

学 位 論 文 題 名

Formation and Characterization of Ultrathin Pseudomorphic Interface Control Layers for Surface Passivation of GaAs

(ガリウムヒソの表面不活性化のための
擬似格子整合した超薄膜界面制御層の形成と評価)

学位論文内容の要旨

近年、GaAs や InP を用いた超高速デジタル IC やアナログ IC、また、GaAs 系の混晶を用いる光エレクトロニクスデバイスの研究開発が急速に推進されつつある。こうした動向は、光通信システムや衛星通信システムにおいては大量の情報を超高速で処理するギガビット電子デバイスが必要となり、従来のシリコンデバイスにかわって、より高性能の III-V 族化合物半導体集積回路が使われる可能性が大きいという予測を根拠としている。しかしながら、GaAs 表面は、表面・界面準位が高密度に存在する非理想的な状態にあり、界面でフェルミ準位が固定あるいはその動きが著しく防げられる「フェルミ準位のピンニング現象」が生じている。この現象は、デバイス動作を妨げ、性能を制限し、信頼性を劣化させる原因となる。さらに、近年の半導体デバイス構造の微細化は、そのデバイス構造に占める表面・界面の割合を飛躍的に増加させ、表面科学に基づいた表面・界面の物性の理解及び有効な GaAs 表面不活性化技術の確立はより一層重要なものとなってきた。

現在、GaAs の表面不活性化技術については、様々の方法が検討されているが、表面不活性化効果の持続性や不活性化膜自体の安定性など問題も残り、十分な効果を得るまでには至っていない。我々のグループでは、Si 界面制御層による表面・界面制御手法を提案し、その検討を行ってきた。しかしながら、InP 及び InGaAs 表面と比較すると GaAs 表面に対する不活性化効果は非常に劣っており、更なる改善が必要である。

本論文は、以上の背景のもと、ワイドバンドギャップをもつ GaN などの界面制御層 (Interface Control Layer: ICL) を用いた界面制御手法を提案したものである。さらに、従来の Si ICL 及び今回提案した GaN ICL による GaAs(001) 表面不活性化手法の最適化として、初期表面に (4×6)Ga 安定化面を用いた界面の真空中における表面構造及び電気的・光学的特性の検討を行い、実用的な MIS 構造を作製し、新たな不活性化技術を確立したものである。

本論文は 9 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、化合物半導体表面並びに絶縁体界面の物理および諸物性について述べる。また、課題となっている表面・界面準位の振る舞い、フェルミ準位ピンニング現象の起因

に関するモデルなどについて述べ、本研究で使用する界面制御層による不活性化技術の原理について記している。

第3章では、化合物半導体界面を形成する技術として、超高真空一貫システムに接続されたMBE法による結晶成長およびCVD法による絶縁膜の形成技術について述べ、さらに、界面の評価法として、X線光電子分光(XPS)法、フォトルミネッセンス(PL)法、非接触容量-電圧(C-V)測定法、MIS C-V 測定法、原子間力顕微鏡(AFM)について、それらの原理や具体的な装置の概要が説明されている。

第4章では、不活性化されるGaAs表面とその様々な表面再構成の基本的な形成手順および構造について議論している。基盤としたAs安定化面を適切なアニール処理することにより、Ga安定化(4×6)面が形成されることが明らかになった。各再構成をした表面を化学状態・光学的特性を評価したところ、Ga安定化GaAs表面を作製することで表面の特性が大幅に改善し、不活性化初期表面として有望な表面であることを示した。

第5章では、MBE法で成長したGaN表面の表面特性を、大気に曝さずXPS法、PL法及びPLS³シミュレーションを用いて詳細に調査した結果、エネルギー空間に高密度かつ連続的に分布している表面準位と離散的な準位が混在していることが明らかになった。その対策として、SiN_x膜による不活性化を行うことにより、表面準位が非常に減少し、SiN_x膜がGaN表面の適切な不活性化層であることを明らかにした。

第6章では、GaAs表面の直接窒化法を用いた超薄膜擬似格子整合する立方晶(c-)GaNの形成について述べている。適切な窒化条件を用いた場合、GaAs上に超薄膜c-GaN厚さ5Åの形成に成功している。また、窒化プロセスの初期段階にAsビームを照射することによって、非常に良いGaN表面のモフォロジーを示した。得られたGaN超薄膜を界面制御層として利用し、PL法およびMIS C-V測定で界面の電気的特性を評価した結果、界面準位密度が減少し、フェルミ準位ピンニングが緩和したことが明らかとなった。

第7章では、Ga安定化(4×6)GaAs面を初期表面として、GaN界面制御層によるGaAs表面不活性化手法の最適化について検討を加えている。窒化処理を行った表面の化学組成とモフォロジーを評価したところ、初期表面の再構成とGaN層の形成機構に相関があることが明らかとなった。超高真空中におけるSTM/STS法とPL法による評価結果から窒化した表面特性が大幅に改善することを明らかにした。さらに、(4×6)Ga安定化面上に形成したGaN界面制御層により不活性化したGaAsのMIS構造を作製し、大気中でC-V測定を行ったところ、フェルミ準位ピンニングが大幅に緩和し、真空中で得られた良好な界面特性は大気に曝したMIS構造でも保持されていることを明らかにした。

第8章では、(4×6)Ga安定化面上に従来のSi界面制御層を形成することにより、(001)GaAs表面の不活性化について述べられている。Si層の形成により、(4×6)Ga安定化面上に存在する高密度なアクセプター型界面準位を除去することが可能であることを見出した。さらに、様々な再構成した表面を有するMIS構造を作製した結果、初期表面再構成とフェルミ準位ピンニングの強度に非常に強い相関があることを示した。ピンニングの強いAs安定化面と比較して、“真の”(4×6)面上にSi ICLで不活性化を行ったMIS構造では、バンドギャップ全体にわたって、フェルミ準位のピンニングが緩和し、界面準位密度の最

小値が $4 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ まで減少したことが明らかになった。さらに、本研究のパッシベーション技術を用いて良好なゲート制御性を示す MISFET の試作に成功している。

第 9 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 長谷川 英 機

副 査 教 授 福 井 孝 志

副 査 教 授 陽 完 治

副 査 助教授 橋 詰 保

学 位 論 文 題 名

Formation and Characterization of Ultrathin Pseudomorphic Interface Control Layers for Surface Passivation of GaAs

(ガリウムヒソの表面不活性化のための
擬似格子整合した超薄膜界面制御層の形成と評価)

近年の高度情報通信システムの急速な発展は、ガリウムヒソやインジウムリンを中心とした化合物半導体によるレーザーダイオード・フォトダイオード等の高効率光デバイスや高電子移動度トランジスタ・ヘテロ接合バイポーラトランジスタ等の超高周波電子デバイスの著しい進展に支えられてきた。さらに、次世代のユビキタスネットワークにおける通信データの大容量化と変調方式の高度化に対応するために、III-V 族化合物半導体電子デバイスのミリ波帯からテラヘルツ帯への更なる高周波化やパワー性能の大幅な向上が必須であるとされている。

しかしながら、一般的に化合物半導体表面・界面では、高密度の表面・界面準位が禁制帯中に発生し、フェルミ準位が特定のエネルギー位置に固定される「フェルミ準位ピンニング現象」が引き起こされる。この現象は、シリコン技術で主流となっている金属－絶縁体－半導体(MIS)形電界効果トランジスタの実現を困難にすると共に、その他の電子デバイスや光デバイスの性能を著しく劣化させ、さらに準位の充放電やそれに伴う発熱によりデバイスの信頼性を損なう。そして、これらの悪影響は、デバイスの微細化に伴いさらに増大する。このため、化合物半導体デバイスの高性能化・高信頼化のためには、表面・界面準位の制御と不活性化が不可欠である。これまでに、III-V 族化合物半導体表面の制御と不活性化に関して種々の方法が提案されてきたが、表面不活性化効果の持続性や不活性化膜自体の安定性などに問題が残り、実用化に至っていない。

本論文は、以上の背景のもとに、III-V 族半導体の代表とも言えるガリウムヒソ(GaAs)について、その(001)面に擬似格子整合した超薄膜界面制御層を用いた新しい表面不活性化構造の開拓を試みたものである。「シリコン界面制御層(Si ICL)」と「窒化ガリウム界面制御層(GaN ICL)」を界面制御層として利用し、GaAs 初期表面構造および超薄膜界面制御層の構造・組成・光学特性・電子物性を詳細に評価し、それにもとづき、表面・界面準位の特性を明らかにするとともに、MIS 形電界効果トランジスタへの応用を検討している。本論文は 9 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ている。

第 2 章では、化合物半導体表面および絶縁体-半導体界面におけるフェルミ準位ピンニング機構のモデルと界面制御層による表面不活性化の原理について述べている。

第 3 章では、実験に用いた超高真空一貫システムおよび表面・界面の評価法について概説している。評価法としては、X 線光電子分光(XPS)法、フォトルミネッセンス(PL)法、非接触容量-電圧(C-V)測定法、MIS C-V 測定法、走査トンネル顕微鏡(STM)および原子間力顕微鏡(AFM)が用いられた。

第 4 章では、分子線エピタキシー(MBE)により成長した GaAs(001)表面の原子配列、電子状態、光学特性を詳細に評価している。一般的に用いられている As 安定化面(2×4)面と、その面をアニール処理することにより得られる Ga 安定化(4×6)面を、STM, XPS および PL 法により評価・比較し、Ga 安定化(4×6)面が不活性化初期表面として優れていることを明らかにしている。

第 5 章では、分子線エピタキシー法で成長した GaN 表面の特性を詳細に評価している。高真空中での XPS 測定および PL 測定結果と、表面準位効果を含めた計算機シミュレーションにより、MBE 成長 GaN 表面には、エネルギー的に連続分布を有する表面準位と窒素空孔に関連した離散準位が高密度に存在することを見いだした。さらに、窒素プラズマ処理による不活性化処理により、表面準位が低減できることを明らかにしている。

第 6 章では、GaAs 表面を窒素プラズマあるいはラジカルにより窒化処理し、GaAs に擬似格子整合する立方晶 GaN(c-GaN) 超薄膜の形成について検討している。詳細な XPS 測定に基づく窒化プロセスの最適化により、GaAs 上に 5Å の膜厚を持つ c-GaN 超薄膜が形成されることを示した。さらに、PL 測定および C-V 測定の結果より、c-GaN 超薄膜の形成により GaAs 表面の表面準位が減少し、フェルミ準位ピンニングが緩和することを明らかにしている。

第 7 章では、Ga 安定化(4×6)面を初期表面とする、GaN 界面制御層による GaAs 表面不活性化構造の評価とプロセスの最適化について検討を行っている。XPS 法と STM 法により Ga 安定化(4×6)面の窒化機構を明らかにし、表面準位を大幅に低減するプロセスを確立した。さらに、GaN 界面制御層を用いた不活性化構造が、実用的な MIS 構造に適用可能であることを示している。

第 8 章では、Ga 安定化(4×6)面を初期表面とする、Si 界面制御層による GaAs 表面の不活性化が議論されている。STM 評価により原子オーダーでの Si 界面制御層の形成機構を明らかにし、不活性化構造形成プロセスの最適化により界面準位密度を $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ まで低減することに成功した。さらに、Si 界面制御層不活性化構造をゲート構造に適用し、良好なゲート制御性を示す GaAs MIS 形電界効果トランジスタの試作に成功している。

第 9 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、ガリウムヒソの新しい表面不活性化法として、(001)面に擬似格子整合したシリコンおよび窒化ガリウム界面制御層の形成法と構造・組成および電子物性を詳細に検討するとともに、MIS 形電界効果トランジスタの試作を通じ、その有効性を実証したものであり、半導体工学の進歩に寄与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。