

パワーデバイスのためのチャネリングイオン注入技術

Channeling Ion Implantation Technology for Power Devices

浜田 信吉*

Shinkichi Hamada

平井 裕也

Yuya Hirai

臼井 洸佑

Kosuke Usui

田中 浩平

Kohei Tanaka

和田 涼太

Ryota Wada

黒井 隆

Kuroi Takashi

本稿は「MRS Advances, Volume 10, Issue 4 (2025) pp. 430-433」に掲載された論文に、一部加筆したものである。

パワーデバイスのための高精度チャネリングイオン注入システムを開発した。チャネリングイオン注入とは、結晶格子の特定の向きに沿ってイオンを注入することで、より深くまでイオンを埋め込む技術である。従来のシリコンカーバイド (SiC) パワーデバイスの製造プロセスでは高エネルギー注入装置が使用されているが、チャネリングイオン注入技術はこのプロセスの一部を置き換えることができるだけでなく、デバイス特性を大幅に向上させる可能性を秘めている。注入角度を精密に制御できる本システムを使用することにより、安定したチャネリングイオン注入を繰り返し実現することが可能となる。

Nissin Ion Equipment Co., Ltd. developed a high-precision channeling ion implantation system for power devices. Channeling ion implantation is a technique that enables ions to be implanted deeper by aligning implantation along a specific direction of the crystal lattice. This technique not only has the potential to replace part of the conventional silicon carbide (SiC) power device manufacturing process, which uses a high-energy ion implanter, but also promises to significantly improve device characteristics. Our system precisely controls the implantation angle, enabling stable and repeatable channeling ion implantation.

キーワード：シリコンカーバイドパワーデバイス、チャネリング注入

1. 緒 言

近年、シリコンカーバイド (SiC) パワーデバイスは、特に再生可能エネルギー、クラウドコンピューティング、電気自動車などのいくつかの強力な長期成長市場において、カーボンニュートラルを達成するための重要なコンポーネントとして急速に成長している。SiC パワーデバイスは、

シリコンパワーデバイスと比較して、電力損失が大幅に少なく、より優れた耐熱性と耐電圧性を示す。SiC パワーデバイスの構造は平面型からトレンチ型へと移行しており、スーパージャンクション構造などの高度に設計されたデバイスの製造には、深い領域へのイオン注入が必要となっている。

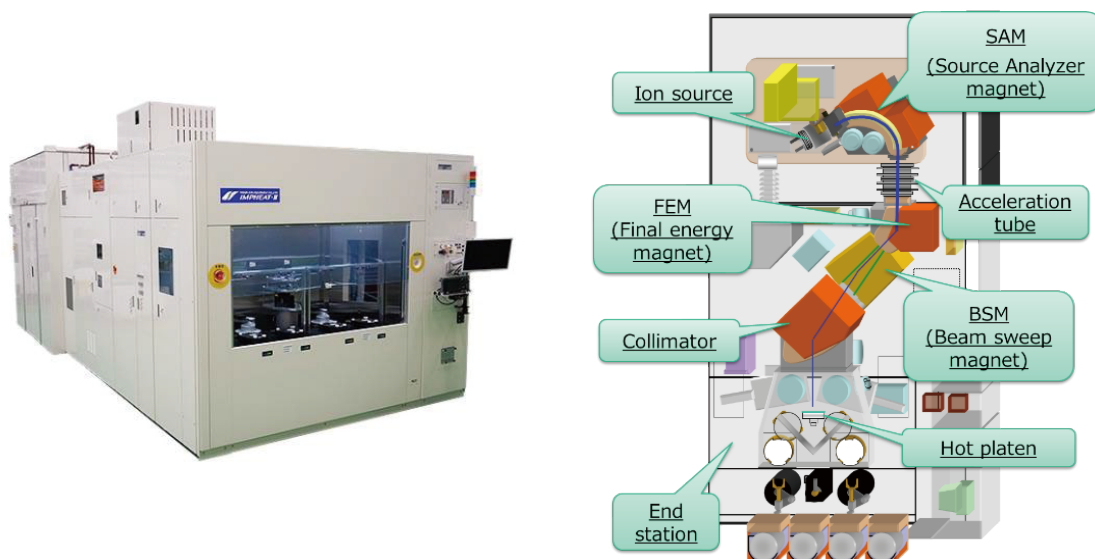


図1 「IMPHEAT」の外観および概略

従来、深い領域へのイオン注入は高エネルギーのイオン注入装置を使用して、ランダム注入と呼ばれるイオンの進行方向が結晶構造に依存しない注入方法が用いられており、高エネルギーのイオン注入装置が必要である。一方、チャネリングイオン注入（以降、チャネリング注入）は、ウェーハの結晶格子軸に沿ってイオンを注入するため、結晶原子との衝突回数がランダム注入より大幅に減少する。これは、デバイス製造のプロセスにおいてより低いエネルギーで深い領域へのイオン注入が可能になるということであり、高エネルギー装置を必要とする従来のイオン注入法に置き換わる可能性を秘めている。実際に、チャネリング注入への置き換えによるいくつかの利点が報告されている⁽¹⁾。例えば、ボックス状プロファイルは、従来、イオン注入後に加速エネルギーを変更し再度イオン注入する工程を複数回繰り返すことで達成していたが、チャネリング注入を用いると、より少ない回数の注入で達成できる。

さらに、ランダム注入では、イオンが結晶原子と衝突しながら進むため、注入の深さが増すにつれて横方向にも広がる。一方、チャネリング注入では、このようなイオンの広がりが最小限に抑えられるため、マスク開口部に対して小さな広がりで正確なドーパントプロファイルが実現する。これにより、高抵抗成分が削減され、オン抵抗の低下につながる⁽²⁾。また、チャネリング注入は、ランダム注入よりも低い加速エネルギーで同等の注入深度を達成できるため、より薄いマスクが使用できるという利点もある。

図1に、日新イオン機器㈱が開発したパワー半導体製造用の高温イオン注入装置「IMPHEAT」シリーズ（最大エネルギー：960 keV）の外観および概略図を示す⁽³⁾。本装置にて各種イオンの注入が可能である。注入されたアルミニウムイオンおよびリンイオンのプロファイルは、チャネリング注入を用いると、ランダム注入を用いた場合のそれぞれ約3倍および約2倍の深さになる。イオン種によって注入深さが異なる原因は、SiCへの侵入中のエネルギー損失に影響を与える電子阻止能（Se）がイオン種によって異なるためである⁽⁴⁾。チャネリング注入では注入角度の精密な制御が必要であり、「IMPHEAT」シリーズは垂直および水平方向の平均イオン注入角度を精密に制御できる機能を提供している⁽⁵⁾。

図2にイオン角度の計測と補正システムの模式図を示す。垂直方向のイオン角度は、プラテン^{※1}上の静電チャックと機械的クランプで保持されたウェーハの傾斜角度を制御しながら、プラテン前方に配置された可動フロントファラデーカップ^{※2}と後方のバックファラデーカップに設置されたシャッターを調整することで計測する。水平方向のイオン角度は、プラテンの前方と後方に配置された2つの多点ファラデーカップによる測定に基づいてコリメータ磁石の磁場を調整することで制御する。「IMPHEAT」シリーズは、垂直方向と水平方向の両方向で、チャネリング注入に適した優れた角度制御性（制御精度 ± 0.1 度）を示している⁽⁶⁾。

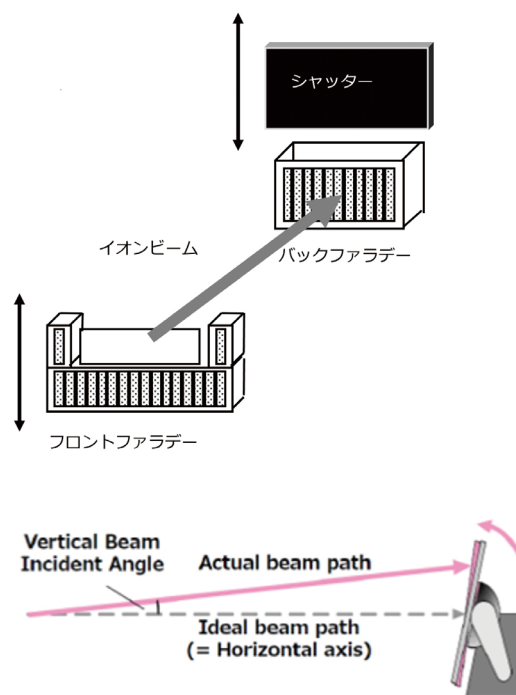


図2 イオン計測と角度補正システム

2. チャネリングイオン注入技術

チャネリング注入技術の実現可能性と量産への実装における大きな懸念事項は、各ウェーハのオフアクシス角^{※3}の信頼性と変動である。チャネリング注入が可能な臨界角はエネルギーに依存しており、最大エネルギーである960 keVでは ± 0.2 度の注入角度制御を達成する必要がある⁽¹⁾。精密なチャネリング注入を実現するためには、各ウェーハのオフアクシス角を事前に測定し、イオン注入中にイオンビームの角度をオフアクシス角に合わせることが求められる。

そこで日新イオン機器㈱は各ウェーハのオフアクシス角を測定し、イオン注入ごとにプラテン角のフィードフォワード制御を実施するシステムを開発した。図3にX線回折装置（XRD）搭載状態とX線回折結果を示す。X線照射装置は、アライナー^{※4}上部と人の作業領域に近いので、X線暴露対策としてウェーハカセット設置扉にインターロックを

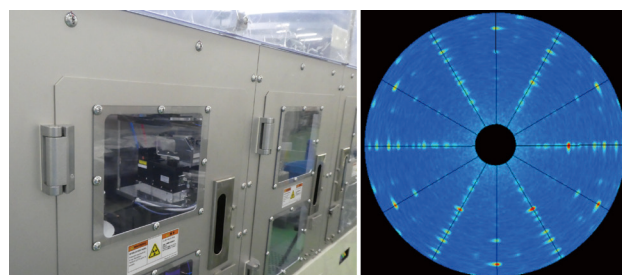


図3 XRD 装置搭載状態とXRD測定結果

設けている。X線照射装置は、ウェーハに連続した波長のX線を照射し、ブラッグ条件が各結晶面に対して満たされると、X線は特定の方向に回折し、ラウエ斑点として知られる回折パターンが生成される⁽⁷⁾。これらのラウエ斑点の位置は格子定数および結晶面の配置に関連している。ウェーハへの入射X線の角度と距離に関する情報を提供することにより、ウェーハのオフアクシス角を計測することができる。

さらに、パワーデバイスに使用されるSiCウェーハは変形しやすいが、本システムでは、アライナーの真空チャックによってφ0.8 mmの測定範囲内で平坦に保持される。このシステムを変形したウェーハに使用した場合でも、ウェーハ全体の表面を50 μm未満の平坦度を保証するように製造された静電チャックで保持することで、均一なチャネリング注入が可能となる。このアプローチにより、ウェーハの歪みが注入中の角度の正確な制御に与える影響を回避することができる。

3. 実験結果

表1に、X線回折ロックイングカーブ測定と、チャネリング注入用に開発した本システムを使用して測定されたウェーハのオフアクシス角の比較を示す。結果には、新しいウェーハの測定結果とイオン注入後に200 μmを超える変形を示すウェーハの測定結果が含まれている。ロックイングカーブ測定ではウェーハ表面が基準位置として使用されるため、ウェーハの変形の影響を受けない測定が必要である。測定結果の差を見ると、新しいウェーハでは0.06度、変形ウェーハでは0.05度であり、アライナーの真空チャックを使用することでウェーハの変形の影響を受けない測定が可能であることが示された。

表1 測定結果一覧

Sample	XRD measurement of rocking curve	SiC offset angle with our system
New SiC	4.11°	4.05°
Implanted SiC	4.01°	3.96°
SiC wafer with 1 μm SiO ₂	4.10°	4.05°
SiC wafer with epi layer	4.12°	4.05°
Si with resist	0.26°	0.25°

さらに、表面に1 μm厚のSiO₂層を有するSiCウェーハ、エピタキシャル成長層を有するSiCウェーハ、およびレジストフィルムを有するSiウェーハを測定したところ、両測定法での測定値の差は、それぞれ0.05度、0.07度、0.01度であり、顕著な違いは見られなかった。これらの結果から、本システムでの測定はウェーハの表面状態に影響され

ないことが示された。

図4に、チャネリング注入と、チャネリングから注入角度をオフセットしたときのイオン分布を示す。最大エネルギー960 keV、ドーズ量 1×10^{13} ions/cm²のアルミニウムイオンビームを用いて室温で注入を行った。チャネリング現象を評価するための原料として、〈11-20〉方向に4度のオフカットを持つn型4H-SiC (0001) を用意した。イオンビームの角度とウェーハのオフアクシス角をプラテンの傾斜角に対して相対的にフィードフォワード制御した結果、静電チャックで保持されたウェーハの傾斜角は注入中4.1度に制御された。比較のため、同じビーム条件下で傾斜角を±0.2度および±0.4度オフセットした注入も行った。

SIMSによる深さプロファイル測定の結果、本システムの自動チャネリング注入は±0.2度以内の注入精度を達成し、優れたチャネリングプロファイルが得られることを確認した。

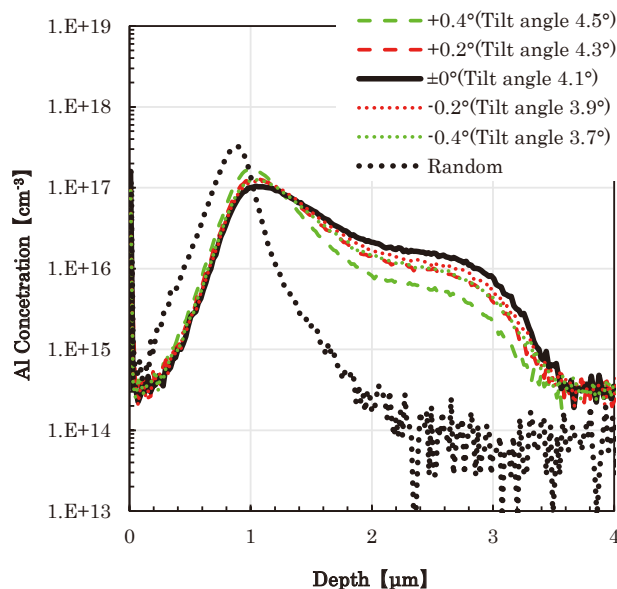


図4 チャネリング注入と、チャネリングから注入角度をオフセットしたときのイオン分布 (SIMS評価)

4. 結 言

日新イオン機器㈱は、チャネリング注入に必要な正確な注入角度制御を達成するシステムを開発した。本システムは、X線測定からラウエ斑点を使用してウェーハのオフアクシス角を分析し、注入角を自動的に補正するが、その実現のためにイオンビームの注入角に合わせてプラテンの角度をフィードフォワード制御する。本システムは、チャネリング注入角度を±0.2度の精度で制御し、深い領域でのチャネリング注入に使用される高エネルギー注入プロセスの有望な代替手段として位置づけられる。

用語集

※1 プラテン

試料を保持するための平面構造物。

※2 ファラデー

イオンのビーム電流を測定するためのデバイス。

※3 オフアクシス角

ウェーハ表面と SiC (0001) 結晶面のなす角度。

※4 アライナー

ウェーハ回転軸を調整する大気側に置かれたデバイス。

・IMPHEATは、日新イオン機器㈱の登録商標です。

参考文献

- (1) R. Wada, et al. "The exceptional advantages of channeling implantation into 4H-SiC to make abrupt deep profiles," Jpn. J. Appl. Phys., Vol.61 SC1033 (2022)
- (2) R. Maloušek, et al. "SiC diode with vertical superjunction realized using channeled implant and multi-step epitaxial growth," Materials Science Forum, Vol. 1062, pp. 549-553 (2022)
- (3) Y. Kuwata, et al. "IMPHEAT-II, a novel high temperature ion implanter for mass production of SiC power devices," MRS Advances, Vol. 7, pp. 1486-1489 (2022)
- (4) G. Hobler, et al. "Simulation study of Al channeling in 4H-SiC," 2018 22nd International Conference on Ion Implantation Technology (IIT), pp. 247-250 (2018)
- (5) S. Sakai, et al. "High performance medium current ion implanter system EXCEED3000AH-G3," AIP Conference Proceedings, Vol. 866, pp. 605-608 (2006)
- (6) H. Das, et al. "P-type and N-type channeling ion implantation of SiC and implications for device design and fabrication," ECS Transactions, Vol. 98 No. 6, pp. 119-124 (2020)
- (7) J. R. Helliwell. "Single-crystal X-ray techniques," International Tables for Crystallography Volume C: Mathematical, Physical and Chemical Tables, Vol. C, pp. 26-41 (2006)

執筆者

浜田 信吉* : Nissin ion equipment USA Inc.



平井 裕也 : 日新イオン機器㈱ 係長



臼井 洸佑 : 日新イオン機器㈱



田中 浩平 : 日新イオン機器㈱ グループ長



和田 涼太 : 日新イオン機器㈱ 主任



黒井 隆 : 日新イオン機器㈱ エキスパート



*主執筆者

出典元
浜田、平井、臼井、田中、和田、黒井、「パワーデバイスのためのチャネリングイオン注入技術」、日新電機技報 vol.70、No.2、pp.25-29 (2025.11)