



Title	Surface-related operation instabilities of GaN HEMTs and their control using Al ₂ O ₃ -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_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 西口 賢弥

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）

携帯電話、LAN 利用による既存周波数帯の利用率が急増しており、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つつある。また、ミリ波帯 (30–300 GHz) は大容量通信や高速通信が可能であり、第 5 世代通信システムでは、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。しかしながら、長距離無線通信における伝送距離と広域周波数帯域通信での通信容量の点から、ミリ波帯には真空管素子が用いられているのが現状である。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デバイスの実現が強く要請されている。

そこで現在、窒化ガリウム (GaN) に注目が集まっている。GaN のバンドギャップは 3.4 eV であり、Si の約 3 倍の値を有している。広いバンドギャップに起因した絶縁破壊電界強度は Si の 10 倍以上の値であり、高電圧・大電力動作が期待できる。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 $1\text{--}2 \times 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ と Si MOSFET よりも一桁程度大きく、移動度も $2000 \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 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、高周波電力増幅素子として研究開発が進んでおり、一部実用化に至っている。現在では、600 V 以上の耐圧を持つ AlGaN/GaN HEMT や、遮断周波数 f_T が 454 GHz にも達する GaN 系 HEMT も報告されており、より一層の性能向上が期待される。現在実用化されている GaN HEMT にはショットキーゲート構造が利用されているが、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や効率の向上が極めて難しい。特に、InAlN/GaN 構造では大きな分極電荷により InAlN の内部電界が非常に大きくなり、ポテンシャル薄層化によるトンネルリーク電流が顕著となり、ショットキーゲート型 HEMT の実用化が危ぶまれている。

これらの問題を解決するため、MIS(Metal-Insulator-Semiconductor) ゲート構造の採用が有望であるが、MIS 型 GaN 系 HEMT 実用化のためには、いくつかの課題が残されている。最も深刻な問題は、しきい値電圧 V_{th} の変動である。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し、さらに時間経過、温度上昇などにより V_{th} が元に戻ろうとする。すなわち、スイッチングを繰り返すことで、 V_{th} が変動してしまうのである。もう一つの問題は、電流線形性の障害である。正バイアスを印加するにつれて電流線形性が妨げられることが複数のグループから報告されており、これは、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、オン抵抗の増加が引き起こされる「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ドレイン-ゲート電極間 (アクセス領域) 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、2DEG 密度が減少することが原因とされている。

以上の観点から、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 を有する HEMT を作製して、表面帯電と特性変化との相関を評価した。続いて、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ を用いた絶縁ゲート界面の評価を行い、独自に開発した逆バイアスアニール法が界面準位低減に与える効果を詳細に検討した。さらに、逆バイアスアニール法を絶縁ゲート AlGaIn/GaN HEMT に適用し、ヘテロ構造上の Al_2O_3 ゲート界面準位が HEMT の電気特性に与える影響を検討し、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。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、GaIn 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、MIS 構造に形成される界面準位の基礎理論に加え、シミュレーションを用いて、その影響について考察した。

第 4 章では、dual-gate 構造を持つ AlGaIn/GaN HEMT を作製し、電流コラプスについて評価を行った。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ドレイン側あるいはソース側に限定できる。その結果、表面帯電領域がゲート端のドレイン側だけでなく、ソース側でも形成されることが明らかになった。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、 V_{th} が正方向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 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ 構造を作製し、その詳細な評価から逆バイアスアニールが界面準位制御に有効であることを見いだした。逆バイアスアニール法により $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{n-GaN}$ 界面準位が劇的に低減し、フラットバンド変動の抑制と高温での動作安定性に寄与していることを明らかにした。続いて、逆バイアスアニールを $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}/\text{GaN}$ HEMT に適用し、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、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{AlGaIn}$ 界面の電子準位の低減を確認した。さらに、それに起因する電流線形性の向上、 V_{th} 変動の抑制、高温安定性を観測し、絶縁ゲート型 GaIn HEMT における界面電子準位の評価・制御に関して新しい指針を示すことができた。

第 6 章では、本論文の結論を述べている。