

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
奨励研究助成 成果報告書

公益財団法人矢崎科学技術振興記念財団
理事長 殿

研究助成期間終了にあたり、下記の通り成果を報告します。

2026 年 4 月 30 日

氏名: 前田 拓也

所属: 東京大学大学院工学系研究科電気系工学専攻

職位: 講師

1. 申請研究の題目

窒化アルミニウム系ショットキーバリアダイオードの低損失化

2. 研究の目的

持続可能な社会の実現に向けて、電力利用の高効率化が必要である。窒化アルミニウム(AIN)はバンドギャップが 6.0 eV と極めて大きく、極めて高い絶縁破壊電界(> 10 MV/cm)を有すると予想され、次世代パワーデバイス材料として注目を集めている。しかし、浅いイオン化エネルギーを持つドナーやアクセプターが存在せず、不純物ドーピングによって室温で十分なキャリア密度が得ることが難しい。また、バンドギャップが大きいがゆえに金属/AIN 界面の障壁高さが大きく、良好なオーミック接触を形成することが困難である。そこで、本研究では、窒化物半導体に特有の技術である混晶・ヘテロ接合の活用により、ドーピングとオーミック接触の課題を解決し、AIN 系パワーデバイスの劇的な低損失化を目的とする。

3. 研究の内容

本研究では、AIN と GaN の混晶である AlGa_N を活用し、AIN 系ショットキーバリアダイオード(SBD)の試作実証に取り組んだ。具体的には、(1) 組成傾斜 AlGa_N 層による耐圧維持層、(2) Si ドープ組成傾斜 AlGa_N 中間層、(3) AIN/AlGa_N 超格子電流拡散層を組み合わせた AIN 系 SBD を作製し、そのデバイス特性を詳細に評価した。

図 1 に本研究で作製したデバイス構造およびエネルギーバンド図を示す。低転位($\sim 10^4 \text{ cm}^{-2}$)な AIN バルク基板上に有機金属気相成長法(MOVPE)によって AIN バッファ層、AIN/AlGa_N 超格子電流拡散層、Si ドープ組成傾斜 AlGa_N 中間層、組成傾斜 AlGa_N 耐圧維持層をエピタキシャル成長させた。その後、塩素系ガスを用いた誘導結合型反応性イオンエッチング(ICP-RIE)によって耐圧維持層を除去し、電流拡散層を露出させた。電流拡散層上に V/Al/Pt/Au 電極を蒸着し、高

温熱処理を行うことでオーミック接触を形成した。耐圧維持層表面に Ni/Au 電極を蒸着し、Schottky 電極を形成した。一次元の Poisson-Schrödinger 計算により、分極ドーピングによって可動電子が $(1.3\text{--}1.8) \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 程度が誘起されることがわかった。

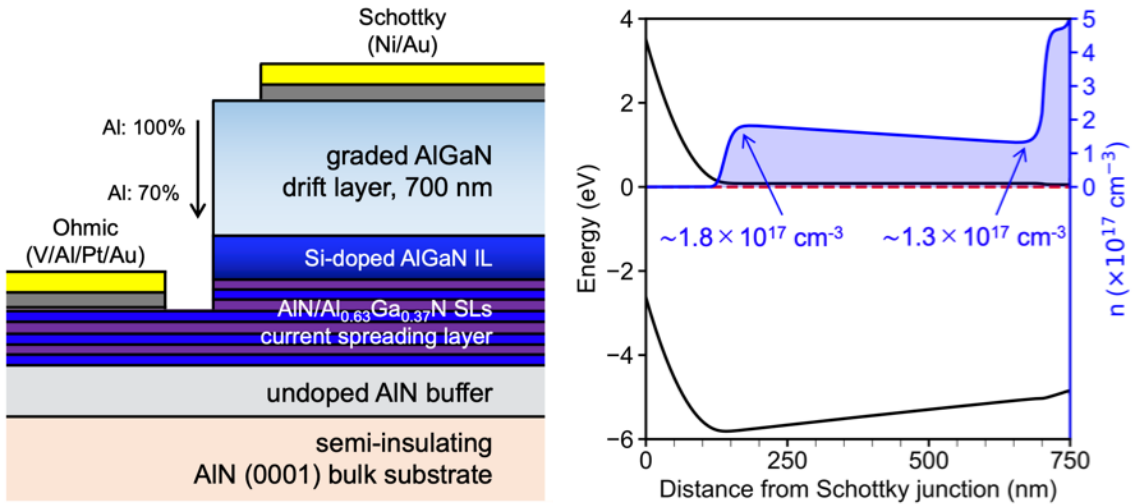


図 1. 本研究で作製した AlN 系 SBD のデバイス構造図(左図)およびそのエネルギーバンド図と電子濃度分布の数値計算結果(右図)。

作製した AlN 系 SBD に対し、容量-電圧(C - V)特性を測定したところ、耐圧維持層の空間電荷密度として $1.2 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ が得られ、分極から予想される計算結果とよく一致した。これは、不純物添加無しで分布型分極ドーピングによって高密度の電子が誘起されていることを示している。

電流拡散層に対し、伝送長(TLM)測定を行った結果を表 1 に示す。低電圧域ではやや非線形な特性が見られたものの、シート抵抗 $209 \text{ } \Omega/\text{sq}$ 、コンタクト抵抗 $1.3 \text{ } \Omega\text{mm}$ 、特性コンタクト抵抗率 $3.6 \times 10^{-5} \text{ } \Omega\text{cm}^2$ を示し、概ね良好なオーミックが形成されていることが確認できた。また、表 1 に Hall 効果測定結果を示す。シート抵抗は $136 \text{ } \Omega/\text{sq}$ であり、TLM 測定結果と概ね一致する結果が得られた。TLM 測定の方がやや大きいのは TLM 素子の非線形性によって過大評価していることを反映している。シート電子密度は $7.5 \times 10^{14} \text{ cm}^{-2}$ 、移動度は $61 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ となった。

表 1. TLM 測定および Hall 効果測定結果。

TLM measurements			Hall measurements		
R_C [Ωmm]	ρ_C [Ωcm^2]	R_{sh} [$\Omega/\text{sq.}$]	R_{sh} [$\Omega/\text{sq.}$]	n_s [cm^{-2}]	μ [cm^2/Vs]
1.3	3.6×10^{-5}	209	136	7.5×10^{14}	61

図2に作製した AlN 系 SBD の順方向電流-電圧(I - V)特性を示す。理想因子 1.5 程度と概ね熱電子放出で説明できる特性が得られ、その微分オン抵抗は $0.34 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ となった。これはこれまで報告されている AlN 系デバイスの中で最小の値である。逆方向 I - V 特性を測定したところ、耐圧 400 V (最大破壊電界 8 MV/cm)を示した。図に耐圧-オン抵抗のトレードオフ理論限界のベンチマークプロットを示す。これらの結果は、Si の理論限界を凌駕し、SiC, GaN の理論限界に肉薄する結果である。

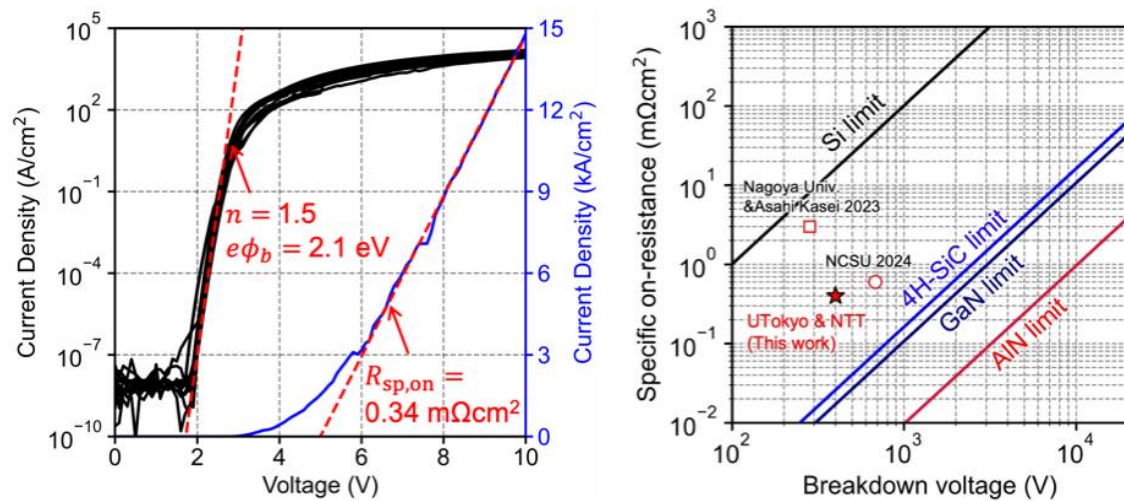


図2. 作製した AlN 系 SBD の順方向電流-電圧特性(左図)および耐圧-オン抵抗のベンチマークプロット(右図)。本研究で作製したデバイスは AlN 系デバイスの報告の中で世界最小のオン抵抗 $0.34 \text{ m}\Omega\text{cm}^2$ を示した。

4. 研究の成果と結論、今後の課題

本研究では、混晶・ヘテロ接合の活用によってバンドギャップや分極をエンジニアリングすることにより、世界最小のオン抵抗を有する AlN 系 SBD の試作実証に成功した。本研究で作製したデバイスを評価する中で、オン抵抗が電極サイズに大きく依存し、電極面積増加によってオン抵抗が増加することがわかっている。これは、デバイス構造が擬似縦型構造であるがゆえに、電極面積増加によって電流引き出し抵抗(メサ内部での電流広がり抵抗)が増大することに起因している。今後、この問題を解決する新規デバイス構造を提案することで、AlN 系デバイスの大面積化・大電流化を目指す。

5. 成果の価値

5-1. 学術的価値

本研究成果は、分極やヘテロ接合を活用することで、AlN を劇的に低損失化できることを示した結果である。これらの結果は、AlN 系パワーデバイスの優位性を示す結果である。

5-2. 社会的価値

本研究により、AlN 系パワーデバイスの優位性が示され、AlN 系パワーデバイスの研究開発がこれまで以上に活発化することが期待される。AlN 系パワーデバイスにより、超低損失な電力変換が実現できれば、カーボンニュートラル社会の実現に大きく貢献するため、社会的価値が非常に高いと言える。

これらの結果は、パワーデバイス分野で最高峰の国際会議である The 38th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD 2026)に投稿し、口頭発表を行なった（口頭発表採択率 15%程度）。また、東京大学よりプレスリリースを行なった。

超低損失 AlN 系ショットキーバリアダイオードの試作に成功 —低炭素社会に寄与する新しいパワー半導体の実現に向け大きく前進— : <https://www.t.u-tokyo.ac.jp/press/pr2026-05-25-002>

6. 研究成果

・「研究論文(原著)」

[1] I. Sasaki, M. Hiroki, K. Ebata, K. Hiram, Y. Taniyasu, **T. Maeda**,

“Extremely Low ON-Resistance AlN-based SBDs with Distributed Polarization Doping Drift Layer”,

Proceedings of the 38th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD 2026), Las Vegas (USA). 2026/08 に IEEE Xplore digital library に公開予定。

・「国際会議発表」

[1] I. Sasaki, M. Hiroki, K. Ebata, K. Hiram, Y. Taniyasu, **T. Maeda**,

“Extremely Low ON-Resistance AlN-based SBDs with Distributed Polarization Doping Drift Layer”,
The 38th International Symposium on Power Semiconductor Devices and ICs (ISPSD 2026),
Las Vegas (USA), May 2026, Oral.

[2] **T. Maeda**,

“Current Transport in AlN Schottky Barrier Diode”,
UK Nitride Consortium Winter Meeting 2026 (UKNM 2026), Swansea (UK), January 2026. [invited]

[3] **T. Maeda**, I. Sasaki, M. Hiroki, K. Hiram, K. Kumakura, Y. Taniyasu,

“Electrical Characterization of AlN Schottky Barrier Diodes at High Temperature”,
The Lester Eastman Conference on High Performance Devices 2025 (LEC 2025),
Gainesville (FL, USA), August 2025, Poster. [Late News]

[4] I. Sasaki, M. Hiroki, K. Hiram, K. Kumakura, Y. Taniyasu, A. Tanaka, Y. Honda, **T. Maeda**,

“Origin of Local Barrier Height Lowering in AlN Schottky Barrier Diodes”, *The 15th International Conference on Nitride Semiconductors (ICNS 15)*, Malmö (Sweden), July 2025, Oral.

[5] **T. Maeda**, "High-Field Transport in Wide-Bandgap Nitride Semiconductors -Impact Ionization, Avalanche, Tunneling, and Velocity Saturation-", *Compound Semiconductor Week 2025 (CSW 2025)*, Banff (Canada), May 2025. [Young Plenary Hot Topics Talk]

・「特許」

該当無し。

・「受賞」

[1] The 2025 IEEE EDS Chenming Hu Early Career Award, 2025/12.

[2] 佐々木一晴, EMS 学生奨励賞, 2025/10.

I. Sasaki, M. Hiroki, K. Kumakura, K. Hiram, Y. Taniyasu, **T. Maeda**,

“Characterization of temperature dependence of barrier height in Si-doped AlN Schottky barrier diodes on AlN substrates”,

The 44th Electronic Materials Symposium (EMS 44), 橿原, We1-19, 10 月 (2025).

[3] 第 24 回 2024 年度船井研究奨励賞, 2025/05.

(本研究に関連があるもののみ記載)