

2025 年 12 月 9 日

AlN 基板上 AlN/GaN/AlN 薄膜トランジスタで 高耐圧・低抵抗・電流不安定性解消を実証 ～通信・レーダー向け高周波デバイスの性能向上に期待～

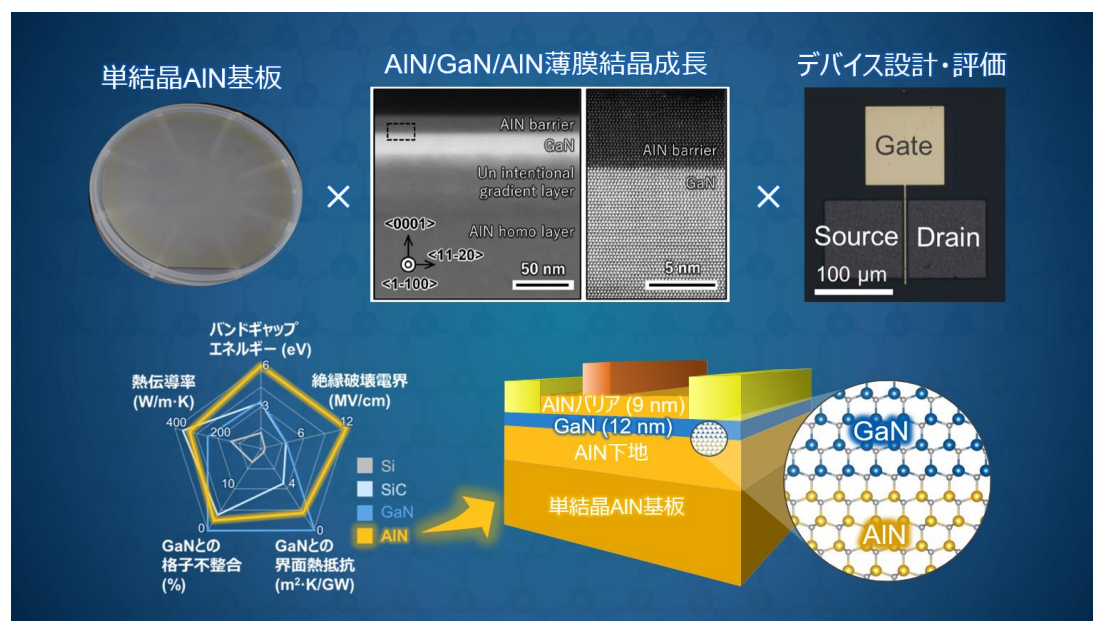
【研究概要】

名古屋大学未来材料・システム研究所の須田 淳 教授、天野 浩 教授らと旭化成株式会社の研究グループは、窒化アルミニウム(AlN)基板上にコヒーレント成長させた AlN/GaN/AlN 高電子移動度トランジスタ(HEMT) を実現し、従来の GaN HEMT と比べ 2 倍以上の耐圧性能、低抵抗化、そして電流コラプスの抑制を実証しました。本成果は、通信・レーダー向け高周波デバイス^{注 5)}の飛躍的な性能向上に直結する重要なブレイクスルーです。

AlN は、ワイドバンドギャップ半導体^{注 6)}として知られるシリコンカーバイド(SiC)や窒化ガリウム(GaN)よりも広い約 6 eV のバンドギャップを持つウルトラワイドバンドギャップ半導体^{注 7)}であり、高い絶縁破壊電界と優れた熱伝導率を兼ね備えています。また、GaN との格子定数^{注 8)}のずれが小さく、GaN/AlN 界面の熱抵抗が小さいため、GaN デバイスとの相性が良く、次世代の高周波・高出力デバイス材料として注目されています。本研究グループはこれまで、20 nm の GaN を AlN 上にコヒーレント成長させる革新的な結晶成長条件を見出し、世界で初めて有機金属気相成長(MOVPE)法により AlN(9 nm)/GaN(12 nm)/AlN HEMT を実現しました。

本研究では、結晶成長条件とデバイスプロセスの改善により、当初高かったデバイスの抵抗を二桁低減し、従来の GaN HEMT と同等水準の抵抗値を実現しました。また、従来構造に比べて 2 倍以上の耐圧性能をもつことを実証し、AlN/GaN/AlN 構造の高いポテンシャルを示しました。加えて、従来の GaN HEMT で課題となっていた電流コラプスを抑制し、安定動作を可能にしました。これにより、信頼性の高い高周波・高出力デバイスの実現に大きく前進しました。本成果は、次世代の通信やレーダーシステムにおける高周波・高出力デバイスの性能向上に大きく貢献することが期待されます。

本研究成果は、本学未来材料・システム研究所 旭化成次世代デバイス産学協同研究部門の李 太起(リ テギ)特任助教により 2025 年 12 月 8 日に世界トップクラスの半導体デバイスに関する国際会議(International Electron Device Meeting, IEDM^{注 9)}、米国サンフランシスコ開催)で発表されました。



【本研究のポイント】

- ・量産性に優れた MOVPE^{注1)}法により、窒化アルミニウム(AlN)基板上にコヒーレント成長^{注2)}させた AlN/GaN/AlN 高電子移動度トランジスタ(HEMT)^{注3)}を実現。
- ・従来の GaN HEMT と比べ、同等水準の抵抗値を実現しつつ、2 倍以上の耐圧性能を達成。
- ・従来の GaN HEMT で課題だった電流コラプス^{注4)}を抑え、安定動作を実現。
- ・Crystal IS の高品質 AlN 単結晶基板、旭化成と名古屋大学により開発した革新的結晶成長技術、そして名古屋大学 エネルギー変換エレクトロニクス実験施設(C-TEFs)の先端デバイス試作環境の融合により、産学連携でブレークスルーを実現。

【研究背景】

次世代の通信システムやレーダー装置では、より高い周波数で大きな電力を扱える半導体デバイスが求められています。このような用途では、広く利用されているシリコン(Si)やガリウムヒ素(GaAs)に比べ、高出力化に対応できる窒化ガリウム(GaN)を用いた高電子移動度トランジスタ(HEMT)の実用化が進んでいます。しかし、従来の AlGaN/GaN HEMT では、耐圧や放熱性の制約、動作時の電流不安定性(電流コラプス)といった課題がありました。

これらを解決する鍵となるのが、ウルトラワイドバンドギャップ半導体である窒化アルミニウム(AlN)です。AlN は約 6 eV の広いバンドギャップ、高い絶縁破壊電界、優れた熱伝導率を持ち、GaN との格子整合性も良好です(図 1)。本研究では AlN 単結晶基板上にコヒーレント成長させた AlN/GaN/AlN HEMT の可能性を実証し、次世代高周波・高出力デバイスへの新しい設計指針を提示します。

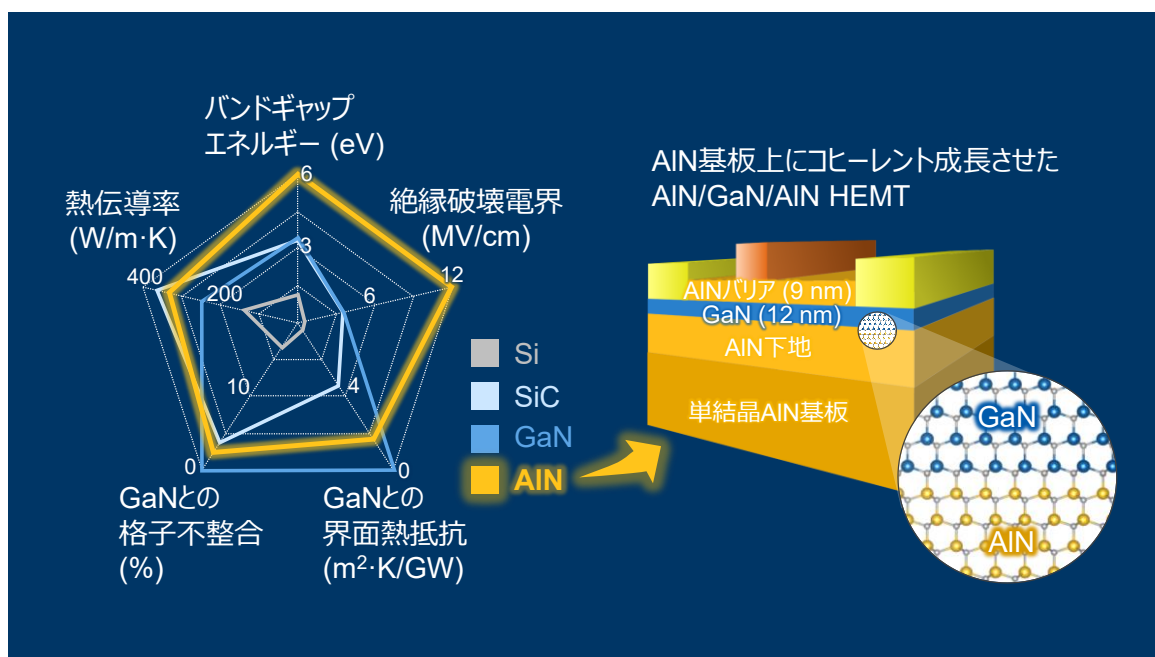


図 1. (左)Si、SiC、GaN、AlN の材料特性比較。(右)単結晶 AlN 基板上にコヒーレント成長させた AIN/GaN/AIN HEMT の模式図。

【研究成果】

本研究では、GaN 成長時の Ga 原料を変えることで結晶中の炭素不純物を大幅に低減し、シート抵抗を $2000 \text{ } \Omega/\text{sq}$ から $507 \text{ } \Omega/\text{sq}$ へ約 4 分の 1 に低減しました。さらに、AlN バリア層のエッチング工程を導入することで、コンタクト抵抗を $64 \text{ } \Omega\text{mm}$ から $2.4 \text{ } \Omega\text{mm}$ へ約 25 分の 1 に低減しました。これにより、デバイスの特性オン抵抗は 2 桁低減し、従来の AlGaN/GaN HEMT と同等水準に到達しました(図 2 (a))。また、耐圧性能の指標である絶縁破壊電界は最大 2 MV/cm を記録し、従来の AlGaN/GaN HEMT の値(1 MV/cm 以下)の 2 倍以上を達成しました(図 2 (b))。

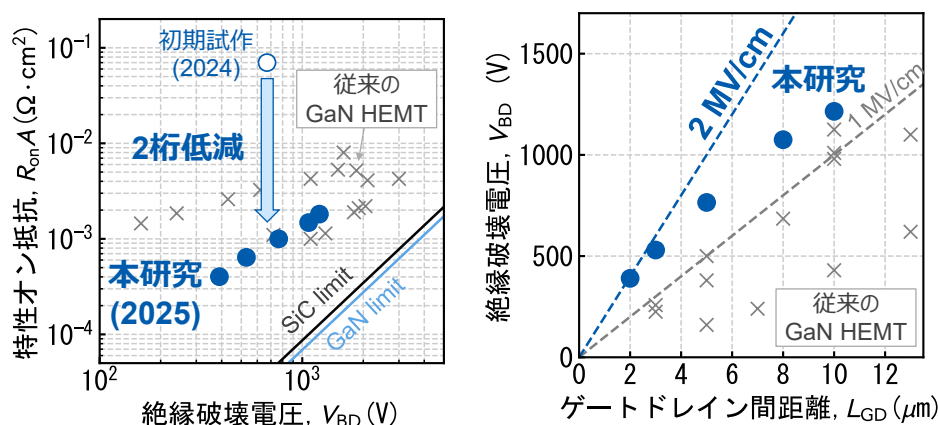


図 2. (a)絶縁破壊電圧とデバイスの特性オン抵抗の関係。(b)ゲートドレイン間距離と絶縁破壊電圧の関係。

表面保護膜の導入により電流コラプスが完全に抑制され、表面欠陥の影響が低減されていることが確認されました(図 3)。電流コラプスは結晶内部の欠陥にも起因するため、この結果は AlN 基板上的 AlN/GaN/AlN 構造が極めて高い結晶品質を有することを示しています。これらの成果は、高周波デバイスの高性能化に向けた重要なブレイクスルーです。

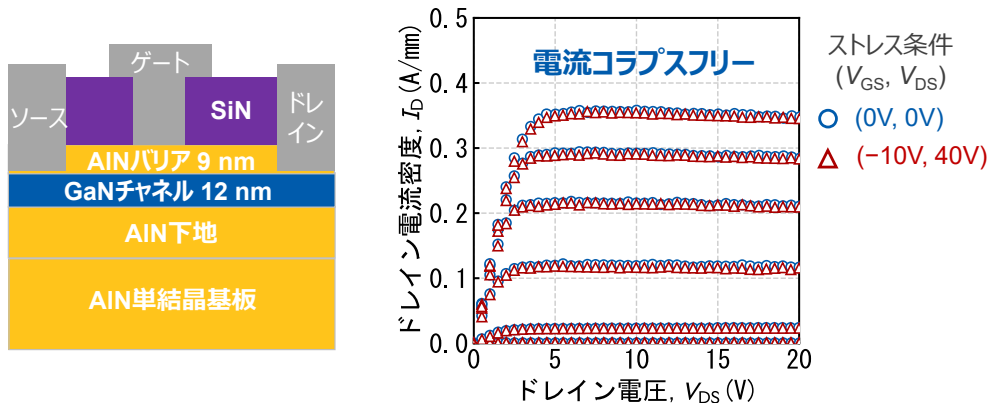


図 3. 電流コラプスを評価するために行ったパルス I-V 測定の結果。パルス幅 $10\mu\text{s}$ 、パルス周期 1ms の条件で測定。ノンストレス条件(0V, 0V)とストレス印加条件(-10V, 40V)の結果が一致していることから、電流コラプスを完全に抑制できていることが分かる。

【成果の意義】

本研究では、AlN/GaN/AlN HEMT の最重要課題であった低抵抗化に成功し、実用化に向けた大きな一歩を踏み出しました。これにより、従来の AlGaIn/GaN HEMT を超える高性能化が現実味を帯び、次世代通信やレーダー技術の革新に直結する成果となりました。また、耐圧と電流コラプスの両面で、従来構造の特性を凌駕する結果が得られたのは、高周波・高出力デバイスの性能向上に直結する極めて重要な成果です。これにより、6G 通信や衛星通信・高性能レーダーなどの先端技術の実現を大きく前進します。

さらに、今回の成果は「世界で初めて MOVPE 法で実証できた」という点で非常に大きな意味を持ちます。青色 LED が量産性に優れた MOVPE 法で実現したことで世界に普及したように、AlN/GaN/AlN HEMT も MOVPE での実証により、広く産業界に普及する可能性が開かれました。

本研究は、ウルトラワイドバンドギャップ半導体を活用した次世代高周波デバイスの量産化に向けた重要な一歩であり、通信・レーダー分野の応用に革新をもたらすことが期待されます。

【本成果をなぜ実現できたか】

今回の成果は、名古屋大学と旭化成の産学連携による総合力の結晶です。高品質な AlN 単結晶基板、AlN/GaN/AlN 薄膜の成長を可能にする結晶成長技術、HEMT デバイスの設計・プロセス技術、そして精密な評価技術を統合することで、AlN/GaN/AlN HEMT の実証に成功しました。この背景には、両者が長年にわたり積み重ねてきた AlN 系半導体研究の知見と、名古屋大学が保有する次世代半導体クリーンルームや先端評価設備(図 4)、旭化成の材料開発力(図 5)があります。こうした産学連携の強みが、次世代高周波デバイスの実現に向けた大きな一歩を可能に

しました。



図4. 名古屋大学未来材料・システム研究所のエネルギー変換エレクトロニクス実験施設（C-TEFs）。本施設は、GaN 研究における結晶成長・デバイスプロセス・評価を同一スペースで行える約 1,000 m² の大空間クリーンルームを有しており、名古屋大学と企業・研究機関の連携を強化する場となっている。

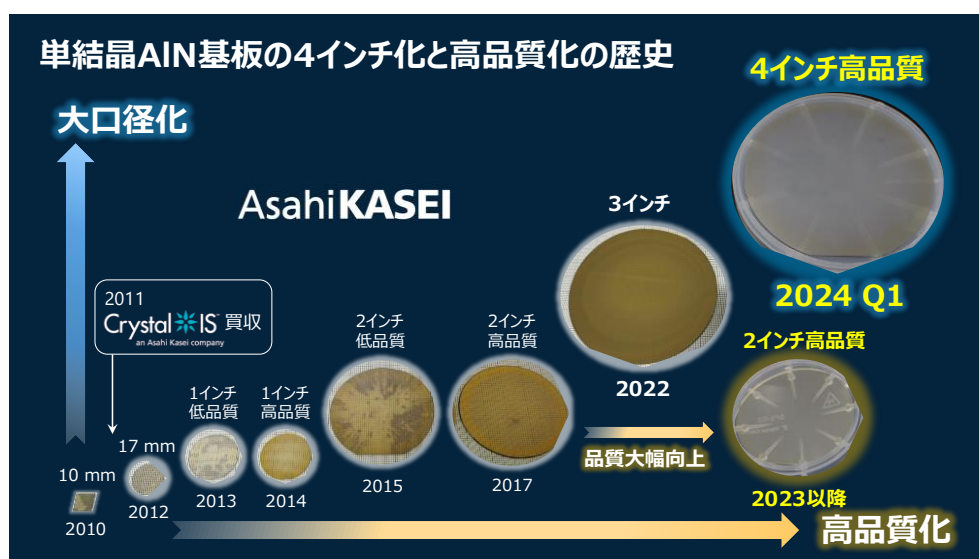


図5. 旭化成と Crystal IS による単結晶 AlN 基板開発の歴史。

【用語説明】

注 1)MOVPE(Metalorganic vapor phase epitaxy;有機金属気相成長) 法:

半導体結晶を成長させる代表的な方法の一つ。金属有機化合物とアンモニアなどのガスを高温で反応させ、基板上に薄膜を形成する。大量生産に適しており、LED やパワーデバイスの製造に広く使われている。

注 2)コヒーレント成長:

異なる材料を積層する際に、面内方向の格子定数が一致した状態で成長していることを指す。具体的には、下地層と成長層の格子定数にわずかな差があっても、成長初期では成長層が下地層の結晶格子に合わせて歪み、転位などの欠陥が形成されずに成長する状態である。ただし、成長層の厚みが増すと歪みエネルギーが蓄積し、臨界厚を超えるとコヒーレント

成長は維持できなくなる。このため、コヒーレント成長は「歪みを保持したまま格子整合を維持する成長モード」と理解される。

注 3) 高電子移動度トランジスタ(HEMT):

異なる半導体材料を組み合わせることで界面に二次元電子ガス(2DEG)を形成し、電子が高速に移動できるようにしたトランジスタ。この構造に窒化ガリウム(GaN)を用いた GaN HEMT は、GaN のワイドバンドギャップ特性により高耐圧・高出力・高温動作が可能である。さらに GaN HEMT では、AlGaN や AlN などのバリア層との間で自然に発生する分極効果によって電子が集まり、2DEG が形成されるため、不純物ドーピングが不要である。AlGaN バリアの Al 組成が高いほど分極効果が強くなるため、AlN バリアでは分極効果が最大となり高密度の 2DEG が形成される。

注 4) 電流コラプス:

HEMT などの高周波・高電圧デバイスで、オフ状態からオン状態に切り替えた際に、本来は流れるはずの電流が一時的に大きく減少する現象。この現象はスイッチング動作における性能低下の主な要因であり、出力電力や効率に悪影響を与える。特に GaN 系 HEMT では、表面欠陥や界面欠陥、結晶内部の欠陥に電荷がトラップされることが原因となる。この問題を抑えるためには、表面保護膜の開発やデバイスプロセス改善、結晶品質の向上が重要である。

注 5) 高周波デバイス:

マイクロ波やミリ波などの高い周波数の信号を扱う半導体電子デバイスの総称。一般に、周波数を高くすると扱える電圧(出力電力)が低下するため、通信やレーダー用途では高周波と高出力の両立が重要な課題となる。従来の Si や GaAs では性能に限界があり、現在ではワイドバンドギャップ半導体である GaN 系材料が高周波・高出力デバイスの主流になっている。さらにその先の展開として、ウルトラワイドバンドギャップ半導体である AlN 系材料への期待が高まっている。

注 6) ワイドバンドギャップ半導体:

バンドギャップとは、電子が価電子帯から伝導帯へ移動するために必要なエネルギーのことで、この値が大きいほど材料は高電圧や高温に耐えやすくなる。ワイドバンドギャップ半導体は、従来の半導体材料である Si(1.1 eV)や GaAs(1.4 eV)よりもバンドギャップが広い半導体を指す。代表的な材料には、SiC(3.3 eV)や GaN(3.4 eV)があり、一般に 3 eV 程度のバンドギャップを持つ。これらの材料は、高電圧・高周波・高効率求められる分野で不可欠である。

注 7) ウルトラワイドバンドギャップ半導体:

おおむね 4 eV 以上のバンドギャップを持つ材料。代表例としては、AlN(6.0 eV)、ダイヤモンド(5.5 eV)、Ga₂O₃(4.8 eV)などがある。原理的にはワイドバンドギャップ半導体よりも高電圧・高周波・高効率求められる分野で高い性能をもつことが期待できる。

注 8) 格子定数:

結晶の基本単位格子の辺の長さ。結晶構造を決定する重要なパラメータ。AlN と GaN の a 軸の格子定数はそれぞれ 3.11 Å、3.19 Å であり、格子不整合度は 2.4% である。このわずかな違いでも、AlN 上に GaN をコヒーレント成長させるのは難しいとされている。しかし当研究グループでは、独自技術によりこの課題を克服し、コヒーレント成長を実現した。一方で、Si、サファイヤ、SiC 基板と GaN との格子不整合度はそれぞれ 17%、16%、3.8% とさらに大きく、GaN を成長させると多くの欠陥が入ることが知られている。その結果、デバ

イス性能や信頼性が低下する原因になる。

注 9) IEDM(<https://www.ieee-iedm.org>):

米国電気学会(IEEE)が主催する半導体デバイス分野で世界最高峰の国際会議。集積回路、イメージセンサー、高周波デバイス、パワーデバイスなど、半導体デバイス技術の最先端を網羅されており、世界中の企業・大学・研究機関が注目している。毎年 12 月に米国サンフランシスコで開催され、半導体業界の未来を方向づける場として位置づけられている。

【論文情報】

雑誌名: 71st International Electron Device Meeting (IEDM) 2025

論文タイトル: Low-Resistance and Current-Collapse-Free MOVPE-Grown Pseudomorphic AlN/GaN/AlN HEMTs on AlN substrates

著 者 : TaeGi Lee^{1,2}, Akira Yoshikawa^{1,2}, Yoshihito Hagihara², Sho Sugiyama^{1,2}, Manabu Arai¹, Yuji Ando¹, Jun Suda¹, Hiroshi Amano¹

¹名古屋大学 未来材料・システム研究所(IMaSS)

²旭化成株式会社 研究・開発本部 先端技術研究所 次世代化合物半導体開発部

DOI: (Technical digest として IEEE digital library に掲載後付与予定)