

学位論文題名

# *In-Situ* Scanning Tunneling Microscopy Characterization of As Grown and Silicon Interlayer Passivated GaAs(001) Surfaces

(成長直後およびシリコン界面層で不活性化した GaAs(001) 表面の  
走査トンネル顕微鏡によるその場評価)

## 学位論文内容の要旨

GaAs および InP を代表とする III-V 族化合物半導体は、Si と比較して、高移動度、高発光効率等の優れた特性を有する材料であり、光通信分野では受発光デバイスとして、移動体通信分野ではミリ波および準ミリ波帯超高周波デバイスとして必要不可欠なものとなっている。しかしながら、III-V 族化合物半導体表面は、一般に高密度の表面・界面準位が存在し、界面でフェルミ準位が固定あるいはその動きが著しく妨げられる「フェルミ準位ピンニング現象」が生じている。この現象は、ゲートのポテンシャル制御を著しく妨げ、デバイス動作の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、その表面・界面に関する不活性化技術の重要性はますます高まりつつある。

過去 20 年にわたる表面不活性化技術に関する多くの研究により様々な手法が提案されているが、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っており、完全な解決策を得るまでには至っていない。一方、以前提案された Si 界面制御層による表面・界面制御手法は、適用する材料により有益な効果を示すことが明らかとなった。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いる。このため、GaAs 表面を適切に不活性化するためには、表面科学的手法に基づいた表面・界面に関する物性の理解はより一層重要なものとなってきている。

これまで、GaAs(001)面上の 2 つの異なる再構成表面—As 安定化(2x4)および c(4x4)表面—to Si 界面制御層を適用し、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)測定法といった巨視的な表面評価手法により、不活性化効果に違いの現れることが明らかとなった。しかしながら、その他の再構成表面および微視的な評価については、未だ十分検討されていないのが現状である。

このような背景のもと、本論文では、走査トンネル顕微鏡(STM)および走査トンネル分光(STS)法により、GaAs(001)-As 安定化面の 2 種類の再構成表面における電子状態および表面構造を原子レベルで評価を行い、その表面上で観測された異常 STS スペクトルが表面準位の充放電によって引き起こされることを明らかにし、Si 界面制御層を用いた表面不活性化の効果とその機構について検討を行った。また、Ga 安定化面についても同様の評価を行ったところ、As 安定化面と比較して Si 界面制御層により表面特性が著しく改善されることを明らかにし、デバイスのさらなる高性能化を実現するためには、初期表面の再検討が必要であるという新知見を得た。

本論文は 8 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、化合物半導体表面を形成する手法として、超高真空一貫システムに接続された MBE 法による結晶成長技術について述べ、さらに、表面の評価法として、STM/STS 法、XPS 法、PL 法、非接触 C-V 測定法について、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 3 章では、化合物半導体表面並びに絶縁体界面に存在する表面・界面準位の起源および、フェルミ準位ピンニング現象に関して提唱された主要なモデルについて述べ、本研究で使用される界面制御層による不活性化技術の原理について記されている。

第 4 章では、実験条件に依存して GaAs(001)面で現れる様々な再構成表面を STM 法および反射高エネルギー電子線回折法により評価し、その再構成表面の形成手順および提唱された主要な表面構造モデルについて説明がなされている。

第 5 章では、工業的に重要な GaAs(001)-As 安定化面について STM/STS 法により詳細な評価を行った結果が述べられている。MBE 法により形成した As 安定化面上の STS 測定結果は、コンダクタンスギャップが GaAs のバンドギャップと同値である「通常の STS スペクトル」と、コンダクタンスギャップが GaAs のバンドギャップ大きな値を示す「異常 STS スペクトル」の 2 種類のスペクトルが同じ試料上に共存することを示した。この「異常スペクトル」は、半導体表面のフェルミ準位が探針のフェルミ準位と平衡すると仮定し、探針のフェルミ準位に従い局所的に表面準位が充放電され、バンド曲がりが増加することにより観測されると考えた。また、このモデルは、シミュレーション結果とも一致し、「異常スペクトル」に対する定性的・定量的な説明が可能であることを示した。

第 6 章では、GaAs(001)-As 安定化面に Si 超薄膜を形成し、その表面不活性化の効果およびその不活性化の機構について述べられている。初期表面では高密度に表面準位が存在し、フェルミ準位がピンニングされているが、Si 超薄膜の形成により、表面準位密度が減少し、比較的良好な特性を有する表面が得られ、Si 超薄膜が GaAs 表面の不活性化に有効であることがわかった。特に、c(4x4)表面では、表面準位密度が著しく減少することも明らかとなった。Si 超薄膜形成前後の STM 観察により、c(4x4)表面では、(2x4)表面上で観察されたような欠陥が存在しないことが分かった。これより、2 次元的な Si 膜の形成が表面特性の向上につながったと思われる。さらに、バイアス依存 STM 観察により、表面準位は、空間的・エネルギー的に連続的な分布を示すことが明らかとなった。

第 7 章では、さらなる表面不活性化を実現するため、Ga 安定化面の表面特性を詳細に評価し、Si 超薄膜の効果について述べられている。STS 法および非接触 C-V 法による結果は、伝導帯近傍に高密度のアクセプター形表面準位が存在することを示した。しかしながら、その表面は、低密度かつバンドギャップ内に広く分布する表面準位を有し、強いバンド端 PL 発光強度を示した。Si 超薄膜形成後、伝導帯近傍で高密度に存在した表面準位は完全に消滅し、さらに PL 発光強度を増大した。また、STM 観察により、Si 膜の形成は、Ga 安定化面の構造を乱すことなく、2 次元的に行われることが分かった。これらの結果より、Ga 安定化面は、As 安定化面と比較して、秩序性およびプロセスに対する安定性が優れていることが明らかとなった。この表面上に Si 界面制御層を適用した MIS 構造では、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  $4 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$  まで減少することが明らかとなった。

第 8 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 佐 野 栄 一  
副 査 助 教 授 橋 詰 保

学 位 論 文 題 名

## *In-Situ* Scanning Tunneling Microscopy Characterization of As Grown and Silicon Interlayer Passivated GaAs(001) Surfaces

(成長直後およびシリコン界面層で不活性化した GaAs(001) 表面の  
走査トンネル顕微鏡によるその場評価)

ガリウムヒソ(GaAs)やインジウムリン(InP)を中心とした化合物半導体による高効率光デバイスや超高周波電子デバイスの著しい進展は、現在の高度情報通信システムの急速な発展の原動力となっている。さらに、次世代「ユビキタスネットワークシステム」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特性の大幅な向上が必須であり、加えて、量子ナノ構造等を利用した新しい原理で動作するデバイスの開発が要請されている。

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、電子デバイスや光デバイスの性能を劣化させ、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著しく低下させる。さらに、ナノデバイス構造においては表面・界面の割合が飛躍的に増加するため、これらの悪影響はさらに増大する。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、GaAs(001)面における種々の再構成表面の電子状態および表面構造を、走査トンネル顕微鏡(STM)および走査トンネル分光(STS)法により詳細に評価し、表面フェルミ準位のピンニング機構を原子レベルで解明することを試みるとともに、超薄シリコン界面制御層による表面不活性化効果を、原子レベルで詳細に検討したものである。

本論文は8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、実験に用いた超高真空一貫システムを概説している。化合物半導体成長法として分子線エピタキシー(MBE)法による結晶成長法、表面の評価法として STM/STS 法、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 3 章では、化合物半導体表面および絶縁体界面の表面・界面準位の起源と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述べ、本研究で利用された界面制御層による不活性化技術の原理について述べている。

第 4 章では、GaAs(001)面における種々の再構成表面の形成方法を説明し、それらの再構成表面を STM 法および反射高エネルギー電子線回折(RHEED)法により詳細に評価し、表面構造モデルの検討を行っている。

第 5 章では、実際のデバイス構造に利用されている GaAs(001)-As 安定化面について STM/STS 法により詳細な評価を行った結果が述べられている。MBE 法により形成した As 安定化面上の STS 測定により、コンダクタンスギャップが GaAs のバンドギャップより大きな値を示す「異常 STS スペクトル」が観測された。実験とシミュレーションの両面から、この機構の解明を試み、探針のフェルミ準位の変化に従い表面準位が局所的に充放電してバンド曲がりが増加することを明らかにし、「STS 異常スペクトル」に対する新しい定量的モデルが提案されている。

第 6 章では、GaAs(001)-As 安定化面に Si 超薄膜界面制御層を形成した場合の表面不活性化の機構について述べられている。成長直後の初期表面では高密度の表面準位によりフェルミ準位がピンニングされており、バイアス依存 STM 観察により、表面準位は空間的・エネルギー的に連続的分布を持つことを明らかにしている。数原子層の Si 超薄膜の形成により、表面準位密度が減少し、特に、(2x4)表面と比較して、c(4x4)再構成表面では 2 次的に Si 層が形成されるため表面電子状態が改善することが示されている。

第 7 章では、GaAs(001)-Ga 安定化面の表面電子状態の評価と Si 超薄膜の不活性化効果について述べられている。STS 法および非接触 C-V 法による評価結果は、伝導帯近傍に高密度のアクセプター形表面準位の存在を示唆したが、Si 超薄膜形成によりこの表面準位は完全に消滅し、バンドギャップ全体において低密度の表面準位分布が実現され、バンド端 PL 発光の大幅な改善が示された。詳細な STM 観察により、Ga 安定化面の原子配列を乱すことなく Si 膜が形成されることが示され、Ga 安定化面は秩序性およびプロセスに対する安定性が優れていることが明らかとなった。さらに、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。

第 8 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(001)面における表面フェルミ準位ピンニング機構を、走査トンネル顕微鏡(STM)および走査トンネル分光(STS)法により原子レベルで解明するとともに、超薄シリコン界面制御層の構造・組成および電子物性を詳細に検討し、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。