

## 新半導体デバイスによる、近未来省エネ・安全社会の実現に向けて

## ■概要

現在、世界規模での革新的な省エネ技術開発が急務となっている。中でも、電力変換に用いるパワースイッチングデバイスは、その用途も多岐にわたることから、個々の機器における損失低減の積み重ねが、社会全体に大きな省エネ効果をもたらす。そのため、日本はもとより米国、欧州においても、近年半導体パワーデバイス開発が活発化している。

新半導体材料酸化ガリウム ( $\text{Ga}_2\text{O}_3$ ) は、平成23年にNICTが見だし、世界に先駆けてトランジスタ動作実証に成功した。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  は、その非常に大きなバンドギャップに代表される材料特性から、パワースイッチングデバイスに用いた場合、既存の半導体デバイスを上回る高耐圧・大電力・低損失特性が期待できる。また、簡便かつ安価に高品質・大口径単結晶ウェハが製造可能という産業上重要な特徴も有する。これらの利点に注目が集まった結果、現在 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  パワーデバイス開発は世界的に活発に行われている。

$\text{Ga}_2\text{O}_3$  は、様々な物性の中でも、半導体の最も基本的な特性を示すバンドギャップが唯一無二であることから、類似例の存在しない全く新しい半導体である。そのため、期待されるデバイス応用に向けたポテンシャルは、パワーデバイスだけにとどまらず様々な領域に広がる。例えば、極限環境と呼ばれる高温、放射線下などの、通常半導体デバイスの利用が想定されていない過酷な環境への適用も期待される。

グリーンICTデバイス先端開発センターでは、パワースイッチング、高周波無線通信、極限環境エレクトロニクスの3つの異なる領域での実用を目指した $\text{Ga}_2\text{O}_3$  トランジスタ、ダイオードの研究開発を、外部機関（大学、企業）との緊密な連携の下、推進している。

## ■平成30年度の成果

1. Nイオン注入ドーピングによる $p\text{-Ga}_2\text{O}_3$ 

最初に、平成29年度に要素技術として開発し、縦型トランジスタプロセスにも採用した、 $p$ 型 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  領域を作製するためのマグネシウム (Mg) イオン注入ドーピングプロセスの問題点である、注入したMg原子の熱拡散の低減に取り組んだ。しかしながら、プロセス条件をいろいろ試したが、Mg熱拡散問題の根本的な解決には至らなかった。そのため、 $p\text{-Ga}_2\text{O}_3$  を作製するために、もう一つのアクセプタ元素候補として平成29年度に見いだしていた、窒素 (N) のイオン注入ドーピングプロセス開発へと方向転換した。 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  中にイオン注入したN原子は、アニール温度 $1,100^\circ\text{C}$ 以上で活性化することがわかった。また、アニール時の熱拡散は、 $1,200^\circ\text{C}$ アニール後も非常に小さく、デバイス作製上問題にならないレベルであった。そのため、バックグラウンドドナー濃度以上にアクセプタであるNを注入した領域では、 $p\text{-Ga}_2\text{O}_3$  を形成することができるようになった。この $p\text{-Ga}_2\text{O}_3$  作製のためのNドーピング技術を、量産に適し、汎用性も高く、低コスト製造が可能であり、実際の半導

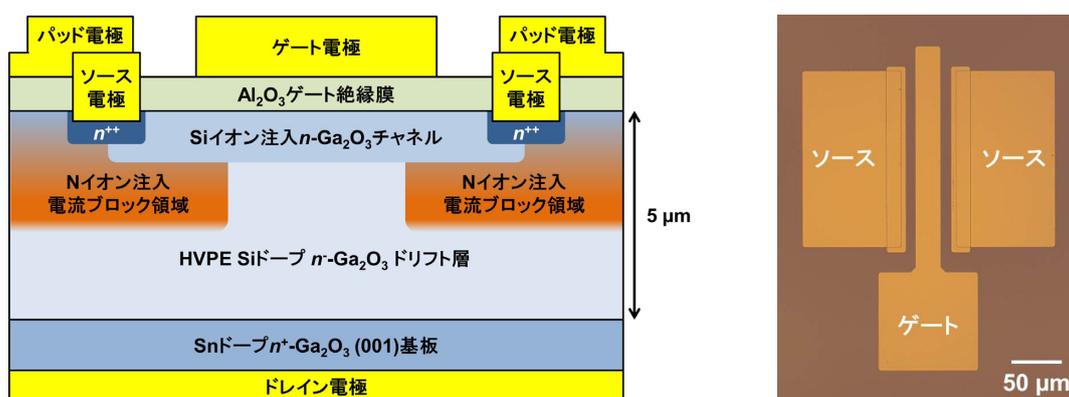


図1 縦型 $\text{Ga}_2\text{O}_3$  トランジスタの (左) 断面構造模式図、(右) 光学顕微鏡写真

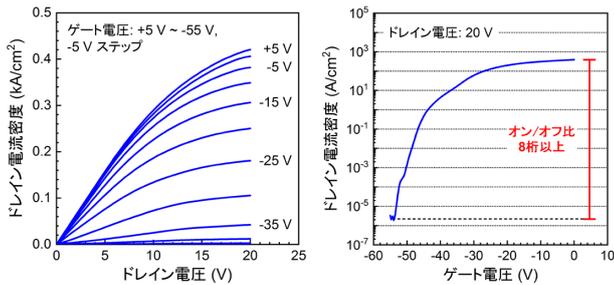


図2 縦型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタの(左)電流-電圧出力特性、(右)トランスファ特性

体デバイス製造現場で広く用いられているイオン注入プロセスを用いて実現したことは、科学的価値はもとより、近い将来のGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの産業化という観点からも非常に大きな意味がある。

## 2. 縦型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタの開発

続いて、平成29年度にMgイオン注入ドーピングを用いて作製したものとほぼ同様の構造を有する縦型ノーマリーオンGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタを、本年度は上述の新たに開発したNイオン注入ドーピングを用いて試作し、そのデバイス特性を評価した。なお、Mg、N両イオン注入ドーピングは、電流ブロック領域の作製プロセスに用いた。図1に、そのデバイス構造断面模式図、光学顕微鏡写真を示す。また、図2に代表的なデバイス特性である電流-電圧特性、トランスファ特性を示す。前年度Mgイオン注入ドーピングを用いて作製したトランジスタでは大きなドレイン電流リークが見られたのに対し、本年度Nイオン注入ドーピングを用いて作製したトランジスタではリークは皆無であった。その他、スイッチングデバイスとして最も重要な特性であるドレイン電流オン/オフ比が、実用上必要な5、6桁を大きく上回る8桁を記録するなど優れたものであった。なお、本縦型Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタ開発成果に関しては、12月12日に報道発表を行い、多くの新聞、雑誌等のメディアで取り上げられた。

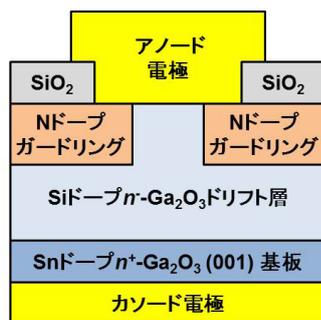


図3 Nドーピングガードリングを有するGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードの断面構造模式図

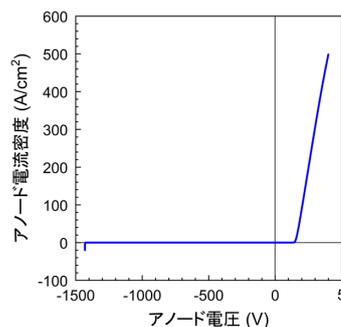


図4 Nドーピングガードリングを有するGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードの電流密度-電圧出力特性

## 3. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードの開発

平成29年度にデバイスシミュレーションを用いて設計した、縁部電界集中緩和構造としてガードリングを採用したGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードを、本年度実際に試作し、その特性評価を行った。ガードリング構造の作製には、上述縦型トランジスタと同様にNイオン注入ドーピングを用いた。試作したショットキーバリアダイオードの断面構造模式図と電流密度-電圧出力特性を、図3、4にそれぞれ示す。Nイオン注入ガードリングを採用したことにより、以前のものと比較して逆方向耐圧に大幅な改善が見られた。このGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードで記録した、オン抵抗4.7 mΩ・cm<sup>2</sup>、逆方向耐圧1.43 kVは、世界最高レベルに相当する。

## 4. Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードの電子線照射耐性試験

本年度、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>デバイスの耐放射線デバイスとしてのポテンシャルを調査することを目的に、前年度行ったGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>トランジスタへのガンマ線照射耐性試験に引き続き、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードの電子線照射耐性を評価した。電子線に対する半導体デバイスの耐性は、宇宙応用などにおいて重要となる。放射線を半導体に照射すると、結晶中に電子-正孔対が生成され、それらが結晶中に存在する欠陥にトラップされることで、デバイス特性の変化が生じる。それに加えて、ガンマ線とは異なり電子線は質量を有する粒子線であるために、照射された電子が材料の構成原子に衝突し、その原子を正常な格子位置から変位させてエネルギーを失うという過程をとることで、照射対象とする材料中に格子欠陥を生じる。

テストしたショットキーバリアダイオードの順方向デバイス特性は、本年度行った最大ドーズ5×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>照射後も照射前と比較してほとんど変化がなかった。一方、逆方向リーク電流に関しては、ドーズ2×10<sup>15</sup> cm<sup>-2</sup>照射後に若干増加した。これは、電子線照射によりGa<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ドリフト層中に欠陥が導入された結果であると推察される。

しかしながら、その変化量は最大でも1桁以下であり、実用上特に問題とならない程度の小さな劣化レベルであった。これらの結果から、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>ショットキーバリアダイオードは電子線照射に対しても高い耐性を有していることがわかった。