

学位論文題名

Fabrication of GaAs Quantum Dots by Selective Area Metalorganic Vapor Phase Epitaxy and Their Application to Quantum Effect Devices

(有機金属気相選択成長によるガリウム砒素量子ドットの作製とその量子効果素子への応用)

学位論文内容の要旨

近年の微細加工技術の急速な発展により、半導体をナノメートルスケールで加工および制御する事が可能になりつつある。このような技術により、電子を半導体極微小領域に閉じ込めた場合、電子の量子力学的な「粒子性」と「波動性」が現れ、これらの2つの性質を巧みに利用した量子波動素子、あるいは電子1個1個を操作する単電子素子等の新しい機能を持つデバイス実現への道が開かれる。また、これらのデバイスの基本素子となるべき、量子細線や量子ドットなどの低次元量子構造を活性層に利用したレーザーにおいては、従来のレーザーに比べてしきい値電流の低減など様々な特性の飛躍的向上が理論的にも予測されている。しかしながら、従来までの微細加工技術による作製法では、電子や正孔の閉じこめ領域となる活性層部を直接加工するため、物理的な損傷等の影響による空乏領域のひろがりなどが、ナノメートルサイズのデバイスの正常動作を妨げる恐れがある。また、室温動作する量子デバイスを実現するためには、加工ダメージのないナノスケールでの加工精度が必要となり、電子の低次元性の特長を最大限生かすためには、ダメージフリーであるとともに、個々のサイズの均一性が非常に重要となってくる。

これらの構造実現のために、半導体の結晶成長技術を巧みに利用し量子細線や量子ドットを作製する方法が非常に有望である。結晶成長を利用して構造を作製するため、活性層にプロセス等による加工損傷や汚染がなく、また、結晶成長の自己組織化を利用することでナノメートルサイズの構造が容易に作製できる事が知られている。しかしながら、これら量子構造の位置やサイズの制御が困難でありデバイス作製の際、さらなる改善が必要とされる。

本論文では、従来までの半導体プロセス技術と半導体結晶成長法である有機金属気相成長法(MOVPE)を組み合わせた、有機金属気相選択成長により量子細線や量子ドットなどの低次元量子構造を作製し、作製した構

造のデバイス応用を試みるものである。具体的には、この選択成長の成長機構の解明をおこない、構造作製のための最適な成長条件を明らかにし、ナノメートルサイズのガリウム砒素(GaAs)量子ドット構造作製技術を確立した。また、選択成長により作製した量子ドットを単一電子素子へと応用しその特性を評価するとともに、本方法による低次元量子構造作製の優位性も示している。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章では、低次元量子構造を作製するためのMOVPE選択成長に用いる、マスク基板の作製プロセス、MOVPE選択成長時に現れる特徴的な結晶面であるファセットについて述べている。また、成長機構のマスク形状や成長条件の依存性についても述べている。

第3章では、特定のマスク形状や成長条件を適切に選択することにより、ファセットに囲まれた微細構造が成長を続けても、そのサイズや形状を維持し、かつ非常に均一となる、MOVPE選択成長の自己停止機構について述べている。この成長の自己停止機構を利用し作製した量子ドット構造を光学的に評価した結果にも言及し、本方法による低次元量子構造作製の可能性について述べている。

第4章では、第2章および第3章の結果に基づき、MOVPE選択成長により作製した量子ドットのデバイス応用に向けて、量子ドットを量子細線により結合した量子ドットネットワーク構造の作製について述べている。このような結合系の量子ドットを作製する事は、将来の単電子デバイスや単電子メモリを集積化する上で、非常に重要である。本章では、この結合系のGaAs量子ドットの成長機構を考察し、作製法の確立を行っている。また、光学的な手法により電子状態を解明し、単電子トランジスタ等のデバイス応用の可能性について述べている。

第5章では、MOVPE選択成長により、量子ドットと量子細線がトンネル障壁を介して結合した、単電子トランジスタ構造の作製法について述べている。マスク形状を工夫し様々なファセットを利用することで、電子の通り道であるチャネルの幅を周期的に変化させている。この構造をゲート制御することで単電子トランジスタの作製に成功した。本章では、このデバイスプロセス、および作製したデバイスの電気的特性、さらにはMOVPE選択成長法の優位性についても述べている。

最後に第6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 GaAs Quantum Dots by Selective Area Metalorganic Vapor Phase Epitaxy and Their Application to Quantum Effect Devices

(有機金属気相選択成長によるガリウム砒素量子ドットの作製とその量子効果素子への応用)

近年の微細加工技術の急速な発展により、半導体をナノメートルスケールで加工および制御する事が可能になりつつある。このような技術により、電子を半導体極微小領域に閉じ込めた場合、電子の量子力学的な「粒子性」と「波動性」が現れ、これらの2つの性質を巧みに利用した量子波動素子、あるいは電子1個1個を操作する単電子素子等の新しい機能を持つデバイス実現への道が開かれる。また、これらのデバイスの基本素子となるべき、量子細線や量子ドットなどの低次元量子構造を活性層に利用したレーザーにおいては、従来のレーザーに比べてしきい値電流の低減など様々な特性の飛躍的向上が理論的にも予測されている。しかしながら、従来までの微細加工技術による作製法では、電子や正孔の閉じこめ領域となる活性層部を直接加工するため、物理的な損傷等の影響による空乏領域の広がりなどが、ナノメートルサイズのデバイスの正常動作を妨げる恐れがある。また、室温動作する量子デバイスを実現するためには、加工ダメージのないナノスケールでの加工精度が必要となり、電子の低次元性の特長を最大限生かすためには、ダメージフリーであるとともに、個々のサイズの均一性が非常に重要となってくる。

これらの構造実現のために、半導体の結晶成長技術を巧みに利用し量子細線や量子ドットを作製する方法が非常に有望である。結晶成長を利用して構造を作製するため、活性層にプロセス等による加工損傷や汚染がなく、また、結晶成長の自己組織化を利用することでナノメートルサイズの構造が容易に作製できる事が知られている。しかしながら、これら量子構造の位置やサイズの制御が困難でありデバイス作製の際、さらなる改善が必要とされる。

本論文では、従来までの半導体プロセス技術と半導体結晶成長法である有機金属気相成長法(MOVPE)を組み合わせた、有機金属気相選択成長により量子細線、量子ドット等の低次元量子構造を作製し、さらにデバイスへの応用を試みたものである。具体的には、この選択成長の成長機構の解明をおこない、構造作製のための最適な成長条件を明らかにし、ナノメートルサイズのガリウム砒素(GaAs)量子ドット構造作製技術を確立している。また、選択成長により作製した量子ドットを単電子素子へと応用しその特性を評価するとともに、本方法による低次元量子構造作製の優位性も示している。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、低次元量子構造を作製するために MOVPE 選択成長に用いる、マスク基板の作製プロセス、MOVPE 選択成長時に現れる特徴的な結晶面であるファセットについて述べている。また、成長機構のマスク形状や成長条件の依存性についても述べている。

第3章では、特定のマスク形状や成長条件を適切に選択することにより、ファセットに囲まれた微細構造が成長を続けても、そのサイズや形状を維持しかつ非常に均一となる、MOVPE 選択成長の自己停止機構について述べている。この成長の自己停止機構を利用し作製した量子ドット構造を光学的に評価した結果にも言及し、本方法による低次元量子構造作製の可能性について述べている。

第4章では、第2章および第3章の結果に基づき、MOVPE 選択成長により作製した量子ドットのデバイス応用に向けて、量子ドットを量子細線により結合した量子ドットネットワーク構造の作製について述べている。このような結合系の量子ドットを作製する事は、将来の単電子デバイスや単電子メモリを集積化をする上で、非常に重要である。そして、この結合系の GaAs 量子ドットの成長機構を考察し、作製法の確立を行っている。また、光学的な手法により電子状態を解明し、単電子トランジスタ等のデバイス応用の可能性について述べている。

第5章では、MOVPE 選択成長により、量子ドットと量子細線がトンネル障壁を介して結合した、単電子トランジスタ構造の作製法について述べている。マスク形状を工夫し様々なファセットを利用することで、電子の通り道であるチャネルの幅を周期的に変化させている。この構造をゲート制御することで単電子トランジスタの作製に成功している。そして、このデバイスプロセス、および作製したデバイスの電気的特性、さらには MOVPE 選択成長法の優位性についても述べている。

最後に第6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、半導体結晶成長技術の一つである、有機金属気相選択成長を用いて半導体極微細構造を作製し、形成過程、光学的評価を詳細に調べ、単電子トランジスタ等へ素子応用し有益ないくつかの新知見を得たものであり、半導体結晶成長、評価、素子応用といった一連のプロセスにおいて電子情報工学、特に半導体新機能素子の研究分野の進展に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。