

半導体デバイスの進化を支える ドライエッチング装置

Plasma Etching System Supporting Evolution of Semiconductor Devices

榎並 弘充

Enami Hiromichi

伊澤 勝

Izawa Masaru

小川 芳文

Ogawa Yoshifumi

斉藤 孝明

Saito Takaaki

日立グループのエッチング装置は、1983年からの有磁場マイクロ波プラズマの研究によって地歩を築き、インラインの後処理、静電吸着などの優れた技術を開発・搭載して拡大してきた。2000年以降は300 mmウェーハ生産の本格化、日本国内からアジア市場へのシフト、微細化の継続により、求められる技術も多様化してきた。それらの変化に迅速に対応して、最適な製品群を準備することにより、ビジネスを維持・拡大している。また、物理限界に近づくエッチングに対応して、優れた生産効率向上を実現できる機能を世界に先駆けて実用化した。今後の半導体デバイスのさらなる進化に対応するため、製品の環境負荷軽減活動を含めて、ビジネスを継続していく。

1. はじめに

ULSI (Ultra Large-scale Integration) などの半導体製造は、数十枚のパターンを重ね合わせ、シリコン基板上にトランジスタなどの能動素子や記憶素子および配線などを形成するものである。成膜、リソグラフィ、エッチング、および不純物拡散の順に工程を経て、1層のパターンが形成される。この中でエッチングは、リソグラフィで形成された有機レジストパターンを下地膜に正確に転写し、実パターン化することが役割となる。そこで求められる技術課題には、エッチング速度、選択性、寸法制御性などがあり、デバイスの世代進行とともに、要求性能はますます厳しくなっている。

現在、最小加工寸法は数十ナノメートル、配線層数は10層以上となり、エッチング工程数も30~50と世代ごとに増加している。また、新規メタル材料の採用やデバイス構造の三次元化により、求められる性能も高度化・多様化してきた。さらに、2000年代に入り、300 mmウェーハへの移行とともに、大規模メモリ工場や、ファウンドリの建設が拡大し、装置の生産性がキーポイントになっている。

半導体製造から見た生産性向上戦略(図1参照)においても明確に見えるように、顧客における生産性向上の課題を装置サプライヤー側からも解決することが求められている¹⁾。

ここでは、日立グループにおけるドライエッチング装置の開発経緯と今後の展開について述べる。

2. エッチング装置開発の経緯

日立エッチング装置の本格的な開発は、1981年に当時の笠戸工場で着手された。これは、日立製作所において半導体の開発・生産を担っていた中央研究所、デバイス開発センタ、半導体事業部などと連携したもので、当時の主流であった平行平板型RIE (Reactive Ion Etching) 方式を対象として、バッチ式RE-504、枚葉式R-206Aなどの装置を開発した。しかし、競合他社の装置性能を凌駕(りょうが)するには至らず、社内での活用が中心となった。

このような背景の下、1983年には、1.3 μm 半導体プロ

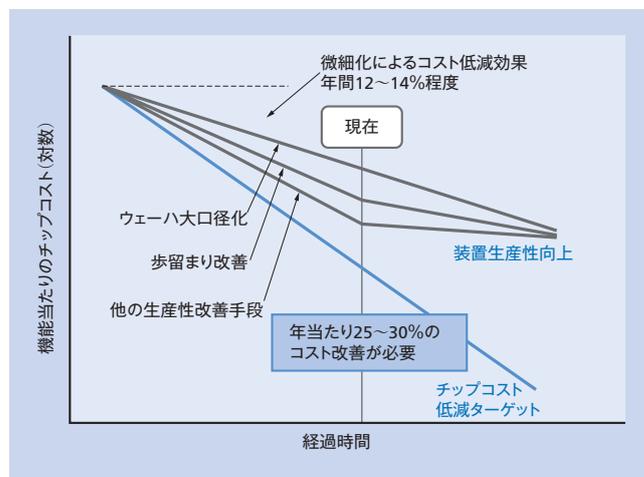


図1 | 半導体製造における生産性向上戦略の概要

半導体製造では、同等機能のデバイス製造コストを、微細化、ウェーハの大口径化、歩留まり向上などで年率25~30%改善していかなければ、他社との競争で生き残れない。装置生産性向上が優位化のポイントである。

セスの開発を目的とした研究と、サブミクロン対応エッチング装置の開発を目的とした研究が同時にスタートした。有磁場マイクロ波を用いた高密度プラズマの形成と、別の高周波電源による独立したウェーハへのイオン加速制御を特長とするエッチング方式をこの研究で開発した。この方式は、1M DRAM (Dynamic Random Access Memory) 製造プロセスにおいて初めて採用されたポリサイドゲートの加工で、エッチング速度と加工精度で競合他社の装置性能を上回ることになり、枚葉式M-206Aとして発売した〔図2(a)参照〕。

また、1.3 μmメタル配線プロセスでは、アルミニウム配線のマイグレーション防止のためにバリアメタルとの3層構造が採用されたが、この方式は、エッチングにおいても優位性の高い垂直加工性能を示すことができた。こうした結果に加えて、同一真空内に耐腐食性能の向上を目的としたインラインの後処理チャンバを搭載した枚葉式M-308ATを開発、発売を開始した〔図2(b)参照〕。

日立グループは、枚葉式M-206A、およびM-308ATの2機種をベースに社内顧客のニーズを反映させて、新しい技術を開発・搭載することで、エッチング装置の優位性を高めてきた。

(1) 静電吸着

ウェーハを静電吸着で電極に固定し、冷却効率を格段に向上させた。チャージアップダメージ対策で、競合他社を



図2 | 特別研究により開発されたM-206AおよびM-308AT
有磁場マイクロ波プラズマ源を搭載したベータ機は、1984年末にデバイス開発センタに設置され、装置改良・運用評価を実施した。改良型M-206Aとして1985年末に同センタへ納入した1号機を(a)に、M-206Aをベースに、種々の改良とインライン後処理の搭載を行い、1987年に市場へ投入したM-308ATを(b)に示す。

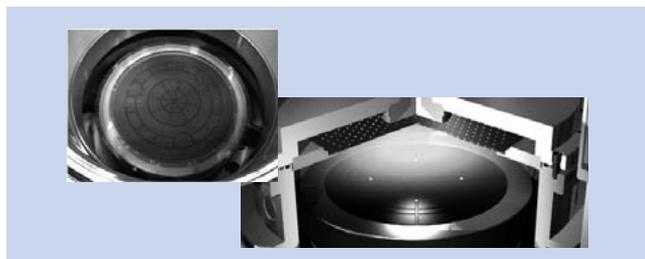


図3 | 静電吸着電極の外観とそれを搭載した反応室のイメージ
静電吸着機構は、ウェーハの温度制御上、重要であったが、寿命とダメージの点で搭載が困難であった。顧客と装置機能部品サプライヤーとの共同開発により、1年という短期間で実用化レベルまで引き上げた技術である。

装置型式	M-318EX	M-511A	M-712A	M-712XT	M-8190XT
プラズマソース	2.45 GHz	2.45 GHz + 自動チューニング			
バイアス電源周波数	2 MHz	800 kHz	400 kHz		
バイアス印加方式	連続	連続/TMモード		新型電源	
ガス導入	側壁	SP		新型SP	
排気システム	非対称・非同軸			対称・同軸	
静電吸着電極	シングルゾーン (冷媒)		2ゾーン (冷媒)	3ゾーン (ヒータ付き)	

石英ベルジャー 空洞共振室

注：略語説明 TM (Time Modulation), SP (Shower Plate)

図4 | 有磁場マイクロ波プラズマSi用エッチング装置の反応室変遷
M-206A、M-318EXでは石英ベルジャーを採用したが、大口径化に伴う均一性向上のために、M-511Aから空洞共振型に変更した。また、その他の項目についても、均一性向上、選択性向上のために改良が加えられている。

約5年間リードできた(図3参照)。

(2) タイムモジュレーションバイアス

イオン加速用高周波バイアスをミリ秒単位に繰り返し変動させる技術である。形状制御性と選択性の向上に有効で、現在も改良が続けられている。

(3) 低温エッチング

中央研究所が開発した低温エッチング技術を改良し、量産性の高い技術として完成させた。現在も深穴加工などのエッチングに適用されている。

(4) EMCP (Electromagnetically Coupled Plasma)

機能シールドを設ける独自技術により、不揮発性材料に対する良好な加工特性が得られることから、Eシリーズとして製品化した。

これらは、現在販売しているエッチング装置にも採用されている優位性の高い技術である。有磁場マイクロ波技術は、大口径化・微細化の進行に対応して、構造変更や機能追加を繰り返し、現在に至っている(図4参照)。また、腐食性材料をエッチングした後の防食性能をさらに向上するため、インラインのウェット洗浄機能を開発・搭載して、枚葉式M-308ATWとして発売した。現在は後継機である500シリーズに洗浄機能が搭載され、200 mmウェーハ製造ラインの主力装置として運用されている。

3. 日立エッチング装置のラインアップ

主力装置であるM-712XT、M-8190XTは、継続的に改良を図ることで、大規模メモリ、ファウンドリ顧客などへの導入が進んでおり、ビジネスの柱となっている(図5参照)。現在では、先端デバイスを開発・生産する顧客に評価機を納入して、共同開発することによって装置技術を新たに生み出している^{2), 3)}。

(1) 同軸排気

電極をエッチングチャンバに対して同軸に配置し、チャ



図5 | 2010年現在のエッチング装置ラインアップ

U-8250は、絶縁膜用装置として、広いプロセス範囲に適用している。E-642Aと同型で、Si深穴加工用として、M-6180もラインアップしている。

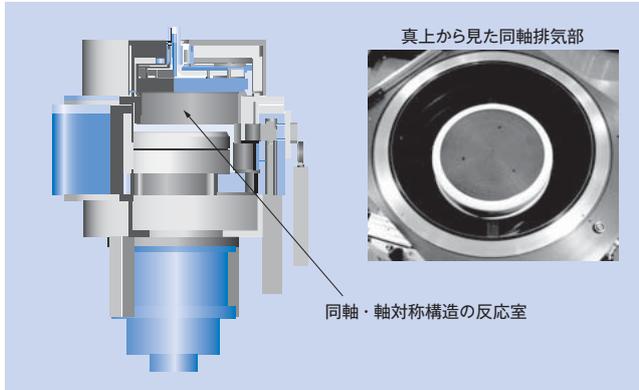


図6 | 同軸型エッチング反応室の構造

ウェーハの搬送経路を含めて軸対称構造を実現した。反応室側に短時間で交換可能な内部チャンバを具備している。これにより、格段に寸法均一性が向上し、寸法ばらつきを3σで3.0~1.5 nm以下に低減した。

ンバ自体をシンメトリカルな構造にすることで、均一性を格段に向上させた(図6参照)。

(2) 多ゾーンヒータ付き静電吸着電極

多層膜の連続加工では、それぞれの膜材料ごとに最適な電極温度分布が必要になる。そのために、電極温度を急速に昇降温できる機能として開発し、実用化した(図7参照)。

(3) 多チャンネルプラズマ発光検出

チャンバ内のプラズマ発光の変化を波長単位に並列計測するシステムで、微量な変化も発光強度差として検知できる能力を持つ⁴⁾。

(4) 高精度高周波電源

高周波出力制御の直線性を向上させ、低エネルギー下で

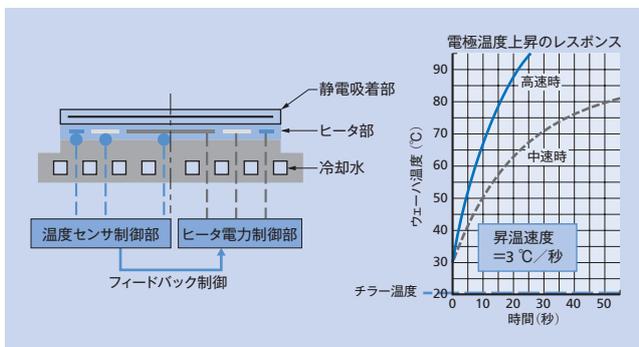


図7 | 3ゾーンヒータ付き静電吸着電極とそのレスポンス

多層膜のエッチングでは、膜種ごとに電極の温度をゾーン単位で5~20°C変化させることにより、寸法均一性が著しく向上する。高速制御時では、2~6秒で必要な温度に達する。

のイオン加速を実用化した。これにより、Siリセス量を0.5 nm以下に低減することができた。

(5) ウェーハエッジ性能改善機能

ウェーハ端での性能劣化を防止するため、イオンバイアスやガス雰囲気局所的に変化させ、均一性を向上する技術を開発し、実用化した。

これら技術開発の成果は、均一性、多層膜加工の均質性、形状制御性などの加工性能を向上させ、チャンバ間加工差の低減や経時変動の抑制に効果を発揮している。

また、近年、注目されているダブルパターニング技術に対しては、装置サプライヤー間での協業による技術開発を行い、優れた加工性能を示すことができた(図8参照)。なお、E-541AWおよびE-642Aは、反応生成物の蒸気圧が小さい不揮発性材料加工に特化した装置開発を行い、ハードディスクの磁気ヘッド加工や不揮発性メモリの加工において、優れた生産性と高い優位性能を示している。

4. 付加価値向上施策

現在、装置の稼働率向上を含めた生産性向上、および微細化対応の加速が競合他社に対して優位性を示す大きなポイントとなっている。ITRS (International Technology Roadmap for Semiconductor) にも示されるように、装置

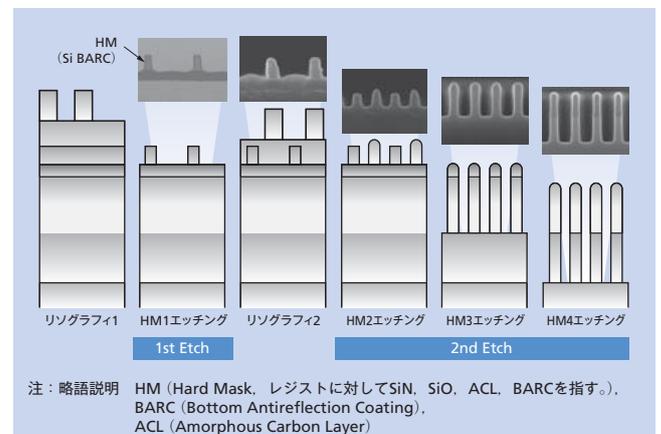
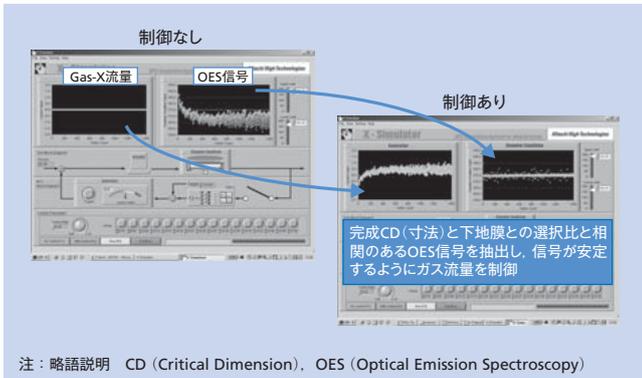


図8 | M-8190XTを用いたダブルパターン形成例 (LELE (Litho-Etch-Litho-Etch) 方式) リソグラフィ1で形成したパターンの中に、リソグラフィ2でパターンを形成する。各層の選択性を調整することで、最終的に(HM4エッチング後)両者のパターンを相互に差がなく形成した。



注：略語説明 CD (Critical Dimension), OES (Optical Emission Spectroscopy)
図9 | EPC (Equipment Process Control) システムの実用化例
 65 nm以降のデバイス世代対応として、寸法 (CD) の制御性、選択比の制御性を向上するために実用化した技術である。

サプライヤーとしては、以下に挙げる6項目の課題について、早期解決を推進しなければならない。

- (1) 装置運用時のCoC (Cost of Consumable) 低減
- (2) 性能の経時変動の検出とその補正
- (3) 装置間機差の検出とその補正
- (4) 非製品ウェーハ処理の削減
- (5) 反応室クリーニング方法の確立とチェック方法
- (6) 装置メンテナンス方法の確立とそのルール化

特に、装置間機差や経時変動については、システムとして各種の対応を図っている。一例として、EPC (Equipment Process Control) システムについて述べる (図9参照)。

このシステムは、プロセス性能のキーパラメータである寸法・選択性と密接な関係にあるセンサー値を、装置雰囲気モニタを用いて見だし、その値をガス流量で制御する方式を採用している。事例として、システム適用前は、100枚のダミー処理後、500枚の製品処理を実施して、装置を洗浄するというサイクルが、システム適用後は、5枚のダミー処理後、1万5,000枚の製品処理が可能となり、

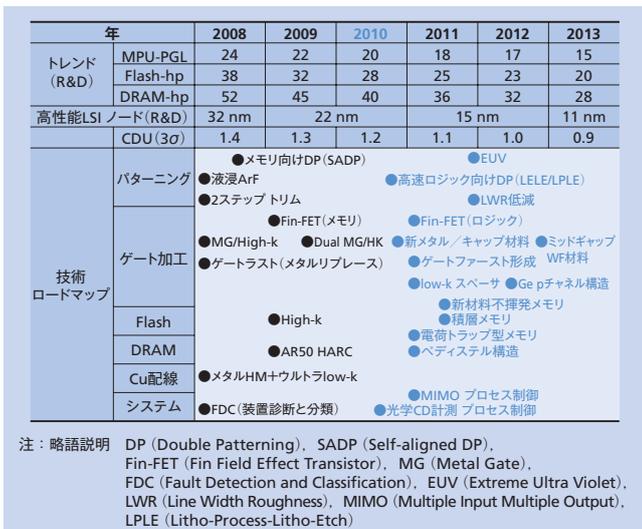


図10 | 今後のデバイスおよびキープロセスのトレンド
 株式会社日立ハイテクノロジーズが学会および顧客へのヒアリングを基に作成した、各デバイスとそのキープロセス技術のトレンド予測を示す。

装置実稼働率 (OEE: Overall Equipment Efficiency) で18%の向上が実現できた。

5. おわりに

ここでは、日立グループにおけるドライエッチング装置の開発経緯と今後の展開について述べた。

今後のデバイスおよびキープロセスのトレンド予測を図10に示す。今後のエッチング装置には、(1) 継続される微細化とそれに伴う均一化、(2) ウェーハ径450 mm化への対応、(3) 三次元デバイスの進化、(4) 新規材料の採用、(5) 次世代露光技術であるEUV (Extreme Ultra Violet) などへ早期に対応することが重要である。さらに、前述した装置間機差や経時変動を継続的にシステムで低減することも不可欠な課題である。また、省エネルギーを含めた環境対策も装置選定の重要な位置づけとなっており、顧客・装置機能部品サプライヤーと協力して計画的な推進を行っていく所存である⁵⁾。

参考文献

- 1) J. Pettinato, et al.: An ITRS View on Future Process Control Challenges and Opportunities, 2003 AEC/APC Symposium (2003)
- 2) 榎並、外: 45 nmノード以降の最先端デバイス用のプラズマエッチング装置とその応用、日立評論、89、4、350~355 (2007.4)
- 3) H. Enami, et al.: Strategy and Recent Activities for Equipment and Process Stabilization of Dry Etch, 2005 Japan Semiconductor Technology Symposium (2005)
- 4) H. Enami, et al.: Process Environment Monitoring of Plasma Etching for APC, American Vacuum Society Fall Meeting, MS-ThM7-01 (1998)
- 5) 榎並: hp32 nm以降のドライエッチ技術の現状と将来展望、SEMIフォーラムジャパン2010 (2010.5)

執筆者紹介



榎並 弘充
 1978年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 プロセス製造装置営業本部 所属
 現在、半導体プロセス装置のマーケティング・営業に従事
 応用物理学会会員



小川 芳文
 1981年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ ナノテクノロジー製品事業本部 笠戸事業所 開発設計グループ 所属
 現在、次世代エッチング装置の設計・プロセス開発に従事
 応用物理学会会員



伊澤 勝
 1989年日立製作所入社、中央研究所 エレクトロニクス研究センター ナノプロセス研究部 所属
 現在、株式会社日立ハイテクノロジーズ ナノテクノロジー製品事業本部 笠戸事業所 開発設計グループに出向、次世代エッチング装置の開発に従事
 応用物理学会会員、日本化学会会員



斉藤 孝明
 1991年日立製作所入社、株式会社日立ハイテクノロジーズ 半導体製造装置営業統括本部 プロセス製造装置営業本部 所属
 現在、半導体プロセス装置のマーケティング・戦略策定に従事