

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2022～2023

課題番号：22K20423

研究課題名（和文）窒化ガリウム半導体の高電界物性・キャリア輸送特性の解明

研究課題名（英文）Study on High Field Carrier Transport in Gallium Nitride

研究代表者

前田 拓也（Maeda, Takuya）

東京大学・大学院工学系研究科（工学部）・講師

研究者番号：20965694

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 2,200,000 円

研究成果の概要（和文）：本研究では、窒化ガリウム(GaN)系高周波トランジスタの高度な設計や特性の理解に向けて、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面に分極誘起される二次元電子ガス(2DEG)のドリフト速度を詳細かつ系統的に調べた。コンタクト抵抗を極力低減するために埋め込み再成長n+GaNを有する伝送長法(TLM)測定用素子を作製し、パルス幅が1 us以下のパルス電流-電圧(I-V)測定によって自己発熱を極力低減することに留意しながら、様々な寸法(幅, 長さ)の電流経路に対するI-V特性を得た。I-V特性を解析して速度-電界特性を抽出したところ、寸法によらず一貫した速度-電界特性を得ることに成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究で得られた結果は、AlGaIn/GaNヘテロ接合における2DEGのドリフト速度-電界特性の決定版というべき結果である。様々なAl組成の素子を作製し、どの特性を詳細かつ系統的に調べることで、電界依存性や電子濃度依存性、温度依存性を包括的に明らかにすることに成功した。特に、測定用素子の構造や測定手法を工夫することで、誤差要因を徹底的に排除し、非常に精度のよい値が得られたことが特色・独自性である。これらの結果は、GaN高周波デバイスの高電界輸送を理解する際に非常に有益であり、次世代高周波通信を担うデバイスの性能理解に大きく役立つ結果である。

研究成果の概要（英文）：In this study, we systematically examined the drift velocity of two-dimensional electron gas (2DEG) induced by polarization at the AlGaIn/GaN heterojunction interface, aiming for an advanced design and understanding of the characteristics of gallium nitride (GaN)-based high-frequency transistors. To minimize contact resistance, we fabricated transmission line method (TLM) test devices with embedded regrown n+GaN. While paying attention to minimizing self-heating through pulse current-voltage (I-V) measurements with pulse widths of 1 us or less, we obtained I-V characteristics for various dimensions (width, length) of current paths. Upon analyzing the I-V characteristics and extracting the velocity-electric field characteristics, we successfully obtained consistent velocity-electric field characteristics regardless of dimensions.

研究分野：電子工学

キーワード：窒化ガリウム(GaN) 高周波トランジスタ ドリフト速度 二次元電子ガス(2DEG)

科学研究費助成事業 成果報告書

1. 研究開始当初の背景

窒化ガリウム(GaN)は高い絶縁破壊電界や高いドリフト速度などの優れた物性を有しており、高耐圧・低損失・高周波動作可能な電子デバイスの材料として注目を集めている。特に AlGaN/GaN ヘテロ接合界面に分極誘起される高濃度・高移動度な二次元電子ガス(2DEG)を利用した高電子移動度トランジスタ(HEMT)は、パワーデバイスや高周波増幅デバイスとして研究開発が活発であり、実用化が進められている。しかし、その物性やデバイス物理についてはまだ理解が不十分であり、材料の潜在能力を十分に引き出せていないのが現状である。

電子ドリフト速度は、低電界域では移動度に比例し、高電界になるにつれて鈍り、ある電界から飽和すると知られている。GaN のドリフト速度の報告例は複数あるものの、報告間でデータがばらついており、正確な値がわかっていない。また、電子濃度依存性や温度依存性、面方位依存性、キャリアの極性依存性など、詳細な理解が欠落している。

2. 研究の目的

本研究では、AlGaN/GaN ヘテロ接合における 2DEG に着目し、そのドリフト速度の電界依存性について明らかにすることを目的とする。

3. 研究の方法

ドリフト速度の測定において課題となるのが、コンタクト抵抗や自己発熱による誤差・特性ばらつきである。これらの課題を解決するために、本研究では、埋め込み再成長 n⁺GaN コンタクト層を形成した伝送長法(TLM)測定用素子を作製し、パルス電流-電圧(I-V)測定を行うことによって自己発熱の影響を極力低減する手法を提案する。本測定方法では、誤差要因を最小化した上で寄生抵抗の影響を考慮することができるため、精度の高い値が得られると期待できる。

図1に作製した TLM 用素子構造を示す。半絶縁性 SiC 基板の上に AlGaN/GaN 層を有機金属気相成長法(MOVPE)によってヘテロエピタキシャル成長した Al 組成の異なる二種のサンプル(Al: 20%, 30%)を準備した。その後、AlGaN 層の除去と MOVPE による n⁺GaN の選択再成長、素子分離、Ohmic 電極として Ti/Au を蒸着した。また、表面パッシベーションとして SiN を堆積した。パルス I-V 測定には Keithley 4200-SCS のパルス測定ユニットを用いた。

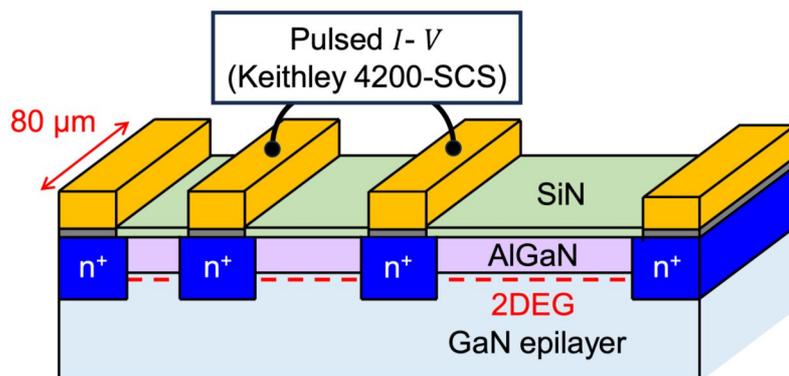
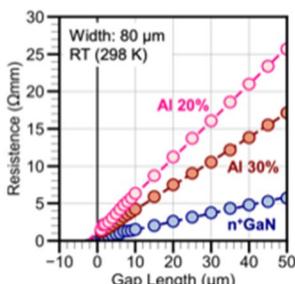


図1. 本研究で作製した TLM 用素子の構造。

4. 研究成果

図2に TLM 測定から得られたコンタクト抵抗とシート抵抗、および、Hall 効果測定から得られたキャリア密度と移動度を示す。0.4-0.6 Ωcm と非常に低いコンタクト抵抗が得られ、また、TLM 測定と Hall 効果測定で一貫したシート抵抗が得られた。



	TLM measurements			Hall measurements (Hall bar)		
	R_C [Ωmm]	ρ_C [Ωcm ²]	R_{sh} [Ω/sq.]	R_{sh} [Ω/sq.]	n_s [cm ⁻²]	μ [cm ² /Vs]
Al 20%	0.61	7.6×10^{-6}	494	488	8.1×10^{12}	1585
Al 30%	0.44	5.9×10^{-6}	325	318	1.3×10^{13}	1461
n ⁺ GaN	0.19	3.1×10^{-6}	110	100	2.1×10^{14}	293

図2. TLM 測定から得られた抵抗-ギャップ長特性および TLM, Hall 測定結果。

図3に測定したパルス I - V 特性の一例を示す．パルス印加による電流波形に注目すると，電圧立ち上がり時のオーバーシュート後の定常状態の値が一定であり，発熱が無視できる程度であることが確認できた．また， I - V 特性では，電圧印加に応じて電流値が鈍り，飽和していることがわかる．また， I - V 特性は TLM のギャップ長に依存し，ギャップ長が短いほど低電圧で飽和が見られている．得られた I - V 特性に対し，寸法および電子濃度を考慮することで，ドリフト速度-電界特性を得ることができる．図4 (a)に Al 組成 20% の速度-電界特性を示す．ギャップ長によらず一貫した特性が得られており，飽和速度は 1.1×10^7 cm/s 程度であることがわかる．得られた特性は Si におけるキャリアの速度-電界特性のモデルで用いられる Coughy-Tohmas の式で良好にフィッティングすることができた．また，図4 (b)に Al 組成 20%, 30% の AlGaIn/GaN ヘテロ接合の 2DEG の速度-電界特性を示す．電子濃度が高くなると，飽和速度が低下していることがわかる．これは，電子濃度が増加することによってより高エネルギーに電子が分布しやすくなり，光学フォノンの放出が起こりやすくなるためであると考えられる．

本研究で得られた結果は，GaN HEMT のデバイス設計や特性の予測をする際に有用であり，学術的にも工学的にも重要な知見である．

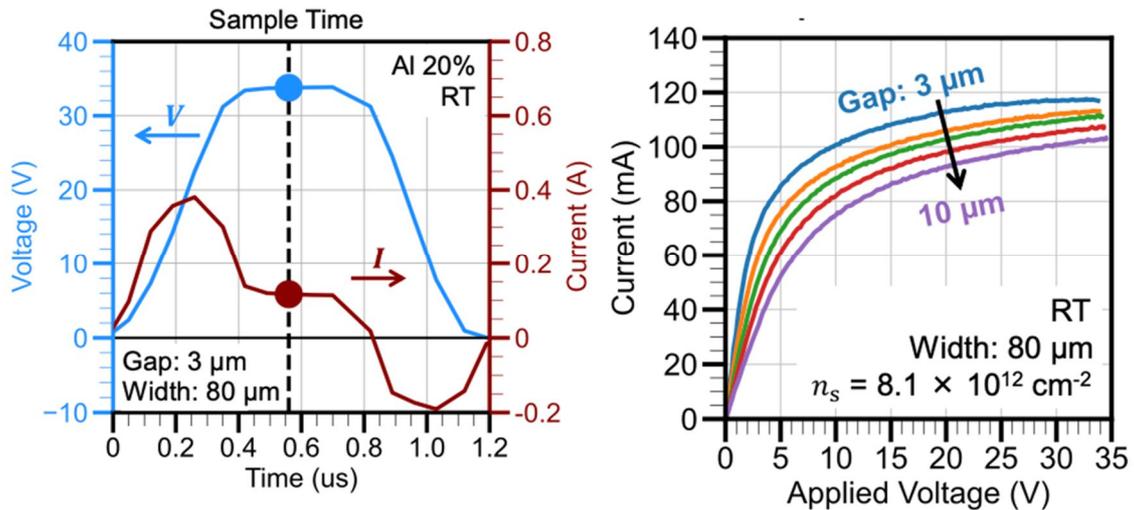


図3. パルス I - V 測定時の I - t , V - t 波形の一例およびパルス I - V 特性．

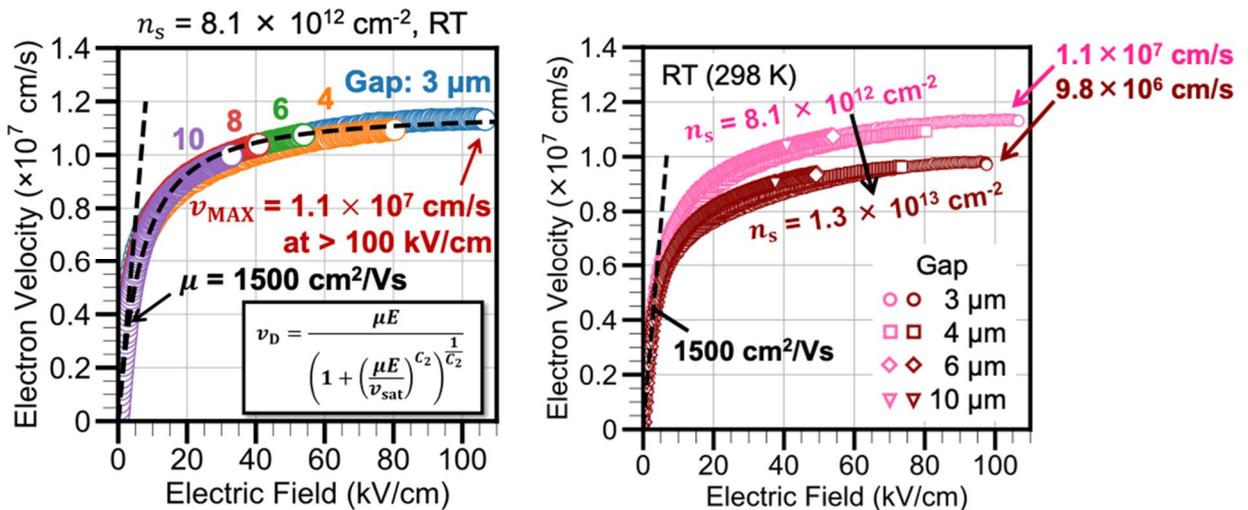


図4 (a) 様々なギャップ長(3-10 μm)に対する AlGaIn/GaN ヘテロ接合の 2DEG の速度-電界特性の実験値と Coughy-Tohmas の式によるモデル化．(b) Al 組成 20%, 30% における 2DEG の速度-電界特性．

4 . 研究発表

【学術論文・プロシーディング】

- [1] Y. Wakamoto, T. Kawahara, S. Yoshida, K. Makiyama, K. Nakata, **T. Maeda**,
"Velocity-Field Characteristics of 2DEG in AlGa_N/Ga_N Precisely Determined by Pulsed I-V
Measurements for TLM Structure",
Proceedings of the 82nd Device Research Conference (DRC 82), 2024.

【国際会議】

- [1] Y. Wakamoto, T. Kawahara, S. Yoshida, K. Makiyama, K. Nakata, **T. Maeda**,
"Velocity-Field Characteristics of 2DEG in AlGa_N/Ga_N Precisely Determined by Pulsed I-V
Measurements for TLM Structure",
The 82nd Device Research Conference (DRC 82), Maryland (USA), June 2024, Poster.

【国内会議】

- [1] 若本裕介, 河原孝彦, 吉田成輝, 牧山剛三, 中田健, 中野義昭, **前田拓也**,
"AlGa_N/Ga_N ヘテロ接合における二次元電子ガスのドリフト速度の測定",
第 70 回応用物理学会秋季学術講演会, 24p-52A-11, 東京都市大学, 2024 年 3 月, 口頭発表 .
- [2] 若本裕介, 河原孝彦, 吉田成輝, 牧山剛三, 中田健, 前田拓也,
"AlGa_N/Ga_N ヘテロ接合における二次元電子ガスのドリフト速度の高温特性",
第 16 回ナノ構造エピタキシャル成長講演会, Th-P06, 高知県立県民文化ホール, 2024 年 5 月,
ショートプレゼン&ポスター発表. [発表奨励賞]

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Yusuke Wakamoto, Takahiko Kawahara, Shigeki Yoshida, Kozo Makiyama, Ken Nakata, Yoshiaki Nakano, Takuya Maeda	4. 巻 -
2. 論文標題 Velocity-Field Characteristics of 2DEG in AlGaIn/GaN Precisely Determined by Pulsed I-V Measurements for TLM Structure	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 Proceedings of the 82nd Device Research Conference (DRC 2024)	6. 最初と最後の頁 -
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） なし	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 1件 / うち国際学会 2件）

1. 発表者名 Y. Wakamoto, T. Kawahara, S. Yoshida, K. Makiyama, K. Nakata, T. Maeda
2. 発表標題 Velocity-Field Characteristics of 2DEG in AlGaIn/GaN Precisely Determined by Pulsed I-V Measurements for TLM Structure
3. 学会等名 The 82nd Device Research Conference (DRC 82)（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 T. Maeda
2. 発表標題 Transport Properties of GaN under High Electric Field
3. 学会等名 15th Topical Workshop on Heterostructure Microelectronics (TWHM 2024)（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 若本裕介, 河原孝彦, 吉田成輝, 牧山剛三, 中田健, 中野義昭, 前田拓也
2. 発表標題 AlGaIn/GaNヘテロ接合における二次元電子ガスのドリフト速度の測定
3. 学会等名 第70回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2024年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------