

新半導体材料・デバイスの創出、実用に向けた基盤技術開発

■概要

情報通信のみならず、世の中に存在するほぼ全てのエレクトロニクスは、半導体デバイスによって支えられていると言っても過言ではない。そのため、より高性能な半導体デバイスの創出が常に社会的に求められている。グリーンICTデバイス先端開発センターでは、革新的半導体電子デバイスを創出すべく、材料・デバイス両面からの包括的な研究開発を行っている。第4期中長期計画では、第3期中長期計画にて我々が見いだした、新ワイドバンドギャップ半導体 酸化ガリウム (Ga_2O_3) を材料とするトランジスタ、ダイオードの研究開発を行っている。実用化に向けたパワーデバイス基盤技術開発を中心テーマに据える一方、新たな試みとして極限環境と呼ばれる、現状半導体デバイスの利用が想定されていない過酷な環境での実用に向けたデバイス開発もスタートした。これら研究開発においては、研究所内自主研究だけでなくとどまらず、大学・企業との緊密な連携を推進している。また、産学官連携において得られた成果の技術移転を積極的に行っている。

■平成29年度の成果

1. 縦型 Ga_2O_3 トランジスタの開発

平成29年度は、縦型ディプレッションモード (Dモード) Ga_2O_3 metal-oxide-semiconductor field-effect transistor (MOSFET) の試作、デバイス特性評価を行った。

最初に、縦型 Ga_2O_3 MOSFETを作製するための要素技術として、マグネシウム (Mg) イオン注入プロセス開発を行った。その実験結果として、 Ga_2O_3 中にイオン注入したMgは、900℃以上の温度におけるアニール処理により活性化することを確認した。また、注入時に生じた Ga_2O_3 膜中のダメージも、同温度アニールで回復する。実際、注入したMgは、活性化アニールを経てサイトに取り込まれ、アクセプタとして振る舞い、バックグラウンド電子濃度を補償により大幅に減少させることができる。しかしながら、同時に、注入したMgが Ga_2O_3 膜中をバックグラウンドのドナー濃度と等しくなるように熱拡散することも分かった。そのため、Mgはバックグラウンドドナー濃度以上には分布せず、その注入領域が

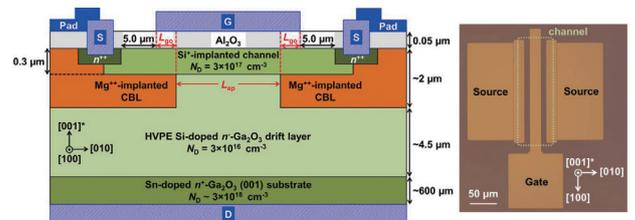


図1 縦型Dモード Ga_2O_3 MOSFETの (左) 断面構造模式図、(右) 光学顕微鏡写真

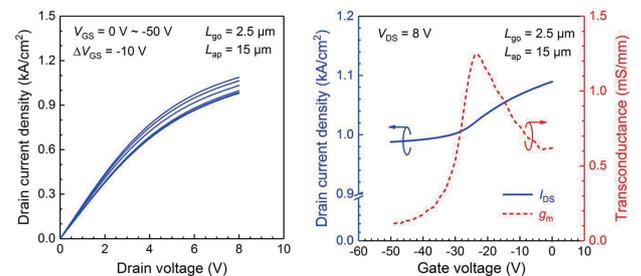


図2 縦型Dモード Ga_2O_3 MOSFETの (左) DC電流-電圧出力特性、(右) トランスファー特性

p型へ反転することは無かった。結果として、Mgイオン注入により形成した電流ブロック層において、高い絶縁特性は得られなかった。

続いて、実際のデバイス試作、特性評価を行った。図1に、本年度作製した縦型Dモード Ga_2O_3 MOSFETの断面模式図、光学顕微鏡写真を示す。また、図2にその代表的なデバイス特性であるDC電流-電圧出力特性、トランスファー特性を示す。本格的な縦型 Ga_2O_3 トランジスタとしては、世界初の動作実証を達成した。Mg注入領域の不十分な電流ブロッキング特性のため、大きなドレイン電流リークが見られるが、その他のデバイス特性に関しては、おおむねデバイスシミュレーションによる設計どおりの値が得られている。

2. 耐放射線 Ga_2O_3 トランジスタの開発

Ga_2O_3 は、その材料特性から高温・多湿・放射線下に代表される過酷な環境においても、安定かつ特性劣化無く動作し続けることが期待される。それらの多くは、人間が立ち入ることができない環境での作業において、現場の状況を離れた場所でリアルタイムに把握するための各種センサー (カメラ、温度計、放射線量計など) と組

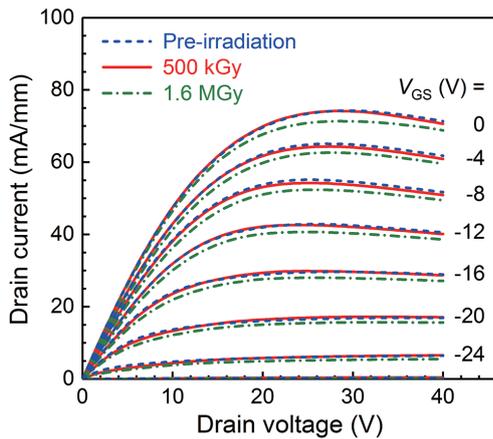


図3 横型Ga₂O₃ MOSFETのガンマ線照射前後のDC電流-電圧出力特性の比較

み合わせて利用される。本年度、横型Ga₂O₃ MOSFETへのガンマ線照射実験を前年度に引き続き行い、照射後の様々なデバイス特性の変化について調査した。結果、1.6 MGy (メガグレイ) という非常に高い線量のガンマ線照射後においても、デバイス特性劣化はほとんど認められなかった (図3参照)。なお、一般的に、宇宙応用には0.1 MGy以上、原子炉応用には1 MGy以上のガンマ線耐性が求められる。これらの結果から、Ga₂O₃の有する耐放射線デバイス半導体材料としての高いポテンシャルが確認された。

3. Ga₂O₃ショットキーバリアダイオードの開発

平成29年度は、縁部電界集中緩和構造としてガードリングを用いることで、更なる高耐圧化を目指したGa₂O₃ショットキーバリアダイオードの開発を行った。まず、デバイスシミュレーションにより、最大で耐圧3 kVを超えるガードリングを有するショットキーバリアダイオードのデバイス構造設計を行った。本検討では、ガードリング構造のアクセプタ濃度、深さ、フィールドプレート内側、外側への張り出し幅をパラメータとし、得られた各々の条件下でのデバイス構造内の電界強度分

布を比較した。最適化したガードリング構造を有したショットキーバリアダイオードの場合、逆方向電圧3.1 kVを印加した条件においても、図4に示すようにガードリングとドリフト層の界面付近に電界が分散される。その結果、A-A'ラインにおける電界強度分布から、最大電界強度は約5.5 MV/cmに抑えられることが分かった。その後、デバイス試作に必要なプロセス要素技術開発を行った。平成30年度には、このシミュレーション結果に基づき構造設計した、ガードリング付きGa₂O₃ショットキーバリアダイオードの試作及びデバイス特性評価を行う予定である。

4. Ga₂O₃薄膜エピタキシャル成長技術の開発

平成29年度、MgとともにGa₂O₃におけるアクセプタ候補である窒素 (N) をドーピングすることで、p型Ga₂O₃膜のオゾン分子線エピタキシー成長技術の開発に取り組んだ。高純度酸素 (O₂) ガスに少量のN₂ガスを混合した原料ガスを用い、そのN₂濃度を変化させることで、Ga₂O₃エピ膜中のNドーピング濃度を制御した。N₂/O₂濃度を0%、0.04%、0.4%と増加させるに従い、Ga₂O₃膜中のN濃度が、二次イオン質量分析法の検出限界である $1 \times 10^{16} \text{ cm}^{-3}$ 以下から $1.5 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ へと単調に増加した。また、これら3種類のエピ基板を用いてショットキーバリアダイオードを作製し、電流密度-電圧 (J - V) 特性を評価した。原料ガス中のN₂ガス濃度が大きくなるに従い、順方向バイアス $V = +4 \text{ V}$ を印加時、 $J = 6.1 \times 10^{-6} \text{ A/cm}^2$ (N₂/O₂ = 0%)、 $3.5 \times 10^{-7} \text{ A/cm}^2$ (N₂/O₂ = 0.04%)、 $1.6 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ (N₂/O₂ = 0.4%) と指数関数的に減少した。実際、この $J = 1.6 \times 10^{-8} \text{ A/cm}^2$ は、抵抗率にして $\rho = 10^{11} - 10^{12} \Omega \cdot \text{cm}$ に相当する非常に大きな値であり、残留電子濃度に直すと $n = 1 \times 10^6 \text{ cm}^{-3}$ 程度以下という極めて小さな値となる。これらの結果から、NはMgを上回るアクセプタとしてのポテンシャルを有することがわかれる。

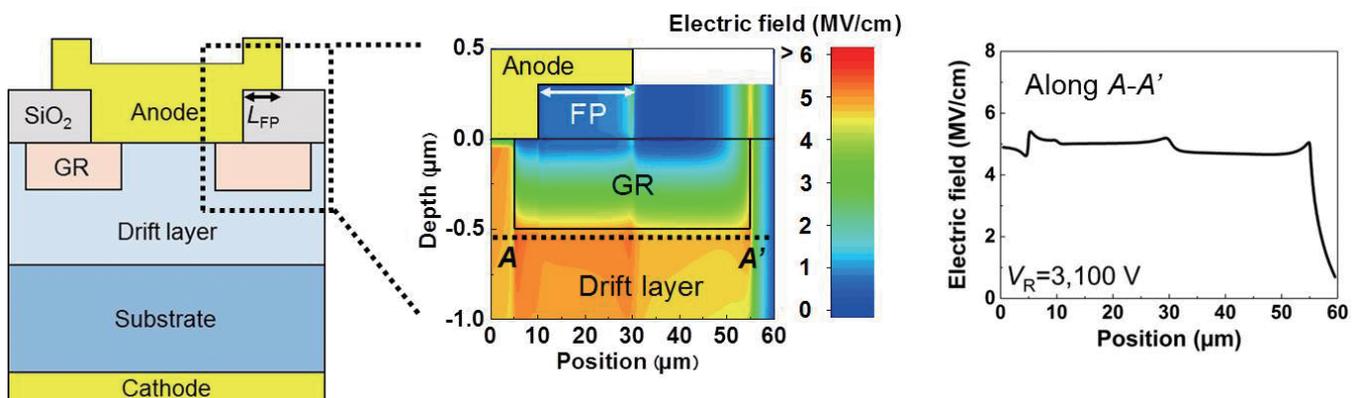


図4 耐圧3.1 kVで設計したGa₂O₃ショットキーバリアダイオードのブレイクダウン条件における電界分布シミュレーション