



Title	AlGaIn/GaNヘテロ構造における表面・界面の評価および制御とトランジスタ応用 [論文内容及び審査の要旨]
Author(s)	越智, 亮太
Citation	北海道大学. 博士(工学) 甲第16003号
Issue Date	2024-03-25
Doc URL	<a href="http://hdl.handle.net/2115/91938">http://hdl.handle.net/2115/91938</a>
Rights(URL)	<a href="https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/">https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/</a>
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	Ryota_Ochi_abstract.pdf (論文内容の要旨)



[Instructions for use](#)

## 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 越智 亮太

### 学位論文題名

AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> ヘテロ構造における表面・界面の評価および制御とトランジスタ応用  
(Characterization and control of surface and interface on AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> heterostructures for transistor applications)

現在、スマートフォン等のモバイル端末の普及拡大により、モバイルデータトラフィックが急激に増大している。加えて、「Society 5.0」に代表されるように、世界中でデジタルトランスフォーメーション (DX) が進められており、IoT や AI の利用拡大に伴い、無線通信端末数の増加が予想される。今後のトラフィック増加に対応するため、30~100GHz のミリ波帯と呼ばれる高周波帯の活用が期待されている。特に、バックホールと呼ばれる基地局とコアネットワーク間通信においては、トラフィックの増大に対応する為に、より大容量・広帯域化が可能な E バンド (70~80GHz) 帯の活用が期待されている。また、将来の無線通信システムでは、地上だけではなく、ドローンや人工衛星を活用し、海上や空を含む地球全体をカバーすることが想定されている。そのため、高周波・高出力の電力増幅器への要求が高まっている。

このような要求を満たす高周波増幅用トランジスタ材料として、窒化ガリウム (Ga<sub>N</sub>) を初めとした「窒化物半導体」に高い注目が集まっている。Ga<sub>N</sub> は Si と比較すると、約 3 倍の飽和電子速度と約 10 倍の絶縁破壊電界を有し、AlGa<sub>N</sub> や InAl<sub>N</sub> 等の混晶半導体とヘテロ接合を形成することで、分極効果により、高密度な二次元電子ガス (2DEG) が接合界面に形成される。2DEG の電子密度は Si MOSFET の 10 倍にもおよび、約 2000cm<sup>2</sup>/Vs の高電子移動度を有するため、これを活用した Ga<sub>N</sub> 系高電子移動度トランジスタ (HEMTs) は、高周波において高電圧・高電力動作が可能である。近年では、2-10GHz 帯の無線通信や気象レーダー分野で、ショットキーゲート (SG) 構造の AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMT が実用化されるに至っており、ミリ波帯への応用に大きな期待が寄せられている。しかし、SG 構造では、高出力化に伴う大振幅動作時に、その入力振幅が順バイアス領域にまでおよび、ゲートリーク電流が増加し、効率の低下や動作不安定性が生じる。更に、順バイアスストレス印加により、金属/半導体界面の化学的な劣化により、リーク電流が増大することも報告されている。

これらの問題を解決するために、金属電極-半導体間に絶縁膜を挿入した MIS (Metal-Insulator-Semiconductor) ゲート構造の実用化が望まれている。MIS ゲート構造の絶縁膜には、リーク電流を抑制する点から広い禁制帯幅と、高周波性能を低下させないために高い誘電率が求められる。この様な点から、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜が広く研究に用いられているが、熱的安定性に課題がある。また、MIS ゲート構造の実用化には、表面や界面に起因する課題が多く残されている。半導体表面や半導体/絶縁膜界面に存在する、表面準位や界面準位ではデバイス特性に大きな影響を及ぼすため、その評価と制御が非常に重要である。また、Ga<sub>N</sub> MIS-HEMTs では、界面が 2 つ (AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> と絶縁膜/AlGa<sub>N</sub>) が存在し、バイアス条件によっては、それぞれの界面での並列電子輸送 (パラレル伝導) が生じる可能性があるが、絶縁膜/AlGa<sub>N</sub> 界面での電子伝導について評価された例はない。

以上の観点から、本研究では、はじめに、AlGa<sub>N</sub> 表面近傍領域が電気的特性に与える影響を調

査することを目的とし、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の電気的特性と XPS による表面分析との相関を評価した。続いて、GaN 系 HEMTs に対して広い禁制帯幅と高い誘電率を有するアモルファスの HfSiO<sub>x</sub> 膜を初めてゲート絶縁膜として適用し、MIS-HEMTs を作製し、その電気的特性評価と界面制御を実施した。さらに、実験と理論計算の両面から絶縁膜/AlGaIn 界面での電子蓄積 (チャネル形成) が発生する条件を示し、これが GaN MIS-HEMTs の電流線形性に大きな影響を与えることを明らかにした。

本論文は、7 章から形成されている。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た。

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

第 3 章では、この論文を理解する上で重要となる、半導体表面および界面に形成される電子捕獲準位の起源について論じた。また、金属/半導体表面の物理について触れ、その後、AlGaIn/GaN MIS-HEMTs 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容量-電圧 (C-V) 特性に与える影響と界面準位密度の評価手法についてまとめた。

第 4 章では、異なる 3 種類の AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用い、伝送線路モデル (TLM) 法を用いた電気的特性評価と X 線電子分光法 (XPS) を用いた表面分析を行い、その相関を調査した。また、表面フェルミレベル ( $E_{FS}$ ) ピンニング位置が深い試料に対して、低損傷 PEC エッチングにより表面層除去を行い、その影響評価を行った。その結果、AlGaIn 表面状態の違いが、 $E_{FS}$  の位置を変化させ、電気的特性に大きな影響を与える支配的要因となり得ることを明らかにした。

第 5 章では、GaN 基板上に成長した AlGaIn/GaN ヘテロ構造を用いて、Hf<sub>0.57</sub>Si<sub>0.43</sub>O<sub>x</sub>/AlGaIn/GaN MOS-HEMTs を作製し電気的特性評価を行った。その高い誘電率から予測される高い相互コンダクタンスと、良好なゲート制御性が得られた。また、界面制御を行ったダイオード構造の C-V 特性と詳細な C-V 特性解析から、HfSiO<sub>x</sub>/AlGaIn 界面での準位密度は、GaN HEMTs における報告で最小の値を得た。更に、高温下でも、非常に高い動作安定性を示し、HfSiO<sub>x</sub> 膜が高周波 GaN HEMTs において有望であることを明らかにした。

第 6 章では、電気的特性と数値計算を用い、絶縁膜/AlGaIn 界面での電子準位と電子蓄積が電気的特性に与える影響を詳細に検証し、絶縁膜/AlGaIn 界面と AlGaIn/GaN 界面での平行伝導により、電流線形性が劣化することを明らかにした。絶縁ゲート HEMTs における、平行伝導と電気的特性の関係を示した初めての報告である。

第 7 章では、本論文の結論を述べた。