

## 1. 評価対象研究課題

- (1) 研究課題名：超高耐圧 $\alpha$ 型酸化ガリウムパワー半導体とパルス電源の基礎研究
- (2) 研究代表者：株式会社 FLOSFIA 四戸 孝
- (3) 研究期間：平成30年度～令和4年度

## 2. 終了評価の実施概要

日時：令和5年11月10日

場所：TKP 秋葉原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 洽 (委員長)

神奈川大学 名誉教授

遠藤 信行

東京理科大学 工学部 電気工学科 嘱託教授／

東京理科大学 名誉教授

村口 正弘

元東海大学 教授

森本 雅之

(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

高電圧・大電流のパルス電源の実現を目的として、酸化ガリウム ( $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) を用いたスイッチング素子の開発、及び開発した素子を用いたパルス電源のシステム化の研究を実施した。

### 成果の概要

スイッチング素子の開発では、完全縦型 SBD (ショットキーバリアダイオード) で耐圧 1.7 kV アンペア級動作実証、完全縦型トレンチゲート MOSFET で 0.4 A 通電実証に成功した。また、酸化ガリウムパワーデバイスに期待されている p 型半導体を組み込んだ要素開発に成功、横型 PiN ダイオードによる耐圧 10 kV 実証、薄型 PiN ダイオードで電導度変調を確認する等、世界初の成果をあげた。パルス電源のシステム化では、独自の小型モジュールを用いたパルス電源を仮作して、1.1 kV 4.6 kA 10 msec のパルス出力を実証した。

#### 4. 終了評価の評点

A 十分な研究成果をあげた。

#### 5. 総合コメント

p型半導体の実現、反転型チャネル縦型MOSFETの基本動作確認、 $\kappa$ 型結晶の見通し、論文、特許など、多くの副次的成果が得られている。

電流値は、目標10Aに対して実現値0.4Aと、目標に遠く及ばないレベルであり、未達の理由が解析されていない。また、パルス電源の試作では研究成果が示されず、費用に相応する成果を今後、公表してほしい。

本方式が今後時間をかけて改善できるかについては楽観せずに、後継プロジェクトで頑張してほしい。

#### 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）

###### (1) スイッチング素子の開発

・定量的な目標値 A（大電流化）：耐压1.7 kV以上、電流容量100 A以上のMOSFETを実証

完全縦型化に時間を要し目標値には達しなかったが、以下に示す途中段階の成果が得られた。

- ① 完全縦型SBDで耐压1.7 kVアンペア級動作を確認した（世界初。プレスリリース）。
- ② 大電流密度化につながる完全縦型トレンチゲートMOSFETで0.4 A通電を確認した（世界初。従前は数 $\mu$ A程度）。
- ③ 耐压1.7 kV級MOSFETのシミュレーションによるデバイス設計を完了した。

・定量的な目標値 B（高耐压化）：耐压10 kV以上、電流容量10 A以上のMOSFETを実証

目標値には達しなかったが、以下に示す途中段階の成果が得られた。

- ② 横型PiNダイオードを試作し耐压10 kVを確認した（世界初。従前は100 V程度）。
- ② 厚膜(30  $\mu$ m)、低濃度( $1 \times 10^{16}$   $\text{cm}^{-3}$ )のエピタキシャル膜で耐压10 kV級完全縦型PiNダイオードを試作した。
- ③ 耐压10k V級MOSFETのシミュレーションによるデバイス設計を完了した。

・定量的な目標値 C（ハイリスク研究；PiNダイオード実証）：耐压20kV以上のPiNダイオードを実証

困難とされていた伝導度変調を確認できた。

- ① エピタキシャル薄膜でのPiNダイオードで伝導度変調を確認した（世界初）。
- ② 耐压20 kV級PiNダイオードのシミュレーションによるデバイス設計を完了し

た。

③ 耐圧20 kV向けパッケージ開発を行い20 kVの耐圧特性を確認した。

- ・ 定量的な目標値 D (ハイリスク研究 ; IGBT実証) : 耐圧20 kV以上のIGBTを実証デバイスシミュレーションによるデバイス設計までは行ったが、試作は実施しなかった。

① 目標値C②の結果をもとに、耐圧20 kV級IGBTのシミュレーションによるデバイス設計を完了した。

② 上記①の結果をもとに静特性・動特性、熱解析、チップ並列動作解析等を行い、耐圧20 kV、1 kA、IGBTの実現可能性を検討した。

## (2) パルス電源のシステム化

- ・ 定量的な目標値 E (パルス電源実証) : 耐圧1.7 kV、100 A級MOSFETを用いて1 kV、5 kA級パルス電源ミニモデルを仮作し、模擬負荷による実証SiC-MOSFETモジュールを用いておおよそ目標値に近いパルス出力を実証した。

① 仮想 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>としてSiC MOSFETスイッチングモジュールを適用したパルス電源を仮作して正常動作を確認し、1.1 kV、4.6 kA、10 msecのパルス出力を実証した。

### 【個々の委員によるコメント】(主題的成果)

- ・ p型半導体を実現し、反転型チャネル縦型MOSFETの基本動作を確認できたことは評価できる。ただし、目標電流値10 Aと比較し実現値0.4 Aでは、目標に遠く及ばないレベルである。
- ・ パルス電源については、目標値は達成したが、ただ「目標どおり動いた」で終わっており、将来を見据えた技術課題の抽出に至っておらず、要素的・技術的な成果とは認めがたい。

## 6-2. 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)

ウェハ開発用高品質結晶成長技術の開発において、Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>の他の結晶構造である $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>のエピタキシャル成長において想定していなかった成果があった。高品質結晶成長を目的とした横方向成長(EL0: Epitaxial Lateral Overgrowth)の成長挙動を把握するための実験をしていたところ、特定の結晶軸方向にマスク材を形成するとこれまで得られなかった単結晶の $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>が成長することを発見した。 $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>もバンドギャップが4.9 eVと $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub>を超える強誘電性ウルトラワイドバンドギャップ半導体であり、強誘電特性と半導体特性を組み合わせた新規なデバイスの創出につながる可能性がある。本成果はJapanese Journal of Applied Physics 誌に掲載された。

### 【個々の委員によるコメント】(副次的成果)

- ・  $\kappa$  型結晶の見通しが得られた。
- ・ 関連する要素技術には進展があった。

### 6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

本研究の研究期間において、代表研究機関の（株）FLOSFIA では他の国プロ（政府研究開発プロジェクト）も活用しながら中耐圧（耐圧 600 V-1200 V 級）パワー半導体素子の開発および事業化へ向けた準備を並行して実施した。ここでは本研究の基礎研究により底上げされた材料技術・素子技術・評価技術が適用され、開発・事業化を加速する効果が得られた。

- ・ 耐圧 600 V-1200 V のダイオード(SBD)開発
  - 【国立研究開発法人新エネルギー・産業技術総合開発機構】
  - 耐圧 600 V 級 SBD は量産間近、評価用ボード販売（2020 年～）、サンプル出荷（2021 年～）
  - SBD 特性は  $\beta$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> を含めて比較しても幅広い耐圧範囲でトップデータを独占
- ・ 耐圧 600 V-1200 V のスイッチング素子(MOSFET)開発
  - 【内閣府 戦略的イノベーション創造プログラム（SIP）第 2 期】
  - プレーナゲート MOSFET のスイッチング動作成功、事業化計画策定
- ・ 新工場の立上げ、量産設備導入、量産体制構築
  - 【経済産業省 サプライチェーン対策のための国内投資促進事業費補助金】
- ・ 特許網の構築：出願件数 640 件以上、特許登録 230 件以上（海外含む）
- ・ 上流(材料)・下流(ユーザー)の双方で業界のリーダー企業と強固なパートナー関係を構築

### 6-4. 科学技術上特筆すべき成果

- ・ 本研究による基礎技術のデータ蓄積により、（株）FLOSFIA で並行して進めている中耐圧パワー半導体素子の開発および事業化を加速する効果が得られている。これにより、京都大学が 2008 年に世界で初めて  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の材料合成（エピタキシャル成長）に成功してから、わずか 15 年ほどでパワー半導体素子の量産間近まで辿りつくことができた。量産での品質安定化は、さらに研究を高度化するうえで安定したデータの取得へとポジティブな影響をもたらすと考える。
- ・ 現時点でも  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の大電流化につながる完全縦型化に成功しているのは（株）FLOSFIA のみであり、今後の  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワー半導体素子の電流化の基盤技術を構築できている。
- ・ 横型 PiN ダイオードによる 10kV 級パワー半導体素子の実証試作は世界初の成果であり、今後の  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワー半導体素子の高耐圧化につながる成果が得られた。
- ・ ウェハの高品質化技術が進み、耐圧 10 kV 級パワー半導体素子開発の土台ができた。これらの成果をもとに、次期国プロで耐圧 10 kV、100 A 級 MOSFET の開

発に取り組むこととした。

- ・  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では不可能と考えられていたバイポーラデバイスの基本原理実証（電導度変調の確認）ができた。これにより従来は諦められていた  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> バイポーラデバイス研究の端緒を拓くことができた。
- ・  $\alpha$ -(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> による耐熱性の向上、バンドギャップの拡大等の成果により、さらにバンドギャップが広く高耐圧化が期待できる  $\alpha$ -(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワーデバイス研究の素地を固めることができた。先行している GaN でも AlGa<sub>2</sub>N や AlN (バンドギャップ 6.1 eV) の基礎研究が進められており、さらにバンドギャップの広い 6.5 eV が実証されたことは特筆に値する。
- ・ 副次的成果で記載した  $\kappa$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> は、これまで 3 種類の方向に配向した小さな単結晶の寄せ集めでしか成膜できなかつたものが、高品質な単結晶として成膜することに成功した。この材料は強誘電体特性を持つために、実用化が始まっている GaN よりさらに低消費電力でノーマリオフ（パワーデバイスで要求される制御電源喪失時にオフとなる特性）の高周波デバイスを実現できる可能性を持っている。

【個々の委員によるコメント】（科学技術上特筆すべき成果）

- ・ 新たな材料に取り組み、その限りでは世界初をいくつか成就している。
- ・ 縦型素子の製法に関して普及効果があり、評価できる。

6-5. 論文（投稿中のものも含む）、学会発表等

学術論文 5 件、口頭発表 7 件、プレス発表 1 件

産業タイムズ社主催「半導体・オブ・ザ・イヤー2020」で、半導体デバイス部門のグランプリを受賞

6-6. 特許（出願中のものも含む）

出願中 52 件（うち 1 件は登録済み）

半導体材料、素子、装置と幅広く出願し、今後の社会実装に向けて強固な特許網を構築している。

また、特許庁から「知財功労賞（経済産業大臣）」を受賞した。

【個々の委員によるコメント】（論文、特許、学会発表等の研究の成果）

- ・ 論文、特許に関しては十分な成果が出ている。

6-7. 科学技術への波及効果

- ・ スイッチング素子の開発にあたり実施した各種評価方法はワイドバンドギャップ半導体に適した評価方法であり、実用化が急速に進む SiC や GaN に続くウル

トラワイドバンドギャップ半導体の評価に役立てられるものである。

→事業化準備を進める耐圧 600-1200 V 級素子開発でもこれらの知見を活用。

- ・耐圧 10kV 以上の  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワー半導体に適用可能な低濃度、厚膜エピタキシャル層が開発され、今後の耐圧 10 kV 級素子開発の土台ができたといえる。

→この成果をもとに次期国プロで耐圧 10 kV、100 A 級 MOSFET の開発に取り組む。

- ・高品質化技術にも進展があり、転位密度を  $10^{10}$  cm<sup>-2</sup> 台から  $10^7$  cm<sup>-2</sup> 台へ低減できる見通しが出てきた。本研究により得られた高品質化技術による  $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 結晶を詳細に評価することで本質的な物性や欠陥の影響が明らかになり、学術だけでなく産業応用的にも財産になる情報が得られる可能性がある。

→材料の高品質化が進み、 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 本来の材料特性を評価できる素地が固まった。

- ・バイポーラ動作の基本となる電導度変調を初めて観測することができた。本研究により得られた成果をもとにバイポーラデバイス研究の進展が期待できる。

→ $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> では不可能と考えられていたバイポーラデバイス研究の端緒を拓いた。

- ・AlN を超えるバンドギャップの実証、耐熱性向上の確認、n 型ドーピング実証等の成果があった。 $\alpha$ -Ga<sub>2</sub>O<sub>3</sub> の発展形としての研究の足掛かりをつかむことができた。

→さらに高耐圧が期待できる  $\alpha$ -(AlGa)<sub>2</sub>O<sub>3</sub> パワーデバイス研究の素地を固めた。

#### 6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

研究期間全体を通して「研究開発進捗確認会議」を毎月 1 回の頻度で実施した。ミーティングでは、研究の進捗状況の確認、技術課題の確認、評価、解決方針の調整、研究の方向性に関する協議や知財関連の活動等のほか、技術動向、業界動向や他者とのベンチマーク等に関する情報共有を行い、プロジェクトの円滑な推進を図った。本研究の実施により得られた成果について、国内外の学会等において積極的に発表し、本研究の更なる進展に努めた。

#### 【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）

- ・パルス電源の試作は、目標どおり動作したとの話で終わっている。将来の 1 MA 級の出力の際に生じうる技術課題を見出すという観点では、意味のない内容であった。

#### 6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

- ・定量的な目標値 A（大電流化）では MOSFET の完全縦型化プロセスの開発が難航した。これに対応するため、特性改善については完全縦型化プロセスを適用せずに開発が可能な疑似縦型構造を用いて開発を促進し、完全縦型化プロセス開

発については経験豊富な SBD の当該プロセス担当技術者の応援をもって開発を促進した。この結果、数 mA オーダーしか通電できなかったものが、その 100 倍程度の 0.4 A まで通電することに成功した。目標値に対しては不十分であるが、現時点では完全縦型 MOSFET で 0.4 A 通電した例は他にない。

- 定量的な目標値 B（高耐压化）では耐压 10 kV 相当の厚膜・低濃度のエピタキシャル膜は最終年度に完成したが、上記の完全縦型 MOSFET の準備が整わず PiN ダイオードの試作にとどまった。この状況に対応するため、厚膜が不要な横型 PiN ダイオードの試作を進め耐压 10 kV を実証することに成功した。また、耐压 10 kV 級 MOSFET の試作に着手する準備として、独自開発の導電型 p 型層を用いた電界緩和構造を適用した素子構造のシミュレーションによる設計を行い、各種パラメータの最適化を実施した。これにより、今後の耐压 10 kV 級 MOSFET 開発の土台を構築することに成功した。これらの技術は後続の研究で活用を計画している。
- 定量的な目標値 C（PiN ダイオード実証）および D（IGBT 実証）では、エピタキシャル薄膜（膜厚 1-2  $\mu\text{m}$ ）では世界初の伝導度変調の確認に成功した。本研究開始時には不可能とも考えられていた電導度変調が確認された成果は大きいですが、超高耐压素子に適用するには不十分な結果となった。これに対応するため、耐压 20 kV 級 PiN ダイオードおよび IGBT の包括的なデバイスシミュレーションを行い、エピタキシャル層として有すべき目標値を明らかにした。これにより、今後のバイポーラデバイス研究を進めるうえでの目標設定を明確にすることができた。

#### 6-10. 経費の効率的な執行

経費の執行にあたっては、研究目的に合致する仕様のものを選定し、各研究機関の定めにより相見積、入札などを実施して適正な価格で調達した。前半にスイッチング素子の試作・評価設備を計上、後半にパルス電源の作製費用を計上し、めりはりのある予算執行を行った。研究の進展に伴って、計画より使用頻度が少ないものは代替手段を探して導入を取りやめる一方で、使用頻度が高くなり即座にフィードバックが必要な装置や、新たに必要となった装置を導入するなど、研究効率・スピードを高めるために機動的に予算を運用した。

#### 【個々の委員によるコメント】（経費の効率的な執行）

- パルス電源に対し、研究経費が掛かっているにもかかわらず研究成果（論文、特許）がないため、研究成果として公表してもらいたい。