

## [8] イオン注入装置

近年、カーボンニュートラルを実現するためのキーデバイスとして、従来のシリコン（Si）パワーデバイスと比較して電力損失を大幅に低減でき、耐熱・耐電圧性に優れる炭化ケイ素（SiC）パワーデバイスが広がりを見せている。合わせてモビリティの電動化の流れの中、多くの自動車メーカーが2025年頃を目途にEVの本格普及を計画しており、EVへのSiCパワーデバイスの供給体制を確立すべく、デバイスメーカー各社は開発・投資を進めている。

このSiCパワーデバイスの生産には、ウェーハ加熱機構を持つイオン注入装置が必要であり、当社はいち早くこの分野に対して量産装置（「IMPHEAT<sup>(\*)</sup>」シリーズ）を投入しており、高い市場シェアと競争力を維持している。

デバイスメーカー各社におけるSiCパワーデバイスの本格的な量産が始まる中、市場はより高い生産性が求められる環境に変化してきている。このため、製造装置分野における最近の開発トレンドは、ウェーハの大口径化、ビーム電流の増大、ウェーハの搬送スループット向上、メンテナンス頻度の低減などとなっており、当社も開発を進めている。

また、Siの最先端ロジック半導体向けには、低エネルギー領域での大電流イオンビームによる材料表面改質という新しいプロセスの実現を目指した装置を開発中である。

加えて、SiCパワーデバイスの製造プロセスは現在も各社模索中であり、当社においてもデバイスメーカーに対してより良いプロセスの提案ができるよう、単独あるいは、研究機関などと共同でプロセス開発を行っている。

本稿では、これらの内、①ウェーハの大口径化とメンテナンス頻度の低減を実現するイオン源の長寿命化、②低エネルギー超大電流イオン注入装置の開発、③金属汚染がデバイスの信頼性に与える影響評価の3テーマについて報告する。

（日新イオン機器株式会社）

### 8. 1 8インチ SiCパワーデバイス対応 高温イオン注入装置向け新型イオン源の長寿命化

SiCパワーデバイスは、高耐圧・小型であり、低損失かつ高速・高温での動作が可能で、Siパワーデバイスの性能を大きく上回る次世代パワーデバイスとして、その活用が期待され、本格的な普及期に差し掛かっている。

昨今のSiCパワーデバイスの需要増加に伴い、パワーデバイスメーカー各社は、低コスト化に向けた技術開発に取り組んでいる。この取組みのうち、代表的なものが、ウェーハの大口径化であり、これを受けて当社でも2019年度までに8インチのSiCウェーハに対応するための各種要素技術の開発に着手した<sup>(1)(2)</sup>。

これまでに、搬送系では8インチに対応したウェーハを保持する高温静電チャック（ESC）、ウェーハの予備加熱機構、真空内での高速搬送機構を開発してきた。加えて、ウェーハ取出し時の冷却強化、搬送シーケンスの最適化を進め、6インチSiCウェーハの搬送スループットと同等の速度で、さらなる搬送安定性を実現している。

今年度は、イオン源のマグネット磁場の強化や、プラズマ生成部のデザインを一新（熱電子源、アルミニウム（Al）スパッタ源の改良、ガス導入経路の変更）し、ビームの自動立上げソフトウェアのシーケンスを

改良することで、注入領域の大型化に伴うビーム効率の低下に対応するだけでなく、より大電流のビーム照射が可能となった。加えて、イオン源の寿命を2倍に延長するとともに、放電エラーの頻度を1/10に減少させることに成功した。図1に、新旧イオン源でのイオン源寿命検証結果の比較を示す。

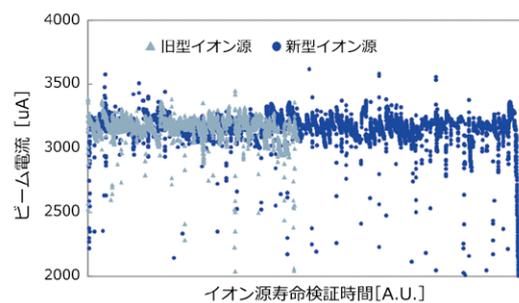


図1 新旧イオン源でのイオン源寿命検証結果比較

この度、これらの改良技術を当社製品である8インチウェーハ対応のイオン注入装置「IMPHEAT-II」に搭載し、パワーデバイスメーカーに納入した。今後も、さらなる市場拡大に対応すべく、継続して開発を進めていく所存である。

8. 2 最先端ロジック半導体対応の材料表面改質向け超大電流イオン注入装置 (注)

半導体デバイスの進歩は目覚ましく、その構造はますます複雑なものとなり、処理工程も多くなった。材料表面の物理的および電気的特性の改質は、この問題を解決する有力な手段の1つであり、それはイオン注入によっても実現可能である。

従来の大電流イオン注入装置において、ソース・ドレイン工程で必要とされるドーズ量は $1 \times 10^{15}$  ions/cm<sup>2</sup>オーダーである。一方、薄膜特性を改質させるためには、 $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>以上の高いドーズ量が必要であり、かつ1keV程度の低いビームエネルギーが求められる。低エネルギーかつ大電流なビームの輸送は空間電荷効果によって非常に困難であるため、イオン注入自体は成熟したプロセスであるものの、材料表面改質を目的とした工程には生産性の観点から採用されてこなかった。

当社は、長年にわたりイオン注入装置を開発・製造・販売し、イオンビームに関する数々の技術を蓄積している。今回、その技術を応用し、材料改質用途で使用可能な低エネルギー超大電流イオン注入装置の開発を開始した。現在、準量産装置を開発し、多数顧客でのプロセス開発の評価をとおして装置改良を進めている。

本装置は高いビーム輸送効率を実現できる縦長ビームに特徴があり、当社の半導体デバイス向け大電流イオン注入装置「LUXiON<sup>(\*)</sup>」にも採用されている。また、イオン源とビームラインの構成は、低エネルギーの大電流ビームがより多く得られるように最適化されている。

現在、半導体製造装置で使用される代表的なイオン種において、1keVのエネルギーでビーム電流量は30mAを超え、従来機の3~5倍を達成している。これは $1 \times 10^{16}$  ions/cm<sup>2</sup>のドーズ条件における1時間あたり30枚以上のウェーハスルーputに相当し、生産性の観点から十分に製造工程で利用することが可能な性能となっている。

さらに、本装置を用いた二酸化ケイ素 (SiO<sub>2</sub>) 膜のウェットエッチングとドライエッチングの速度制御評価では、注入するイオン種とその注入量を選択することでエッチングレートを制御できることを確認できた (図2)。これらの評価結果は、イオン注入を使用した材料改質が生産に値するプロセスとして、デバイス製造に利用できることを示している。

今後、早期に量産装置を開発し、市場参入していく予定である。

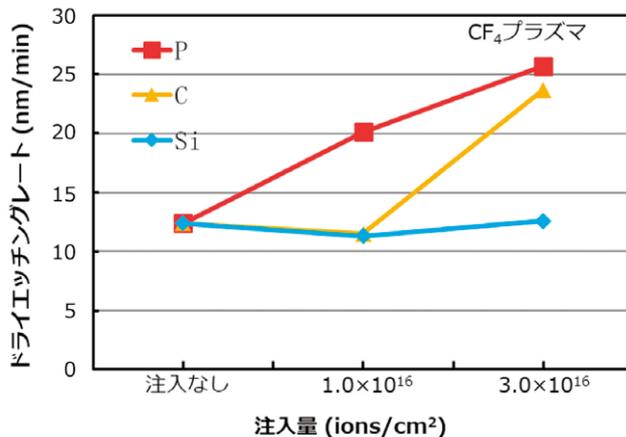
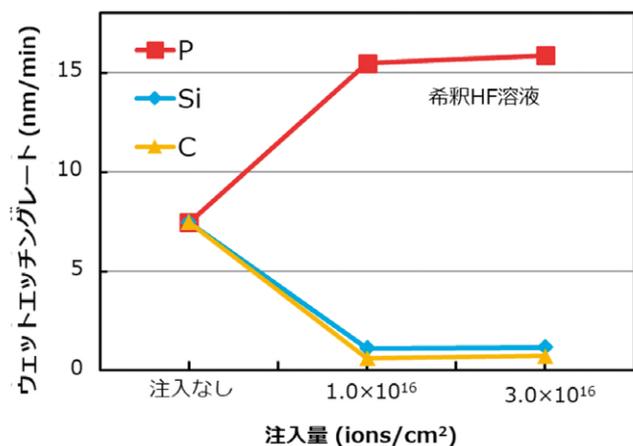


図2 SiO<sub>2</sub>膜に対するエッチングレートのドーズ依存性

(注) この成果は、国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構 (NEDO) の委託業務の結果得られたものです。

### 8. 3 SiC中の重金属の拡散

重金属は、半導体デバイス作製プロセス中に薄膜内に混入する可能性があり、素子形成領域にまで拡散することで、接合リーク電流の増加、ショットキーバリア障壁の低下、ゲート絶縁膜信頼性の劣化といったデバイス特性に悪影響を与えることが一般的に知られている。これを回避するため、プロセス装置のクリーン化やゲッターリング技術が開発されている。現象の把握として、SiC中の重金属の振る舞いはこれまで多くの研究が行われているのに対し、次世代パワーデバイスとして注目されているSiC中の重金属の振る舞いは、ほとんど調べられていない。ここでは、SiC中の鉄(Fe)の挙動について紹介する。

SiC中のFeの挙動を評価するために、SiC単結晶膜に低ドーズのFe<sup>+</sup>イオンを深さ100nmになるように注入し、強制汚染を実施した。また、拡散層形成のイオン注入によるダメージの影響を明らかにするため、深さ50nmの位置に、高ドーズのAl<sup>+</sup>イオンを室温と500℃の両方の状態で注入を行った。その後、SiC半導体作製プロセスでドーパントの活性化に用いられる高温熱処理を行い、二次イオン質量分析法(SIMS)を用いて、SiC中のFeの分布を確認した。

図3に熱処理前後のFeの深さ分布を示す。一般的にSiC中の不純物の拡散は非常に小さいと報告されているが、高温熱処理により、Feが容易にSiC中を拡散していることがわかる。Feの挙動は、Al<sup>+</sup>イオン注入を行うことで大きく変化し、表面方向へ拡散する。

Feの拡散はイオン注入時の処理温度に依存し、高温の500℃で注入した場合、表面方向の拡散が抑制される一方、室温注入の場合、ほとんどのFeが表面から脱離していることがわかる。室温と高温注入とでは、発生する結晶欠陥量に違いがあり、室温注入では多量の点欠陥によりAlの拡散が増速されていると考えられる。また、Alの存在により、Feの拡散が抑制されていることが示唆される。

SiC中の金属の挙動の解明は、高信頼SiCパワーデバイスの実現に貢献できると考えられ、引き続き、検証を進めていく所存である。

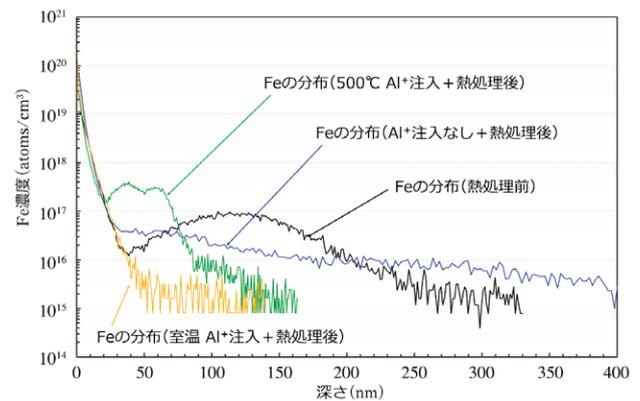


図3 熱処理前後のFeの深さ分布

#### 参考文献 [8] イオン注入装置

- (1) 「2020年の技術と成果 [8]イオン注入装置」日新電機技報, Vol.66 No.1, pp.21-23 (2021.06)
- (2) 「2021年の技術と成果 [8]イオン注入装置」日新電機技報, Vol.67 No.1, pp.24-27 (2022.05)

(\*1) 「IMPHEAT」は、日新イオン機器(株)の登録商標です。

(\*2) 「LUXiON」は、日新イオン機器(株)の登録商標です。