

学位論文題名

Silicon Interlayer Based Control of InP-based Compound Semiconductor Interfaces
and Its Application to Insulated Gate Transistors

(シリコン界面層によるインジウム燐系化合物半導体界面の制御とその絶縁ゲート形トランジスタへの応用)

学位論文内容の要旨

本格的なマルチメディア時代に入り、半導体電子デバイスに対する小型化、高速化、多機能化が求められている。これらの要求に応え、半導体電子デバイスの材料として、従来用いられてきたシリコン(Si)以外に、電子移動度が大きいこと、急峻なヘテロ界面が得られること、様々な材料を組み合わせることでその物性を変化させることができることなど、優れた特性を有していることから、ガリウム砒素(GaAs)、インジウム燐(InP)に代表されるIII-V族化合物半導体が用いられるようになった。特にInP系化合物半導体は、高電子移動度、高電子濃度が得られること、光通信に適したバンドギャップを有していることから、単一マイクロ波集積回路(monolithic microwave IC:MMIC)、光・電子集積回路(optoelectronic IC:OEIC)などの次世代の電子デバイスの材料として注目されている。

一般に、化合物半導体では、プレーナ集積回路の基本構成要素である電界効果トランジスタ(FET)のゲート構造には、Schottky接合とよばれる金属-半導体接合が用いられている。これは、絶縁体-化合物半導体界面に存在する高密度の界面準位が、絶縁ゲート形デバイスの実現を妨げているためである。しかしながら、InP系化合物半導体の障壁層として用いられるInAlAsでも、そのSchottky障壁高さはたかだか0.7eV程度と低く、ゲート漏れ電流が大きいため、低消費電力化の観点から高集積化には限界があり、InP系化合物半導体電子デバイスは、現在まで限られた領域で用いられるにとどまっている。将来のInP系化合物半導体集積回路を発展させる上で、ゲート構造に漏れ電流の極めて小さい絶縁体-半導体接合をもつ、絶縁ゲート形デバイスを実現することは必須の条件と考えられる。

本論文では、絶縁体-化合物半導体界面にSi超薄膜界面制御層を挿入するという新しいアプローチにより、その界面特性を制御し、絶縁ゲート形電子デバイスへの応用を試みるものである。具体的には、絶縁体-化合物半導体界面の諸特性を詳細に分析、評価し、界面制御を行い、絶縁ゲート形FETおよび絶縁ゲート形高電子移動度トランジスタ(HEMT)に応用している。また、絶縁ゲート形電子デバイスの電気特性を詳細に評価することで、界面準位とデバイス特性の相関を明らかにしている。

本論文は、7章から構成されている。以下に各章の要旨を述べる。

第1章では、本研究の歴史的背景と目的を述べるとともに、各章の概要を記した。

第2章では、本研究で用いた実験装置と実験方法について述べている。章の前半にお

いては、絶縁体-化合物半導体接合形成とその”その場”評価に用いた超高真空試料作製評価システムと構成装置について説明している。この超高真空試料作製評価システムは、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、半導体の表面化学状態の評価に用いた光電子分光 (XPS) 装置が超高真空搬送チャンバで接続されている。章の後半においては、半導体の表面状態の評価に用いた光電子分光法の原理と、作製したデバイスの電氣的評価法について説明している。

第3章では、絶縁体-化合物半導体界面の界面制御法として用いた界面制御層技術について説明している。まず界面準位の引き起こす現象とその起源に関するモデルとして、界面準位が界面における結合の乱れに起因するとする統一DIGS (Unified Disorder Induced Gap State) モデルのみが、観測されている界面の振る舞いを説明できることを指摘している。次にこのモデルに基づき、提案された超薄膜界面制御層 (Interface Control Layer: ICL) の概念が説明されている。超薄膜界面制御層は、これを絶縁体-半導体界面に挿入することにより、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ことをその役割としている。また、絶縁膜として用いられたSi系絶縁膜と良好な界面が形成できることから、超薄膜界面制御層にはSiを用いることが適切であると指摘している。

第4章では、実際のデバイスプロセスを想定し、Si ICL界面制御技術を、一度大気にさらしたInGaAs、InAlAs表面に適用した結果について述べている。一度大気にさらしたInGaAs、InAlAs表面は、それぞれの構成元素であるIn、Ga、Al、Asの自然酸化物が多量に存在しており、そのままではSi ICL界面制御技術を適用できないことから、Si ICL形成前にこれらの自然酸化物を取り除くための表面処理が検討された。最も効果的な表面処理として、窒素雰囲気中においてフッ酸によるエッチングを施すと、Si超薄膜形成後には、界面に酸化物の存在しない清浄な界面が得られることを光電子分光法により明らかにしている。さらにこの処理を用いて作製したInGaAs MISダイオード、InGaAs/InAlAs絶縁ゲート形HEMTダイオードが良好な容量-電圧特性を示し、その界面準位密度が禁制帯中にU字形状を有し、その最小値が $10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 以下まで低減可能であることを明らかにしている。

第5章では、Si ICL界面制御技術のInGaAs絶縁ゲート形FETへ応用した結果について述べている。ゲート長 $6 \mu\text{m}$ で相互コンダクタンス 61mS/mm 、実効移動度 $3850 \text{cm}^2/\text{Vs}$ という良好な特性を有するInGaAs絶縁ゲート形FETを作製することに成功し、Si ICL界面制御技術の絶縁ゲート形デバイスの実現に有効であることを示している。また、ドレイン電流ドリフト特性から、界面準位は 10^{-4}s から 10^4s までの広い範囲にわたる時定数をもつことを明らかにし、その機構について検討している。さらに、I-V特性、ドレイン電流ドリフト特性、マイクロ波特性における界面準位の影響について検討し、それぞれの特性から見積もられる界面準位密度が、全て $10^{11} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 台であることを示し、界面準位がデバイス特性に与える影響が定量的に矛盾なく説明できることを論じている。

第6章では、Si ICL界面制御技術のInGaAs/InAlAs絶縁ゲートHEMTへ応用した結果について述べている。ゲート長 $2 \mu\text{m}$ で相互コンダクタンス 170mS/mm 、実効移動度 $3050 \text{cm}^2/\text{V.s}$ という良好な特性を有するInGaAs/InAlAs絶縁ゲート形HEMTを作製することに成功した。さらに、界面準位の影響を考慮した等価回路を仮定し、その高周波帯における界面準位の影響を計算した結果、界面準位密度が $10^{10} \text{cm}^{-2} \text{eV}^{-1}$ 程度であれば、その影響が無視できることを指摘している。

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 InP-based Compound Semiconductor Interfaces and Its Application to Insulated Gate Transistors

(シリコン界面層によるインジウム燐系化合物半導体界面の制御とその絶縁ゲート形トランジスタへの応用)

インジウム燐 (InP) およびそれに格子整合するインジウムガリウム砒素 (InGaAs)、インジウムアルミニウム砒素 (InAlAs) など、いわゆる「インジウム燐系」化合物半導体は、ミリ波帯の超高周波デバイスや長波長光デバイスなど将来のマルチメディア時代のキーデバイスの材料として注目されている。しかし、絶縁体/半導体界面に高密度の界面準位が存在するため、表面パッシベーション技術が未完成であると共に、それを利用した高性能絶縁ゲート形のデバイスも実現されていない。

本論文は、インジウム燐系の化合物半導体の絶縁体/半導体界面にシリコン超薄膜による界面制御層 (Si ICL) を挿入するという新しい手法により、その界面特性を制御することを試みると共に、それを絶縁ゲート形電子デバイスへ応用することを検討したものである。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章では、本論文で用いた実験装置と実験の原理や方法が述べられている。絶縁体/化合物半導体界面の形成とそれを”その場”で評価するために、実験装置として「超高真空界面形成加工評価システム」が用いられている。このシステムは、半導体の成長を行う分子線エピタキシー (MBE) 装置、絶縁体の堆積を行う光励起化学気相堆積 (光CVD) 装置、半導体の表面の化学的状態を評価する光電子分光 (XPS) 装置などが、超高真空搬送チャンバで接続された構成をとっている。

第3章では、本論文で用いる絶縁体/化合物半導体界面の制御法の原理を述べている。まず界面準位の起源に関して、本論文では、「界面準位が界面における結合の乱れに起因する」とする統一DIGSモデルの立場をとることが説明されている。次に、このモデルに基づき提案された超薄膜界面制御層 (Interface Control Layer : ICL) の概念が説明されている。超薄膜界面制御層は、半導体から絶縁体へのボンドの遷移を原子レベルで円滑とする役割をもつものである。その具体的な材料として、シリコン系絶縁膜と良好

な界面が形成できるシリコン超薄膜が適切であることが結論されている。

第4章では、Si ICL界面制御技術を、一度大気にさらしたInGaAs、InAlAs表面に、適用可能とするための方策について検討した結果が述べられている。これは、この技術を通常のデバイス製作工程の中に取り入れるためには、必要不可欠である。

一度大気にさらしたInGaAs、InAlAs表面には、In、Ga、Al、Asの自然酸化物が多量に存在しており、そのままではSi ICL界面制御技術を適用できない。そこで、適切な表面処理によりSi ICL形成前にこれらの自然酸化物を取り除くことが検討された。その結果として、窒素雰囲気中におけるフッ酸によるエッチングが最も効果的な表面処理であることが見出されている。この処理後、界面はAsリッチとなるが、その上にSi超薄膜形成した後は、As成分が脱離し、清浄な界面が得られることが、光電子分光法により明らかとされている。

さらにこの処理を用いて作製したInGaAs MISダイオード、InGaAs/InAlAs絶縁ゲート形HEMTダイオードが、ともに良好な容量-電圧特性を示すこと、また、その界面準位密度分布が禁制帯中でU形状を示し、その最小値が $10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 以下となることが結論されている。

第5章では、Si ICL界面制御技術を、InGaAs絶縁ゲート形FETのゲート絶縁膜形成に応用した結果が述べられている。まず、試作されたInGaAs絶縁ゲート形FETは、良好な電流-電圧特性を示し、ゲート長 $6\mu\text{m}$ で、相互コンダクタンス 61mS/mm 、実効移動度 $3850\text{cm}^2/\text{Vs}$ という優れた特性値が得られている。

さらに、電流-電圧特性、ドレイン電流ドリフト特性、マイクロ波特性と界面準位の関連について定量的に検討した結果、それぞれの特性から見積もられる界面準位密度の値が、相互に矛盾することなく、 $10^{11}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 台であることが示され、デバイス特性の立場からも、低い界面準位密度が実現されたことが確認されている。

第6章では、Si ICL界面制御技術をInGaAs/InAlAs絶縁ゲート形HEMTのゲート絶縁膜形成に応用した結果が述べられている。これによれば、良好な電流-電圧特性をもつ絶縁ゲート形HEMTが初めて実現され、ゲート長 $2\mu\text{m}$ で相互コンダクタンス 170mS/mm 、実効移動度 $3050\text{cm}^2/\text{Vs}$ という良好な特性が得られている。さらに、界面準位の影響を取り入れた小信号マイクロ波等価回路に基づき、高周波帯における界面準位の影響を理論計算した結果、界面準位密度が $10^{10}\text{cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 程度であれば、その影響が無視できることが明らかにされている。

第7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、インジウム燐系化合物半導体を表面パッシベーションしたり、それを用いて絶縁ゲート形デバイスを実現する上で問題となってきた絶縁体/半導体界面の界面準位を、シリコン超薄膜界面制御技術により、制御・低減する方法を確立すると共に、デバイスの試作を通じ、良質の表面パッシベーションや絶縁ゲート形デバイスを実現する新しい展望を開いたものであり、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。