

一般論文

SiCパワーデバイス用 イオン注入装置IMPHEATの開発

Development of Medium Current
Ion Implantation system "IMPHEAT" for SiC

飛川和紀*	塩尻史郎*
K. Tobikawa	S. Siojiri
趙維江*	小林友昭*
Weijiang Zhao	T. Kobayashi
白川浩*	新粥竜也*
H. Shirakawa	T. Singai
但吉正英*	井上真輔*
M. Tajiyoshi	S. Inoue
酒井滋樹*	
S. Sakai	

概要

SiCパワーデバイスは高耐圧、低損失であり熱伝導性も高いため、Siデバイスの限界を超える次世代のパワーデバイスとして自動車、電力、家電市場等から本格的量産が期待されている。SiCウェーハにイオン注入を行う場合、注入により発生する結晶欠陥がアニール時に解消されにくいという問題があるが、ウェーハを高温に加熱しながらイオン注入を行う事で欠陥の発生を抑える事が可能である。当社では2009年にSiCウェーハを高温に保ち注入を実施できる研究用イオン注入装置IMPHEATをリリースしたが、今回6インチSiCウェーハの連続処理が可能なIMPHEATの量産用装置を開発した。

Synopsis

Power device using SiC material is expected as the next generation power device which has a superior electrical performance compared to the one using conventional Si material. SiC crystal damages induced by the ion implantation are reduced by heating the wafer at high temperature during implantation. We have developed the high temperature ion implanter "IMPHEAT" for mass production of 6 inch's SiC wafers.

1. はじめに

SiCデバイスを作成するにあたり、イオン注入プロセスは不可欠であるが、注入による残留欠陥抑制のため基板温度を高温にする必要がある。IMPHEATは当社のSiウェーハ量産用イオン注入装置EXCEEDシリーズを基本にSiCウェーハの処理に必要な機能を追加しており、ウェーハを高温状態に保ちながらイオン注入を実施する事が可能である。以下の章では、IMPHEATの装置特性と注入特性について解説する。

2. 装置概要

IMPHEATは弊社のSiウェーハ量産用イオン注入装置EXCEEDシリーズと共通のコンセプトにて製作され、ほ

ぼ同様のレイアウトを有する。イオンビーム発生用イオン源として傍熱型 (IHC: Indirectly Heated Cathode) を採用し、引き出されたイオンビームは分析電磁石で分析後、アインツェルレンズを応用した収束電極付きの加速管で所望エネルギーに加減速され、FEM (Final Energy Magnet) にて加速管で発生したエネルギーコンタミネーションが完全に除去される。その後磁界スキャンマグネットとコリメーターマグネットの組み合わせで水平方向にシート状の平行ビームが作られ、機械的駆動により垂直運動を行なうエンドステーションのウェーハ保持部に均一に注入される。最大加速エネルギーは960 keV (3価イオン使用時) である。表1にIMPHEATの装置仕様を示す。

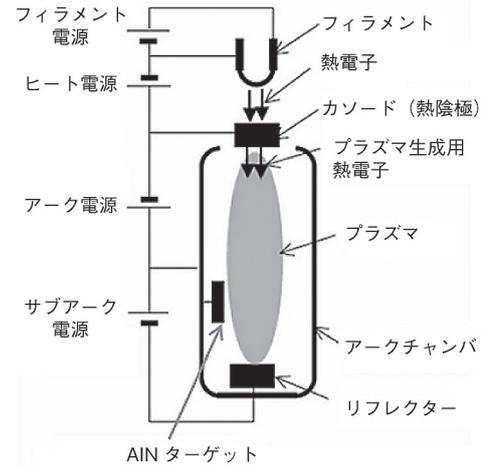
* 日新イオン機器(株)



図1 SiC用イオン注入装置：IMPHEAT

表1 IMPHEAT装置仕様

ビームエネルギー	3~960 keV (320 kV)
最大ビーム電流	Al ⁺ : 1.4mA, Al ²⁺ : 500μA, Al ³⁺ : 10eμA P ⁺ : 4.1mA, B ⁺ : 3.8mA, N ⁺ : 3.4mA
ウェーハ温度	室温~500℃
スループット	Si単結晶、SiC多結晶基板： 30w f s/h@500℃ SiC単結晶基板： 10w f s/h@500℃ (ウェーハ品質により増減)
ウェーハサイズ	150 mm, 100 mm
外形寸法	3.5 (W) × 7.0 (L) × 3.3 (H) (m)



IHC-R (Indirectly Heated Cathode with electron active Reflection) イオン源

図2 IHC-Rイオン源

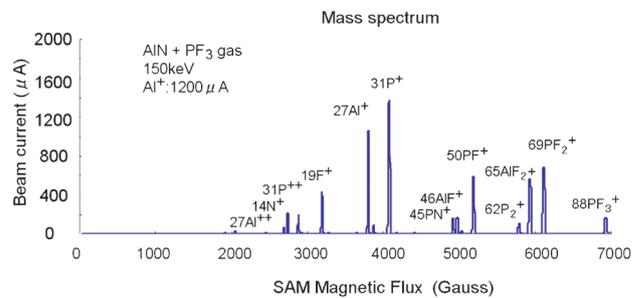


図3 Alビーム発生時のマススペクトル

3. 高電流Alビームの発生

イオン源にはプラズマ室内にAl化合物製ターゲットを装着することによりAlイオンビームの発生を可能としている。Al⁺ビームの増大を実現するために、スパッタソースに対するアシストガスの作用を確認し、エネルギーコンタミネーション低減も考慮した結果、PF₃ガスが最適であると判断した。同ガスを使用したアークプラズマに対し、そのビーム量の増減に大きく影響するイオン源パラメータとしてソースマグネット電流とアーク放電電流の最適化を行い、Al⁺ビーム電流の目標値である1.4mAを達成することに成功している。生産装置としてセットアップに時間を取られないという要素も重要であるため、上記の条件を反映した装置全体の運転パラメータ群を作成し、使用領域のエネルギー、ビーム電流レシピにおいて自動立ち上げ時間が平均4分が可能であることを確認した。(1)(2)(3)

ビーム電流の増大に伴い、イオン源を冷却状態から運転する場合に引出放電の問題が発生したが、それに対して適切なコンディショニングシーケンスを追加することにより、安定稼働を可能としている。図2にIHC-Rイオン源の構造、図3にPF₃ガスを使用しAlビームを発生させた場合のマススペクトルを示す。

4. 高温自動搬送システム

4. 1 高温静電チャックへのウェーハ搭載と離脱

IMPHEATでは処理チャンバ内ウェーハ保持部(プラテン)を高温に加熱し、ウェーハを静電吸着させ高温注入を実施しているが、プラテンにウェーハを搬送後直ちに吸着を行うと、ウェーハ自身の熱膨張により、「割れ」や「はね」が発生してしまう。この問題に対し、静電チャックによるウェーハ吸着前の待ち時間の追加と、吸着時の印加電圧をなめらかに制御する事で、ウェーハに掛かるストレスを低減し、ウェーハの「割れ」を防止している。また、ウェーハの静電チャック吸着OFF後、高温プラテンとウェーハの接触面に残留電荷量が多い場合、そのままウェーハ引き剥がし動作を実施するとウェーハの「はね」が発生する。この残留電荷を消去する為、ウェーハ吸着OFF実行時に、吸着電圧に対し、逆電圧を段階的に印加するシーケンスを追加した。この改良と同時にウェーハ引き剥がし動作において、プラテンを傾けて引き剥がすように改良を実施し、ウェーハの「はね」の問題を解決している。

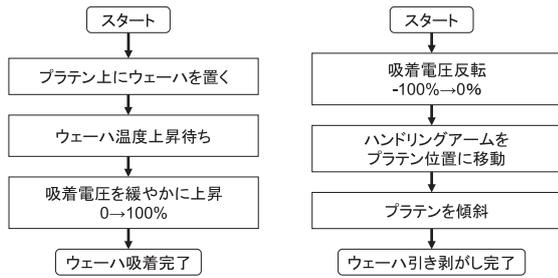


図4 ウェーハの吸着と離脱

4. 2 搬送パラメータ可変システム

搬送するウェーハの材質及び設定温度によって最適な搬送パラメータが異なるため、従来装置ではその都度に設定変更が必要となり、異なるパラメータでの自動連続搬送が出来なかった。その為、装置の注入条件設定画面にて、ウェーハ材質及び目標設定温度を指定する事により、最適な搬送パラメータ群が装置により選択されるシステムを提供し、材質の異なるウェーハを自動連続搬送可能としている。また熱変形の激しいウェーハに対しては熱変形が少ない状態でプラテンに吸着後、目標温度まで昇温させるシーケンスを開発した。

4. 3 放射温度計によるウェーハ温度計測システム

プラテン上で吸着されたウェーハは高温に昇温され静電チャックにより加熱される。この時静電チャックプラテン取り付けモジュールに組み込まれた熱電対信号によりプラテン温度は一定に制御されているが、吸着されたウェーハの温度はプラテン温度と静電チャックの吸着力に応じて変化する。静電チャックプラテン上のウェーハ温度を知るために、ウェーハ温度を放射温度計で計測するシステムを開発した。⁽⁴⁾ SiCウェーハの赤外線放射特性（放射率、透過率）の測定を実施し、SiC計測に最適な赤外線波長を調査した。その結果、放射率が高く透過率が小さい $5\mu\text{m}$ に測定波長を決定した。大気側に設置した放射温度計にて真空中の温度測定を行うには、赤外線が透過可能なビューポートが必要となる。ビューポート材質については、赤外線波長 $5\mu\text{m}$ での測定のため、良好な透過率が得られる CaF_2 （フッ化カルシウム）を採用した。

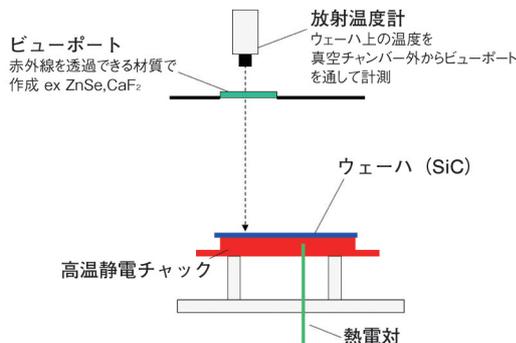
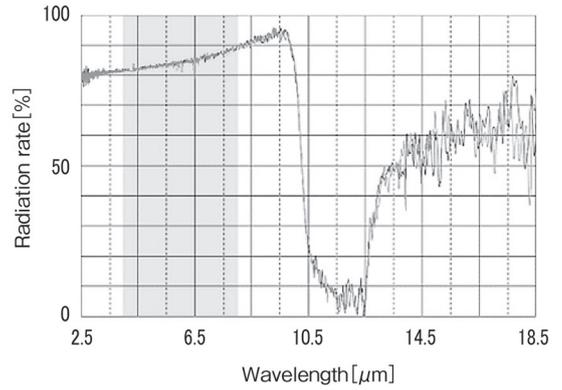
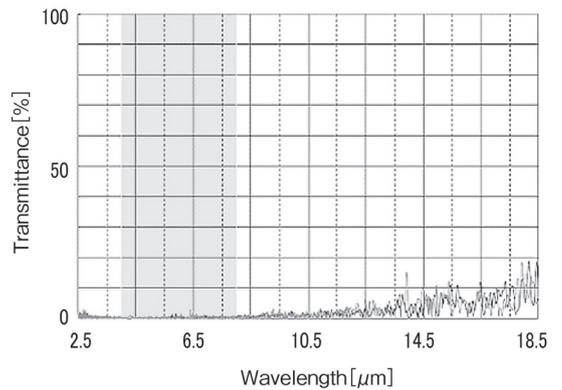


図5 放射温度計によるウェーハ温度計測



SiC単結晶ウェーハ（4H-N）の放射率



SiC単結晶ウェーハ（4H-N）の透過率

図6 SiC単結晶ウェーハ（4H-N）の赤外線分光スペクトル

4. 4 ウェーハ面内温度均一性の改良

ウェーハの面内温度均一性はプラテンからの熱輻射のため、高温になるほど外周部の温度が低下し悪化する傾向がある。このためプラテン外周部の吸着力をプラテン中心部より強める事ができるパターンとする事でプラテン外周部の温度低下を抑制している。⁽⁴⁾ またプラテンのヒーターパターンについても同様に外周部のみにヒーターを配置し、外周部の温度を高くできるように改良した。図7に吸着電極パターン及びヒーターパターンについて従来型と改良型の違いを示した。

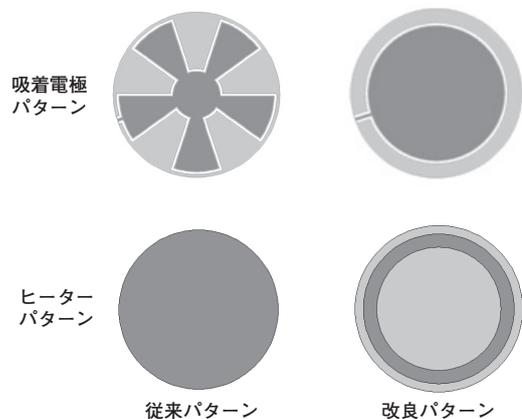


図7 静電チャック吸着電極及びヒーターパターン

図8はSiCウェーハの温度分布を放射温度系にて測定した結果である。従来型に比べて面内温度差が約50℃から約20℃まで改善されていることがわかる。

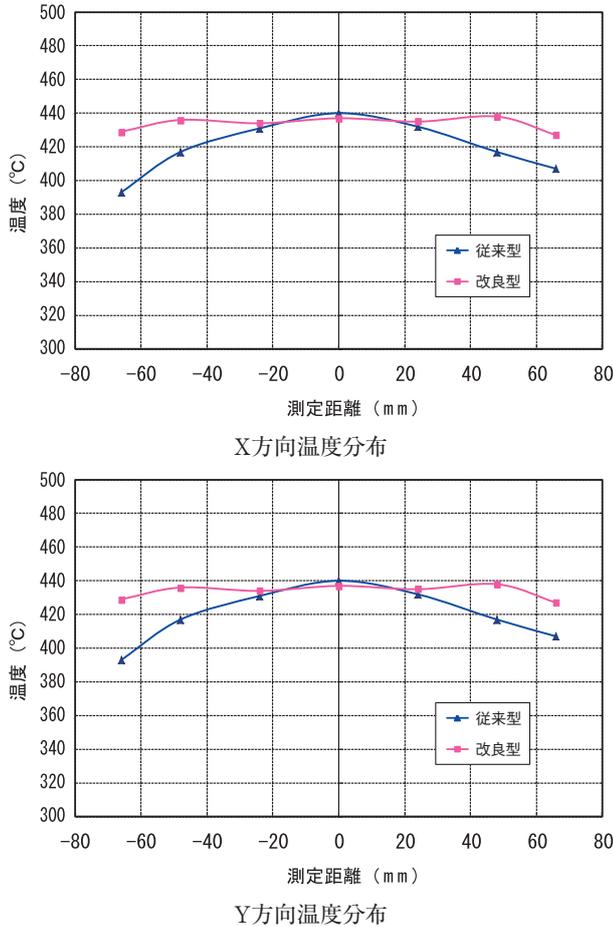


図8 放射温度計によるウェーハ温度分布測定結果

5. イオン注入特性

IMPHEATで500℃のSiCウェーハにAl⁺ビーム100keV, 5E14cm⁻²を注入した場合のAlの二次イオン質量分析SIMS分布と注入深さをシミュレーションするソフト「TRIM」⁽⁶⁾⁽⁷⁾によるシミュレーション結果を、図9に示す。SIMSとTRIMの分布は、裾野部分を除けば、よく一致していると言える。⁽¹⁾⁽⁵⁾

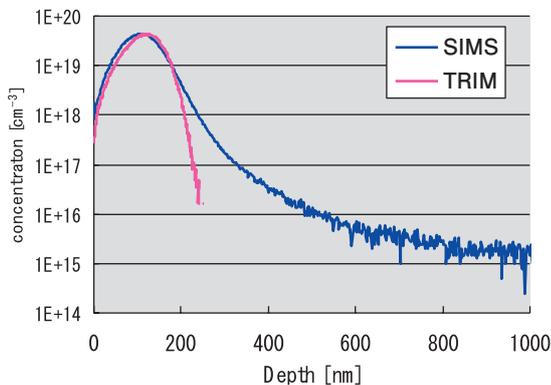
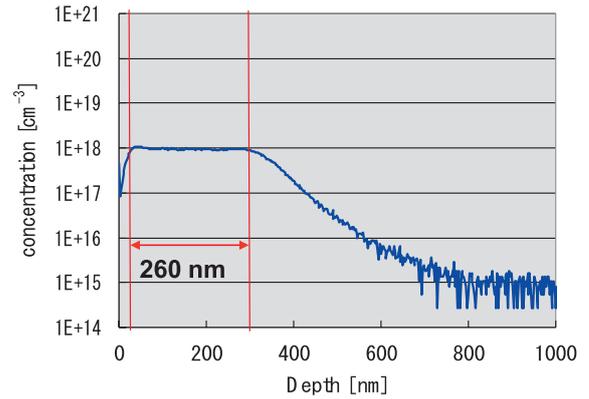


図9 Al⁺100keV, 5E14cm⁻²注入時のSIMSプロファイル 2インチSiCウェーハ、高温注入(500℃)



注入条件	Energy [keV]	Dose [cm ⁻²]
チェーン注入	250	1.60E+13
2インチSiCウェーハ	150	8.00E+12
高温注入(500℃)	90	5.50E+12
	50	3.00E+12
	30	2.00E+12
Total		3.45E+13

図10 チェーン注入時のSIMS分布

SiC注入では結晶中のキャリアの濃度分布を深さ方向に一定にするため、複数のエネルギーを用いた注入を同時に行うチェーン注入が用いられる。図10にAl⁺ビームのチェーン注入SIMS分布を示す。⁽¹⁾⁽⁵⁾結果から深さ260nmの領域で均一な注入分布が達成されている事が確認できる。IMPHEATでは吸着と離脱を注入回数分繰り返す事なく、異なるレシピの注入が実施可能なチェーン注入システムを追加しており、高温連続注入時の処理時間を短縮し、ウェーハストレスを低減させている。

図11に、室温の6インチSiウェーハにP⁺ビーム100keV, 1E14cm⁻²を注入し、アニールしたウェーハのシート抵抗Rs分布を示す。均一性0.15%が得られており、通常のシリコンデバイス用EXCEEDイオン注入装置と同等の面内均一性が得られている。⁽⁴⁾⁽⁵⁾

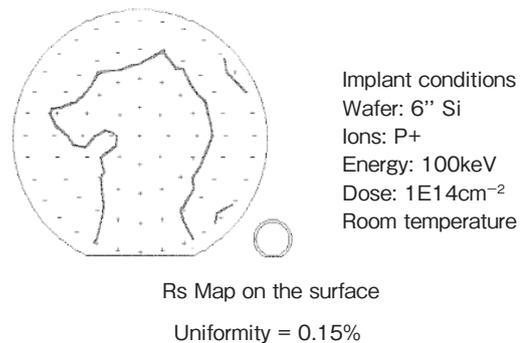


図11 ウェーハ注入均一性

6. まとめ

大口径SiCウェーハ量産用イオン注入装置IMPHEATの装置性能と注入特性を紹介した。本装置を使用したSiCパワーデバイスの量産が開始されている。イオン注入時にウェーハを高温に保持し、結晶ダメージを低減させる技術はSiCパワーデバイス以外のプロセスにも応用可能と考えられ、本装置で開発した機能が他のプロセスへ有効利用される可能性が期待される。

今後の課題としては、搬送パラメータの最適化による処理能力向上、信頼性及び耐久性の向上、更なる高温時のウェーハ端部までの温度分布の平坦化等が挙げられ、性能向上のための改良を引き続き進めている。

7. 謝辞

本開発は、新エネルギー・産業技術開発機構（NEDO）殿の助成を頂いております。

参考文献

- (1) T.Igo et al., Proceedings of IIT2008,p.388(2008)
- (2) M.Miyamoto et al., Proceedings of IIT2008, p.384(2008)
- (3) S.Umisedo et al., AIP Conference 1066, Proceedings of IIT2008,p.296(2008)
- (4) K.Tobikawa et al., IIT2012, AIP Conf. Proc. 1496, 332 (2012)
- (5) M.Tanjo et al., 学振 結晶加工と評価技術第145委員会 第133回,研究会最新イオン注入装置と新材料への応用(2013)
- (6) J.F.Ziegler et al, The Stopping and Range of Ions in Solid. Pergamum, Press NewYork, 1985.
- (7) SRIM-2013
<http://www.srim.org/>

執筆者紹介



飛川 和紀 Kazuki Tobikawa
日新イオン機器(株) I/I事業センター
プロセスエンジニアリンググループ 主任



塩尻 史郎 Siro Shiojiri
日新イオン機器(株) I/I事業センター
システムエンジニアリンググループ
エキスパート



趙 維江 Weijiang Zhao
日新イオン機器(株) I/I事業センター
プロセスエンジニアリンググループ 主任



小林 友昭 Tomoaki Kobayashi
日新イオン機器(株) I/I事業センター
システムエンジニアリンググループ 主任



白川 浩 Hiroshi Shirakawa
日新イオン機器(株) I/I事業センター
システムエンジニアリンググループ 主任



新粥 竜也 Tatsuya Shingai
日新イオン機器(株) I/I事業センター



但吉 正英 Masahide Tajiyoshi
日新イオン機器(株) I/I事業センター
システムエンジニアリンググループ



井上 真輔 Shinsuke Inoue
日新イオン機器(株) I/I事業センター
プロセスエンジニアリンググループ



酒井 滋樹 Shigeki Sakai
日新イオン機器(株) I/I事業センター
プロセスエンジニアリンググループ 長