

安全保障技術研究推進制度 令和3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：極限量子閉じ込め効果を利用した革新的高出力・高周波デバイス
- (2) 研究代表者：富士通株式会社 小谷 淳二
- (3) 研究期間：平成29年度～令和3年度

2. 終了評価の実施概要

日時：令和4年11月29日

場所：ビジョンセンター浜松町

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)

東京工業大学 工学院 電気電子系 教授

梶川 浩太郎

東京農工大学 名誉教授

佐藤 勝昭

東京工業大学 名誉教授

谷岡 明彦

千歳科学技術大学 理工学部 特任教授

下村 政嗣

理化学研究所 光量子工学研究センター センター長

緑川 克美

(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

本研究は、将来の無線通信技術に資する半導体デバイスの飛躍的な性能向上を目指し、次世代材料の一つとして期待される超ワイドバンドギャップ半導体(AIN)を利用した革新的高出力デバイス創造の可能性を探るものである。さらに、高品質 AIN 自立基板作製技術の確立と、産業的側面で普及に不可欠な大口径化についても検証を行った。

成果の概要

AIN 基板上トランジスタとして世界最高出力密度となる 24.4 W/mm の高出力動作を実証した。また、複数のサブバンドを扱う電子輸送現象の計算技術を確立し、量子

閉じ込め構造の設計指導原理を得た。さらに、高純度 2 インチ AlN 自立基板の作製技術を確立した。加えて、高温成長において出現するウェーハ端部のファセットの傾きから大口径化の指針を得た。

詳細は、以下の通り。

(1) Xバンドの高周波帯において、高電子移動度を実現する電子走行層内部電界の低減技術、MOCVD(有機金属気相成長)装置を利用した高耐圧絶縁膜形成技術により、AlN 基板上トランジスタとして世界最高出力密度となる 24.4 W/mm の高出力動作に成功した。

(2) 高出力化に伴う発熱量の増加に対応するため、高放熱材料(ダイヤモンド)との異種材料融合技術について表面および裏面からの放熱構造について検討した。熱CVD法を用いてトランジスタ表面にダイヤモンド膜を形成する技術を開発し、世界で初めて表面に形成したダイヤモンド膜による放熱効果を実証した。さらに、AlN基板とダイヤモンド基板を接合する技術を確立し、熱抵抗が 1/4 となることを実証した。

(3) 導波管内を中空化した SIW(ポスト壁導波路)を用いた電力合成技術の開発を行い、従来の Wilkinson 型合成器に対して電力合成損失を 1.6 dB 低減した。さらに高インピーダンスな AlN 基板上トランジスタパラメータを取得し、DPA(デジタルパワーアンプ)によりバックオフ時の出力電力が 50%超増大することを計算で実証した。

(4) 量子閉じ込め効果について、理論および実験の両面から検証を行い、従来電子輸送を超える電子高速化に向けた指針を得た。フォトルミネッセンス測定および量子ホール効果測定から、閉じ込めチャンネル構造における量子準位の形成を確認した。さらに、セルオートマトン法を利用して複数のサブバンドや散乱機構を考慮した計算手法を確立し、電子を量子井戸中に閉じ込めつつ、チャンネル中の内部電界を低減することが電子高速化の鍵であるという重要な設計指針を初めて明らかにした。

(5) 大口径自立基板の作製は、産業的側面でのインパクトが大きく、新材料を利用した次世代デバイスの広範な分野における普及を後押しすることが期待される。本研究では、HVPE法(ハイドライド気相成長法)による高純度 AlN 基板作製技術の研究に取り組み、成長速度 100 μ m/h 超、ウェーハ端面における口径拡大を実証した。さらに、従来の PVT 法で作製した AlN 基板は高濃度の不純物を含有することで有色であるのに対し、無色透明な高純度 2 インチ AlN 基板の作製に成功した。

以上の成果により、X帯トランジスタにおいて従来比4倍の出力密度を達成し、従来比2.5倍の低損失電力合成回路と合わせて、従来比10倍の高出力化に目途を付けた。

4. 終了評価の評点

S 当初は想定されていなかったような、非常にすばらしい成果をあげた。

5. 総合コメント

AlN基板上トランジスタとして世界最高出力の達成、動作温度の低減、高耐圧化など、当初の目標を上回る大きな成果が得られた。また、固相・気相界面での理論的考察に基づき優れた表面構造を有するAlNの結晶成長技術を確立するなど、学術的にも重要な成果が得られたことは高く評価できる。今後は大口径化を実現し、実用化に向けたさらなる展開が期待される。

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）

(1) X帯の高周波帯においてAlN基板上トランジスタとして世界初の高出力動作(15.2W/mm)を達成し、さらに電子走行層内部電界の低減技術、MOCVD装置を利用した高耐圧絶縁膜形成技術により、世界最高出力密度となる24.4 W/mmの高出力動作に成功したことは高く評価できる。

(2) 熱CVD法を用いてトランジスタ表面にダイヤモンド膜を形成する技術を開発し、世界で初めて表面に形成したダイヤモンド膜による放熱効果を実証した。さらに、AlN基板とダイヤモンド基板を接合する技術を確立し、熱抵抗が1/4となることを実証した。

(3) 導波管内を中空化したSIWを用いた電力合成技術の開発を行い、従来のWilkinson型8合成器に対して電力合成損失を1.6 dB低減した。さらに高インピーダンスなAlN基板上トランジスタパラメータを取得し、デジタル変調型パワーアンプによりバックオフ時の出力電力が50%超増大することを計算で実証した。

(4) 量子閉じ込め効果について、理論および実験の両面から検証を行い、従来電子輸送を超える電子高速化の指針が得られた。本研究独自のセルオートマトン法を利用した計算手法により、電子を量子井戸中に閉じ込めつつ、内部電界を低減することが電子高速化の鍵であることを初めて明らかにした。

(5) 大口径自立基板の作製は、産業的側面でのインパクトが大きく、新材料を利用した次世代デバイスの広範な分野における普及を後押しすると期待される。本研究では、HVPE法による高純度AlN基板作製技術の研究を実施し、成長速度 $100\mu\text{m/h}$ 超、ウェーハ端面における口径拡大を実証した。さらに、無色透明な高純度2インチAlN基板の作製に成功した。

【個々の委員によるコメント】(主題的成果)

- ・ 目標である高出力素子は実現されており、世界的にもトップランナーと言える。
- ・ 当初の目標よりはるかに高いパワーを達成し、AlNの高周波デバイス実用化に道を拓いたことは大きな成果である。
- ・ 高出力動作や動作温度の低減等のトップデータが得られており、十分に目標が達成された。
- ・ デバイスとして困難な構造を実現したことは評価できる。
- ・ 次世代半導体の社会実装に期待したい。

6-2. 計画時に想定していなかった成果(副次的成果)

○高出力化に寄与する技術

(1) AlN基板上トランジスタにおける高耐圧化の効果

本研究では基板にAlNを採用したことで、Al組成30%以上でありながら転位密度の低い高品質AlGa_{0.3}Nバッファ層を利用することが可能となった。その結果、SiC基板上に作製したHEMT構造に対しても高い耐圧が得られることが明らかになった。これは計画時に想定していなかった成果であると評価できる。

(2) 高温成長・高耐圧SiN_x絶縁膜による高耐圧化

研究の中で、従来のCVD法により成長したSiN_x膜の耐圧不足が明らかになったが、MOCVD装置を用いた高温成膜(約940°C)SiN_xを開発することで、110Vの高電圧動作を達成した(従来SiN_xでは70V動作が限界)。これにより最高出力密度24.4W/mmを実現した。高温成膜SiN_xによる動作電圧の向上は、計画時に想定していなかった成果であると評価できる。

(3) 歪み制御バッファ構造による低シート抵抗化

セルオートマトン法を用いた電子輸送の解析から、量子閉じ込め構造内部の電界を低減することが低電界移動度の改善に必要であることを明らかにし、結晶歪みを制御することで、AlGa_{0.3}Nバッファ層およびGa_{0.5}Nチャネル界面に発生する負の分極電荷を低減する結晶成長技術を開発した。これにより低電界移動度を改善し、当初最終目標(800Ω/sq.)を大きく超える低いシート抵抗313.3Ω/sq.を達成したことは高く評価できる。

○電子輸送原理の理解に基づいた最適構造の提案

電子輸送原理の解析から、量子閉じ込め状態を実現しつつ、チャンネル中の内部電界を低減することが高電界・低電界領域両方の電子速度を向上する上で重要であることを明らかにした。この基本指針に基づき、分極電界が発生しない m 面結晶を用いた量子チャンネル構造において、低電界・高電界の両方で従来 HEMT を凌駕出来ることを理論計算で示した。これは計画時に想定していなかった成果として評価できる。

○高品質 AlN 基板の作製技術

当初、PVT-AlN 基板と同等の結晶性（転位密度）を維持したまま AlN を $100\ \mu\text{m/h}$ 以上で高速 HVPE 成長するには、基板温度を高温化する他に対応策がないと考えられた。しかし、PVT-AlN(0001) ジャスト基板（表面オフ角 0.5° 未満）の表面オフを意図的に m 方向に揃えることで、 1450°C という従来と同じ温度で $150\ \mu\text{m/h}$ を超える成長速度で基板と同等の結晶性を維持できることを明らかにした。今後、AlN 基板の生産においては表面オフを m 方向に揃えたジャスト基板の製造が標準プロセスになると考えられる。これは計画時に想定していなかった成果として評価できる。

【個々の委員によるコメント】（副次的成果）

- ・ いくつもの想定外の課題に取り組み、それがブレークスルーにつながった。
- ・ 当初の予想に反した結果が得られたが、それを十分に考察しながら解決した点が想定以上の成果を生んだ。
- ・ 高耐圧化などいくつかの副次的成果を上げていると言える。
- ・ 当初の計画を上回る高圧動作やシミュレーションによる解析を駆使した改善等、想定外の成果が出ている。

6-3. 他の者により派生した成果（間接的成果）

本研究では、高い電子移動度を有する量子チャンネル構造の形成を目指し、特に界面制御に着目した研究が行われた。その結果、界面の分極電荷を低減しつつ、平坦性の高い量子チャンネル構造を成長する界面制御技術を確立した。一方、GaN 基板上トランジスタは高い結晶品質が得られるものの、基板/エピタキシャル成長層界面に存在する Si 不純物の影響で高効率化に課題があった。

本研究で得られた残留不純物を除去する適切な成長前処理技術を展開することで、GaN 基板上成長における Si 不純物の偏析を抑制することが可能となった。GaN 基板/エピ界面に起因したドレインコンダクタンスを抑制することで、世界最高効率 GaN トランジスタの動作実証に成功したことは評価できる（応用物理学会論文賞を受賞）。

6-4. 科学技術上特筆すべき成果

本研究の特徴は、次世代材料の一つとして期待される超ワイドバンドギャップ半

導体 (AlN) を利用し、従来の SiC 基板上 GaN HEMT 構造を凌駕する次世代デバイス創造の可能性を探ることにある。基板材料を AlN へ刷新し、量子効果を取り入れた電子輸送原理を検証する本研究は新規性・先導性が高く、AlN 基板上 HEMT 研究の礎となり得る以下に示す特筆すべき成果を挙げた。

米国コーネル大学の先行研究に代表されるように、従来 AlN 基板上 HEMT 構造の電子移動度は低く ($200\sim 600\text{ cm}^2/\text{Vsec}$ 程度)、高出力化には課題があった。本研究では、閉じ込め状態にある電子の移動度と分極電荷による内部電界の関係を厳密な理論計算から明らかにし、チャンネル内の分極電界を低減するバッファ層成長技術を確立した。分極電荷制御に基づく電子移動度の改善は、本研究独自の取り組みであり、新規性・独自性が高いと評価できる。その結果、世界に先駆けて AlN 基板上 HEMT の高出力動作に成功し、新規 AlN 基板上構造の可能性の高さが示された。これらの成果は、AlN 基板上構造の優れた可能性を初めて示すものであり、学術的価値が高い。

【個々の委員によるコメント】 (科学技術上特筆すべき成果)

- ・ 出力面で世界最高のデータを得たことは評価できる。
- ・ AlN 基板上にデバイスを構成するという世界に先駆けた特筆すべき成果と言える。
- ・ 高出力動作や動作温度の低減等の成果では学術論文においても高く評価できる。

6-5. 論文, 学会発表等

論文 14 件

1. Shiro Ozaki, Junya Yaita, Atsushi Yamada, Yusuke Kumazaki, Yuichi Minoura, Toshihiro Ohki, Naoya Okamoto, Norikazu Nakamura, and Junji Kotani, “First demonstration of X-band AlGaIn/GaN high electron mobility transistors using free-standing AlN substrate over 15-W/mm output power”, Applied Physics Express, Vol. 14, no. 4, 2021. (2021 年度 Spotlights 論文に選出)
2. Toru Nagashima, Reiko Ishikawa, Tatsuya Hitomi, Reo Yamamoto, Junji Kotani, Yoshinao Kumagai, “Homoeptaxial Growth of AlN on a 2-in.-diameter AlN Single Crystal Substrate by hydrid vapor phase epitaxy”, Journal of Crystal Growth, vol. 540, 125644, 2020. 等

口頭発表 26 件 (招待講演 5 件)

1. 64th IEDM, “Recent advancement of GaN HEMT with InAlGaIn barrier layer and future prospects of AlN-based electron devices” (招待講演)
2. IMFEDK-2021, ” Current status of high-power GaN HEMTs and future prospects on AlN-based devices” , (基調講演) 等

プレスリリース・ウェブ記事掲載：各1件

1. 富士通プレスリリース「GaN HEMTの放熱効率を高めるダイヤモンド膜の形成に成功」(<https://pr.fujitsu.com/jp/news/2019/12/5.html>)
2. 富士通ウェブ記事「世界初！新材料窒化アルミニウムを用いた高出力パワーアンプの開発に成功」(<https://www.fujitsu.com/jp/about/research/article/202201-high-output-aln.html>)

【個々の委員によるコメント】（論文（投稿中のものも含む），学会発表等）

- ・ 非常に多くの成果を公表している。
- ・ 特許だけでなく多くの論文発表も行っており、社会への還元も十分であると考えられる。
- ・ 多くの招待講演をしていることも評価できる。

6-6. 特許（出願中のものも含む）

登録済み5件、出願中36件

1. 山田敦史、小谷淳二、“半導体装置及びその製造方法”、特許第7024534号
2. Yamada Atsushi, Kotani Junji, “Semiconductor device and method of manufacturing the same”, 10707338.
3. Ozaki Shirou, Makiyama Kozo, Minoura Yuichi, Kumazaki Yusuke, Ohki Toshihiro, Okamoto Naoya, “Compound semiconductor device”, 10964805.
4. Ozaki Shirou, Ohki Toshihiro, “Compound semiconductor device and fabrication method therefor, and amplifier”, 11088044.
5. Makiyama Kozo, “Compound semiconductor device, method of manufacturing compound semiconductor device, and amplifier”, 11094813.

6-7. 科学技術への波及効果

COVID-19感染拡大により、高品質AlN基板を用いたAlGaN系の高出力・長寿命なウイルス不活性化用深紫外光源（発光波長265nm）に対する注目が高まった。現在、深紫外線透過性を有するAlN結晶は高純度なHVPE-AlN基板のみであり、その利用が始まっている。これによりAlN基板のポテンシャルが広く認知されることで広範な使用につながるものと期待される。

本研究は、新材料への挑戦と、新しい電子輸送現象の検証という2つの技術革新を有する挑戦的研究である。AlN基板上デバイスにて世界最高出力を達成し、初めてAlN基板上構造のポテンシャルを実証した先駆的研究であり、学術的価値は高いと評価できる。さらに、量子閉じ込め状態における電子輸送現象を詳細に解析し、従来原

理を超える電子高速化の指針を獲得した。これはいずれも将来の技術革新に資する成果である。

【個々の委員によるコメント】（科学技術への波及効果）

- ・ 通信やエネルギー分野への波及効果は大きい。
- ・ 量子井戸の最適化に結晶成長制御が不可欠であることを見出した点は大きな波及効果がある。
- ・ 固相・気相界面での理論的考察に基づき優れた表面構造の窒化アルミの結晶成長技術を確立したことは、結晶成長学として評価できる。
- ・ 量子構造を使い、電荷密度制御を加えた構造は、他の窒化物半導体高周波デバイスにも適用でき、また、発光デバイスにも応用できるため、発展性が期待される。

6-8. 効率的な研究実施体制とマネジメント

四半期ごとに関係機関が一堂に会する全体合同会議を実施した。コロナ禍における他機関との連携にはオンライン会議を活用し、定期的な情報共有が行われた。また、電子輸送解析を担当した産業技術総合研究所とデバイス設計を行った富士通株式会社隔週の定例会議を実施して緊密に連携したことで、電子輸送原理の解析と電子高速化に向けた設計指針を確立する成果を挙げた。

【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）

- ・ 分担機関の役割分担が明確であり、効率的なマネジメントができていると考えられる。
- ・ 実施機関の見事な役割分担と、相互連携が成果をもたらした。

6-9. 研究推進時に生じた問題への対応

従来研究の AlN 基板上 HEMT 構造は、AlN と GaN チャネル界面の平坦性が低く、MBE 法で成長された結晶には高密度の欠陥があることが確認されたため、当初は表面平坦性の向上と欠陥の抑制を指針として成長技術の開発が進められた。しかし、平坦性および欠陥抑制の両方に確実な進捗が得られているにもかかわらず、移動度の改善が見られないという根源的な課題が生じたため、量子チャネル構造における電子輸送状態の解析による原因の究明が検討された。その結果、量子井戸中の強い内部電界により、基底準位と第二準位間のサブバンド間散乱が増加し、移動度の低下が引き起こされることを明らかにし、平坦性・欠陥という当初指針から「バッファ層の歪み制御によるチャネル中の内部電界低減」に基本指針を転換することで、高出力化に向けた最大の課題であった移動度の問題を解決した。当初指針に基づいた改善が得られないことを率直に捉え、理論面から全体方向性を見直すことで課題に柔軟に対応し、目標を達成したことは高く評価できる。

6-10. 経費の効率的な執行

(1) 保有設備の有効利用

各研究機関はいずれも担当分野の研究において実績を有する。本研究では、各研究機関が保有する設備を最大限に有効活用することを前提とし、研究の垂直立ち上げと経費の有効利用が行われた。

(2) 外注費用の圧縮

X線回折を用いた結晶構造の同定など、頻度の高い分析については、富士通株式会社内において解析技術が確立され、外注分析費用の圧縮に繋がった。また、特殊評価など外注分析が必要な案件については、実験計画の調整により試料作製を同時期に実施し、一括の多試料同時分析として外注費用の抑制が行われた。

(3) 相見積りによる価格精査

相見積りを実施し、性能差等の特別な理由がない限りは価格を優先した発注を行い、経費の無駄が省かれた。

【個々の委員によるコメント】(経費の効率的な執行)

- ・ Sタイプならではの高額な結晶成長装置、微細加工装置の導入が、成果につながっている。