

博士(工学) 小谷淳二

学位論文題名

Control of metal/GaN-based semiconductor interfaces
for electron device application

(金属-窒化ガリウム系半導体界面の制御とその電子デバイス応用)

学位論文内容の要旨

20世紀中頃のトランジスタの発明は、20世紀最大の発明とも言われ、事実、現代社会は半導体技術を無しに到底成立しない。現在の半導体技術において、コンピュータの中核を担う高密度集積回路分野は、シリコンの独壇場であるということに疑いの余地はなく、最先端のシリコンプロセス技術は他の追随を許さないのが現状である。その一方、GaAs や InP といった優れた電子輸送特性・光学特性を持つ化合物半導体は、高周波・光デバイスの分野を担い、携帯電話や光通信技術といった情報通信機器の発展に重要な役割を果たしてきた。つまり、結晶成長技術の発展とともに、新しい物性を持つ化合物半導体が出現し、シリコンが不得意とする高周波・光デバイスの分野を支えてきたと言える。

比較的新しい化合物半導体である窒化物半導体は、その大きな禁制帯幅、伝導帯バンド不連続量、高電子密度といった特徴から、シリコンや GaAs といった従来の半導体材料では実現不可能であった、高出力、高温動作、短波長発光デバイスを実現する材料として期待されている。さらに、近年国際社会でも盛んに議論されているエネルギー問題、環境問題、資源問題の面からも重要な材料である。現在までに、GaN 系トランジスタにおいて 2GHz 帯ワンチップ出力 230W が達成されている他、これまでの半導体材料ではバンドギャップという絶対的制約により青色領域の短波長発光が実現不可能であったのに対し、ワイドバンドギャップという窒化物材料固有の特性を活かし、20世紀中には難しいとされてきた青色発光ダイオード・レーザーを誕生させた。

しかし窒化物材料の本格的実用化を前に、依然として基盤的課題も山積しているのが現状である。その一つに、金属/窒化物半導体界面の制御が挙げられる。金属/半導体界面には整流性を示すショットキー接觸、オーム性を示すオーム接觸があり、これを的確に制御し、有效地に利用することは最も基本的で半導体技術の根幹である。これは全ての半導体デバイスに関係し、デバイス特性を左右する本質となる。このため窒化物半導体デバイスの本格的実用化に向けて、ショットキー接合における漏れ電流の抑制は必要不可欠な問題であり、第一にその漏れ電流機構を早急に突き止めることが急務となっている。

以上述べた背景のもと本論文では、金属-窒化物半導体界面における電流輸送機構を明らかにし、漏れ機構の本質的理解の下に金属/窒化物半導体界面の制御を行うことを目的とした。さらに、本研究において開発した新しい表面制御技術を AlGaN/GaN HEMT (High Electron Mobility

Transistor)構造へ応用し、デバイス特性の改善とその物理的理をを目指した。

本論文は全 8 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共に各章の概要を記している。

第 2 章では、窒化物半導体の物性的特徴とその優位性について述べている。また、窒化物半導体の特徴の一つであり、デバイス応用上重要でもある AlGaN/GaN ヘテロ構造における分極効果についても言及している。

第 3 章では、一般的な金属／半導体界面における電流輸送機構の基礎理論を展開している。最も重要で基礎となる熱電子放出理論から始まり、熱電子電界放出および電界放出理論について紹介し、最後にトンネル電流の一般式の導出を詳しく記述した。また、ショットキーバリア高さの物理的背景について、ショットキーリミットとバーディーンリミットの二つの基礎的モデルを用いて説明した。

第 4 章では、窒化物半導体ショットキー接合におけるリーク電流機構について議論している。GaN および AlGaN ショットキー接合を作製し、電流-電圧特性を様々な温度で評価した。測定結果は、本研究において開発した電流-電圧シミュレーションプログラムを用いて詳細に解析され、表面近傍の窒素空孔欠陥および酸素不純物ドナーの存在によるショットキーバリアの薄層化がトンネル漏れ電流の起源となることが明らかになった。さらに、表面ドナー密度を低減する新しい表面制御プロセスを開発し、実験的にその漏れ電流抑制効果を実証した。

第 5 章では、ショットキーゲート AlGaN/GaN HEMT を作製し、そのゲート漏れ特性、伝達特性の解析から、ゲート端における横方向電子注入について議論した。ゲート漏れ特性はゲート界面を垂直に流れる電流成分だけでは説明がつかず、表面に沿った横方向への漏れ電流成分の存在が示唆された。さらに、伝達特性は実際のゲート長よりも長いゲート長を仮定した理論計算と良く一致することが分かった。これらの結果から、ゲート端における横方向への電子注入が仮想ゲート形成に関係している可能性を指摘した。また、第 4 章で開発した表面制御プロセスを AlGaN/GaN HEMT 構造に応用することで、高温高バイアスストレスに対するドレイン電流の安定性の向上を達成した。

第 6 章では、第 5 章で議論した横方向電子注入の直接的検証として、ゲート近傍における横方向表面電流の評価を試みた。本研究では、AlGaN/GaN ヘテロ構造上に数百 nm の距離で近接するショットキーゲートを 2 本形成し、ゲート間の表面電流を選択的に検出することに成功した。表面電流の温度依存性の解析から、表面準位を介したバリアブルレンジホッピング伝導が電流輸送に深く関係していることが示唆された。また、 SiN_x 膜による表面保護により、表面電流の大幅な抑制が可能であることを実験的に示した。

第 7 章では、AlGaN 中の深い電子準位を Deep Level Transient Spectroscopy (DLTS) 法により調べた。始めに DLTS 法の基本原理およびデータ解析法について述べた。AlGaN ショットキー接合を用いた DLTS 測定から、深さ 0.9eV、準位密度 $6 \times 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ の深い電子準位の存在が明らかになったとともに、その準位密度の定量的見積もりには特に注意を要し、準位の部分的イオン化を考慮した「入効果」を取り入れた詳細な解析を必要とすることが示された。また、深い準位を AlGaN/GaN 構造に取り入れたシミュレーション計算を行い、深い準位の存在がドレイン電流の不安定性に影響することを示した。

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 橋詰 保

副査 教授 福井 孝志

副査 教授 本久 順一

学位論文題名

Control of metal/GaN-based semiconductor interfaces for electron device application

(金属-窒化ガリウム系半導体界面の制御とその電子デバイス応用)

窒化ガリウム (GaN) に代表される窒化物半導体は、その大きな禁制帯幅、伝導帯バンド不連続量、高電子密度といった特徴から、シリコンやガリウムヒ素 (GaAs) といった従来の半導体材料では実現不可能であった、高出力、高温動作、短波長発光デバイスを実現する材料として期待されている。特に GaN あるいは AlGaN/GaN ヘテロ構造を用いた電界効果トランジスタ (FET、HEMT) は、優れた耐電圧性とヘテロ界面の輸送特性を活かした高効率電力変換デバイスや高周波パワーデバイスとして研究が進み、特にここ数年の日本からの寄与がめざましく、2GHz 帯で出力 100W 超の AlGaN/GaN HEMT が市販されるに至っている。さらに、超高効率電力変換デバイスの開発が急ピッチで展開されており、エネルギー問題、環境問題に大きく貢献する可能性を持っている。

しかしながら、電流変動や漏れ電流などの安定性・信頼性の問題は完全には解決されておらず、デバイス動作に制限を与え、更なる高性能化を阻害する要因となっている。半導体デバイスプロセスは、表面に種々の加工を施し、種々の界面を巧みに形成する過程であるが、それは同時に、半導体表面が幾度も高いエネルギーに曝される場でもある。化合物半導体デバイスの研究・開発において、表面特有の欠陥構造・欠陥準位とデバイスの不安定性との相関を丁寧に調べ、表面・界面の電子準位を制御することは、材料物性の優位性を真にデバイス特性に反映させるために不可欠な課題となってきた。金属/半導体界面の制御はその重要課題の 1 つである。金属/半導体界面には整流性を示すショットキー接觸、オーム性を示すオーム接觸があり、これを的確に制御し、有効に利用することは最も基本的で半導体技術の根幹である。このため窒化物半導体デバイスの本格的実用化に向けて、ショットキー接合における漏れ電流の抑制は必要不可欠な問題であり、第一にその漏れ電流機構を早急に突き止めることが急務となっている。

本論文は、以上の背景のもとに、詳細な実験と数値計算手法を用いて金属/窒化物半導体界面に

おける電流輸送機構を明らかにし、漏れ電流の本質的制御を行い、新しく開発した表面制御技術を AlGaN/GaN ヘテロ構造へ適用してデバイス動作の信頼性向上を試みたものである。

本論文は全 8 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ている。

第 2 章では、窒化物半導体の物性的特徴とその優位性を概説している。

第 3 章では、金属/半導体界面において、これまでに提案されている電流輸送機構モデルをまとめ、界面障壁の形成機構について、ショットキー極限とバーディーン極限の二つの基礎的モデルを説明している。

第 4 章では、窒化物半導体ショットキー接合の電流輸送機構を詳細に議論している。GaN および AlGaN ショットキー接合を作製し、電流-電圧特性を様々な温度で評価した。さらに、熱励起電界放出理論を基盤とした数値計算手法を確立して実験結果を解析することにより、表面近傍の窒素空孔欠陥および酸素不純物ドナーの存在による界面障壁の薄層化がトンネル漏れ電流の主な起源となることを明らかにしている。

第 5 章では、金属ゲート AlGaN/GaN HEMT のゲート漏れ特性、伝達特性の解析から、ゲート端における横方向電子注入について議論している。ゲート漏れ電流には表面に沿った横方向成分の存在が示唆され、ゲート端から AlGaN 表面への電子注入が表面準位の荷電状態を変化させデバイス特性変動の要因になることを指摘している。さらに、新しく開発した表面制御プロセスが、デバイスの信頼性向上に効果的であることを実証している。

第 6 章では、2 重ゲート構造を利用してゲート近傍における横方向表面電流の輸送機構を議論している。表面電流の温度依存性の解析から、AlGaN 表面に存在する高密度電子準位を介したホッピング伝導が電流輸送を支配していることを明らかにし、さらに、SiNx 膜による表面保護法が表面伝導電流を抑制できることを示している。

第 7 章では、過渡容量分光法 (Deep Level Transient Spectroscopy :DLTS) を用いて、AlGaN 中の深い電子準位を評価している。その結果、エネルギー深さ 0.9eV の電子準位の存在を明らかにするとともに、準位の部分的イオン化を考慮した詳細な解析により準位密度を決定している。

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、詳細な実験と数値計算手法を用いて金属/窒化物半導体界面における電流輸送機構を明らかにし、漏れ電流と表面電子準位の本質的制御法を AlGaN/GaN ヘテロ構造トランジスタへの適用したものであり、ここで得られた電流輸送モデルと新しい表面制御法は、半導体デバイス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。