

次世代無線通信に向けた高周波 GaN 系バイポーラトランジスタの研究開発

Research on High-Frequency GaN-Based Bipolar Transistors for Next-Generation Wireless Communications

研究代表者

三好 実人 国立大学法人名古屋工業大学 次世代半導体エレクトロニクス共創研究センター
Makoto Miyoshi Nagoya Institute of Technology
Innovative Common Research Center for Advanced Semiconductor Electronics

研究分担者

間瀬 晃 国立大学法人名古屋工業大学 次世代半導体エレクトロニクス共創研究センター
Akira Mase Nagoya Institute of Technology
Innovative Common Research Center for Advanced Semiconductor Electronics

研究期間 令和5年度～令和7年度

概要

GaN 系 HBT は高周波動作が期待される一方、p-GaN の高抵抗と高コンタクト抵抗が実用化の障壁となっている。本研究では GaInN/GaN Multiple Quantum Well (MQW) によりベース比抵抗を約 $0.9 \Omega \text{ cm}$ まで低減し、さらに $0.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$ の低コンタクト抵抗を実現した。これらを反映した HBT を試作し、 $\beta=21$ 、出力電流密度 0.8 kA/cm^2 の動作を確認した。

Abstract

GaN-based heterojunction bipolar transistors (HBTs) show promise for high-frequency operation, yet the high resistivity of p-GaN and large contact resistance remain major obstacles to practical use. This study reduces the base resistivity to approximately $0.9 \Omega \text{ cm}$ using a GaInN/GaN Multiple Quantum Well (MQW) structure and achieves a low contact resistance of $0.5 \text{ m}\Omega \text{ cm}^2$. An HBT incorporating these improvements was fabricated, demonstrating a current gain of $\beta=21$ and a maximum current density of 0.8 kA/cm^2 .

1. まえがき

本研究は、Beyond-5G 移動体通信やミリ波レーダなど次世代無線分野への応用が期待される高周波デバイス、GaN 系ヘテロ接合バイポーラトランジスタ (HBT) に関するものである。高周波トランジスタは移動体通信、衛星通信、自動車レーダなど幅広い用途で利用されており、通信量増加やレーダ搭載車の普及、IoT・無線電力伝送の拡大により、今後も需要が高まると見込まれる。次世代デバイスには、ミリ波帯でも高出力・高利得・低雑音を実現する性能が求められ、ワイドバンドギャップ材料である GaN 系 HBT はこれらの要件を満たす特性を有する。

我々は、高品質な格子整合 Al(Ga)InN/GaN ヘテロ構造技術を基盤とした GaN 系 HBT を提案してきた。本研究では、これまでの成果を踏まえ、実用レベルの HBT 実現を目指して開発を進めた。フェーズ I では課題であった p 型層および電極コンタクト抵抗の低減に取り組み、新たな p 型ドーピング法と再成長コンタクト技術確立した。フェーズ II では、これらの技術を用いて HBT の設計・試作と高周波特性評価を行い、ミリ波応用に向けた有用性を実証した。

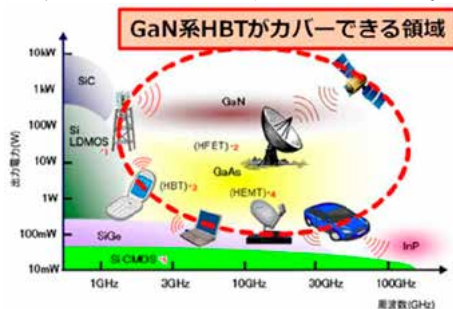


図 1. 高周波デバイスの応用市場と性能領域
(三菱電機ホームページ記載の図に加筆)

2. 研究内容及び成果

高周波デバイスとして有効な GaN 系 HBT であるが、以下の3課題が障害となっている。

【課題1】ベース層上にエミッタ層が積層形成のため脱水素処理が不完全となり、比抵抗が本来の p 型 GaN の数倍程度に悪化することである。

【課題2】ベース層の成長時に貫通ピットが形成され、pn 接合における電流リークを誘発することである。これはトランジスタのピンチオフ特性に多大な影響を与える。

【課題3】ベース層の p-GaN と金属電極の界面に高いショットキー障壁が残る、接触抵抗が大きいことである。つまり、高抵抗ベース層と結晶欠陥、高接触抵抗が高周波動作・大電流動作のボトルネックとなっている。これらの課題に対し、我々は以下の取組を行った。

【取組1】GaInN/GaN 薄膜を積層し、多重量子井戸 (MQW) 構造からなるベース層を形成する。量子井戸に発生する2次元正孔による低抵抗化を図った。

【取組2】MQW 構造による欠陥の抑制し、結晶欠陥の少ないベース層を得る。

【取組3】ベース表面の p⁺-GaN 層と Pd/Ni/Ni 電極によるオーミック接続を実現する。

(1) GaInN/GaN MQW 構造による低抵抗化

GaInN/GaN MQW では、GaInN 量子井戸層に正孔が閉じ込められることで二次元ホールガス(2DHG)が形成される。本研究では、InN モル分率と 2 次元伝導の発生条件を明らかにするため、ホール移動度およびシートホール濃度の温度依存性を評価した。試料は c 面サファイア基板上に Metal Organic Chemical Vapor Deposition (MOCVD) 法で成長した Mg ドープ GaInN MQW (井戸 3 nm/バリア 3 nm × 20 組) で、InN モル分率は 1%、3%、5% とした。

比較として単層 p-GaN も作製した。成長後、775 °C・90 分間のアニールで Mg を活性化し、Pd/Ni/Au 電極を形成してホール測定を行った。

図2に示すように、InN 3% 以下の MQW は温度低下とともにホール濃度が増加し、三次元輸送が支配的であった。一方、InN 5% ではホール濃度が一定となる領域が現れ、2次元ホール伝導の発生を示した。以上より、GaN 系 npn-HBT の p 型ベース層として GaInN MQW を用いるには、InN モル分率 5%以上が必要であると判断した。

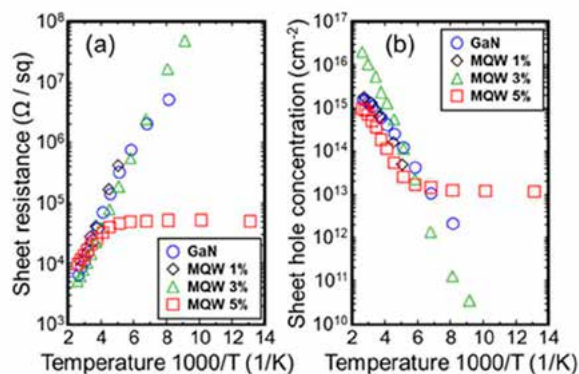


図2. InN モル分率の異なる Mg ドープ GaInN MQW 構造について、ホール効果測定により得られた (a) シート抵抗および (b) シートホール濃度の温度依存性。比較のため、Mg ドープ単層 GaN 膜の結果も併せて示す。

上記評価結果を反映させ、GaInN/GaN 3/3 nm MQW を作成し、Transfer Length Method (TLM)測定を行い膜平面方向の比抵抗を評価した。水準は MQW 20 組、12 組および GaInN 単層とした。図3に TLM 測定で得た I-V 特性を、表1に比抵抗の結果を示す。結果、MQW 20 組の構造で比抵抗値 $0.93 \Omega \cdot \text{cm}$ を得た。従来の GaInN 単層と比較して、大幅な低抵抗化が見込まれる。

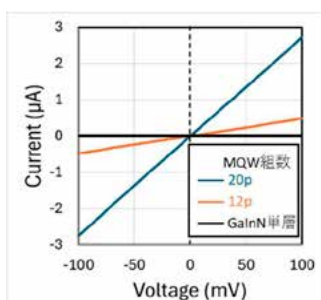


図3 MQW 構造の TLM 測定 I-V 特性

表1 比抵抗の結果比較

MQW 組数	膜厚 (nm)	比抵抗 ($\Omega \cdot \text{cm}$)
20p	133	0.93
12p	85	1.41
GaInN 単層	150	783

(2) MQW 構造によるベース領域の結晶品質の向上

MQW 構造は格子定数の異なる膜を積層するため、下方より伸張する結晶欠陥が曲げられる、または消滅する報告がされている。GaInN/GaN 系では In モル分率に起因する局所的な格子ミスマッチが周期的に導入され、各界面に歪み緩和領域が形成される。この領域が転位の散乱中心として働くこ

とで、単層 GaN または GaInN ベースに比べて転位の貫通が抑制され、上部に形成されるベース層の結晶品質が向上すると考えられる。

本研究では、図4に示すように、AFM 測定により MQW ベースでは RMS 粗さが 0.16 nm と小さく、単層 GaInN ベースの 0.55 nm に比べて表面平坦性が改善されることを確認した。これは成長表面の安定化および転位進展の抑制を反映した結果と解釈できる。また、我々の過去の研究で行った Time-Resolved Photoluminescence (TRPL) 測定では、井戸厚が 3 nm 付近の MQW 試料において発光減衰寿命が最も長く、非放射再結合中心が減少していることが示唆された。(M. Miyoshi et al., Solid-State Electronics 129, (2017).) これらの結果は、MQW が結晶欠陥密度の低減に寄与していることが構造的・光学的に裏付けられる。

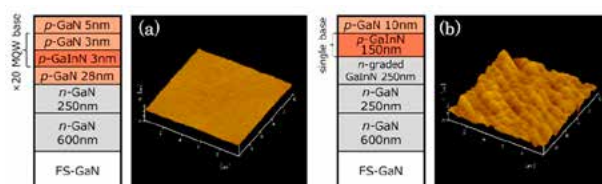


図4. AFM による表面状態の比較 (a) GaInN/GaN MQW base 3/3 nm 22 組 RMS 0.16 nm . (b) GaInN base 150 nm RMS 0.55 nm

(3) p 型ベース層の電極コンタクト抵抗低減

当初より、コンタクト抵抗低減の手法として「選択再成長法」による p 型コンタクト形成と、「Mg 熱拡散」の適用を検討してきた。前者は高温プロセスを必要とするため pn 接合特性が劣化する課題があった。一方、後者では pn 接合特性は改善され、コンタクト抵抗も $3.3 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ まで大きく低減できたものの、目標値には到達しなかった。

そこで、熱負荷が小さく、かつプロセスがシンプルな手法として、p-GaN 最上層に高濃度 Mg ドープ薄膜 ($[\text{Mg}] = 2 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$) を形成し、その上に Pd/Ni/Au を積層した電極を用い、20% 酸素含有の窒素雰囲気中でアニールすることで低コンタクト抵抗化を図った。図5 および表2 に、TLM により評価した結果を示す。比較のため、Ni/Au および Pd/Pt 電極についても同様に評価した。

その結果、Pd/Ni/Au (60/10/30 nm) 電極を用いることで、目標値 ($1 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$) を十分に満たす $0.52 \text{ m}\Omega \cdot \text{cm}^2$ を達成した。最適化されたアニール条件は、 $520 \text{ }^\circ\text{C} / 5 \text{ 分間}$ 、 $\text{N}_2:\text{O}_2 = 4:1$ 雰囲気である。

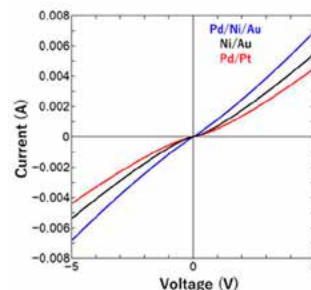


図5. 電極間距離 $5 \mu\text{m}$ の電極対で測定した I-V 曲線

表2. 電極材料と固有接触抵抗比較.

電極材料	膜厚 (nm)	固有接触抵抗 ($\text{m}\Omega \cdot \text{cm}^2$)
Pd/Ni/Au	60/10/30	0.52
Ni/Au	10/100	33.0
Pd/Pt	60/50	28.0

(4) 2インチ径フルサイズウェハプロセスの構築とHBTデバイスの試作

GaInN/GaN の積層による多重量子井戸(MQW)構造をベース層に導入することで生成される二次元ホールガス(2DHG)を利用し、ベース層の低抵抗化を図る手法を提案し、HBT の試作評価を行った。図6に本手法を適用した HBT の概略構造を示す。また、図7に試作した 2 インチ径フルサイズウェハの写真を示す。

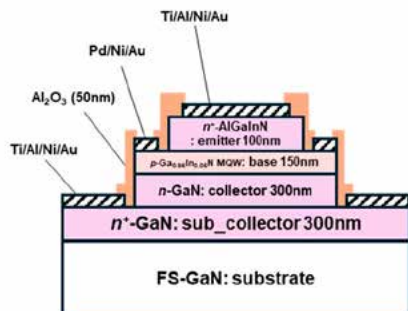


図6. GaInN/GaN MQW 構造をp型ベース領域とするGaIn npn-HBT の概略図

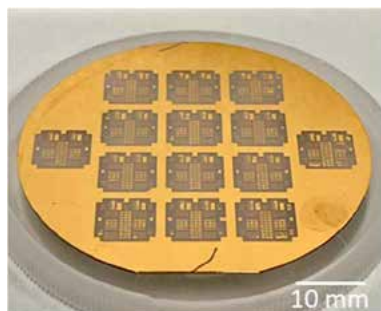


図7. 2インチ基板に試作したHBTの写真。

(5) デバイスシミュレーションを用いた構造設計と試作デバイスの動作解析

本項目では、HBT の特性向上に向けて行ったベース領域の横方向比抵抗低減の効果をシミュレーションで検討した。提案する p-GaInN/GaN 多重量子井戸(MQW)構造を用いた HBT をモデルとし、Silvaco® Atlas により構造設計と動作シミュレーションを行った。図8左に断面構造と動作時の正孔濃度分布を示す。GaInN/GaN MQW (3 nm/3 nm × 20 組)を導入した場合、ベース領域に 10^{19} cm^{-3} を超える高濃度正孔が生成され、図8右に示すように良好な変調動作が得られた。

さらに、小信号特性として、図9(a) 電流増幅率の周波数特性、(b) S11-S22 の Smith Chart、を示す。計算精度については、試作デバイスの測定結果と比較しながら継続的に検証を進める。

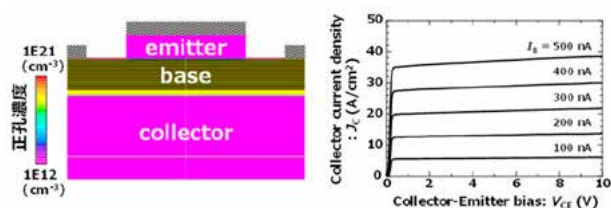


図8. 試作HBTの断面模式図(左:正孔濃度分布図を兼ねる)とデバイスシミュレーションによるI-V静特性(右)

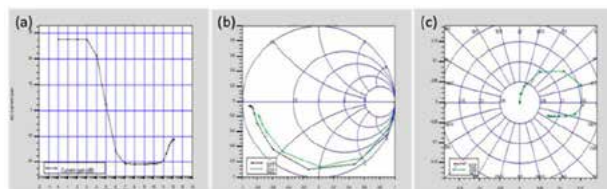


図9. (a) 電流増幅率の周波数特性、(b)スライスパラメータ S11-S22 の Smith Chart、(c) S12-S21 の polar chart のデバイスシミュレーション結果

(6) HBT の試作と評価結果

p-GaInN/GaN MQW をベース領域に用いた GaN 系 npn-HBT を作製した。図6に概略構造を示す。デバイスは Free-standing (FS)-GaN 基板の上に、n⁺-GaIn サブコレクタ、n-GaN コレクタ、p-GaN (28 nm) および Ga_{0.95}In_{0.05}N/GaN (3 nm/3 nm × 20 組) の MQW ベース、さらに p⁺-GaIn コンタクト層を順に成長して形成した。コレクタ電極部を Reactive Ion Etching (RIE)法でサブコレクタまでエッチング後、選択再成長により n⁺-Al_{0.33}Ga_{0.67}In_{0.05}N (100 nm) エミッタを形成した。成長後、Mg 活性化のため 775 °C・90 分間のアニールを行った。n 型電極は Ti/Al/Ni/Au を蒸着し 775 °Cでアニール、p 型電極は Pd/Ni/Au を 520 °Cでアニールして形成した。表面パッシベーションには Atomic Layer Deposition (ALD)-Al₂O₃ (50 nm) を用い、開口部をウェットエッチングで形成した後、Ni/Au パッドを蒸着した。直流特性は B1500A によるオンウエハ測定で取得した。

図10(a) の J-V 特性では、ベース電流によるコレクタ電流の変調と、飽和領域に続く明確な活性領域を確認した。図10(b) の Gummel plot から電流増幅率 β は 21 に達した。加えて、図11に示す結果より、ベース層の抵抗低減により、高いベース電流・コレクタ電流密度でも変調動作が確認できた。最大電流密度は 0.8 kA/cm^2 ($I_B=3 \text{ mA}$ $V_{CE}=30 \text{ V}$) に到達した。

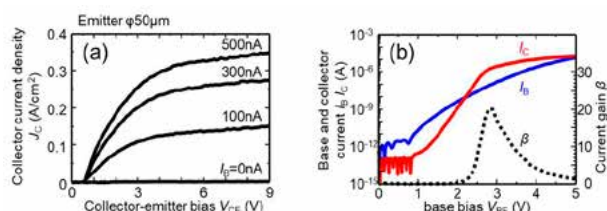


図10. 試作したHBTの(a) J-V特性 (b) Gummel plot

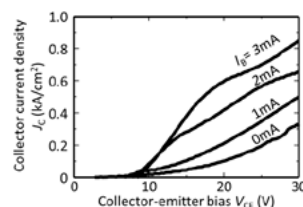


図11. ベース電流を増加させた場合の J-V特性

(7) 高周波計測システムの再構築と試作デバイスの特性評価

R6 年度、再立ち上げを行ったミリ波ネットワークアナライザ (Agilent Technologies PNA-X N5247A) を用いて、試作 HBT 素子の高周波特性を評価した。高周波測定用 HBT の表面 SEM 像を図12に示す。エミッタをダブルで配置、その周囲をベースが囲む構成。S11 側をベース、S22 側をコレクタ、コモンをエミッタに配置。エミッタ面積は1素子辺り

2000 μm^2 である。図13には、10MHzから300MHzの範囲で測定した (a) S11-S22 の Smith Chart、(b) S12-S21 の Polar Chart を示す。S パラメータから算出したカットオフ周波数は約 10 MHz であった。しかし当初予測よりも低い値であるため、素子の寄生容量や測定時のキャリブレーション方法などの影響を含め、原因の調査を継続している。

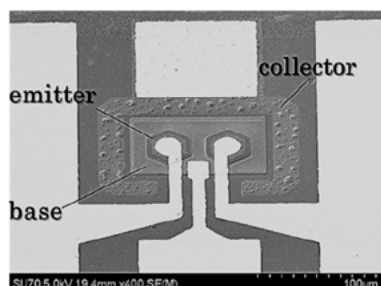


図12. 高周波測定用素子表面のSEM像

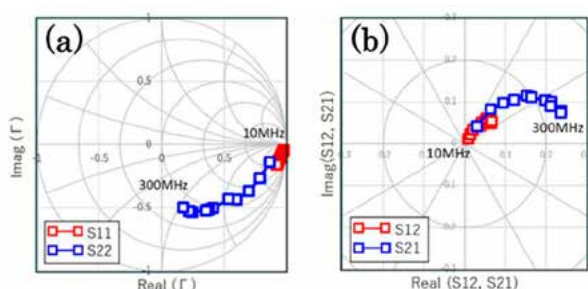


図13. (a) スパイスパラメータ S11-S22 の Smith Chart、(b) スパイスパラメータ S12-S21 の Polar Chart

3. 今後の研究成果の展開

MQW 構造および新規電極形成法を採用したことにより、基本的な DC 特性については目標を達成した。一方、高周波特性についてはカットオフ周波数が予測よりも低い値となったため、原因の解明と改善に向けた検討を継続する。

今後は、企業主体の外部資金申請を行い、開発ターゲットである GaN 系 HBT とそれを搭載した通信機器の商品開発・社会実装を推し進める。提携先の企業としては、MOCVD 装置メーカー、無線通信システムを手掛けるメーカーなどが有力候補である。ここでは、デバイスの実用性判断について、デバイスメーカーの事業部や開発部隊の協力を仰ぎながら、デバイス試作と特性評価、特に大学で評価が困難な高周波パワー効率測定などの実証評価を行う事で技術上の課題を抽出し、開発技術の完成度を高めていく。この取り組みの中では、キーとなる結晶成長装置を用いた量産化技術の確立を目指すと同時に、増幅器の商品化に向けて、車載レーダやミリ波帯増幅器といった応用機器へのテスト搭載を伴った実地試験を展開したいと考えている。また、知財活動としては、関連企業との共同出願の形で主に商品化に係る権利獲得を進めていく方針である。

4. むすび

次世代無線分野への応用が期待される高周波デバイスである GaN 系 HBT について、その主要課題である p-GaN 層の低抵抗化および金属電極との接触抵抗低減に取り組んだ。本研究では、新規に提案した GaInN/GaN 多重量子井戸 (MQW) 構造を備えるベース構造と、p-GaN 表面に形成した高濃度 p⁺-GaN 層に Pd/Ni/Au 電極を接続する構造を適用した。その結果、前者ではベース層の比抵抗 0.93 Ωcm 、後者では固有接触抵抗 0.52 $\text{m}\Omega\text{cm}^2$ を達成した。さらに、

これらの新規要素を反映して HBT を試作したところ、ベース電流による良好な電流変調およびピンチオフ特性を確認した。電流増幅率は $\beta = 21$ ($V_{BE} = V_{CE} = 2.8\text{ V}$)、最大電流密度は 0.8 kA/cm^2 を得た。

加えて、小信号特性 (S パラメータ) を取得し、カットオフ周波数は約 10 MHz であることを確認した。これは当初予測よりも低い値であり、原因については今後も調査を継続する。

【査読付き誌上発表論文】

- [1] A. Mase, M. Takimoto, R. Inoue, T. Kojima, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Fabrication and characterization of AlGaInN/GaInN/GaN n-p-n heterojunction bipolar transistors with a p⁺-GaIn contact layer”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.64 No.070901 pp1-3 (July 7 2025).
- [2] A. Mase, R. Inoue, T. Kojima, T. Egawa, and M. Miyoshi, “GaN-based n-p-n heterojunction bipolar transistors employing Mg-doped GaInN multiple-quantum well structure as p-type base region”, Jpn. J. Appl. Phys. Vol.64 No.100907 pp1-4 (October 27 2025).

【査読付き口頭発表論文】

- [1] R. Inoue, A. Mase, T. Kojima, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Simulation study on GaN-based npn HBTs with MQW structured p-base region”, Proc.15th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2024).
- [2] 井上 諒星, 小嶋 智輝, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, “GaInN/GaN MQW 構造からなる p 型ベース層を備えた GaN 系 HBT の作製と特性評価”, 電子情報通信学会技術研究報告 D2024-36, CPM2024-80, LQE2024-67 (2024-11).
- [2] R. Inoue, T. Kojima, A. Mase, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Demonstration of GaN-based npn HBTs with a GaInN/GaN MQW structure as a p-type base region”, Extended Abstract of 17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma 2025).
- [3] R. Inoue, A. Mase, T. Kojima, T. Egawa, and M. Miyoshi, “GaN-based n-p-n HBTs with Mg-doped GaInN MQWs as p-type base region,” International Conference on Solid State Devices and Materials (SSDM), PACIFICO Yokohama, Japan Sep. (2025).

【口頭発表】

- [1] [1] R. Inoue, A. Mase, T. Kojima, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Simulation study on GaN-based npn HBTs with MQW structured p-base region”, 15th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2024), Sendai, Japan Aug. (2024).
- [2] 井上 諒星, 小嶋 智輝, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, “GaN 系 npn 型 HBT のベース層適用に向けた p 型 MQW 構造の検討”, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 (新潟市、2024 年 9 月 18 日).
- [3] 井上 諒星, 小嶋 智輝, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, “GaInN/GaN MQW 構造からなる p 型ベース層を備えた GaN 系 HBT の作製と特性評価”, 電子情報通信学会 CPM/ED/LQE 研究会 (名古屋市、2024 年 11 月 29 日).

- [4] R. Inoue, T. Kojima, A. Mase, T. Egawa, and M. Miyoshi, “Demonstration of GaN-based npn HBTs with a GaInN/GaN MQW structure as a p-type base region”, 17th International Symposium on Advanced Plasma Science and its Applications for Nitrides and Nanomaterials (ISPlasma), Nagoya, Japan Mar. (2025).
- [5] 井上 諒星, 小嶋 智輝, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, “GaInN/GaN MQW 構造からなる p 型ベース層を備えた GaN 系 HBT の作製と特性評価”, 2025 年電子情報通信学会総合大会 (東京都、2025 年 3 月 28 日) .
- [6] 井上 諒星, 石田 颯汰朗, 間瀬 晃, 江川 孝志, 三好 実人, “GaN 系 HBT にむけた p 型 GaInN/GaN MQW 構造の電気特性評価”, 第 86 回 応用物理学会 秋季学術講演会 (愛知県名古屋市、2025 年 9 月 8 日) .
- [7] 間瀬 晃, 井上 諒星, 江川 孝志, 三好 実人, “p 型ベース領域に GaInN/GaN MQW 構造を備えた GaN 系 HBT の研究”, 電気学会・専門委員会 (神奈川県厚木市、2025 年 11 月 28 日) .

【受賞リスト】

- [1] 井上 諒星、「発表奨励賞」電子情報通信学会 電子デバイス (ED) 研究専門委員会 (受賞日 2025 年 1 月)