

学位論文題名

Fabrication and characterization of periodic semiconductor nano-structures on patterned vicinal substrates by metal-organic vapor phase epitaxial growth

(有機金属気相成長法による加工微傾斜基板上への
半導体周期ナノ構造の形成と評価)

学位論文内容の要旨

1971年に登場した超小型演算器「Intel(R) 4004」から始まった、汎用の情報処理能力を持つ演算器の開発競争と、それに平行して急速に発達したソフトウェア技術、そして近年の、冷戦終結による軍用システムとして構築された Internet の一般開放、高速通信技術の開発、携帯電話に代表される移動体通信網の普及などにより、世界中どこにいてもデジタル情報の受発信が可能となった。これらを支えるのは、半導体電子デバイス関連技術のたゆまぬ進展である。中でも、化合物半導体系の技術の進展は、その材料自体の特質から、特に通信分野で用いられる光・高周波デバイスにおいて性能の向上に大きな貢献をしている。化合物半導体は、材料の組み合わせにより、バンド構造をはじめとした多彩な特性を設計することができるという利点を持ち、有機金属気相成長法(MOVPE)や分子線エピタキシ法(MBE)などの結晶成長技術により、原子層での制御性で様々な化合物半導体を多層成長させることが可能である。ヘテロ接合が比較的容易に形成可能であるのは化合物半導体の特徴の一つである。近年、この成長技術を基礎としてナノスケールの微細構造を形成する試みが成されている。特に、量子サイズ効果が出現する領域にまで微細化を進めた、量子井戸(QWL)、量子細線(QWR)、量子箱(QD)構造は、既存のデバイスの性能を向上させるだけでなく、通常の電解効果トランジスタとは異なる特性を有する、新機能素子の基本構成要素としても重要であることが様々な検討から見いだされている。

これらの微細構造の形成手法としては、結晶成長装置により多層構造を形成した後にリソグラフィなどのプロセスを加えて加工する、Si系 MOS-FET で養われた技術を利用する手法の他に、結晶成長時の特異な原子の振る舞いを巧みに利用した自己組織化と呼ばれる手法がある。半導体ナノ構造の形成にあたっては、加工損傷、サイズの均一性、位置制御性、電子や正孔の閉じ込め強さなどが問題となってくるが、上記の方法で全ての問題を克服することは難しい。

本論文では、プロセス技術による加工と結晶成長中に生じる自己組織化とを組み合わせ、両者の特長を取り入れた半導体ナノ構造の形成手法を試みている。具体的には、GaAs(001)面からわずかに傾斜した、いわゆる微傾斜基板に結晶成長前に加工を施す。GaAs(001)微傾斜基板は、適切な条件で基板上に MOVPE 成長を行うと、自己組織的にある程度周期の整った多段原子ステップが形成される。このとき、基板表面に加工が施されていると、その加工パターンに応じて自己組織化によって形成されるナノ構造の形状や位置などが影響を受ける。たとえば、傾斜方向に垂直に周期的な溝を成長前に作製しておくと、その周期に等しい多段原子ステップが表面に形成される。その上に選択ドープ構造を作製することにより、量子ナノ構造の一つであるラテラル表面超格子構造を結晶成長中に作製することが可能である。また、多段原子ステップ構造上での成長速度の異方性を利用して量子細線構造を形成することが可能であるが、これは量子細線レーザーなどへの応用が期待される。

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、本研究の背景及び目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第2章では、半導体ナノ構造を形成する際に用いられる基礎技術と、その評価法について述べている。まず、本研究の基礎技術の一つである有機金属気相成長法の概略について述べ、他の結晶成長法と比較しながら、その特徴について触れた。続いて、プロセスによる直接加工法と成長中に生じる自己組織化による方法のそれぞれの概要について簡単に述べている。本研究で用いているステップパッチングと呼ばれる自己組織化については、その形成モデルについて説明した。これらに関連して、半導体ナノ構造の表面形状や光学特性などを明らかにする、各種評価技術についても述べた。

第3章では、半導体ナノ構造の基本構成要素の一つであり、量子細線構造の形成の下地としての利用も期待される、周期的多段原子ステップ構造の形成法について述べている。[-110]方向に2度ないし5度傾斜したGaAs(001)微傾斜基板に、[110]方向に $4.0\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$ 周期の溝をリソグラフィとウェットケミカルエッチングにより作製したものを成長基板とする。MOVPEにより、この基板上にGaAsもしくはAlGaAsを成長させると、先ほどのパターン周期と同じ周期を持つ多段原子ステップ構造が形成される。この多段原子ステップは、長周期のものと短周期のものとで形状が異なり、短周期になるにつれて、プロセスを施していないGaAs(001)微傾斜基板に形成させた多段原子ステップの形状の相似形に近づく事が明らかになった。また、GaAs / AlGaAs 多層構造を用いることで、加工微傾斜基板上で多段原子ステップ構造が形成される様子を追跡した。この表面構造上に、さらにAlGaAs / GaAs / AlGaAsのGaAs量子井戸構造を形成すると、ステップ端近傍で成長速度が速くなるために、量子細線状構造が形成される事を、走査電子顕微鏡による成長層の断面観察とカソードルミネッセンスにより確認した。以上の結果は、本研究の手法が、加工による位置制御や形状制御の利点を引き継ぎつつ、量子構造自体は加工を施した領域から離れた位置に形成されるため、加工損傷のない構造が形成可能であるという自己組織化の利点を十分に生かせることを示している。

第4章では、先に述べた周期的多段原子ステップ構造の形成法を応用した、自己組織化だけでは形成が難しい、周期的鱗構造(Square Scale Structure)の形成法について述べている。鱗構造とは、互いに交差したステップ構造により、正方形のテラスと2辺の多段原子ステップを持つものである。GaAs(001)微傾斜基板に、[-100]方向と[010]に $0.8\mu\text{m}\sim 0.4\mu\text{m}$ 周期の溝をリソグラフィとウェットケミカルエッチングにより作製したものを成長基板とする。MOVPEにより、この基板上にAlGaAsを成長させると、鱗構造が形成される。この表面構造上に、30%組成、及び15%組成のInGaAsを成長することで、鱗構造中の多段原子ステップ部分に、第3章と同じように成長膜厚が局所的に厚く成長する事が原子間力顕微鏡とカソードルミネッセンスにより確認した。以上の結果は、本研究の半導体ナノ構造形成手法が、比較的単純な構造である周期的多段原子ステップだけでなく、複雑な構造を形成可能である事を示している。

第5章では、周期的多段原子ステップ構造上にヘテロ接合を用いて作製した、周期的ポテンシャル変調構造の電気的特性について述べている。本研究での構造は、空乏層の利用や光励起などによる周期的ポテンシャル変調構造と比較して、大きなポテンシャル変調を持っている。 $0.4\mu\text{m}$ 周期多段原子ステップ上にAlGaAs / GaAs / AlGaAsのGaAs量子井戸構造を形成すると、30meV近いポテンシャル変調を持つ表面超格子構造を得られる。この上に選択ドープ構造を形成し、一般的に用いられるHall-bar形状にリソグラフィとウェットケミカルエッチングで加工した上で、電極を蒸着形成し、FET構造とした。このFETは、電流方向に対してチャンネル中の多段原子ステップが平行なものと垂直なものの2種類を用意した。電流方向に対してチャンネル中の多段原子ステップが平行なFETは、ゲート電圧に対するソース-ドレイン電流の変化が通常のFETに非常に似ているのに対し、電流方向に対してチャンネル中の多段原子ステップが垂直なFETは、ゲート電圧に対して46mV周期で明瞭な電流振動が現れた。また、磁気抵抗特性においても、通常の2DEG系で見られるようなSdH振動が観測されず、大きな正磁気抵抗が現れることが明らかになった。

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 and characterization of periodic semiconductor nano-structures on patterned vicinal substrates by metal-organic vapor phase epitaxial growth

(有機金属気相成長法による加工微傾斜基板上への
半導体周期ナノ構造の形成と評価)

化合物半導体関連の技術の進展は、その材料自体の特質から、特に通信分野で用いられる光・高周波デバイスにおいて性能の向上に大きな貢献をしている。化合物半導体は、材料の組み合わせにより、バンド構造をはじめとした多彩な特性を設計することができるという利点を持ち、有機金属気相成長法(MOVPE)や分子線エピタキシ法(MBE)などの結晶成長技術により、原子層での制御性で様々な化合物半導体を多層成長させることが可能である。近年、この化合物半導体の結晶成長技術を基礎としてナノスケールの微細構造を形成する試みが成されている。特に、量子サイズ効果が出現する領域にまで微細化を進めた、量子井戸(QWL)、量子細線(QWR)、量子箱(QD)構造は、既存のデバイスの性能を向上させるだけでなく、通常の電界効果トランジスタとは異なる特性を有する、新機能素子の基本構成要素としても重要であることが様々な検討から見いだされている。これらの半導体ナノ構造の形成にあたっては、加工損傷、サイズの均一性、位置制御性、電子や正孔の閉じ込め強さなどが問題となってくるが、上記の方法で全ての問題を克服することは難しい。

本論文では、プロセス技術による加工と結晶成長中に生じる自己組織化とを組み合わせ、両者の特長を取り入れた半導体ナノ構造の形成手法を試みている。具体的には、GaAs(001)面からわずかに傾斜した、いわゆる微傾斜基板に結晶成長前に加工を施す。GaAs(001)微傾斜基板は、適切な条件で基板上に MOVPE 成長を行うと、自己組織的にある程度周期の整った多段原子ステップが形成される。このとき、基板表面に加工が施されていると、その加工パターンに応じて自己組織化によって形成されるナノ構造の形状や位置などが制御される。

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、本研究の背景及び目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第2章では、半導体ナノ構造を形成する際に用いられる基礎技術と、その評価法について記した。

第3章では、半導体ナノ構造の基本構成要素の一つであり、量子細線構造の形成の大地としての利用も期待される、周期的多段原子ステップ構造の形成法について述べた。 $[-110]$ 方向に傾斜した GaAs(001)微傾斜基板に、 $[110]$ 方向に周期的な溝をパターンニングしたものを成長基板とする。MOVPEにより、この基板上に GaAs もしくは AlGaAs を成長させると、先ほどのパターン周期と同じ周期を持つ多段原子ステップ構造が形成される。この多段原子ステップは、長周期のものと短周期のものとの形状が異なる事が明らかになった。同時に、加工微傾斜基板上で多段原子ステップ構造が形成される様子も追跡した。この表面構造上に、さらに AlGaAs / GaAs / AlGaAs の GaAs 量子井戸構造を形成すると、ステップ端近傍で成長速度が速くなるために、量子細線状構造が形成される事を確認した。以上の結果は、本研究の手法が、加工による位置制御や形状制御の利点を引き継ぎつつ、量子構造自体は加工を施した領域から離れた位置に形成されるため、加工損傷のない構造が形成可能であるという自己組織化の利点を十分に生かせることを示している。

第4章では、先に述べた周期的多段原子ステップ構造の形成法を応用した、自己組織化だけでは形成が難しい、周期的鱗構造(Square Scale Structure)の形成法について述べた。鱗構造とは、互いに交差したステップ構造により、正方形のテラスと2辺の多段原子ステップを持つものである。GaAs(001)微傾斜基板に、 $[-100]$ 方向と $[010]$ に $0.8\mu\text{m} \sim 0.4\mu\text{m}$ 周期の溝をリソグラフィとウェットケミカルエッチングにより作製したものを成長基板とする。MOVPEにより、この基板上に AlGaAs を成長させると、鱗構造が形成される。この表面構造上に InGaAs を成長することで、鱗構造中の多段原子ステップ部分に、第3章と同じように成長膜厚が局所的に厚く成長する事を確認した。以上の結果は、本研究の半導体ナノ構造形成手法が、比較的単純な構造である周期的多段原子ステップだけでなく、複雑な構造を形成可能である事を示している。

第5章では、周期的多段原子ステップ構造上にヘテロ接合を用いて作製した、周期的ポテンシャル変調構造の電気的特性について述べた。本研究での構造は、空乏層の利用や光励起などによる周期的ポテンシャル変調構造と比較して、ヘテロ閉じ込め構造による大きなポテンシャル変調を持っている。本構造上に選択ドープ構造を形成し、一般的に用いられる Hall-bar 形状に加工した上で、電極を蒸着形成し、FET 構造とした。電流方向に対してチャンネル中の多段原子ステップが平行な FET は、ゲート電圧に対するソース-ドレイン電流の変化が通常の FET に非常に似ているのに対し、電流方向に対してチャンネル中の多段原子ステップが垂直な FET は、ゲート電圧に対して 46mV 周期で明瞭な電流振動が現れた。また、磁気抵抗特性においても、通常の 2DEG 系で見られるような SdH 振動が観測されず、大きな正磁気抵抗が現れることが明らかになった。

第6章では、本論文の結論と今後の展望について述べた。

これを要するに、本論文は、結晶成長時の自己組織化とプリプロセスによる化合物半導体ナノ構造の形成手法について、その有用性を示すものであり、半導体工学の進歩への貢献が認められる。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。