

学位論文題名

Control of surface Electronic States in GaN- and GaAs-based Nanostructures

(GaN および GaAs ナノ構造の表面電子準位制御)

学位論文内容の要旨

20 世紀最も大きな影響を与えた発明の一つであるトランジスタは、それまでの真空管エレクトロニクスから現今の半導体エレクトロニクスへと大きな技術革新を導いた。この革新無しには、いまや日用品となったコンピュータや通信装置、電子機器なども存在せず、半導体デバイスの発展無しには現在の情報化社会は考えられないのはまぎれもない事実である。現在のエレクトロニクスは大規模集積回路に代表されるシリコン (Si) によって支えられており、優れた結晶技術、物理的・化学的性質とともに超微細加工技術の進歩により急速な発展を遂げてきた。一方、化合物半導体は、光デバイスや超高速デバイスなど、シリコンでは達成不可能・あるいはより高性能な分野を担う重要な研究材料としての地位を築いている。中でもガリウム砒素 (GaAs) をはじめとする III-V 半導体は、Si と比べて高い電子速度、直接遷移型のバンド構造など非常に優れた材料物性を示し、既にレーザーや高周波デバイスなどの用途においては実用化がなされている。また、窒化ガリウム (GaN) に代表される窒化物半導体は、大きな禁制帯幅、伝導帯バンド不連続、高電子密度などの特徴から、これまでにない高出力、高温動作、短波長発光デバイスを実現する材料として期待されている。

近年の情報化社会の発展は同時に半導体の微細化への要求に反映され、半導体寸法が原子スケールに近づくにつれゲートリーク電流やショートチャネル効果がデバイス動作への悪影響として顕著に表出してきた。また、微細化された構造ではデバイス全体に占める表面積の割合が増すため、その特性は表面欠陥や表面特有の構造に起因する表面電子準位に非常に敏感となる。III-V 族化合物半導体では表面電子準位が特に高密度に存在することが知られており、リーク電流やチャネルの空乏化などデバイスの不安定性を引き起こす要因となる。複雑化するデバイス構造はもはや界面の集合体であり、これを制御することは最も高度かつ重要な半導体技術の根幹である。Si 技術が今日まで発展を遂げてきた理由の一端には、Si の熱酸化膜である SiO_2 との間に電子準位密度の低い非常に良好な界面を容易に形成可能であることが挙げられる。その点、III-V 半導体の表面電子準位の制御では種々の要請を満たす手法が確立されておらず、材料固有の問題点の理解とともに、電子準位生成機構の本質的解明に結びつく研究アプローチが求められている。

以上の背景をもとに、本論文では III-V 半導体の中心材料である GaAs と GaN を用いた薄膜表面およびナノ構造について、光学および電気的特性に対する表面準位の影響を解明するとともに、表面・界面準位の発生源の考察に基づき、その制御構造を構築することを目的とした。GaAs については量子構造において光学特性が表面準位から受ける影響およびシリコン制御層の導入による特性改善を試みた。また GaN の電気化学酸化手法を確立し、母体半導体酸化膜形成による表面制御を行った。

本論文は全7章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に各章の概要を記している。

第2章では、GaAsとGaNについて基礎的な物性について述べている。結晶構造やIII-V半導体に特徴的なイオン性結合についてまとめた上で、得られるバンド構造に関する議論を行っている。また、本研究に用いるGaAs/AlGaAsおよびAlGaIn/GaNヘテロ接合に関する詳細な記述も行っている。

第3章では、表面制御を行う上で重要な半導体表面の特性および表面・界面準位の起源、特性についてまとめている。金属-半導体、絶縁膜-半導体界面に存在する界面準位の起源にはいくつかのモデルがあり、解明の歴史的背景とともにこれらの特徴について記述した。高密度の表面・界面準位によって引き起こされる、フェルミ準位のピンニングなど半導体の基礎特性に及ぼす影響や、実デバイスで問題となる現象を議論すると共に、表面・界面準位を不活性化するための手法として、界面制御層の形成をはじめとするいくつかの実験的アプローチについても言及している。

第4章では、III-V半導体の表面酸化を行うための基礎的な電気化学理論についてまとめた。続いてGaAs、AlGaAs、GaNを半導体電極とした陽極化成の検討を行った。プロピレングリコール水溶液を電解質溶液とし、半導体電極の酸化電流の時間依存性や酸化電流-印加電圧特性を解析し、酸化特性の比較を行った。GaAs系材料の酸化における組成および面方位依存性を調べ、GaAsとAlGaAsの酸化ではそれぞれ面方位の違いによる酸化速度の違いがなく、酸化膜厚は印加電圧により制御可能であることが実験的に示された。GaNの陽極酸化膜は電圧の印加条件により酸化膜内部の組成や構造に違いが生じることが見いだされ、酸化条件の最適化を経て酸化膜厚および表面平坦性の制御に関する知見を得ることができた。また、GaN/酸化膜界面の界面準位密度を容量-電圧(C-V)特性から見積もった結果、 $5 \times 10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ という非常に低い値が得られ、非常に良好な界面を形成することが示された。

第5章では、GaAs/AlGaAs量子細線構造における表面準位の影響と、シリコン表面制御層を用いた表面不活性化の効果を系統的に光学評価した結果について述べている。MBEにより作製された量子細線構造を大気中に取り出しフォトルミネッセンス(PL)による量子細線からの発光強度を評価した。表面のAlGaAs障壁層厚さの薄化に伴う発光強度の変化から、表面準位の影響を取り入れた発光強度減衰のメカニズムについて考察した。考察結果に基づいた表面制御プロセスを施した結果、AlGaAs障壁層厚約30nmから急激に劣化した量子細線からの発光強度の回復に成功した。

第6章では、GaN表面の陽極酸化による表面準位制御及び低損傷プロセスを試みた。酸化膜がアルカリ溶液により除去可能であることをX線光電子分光法(XPS)により確認した後、GaN表面の酸化と酸化膜除去を組み合わせたウェットエッチング手法を、ドライエッチングによりプラズマ損傷のあるGaN表面に対し施した。その結果、ショットキー特性の比較により本手法が電気的特性の回復に有用であることが示された。また、酸化膜を形成することによりGaNからのPL強度が3~14倍増加し、このメカニズムについてモデルを考案し議論した。更に、AlGaIn/GaN HEMTナノ細線デバイス構造において、メサ構造端面の選択的酸化によりドレイン-ソース電流値が増加した。この結果から端面に存在する表面準位によるキャリアの捕獲やチャネルの空乏化が抑制できる可能性が実験的に示された。

第7章では、本論文の結論を述べている。

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 教 授 本 久 順 一

副 査 准教授 佐 藤 威 友

学 位 論 文 題 名

Control of surface Electronic States in GaN- and GaAs-based Nanostructures

(GaN および GaAs ナノ構造の表面電子準位制御)

従来の半導体デバイス・集積回路には主として Si 材料が用いられ、デバイスの微細化をベースとする高性能化が進められてきた。しかし近年の高度情報化の驚異的進行により、半導体デバイスへのさらなる高性能化への要求が高まり、Si エレクトロニクスには微細化にともなう漏れ電流の増大、ショートチャネル効果の発現などの限界が見え始めている。ガリウム砒素 (GaAs) や窒化ガリウム (GaN) などの化合物半導体は、Si と比べて高い電子速度、広いバンドギャップなど非常に優れた材料物性を有しており、既に高周波デバイスなど一部の用途においては実用化がなされている。さらに、その優れた材料物性を活かした集積回路や電力変換デバイスなどへの応用も進められており、Si の材料限界を打破する次世代デバイス・集積回路の有力候補である。

半導体デバイス・集積回路の高性能化を目指して種々のナノ構造が利用されている。このようなナノ構造ではデバイス全体に占める表面積の割合が増すため、その特性は表面欠陥や表面特有の構造に起因する表面電子準位に非常に敏感となる。III-V 族化合物半導体では表面電子準位が特に高密度に存在することが知られており、リーク電流、チャネルの空乏化、発光効率低下などデバイス特性を左右する要因となる。複雑化するナノデバイス構造はもはや界面の集合体であり、これを制御することは最も高度かつ重要な半導体技術の根幹である。

以上の背景をもとに、本論文では III-V 半導体の中心材料である GaAs と GaN を用いた薄膜表面およびナノ構造について、光学的・電気的特性に対する表面準位の影響を解明するとともに、表面・界面準位の発生起源の考察に基づきその制御構造を構築することを目的としている。GaAs については量子構造において光学特性が表面準位から受ける影響を評価し、その制御を試みている。また GaN の電気化学酸化手法を確立し、母体半導体酸化膜形成による表面制御を検討している。

本論文は全 7 章から構成されている。

第 1 章では、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に各章の概要を記している。

第 2 章では、GaAs と GaN について基礎的な物性について述べている。結晶構造や III-V 半導体の特徴的なイオン性結合についてまとめた上で、得られるバンド構造に関する議論を行っている。

第3章では、表面制御を行う上で重要な半導体表面の特性および表面・界面準位の起源、特性について記述している。また、高密度の表面・界面準位によって引き起こされるフェルミ準位のピンニングなど半導体の基礎特性に及ぼす影響、および実際のデバイスで問題となる現象を説明すると共に、表面・界面準位を不活性化するための手法として、界面制御層の形成をはじめとするいくつかの実験的アプローチについても言及している。

第4章では、III-V 族化合物半導体の表面酸化を行うための電気化学プロセスの基礎をまとめている。続いて GaAs、AlGaAs、GaN を半導体電極とした陽極化成の検討を行った。プロピレングリコール水溶液を電解質溶液とし、半導体電極の酸化電流の時間依存性や酸化電流-印加電圧特性を解析し、酸化特性の比較を行っている。GaAs 系材料の酸化における組成および面方位依存性を調べ、GaAs と AlGaAs の酸化ではそれぞれ面方位の違いによる酸化速度の違いがなく、酸化膜厚は印加電圧により制御可能であることが実験的に示された。GaN の陽極酸化膜は電圧の印加条件により酸化膜内部の組成や構造に違いが生じることが見いだされ、酸化条件の最適化を経て酸化膜厚および表面平坦性の制御に関する知見を得ている。また、GaN/酸化膜界面の界面準位密度を容量-電圧 (C-V) 特性から見積もった結果、単位面積・単位エネルギーあたりの値が低いことが判明し、良好な界面を形成することが示された。

第5章では、GaAs/AlGaAs 量子細線構造における表面準位の影響と、シリコン表面制御層を用いた表面不活性化の効果を系統的に評価した結果について述べている。量子細線構造のフォトルミネッセンス (PL) 評価より、表面の AlGaAs 障壁層膜厚の減少に従って発光強度が減少することが分かり、表面準位の影響を取り入れた発光強度減衰のメカニズムを検討している。さらに表面制御プロセスを施した結果、AlGaAs 障壁層厚約 30nm から急激に劣化した量子細線からの発光強度の回復に成功している。

第6章では、GaN 表面の陽極酸化による表面準位制御及び低損傷プロセスを実施している。酸化膜がアルカリ溶液により除去可能であることを X 線光電子分光法 (XPS) により確認した後、GaN 表面の酸化と酸化膜除去を組み合わせたウェットエッチング手法を、ドライエッチングによりプラズマ損傷のある GaN 表面に適用した。その結果、ショットキー特性の比較により本手法が電気的特性の回復に有用であることが示された。また、酸化膜を形成することによる GaN からの PL 強度が 3~14 倍増加することが分かり、この機構に関して議論している。更に、AlGaN/GaN HEMT ナノ細線デバイス構造において、メサ構造端面の選択的酸化によりドレイン-ソース電流値が増加することを観測した。この結果から端面に存在する表面準位によるキャリアの捕獲やチャネルの空乏化が抑制できる可能性が実験的に示された。

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、III-V 半導体の中心材料である GaAs と GaN を用いた薄膜表面およびナノ構造について、表面・界面準位の発生起源の考察に基づきその制御構造を実験的に検討しており、ここで得られた表面電子準位制御に関する知見は、次世代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。