HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Interface control of Al2O3-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
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第13513号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/74171
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	theses (doctoral - abstract and summary of review)
Additional Information	There are other files related to this item in HUSCAP. Check the above URL.
File Information	Shiro_Ozaki_review.pdf (審査の要旨)

Instructions for use

Hokkaido University Collection of Scholarly and Academic Papers : HUSCAP

学位論文審査の要旨

博士の専攻分野の名称　　博士 (工学)　　氏名　　尾崎　史郎

審査担当者　主　査　教　授　本久　順一
　　副　査　教　授　葛西 誠也
　　副　査　准教授　佐藤 威友

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）

第 5 世代移動通信システム (5G) においては、数 km 以上の基地局間の無線伝送、災害時に損傷した光通信網を補填する無線伝送、Internet of Things(IoT) や Machine-to-Machine(M2M) などが要請する無線通信の高機能化等により、データトラフィック量の爆発的増大が予測されている。これに対応するため高周波化による帯域幅の増加と高出力化による長距離無線伝送システムが必須であり、ミリ波帯 (30-300 GHz) で数 W 出力のトランジスタが要求される。しかし、従来のガリウムヒ素 (GaAs) やシリコン (Si) デバイスでは動作電圧に限界があり、出力電力は 0.1 W 程度が限界である。これに対して、高電圧動作可能な窒化ガリウム (GaN) 系材料を利用するトランジスタが注目されており、すでに 1～2 GHz 帯の基地局用途で、数 100W クラスの GaN 高電子移動度トランジスタ (High-electron-mobility transistor, HEMT) が使用されている。

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高入力信号・飽和出力領域を使用するニーズが高まっている。現在実用化されている GaN 系 HEMT はショットキー (金属) ゲート構造を利用しており、高入力信号領域で入力振幅が順方向に及んだ場合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、絶縁ゲート構造を用いた GaN HEMT の開発が強く求められている。しかしながら、絶縁体と GaN 系材料の界面特性に不明な点が多く、界面制御が実現されていないため、閾値電圧 (Vth) の変動、動作電流変動、順バイアスでの電流線形性の劣化などの深刻な課題が残されている。

以上を踏まえ、本研究では、絶縁膜 (Al2O3)/GaN 構造における電子準位特性を明らかにするとともに、それらを抑制する Al2O3 形成技術・界面制御技術を検討し、AlGaN/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、ゲート構造形成後のアニール (post-metallization annealing:PMA) を適用することで、Al2O3 膜中および Al2O3/InAlN 界面における電子準位が低減し、Vth シフトや電流コラプスを抑制するとともに、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。

第 1 章は序論であり、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と AlGaN/GaN ヘテロ構造の特徴について述べている。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とデバイス特性に及ぼす影響について概説している。さらに、バンドギャップ内全域にわたる電子準位を評価する手法として、光照射下で行う容

量-電圧 (C-V) 測定の原理と効果を述べている。

第 4 章では、原子層堆積 (Atomic Layer Deposition:ALD) 法にて成膜した Al2O3 膜を評価し、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、GaN 表面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、AlGaN/GaN MOS-HEMT の Vth 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 において、酸素原料が InAlN/GaN MOS-HEMT の電気特性に与える影響を評価するとともに、InAlN 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。H2O 蒸気を用いた ALD 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、界面の In2O3 形成を抑制することができた。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(post-metallization annealing) 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 Vth 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 Al2O3 中の欠陥と界面準位の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。

これを要するに、本論文は、原子層堆積法で形成した Al2O3 膜および Al2O3/AlGaN (InAlN) 界面の特性を詳細に評価し、電子準位特性の評価結果を基盤とする界面制御プロセスを開発した。さらに、この界面制御法を AlGaN/GaN および InAlN/GaN 構造に適用し、高周波トランジスタの動作安定性および電流線形性の向上を実現した。ここで得られた知見は、絶縁ゲート型 GaN HEMT のゲート制御・安定動作を大きく向上させ、さらに次世代の窒化物半導体デバイス研究に展開できるものである。

よって著者は、北海道大学博士 (工学) の学位を授与される資格ある者と認める。