



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Interface control of Al ₂ O ₃ -based insulated-gate structures for high-frequency GaN HEMTs [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	尾崎, 史朗
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13513号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74171
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Shiro_Ozaki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士（工学） 氏名 尾崎 史郎

学 位 論 文 題 名

Interface control of Al_2O_3 -based insulated-gate structures for high-frequency GaN HEMTs
(Al_2O_3 絶縁ゲート構造の界面制御と高周波 GaN HEMT への応用)

現在、スマートフォンが世界的な規模で爆発的に普及しており、携帯電話の通信速度が、モバイルデータトラフィックの増加速度に追いつかない、といった問題が顕在化しつつある。また、様々な「モノ」がセンサを介して通信する Internet of Things(IoT) という概念が新たに生まれ、ウェアラブルデバイス、コネクテッドカー、自律ロボットなどが相互につながる Machine-to-Machine(M2M) 通信により、今後はさらに無線通信端末数が増加すると予想される。その際には、既存の無線周波数帯 (6 GHz 以下) のみでデータトラフィック量を収納するのは困難であるため、第 5 世代移动通信システム (5G) においては、ミリ波帯 (30-300 GHz) の利用が検討されている。ミリ波無線通信において、数 km 以上の遠距離伝送を実現するためには、送信用のアンテナにワット級の高出力のパワーアンプが必要であるが、従来のガリウムヒ素 (GaAs)、シリコン (Si) 系のデバイスでは、動作電圧に限界があり、0.1 W 程度までしか出力を高められない。

そこで、広いバンドギャップにより、高電圧・大電力動作が期待できる窒化ガリウム (GaN) 系の材料に注目が集まっている。例えば、1~2 GHz 帯の携帯電話や WiMAX の基地局用途では 100W クラスのデバイスが必要とされるが、従来の GaAs、Si 系デバイスでは、パワー性能が 1 チップあたり数十 W にとどまるため、100 W のパワー増幅には複数のチップを並列に構成する必要がある。それに対し、GaN 系材料を用いた高電子移動度トランジスタ (High-electron-mobility transistor, HEMT) では、1 チップで 100 W 以上を出力することができるため、並列分配・合成回路が不要となり、小型で高効率なパワーアンプを実現できる。さらに、5G をはじめとする次世代無線通信の基地局用途では、パワーアンプを高効率化するため、飽和出力領域を使用するニーズが高まっている。しかしながら、現在実用化されている GaN 系 HEMT はショットキーゲート構造が採用されており、入力振幅が順方向に及んだ場合、入力電力の増加とともにゲートリーク電流が急激に増加し、信頼性や増幅特性の劣化に繋がる。そこで、飽和領域での順方向ゲートリーク電流を抑制するため、絶縁ゲート構造を用いた GaN MOS-HEMT の開発が進められている。

しかしながら、実用化のためにはいくつかの課題が残されている。最も深刻な課題は、閾値電圧 (V_{th}) の不安定性である。ゲートに正バイアスを印加する条件では、 V_{th} が正バイアス方向にシフトすることに加え、時間経過や温度上昇などにより V_{th} が元の値に戻る現象が多数のグループから報告されている。二つ目の課題は、正バイアスを印加した際の電流線形性の劣化である。これは順方向ゲートリーク電流を抑制し、飽和出力領域を使用する MOS 構造の利点を損なう大きな問題である。さらに、MOS-HEMT を高電圧動作させた際にドレイン電流が減少する“電流コラプス”と呼ばれる現象が存在する。ゲートに負バイアスを印加すると、ゲート端からトンネル注入された電子がアクセス領域 (ドレイン-ゲート電極間) の表面準位に捕獲されることで、その領域のポテンシャルが引き上げられ、キャリア密度が減少することが原因と考えられている。

以上の観点から、本研究では、まず上述した課題のメカニズムを解明するため、絶縁膜

(Al₂O₃)/GaN 構造における電子準位の起源を明らかにするとともに、それらを抑制する Al₂O₃ 形成技術の詳細に検討し、AlGaIn/GaN MOS-HEMT にて効果を検証した。続いて、高い自発分極から高濃度の 2 次元電子ガス (2DEG) を誘起でき、高出力性と高周波特性の両立が期待される “InAlN” をバリア層に用いた InAlN/GaN MOS-HEMT を試作し、MOS 構造形成後のアニール (post-metallization annealing, PMA) を適用することで、Al₂O₃、および Al₂O₃/InAlN 界面における電子準位が低減し、V_{th} シフト、電流コラプスの抑制に加え、電流線形性が格段に向上することを明らかにした。

本論文は 7 章から構成されている。以下にそれぞれの要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景を述べ、研究目的とその重要性を記している。

第 2 章では、GaN 系半導体の基礎物性、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の特徴について述べた。

第 3 章では、半導体表面および界面に形成される電子準位の起源、影響について概説した。その後、GaN 系半導体のバンドギャップ内全域にわたる電子準位を評価するためには、光照射下での容量-電圧 (C-V) 測定を系統的に行い、検出可能なエネルギー範囲を良く検討することが必要であることを述べた。

第 4 章では、原子層堆積 (Atomic Layer Deposition, ALD) 法にて成膜した Al₂O₃ 中の電子準位として、酸素原料に起因した残留不純物 [Al(OH)_x] を X 線光電子分光 (X-ray Photoelectron Spectroscopy, XPS) 法にて同定し、それらを低減するためのアニール技術を検討した。さらに、Al₂O₃/GaN 界面における GaN 酸化への酸素原料の影響を解明し、O₂ ラジカル等の活性酸素を含まない H₂O 蒸気の採用により、界面の酸化層に起因した電子準位を低減でき、AlGaIn/GaN MOS-HEMT の V_{th} シフトが低減することを明らかにした。

第 5 章では、InAlN/GaN MOS-HEMT のバリア層の酸化手法に着目し、酸素原料が InAlN/GaN MOS-HEMT の電気特性に与える影響を調査するとともに、表面酸化制御によるゲートリーク電流、および電流コラプスの低減を試みた。その結果、従来の O₂ プラズマ酸化では、Al₂O₃ に加えてバンドギャップの小さい In₂O₃ が InAlN 表面に形成されるため、ゲートリーク電流を十分に低減できないことを見出した。また、In₂O₃ は化学的に不安定であるため酸素欠損が生成しやすく、O₂ プラズマを用いた InAlN/GaN MOS-HEMT では電子トラップに起因した電流コラプスが大きい。一方、今回新たに検討した H₂O 蒸気を用いた表面酸化制御では、水酸化物を経由して酸化膜を形成するため、不安定な水酸化インジウム [In(OH)_x] を選択的に分解除去でき、酸化膜の Al₂O₃/In₂O₃ 比を向上することができた。その結果、InAlN/GaN MOS-HEMT のゲートリーク電流、及び電流コラプスを低減することに成功した。

第 6 章では、ALD-Al₂O₃ を用いた InAlN/GaN MOS-HEMT に対する PMA の効果を詳細に検証し、Al₂O₃ 中の酸素空孔や Al₂O₃/InAlN 界面におけるボンド乱れが V_{th} シフトや電流コラプス、電流線形性の劣化に影響することを明らかにするとともに、大気中での PMA が欠陥低減に有効であることを見出した。これにより、Al₂O₃ 絶縁ゲート構造の界面制御に関して新しい指針を示すとともに、それらを高周波 GaN HEMT に応用することで、性能向上を実現することができた。

第 7 章では、本論文の結論を述べている。