

マイクロ波プラズマエッチング装置

Microwave Plasma Etching System

半導体素子の急速な高集積化の進展により、ドライエッチング装置に対しても素子ダメージの少ない高度な微細加工技術が要求されている。

微細加工性に優れた特長を持つマイクロ波プラズマエッチング装置は、メタル配線材料、ゲート電極材料の加工に適用されてきているが、新たなニーズに対するプロセス技術の開発・改善や処理機能の増設により、ハーフミクロンLSI製造装置用に性能向上を図った。

また、ハーフミクロン時代以降にも適用可能なマイクロ波方式の絶縁材料用エッチング装置を新たに開発した。本装置はコンタクトホール加工などの高段差・微細加工プロセスに適用されつつある。

金井三郎*
野尻一男**
縄田 誠***
岡田建夫****

Saburō Kanai
Kazuo Nojiri
Makoto Nawata
Tateo Okada

1 はじめに

超LSIでMOS DRAM(Dynamic RAM)を例にとれば、集積度16 Mビット、配線幅0.5~0.6 μmのハーフミクロン、ウェーハサイズ8インチでの量産立ち上げ時代に突入した。この中でドライエッチング技術は、リソグラフィーとともに微細加工の中核プロセスとなっている。

半導体素子の高集積化に伴い、構造は三次元化され薄膜化・多層化が進展し、配線材料も高融点金属やその合金との組み合わせとなり、多様化してきている。このため、ドライエッチング装置に対して、高段差微細寸法を従来よりも寸法精度よく垂直形状に加工することはもちろん、高選択比・高均一性が要求され、さらに信頼性の面から異物の低減・ダメージフリー・コロージョンフリーが不可欠の要件となっている。

また、最先端デバイスになるほど各デバイスメーカーごとに構造、材質およびその組み合わせが異なり²⁾、エッチングに対する要求もさまざまであり、各デバイスメーカーごとにデバイスメーカーと装置メーカーとが一体となった取り組みが必要となってきた。

マイクロ波プラズマエッチング装置は、高真空領域でマイクロ波によって高密度のプラズマを発生させ、低い入射イオンエネルギーで損傷の少ない垂直エッチングを行うことができ、まさにハーフミクロン時代の要請にこたえられる装置である。現在、マイクロ波プラズマエッチング装置はエッチング材料別に、表1に示す機種を製品化しユーザーに使用してもらっている。以下、装置の特長と各エッチング材料別の適

表1 エッチング材料別機種形式一覧表 処理室の追加やウェーハ搬送の自動化対応(FA対応)別の機種のラインアップを示す。

エッチング材料	機種呼称	形 式	内 容
メタル配線材料	M-308AT	M-308AT	標準機
		M-308ATW	同上+リンサ*
		M-308FX	FA対応標準機
		M-308FXW	同上+リンサ*
ゲート電極材料	M-318EX	M-318EX	標準機
		M-308FX	FA対応標準機
絶縁材料	M-328EX	M-328EX	標準機
		M-328FX	FA対応標準機

注：* リンサ(純水リンス処理機能)

用状況について述べる。

2 マイクロ波プラズマエッチング装置の原理と特長

メタル配線用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、導波管を通して石英ベルジャ内の処理室に導入される。処理室にはソレノイドコイルによる磁場が印加されており、磁場強度はマイクロ波の進行方向に沿って徐々に減少し、試料台の上方でECR(Electron Cyclotron Resonance：電子サイクロトロン共鳴)条件である0.0875 Tになっている。

ECR条件では、磁力線の周りを円運動する電子の回転周波数とマイクロ波の周波数が一致するため、電子が共鳴的に加

* 日立製作所 笠戸工場 ** 日立製作所 半導体設計開発センタ *** 日立製作所 機械研究所 **** 日立製作所 電機システム事業本部

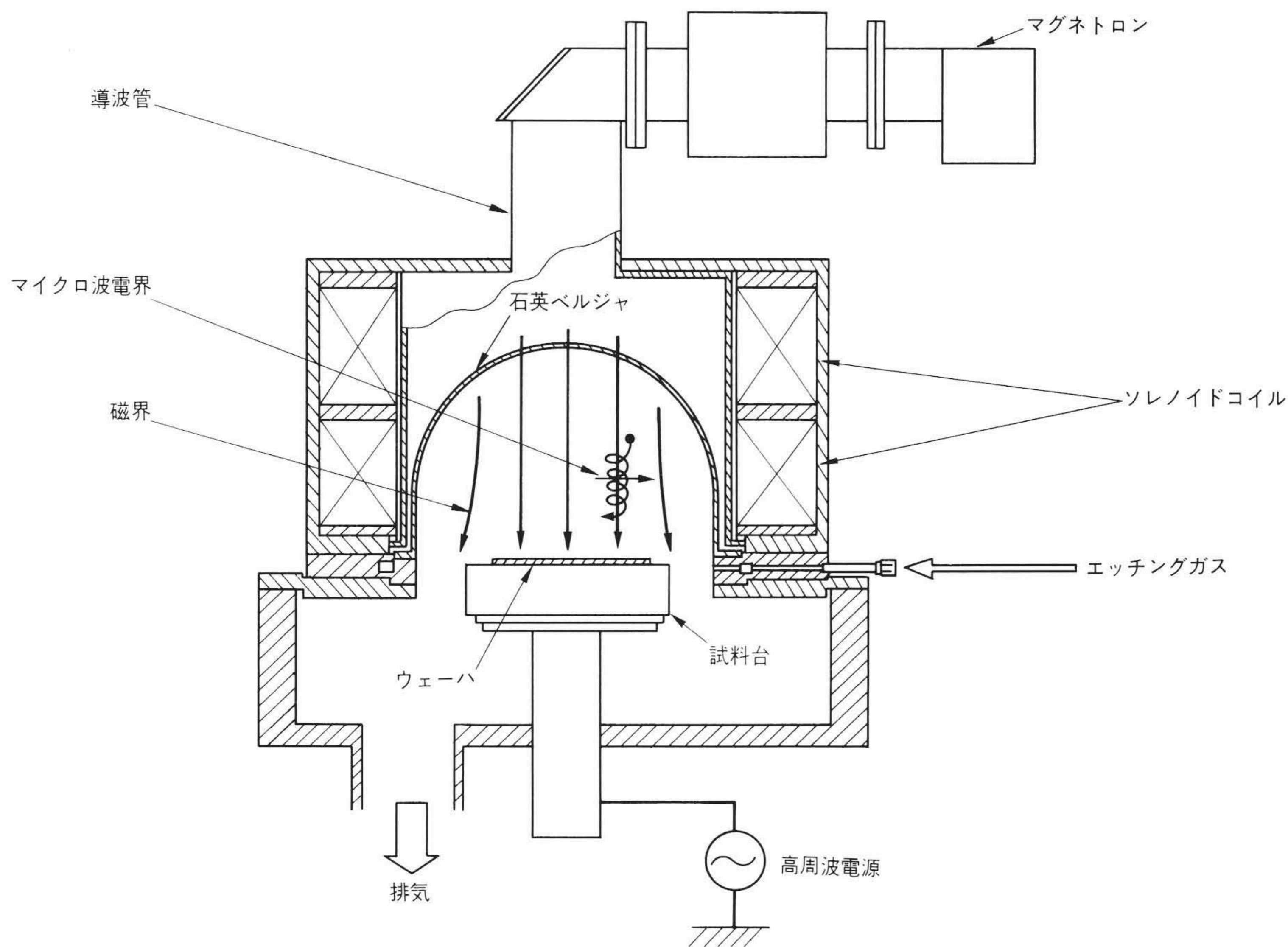


図1 マイクロ波プラズマエッチング装置の処理室構成 直交するソレノイドコイルによる磁界とマイクロ波電界との相互作用により、低い放電電圧かつ無電極で高密度プラズマが発生する。試料台には高周波電源を印加することによって、イオンエネルギーの制御が可能である。

表2 有磁場マイクロ波プラズマとRFプラズマの特性比較³⁾ プラズマ自体の物理的特性を比較したもので、マイクロ波プラズマが高真空状態で密度の高いプラズマであることがわかる。

項 目	RFプラズマ	有磁場マイクロ波プラズマ
励起周波数	13.56 MHz	2.45 GHz
ガス圧力	10 Pa	6.7×10^{-2} Pa
平均自由行程	0.7 mm	110 mm
電子温度	8 eV	3.8 eV
プラズマ密度	10^{10} cm ⁻³	3×10^{11} cm ⁻³
電離度(α)	4×10^{-6}	2×10^{-2}
イオンシース幅	1 mm	0.1 mm
飽和イオン電流	0.3 mA/cm ²	7.5 mA/cm ²

注：略語説明 RF(Radio Frequency)

速され、電子と気体分子の衝突が加速度的に増加して電子雪崩を生じ、高密度なプラズマを効率よくかつ低い放電開始電圧で発生させることができる。

有磁場マイクロ波プラズマの原理的特長を下記に列挙し、RF(Radio Frequency)プラズマとの特性比較を表2³⁾に示す。

(1) 磁場とマイクロ波の相互作用により、高密度なプラズマが形成できる。したがって、飽和イオン電流が大きい。

- (2) 無電極放電であるため、汚染が少ない。
- (3) ウェーハに高周波電源を印加するRFバイアス法により、プラズマ状態を変えることなく、ウェーハに入射するイオンエネルギーを浮遊電圧である数十電子ボルトから数百電子ボルトまで、自由に制御することが可能である。

上記特長のあるプラズマをエッチングプロセスに適用したときのプロセス上の利点は以下のとおりである。

- (1) 高真空条件でのエッチングが行え、異方性形状を得やすい。えに、マイクロローディング効果が少ない。
- (2) 飽和イオン電流が大きく、エッチング速度が速い。
- (3) 低イオンエネルギーでの低損傷・微細加工が実現できる。
- (4) 石英ベルジャ内での無電極放電のため、汚染の少ないクリーンなエッチングができる。
- (5) プラズマ状態を変えることなく、イオンの運動エネルギーを制御できるため、異方性エッチングから等方性エッチングまで広範囲の形状制御が容易にできる。
- (6) RFバイアス法、側壁保護プロセスの併用により、下地との選択比を高めた高段差・異方性エッチングが高速で可能である。
- (7) 電離度が高いためガスの利用効率が高く、ガス流量が少なく済む。

3 メタル配線への適用

半導体素子の高集積化により、コンタクト抵抗の増加、ストレスマイグレーションやエレクトロマイグレーションによる断線の問題が顕著になってきている。これらの問題解決の一つの手段として、Al合金膜の下にバリアメタル膜を配置する構造が採用されてきている。

バリアメタル採用により、メタル配線ドライエッチングの技術面では以下の要求があげられている。

- (1) Al合金膜とバリアメタル間にえぐれがなく、垂直形状が得られること。
- (2) エッチング処理後に腐食が長期間発生しないこと。

これらの課題に対して、M-308ATでは、RFバイアスやエッチングガス量・ガス種を変化させるマルチステップエッチング法の採用と、防食機能の追加によって良い効果を得ている。以下、マルチステップエッチング法と防食法の適用例について述べる。

3.1 マルチステップエッチング法

Al合金・バリアメタル多層膜をエッチングする場合、Al合金膜とバリアメタルとはプロセス条件を変える必要があり、バリアメタルに対しては、各膜種ごとに個別のプロセスを適用している。その理由は、採用されているバリアメタルがTiW, TiN, WSi, MoSi, W, TiN・Tiなどと材質や膜特性が異なっており⁴⁾、Al合金とも膜特性が異なっているためである。

一般にAl合金膜は、側壁保護膜形成用のガスを含まない塩素系ガスによって垂直形状に加工できる。

一方、TiN, WSi, TiN・Tiの場合には、(膜厚にもよるが)Al合金膜と同一条件でエッチングが可能である。しかし、エッチング特性はAl合金膜と異なりイオンの加速エネルギーに対する依存性が大きく、要求性能を満足しない。

すなわち、垂直形状でエッチング残渣(さ)のない微細加工を達成するためには、各種バリアメタルに対して適正にイオンエネルギーを制御する必要がある。

また、TiW, W, MoSiの場合は、Al合金膜と同一条件では実用上のエッチング速度が得られず、レジストが耐えられない。これらの膜に対しては、塩素系ガスにフッ素系ガスを添加することによって昇華しやすいフッ化物を生成させ、エッチング速度を高めることが必要である。

Al合金・バリアメタル構造のサンプルを、マルチステップによってエッチング処理した形状を図2に示す。

3.2 防食処理法

Al・バリアメタル多層膜をエッチングしたときの大きな問題として、アフターコロージョンがある。Al合金配線膜のドライエッチング後の腐食発生メカニズムに関しては数多く報告されており、大きな要因として異種金属間の局部電池作用があるとされている。特に、異種金属が積層構造となってい

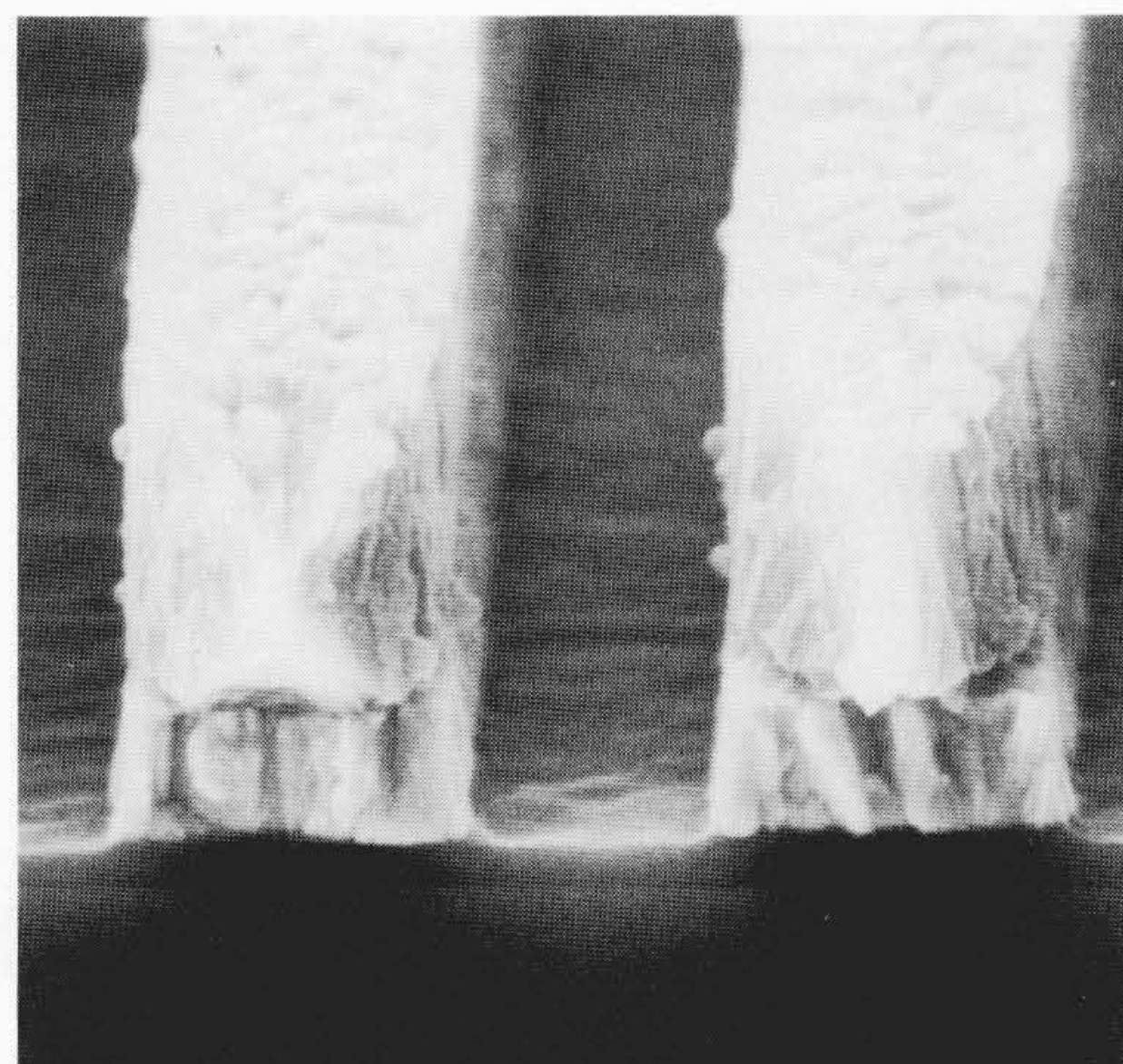


図2 バリアメタル付き配線材料のエッチング例 Al合金・バリアメタル積層配線も、マルチステップエッチングを行うことによって各層間に段差、食い込みを生じない異方性エッチングが可能である。

るAl合金・バリアメタル多層膜では、ドライエッチング後の腐食発生に至る時間がAl合金単層膜をエッチングした場合と比較し一段と短くなっている⁵⁾。

対策としての防食処理方法には、プラズマ中で処理するドライ処理と、純水などを用いるウェット処理がある。

一般にドライ防食処理方法は、処理後の残留塩素量を計測することによって効果が確認されている。M-308ATでも、防食処理に対して、

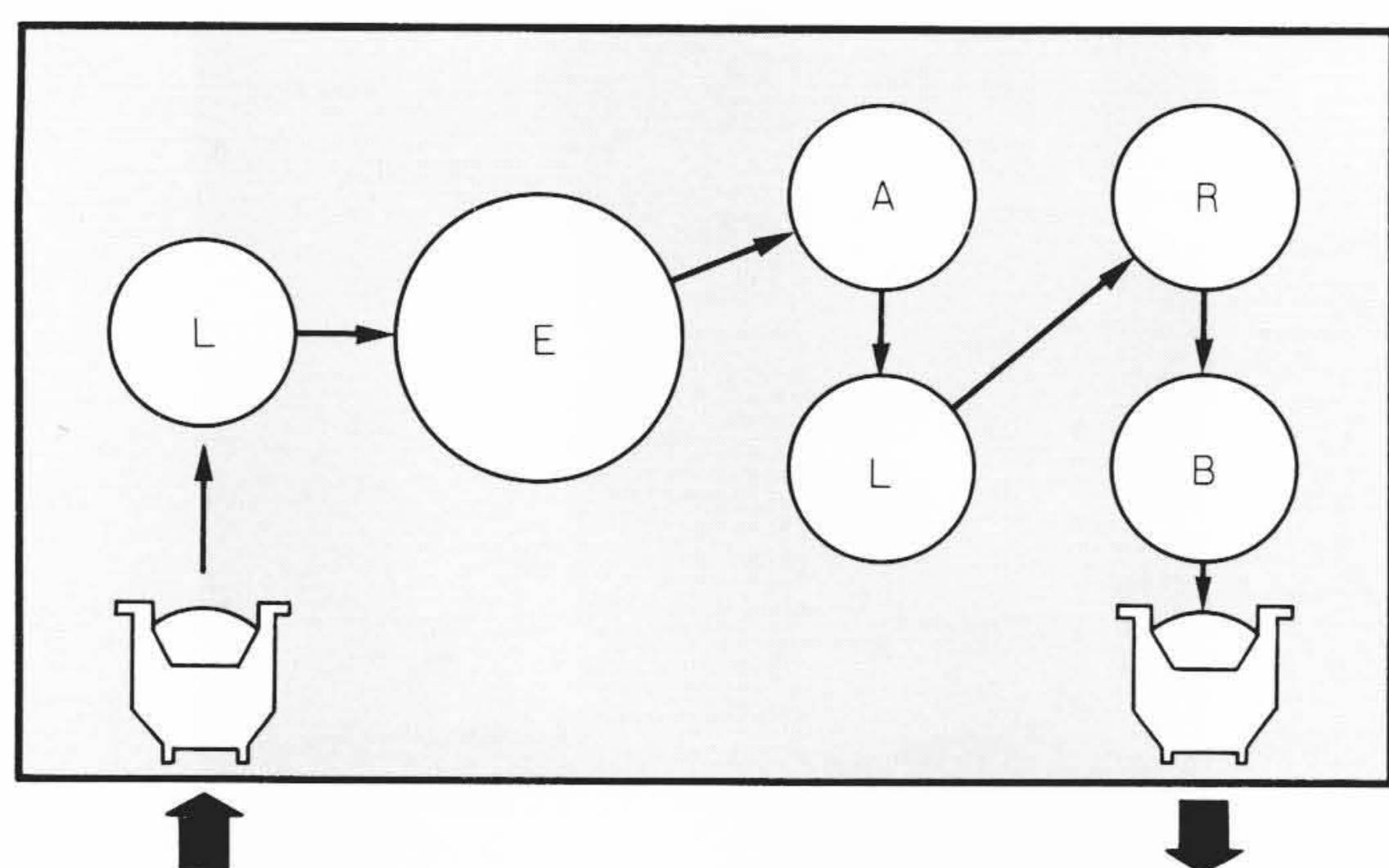
- (1) ウェーハ面内の特定個所や特定パターンだけに発生しやすい。
 - (2) レジスト塗布後の経過時間によって腐食発生頻度が変化する。
 - (3) 成膜装置、成膜条件によって腐食発生頻度や発生時間が変化する。
 - (4) クリーンルーム内の湿度など環境に影響される。
- などを経験している。(1)に関しては、パターン側壁に付いた付着物による影響であることを示唆していると言える。

このような場合でも、付着物に含まれる残留塩素量を真空中で徹底的に除去することにより、O₂ガスに添加ガスを加えたドライ処理方法でも、十分な防食効果を得ることができる。

一方、さらに信頼性を向上させた防食処理として、最近、ドライ処理後に連続してウェット処理(純水リンス法)を行うメタル配線ドライエッチング装置のニーズが高まってきている。

そこで、純水リンス処理機能を付加したM-308ATWを製品化した。本装置構成を図3に示す。

また、本装置を使用した防食処理技術例として、腐食発生頻度の高いAl合金・バリアメタルサンプルで評価を行った結果を図4に示す。エッチング後のドライ処理によって防食処理を行い、その後の純水リンス処理の有無による腐食発生頻度の比較を行ったものである。ドライ処理では大気に取り出



注：略語説明 L（ロードロック室）、E（エッチング室）
A（アッシング室）、R（リンスステーション）
B（ベークステーション）

図3 M-308ATWの装置構成 防食用処理室としてウェーハの洗浄を行うリンスステーションと乾燥用ベークステーションを追加し、防食処理までを一貫して行える。

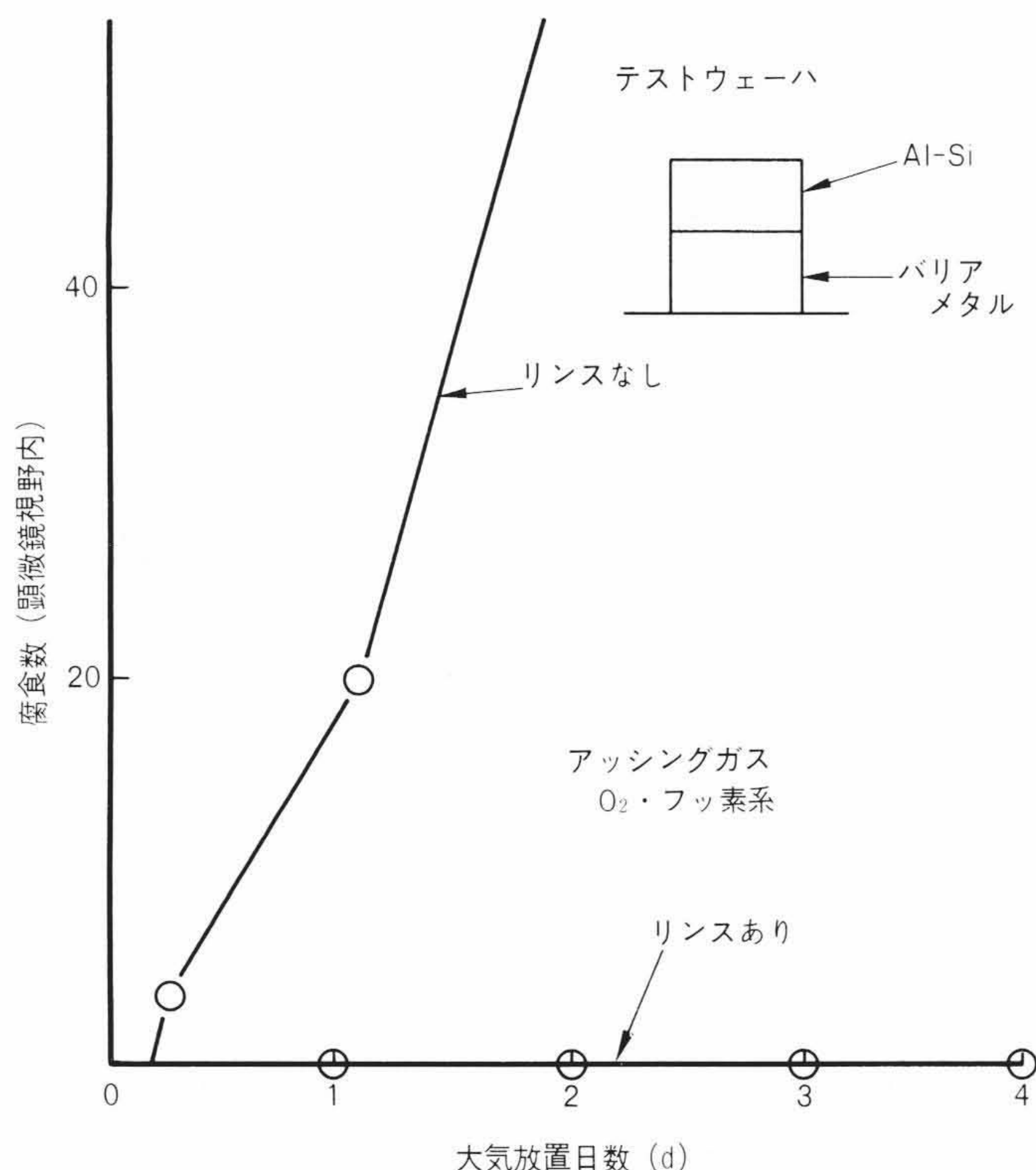


図4 水洗浄有無による腐食発生と比較 純水洗浄の追加処理によって防食性能が飛躍的に向上する。

したあと数時間で腐食発生をみたサンプルが、純水リンス処理後では4日以上防食性能の向上が得られている。

4 ゲート電極加工への適用

シリコンデバイスの高集積化が進むにつれて、ゲート電極の材料や構造が多様化し、このゲート電極の加工に要求され

る加工性能も一段と厳しさを増しており、次のような技術課題がある。

- (1) ファーストゲート電極下層のゲート酸化膜の薄膜化に伴う対酸化膜選択比の向上
- (2) 段差部のスタックドゲートの加工に対する対レジスト選択比の向上
- (3) CDロス(Critical Dimension Loss：寸法変換誤差)が少ないなど形状制御性が良いこと。
- (4) ゲート酸化膜の絶縁破壊などデバイスダメージ低減のための低汚染・低イオンエネルギーでのエッチング
- (5) マイクロローディング効果⁶⁾が少ないこと。

これらのニーズに対応するためゲート電極加工用エッチング装置M-318EXでは、クリーンエッチングのために塩素主体のエッチングガスを用い、高密度プラズマ条件下での低イオンエネルギーエッチングの実現に取り組んできた。

すなわち、対ゲート酸化膜および対レジストとの選択比を従来と比べ大きく向上させるためには、ゲート電極材料自体のエッチング速度を増加もしくは維持させて、酸化膜およびレジストのエッチング速度を大幅に下げる方法がある。

酸化膜およびレジストのエッチング速度を下げるためには、イオンエネルギーを低下させればよい。一方、ゲート電極材料は、イオンエネルギーを下げてもイオン電流密度を増加させることでエッチング速度は低下しない。したがって、高密度プラズマによってイオン電流密度を増加させた、低イオンエネルギーでのエッチングが有効となる。

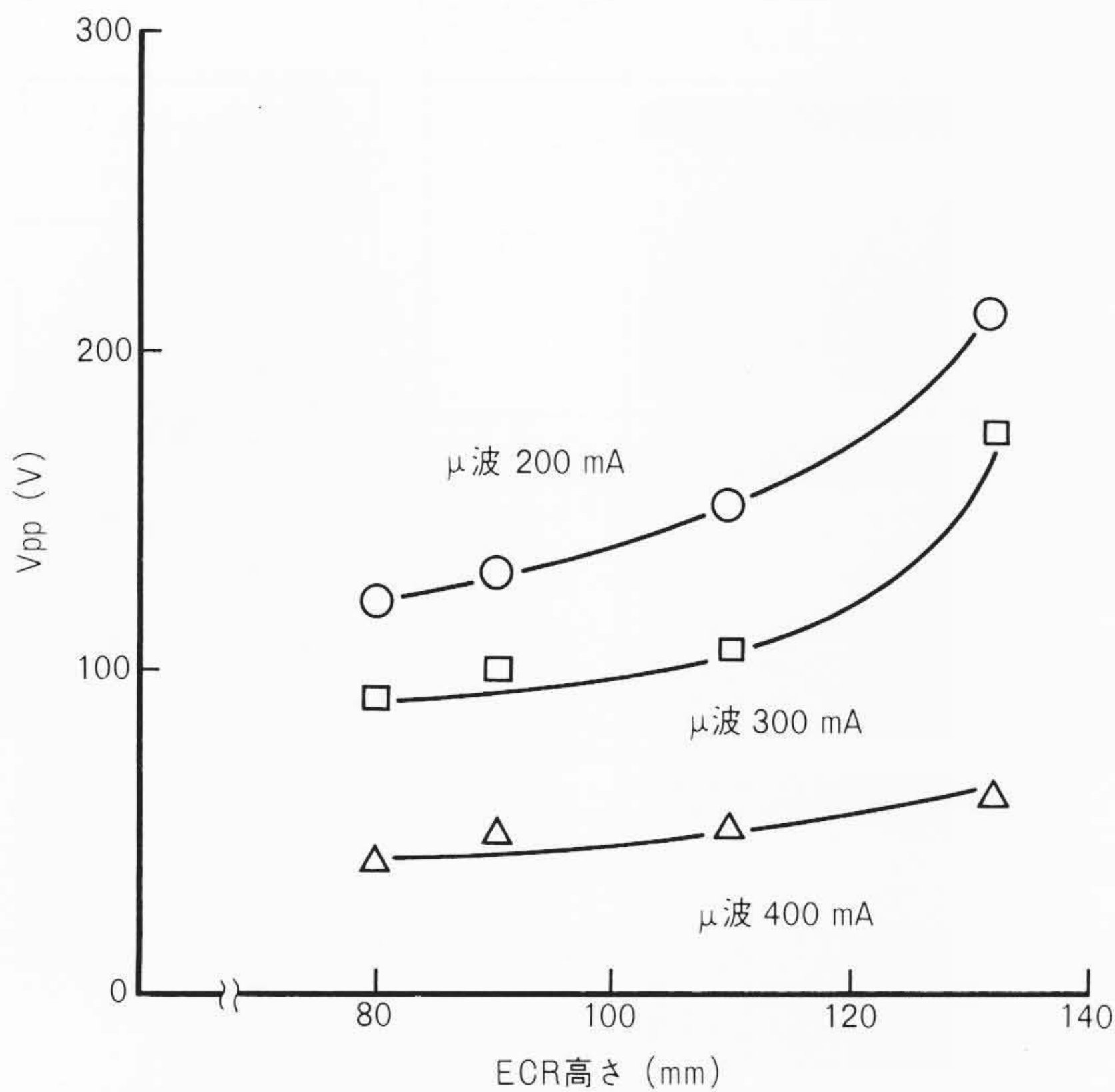
マイクロ波プラズマの特徴として、イオンエネルギーはRFバイアスの V_{pp} ⁷⁾(peak to peak電圧)にほぼ比例したパラメータであり、 V_{pp} はプラズマ密度(イオン電流密度)とほぼ逆比例する関係がある。したがって、プラズマの高密度化はイオンエネルギーの低減にもなる。

上述の内容から、M-318EXではプラズマの高密度化が重要であり、その手段として、ウェーハからECR面までの距離や、マイクロ波入射電流値、さらには、RFパワーなどがエッチングに影響を与えるパラメータとなっている。これらパラメータによって、イオン電流密度やイオン加速エネルギーを制御して最適なエッチングを行うことが可能となっている。

プラズマ密度を容易に推定するためには、 V_{pp} とプラズマ密度がほぼ逆比例する関係から、同じRFパワーを印加した状態で V_{pp} を計測することによって可能である。一例として、ウェーハからECR面までの距離と、マイクロ波入射電流値をパラメータとした場合のRFパワー一定条件での V_{pp} 特性を図5に示す。

次に、高プラズマ密度でのエッチング例を示す。

ウェーハからECR面までの距離を約110 mm、マイクロ波入射電流値300 mAとし、200 mmウェーハでのPoly-Si膜をエッチングした場合のエッチング特性のRFパワー依存性を図6に



注：略語説明 ECR (Electron Cyclotron Resonance)

図5 V_{pp}特性 マイクロ波パワーを上げたり、ECR高さを下げるとイオン電流が増加し、V_{pp}が下がる。

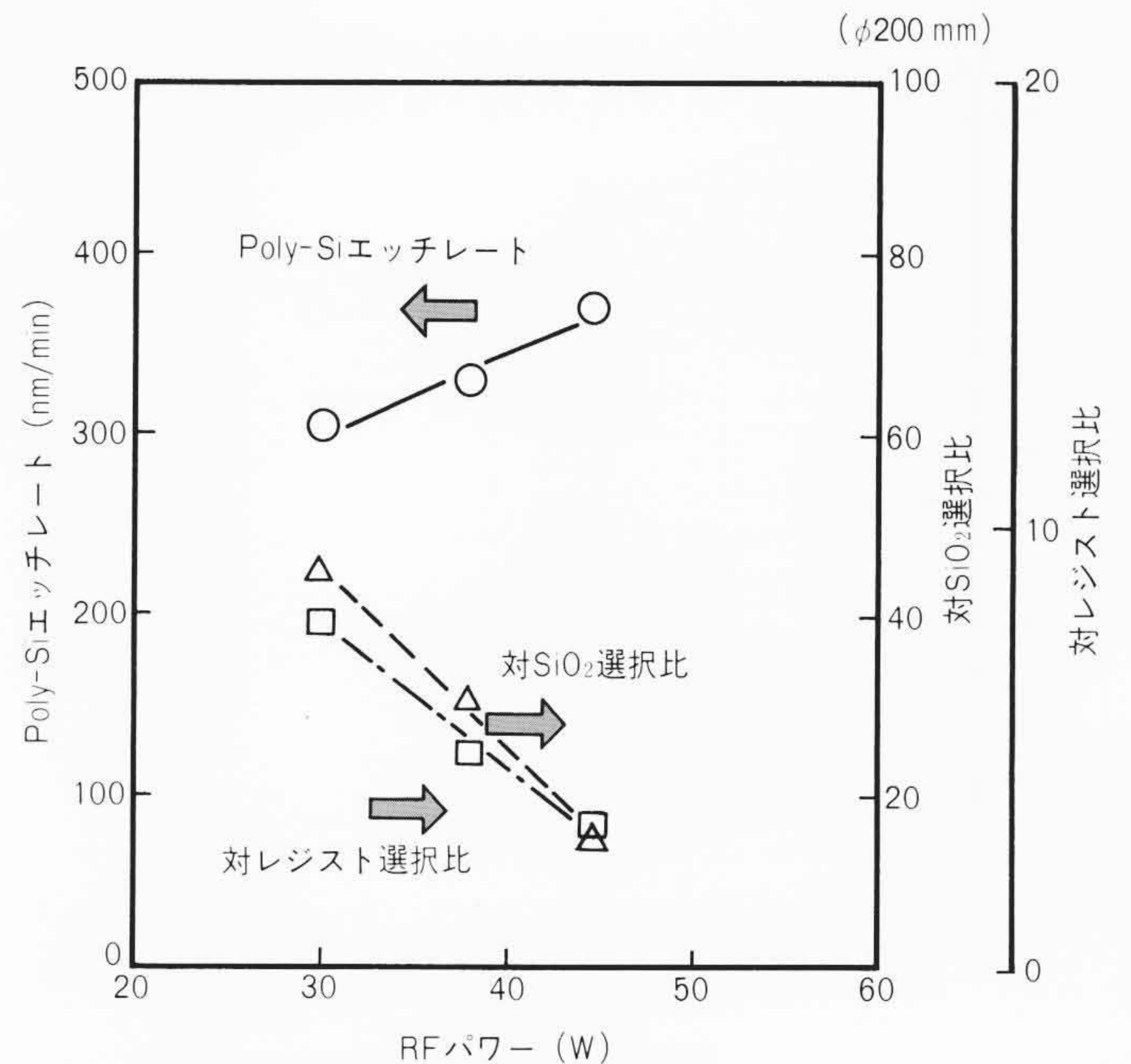


図6 エッチング特性のRFパワー依存性 高密度プラズマ状態でイオンエネルギーを低下させることによって、高選択比が実現できる。エッチング圧力は0.67 Paである。

示す。RFパワー30 Wの場合には、対レジスト選択比7、対SiO₂選択比45の値を得ている。また、加工形状についても、図7に示すように250%相当のオーバーエッチを実施しても異方性形状を維持できている。

5 絶縁材料への適用

デバイスの高集積化に伴い、絶縁材料の加工工程は急速に増大してきているが、エッチバックプロセスなど従来のエッチング装置で対応可能なプロセスと、対応しにくいプロセスとに分かれてきている。

酸化膜エッチング装置M-328EXは、ハーフミクロン時代以降のプロセスに適応可能な装置として開発した装置であり、従来のエッチング装置では対応しにくい微細コンタクトホール加工プロセスなどに適用できる装置である。本装置は次のような特長を持っている。

- (1) プラズマ発生部のくふうによって、プラズマの高密度化(当社従来比約4倍)を図り、BPSG(Boron phosphosilicate Glass)膜で700~1,000 nm/minのエッチング速度が得られる(図8)。
- (2) 0.1 Pa台でのエッチングが可能であり、マイクロローディング効果がほとんどなく、微細径・高アスペクト比の穴を垂直形状に加工可能である(図9)。
- (3) コンタクトホール穴底での下地シリコンとの選択比は、穴径が小さいほど高くなる傾向にある。
- (4) イオン衝撃によるダメージ層が浅い。

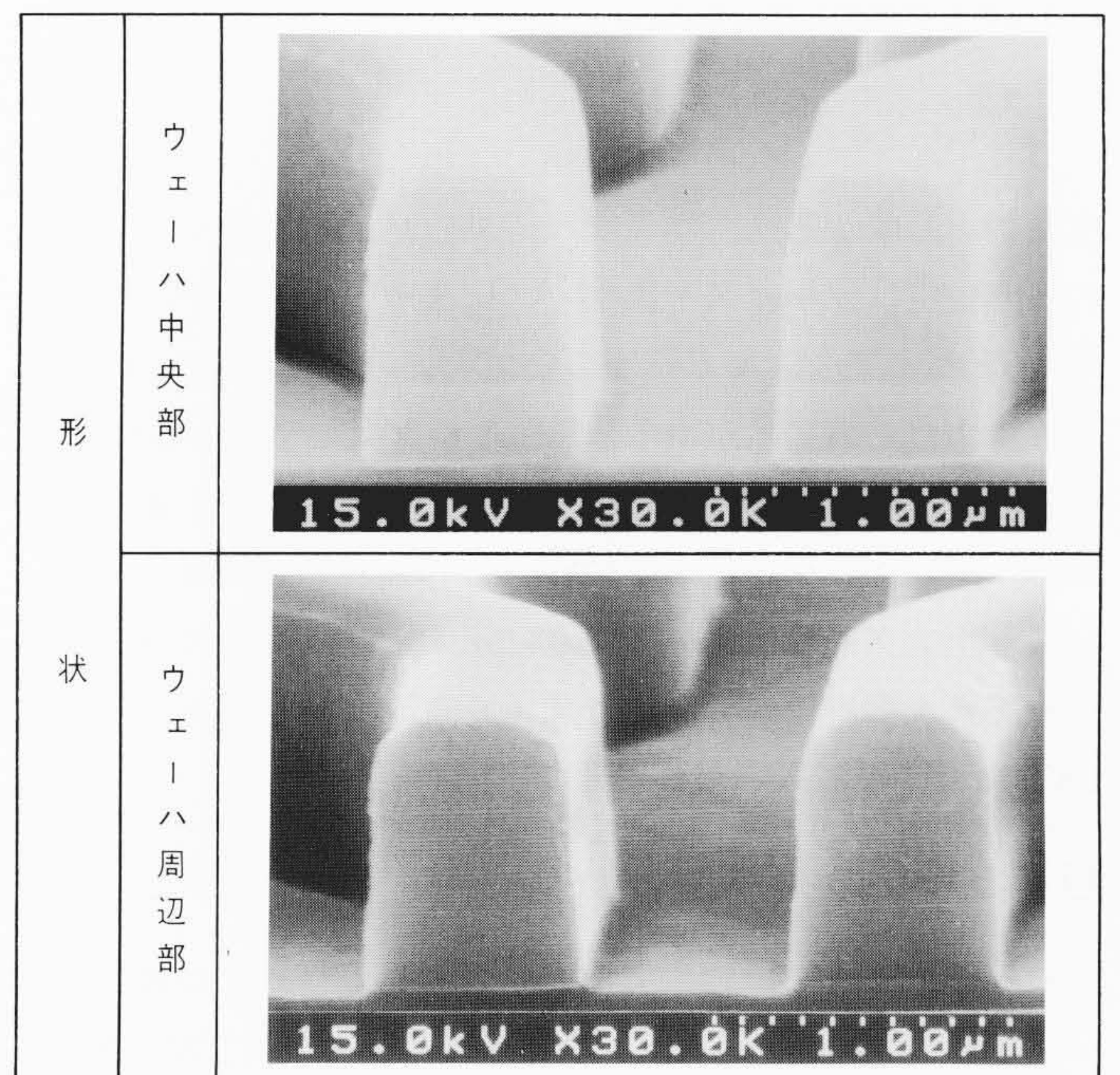
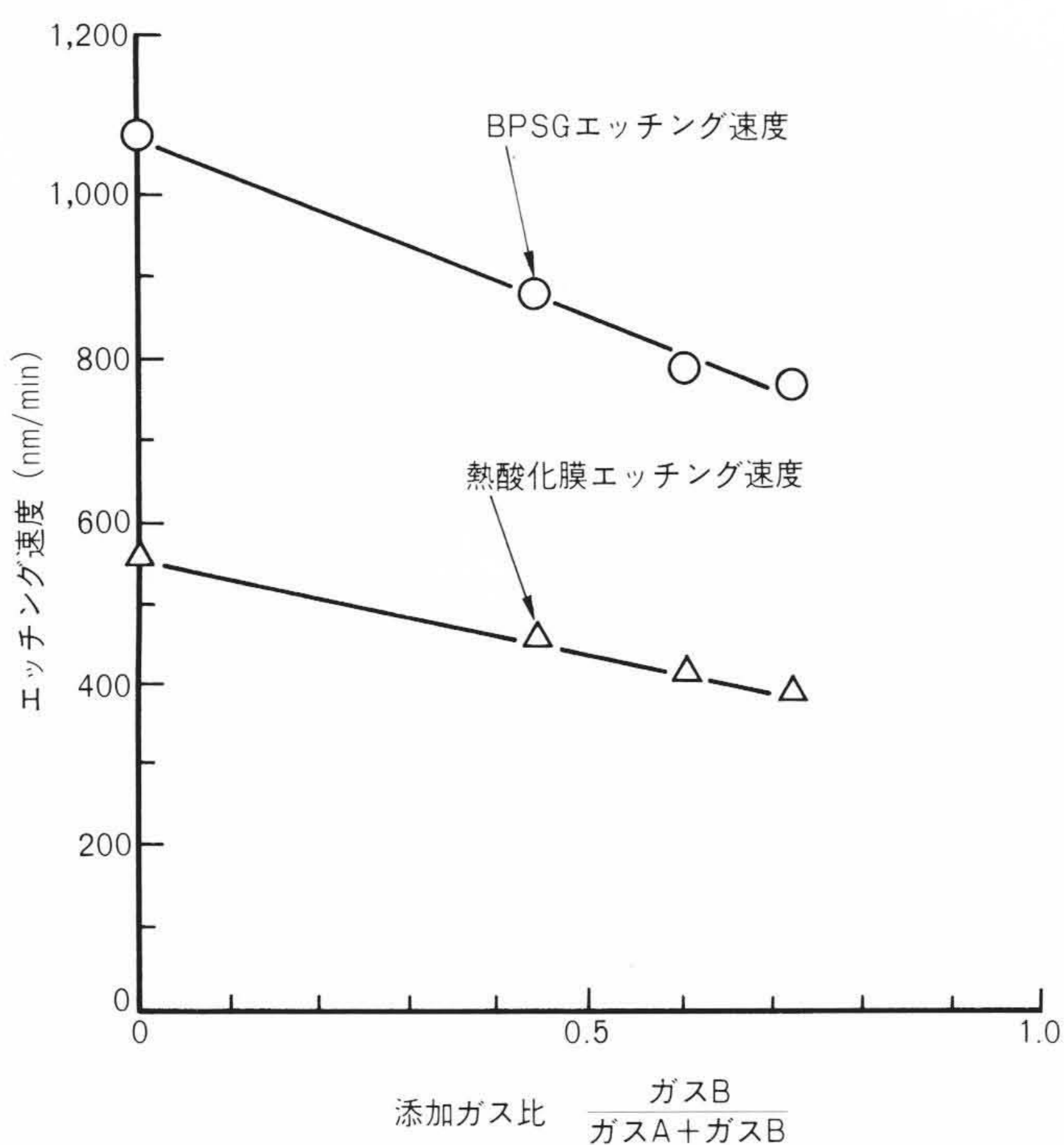


図7 Poly-Siの加工形状 250%相当のオーバーエッチを行っても、異方性形状を維持している。

- (5) 後処理室を標準装備しており、エッチング後の後処理ができる。

次に、本装置によるエッチング特性の一例を述べる。酸化膜をエッチングするには、イオンの運動エネルギーをある程



注：略語説明 BPSG (Boron phosphosilicate Glass)
RIE (Reactive Ion Etching)

図8 エッチング特性の添加ガス比依存性 パターンなしウェーハでのエッチング速度の添加ガス比依存性を示す。基板印加電圧約400 V、エッチング圧力0.7 Paの条件である。RIE装置に比べ、低い加速電圧で高いエッチング速度が得られる。

度高める必要があり、ポリマーの堆(たい)積とエッチングとのしきい値は使用ガス・添加ガスによって異なるが、本装置ではRFバイアスによるイオンの最大加速電圧で50～200 Vである。また、単結晶Siや多結晶Siとの選択比を高めるために、CnFm系ガスのn/m値の大きいものにCHF系ガスを添加している。エッチング速度の添加ガス依存性を先の図8に示す。

エッチング形状は、先の図9に示すように高アスペクト比の微細穴を垂直にかつ高速で加工でき、穴底もタングステンCVDなどによる穴埋めに適した形状と言える。

6 おわりに

ハーフミクロンデバイス加工に対応したマイクロ波プラズマエッチング装置として、メタル配線用M-308ATW、ゲート電極材料用M-318EX、および酸化膜用M-328EXの特長と現在の適用プロセスについて述べた。

高融点金属によるバリアメタルのエッチングでは、防食の観点からエッチング直後にレジストを除去した後、直ちに水洗・乾燥処理を行うことが有効である。

また、ゲート電極材料のエッチングについては、電極材料ごとに最適なプラズマ条件を選定することが大切であり、その手段としてマイクロ波プラズマエッチング装置は、ECR面高さ、RFバイアスおよびマイクロ波パワーの三つの独立した

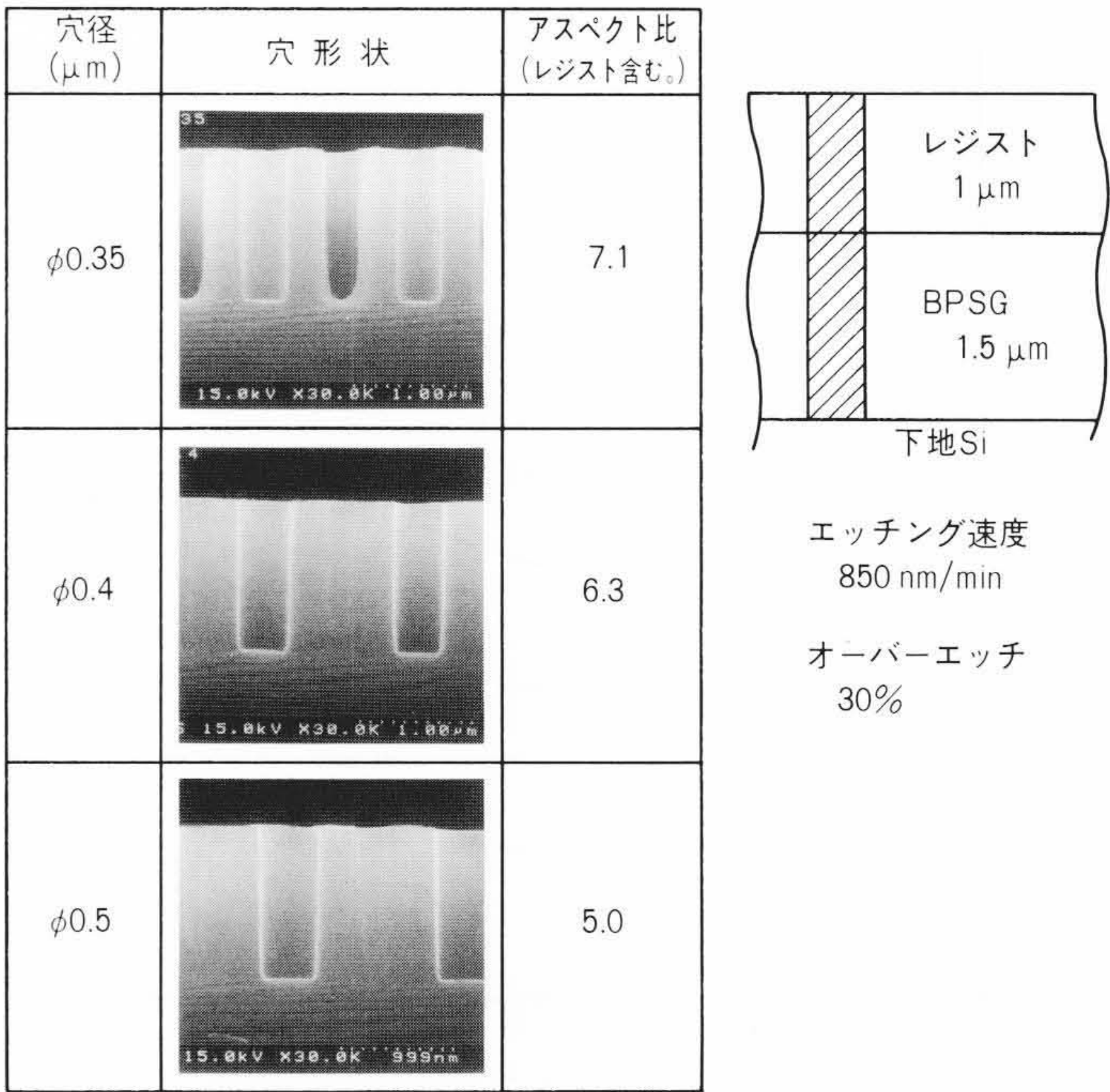


図9 エッチング結果の一例(レジスト除去後) アスペクト比の高い微細穴も、高速で垂直形状にエッチングが可能である。

パラメータを持ち、これらを適切に組み合わせることにより、下地SiO₂との選択比やホトレジストとの選択比を飛躍的に高めることが可能である。

酸化膜については、プラズマのより高密度化・高真空化によって、アスペクト比の高い0.5～0.35 μmのコンタクトホールを、高速で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。

今後、デバイスの高密度化が進むにつれて微細加工技術もますます高度なものが要求されてくるであろう。それらの諸課題を解決していくには、ユーザーごとに異なる個々の技術の蓄積と、それを集大成した総合技術力が重要視されてくると思われる。メーカーとしての技術開発には、今後も邁(まい)進することはもちろん、ユーザーとのよりいっそうの連携を深めエッチング技術の発展に貢献する考えである。

参考文献

- 1) 菅原：月刊Semiconductor World, p.291(1990増刊号)
- 2) 日経BP社編集部：月刊NIKKEI MICRODEVICES p.80 (1990-12)
- 3) K. Suzuki, et al. : Proc. Int'l Ion Engineering Congress, Kyoto, p.1645(1983)
- 4) D. S. Williams : Nitrogen and Argon Incorporation During Reactive Sputter Deposition of Titanium Nitride, J. Vac. Sci. Technol., 6 : p.1723(1987)
- 5) 掛樋, 外：月刊Semiconductor World, p.103(1988-12)
- 6) 関根：超LSIプロセスデータハンドブック, p.188, (株)サイエンスフォーラム(1990)
- 7) 川崎, 外：ドライエッチング装置, 日立評論, 71, 5, 387～392(平1-5)