

一般セッション(口頭講演) | 15 結晶工学：15.4 III-V族窒化物結晶

2025年3月15日(土) 9:00 ~ 11:30 皿 K401 (講義棟)

[15a-K401-1~8] 15.4 III-V族窒化物結晶

前田 拓也(東大)、宇佐美 茂佳(阪大)

9:00 ~ 9:15

[15a-K401-1]

スパッタ法によるAlGaIn/GaN HEMTへの縮退 n^+ -GaIn(d-GaN)オーミックコンタクト形成プロセスの検討○藤澤 海都¹、上野 耕平¹、藤岡 洋¹ (1.東大生研)

◆ 奨励賞エントリー

9:15 ~ 9:30

[15a-K401-2]

 n^{++} Al-rich AlGaInオーミックコンタクトを有するスパッタマルチチャネルAl-rich AlGaInナノワイヤトランジスタの開発○小坂 鷹生¹、上野 耕平¹、藤岡 洋¹ (1.東大生研)

9:30 ~ 9:45

[15a-K401-3]

THz-TDSEによるMgイオン注入したGaIn単結晶の電気特性評価(V)

○藤井 高志^{1,2}、王 丁丁¹、岩本 俊志²、須山 篤志³、荒木 努¹ (1.立命館大学、2.日邦プレジジョン、3.イオンテクノセンター)

◆ 奨励賞エントリー

9:45 ~ 10:00

[15a-K401-4]

2 MV/cmの高い絶縁破壊電界を有するAlN基板上シュードモルフィックAlN/GaN/AlN HEMTのオン抵抗低減

○李 太起¹、吉川 陽^{1,3}、杉山 聖¹、新井 学³、安藤 裕二^{2,3}、須田 淳^{2,3}、天野 浩^{2,3} (1.旭化成、2.名大院工、3.名大IMaSS)

10:15 ~ 10:45

[15a-K401-5]

[分科内招待講演] N極性面AlNの結晶成長とGaIn/AlN HEMTへの応用

○岡田 成仁¹、ヒヤマ アイナ¹、藤井 開¹、木本 大星¹、仁ノ木 亮祐¹、山中 郁哉¹、倉井 聡¹、山田 陽一¹ (1.山口大院創成)

◆ 奨励賞エントリー

10:45 ~ 11:00

[15a-K401-6]

N極性面GaIn HEMTデバイスの性能に及ぼすアニールの影響

○(M1C)仁ノ木 亮祐¹、平田 靖晃¹、Zazuli Aina Hiyama¹、藤井 開¹、木本 大星¹、倉井 聡¹、岡田 成仁¹、山田 陽一¹ (1.山口大創成科学)

◆ 奨励賞エントリー

11:00 ~ 11:15

[15a-K401-7]

外部応力によるN極性GaIn/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AlN HEMTの電気特性変化

○(DC)Zazuli Hiyama Aina¹、藤井 開¹、仁ノ木 亮祐¹、木本 大星¹、山中 郁哉¹、平田 靖晃¹、段島 陽樹¹、林内 天¹、倉井 聡¹、岡田 成仁¹、山田 陽一¹ (1.山口大創成科学)

◆ 英語発表

11:15 ~ 11:30

[15a-K401-8]

N-polar AlN-based GaN channel on sapphire for high electron mobility transistors

○Markus Pristovsek¹, Ituski Furuhashi¹, Xu Yang¹, Chengzhi Zhang², Matthew D. Smith², Martin Kuball² (1.Nagoya Univ., 2.Univ. of Bristol)

スパッタ法による AlGaIn/GaN HEMT への 縮退 n⁺-GaN(d-GaN)オーミックコンタクト形成プロセスの検討

Investigation on sputtering degenerate n⁺-GaN (d-GaN) ohmic contacts for AlGaIn/GaN HEMTs

東京大学生産技術研究所 ○藤澤海都, 上野耕平, 藤岡洋

Institute of Industrial Science, The University of Tokyo

○Kaito Fujisawa, Kohei Ueno, Hiroshi Fujioka

E-mail: kfujisaw@iis.u-tokyo.ac.jp

【背景】 GaN 系高電子移動度トランジスタ (HEMT) は、RF デバイスやスイッチングデバイスとして広く利用されている。製造上の重要な課題は、AlGaIn/GaN ヘテロ構造中の 2DEG と低抵抗かつ信頼性の高いオーミックコンタクトを実現することである。近年では、ソース・ドレイン領域への再成長 n 型 GaN オーミックコンタクトが広く検討されている。我々のグループでは、このような n 型 GaN 再成長手法として、低温プラズマプロセスであるパルススパッタリング堆積 (PSD) 法に着目し研究を進めている。これまでに SiO₂ マスクを用いたエピポリ同時成長により $\sim 3 \times 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ の高い電子濃度をもつ高濃度縮退 GaN (degenerate GaN: d-GaN) をソース・ドレイン領域に位置選択的に形成できることを報告してきた。[1] しかしながら、ICP エッチングにより露出した 2DEG 側壁と d-GaN との接触界面の形成プロセスについて十分に検討されていない。本発表では、AlGaIn/GaN HEMT に対する d-GaN 再成長オーミック形成について、ドライエッチングや d-GaN 再成長前処理等について検討を行い、低抵抗なオーミックコンタクトを実現したので、その詳細について報告する。

【実験方法】 Si(111) 基板上に形成された市販の AlGaIn HEMT ウエハに対し、Ni/SiO₂ マスクを成膜し、その後 ICP ドライエッチングにより AlGaIn バリアを除去した。次に、酸処理により Ni マスクを除去し、PSD 法により d-GaN エピポリ同時成長を行った。(図 1) その後 HF 水溶液で SiO₂ と多結晶 GaN をリフトオフした。最後に超高真空 EB 蒸着によりオーミック電極として Ti/Au、ゲート電極として Ni/Au を堆積した。

【結果と考察】 再成長コンタクトの接触抵抗は、図 1 に示すように n⁺-GaN と Ti/Au 電極界面の接触抵抗 (R₁)、d-GaN の抵抗 (R₂)、d-GaN と 2DEG の接触抵抗 (R₃) の 3 種類に分けられる。2 種類の TLM パターンを用いて、R₁ = 0.016 Ω·mm、R_c = R₁ + R₂ + R₃ = 0.072 Ω·mm と決定した。R₂ は d-GaN のシート抵抗をもとに 0.008 Ω·mm と計算した。これらの結果から n⁺-GaN と 2DEG との接触抵抗は R₃ = 0.048 Ω·mm の値が得られた。R₁, R₂, R₃ 全て AlGaIn/GaN HEMT としては極めて低い接触抵抗であり、スパッタ法により形成した d-GaN 再成長コンタクトは、AlGaIn/GaN ヘテロ界面の低抵抗化に有望であることが分かった。当日は d-GaN 再成長コンタクトのデバイス特性およびデバイスの温度依存性についても報告する。

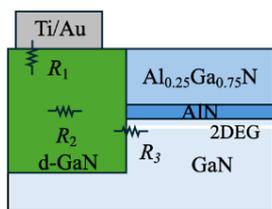


Fig. 1. Schematic of TLM patterns on GaN HEMT structure and the overall contact resistance R_c with three components of R₁, R₂ and R₃

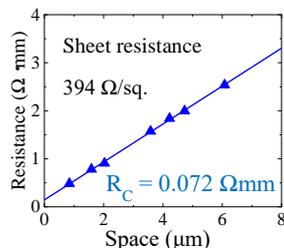


Fig. 2. TLM fitting for determining the contact resistance of the GaN HEMT with regrown d-GaN contacts

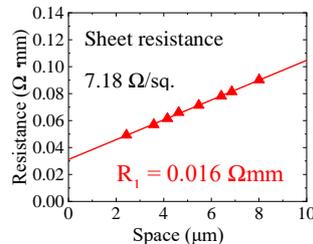


Fig. 3. TLM fitting for determining the contact resistance between d-GaN and ohmic metal electrode.

【謝辞】 本研究の一部は JST ALCA-Next JPMJAN23E3、科研費 (JP24H00310)、科研費 (JP23K26557) 等の助成を受けて行われたものである。

文献 [1] R. Maeda *et al.*, Applied Physics Express **17**, 011006 (2024).

n⁺⁺ Al-rich AlGaN オーミックコンタクトを有する スパッタマルチチャネル Al-rich AlGaN ナノワイヤトランジスタの開発

Development of sputtering Al-rich AlGaN multi-channel nanowire transistor with n⁺⁺ Al-rich AlGaN ohmic contacts

東京大学生産技術研究所 °小坂鷹生, 上野耕平, 藤岡洋
Institute of Industrial Science, The University of Tokyo
°Takao Kozaka, Kohei Ueno, Hiroshi Fujioka
E-mail: kozaka@iis.u-tokyo.ac.jp

【背景】 Ultra-wide band-gap (UWBG)半導体の Al-rich AlGaN は高い絶縁破壊電界を持つことから、次世代パワーデバイスの半導体材料として期待されている[1]。また、AlGaN/GaN 構造と同様に AlN/AlGaN のヘテロ界面に誘起される良質な電子伝導層の 2次元電子ガス (2DEG) を多層化することができ、破壊電圧とオン抵抗のトレードオフを改善することができる[2]。しかし、Al-rich AlGaN の電子親和力は非常に小さいため、良好なオーミック接触を形成することは困難であり、Al-rich AlGaN を応用したナノワイヤトランジスタを実証した報告例はまだない。本研究では、チャンネル層の Al 組成が 70%を超える AlN/AlGaN マルチチャネル構造に対し、パルススパッタ堆積 (PSD)法を用いて n⁺⁺Al-rich AlGaN 電極結晶をエピタキシャル成長させることで、良好なオーミック特性を示すマルチチャネル Al-rich AlGaN ナノワイヤトランジスタを実現したので報告する。

【実験方法】 Fig. 1(a)に作製したマルチチャネル Al-rich AlGaN ナノワイヤトランジスタの模式図を示す。AlN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N マルチチャネル構造は、+c-AlN/sapphire テンプレート上に PSD 法を用いてコヒーレントに結晶成長させた。ソース・ドレインのオーミックコンタクトは、SiO₂ マスクを用いて部分選択的に、電子密度が 1×10²⁰/cm³程度の Al_{0.7}Ga_{0.3}N 層を結晶成長させた後、Al 組成 x を 70%から 0%まで線形傾斜した n⁺⁺Al_xGa_{1-x}N 層、電子密度が 3×10²⁰/cm³程度の n⁺⁺GaN 層を連続的に結晶成長させ、最後に EB 蒸着で Ti/Al/Ti/Au を堆積した。

【結果と考察】 Fig. 1(b)に示す、AlN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N ダブルチャネル構造と、オーミックコンタクトの n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N/n⁺⁺Al_xGa_{1-x}N 電極結晶をエピタキシャル成長させたデバイスの逆格子マッピングを比較すると、チャンネル層の Al 組成に近い n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N と n⁺⁺GaN のピークが新たに確認できる。また、Fig. 1(c)に示す Al 組成が 70%のチャンネルに対して、n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N コンタクトと n⁺⁺GaN コンタクトの Transfer length method (TLM) パターンにおける I-V 測定を比較すると、n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N コンタクトについてのみ良好なオーミック特性が確認された。また、n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N と 2DEG 間の接触抵抗は 9 Ωmm となり、n⁺⁺GaN コンタクトと比較して 4 倍程度小さく、チャンネル層の Al 組成が 70%を超える AlN/AlGaN 構造への接触抵抗の報告値として最も低い値となった。以上より、PSD 法による n⁺⁺Al-rich AlGaN 電極結晶のエピタキシャル成長によって良好なオーミックコンタクトが実現したことがわかる。当日の発表では、マルチチャネル Al-rich AlGaN ナノワイヤトランジスタの電気特性についても併せて報告する。

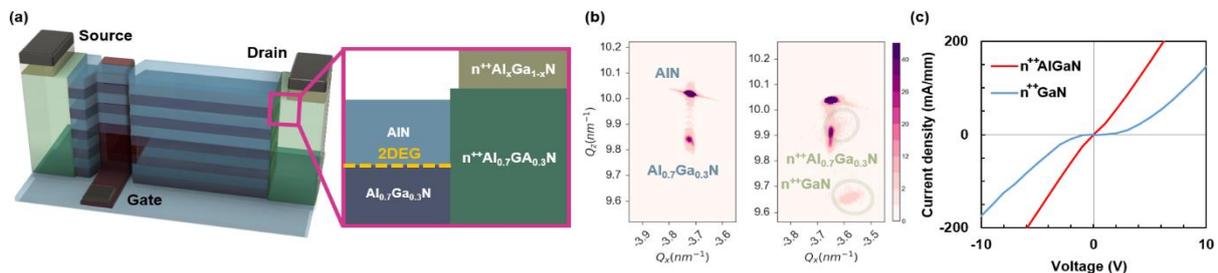


Fig. 1 (a) 3D schematic and cross-sectional schematic of AlN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N multi-channel nanowire transistor with n⁺⁺Al-rich AlGaN contact. (b) The reciprocal space mapping near 1015 diffractions of AlN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N and the nanowire transistor with n⁺⁺Al_xGa_{1-x}N contact. (c) Two terminal I-V characteristics using TLM patterns of the AlN/Al_{0.7}Ga_{0.3}N 2-channel structure with n⁺⁺Al_{0.7}Ga_{0.3}N contact and n⁺⁺GaN contact.

【謝辞】 本研究の一部は JST ALCA-Next JPMJAN23E3、科研費 (JP24H00310)、科研費 (JP23K26557) 等の助成を受けて行われたものである。

【参考文献】 [1] A. G. Baca *et al.*, J. Vac. Sci. Technol. A **38**, 020803 (2020). [2] Y. Zhang *et al.*, Nat. Electron. **5**, 723 (2022).

THz-TDSE による Mg イオン注入した GaN 単結晶の電気特性評価 (V)

Evaluation of Electrical Properties of Mg Ion-implanted GaN Single Crystals using THz-TDSE (V)

立命館大¹, 日邦プレジジョン², イオンテクノセンター³ (M2)王 丁丁¹, ○藤井 高志^{1,2},
岩本 敏志², 須山 篤志³, 荒木 努¹

Ritsumeikan Univ.¹, Nippo precision Co., Ltd², Ion Technology Center Co., Ltd.³

D. Wang¹, ○T. Fujii^{1,2}, T. Iwamoto², A. Suyama³, and T. Araki¹

E-mail: tafujii@fc.ritsumei.ac.jp

我々は、GaN への Mg イオン注入後に AlN 保護膜を形成して活性化アニールをおこない p 型導電層の実現する技術の確立をめざしている。この Mg イオン注入層の電気特性測定に THz 時間領域分光エリプソメトリー (THz Time-Domain Spectroscopic Ellipsometry: THz-TDSE) の適用を目指している。THz-TDSE は非接触・非破壊かつ多層膜のキャリア濃度、移動度、導電率の測定が可能である[1]。そのため AlN 保護膜を剥離することなくイオン注入層の電気特性測定が可能であり、さらに同一サンプルで活性化アニール条件を変化させて電気特性を測定することが可能である。

我々はこれまでに、THz-TDSE を用いて AlN 保護膜を剥離することなく Mg イオン注入層の電気特性および活性化率の測定が可能であることを報告した[2,3]。前報では Mg 濃度が $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ で厚さ 300nm のボックスプロファイルとなるイオン注入層を形成したサンプルを THz-TDSE により測定した。解析には図 1 に示すモデルを用いイオン注入層を 300nm の均一濃度の単層膜と仮定した。得られたイオン注入層の電気特性の結果を下表の上段に示す。活性化率は従来の報告と対応したが移動度に関しては異なっていた。

今回は、この差異の原因として 300nm の注入層の下部に Mg 濃度変化層が存在することが影響しているのではないかと考え、この濃度変化層の THz-TDSE の解析へ与える影響について検討を行った。解析は図 1 に示すモデルから、注入層の下部に新たに電気伝導層の存在を仮定して図 2 のモデルを用いた。ただし、解析の便宜上この電気伝導層は均一な電導度であると仮定している。電気伝導層の電導度を 0.128Scm^{-1} で厚さを 300nm とした場合の解析結果を下表の下段に示す。移動度は従来の報告と近い値となった。これにより注入層の下部に存在する濃度変化層を考慮する必要があることが分かった。電気伝導層の電導度に関してはより詳細な検討が必要である。

さらに今回はボックスプロファイルでイオン注入濃度を変化させたサンプル (1×10^{17} 、 1×10^{18} 、 $1 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$) の THz-TDSE による測定結果についてもあわせて報告する。



図 1



図 2

表 電気伝導層の有無による Mg イオン注入層の電気特性

電気伝導層	キャリア濃度(cm^{-3})	活性化率(%)	移動度($\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$)	注入層厚(nm)
なし (図 1)	1.5×10^{15}	1.5	47	302
あり (図 2)	1.1×10^{15}	1.1	16	300

参考文献

[1] 藤井高志「次世代パワーエレクトロニクスの課題と評価技術」 pp.127-138 (2022 年 S&T 出版)

[2] Wang et al., 24th International Conference on Ion Implantation Technology, O13 (2024 in Toyama)

[3] 藤井他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 19p-C42-5

2 MV/cm の高い絶縁破壊電界を有する AlN 基板上シュードモルフィック AlN/GaN/AlN HEMT のオン抵抗低減 Reduction of On-resistance in Pseudomorphic AlN/GaN/AlN HEMT on AlN Substrate with Critical Electric Field of 2 MV/cm

旭化成¹, 名大院工², 名大 IMASS³ ○李太起¹, 吉川陽^{1,3}, 杉山聖¹, 新井学³, 安藤裕二^{2,3}, 須田淳^{2,3}, 天野浩^{2,3}

¹Asahi Kasei Corp., ²Nagoya Univ., ³IMaSS, ○TaeGi Lee¹, Akira Yoshikawa^{1,3}, Sho Sugiyama¹,
Manabu Arai³, Yuji Ando^{2,3}, Jun Suda^{2,3}, and Hiroshi Amano^{2,3}

E-mail: lee.tb@om.asahi-kasei.co.jp

【緒言】近年, パワーデバイス応用や高周波アンプの高出力化に向けて, GaN HEMT の高耐圧化が望まれている. 6.0 eV のワイドバンドギャップを有する AlN を活用することは, 高耐圧化を実現するための有力な方法の一つである. 従来の AlGaIn/GaN HEMT の絶縁破壊電界が 1.0 MV/cm 以下であるのに対し, M. Wolf らは AlN 基板上 AlN buffer を用いることで 1.3 MV/cm の AlGaIn/GaN HEMT を実現している^[1]. A. Hickman らは MBE 法によりシュードモルフィック(コヒーレント)成長させた AlN/GaN/AlN HEMT において最大 2.0 MV/cm を達成した^[2]. これまで我々は量産性に優れた MOVPE 法により AlN/GaN/AlN HEMT を実現し, 最大 2.2 MV/cm の高い耐圧をもつことを実証してきた^[3-5]. 本研究では AlN/GaN/AlN HEMT のオン抵抗低減に成功したので報告する.

【実験】単結晶 AlN 基板上に, 図 1 (a)に示すシュードモルフィック AlN/GaN/AlN 層を MOVPE 法により成膜した. 従来の成膜条件のウェハ(#1, $R_{sh}=2368 \Omega/sq$)と成膜条件を改善したウェハ(#2, $585 \Omega/sq$)を用意し, フィールドプレートのない HEMT を作製した. ソース・ドレイン電極は AlN バリア層をエッチングした後 V/Al/Ni/Au を蒸着し形成した. ゲート電極には Ni/Au を用いた.

【結果】出力特性を図 1 (b)に示す. これまで報告してきた#1 の結果と比べ^[5], #2 ではシート抵抗の低減効果により R_{on} の低減と I_{max} の増大が観測された. #2 の特性オン抵抗 R_{onA} は $6.4 \times 10^{-4} \Omega cm^2$ であった. 絶縁破壊電圧 V_{BD} をゲートドレイン間距離 L_{GD} で割った絶縁破壊電界 E_c を図 1 (c)に示す. #1 は最大 2.2 MV/cm^[5], #2 は最大 2.0 MV/cm でありどちらも高い耐圧を示した. 以上の結果は単純なデバイス構造のサンプルで得られた結果であり, AlN 基板及び AlN/GaN/AlN 薄膜の高いポテンシャルを示すものである. 今後デバイス構造の工夫により更なる特性改善が期待される.

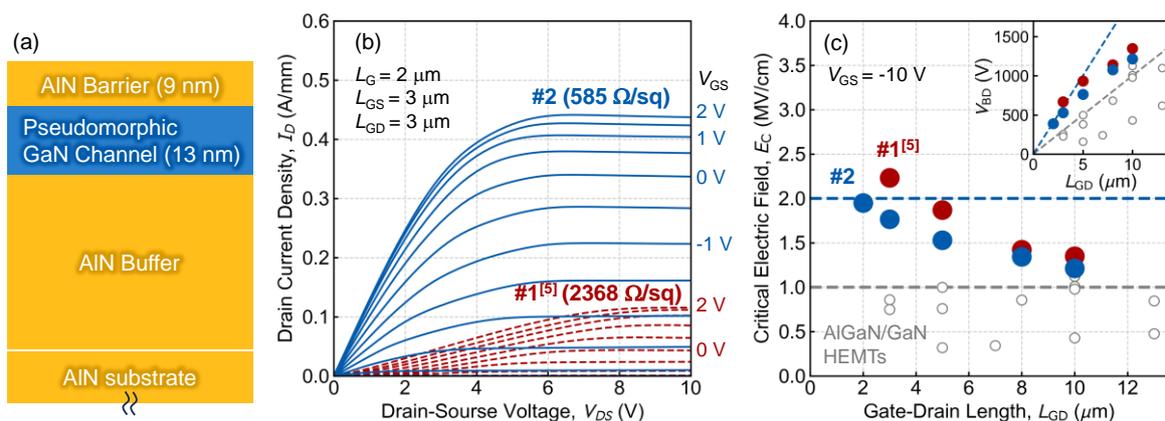


Figure 1. (a) Epitaxial layer, (b) output characteristics and (c) off-state breakdown of the HEMTs.

[1] M. Wolf *et al.*, IEEE Electron Device Lett. **45**, 1048 (2024).

[2] A. Hickman *et al.*, IEEE Electron Device Lett. **40**, 1293 (2019).

[3] A. Yoshikawa *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. **63** 060903 (2024).

[4] 李太起 他, 第 85 回応用物理学会秋季学術講演会 16p-A22-16 2024 年 9 月.

[5] 李太起 他, 第 11 回先進パワー半導体分科会 IB-20 2024 年 11 月.

N 極性面 AlN の結晶成長と GaN/AlN HEMT への応用

Growth of N-polar AlN and its application to GaN/AlN HEMTs

山口大院・創成科学,

○岡田 成仁*, (D)Aina Hiyama Zazuli, (M2)藤井 開, (M1)木本 大星, (M1)仁ノ木 亮祐,
(M1)山中 郁哉, 倉井 聡, 山田 陽一

Grad.School of Sci. & Tech. for Innovation, Yamaguchi Univ.

○N. Okada*, A. H. Zazuli, K. Fujii, T. Kimoto, R. Ninoki, F. Yamanaka, S. Kurai, and
Y. Yamada

*E-mail: nokada@yamaguchi-u.ac.jp

N 極性面 GaN/AlN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)は、AlN キャップを用いずに二次元電子ガスを発生することができ、さらに AlN を下地に用いることで従来構造である AlGaIn/GaN HEMT よりも更なる大電力、高耐圧、高温動作などを実現できる可能性がある。我々の研究室では、有機金属化合物気相成長 (MOVPE) 法によって作製した N 極性面 GaN/AlGaIn/AlN HEMT の動作を実証してきた^[1]。本発表では、サファイア基板上 N 極性面 AlN の結晶成長および N 面 GaN/AlN HEMT への応用について解説する。

MOVPE 法を用いてサファイア基板上に N 極性面 AlN を成長させる場合には低 V/III 比とすることが重要である。さらに表面平坦性を確保するためにはオフ角の制御が重要であり、おおよそオフ角 2.0°が平坦な N 極性面 AlN を成長させるために重要であった^[2]。このとき、表面粗さを示す原子間力顕微鏡 (AFM) の二乗平均平方根 (RMS) は 1 nm 程度であった。さらなる平坦化には水素パルスエッチングと命名した水素で N 極性面 AlN をエッチングしつつ成長を行うことが効果的であり、RMS 0.4 nm 程度までの平坦化を可能とした^[3]。一方、一般的にサファイア基板上に窒化物半導体を成長させるときには高密度の貫通転位密度を有することがよく知られており、特に N 極性面は転位が多いことがよく知られている。この問題に対して、我々は Al 極性面を用いた微小の凹凸構造による転位消滅機構と Al 極性面→N 極性面の極性反転を用いることで、サファイア加工基板上 N 極性面 AlN の転位密度を効果的に低減させることに成功した^[4]。サファイア基板上 N 極性面 AlN の平坦化と結晶性改善がなされた後、N 極性面 GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AlN 構造 HEMT を成長させた。GaN チャネル表面には 2 nm の SiO₂ を製膜し、メサ加工をベースにソース及びドレイン電極には Ti/Al/Ti/Au を、ゲート電極には Ni/Au を用いることでデバイス化を行った。N 極性面 GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AlN を実現させるためには GaN 層の成膜条件が重要であり、特に温度を適切にすることが重要であることが分かった。さらにその性能改善には GaN チャネル中に含まれる不純物濃度の低減が重要であり、V/III 比・キャリアの水素窒素比である F 値の最適化が特に効果的であった。また貫通転位密度の低減によりドレイン電流を上昇させることが出来た。以上より、MOVPE 成長にてサファイア基板上 N 極性面 GaN/AlGaIn/AlN HEMT は最大ドレイン電流 400 mA/mm を超えるまでの性能に至っている。

[謝辞] 本研究の一部は科研費基盤 B(24K01363)、名古屋大学未来材料・システム研究所共同利用の支援を受けて実施したものである。

参考文献

[1] A. H. Zazuli *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 63, 09SP11 (2024)

[2] Isono *et al.*, Phys. Stat. Solidi B, 257, 1900588 (2020)

[3] N. Okada *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys., 60, 125502 (2021)

[4] N. Okada *et al.*, J. Appl. Phys., 136, 025705 (2024)

N 極性面 GaN HEMT デバイスの性能に及ぼすアニールの影響 Effect of annealing on the performance of N-polar GaN HEMT devices

山口大学・創成科学¹, [○]仁ノ木亮祐¹, 平田靖晃¹, Aina Hiyama Zazuli¹,
藤井開¹, 木本大星¹, 倉井聡¹, 岡田成仁^{1,*}, 山田陽一¹

Grad. School of Sci. & Tech. for Innovation, Yamaguchi Univ.¹ [○]R. Ninoki¹, N. Hirata¹,

A. H. Zazuli¹, K. Fujii¹, T. Kimoto¹, S. Kurai¹, N. Okada^{1*} and Y. Yamada¹

E-mail: nokada@yamaguchi-u.ac.jp

AIN を下地層に持つ構造のデバイスは、従来の AlGaIn/GaN 電子デバイスと比べ高耐圧化、高温動作可能であるなどの様々な利点を有している。また、N 極性面 GaN 高電子移動度トランジスタ (HEMT) は金属極性面とは分極方向が逆となるためキャップ層を必要とせず、低い電気抵抗を実現出来る。従来構造の AlGaIn/GaN HEMT においては良好なコンタクトを形成するために、850°C や 900°C での高温アニールが必要であることが知られているが、AIN を下地層に持った N 極性面 GaN HEMT はその結晶成長の難しさから良好なコンタクトを形成する条件に関する報告は少なく、十分に理解されていない。本研究では GaN の成長温度を大幅に下げ、Ga 原子のマイグレーション長を抑制することによって研究報告のほとんど無い N 極性面 GaN/AlGaIn/AIN HEMT を作製することに成功している。本研究では、作製した N 極性面 GaN/AlGaIn/AIN HEMT 上に電極を蒸着し、アニール温度毎に出力電流と接触抵抗を導出することによって低温成長 N 極性面 GaN/AlGaIn/AIN HEMT における最適なアニール温度について調査を行った。

有機金属化合物気相成長法を用いてサファイア基板上に N 極性面 AIN と AlGaIn を作製し、その上に GaN を 650°C でヘテロ成長させた。電極として Ti/Al/Ti/Au を蒸着し、N₂ 雰囲気下で 100°C から 800°C まで 100°C ずつ温度を上昇させ、30 秒間熱処理を行った。

電極間に 10 V を印加した時の出力電流とアニール温度の関係を Fig.1 に示す。グラフの各色は電極間距離の違いを示している。600°C でアニールした時に最も優れた電流値が得られ、それよりも高い温度においてはアニールしていない状態よりも電流値が悪化した。また、Fig.2 は 600°C および 800°C でアニールした時の *I-V* 特性である。本実験ではアニール温度が 500°C と 600°C の時においてのみオーミック接触を得られ、それより高温でアニールするとショットキー接触となってしまった。よって低温成長 N 極性面 GaN/AlGaIn/AIN HEMT においては GaN の成長温度である 650°C よりも低温である 500°C や 600°C でのアニールが適し、従来のような高温アニールを行う事によってむしろデバイス性能を悪化させてしまうことが分かった。

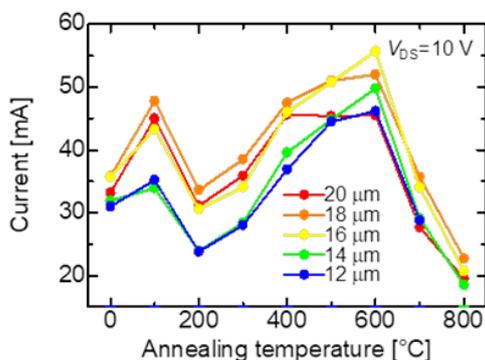


Fig.1 Relationship of output current and annealing temperature

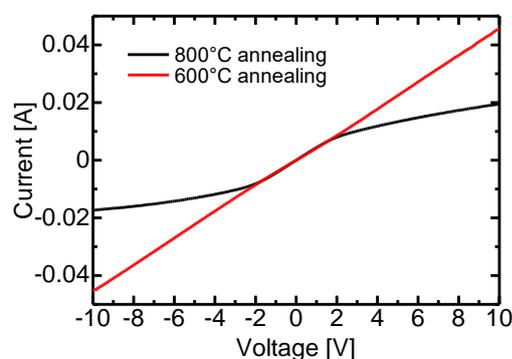


Fig.2 *I-V* characteristics at 600°C and 800°C annealing

[謝辞] 本研究の一部は科研費基盤 B(24K01363)の支援を受けて実施したものである。

外部応力による N 極性 GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AIN HEMT の電気特性変化 Effect of External Stress on Electrical Properties of N-polar GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AIN HEMT



山口大学大学院創成科学研究科, ^(DC)Aina Hiyama Zazuli, ^(M2)藤井 開,
^(M1)仁ノ木 亮祐, ^(M1)木本 大星, ^(M1)山中 郁哉, ^(B4)平田 靖晃, ^(B4)段島 陽樹,
^(B4)林内 天, 倉井 聡, 岡田 成仁*, 山田 陽一

Grad. School of Sci. & Tech. for Innovation, Yamaguchi Univ.,

^(DC)A. H. Zazuli, K. Fujii, R. Ninoki, T. Kimoto, F. Yamanaka, N. Hirata, H. Danbata, A.
Hayashiuchi, S. Kurai, N. Okada*, Y. Yamada

*E-mail: nokada@yamaguchi-u.ac.jp

窒化物半導体ヘテロ接合では c 軸方向への自発分極及び残留応力から生じるピエゾ分極によって二次元電子ガス(2DEG)が薄膜層の界面に発生し、高電子移動度トランジスタ (HEMT) を実現可能としている。意図的に結晶に歪を加えることによるトランジスタ特性の制御が期待できるため、AlGaN/GaN HEMT に対する応力の影響が報告されている。^[1] 一方我々が着目して研究対象としている N 極性 GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AIN HEMT に対する外部応力の影響は十分に解明されていない。本研究では N 極性 GaN HEMT 構造に様々な外部応力を加えたときの電気特性の変化について報告する。

Fig.1、2 に N 極性 GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AIN 構造の FET デバイス構造、外部応力印加に用いた治具の概略図を示す。この方法では基板を凸にそらせることで表面の GaN チャネル層に引っ張り歪を加えることができ、凹に反らせることで圧縮歪を加えることができる。試料に様々な外部応力を加えた際のドレインソース間の I-V 測定を行った。チャネル層に印加されている応力は、基板表面全体に均一な応力がかかっていると仮定し、試料を反らせたときの曲率半径から算出した。Fig.3 に応力がない場合を基準に、応力を変化させた時の $V_{DS}=10$ V 時の電流値の変化率を示す。N 極性 GaN HEMT では引っ張り応力 86 MPa が加わると電流が 1.3% 増加し、同等の圧縮応力が加わると電流値は 0.2% 減少した。N 極性 GaN HEMT の場合、引っ張り歪によって GaN チャネル内のピエゾ分極が減少し 2DEG の電子密度も減少することが予想される。しかし、実験結果は引っ張り歪を加えた場合に電流値の増加を示した。そこで、電荷密度を調べるために、試料に外部応力を印加した状態でホール効果測定を行った。その結果、引っ張り歪が加わっている場合において移動度の増加と電子密度の低減が確認できた。以上から、引っ張り歪を加えた際の電流値の増加に於いて、移動度増加の影響が分極効果による電子密度低下の影響を上回っていることが考えられる。

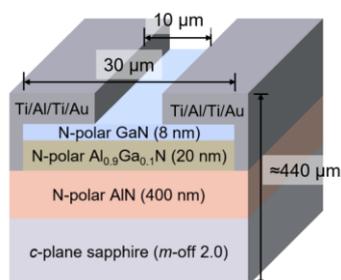


Fig. 1 Schematic diagram of N-polar GaN/Al_{0.9}Ga_{0.1}N/AIN.

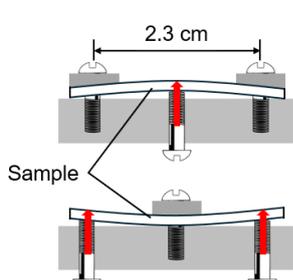


Fig. 2 Schematic diagram of setup for applying strain on sample.

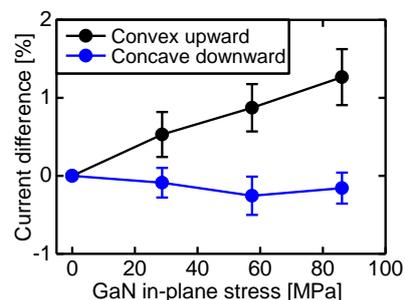


Fig. 3 Relationship between GaN in-plane stress and current difference at $V_{DS}=10$ V.

[謝辞] 本研究の一部は科研費基盤 B(24K01363)の支援を受けて実施したものである。

[参考文献]

[1] K. Liu, H. Zhu, S. Feng, L. Shi, Y. Zhang, C. Guo, *Microelectronics Reliability* **55** (2015) 886–889.

N-polar AlN-based GaN channel on sapphire for high electron mobility transistors**Nagoya University¹, University of Bristol, UK², ^oMarkus Pristovsek¹, Itsuki Furuhashi¹, Xu Yang¹,****Chengzhi Zhang², Matthew D. Smith², Martin Kuball²****E-mail: pristovsek.markus.w3@f.mail.nagoya-u.ac.jp**

Nitride-based high electron mobility transistors (HEMTs) are typically in the Ga-polar orientation where a 2-dimensional electron gas (2DEG) is generated at the interface between a GaN channel and an AlGaN barrier layer on top. The HEMT performance strongly depends on the 2DEG. Higher sheet carrier densities can be obtained by increasing the AlGaN content. However, this increases the ohmic resistance to the channel without further measures. Ultimately, AlN develops cracks for layers thicker than ~8 nm.

We have therefore investigated N-polar AlN-based HEMTs with GaN channels on sapphire. The N-polar AlN buffer is relaxed and on top up to about 9 nm strained GaN channels can be grown. The 2DEG is at the bottom GaN/AlN interface and thus away from the surface and highly confined in the channel.

The challenging growth of smooth N-polar AlN in metal-organic vapour phase epitaxy (MOVPE) was only achieved recently using very low V/III ratios. The resulting 2DEGs show low mobilities compared to GaN-based HEMTs. We have compared several samples and growth strategies with different interface/surface roughness and relaxation. For typical mobilities around 100 cm²/Vs, the roughness has no impact (as long as the rms roughness is smaller than 1 nm). However, as soon as the GaN channel relaxes, the mobilities are strongly reduced. Hence, dislocations have an impact.

Next, we investigated point defects. Using tri-ethyl gallium as Ga precursor and very high V/III ratios, we could reduce both oxygen and carbon in the GaN channel to values below 10¹⁷ cm⁻³ even for the low growth temperatures ~750°C needed to avoid step bunching. Thus, point defects in GaN cannot explain the low mobilities. However, the oxygen level in N-polar AlN is near 10¹⁹ cm⁻³ and could limit mobilities via charged point defects close to the channel. An intermediate AlN layer using higher V/III ratios and grading the temperature towards GaN channel had improved the mobilities, further supporting this assumption.

Thus, at the moment, dislocation from the AlN buffer continuing in the GaN channel and oxygen point defects in AlN are the main suspects for limiting the 2DEG mobilities.

To reduce dislocation density in N-polar AlN, we have employed high temperature annealing (HTA). By HTA, the FWHM of the 10.2 reflection was reduced from 1500 to 400 and the 002 from 250 to 80". However, the 2DEG grown on such HTA AlN templates showed only a small increase of mobility. Secondary ion mass spectroscopy (SIMS) found that the HTA of N-polar AlN at 1700°C dramatically increased the oxygen content in the AlN layer next to the sapphire. That oxygen seemed to further diffuse upwards. This would require very thick overgrowth with AlN (at 1300°C) to reduce the oxygen level again to below 10¹⁹ cm⁻³ and makes it difficult to discern between the effect of dislocations and oxygen in AlN.

Nevertheless, first HEMT devices have been processed successfully at the University of Bristol.