

学位論文題名

Silicon Interlayer Based Control of Compound Semiconductor Interfaces and Its Application to Quantum Structures

(シリコン界面層による化合物半導体界面の制御とその量子構造への応用)

学位論文内容の要旨

半導体表面は、本質的に活性であり、外部の原子、分子、イオンを吸着しやすく、また、その状況を反映して表面の電子状態は鋭敏に変化し、不安定となる。そこで、絶縁体薄膜で半導体表面を覆い、未結合手を適切に終端し禁制帯内の表面準位の発生を抑制するとともに、表面の性質が外部雰囲気に対して不活性とする、表面不活性化技術が必要となる。半導体デバイスや集積回路は、半導体の表面近傍を利用して製作されるので、表面不活性化技術は重要な基本技術である。

熱酸化シリコン膜が非常に優れた不活性化膜として働くことが、シリコン集積回路を中心とするエレクトロニクスの隆盛の一因となったことは周知の事実である。一方、化合物半導体デバイス技術においては、その材料特性を生かし、ナノスケールの微細構造や薄膜多層構造を用いて、新しい動作原理に基づくデバイスが開発されつつある。この様に、微細化、薄膜化を押し進めると、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。しかし、化合物半導体と絶縁体との界面には一般に高密度の界面準位が発生し、界面のフェルミ準位の位置を固定、あるいは、その動きを著しく妨げる「フェルミ準位のピンニング現象」が生じるため、真の意味では、未だに不活性化技術は確立していない。絶縁体-半導体界面の物性を理解し制御して、より優れた表面不活性化技術を確立することは、化合物半導体デバイスや集積回路技術、量子デバイスをさらに発展させる上で本質的に重要である。

本論文では、界面にシリコン超薄膜界面制御層(SiICL)を挿入する新しいアプローチにより、絶縁体-半導体界面および化合物半導体量子構造の表面の制御を試みるものである。具体的には、表面・界面の諸特性を詳細に分析・評価し、界面制御に必要な条件を明らかにし、化合物半導体表面の不活性化法を確立している。また、化合物半導体量子構造での量子準位と表面準位との相関を明らかにするとともに、量子構造の本質的な表面不活性化に初めて成功している。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、表面不活性化プロセスの最適化をおこなう際に用いた、半導体成長から表面不活性化まで試料を一度も大気にさらさずに行える超高真空試料作製評価システムについて説明している。半導体成長に用いた分子線エピタキシー(MBE)装置、絶縁体堆積に用いた光励起化学気相堆積(光CVD)装置、さらに、評価に用いた光電子分光(XPS)法、容量-電圧法、フォトルミネッセンス(PL)法の各原理及び作製・測定条件についても述べている。

第3章では、シリコン超薄膜界面制御層(SiICL)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・界面準位が引き起こす現象とその起源に関するモデル

の妥当性が議論され、これらの現象すべてを説明できるのは統一DIGS (Unified Disorder Induced Gap State) モデルのみである事が指摘されている。この界面制御法は、DIGSモデルに基づいて、適切な界面制御層を設計・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ものであり、界面制御層としては、絶縁体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。シリコン超薄膜を用いる界面制御法が成功するための条件は、(a)SiICLが化合物半導体と疑似格子整合すること、(b)SiICLが化合物半導体の界面反応を防止するバリアとなること、(c)SiICLと外部絶縁体との界面準位を除去することの3つであることが指摘されている。

第4章では、不活性化プロセスの最適化について検討した結果を述べている。詳細な界面特性の評価により、絶縁体-化合物半導体界面にシリコン超薄膜を挿入するだけでは、第3章で指摘されている条件(a)、(b)を同時に満たすことは困難であり、絶縁体-SiICL界面に界面反応を防止する適切な防御層が必要であることを指摘した。この防御層として、原子層レベルでのシリコンを堆積/酸化を繰り返して作製した熱酸化シリコン膜と、光CVD法で堆積した超薄膜 Si_3N_4 膜について検討を行い、超高真空一貫プロセスにより作製した SiO_2 /超薄膜 Si_3N_4 /SiICL/化合物半導体構造を用いることで、AlGaAs及びInGaAsに対して第3章で指摘されている条件を同時に満たす界面構造が実現できることを示している。さらに、 SiO_2 /超薄膜 Si_3N_4 /SiICL/InGaAs構造を用いて界面準位密度の最小値 $2 \times 10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ が達成できることが示されている。

第5章では、現状のプロセス技術の観点から、化合物半導体を一度大気にさらした場合の表面不活性化について検討した結果を述べている。大気にさらされた化合物半導体表面は自然酸化膜で覆われており、このままではSiICL界面制御技術を用いた不活性化が困難であることを指摘し、この自然酸化膜を除去するためにInGaAs及びAlGaAsに対しての各種表面処理について検討している。InGaAsに対してはフッ酸処理、AlGaAsに対しては塩酸処理で自然酸化膜が最も効果的に除去できることが判明した。さらに、これらの表面処理と組み合わせることで、シリコン超薄膜を用いる界面制御法が大気にさらした半導体表面に対しても効果的であることを示している。

第6章では、SiICL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AlGaAs/GaAs/AlGaAs量子井戸構造では、量子井戸と表面の距離 t_b が10nm以下になると、量子井戸からのフォトルミネッセンス(PL)強度が指数関数的に減少することを観測した。この現象は量子井戸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、SiICL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_b が5nmの時、約1/1000倍まで減少したPL強度を完全に回復させている。さらに、この界面制御技術をInGaAsリッジ量子細線構造に応用することで、絶縁体障壁層を有する量子細線の作製に成功している。従来の化合物半導体量子構造・デバイスでは、良好な界面である半導体-半導体接合が用いられているが、バンド不連続量が小さいために障壁が低く、閉じ込めが弱いので量子効果を利用するためには極低温を必要とした。SiICLを用いた界面制御技術により不活性化膜が障壁層として利用できることは、その高い障壁による強い閉じ込め効果が期待でき、化合物半導体量子構造デバイスの室温動作への可能性を示す一歩となる。

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 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

Silicon Interlayer Based Control of Compound Semiconductor Interfaces and Its Application to Quantum Structures

(シリコン界面層による化合物半導体界面の制御とその量子構造への応用)

Ⅲ-V族化合物半導体は、高移動度トランジスタなどのマイクロ波・ミリ波デバイスや、レーザーに代表される光デバイスの材料として利用され、集積化も進展している。さらに、ナノスケールの微細量子構造や薄膜多層構造を用いて、新しい動作原理に基づく量子波動デバイスや単電子デバイスが研究開発されつつある。

これらデバイスの性能を十分に引き出すためには、デバイスあるいは集積回路の表面を保護、不活性化することが重要である。化合物半導体表面の不活性化には、通常、シリコン酸化膜やシリコン窒化膜の堆積絶縁膜が用いられている。しかし、これら半導体-絶縁体界面には、高密度の界面準位が発生し、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文は、界面にシリコン超薄膜界面制御層(SiICL)を挿入する新しい手法により、化合物半導体およびその量子構造の表面および絶縁体-半導体界面を制御し、フェルミ準位ピンニングを除去することを試みたものである。本論文は7章から構成されている。以下に各章の概要を示す。

第1章では、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、本研究で用いた実験装置と方法について述べている。表面不活性化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、分子線エピタキシー(MBE)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。評価には、容量-電圧法やフォトルミネッセンス(PL)法も用いられている。

第3章では、シリコン超薄膜界面制御層(SiICL)を用いた界面制御法の基本的概念およびその満たす条件が述べられている。この界面制御法は、シリコン超薄膜界面制御層(SiICL)を界面に挿入し、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ものである。この方法が成功するためには、次の3条件、すなわち、(a)SiICLが化合物半導体と疑似格子整合すること、(b)SiICLが化合物半導体の界面における化学反応を防止するバリアとなること、(c)SiICLと外部絶縁体との界面準位を除去すること、が満たされる必要があることが結論されている。

第4章では、表面不活性化プロセスの最適化を試みている。界面の構造・組成を詳細に検討した結果、シリコン超薄膜に界面反応を防止する適切なバリア層を付加することが、より有効であるが示された。次にこのバリア層として、熱酸化シリコン超薄膜と、光CVD法で堆積した超薄膜 Si_3N_4 膜について検討を行い、それらがともに有効であることを実証している。ことに、超薄膜 Si_3N_4 を用いた場合、InGaAsの表面パッシベーションで界面準位密度の最小値 $2 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ を達成している。

第5章では、新しい表面不活性化法を現状のデバイスプロセス技術の中で適用するため、一度大気にさらした半導体表面の不活性化法について検討している。この結果、InGaAsに対してはフッ酸処理、AlGaAsに対しては塩酸処理で自然酸化膜が最も効果的に除去できることを見いだすと共に、これらの表面処理後にシリコン超薄膜を用いる界面制御法を適用することが、きわめて効果的であることを示している。

第6章では、新しい界面制御技術を化合物半導体量子構造へ適用した結果について述べている。まず、表面近傍に形成したAlGaAs/GaAs/AlGaAs量子井戸構造では、量子井戸と表面の距離が10nm以下になると、量子井戸からのフォトルミネッセンス強度が指数関数的に減少することを観測し、この現象が量子井戸準位と表面準位との相互作用によるものであることを示した。次にシリコン超薄膜を用いた界面制御技術を適用した表面不活性化により、このフォトルミネッセンス強度の減少を完全に除去することに初めて成功している。さらに、この界面制御技術をInGaAsリッジ量子細線構造に適用し、絶縁体障壁層を有する量子細線において、強いフォトルミネッセンス発光を実現することにも、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、ことに量子構造の表面を不活性化する独自の方法、その最適条件および得られる界面物性に関し、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。