

学 位 論 文 題 名

Characterization and Control of Surfaces of Gallium Nitride and Aluminum Gallium Nitride

(窒化ガリウムおよび窒化アルミニウムガリウムの表面の評価と制御)

学位論文内容の要旨

窒化ガリウム(GaN)および窒化アルミニウムガリウム(AlGa_N)を含む III-V 族窒化物半導体は、高輝度青色系発光ダイオード(LED)が開発されて以来、最も注目される半導体材料の 1 つとなった。現在、白色 LED、高密度記憶媒体用紫色レーザーダイオード(LD)、フルカラーディスプレイなどの光デバイスの開発が進められている。さらに、窒化物半導体は優れた電子物性をも有するため、従来の Si 系や GaAs 系デバイスでは不可能であった、高周波および高温で動作するパワーデバイス、例えば、移動体通信基地局や衛星搭載向けパワー増幅器、自動車衝突予測レーダー用ミリ波素子などへの応用が期待されている。このような背景により、最近、AlGa_N/GaN 系ヘテロ構造電界効果トランジスタ(HFET)の研究開発が急速に進められ、高い潜在能力が示されている。

しかしながら一方、窒化物半導体を含め III-V 族化合物半導体では、高密度の表面準位が存在し、デバイス安定動作の妨げになる場合が多い。AlGa_N/GaN 系 HFET においても、「電流コラップス現象」や「大きなゲート漏れ電流の存在」など表面準位に起因するといわれている現象が報告されており、デバイス性能の低下を招いている。AlGa_N/GaN 系高周波パワー HFET を実現させるには、その基本構造となる AlGa_N/GaN ヘテロ構造の表面を制御する技術が必要不可欠となる。

本論文では、以上の背景のもと、成長用基板および AlGa_N/GaN ヘテロ構造表面の構造的・化学的・電気的評価を詳細に行い、それに基づき、GaN 系高周波パワーデバイス実現に不可欠な表面制御法を確立することを目的としている。具体的には、まず、放熱面で有利な高い熱伝導度をもつガリウム燐(GaP)の表面窒化を行い、化学量論的組成に非常に近い GaN 超薄膜が形成できることを示し、GaN エピタキシャル膜成長基板へ適用可能であることを明らかにした。次に、高周波パワー電子デバイス応用に重要な AlGa_N/GaN ヘテロ構造において、溶液処理およびプラズマ処理を施された表面を X 線光電子分光(XPS)法等を用いて詳細に評価し、種々の表面の化学結合状態や表面フェルミ準位位置を明らかにした。また、金属/AlGa_N ショットキー接合において、消費電力の増大やゲート制御性の低下を招く大きな逆方向漏れ電流が存在することを明らかにし、電流輸送機構が窒素空孔に関連する深いドナーを含む「薄い表面障壁層」モデルにより説明できることを示した。さらに、AlGa_N 表面を不活性化する手法として、超薄アルミナ(Al₂O₃)膜を利用するプロセスを提案し、Al₂O₃ 絶縁ゲート AlGa_N/GaN 系 HFET 応用への可能性を示した。

本論文は 8 章より構成されている。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、各章の概要を記している。

第2章では、III-V 族窒化物半導体について概説した。はじめに、窒化物半導体の結晶成長および伝導性制御について述べている。また、窒化物半導体でみられる特徴的な現象として、自発分極効果およびピエゾ分極効果について記述しており、それらにより AlGaIn/GaN ヘテロ界面に誘発された2次元電子ガス(2DEG)についても説明している。さらに、窒化物半導体におけるデバイス作製プロセスの概要を説明している。

第3章では、まず、ショットキー障壁の形成および電流輸送特性、これまでに提案されたいる表面・界面準位の起源およびフェルミレベルピンニングの機構に関する主要なモデルについて説明している。また、表面・界面の評価のために本研究で主として用いた、X線光電子分光法(XPS)、電流-電圧法(I-V)、容量-電圧法(C-V)の原理を記述している。さらに、表面制御プロセスにして用いた超高真空一貫装置について概説している。

第4章では、GaP基板の表面窒化によって形成されたGaN超薄膜の評価とそのGaN成長用テンプレート基板への応用について議論している。GaPは熱伝導度がサファイア基板の約4倍大きいため、放熱性に優れており、高周波パワーデバイス応用に有利である。基板温度500°C窒化時間10分の条件で窒素ラジカルを照射したGaP表面では、化学量論的組成にはほぼ一致する超薄GaN層が形成され、直径5~10nm、高さ1~2 nmの微小粒状構造を持つことが明らかになった。また、この超薄GaN層上に低温MBE成長したGaNをアニールすることによって、立方晶GaN結晶が成長できることを明らかにした。

第5章では、有機金属気相成長法(MOVPE法)によって成長した $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ ヘテロ構造表面を角度分解XPS法によって分析し、大気中に曝した表面では、 $\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ga}_2\text{O}_3=7:3$ の組成比を有する自然酸化膜に表面が覆われていることを明らかにした。次に、清浄化された化学量論的組成に近い初期表面を得るプロセスとして、 NH_4OH 溶液処理が有効であることを示した。また、 NH_4OH 溶液溶液処理後の真空中での表面処理法として、ECR窒素プラズマ処理を試み、表面の化学量論的組成を乱すことなく酸化膜を除去するプロセスとして最も効果的であることを明らかにした。一方、清浄化プロセスとしてしばしば用いられている水素プラズマ処理は、表面において窒素空孔を発生させ、表面電子状態を劣化させることを明らかにした。

第6章では、金属/AlGaInショットキー接合の電流輸送特性をI-V特性の詳細な温度依存性より議論した。金属/AlGaInショットキー接合のI-V特性においては、熱電子放出理論から予測される値よりも何桁も大きい逆方向漏れ電流が観測され、さらに、温度依存性の解析により、順方向・逆方向ともに熱電子放出理論に全く従わない振る舞いを示した。これらの輸送機構を解明するために、窒素空孔に関連する深いドナーを含む「薄い表面障壁層(TSB)モデル」を提案し、それに基づいた計算により、実験結果がよく説明できることを示した。

第7章では、AlGaIn/GaNヘテロ構造表面を制御するために、超薄アルミナ(Al_2O_3)膜形成プロセスの検討と界面特性の評価を行った。 Al_2O_3 薄膜は、金属Al蒸着、ECR酸素プラズマ酸化および真空アニールプロセスを超高真空一貫装置で連続して行うことにより形成した。XPS法によりプロセスの最適化を行い、化学量論的組成に近い Al_2O_3 超薄膜(3~4nm)の形成に成功し、7eVの禁制帯幅を有し、AlGaIn層に対して十分なバリア膜として機能することを明らかにした。また、形成した Al_2O_3 薄膜をAlGaIn/GaN系HFETの絶縁ゲートへ応用し、ショットキーゲート構造と比較してゲート漏れ電流値が5~7桁低減し、大きな順バイアスまでゲート掃引可能なHFETの作製に成功した。

第8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	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

Characterization and Control of Surfaces of Gallium Nitride and Aluminum Gallium Nitride

(窒化ガリウムおよび窒化アルミニウムガリウムの表面の評価と制御)

ユビキタスネットワーク社会を構築するために、ワイヤレス通信システムのさらなる高性能化が強く要請されている。ことに移動体通信データの大容量化と変調方式の高度化に対応するために、超高周波帯で優れた線形性を有する高出力トランジスタを開発することが、次世代ワイヤレス通信システムを実現する上で必須であるとされている。

窒化ガリウム(GaN)および窒化アルミニウムガリウム(AlGaN)を含む III-V 族窒化物半導体は、高輝度青色発光ダイオードの開発が成功して以来、最も注目される半導体材料の一つとなり、青色・紫色・近紫外・白色の発光ダイオードおよびレーザーダイオードが実用化されるに至った。さらに、窒化物半導体は、絶縁破壊電界強度が高い、電子飽和速度が大きい等の優れた電子物性を有するため、従来の高周波半導体デバイスでは不可能であった高い出力電力で高温動作するパワーデバイスの研究開発が活発に展開されている。例えば、AlGaN/GaN ヘテロ界面を利用したヘテロ構造電界効果トランジスタ(HFET)は、10GHz 帯でガリウムヒソ系デバイスの 10 倍以上の電力密度を達成し、次世代ワイヤレス通信システム用パワーデバイスの最有力候補と期待されている。

しかし一方、シリコンやガリウムヒソと比較すると、窒化ガリウム系結晶は高密度のバルク結晶欠陥を含むとともに、表面欠陥の制御が不十分である。そのため、窒化ガリウム系ヘテロ構造電界効果トランジスタでは、表面に起因するとされる「ゲート漏れ電流」や「電流コラプス現象」などが観測され、デバイス動作の信頼性を大きく妨げているが、その原因や機構は、ほとんど未解明の状態にある。窒化ガリウム系材料を用いた高電力電子デバイスの実用化や光デバイスの信頼性・寿命の向上のためには、表面電子状態の系統的理解と制御が不可欠な状況にある。

本論文は、以上の背景のもとに、窒化ガリウムおよび窒化アルミニウムガリウムの表面の構造・組成・電子物性の評価を詳細に行い、それにもとづき、ヘテロ構造電界効果トランジスタにおける不安定現象の機構を解明するとともに、不安定現象を除去する新しい表面制御構造の開拓を試みたものである。本論文は 8 章より構成されている。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ている。

第 2 章では、III-V 族窒化物半導体の基本物性と結晶構造を概説し、六方晶窒化物半導体で顕著に見られる自発分極効果およびピエゾ分極効果と、それにより誘起されるヘテロ界面の高密度 2 次元電子ガス(2DEG)の特徴を述べている。

第 3 章では、ショットキー障壁の形成機構、表面・界面準位の起源およびフェルミ準位ピンニングの機構に関する主要なモデルを説明している。また、表面・界面評価のために本研究で主として用いた、X 線光電子分光法(XPS)、電流-電圧法(I-V)、容量-電圧法(C-V)の原理と、表面制御プロセスに用いた超高真空一貫システムを概説している。

第 4 章では、ガリウムリン(GaP)の表面窒化によって形成された GaN 超薄膜の評価とその GaN 成長用テンプレート基板への応用について議論している。電子サイクロトロン共鳴(ECR)励起による窒素ラジカルを利用し、GaP 表面を基板温度 500°C で窒化処理することにより、化学量論的組成にほぼ一致する超薄 GaN 層が形成されることを見出している。さらに、この超薄 GaN 層をテンプレートとして、分子線エピタキシャル(MBE)法により、立方晶 GaN 結晶が成長できることを明らかにしている。

第 5 章では、有機金属気相成長法によって成長した AlGaIn/GaN ヘテロ構造表面の化学的状態を、角度分解 XPS 分析により詳細に評価している。まず、大気にさらした表面には、 Al_2O_3 と Ga_2O_3 を成分とする自然酸化膜が存在し、表面の化学量論的組成を大きく乱していることを明らかにした。次に、 NH_4OH 溶液処理と ECR 励起窒素プラズマ処理が、表面の化学量論的組成を乱すことなく酸化膜を除去するプロセスとして最も優れていることを示している。同時に、表面清浄化プロセスとして通常用いられる水素プラズマ処理は、表面近傍に窒素空孔欠陥を発生させ、表面電子状態を著しく劣化させることをも、明らかにしている。

第 6 章では、AlGaIn ショットキー接合のリーク電流の機構を検討している。電流-電圧特性の温度依存性を詳細に検討することにより、金属/AlGaIn 接合の電流輸送特性は熱電子放出理論では全く説明できないことを示した。さらに「薄い表面障壁層(TSB)モデル」による詳細なシミュレーションを行い、窒素空孔ドナー準位により薄くなった表面障壁を介するトンネル機構が、金属/AlGaIn 接合のリーク電流を支配していることを明らかにしている。

第 7 章では、AlGaIn/GaN ヘテロ構造の表面制御を目的として、アルミナ(Al_2O_3) 超薄膜を利用した表面パッシベーションおよび絶縁ゲート構造の検討を行っている。まず、超高真空下での Al の分子ビーム堆積と ECR 酸素プラズマ酸化により、膜厚 3.5nm の高品質 Al_2O_3 超薄膜が形成できることが示されている。次に、詳細な XPS 解析により、 Al_2O_3 超薄膜の禁制帯幅と Al_2O_3 /AlGaIn 界面のバンド不連続量を求め、 Al_2O_3 超薄膜が AlGaIn 層に対して十分なバリア層となることを明らかにしている。さらに、 Al_2O_3 超薄膜を用いた絶縁ゲート形ヘテロ構造電界効果トランジスタを作製し、ショットキーゲート形と比較し、ゲート漏れ電流を 5 桁以上低減できることや、試作デバイスが「電流コラプス現象」を全く示さないことから、本ゲート構造がデバイスの安定性向上に極めて有効であることを結論している。なお、試作デバイスは、高い飽和電流値(0.8A/mm)と伝達コンダクタンス値(120mA/mm)を示し、後者はこれまでに報告された絶縁ゲート形デバイスの中で最高値となっている。

第 8 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、窒化ガリウムおよび窒化アルミニウムガリウムの表面の構造・組成・電子物性の評価を詳細に行い、ヘテロ構造電界効果トランジスタにおける不安定現象の機構を解明するとともに、不安定現象を除去する新しい超薄膜アルミナ絶縁ゲート構造を開拓し、窒化ガリウム系半導体電子デバイスの特性向上に関して、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者と認める。