

## 学位論文題名

インジウムリン系化合物半導体と絶縁体の界面の制御と  
超高周波トランジスタへの応用

## 学位論文内容の要旨

次世代情報技術を支える超高速・大容量通信システムの構築には、超高速でかつ、大電力駆動、低消費電力、高信頼性を兼ね備えた電子デバイスが必要不可欠である。インジウムリン(InP)系化合物半導体を用いた電界効果トランジスタは、優れた電子輸送特性を有し、100GHz以上の超高速動作が可能な電子デバイスとして期待されている。しかしながら、化合物半導体においては、良好な絶縁体/半導体界面を形成することが困難なため、高速、かつ、大電力駆動、低消費電力動作を可能にする絶縁ゲート形電界効果トランジスタの実現が阻まれている。

一般に、絶縁体とインジウムリン系化合物半導体接合の界面には高密度の界面準位が存在し、フェルミ準位のピンニング現象を引き起こす。これが、デバイスのキャリア密度制御を阻害しゲート制御特性を劣化させ、かつ、デバイス特性の不安定性をもたらす。従って、絶縁ゲート形電界効果トランジスタの実現には、界面準位を排除する絶縁体/半導体界面制御技術と、これに基づいたデバイス作製技術が求められる。

このような背景のもとに、本論文は、絶縁体とインジウムリン系半導体界面を、超薄膜シリコン界面制御層(Si Interface Control Layer; Si ICL)によって制御する技術を確認し、これを絶縁ゲート形の電界効果トランジスタ(MISFET)および高電子移動度トランジスタ(HEMT)へ応用し、その優れた動作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章は序論であり、本研究の歴史的背景と目的を述べると共に、各章の概要を記している。

第2章では、まず、絶縁体/化合物半導体界面に存在しフェルミ準位のピンニング現象を起こす界面準位について、理論モデルを取り上げその性質と成因をまとめている。次に、これに基づき絶縁体/半導体界面制御方法として導入した超薄膜シリコン界面制御層(Si ICL)による界面制御手法を説明している。さらに、擬似格子整合にとまなうシリコン層歪みによる狭バンドギャップ効果、バンドラインナップの変化や量子状態をも考慮した絶縁体/Si ICL/InP系半導体界面構造の理論解析と設計を行ない、Si ICLの最適膜厚(~0.5 nm)を理論的に導き出した。

第3章では、Si ICLによる絶縁体/InP系化合物半導体界面制御について、実験的検討を行ない、最適化した結果について述べている。まず、本研究で用いたMBE、ECR-PCVD、XPSを含む超高真空一貫システムなどの界面形成と評価に用いた各装置とその原理について説明している。次に、Si ICLを適用した絶縁体/InP系化合物半導体構造の形成プロセスについて、XPS、フォトルミネセンスなどのその場観察手法に

より各ステップ毎に詳細な評価を行い、InGaAs キャップ層の重要性を指摘すると共に、Si ICL の表面部分窒化プロセスを導入し、界面形成プロセスの最適化を図った。さらに、最適化されたプロセスにより実現した MIS 容量素子の電氣的測定を行い、絶縁体/半導体界面準位密度や分布形状を評価し、Si ICL を用いた絶縁体/InP 系半導体界面制御手法の有効性を明らかにした。

第4章では、最適化された絶縁体/InP 系化合物半導体構造を適用し、InGaAs MISFET を試作し、電氣的評価を行った結果について述べている。まず、Si ICL を適用した場合の MISFET 作製プロセスについて検討し、ふっ酸による半導体表面処理を導入した。これにより、一度大気に曝した試料についても良好な絶縁体/Si ICL/化合物半導体構造を形成可能とし、デバイス作製プロセスの自由度を高めた。このプロセスを適用し作製した InGaAs MISFET の動作検証を行い、良好なチャネルピンチオフ特性、従来の MISFET と比較し大幅なゲート制御特性の改善、および、ドレイン電流ドリフトを4%以下に低減したデバイスの実現に成功した。

第5章では、高周波動作可能な InP 系 HEMT に Si ICL 絶縁ゲート構造を適用した、絶縁ゲート形 HEMT デバイスの試作と、静特性・高周波動作特性評価の結果について述べている。最適化された絶縁体/Si ICL/半導体界面構造を適用することにより、大幅なゲート耐圧の改善とゲート漏れ電流の低減に成功した。さらに、ゲート長  $1.6\mu\text{m}$  にて、相互コンダクタンス  $g_m=177\text{mS/mm}$ 、電流利得遮断周波数  $f_T=9\text{GHz}$ 、最大発振周波数  $f_{\text{max}}=38\text{GHz}$  という、これまで化合物半導体で主流であったショットキーゲート形トランジスタに匹敵する優れた動作特性を実証し、超高速・超低消費電力絶縁ゲート形電界効果トランジスタ実現の可能性を明らかにした。

第6章では、本論文の結論が述べられている。

# 学位論文審査の要旨

主査	教授	長谷川	英機
副査	教授	雨宮	好仁
副査	教授	酒井	洋輔
副査	教授	福井	孝志
副査	助教授	橋詰	保

学位論文題名

## インジウムリン系化合物半導体と絶縁体の界面の制御と 超高周波トランジスタへの応用

次世代の情報通信技術においては、光通信やワイヤレス通信技術の一層の高度化が要求される。このため、超高周波、大電力、低消費電力、低雑音、高信頼性等の性能を極限まで追及した電子デバイスがシステムの基幹部品の1つとなると考えられている。インジウムリン系化合物半導体は、ガリウムヒソ系よりも優れた電子輸送特性をもち、それをを用いた電界効果トランジスタは、現在最も高速動作可能な電子デバイスとして知られ、次世代デバイスの有力な候補である。しかしながら、現状では、ショットキゲート構造が用いられ、しかも、そのショットキ障壁高はガリウムヒソ系より一般に低い。

そこで、この材料系に良好な絶縁体/半導体界面を形成することができれば、低消費電力で大電力駆動が可能な絶縁ゲート形電界効果トランジスタが実現できる筈である。しかし、これは従来技術では難しい。なぜならば、絶縁体/インジウムリン系化合物半導体界面には高密度の界面準位が禁制帯中に発生し、いわゆるフェルミ準位ピンニング現象を引き起こして、ゲート制御性を劣化させるとともに、準位の充放電により、デバイス特性に不安定性をもたらし、信頼性を損なうからである。

このような背景のもとに、本論文は、著者らの研究室が独自に開発した「シリコン界面制御層 (Si ICL) による界面制御技術」をインジウムリン系化合物半導体に適用し、良好な特性をもつ絶縁体/界面を実現する技術を確立するとともに、これを応用した絶縁ゲート電界効果トランジスタ (MISFET) および絶縁ゲート高電子移動度トランジスタ (IGHEMT) を試作し、その優れた動作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 章は序論であり、本研究の歴史的背景と目的を述べている。さらに各章の概要が紹介されている。

第 2 章では、まず、絶縁体/化合物半導体界面に発生する界面準位の成因に関するモデルについて議論し、それに基づき超薄膜シリコン界面制御層 (Si ICL) により絶縁体-半導体界面を制御する方法を導入している。さらに、この方法をインジウムリン系半導体に導入した場合について、Si ICL の歪みや表面量子井戸内の量子状態を考慮した理論計算にもとづく界面設計を行ない、Si ICL の最適膜厚を見出している。

第3章では、Si ICL を挿入した絶縁体/インジウムリン系半導体界面の物性を実験的に検討した結果が述べられている。まず、MBE、ECR-PCVD、XPS を含む超高真空一貫システムなど、本研究で界面形成と評価に用いた各装置の原理と概要が紹介されている。次に、Si ICL をもつ絶縁体-化合物半導体構造の形成法について、Si ICL の MBE 成長やその後の表面窒化プロセスなどを含む各プロセスステップにおける、XPS、フォトルミネセンスなどのその場観察手法による評価を行い、界面形成プロセスを最適化した結果が述べられている。最後に、最適プロセスにより実現した MIS 容量素子の電氣的評価を行い、Si ICL による絶縁体/半導体界面制御が極めて有効であることを示している。

第4章では、最適界面形成プロセスをインジウムガリウムヒソ表面に適用し、MISFET を試作し、デバイスの電氣的特性を評価した結果が述べられている。実用的観点から、一度大気に曝した半導体表面に、Si ICL を形成して、MISFET を作製するプロセスが詳細に検討された。その結果、Si ICL の MBE 成長直前に、ふっ酸による半導体表面処理を行うことが有望であることが見出されている。このプロセスを適用し作製された MISFET の動作特性を測定し、従来の MISFET と比較して、ゲート制御特性が大幅に改善されるとともに、良好なチャネルピンチオフ特性が得られ、かつ、ドレイン電流のドリフトが、非常に少ないことを確認している。

第5章では、歪み入り InP 系高移動度トランジスタ(P-HEMT)構造に、Si ICL を用いた絶縁ゲートを適用した新しいデバイスについて、その試作と静特性・高周波動作特性を評価した結果について述べている。最適化されたプロセスを用い Si ICL を形成し挿入した絶縁ゲート構造をもつ InP 系高移動度トランジスタ(P-HEMT)では、ゲート耐圧が大幅に増大し、ゲート漏れ電流が大幅に低減した。ゲート長  $1.6\mu\text{m}$  にて、相互コンダクタンスの最大値  $g_m=177\text{mS/mm}$  を得ている。さらに、電流利得遮断周波数  $f_T=9\text{GHz}$ 、最大発振周波数  $f_{\text{max}}=38\text{GHz}$  という、実用に耐えうる優れた高周波特性が実現されている。

第6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、シリコン界面制御層 (Si ICL) による界面制御技術をインジウムリン系化合物半導体に適用する場合の界面構造の最適設計とプロセスの最適化を行うとともに、これを適用したインジウムリン系超高周波絶縁ゲート電界効果トランジスタを試作し、優れた静特性と高周波特性を実証したものである。これまで困難であった化合物半導体絶縁ゲート電界効果トランジスタ実用化の可能性を明示するとともに、いくつかの有益な知見を得ており、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。