

研究成果報告書

研 究 題 目	N 面 AlN ベース 高電子移動度 トランジスタの実用化		実 施 年 度
			2022 年度
代 表 研 究 者	所 属	山口大学創成科学研究科科学研究科	
	氏 名	岡田 成仁 印	

1. 研究の目的・背景

現在の AI の隆盛を支える技術である高速無線通信は半導体高周波デバイスが不可欠である。さらに、AI に必要な電力の大幅な増加が予測されている。この点に関して、本研究テーマである「**N 面 AlN 電界効果トランジスタ(HEMT)**」は 6G・7G に対応する超高周波デバイスの可能性を秘め、現行の AlGaN/GaN HEMT の電力変換効率を 20%改善できる。これまでの研究の推進により、N 面 AlN HEMT のデバイス動作の一手手前である。本研究課題では、N 面 AlN HEMT を作製し、動特性（周波数特性）がどこまで伸びるのか、さらに高出力化がどこまで可能であるか、性能評価を実施する。その結果をフィードバックし、デバイス性能を 6G・7G 対応へと躍進させる。申請者は貴財団に 2009 年度に GaN をベースにした研究テーマにて採択されているが、今回の研究は GaN よりもバンドギャップの大きな AlN に研究フェーズが移行したタイミングで申請させていただく。**前回研究では、様々な結晶面方位の GaN 成長を遂行し、特異な面方位の結晶成長技術を確立**してきた。その技術を用いて、今回の AlN では一般的な面方位である AI 面でない、N 面を用いた結晶成長とデバイス構造の提案となっている。前回研究で培った、結晶成長技術を生かし、**今後の日本・世界の AI・情報化社会に貢献する半導体デバイスを提供することが最終目標**である。

本研究の提案に、AlGaN系ヘテロ構造として最適な構造は何かをポアソン方程式・古典物理モデルをベースとした電磁界シミュレーションを用いて検討した。図1にN面GaN/AlNのバンド構造のシミュレーション結果を示す。**N面を用いた場合、一般的なAI面に対して極性反転構造となるため、上部の GaN中に二次元電子ガス（2DEG）が発生**することが理論的に明らかとなった。しかしながら、本提案の構造を実際に試作した場合に、ほとんど電流が流れない問題が生じた。本研究では、2DEGを発生させ、HEMTの動作特性を得ることを目標とし、最終的に次世代の高周波デバイスとして利用できるような性能向上を目指す。

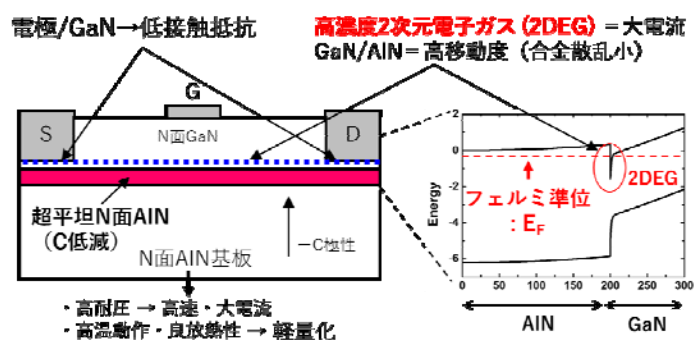


図1 N 面 AlN を用いた HEMT 構造とその利点
およびバンドシミュレーション結果

2. 研究成果及び考察（申請時の計画に対する達成度合を織込む）

本研究課題申請には、2DEGを妨げる要因として以下のような①～③の3つの課題があった。

① HVPE法によるN面AlN結晶成長

② CのN面AlN中の導入機構と2DEG発現の関係性

③ N面（Al）GaN/AlN HEMTデバイスの実証

まず①に関しては、N面AlN結晶の高品質化を課題に掲げた。その中で申請時とは少し異なる新たな手法の開発に成功し、N面AlNの高品質化を達成することに成功した。それは、高品質Al面AlN上極性反転による高品質N面AlNの結晶成長である。一般的にN面AlNはその結晶成長の難しさにより高品質化が困難であった。一方Al面AlNは高品質化が比較的容易な結晶面であることがわかっていて、申請者はこの点に着目し、Al面→N面へ結晶の極性を成長途中で変換することによって品質高いAl面AlN上に高い品質を保ったままN面AlNが成長できるのではないかと考えた。予想通りの結果を得ることができ、結晶成長条件によってN面AlNが安定に成長できる成長方法を開発し、結晶の欠陥密度を従来の1/10程度まで低減することに成功した。

続いて②に関してはN面AlNは基本的に炭素（C）などの不純物が成長条件・結晶成長面の特等として非常に多く取り込んでしまう問題があった。かかる問題に対し、申請者はAlNではなくGaを微小に含んだAlGaNバッファ層を導入することで不純物の混入が防げるのではないかと考えた。その結果AlGaNバッファ層はAlN層と比較し2～3桁ほど不純物濃度が小さいことが明らかとなった。例えば炭素濃度は 10^{20} cm^{-3} から 10^{17} cm^{-3} まで低減することに成功した。これによって、チャネル層となるGaN層内のCによる電子トラップ機構が抑制され2DEGの発現を確認することができた。

最後に③については、上記問題を解決し図2に示すようなN面GaN/AlGaN/AlN HEMT構造を有機金属気相成長（MOVPE）させ、ソース・ゲート・ドレイン電極を作製などのプロセス工程を経て、半導体パラメータアナライザによる $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性を評価した。その結果、実用化・量産に適したMOVPE成長によって作製されたデバイスの動作実証を確認した。

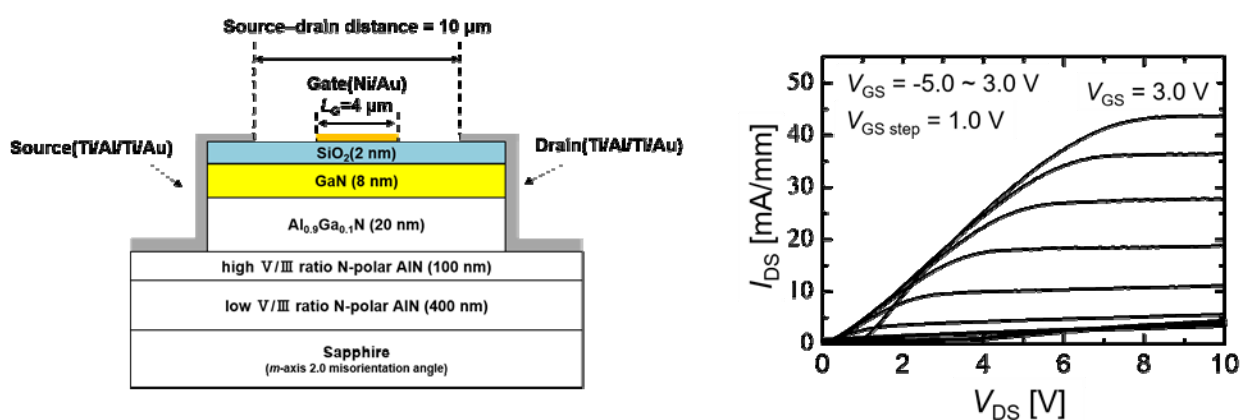


図2 N面Ga_N/AlGa_N/AlN HEMT構造と $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ 特性

3. 経費の使用状況（申請時の計画に対する実績を記述）

以下に申請時と実績の比較を示す。本研究に必要な経費の一部を支援いただく形を取っている。装置改造は先に述べた通り、別の手法において N 面 AlN の高品質化を達成したため、行わなかった。装置改造を使用しなかった分については消耗品などに使用したため申請時の金額よりも多く使用した。

申請時（千円）

品目		申請時	実績
設備備品費 (注) 4	装置改造	130	
消耗品費 (注) 4	・結晶成長原料（有機金属、水素ガス、窒素ガス、アンモニア）・結晶成長消耗品（ヒータ、フローチャネル、サセプタ等）	(140) 490	752
借料損料	名古屋大学共通機器使用料	(10) 20	203
旅費 (注) 5	共同研究者本田先生・名古屋大学への訪問、デバイスの性能評価（5 日間×年 4 回）	(30) 60	88
その他	機器メンテナンス費	(20) 70	659
合計		(200) 770	1,500

4. 将来展望（今後の発展性、実用化の見込み等について記述）

申請時に掲げた課題及びであった以下 3 点について取り組んできた。

- ① HVPE法によるN面AlN結晶成長
- ② CのN面AlN中の導入機構と2DEG発現の関係性
- ③ N面（Al）GaN/AlN HEMTデバイスの実証

その結果、いずれの課題についても解決することができ、6G・7Gに対応する超高周波デバイス「N面AlN電界効果トランジスタ（HEMT）」の基盤技術を確立することができた。今後はこのデバイスの性能をさらに高めることにより、実用化につなげることができる。具体的な課題として、高周波特性については、時祭の動作確認が行えていない状況であるに加えて、まだまだ電子移動度が $200 \text{ cm}^2 \text{ V}^{-1} \text{ s}^{-1}$ と小さい課題が残っている。また、デバイスの耐圧測定、高温動作の確認などが研究課題である。

一方で、本研究課題の最大の成果は、現在 GaN 系半導体デバイスで量産に使用されている MOVPE 装置を用いたデバイスによる動作実証を達成したことである。これは、実用化に向けた大きな成果である。市場要求に対する性能まで引き上げることができれば実用化の見込みは大きいと考えており、今後も継続的に研究に取り組んでいく予定である。

5. 成果の発表（学会での発表、学術誌への投稿等を記載。予定を含む）

国際会議

1. K. Hanasaku, W. Matsumura, T. Kowaki, S. Kurai, Y. Yao, Y. Ishikawa, N. Okada and Y. Yamada Impact of buffer layer on flatness and crystalline quality of N-polar AlN on sapphire substrate Berlin, Germany 22.10.09-14 AT035
2. D. Inahara, S. Matsuda, W. Matsumura, R. Okuno, K. Hanasaku, T. Kowaki, M. Miyamoto, S. Kurai, N. Okada, and Y. Yamada Investigation of electrical properties of N-Polar AlGa_N/AlN Heterostructure Field Effect Transistors Berlin, Germany 22.10.09-14 AT068
3. T. Kowaki, W. Matsumura, K. Hanasaku, R. Okuno, D. Inahara, S. Matsuda, S. Kurai, Y. Yao, Y. Ishikawa, N. Okada, and Y. Yamada Si doping effects in AlGa_N channel layer on performance of N-polar AlGa_N/AlN heterojunction FETs Berlin, Germany 22.10.09-14 AT190
4. R. Okuno, W. Matsumura, T. Kowaki, K. Hanasaku, M. Miyamoto, K. Fujii, S. Kurai, Y. Yao, Y. Ishikawa, N. Okada and Y. Yamada Improvement of crystallinity and flatness of N-polar AlN by polarity inversion from Al-polar AlN on vicinal sapphire substrate Berlin, Germany 22.10.09-14 PP359
5. N. Okada Light-Emitting Diodes and Electronic Devices using Nitride Semiconductors Yamaguchi Univ. Webex Online

国内会議

1. 岡田成仁 窒化アルミニウムの結晶成長とデバイス応用 CVD 反応分科会第 36 回シンポジウム Zoom オンライン
2. 松田駿佑, 稲原大輔, 松村航, 花咲光基, 金崎蓮, 齊藤俊介, 姚永昭, 石川由加里, 倉井聡, 岡田成仁, 山田陽一 N 極性面上 AlGa_N/AlN 電界効果トランジスタの試作と評価 2022 年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会 香川大学幸町キャンパス Ca-3
3. 宮本弥風, 松村航, 奥野棕, 花咲光基, 小脇岳土, 松田駿佑, 稲原大輔, 姚永昭, 石川由加里, 倉井聡, 岡田成仁, 山田陽一 N 面 AlN を用いたヘテロ接合型電界効果トランジスタの高性能化 2022 年度 応用物理・物理系学会 中国四国支部 合同学術講演会 香川大学幸町キャンパス Ca-4
4. 奥野棕, 松村航, 花咲光基, 小脇岳土, 宮本弥風, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 姚永昭, 石川由加里, 山田陽一 微傾斜サファイア基板・極性反転を用いた Al 面・N 面 AlN の結晶性と平坦性の改善 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 青山学院大学 相模原キャンパス/オンライン 20p-B201-14

5. 小脇岳土, 松村航, 奥野棕, 花咲光基, 宮本弥風, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 姚永昭, 石川由加里, 山田陽一 N 極性面 AlN 上 AlGa_N の極性反転と成長条件の関係性 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 青山学院大学 相模原キャンパス/オンライン 20p-B201-15
6. 花咲光基, 松村航, 小脇岳土, 奥野棕, 松田駿佑, 稲原大輔, 宮本弥風, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 姚永昭, 石川由加里, 山田陽一 N 極性 AlGa_N/AlN ヘテロ接合型 FET の性能に対する AlGa_N チャネル層中の Si ドーピング効果 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 青山学院大学 相模原キャンパス/オンライン 20p-B201-16
7. 稲原大輔, 松田駿佑, 松村航, 奥野棕, 花咲光基, 小脇岳土, 宮本弥風, 金崎蓮, 齊藤俊介, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 姚永昭, 石川由加里, 田中敦之, 新田州吾, 本田善央, 天野浩, 山田陽一 N 極性面 AlGa_N/AlN ヘテロ接合型 FET の性能改善 第 83 回応用物理学会秋季学術講演会 青山学院大学 相模原キャンパス/オンライン 23a-B204-6
8. 松村航, 花咲光基, 小脇岳土, 奥野棕, 松田駿佑, 稲原大輔, 宮本弥風, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 山田陽一 サファイア基板上 N 面 AlGa_N/AlN 構造の表面平坦性向上による電気特性の改善 第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会 宇部市文化会館 Th-P01
9. 奥野棕, 松村航, 花咲光基, 小脇岳土, 宮本弥風, 藤井開, 倉井聡, 岡田成仁, 山田陽一 Al→N 極性反転による N 面 AlN の結晶品質と表面平坦性の改善 第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会 宇部市文化会館 Th-P02
10. 谷川俊介, 迫山卓哉, 倉井聡, 岡田成仁, 中野貴之, 山田陽一 AlN の極性制御と両極性 AlN の結晶成長 第 14 回ナノ構造・エピタキシャル成長講演会 宇部市文化会館 Th-P03
11. 岡田成仁 窒素面 AlN の結晶成長とデバイス応用 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 Webex Online
12. 岡田成仁 N 極性 AlN の結晶成長と応用 日本学術振興会 第 R032 委員会 第 10 回研究会プログラム 三重大学, 三重県
13. 宮本 弥風, 松村 航, 奥野 棕, 松田 駿佑, 花咲 光基, 小脇 岳土, 稲原 大輔, 倉井 聡, 岡田 成仁, 山田 陽一 N 面 AlGa_N/AlGa_N/AlN 構造の中間層最適化による電気特性の改善 第 70 回応用物理学会春季学術講演会 上智大学四谷キャンパス、東京都 18p-B401-10

学術誌

1. Lu You, Wataru Matsumura, Kazuya Ataka, Shunsuke Matsuda, Daisuke Inahara, Koki Hanasaku, Ryo Okuno, Taketo Kowaki, Yongzhao Yao, Yukari Ishikawa, Satoshi Kurai, Narihito Okada, Kazuyuki Tadatomo, and Yoichi Yamada “Growth and characterization of nitrogen-polar AlGa_N/AlN and demonstration of field effect transistor” Japanese Journal of Applied Physics, 2023, 62 , SA1018
2. Shunsuke Tanigawa, Takuya Sakoyama, Satoshi Kurai, Narihito Okada, and Yoichi Yamada “Control of Polarity of AlN Grown on Sapphire Substrate and Growth with Both Al- and N-Polarities” Physica Status Solidi (b), 2023, 2200567
3. Daisuke Inahara, Shunsuke Matsuda, Wataru Matsumura, Ryo Okuno, Koki Hanasaku, Taketo Kowaki, Minagi Miyamoto, Yongzhao Yao, Yukari Ishikawa, Atsushi Tanaka, Yoshio Honda, Shugo Nitta, Hiroshi Amano, Satoshi Kurai, Narihito Okada, Yoichi Yamada “Investigation of Electrical Properties of N-Polar AlGa_N/AlN Heterostructure Field-Effect Transistors” Physica Status Solidi (a), 2023, 202200871