HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Surface-related operation instabilities of GaN HEMTs and their control using Al2O3-based MOS structures [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	西口, 賢弥
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(工学)
Dissertation Number	甲第13083号
Issue Date	2018-03-22
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/70526
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Kenya_Nishiguchi_review.pdf, 審査の要旨

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　西口　賢弥

審査担当者　主　査　教　授　本久　順一
副　査　教　授　葛西 誠也
副　査　特任教授　佐野 栄一
副　査　教　授　橋詰 保

学位論文題名

Surface-related operation instabilities of GaN HEMTs and their control using Al2O3-based MOS structures
（GaN HEMT における表面起因の動作不安定性と Al2O3 MOS 構造による制御）

第 5 世代無線通信システムでは、利用周波数帯の拡大とより高周波帯の利用が必須となり、さらに、基地局間通信に E 帯 (60-90 GHz) や W 帯 (75-110 GHz) の無線通信を利用する構想がある。現状のミリ波帯通信には真空管増幅素子が用いられているが、次世代通信システムでは、増幅器の小型化や消費電力の大幅な削減が必須であり、ミリ波帯での半導体増幅デバイスの実現が強く要請されている。

窒化ガリウム (GaN) は 3.4 eV の禁制帯幅を有し、これに起因する絶縁破壊電界強度は Si の 10 倍以上の値となるため、高電圧・大電力動作が可能である。また、GaN は AlGaN および InAlN 混晶とヘテロ接合を形成することにより、分極効果によって高密度の 2 次元電子ガス (2DEG) 層が形成できる。そのキャリア密度は Si MOSFET よりも一桁程度大きく、移動度も 2000 cm2/Vs 程度と高い。これらの特性を利用した AlGaN/GaN 高電子移動度トランジスタ (High-electron-mobility transistor: HEMT) は、高効率の高周波電力増幅素子として研究開発が進んでおり、454 GHz の遮断周波数が報告され、96GHz での出力電力が 3W/mm に達する GaN 系 HEMT が実現されている。しかし、現状の GaN HEMT にはショットキーゲート構造が利用されており、ゲートに正バイアスを印加した場合にゲートリーク電流が劇的に増加するため、大振幅動作による高出力化ならびに利得・効率の向上が難しい状況である。

この問題を解決するため、MIS(Metal-Insulator-Semiconductor) ゲート構造の適用が有望であるが、いくつかの課題が残されている。最も深刻な問題はしきい値電圧 Vth の変動であり、実用化の鍵となる動作安定性を妨げている。また、電流線形性にも課題が見られる。正バイアスを印加するにつれて電流線形性が悪化することが報告されており、正バイアス領域でもリーク電流を抑制して動作するという MIS 構造の利点を損なう大きな問題となっている。さらに、スイッチングを繰り返すことで、オン抵抗が増加する、いわゆる「電流コラプス」と呼ばれる現象が存在する。

以上を背景として、本研究では、まず電流コラプスのメカニズム解明を目的として、dual-gate 構造を有する HEMT を作製して、表面帯電と動作特性との相関を評価している。続いて、Al2O3/GaN を用いた絶縁ゲート界面の評価を行い、独自に開発したアニール法が界面準位低減や動作安定性の向上に効果的であることを見いだした。さらに、Al2O3 ゲート AlGaN/GaN HEMT にこのアニール法を適用し、MOS 界面の電子準位制御により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 6 章から構成されている。第 1 章は序論である。第 2 章では GaN 系半導体の基礎物性や AlGaN/GaN ヘテロ構造の特徴について記述されている。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モデル化と、界面準位を考慮したシミュレーション技法の開発について述べられている。

第 4 章では、dual-gate 構造を持つ AlGaN/GaN HEMT を作製して、電流コラプスの評価を行った結果が記されている。ゲートに負バイアスを印加すると、ゲートからの電子注入によりゲート端近傍に表面帯電領域が形成される。dual-gate 構造を利用することで表面帯電が生じる領域を限定でき、表面帯電領域がゲート端のドレイン側だけではなく、ソース側でも形成されることを明らかにした。加えて、表面帯電の電荷量が極めて大きい場合、ゲート直下のポテンシャルに影響を与え、Vth が正方向にシフトする現象を見いだした。

第 5 章では、原子層堆積法により Al2O3/n-GaN 構造を作製し、ゲート電極形成後のアニールが界面準位制御に非常に有効であることを見いだした。このプロセスにより Al2O3/n-GaN 界面準位が劇的に低減され、フラットバンド電圧の安定化と高温での動作安定性に寄与していることが明らかになった。さらに、このアニール処理を Al2O3/AlGaN/GaN HEMT に適用し、電流線形性の向上、Vth 変動の抑制、高温安定性を観測した。独自に開発したシミュレーションと実験結果との比較より、Al2O3/AlGaN 界面の電子準位の低減を確認し、HEMT の線形性・安定性向上の主要因であることを明らかにした。

第 6 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、AlGaN/GaN HEMT における表面起因電流変動 (電流コラプス) の要因を明らかにし、また、縁膜膜/GaN および絶縁膜/AlGaN/GaN 構造における電子準位特性の詳細評価を基盤とする界面制御プロセスを開発した。ここで得られた知見は、絶縁ゲート型 GaN HEMT の動作安定性・電流線形性を大きく向上させ、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。