

| | | | |
|--|---|----|-------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏名 | 中澤 敏志 |
| 論文題目 | <p>Interface Charge Engineering in AlGaIn/GaN Heterostructures for GaN Power Devices (AlGaIn/GaN ヘテロ接合電界効果トランジスタの特性改善に向けた界面電荷制御)</p> | | |
| <p>(論文内容の要旨)</p> <p>本論文は、広禁制帯幅半導体であるGaN（窒化ガリウム）を用いた電界効果トランジスタの高性能化を目指して、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面近傍の電荷制御を試み、オーム性接触の特性改善、絶縁膜/半導体界面の欠陥低減等を通じて、高周波特性および高電圧スイッチング特性に優れたGaN系パワーデバイスを実現した研究をまとめたもので、6章からなる。</p> <p>第1章では、次世代無線通信用の高周波トランジスタおよび低損失電力変換用の高耐圧トランジスタの重要性と、これらのデバイスに要求される性能を紹介している。次に、本研究で扱うGaN系半導体の性質と研究開発状況を紹介した後、高周波および高電圧应用到有望なAlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタの特徴、優位性と研究課題について概説し、当該分野における本研究の位置付けと目的を明らかにしている。</p> <p>第2章では、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面分極に起因する空乏層形成の影響で、オーム性電極の接触抵抗およびアクセス抵抗が高くなるという問題の解決に取り組んだ成果について述べている。この問題を低減するために、四元混晶となるInAlGaIn薄膜層を導入し、AlGaIn/GaNヘテロ接合界面分極を低減することを提案している。下地のGaNと格子整合し、かつ界面分極を低減するInAlGaIn組成を計算により求め、高品質薄膜を有機金属気相堆積法により成長できることを示している。さらに、この上にAlGaIn/GaNヘテロ接合を形成して特性を評価し、接触抵抗およびアクセス抵抗を従来構造に比べて数分の一に低減することに成功している。この領域の抵抗成分を、分布定数回路モデルを用いて解析し、さらなる抵抗低減に向けた指針を議論している。</p> <p>第3章では、大面積ウェハが広く市販されているSi基板上に高周波用AlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを作製することを提案し、実証した結果を述べている。まず、格子定数および熱膨張係数の不整合を克服するために成長初期にAlN系バッファ層を導入することにより、良質のAlGaIn/GaNが成長できることを示している。次に、高電圧印加時の電界集中を緩和するためにゲート電極を金属で覆うフィールドプレート構造を提案し、二次元デバイスシミュレーションによる構造設計について述べている。GHz帯の高周波トランジスタでは、トランジスタの直流特性だけでなく、入出力インピーダンスの整合が重要になる。申請者は、フィールドプレート構造に工夫をこらし、単なる電界集中緩和による高耐圧化だけではなく、入出力インピーダンス整合をも同時に満足する構造について議論している。最終的には、最適化したフィールドプレート構造を導入することによって、2.5 GHz帯で最高水準となる高い出力電力（200 W級）と高い電力利得（16 dB以上）を有する高周波AlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを実現している。</p> | | | |

| | | | |
|--|--------|-----|-------|
| 京都大学 | 博士（工学） | 氏 名 | 中澤 敏志 |
| <p>第4章では、絶縁膜とAlGaIn/GaN界面の電気的特性について論じている。AlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを電力変換用の高耐圧パワートランジスタに適用する上では、高いしきい値電圧を有するノーマリオフ動作が重要となる。従来のショットキー障壁ゲート構造のトランジスタでは、リーク電流や小さい拡散電位などの影響により、この要求を満足することが本質的に難しいことを述べ、この問題を解決するために、金属—絶縁膜—半導体(MIS)型ゲート構造を提案し、その絶縁膜/半導体界面の形成と界面欠陥の電気的特性について述べている。絶縁膜として用いるAl₂O₃膜の原子層堆積条件依存性、反応性イオンエッチングによる表面損傷の影響が界面特性に与える影響を詳細に調べている。MIS構造の容量—電圧特性の解析から、当該素子における界面近傍の電荷の起源を、ヘテロ界面の分極、MIS界面の固定電荷、MIS界面の界面準位（電子トラップ）に分類する手法を述べた後、これらの界面電荷の詳細な評価を行っている。さらに、Al₂O₃膜では堆積や熱処理条件を最適化しても高密度の電子トラップが残留するという問題を指摘し、堆積したAl₂O₃膜をNH₃プラズマにより窒化処理することによって、界面特性と信頼性に優れたAlGaIn/GaNのMIS構造を得ることに成功している。</p> <p>第5章では、第2～4章で得た成果を基にして、Si基板上に高耐圧のMIS型ゲートAlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを作製し、その直流特性とスイッチング特性を調べた結果を述べている。具体的には、ゲートリセス工程における反応性イオンエッチングの損傷を回避するためにAlGaIn薄膜再成長を行い、かつ上述の窒化処理したAl₂O₃膜（結果としてAlON膜を形成）を採用することによって、しきい値電圧 1.4 Vのノーマリオフ動作で耐圧700 V級、オン電流20 A級という優れたトランジスタ特性を得ることに成功している。また、誘導負荷のスイッチング試験を行い、400 V / 10 Aの大容量スイッチングを約4 nsという高速で達成できることを実証している。この優れたスイッチング特性を従来のSiパワートランジスタと比較し、本研究で作製したMIS型ゲートAlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタの入力容量、出力容量、および帰還容量がSiトランジスタに比べて著しく小さいことに起因することを論じている。なお、本特性は、Si基板上に作製された600 V以上のトランジスタとしては、例外的に優れた高速スイッチングであり、将来、電力変換器の大幅な小型化に貢献できることを述べている。</p> <p>第6章は結論であり、InAlGaIn四元混晶を用いた界面分極低減、AlN系バッファ層の導入によるSi基板上AlGaIn/GaNヘテロ構造の高品質化、独自のフィールドプレート構造導入による高周波特性の向上、AlON薄膜を用いた高耐圧MIS型ゲートAlGaIn/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタなど、本研究を通じて得られた新しい学術的、技術的知見を整理して述べている。また、当該分野における今後の研究課題を提示し、これらの課題解決に向けた研究指針を提案している。</p> | | | |

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、GaN（窒化ガリウム）を用いた電界効果トランジスタの高性能化を目指して、AlGaN/GaNヘテロ接合界面近傍の電荷制御を試み、オーム性接触の特性改善、絶縁膜/半導体界面の欠陥低減等を通じて、高周波特性および高電圧スイッチング特性に優れたGaN系パワーデバイスを実現した研究をまとめたものであり、得られた主な成果は以下の通りである。

1. GaN系トランジスタで問題となるオーム性電極の接触抵抗を低減するために、四元混晶となるInAlGa層を導入することを提案し、下地のGaNとの格子整合および界面分極低減を両立する組成を計算により求め、これを有機金属気相堆積法により成長することによって、接触抵抗を従来法に比べて約1/5に低減することに成功した。
2. Si基板上にAlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを作製することを提案し、成長初期にAlN系バッファ層を導入することで良質のAlGaN/GaNを成長した。次に、高電圧印加時の電界集中を緩和するために独自のフィールドプレート構造を導入し、周波数2.5 GHz帯で最高水準となる高い出力電力と電力利得を有する高周波AlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを実現した。
3. AlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタの電力応用を進める上で重要となるしきい値電圧の増大を図るため、従来のショットキー障壁ゲートに代わり、金属—絶縁膜—半導体(MIS)型ゲートを提案し、その絶縁膜/半導体界面の電子物性を明らかにした。絶縁膜として用いるAl₂O₃膜の堆積条件依存性、反応性イオンエッチングによる表面損傷の影響などを調べ、最終的にはAl₂O₃膜を窒化处理することにより、界面特性と信頼性に優れたMIS構造を得ることに成功した。
4. 上述の成果を基にして、Si基板上に高耐圧のMIS型ゲートAlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを作製し、優れた直流特性とスイッチング特性を実証した。具体的には、ノーマリオフ動作で耐圧700 V級、オン電流20 A級の大容量素子を実現し、約4 nsという高速スイッチング特性を達成して、従来のSiパワートランジスタに対する優位性を明らかにした。

以上、要するに、本論文は高周波および高電圧電力応用に有望なAlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタの性能を支配する界面近傍の分極および電荷の制御を試み、結晶成長、プロセス技術の高度化と独自のデバイス構造を提案することによって最高性能を有するSi基板上AlGaN/GaNヘテロ接合電界効果トランジスタを実現したもので、学術上、實際上寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士（工学）の学位論文として価値あるものと認める。また、令和元年8月22日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規程第14条第2項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。