

# Al 電極への超低接触力コンタクトのメカニズム

伊藤 寿 浩

Mechanism of Ultra Low Force Contact on Al Electrodes

Toshihiro ITOH

This article reports on the breakdown of thin native oxide film formed on aluminum electrodes contacting metal probes at the contact force smaller than 0.1 mN when the surface aluminum oxide is difficult to break mechanically. The contact method with low contact force on aluminum electrodes is required for test probing of LSI for the next generation. A gold wire was used as a contact probe on aluminum electrode formed on Si wafer. To investigate the initial stage of the breakdown, the current flow is limited to the value below 1  $\mu$ A using a large resistance inserted to the current circuit. It was found that ohmic contacts with resistance of about 10-100  $\Omega$  were obtained after the breakdown at 3-10 V. The contact resistance was found to be affected by the breakdown voltage, not by the current. Adhesion forces between the probe and the wafer were found to be 40-80  $\mu$ N. A small current was observed before breakdown and may have influences on the breakdown voltage.

## 1. はじめに

半導体デバイスの I/O パッド電極には Al 膜が使われているが、その理由の一つは、Al 膜表面が安定な自然酸化膜で覆われ、その酸化膜が電極の酸化進行による劣化を防ぐ保護膜として働くという利点があるためである。しかし、半導体デバイスを検査する際には、何らかの方法でこの酸化膜を破壊し、検査プローブとの間で電気的なコンタクトを形成しなければならない。従来の検査では、W などの金属針プローブを Al 電極に押し付けて電極表面を引っ掻くような動作をさせること（スクラビング scrubbing）で酸化膜を破壊しコンタクトを形成するが、そのためにプローブ当たり 30-100 mN の荷重が必要となる。

ところで、半導体デバイスの高集積化に伴い、I/O パッド電極も益々小型化・高密度化が進んでいるが、金属針の片持ち梁プローブをプリント基板上に植えつけたプローブカードによる検査では対応が困難になりつつある。そこで、近年、様々な機関がマイクロマシニング技術を使ったプローブカードの開発を発表している<sup>1-5)</sup>。これらの“MEMS (Micro Electro Mechanical Systems) プローブカード”は狭ピッチ・多ピンデバイスの検査に有効と考えられているが、マイクロマシニング技術で作られた個々の微小プローブに、Al 電極酸化膜破壊のためのスクラビング動作に耐えるだけの強度を持たせることは難しいという問題がある。

上記の問題を解決するためには、数 10 mN といった大きな力を印加すること無くコンタクトを形成する新しい手法が必要である。そこで、我々の研究グループでは、Al 電極や Cu 電極の表面酸化膜を電氣的に破壊するフリッティング現象に関する研究や<sup>6-7)</sup>、水素還元を利用した Cu 電極の低接触力コンタクト手法の開発<sup>8)</sup>などを行ってきた。これらの低接触コンタクト手法を用いれば、狭ピッチで大きなコンプライアンスを有する新しい MEMS プローブカードを実現することが可能となる。例えば、非常に柔らかいマイクロカンチレバープローブでも、フリッティングプロセスを使うことにより、10 mN 以下の力で低抵抗コンタクトが実現できるし<sup>9)</sup>、低接触コンタクトを前提とすれば、積層めっきによる S 字型のマイクロスプリングプローブ<sup>10)</sup>のようなものでもプローブカードへの適用が可能だと考えられる。

Al の電気コンタクトに関する研究は、電力伝送接続系の分野で 50 年以上前から行われており<sup>11)</sup>、故障メカニズムの研究や<sup>12)</sup>、Al コンタクト形成に関する基礎的研究<sup>13, 14)</sup>などがある。しかし、これらの研究では、実験で使われた接触力が 0.1 N 以上と大きく、接触部のサイズも比較的大きいため、接触力が 1 mN 以下で表面の Al 酸化膜が機械的に破壊されない場合については改めて検討する必要がある。

Holm らのフリッティングコンタクトに関する研究によれば<sup>15)</sup>、フリッティングプロセスは初期電流路形成に関わる A フリッティングと電流路拡大に関わる B フリッティングの 2 つの過程からなる。我々のこれまでの実験では、100 mA 以上の電流を印加してフリッティングを

行っていたが、その場合にはAフリットングの直後に、形成された微小電流路がジュール熱で加熱され、その部分のAlが溶けて接触部が拡大するBフリットングが起きることになる。このBフリットング現象については電流電圧測定から直接観測ができていないが、Aフリットングの過程については、詳細な検討がなされていない。また接触荷重に関しても、1 mN以上の荷重では、局所的には酸化膜が機械的に破壊されると考えられる現象も観測されており、より低荷重でのコンタクト手法を確立するためには、Aフリットング過程の解析が不可欠である。本報告では、微小接触力・微小電流下でのAl電極表面酸化膜の絶縁破壊（Aフリットング）現象を調べることを目的に行った実験結果について述べる。

## 2. 実験方法

図1に本研究で用いたコンタクト実験装置の模式図を示す。Al電極試料（Siウェハ上に形成した1  $\mu\text{m}$ 厚のスパッタ膜）は、3軸粗動ステージに取り付けたピエゾステージ上にセットし、このピエゾステージを鉛直方向に微小駆動することで接触力の制御を行う。一方、コンタクトプローブには、図2に示すような200  $\mu\text{m}$ 径のAuワイヤをU字型に曲げたものを用い、これを23 N/mの板ばねに取り付けて、電子天秤上（力分解能：1  $\mu\text{N}$ ）に設置した。

測定の際には、まずAl電極試料をプローブに向かって移動させ、所要の接触力で接触させる。そして、図3に示すような簡単な回路で電気的な測定を行うが、測定中も、接触力が所要の値に保たれるようにピエゾステージの制御を行う。測定終了後は、Al電極試料を元に位置に戻し、粗動ステージで次の接触位置の上方に移動させて、上記一連の動作を繰り返す。Al電極試料を戻す際にも接触力の測定を続け、コンタクトを開放する（Al電極をプローブから引き離す）のに必要な力を測定する。この力（Separation Force）は、プローブとAl電極との間の凝着力に相当する。

測定回路は、図3に示すような直流電源、電流計（ADVANTEST, Digital Multimeter R6441C）、電圧計（Hewlett Packard, Voltmeter 34420A）および制限抵抗  $R_1$  から構成された簡単なもので、電源電圧を徐々に上げながら、試料間の電圧・電流を測定する。電源電圧の最大値は10 Vで、制限ライン抵抗  $R_1$  には8.2 M $\Omega$ と98 M $\Omega$ の2種類を用いたため、最大電流値は、それぞれ1.2  $\mu\text{A}$ と0.1  $\mu\text{A}$ である。用いた電流計の最小測定電流は0.5 nA、電圧計の最小測定電圧は0.02  $\mu\text{V}$ であり、即定時は電源電圧を0.1 Vステップで上昇させた。

## 3. 結果および考察

図4に試料間電圧・電流変化の測定例を示す。この測定では、ライン抵抗  $R_1$  を98 M $\Omega$ として、接触力は50  $\mu\text{N}$ にした。また極性は、プローブ側を陽極にした。最初は

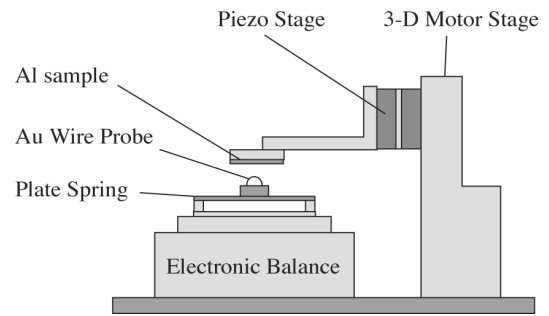


図1. コンタクト実験装置

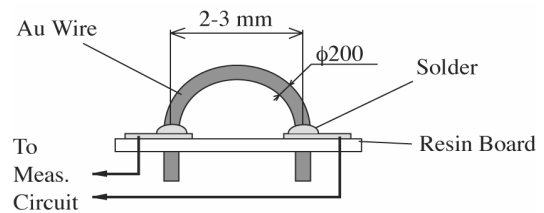


図2. Auワイヤプローブ試料

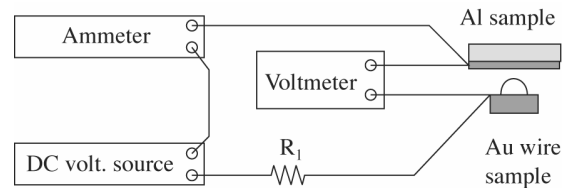


図3. コンタクト特性測定

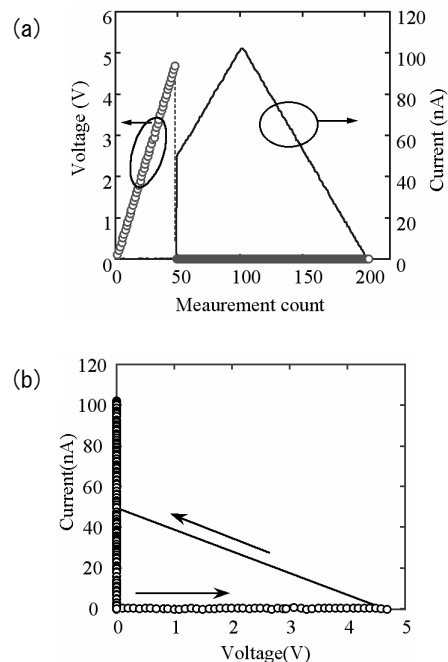


図4. (a) 試料間電圧・(b) 電流変化の測定例

表 1. 測定条件

n	probe	Contact Force[ $\mu\text{N}$ ]	R1[M $\Omega$ ]	n	probe	Contact Force[ $\mu\text{N}$ ]	R1[M $\Omega$ ]
1	cathode	10	98	17	cathode	50	8
2	anode	10	98	18	anode	50	8
3	cathode	20	98	19	cathode	10	8
4	anode	20	98	20	anode	10	8
5	cathode	50	98	21	cathode	20	8
6	anode	50	98	22	anode	20	8
7	cathode	10	98	23	cathode	50	8
8	anode	10	98	24	anode	50	8
9	cathode	20	98	25	anode	100	98
10	anode	20	98	26	anode	100	98
11	cathode	50	98	27	anode	100	98
12	anode	50	98	28	anode	100	98
13	cathode	10	8	29	anode	100	8
14	anode	10	8	30	anode	100	8
15	cathode	20	8	31	anode	100	8
16	anode	20	8	32	anode	100	8

印加電圧が小さいため、電流は流れないが、ある電圧(図4の場合は4.8 V)で絶縁破壊を起こし、突然数10 nAの電流が流れるようになり、電圧が急降下する。特に本研究では、1 nAを越える電流が観測されたときの電源電圧を絶縁破壊電圧と定義した。図4からわかるように、絶縁破壊が起こると、オーミックなコンタクト特性を示す。

実験条件は、表1のように設定した。直前の測定の影響を排除するため、毎回の条件が変わるように実験順序を計画し、各々の条件で各2回の測定を行った。図5に絶縁破壊電圧、図6にコンタクト開放時の力、図7に絶縁破壊後の接触抵抗値を示す。絶縁破壊電圧がゼロである場合、破壊後の接触抵抗が十分に下がらない場合など、いくつか例外的に取り扱わなければならないデータがあることがわかる。図6から、ライン抵抗値を8 M $\Omega$ とした場合と、接触荷重を100  $\mu\text{N}$ にした場合には、コンタクト開放力が低下することがわかるが、25回目のデータは例外的な取り扱いが必要である。

図8に接触力と絶縁破壊電圧との関係を示す。機械的接触によって酸化膜破壊が生じた場合は例外として除くと、破壊電圧は、3-10 Vの範囲であるが、接触力を増やすと平均値とばらつきが減っていく。これは、接触力が低い場合には、板ばねの振動等の影響で機械的接触が安定しないためと思われる。今回の実験における最大荷重である100  $\mu\text{N}$ を印加すると絶縁破壊電圧は $4 \pm 1$  Vに安定していることから、今回実験に用いたA1膜の酸化膜の破壊に必要な電圧は4 V程度であると言える。

図9に接触力とコンタクト開放力との関係に整理したグラフを示す。ライン抵抗が98 M $\Omega$ の場合には、絶縁破壊で形成されたA1-Auのコンタクトを機械的に開放するのに40-80  $\mu\text{N}$ の力が必要であることがわかるが、一方、既に触れたように、ライン抵抗を小さくする(最大電流を1.2  $\mu\text{A}$ )か、接触力を100  $\mu\text{N}$ まで大きくすると、開放に必要な力は10  $\mu\text{N}$ 程度以下となり、非常に小さくなっている。なお、接触力と絶縁破壊電圧およびコンタクト開放力との関係においては、電圧印加極性の明確な影響は見えない。

図10(a)には接触力と接触抵抗との関係を、図10(b)

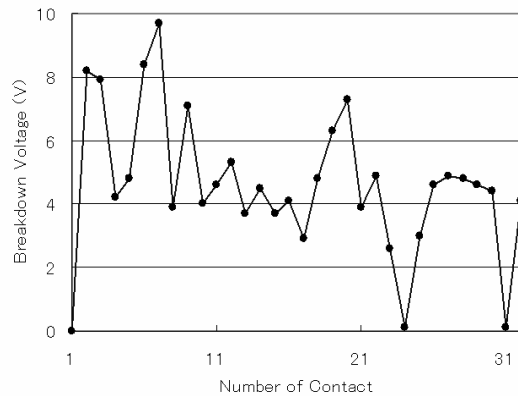


図5. 絶縁破壊電圧の測定結果

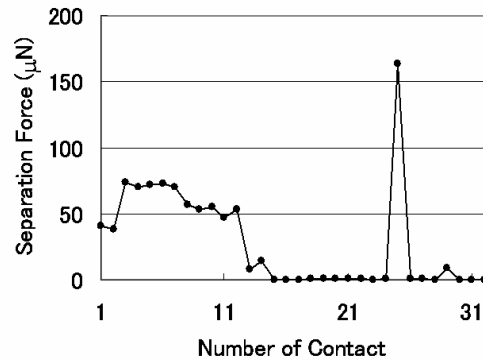


図6. コンタクト開放力の測定結果

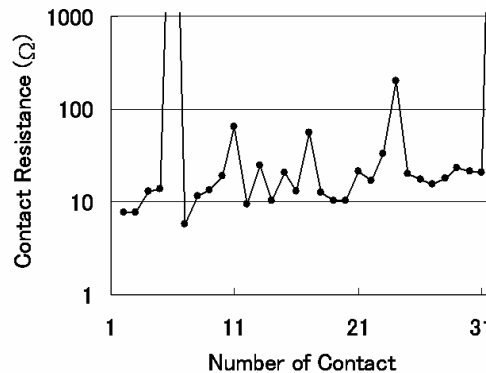


図7. 接触抵抗の測定結果

には絶縁破壊電圧と接触抵抗との関係を示す。接触抵抗値としては10-100  $\Omega$ の値が得られており、接触力が小さくなるに従って、接触抵抗の最小値が減少している。また図10(b)からわかるように、絶縁破壊電圧が大きいほど接触抵抗が小さくなっていることがわかる。しかし、これらの結果は次のように説明できる。つまり、機械的接触が不安定な場合には、例えば表面汚染層やごみの影響などを受けやすくなり、絶縁破壊電圧が高くなる。そして、その場合には絶縁破壊時にコンタクト部に投入さ

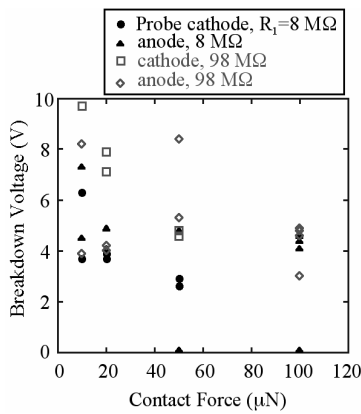


図 8. 接触力と絶縁破壊電圧の関係

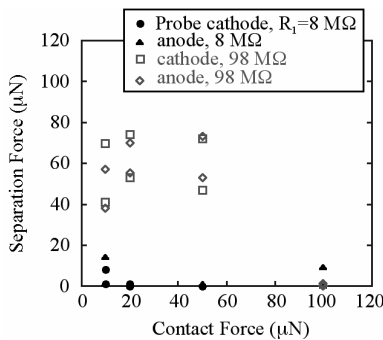


図 9. 接触力とコンタクト開放力の関係

れるエネルギーが大きくなるため、結果的に破壊後の接触抵抗は低下する。最大電流値の影響については、接触力が小さい場合には、最大電流値が小さい場合の方が絶縁破壊電圧が大きくなる傾向があるが、接触力 100  $\mu\text{N}$  とした場合には有意な差は見られない。

これまでの結果<sup>7)</sup>によれば、最大電流値が 1 mA を越えるような場合には、フリッピング後の接触抵抗は最大電流値が大きいほど低くなる。これは接触抵抗が B フリッピングによる電路拡大プロセスによって決まっていることを意味している。一方、今回の実験では、ほぼ絶縁破壊電圧のみで接触抵抗が決まっていると言え、最大電流の影響は見られない。すなわち、今回の 1  $\mu\text{A}$  以下の最大電流値では、主に A フリッピング（絶縁破壊、初期電路形成）が接触抵抗を決めると言って良い。

A フリッピングが起こる過程については、古くからトンネル電流などで説明されている<sup>15)</sup>。図 11 に、絶縁破壊前の電圧-電流特性を測定した結果を示す。条件に関わらず、多くの場合は (b) のパターン、すなわち絶縁破壊前にほとんどトンネル電流は観測されない。しかし、(a) のように、明確なトンネル電流が観測される場合もあり、データのばらつきなどもこの辺りに原因があるものと思われる。なお、(a) のトンネル電流は、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  膜厚が 12 nm の場合に相当する。

我々は、フリッピングを利用した新しい低接触力カブ

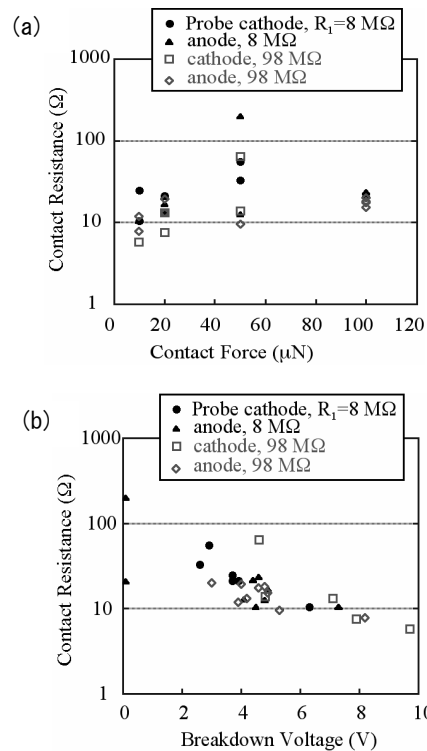


図 10. 接触抵抗と (a) 接触力および (b) 絶縁破壊電圧

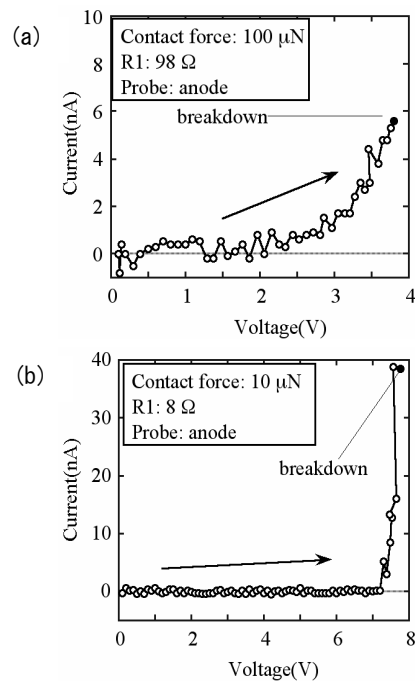


図 11. 絶縁破壊前の電流電圧変化の例

ローリング手法の提案をしているが、フリッピング後の接触抵抗のばらつきの低減が一つの課題となっている。今回、A フリッピングに関しては、100  $\mu\text{N}$  程度の荷重を印加すれば、破壊電圧および破壊後の接触抵抗が安定することがわかった。これは、A フリッピングプロセ

スに続いてBフリッピングを行えば、フリッピング後の接触抵抗も安定する可能性を示唆するものと言える。

#### 4. おわりに

本研究では、0.1 mN 以下の接触力、最大電流 1  $\mu$ A 以下の条件下での Al 電極へのフリッピングコンタクトについて調べた。最大電流を 1  $\mu$ A 以下にすれば、A フリッピングと呼ばれる絶縁破壊電路形成が支配的となり、その特性を調べることができること、0.1 mN の接触力であれば、絶縁破壊電圧のばらつきが少なく、その結果接触抵抗値のばらつきも小さくなることがわかった。これらの知見を、半導体の低接触力プロービングに応用していくためには、さらなる研究開発が必要であるが、いずれにしろ実用化に向けて重要な知見が得られたものと言える。

本報告は、2006 年 9 月に開催された国際電気接点会議 (Holm 会議 06) の発表論文の内容に基づいている。最後に、本研究の共同研究者である、東京エレクトロン AT 株式会社の片岡憲一氏、小松茂和氏、東京大学の須賀唯知教授に感謝いたします。

#### 引用文献

- 1) T. Hirano, A. Kimura, and S. Mori, Proc. Multi-Chip Module Conf., 1994, pp. 89-94.
- 2) T. Ito, R. Sawada, and E. Higurashi, Proc. MEMS '99, 1999, pp. 263-266. B-H Kim, S. Park, B. Lee, J-H Lee, B-G Min, S-D Choi, D. Cho and K. Chun, Proc. MEMS '02, 2002, pp. 368-371. Y-D Kim, J-H Sim, J-W Nam, and J-H Lee, Jpn. J. Appl. Phys., vol. 37, pp. 7070-7073, 1998
- 3) Y. Zhang, Y. Zhang, and R. B. Marcus, J. Microelectromech. Syst., vol. 8, pp. 43-49, 1999.
- 4) T. Itoh, K. Kataoka, and T. Suga, Sensors and Actuators A, vol. 97-98, pp. 462-467, 2002.
- 5) K. Kataoka, T. Itoh, and T. Suga, IEEE Trans. Compon. and Packag. Technol., vol. 26, pp. 382-387, 2003.
- 6) K. Kataoka, T. Itoh, K. Okumura, and T. Suga, Proc. Int. Test Conf. 2002, 2002, pp. 424-429.
- 7) K. Kataoka, S. Kawamura, T. Itoh, K. Ishikawa, H. Honma, and T. Suga, Sensors and Actuators A, vol. 103, pp. 116-121, 2003.
- 8) K. Kataoka, T. Itoh, K. Inoue and T. Suga, Tech. Digest of MEMS 2004, 2004, pp. 733-736.
- 9) J. Aronstein, Proc. 50<sup>th</sup> IEEE Holm Conf. on Electrical Contacts and 22<sup>nd</sup> Int. Conf. on Electrical Contacts, 2004, pp. 494-501.
- 10) M. Braunovic, N. S. McIntyre, W. Chauvin and I. Aitchison, IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manufact. Technol., vol. 7, pp. 96-106, 1984.
- 11) M. Runde, H. Kongsjorden, J. Kulsetas and B. Totdal, Hybrids, Manufact. Technol., vol. 9, pp. 77-85, 1986.
- 12) R. S. Timsit, IEEE Trans. Compon., Hybrids, Manufact. Technol., vol. 3, pp. 71-79, 1980.
- 13) R. Holm and E. Holm, *Electric Contacts - Theory and Application*, Springer-Verlag, Berlin, edn. 4, 1967, p.135.