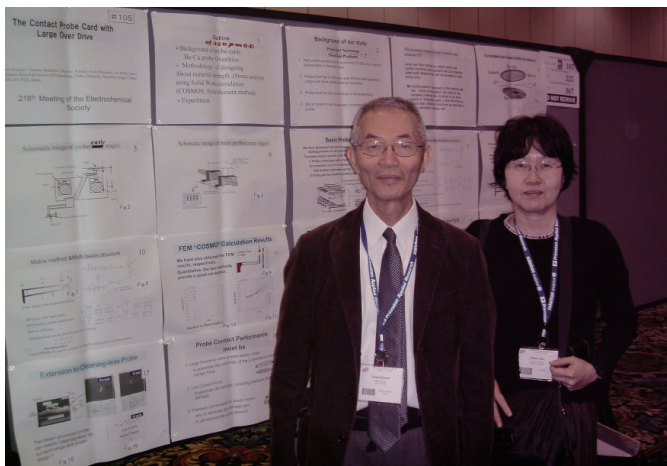


## 狭ピッチプローブの開発

株式会社プロブエース 代表取締役 木本 軍生  
 早稲田大学 齋藤 美紀子, 加藤 邦男



(写真左) 左から 株式会社プロブエース 代表取締役 木本 軍生, 早稲田大学 齋藤 美紀子  
 (写真右) 早稲田大学 加藤 邦男



### はじめに

プローブカードは半導体ウェハ製造工程におけるウェハ検査システムに使用され、ウェハ上の半導体の微小な電気端子(パッド)と検査装置(テスタ)とのインタフェース機能を有し、狭ピッチかつ多数の針(プローブ)を搭載した配線基板である(図1)。それ故にプローブカード技術は必然的に、デバイス製造技術の急激な進歩と高機能化したテストプロセス要求に、常に追従していかねばならないという課題を抱えている。多くの研究にて次世代用プローブカードを追求してきた。次世代用プローブカードは、表1に示す要求を「同時に」満足しなければならない。

半導体業界は、「ムーアの法則」[1][2]に基づくデバイスの急速な小型化を促進してきた。高集積化と縮小化(スケールリング)は、検査用電極パッドをますます小さく、かつ狭ピッチにし、パッド配列をより複雑にしてきた。1つのプローブカードで数千～数万本のプローブを数十 $\mu$ mのピッチで配列することが要求されている。また一方で、ウェハの薄化が進み、電極パッドの微小化と相俟ってプローブ先端動作のより高度な制御が必要になってきている。プローブ先端で電極パッド表面に生じた酸化膜

を破壊し、電氣的導通を確保すると同時に、過度の接触力による電極パッド素材の破壊、または接触時に生じるプローブ先端付着物による検査不良・メンテナンスコスト等を最小限に抑制しなければならない[3]。

本研究では、文部科学省ナノテクノロジープラットフォーム事業を利用して、早稲田大学ナノ理工学研究機構の協力により、プローブ製造のための微細加工技術開発と高度な計測技術によるプローブ先端動作解析を行い、これまで実現できなかったプローブ先端動作の理論的な追及を行い、先端クリーニングが不要なプローブの開発に至った。この成果と共に、当社は表1に示すように、プローブカードに対する種々の要求事項を満足するソリューションを総合的に有することとなった。



### プローブ先端の電極パッドとのコンタクトにおけるメカニズムと現状の問題点

現在一般的に使用されているプローブカードのプローブ形状は、図1に示すように、片持ち梁(カンチレバー)の動作による。ウェハがプローブに押し当てられて電極パッドとプローブ先端が接触を開始し、さらに押し当てが進むと図示のような弾性変形により、垂直方向の変位

量（オーバードライブ）と接触力が生じる。また、片持ち梁の回転モーメントによりプローブ先端位置が水平方向にも変位する。これは電極表面を擦りながら変位するため、「スクラブ」と称している。プローブ動作ではこれらの3つのパラメータが重要な要素となっている [7]。

弾性域における垂直変位量であるオーバードライブは大きい方が望ましい。なぜならば、各プローブ先端位置のバラツキやウェハ自身の反りや傾きに起因する接触力

のバラツキを吸収することが可能となるからである。しかしながら、図1のような従来のカンチレバー型プローブでは、オーバードライブ量が大きいとスクラブ量も大きくなる。

過度の接触力及びスクラブ動作は、様々な問題を生じさせる。図2は、プローブ先端動作による電極パッドへの影響を示したものである。現在のプローブでは多くの場合、図2 (b) で示すように、表面の酸化膜を破壊する

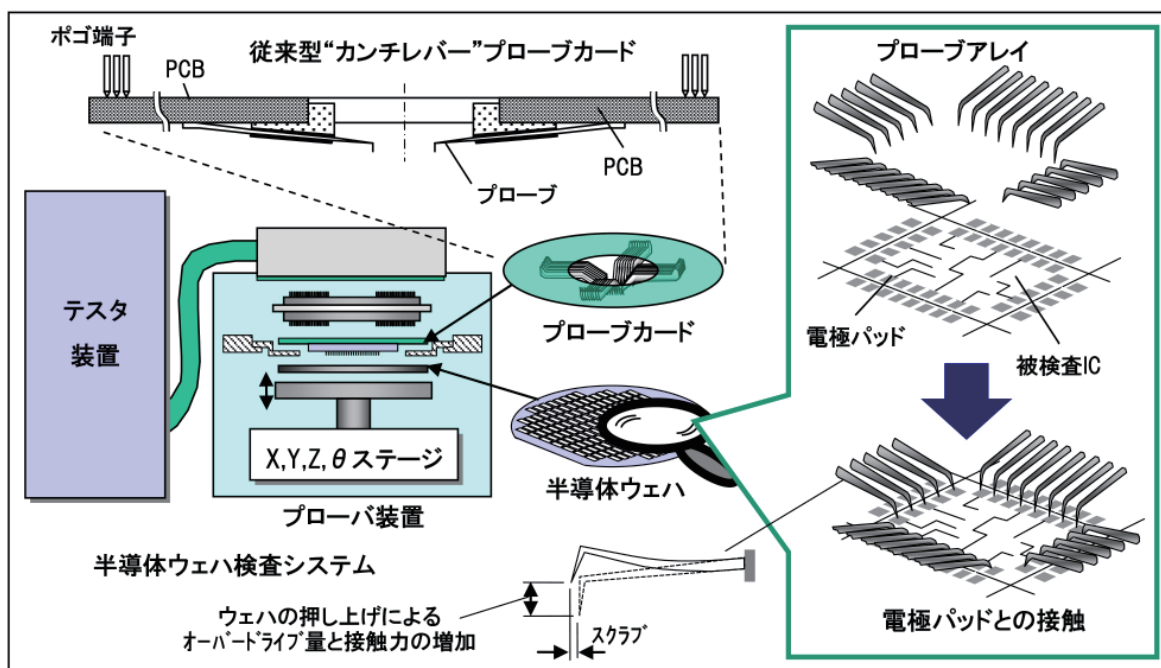


図1 プローブカードの位置付けと基本的なプローブ動作

表1 プローブカードへの主な要求項目と本研究テーマを含む当社のソリューション [4][5][6]

プローブカードへの主な要求項目	当社のソリューション (AMMECS®)
<b>1. プローブ配列の幾何学的要求</b> (1) 多ピン狭ピッチプローブ配列 (2) 同時測定適用プローブ配列	○多数プローブ搭載のプローブシート構造とそのプローブシートの複数配列
<b>2. プローブの機械的特性要求</b> (1) 小接触抵抗での最適で安定したプローブ接触力 (2) 弾性域における大オーバードライブ量 (3) プローブ先端動作の高精度制御 (4) 高耐久性	○BeCu を素材としたマルチビーム構造を始めとするプローブ先端形状及びバネ形状の最適化設計 ○プローブ製造装置の自動化
<b>3. プローブカード単体コストと所有者コストの低減</b> (1) クリーニングレスプローブ (※本研究テーマ) (2) プローブ配列組立の容易性 (3) プローブの基板回路接続の容易性	◎プローブ先端形状及びバネ形状の最適化設計 ○プローブ設計の自動化と製造装置の自動化 ○ワイヤ配線技術及びその装置の自動化
<b>4. プローブカードの電気的特性</b> (1) プローブの高周波特性 (2) 微小電流測定における低リーク電流特性	○ワイヤ配線技術による不連続点の最小化 ○シート型プローブ構造によるアース層との多層化

だけでなく、パッドの素材も少なからず破壊している。このためパッド素材等によるプローブ先端へのゴミの付着が発生して検査継続の妨げとなっており、定期的なクリーニングを余儀なくされている。電極パッド上における過度の接触力やスクラブは、最悪の場合、図2(c)のように回路を破壊し、また、パッドから外れて検査不良となってしまう。プローブの接触力とスクラブ量は、ゴミの付着やチップダメージを防ぐために最小限でなければならない。すなわち、図2(a)で示すような酸化膜のみを破壊する動作が理想的である。

当社では、平行バネを応用した平行四辺形リンク形状を有するプローブ構造（マルチビーム構造）を適用している。それは、オーバードライブを大きく設計した場合でも、スクラブを極力小さく制限できるためである [4]。



### プローブ先端高精度動作設計手法による クリーニングレスプローブの実現

ウェハテストにおけるクリーニングレスプローブの実現は、長年に亘る要求事項であった [3]。プローブ先端のゴミの付着は、過度の接触力及びスクラブ動作に起因する。図2(a)で示した理想的なプローブ先端動作が実現

できればクリーニングレスプローブが可能である。



### アルミパッドの酸化膜の破壊に関する研究

クリーニングレスプローブの開発のために、当社はまず、ナノインデンション法 [8] を用いて、プローブ先端をアルミ (Al) 電極パッドの表明に生じた厚さ約 30nm の  $Al_2O_3$  薄膜を破壊し、Alパッドと電気的導通を行うメカニズムの研究を行った。

本研究において、冷間圧延処理ベリリウム銅 (Be Cu) をプローブとして使用した。Be Cu は、疲労耐性の優れた機械的ばね特性や電気的導通特性を有するため、ばね材として広く使用されている。図3に示すように、Be Cu は結晶構造であるため、MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) 型プローブで用いられる Ni 電鍍のようなポーラス構造と比較して良好な疲労耐性を有する。硬度 400Hv に時効硬化処理した厚さ  $20 \mu m$  の Be Cu 材料を、塩化第 2 鉄でウエットエッチングした時の表面粗さを AFM で計測した結果、図4に示すように 500nm 前後の突起があることが分かった。プローブ先端の SEM 像を図5に示す。先端の 1 つの突起を粗さ計で測定したデータを図6に示す。

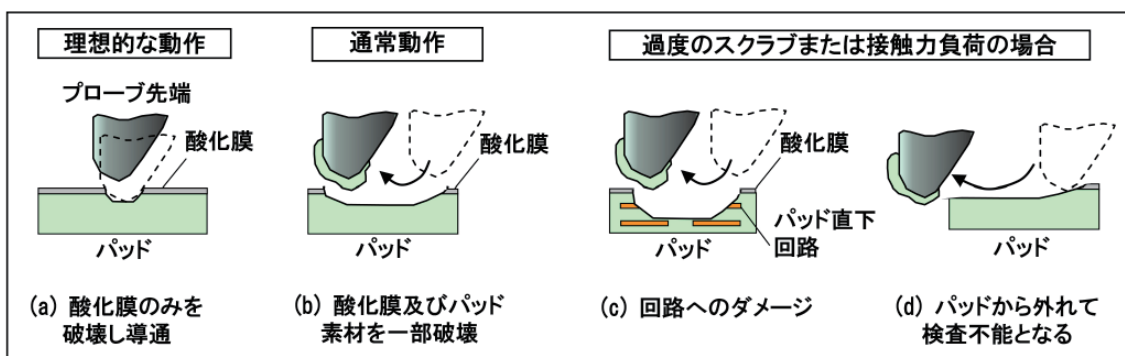
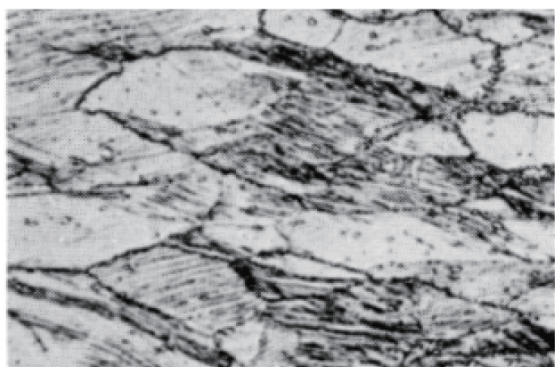


図2 プローブ先端動作による電極パッドへの影響



Crystal structure of Be-Cu cold rolling

図3 Be Cu 材の金属結晶

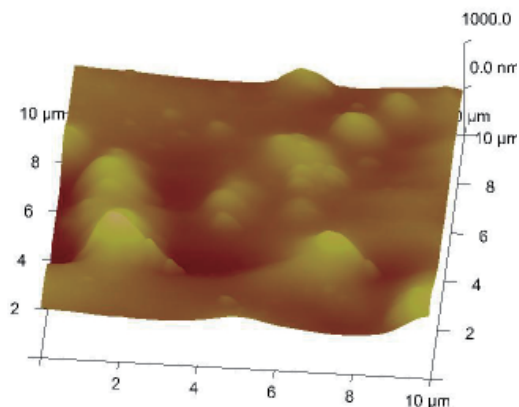


図4 エッチング後の Be Cu 表面

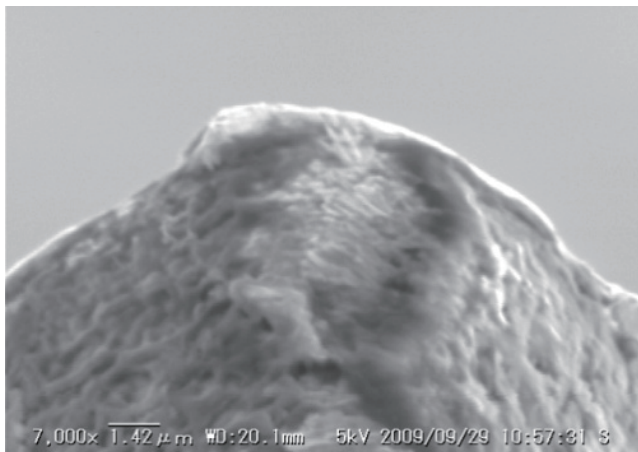


図5 プローブ先端部 SEM

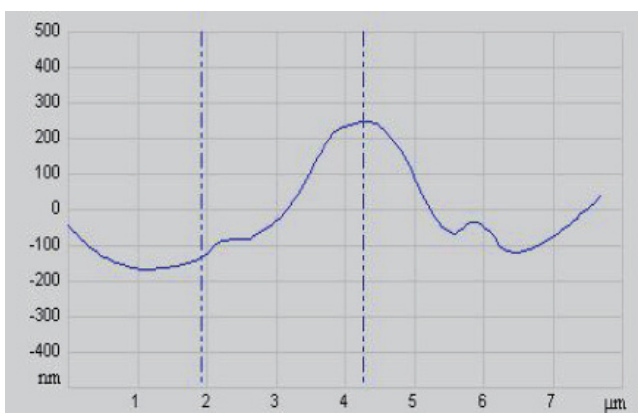


図6 プローブ先端部粗さ測定結果

$\text{Al}_2\text{O}_3$ の薄膜は硬度 430Hv、厚さは約 30nm であり、硬度 80Hv の Al パッド表面に形成されている。本研究の目的は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜より柔らかい Be Cu 板からなるプローブ先端を  $\text{Al}_2\text{O}_3$  薄膜に接触させ従来のプローブより小さい接触力により有効な破壊を起こすための条件を見出すことである。

プローブの先端をナノインデント用圧子として応用し、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜の塑性変形または破壊によってプローブの先端がアルミ面に到達し電氣的導通がどの様に行われるかを実験で求めた。同時にプローブ先端と Al パッド（実験ではウェハ上の Al ベタ使用）との接触抵抗を測定した。図 7 に荷重と押し込み量及び接触抵抗との関係を示す。この結果、荷重 6mN を与えれば安定した抵抗値が得られることが判明した。また  $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜の塑性変形または破壊の荷重は 3mN と推定することができた。

### クリーニングレスプローブの設計

アルミパッド上の酸化膜厚は約数十 nm であり、インデントの先端で突き破るには十分薄いものである。したがって、プローブ先端部をナノインデント用圧子として作用できれば、最小コンタクト力で酸化膜を除去することができる。そのためには以下の条件が必要である。

- (1) パッド表面との実際のプローブ接触部は、インデントの先端のように鋭く形成されること
- (2) プローブ先端動作が高精度に制御されること

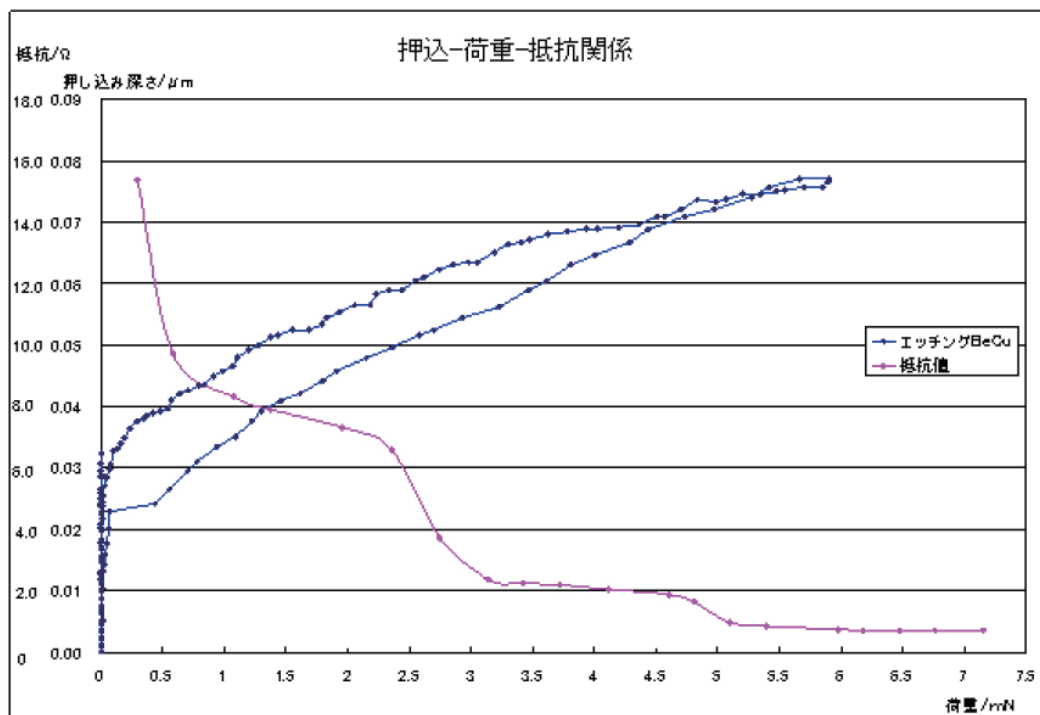


図7 荷重と押し込み量及び接触抵抗との関係

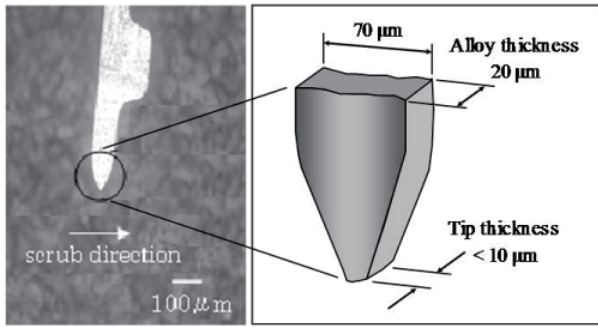


図8 プローブ先端部

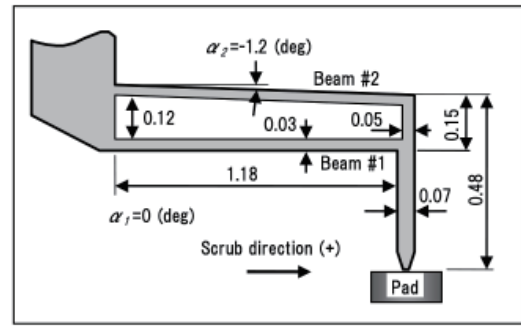


図9 プローブ寸法

条件 (1) は、高精度のエッチング加工により得られ、条件 (2) は、既に開発したマルチビーム構造 [4] により解決可能である。図 8 の左側の写真は Be Cu プローブ先端を示し、右側はその詳細形状を示す。マルチビーム構造は、大オーバードライブ設計が可能で、かつ、大小レベルの接触力やスクラブ量が制御可能であり、耐久性のある接触抵抗のプローブ設計のために異なる様々な梁形状を選択できる。本研究でのプローブは、図 9 に示すような 2 ビーム構造を使用した。

プローブ厚さ方向の開口長は約  $8 \mu\text{m}$ 、最大深さは約  $0.25 \mu\text{m}$  である。この変形痕寸法と図 8 に示すプローブ先端近傍の寸法との比較より、変形部の一部分は弾性限界内であるためにプローブ除去後に収縮し、他の部分は、表面上の塑性残余変形物によるものと推定される。さらに、このプローブコンタクトでは、垂直動作のみでスクラブ動作は発生していないため、酸化膜層の破壊又はアルミ材の破損片の蓄積は十分制限されている。

### 変形痕の詳細測定

図 10 は、プローブコンタクトによる変形痕の画像と測定結果を示す。プローブ先端がアルミパッド表面と接触した後のパッド変形の形状と深さ、及び変形エリア周辺の蓄積物の量は、AFM によって評価した。評価は、接触力  $10\text{mN}$  負荷後に行った。これは、本研究で使用したプローブのオーバードライブ  $100 \mu\text{m}$  に相当する。変形痕の不均質性を把握するため、図 10 (a) (b) に 3 箇所位置でプロットした結果を示す。また、スクラブ方向とスクラブ長の関係を図 10 (c) で示した。

図 10 に示すように、スクラブ方向の長さは約  $1 \mu\text{m}$ 、

### 接触抵抗の検証

電氣的接触抵抗の増加は、プローブ先端の局所的なジュール発熱によるものと言われている。これが、局所における酸化の増加と共に、局所的な温度上昇の大きな原因となっている。ITRS で示されているように [3]、電氣的接触抵抗は、 $0.5 \Omega$  以下である必要があるとされている。

ホルムによれば [9]、2 種類の金属（ここでは、Si ウェハ上のアルミ蒸着と Be Cu プローブ）間の接触点の電氣抵抗値は、圧縮抵抗  $R_C$ 、フィルム抵抗  $R_F$  の合計である。

$$R_a \approx R_C + R_F = (\rho_1 + \rho_2) / 4a + \sigma_F / \pi a^2, \quad (1)$$

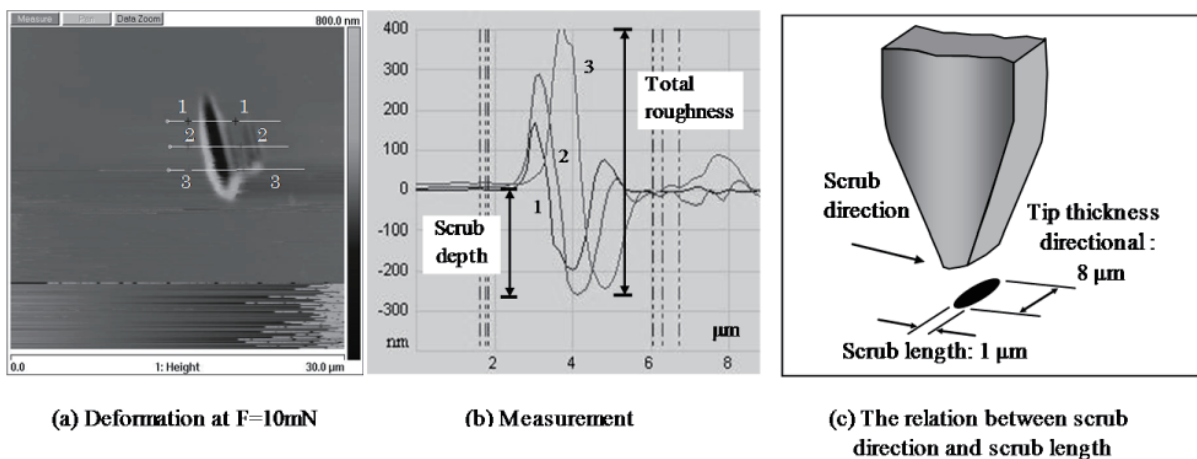


図 10 プローブコンタクトによる変形痕の画像と測定結果

ここで、 $a$ は接触スポット径、 $\rho_1$ 、 $\rho_2$ はそれぞれ金属1及び2の電気抵抗率、 $\sigma_F$ はフィルムの表面比抵抗を示す。平均荷重 $P$ 負荷時の接触スポット径は、式(2)又は式(3)で与えられる。

$$a_e = (3PR/4E^*)^{1/3} \quad (2)$$

$$a_p = (P/\pi H)^{1/2} \quad (3)$$

ここで、 $H$ は平均圧、すなわちマイヤー刻印硬度、 $R$ はプローブ径(本研究ではプローブ厚さ $15 \mu\text{m}$ に相当する)を示す。添字 $e$ 及び $p$ は、弾性及び塑性変形を示す。 $E^*$ は有効ヤング率で、式(4)により、2種金属のヤング率とポアソン比の関数で表される。

$$1/E^* = (1-\nu_1^2)/E_1 + (1-\nu_2^2)/E_2 \quad (4)$$

表2で示す材料特性[10]は、接触抵抗の計算に使用される。テスト片(本研究では、ウェハ上のアルミ蒸着)の固さは、接触抵抗の計算に使用される。

図11は、3~15mNの接触力を負荷した後に、BeCuプローブのインデーター下におけるウェハ上の接触痕を示したものである。図12は、等価接触径の関数として測定された接触領域を示す。式(2)及び式(3)を使用し、弾性変形後及び塑性変形後の接触痕径はAFM試験で得られた計測データとの比較で決定され、図13にそれらをプロットした。定性的には、測定データは、塑性変形の仮定のもとに得られたデータと良く一致している。

同様に、式(1)に基づき、計測した接触径を元に計算した接触抵抗 $R_c$ の逆解析を、コンタクト力を変数としてプロットしたものが図14である。逆解析は、フィルム抵抗率のいくつかの異なる値を用いて行った。接触抵抗の実験データも、コンタクト力の逆計算との比較のためプロットした。この関係により、フィルム抵抗率は、 $1 \sim 3 \times 10^{-13} \Omega \cdot \text{m}^2$ である。フィルム低効率の概算値を用い、接触抵抗は変形モード「弾性」「塑性」をベースとした式(2)、式(3)から得られるコンタクト径を使って、ホルムの式を元に計算される。

こうして得られた計算結果を図15に示す。この式から導かれることは、弾性変形の関係を使用して、コンタクト力が8mNより大きい場合には、実験データと一致

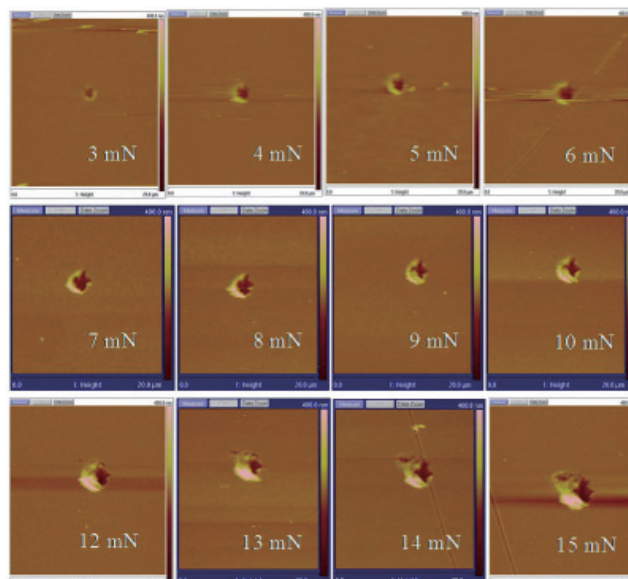


図11 接触痕

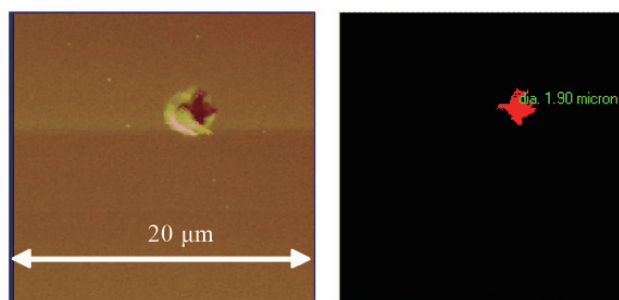


図12 接触領域

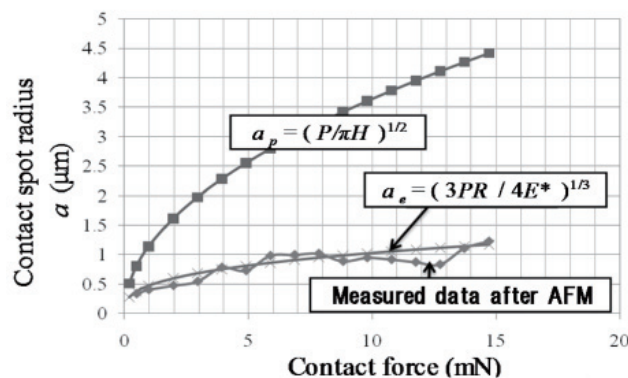


図13 弾性変形後及び塑性変形後の接触痕径

表2 材料特性

Specification	Be-Cu [C1720HT]	Al
Electrical Resistivity $\rho$ at 20°C [ $10^{-8} \Omega \cdot \text{m}$ ]	7.84	2.65
Modulus of Elasticity $E^*$ [ $10^{11} \text{ N/m}^2$ ]	1.25	0.7
Film Resistivity $\sigma_F$ [ $10^{-10} \Omega \cdot \text{m}^2$ ]	-	0.25
Hardness $H$ [ $10^8 \text{ N/m}^2$ ]	4.2	2.4

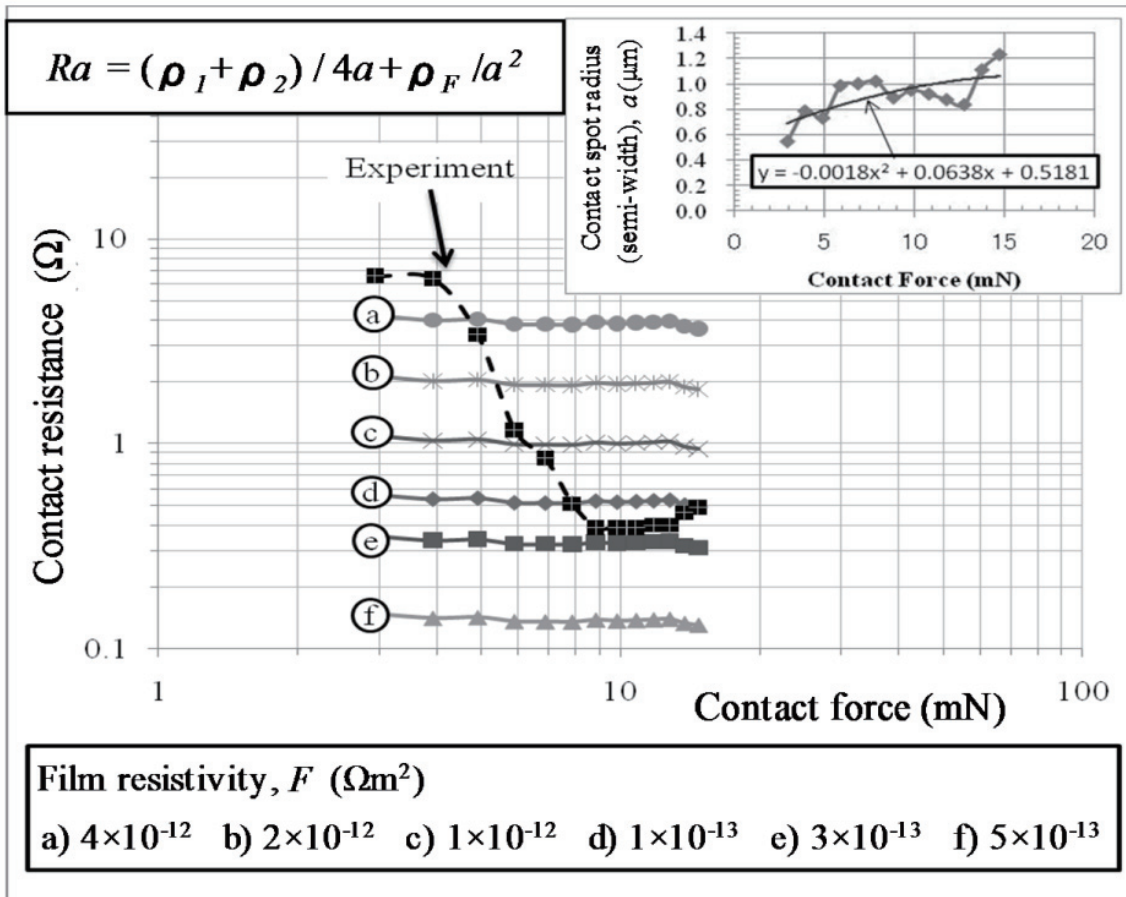


図 14 接触抵抗  $R_c$  の逆解析

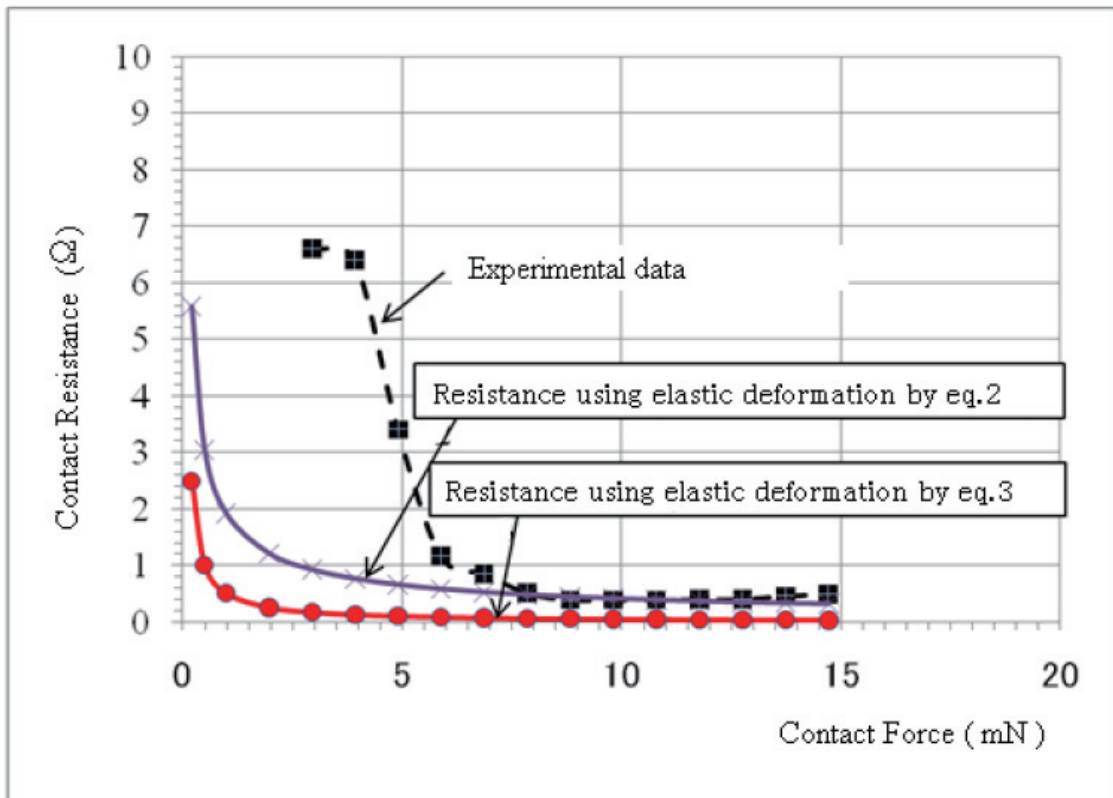


図 15 接触抵抗の計算結果

する接触抵抗値を定性的に算出することができる。一方、塑性変形をベースとした接触抵抗は一致が得られず、低い領域での値である。総合的にいえば、コンタクト力が8mN以上であれば、0.5 Ωの接触抵抗が維持される。図16において、Be CuプローブとSiウェハ上のアルミ蒸着との接触で得られる接触抵抗とコンタクト力との実験データを、図9で示したプローブ構造で得られるオーバードライブの相関として示した。



## 耐久性試験での接触抵抗値測定結果

プローブカードは、1種類のデバイステストに対して数万回以上という耐久性を要する。本研究において、連続接触動作に対する電気的接触抵抗を図17に示す測定系により実験で求めた。これにより、負荷する接触力と特定のオーバードライブにおける電気的接触抵抗の値を算出できる。電流計と電圧計を使用して4端子法で行った[11]。図18に示すように、接触力10mNでの10万回耐久性試験を行った。結果は、全連続試験において、先端クリーニング無しで0.5 Ω以下の接触抵抗が維持された。この結果は、パッド表面で蓄積されたゴミは無視でき、プローブとパッド表面間の次の接触までのクリーニングを不要とするものである。耐久性も、特に電気特性の観点において、コンタクトプローブの最適動作を維持し、メンテナンスコストを低減するのに重要な要素である。



## おわりに

プローブカードにおけるプローブ先端部は、半導体プロセスにより製造されたウェハと直接接触する個所であるため、先端部の動作解析は非常に微細なレベルが要求される。今回、ナノテクノロジープラットフォーム事業を利用することにより、ナノインデンション法を応用した計測技術によるプローブ先端動作解析を行い、これまで実現できなかったプローブ先端動作を理論的に追及し、他社にないクリーニングレスのプローブを開発することができた。

今回の研究成果と共に、表1に示すように、プローブカードに対する種々の要求事項を満足するソリューションを総合的に有することとなった。本成果を含む当社プローブカード総合技術をAMMECS<sup>®</sup> 称し[4]、既に国際的な専門学会等の発表を通じて各半導体メーカーより高い評価を得ており、今後の市場参入に対して大きな優位性を持つことができたといえる。

本研究は、早稲田大学・ナノ理工学研究機構の支援を受け、実施した。検討項目において、プローブのSEM像、AFMを用いたナノインデンテーション試験は、早稲田大学の支援を受け、行ったものである。

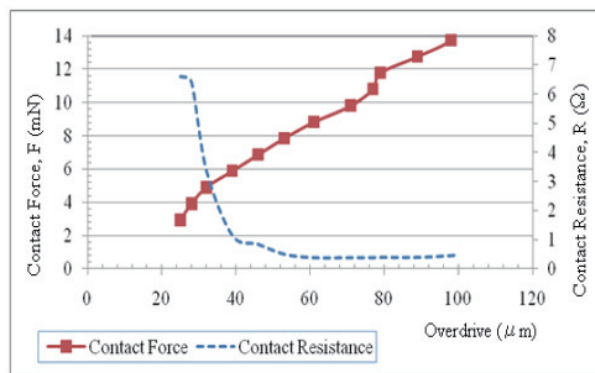


図16 接触抵抗と接触力との実験結果

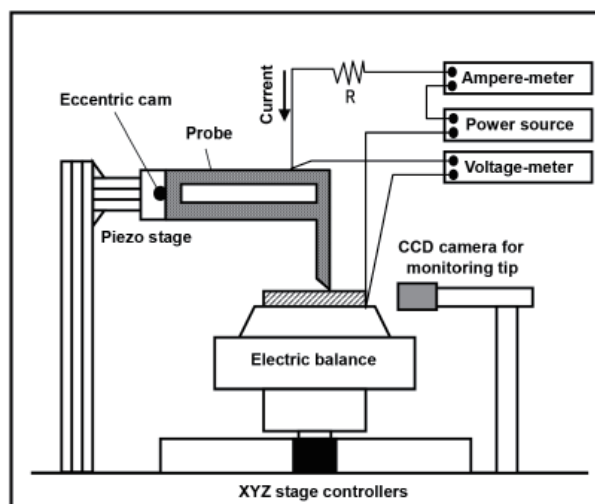


図17 接触抵抗測定系

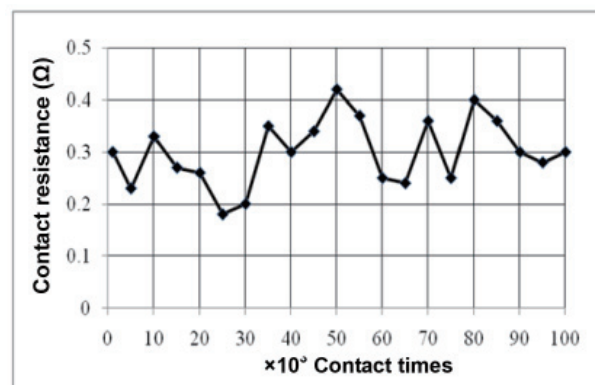


図18 接触力10mNでの10万回耐久性試験における接触抵抗値変化



## 参考文献

- [1] G. E. Moore, "Cramming more components onto integrated circuits," *Electronics*, 38, (8), 1965.
- [2] G. E. Moore, "Progress In Digital Integrated Electronics," *Technical Digest, IEEE International Electron Devices Meeting*, pp. 11-13, 1975.



- [3] International Technology Roadmap for Semiconductors, edition 2011, Test and Test Equipment
- [4] G. Kimoto, "Research on contact probe card for inspection of high density semiconductor device," Ph. D. dissertation, Dept. Mechanical Eng, Chiba Univ, 2011.
- [5] G. Kimoto, *et al*, "Design and Manufacture of Novel Probe Card for Testing 3D ICs with TSVs," IEEE EPTC2012.
- [6] G. Kimoto, "Novel Probe Card with High Count of Needles in Single Sheet for Universal Wafer Testing," IEEE SWTW2013.
- [7] O. Weeden, "Probe Card Tutorial," Keithley Instruments, Inc. 2003.
- [8] Z. Zong and W. Soboyejo, "Indentation size effect in face centered cubic single crystal thin films," *Materials Science and Engineering*, A404, pp. 281-290, May 2005.
- [9] R. Holm, *Electric Contacts, Theory and Application*, (4th edition) Berlin/New York: Springer-Verlag, 1967.
- [10] "Guide to Beryllium Copper," Bruch Wellman Ltd, 2009.
- [11] K. Kataoka, S. Kawamura, T. Itoh, K. Ishikawa, H. Honma, and T. Suga, "Electroplating Ni micro-cantilevers for low contact-force IC probing", *Sensors and Actuators A*, Vol. 103, pp. 116-121, 2003.

(株式会社プロブエース 木本 軍生)



**【お問い合わせ】**

微細加工プラットフォーム

早稲田大学

☎ 03-5286-9068

E-mail [inn-npc@list.waseda.jp](mailto:inn-npc@list.waseda.jp)

ホームページ

<http://www.all-nano.waseda.ac.jp/platform/>