

学位論文題名

Formation of InGaAs Quantum Structures by Molecular Beam Epitaxy and Control of Their Surfaces

(分子線エピタキシー法によるインジウム
ガリウムヒ素量子構造の形成とその表面制御)

学位論文内容の要旨

現代情報化社会において、半導体集積回路の果たしてきた役割は非常に大きい。それだけに、半導体集積回路に対する社会的要求は、将来、量的にも質的にもこれまで以上に大きくなると予想される。現在の集積回路の基本素子であるトランジスタの動作原理は、多数の電子の運動が、その古典力学的「粒子」としての運動の平均値で代表でき、古典的なドリフト-拡散方程式で記述できる事を物理的基礎としている。しかしながら、集積回路の高密度化・微細化をさらに進め、素子寸法が電子の波長(~ 10 nm)と同程度になると、電子の量子力学的「粒子-波動」2重性が顕著となり、古典力学的描像は成り立たなくなる。この領域では、電子の運動はシュレーディンガーの波動方程式に従い、量子力学的な効果が支配的となる。このため、既存の素子は、もはや満足に動作しなくなる。そのため、更なる高密度化・微細化を達成するためには、量子力学的効果を基本素子の動作原理に積極的に取り入れた、新たな「量子デバイス」を構築する必要がある。

量子デバイスを構築するために、既存の技術に加えて達成しなければならない重要な技術的課題として、量子効果素子の基本構造である、量子細線・量子箱構造の形成および量子構造の表面制御があげられる。すなわち、量子構造では寸法自体が原子数十~数百個程度であるため、原子オーダーの形状・寸法の制御が必要となる。さらに、化合物半導体表面には、高密度の表面準位が存在し、フェルミ準位のピンニング現象を引き起こすことが知られている。ことに量子構造では、相対的に表面・界面の占める割合が増大し、従来以上に表面・界面の重要性が増大する。

このような背景をもとに本論分は、量子材料として有望であるInGaAsから成る量子構造を分子線エピタキシー(MBE)法を用いて形成し、さらに、シリコン超薄膜界面制御層(Si ICL)を用いる新しい表面制御法により、形成した量子構造の表面制御を試みたものである。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、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第2章は、まず章の前半において、本論文での量子構造形成の試みを、従来行われてきた試みと比較しつつ、概観している。具体的には、量子構造形成手法として、リソグラフィ技術に基づく方法および選択的結晶成長法に基づく方法の2通りの手法が説明されている。前者は、従来の集積回路技術の応用であり、後者は半導体結晶成長のみによって量子構造を形成する新しい手法である。本章の後半では、量子構造の

界面制御法として、シリコン超薄膜界面制御層(Si ICL)を用いた界面制御法の基本的概念について説明している。まず、表面・界面準位が従来の素子および量子効果素子に及ぼす影響とその起源に関するモデルが議論されている。次に、適切な超薄膜界面制御層を設計・導入し、半導体から絶縁体への遷移を原子レベルで滑らかにする界面制御層の概念が説明されている。さらに、界面制御層としては、Si系絶縁膜との相性の観点から、Siが適切であることを指摘している。

第3章では、本研究で用いた実験装置と方法について述べている。量子構造形成、その表面制御プロセスおよびその“その場(in-situ)”評価には、超高真空試料作製評価システムが用いられた。このシステムでは、MBE装置、電子線(EB)描画装置、光励起化学気相堆積(光CVD)装置、光電子分光(XPS)装置等が、超高真空搬送チェンバで接続されている。量子構造の物性評価には、フォトルミネッセンス(PL)法、カソードルミネッセンス(CL)法、縦磁気抵抗測定も用いられている。

第4章では、Si ICLを用いた表面制御技術を、加工による量子構造形成における最も重要な技術的課題である、加工表面の制御へ応用した結果について述べている。まず最初に、本章では、加工表面の評価法の検討を行った。従来のPLによる加工表面の評価手法では、表面再結合速度が一定であるという単純化されたモデルにその基礎をおいていたが、加工表面の状態を正しく評価するためには、表面準位を介する表面再結合が励起光強度に強く依存する事を考慮する必要がある事が指摘されている。この事は、加工により形成したInGaAs細線の表面特性、および、Si ICLにより表面制御された細線の表面特性の評価に適用された。その結果、Si ICLを用いた表面制御を施した細線において、表面準位の影響の低減が見られ、Si ICLを用いた表面制御技術が、加工により形成した量子構造の加工表面の制御に有効であることが示された。

第5章では、量子構造形成の新しいアプローチとして、MBE選択成長法を検討している。様々な加工を表面に施したInP基板の上に、InGaAsおよびInAlAsのMBE成長を行い、加工基板における成長様式、成長機構、成長の選択性を詳細に調べている。また、これらの知見を基に、実際に、ナノメーターサイズの「三角形」および「やじり形」の2種類のInGaAs量子細線構造を形成することに成功した。

第6章では、第5章で述べた2種類のInGaAs量子細線の光学的・電気的特性を検討した結果について述べている。どちらのInGaAs量子細線ともに、良好な光学特性を示し、MBE選択成長法により、良好な結晶性およびヘテロ界面特性を有するInGaAs量子細線が形成可能であることが示された。特に、「やじり形」のInGaAs量子細線は、室温においてなお強いPL発光を示し、また、4Kにおける縦磁気抵抗測定において、明瞭なシュブニコフ・ド・ハース振動が観測されたこと等から、極めて高品質な量子細線が実現されていることが確認された。また、シュブニコフ・ド・ハース振動の測定から、1次元量子閉じ込め効果の存在が明確に示された。

第7章では、Si ICL界面制御技術の化合物半導体量子構造への応用を検討した結果について述べている。表面近傍に形成した「やじり形」InGaAs量子細線では、細線と表面の距離 t_{ws} が10nm以下になると、細線からのPL強度が指数関数的に減少することを観測した。この現象は量子準位と表面準位との相互作用によるものであることを明らかにし、Si ICLを用いた界面制御技術を適用した表面不活性化により、このPL強度の減少を完全に回復することに初めて成功した。具体的には、 t_{ws} が0の時、約1/250倍まで減少したPL強度を完全に回復させている。

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	雨宮	好仁
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 of InGaAs Quantum Structures by Molecular Beam Epitaxy and Control of Their Surfaces

(分子線エピタキシー法によるインジウム ガリウムヒ素量子構造の形成とその表面制御)

半導体集積回路の高密度化・高性能化を可能にしてきたのは、主として微細加工技術の進歩である。しかしながら、21世紀の初頭には、この微細化にもとづく改善が本質的な限界をむかえると予想されている。これは、デバイス寸法が電子の波長と同程度となると、電子の量子力学的性質、すなわち、「粒子-波動」2重性が顕著となり、電子を古典的「粒子」として扱う既存のデバイスがもはや満足に動作しなくなるためである。この限界を乗り越える一つの有力な方策は、極微細な構造で強く発現する量子力学的効果を基本素子の動作原理に積極的に取り入れた、新たな「量子デバイス」を構築することである。これにより、更なる高密度化・微細化を達成することが期待できる。

しかしながら、量子デバイスを構築するためには、達成しなければならない技術的課題がなお幾つか存在する。まず、量子デバイスの基本構造である量子細線および量子箱構造の寸法は原子数十～数百個程度であり、そこで発現する量子力学的効果の詳細は構造の形状・寸法に強く依存する。そのため、原子的レベルで形状・寸法が制御された量子構造を形成することが必要となる。さらに、化合物半導体表面には、一般に、高密度の表面準位が存在しており、表面準位に起因するフェルミ準位のピンニング現象や表面準位を介したキャリアの漏洩等がデバイスの正常動作を妨げることが知られている。ことに量子構造においてはその寸法が極めて微細であり、従来以上に表面・界面の重要性が増大する。そのため、量子構造の表面・界面の制御は量子デバイスの構築のために本質的に重要である。

このような背景をもとに、本論文は、量子デバイスの材料として有望なインジウムリン(InP)系インジウムガリウムヒ素(InGaAs)ヘテロ接合系を取り上げ、すぐれた量子構造を分子線エピタキシー(MBE)法を用いて形成する方法、および、形成された量子構造の表面を制御する方法について研究を行ったものである。本論文は8章から構成されている。以下に、各章の概要を示す。

第1章は序論であり、本研究の歴史的背景と目的および各章の概要を述べている。

第2章では、まず量子構造形成に従来用いられてきた手法を概観するとともに、本研究で用いた量子構造形成法を述べている。次に、本研究で用いたシリコン超薄膜界面制御層(Si ICL)による量子構造の表面・界面制御の原理を、表面・界面準位の起源に関するモデルに基づき説明している。

第3章では、本研究で用いた実験装置および実験方法を説明している。ことに、量子構造形成、その表面制御プロセスおよびプロセスの“その場(in-situ)”評価を、半導体表面を大気にさらすことなく、全て超高真空中で一貫して行うことを可能とした超高真空試料作製評価システムに関する説明がなされている。

第4章では、量子井戸に微細加工を加え量子構造を形成する際の最大の技術的課題である加工端面の制御に、Si ICLを用いたパッシベーション技術を適用することを検討している。まず、InP基板上にMBE成長したInGaAs量子井戸に電子線リソグラフィによる微細加工を施し、InGaAs量子細線を準備し、その光学特性を調べている。その結果、加工端面における損傷のために量子細線からのホトルミネセンス(PL)発光効率が低いこと、および、Si ICLを用いて加工端面のパッシベーションを行うと、発光効率はかなり改善できることを示した。また、PLによる従来の加工端面の評価法に問題があることを指摘し、新たにPL発光効率の励起光強度依存性に基づく加工端面の評価法を提案している。

第5章では、InGaAs量子構造形成のアプローチとして、加工基板上へのMBE選択成長法を検討している。様々な結晶方位に沿った線状あるいは四角形状のメサ加工を表面に施したInP基板上に、InGaAsおよびインジウムアルミニウムヒ素(InAlAs)のMBE成長を行い、加工基板上での成長様式、成長機構、成長の選択性、および、得られる構造の均一性を詳細に検討している。また、これらの知見をもとに、実際に、ナノメートルサイズのInGaAs量子細線および量子箱の形成に成功している。

第6章では、上述のInGaAs量子構造のうち、線状のメサパターン上に形成された「三角形」および「やじり形」の2種類のInGaAsリッジ量子細線について、その光学的特性・電子輸送特性を検討している。その結果、これらの2種類のInGaAsリッジ量子細線が、良好な結晶性・ヘテロ界面特性を有し、さらに、強いキャリアの1次元閉じ込め効果を示すことを明らかにしている。

第7章では、Si ICLを用いた表面パッシベーション技術を表面近傍に形成した「やじり形」InGaAsリッジ量子細線の表面制御に適用することを検討している。まず、量子細線と表面の距離 t_{ws} が10nm以下になると量子細線からのPL強度が指数関数的に減少すること、および、この現象は量子準位と表面準位との相互作用によるものであることを明らかにしている。さらに、Si ICLを用いた界面制御技術を適用した表面不活性化により、このPL強度の減少を完全に回復することに初めて成功している。

第8章では、本研究の成果を総括している。

これを要するに、著者は、化合物半導体量子構造の形成法および量子構造表面の制御法に関し系統的検討を加え、いくつかの有益な知見を得たものであり、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ものと認める。