

学位論文題名

Characterization and Control of Surfaces and Interfaces of GaAs and Related Alloys

(砒化ガリウムと関連混晶の表面・界面の評価と制御)

学位論文内容の要旨

シリコンを利用した半導体集積回路は、近年めざましい発展を遂げ、VLSIを生産するに至った。その発展に対する高度情報化社会からの要請は留まるどころを知らず、さらなる高速化、高集積化にむけて、研究・開発が行われている。しかし、その研究・開発も、将来を見通すと限界が見え始めており、新たな方策が模索されている。

砒化ガリウムおよびその関連混晶は、高い電子移動度や直接遷移形のバンド構造といったシリコンにはない優れた物性をもち、高速・高周波デバイスや光電子デバイスにおいて実用化されており、光電子集積回路に適した材料として期待されている。さらに、量子デバイスの研究においては最も研究されている材料であり、超高密度集積回路あるいは全く新しい機能をもつ集積回路の出現を期待させている。

高集積化は、素子の微細化・高密度化を意味し、それはすなわち半導体の表面・界面の半導体内部に対する割合の増加を意味する。したがって、半導体材料の表面・界面の特性をよく知り、制御することは今後ますます重要になって行くものと考えられる。ところが、一般には、砒化ガリウムおよびその関連混晶は、その表面・界面の制御が困難であることが知られており、重要な課題として残されている。

本研究はこのような背景のもとで、砒化ガリウムおよびその関連混晶の表面・界面を制御する方法を見つけることを目的とした。具体的には、表面・界面の性質を詳しく調べ、DIGS (disorder-induced gap state) モデルに基づいた超薄膜界面制御層を用いて、絶縁体、金属、および他の半導体との界面の電子物性を工学的に制御する方法を検討した。特に、絶縁体-化合物半導体界面においては、従来はフェルミレベルがピンニングされる原因となっていた、界面準位の低減に成功し、MISFETの作製にも成功した。

全体は7章から成る。以下に各章の要旨を述べる。

第1章は序論である。本研究の歴史的背景について述べ、本研究の目的と本論文の構成についてまとめている。

第2章では砒化ガリウムおよびその関連混晶の表面・界面において一般に見られるフェルミレベルのピンニング現象とその機構に関するモデル、および界面の特性の制御方法について述べている。

第3章では、本研究において用いた、表面・界面の形成・分析・評価のための方法とその原理について述べている。

第4章では、一般には制御が困難とされている、絶縁体と砒化ガリウムおよびその関連混晶との界面におけるフェルミレベルのピンニングの除去法について検討した結果について述べている。ここでは、DIGSモデルに基づき、界面の制御法として、シリコン超薄膜を界面制御層として用いる方法について検討し、その形成法の最適化を行った。

具体的には、光CVDによる SiO_2 あるいは Si_3N_4 の絶縁膜と、MBE成長によるGaAsおよびInGaAsとの界面を、超高真空中で、MBEシリコン超薄膜を挿入して形成し、X線光電子分光法によりその場表面観察する方法で制御を試みた。結果として、シリコン界面制御層は、 SiO_2 - InGaAs界面に対して有効であることがわかり、界面準位の低減に成功した。また、最適な厚さのシリコン超薄膜は、下地の半導体とは擬似的な格子の整合を保ち、かつその上に堆積される絶縁膜の形成時には、下地の半導体表面の乱れを防止して、結果的に絶縁体-半導体界面の乱れを低減し、界面準位を低減することが明らかとなった。この結果は、界面制御の指導原理としたDIGSモデルを支持するものであった。さらに、界面準位の低減された絶縁体-半導体界面を応用して、InGaAs MISFETを作製・評価した。作製したMISFETは、界面制御層無しで作製したものに比較してはるかに性能がよく、前例の無い優れた安定性をもつことがわかった。MISFETの特性の向上から、界面準位の低減がMISデバイスの特性向上に重要であることが明らかとなるとともに、シリコン界面制御層の有効性が確かめられた。

第5章では、超高真空中の一貫プロセスにより最適化されたシリコン超薄膜界面制御技術の機構に対しさらに詳細な検討を加え、大気にさらしたInGaAs表面の不活性化および金属-半導体界面のショットキー障壁高さの制御への応用について検討した結果について述べている。大気にさらしたInGaAsはその表面に自然酸化膜が形成されており、DIGSモデルに基づいて考えると、この自然酸化膜による乱れに起因した表面準位が、半導体表面フェルミレベルのピンニングの原因になっており、その除去と再酸化の防止こそが、半導体表面の不活性化において重要であると考えられる。そこで、表面自然酸化膜の除去法について検討した。その結果、弗化水素による化学的表面処理と、シリコン超薄膜との組合せによって、InGaAs表面の自然酸化膜を除去して、 SiO_2 膜により表面を不活性化することに成功し、超高真空中の一貫プロセスで形成した絶縁体-半導体界面と同程度まで、界面準位を低減することができた。一方、これまで困難と考えられてきた金属-GaAs界面のショットキー障壁高さの人工的制御も、ドーピングしたシリコン超薄膜界面制御層の利用により可能であることを示し、その機構について述べている。乱れの少ない金属-半導体界面を利用して、良好な特性をもつショットキーバリアダイオードの作製に成功した。

第6章では、理論的に予測されている、界面ダイポールの発生によるヘテロ界面バンド不連続量の制御について検討した。界面ダイポールは、砒化ガリウムおよびその関連混晶においても理論的には発生が予測されているものの、実験的に確かめられた例はなかった。しかし、最近になって、砒化ガリウムと砒化アルミニウムとの界面に、Si原子層を挿入することにより、界面ダイポールが発生することをXPSによる測定により確認したとの報告が出されたので、これに対し、再検討を加えた。その結果、報告されたような通常のエピタキシャル成長によるシリコン原子層の挿入によっては、界面ダイポールは発生しないことが明かとなった。具体的には、GaAs-AlAsおよびInGaAs-InAlAsヘテロ界面について検討し、XPS観察を行い、実験データに対して理論計算による考察を行った。データの詳細な検討の結果、両界面にSi原子層をMBE法により挿入しても、原子が拡散してしまい、界面における δ -ドーピングが行われるだけであり、実際にはバンド不連続量の変化は起こらないことがわかった。その証拠として、試料表面での急峻なバンドの曲がりにより、内殻準位ピークの半値幅および価電子帯上端とのエネルギー差が大きく変化していることを指摘し、これに独自のモデルで説明をつけた。

第7章において、前章までの結果を総括し、まとめとした。

学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	田頭	博昭
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

Characterization and Control of Surfaces and Interfaces of GaAs and Related Alloys

(砒化ガリウムと関連混晶の表面・界面の評価と制御)

シリコン集積回路は、今世紀後半に驚異的進歩を達成し、高度情報化社会の実現を可能とした。数ある半導体材料のうち、シリコンでこれが可能となった重要な理由の1つとして、シリコン酸化膜によりシリコン表面の性質がよく制御できることが挙げられる。

砒化ガリウムおよびその関連混晶は、高い電子移動度をもつ、直接遷移形のバンド構造をもつ、基板が半絶縁性をもつ、高度のヘテロ接合が形成できるなどといったシリコンにはない優れた物性をもつため、超高速デバイス、光電子デバイスに適した材料であり、その特長を活かした高速電子集積回路や光電子集積回路の実用化が進展しつつある。さらに、これら材料は、精密なヘテロ接合多層膜構造が実現できるため、それをいかした先端量子デバイスの研究に、欠くことのできない材料でもある。しかし、シリコンと比較すると、これら材料は、その表面・界面の制御が困難であることが知られており、重要な未解決の技術的課題として残されている。

集積回路の高性能化や高密度集積化は、デバイス寸法の微細化によって達成される。また、微細化により、電子の量子力学的挙動が顕著となり、新しいデバイスの可能性が開かれる。このような微細化された領域では、半導体の表面・界面の性質が半導体内部の性質に対して、より重要となってくる。従って、表面・界面を適切に制御することは、砒化ガリウムおよび関連混晶を用いたデバイスのさらなる高密度集積化を促進するためにも、また、新しい量子デバイスを研究開発するためにも、今後ますます重要となる課題であるといえる。

本論文は、このような背景のもとに、砒化ガリウムおよびその関連混晶の表面・界面の性質を理解し、その物性を制御することを検討したものである。全体は7章から成り、各章の要旨と成果は、以下に述べる通りである。

第1章は序論であり、本論文の歴史的背景、目的、構成について述べている。

第2章では、砒化ガリウムおよびその関連混晶の表面・界面において一般的に見られるフェルミ準位のピンニング現象について述べ、本論文で界面制御の指導原理としているDIGSモデルをはじめとして、ピンニングの機構に関する従来モデルについて概観している。また、さらに、従来試みられた界面の物性の制御の手法について述べている。

第3章では、本論文において用いられた表面・界面の形成・分析・評価の手法につい

て、それらの原理と本論文で具体的に用いられたシステムの構成・性能について述べている。

第4章では、砒化ガリウムおよびその関連混晶と絶縁体との界面におけるフェルミ準位のピンニング現象を、シリコン超薄膜界面制御層によって除去する方法について検討した結果を述べている。この方法は、分子線エピタキシャル(MBE)成長により結晶成長したGaAsまたはInGaAs層の上に、超高真空中で、MBE法により、シリコン超薄膜を形成してから、光化学気相堆積(CVD)法により、 SiO_2 あるいは Si_3N_4 絶縁膜で覆うものである。プロセスの評価および最適化には、界面の構造および組成をX線光電子分光法によりその場表面観察する方法および容量-電圧(C-V)法で界面の電気的特性を評価する方法が用いられている。最適な厚さのシリコン超薄膜は、下地の半導体とは擬似的な格子の整合を保ち、かつその上に堆積される絶縁膜の形成時に下地の半導体表面の乱れを防止して、結果的に絶縁体-半導体界面の乱れを低減し、界面準位を低減する役割を果たすことを明らかにしている。さらに、界面準位の低減された絶縁体-半導体界面を利用して、InGaAsをチャネルとするMISFETを試作し、高い実行移動度を実現すると共に、この種のデバイスで従来から問題とされてきたドレイン電流のドリフト現象について、前例の無い優れた安定性を達成している。

第5章では、シリコン超薄膜界面制御技術の機構を、さらに発展させ、大気にさらしたInGaAs表面の不活性化および金属-半導体界面のショットキー障壁高さの制御へ応用することについて検討した結果を述べている。まず、すべての工程を超高真空中で行なう第4章の方法は、通常デバイス製作工程に取り入れにくいことに注目し、大気にさらしたInGaAs表面に、シリコン超薄膜界面制御層技術を適用することを検討している。そのため、大気にさらしたInGaAs表面の自然酸化膜の除去法について検討し、弗酸による化学的表面処理と表面の化学量論的組成の制御と、MBE法によるシリコン超薄膜形成との組合せによって、InGaAs表面の自然酸化膜を完全に除去することに成功し、界面準位を超高真空中の一貫プロセスと同程度までに、低減することに成功している。次に、シリコン超薄膜界面制御層技術を金属-半導体界面に適用することを検討している。すなわち、金属-GaAs界面では、これまでフェルミ準位のピンニング現象により、ショットキー障壁高さが一定値をとることが知られているが、ドーブしたシリコン超薄膜界面制御層を挿入することによりその人工的制御が可能であることを実験的に示し、その機構について述べている。

第6章では、シリコン超薄膜界面制御層により、ヘテロ接合のバンド不連続量を制御する可能性について検討している。砒化ガリウムおよびその関連混晶のヘテロ界面に、IV族原子層を挿入すると、界面に化学結合に基づく真性ダイポールが発生し、バンド不連続量が増加することが理論的に予測され、かつ、実験的にも、砒化ガリウムと砒化アルミニウムとの界面に、Si原子層を挿入することにより、バンド不連続量が増加することを、光電子分光(XPS)法により確認したとの報告がすでになされている。そこで、GaAs-AlAsおよびInGaAs-InAlAsの2種類のヘテロ界面に、シリコン超薄膜を挿入することによる電子物性の変化を、XPS法で観察し、実験データに対して理論計算による考察を加えた。この結果、いずれの界面でも、見かけ上、バンド不連続量が増加したように見えるが、XPSスペクトルには、内殻準位ピークの半値幅の増大および内殻準位と価電子帯上端とのエネルギー差の変化といった、異常な振舞いが見られ、結局、Si原子層をMBE法により挿入しても、高温であるため原子が拡散してしまい、界面における δ -ドーピングが行われるだけで、バンド不連続量の変化は生じないという新しいモデルに到達している。このモデルでは、バンド不連続量の見かけの変化は、 δ -ドーピングによる試料表面での急峻なバンドの曲がりにより生ずるが、これを定量的に評価し、実験的に観測された異常性を定量的に説明することに成功している。

第7章においては、本論文で得られた結果を総括し、まとめとしている。

以上のように本論文は、砒化ガリウムおよびその関連混晶の表面・界面の評価と制御について、系統的な研究を進め、いくつかの重要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。