

学位論文題名

Fabrication of self-organized quantum wires
using multiatomic steps and their application
to semiconductor lasers(多段原子ステップを用いた自己組織化量子細線
の作製およびその半導体レーザーへの応用)

学位論文内容の要旨

一次元周期ポテンシャル構造を有する半導体超格子構造が提案されて以来、化合物半導体を基本とした異種材料間接合(ヘテロ接合)構造により、その実現が行われてきた。これを可能にしたのは、分子線エピタキシー(MBE)法、有機金属気相成長(MOVPE)法に代表される化合物半導体材料のエピタキシャル結晶成長技術の発達であった。これらの結晶成長技術は、成長薄膜の膜厚制御性に優れており、一原子層もしくは一分子層レベルで急峻なヘテロ接合界面の形成を可能にする現代半導体産業における重要な基本技術の一つである。

化合物半導体デバイスは、その材料特性を活かし、通信・マルチメディアの各分野において広く応用されていることは周知の事実である。とりわけ、従来のシリコン系材料に比べて、可視光から赤外光領域まで広範囲に渡って極めて高効率で発光する特徴を有するため、半導体レーザー等の半導体光デバイスの分野において盛んに利用されている。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低次元量子閉じ込め構造(量子ナノ構造)を、このような半導体デバイスに利用することにより、デバイス特性の飛躍的向上等が理論的に予測され、その開発も盛んに試みられている。量子ナノ構造は従来、薄膜多層構造のエッチングやイオン注入技術により作製が行われてきたが、電子の閉じ込め領域に加工損傷を与える等の問題点を有していた。一方、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・開発されている。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、以上のような利点を持つ化合物半導体量子ナノ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。具体的には、通常の低ミラー指数を持つ GaAs(001)面からわずかに傾斜した、いわゆる微傾斜 GaAs(001)基板上に MOVPE 成長する際に自己組織的に形成される多原子層のステップ(多段原子ステップ)構造を用いて、電子の二次元閉じ込め構造である量子細線を作製している。構造の表面観察、光学的特性の評価を行うと共に、これらを活性層に有する半導体レーザーの試作にもはじめて成功している。本論文は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、半導体成長に用いた有機金属気相成長(MOVPE)装置、半導体表面の極微細構造の観察に用いた原子間力顕微鏡(AFM)装置、さらに、光学的特性評価に用いたフォトルミネセンス(PL)法、フォトルミネセンス励起(PLE)スペクトル測定法、磁場中におけるフォトルミネセンス(MPL)法等の各原理、および、サンプルの作製・測定条件について簡単に述べている。さらに、本研究で用いている微傾斜基板上において MOVPE 成長する際に形成される多段原子ステップについても述べている。

第 3 章では、はじめに微傾斜 GaAs(001)基板上に GaAs を MOVPE 成長し、GaAs 多段原子ステップ構造を自己組織的に形成した。実際に本研究で用いた微傾斜基板は、(001)面方向から[-110]方向に 2° ~ 6° 傾斜したものである。AFM による表面観察により評価を行った結果、成長表面には周期約 70nm の多段原子ステップが形成されていることが示されている。この構造を用いてさらに、電子の二次元閉じ込め構造である GaAs/AlGaAs 量子細線を作製し、多段原子ステップのステップ端において部分的に厚くなった構造を透過型電子顕微鏡観察により確認している。PL 法による光学的特性の評価および数値計算の結果、ステップ端で部分的に厚くなったことによる効果と量子細線としての二次元量子細線閉じ込め効果の両方により、PL スペクトルのピーク位置が低エネルギー側にシフトする効果を見いだしている。

第 4 章では、量子細線作製に用いる多段原子ステップの周期の均一性・直線性・連続性を制御する方法を議論している。具体的には、本章の前半において、単一量子井戸構造の下側障壁層として三元混晶の AlGaAs 薄膜の代わりに AlAs 薄膜を用いることにより、GaAs 表面に形成された均一な多段原子ステップ構造を保持する方法を紹介している。実際に AlAs 層は GaAs 表面に形成された多段原子ステップを AlGaAs 薄膜に比べ良好に踏襲しており、この方法により作製した GaAs 量子細線からの PL スペクトルにおいてもその半値幅が低減することが確認されている。後半では、ある周期の溝を成長前に微傾斜基板上に作製し、それをガイドとすることにより多段原子ステップ形成を制御する方法を紹介している。この方法により、基板上の溝の周期と同一の周期をもつ多段原子ステップを形成することに成功しており、直線性・連続性にも優れた構造を作製している。

第 5 章では、本研究で作製した量子細線構造を半導体レーザーへ応用することを念頭に置き、赤外波長領域で発光する InGaAs/GaAs 量子細線の作製を行った結果について述べている。この構造では、量子細線の障壁層として直接均一性の高い GaAs 多段原子ステップを用いることが可能である。はじめに、InGaAs と GaAs ではその格子定数の違いから歪みが生じるため、GaAs 多段原子ステップ上における InGaAs 薄膜の成長モード変化を AFM により評価している。基板傾斜角度、成長温度、成長時のアルシン分圧の制御により、多段原子ステップのステップ端から InGaAs の横方向成長により成長するモードから、ステップ端に三次元的に島状成長するモードへと制御できることが示されている。実際に多段原子ステップのステップ端から InGaAs の横方向成長により作製した量子細線を、磁場中における PL スペクトル測定等により光学的に評価を行い、量子細線における二次元閉じ込め効果の確認も行っている。また第 4 章で紹介した、加工微傾斜基板上に形成した多段原子ステップを用いた InGaAs 量子細線の作製も行っており、数十 μm の広範囲に渡って均一な発光を確認している。

第 6 章では、第 5 章で作製した InGaAs 量子細線を活性層に持つ PN 接合ダイオード・レーザーの試作を行った結果について述べている。作製した構造は、キャリアおよび光の閉じ込め層を別々に持つ SCH(separate confinement heterostructure)構造であり、{110}面の劈開端面を共振器のミラーに利用する標準的なファブリ・ペロータイプのレーザー・ダイオード(LD)である。はじめに、本研究におけるサンプル作製の手順を紹介した。電流注入によるエレクトロルミネセンス・スペクトルの測定結果と共に、液体窒素温度におけるパルス発振特性をはじめて観測した結果について述べている。

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

学 位 論 文 題 名

Fabrication of self-organized quantum wires using multiatomic steps and their application to semiconductor lasers

(多段原子ステップを用いた自己組織化量子細線
の作製およびその半導体レーザーへの応用)

化合物半導体デバイスは、その材料特性を活かし、通信・マルチメディアの各分野において広く応用され、とりわけ従来のシリコン系材料に比べて、可視光から赤外光領域まで広範囲に渡って極めて高効率で発光する特徴を有するため、半導体光デバイスの分野において盛んに利用されている。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低次元量子構造(量子ナノ構造)を、半導体デバイスに利用することにより、デバイス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、エピタキシャル結晶成長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。

このような背景をもとに本論文は、GaAs(001)面からわずかに傾斜した、いわゆる微傾斜 GaAs(001)基板上に有機金属気相成長(MOVPE)する際、自己組織的に形成される多原子層のステップ(多段原子ステップ)構造を利用して、電子の二次元閉じ込め構造である量子細線を作製する新しいアプローチを試みたものである。本論文は 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、半導体結晶成長に用いた MOVPE 装置、半導体表面の極微細構造の観察に用いた原子間力顕微鏡(AFM)、フォトルミネセンス(PL)法を基本とする光学的特性評価法について述べている。さらに、微傾斜基板上における多段原子ステップ形成について述べている。

第 3 章では、GaAs 多段原子ステップ構造を(001)面方向から[-110]方向に 2°~6°傾斜した基板上に形成し、量子細線への利用を試みている。均一性の高い多段原子ステップ

形成が安定になされ、かつ 7nm 程度のステップ高さが得られる 5°傾斜した微傾斜基板上に、GaAs/AlGaAs 量子細線を作製し、多段原子ステップのステップ端において部分的に厚くなった構造を、透過型電子顕微鏡観察により確認している。また PL 法による評価および計算の結果、量子細線としての二次元閉じ込め効果よりも、ステップ端で選択的に厚くなる効果が顕著に現れ、PL スペクトルのピーク位置が低エネルギー側にシフトする現象を見いだしている。

第 4 章では、多段原子ステップの周期均一性・直線性・連続性を制御する方法を議論している。前半では、単一量子井戸構造の下側障壁層として三元混晶の AlGaAs 薄膜に代わり AlAs 薄膜を用いることにより、GaAs 表面に形成された多段原子ステップ構造の均一性を保持する方法を試みている。AlAs 薄膜は GaAs 表面に形成された多段原子ステップを AlGaAs 薄膜に比べ良好に踏襲し、実際にこの方法により作製した GaAs 量子細線の PL スペクトルにおいても、その半値幅の低減が確認されている。後半では、ある周期の溝を成長前の微傾斜基板上に作製し、それをガイドとして多段原子ステップ形成の制御を試みている。これにより、基板上的溝の周期と同一の周期をもつ多段原子ステップの形成に成功しており、直線性・連続性にも優れた構造を作製している。

第 5 章では、歪み系材料である InGaAs 薄膜の、GaAs 多段原子ステップ上における成長モードを制御し、赤外波長域で発光する InGaAs/GaAs 量子細線の作製に関する結果を述べている。AFM 観察から、基板傾斜角度、成長温度、成長時のアルシン分圧の制御により、多段原子ステップのステップ端で三次元的な島状成長するモードから、InGaAs の横方向成長により成長するモードへと制御可能であることが示されている。実際に作製した InGaAs 量子細線を、磁場中における PL スペクトル測定等により光学的に評価し、量子細線における一次元性による効果を確認している。また加工微傾斜基板上に形成した多段原子ステップを用いた InGaAs 細線構造の試作も行っており、数十 μm の広範囲に渡って均一な発光が確認されている。

第 6 章では、第 5 章で作製した InGaAs 量子細線を活性層に持つ、PN 接合レーザーダイオード(LD)の作製に関して述べている。電流注入によるエレクトロルミネセンス・スペクトルの測定結果と共に、液体窒素温度におけるパルス発振特性を観測した結果について述べている。共振器方向が量子細線と垂直方向のとき、しきい値電流密度が量子井戸 LD よりも小さくなる効果を観測しており、多段原子ステップ上の量子細線を用いた量子細線レーザーの作製に初めて成功している。

第 7 章では、本論文の結論を述べている。

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量子ナノ構造に応用する独自の手法、およびその半導体レーザーへの応用に関し、有益ないくつかの新知見を得たものであり、半導体工学、結晶工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。