

学位論文題名

Control of Metal/Ⅲ-V Compound Semiconductor Interfaces
and Its Application to Quantum Effect Devices

(金属/Ⅲ-V族化合物半導体界面の制御とその量子効果デバイスへの応用)

学位論文内容の要旨

近年、半導体集積回路の集積度は増し個々の素子は極めて小さくなってきているが、これに伴い半導体中の電子輸送を支配する物理が古典力学から量子力学に移行しつつあり、既存の半導体デバイスの物理的限界が見え始めている。これを打破するためには、量子力学に基づく新たな半導体量子効果デバイスの実現が必須である。

半導体デバイスは、素子中のポテンシャルを制御することにより電子の動きを巧みに制御し、様々な動作を実現している。このポテンシャルは半導体と様々な材料の界面によって実現されるが、中でも金属/半導体界面は、接合界面にショットキー障壁と呼ばれる大きなポテンシャル障壁を形成するため、半導体デバイスを構成する上で重要な要素となっている。しかし量子効果デバイスにおいては、量子力学に支配されたより少数の電子の動きを制御するため、これまでより精密でかつ極微小領域でのポテンシャル制御が必要である。Ⅲ-V族化合物半導体は良好なヘテロ接合が形成できるなど、量子効果デバイスの実現に有利な特質を有し、かつ金属/Ⅲ-V族化合物半導体界面は非常に有効なポテンシャル障壁を形成する。しかしながらその障壁高さは「フェルミ準位のピンニング現象」により一般に制御が困難であり、また、量子構造を実現するにも、従来より用いられているⅢ-V族化合物半導体ヘテロ構造表面に微細なショットキーゲートを配置してポテンシャルを制御するスプリットゲート法では電子の閉じ込めポテンシャルが弱く、デバイス動作は極低温に限られる。ショットキー障壁を利用した量子効果デバイスの実用化には、系統的な障壁高さ制御の手法と新たな量子構造を見いだすことが必要である。

本論文では、金属/Ⅲ-V族化合物半導体界面制御法を理論的かつ実験的に検討し、さらに界面制御された金属/半導体接合を用いた新たな量子構造を見だし、これらを量子効果デバイスに応用することを試みるものである。具体的には、接合界面の諸特性の詳細な分析・評価・理論解析を行い、界面制御層を金属/半導体界面に挿入する方法および電気化学プロセスにより理想的な金属/半導体接合を形成する二つの方法を検討し、化合物半導体ショットキー障壁高さの制御方法を確立している。また、ショットキー接合を用いた新たな化合物半導体量子構造を提案・実現し、その有用性を明らかにした。本論文は10章より構成されており、以下に各章の要旨を示す。

第1章では、本研究の背景と目的を述べると共に、各章の概要を記した。

第2章では、金属/半導体界面制御の基礎となるショットキー障壁の形成モデルと、

実験的に形成した金属／半導体界面の評価に用いた電氣的評価法、光電子分光法の原理および測定法について説明している。さらに本研究に用いた、半導体成長から金属堆積まで試料を大気にさらさず形成評価が可能な超高真空試料作製評価システム、量子効果デバイス作製評価に用いた電子線露光装置および電氣的評価システムなどについて概説している。

第3章では、金属／Ⅲ-V族化合物半導体界面制御方法について理論的検討を行っている。その方法として、理想的な金属／半導体界面を形成する方法と金属／半導体界面に界面制御層と呼ばれる極薄い層を挿入する方法を取り上げ、統一DIGS (Unified Disorder-Induced Gap State)モデルおよびポテンシャル計算によりこれら障壁高制御手法の可能性を議論している。

第4章では、界面制御層によるショットキー障壁高制御に関し、実験的に界面制御層を最適化した結果を述べている。金属／化合物半導体界面に様々な界面制御層を挿入した試料を作製し、界面の化学的状態、ショットキー障壁高さの変化および電流輸送特性について検討を行った。得られた結果を総合的に判断し界面制御層として超薄膜シリコン層が最適であると結論している。

第5章では、界面制御層として超薄膜シリコン界面制御層(Si ICL)を用い化合物半導体ショットキー障壁高さ制御を試みた結果を述べている。Si ICLの膜厚を変化させたときのショットキー障壁高さの振る舞いと理論計算との比較により、Si ICLは化合物半導体に疑似格子整合する必要があることを示した。また以上の条件を満たした状態では、Si ICL中の不純物電荷量を制御することにより、GaAsおよびInPショットキー障壁高さを300meV以上の広範囲にわたり精密に制御できることを明らかにした。

第6章では、電気化学プロセスによる金属／半導体界面形成方法について述べている。この界面形成方法では、低エネルギーでダメージの少ない理想的な界面が形成でき、そのためフェルミレベルのピンニングが緩和され、ショットキー理論に基づく障壁高さ制御が可能であることが実験的に示されている。

第7章では、Si ICL界面制御技術を表面超格子量子効果デバイスに応用した結果について述べている。表面超格子は化合物半導体ヘテロ構造表面より周期ポテンシャルを導入し、ヘテロ界面に形成される電子波に干渉を起こさせるものであるが、ここではポテンシャル変調法としてSi ICLにより障壁高さ制御された2種類のショットキー接合を周期的に配置する方法を試みた。この手法により実現した素子の電流－電圧特性に量子効果に基づくコンダクタンス振動特性を観測し、本手法により効果的な周期ポテンシャルがヘテロ界面に導入されていることを確認した。

第8章では、ショットキー接合を用いた新しい量子構造として、ショットキーインプレーンゲートおよびラップゲート構造を取り上げ、電子線誘起電流(EBIC)法によるポテンシャル評価を通して、これらの手法による量子構造実現の有効性について述べた。Ⅲ-V族化合物半導体においてはEBICは素子中の電界を反映するため、EBIC法によりポテンシャル形状を直接的に評価できることを示し、さらにショットキーインプレーンおよびラップゲート構造を用いて作製した様々な量子構造に対しEBIC法を適用し、構造中のポテンシャルを直接的に検出することに成功した。

第9章では、ショットキーインプレーンゲートによる単一および多重量子ドット単電子トランジスタを作製評価した結果について述べている。作製した素子は単電子輸送効果に基づく明瞭なコンダクタンス振動特性を示し、またその動作温度が従来のスプリットゲート形による単電子デバイスよりも非常に高く、本研究で取り上げた構造が単電子デバイスの実現に有効であることを明らかにしている。

第10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 福 井 孝 志
副 査 教 授 陽 完 治
副 査 教 授 雨 宮 好 仁

学 位 論 文 題 名

Control of Metal/Ⅲ-V Compound Semiconductor Interfaces and Its Application to Quantum Effect Devices

(金属/Ⅲ-V族化合物半導体界面の制御とその量子効果デバイスへの応用)

半導体集積回路の高密度化を目指し、微細化をさらに進めると、電子の量子力学的性質が顕著となり、既存の半導体デバイスは満足に動作しなくなる。このため、電子の量子力学的挙動を基本動作原理とする量子効果デバイスの実現が検討されている。金属/半導体接合は、既存の半導体デバイスにおいても必要不可欠な構成要素であるが、これを量子効果デバイスにおけるゲート制御に用いる場合、極少数の電子を、極微細領域に閉じ込めて、制御することとなるため、界面特性をこれまで以上に精密に制御することが必要となる。

本論文は、金属/Ⅲ-V族化合物半導体界面の電子的な性質を制御するいくつかの新しい方法、および、それらを量子効果デバイスにおけるゲート制御へ応用する方法について研究を行ったものである。本論文は10章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、本論文の歴史的背景、目的、各章の概要が述べられている。

第2章には、本論文の基礎をなすモデルや、実験方法、理論計算手法がまとめられている。まず、金属/半導体界面の電子物性を制御するための基礎となるショットキー障壁の形成モデルが述べられている。次に、実験装置としては、試料を大気にさらすことなく、半導体結晶成長から金属/半導体界面形成とその評価に至るまでを行うことができる「超高真空界面形成加工評価システム」が用いられている。

第3章では、金属/半導体界面の電子物性を制御する方法について理論的検討を行った結果が述べられている。具体的には、界面準位のない理想的な金属/半導体界面を形成し、金属の仕事関数を変えることにより、ショットキー障壁高を制御する方法と、金属/半導体界面に界面制御層と呼ぶ極薄い層を挿入し、界面ダイポールを形成し、ショットキー障壁高を制御する方法が論じられている。ことに後者については、数値計算を行い、ショットキー障壁高制御手法の可能性や条件、限界、問題点を議論している。

第4章では、界面制御層を用いてショットキー障壁高を制御する方法に関し、界面制御層の材料の選択について、実験的な立場から検討を行った結果が述べられている。金属／化合物半導体界面に様々な界面制御層を挿入した試料を作製し、界面の化学的状態、ショットキー障壁高の変化および電流輸送特性について検討を行った。その結果、界面制御層としては超薄膜シリコン層が最適であることが結論されている。

第5章では、超薄膜シリコン界面制御層 (Si ICL) を用いて、化合物半導体のショットキー障壁高の制御を試みた結果が述べられている。まず、Si ICLの膜厚を変化させたときのショットキー障壁高の変化を理論計算と比較した結果、Si ICLが有効に機能するのは、化合物半導体に疑似格子整合する範囲であることが示されている。次に、この条件を満たす範囲内で、Si ICL中に添加する不純物電荷量を制御することにより、GaAsおよびInP上で、ショットキー障壁高を300meV以上の広範囲にわたり精密に制御できることが実証されている。

第6章では、電気化学プロセスを用いて、金属／半導体界面の電子物性を制御することについて述べている。この方法は、低エネルギーであるためプロセス損傷の少ない理想に近い界面が形成できること、そして、そのためフェルミ準位のピンニングが緩和され、ショットキー理論に基づく障壁高制御がある程度可能であることが、指摘されている。

第7章では、Si ICL界面制御技術を、化合物半導体表面超格子デバイスのゲート制御部に応用した結果が述べられている。この新しい表面超格子デバイスは、Si ICLの挿入の有無に対応して、表面に障壁高の異なる2種類のショットキー接合を周期的に配置することにより、表面ポテンシャルを周期的に変化させ、内部のヘテロ界面に形成される電子に波動干渉を起こさせるものである。試作したデバイスの電流－電圧特性を極低温で測定した結果、量子効果に基づくコンダクタンス振動特性が観測され、新しい方法により、周期ポテンシャルがヘテロ界面に効果的に導入されていることが確認されている。

第8章では、ショットキー接合を用いて2次元電子ガスを空乏化することにより、量子デバイスを実現する新しいゲート構造として、ショットキーインプレーンゲート (IPG) およびラップゲート (WPG) 構造が取り上げられ、そのゲート制御特性が明らかにされている。理論的には、量子構造中のポテンシャル分布をコンピュータにより解析すると共に、実験的には、電子線誘起電流 (EBIC) 法によりポテンシャル分布を直接的に評価している。ショットキーIPGおよびWPG構造を用いて作製した様々な量子構造に対し、理論的および実験的にポテンシャル分布を明らかにした結果、新しい構造が従来のスプリットゲート構造より、強い閉じ込めポテンシャルを実現できることが示されている。

第9章では、ショットキーIPG/WPGゲート構造を用いて、単一および多重量子ドット単電子トランジスタ (SET) を試作し、評価した結果が述べられている。試作されたSETでは、従来のスプリットゲート形SETよりも、高い温度でコンダクタンス振動が観測され、デバイスの動作温度の高温化が達成された。さらに、これらの新しいデバイスでは、古典的な帯電効果と量子閉じ込め効果や量子単位相互作用が競合することが明らかにされている。

第10章では、本論文の結論が述べられている。

これを要するに、本論文は、金属とⅢ－Ⅴ族化合物半導体が形成する界面の電子物性を制御するいくつかの方法、および、これらをショットキーゲート制御形の新しい量子効果デバイスへ応用する方法に関し、系統的な検討を加え、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。