

## 学位論文題名

## Fabrication of lateral surface superlattices utilizing multiatomic steps and their transport properties

(多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子の作製とその伝導特性)

## 学位論文内容の要旨

現代電子産業の発展は半導体固体素子により支えられてきたといっても過言ではない。半導体固体素子は Si、GaAs などの半導体結晶により構成され、そのバンド構造を制御することにより実現されている。特に GaAs などの化合物半導体は幅広い材料選択性を有し、異なる半導体を接合したいわゆるヘテロ接合の作製が可能である。化合物半導体ヘテロ接合の作製には半導体エピタキシャル結晶成長技術が用いられる。中でも分子線エピタキシー(MBE)法、有機金属気相成長(MOVPE)法は、成長薄膜の膜厚制御性に優れており、原子層レベルで急峻なヘテロ接合界面の形成が可能である。また、このようなエピタキシャル結晶成長技術は、一次元方向のサイズを電子波長程度(ナノメートル・スケール)に制御した半導体超格子構造(SL)、量子井戸構造(QWL)、高電子移動度トランジスタ(HEMT)の実現が可能である。これらの構造中では電子が二次元的に振る舞うため、二次元電子系の物性やそのデバイス応用が盛んに研究されるようになり、既に半導体デバイスへの応用がなされている。

こうした中、さらに多次元方向へのナノメートル・スケール制御により実現される、量子細線構造(QWR)や量子ドット構造(QD)等の量子ナノ構造が注目されるようになった。その理由は、量子ナノ構造により様々な半導体デバイスの特性が飛躍的に向上することが理論的に予測されているためである。従来その作製は、一次元方向にサイズ制御された多層薄膜構造をエッチングなどの加工や微細電極からの電界による閉じ込めにより行われていたが、加工損傷や閉じ込め強さ並びにそのサイズ等の問題点を有していた。これらの問題点を改善する方法として、化合物半導体材料個々の性質の違いから、直接エピタキシャル結晶成長により量子ナノ構造を作製する、いわゆる「自己組織化」技術が近年盛んに研究されている。この技術は、単に結晶成長条件を制御することにより、ナノメートル・スケールの高均一・高密度構造を作製可能にする。

本論文では、量子ナノ構造の一つであるラテラル表面超格子構造を自己組織的に作製するため、エピタキシャル結晶成長中に形成される原子ステップを利用した新しいアプローチを試みている。ラテラル表面超格子構造は二次元電子に周期的変調を導入した構造である。具体的には、GaAs(001)面から僅かに傾斜した、いわゆる微傾斜 GaAs(001)基板に MOVPE 成長する際に自己組織的に形成される周期的な多段原子ステップ構造を用いる。その上に選択ドープ構造を形成することで、結晶成長技術のみでラテラル表面超格子構造を作製する。作製した構造の伝導特性の評価を行うと共に、量子効果デバイス応用への可能性も示している。本論文は 6 章から構成されている。以下に各章の要旨を示す。

第 1 章では、本研究の背景および目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第 2 章では、多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子構造の作製について述べている。まず、ラテラル表面超格子構造の概要についてふれ、続いて多段原子ス

トップ上に作製した n-AlGaAs/GaAs (GaAs SH)、n-AlGaAs/GaAs/AlAs/GaAs (GaAs DH)、n-AlGaAs/InGaAs/GaAs (InGaAs DH)、各構造を有するラテラル表面超格子の特徴について記した。続いて、試料作製に用いた MOVPE 法やリソグラフィ法、試料評価法について簡単に述べている。さらに、本方法で最も重要となる多段原子ステップ形成について、その形成モデル及び GaAs 多段原子ステップ形成結果について説明し、実験結果から成長表面には周期約 70nm の GaAs 多段原子ステップが形成されていることを示している。また GaAs DH や InGaAs DH を作製する際に重要となる GaAs 多段原子ステップ上の GaAs/AlAs ヘテロ構造及び InGaAs 薄膜を形成した結果についても述べており、成長膜厚や混晶組成比による多段原子ステップ形状の変化を比較している。

第 3 章では、作製したラテラル表面超格子構造の評価として、各構造の伝導特性について述べている。ラテラル表面超格子構造の伝導特性は、伝導方向に対する異方性や周期構造による電子波干渉効果が報告されている。ここではまず、予想される多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子構造の伝導特性を数値計算により示している。続いて、ステップに対して平行方向もしくは垂直方向へチャンネルを形成した試料を用い、移動度の電子密度依存性及びドレイン電流特性を測定した結果について述べている。測定した構造は、GaAs SH、チャンネル層厚 10nm、15nm の GaAs DH、共にチャンネル層厚 4nm の  $\text{In}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  DH 及び  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  DH である。その結果、全構造においてステップに平行方向の移動度が垂直方向より高いことを見だし、多段原子ステップによる電子系の変調を明らかにしている。特にチャンネル層厚 15nm の GaAs DH 及び  $\text{In}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$  DH では、ドレイン電流特性においても顕著な異方性が示され、電子系の大きな変調を推測している。また、ラテラル表面超格子内での電子波干渉効果について、均一性の高い多段原子ステップを有する GaAs SH 構造を用いて評価し、ステップ周期と電子波長との整合によるドレイン電流微分特性の振動を見いだしている。以上の結果により、多段原子ステップ構造が量子効果素子応用に有用であることを示している。

第 4 章では、ラテラル表面超格子構造が磁場印加中で示す磁気輸送特性について述べている。ラテラル表面超格子構造の磁気輸送特性においても、通常の二次元電子系とは異なる新たな磁気抵抗振動が報告されており、固体物理学上非常に興味深い。ここでは、それらの報告について簡単にまとめた後、各構造の磁気抵抗について測定した結果について述べている。特に InGaAs DH において、通常の二次元電子系では見られない大きな正磁気抵抗効果や、伝導方向に対する磁気抵抗異方性を確認している。さらに、これらの結果が電子系の周期的変調に起因することを明らかにし、多段原子ステップ程度の周期構造中での磁気輸送特性についての一つの解釈を示している。

第 5 章では、前章までに示したような多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子のポテンシャル変調の応用として、ナノメートル・スケールのポテンシャル変調を有する一次元電子系をスプリットゲート (SPG) 構造及びラップゲート (WPG) 構造を用いて試作し、その伝導特性を評価した結果について述べている。SPG 構造では、通常の一次元電子系の量子化コンダクタンスが変調されていることを見いだした。この結果は多段原子ステップにより変調された一次元チャンネルの伝導を示していると推測している。また WPG 構造では SPG 構造と異なり、単一電子輸送に起因するクーロン振動を見だし、結合量子ドット構造が形成できていることを示している。以上の結果から、多段原子ステップが低次元電子系実現に有用であることを示している。

第 6 章では、本論文の結論と今後の展望について述べている。

# 学位論文審査の要旨

主 査 教 授 福 井 孝 志  
副 査 教 授 雨 宮 好 仁  
副 査 教 授 長 谷 川 英 機  
副 査 助 教 授 本 久 順 一

## 学 位 論 文 題 名

### Fabrication of lateral surface superlattices utilizing multiatomic steps and their transport properties

(多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子の作製とその伝導特性)

現代電子産業の発展は半導体固体素子により支えられてきた。特にGaAsなどの化合物半導体は幅広い材料選択性を有し、異なる半導体を接合したヘテロ接合により、光・高周波素子を実現している。近年、電子をナノメートル・スケールの極微細構造中に閉じ込める量子ナノ構造を、半導体固体素子に利用することにより、素子特性の飛躍的向上等が理論的に予測され、その開発が盛んに試みられている。このような量子ナノ構造を作製する方法として、化合物半導体材料個々の性質の違いから、分子線エピタキシー(MBE)法、有機金属気相成長(MOVPE)法などのエピタキシャル結晶成長技術により直接量子ナノ構造を作製する、いわゆる「自己組織化」技術が近年盛んに研究・開発されている。この技術は、単に結晶成長条件の制御により、高均一・高密度の量子ナノ構造の作製を可能にする。

このような背景から、本論文は量子ナノ構造の一つであるラテラル表面超格子を、微傾斜GaAs(001)基板上にMOVPE成長中に自己組織的に形成される周期約70nmの多段原子ステップを利用して作製するという、新しいアプローチを試みているものである。ラテラル表面超格子は二次元電子に周期的変調を導入した構造であり、構造中での電子波長と構造周期の整合による電子波干渉効果や、磁場中における電子サイクロトロン直径と構造周期の整合による磁気抵抗振動が期待され、工学的・物理学的に非常に興味深い構造であり、構造周期がその特性を決定する重要な要素となる。本論文は6章から構成されており、以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景および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、多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子の作製について述べている。主として、多段原子ステップ上に作製したn-AlGaAs/GaAs (GaAs SH)、n-AlGaAs/GaAs/AlAs/GaAs (GaAs DH)、n-AlGaAs/InGaAs/GaAs (InGaAs DH)、各構造を有するラテラル表面超格子の特徴と、作製の際に最も重要となるGaAs多段原子ステップ形成およびGaAs多段原子ステップ上のGaAs/AlAsヘテロ構造及びInGaAs薄膜形成した結果について述べている。また、試料作製に用いたMOVPE法やリソグラフィ法、試料評価法

についても簡単に記している。

第3章では、作製したラテラル表面超格子の電気伝導特性について述べている。予想される、多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子の伝導特性を、数値計算により多段原子ステップの周期が有用であることを示している。続いて、ステップに対して平行および垂直方向へチャンネルを形成した試料を用い、電子移動度及びドレイン電流特性を測定している。その結果、ステップに平行方向の移動度が垂直方向より高いことを見いだし、多段原子ステップによる電子系の変調を明らかにしている。また、ラテラル表面超格子内での電子波干渉効果について、均一性の高い多段原子ステップを有するGaAs SH構造を用いて評価し、ステップ周期と電子波長との整合によるドレイン電流微分特性の振動を見いだししている。以上の結果により、多段原子ステップ構造が量子効果素子応用に有用であることを示している。

第4章では、ラテラル表面超格子構造が磁場印加中で示す磁気輸送特性について述べている。まず、これまでに報告されているラテラル表面超格子構造の磁気輸送特性について簡単にまとめた後、各構造の磁気抵抗について測定した結果について述べている。特にInGaAs DHにおいて、通常の二次元電子系では見られない大きな正磁気抵抗効果や、伝導方向に対する磁気抵抗異方性を確認しており、これらの結果が電子系の周期的変調に起因することを示している。

第5章では、多段原子ステップを利用したラテラル表面超格子の応用として、ナノメートル・スケールのポテンシャル変調を有する一次元電子系をスプリットゲート(SPG)構造及びラップゲート(WPG)構造を用いて作製し、その伝導特性を評価した結果について述べている。SPG構造では、通常の一次元電子系の量子化コンダクタンスが変調されていることを示しており、結果が多段原子ステップにより変調された一次元チャンネルの伝導を示していると推測している。またWPG構造ではSPG構造と異なり、単一電子輸送に起因するクーロン振動を見いだし、結合量子ドット構造が形成できていることを示している。以上の結果から、多段原子ステップが低次元電子系実現に有用であることを示している。

第6章では、本論文の結論と今後の展望について述べている。

これを要するに、著者は、化合物半導体表面に形成される多段原子ステップ構造をラテラル表面超格子に応用する独自の方法、およびその電気伝導ならびに磁気輸送特性に関し、有益ないくつかの新知見を得たものであり、結晶工学、半導体工学、量子物理学の進歩に対して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ものと認める。