

ドライエッチング装置

Dry Etching System

半導体素子の高集積化が急速に進むなかで、ドライエッチングに対してもますます高度な微細加工技術が要求されており、従来技術では対応が困難となりつつある。これに対しマイクロ波プラズマエッチング装置は、微細加工性に優れた特徴を持ち、ゲート電極加工への適用をはじめとして、メタル配線材料の加工にも適用されてきている。

ゲート電極加工では、バイアス電源の周波数を下げることによって、下地酸化膜との選択比が向上し、メタルの加工ではマイクロ波プラズマ処理室を追設することで防食性能が著しく向上する。

また、低温エッチング技術と組み合わせることによって、ディープサブミクロン時代の各膜種への適用が可能である。

川崎義直* Yoshinao Kawasaki
西海正治* Masaharu Nishiumi
奥平定之** Sadayuki Okudaira
掛樋 豊*** Yutaka Kakehi

1 緒 言

2～3年前には、サブミクロンであろうがディープサブミクロンであろうが、マスクパターンさえきちんとできていれば「反応性スパッタエッチング装置を用いて、エッチングできる。」と多少露光技術に責任を押しつけながら豪語されていたが、実際にその時代を迎えてみると、予想以上の技術的厳しさがある。

半導体素子構造の高集積化を進める過程で、3次元構造を余儀なくされ、トレンチキャパシタ構造のように5～10 μm の深い穴を再現性よく高速に加工することや、スタックキャパシタ構造での段差の大きく、膜厚差の大きい膜を寸法精度よく異方性に加工することが必須(す)技術となっている。また、配線材料に代表されるようにAl-Si単層膜の時代から、高融点金属やそれらの合金との組み合わせによる積層構造に転換しているため、防食処理が一段と難しくなっており、より高度の防食技術が不可欠になっている^{1),2)}。

さらに、最先端デバイスでは各ユーザーごとに構造や材質が異なっており、エッチングに対する要求の厳しさは言うまでもなく、コンタミネーションや種々のダメージを低減する手段も含めて、ユーザーと装置メーカーが一体となった取り組みが必要となっている。

マイクロ波プラズマエッチング装置は、この時代の要請にこたえることができる装置であり、その開発は研究着手後十数年を経ている。マイクロ波を用いるという発想は、マグネトロン発振器の発明が日本人の手によるものという歴史的経

緯があってこそわが国で早くからなし得たものであろう。

ドライエッチングの理想としては、低温で、反応に寄与する活性種の運動エネルギーが低く、クリーンな環境を作り出すことである。この一つの解を与えることができる装置がマイクロ波プラズマエッチング装置である。

2 マイクロ波プラズマエッチング装置の原理と特徴

マイクロ波プラズマエッチング装置の処理室構成を図1に示す。マグネトロンから発振された2.45 GHzのマイクロ波は、導波管を通じて処理室内に導入される。このマイクロ波の電場と、それに対して垂直方向に形成されたソレノイドコイルによる磁場との相乗作用で、プラズマ中の電子にサイクロトロン運動を生じさせ、これによって低圧力下でも高密度で均一なプラズマを安定して得ることができる。磁場の磁束密度をECR(Electron Cyclotron Resonance: 電子サイクロトロン共鳴)が起こる値である0.0875 Tに選ぶと、放電効率が高くなる。実際にはECR条件より強い磁場条件のほうがプラズマを制御しやすいこと、およびECR条件を利用する場合でも、放電領域で磁場強度の空間分布があり、局所的にしかECR条件を満足させられないことから、ECRプラズマと呼ばずに、単にマイクロ波プラズマと称している。

マイクロ波プラズマは無電極で放電可能であり、試料に高周波バイアスを印加する日立製作所独自の方式によって、ウェーハに入射するイオンエネルギーを浮遊電圧の数十電子ボ

* 日立製作所笠戸工場 ** 日立製作所中央研究所 理学博士 *** 日立製作所機械研究所

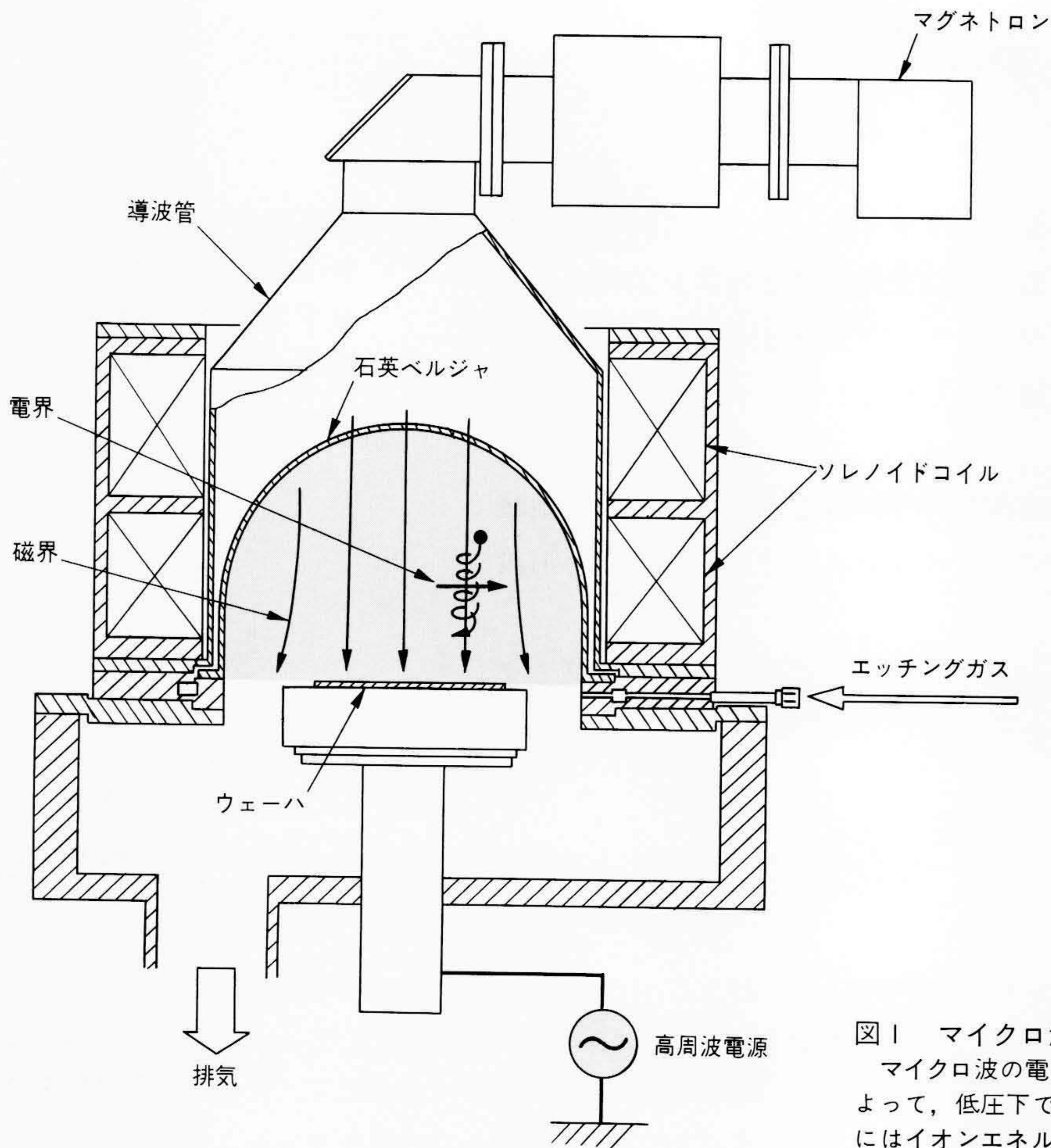


図1 マイクロ波プラズマエッチング装置の処理室構成
マイクロ波の電界とソレノイドコイルによる磁界との相乗効果によって、低圧下でも高密度で均一なプラズマが得られる。試料台にはイオンエネルギー制御用の高周波電源が印加できる。

ルトから数百電子ボルトまで自由に制御することができる。

日立マイクロ波プラズマエッチング装置の特徴として、

- (1) 異方性エッチングから完全等方性エッチングまで形状制御が容易であること。
- (2) イオン化率が従来のRIE (Reactive Ion Etching) と比べて3～4けた高く、低イオンエネルギーでダメージの少ない高速エッチングが可能であること。
- (3) 側壁保護プロセスと高周波バイアス制御の併用によって、下地との選択性を高め、高段差部の異方性エッチングが可能であること。
- (4) 石英ベルジャ内で無電極放電を行うため、汚染源が少なくクリーンなエッチングができること。

などが挙げられる。このような特徴を生かし、今後ますます微細化、薄膜化および高段差化する素子デバイスへの適用を図るため、ゲート材料をはじめとして各膜種に対応するプロセス開発や装置開発を推進している。

3 ゲート電極加工への適用

ゲート電極加工ではデバイスの高集積化によって、下地絶縁膜の膜厚が薄膜化しているため、寸法加工精度と下地絶縁膜に対する選択性の両立が厳しく要求されている。

このため、装置開発当初からゲート電極加工プロセス開発に取り組んできており³⁾、本装置が現在量産されている1 MビットDRAM用のプロセス装置となってきた。0.8 μm (4 MビットDRAM)、0.5 μm (16 MビットDRAM)への超微細化も今まで以上の短いインターバルで進展しつつあり、これらの超微細化へのニーズに対応するため、種々のプロセス検討を加えている。

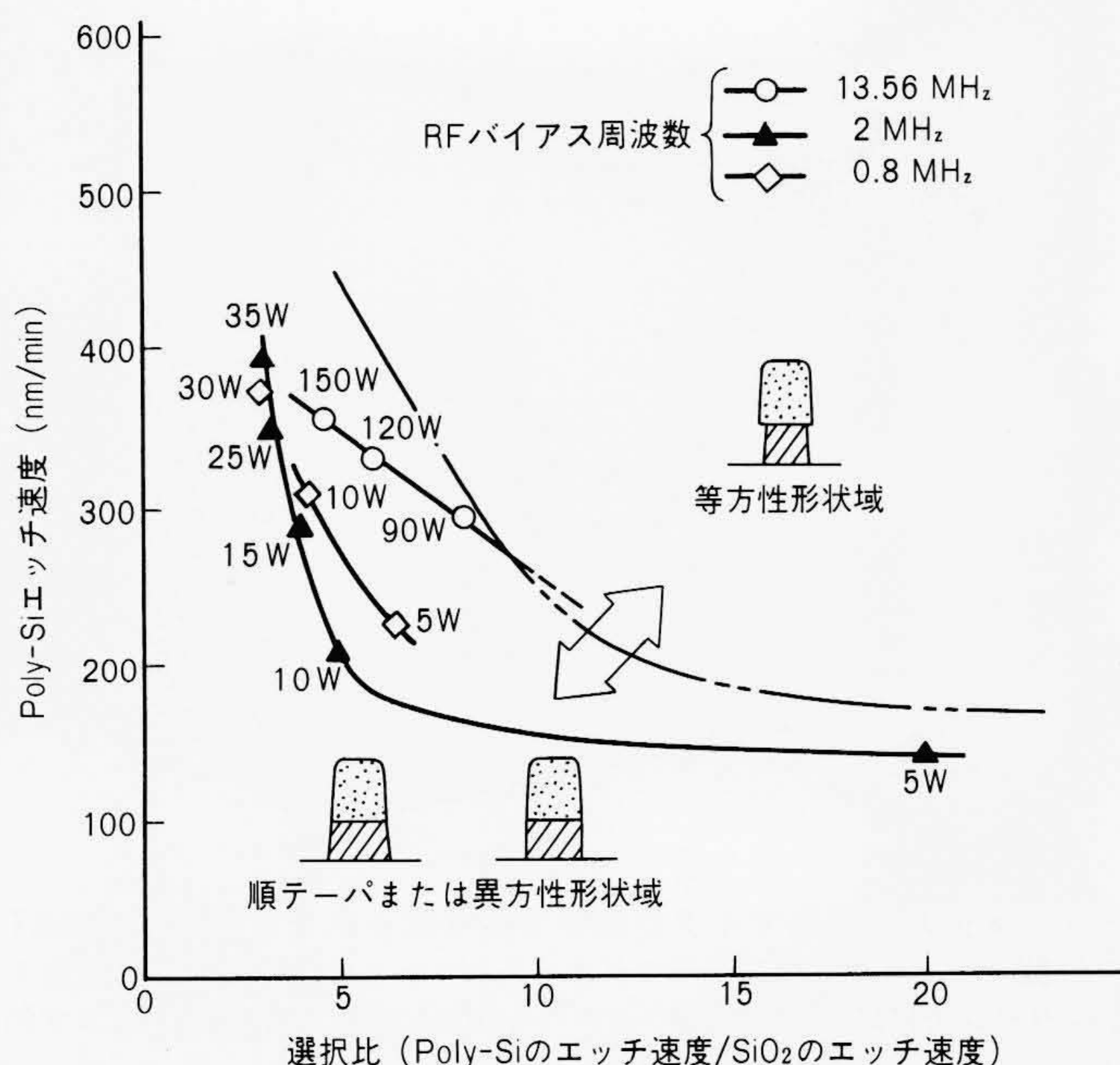
ここではその一例として、本マイクロ波プラズマエッチング装置のキーポイントである高周波バイアスについて、その周波数を変えた場合のエッチング特性を紹介する。

高周波バイアスとして、13.56 MHz、2 MHzおよび800 kHzの3種類の周波数を用い、フッ素系エッチングガスによるPoly-Siのエッチ速度と対下地SiO₂選択比(Poly-Siのエッチ速度とSiO₂のエッチ速度の比)の関係を図2に示す。

Poly-Siのエッチ速度に着目すると、異方性形状を確保しながらエッチ速度の増大を図るためには、現在一般的に使用されている13.56 MHzよりも2 MHzや800 kHzの低周波のほうが有利である。

次に、対下地SiO₂選択比については、異方性形状が確保できる領域では2 MHzが有利となっている。

ウェーハに入射するイオンエネルギーは、高周波バイアス



注：図中の数値は電力(W：ワット)を示す。

図2 ゲート電極加工での高周波バイアス周波数依存性 高周波バイアスの低周波数化により、比較的小さい電力の投入量で異方性形状を保ちながら、下地酸化膜との選択比が大きな条件が存在する。

の周波数が高い場合(10 MHz以上)にはその周期にイオンが追従できず、イオンシースでの電圧降下に主として支配される。一方、周波数が低い場合(2 MHz以下)では、イオンがその周期に十分に追従できるようになり、印加されるピーク～ピークの電位に支配されるように変化する。図2に示したエッチング特性は、このようなイオン加速機構の差が現れていると解釈でき、低周波の場合是一种のTMエッチング(タイムモジュレーションエッチング)^{4),5)}と同様な効果が生じていると考えられる。

したがって、2 MHzを用い、最初は高い電力を投入して高速にエッチングし、途中で電力を選択比が高い領域まで下げることによって、下地SiO₂のエッチ量を僅(きん)少に抑えながらジャストエッチまで異方性に加工することができる。

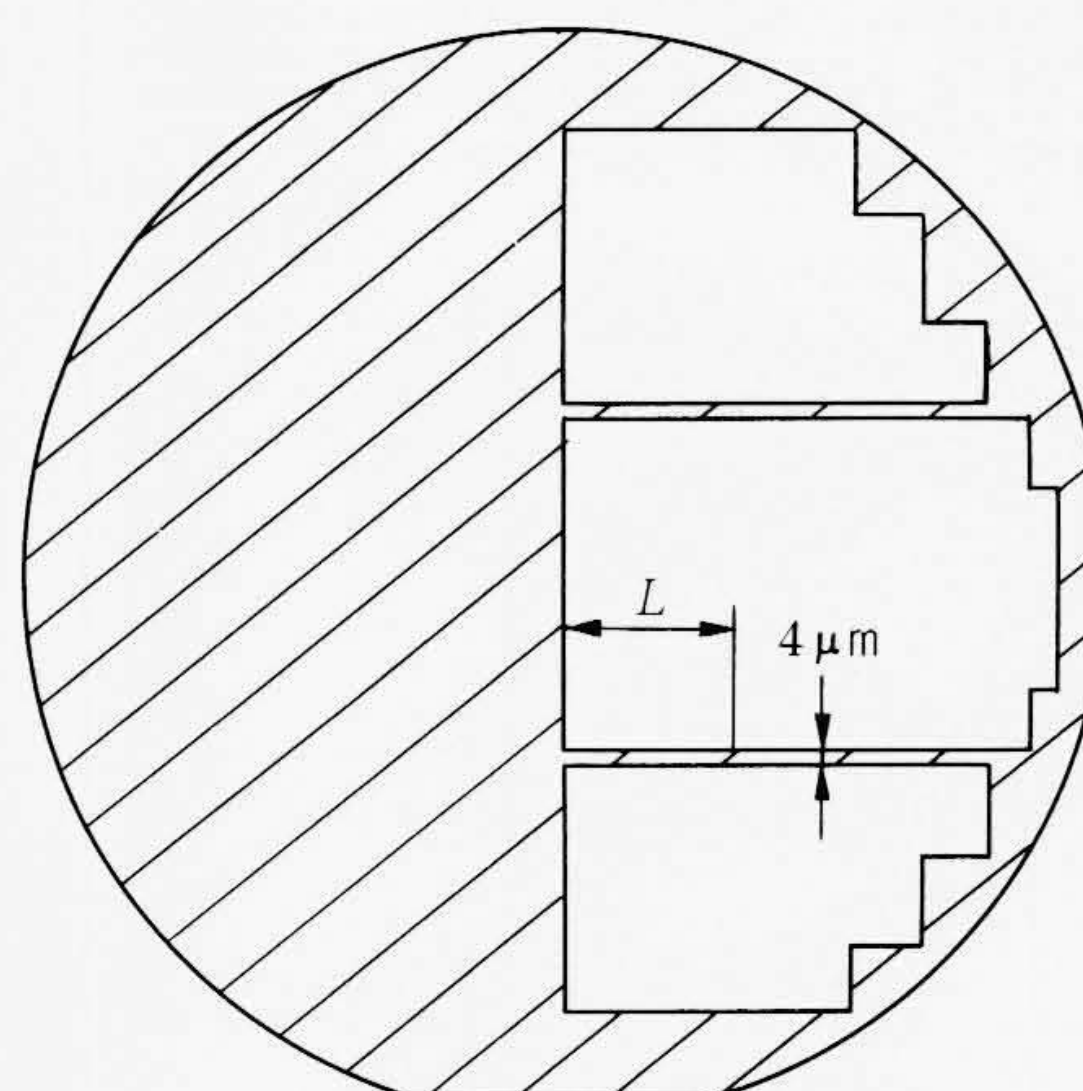
今後さらに種々検討を加え、サブミクロン以下の量産レベルの超微細加工に対応していきたい。

4 メタル配線材料加工への適用

LSIの配線材であるAl合金膜の加工には、従来からRIEが採用されている。この方式では処理中のガス圧力が高いために、マイクロローディング効果^{*)}が出やすい。また、パターンに忠実なアンダーカットのないエッチングを実現するには、パタ

※) マイクロローディング効果：パターンの疎密によりエッチ速度や加工形状に差が生じること。

サンプル：5インチウェーハ
レジスト OFPR 800 220℃ベーク



エッチング後の断面形状



L=5 mm

L=20 mm

L=40 mm

注：L(レジスト端面からの距離)

図3 Al-Si-Cu膜の加工に及ぼすレジストの影響 レジストで覆われた部分(図中の斜線部)の端面からの距離による加工形状の差は小さい。

ーン側壁に保護膜を形成するデポジション性の強いガスを添加する必要がある。しかし、このデポジション性ガスは処理室内壁にも付着し、連続処理の過程によってウェーハ上の異物が増加しデバイスの歩留まり低下の一因となっている。これらはLSIの高集積化に伴うパターンの微細化とともにますます顕著に現れる問題でもある。

これに対しマイクロ波プラズマエッチングでは、従来のRIEよりも高真空領域で安定な高密度プラズマが得られるため、マイクロローディング効果の少ないエッチングが可能である。これを示す一例として、ウェーハ半分にだけレジストを塗布したサンプルのエッチング形状を調べた結果を図3に示す。同様の実験が従来の装置でも行われているが⁶⁾、マイクロ波プラズマ方式ではこのように極端なパターンで寸法、形状差の少ないエッチングが可能であり、今後のサブミクロンデバイスあるいは疎密の厳しいASIC(Application Specific Integrated Circuit)の加工に適していると言える。

また、プラズマの状態を変えることなく、ウェーハへのイオン入射エネルギーが制御できるため、デポジション性の強いガスを添加しなくても、側壁保護膜の形成過程の制御が容易となる。このため異方性のエッチングが容易に実現できる⁷⁾。高周波バイアス出力とAl合金膜のアンダーカット量の関係を

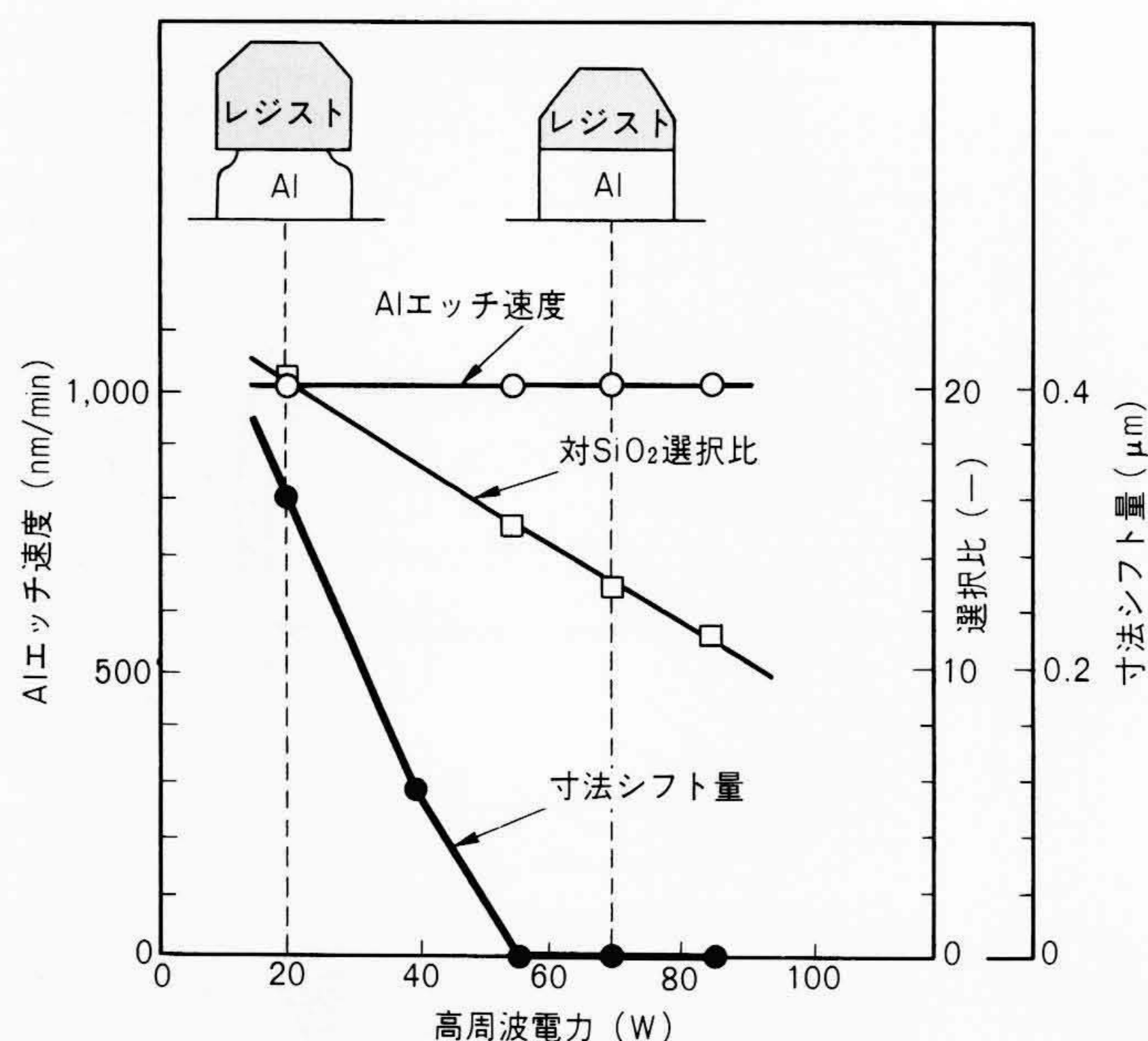


図4 Alエッチング特性の高周波電力依存性 デポジション性の強いガスを添加しないでも、高周波バイアスの電力を制御することによって、高速で異方性のエッチングができる。Alのエッチ速度は高周波電力に依存しない。

図4に示す。RIE方式と比べて大きく異なる点は、エッチ速度が高周波バイアスの大きさに依存せず、プラズマ発生のパラメータ(マイクロ波電力、磁場強度、ガス圧など)だけで決まる一定値となることである。このため、マルチステップによる選択比の向上や形状制御のためのエッチングプロセスが組み立てやすく、目まぐるしく変わるASICへのプロセス対応も容易となる。

Al合金膜のエッチングでの別の課題として、アフターコロージョンが挙げられる。これはAl合金膜のエッチングにCl系ガスが使用されるため、エッチング時にウェーハに付着したCl₂やAl₂Cl₆などの反応生成物が大気中の水分に溶解してCl⁻イオンを生成し、酸素溶解や局部電池作用によってAlが腐食反応を起こすためである⁷⁾。

このようなAl配線の腐食を防止するためには、水分の少ない真空中で、塩素成分を徹底して除去することや大気に出したときの水分との反応を防止する表面処理技術などが必須となる。

今回製品化したメタル配線用マイクロ波プラズマエッチング装置M-308AT(図5)では、エッチング室とは別に防食処理が行えるプラズマ処理室を設けており、大気に取り出す前にレジストおよびパターン側壁に付着した塩素成分を除去するなどの表面処理ができるので、従来方式に比べて防食性能が優れている。

また、このプラズマ処理としてマイクロ波プラズマダウンストリーム方式を採用することによって、従来のプラズマ処理時での荷電粒子のチャージアップによるゲート絶縁膜の耐

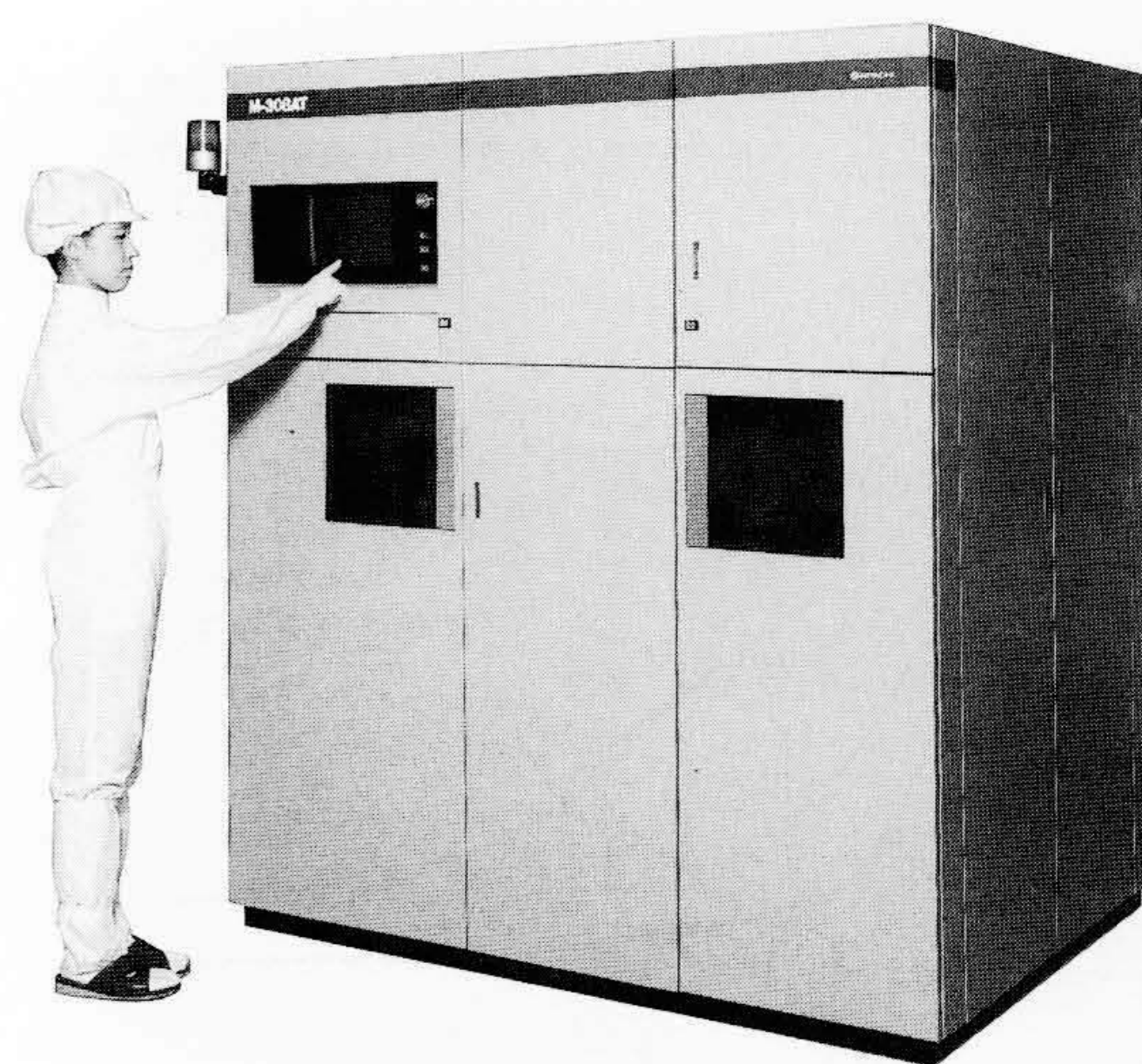


図5 メタル配線用マイクロ波プラズマエッチング装置M-308ATの外観 マイクロ波プラズマダウンストリーム式のプラズマ処理室をインラインで接続しており、ウェーハを大気に取り出す前にプラズマ処理が行えるので、防食性能が優れている。

圧不良の問題を解決している⁷⁾。

次に、メタル配線材料として最近採用されているバリアメタルのエッチングについて紹介する。これは、パターンの微細化によってメタル配線材料ではエレクトロマイグレーションやストレスマイグレーション対策が重要となり、4MビットDRAMではバリアメタルと称するTi, W, TiW, TiNなどの高融点材料とAl合金膜の積層構造が採用されている。このような積層膜のエッチングでは、各層間に段差が生じない異方性エッチングが要求される。これに対してもマイクロ波方式では前述の高周波バイアス制御が有効である。例えば、同一ガス系でバリアメタル層をエッチングする場合は、Al層を異方性に保つのに必要な高周波バイアス値を下限として、バリアメタル層が異方性に加工できるバイアス値を決定すればよい。したがって、Al層とバリアメタル層で高周波バイアス値だけを切りかえるだけで、多層膜を高速でしかも異方性に加工することができる。この加工例を図6に示す。

LSIの高集積化とともに、パターンの微細化だけでなく使用される材料も変わることが予想されるが、マイクロ波エッチング装置の特長である低圧下でのプラズマ制御性を有効に活用することによって、サブミクロンデバイスでのメタル配線の加工に対応できるものと考ええる。

5 低温エッチング技術

現在までのドライエッチング技術は、側壁保護膜形成方式によって微細加工技術を発展させてきたとも言えよう。そのために、エッチングガスとデポジション性の高いガス種の選択および混合比が、最適なプラズマ形成に重要とされてきた。

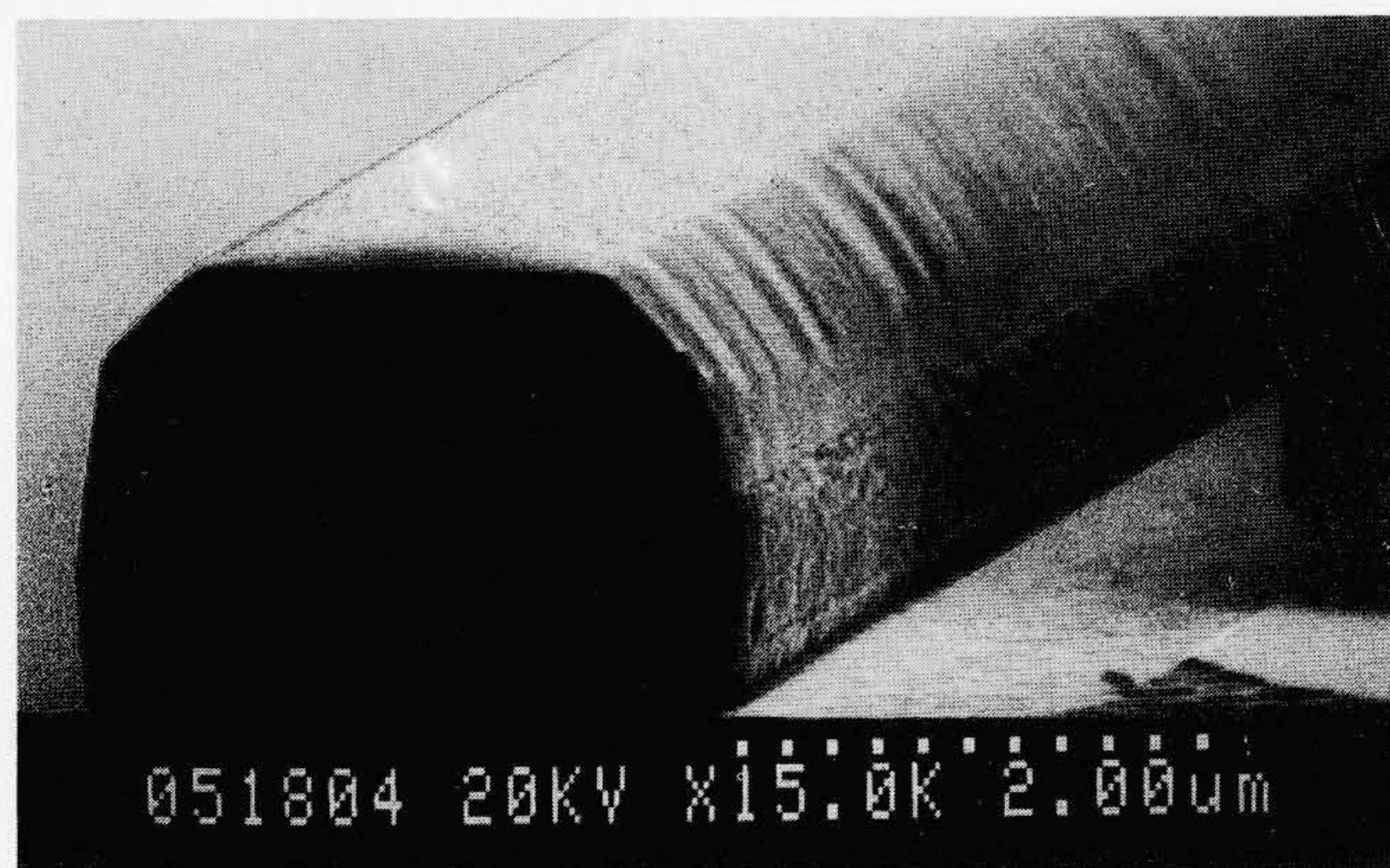


図6 バリアメタル付き配線材料のエッチング例 Al-Cu-Si・バリアメタルの積層配線も、高周波バイアスの最適化を行うことによって、高速でしかも各層間に段差の生じない異方性エッチングが可能である。

この側壁保護膜形成技術は中性ラジカルによるエッチング反応が起こらないように側壁に膜を形成させ、垂直方向だけをエッチングする技術である。すなわち、イオンの入射がほとんどない側壁はエッチングされず、イオンが入射する底面部がエッチングされる技術である。しかし、このような保護膜形成による微細加工は決して好ましいものではない。なぜならば、保護膜は垂直方向のエッチ速度や選択性を低下させるだけでなく、ウェーハや装置の汚染の源となり、信頼性や再現性を低下させる原因となるからである。したがって、従来技術のままではディープサブミクロン時代に対応できなくな

りつつある。

側壁保護膜をできるだけ低減して異方性エッチングを実現させる技術として、日立製作所は側壁保護膜をまったく用いず異方性エッチ、高エッチ速度、高選択性を同時に満足させる技術として低温エッチング技術を提案した⁸⁾。

低温エッチングは、方向性のない中性ラジカルと側壁との反応を凍結させ、底面でのイオンアシスト反応は常温でのエッチ速度のまま保持される技術である。したがって、側壁保護膜形成のために必要であったデポジション性ガスを必ずしも必要としない。

このような考え方に基づいて、ウェーハを冷却し SF_6 ガスだけを用いたときのSiのエッチング特性を図7に示す⁹⁾。デポジション性ガスを用いないためエッチ速度1,000 nm/min以上と従来の数倍となっており、基板温度が $-120 \sim -130^\circ\text{C}$ ではSiのエッチ速度はほとんど低下せず、垂直にエッチングされている。また、マスク材料であるホトレジスト(および下地 SiO_2)との選択比が低温になるほど向上している。

同じく O_2 プラズマによるレジストのエッチングでは、図8に示すように高周波バイアス電力によってエッチ速度が向上する。どの電力でも -100°C までエッチ速度の変化はなく、 -100°C 近傍で高速、高選択、異方性が満足されている¹⁰⁾。レジストのエッチングの場合には、酸素ラジカルとレジストの化学反応凍結というよりは、反応生成物の H_2O の蒸気圧が -100°C 近傍で急激に低下するためと考えている。したがって、低温エッチングは側壁部で反応が起こらないように反応凍結

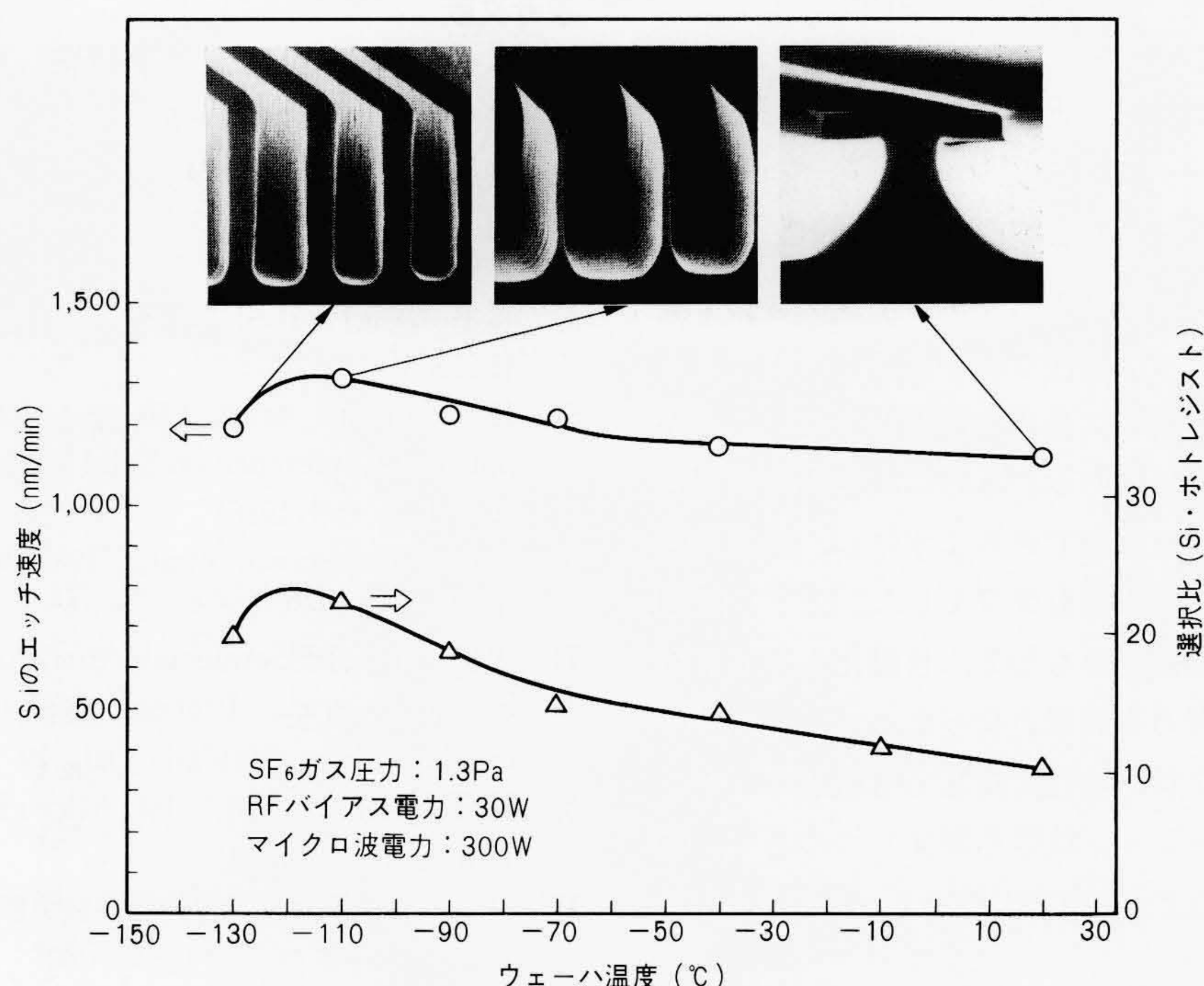


図7 シリコンの低温マイクロ波プラズマエッチングの一例 Siのエッチングでは、ウェーハ温度 -130°C 近傍で形状、エッチ速度、選択比のすべての特性が良い。

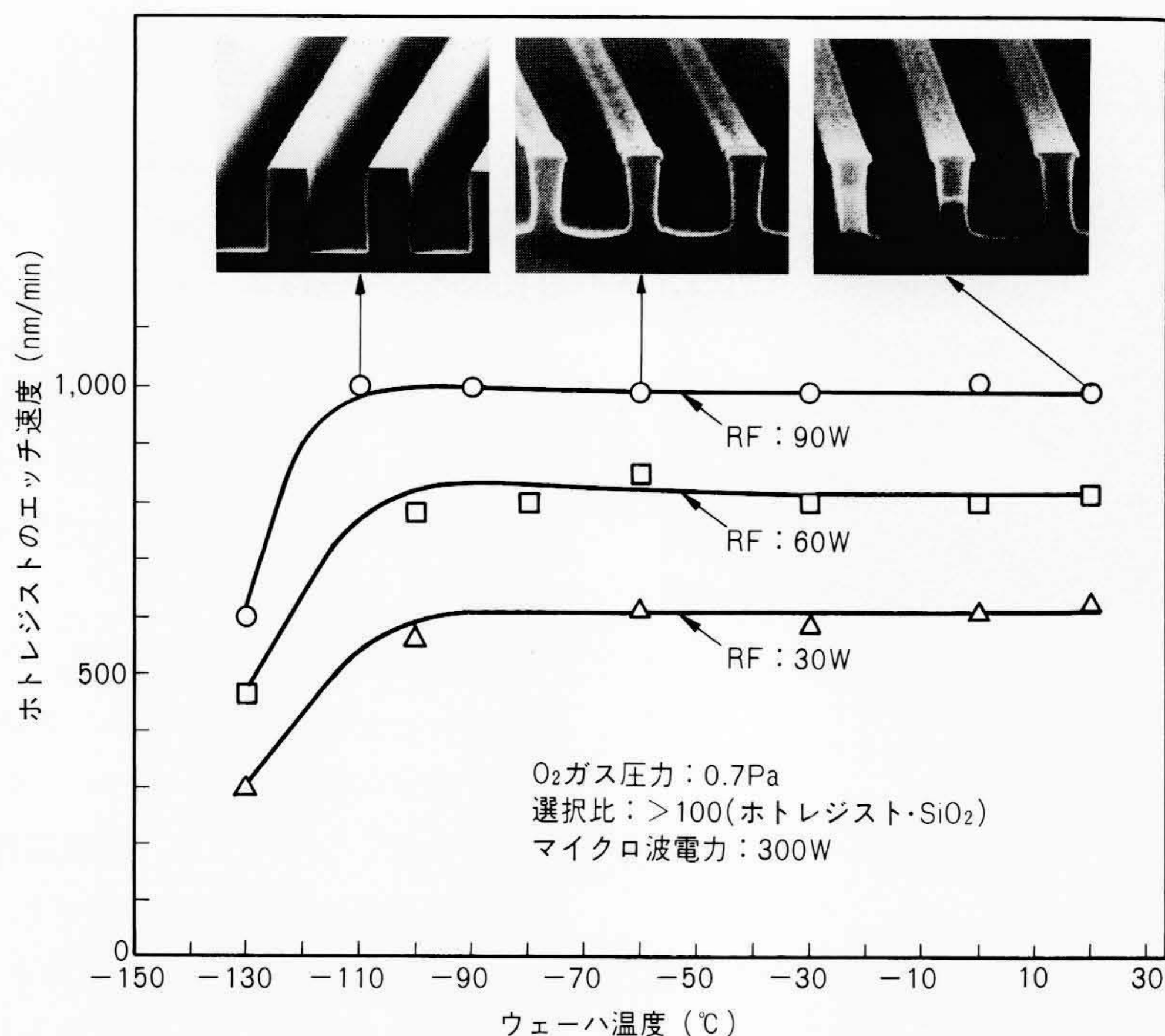


図8 ホトレジストの低温マイクロ波プラズマエッチングの一例 ホトレジストのエッチングではウェーハ温度 -100°C 近傍で形状、エッチ速度の特性が良い。RF電力が90 W以下では、選択比は100倍以上である。

するか、たとえ反応しても反応生成物を凍結するかによって、サイドエッチを防止する技術と言える。

以上のように、低温エッチングは異方性、高選択性、高速性を同時に満足させるだけでなく、その他、装置内発塵(じん)の原因となる堆(たい)積物の低減や、前後処理工程を減らすことも可能であり、均一性、低損傷なども期待できる有望な技術と考えられる。

6 結 言

サブミクロン加工に対応するゲート電極材料、およびメタル配線材料加工用のマイクロ波プラズマエッチング装置を開発した。マイクロ波プラズマは活性な粒子を多く生成できる高効率放電であり、同時に素子に与える損傷が少ないことから、ドライエッチングに適している。さらに、本開発装置はイオンのエネルギーを独立に制御できるようにし、装置内壁を石英にすることによって汚染源も少なくした。メタル配線材料加工用装置では後処理技術をも加え、自動化も充実させたので、量産装置として有力な装置となった。

将来のディープサブミクロン時代に対しても低温エッチング技術やタイムモジュレーション技術を開発しつつあり、微細加工技術の発展に役立つように努力している。そのために、

エッチング反応機構の研究、素子特性向上のためのデータの蓄積および改良技術の開発も重要と考えている。

参考文献

- 1) 広部：月刊Semiconductor World, p.73(1988-12)
- 2) 岩田, 外：VLSI電極・配線材料, 電気学会, 金属材料研究会資料, MR-86-7(1986)
- 3) 濱崎, 外：マイクロ波プラズマエッチング装置, 日立評論, **68**, 9, 711~714(昭61-9)
- 4) 奥平：次世代超LSIプロセス技術 応用編, p.260, リアライズ社(1988)
- 5) K.Tsujimoto, et al. : Extended Abstracts of 18th. International Conference on Solid State Devices and Materials, A-6-1, p.229(1986)
- 6) Isahiro Hasegawa, et al. : 1985 Dry Process Symposium, p.126
- 7) 掛樋, 外：月刊Semiconductor World, p.103(1988-12)
- 8) S.Tachi, et al. : Proceeding of 1987th Dry Process, Electrochem. Soc. Hawaii, Oct. 19
- 9) K.Tsujimoto, et al. : 1st. Micro Process Conference, No. B-5-1, p.132(1988)
- 10) 川上, 外：第35回応用物理学会予稿集, p.496(1988)