

特 集 論 文

関連するSDGs



イオン注入装置の変遷と今後について

Changes in Ion Implantation Tools and Future Efforts

井 内 裕
Inouchi Yutaka

概要

イオン注入装置は、高電圧技術や真空技術を基礎として、イオン生成、イオン輸送、基板搬送技術、およびイオン注入技術を必要とする総合的な技術の側面を持って進化してきた。本稿では、イオン注入装置の技術的な発展の歴史を振り返るとともに、当社の代表的なイオン注入装置の特長および今後の展望を解説する。

Synopsis

Ion implanters continue to develop with various technologies such as ion production, ion transportation, substrate transfer and ion implantation on the basis of high voltage and low pressure technologies. Their development history is briefly reviewed and advantages of some leading implanters of NIC are explained. In addition, our future technological expansion is introduced.

■ 1. はじめに

イオン注入装置は、高電圧技術や真空技術等の基盤技術の上に、イオンビーム発生・輸送技術や基板搬送技術といった幅広い分野の高度な技術を用いて構成されている。

本稿では、当社のイオン注入装置の主な技術を製品とともに紹介する。

■ 2. イオン注入装置の概要

イオン注入装置を、注入ターゲットがウェーハであるかガラス基板であるかにより大別すると、半導体製造用イオン注入装置とフラットパネルディスプレイ（以下FPD）製造用イオン注入装置に区別される。各装置は、所定量のイオンを決められたエネルギーでターゲットに注入するという点では同じであるが、当社においては、それぞれ別の技術背景を持っている。次節以降では、各装置の技術的な歴史とともに当社のイオン注入技術について紹介する。

2. 1 半導体製造用イオン注入装置

イオン注入装置には、イオン源にてイオンを生成し、高真空中で輸送する中で質量分離・加速する技術が使用されている。その技術のルーツは、1930年代以降に物理の分野で開発された荷電粒子加速器、同位体元素分離器にさかのぼる。その後1950年代に入り、これらの技術を表面改質や半導体の電気的特性改善に適用するための開発がおこなわれた。

当社は1970年代に、上記のイオン注入技術に着目して、事業参入した。当時は、イオン注入プロセスで製作される半導体素子形成においてアニール技術に課題があり、参入には障壁がある状況であった。しかしながら、その課題はいずれ解決されると考えられたこと、また定量性に優れたイオン注入技術は必ず採用されると判断し、当社は半導体用イオン注入装置を市場投入した。これまでに市場投入した機種は約30機種に及ぶ⁽¹⁾。半導体市場におけるニーズの急激な変化に追随する形でイオン注入技術も進化しており、その時々必要性を判断して開発を継続してきた。ビジネス的にはその時点での直接の成果に結びつかなかった機種も多いが、技術的には大き

な成果をもたらした機種も多く、それらの技術の蓄積が当社製品を支えてきた。その中で、当社の製品におけるエポックメーキングな装置は、1990年代に発売を開始したEXCEED2000シリーズである⁽²⁾。

EXCEED2000シリーズより、200mmウェーハ用として代表的なEXCEED2000Aの概要図を図1に示す。

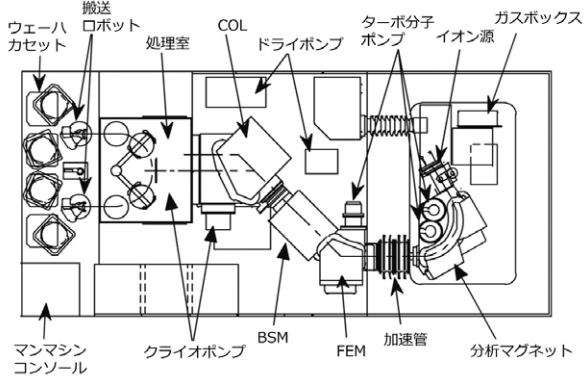


図1 EXCEED2000A

主要なパーツとして、イオン源⇒分析マグネット⇒加速管⇒FEM（エネルギーフィルターマグネット）⇒BSM（ビームスイープマグネット）⇒COL（平行化マグネット）⇒シングルプラチエンステーションから構成されており、以後のEXCEEDシリーズは全てこの構成としている。

ウェーハに対する入射角を常に一定に保つ平行ビーム注入機構は、前シリーズにて技術確立されており、EXCEEDシリーズでは、これを踏襲している。EXCEEDシリーズでは、BSMとCOLを用いた磁場によるビーム高速走査という独自の方式を採用した。磁場によるイオンビームの高速走査は、電場走査と比較して空間電荷効果による影響を受けにくく、精度の高い注入ビーム制御に寄与している。

また、FEMは当時他社に先駆けて搭載した要素で、それにより実現される機能は、本シリーズを特長づけている。FEMを搭載することで、加減速後にビームに含まれるエネルギーコンタミ成分を完全に除去することができ、トランジスタのVtばらつきを抑制する製造プロセスを実現した。

2. 2 FPD製造用イオン注入装置

1980年代後半に、ウェーハ上に半導体を生成する半導体製造用イオン注入装置の技術をベースにして、ガラス基板上のTFT（Thin Film Transistor）へのイオン注入プロセスも開発されつつあった。ただし、当時の半導体用のイオン注入装置で処理できる基板サイズは直径6インチ程度であり、FPD製造

用を使用される大型ガラス基板へのイオン注入は、技術利用や処理能力の点で困難であった。当社は、他社研究機関との共同装置開発を実施し、基板の全域を覆う円形で均一なビームを注入する方式を採用し、この課題を解決した。

そして、1990年に研究用装置として、ID-100の1号機を納入した。本装置が世界で初めて納入されたFPD用イオン注入装置である。

当時からFPD用イオン注入装置は、半導体用と比較して、イオン注入均一性の精度や不純物のコンタミネーションの許容値を広くできることが判明していた。従来のイオン注入装置では、単孔電極から発生したイオンビームを質量分離マグネットに通過させて必要なイオンを取出し、ビームと基板を走査して注入する方式を採用していた。これに対し本装置は、多孔電極を用いてプラズマ生成室で発生した全てのイオンをシャワー状に注入することで、大面積注入による高処理能力を実現した。これを、従来装置と区別して「イオンドーピング装置」と名付けた。

イオンドーピング装置は、電子移動度が高い多結晶シリコン：LTPS（Low Temperature Polycrystalline Silicon）のTFT製造プロセスに使用でき、画素駆動回路の組み込みやTFTを小型化できることから、ディスプレイを小型高精細化／低消費電力化できる特徴があったが、製造コストが高いという課題が残っていた。このため、当時のFPDの大量生産における画素部のTFT製造プロセスは、成膜とエッチングの組合せにより製造されるアモルファスシリコンが主流であり、イオンドーピング装置は使用されなかった。イオンドーピング装置を使用するLTPSプロセスは、スマートフォンに使用するFPDの製造に利用されるまで、幾多の開発・改良が重ねられた。その中でも重要な開発は、全面照射型からリボンビーム+1次元スキューンへ移行した装置開発である。この開発においては、イオン源としてマルチカスプ型の採用、大型ガラス基板の垂直搬送やダブルプラチエン構成等、さらにはマルチファラデーカップによるビーム計測およびイオン源フィラメントへのフィードバックによるビームプロファイル制御等、現在のイオンドーピング装置の要素技術の開発を進めた⁽³⁾。

上記要素技術のうちマルチカスプイオン源は、1960年代から産学官で開発されていた核融合炉へのエネルギー供給用としての中性粒子入射装置のイオン源に端を発している。当社はそのイオン源開発に参画しており、そこで培われた技術を応用している。

これらの開発・改良が重ねられた装置は、簡易的なマスフィルタリング機能は持っていたが、半導

体製造用イオン注入装置のような分析マグネットを持たないため、不純物イオンの注入は避けられなかった。このため、素子微細化のトレンドは、半導体用ほどではなかったが、素子高機能化を含めて、分析マグネットの実装開発を進めた。こうして開発されたのが、第4.5世代ガラス基板に対応した質量分析付きのイオンドーピング装置iG4⁽⁴⁾である。図2にiG4の分析マグネットおよびビーム軌道の様子を示す。

iG4以降のイオンドーピング装置に共通した装置コンセプトは、イオン源からターゲットまでビームを同じ形状で輸送することである。そのため、ビームラインでのレンズ系は極力使用せず、ターゲット上でのビームの凹凸はイオン源プラズマの密度制御により平坦化をおこなっている。

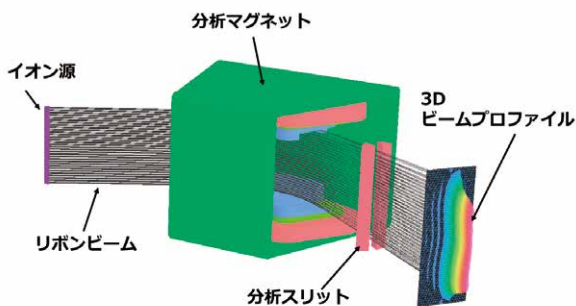


図2 iG4の分析マグネットとビーム軌道

3. 現在の主力装置

パワー半導体向けのイオン注入装置として、先述のEXCEEDシリーズの技術を展開したIMPHEAT^(*)シリーズを開発し、現在主力装置として世界展開している⁽⁵⁾。また、FPD製造用イオン注入装置では、先述のiG4から進化を続け、現在は第6世代基板対応のイオンドーピング装置iG6が主力装置となり、この世代向けのイオン注入装置としてはシェア100%である。

本章では、IMPHEATシリーズおよびiGシリーズの概要を紹介する。

3.1 半導体製造用イオン注入装置IMPHEATシリーズ

SiC（炭化ケイ素）を用いたパワー半導体は、従来のものと比べ高電圧・高温耐性が優れていることから、今後電気自動車の普及に伴い、その市場成長が見込まれている。当社は、2009年に世界初となる量産に対応した4インチのSiCウェーハ向け半導体製造用イオン注入装置IMPHEATをリリースした^(6,7)。その後、ウェーハの自動搬送システムおよび搬送シーケンスの最適化、ウェーハ面内の

温度均一性向上、およびチャージアップ防止用高周波プラズマフラッドガンの搭載等の開発を継続し、2013年には6インチのSiCウェーハに対応した半導体製造用イオン注入装置を実現した⁽⁸⁾。

加えて、SiCパワー半導体の省電力化のためには、ウェーハの厚みを薄くする必要があるが、これにより注入時あるいは搬送時のウェーハが大きく変形する。これへの対応の一つとして、従来の静電チャックに、ウェーハを固定する機械的なクランプ構造の追加（図3）などを行い、変形したウェーハの搬送・処理を可能とすることで、薄いウェーハのメカニカルスループット（搬送スピードによるスループット）を飛躍的に向上させることができた。



図3 機械的なクランプ構造を追加した静電チャックモジュール

2019年には搬送系の大幅な改良やアルミイオンビーム電流量を増大し、8インチのSiCウェーハに対応したIMPHEAT-IIを市場投入した。IMPHEAT-IIの外観図を図4に示す。



図4 IMPHEAT-II 外観

本装置の具体的な改良項目としては、8インチのSiCウェーハ搬送に対応させるべく、ウェーハの予備加熱機構、真空内での高速搬送機構、ウェーハ取り出し時の冷却強化等の機能追加をおこなった。今後も、SiCパワー半導体製造用イオン注入装置のトップメーカーとして、顧客要求を先取りして開発・改良を継続していく所存である。

3. 2 イオンドーピング装置iGシリーズ

2000年代後半に、スマートフォンが登場したことで、そのディスプレイ製造プロセスにおいて、LTPSが使用され、FPD製造用イオン注入装置の需要が急速に高まった。

FPDの場合は、微細化やプロセスに違いはあったとしても、生産性の向上のために、基板サイズの拡大が常に要求される。当社では、イオンドーピング装置の市場要求に応えるべく、2003年のiG4に続き2011年に第5.5世代基板対応のiG5、第6世代基板対応のiG6を市場投入した。

iG4からiG6の継続的な開発において、重要なものは、マルチカスプイオン源内でのマスフィルタリングによるボロンイオンビームの電流アップ方法の確立⁽⁹⁾と、生産現場での装置安定稼働・メンテナンスサイクルの長期化を達成するためのクリーニング方法の開発⁽¹⁰⁾である。スマートフォンの高級機に有機ELディスプレイが採用されたことから、ボロンイオン注入の生産性が重要視されたことも、iGシリーズの需要を増やし、iG6は、シェア100%を維持している。

また、iG5以降のイオンドーピング装置においては、装置重量の増大を抑制するため、分析マグネットはポールを持たない空芯構造を採用している。iG6の概略図を図5に示す。

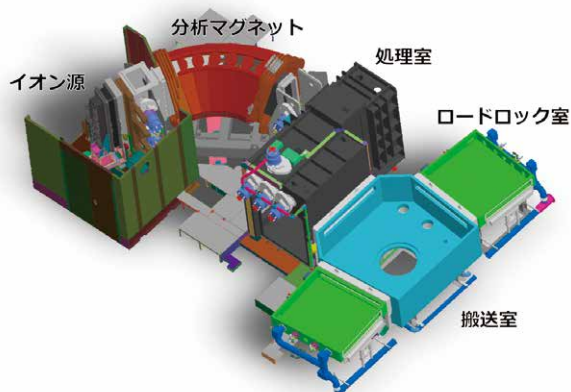


図5 iG6概略図

4. 今後の装置展開

本章では、当社の装置開発における要素技術の方向性について、それぞれ紹介する。

4. 1 大電流低エネルギーでのイオン注入技術

当社はこれまで、大電流注入機、高エネルギー注入機を含め、種々のイオン注入装置を開発してきた。

先述の当社製品群のうちEXCEEDシリーズは、イオンビームの電流量、注入エネルギー、注入角度の精度等のいわゆる“質”を重視したウェーハ用の中電流の装置である。iGシリーズは、大面積を高生産性で処理するためのビーム電流“量”を重視するFPD用のイオン注入装置である。ただし、本装置のビームは高電流密度ではなく、低電流密度だが大面積ビーム輸送によって大電流注入装置になっている。これらのことから、両技術を活かした当社ならではの、長尺ビームを利用したウェーハ用の大電流装置の可能性が見え、より低エネルギー領域への装置展開を考え、開発中である。

装置の適用先としては、従来からの“注入”だけでなく、“表面改質”も視野に入れ開発している。その一例として、SiO₂絶縁膜のエッチングレートを高ドーズイオン注入により制御可能であることがわかっている⁽¹¹⁾。

4. 2 iG8

イオンドーピング装置としては、生産性の向上や、注入プロセスのより大画面への適用などから、大型基板に対応した装置の開発が期待されている。当社も、第8世代基板対応に向けて、要素技術の開発と、装置の検討を行っている。

4. 3 チャネリング注入

当社では、EXCEEDシリーズやIMPHEATシリーズを納入した顧客に対し、積極的なプロセス提案をおこなっている。特に顧客から関心を集めているものの一つとして、チャネリング注入がある⁽¹²⁾。例えば、4H-SiC基板にAl（アルミニウム）、P（リン）、B（ボロン）、N（窒素）イオンを結晶の軸あるいは面にはほぼ平行に注入した場合、それぞれのイオンと基板間の電子阻止能の違いにより、ボックス型の注入プロファイルから、最深領域にピークがあるようなプロファイルとすることが可能である。上記の基板とイオンの組み合わせにおいては、AlおよびPイオンでは前者のプロファイルになり、BおよびNイオンでは後者のプロファイルになる。図6にAlおよびBイオンを注入した場合のSIMS（二次イオン質量分析法）により得られた注入イオンの深さ方向の分布（Depth Profile）を示す。

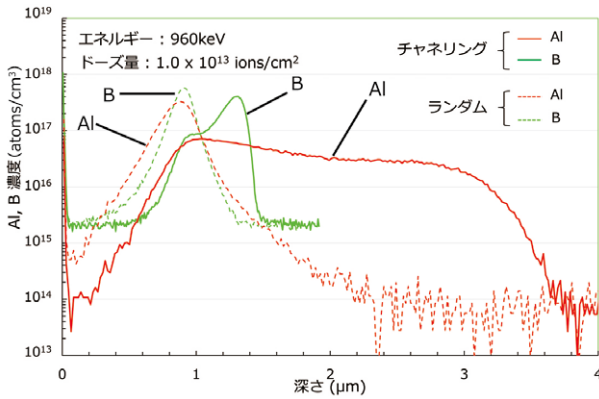


図6 SIMSによるDepth Profile

Alイオンの場合は、チャネリング注入とそうでない場合で注入深さに3倍の差が出ていることがわかる。また、チャネリング注入により、深さ方向およびそれに垂直な方向の注入分布のテールを急峻にすることが可能であることがわかった。これは、図6のチャネリング注入時の深さ分布の右端が急峻に落ちていることにも表れている。また、チャネリング注入により、高エネルギー注入装置領域においても、プロセスによってはIMPHEATの使用により、高エネルギー注入機よりも効率よく処理することが可能である。

4.4 酸化物半導体へのイオン注入

酸化物半導体のうち、a-IGZO (amorphous Indium-Gallium-Zinc Oxide) のような非晶質の酸化物半導体の製造プロセスは、a-Siの製造プロセスからの代替が比較的容易であり、ディスプレイの性能アップが可能であるため、近年注目を集め、盛んに開発が進められている。

当社でもa-IGZOにイオン注入処理をする技術の開発を進めている。イオン注入により、未注入に対して画期的に低抵抗化を計れるばかりでなく、プラズマ照射等と違い、注入深さ制御が可能のため、絶縁膜を介しての処理も可能であることがわかって⁽¹³⁾。図7に、a-IGZOへ各種イオンを注入したときのシート抵抗値の変化を示す。注入時のドーズ量は 1×10^{15} ions/cm²であり、注入エネルギーは注入深さが約15nmになるように設定している。注入イオン種によっては、シート抵抗値が 10^4 (Ω/sq.) 台まで下がっていることがわかる。さらに注入量により、プロセスにおけるシート抵抗値制御が可能であることもわかった。

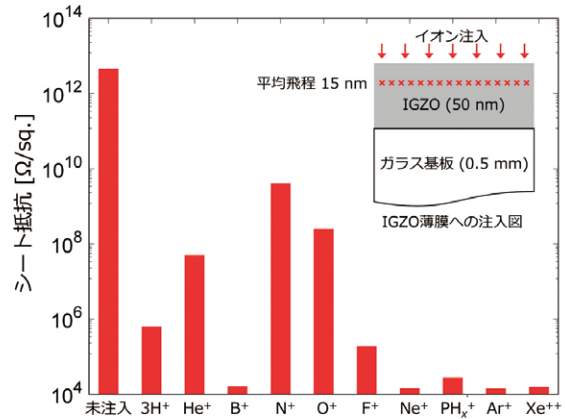


図7 イオン注入によるシート抵抗値の変化

4.5 人工知能 (AI) の適用

イオン注入装置に用いられる運転パラメータは、当社推奨の値を基本に顧客が調整することで注入プロセスの生産性を上げてきた。半導体生産装置は、これら運転パラメータの履歴が膨大にあり、目的に応じた運転パラメータの値をAIを活用し、予想することができる。当社は、上記運転パラメータの中でイオンビームをセットアップするためのパラメータの設定にAIの適用を進めており、注入プロセスの生産性向上を高い確度で実現できることを確認している。また、工場内装置の管理に対するAIの適用も検討し開発を進めている。

5. まとめ

当社グループがイオン注入装置に関わり始めてから約半世紀が経とうとしている。

本報告では、当社のイオン注入装置に関するイオン注入技術の特長を紹介し、今後の展望についても、プロセス的な面を含め、簡単に触れた。

本稿で紹介した各種装置・技術は、当社の技術開発の歴史における氷山の一角でしかない。今後も多くの開発を続けながらニーズに沿った製品展開を続け、イオン注入装置事業の発展に寄与していく所存である。

参考文献

- (1) 内藤 他:「イオン注入装置事業と技術のあゆみ」, 日新電機技報, Vol.62 No.1, pp.141-154 (2017)
 - (2) T.Kawai, M.Naito, et al.:“Nissin EXCEED 2000 - A New High Performance Medium Current Ion Implanter” , Proceedings of Ion Implantation Technology -94, pp.470-473
 - (3) M.Naito, Y.Ando, et al.: “Ion source for large area processing” , Rev.Sci.Instrum., Vol.71, pp.1023-1028 (2000)
 - (4) S.Dohi, Y.Ando, et al: “Increase of Beam Current Mass-Separated by Long Gap Dipole Sector Magnet for S/D Process in FPD manufacturing” , Proceedings of 16th International Conference on Ion Implantation Technology, pp.417-420 (2006)
 - (5) 濱本:「SiCパワー半導体向けイオン注入装置”IMPHEAT”の海外展開」, 日新電機技報, Vol.65 No.2, pp.45-48 (2020)
 - (6) T.Igo, et al.:“Development of Medium Current Ion Implanter “IMPHEAT” for SiC” , Proceedings of Ion Implantation Technology 2010, pp.388-391
 - (7) K.Tobikawa, et al.:“IMPHEAT high temperature ion implantation system” , Proceedings of Ion Implantation Technology 2012, pp.332-335
 - (8) 飛川, 塩尻 他:「SiCパワーデバイス用イオン注入装置IMPHEATの開発」, 日新電機技報, Vol.58 No.2, pp.36-40 (2013)
 - (9) Y.Inouchi, et al.:“Mass Filtering Function of Magnetic Boundaries in Multi-Cusp Ion Source” , Proceedings of Ion Implantation Technology 2010, pp.500-503
 - (10) T.Matsumoto, et al.: “NISSIN iG5 implantation tool for Generation 5.5 in the flat panel display industry” , Proceedings of Ion Implantation Technology 2012, pp.324-327
 - (11) R.Wada, H.Kai, et al.: “Surface modification of SiO₂ thin film using high-dose ion implantation technique as a suitable manufacturing process” , JJAP, Vol.59, SGGA03 (2020)
 - (12) R.Wada, et al.: “The exceptional advantages of channeling implantation into 4H-SiC to make abrupt deep profiles” , JJAP, Vol.59, SGGA03 (2020)
 - (13) T.Ui, R.Fujimoto et al: “Characteristics of noble-gas-ion-implanted amorphous-InGaZnO films on glass” , the 27th AM-FPD '20 pp.115-118 (2020)
- (*) 「IMPHEAT」は、日新イオン機器(株)の登録商標です。

執筆者紹介



井内 裕 Inouchi Yutaka
日新イオン機器株式会社
技術主幹