

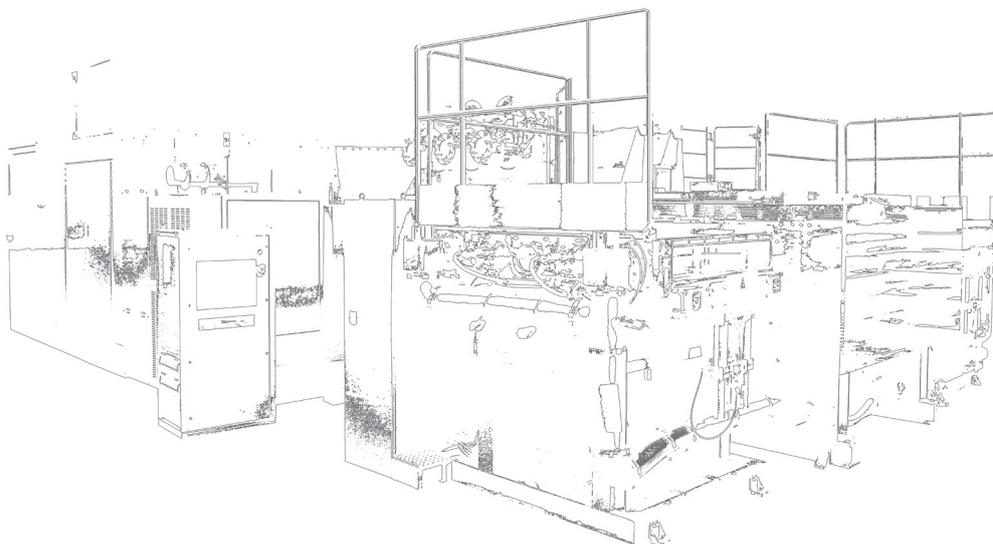
## 〔8〕 イオン注入装置

日新イオン機器株式会社（NIC）は、イオン注入装置製造メーカーとして、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。ウェーハ用では従来の中心的な製品であった中電流機をベースとしてSiCパワーデバイス向けの高温イオン注入装置を開発し、2010年から市場投入してきた。デバイスメーカーに多く採用されており、その経験をもとに改良を重ね、今年度IMPHEAT-IIを市場投入した。パワーデバイス市場の拡大は確実視されており、NICの一つの柱になると考えている。また、スマートフォンに搭載され、そのセンサとしての需要拡大が見込まれている垂直共振器面発光レーザー製造に用いるための水素イオン注入装置を開発・市場投入した。一方、2017年に市場投入したシートビームを利用した大電流機LUXiONは、そのスルーポットの高さからデバイスメーカーの重要なプロセスを担っている。

中小型ディスプレイ装置市場は、本年度は韓国メーカーが投資を控えており、活況とは言えなかったが、来年度以降の回復が予測されている。今後フォルダブルディスプレイがけん引する中小型ディスプレイサイズの拡大化に期待するとともに、5Gやスマートホーム時代には高機能ディスプレイが重要な役割を担うことは確実であることから、市場拡大に期待している。

また、ウェーハ用およびディスプレイ用、どちらのイオン注入装置についても、それらの応用分野の拡大に期待している。そのため、新しいアプリケーションやプロセスを、外部機関との共同研究を含め、開発している。

（日新イオン機器株式会社）



## 8. 1 最新SiCパワーデバイス向け高温イオン注入装置 “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も、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という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、2019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）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善を実現してきた。今年度はIMPHEATをベースにして、搬送系に対して、ロードロック室1への予備加熱プロセスの追加、真空内V字型搬送アームのdual化、ロードロック室2への冷却強化などを行い、装置の搬送スループットを3倍に改

善した。また、イオンビームの安定性向上とビーム量増加について、原材料ガスに水素を混入することにより、イオン源の放電頻度を1/100に低減し、イオンビーム電流を2倍（実効スループットが2倍以上に改善）にできるイオン源の改良にも成功した。それらの改良により当社最新SiCパワーデバイス向け高温イオン注入機（IMPHEAT-II）の開発をし、パワーデバイスメーカーへ初号機を納入した。図1にIMPHEAT-II開発機の外観を示す。



図1 IMPHEAT-II開発機

## 8. 2 水素イオン注入装置 “EXCEED400HY”

当社ではこれまで半導体用中電流イオン注入装置としてEXCEEDシリーズ、BeyEXシリーズの開発・製造を行ってきた。今回、水素イオンを従来機よりも高エネルギーで注入可能なEXCEED400HYを開発し、市場投入を行った。

現在、半導体市場において垂直共振器面発光レーザー（VCSEL：Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers）素子への注目が集まっている。VCSELは高密度にレーザー素子を実装可能な特徴を持っているため、これまでは大容量通信における光モジュールへの適用が一般的で、市場規模が限られていた。しかし、近年スマートフォンの顔認証に利用されたことで市場規模が拡大し、今後様々な3Dセンシングの分野での更なる需要拡大が見込まれている。

VCSELの製造工程においては、高エネルギーの中電流水素注入が必要とされており、この需要に対応する

ために、EXCEED400HYの開発を行った。開発においては、従来装置では対応できない高エネルギー領域に対応するため、高電圧部を見直し、400kVまで昇圧することを可能とした。また、搬送部においてはSiC分野で培った技術を元にSiウェーハ以外の化合物半導体ウェーハの安定搬送を実現した。さらに、ビーム輸送についても水素注入に最適化することによって、高生産性を実現している。

これらの開発により、EXCEED400HYは従来の中電流装置の安定したプラットフォームに、高エネルギー対応、高生産性、高コストパフォーマンスを備えた装置となっている。

水素注入はVCSELに留まらず、パワー半導体であるIGBTへの活用など、様々な分野での応用が期待されている。今後は、更なる高生産性への対応や他イオン種へ対応するための開発を行う。

### 8. 3 イオン注入技術の新しいアプリケーション

半導体デバイスは、スケーリングにより微細化するモアムーア（more moore）と、新しい機能を盛り込むモアザンムーア（more than moore）の二軸で今も高性能化、高機能化が続いている。イオン注入技術は、現在に至るまで半導体製造のキー技術として使われ続けているが、近年、新しいアプリケーションが提案されている。本章では、その中で材料改質技術を報告する。

従来イオン注入技術は、MOSトランジスタのソースドレイン形成やウェル形成に代表されるように、N型イオンやP型イオンを注入し不純物拡散層を作ることに使われてきた。これらは、注入量が $1 \times 10^{12}/\text{cm}^2 \sim 5 \times 10^{15}/\text{cm}^2$ 程度の範囲で使用されてきた。これに対し $1 \times 10^{16}/\text{cm}^2$ 以上のイオンを物質に注入するとその物質の物性値を変える材料改質が可能となる。

しかしながら、半導体で用いられる薄膜に高濃度で注入するには、sub-keV以下のエネルギーで超大電流が必要となり、これまで市販されているイオン注入機では製造プロセスに組み込むことができなかった。

当社が開発中の低エネルギー超大電流イオン注入機では、低エネルギーでのビーム電流が飛躍的に向上し、リーズナブルなスループットで材料改質に必要な注入が実施できる。ここではシリコン酸化膜にイオン注入を実施し材料改質を行った結果について述べる。

図2は、シリコン酸化膜に、種々のイオン注入を実施した場合のフッ酸（HF）溶液に対するエッチングレートを示している。ボロン（B）、リン（P）イオンの場合、エッチングレートは増加し、炭素（C）、シリコン（Si）イオンの場合はエッチングレートが低下することが判る。このことは、注入による物理的変化だけではなく、化学的変化も起こっていることを示している。注入イオン種と注入量を設定することでシリコン酸化膜のエッチングレートを任意に変えることが可能となる。イオン注入は、フォトリソ膜を用いて選択的に不純物を導入できること、および非常に直進性に優れているという他のプロセスと比較してユニークな特徴を有する。優れた直進性という長所を利用することで、三次元構造に対して選択エッチングが実現できる。

図3は、三次元構造のシリコン基板に酸化膜を堆積し、シリコンイオン注入を行い、フッ酸処理を行ったサンプルの断面SEM写真を示している。イオン注入により溝の底部と上部にはシリコンイオンが導入されるが、側壁には導入されない。溝の底部と上部のみエッチングレートが低下するため側壁部のみシリコン酸化膜が除去される。このような選択エッチング技術を用いることでデバイス構造設計の自由度を広げることが

可能となる。イオン注入を用いた材料改質技術が半導体製造プロセスに導入され、デバイスの高機能化、高性能化に貢献することを期待する。

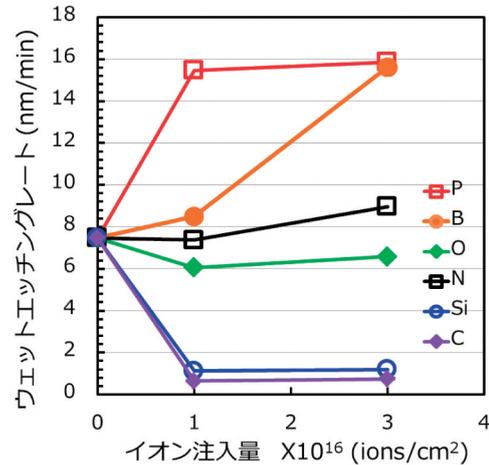


図2 シリコン酸化膜のフッ酸溶液に対するエッチングレートの注入条件依存性

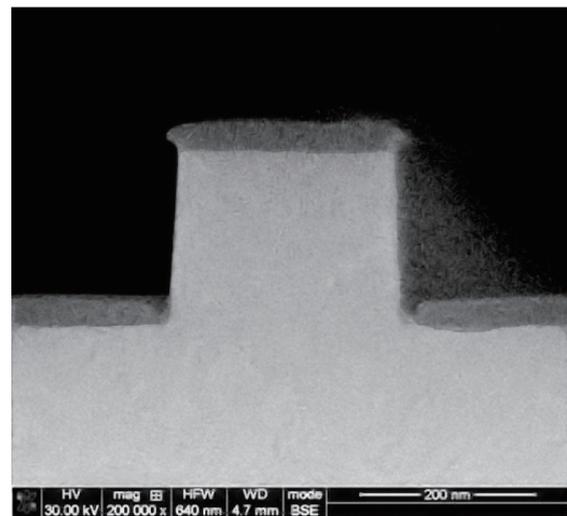
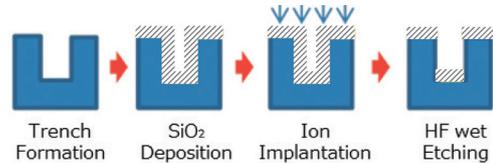


図3 イオン注入による選択エッチング（側面のシリコン酸化膜のみが除去されている。）

## 8. 4 アルゴン又は水素イオン注入併用によるシリコンにイオン注入したボロンの低温活性化

シリコン (Si) にイオン注入したドーパントを低温で活性化する技術の開発は、薄膜トランジスタ (TFT) 等の半導体素子の低温作製のために重要である。特に近年はフレキシブルディスプレイの基板として、従来の無アルカリガラスよりも耐熱温度の低いポリイミドシートが使われるようになってきており、プロセスの低温化がより一層求められている。我々は、ドーパントであるボロン (B) イオンを注入する前に、予め水素 (H) やアルゴン (Ar) などイオン注入しておくことにより、300°Cの低温でBの活性化を試みた。

図4にサンプル作成手順を示す。厚さ500 $\mu$ m、抵抗率1500 $\Omega$ cm以上の高抵抗n型Si基板を用意した。

まず、Ar<sup>+</sup>をエネルギー70keVでドーズ量を1E13cm<sup>-2</sup>から5E14cm<sup>-2</sup>で室温イオン注入し、次にB<sup>+</sup>をエネルギー20keV、ドーズ量1E15cm<sup>-2</sup>注入した (Sample1)。又それとは別に、H<sup>+</sup>をエネルギー8keVでドーズ量1E15cm<sup>-2</sup>から2E16cm<sup>-2</sup>でイオン注入した後、室温でB<sup>+</sup>をエネルギー40keVでドーズ量1E15cm<sup>-2</sup>イオン注入したサンプルも用意した (Sample2)。

また比較のためにAr又はHを注入せずにBのみ注入したサンプルも作成した。これらサンプルに300°Cで30分間のポスト加熱を施した。

Ar<sup>+</sup> (Sample1)又は H<sup>+</sup> (Sample2)イオン注入

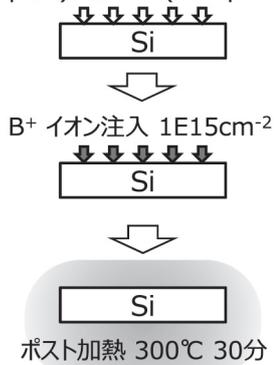


図4 サンプル作成手順

図5に、作成したサンプルのシート抵抗のAr<sup>+</sup>又はH<sup>+</sup>ドーズ量依存性を示す。B<sup>+</sup>のみイオン注入し300°Cポスト加熱を実施したときのシート抵抗が60000 $\Omega$ /sq.と高かったのに対し、Sample1ではArのドーズを増やすにつれてシート抵抗は単調に減少し、Arドーズ1E14cm<sup>-2</sup>のとき最小値890 $\Omega$ /sq.となった。Ar<sup>+</sup>注入により誘発されたSi結晶欠陥が、B<sup>+</sup>イオンが格子間から結晶格子位置へ遷移するための活性化エネルギーを低下させたと考えている。さらにArドーズ量を増やしていくとシート抵

抗は増大していった。これはSiの結晶性を崩し過ぎてアモルファスに近い状態になったためと考えている。

Sample2においてもHのドーズ量が増えるにつれシート抵抗は減少し、Hドーズ1.5E16cm<sup>-2</sup>のとき最小値520 $\Omega$ /sq.となった。シート抵抗が最小となるときのHドーズ量が多いのは、HイオンがArに比べ非常に軽く、Siの結晶性を崩しにくいいためと考えている。

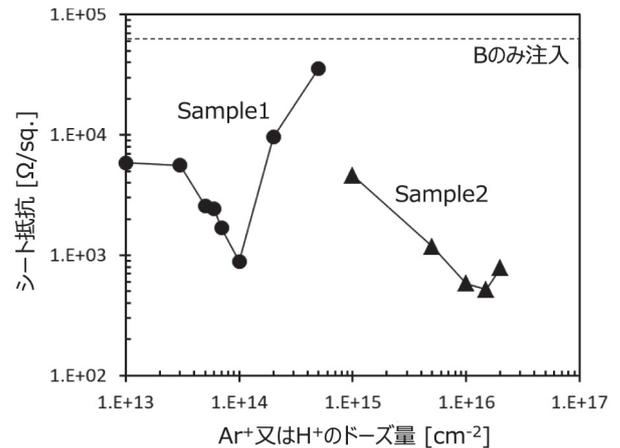


図5 サンプルのシート抵抗のAr<sup>+</sup> (Sample1) 又はH<sup>+</sup> (Sample2) のドーズ量依存性また破線はAr又はHをイオン注入せずにB<sup>+</sup>のみイオン注入した場合のシート抵抗

今回は、単結晶Si基板において、ドーパントB注入の前に、Ar又はHのイオン注入を実施しておくことで、300°Cの低温でシート抵抗をそれぞれ890と520 $\Omega$ /sq.まで下げることができた。現在はLTPS (Low temperature Poly silicon) において同様の効果が得られるか試験を実施中である。

※本内容は国立大学法人 東京農工大学 鮫島俊之教授との共同研究内容となります。