

電子デバイス向け 誘電体エッチングモジュール

中村敏幸^{*1}・大竹文人^{*1}・作石敏幸^{*1}・森川泰宏^{*1}

Dielectric Material Etching Module for Electronic Device Manufacturing Lines

Toshiyuki NAKAMURA^{*1}, Fumito OOTAKE^{*1},
Toshiyuki SAKUISHI^{*1} and Yasuhiro MORIKAWA^{*1}

^{*1}Institute of Advanced Technology, Research & Development HQ, ULVAC, Inc., 1220-1 Suyama, Susono, Shizuoka 410-1231, Japan

We have developed a dielectric material etching module capable of processing wafers up to 8 inches for electronic device manufacturing lines. That is a narrow-gap capacitively coupled plasma etching module using a 400 kHz high-frequency power supply, specifically designed for etching dielectric materials with fluorocarbon-based process gases. It features excellent etching uniformity, less metal contamination, and fewer particles, with optimized components such as single-crystal silicon parts, ceramic electrostatic chuck, and an isotropic exhaust structure.

1. はじめに

半導体デバイスの製造工程で使用されるプラズマドライエッチング装置は、 Cl_2 や BCl_3 などの塩素系ガスを使用する導電体（金属膜）エッチング装置および CF_4 , CHF_3 , C_4F_8 などに代表されるフルオロカーボン系ガスを使用する誘電体（絶縁膜）エッチング装置に大別される。これまでに誘導結合プラズマ（Inductively Coupled Plasma, ICP）、容量結合プラズマ（Capacitively Coupled Plasma, CCP）、電子サイクロトロン共鳴プラズマ（Electron Cyclotron Resonance, ECR）、表面波プラズマ（Surface Wave Plasma, SWP）など様々なプラズマ源が開発されてきた^{1, 2)}。現在は導電体エッチング工程では誘導結合型エッチング装置が、誘電体エッチング工程では容量結合型エッチング装置が主流となっている。

誘電体エッチング工程で容量結合型エッチング装置が使用される理由は、フルオロカーボン系のガスを使用することによる。フルオロカーボン系のガスはプラズマ中で解離することでエッチングに寄与する CF_x を生成するが、過剰解離するとFラジカルを多く放出しレジストや下地膜との選択比が低下する課題がある。また、処理室の側壁にはプラズマ中で解離したカーボン系の堆積物が付着することで、レジストとの選択比の変動やパーティクルの発生が課題となる。故に誘導結合型エッチング装置と比較して狭い放電空間

によりガス粒子の滞在時間が短く、且つ、プラズマを上下電極間に閉じ込める事の出来る容量結合型エッチング装置が好まれる³⁾。

これまで、弊社では化合物半導体や電子デバイス向けに誘導結合型エッチング装置に磁場を付与した有磁場誘導結合型エッチング装置の「Model : NE」, 「Model : NLD」を販売してきた。「Model : NE」にはISM (ICP with Static Magnetic field) プラズマ源が搭載され、「Model : NLD」には磁気中性線放電 (magnetic Neutral Loop Discharge) プラズマ源が搭載されている。一方、誘電体エッチング工程で主流となっている容量結合型エッチング装置は販売していなかった。

本稿では、電子デバイス製造ライン向けに6インチウェーハおよび8インチウェーハを処理可能な誘電体のエッチングに特化した容量結合型エッチングモジュールを開発したので紹介する。

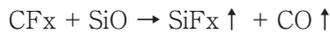
2. 誘電体エッチング技術

半導体デバイスにおける代表的な誘電体としてシリコン酸化膜 (SiO_2) が挙げられる。反応性イオンエッチング (Reactive Ion Etching: RIE) におけるシリコン酸化膜のエッチングには前述の通りフルオロカーボン系のガスが使用される。フルオロカーボン系のガスを用いたシリコン酸化膜のエッチングモデルにおいて、 SiO_2 を構成するSiはFと反応して SiF_x のガス分子を、OはCと反応して CO_x のガス分子を形成することで気体として排気される。

例えば、フルオロカーボン系ガスの一種である CF_4

^{*1} (株)アルバック 開発本部 先進技術研究所
(〒410-1231 静岡県裾野市須山1220-1)

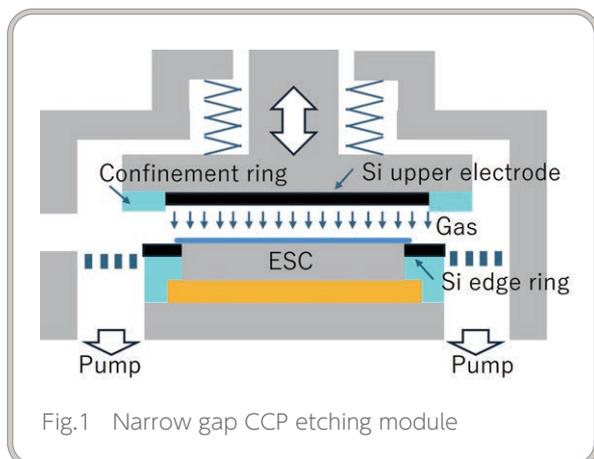
ガスは、プラズマ中で解離することでCF_x (x = 1 ~ 3) やFラジカルに解離する。CF_xは、シリコン酸化膜表面へ付着しCとFからなる堆積物を形成する。ここにシースで加速された高いエネルギーを持つイオンが衝突するとSiとOの結合が切れ以下の反応が起こり、エッチングが進行する。



イオンエネルギーが低い場合にはウェーハ表面への堆積物の形成が優勢となり、エッチング形状がテーパー形状となったりエッチングが進まなかったりする。そのため、一般にはバイアス電源として高いイオンエネルギーが得られる低周波電源が用いられる。また、森川によるとシリコン酸化膜のエッチングに寄与するラジカルはCF₂が望ましく、過剰解離によって発生するFラジカルはレジストや下地膜との選択比が低下する課題をもたらすことが知られている^{4,6)}。このことからCF₄ガスを過剰解離させないプラズマ源が好まれる。また、処理室の側壁にはウェーハ表面同様にCとFからなる堆積物が付着する。この堆積物は、レジストとの選択比を変動させる要因になるとともに剥がれ落ちてパーティクルを発生させる。これらの課題の解決策としてウェーハ近傍のみにプラズマを閉じ込めるチャンバー構造、in-situドライクリーニングやチャンパーパーツを加熱して堆積物を低減するなどの対策が必要となる。以上のように、誘電体エッチングモジュールにはフルオロカーボン系ガスの過剰解離を抑えつつ、CとFからなる堆積物によるパーティクルに配慮したエッチングチャンバーの搭載が望まれる。

3. エッチングモジュール概要

開発したエッチングモジュール (Fig.1) は、1980年代から1990年代に広く用いられた一般にナローギャ



ップ平行平板型エッチング装置と呼ばれる電極間隔の狭い容量結合型プラズマ源を採用している。その特徴は以下の通りである。

- ・ 上部電極の位置を可変する機構を備える。
- ・ 下部電極に400 kHzの低周波を印加する。
- ・ 10 mm程度の狭い電極間隔でプラズマを発生させウェーハを処理する。
- ・ 上部電極周辺に配したコンファインメントリングによりプラズマを上下電極間に閉じ込める構造を備える。
- ・ チャンバー内部部品を交換することで6インチウェーハおよび8インチウェーハに対応可能である。

エッチングモジュールには別置きの2式のチラーユニット、1式のポンプユニットおよび1式の電源ラックユニットが接続されている。

3.1 下部電極およびガスの排気

下部電極は、実績のある「Model : NE」の静電チャック電極を基礎として400 kHzの低周波の伝搬に対応するように改良を加えたセラミック静電チャック電極を搭載している。ウェーハを冷却する機構として裏面He導入機構およびチラーによる冷却機構を備える。静電チャック表面に配した溝のデザインと裏面He導入機構により、ウェーハ面内温度の制御に優れた特性をもつ。また、プラズマに対する耐性の高いセラミック静電チャック電極を搭載することで交換・再生の頻度を低減している。

ウェーハ外周に設置するエッジリングに石英などの絶縁材料を使用すると、ウェーハ外周でのシースが不均一になりエッチングレートやエッチング形状の均一性が悪化する。ウェーハ外周でのシースを均一することを目的として、エッジリングにはバイアス電圧が印加されるシリコン材料を採用している。

ガスの排気は、均一性への影響を考慮して下部電極下側周辺に配置した排気分散板と4ポートからなる排気配管により等方排気を実現している。

3.2 上部電極周辺およびガス供給システム

チャンパー上部構造体は、モーター駆動で上部電極を上下に昇降する機構を搭載している。この昇降機構は、プロセス条件設定画面にて0.1 mm単位でプロセス中の高さを設定することができ、様々なプロセスへの対応が可能である。上部電極は昇降機構を介し筐体接地されている。

下部電極に400 kHzの低周波を印加すると対向電極である上部電極にもウェーハ同様のバイアス電位が印加される。上部電極に印加されるバイアスにより上部電極に付着するCとFからなる堆積物を除去する効果

を有するが、上部電極に陽極酸化したアルミ母材を使用するとプラズマ中のフッ素と反応しフッ化したアルミニウム (AlF_x) がパーティクルとして発生する。また、Al母材に含まれるAlやMgなどが金属汚染の原因となる。このことから上部電極の表面部材に単結晶シリコン電極を採用した。これにより、金属汚染やパーティクルの発生が少ないチャンバーの状態でのウェーハを処理することが可能である。

上部電極は同心円状に無数のガス供給孔が配置されている。8インチウェーハ対応装置は、上部電極内周のガス供給孔と外周のガス供給孔へ個別のガスボックスからプロセスガスを導入することができる。各ガスボックスは、それぞれ4系統のマスフローコントローラからなる。プロセス条件設定画面で上部電極内周と外周に流すガスの流量を個別に設定することが可能である。

4. エッチング特性

実験には「Model : NE-5700」の搬送系に本エッチングモジュールを搭載した「Model : NE-5700 CCP」を用いた。本装置を用いてエッチング特性およびランニング時の再現性やパーティクルを評価した。

4.1 6インチウェーハ対応モジュール

Ar, CF₄, CHF₃のプラズマにて熱酸化膜付きウェーハを処理したエッチング結果をFig.2に示す。プロセス圧力は30 Pa, 放電電力800 W, CF₄とCHF₃の流量比は1 : 1である。ウェーハ外周2 mm以内の範囲でエッチングレートの均一性は±2.4 %であり、目標とする±5 %以下を達成した。この結果は、エッチングの均一性を向上させるためにシリコンエッジリングおよび上部電極の形状を最適化することによって達成されている。

次に連続ランニングした際のエッチング特性の再現性およびパーティクルを確認した。この際に使用したCF₄とCHF₃のガス流量比は1 : 1.2とした。量産ラインでの連続運転を前提としていることから1ロット毎の連続処理を実施し、プラズマによるin-situクリーニングやチャンバーを開放したメンテナンスなどは実施していない。ダミーウェーハおよびパーティクル測定にはシリコンウェーハを用い、パーティクルは0.2 μm以上を測定した。エッチング特性を確認する際は熱酸化膜付きウェーハを用いた。連続ランニング中のエッチング特性の確認は、ロット内の再現確認とロット間の再現確認を実施した。1ロット単位で処理をしていることから、連続放電8時間までは約2時間毎に、連続放電8時間以降は約8時間毎にエッチング特性を確認した。

連続ランニング時のエッチング特性確認ロットの1枚目の推移をFig.3に示す。エッチングレートは、420 nm/min.前後で安定しており、その再現性は±0.5 %であった。各測定ウェーハのエッチングレートの面内

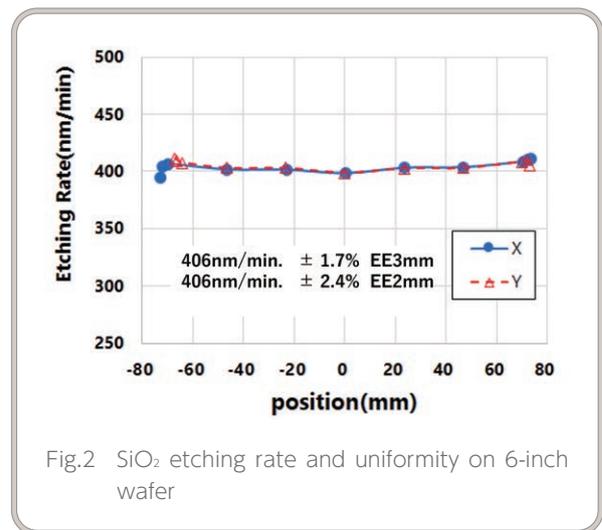


Fig.2 SiO₂ etching rate and uniformity on 6-inch wafer

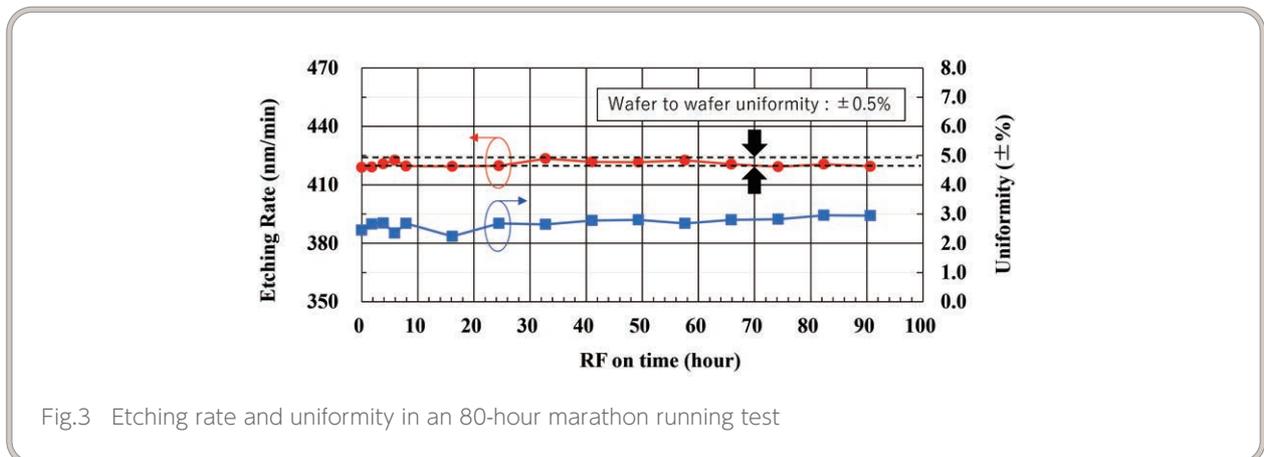


Fig.3 Etching rate and uniformity in an 80-hour marathon running test

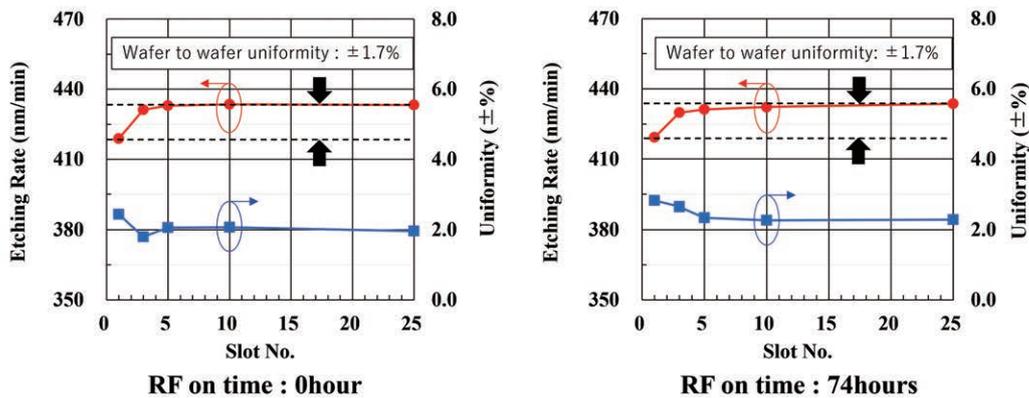


Fig.4 Etching repeatability for 1 lot

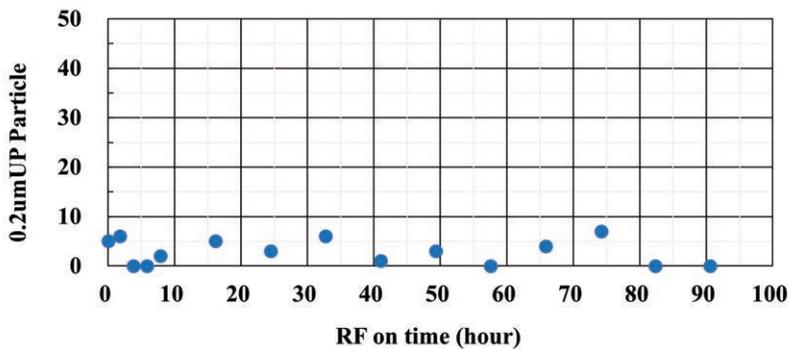


Fig.5 Particle check results from 80-hour marathon running test

均一性は、 $\pm 3\%$ 以下であった。評価開始時（0時間）と74時間連続ランニング処理した後の1ロット内のエッチングレートと面内均一性の推移をFig.4に示す。1ロット内のエッチングレートの再現性は共に $\pm 1.7\%$ であり、各ウェーハの面内均一性は $\pm 2.8\%$ 以下であった。1ロット内のエッチングレートの推移は連続処理時間に関わらず若干の上昇傾向を示し、均一性の推移は若干の改善傾向を示した。74時間処理後の均一性が評価開始時と比較して悪化しているのは、シリコンパーツの消耗によるものと考えられる。

パーティクル測定結果をFig.5に示す。パーティクルは10個以下で推移し、目標とする80時間以上を達成した。連続ランニング後にチャンバーを大気開放し内部パーツの状態を確認した。シリコン材料を用いた上部電極およびエッジリングの表面は、バイアスが印加されることで反応生成物などが付着せず、金属光沢を維持していた。下部電極周辺はフルオロカーボン系の赤茶色の堆積物が付着していたが、目視では付着物の剥離を確認できなかった。

4.2 8インチウェーハ対応モジュール

代表的な8インチ熱酸化膜ウェーハのエッチング特性をFig.6に示す。処理条件は、プロセス圧力70 Pa,

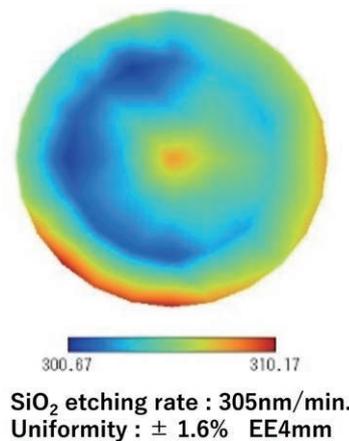


Fig.6 SiO₂ etching rate and uniformity on an 8-inch wafer

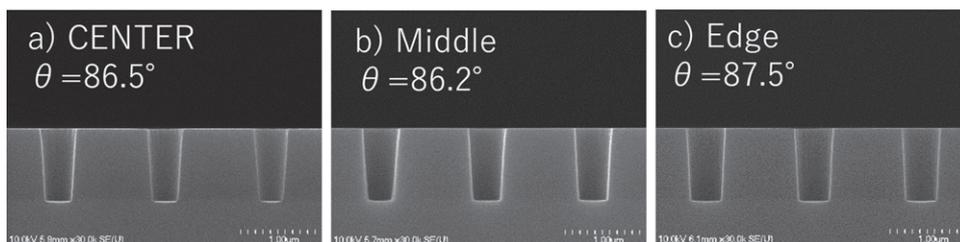


Fig.7 Cross-sectional SEM images of 0.5 μm holes after 30% over-etching

プロセスガスとしてAr, CF₄, CHF₃を使用した。上部電極は前述のように2系統ガス供給システムを採用しており、エッチングレートの面内均一性の良い比率を採用している。エッチングレートの面内均一性はウェーハ外周4 mm以内の範囲で、放電電力に依存せず±2 %前後であり目標の±5 %以内を達成した。

パターン付き熱酸化膜ウェーハを30 %相当オーバーエッチングし、0.5 μm ホール形状のSEM像を観察した結果をFig.7に示す。各SEM像より計算されたテーパ角の分布は1 °以内であった。

5. 接続可能な搬送系

今回開発したエッチングモジュールは、エッチング、スパッタリング、アッシング、CVDなど複数の異なるプロセス室の組合せが可能な「Model : uGmni-200」の搬送コア (Fig.8) に搭載される。「Model : uGmni-200」の搬送コアは、最大二つのモジュールが搭載可能な四角形搬送コアと最大四つのモジュールが搭載可能な六角形搬送コアがあり、少量生産から大量生産に対応可能である。



Fig.8 [Model : uGmni-200] etching system

6. まとめ

電子デバイス生産ライン向けに6インチウェーハおよび8インチウェーハを処理可能な誘電体のエッチングに特化した容量結合型エッチングモジュールについて報告した。このエッチングモジュールは、エッチングの均一性や再現性に優れるとともに金属汚染やパーティクルに配慮した構造となっている。様々な搬送コアへの接続が可能であることから実験ラインから量産ラインまでの適用が見込まれる。現在、400 kHzの高周波を利用したナローギャップ容量結合型エッチングモジュールの構造となっているが、周波数の異なる高周波電源を搭載することが可能で、幅広いプロセスへの適合性を秘めている。

我々の技術がエレクトロニクス産業を支えることで、より豊かで安心・安全な未来の実現されることを願っている。

文献

- 1) S. Shinohara : JSPA Catalog No. AP992339, JSAP, Tokyo (1999), p. 1.
- 2) M. Sekine : J. Plasma Fusion Res. Vol.83, No.4 319, (2007)
- 3) 辰巳哲也 : 応用物理 85, 761 (2016)
- 4) 森川泰宏 : (2003). 気相・表面反応制御に基づくドライエッチング技術に関する研究, 東京大学大学院工学研究科博士論文.
- 5) 米田昌弘 : (1998). プラズマエッチング技術の半導体デバイスへの応用に関する研究, 京都大学大学院工学研究科博士論文.
- 6) T. Tatsumi, H. Hayashi, S. Morishita, S. Noda, M. Okigawa, N. Itabashi, Y. Hikosaka, and M. Inoue : Jpn. J. Appl. Phys. 37, 2394 (1998).