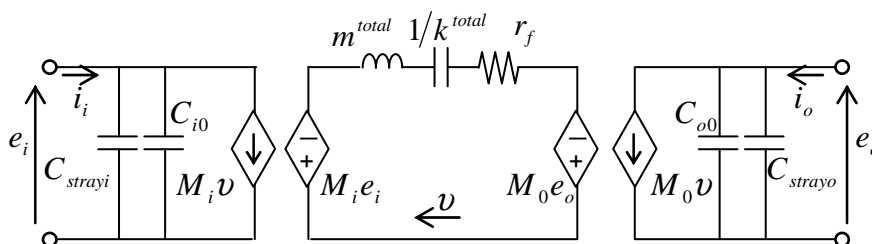
図V.2.2.3-7 静電型櫛歯加速度センサ

可動電極の両端に固定電極を有し、3つの電極端子を持つ静電型のMEMS等価回路は同様の抽出手順で、MEMS等価回路モデルパラメータを抽出できる。

抽出方法

アドミタンス行列

図V.2.2.3-8に外力が働いていない状態での静電型加速度センサの等価回路図を示す。簡単のため、固定電極間に並列に入る浮遊容量は無視している。



図V.2.2.3-8 静電型櫛歯加速度センサの等価回路図(外力印加がない場合)

表V.2.2.3-2 MEMS 等価回路モデルパラメータ

回路図中記号	説明	次元
e_i, e_o	交流電圧源	電圧、位相
i_i, i_o	交流電流	電流、位相
f	外力	電圧、位相
v	可動部速度	電流、位相
L_m	可動部等価質量	インダクタンス
C_k	等価コンプライアンス	キャパシタンス
R_f	機械抵抗	レジスタンス
C_{i1}, C_{o2}	固定電極と可動電極の電極間容量	キャパシタンス
C_{strayi}, C_{strayo}	固定電極と可動電極間に付随する浮遊容量	キャパシタンス
C_{stray}	固定電極間に付随する浮遊容量	キャパシタンス
M_i, e_i, M_o, e_o	電圧増幅率	無次元
M_i, i_i, M_o, i_o	電流増幅率	無次元

2 端子対回路であるので、端子対の電流と端子電圧の関係をアドミタンス行列で表すことができる。アドミタンス行列 \mathbf{Y} を

$$\mathbf{Y} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \quad (\text{数式 1-3})$$

とすると、

$$\begin{pmatrix} i_i \\ i_o \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Y_{11} & Y_{12} \\ Y_{21} & Y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_i \\ e_o \end{pmatrix} \quad (\text{数式 1-4})$$

である。ここで、

$$Z_m = j\omega m^{total} + \frac{k^{total}}{j\omega} + r_f \quad (\text{数式 1-5})$$

：角周波数

j ：虚数単位

とする。可動部の速度 v は、

$$v = \frac{M_i e_i - M_o e_o}{Z_m} \quad (\text{数式 1-6})$$

と表すことができ、端子対電流 i_i i_o は

$$i_i = \left(j\omega(C_{i0} + C_{stray_i}) + \frac{M_i^2}{Z_m} \right) e_i - \frac{M_i M_o}{Z_m} e_o \quad (\text{数式 1-7})$$

$$i_o = -\frac{M_i M_o}{Z_m} e_i + \left(j\omega(C_{o0} + C_{stray_o}) + \frac{M_o^2}{Z_m} \right) e_o \quad (\text{数式 1-8})$$

と表せる。

可動電極の電流

他方の固定電極と可動電極が短絡されるのと等しい場合、 $e_o=0$ である。端子対電流 i_i は、

$$i_i = \left(j\omega(C_{i0} + C_{stray_i}) + \frac{M_i^2}{Z_m} \right) e_i \quad (\text{数式 1-9})$$

となる。これを等価回路図で表すと図 V.2.2.3-9 のようになる。

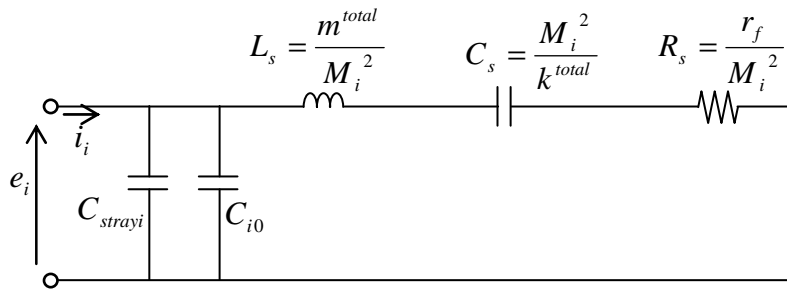


図 V.2.2.3-9 i_i から見た等価回路図

(数式 1-9)を横軸に角速度、縦軸に電流値の模式グラフで表すと、図 V.2.2.3-10になり、傾きが電極間容量と浮流容量の和 $C_{i0} + C_{strayi}$ に相当する。

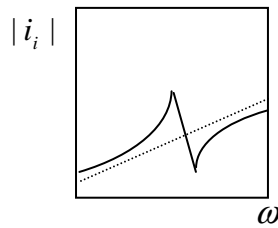


図 V.2.2.3-10 可動電極電流特性模式図

固定電極の電流

同様に端子対電流 i_o は、

$$i_o = \frac{M_i M_o}{Z_m} e_i = \frac{M_i M_o}{j\omega m^{total} + \frac{1}{j\omega k^{total}} + r_f} e_i \quad (\text{数式 1-10})$$

である。これを等価回路図で表すと図 V.2.2.3-11 のようになる。図 V.2.2.3-11 からわかるように、機械系回路である直列 LCR 回路を見ていることに相当する。

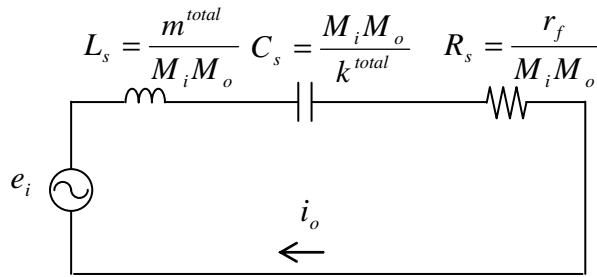


図 V.2.2.3-11 i_o から見た等価回路図

直列 LCR 回路インピーダンス Z は、次式で表せる。

$$Z = \frac{e_i}{i_o} = j\omega L_s + \frac{1}{j\omega C_s} + R_s = R_s + j\left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s}\right) \quad (\text{数式 1-11})$$

(数式 1-11)を横軸に角速度、縦軸にインピーダンスの模式グラフで表すと図 V.2.2.3-12 のようになる。

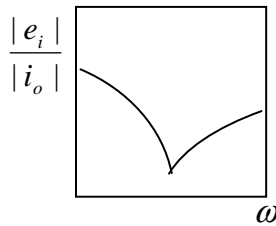


図 V.2.2.3-12 直列 LCR 回路インピーダンス模式図

インピーダンスの大きさは次式で表せ、

$$\left| \frac{e_i}{i_o} \right|^2 = R_s^2 + \left(\omega L_s - \frac{1}{\omega C_s} \right)^2 \quad (\text{数式 1-12})$$

インピーダンスの極小値が、直列抵抗である。

$$\underline{\underline{R_s = \min\left(\left| \frac{e_i}{i_o} \right| \right)}} \quad (\text{数式 1-13})$$

直列回路では、

$$Q = \frac{\omega_0 L_s}{R_s} \quad (\text{数式 1-14})$$

であるから

$$\underline{\underline{L_s = \frac{R_s Q}{\omega_0}}} \quad (\text{数式 1-15})$$

によってインダクタンスを算出することができる。

ここで、 Q は Q 値である。

$$Q = \frac{\omega_0}{\omega_1 - \omega_2} \quad (\text{数式 1-16})$$

ω_0 は、変位が最大となる角速度である。 ω_1 の ω_2 は、変位が最大値の $1/\sqrt{2}$ になる角速度である。

共振周波数と直列インダクタンスから直列キャパシタンスを求めることができ、

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_s C_s}} \quad (\text{数式 1-17})$$

であるから、次式で求めることができる。

$$\underline{\underline{C_s = \frac{1}{\omega_0^2 L_s}}} \quad (\text{数式 1-18})$$

可動部速度

エネルギー関数から運動方程式を導出する過程で

$$v = \frac{M_i}{j\omega m^{total} + \frac{1}{j\omega k^{total}} + r_f} e_i \quad (\text{数式 1-19})$$

が得られる。これを等価回路図で表すと、図 V.2.2.3-13 のようになる。

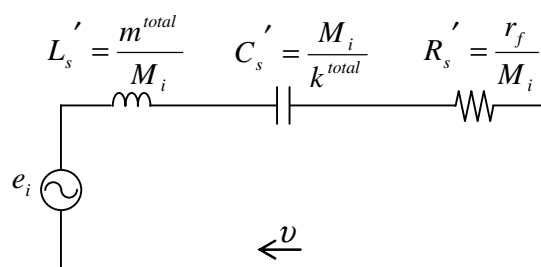


図 V.2.2.3-13 v から見た等価回路図

直列 LCR 回路であるので、速度と周波数の特性が得られれば、同様に回路素子パラメータを決定することができる。

また、(数式 1-11) と (数式 1-19) から 電気機械結合定数 M_i を算出することができる。

$$\underline{\underline{M_i}} = \frac{i_o}{v} \quad (\text{数式 1-20})$$

抽出方法の検証

前述の手順に従って、MEMS 等価回路パラメータの抽出方法の検証をおこなった。

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出に使用した測定データを図 V.2.2.3-14および図 V.2.2.3-15に示す。図 V.2.2.3-14が可動電極の電流-周波数特性であり、図 V.2.2.3-15が固定電極の電流-周波数特性である。

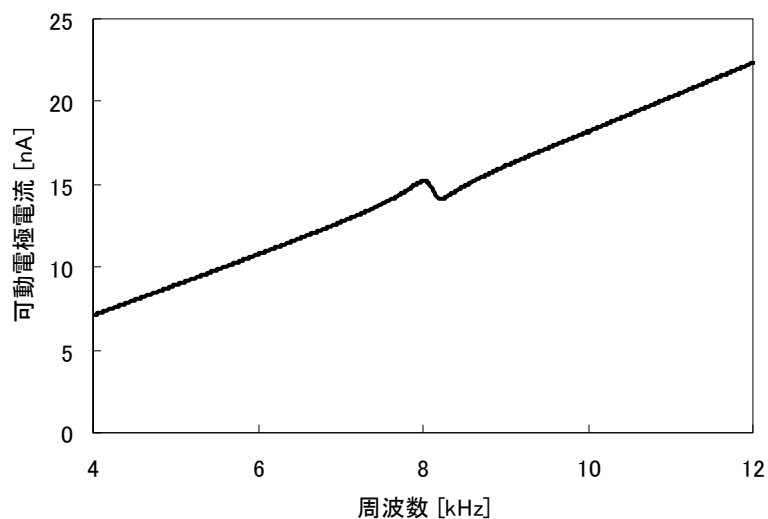


図 V.2.2.3-14 可動電極電流-周波数特性測定データ

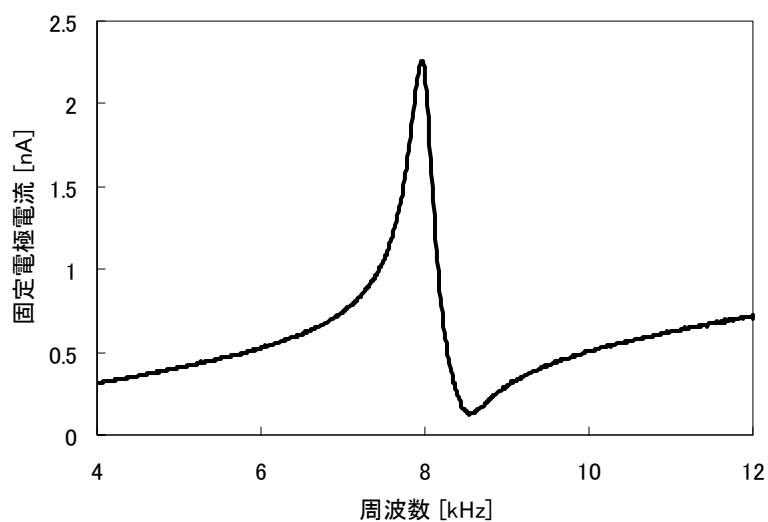
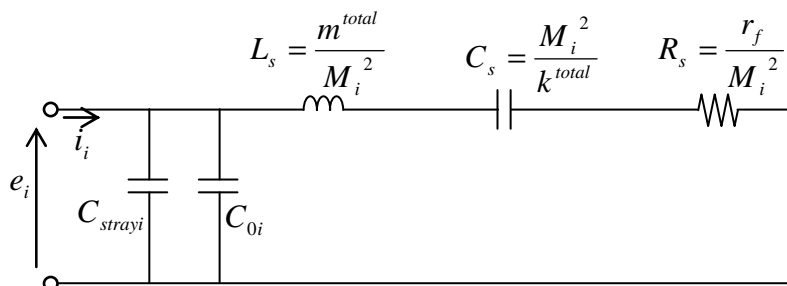
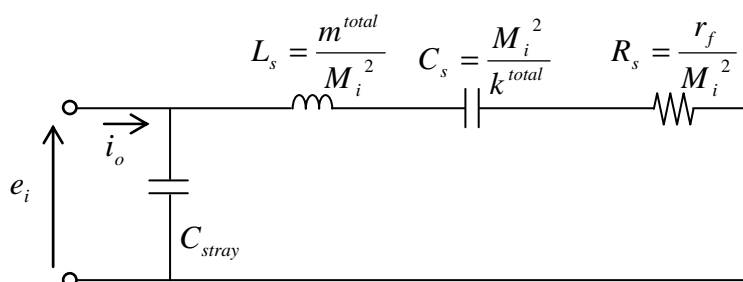


図 V.2.2.3-15 固定電極電流-周波数特性測定データ

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出の対象とした構造は、可動電極と固定電極の電極間の静電容量を構成する構造が対称である。このため、電気機械結合定数（図V.2.2.3-9および図V.2.2.3-11の M_i 、 M_o ）は等しい。図V.2.2.3-9、図V.2.2.3-11は、それぞれ図V.2.2.3-16、図V.2.2.3-17のように書き換えられる。また、図V.2.2.3-17には、固定電極間に並列に入る浮遊容量 C_{stray} を描き入れている。



図V.2.2.3-16 i_i から見た等価回路図(対称なデバイスの場合)



図V.2.2.3-17 i_o から見た等価回路図(対称なデバイスの場合)

測定した出力特性から算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値を表V.2.2.3-3に示す。

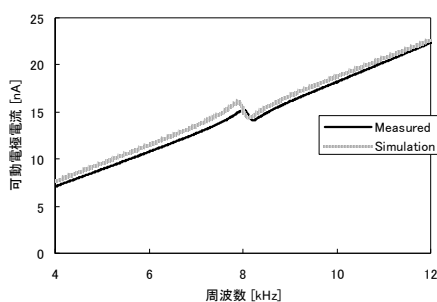
表V.2.2.3-3 MEMS等価回路モデルパラメータ抽出結果

回路記号	値
$C_{i0} + C_{strayi}$	2.897×10^{-13} [F]
C_{stray}	1.134×10^{-14} [F]
R_s	4.616×10^8 [・]
L_s	2.565×10^5 [H]
C_s	1.543×10^{-15} [F]

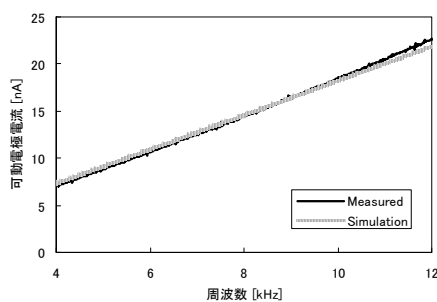
算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値(表V.2.2.3-3)でシミュレーションを行い、抽出した値が特性値を再現するものであることを確認する。

比較結果を図V.2.2.3-18、図V.2.2.3-19および図V.2.2.3-20に示す。図V.2.2.3-18は、2端子モードの「電流計A」の値を比較したものである。シミュレーションの方が、わずかに電流が大きめである。また、共振周波数の値が若干低めである。全体的に実測の形状を再現できている。図V.2.2.3-19は、3端子モードの値を比較したものである。共振特性を示さない傾向を再現できている。図V.2.2.3-20は、3端子モードの値を比較したものである。シミュレーション値は、実測特性とよく一致している。

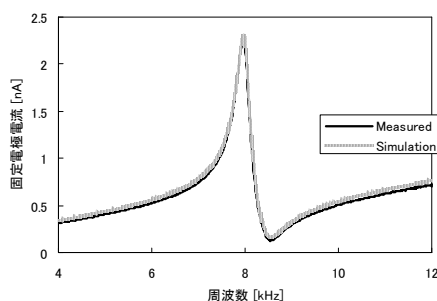
以上から、実測特性から算出したMEMS等価回路モデルパラメータの値は、実測値をよく再現することが確認できた。



図V.2.2.3-18 2端子モード測定電流比較



図V.2.2.3-19 3端子モード測定電流比較



図V.2.2.3-20 3端子モード測定電流(電流計C)比較

(3) - 4 構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係

はじめに、静電型楯歯加速度センサの構造寸法を測長 SEM を利用して測定し、その測定結果を入力としてシミュレータで各電氣的・機械的特性（等価回路モデルパラメータ）に対する感度解析を行うことで構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係を検討した。

測長値をヒストグラムで表したものを図 V.2.2.3-21 から図 V.2.2.3-25 に示す。それぞれ、板バネの幅、折り返しバネの幅、楯歯の幅、四角形格子の幅、六角形格子の幅の測長結果である。測長結果はおおよそ正規分布に従うことがわかる。

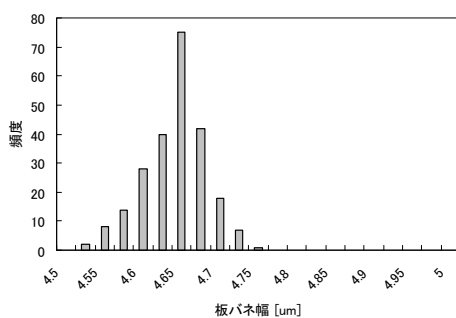


図 V.2.2.3-21 板バネ幅測長値ヒストグラム

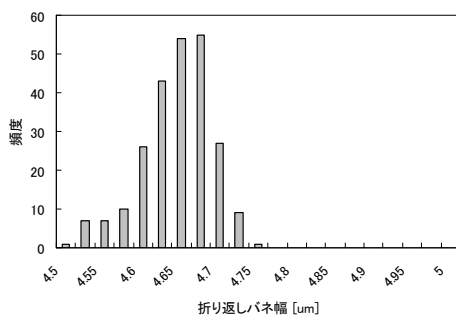


図 V.2.2.3-22 折り返しバネ幅測長値ヒストグラム

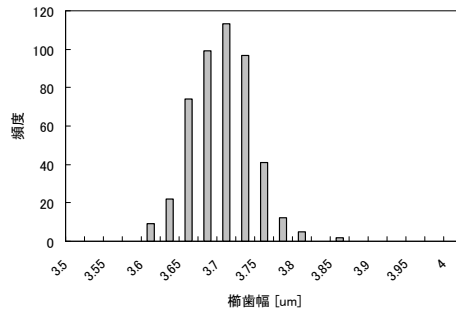


図 V.2.2.3-23 櫛歯幅測長値ヒストグラム

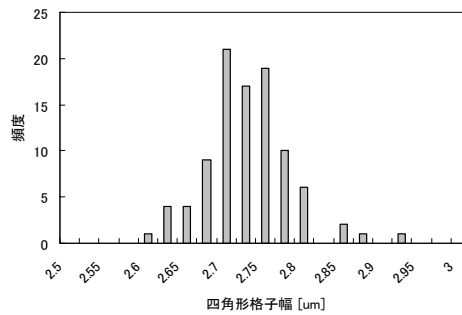


図 V.2.2.3-24 四角形格子幅測長値ヒストグラム

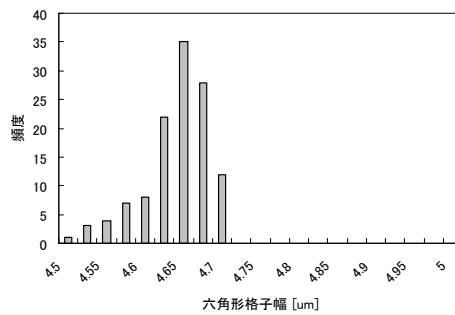


図 V.2.2.3-25 六角形格子幅測長値ヒストグラム

測長値の平均値と標準偏差を表 V.2.2.3-4 に示す。測長箇所によらず、平均値とマスク寸法の差はおおよそ $0.37\mu\text{m}$ 小さい値であり、標準偏差は $0.04\mu\text{m}$ である。測長箇所によらず、標準偏差がおおよそ同程度の正規分布に従うことがわかる。

表 V.2.2.3-4 測長値平均、標準偏差

測長箇所	マスク寸法	サンプル数	平均値	平均値とマスク寸法の差	標準偏差
板バネ幅	5 μm	240	4.629 μm	0.371 μm	0.040 μm
折り返しバネ幅	5 μm	240	4.632 μm	0.368 μm	0.046 μm
櫛歯幅	4 μm	474	3.683 μm	0.317 μm	0.040 μm
六角形格子幅	5 μm	120	4.628 μm	0.372 μm	0.041 μm

次に、測長値間の相関を確認した。同一デバイスの梁幅と櫛歯の幅をグラフにしたものが、図 V.2.2.3-26 である。同様に櫛歯幅と四角形格子幅のグラフが図 V.2.2.3-27、櫛歯幅と六角形格子幅のグラフが図 V.2.2.3-28 である。測長値間には、正の相関が見られる。よって、測長箇所ごとの測長値のばらつきは独立ではなく、相関がある。つまり、櫛歯幅が平均より大きく形成されたデバイスは、櫛歯幅、格子幅ともに同程度に平均より大きいということである。これを確かめるために、軸を平均値との差に取り直したグラフを図の右側に併せて示す。

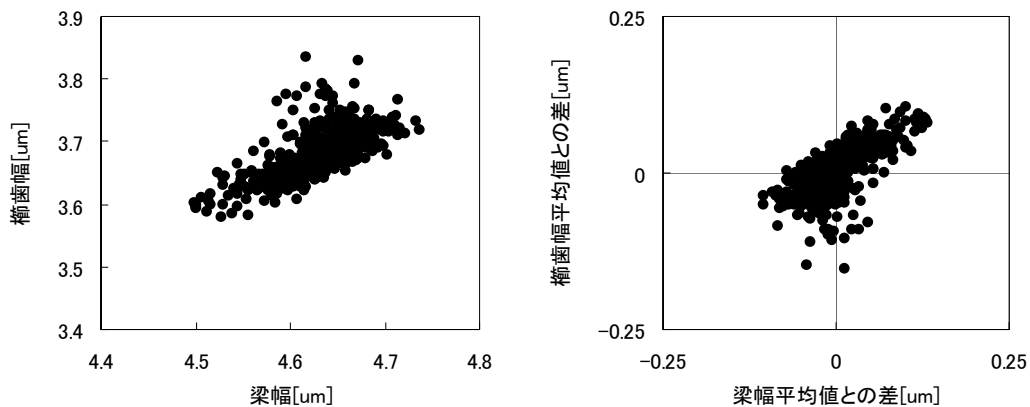


図 V.2.2.3-26 梁幅と櫛歯幅測長値の相関

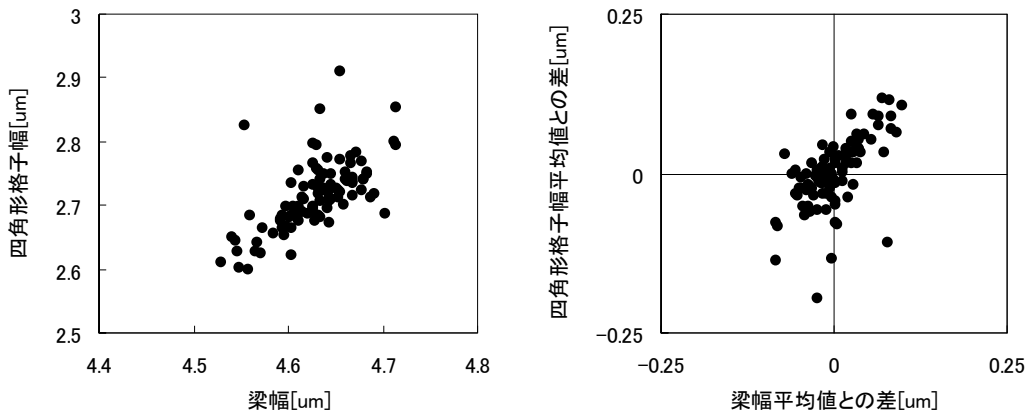


図 V.2.2.3-27 梁幅と四角形格子幅の相関

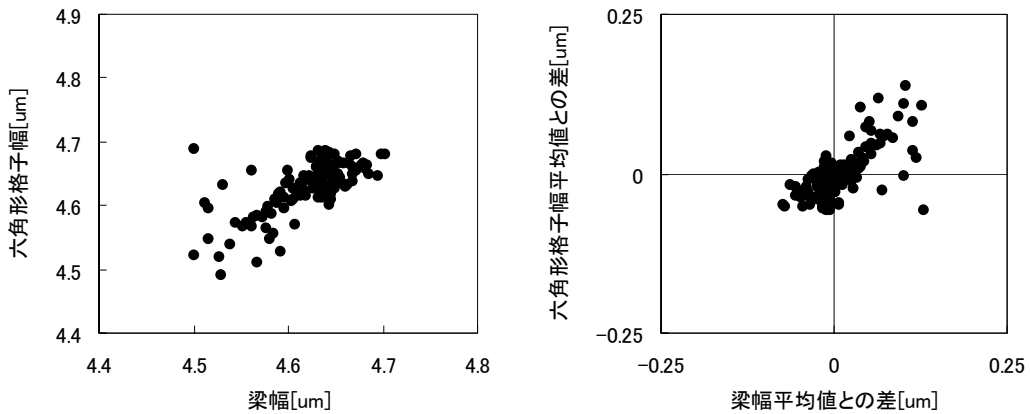


図 V.2.2.3-28 梁幅と六角形格子幅の相関

標準偏差が測長箇所によらず同程度であること、測長箇所間には測長値の相関があることがわかった。形状ばらつきをモデル化するために、マスク寸法とできあがり形状との差 X_s を変数とする。できあがり形状はマスク寸法から一律に X_s だけ差を持つとする。全測長箇所のマスク寸法との差をヒストグラムで表すと図 V.2.2.3-29 のようになる。 X_s の平均値と標準偏差は表 V.2.2.3-5 のとおりである。よって、形状ばらつきモデルとし、マスク寸法とできあがり形状との差 X_s を平均値 $0.341 \mu\text{m}$ 、標準偏差 $0.052 \mu\text{m}$ に従う正規分布としてモデル化する。

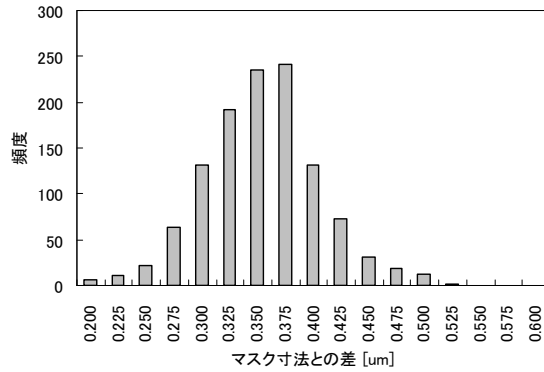


図 V.2.2.3-29 全測長箇所のマスク寸法との差のヒストグラム

表 V.2.2.3-5 全測長箇所のマスク寸法との差の平均、標準偏差

平均値 μ	0.341 μm
標準偏差 σ	0.052 μm

形状ばらつきをモデル化したパラメータであるマスク寸法との差異 X_s を表V.2.2.3-5に示す平均値、標準偏差で表される正規分布と仮定し、共振周波数のばらつきをシミュレーションした。

シミュレーションは、 X_s を μ 、 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ 、の5ケースをおこなった。図V.2.2.3-30にシミュレーション結果を示す。実測は、横軸を梁幅測長値のマスク寸法との差をとった。シミュレーションは、 X_s が増加すると共振周波数が減少する形状を再現しており、減少の傾きが実測と同様の傾向が得られた。

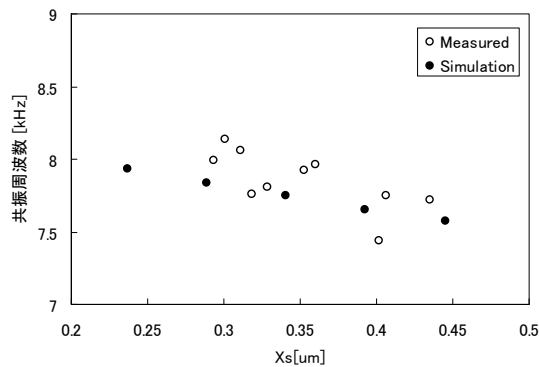


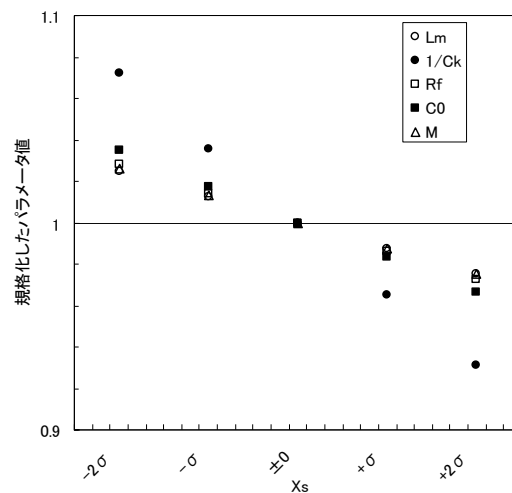
図 V.2.2.3-30 形状ばらつきと共振周波数の関係

モデル化した形状ばらつきをもとに、 X_s に対する MEMS 等価回路モデルパラメータの感度を求めた。

X_s の平均を μ 、標準偏差を σ で表すとき、 X_s を μ 、 $\mu \pm \sigma$ 、 $\mu \pm 2\sigma$ とした5ケースに関し、MEMS 等価回路モデルを算出した。 X_s が平均値でのMEMS等価回路モデルパラメータで規格化し値を図V.2.2.3-31に示す。この結果より以下の事が分かる。

- C_k 以外は構造寸法のばらつきに対して負の相関を持つ
- C_k の逆数が最も感度が高い

機械系の変数との対応を表V.2.2.3-6に示す。 C_k は、集中質点系へ近似した場合のバネ定数に相当し、特性ばらつきを抑制するためには、バネ構造に相当する梁のばらつきを抑えることが効果的であることが分かる。



図V.2.2.3-31 X_s に対する MEMS 等価回路モデルパラメータ値の変化率

表V.2.2.3-6 機械系の変数との対応

機械系変数	電気系変数
質量	Lmインダクタンス
コンプライアンス (ばね定数)	Ckキャパシタンス
機械抵抗	Rf電気抵抗

(4) 評価手法の検証

(4) - 1 電氣的・機械的特性の計測

本プロジェクトで作成したセンサ TEG 内の静電型楯歯加速度センサのパターン Variable_b3 に関して評価を実施した。

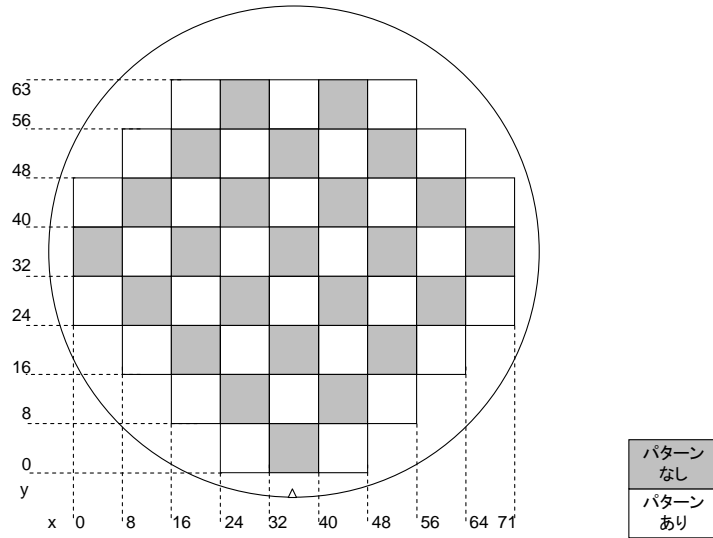
図V.2.2.3-32にショット内の配置を示す。左右に同じ配置を持つ。太線で囲まれた範囲がショット内のデバイス配置単位(以降、チップと呼ぶ)である。太線の枠の中に点線で上下に分割したものは、1つのチップの中に、2つのデバイスを持つことを表す。Variable_b3 を灰色で塗りつぶし表示した。

右と同じレイアウト	Variable_c1	Variable_b1	Variable_a1	Sensor_a1
	Variable_c2	Variable_b2	Variable_a2	Sensor_a2
	Variable_c3	Variable_b1_3um	Variable_a1_3um	Sensor_a1_3um
	Variable_c4	Variable_b2_3um	Variable_a2_3um	Sensor_a2_3um
	Noise_2um	Variable_b3	Variable_a3	Sensor_a3
	Noise_3um	Variable_b4	Variable_a4	Sensor_a4
	Noise_2.5um	Variable_b3_3um	Variable_a3_3um	Sensor_a3_3um
	Noise_3.5um	Variable_b4_3um	Variable_a4_3um	Sensor_a4_3um
	Variable_a1_0comb	NBE	Membr_R700_4	Gyro_A210_4
	Variable_a2_0comb			
	Variable_a3_0comb	Gyro_A500_4_X2um	Membr_R700_8	Gyro_A210_8
	Variable_a4_0comb			
	Variable_b1_0comb	Gyro_A500_4_X5um	Membr_R800_4	Gyro_A500_4
	Variable_b2_0comb			
	Variable_b3_0comb	Gyro_A500_4_X2_L125	Membr_R800_8	Gyro_A500_8
	Variable_b4_0comb			

図V.2.2.3-32 ショット内配置

図V.2.2.3-33にセンサTEGのウエハ内の配置を示す。図V.2.2.3-32に示すパターンを持つ部分と持たない部分が千鳥格子状に配置されている。パターンのある区画が 30 であり、1 ショットに同じデバイスが 2 つ配置されているので、ウエハ内には同一デバイスが 60 個存在する。

ウエハ内のチップ位置を表す座標は、ノッチ側を下にしたときの左下を(0,0)として、チップに対して割り当てる。



図V.2.2.3-33 ウエハ内配置

測定したチップ座標と測定モードを表V.2.2.3-7に示す。○印が付いているものが測定を実施したことを示す。

表V.2.2.3-7 測定デバイス

番号	x 座標	y 座標	2 端子モード	3 端子モード
1	17	45	○	
2	1	29	○	
3	25	37	○	
4	25	5	○	
5	33	13	○	
6	33	29	○	○
7	41	37	○	
8	41	5	○	
9	49	45	○	
10	57	53	○	○
11	61	21	○	
12	65	29	○	
13	9	21	○	
14	9	53	○	○
15	21	45		○
16	37	13		○
17	37	29		○
18	37	61		○
19	53	45		○
20	5	29		○
21	69	29		○

2 端子モードで測定した場合の、可動電極の電流-周波数特性を図V.2.2.3-34に示す。3 端子モードで測定した場合の、固定電極の電流周波数特性を図V.2.2.3-35に示す。特性カーブ

がばらつきを持っていることがわかる。

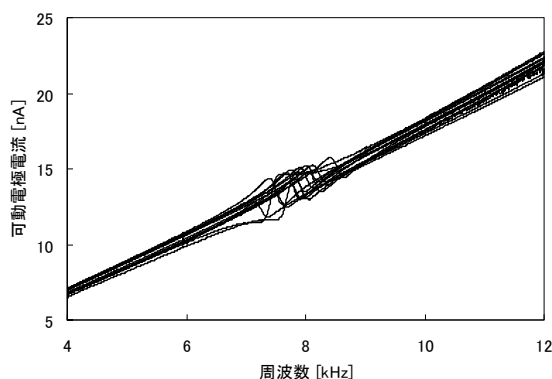


図 V.2.2.3-34 2 端子モード可動電極電流特性

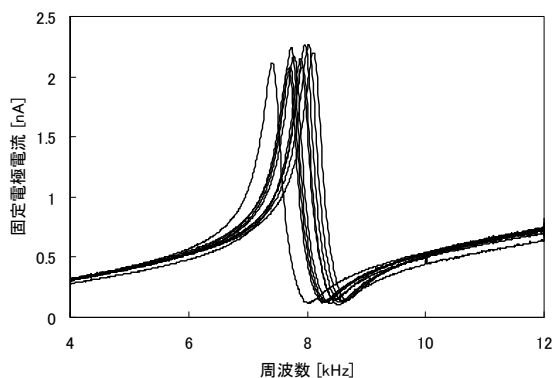


図 V.2.2.3-35 3 端子モード固定電極電流特性

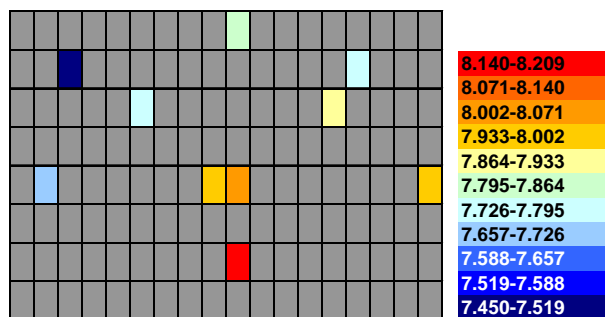
共振周波数とQ値を表V.2.2.3-8に示す。共振周波数およびQ値は機械的な特性から決めた。(数式 3-9)と(数式 3-17)からわかるように、3 端子モードの固定電極電流は、速度特性の定数倍であるので、3 端子モードの固定電流から求めると機械的な特性から決めるのと同様である。

共振周波数の平均値は 7.858kHz、標準偏差は 0.190kHz である。Q 値の平均値は 27.118、標準偏差は 0.831 である。

表 V.2.2.3-8 出力特性値

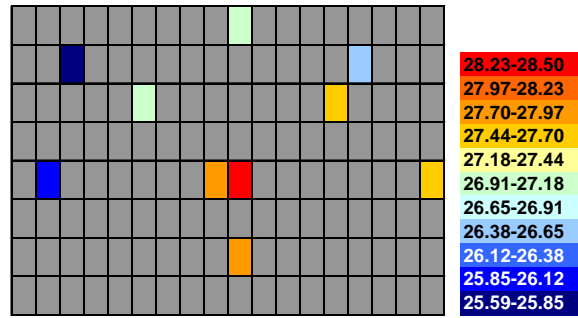
番号	x 座標	y 座標	共振周波数 [kHz]	Q 値
1	17	45	—	—
2	1	29	—	—
3	25	37	—	—
4	25	5	—	—
5	33	13	—	—
6	33	29	8.000	27.930
7	41	37	—	—
8	41	5	—	—
9	49	45	—	—
10	57	53	7.750	26.498
11	61	21	—	—
12	65	29	—	—
13	9	21	—	—
14	9	53	7.450	25.589
15	21	45	7.770	26.992
16	37	13	8.140	27.967
17	37	29	8.060	28.233
18	37	61	7.810	26.983
19	53	45	7.920	27.458
20	5	29	7.720	26.005
21	69	29	7.960	27.523
平均			7.858	27.118
標準偏差			0.190	0.831

図 V.2.2.3-36 および図 V.2.2.3-37 に共振周波数と Q 値のウエハマップ表示を示す。いずれも中心からノッチ側の値が高く、上側は値が低くなっており、共振周波数と Q 値の分布傾向は似ている。図 V.2.2.3-38 は、共振周波数と Q 値を平均値で規格化した値をグラフ化したものである。このグラフからも共振周波数と Q 値の分布はほぼ同じ傾向を示すことが分かる。



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-36 共振周波数ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-37 Q 値ウエハマップ表示

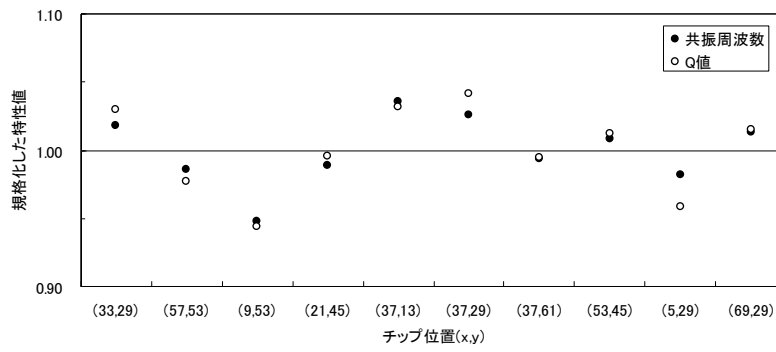


図 V.2.2.3-38 共振周波数と Q 値の傾向

(4) - 2等価回路モデルパラメータ抽出

測定した電気・機械特性からMEMS等価回路モデルパラメータの抽出を行った。抽出を行った等価回路モデルパラメータは電極間容量 C_0 、浮遊容量 C_{stray} 、抵抗値 R_s 、インダクタンス L_s 、キャパシタンス C_s である。その値を表V.2.2.3-9に示す。

表V.2.2.3-9 MEMS 等価回路モデルパラメータ抽出結果

番号	x 座標	y 座標	$C_0 + C_{stray}$ [F]	C_{stray} [F]	R_s [\cdot]	L_s [H]	C_s [F]
1	17	45	2.884E-13	—	—	—	—
2	1	29	2.727E-13	—	—	—	—
3	25	37	2.912E-13	—	—	—	—
4	25	5	2.837E-13	—	—	—	—
5	33	13	2.860E-13	—	—	—	—
6	33	29	2.897E-13	1.134E-14	4.616E+08	2.565E+05	1.543E-15
7	41	37	2.900E-13	—	—	—	—
8	41	5	2.791E-13	—	—	—	—
9	49	45	2.850E-13	—	—	—	—
10	57	53	2.798E-13	1.097E-14	5.052E+08	2.749E+05	1.534E-15
11	61	21	2.775E-13	—	—	—	—
12	65	29	2.756E-13	—	—	—	—
13	9	21	2.791E-13	—	—	—	—
14	9	53	2.878E-13	1.096E-14	4.926E+08	2.693E+05	1.695E-15
15	21	45	—	1.141E-14	4.653E+08	2.573E+05	1.631E-15
16	37	13	—	1.158E-14	4.770E+08	2.608E+05	1.466E-15
17	37	29	—	1.144E-14	4.622E+08	2.577E+05	1.513E-15
18	37	61	—	1.090E-14	4.807E+08	2.643E+05	1.571E-15
19	53	45	—	1.017E-14	4.817E+08	2.658E+05	1.519E-15
20	5	29	—	1.103E-14	5.058E+08	2.712E+05	1.567E-15
21	69	29	—	1.138E-14	5.066E+08	2.788E+05	1.434E-15

(4) - 3モデルパラメータばらつき評価

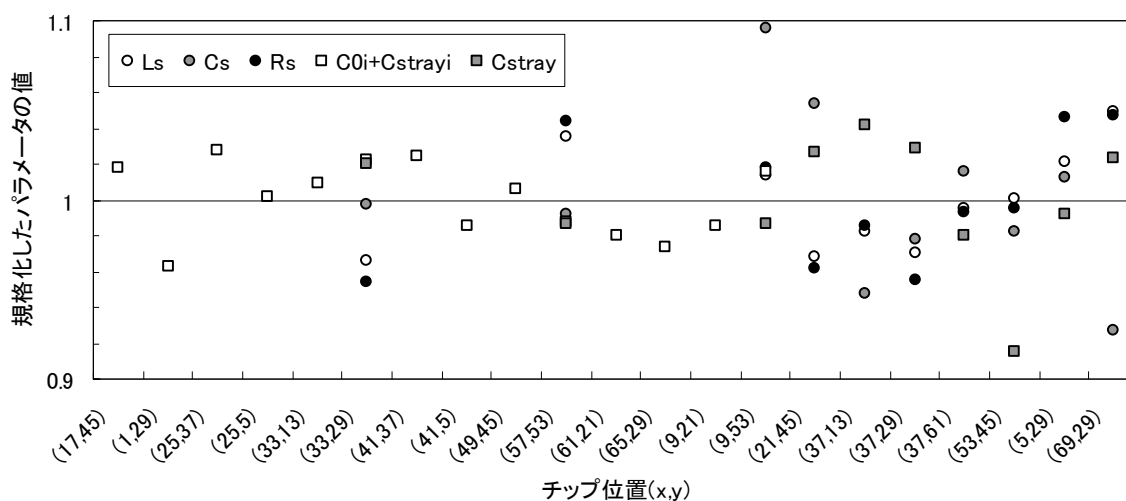
各パラメータの平均と標準偏差、変動係数を表V.2.2.3-10に示す。平均および標準偏差は次元を持つ値であり、異なるパラメータを比較するには適していない。変動係数は、標準偏差を平均で除した値であり、無次元であり、相対的な標準偏差といえる。

表V.2.2.3-10 MEMS 等価回路モデルパラメータ統計値

回路記号	平均		標準偏差		変動係数(=標準偏差/平均)	
$C_{i0} + C_{stray}$	2.833×10^{-13}	[F]	5.785×10^{-15}	[F]	2.04	%
C_{stray}	1.112×10^{-14}	[F]	3.891×10^{-16}	[F]	3.50	%
R_s	4.839×10^8	[.]	1.705×10^7	[.]	3.52	%
L_s	2.656×10^5	[H]	7.387×10^3	[H]	2.78	%
C_s	1.547×10^{-15}	[F]	7.165×10^{-17}	[F]	4.63	%

各パラメータの平均値で規格化した等価回路モデルパラメータ値を図V.2.2.3-39にグラフ化する。Csの変動幅がもっとも大きいことがわかる。

Csは機械系のコンプライアンスを電気機械結合定数で除した値であり、梁の形状のばらつきが大きいことを示唆している。シミュレーションを用いた感度解析で、実効的なバネ定数の感度がもっとも高い結果となったことと一致している。

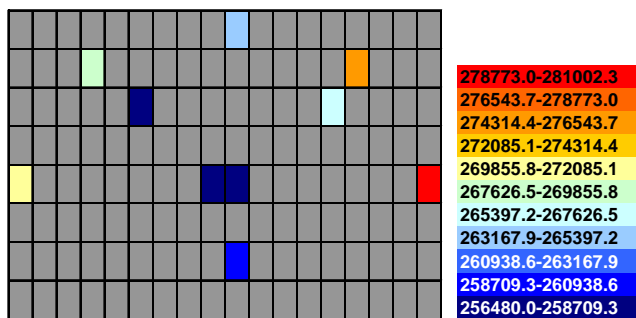


図V.2.2.3-39 規格化したパラメータの傾向

図V.2.2.3-40から図V.2.2.3-44に実測特性から算出した各MEMS等価回路モデルパラメータのウエハマップ表示を示す。

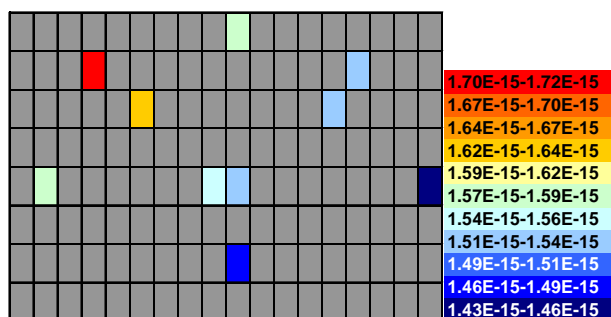
共振周波数はウエハ中心の共振周波数が高く、周辺の共振周波数が低い傾向を示した。

これに対して、 L_s 、 C_s 、 R_s のウエハマップ表示図V.2.2.3-40、図V.2.2.3-41、図V.2.2.3-42は、おおよそウエハ中心の値が低く、周辺の値が高い傾向を示す。共振周波数と L_s 、 C_s 、 R_s には負の相関があるというシミュレーション結果と一致すると考えられる。



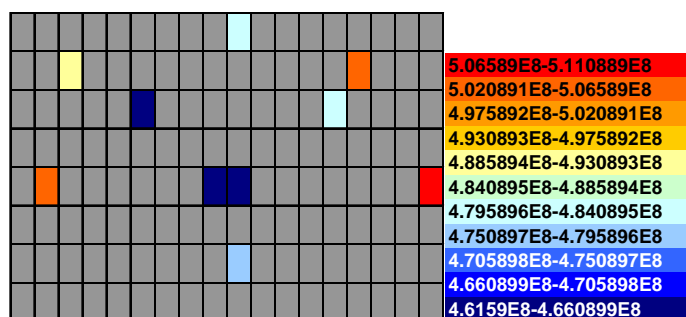
(ノッチ側)

図V.2.2.3-40 L_s ウエハマップ表示



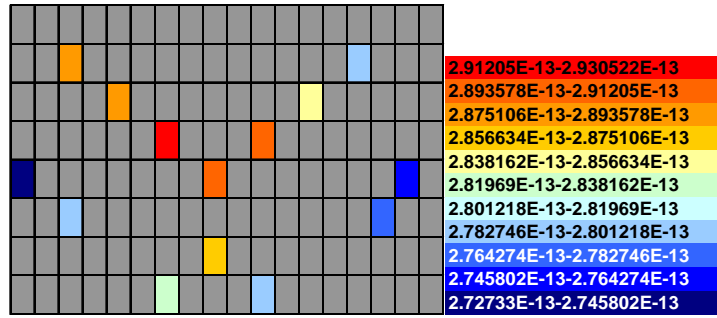
(ノッチ側)

図V.2.2.3-41 C_s ウエハマップ表示



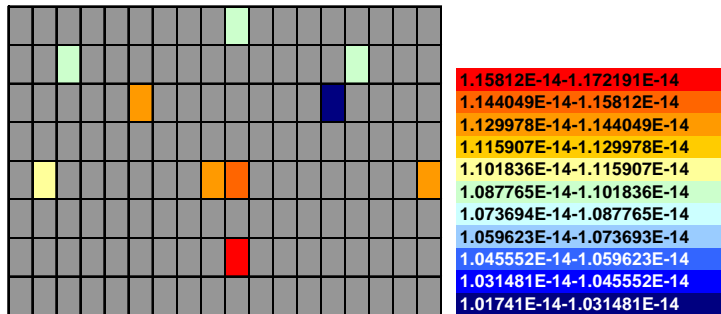
(ノッチ側)

図V.2.2.3-42 R_s ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-43 $C_{i0} + C_{stray_i}$ ウエハマップ表示



(ノッチ側)

図 V.2.2.3-44 C_{stray} ウエハマップ表示

(4) - 4 構造寸法ばらつき評価

等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行う。ここでは、ばらつきの評価項目としてウエハ面内分布の検証を行う。図 V.2.2.3-45、図 V.2.2.3-46 に等価回路モデルパラメータ L_s と R_s のウエハ面内分布を示す。いずれのパラメータも分布には以下の特徴がある。

1. ウエハ中心での値が小さい
2. ウエハ周辺部では、右上と左側の値が大きい。

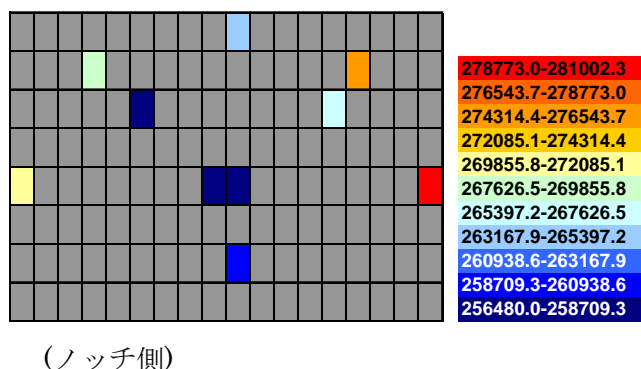


図 V.2.2.3-45 等価回路モデルパラメータ L_s のウエハ面内分布

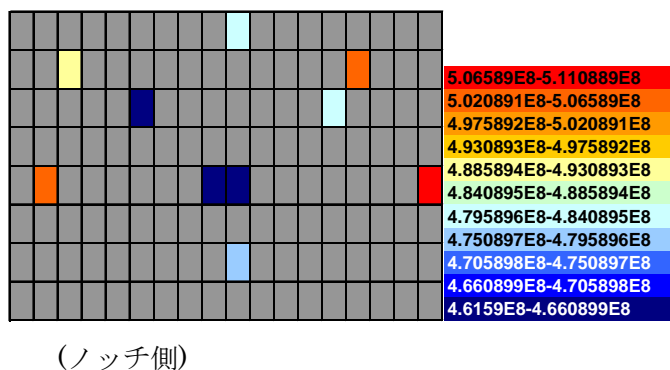


図 V.2.2.3-46 等価回路モデルパラメータ R_s のウエハ面内分布

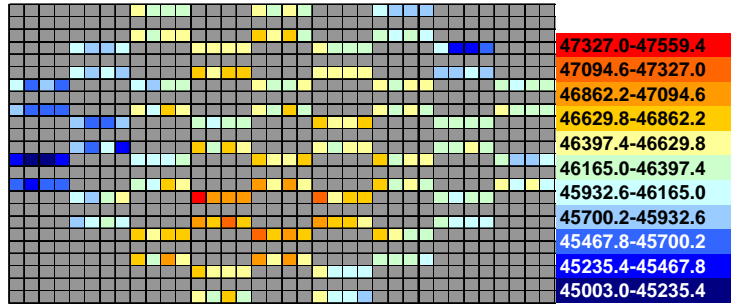
図 V.2.2.3-31 に示したように等価回路モデルパラメータと構造寸法のばらつきには負の相関がある。よって、図 V.2.2.3-45、図 V.2.2.3-46 の面内分布結果より、構造寸法のウエハ面内は逆となり、以下の傾向があることが予測できる。

1. ウエハ中心での値が大きい
2. ウエハ周辺部では、右上と左側の値が小さい。

SEM で測定したサイズのデータを用いて、上記の等価回路モデルパラメータのばらつき

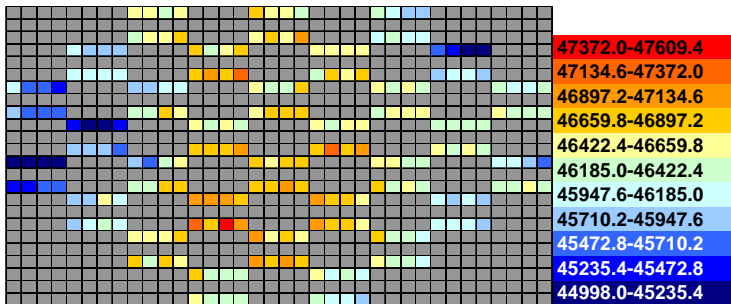
より予測した構造寸法のばらつきの結果が正しいか検証を行う。

図V.2.2.3-47に板バネの幅、図V.2.2.3-48に折り返しバネの幅、図V.2.2.3-49に櫛歯の幅の測長値をウエハマップ表示で示す。どの箇所も中心付近の測長値が大きく、周辺の右上と左側の測長値が小さい傾向を示しており、予測した構造寸法のばらつきと一致しており、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることが確認できた。



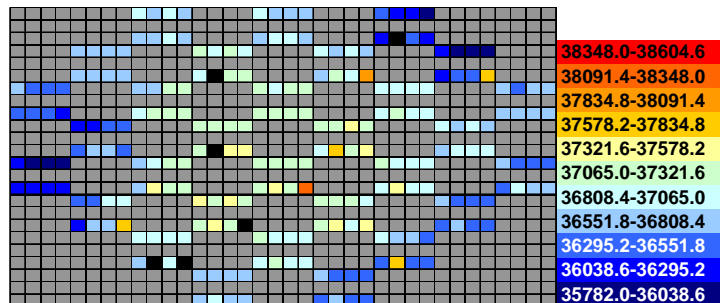
(ノッチ側)

図V.2.2.3-47 板バネ幅



(ノッチ側)

図V.2.2.3-48 折り返しバネ幅



(ノッチ側)

図V.2.2.3-49 櫛歯幅

(5) 設計へのフィードバック

0節で示したように、測長箇所によらず、1次近似的には、設計（マスク）寸法とできあがり形状との差 X_s でモデル化できることを示した。このモデルを元に行った0章の検証から分かった設計へフィードバックすべき事項を以下にまとめた。

- 設計（マスク）寸法と実寸の差は場所によらず、値と標準偏差が一定である。
- 測長箇所ごとの構造寸法は正の相関があり、ばらつきは独立でなく相関がある。
- 静電型楯歯加速度センサで Ck の逆数が構造寸法ばらつきに対して最も感度が高い
- Ck は集中質点系へ近似した場合のバネ定数に相当する。静電型楯歯加速度センサの特性ばらつきを抑制するためには、バネ構造に相当する梁のばらつきを抑えることが効果的である。

また、図 V.2.2.3-31 の構造寸法変化に対する電氣的・機械的特性に対する感度を用いることで設計時に電氣的・機械的特性のばらつき幅を推定することができる。

(6) まとめ

(6) - 1 考察

MEMS 等価回路モデルによるばらつき評価技術の開発をおこなった。

まず、MEMS等価回路モデルを用いたばらつき評価方法について0章で述べ、評価に必要な要素技術として0章でパラメータ抽出の方法と0章で構造寸法と電氣的・機械的特性のばらつきの関係を示した。

次に、MEMS等価回路モデルを用いたばらつき評価方法の検証を0章で行った。複数のデバイスの測定を行い、それぞれのMEMS等価回路モデルパラメータを算出した。算出した等価回路モデルパラメータのばらつきより構造寸法のばらつき評価を行い、等価回路モデルパラメータのばらつきから構造寸法のばらつきが正しく評価できることを確認した。

(6) - 2 課題

今回の検証から分かった今後の課題は以下である。

MEMS等価回路モデルに関する課題

形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出し、特性をシミュレーションする際の課題を記す。

- **ハードスプリング効果の見積もり**

形状から MEMS 等価回路モデルパラメータを算出する場合に、直流電圧による静電力によって実効的にバネ定数が高くなる、いわゆるハードスプリング効果の見積もりが小さめとなった。また、同様にある直流電圧における電極間容量の見積もりも小さめとなる。これらを考慮し、MEMS 等価回路モデルパラメータ算出方法を改善することが課題である。

- **直流電圧依存を含む MEMS 等価回路モデル**

現状の MEMS 等価回路モデルは、デバイスおよび端子が決定すると等価回路の回路構成が決定する。各回路素子の値は、直流電圧によって決まるため、直流電圧が異なるとネットリストを作り直す必要がある。

直流電圧値を考慮したネットリストが作成可能であれば、直流電圧によってネットリストを作成し直さずに済み、回路シミュレーション上で直流電圧を変化させるだけ使用可能である。

MEMS等価回路モデルパラメータ抽出に関する課題

測定した出力特性から MEMS 等価回路モデルパラメータを抽出する際の課題を記す。

- **直流電圧を変化させた出力特性からの MEMS 等価回路モデルパラメータ抽出**

測定出力特性のピーク値を使用して算出する MEMS 等価回路モデルパラメータが存在する。ピーク値はより精度の高いものが望ましいが、測定のサンプリング間隔とも関連し、再現性よく測定することは困難である。これを改善する 1 つの方法として、複数の直流電圧での出力特性を測定し、全測定データを利用し MEMS 等価回路モデルパラメータを抽出することが考えられる。この場合の抽出手順検討が課題である。

以上