

〔8〕 イオン注入装置

イオン注入装置製造メーカーとして、当社は、ウェーハ用および中小型ディスプレイ用のイオン注入装置を製造・販売している。今年度の当社を取り巻く製造装置市場は、新型コロナウイルス感染症の影響を受け、各デバイスメーカーの投資は減少した。その中で、中国の景気立ち上がりがあったことから、来年度は投資の増加が見込まれている。しかしながら、現在の主力製品であるディスプレイ用イオン注入装置iG6に対する投資は、長期的には縮小方向と予測されている。そのため、新たな市場に対する装置開発に加え、新たなアプリケーション開発も行い、イオン注入プロセスの適用製品拡大を図っている。今回は、それらの取り組みの一部を紹介する。

SiC（炭化ケイ素）デバイス向けのイオン注入装置については、昨年度IMPHEAT^(*)-IIを市場投入したが、今年度は改良を行い、高生産性および高安定稼働を達成した。さらに、8インチSiCウェーハに対応した装置の開発に成功した。一方、SiCパワーデバイスの高性能化のために、従来は高エネルギー用のMeVイオン注入装置を用いていたプロセスを、注入角度精度の良いIMPHEATによるチャネリング注入を用いることで良好な結果を得ることができた。また、通常はIGZO（Indium Gallium Zinc Oxygen）TFT（薄膜トランジスタ）にはイオン注入プロセスを用いないが、イオン注入を使用することにより、TFT特性を格段に向上させることが可能であることを示し、パネルメーカーに注目されている。以下に、これらの詳細を説明する。

（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の開発（IMPHEAT-II）

SiCパワーデバイスは、高耐圧、小型、低損失、高速・高温動作が可能で、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、各デバイスメーカーで本格的な量産が開始されつつある。

SiCデバイスの製作において、イオン注入工程が必要であるが、Siデバイスと比べてイオン注入後の結晶欠陥が回復し難い特有の問題があり、SiCウェーハを500℃前後に加熱しながら注入する事が必要である。

当社は2009年よりSiCウェーハ向けの高温イオン注入装置を開発し、2020年時点で4インチ、6インチSiCウェーハ向けの連続自動処理可能な量産機（IMPHEATシリーズ）を市場に投入している。2011年度の初号機リリース以降、これまで継続的な開発として、ウェーハの自動搬送システム開発及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、及びチャージアップ防止用高周波型プラズマフラッドガン

（RF-PFG）の搭載など顧客より要求される量産装置としての改良を実施した。

2019年度には、IMPHEATをベースにした新型イオン注入装置IMPHEAT-IIを開発した。IMPHEAT-IIでは搬送系の大幅な改良を行い、装置の搬送スループットを3倍に改善し、またイオン源の改良により、安定稼働と高生産性を実現している。

今年度は、今後の本格的な量産が期待されている8インチのSiCウェーハに対応するための開発を実施した。

搬送系ではウェーハを保持する高温静電チャック（ESC）の8インチ化をはじめ、IMPHEAT-IIで搭載された、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などの機能を満足しながら、8インチSiCウェーハの搬送に対応させた。更に、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更なる安定稼働を実現した。

また、イオン源においても、中電流イオン注入装置 BeyEX^(*)2) で開発されたイオン源をベースにAl注入に対応した新型イオン源を開発し、注入領域の大型化に伴うビーム効率の低下を、ビーム量アップにて対応した。

8. 2 SiCパワーデバイス高性能化の実現

2050年のカーボンニュートラル実現に向けてのグリーン戦略で、電気自動車 (EV: Electric Vehicle) が大きな注目を集めている。電気自動車は、従来のエンジンとは異なり、電気をエネルギーとして、電動モーターを動力源に使用する。そのため、モーターの制御インバータに用いるパワー半導体がキーパーツの一つとなる。

パワー半導体として、これまでSi-IGBT (絶縁ゲートバイポーラトランジスタ: Insulated Gate Bipolar Transistor) が広く用いられてきた。電気自動車の省エネルギー化にはIGBTの低電力損失化が必要で、様々な改良が実施されてきたが限界が近づいてきている。IGBTの限界を打破するために、Siと比較して大幅に低電力損失が実現可能なSiC (炭化ケイ素) を用いたパワー半導体の実用化が始まり、自動車への採用も始まっている。

SiCを用いたパワー半導体では、低オン抵抗化による通電損失の改善、および短いターンオフ時間によるスイッチング損失の低減により、低電力損失が実現できる。

当社は、SiCパワー半導体対応のイオン注入機 IMPHEAT-IIをお客様に提供しており、ここでは、SiCパワー半導体の高性能化のためのチャネリングイオン注入技術について報告する。

イオンビームは、結晶のチャネル方向に沿って入射するとターゲット原子との衝突確率が小さくなり、深い位置まで到達することになる。この現象をチャネリングという。

図1は、SiCにAl⁺イオンを960keVの加速エネルギーで、注入した時の深さ方向分布を示している。通常のイオン注入では、深さ0.9 μ m付近にピークを持つ分布となるが、[0001]軸に沿った方向で注入した場合、3 μ m以上の深さまでAl⁺イオンを導入することができる。通常のイオン注入で深さ3 μ mの分布を実現するには、4MeV以上の加速エネルギーが必要で、RF加速器等を搭載した複雑で大きなイオン注入装置が必要になる。しかし、チャネリング技術を用いることにより、中電流イオン注入装置で実施することが可能となる。

チャネリング注入の他の長所として、所望のウェーハ面内領域にイオンを注入するためのマスク材料の厚さを薄くできることが挙げられる。チャネリングは、

これらの開発機能を搭載した装置での8インチSiCウェーハでの連続搬送・注入試験も完了し、8インチのSiCウェーハに対応した量産装置の開発、製品化を実施した。

SiC基板部分のみで起こり、マスク材料中では起こらない。よって、同じ深さの分布を形成する場合、通常の注入に比べてマスク厚さを1/3以下にすることができ、コスト低減、パターン精度の向上が可能となる。更なる長所として、縦方向、横方向ともに分布の拡がりや抑制できる結果、急峻な分布が実現できることが挙げられる。

図2は、スーパージャンクション構造を有するSiC-MOSFETの模式図を表している。チャネリング注入を用いることで、精度よくかつ簡略なプロセスで図中のN型、およびP型のピラー構造を形成できる。IMPHEAT-IIは、イオンビームの角度制御性が極めて高い装置であるため、チャネリング技術を安定した量産プロセスとして採用することが可能となる。

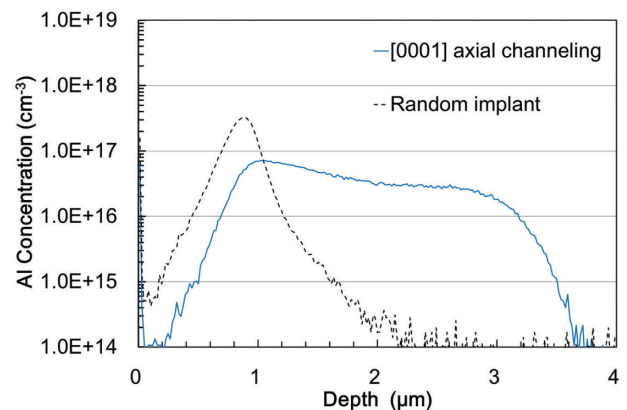


図1 SiCに960keVでAl⁺イオンを通常と[0001]軸方向に注入した時の分布

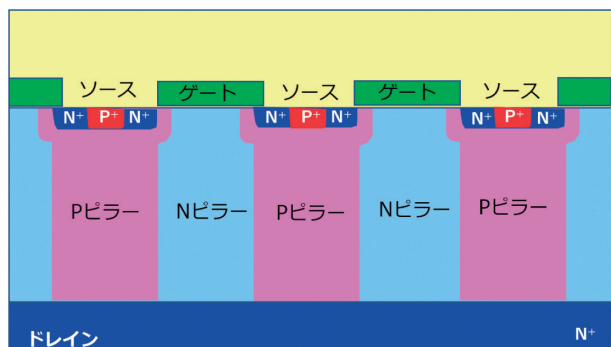


図2 スーパージャンクションMOSFET構造

8. 3 IGZO膜へのイオン注入によるTFT特性向上

インジウム (In)、ガリウム (Ga)、亜鉛 (Zn) の各酸化物から成る半導体 (IGZO) を用いた薄膜トランジスタ (TFT) は、高速動作、低消費電力、高耐圧が実現可能であり、次世代電子デバイスとしてフラットパネルディスプレイへの産業応用が期待されている。さらに近年、IGZO TFTをより高性能化するため、プラズマ照射あるいはレーザー照射によるソースおよびドレイン (S/D) 領域の低抵抗化が検討されており、その有効性が数多く報告されている。

一方、当社は微細化・集積化・生産性において長所を有するイオン注入装置を用い、S/D領域の低抵抗化によるTFT特性向上を試みた。具体的にはアルゴンイオン (Ar^+) あるいはホウ素イオン (B^+) のイオン注入を行い、TFT特性の評価を実施した。

図3にIGZO TFT作製プロセスフローを示す。ガラス基板上にプラズマパッタ装置を用いて堆積された厚さ $\sim 50\text{nm}$ 、シート抵抗 $\sim 10^{12}\Omega/\text{sq.}$ のIGZO膜に対し、プラズマCVD装置により厚さ $\sim 100\text{nm}$ あるいは、 $\sim 200\text{nm}$ の絶縁膜SiON:F (SiON) を形成した後、金属 (ゲート) 電極を形成し、金属/SiON/IGZO構造 (MIS構造) を得た。SiONを貫通させ、下層のIGZO膜にイオン注入を行うため、SiON膜厚 $d_{\text{ins}}\sim 100\text{nm}$ のMIS構造に対しては Ar^+ をエネルギー 80keV 、注入量 $5\times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ で、また $d_{\text{ins}}\sim 200\text{nm}$ に対しては B^+ をエネルギー 60keV 、注入量 $1\times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ でイオン注入を行い、ゲート領域を除くIGZO領域を低抵抗化 ($10^3\Omega/\text{sq.台}$) させS/D領域とした。最後にS/D電極を形成し、TFTを製作した。

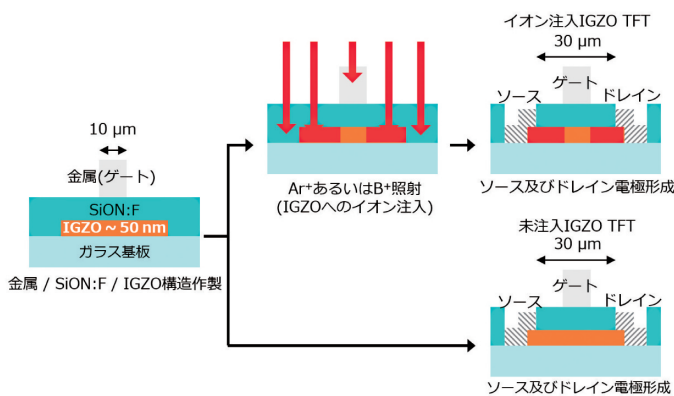


図3 イオン注入を用いたIGZO TFT作製および未注入IGZO TFTの作製プロセスフロー

図4に (a) Ar^+ 注入及び (b) B^+ 注入を行ったIGZO TFTのドレイン電流 (I_d) -ゲート電圧 (V_g) 特性 (伝達特性) と、イオン未注入IGZO TFTの伝達特性を併

せて示す。ここで、ドレイン電圧は $+5\text{V}$ とした。 Ar^+ 注入TFTについて、 I_d のオン領域では $\sim 10^{-3}\text{A/mm}$ であり、イオン注入により I_d は2-3桁増大した。よって、注入前後で、 I_d のオン/オフ比は2桁程度増大し、 Ar^+ 注入によるTFT特性の大幅な改善を示した。一方、 B^+ 注入TFTについて、オン領域では Ar^+ 注入TFTと同程度である $I_d\sim 10^{-3}\text{A/mm}$ が得られ、イオン注入により I_d は3桁程度増大した。よって、注入前後で、オン/オフ比は3桁程度増大し、 B^+ 注入についてもTFT特性の大幅な改善を示した。なお、オフ領域では Ar^+/B^+ 注入の両者ともに I_d のわずかな増加が確認された。

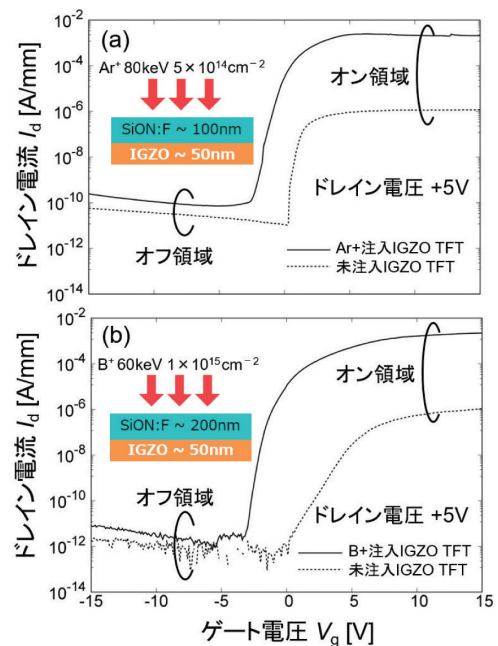


図4 イオン注入/未注入IGZO TFTのドレイン電流-ゲート電圧特性、(a) Ar^+ 注入: 80keV 、 $5\times 10^{14}\text{cm}^{-2}$ 、SiON:F膜厚 $d_{\text{ins}}\sim 100\text{nm}$ (b) B^+ 注入: 60keV 、 $1\times 10^{15}\text{cm}^{-2}$ 、 $d_{\text{ins}}\sim 200\text{nm}$

本研究では、イオン注入装置を用い、S/D領域の低抵抗化によるIGZO TFT特性改善を試みた。その結果、TFTの伝達特性において、オン領域の I_d の大幅な増大が得られ、オン/オフ比増大を示した。以上の成果は、IGZO TFTプロセスにおいてイオン注入がオン電流増加のみならず、半導体、低温ポリシリコン (LTPS) での実績から、微細化・集積化にも有効である可能性を示唆する。更なる発展の余地も非常に大きいため、引き続き検討を行う予定である。

※本内容は日新電機株式会社ビーム・プラズマ技術開発研究所との共同研究の成果であり、国際学会International Display Workshops (the 27th IDW'20, FMCp3-5.) において報告した。

(*1) 「IMPHEAT」は、日新イオン機器株の登録商標です。(p.21)
 (*2) 「BeyEX」は、日新イオン機器株の登録商標です。(p.22)