

学位論文題名

Characterization of Electronic Levels and
Chemical Properties of GaN-Based Semiconductor Surfaces

(窒化物半導体表面の電子準位および化学的特性の評価)

学位論文内容の要旨

エネルギー問題が深刻化しつつある今日、低損失・高効率の電力変換システム(インバータ)の開発は問題解決の一つの鍵となっている。現在はシリコン(Si)パワートランジスタがインバータの中心素子であるが、Siの物性限界のためインバータの更なる損失低減は非常に難しい。この限界を打ち破る材料として窒化物半導体が注目されている。窒化ガリウム(GaN)はSiよりも10倍の絶縁破壊電界を持ち、さらに、AlGaNとGaNとのヘテロ構造を形成することによって、AlGaN/GaN界面には高い電子密度($1.2 \times 10^{13} \text{cm}^{-3}$)、高い電子移動度($1000 - 2000 \text{cm}^2/\text{Vs}$)を持つ二次元電子ガスが形成される。この特性を利用することにより、電力スイッチ用トランジスタのオン抵抗をSiと比較して1/100以下に減少させることが可能であり、高耐圧・高効率の次世代パワーデバイスとして応用が期待されている。

半導体デバイスは半導体/半導体、金属/半導体および絶縁体/半導体界面の集合体である。半導体表面には未結合手(ダングリングボンド)が存在したり、バルクの周期的化学結合と異なる終端結合をとるため、特異な電子状態となる場合が多い。このため、半導体表面では禁制帯中に高密度の状態密度を有する電子捕獲準位(表面準位)が形成され、キャリアの捕獲・放出に伴う荷電状態変化や準位を介した再結合が半導体デバイスの動作制御・安定性を大きく左右する。しかし、窒化物半導体の表面準位や界面準位の性質は明らかにされておらず、表面・界面の化学結合状態と電子準位との相関についての報告は多くはない。このような背景から、本論文では窒化物半導体表面の化学結合状態を調べ、表面準位形成との相関を調べることを第一の目的とした。

また、MgドープGaNはp型伝導層として用いられており、レーザーダイオード(LD)、発光ダイオード(LED)、ヘテロ接合バイポーラトランジスタ(HBT)などのバイポーラ素子における重要なデバイス要素である。また、金属/半導体/絶縁体型電界効果トランジスタ(MOSFET)の反転チャネル層として研究が開始されている。これらのデバイスでは不純物ドーピング制御が鍵となるが、MgはGaN中で表面偏析しやすく、設計通りのドーピング密度分布を得ることは容易ではない。また、Mgのアクセプタ準位が深く(活性化エネルギー:160 meV)、p型伝導層を得るためには高密度のMgドーピングが不可欠であるが、この高密度ドーピングによりGaN結晶中に深い準位を誘起するという報告も多い。そこで、MgドープGaNの結晶欠陥形成とMgドーピング密度や高温プロセスとの相関を詳細に検討することを、本論文の第二の目的とした。

本論文は6章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第2章では、GaN および AlGaIn の物性的特徴を要約し、Mg ドープ GaN の p 型伝導が得られるまでの歴史、p 型伝導層の基本特性、各種 p 型ドーパントのアクセプタ準位に関して概説した。

第3章では半導体の表面準位や界面準位の特性を概説した。まず、半導体表面・界面とフェルミ準位ピンニングについて簡単に説明し、続いて、これまでに提案されている表面・界面準位の起源およびフェルミ準位ピンニング機構に関する主要なモデルについて紹介した。また、GaIn の結晶欠陥に起因した発光特性に関して記述した。

第4章では GaIn 表面の化学結合状態を X 線光電子分光 (XPS) 法により評価を行い、表面の表面ポテンシャルとの相関を調べた。比較を行った試料は、有極性の c 面 GaIn 表面と無極性の m 面 GaIn 表面、アンドープと Mg ドープ GaIn 表面、プラズマ処理を行った Mg ドープ GaIn 表面である。それぞれの表面において、化学的結合状態と表面ポテンシャルに違いがあることが示され、各表面に特有の電子捕獲準位が形成されることが明らかになった。特に、プラズマ処理を施した GaIn 表面では化学結合状態の乱れを確認し、表面ポテンシャルの増加がショットキー障壁を増加させ、オーミック特性劣化の要因になっている可能性を示した。また $SiN_x/AlGaIn$ 界面の化学的特性及びバンド曲がりの評価を行った。AlGaIn の成長直後に SiN_x を成長装置内で in-situ 堆積を行った場合、AlGaIn 表面の化学結合状態に顕著な乱れは観測されなかった。これに対し、成長後に AlGaIn を一度大気に曝しプラズマプロセスによって SiN_x 膜を ex-situ 堆積した AlGaIn 表面では、酸化物の形成と AlGaIn 組成の乱れが生じていることが分かった。更に、in-situ 堆積による SiN_x 膜は AlGaIn 表面のバンド曲がりを大きく低減することが明らかになり、in-situ 堆積 SiN_x 膜を表面保護構造として利用することは、GaIn 系デバイスの安定性及び信頼性の改善に有望であることが分かった。

第5章では、高温プロセスを施した Mg ドープ GaIn 表面の化学的結合状態と結晶欠陥に関する評価を行った。Mg ドープ密度が $7 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ (低 Mg ドープ) と $2 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ (高 Mg ドープ) の2種類の試料を用意した。熱処理を行わない場合、低 Mg ドープ GaIn のフォトルミネセンス (PL) スペクトルはバンド端発光が支配的であったのに対し、高 Mg ドープ GaIn では、バンド端発光とともに 3.2 eV 近傍にピークを持つブロードな発光が観測された。XPS 測定から高 Mg ドープ GaIn の内殻準位スペクトルの半値幅の増加が見られ、高密度 Mg ドープが GaIn の化学結合の乱れを引き起こしていることが示された。低 Mg ドープ GaIn に 900 °C 以上の熱処理を行った場合、1.5-2.5 eV のエネルギー領域の発光が顕著に増加することが明らかになった。更に XPS と二次イオン質量分析 (SIMS) 測定から、高温熱処理によって GaIn 表面近傍に Ga の外方拡散が起こることが判明し、900 °C 以上の熱処理によって増加した発光は Ga 空孔を含む複合欠陥に関連した深い準位に関連する発光であることが示唆された。高 Mg ドープ GaIn では、1000 °C 以上の高温熱処理により、支配的な PL 発光のエネルギー値が 3.2 eV から 2.8 eV に変化した。また、熱処理後に Mg 原子の表面偏析が観測され、2.8 eV 発光は、Mg の格子間原子と Ga 空孔を含む複合欠陥に起因した光学遷移であることが示された。

第6章では、本論文の結論を述べた。

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 葛 西 誠 也

学 位 論 文 題 名

Characterization of Electronic Levels and Chemical Properties of GaN-Based Semiconductor Surfaces

(窒化物半導体表面の電子準位および化学的特性の評価)

エネルギー問題が深刻化しつつある今日、低損失・高効率の次世代電力変換システム (インバータ) の開発は、省エネルギー技術の重要な課題の 1 つになっている。現在はシリコン (Si) パワートランジスタがインバータの中心素子であるが、Si の物性限界のためインバータの更なる損失低減は非常に難しい状況である。この限界を打ち破る材料として窒化物半導体が注目されている。窒化ガリウム (GaN) は Si よりも 10 倍の絶縁破壊電界を持ち、さらに、AlGaN と GaN とのヘテロ構造を形成することによって、AlGaN/GaN 界面に高い電子密度と電子移動度を持つ 2 次元電子層が形成できる。この特性を利用することにより、電力スイッチ用トランジスタの損失抵抗を Si と比較して 1/100 以下に減少させることが可能であり、高耐圧・高効率の次世代パワーデバイスとして応用が期待されている。

半導体表面は、結晶内部の周期的化学結合とは全く異なり、未結合手 (ダングリングボンド) の存在、特有な欠陥の存在、不純物の化学吸着などの原因により、特異な電子状態をとる場合が多い。このため、半導体表面では禁制帯中に高密度の電子捕獲準位 (表面準位) が形成され、キャリアの捕獲・放出に伴う荷電状態変化や準位を介した再結合が半導体デバイスの動作制御・安定性に大きな影響を与える場合が多い。しかし、窒化物半導体の表面準位や界面準位の性質は明らかにされておらず、表面・界面の化学結合状態と電子準位との相関についての報告は少ない。また、Mg ドープ GaN は p 型伝導層として用いられており、バイポーラ素子の重要なデバイス要素であるとともに、金属/半導体/絶縁体型電界効果トランジスタ (MOS FET) の反転チャネル層として利用する研究も最近開始されている。しかしながら、Mg は GaN 中で表面偏析しやすく、設計通りのドーピング密度分布を得ることは容易ではない。さらに、Mg アクセプタ準位が深く (活性化エネルギー: 160 meV)、p 型伝導層を得るためには高密度の Mg ドーピングが不可欠であるが、この高密度ドーピングにより GaN 結晶中に深い準位を誘起するという報告も多い。

以上の背景から、窒化物半導体表面の化学結合状態とその表面準位形成との相関を調べ、Mg ドープ GaN の結晶欠陥形成と Mg ドーピング密度や高温プロセスとの関係を詳細に検討することを、本論文の目的としている。

本論文は 6 章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べると共に、各章の概要を記述している。

第2章では、GaN および AlGaIn の物性的特徴を要約し、Mg ドープ GaN の p 型伝導特性、各種 p 型ドーパントのアクセプタ準位に関して概説している。

第3章では半導体の表面準位や界面準位の特性をまとめている。まず、半導体表面・界面準位と表面フェルミ準位ピンニングの関係について説明し、続いて、これまでに提案されている表面・界面準位の起源およびフェルミ準位ピンニング機構に関する主要なモデルを記述している。また、GaIn の結晶欠陥に起因したフォトルミネセンス特性をまとめている。

第4章では、X 線光電子分光 (XPS) 法を用いて、GaIn 表面の化学結合状態と表面ポテンシャルとの相関を系統的に評価している。比較を行った試料は、有極性 c 面および無極性 m 面のアンドープ GaIn、Mg ドープ GaIn、プラズマ処理を行った Mg ドープ GaIn である。それぞれの試料において、化学的結合状態が異なり、各表面に特有の電子捕獲準位が形成される可能性を示している。特に、プラズマ処理を施した GaIn 表面では化学結合状態の乱れを確認し、表面ポテンシャルの増加がショットキー障壁を増加させ、オーミック特性劣化の要因になっている可能性を示した。次に、SiN/AlGaIn 界面の化学的特性及びバンド曲がりの評価を行った。AlGaIn 成長直後に SiN を成長装置内で「その場堆積」を行った場合、AlGaIn 表面の化学結合状態は良好であるが、成長後に AlGaIn を一度大気に曝し、外部プラズマプロセスによって SiN 膜を堆積した AlGaIn 表面では、酸化物の形成と AlGaIn 組成の乱れが生じていることを明らかにした。更に、SiN のその場堆積は AlGaIn 表面のバンド曲がりを低減することを示し、GaIn 系デバイスの安定性及び信頼性の改善に有望であることを明らかにした。

第5章では、Mg ドープ密度が $7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ (低 Mg ドープ) と $2 \times 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ (高 Mg ドープ) の2種類の試料に対して、高温プロセスによる GaIn 表面の化学的結合状態の変化と結晶欠陥生成に関する評価を行っている。熱処理を行わない場合、低 Mg ドープ GaIn のフォトルミネセンス (PL) スペクトルはバンド端発光が支配的であったのに対し、高 Mg ドープ GaIn では、バンド端発光とともに 3.2 eV 近傍にピークを持つブロードな発光が観測されることを示した。次に、低 Mg ドープ GaIn に 900 °C 以上の熱処理を行った場合、1.5-2.5 eV のエネルギー領域の発光が顕著に増加することを示した。XPS 解析と二次イオン質量分析 (SIMS) から高温熱処理による Ga の外方拡散を確認し、900 °C 以上の熱処理によって増加した PL 発光は Ga 空孔を含む複合欠陥準位に関連する発光であることを明らかにした。高 Mg ドープ GaIn では、1000 °C 以上の高温熱処理により、支配的な PL 発光のエネルギー値が 3.2 eV から 2.8 eV に変化することを観測し、この原因は、Mg 原子の表面偏析により誘起された Mg 格子間原子と Ga 空孔を含む複合欠陥に起因している可能性を示した。

第6章では、本論文の主要な結論をまとめている。

これを要するに、本論文は、窒化物半導体表面の化学結合状態とその表面準位形成との相関を調べ、また、Mg ドープ GaIn の結晶欠陥形成と Mg ドーピング密度や高温プロセスとの関係を詳細に検討しており、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。