Electron Cyclotron Resonance Plasma を用いたシリコン深掘り技術

遠田 豊^{*1}・古瀬 宗雄^{*2}・高田 和男^{*2}・堤 貴志^{*1}

Silicon Trench Etching by Electron Cyclotron Resonance Plasma

Yutaka ENTA^{*1}, Muneo FURUSE^{*2}, Kazuo TAKATA^{*2} and Takashi TSUTSUMI^{*1}

^{*1}Process Equipment Sales Dept. 3, Hitachi High-Technologies Corporation Nishi-shinbashi 1-24-14, Minato-ku, Tokyo

^{*2}Etching system Design Dept. 2, Hitachi High-Technologies Corporation Higashitoyoi 794, Kudamatsu, Yamaguchi

(Received September 2, 2009, Accepted May 13, 2010)

Hitachi High-Technologies released a new dry plasma etcher designated as the Hitachi M-6180 and targeted for deep silicon trench etch. The new Hitachi M-6180 deep trench etcher provides for excellent uniformity, superior trench profiles, and high selectivity. The Hitachi M-6180 is based on an ECR (Electron Cyclotron Resonance) plasma source able to generate a high density ($1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$) plasma at 0.01 Pa. The low temperature and low pressure reactions of the Hitachi M-6180 achieve superior trench profiles with no sidewall residue. The clean nature of the Hitachi M-6180 ECR etch chamber allows for Mean Time Between Wet Cleaning (MTBW) that is extremely long and particle levels that are very low.

1. はじめに

省エネルギー化への要求の高まりを背景に、パワー半導体が注目されている。民生機器や自動車、産業機器に加えて、各種電力システムなど、パワー半導体を活用した省エネルギー化が必要とされている¹⁾。これらの機器の省エネルギー化に大きく貢献している IGBT (insulated gate bipolar transistor) や Power MOSFET など代表されるパワー半導体のさらなる技術進化に期待が集まっている。現在、IGBT や Power MOS FET は、シリコン基盤に溝を形成したトレンチ型ゲート構造が主流となっている²⁾。これらのトレンチ型ゲート部のシリコントレンチ形成工程においては、より微細な寸法の形状制御性、ウェーハ面内均一性が求められるようになっている。一方で、製品生産性の観点から、加工形状の連続安定性に対する要求がますます厳しくなり、安定したエッチング再現性が求められる。更に近年、500 V から 700 V レベルの中高耐圧領域の新デバイスとして注目されている高アスペクトなシリコントレンチ構造を持つ Super Junction MOS FET も開発されており³⁾、量産に向けた高エッチングレートに対する要求も強まっている。

これらパワー半導体の開発、量産における要求に対応するべく、当社では新型エッチング装置 M-6180を開発した。M-6180の外観図を Fig. 1 に示す。M-6180は高精度加工に適したマイクロ波 ECR (Electron Cyclotron Resonance) プラズマ技術を用いた次世代対応ディープシリコントレンチエッチング装置である。本稿では、パワー半導体のシリコンエッチング工程の技術課題、および M-6180の開発コンセプトと優位技術について紹介する。

Fig. 1 Appearance of M-6180.

2. シリコントレンチエッチングの課題と対応技術

パワー半導体のシリコントレンチエッチング工程における課題はデバイスの歩留りを安定確保することであり、主に下記 5 項目に集約される。

- ① ウェーハ面内での高均一性確保
- ② エッチング異方性の確保
- ③ 対マスク選択比の確保
- ④ エッチング残渣の抑制
- ⑤ エッチング特性の再現性確保、異物安定性確保

①については、プラズマ方式およびエッチングチャンバー構造によるプラズマの分布は勿論のことながら、エッチングガスの導入方法やエッチングプロセスを制御することがキーポイントである。②に関しては、シリコントレンチエッチングがフッ素ラジカル主体のエッチングであることを考慮したサイドエッチ防止技術および入射イオンの制御が重要となる。また③に関しても、マスクのエッチングを促進する入射イオンの制御が重要である。④のエッチング残渣は、シリコントレンチ底部または広い領域のエッチング部において、堆積性のエッチングガスやエッチングによる堆積性の反応生成物によるマイクロマスクが原因と考えられ、このマイクロマ

^{*1} 株式会社日立ハイテクノロジーズ
プロセス製造装置三部 (〒105-8717 東京都港区西新橋 1-24-14)

^{*2} 株式会社日立ハイテクノロジーズ
エッチング装置第二設計部 (〒744-0002 山口県下松市大字東豊井794)

スクの起因となる堆積性を低くしたエッチング環境が必要である。⑤は、量産性能に関する課題である。エッチング装置状態を一定に保持させることにより、低異物かつ加工精度の安定化を図ることが重要である。エッチング加工中に堆積性の少ない気相状態を形成し、安定したエッチングチャンバー内環境を構築することが望ましい。

M-6180は、上記5項目の課題に対して、以下3項目の技術で対応している。

- 1) マイクロ波 ECR プラズマチャンバー
- 2) 低温エッチング
- 3) TM バイアス (Time Modulation バイアス)

これら3項目の技術を組み合わせることにより、フッ素系ガスをベースとしながらも高均一性と、良好な形状制御性を実現することが可能となる。同時に HBr やフルオロカーボン系ガスのような堆積性の強いガスが不要となるため、チャンバー内を常にクリーンで安定した状態に保ち、枚葉クリーニングを行うことなく高い再現性、異物安定性を確保することができる。3章より各個別技術の詳細について説明する。

3. M-6180 トレンチエッチング技術

3.1 マイクロ波 ECR プラズマチャンバー

Fig. 2 にマイクロ波 ECR プラズマエッチャーの基本チャンバー構成を示す。マイクロ波 ECR プラズマチャンバーは、マグネトロン、導波管、ソレノイドコイル、ウェーハ電極の高周波電源より構成される。マイクロ波 ECR プラズマは、マグネトロンにより発生させた2.45 GHz の電界と、ソレノイドコイルによる87.5 mT の磁界を印加することによる、電界と磁界の共鳴で生じるものである⁴⁾。

マイクロ波 ECR プラズマの特徴は、高いプラズマ生成効率にあり、0.01 Pa 台の低圧下でも $1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 台の高密度プラズマを生成することができる点にある。Fig. 3 に ECR プラズマの生成領域を示す。ECR プラズマは、他のプラズマ生成方式と比べ、幅広い圧力領域において高密度プラズマが生成可能である。特にトレンチエッチングでは、斜め入射イオンが、サイドエッチングやエッチング速度のアスペクト比依存を引き起こす。そのため、斜め入射イオン量を減少させ、イオンの方向を揃えることが重要である。このような観点から、平均自由行程の長い高真空領域で、高密度かつ安定したプラズマを生成可能な ECR プラズマは、トレンチエ

Fig. 2 Structure of micro wave ECR etcher.

ッチングにおいて非常に有益であると言える⁴⁾。

また M-6180 は、チャンバー側面に3段のソレノイドコイルを搭載しており、コイル電流を制御することで高密度プラズマ領域の位置を上下方向に変化することが可能である。これにより種々のエッチング条件における電極-ECR プラズマ間距離の最適化を図ることができる⁵⁾。Fig. 4 にイオン飽和電流の分布と、電極-ECR プラズマ領域間距離との関係を示す。ECR プラズマでは、電極-ECR プラズマ領域間の距離を制御することで、電極上におけるイオン飽和電流分布の最適化を可能とする。そのため、高密度プラズマ領域の位置の可変性は、面内均一性向上に対するパラメータとして利用することができる。

Fig. 5 に深さ $1 \mu\text{m}$ をターゲットとしたトレンチエッチングを行った際の面内均一性データを示す。マイクロ波 ECR プラズマエッチャーを用いることで、面内9点の深さ均一性は2%程度と良好な結果が得られている。

3.2 低温エッチング

低温エッチングはシリコンエッチング時にウェーハ温度を

Fig. 3 Pressure range of ECR plasma. ECR generates high density plasma at wide pressure range.

Fig. 4 Relation between the ion saturation current and the distance from electrode to ECR zone.

Fig. 5 Trench depth uniformity. Depth uniformity: 2.3%.

低温にすることで、HBr やフルオロカーボン系ガスに代表される強い堆積性ガスの添加に頼らずに、良好な形状制御性を実現する技術である。パワー半導体向けトレンチエッチングでは、トレンチ後の酸化工程、埋め込み工程との兼ね合いにより、緻密なテーパ形状制御性が要求される。通常テーパ形状は、HBr やフルオロカーボンなどの堆積性ガスを用い側壁に保護膜を形成、側壁での被エッチング材とラジカルとの接触を防止することで制御されるが、M-6180はウェーハ温度を低温制御することでトレンチ側壁での反応そのものを抑えることでテーパ角度のコントロールを可能としている。

フッ素系ガスを用いたシリコンエッチングにおいて、ウェーハの低温化がトレンチ側壁での反応抑制に有効であることは、リアクティブスポットモデルにより説明がなされる^{4,6)}。すなわち低温化によってラジカルと側壁シリコン表面での自発性反応は著しく抑制されるが、パターン底面には高エネルギーイオンが入射して実効的に高温なリアクティブスポットが形成されており、低温化によるイオン支援反応の抑制が起こらない。結果として、深さ方向へのエッチングのみが進行、テーパ形状が得られる。

Fig. 6 に低温化による形状制御の具体例として、トレンチ底部幅とウェーハ温度の相関関係を示す。ウェーハ温度以外のエッチング条件を固定とし、ウェーハ温度を -15°C 、 -30°C 、 -45°C と変化させ、深さ約 $16\mu\text{m}$ 、開口約 $2.2\mu\text{m}$ トレンチエッチング処理を行った。 -15°C 、 -30°C 、 -45°C とウェーハ温度を低温化することによりトレンチ底部幅は細くなる結果が得られた。

これはウェーハの低温化によってラジカルと側壁シリコン表面での自発性反応が著しく抑制されたことにより、サイドエッチングが減少した結果であると考えられる。M-6180では、ウェーハ低温化によりサイドエッチングを抑制すること

Fig. 6 Relation between Bottom width and Wafer temperature. Trench depth: $16\mu\text{m}$, Mask width: $2.2\mu\text{m}$.

で、フッ素系ガスをベースとしたクリーンエッチングプロセス構築を実現できる。クリーンエッチングプロセスの実現によりエッチング再現性、異物安定性の確保のみならず、マイクロマスク発生の低減やエッチング残渣の抑制も可能としている。クリーンエッチングプロセスの詳細は、第4章で述べる。

3.3 TM バイアス (Time Modulation バイアス)

TM バイアスは、ウェーハに印加する高周波電圧（以下RF電力とする）のONとOFFを繰り返すことで、入射イオンの供給を制御する技術である^{7,8)}。TM バイアスの構成図をFig. 7 に示す。

この技術によりエッチングレートを低下させることなく、エッチング異方性の確保と対マスク選択比の確保を両立させることが可能となる。

Fig. 8 に TM バイアスの原理概略図を示す。(a)はRF電力ONの状態を示す。RF電力のON時は、入射イオンによりシリコンおよび酸化膜やフォトレジストのマスクのエッチングが進行する。また、同時にシリコン、マスク表層への反応生成物の堆積がなされる。一方(b)はRF電力OFFの状態を示す。RF電力がOFFの時には、ウェーハにイオンが入射しないため、ラジカルによるエッチングと反応生成物の堆積が進行する。マスクは、イオンによる物理的エッチングが支配的であり、マスク表層は反応生成物が堆積しやすい。そのため、RF電力OFFの時はマスクのエッチングが抑制される。これに対しシリコンは、フッ素ラジカルによる化学的エッチングが支配的である。その結果、RF電力OFFにおいてもエッチングが進行する。これらの現象により、RF電力のONとOFFを継続させることで、マスクに対するシリコンの選択比を高く確保することが可能となる。

簡便に選択比を向上させる方法としては、エッチングガスに堆積性ガスを混合することによって対マスク選択比を確保する手法もある。しかしこの方法では、深さ方向のエッチングレートを低下させる懸念がある。TM バイアスでは、エッチングレートが低下することなく、対マスク選択比を向上させることができるというメリットがある。

Table 1 に TM バイアスの選択比向上効果に関する実験

Fig. 7 TM Bias system.

Fig. 8 Principle of TM Bias.

(a) While RF is on, Ion Supply is accelerated. (b) While RF is off, Byproduct Supply is accelerated.

Table 1 TM effect for selectivity. Duty rate = $100 \times \text{RF ON Time} / (\text{RF ON Time} + \text{RF OFF Time})$.

	Time modulation	Non Time modulation
Duty rate (%)	50	100
Si etch rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)	1.67	1.67
SiO ₂ etch rate ($\mu\text{m}/\text{min}$)	0.054	0.061
Si/SiO ₂ selectivity	31.1	27.5

データを示す。Table 1 は、同一のシリコントレンチサンプルに対して TM バイアス条件のみを変更した際のエッチングレート、および対マスク選択比を示したものである。TM バイアスを用いることにより、エッチングレートを低下させることなく、対マスク選択比が向上する結果が得られた。これは、先に述べたように、RF 電力 OFF 時にマスクの物理的エッチングが抑制され、それと同時にシリコンがフッ素ラジカルにより化学的エッチングされたためと考えられる。

4. クリーンエッチングプロセス

3章で述べた技術を組み合わせることにより、フッ素系ガスをベースとしながらも高均一性と良好な形状制御性を実現することが可能となる。その結果 HBr やフルオロカーボン系ガスのような堆積性の強いガスが不要なクリーンエッチングプロセスを実現することができる。

Fig. 9 Particles stability.

Particles are stabilized lower than 10.

クリーンエッチングプロセスの大きな特徴は、枚葉でのドライクリーニングなしでエッチングの再現性確保、異物安定性確保が可能な点にある。HBr を用いてエッチングを行う場合、副生成物として SiBr₄ が発生する。SiBr₄ の沸点は 153°C と高く、揮発しづらいため、チャンパー内壁および処理ウェーハへの堆積が進行しやすい。チャンパー内壁表面に堆積した反応生成物は、異物の発生源となりうる。また、堆積した反応生成物からはラジカルやイオンの再解離が生じるため、プラズマコンディションの安定性が妨げられる恐れがある。これらの問題を解決するため、チャンパー内の反応生成物を全てエッチング除去することを目的とした枚葉 In-situ ドライクリーニングプロセスを導入することが一般的である。

一方、フッ素系ガスを用いてエッチングを行う場合、副生成物として SiF₄ が発生する。SiF₄ の沸点は -95.1°C と低いいため、SiBr₄ と異なり揮発しやすい。そのため、チャンパー内壁および処理ウェーハへの副生成物の堆積、ならび副生成物が起因となる異物の発生や、プラズマコンディションの変動といった問題は生じない。その結果、堆積性の強いガスを使用する際に行われる枚葉 In-situ ドライクリーニングが一切不要となる。

Fig. 9 に M-6180 の異物安定性評価結果を示す。異物測定実施後に深さ 5 μm レベルのトレンチサンプル 50 枚の処理を実施したところ、粒径 0.16 μm 以上の異物は 10 個未満と、枚葉での In-situ クリーニングなしで安定した結果が得られている。

続いて、Fig. 10 に 1 ロット 25 枚のウェーハを処理したときの深さ変動を示す。エッチング深さ約 2.7 μm をターゲットとして製品サンプルを 25 枚連続処理した。ウェーハ中央部と外周部の 2 点に対して、SEM を用いたトレンチ深さ測定を行った。Fig. 10 の縦軸はウェーハ中央部、外周部 2 点の深さの平均値を記したものである。7 枚目、13 枚目、19 枚目、25 枚目の深さバラツキは $\pm 0.5\%$ であり、トレンチ深さについても枚葉 In-situ クリーニングなしで良好な再現性が

Fig. 10 Etching depth stability.
The depth results of Slot 7, Slot13, Slot19, and Slot25 were confirmed by SEM.

(a) sectional image

(b) side wall image

Fig. 11 Superior profile achieved by clean etching process.
(a) Sectional image. Trench depth: 8.2 μm, Mask width: 5.0 μm. (b) Side wall image. Clean etching process enable smooth side wall condition.

得られている。

以上 M-6180は、クリーンプロセスの実現により、チャンパー内のコンディションを常にクリーンな状態に保つことを可能とし、枚葉での In-situ クリーニング処理を行うことなく、異物およびエッチング形状の変動を抑制することができる。また枚葉での In-situ クリーニング処理が不要となることで、高い生産性を実現することができる。

Fig. 11に深さ8.2 μm、幅5.0 μmのトレンチエッチング処理例を示す。M-6180では、エッチングステップと堆積ステップの繰り返しを行わないため、滑らかな側壁形状が得られている。

5. 高エッチングレート化への取り組み

近年 Super Junction MOS FET や、デバイス積層を目的としたTSV (Through Silicon Via)、自動車やセキュリティ

Fig. 12 Relation between Etching rate and Pressure.
X-axis is written in the form of ratio and our standard pressure area is regarded as “×1”.

分野を最終用途としたセンサー MEMS など、深さ数十 μm ～数百 μm レベルのディープトレンチエッチングに対する期待が高まっている。これらのエッチングには、生産性の観点から高いエッチングレートが要求されるため、当社では更なる高エッチングレート化に向けた開発を進めている。

高エッチングレート化への取り組みとしては、エッチングプロセスパラメータによるアプローチを行っているが、現状最も有効なプロセスパラメータは処理圧力である。**Fig. 12**に処理圧力とエッチングレートの関係を示す。X 軸は当社標準使用圧力領域を基準とし、圧力を比で示したものである。**Fig. 12**に示すとおり、処理圧力を高めることで、最大で約 18 μm/min の高いエッチングレートを得ることができることを確認した。

6. ま と め

本稿では、パワー半導体シリコンエッチング工程の技術課題、ならび M-6180の開発コンセプトと優位技術について述べた。

マイクロ波 ECR プラズマは、低圧領域で高密度プラズマ生成が可能であり、ウェーハ面内での均一性確保に有効である。

低温エッチングは、ウェーハ温度を低温にすることで、堆積性ガスに頼らずに良好な形状制御性を実現する技術である。

また RF 電力の ON と OFF を繰り返す TM バイアスは、エッチングレートを低下させることなく、対マスク選択比の確保することを可能とする。

更に M-6180では、マイクロ波 ECR プラズマ、低温エッチング、TM バイアスを活用することによって、強い堆積性ガスが不要なクリーンエッチングプロセスを構築することができる。

近年、次世代デバイスや MEMS 等の分野においても、ディープトレンチ構造を有するデバイスの開発が進んでおり、高エッチングレート化への要求が高まってきている。この要求に応えるべく、当社では更なる高エッチングレート化に向けたプロセス開発、装置開発を促進している。

〔文 献〕

- 1) 岸 敬二：パワーエレクトロニクスとその応用（東京電機大学出版，2008）p. 130.
- 2) 山崎 浩：パワー MOSFET/IGBT 入門（日刊工業新聞社，2002）p. 12.
- 3) Y. Noda, T. Shibata, T. Yamamoto and H. Yamaguchi: *Proceedings of International Symposium on Dry Process*, Tokyo, Japan, (2008) p. 127.
- 4) 徳山 巍：半導体ドライエッチング技術（産業図書，1992） p. 26, p. 106, p. 334.
- 5) M. Furuse and S. Watanabe: *J. Vac. Sci. Technol. A*, **17** (6), (Nov/Dec 1999) 3225.
- 6) S. Tachi and S. Okudaira: *J. Vac. Sci. Technol. B*, **4** (1986) 459.
- 7) T. Ono, H. Miyazaki, T. Mizutani, Y. Goto and T. Kure: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **38** (1999) 5292.
- 8) T. Ono, T. Mizutani, Y. Goto and T. Kure: *Jpn. J. Appl. Phys.*, **39** (2000) 5003.