



Title	Al ₂ O ₃ /Ga _N 界面の制御とMOSゲート高電子移動度トランジスタへの応用 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	金木, 奨太
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第14586号
Issue Date	2021-03-25
Doc URL	http://hdl.handle.net/2115/81267
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/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	Shota_Kaneki_review.pdf (審査の要旨)



[Instructions for use](#)

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 金木 奨太

審査担当者 主 査 教 授 葛西 誠也

副 査 教 授 本久 順一

副 査 准教授 佐藤 威友

学位論文題名

Al₂O₃/GaN 界面の制御と MOS ゲート高電子移動度トランジスタへの応用

(Interface control of Al₂O₃/GaN structures for MOS-gate high electron mobility transistors)

省エネルギーの核となるパワーエレクトロニクス分野では、電力変換素子であるインバータの高効率化(低損失化)が極めて重要であり、半導体材料の選択を含めたパワートランジスタの革新が要請されている。また、2020年より一部の実用化が始まった第5世代無線通信技術(5G)では、基盤技術の中核としてミリ波帯(30-300 GHz)の基地局間通信が挙げられる。ミリ波は大気中での伝搬損失が大きく、基地局間の無線伝送を果たすには増幅用トランジスタに高出力動作と高周波動作が同時に求められるため、Siおよび従来の化合物半導体を用いた素子では実現が難しい。

窒化ガリウム(GaN)はSiの約3倍におよぶ3.4 eVの禁制帯幅を有し、さらに絶縁破壊電界はSiの10倍以上の値を持つため、高効率・高出力の電力変換用スイッチングトランジスタの研究開発が活発に展開されている。また、GaNの飽和電子速度はSiの2倍で、かつ、AlGaInやInAlNなどの混晶とヘテロ接合を形成することで、高密度2次元電子ガス(2DEG)層を形成することが知られている。このため、2DEGを利用した高電子移動度トランジスタ(HEMT)は高出力・高周波動作が実現できることから、ミリ波帯無線通信用の高出力増幅トランジスタとして大きな期待が寄せられている。

GaNを利用した電力変換素子や高周波増幅素子の実現には、金属-絶縁膜(酸化物)-半導体(MIS or MOS)ゲート構造の制御が重要な役割を果たす。しかし、窒化物半導体のMIS界面の特性には不明な点が多く、その制御を実現した例は無い。以上を踏まえて、本研究では、まずPost-metallization-annealing(PMA)によるAl₂O₃/GaN構造の界面制御を試み、界面特性を評価した。続いて、無極性面であるm面GaNに形成したAl₂O₃/GaN構造の界面特性と温度特性を詳細に評価した。さらに、絶縁ゲート型AlGaIn/GaN HEMTを作製し、Al₂O₃/AlGaIn界面の電子準位がHEMTの電気的特性へ与える影響について考察した。

本論文は7章から構成されている。第1章は序論である。第2章には窒化物半導体の基礎物性およびAlGaIn/GaNヘテロ構造の特徴が記述されている。第3章では、絶縁膜-半導体界面に形成される電子捕獲準位のモデルを概説し、MOS構造の基礎理論と電子準位がMOS構造の容量-電圧(C-V)特性へ与える影響とその評価法をまとめている。

第4章では、c面GaN上にAl₂O₃/GaN構造を作製し、C-V特性およびコンダクタンス-周波数特性の詳細解析の結果が示されている。MOSダイオード形成後に窒素雰囲気中で300℃前後の熱処理(Post-metallization-annealing: PMA)を行うことにより、Al₂O₃/GaN界面の電子捕獲準位が劇的に低減することを明らかにした。さらに、Al₂O₃/GaN界面の透過電子顕微鏡像に幾何学的位

相解析法を適用して界面近傍の応力分布を評価し、PMA 処理が GaN 表面近傍の格子ひずみを緩和させ、ボンド乱れに起因する界面電子準位を抑制する可能性を指摘している。

第 5 章では、無極性面である m 面 GaN 上に Al₂O₃/GaN 構造を作製し、界面準位密度が c 面 GaN に形成した MOS 構造よりはるかに低いことを明らかにした。m 面 GaN 表面では、第一原理計算と表面分析実験により Ga-N ダイマーの形成が示唆されており、Ga-N ダイマー安定化表面に基づく界面電子準位の低減機構を議論している。さらに、c 面 GaN MOS 構造ではフラットバンド電圧 (V_{fb}) が正の温度依存性を有するが、m 面 GaN MOS 構造は V_{fb} の温度依存性を示さず、分極効果の発生しない無極性を反映する結果が得られ、温度安定性に優れた MOS トランジスタ実現の可能性が示された。

第 6 章では、GaN 基板上に成長した AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用いて作製した Al₂O₃/AlGaIn/GaN HEMT の電气的評価を記述している。ダイオード構造の C-V 実験結果と詳細数値計算の比較より、PMA によって Al₂O₃/AlGaIn 界面の電子準位密度が低減することを明らかにした。さらに、MOS-HEMT の電流線形性、しきい値電圧安定性、および高温における動作安定性の向上に PMA 処理が有効であることを示している。また、極めて低いドレインリーク電流が観測され、ホモエピタキシャル成長による欠陥抑制と漏れ電流の相関が議論されている。

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、Al₂O₃/GaN 構造の詳細な界面特性評価に基づいて制御プロセスを提案し、GaN 表面の面方位と MOS 界面特性の相関を明らかにした。また、Al₂O₃ ゲート AlGaIn/GaN HEMT の電气的評価より、MOS-HEMT の電流線形性、しきい値電圧安定性、および高温における動作安定性の向上に PMA 処理が非常に有効であることを示した。ここで得られた知見は、絶縁ゲート型 GaN トランジスタの動作安定性・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。