

〔8〕 イオン注入装置

当社製品であるSiC（炭化ケイ素）パワーデバイス向けイオン注入装置（IMPHEAT^(*)-II）⁽¹⁾が、第27回半導体・オブ・ザ・イヤー2021（電子デバイス産業新聞社主催）の半導体製造装置部門において、グランプリを受賞した。SiCやSi（ケイ素）などの半導体パワーデバイスは、EV（電気自動車）を代表とするモビリティの電動化、カーボンニュートラルの推進という大きな潮流に対するキーデバイスであり、デバイスメーカーの開発競争が活発化している。SiCは物理特性上で有利である一方、コストや供給量の観点から現時点においてはSiパワーデバイスが主流であり、この分野の技術的進展も重要である。

本稿では、Siパワーデバイスに関連し、Si-IGBT（絶縁ゲート型バイポーラトランジスタ：Insulated Gate Bipolar Transistor）におけるプロセス開発の事例を紹介する。

および、当社はフラットパネルディスプレイ（FPD）向けイオン注入装置においては、現在、6世代基板向けイオン注入装置の唯一のサプライヤーとして、FPD製造用イオン注入装置「iG6」を供給している。近年、高性能なディスプレイパネルが、スマートフォンより大型のタブレットPCなどにおいても要求されており、これを実現するために、より大型の8.5世代基板へのイオン注入工程の適用が検討されている。この流れに速やかに対応するため、主要コンポーネントの開発を進めており、今回はその一つである注入機構部の開発状況を紹介する。

また、近年、機械学習をはじめとするAI（人工知能）の開発が活発に行われており、産業分野への適用が本格化している。半導体製造装置の分野でもAIを装置運用に利用し、運転状態や製品歩留まりの改善、設備の予防保全などへの適用が試みられている。本稿では、当社が行っているビームのセットアップ最適化へのAI適用について紹介する。

（日新イオン機器株式会社）

8. 1 水素イオン注入を用いたSi-IGBTのFS層形成

近年の環境意識の高まりから、世界各地で電化および省エネルギー化が進められている。これらの実現には、モーターや電源といったパワーエレクトロニクス機器の低電力化および、パワー半導体デバイスの性能向上が重要である。このような状況下で、Si-IGBTは、電導度変調効果により、高耐圧でも低いオン抵抗を実現できることから、幅広い分野のパワーエレクトロニクス機器に採用されている。Si-IGBTは、ライフタイムコントロールやノンパンチスルー構造・微細化・トレンチ構造・ウェーハの薄型化などにより、性能向上が図られている。その中で、1で示すようなSi-IGBTのフィールドストップ（以下、FS）層形成は、パンチスルー抑制や電界緩和による高耐圧化が可能となり、性能向上のための非常に重要な技術となっている。

近年、より薄膜化した状態で高耐圧を維持するために深いFS層の形成が強く要求されている。そこで、注目されているのが、ウェーハ裏面からのH⁺イオン注入を用いたFS層の形成である。H⁺イオンは、飛程を深くできることや、比較的低い熱処理温度で結晶欠陥と結びつき、ドナー化することから、FS層への応用が期待できる。当社は、イオンを400keVまで加速させることができる、Si-IGBTの裏面プロセス用のイオン注入機「EXCEED 400HY」をお客様に提供しており、本稿では、本製品による、H⁺イオン注入でのFS層形成（ドナー化）について報告する。

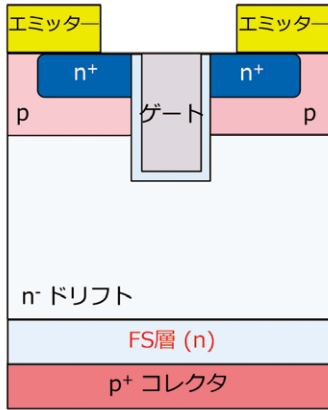


図1 Si-IGBTの構造

H⁺イオン注入によるドナー化を評価するために、n型のFZ-シリコンウェーハ（FZ-Si）に、H⁺イオンを400keVに加速させて注入を行った。また、注入後、400℃低温熱処理を行い、Spreading Resistance法（以下、SR法）にてドナー濃度を確認した。低温熱処理を採用しているのは、裏面注入は、表面側にデバイスがすでに形成されているため、アルミニウム配線の耐熱性から、450℃以下の熱処理が要求されているためである。

図2に、H⁺イオン注入後の二次イオン質量分析法（SIMS）で求めた深さ分布と、400℃熱処理後のSR法で測定したドナー濃度分布を示す。本図より、H⁺

イオンを400keVまで加速させて注入することで、約4.5μm付近の深さまで注入できることがわかる。さらに、熱処理後のドナー分布より、注入ピークの4.5μm付近から表面までドナー化していることがわかる。ここで、表面までドナー化しているのは、H⁺イオンが表面まで拡散したためと考えられる。また、FS層として作用するために十分なドナー濃度である10¹⁶cm⁻³を実現した。

EXCEED 400HYは、H⁺イオン注入に特化した装置であり、非常に生産性が高いことから、上記の内容と併せ、量産技術としてSi-IGBTのFS層形成プロセスへの適応を期待している。

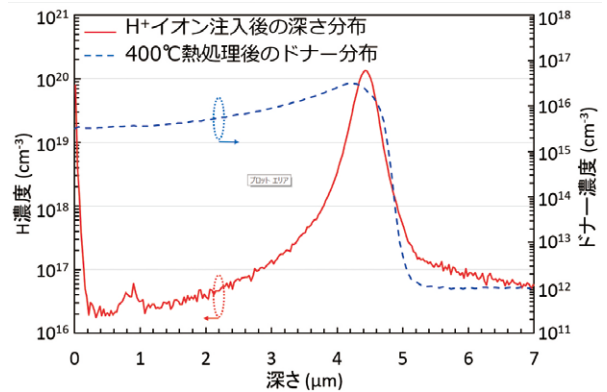


図2 FZ-Siに400keV：4.0×10¹⁵ ions/cm²の条件でH⁺イオンを注入した時の深さ方向の分布と熱処理後のドナー濃度の分布

8. 2 8.5世代基板対応注入機構部の開発

中小型パネルのフォルダブル化、大型パネルのOLED化（有機EL化）が進むことが予想され、8.5世代基板（2200×2500）での生産のニーズが高まっている。

当社では、このニーズの高まりを受け、8.5世代基板向けイオン注入装置の要素技術開発に着手した。本開発にあっては、生産性や安定性において既に高い評価を受けている当社の主力製品の6.5世代基板（1500×1850）向けイオン注入装置「iG6」と同じコンセプトを採用することで、新規開発におけるリスクの低減、開発期間の短縮を図っている。

装置内での基板の流れを図3に示す。基板はロードロックから装置に投入され、装置内の真空ロボットにより、注入機構に運搬され、イオン注入される。注入機構は、基板保持機構部と、基板保持機構部の姿勢を垂直水平にするチルト機構、および、これをビームに対してスキャンするスキャン機構とで構成される。

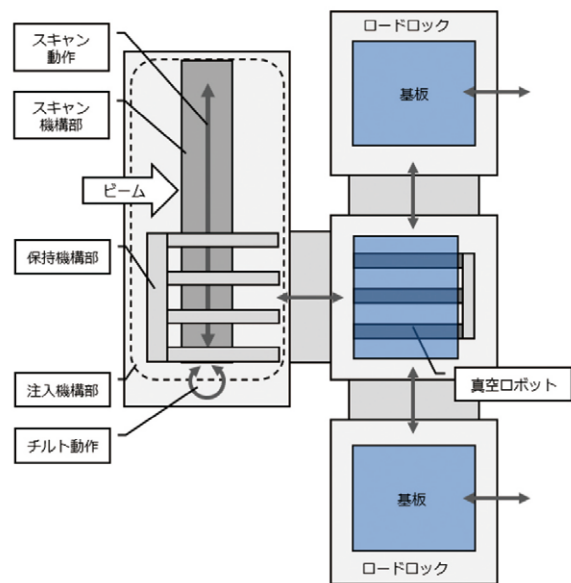


図3 基板の流れ

2021年度は、搬送システムの中でも、注入プロセスにおいて重要な要素である注入機構部を開発した。8.5世代基板向けイオン注入装置では、基板の大型化に伴い、基板のたわみや注入機構部自体のたわみが増大、および重量化に伴う位置決め精度の悪化が課題となる。この課題に対しては、基板の支持点数の最適化や保持機構の構造強化を検討・検証し、たわみ、精度とも基準内であることを確認できた（図4）。

今後は、注入機構部以外に、ビーム生成部等の開発を進め、8.5世代基板向けイオン注入装置の早期上市に向けて、要素技術開発を加速させる所存である。



図4 注入機構検証機外観

8. 3 機械学習を用いたビームチューニングパラメータの最適化

ディープラーニングの技術に代表される機械学習技術の目覚ましい発展は、IoTおよびAIの開発環境整備と社会への浸透を急速に推し進めた。半導体製造の現場においては、省人化や、製造プロセスの自動最適化、製品の歩留まり向上、および、製造設備の予知保全などの分野に適用が試みられており、当社においては、イオン注入装置のビームセットアップ機能の改善に本技術を適応し、製品プロセスの歩留まり向上や、プロセス品質再現性およびセットアップ正常終了率の改善に取り組んでいる。

イオン注入装置のビームセットアップにおいては、計画・突発メンテナンスによるイオン源内部状態の急激な変化、あるいは長期運用による引出電極アパーチャの摩耗、ビームラインのコンタミ蓄積などの複雑な物理現象の総体として、最適ビームチューニングパラメータのドリフトが数週間程度の期間に発生する。このため、必要に応じてマニュアルによるパラメータチューニングを実施する必要がある。

当社はこの工程の省人化を狙い、機械学習によるビームチューニングパラメータの自動最適化システムを開発したので、以下では本システムについて紹介する。

チューニングパラメータの最適化には、逆解析の手法を適応した。逆解析とは、入力と出力の関係が定式化できないような関係がある場合に、機械学習により予測モデルを構築し、探索アルゴリズムを用いて予測モデルから望ましい出力結果を得られる入力を探査するものである。今回は、最適化の対象となるパラメータに加えレシピ、装置状態、前回ビームセットアップの立ち上げ結果を入力として、オートセットアップの処理時間を出力とする処理時間予測モデルを機械学習で構築し、予測処理時間が最短となる入力を探査し

た。なお、データは正常な結果を得られたデータ群のみ抽出している。

前回ビームセットアップ結果は、直前の自動立ち上げ時における装置状態がその直後のセットアップに影響を及ぼすという経験則から入力として採用したものであり、事前の基礎分析からもその寄与が確認されている。

処理時間の予測モデル構築および予測モデルの逆解析には、ともにニューラルネットワーク（以下、NN）を採用した。前者をNN1、後者をNN2と省略する。

逆解析時の最適入力探索には、ベイズ最適化、遺伝的アルゴリズムなどの選択肢もあるが、今回の最適化対象となるビームチューニングパラメータは変数が多く、探索する空間次元が膨大となり計算コストが問題となることが予想された。この問題を回避する目的で、目的変数予測に寄与しない入力値については重みを下げ、効率的に最適入力を探査できるNNを探査アルゴリズムに採用した。これにより、NN2はNN1から出力される予測処理時間を損失関数としてバックプロパゲーションとして学習することが可能となり、予測処理時間を短縮するビームチューニングパラメータを出力することができる（図5）。

入力の前処理に関して、量的変数は正規化処理、マス番号や価数などの質的変数はダミー化処理を実施し、全ての変数を0-1の範囲に揃えた。

学習プロセスでは、実運用の中で得られた約1万件のビームセットアップの履歴データのうち、9割を訓練用、1割を検証用に使用した。バッチ数は100データ、学習回数は10万回、損失関数は予測セットアップ時間と実際のセットアップ時間の二乗誤差のバッチ総和を使用し、学習関数にはAdam Optimizerを使用した。

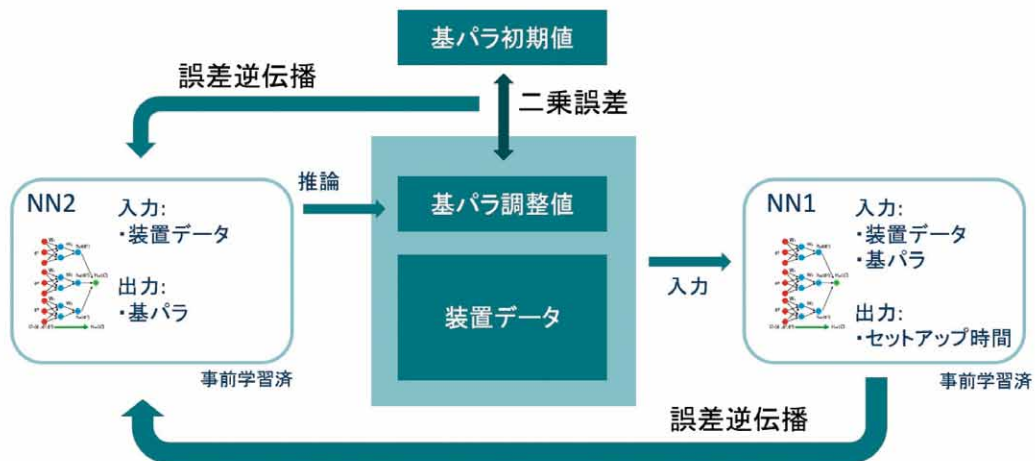


図5 ビームチューニングパラメータ調整システムのニューラルネットワーク構成

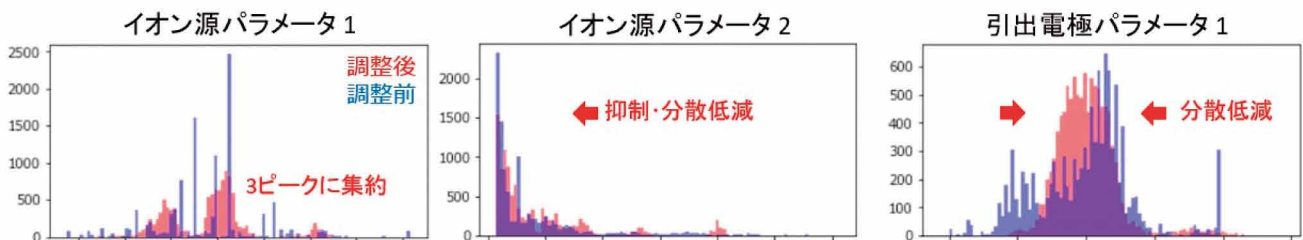


図6 ビームチューニングパラメータ調整システムによるパラメータシフトの様子

最適化後のビームチューニングパラメータの調整状況を図6に示す。図6のヒストグラムにおいては、イオン源パラメータおよび引出電極位置調整の分散値低減を実現した。分散値低減によって、製品プロセスの歩留まりの向上や、プロセス品質再現性の改善が見込まれる。

また、セットアップ正常終了率は、従来のシステムでは9割程度であるが、社内検証機での検証結果においては、安定して9割5分以上の正常終了率とすることが可能となった。

※本内容は株式会社クロスコンパスとの共同研究の成果であり、国内学会である2021年第68回応用物理学会春季学術講演会(16a-Z34-6)において報告した。

参考文献 [8] イオン注入装置

- (1) 日新電機技報, Vol. 66, No. 2, pp. 39-42 (2021.11)

(*)1 「IMPHEAT」は、日新イオン機器株式会社の登録商標です。