

学 位 論 文 題 名

Oxide-Free Surface Passivation of InP  
and Related Materials Using Silicon Interface  
Control Layers and Its Application

(シリコン界面制御層を用いたインジウムリン  
および関連材料の酸化物フリー表面パッシベーションとその応用)

学位論文内容の要旨

マイクロ波、ミリ波、光ファイバー通信網に基づく将来の様々なマルチメディアシステムへの応用という観点から、InP絶縁ゲート型電界効果トランジスタ (MISFET) は、GaAsパワーMESFETに比べて高い電子飽和速度と熱伝導率、低い漏れ電流から、その実現が強く望まれてきた。

InPの表面はGaAsよりも制御しやすいと考えられていて、多くの金属・絶縁体・半導体 (MIS) 構造が理想に近いMISキャパシタのふるまいをすると報告されてきた。しかし、これらの構造の界面は長期的に不安定で、これらのどれもが安定なMISFET動作をすることができなかった。この理由のひとつは、界面で、結合が弱く不安定な半導体種であるInオキサイドが含まれるかまたは発生することによる。一方で、PN、SiNなどを絶縁膜とする酸化膜フリー窒化膜ベースの構造では界面での大きな格子不整合により高密度の界面準位が発生することが報告されている。

本論文では、InPおよびInGaAs、InAlAsのMIS構造において界面準位密度を低減するために、疑似格子整合した分子線エピタキシー (MBE) 成長Si ICL (Interface Control Layer)を用いてInPの表面ボンドを終端し、Si ICLをSi系絶縁膜で終端するというシリコン界面制御層の概念に基づく、新しいオキサイドフリーのMIS構造を考察した。この構造では、InPおよび関連材料の表面のボンドはSi ICLによって終端され、Si ICLの表面のボンドはSi ICLを電子サイクロトロン共鳴(ECR)窒素プラズマによる部分窒化により形成されるSiN<sub>x</sub>超薄膜によって終端される。Si ICLおよび部分窒化膜の形成の様子はX線光電子分光 (XPS) および超高真空非接触C-V法により詳細に調べられた。また、その表面に化学気相体積(CVD)法により厚いSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>絶縁膜を形成し、完全に酸化物フリーのMIS構造を形成し、その電気的特性を容量・電圧(C-V) 法により計測した。さらに、それらをゲート構造に持つInP MIS型電界効果トランジスタ(MISFET)を作製し、その特性を調べた。

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ともに、各章の概要を記した。

第2章では、結晶成長や界面の形成および評価まで、試料を一度も大気にさらさずに行うことが可能な超高真空一貫システムについて説明するとともに、半導体結晶成長に用いたMBE法、絶縁膜の堆積および窒化に用いたECR-CVD装置、評価に用いたXPS法、超高真空非接触C-V法、C-V法の原理および特徴等について述べている。また、超高真空非接触C-V法をInP表面に適用するにあたり、それに必要な光学的ギャップ測定のためのUHVギャップ長に対するレーザーの反射率の計算を行い、非接触C-V法を初めてInP表面に適用可能にした。さらに、非接触C-V法を用いて化合

物半導体表面の表面フェルミレベルの位置を測定する方法を考案し、それをGaAsおよびInP表面に適用した例を示した。また、パルスモードを用いてInP表面のキャリア密度の測定を行い、非接触C-V法のさまざまな能力を示した。

第3章では、Si ICLの概念を示すとともに、これを使うに至った背景となるDIGSモデルをはじめとする界面準位発生のモデルについて述べている。また、Si ICLをInPの界面制御に用いる場合、Siは疑似格子整合することによって歪みを受け、それによってバンドギャップが小さくなる。その様子をmodel-solid理論を用いて詳細に計算した。その結果、Siのバンドギャップは0.22eVと小さくなり、SiN<sub>x</sub>/Si/InPのバンドラインアップにおいてSi表面量子井戸が形成され、これが界面準位と同様の働きをすることが予想されることを指摘している。この問題は、Si ICLの膜厚を十分に薄くすることにより、量子束縛効果によって準位を井戸内から追い出すことにより解決できることを提案した。そのために、実際に量子束縛効果によってどれぐらい準位が追い出されるかをシュレーディンガー方程式を用いて計算を行い、Si ICLの膜厚を5 Å以内にすれば準位を井戸内から完全に追い出すことができることが導き出された。

第4章では、XPS、非接触C-V、C-V法を用いて、Si ICLを用いたInPおよび関連材料のパッシベーションプロセスを詳細に評価した。XPS測定では以下のような見識が得られた。Si ICLの窒化処理後のSi 2p XPSスペクトルを、窒化時間を0分から90分まで変えながら測定することにより、Si ICLが徐々に窒化されていく様子を示した。またこれらのスペクトルを脱出角度45度と15度で行うことにより、それらの強度比から連立方程式を立てて窒化膜厚を計算した。その結果、窒化初期の段階では非常に速く窒化が進み、窒化膜厚が5 Å程度からは窒化がゆるやかに進むことがわかった。これは、窒化初期の段階ではストイキオメトリから離れた薄膜が形成されており、窒化が進むにつれて徐々にストイキオメトリに近づくことに対応している。PのXPSスペクトルでは、窒化を進めるとP-N結合によるピークが見られるようになった。プラズマ照射時間が1分間の場合、わずかにP-N結合のピークが見られた。これはECR窒化プロセス中に窒素がSi ICLを貫通してInP表面と反応したことを示しており、これを避けるために窒化時間は30秒と決定された。また、窒素ラジカルを用いた窒化プロセスをECRプラズマを用いた場合と比較し、窒素ラジカルを用いた窒化プロセスでは十分な化学シフトが得られず、この窒化プロセスには適さないことを指摘した。そして、InP成長後、Si ICL成長後、ECR窒化後のそれぞれのP 2pのXPSスペクトルを比較し、ピーク位置のシフトからフェルミレベルピンニングが大幅に緩和されたことを述べている。つぎにSi ICLを用いたInP表面のパッシベーションのそれぞれのプロセス後に非接触C-V測定を行い、Si ICLの成長とその窒化により表面準位が大幅に低減されることを見いだした。また、in situおよびex situパッシベーションプロセスを比較し、in situパッシベーションプロセスによりほぼバンドギャップいっぱいのフェルミレベルの振り幅を実現した。その後、最適化されたSi ICLの部分窒化のプロセス後に厚いSi<sub>3</sub>N<sub>4</sub>絶縁膜を堆積してC-V測定を行い、このプロセスが界面準位の低減に有効であることを確認した。さらに、このパッシベーションプロセスをInGaAsおよびInAlAs表面に適用した。InGaAs表面ではInP表面と同様の効果が得られたものの、InAlAs表面では同様の効果は得られないことを見だし、InAlAs表面にInGaAsキャップ層を成長させることによりこの問題を解決した。

第5章では、Si ICLとその部分窒化を用いたパッシベーションプロセスをInP MISFETのゲート構造の作製に適用し、実際にMISFETを作製してその特性を評価した。試料はInPエピタキシャル表面を一度大気にさらしてその表面に出来た自然酸化膜をふっ酸処理により除去したex situ試料と、InPのエピタキシャル成長からSi ICLの成長、ECRプラズマによる窒化、ECR-CVD法による絶縁膜堆積までのプロセスを真空一貫システムを用いて大気にさらさずに行ったin situ試料を作製した。どちらのデバイスも10 Vまで降伏を起こさずに動作し、また最大電流密度はin situ試料において477mA/mmが得られ、パワーデバイスとしての能力を実証した。また、ゲートリーク電流をPt/InPショットキー接触構造と比較した。リーク電流は負側で1/100以下、正側で1/1000以下で

あり、MISゲートを用いることの優位性が示された。  
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  | 長谷川 | 英機 |
| 副査 | 教授  | 福井  | 孝志 |
| 副査 | 教授  | 酒井  | 洋輔 |
| 副査 | 助教授 | 橋詰  | 保  |

## 学位論文題名

### Oxide-Free Surface Passivation of InP and Related Materials Using Silicon Interface Control Layers and Its Application

(シリコン界面制御層を用いたインジウムリン

および関連材料の酸化物フリー表面パッシベーションとその応用)

近年、マイクロ波、ミリ波帯におけるワイヤレス通信ネットワーク技術や、光ファイバー通信ネットワークが急速な進歩を遂げ、様々なマルチメディアネットワークシステムが構築されるに至った。化合物半導体デバイスは、これらシステムのキーデバイスである。高度情報化社会は、今後もさらに、飛躍的な進展を続けるものと期待されており、これは、化合物半導体デバイスの進歩なしには達成できない。具体的に進歩の方向は、高周波化、高電力化、消費電力の低減、線形特性の向上、信頼性の向上である。

化合物半導体では、通常的手段では、すぐれた特性をもつ絶縁体-半導体界面が実現できないため、シリコンデバイスで用いられる絶縁ゲート構造に代わって、金属-半導体界面を用いるショットキーゲート構造が用いられている。しかし、原理的には、上述の進歩の方向のいずれにおいても、絶縁ゲート構造がすぐれている。ことに、インジウムリン(InP)は、ガリウム砒素(GaAs)に比較してより高い電子飽和速度と熱伝導率をもつことから、InP 絶縁ゲート電界効果トランジスタの実現が強く望まれてきた。また、すぐれた絶縁体-半導体界面はデバイスの表面パッシベーションに不可欠である。しかし、InP の酸化物-半導体界面は、すぐれた界面特性を示すものの、特性が長期的に不安定である。また、 $\text{PN}_x$ 、 $\text{Si}_3\text{N}_4$  などを用いる酸化物フリーの絶縁体-半導体界面には、高密度の界面準位が発生することが知られている。

本論文は、このような背景のもとで、インジウムリンおよびその関連材料についてシリコン界面制御層(Si ICL)を用いた新しいオキサイドフリーの表面不活性化構造を提案し、その実現法を理論的及び実験的に検討・確立し、絶縁ゲートデバイスの試作により、その有効性を実証したものである。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、本研究の背景と目的を述べるとともに、各章の概要を記している。

第 2 章では、本研究で用いられた超高真空一貫システム、MBE 法、ECR-CVD 装置、XPS 法、C-V 法、金属-絶縁体-半導体(MIS)C-V 法の原理および特徴等が述べられている。ことに、超高真空非接触 C-V 法については、それを InP 表面に適用するのに必要な光学的反射率の計算、表面フェルミレベルの位置を測定する新しい方法の考案などを行い、この方法の有用性を示している。

第 3 章では、まず背景となる界面準位発生モデルが概観されており、次に Si ICL の基本概念が説明されている。Si ICL の構造設計にあてっては、モデル固体理論を用いた計算により、 $\text{SiN}_x/\text{Si}/\text{InP}$  構造の Si 表面量子井戸が形成され、その量子準位が界面準位として働き得ることが指摘されている。さらに、この問題は、量子閉じこめ効果によって準位を井戸内から追い出すことにより解決できることが示されている。

第 4 章では、XPS 法、非接触 C-V 法、MIS C-V 法を用いて、Si ICL を用いた新しいパッシベーションプロセスを詳細に検討し、その最適化を試みている。

まず窒化処理後の Si 2p XPS スペクトルにより、その理論解析から窒化膜厚を決定している。次に、各ステップ後 XPS スペクトルを相互比較し、ピーク位置のシフトから、フェルミ準位のピンニングがパッシベーションにより大幅に緩和されることを示している。さらに、UHV 非接触 C-V 法によっても、その効果を確認している。最後に、厚い  $\text{Si}_3\text{N}_4$  絶縁膜を堆積して実用的 MIS C-V 測定を行い、このプロセスの有効性を実証した。

さらに、この新しい表面不活性化法を InGaAs および InAlAs 表面に適用する方法についても検討を加えている。

第 5 章では、この表面不活性化法を絶縁ゲート InP 電界効果トランジスタの作製に適用し、その有用性を実証している。デバイスの最大電流密度として  $477\text{mA}/\text{mm}$  が得られ、パワーデバイスとしての能力が実証された。また、Pt/InP ショットキーゲート構造と比較すると、リーク電流は大幅に減少した。

第 6 章では、本論文の結論を述べている。

これを要するに、本論文は、InP およびその関連材料について、Si ICL を用いた新しいオキサイドフリーの表面不活性化構造を提案し、その実現法を理論的および実験的に検討・確立し、絶縁ゲートデバイスの試作により、その有効性を実証し、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。