

博士(工学) 水江千帆子

学位論文題名

Characterization and control of GaN-based  
heterostructure interfaces for MOS device applications

(MOS型デバイス応用のための  
窒化ガリウム系ヘテロ構造界面の評価と制御)

学位論文内容の要旨

近年、地球温暖化対策としてグリーンエレクトロニクスの基盤研究が盛んであり、国家プロジェクトとして太陽電池、代替エネルギー、パワーエレクトロニクス関連の研究が推進されている。パワーエレクトロニクス分野においては、電力変換素子であるインバータの高効率化がキーテクノロジーになっている。現在の電力変換素子には、シリコン(Si)トランジスタが利用されているが、それは、超高純度な結晶が容易に得られ、プロセス・回路設計技術も成熟しているためである。しかし、インバータ電力損失の最大要因となるトランジスタのオン抵抗は、Siの物性限界より予想される値に近付いており、インバータ変換効率の更なる向上は望めない。本研究で用いた窒化ガリウム(GaN)材料はIII-V族ワイドギャップ半導体として知られており、Siと比較して3倍のバンドギャップ、10倍の絶縁破壊電界、2倍の飽和電子速度を有している。また、AlGaN/GaNヘテロ界面で得られる2次元電子ガス(2DEG)の移動度は、 $1200\sim1500\text{cm}^2/\text{Vs}$ にまで達し、Si-MOS(metal-oxide-semiconductor)構造のチャネル移動度を上回る。これらの物性値により、GaN系トランジスタを用いたインバータは、従来のSiインバータと比較して、その損失を1/3以上低減できるポテンシャルを持っている。

GaNインバータの実現に向けて、MOSゲート構造がデバイスの安定動作や高機能化に必要不可欠である。しかしながら、絶縁膜/窒化物半導体界面の特性には明らかにされていない点が多く、その制御は達成されていない。たとえば、熱酸化膜を利用したSi-MOS界面においては、そのOS界面準位密度は $10^9\sim10^{10}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 台という値が得られている。これは、チャネルキャリア密度に対して2~3ケタほど低い値であり、界面準位がMOSゲート制御に与える影響は無視できる。これに対し、絶縁膜/GaN構造の界面準位密度は $5\times10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 程度であり、安定なデバイス動作のために準位密度の低減が必須である。また、高性能デバイス応用への期待が高いAlGaN/GaN構造では、絶縁膜/AlGaNの界面準位評価に関する定量的評価は行われていない。

これらの課題に対し本研究では、n-GaNに対していくつかの絶縁膜を堆積し界面準位評価を行った。主な評価法は、容量-電圧(C-V)および容量-時間(C-t)測定である。また、AlGaN/GaNへ

テロ構造上に絶縁膜を堆積し、C-V 法を用いて界面準位分布を評価した。この際、GaN 材料はワイドギャップであるため、測定温度を変化させること、または、光照射を併用することで、広いエネルギー領域からの界面準位応答を測定し、絶縁膜/AlGaN 界面のミッドギャップエネルギー領域における界面準位密度を評価することに初めて成功した。同時に数値計算を行い、絶縁膜/AlGaN/GaN ヘテロ構造のポテンシャル制御に関して、いくつかの有益な知見を得ることができた。

本論文は第 1~6 章で構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章は序論であり、主として Si と比較することにより窒化物半導体の物性的特徴とデバイス応用の可能性について述べ、本研究の背景と目的を記述した。

第 2 章では、金属/半導体および絶縁膜/半導体界面物理に対するフェルミ準位ピンニングおよびバンドラインナップ形成に関する代表的なモデルを概説した。また、金属の仕事関数に対するショットキーバリア高さの変化量を示す S パラメータについて記述した。

第 3 章では C-V 測定法の基礎を記述しており、n-GaN MOS 構造を基本として、モデル方程式の導出から絶縁膜/半導体構造における C-V 曲線を算出している。また、界面準位を取り入れた C-V 曲線の計算を示し、界面準位が素子のポテンシャル変調に与える影響について議論している。後半では、代表的な界面準位の評価方法である Terman 法の原理を示した。加えて、界面準位からの電子放出に関連する Shockley-Read-Hall 統計を考慮することにより、界面準位応答と時間、温度の関係を議論している。最後に、GaN および AlGaN/GaN MOS 構造の自己無撞着計算モデルを説明し、計算より得られたバンド構造および C-V 特性の例を示した。

第 4 章では、絶縁膜/GaN 構造および絶縁膜/AlGaN/GaN 構造の詳細な評価を行った。まず、各絶縁膜の堆積方法と試料構造および作成手順を示し、各サンプルに対して界面準位評価を行った結果について示した。絶縁膜として SiO<sub>2</sub> および Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 膜を用いた。C-V 特性の温度依存性を測定し、数値計算との比較により界面準位評価を行った。その結果、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaN 界面において～ $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  という値が得られた。また、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/AlGaN/GaN 構造に対し、バンドギャップ以下のエネルギーを持つ単色光照射を併用した光支援 C-V 測定を行った。その結果、ミッドギャップエネルギー付近に  $10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$  台の比較的高密度な界面準位が分布していることを初めて明らかにし、ワイドギャップ半導体に対する界面評価法として、光支援 C-V 法の有用性を示した。

第 5 章では、絶縁膜/GaN 構造を利用した紫外光・火炎センサの可能性を記述した。この構造において、紫外光のエネルギーを受けてバンド間キャリア励起が発生することにより半導体中のポテンシャルが変調され、それを容量変化として検出できることを示した。さらに、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/n-GaN 構造の紫外光照射特性を評価し、温度依存性が非常に低いという特長を得ることができた。これは、本質的に強い温度依存性を持つショットキー構造や pn 接合構造と比較して、絶縁膜/半導体構造を利用するセンサ構造の優位点であることを示した。

第 6 章で本研究の結論をまとめた。

# 学位論文審査の要旨

主　査　教　授　橋　詰　保  
副　査　教　授　本　久　順　一  
副　査　准教授　佐　藤　威　友

## 学　位　論　文　題　名

Characterization and control of GaN-based heterostructure interfaces for MOS device applications

(MOS型デバイス応用のための  
窒化ガリウム系ヘテロ構造界面の評価と制御)

近年、地球温暖化対策としてグリーンエレクトロニクスの基盤研究が盛んであり、国家プロジェクトとして太陽電池、代替エネルギー、パワーエレクトロニクス関連の研究が推進されている。パワーエレクトロニクス分野においては、電力変換素子であるインバータの高効率化がキーテクノロジーになっている。現行のインバータの中核素子としてシリコン(Si)トランジスタが利用されているが、インバータ電力損失の最大要因となるトランジスタの損失抵抗はSiの物性限界より予想される値に近づいており、インバータ変換効率の更なる向上は望めない。窒化ガリウム(GaN)材料はIII-V族ワイドギャップ半導体として知られており、Siと比較して3倍のバンドギャップ、10倍の絶縁破壊電界、2倍の飽和電子速度を有している。また、AlGaN/GaNヘテロ構造界面で得られる2次元電子層は、Si-MOS(metal-oxide-semiconductor)構造と比較してはるかに高い電子密度を有する。これらの物性値により、GaN系トランジスタを用いたインバータは、従来のSiインバータと比較して、その損失を1/3以上低減できるポテンシャルを持っており、次世代インバータとして有望視されている。

GaNインバータの実現に向けて、MOSゲート構造がデバイスの安定動作や高機能化に必要不可欠である。しかしながら、絶縁膜/窒化物半導体界面の特性には明らかにされていない点が多く、その制御は達成されていない。たとえば、熱酸化膜を利用したSi-MOS界面においては、その絶縁膜-半導体界面準位密度はチャネルキャリア密度に対して2~3ケタ低い値であり、界面準位がMOSゲート制御に与える影響はほぼ無視できる。これに対し絶縁膜/GaN構造では、このような低い界面準位密度は達成されておらず、安定なデバイス動作のためには準位密度の低減が必須である。また、高性能デバイス応用への期待が高いAlGaN/GaN構造では、絶縁膜/AlGaNの界面準位に関する定量的評価は行われていない。

これらの背景を踏まえて、本研究では、絶縁膜/窒化物半導体の界面電子準位の評価と制御を系統的に実施した。界面電子準位評価には容量-電圧(C-V)測定法を用いる場合が多いが、GaNおよびAlGaNの禁制帯幅は3.4eV以上あるため、室温でのC-V法では禁制帯全域の情報を得るこ

とが不可能である。そこで本研究では、温度エネルギーと光エネルギーの変化を巧みに利用して、広い禁制帯幅に存在する界面準位の評価を試みている。また、数値計算法との組み合わせにより、AlGaN/GaN 異種構造表面に形成した絶縁膜界面の評価を行い、禁制帯中央付近の準位密度を評価することに初めて成功している。

本論文は 6 章で構成されている。以下に各章の概要を示す。

第 1 章は序論であり、窒化物半導体の物性的特徴とデバイス応用の可能性について述べ、本研究の背景と目的を記述している。

第 2 章では、界面準位の基本的特性を述べ、金属/半導体および絶縁膜/半導体界面に対するフェルミ準位ピンニングおよびバンドラインナップ形成に関する代表的なモデルを概説している。

第 3 章では、C-V 測定法の基本原理を記述し、GaN MOS 構造の C-V 曲線の計算より、界面準位が素子のポテンシャル変調に与える影響について議論している。また、界面準位の代表的評価法として Terman 法の原理を示し、界面準位からの電子放出時定数を考慮することにより、界面準位応答のふるまいを概説している。さらに、AlGaN/GaN MOS 構造に対する自己無撞着計算モデルを説明し、計算より得られたバンド構造および C-V 特性の例を示した。

第 4 章では、絶縁膜/GaN 構造および絶縁膜/AlGaN/GaN 構造の評価結果を記述している。まず、各絶縁膜の堆積方法と試料構造および作成手順を示し、プロセス条件が MOS 構造の漏れ電流特性や界面準位密度分布に与える影響を系統的に評価している。その結果を踏まえ、最適プロセスを提案している。また、Al 酸化膜/AlGaN/GaN 構造に対し、禁制帯幅以下のエネルギーを持つ単色光照射を利用した光支援 C-V 法を適用し、Al 酸化膜/AlGaN の界面準位密度を求める手法を開発した。その結果、禁制帯中央近傍に高密度の界面準位が存在することを初めて明らかにし、ワイドギャップ半導体に対する界面評価法として光支援 C-V 法が有用であることを示している。

第 5 章では、絶縁膜/GaN 構造に禁制帯以上のエネルギーを有する紫外光を照射した場合の容量応答特性を評価し、紫外光・火炎センサの可能性を検討した。Al 酸化膜/n-GaN 構造に逆バイアスを加え、300-400 nm の波長範囲の紫外光を照射し、照射光パワー密度および逆バイアスに依存した容量変化を観測している。紫外光照射により発生したホールが Al 酸化膜/n-GaN に蓄積し、その蓄積量に応じて容量値が変化することを明らかにし、センサ応用の可能性を示した。また、容量応答の温度依存性が極めて弱いという特長を見いだし、本質的に強い温度依存性を持つショットキー構造や pn 接合構造と比較して、この特長が絶縁膜/半導体構造を利用するセンサの優位点になり得ることを示している。

第 6 章では本研究の主要成果がまとめられている。

これを要するに、本論文は、絶縁膜/窒化物半導体構造において、広い禁制帯幅に存在する界面準位を系統的に評価する手法を提案し、また、評価結果を基盤にして界面準位密度を低減する表面プロセスを検討しており、ここで得られた基礎的知見は、窒化物半導体デバイス研究に貢献するところ大である。

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。