安全保障技術研究推進制度　令和６年度終了課題　終了評価結果

1.　評価対象研究課題

（１）研究課題名：反転ＭＯＳチャネル型酸化ガリウムトランジスタの研究開発

（２）研究代表者：株式会社ノベルクリスタルテクノロジー　宮本　広信

（３）研究期間　：令和２年度～令和６年度

2.　終了評価の実施概要

日時　　：令和７年１２月１日

場所　　：ＴＫＰ新橋カンファレンスセンター

評価委員：未来工学研究所　理事長、上席研究員

東京大学　名誉教授

平澤　泠（委員長）

筑波大学　数理物質系　物理工学域　教授

岩室　憲幸

東京農工大学　名誉教授

宇野　亨

情報通信研究機構　主席研究員

門脇　直人

産業技術総合研究所　サイバーフィジカルセキュリティ研究部門

副研究部門長

川村　信一

慶應義塾大学　名誉教授

笹瀬　巌

東京工業大学（現　東京科学大学）名誉教授

蜂屋　弘之

元　東海大学　教授

森本　雅之

大阪大学　名誉教授、招へい教授

渡邊　尚

（委員長以外は五十音順・敬称略）

3.　研究と成果の概要

研究の概要

酸化ガリウムは、パワー半導体として優れた材料物性を有しており、従来のシリコン製パワーデバイスよりも低損失のデバイスを作製することができる。また、シリコンなどと同様に、融液成長法によって低コストで高品質大面積の単結晶基板を製造できる。これらの特徴から、次世代のパワーデバイス用材料として、国内外で研究が活発化している。

酸化ガリウムパワーデバイスは、高い耐圧の分野において、特にその低損失性能を発揮する事ができる。10 kV を超える超高耐圧パワーデバイスの応用分野として、半導体製造装置に搭載されるプラズマ発生源や、シンクロトロンのビーム発生源、医療機器の特殊電源などが挙げられる。本研究では、それらの応用展開も見据えて、パルス電源向け 10 kV 級酸化ガリウムトランジスタの大電流化と高速スイッチング特性評価を目的とした。

酸化ガリウムは、p 型ドーピング技術が未完成なため、従来は n 型半導体だけで構築可能な FinFET 構造が用いられていた。しかしながらサブミクロン以下の微細なパターン形成が必要となり、大電流化のための素子の大面積化が困難であった。本研究ではサブミクロン以下の微細なパターン形成を必要とせず、大面積化に有利な MOS トランジスタ構造として、新たに反転 MOS チャネル構造を開発した。

本研究の達成目標は、耐圧 10 kV 以上、電流 100 A 以上、10 A 級素子のスイッチング速度数十 ns 以下とした。研究は、反転 MOS チャネル構造を実現するための要素技術開発を行ったのち、4 インチ量産ラインを用いて大面積、大電流 MOSFET の試作評価を行った。

成果の概要

アクセプタ不純物のドーピング制御技術の開発を行い、反転 MOS 型トランジスタのウエルに必要な電流ブロック特性 1 kV 印可時の漏れ電流 $< 0.3\ mA/cm^2$ を実現した。

絶縁膜/Ga_2O_3 界面制御技術の開発を行い、反転 MOS 型トランジスタの低損失動作に必要となる MOS チャネルの移動度 50 cm^2/Vs を実現した。

ヘテロ p 型半導体/n 型 Ga_2O_3 接合形成技術の開発を反転 MOS 型トランジスタ開発のリスク管理の視点から行い、良好な pn 接合特性を確認した。

トランジスタの試作・評価では上記要素技術を用いて小型の反転 MOS 型トランジスタを作製し、しきい値電圧+6 V 耐圧 1 kV のノーマリオフ動作を世界で初めて実現した。次に 4 インチラインに作製プロセスを展開して 1.7, 5, 10 mm 角の大面積の反転 MOS 型トランジスタを作製してアンペア級のデバイス動作に成功した。10 mm 角の大型素子では世界最高の電流値 109 A を得た。しかしながら 4 インチウエハ(エピタキシャル層厚 10 μm)では 10 kV 耐圧に必要となるエピタキシャル層の厚膜化

(50 μm程度)がウエハ割れのため実現できず耐圧は1 kVに留まった。2インチウエハを用いて、10 kV耐圧に必要となる高品質厚膜エピタキシャルウエハの開発を行った。ウエハ割れが発生していない領域に小型のFin型トランジスタを作製して世界最高の耐圧10 kVを有する縦型トランジスタのノーマリオフ動作に成功した。10 kV耐圧、100 Aトランジスタを実現するためには4インチ高品質厚膜エピタキシャルウエハの開発が今後必要となる。

試作した1.7 mm角のアンペア級反転MOS型トランジスタを用いてスイッチング評価を実施し、300 V、スイッチング速度 < 78 ns, 100 kHz, 300 Vの連続高速スイッチング動作を世界に先駆けて実証した。

4. 終了評価の評点

A　相応の研究成果をあげた。

5. 総合コメント

数値目標を達成できていない項目があるが、反転MOS型トランジスタの動作実証をしたこと、結晶欠陥の評価を透過型で実現したことなどの成果は高く評価できる。また、酸化ガリウムのトランジスタを実現し、トランジスタを動作させ、さらに回路動作まで確認したことは研究成果として評価できる。

大手デバイスメーカとKプロを開始するなど、次フェーズの委託研究も計画されており、実用化に向けた技術開発にも期待できる。

今後、10kV以上、100A以上の両者を達成すること、発熱制御に関してさらに成果が得られることを期待する。

6. 評価の観点ごとの評価結果と個々の委員によるコメント

6-1. 研究開始時に設定した研究目標の達成度（主題的成果）

・目標１　反転MOS型トランジスタの動作実証：
　本研究で初めて動作を実証できた。

・目標２　耐圧 10 kV以上, 電流 100 A以上：
　mA級の小型Fin型トランジスタにて耐圧　10 kV、10 mm角の大型反転MOS型トランジスタにて電流値 109 Aと個別に目標を実証できたが、耐圧と電流値を両立するデバイス実証はできなかった。

・目標３　10 kV, 10 A素子のスイッチング速度　数十ns以下：
　1 A級素子の300 Vスイッチング速度　78 nsを確認したが、10 kV耐圧、10 A素子のスイッチング特性評価が実施できなかった。

反転MOS型トランジスタの動作実証は世界で初めてであり、10 kV以上という耐

圧(従来の Fin 型トランジスタ)、100 A 以上の電流は個別の実証値としても酸化ガリウムの縦型 FET における世界最高性能である。またアンペア級、数百 V のスイッチング動作の実証は電力変換回路への適用を考える上で現実的な性能に近づくことを示すものである。

【個々の委員によるコメント】(主題的成果)
・研究目標がすべて達成できたとは言えないが、目標を達成するための課題の多くを明らかにすることによって、本デバイスの開発に弾みをつけた。
・5mm 角のトランジスタを作り動作させた点は価値がある。ただし、目標値とした耐圧 10 kV かつ、電流 100 A という目標は達成できていない。
・耐圧 10 kV、ドレイン電流 100 A 以上の両者を同時に実現することはできなかったが、それぞれ単独では実現する方法を見出しており、一定の成果は挙げている。
・数値目標は達成できなかったものの、酸化ガリウムのトランジスタを実現し、さらに回路動作まで確認したことは、研究目標を十分に達成している。

6-2. 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)

反転 MOS 型トランジスタ作製技術とダイオード自主開発で開発した放熱改善のためのウエハ薄層化技術、パッケージ実装技術とを組み合わることにより TO247 パッケージに組み込み、LLC コンバータ[*1]の 250 V 入力、180 W 出力動作を実証した。100 W 級の電力変換回路で酸化ガリウムトランジスタの動作実証は世界初である。実用化に向けた大きな前進と考える。

【個々の委員によるコメント】(副次的成果)
・反転 MOS 型という新たな構造にチャレンジし、従来の Fin 型では到底達成できない領域を拓いた。この成果は評価できる。
・LLC 回路への適用とスイッチング特性評価の実現は評価できる。
・100 W 級の回路動作を確認し、また、結晶欠陥の構造解析についても新たな知見とそれに基づく技術を開発したことは大いに評価できる。
・メーカとの共同研究を実施している。結晶欠損の構造解析技術として、X 線の定在波を利用した新たな技術を開発した。

6-3. 他の者により派生した成果(間接的成果)

特に無し。

【個々の委員によるコメント】(間接的成果)

特に無し。

6-4.　科学技術上特筆すべき成果

反転 MOS 型トランジスタの動作実証は世界で初めてであり、10 kV 以上という耐圧(従来の Fin 型トランジスタ)、100 A 以上の電流は個別の実証値としても酸化ガリウムの縦型 FET における世界最高性能である。またアンペア級、数百 V のスイッチング動作の実証は電力変換回路への適用を考える上でデバイス開発が大きく進んだことを示すものである。

【個々の委員によるコメント】(科学技術上特筆すべき成果)

・困難な課題に挑戦し、新たなコンセプトの可能性を実証したことは高く評価出来る。
・研究成果を基に酸化ガリウムトランジスタの可能性を示したことは学術的価値が大きい。また、実用化に向けた課題を明らかにしている。
・酸化ガリウムの高圧・高電流のトランジスタを動作させた点は意義がある。

6-5.　論文（投稿中のものも含む），学会発表等

論文 9 件、学会発表 20 件

6-6.　特許（出願中のものも含む）

出願中 3 件

【個々の委員によるコメント】(論文、特許、学会発表等の研究成果)

・多くの論文を発表しており、この分野への寄与は大きいものと思われる。口頭発表やプレス発表も十分になされている。
・Top viewed article となる論文を出版しているなど、良好な結果である。
・研究成果に見合った特許出願がなされている。

6-7.　科学技術への波及効果

反転 MOS 型トランジスタの開発により、これまでの小電流 Fin 型トランジスタを用いた基礎研究から、アンペア級のトランジスタによる電力変換回路応用等の実用化を視野に入れた開発が可能となる。また、エピタキシャルウエハの設計により 0.6 kV から 15 kV 以上の幅広い耐圧領域で SiC を凌ぐ高性能で低コストの次世代パワーデバイスとして適用が期待できる。

【個々の委員によるコメント】(発展性と波及効果)

・大手デバイスメーカと K プロを開始するなどの発展性が出ている。
・低オン抵抗化、耐圧の確保に課題はあるものの、縦型 Ga_2O_3 実現に向けた基礎技術の確立に貢献したと思われる。

・量産に対応できるラインにより試作が行われており、試作結果より問題点が具体的に明らかになっているので、今後に発展が期待できる。
・損失低下と放熱性の向上ができれば実用化に近づく。
・結晶欠損の構造解析技術は、他への波及効果が期待できる。

6-8.　効率的な研究実施体制とマネジメント

高電圧、大電流トランジスタの実証には基板、エピ中の結晶欠陥の制御が必要であるため、結晶欠陥の構造解析で SiC、GaN デバイス開発で多くの知見を有するファインセラミックスセンターとの連携、評価デバイス提供、解析結果を共有して開発を推進した。

大電流トランジスタ作製に必須となる 4 インチ量産ラインでの試作では、ダイオード開発中の 4 インチ量産ラインへトランジスタプロセスを展開することにより開発期間を短縮、開発費の効率化をはかった。

【個々の委員によるコメント】(効率的な研究実施体制とマネジメント)
・試作と評価の分担がはっきりしており、十分機能していた。

6-9.　研究推進時に生じた問題への対応

最終年度は目標達成のため 4 インチウエハを用いた外注試作費が増加したため、デバイス CAD ソフトのリースを取り止めて対応した。

【個々の委員によるコメント】(研究推進時に生じた問題への対応)
・X 線によるデバイスの解析方法を開発するなどの成果がある一方、膜の欠陥を追い詰めきれなかったという側面がある。
・次のステップにつながる問題点の整理を行っており、適切に対処していたと評価できる。

6-10.　経費の効率的な執行

研究経費は、デバイスシミュレータおよびデバイス試作・評価のため 7 割程度を使用し、残りを消耗品や人件費として用いた。購入した設備一式は、全て本プロジェクトの実行に必須なものであり、効率的に経費を執行できたと考えている。

【個々の委員によるコメント】(経費の効率的な執行)
・特に問題はない。

---

*1　LLC コンバータ：インダクタンス(L)とキャパシタ(C)の共振を利用した直流/直流電力変換回路。回路内で直列に接続した 2 つのトランジスタの交互のオン、オフにより直流/直流変換を行う。