

窒化ガリウム系半導体結晶及び MOS 界面構造の 電子準位評価

学位論文内容の要旨

近年地球温暖化が深刻な問題としてクローズアップされ、低炭素社会への取り組みが始まっている。その一方、中国、インドをはじめとする新興国の経済成長は著しく、世界的に見ると CO₂ 排出量の削減はおろか、増加のペースを押さえることすらままならない状況である。しかしアメリカでは、環境ビジネスによる雇用創出を目指すグリーンニューディール政策を掲げ、日本では経済産業省が Cool Earth 計画を制定し、低炭素化社会に向けた 21 の技術革新目標を発表するなど、全世界で環境問題に関する取り組みが国策として活発化している。日本が掲げた技術革新目標にはパワーエレクトロニクス、高効率照明など、半導体技術のブレークスルーがなければ達成できないテーマが並ぶ。パワーエレクトロニクスのテーマは電力変換、運転制御を行うインバーターの変換効率を上げることにある。インバーターには現在主に Si パワーデバイスが使われているが、Si の物性値的限界により変換効率を約 90% 以上にすることは困難である。しかし、仮に 5% の効率改善がされた場合、日本国内で約 100 億 kWh の電力削減効果が期待できる。GaN に代表される窒化物半導体は Si と比べ、高い絶縁破壊電圧、大きな禁制帯幅、高い電子密度を持つなど物性値に優れていることから、Si より低損失で高温動作が可能なパワーデバイスの実現が期待されている。また、高効率照明とは白熱灯及び蛍光灯を LED (Light emitting diode) 照明に置き換えることにより、消費電力を削減する取り組みである。LED 照明に使われる白色 LED には青色 LED+ 黄色蛍光体、もしくは紫外 LED+ 赤色・緑色・青色蛍光体など様々な方式が提案されているが、いずれも窒化物半導体を中心としてデバイス開発が進められている。

しかし、これらの窒化物材料を核とした省エネ技術の実用化には克服すべき課題が多い。その一つは窒化物材料の製造技術である。GaN を始めとする窒化物材料はバルク成長が出来ない上、格子定数が近い基板がないことから、低温バッファ層や ELO (Epitaxial Lateral Overgrowth) などの複雑な工程を用いて成膜する必要がある。このため、製造コストの増加、歩留まりの低下により基板価格が高価となり、製品普及の妨げとなっている。また、窒化物材料を用いたパワーデバイス、紫外領域 LED の実用化にはさらなる結晶品質の向上が求められる。結晶欠陥は禁制帯中に深い電子準位を形成し、デバイス特性を悪化させる要因となる。このため、結晶品質、もしくはデバイス構造を改良するためには、禁制帯中の深い準位を定量的に評価する手法が必要不可欠となる。さらに、半導体表面は非常に活性であるため、界面特性の制御された絶縁ゲート構造を実現することは容易ではない。このため、デバイス構造の改善には絶縁膜/窒化物の界面特性を正しく評価する手法が必要となる。

これらの課題に対し本研究では、簡易的なプロセスによる GaN の高品質化を目的とし、電子サイクロトロン共鳴支援 N₂ プラズマを用いてサファイア基板表面を穏やかな条件で窒化することで、表面に AlN の極薄層を形成させ、これを GaN 成長用基板として適用することを試みた。次に、DLTS(Deep level Transient Spectroscopy) 法、光容量法、長時間の高温容量過渡応答測定を併用することにより、AlGaIn における活性化エネルギーが 1eV 以上の極めて深い準位について、定量的に特性を評価することを試みた。さらに、絶縁膜/窒化物界面の特性を理解するため、GaN に金属-酸化膜-半導体 (MOS) 構造を形成し、室温から 300 °C までの温度領域で C-V(容量-電圧) 特性を測定し、界面特性の評価を行った。

本論文は第 1 章から第 7 章までで構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章は序論、本研究の背景と目的について記すと共に各章の概要を説明している。

第 2 章では窒化物半導体の物性的特徴と開発の歴史、成長方法及び低転位化技術とバルク基板の取り組みについて述べている。

第 3 章では半導体の深い準位、表面・界面準位が半導体デバイスへ与える影響、表面・界面準位の性質、そして電気的特性評価の基礎を与える SRH(Shockley Read Hall) 統計の理論について述べている。さらに、ショットキー接合、DLTS 法による深い電子準位の評価方法、表面・界面準位の評価で用いられる MOS 構造の基本的特性について述べている。

第 4 章はサファイア表面窒化による窒化物成長用基板の可能性について議論している。電子サイクロトロン共鳴支援 N₂ プラズマ処理により、サファイア表面の平坦性を保ったまま数 nm の窒化層を形成できることが明らかになった。この基板を用いて低温バッファ層なしで MOVPE(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy) による GaN 成長を行ったところ、突起状成長の無い、平坦性の高い GaN 膜の成長が確認された。

第 5 章では、DLTS 法、光容量法、高温容量過渡応答測定を用いて広範囲の Al 組成を有する AlGaIn の深い準位の評価を試みた。測定窓を 100s として行った DLTS 測定では、Al 組成 0.25、0.37 の AlGaIn において、それぞれ活性化エネルギー 1.0、1.3 eV の二つの支配的な深い準位が観測された。Al 組成 0.60 の AlGaIn における深い準位について、光容量法によりその活性化エネルギーが 1.5 eV 以上であることを明らかにした。また、すでに報告されている GaN、AlGaIn、AlN のデータと共に、本研究で得られた支配的な準位のエネルギー位置を Al 組成の関数としてプロットした結果、支配的な深い準位のエネルギー位置は、両性欠陥モデルに基づくフェルミレベル安定化エネルギーに従うことが明らかになった。このことから、AlGaIn の支配的な深い準位は逆格子位置欠陥及び空孔などを含む複合欠陥が起源であることが推測された。

第 6 章では GaN MOS 構造の界面電子準位評価について述べている。Al₂O₃/n-GaN 構造における界面準位応答の温度依存性について、静的な C-V 測定と動的な C-t(容量-時間) 測定を組み合わせることにより評価を行った。高温における C-V 測定では顕著な C-V 曲線の傾きの鈍化が現れた。これは深いエネルギー位置にある界面準位からの充電/放電応答が促進されたことによる。これらの結果より界面準位密度分布を求め、界面準位の捕獲断面積を推定した。

第 7 章にて本研究の結論を示した。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 橋 詰 保

副 査 教 授 佐 野 栄 一

副 査 准教授 佐 藤 威 友

学 位 論 文 題 名

窒化ガリウム系半導体結晶及び MOS 界面構造の 電子準位評価

現在、世界全体の電力消費量は約 15 兆 kWh であるが、今後は著しい増加が予想され、2020～2025 年には現在の 1.5 倍の使用量が見積もられている。国内的に深刻な問題は、高度情報通信システムの中核をなす集中型データセンターでの電力増加である。データセンター電力の約 7 割は心臓部のデジタル機器以外の冷却・空調・電源設備に費され、このままデータセンターの増設が進むと、その電力消費は 2025～2030 年には総電力量の 5 割にも達すると予想されている。したがって、いかに効率的に電力を制御するか、電力流通過程における変換損失をいかに抑制するかが、グリーンエネルギー社会を目指す日本にとって、非常に大きなポイントになっている。

その対策の 1 つは照明分野であり、現在の蛍光灯を LED (Light emitting diode) 照明に置き換えることにより、消費電力を削減することが急ピッチで展開している。LED 照明に使われる白色 LED には青色 LED+ 黄色蛍光体、もしくは紫外 LED+ 赤色・緑色・青色蛍光体など様々な方式が提案されているが、いずれも窒化物半導体を中心とした開発が進められている。また、電力流通過程にはインバータと総称される電力変換素子が重要な役割を果たしており、シリコン (Si) トランジスタがその中枢スイッチング機能を担っている。しかし、エネルギー変換・流通過程の多様化は電力素子のパラダイムシフトを求めており、窒化ガリウム (GaN) に代表される窒化物半導体は高い絶縁破壊電圧、大きな禁制帯幅、高い電子密度などの優れた物性値を有することより、GaN トランジスタはパワー素子パラダイムシフトの有力候補として期待されている。

しかし、窒化物半導体系材料・デバイス分野には克服すべき課題がいくつか残されている。その 1 つは結晶成長・製造技術である。窒化物半導体材料はバルク成長が困難であることから、低温バッファ層などの工程を用いて異種基板表面に成長されているが、窒化物半導体デバイスの高性能化には結晶成長技術の革新と結晶欠陥の抑制が強く求められている。さらに、デバイスの高機能化・高安定化には MOS (Metal Oxide Semiconductor) 構造を含めた表面・界面制御が重要な要素技術となるが、窒化物半導体の表面・界面特性には未解明の部分が多く残されている。

以上の点を踏まえて、本研究では、GaN 系半導体の結晶成長と成長層および接合構造の電子準位評価について検討を行っている。具体的には、サファイア表面改質による GaN エピタキシャル成長の可能性検討、AlGaN 薄膜結晶の深い準位の評価、Al 酸化膜/GaN 界面の電子準位の評価を行い、窒化物半導体デバイスの性能向上に貢献するいくつかの知見を得ている。

本論文は 7 章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章は本研究の背景と目的について述べるとともに、各章の概要を説明している。

第 2 章では窒化物半導体の物性的特徴、開発の歴史、結晶成長方法及び低転位化技術とバルク基板技術の現状について概説されている。

第 3 章では半導体の深い準位、表面・界面準位が半導体デバイスへ与える影響、表面・界面準位の性質、そして電気的特性評価の基礎を与える SRH(Shockley Read Hall) 統計について述べられている。

第 4 章はサファイア表面窒化による GaN エピタキシャル成長の可能性について議論している。電子サイクロトロン共鳴支援窒素プラズマ処理により、サファイア表面の平坦性を保ったまま数 nm の窒化層を形成できることを示し、表面改質層の構造的・化学的特性を詳細に評価した。さらに、この表面改質サファイア基板を用いて低温バッファ層なしで有機金属気相成長を行い、表面平坦性の高い GaN 成長が可能であることを示している。

第 5 章では、広範囲の Al 組成を有する AlGaIn の深い準位の評価を記述している。まず、主たる評価法の DLTS(Deep Level Transient Spectroscopy) 法の原理と解析法を説明している。次に、Al 組成 0.25 と 0.37 の AlGaIn において、活性化エネルギーがそれぞれ 1.0、1.3 eV を持つ 2 つの支配的な深い準位を検出している。また Al 組成 0.60 の成長層については、光容量法により 1.5 eV 以上の活性化エネルギーを持つ深い準位が存在することを明らかにした。さらに、深い準位エネルギーの Al 組成依存性は、両性欠陥モデルに基づくフェル準位安定化エネルギーにほぼ従うことを明らかにし、逆格子位置欠陥と空孔を含む複合欠陥が AlGaIn の支配的な深い準位の成因である可能性を指摘している。

第 6 章では GaN MOS 構造の界面電子準位評価について述べている。まず、MOS 接合の基本的特性と解析法を説明している。次に、原子層堆積法で形成した Al 酸化膜/n-GaN 構造に静的な容量-電圧 (C-V) 測定と動的な容量-時間 (C-t) 測定を適用し、界面準位応答の温度依存性を詳細に評価した。高温状態では、より深いエネルギー位置の界面準位応答が C-V 曲線の傾きと C-t 応答の振幅に顕著な変化をもたらすことを明らかにし、SRH 統計に基づく解析より界面準位の密度分布と捕獲断面積を算出している。

第 7 章では本論文の結論が述べられている。

これを要するに、本論文は、サファイア表面改質による GaN エピタキシャル成長の可能性と AlGaIn 薄膜結晶および Al 酸化膜/GaN 界面の電子捕獲準位の解明に関する検討を行っており、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。