

令和4年度 未来研究ラボシステム 研究成果報告書

研究種目：共同研究

研究期間：令和3年10月～令和5年9月

研究課題名：極性反転集積型 GaN パワーCMOS の開発

ラボ長

所属：システム創成専攻 電子光科学領域

氏名：林侑介

研究成果

【概要】

本研究では、窒化ガリウム (GaN) による相補型金属酸化膜半導体構造 (CMOS) を実現するため、ボトルネックとなっている p チャネルトランジスタの性能向上、および極性反転技術を利用した p および n チャネルの新規集積方法の開発に取り組む。2022 年度では、p チャネルトランジスタの性能向上に向けて、【①GaN/AlN 構造に誘起される p チャネルの移動度解析】、【②表面クリーニングで生じる Al 液滴の微細構造解析】、【③ナノパターン基板上 AlN テンプレートの微細構造解析】の3点に取り組んだ。①では、実験的に得られた移動度が理論値よりも低くなることが明らかになり、その原因として、表面クリーニングを未実施によって生じる多数の貫通転位によるキャリア散乱の可能性を考察した。②では、表面クリーニングで意図せず生じる Al 液滴と、これによって誘起される AlN のエッチング抑制機構を透過電子顕微鏡 (TEM) 観察によって観察した。③では、高導電性 p 型チャネルを安定して形成するため、AlN バッファ層における歪緩和を目指したナノパターン基板上 AlN の微細構造解析に取り組んだ。これらの結果から、正孔移動度を向上させつつも、Al 液滴を発生させないようなクリーニング条件の最適化の必要性、およびナノパターン構造導入と空孔構造・転位分布の関係性が明らかとなった。

また、2021 年度に得られた、N 極性 AlN テンプレート上への GaN/AlN 成膜による n チャネルの形成では、*Sci. Adv.*誌に投稿していた論文が採択され、窒化物半導体および電子デバイスの研究コミュニティにおいても本研究の重要性が認められる結果となった[Z. Zhang*, Y. Hayashi, *et al.*, “Molecular Beam Homoepitaxy of N-polar AlN: Enabling Role of Al-Assisted Surface Cleaning,” *Sci. Adv.*, Vol. 8, pp. eabo6408 (2022).]

プロジェクトの最終年度となる 2023 年度は、条件最適化した表面クリーニングを導入した状態で GaN/AlN 構造を成膜して p チャネルの移動度向上に取り組む。さらに、金属極性および N 極性の同時結晶成長を行い、p チャネルと n チャネルを同一基板上に形成することで最終目標である CMOS 構造の作製に挑戦する。以下では 2022 年度に得られた成果の詳細を報告する。

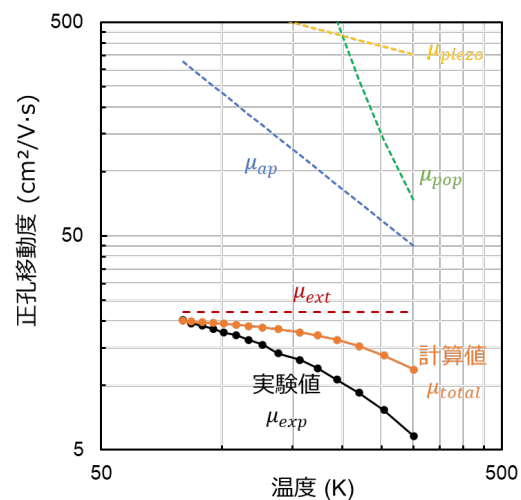


Fig. 1 作製した p チャネルのホール移動度における理論値と実験値の比較

【①GaN/AIN 構造に誘起される p チャネルの移動度解析】

試料は次の手順で作製した。まず、三重大学においてサファイア基板の上に 180 nm の AIN をスパッタ成膜し、1700°C、3 時間の face-to-face アニールを施すことで高品質 AIN テンプレートを作製した。さらにその上に、有機金属気相成長法 (MOVPE) で AIN を 200 nm 成膜し、原子レベルのステップテラス構造で構成される平坦な表面を形成した。その後、コーネル大学において分子線エピタキシー法 (MBE) で AIN 400 nm、ノンドープ GaN 8 nm、Mg ドープ (In)GaN 15 nm を成膜した。AIN/GaN 界面には、大きなバンドギャップエネルギー差、電気分極差に由来して p チャネルが生成される。

この試料に対して、温度依存ホール効果測定によって実験的に得られた移動度と、理論計算との比較を Fig. 1 に示す。理論計算では、音響フォノン μ_{ap} 、極性光学フォノン μ_{pop} 、圧電効果 μ_{piezo} 、および温度に依存しない外部散乱要因 μ_{ext} で制限される移動度をそれぞれ計算し、Matthiessen の規則によって全ての効果を考慮した移動度 μ_{total} を導いた。この結果からわかるように、低温領域で実験値と理論値が一致するように μ_{ext} を設定すると、高温側における移動度では乖離が見られた。このことから、高温側でより移動度を低下させる現象が生じていることが示唆された。このような乖離はコーネル大学による先行研究では見られていないため、本手法に固有の原因だと考えられる。そこで、従来モデルでは考慮されていなかった転位によるキャリア散乱の可能性を考察した。既に本試料の TEM 観察によって、表面クリーニングの未実施による多数の貫通転位の発生、および AIN テンプレートの圧縮歪に由来した GaN/AIN 界面でのミスフィット転位が確認されているため、これら的高密度転位によるキャリア散乱が示唆された。今後は表面クリーニングの導入、およびテンプレートの圧縮歪を考慮した GaN 膜厚の設定により転位の発生を抑制することで、理論計算と一致するような高温領域での移動度改善に取り組む。

【②表面クリーニングで生じる Al 液滴の微細構造解析】

Figure 2 に、表面クリーニングで意図せず生じた Al 液滴の表面・断面構造、Fig. 3 に Al 液滴によ

検討課題 クリーニングにより生じる Al 液滴領域の微細構造解析

- ◇N極性AIN上でAlを用いた表面クリーニング・MBE-AIN成長後にKOHエッチングを実施
- ⇒一部でAl液滴が発生し、エッチングが阻害された可能性
- ⇒極性反転や結晶欠陥につながる懸念

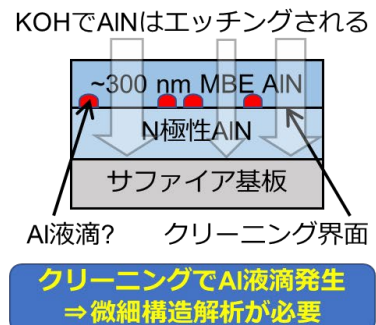
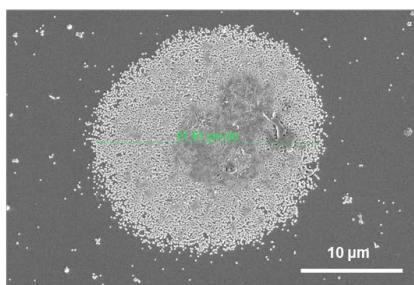
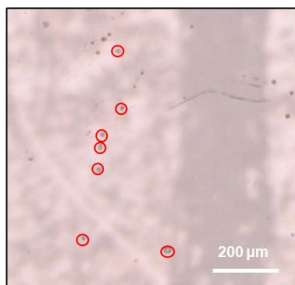


Fig. 2 クリーニングにより生じる Al 液滴の表面・断面構造

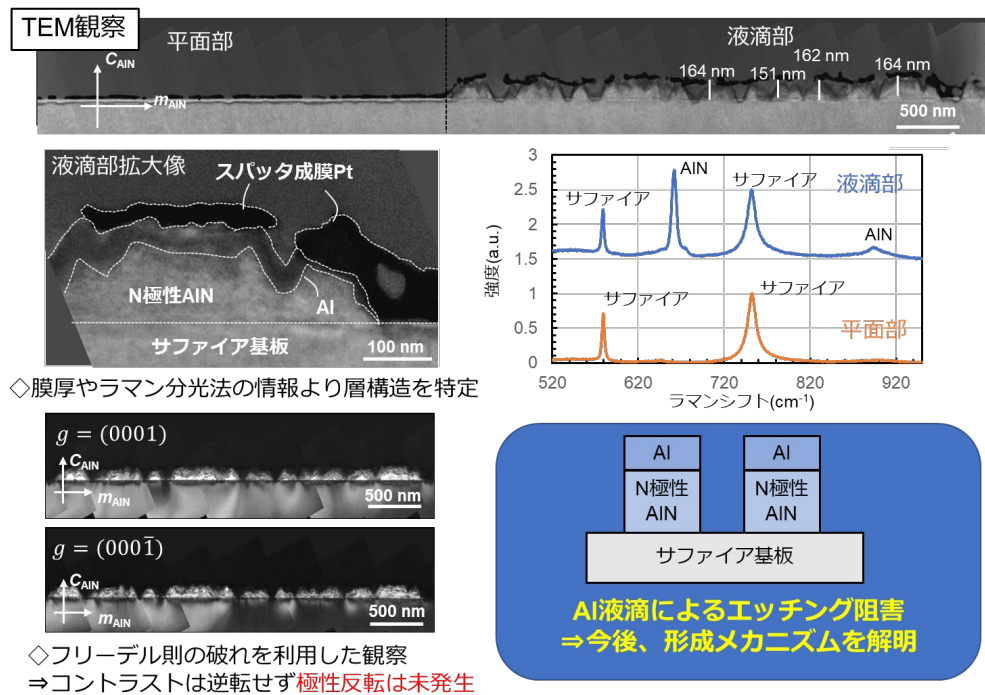


Fig. 3 Al 液滴周辺部の断面 TEM 観察結果

って誘起されるエッチング抑制構造の TEM 観察結果を示す。これまでの検討により、N 極性 AlN テンプレート上で表面クリーニング後に MBE 成長すると、基板の極性を引き継いで N 極性 AlN が結晶成長することがわかっている。N 極性 AlN はアルカリ性水溶液と反応して容易にエッチングされるため、この処理をした本試料ではサファイア基板が表面に露出するはずだが、本試料では表面にドット上のパターンが残留していることが表面観察で明らかになった。コーネル大学との議論の結果、これらは表面クリーニング時に形成される Al 液滴によるものであることが考えられた。このような構造が残留している場合、貫通転位密度の増大やトランジスタのリーク電流増大が懸念されるため、まず Al 液滴周辺における微細構造解析を行った。Figure 3 に示す断面 TEM 像から明らかなように、サファイア基板が露出している平面部とは異なり、液滴部では高さ 160 nm 程度の領域が粒状にエッチングされずに残留していることがわかる。顕微ラマン分光測定から、この残留物が AlN であることが特定され、さらに膜厚が概ね N 極性 AlN テンプレートに一致していることも明らかとなった。以上の結果から、Al 液滴が N 極性 AlN テンプレート上に形成され、エッチング抑制構造として機能していたと考えられる。液滴部をさらに詳細に調査するため、フリーデル則の破れを利用して AlN の極性を確認したところ、膜は全て N 極性であり、Al 極性は混在していないことがわかった。したがって、表面に Al 極性 AlN が形成されてエッチングが止まったのではなく、Al 液滴が反応して酸化アルミニウムなどに変質し、それがマスクとして機能したと考えられる。以上の観察結果は N 極性 AlN 上の Al 液滴について初めて詳細な解析を行った結果であり、今後の Al 液滴の抑制や、それに伴う悪影響を避けるための検討に有用な情報となる。

【③ナノパターン基板上 AlN テンプレートの微細構造解析】

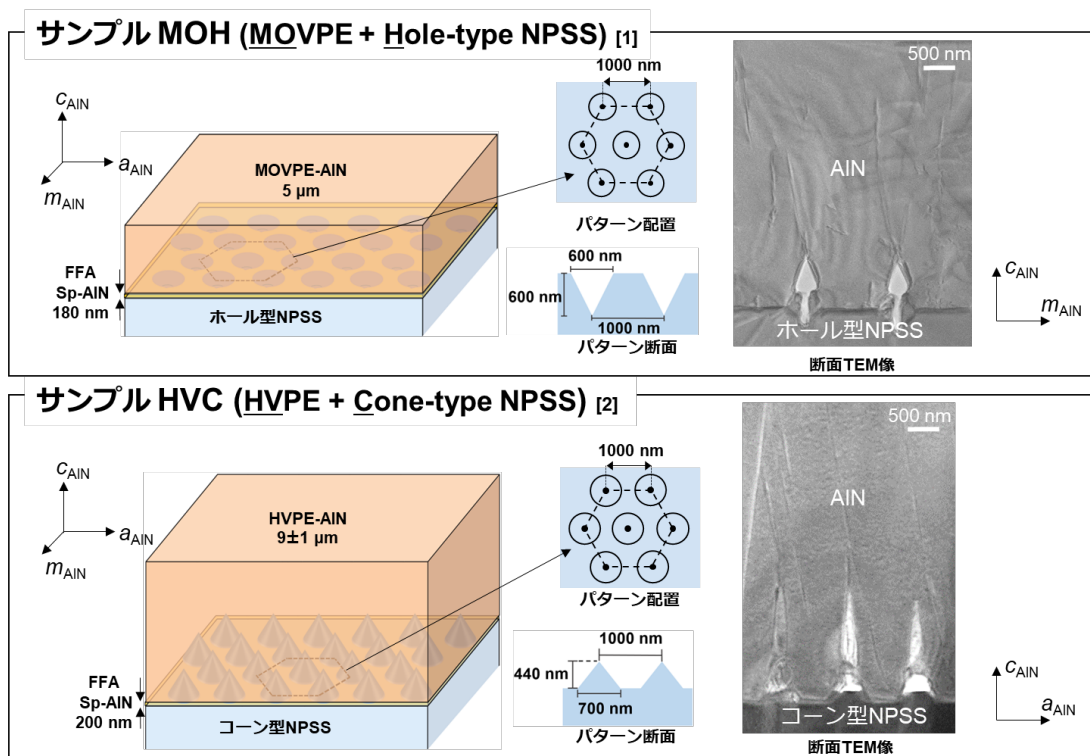


Fig. 4 サンプル MOH および HVC の構造模式図と断面 TEM 観察結果

Figure 4 にナノパターン加工サファイア基板 (NPSS) 上に形成した AlN テンプレートの模式図と断面 TEM 像を示す。断面 TEM 像から明らかなように、ナノパターンの導入により 3 次元的な結晶成長が促され、AlN とサファイアの界面に矢印・三角型の空孔が形成される。サファイア基板上の AlN 成長では、熱膨張係数差によって AlN に圧縮歪が印加されるが、この圧縮歪によって AlN 上 GaN 成長の臨界膜厚を低下させる懸念があった。実際、これまでに作製した試料では GaN/AlN 界面にミスフィット転位が確認されており、AlN バッファ層における圧縮歪のために、既存の GaN 膜厚では臨界膜厚を超えて結晶緩和に近い状態になっていることが示唆されていた。したがって、本研究では十分に高い p チャネル導電性を達成するため、AlN テンプレートにおける圧縮歪の制御・抑制が重要となる。そこで、2 種類の NPSS 上 AlN 薄膜試料を準備し、ナノパターン構造や結晶成長方法の違いによる空孔形状や転位分布を TEM 観察により評価することで、効果的な歪緩和に向けた検討を行った。サンプル MOH は、ホール型 NPSS 上にスパッタアニール法で AlN を 180 nm 形成した後、有機金属気相成長法 (MOVPE) によって 5 μm の AlN 厚膜を成長している。一方、サンプル HVC では、コーン型 NPSS 上にスパッタアニール法で AlN を 200 nm 形成した後、ハイドライド気相成長法 (HVPE) によって $9 \pm 1 \mu\text{m}$ の AlN 厚膜を成長している。これらの試料の断面 TEM 像を解析した結果、両者では空孔形状・転位分布が大きく異なることが明らかとなった。サンプル MOH では矢印型の空孔が埋め込まれており、AlN とサファイアの界面には γ -AlON が形成されていることが組成分析より確認された。一方、サンプル HVC では、三角形状の縦長の空孔が形成されており、さらにコーン頂上部が気相成長中に分解した結果、配向が大きく傾いた AlN 粒が空孔中に存在することがわかった。サンプル MOH では γ -AlON と AlN の界面でミスフィット転位が多数発生し、貫通転位密度は $8.3 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ だったのに対し、サンプル

HVC では空孔周辺での転位の大幅な増大は確認されず、結果として貫通転位密度は $4.7 \times 10^8 \text{ cm}^{-2}$ となっていた。以上の結果から、AlN のテンプレートとしてはサンプル HVC が優れていることが示唆された。本研究成果は J. Electron. Mater. 誌に掲載され、AlN/NPSS 界面のナノ構造が貫通転位密度に大きな影響を及ぼすことを報告した。[Y. Nakanishi*, Y. Hayashi*, T. Hamachi, T. Tohei, Y. Nakajima, S. Xiao, K. Shojiki, H. Miyake, and A. Sakai*, “Micro- and Nanostructure Analysis of Vapor-Phase-Grown AlN on Face-to-Face Annealed Sputtered AlN/Nanopatterned Sapphire Substrate Templates,” J. Electron. Mater., Vol. 52, pp. 10348-1-10 (2023).]

さらに、これら 2 種類の試料について深さ分解ナノビーム X 線回折解析を行い、TEM 解析と関連する深さ方向の歪分布を初めて測定することに成功した。本結果は Nat. Commun. 誌への投稿に向けてデータ解析と原稿準備を進めている。

【参考文献】 [1] R. Chaudhuri *et al.*, Science **365**, 1454 (2019), [2] H. Miyake *et al.*, J. Cryst. Growth **456**, 155 (2016), [3] Y. Cho *et al.*, APL **116**, 172106 (2020).

キーワード：パワーデバイス、GaN

研究経費（R4 年度）の内訳

備品費	消耗品費	旅費	謝金	その他	合計
0 円	401,077 円	549,294 円	0 円	349,629 円	1,300,000 円

共同研究者等

(1)共同研究者（氏名・所属）

Yongjin Cho コーネル大学

Huili G. Xing コーネル大学

Debdeep Jena コーネル大学

上杉謙次郎三重大学 助教

三宅秀人 三重大学 教授

(2)研究協力者（氏名・所属・学年（学生の場合））

西村海音 大阪大学 修士 1 年

中西悠太 大阪大学 修士 2 年

発表論文等（令和 5 年 3 月 31 日現在）

[雑誌論文]

1. T. Sato, T. Hamachi, T. Tohei, Y. Hayashi, M. Imanishi, S. Usami, Y. Mori, and A. Sakai*, “Electrical Conduction Mechanism of Schottky Contacts Fabricated on a Single Threading Dislocation in an HVPE-grown Si-doped GaN Substrate,” Mater. Sci.

Semicond. Process., Vol. xx, pp. xx-x-xx (2023). Under Review.

2. Y. Nakanishi*, Y. Hayashi*, T. Hamachi, T. Tohei, Y. Nakajima, S. Xiao, K. Shojiki, H. Miyake, and A. Sakai*, “Micro- and Nanostructure Analysis of Vapor-Phase-Grown AlN on Face-to-Face Annealed Sputtered AlN/Nanopatterned Sapphire Substrate Templates,” J. Electron. Mater., Vol. 52, pp. 10348-1-10 (2023).
3. T. Hamachi*, T. Tohei, Y. Hayashi, M. Imanishi, S. Usami, Y. Mori, and A. Sakai*, “Comprehensive analysis of current leakage at individual screw and mixed threading dislocations in freestanding GaN substrates,” Sci. Rep., Vol. 13, pp. 2436-1-14 (2023).
4. Z. Zhang*, Y. Hayashi, T. Tohei, A. Sakai, V. Protasenko, J. Singhal, H. Miyake, H. G. Xing, D. Jena, and Y. Cho*, “Molecular Beam Homoepitaxy of N-polar AlN: Enabling Role of Al-Assisted Surface Cleaning,” Sci. Adv., Vol. 8, pp. eabo6408 (2022).

[著書]

なし

[学会発表]

招待講演

1. 林侑介, 藤平哲也, Yongjin Cho, Huili Grace Xing, Debdeep Jena, 三宅秀人, 酒井朗 “高品質 AlN テンプレートの歪制御と電子デバイス応用”, 電気学会「高機能化合物半導体エレクトロニクス技術と将来システムへの応用調査専門委員会(第 2 期)」, Dec. 2022.

国際会議発表

1. Y. Hayashi, T. Tohei, Z. Zhang, H. G. Xing, D. Jena, Y. Cho, H. Miyake, and A. Sakai, “TEM Analysis of MBE-Grown AlN on N-polar Sputtered and Annealed AlN templates,” International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2022), Oct. 2022.
2. Y. Hayashi, T. Tohei, K. Uesugi, K. Shojiki, H. Miyake, and A. Sakai, “Crack Formation Mechanism of Sputtered and Annealed AlN On c- and a-Plane Sapphire,” International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2022), Oct. 2022.
3. T. Hamachi, Y. Hayashi, T. Tohei, S. Usami, M. Imanishi, Y. Mori, and A. Sakai, “Current leakage mechanism at Schottky contacts locally formed on individual screw and mixed threading dislocations in GaN substrates,” International Workshop on Nitride Semiconductors (IWN 2022), Oct. 2022.
4. Y. Nakanishi, T. Hamachi, Y. Nakajima, Y. Hayashi, T. Tohei, S. Xiao, K. Shojiki, H. Miyake, Akira Sakai, “Microstructural Analysis of Thick AlN Films Grown on NPSS Using Cross-Sectional and Plan-View Transmission Electron Microscopy,” The 19th International Conference on Defects-Recognition, Imaging and Physics in Semiconductors (DRIP19), Tu2-3, Sep. 2022.
5. T. Sato, T. Hamachi, T. Tohei, Y. Hayashi, M. Imanishi, S. Usami, Y. Mori, and A. Sakai, “Conduction Mechanism of Schottky Barrier Diodes Fabricated on Single Threading Dislocations in an HVPE-GaN Substrate,” The 9th International Symposium on Control of

Semiconductor Interfaces (ISCSI-IX), WA1-4, Sep. 2022.

国内会議発表

1. Zhendong WU, Yudai Nakanish, Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Yasuhiko Imai, Kazushi Sumitani, Shigeru Kimura, Akira Sakai, “A nanoXRD Based Analysis on HVPE GaN Structure Combined with Machine Learning,” 2023 年第 70 回応用物理学会春季学術講演会, 15p-D511-3, Mar. 2023.
2. Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Zexuan Zhang, Huili (Grace) Xing, Debdeep Jena, Yongjin Cho, Hideto Miyake, Akira Sakai, “Atomic Scale Mechanism of Polarity Control in Molecular Beam Homoepitaxy on Sputter-Annealed N-polar AlN Templates, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-B201-11, Sept. 2022.
3. Yusuke Hayashi, Tetsuya Tohei, Zexuan Zhang, Huili (Grace) Xing, Debdeep Jena, Yongjin Cho, Hideto Miyake, Akira Sakai, “Dislocation Morphologies of Molecular Beam Epitaxy Grown AlN on Sputter-Annealed N-polar AlN, 2022 年第 83 回応用物理学会秋季学術講演会, 20a-B201-12, Sept. 2022.

〔その他〕

プレスリリース

1. 大阪大学 ResOU、三重大学、コーネル大学「6 G用の高速パワーデバイスへ！ N 極性で GaN on AlN を世界で初めて実現！」、2022 年 9 月 10 日

外部資金獲得状況・申請状況

◆採択

研究代表者：林侑介

科学研究費補助金・国際共同研究強化(B) (2022-2026)

大阪大学 データビリティフロンティア機構 学際共創プロジェクト (2022-2023)

科学研究費補助金・基盤研究 B (2023-2026)

池谷科学技術振興財団

◆申請中

大阪大学共創機構シーズ育成グラント

参考となるHP等

<http://www.nano.ee.es.osaka-u.ac.jp/>