

主論文の要約

論文題目 **縦型 GaN パワーデバイス実現に向けた ICP-RIE を用いたトレンチ形成プロセスに関する研究**
(Study on trench formation by inductively coupled plasma reactive ion etching for realization of vertical GaN power devices)

氏名 **山田 真嗣**

論文内容の要約

本研究では、省エネルギー社会の実現に資する、高耐圧・低オン抵抗高性能縦型 GaN パワー MOSFET を実現するために不可欠な半導体デバイスプロセス技術であるトレンチ形成技術の確立を目指して研究を行った。

第1章では、研究の背景、次世代パワーデバイス材料としての GaN 半導体、半導体ドライエッチング技術について述べ、本研究の目的及び本論文の構成について説明している。背景として、地球温暖化防止、そのための省エネルギーのさらなる推進のために、ワイドバンドギャップ半導体材料を用いた次世代パワー半導体デバイスの実現が期待されており、特に、高い絶縁破壊電界と高い電子移動度を持つ窒化ガリウム(GaN)は最も有力な候補の一つであることを述べた。本論文では、GaN を用いた高耐圧・低オン抵抗のトレンチゲート縦型金属-酸化膜-半導体電界効果トランジスタ (Metal-oxide-semiconductor field effect transistor, MOSFET) の実現に向けて、誘導結合型プラズマ反応性イオンエッチング (Inductively coupled plasma reactive ion etching, ICP-RIE) を用いたドライエッチング技術によるトレンチ構造の形状制御とトレンチ側壁に導入されるダメージの低減を目指すことを述べた。

第2章では、GaN トレンチ構造の形状制御として、本研究で用いた ICP-RIE 装置の詳細について述べ、この ICP-RIE 装置を用いた GaN のトレンチ形成機構について詳細に述べた。そして、トレ

ンチ構造の形状制御に対して特に重要なことは、トレンチの垂直性と平坦性及び、底部をラウンド化した形状を作製することであり、そのためには処理パラメータの一つである反応ガス種に塩素(Cl_2)と四塩化ケイ素(SiCl_4)の混合とバイアスパワーを制御することが重要であることを述べた。 Cl_2 によるエッチングの促進やバイアスパワーによる反応性イオンの直進性の確保と、 SiCl_4 による副生成物のトレンチ側壁へのデポジションのバランスを取ることで、形状制御が実現可能であることを示した。

第3章の前半では、ICP-RIEによって導入されるダメージとして、主にイオン衝突が原因と考え、それらにより GaN 結晶層の表面近傍に点欠陥等の欠陥準位や結合手の乱れ、チャージアップダメージが形成されると考えた。その上で、ICP-RIE の処理パラメータの一つであるバイアスパワーに着目し、バイアスパワーとダメージの関係をショットキーバリアダイオード(SBD)や MOS キャパシタの素子構造を用いて評価を行った。バイアスパワーの増大とともに SBD のショットキー障壁高さが低くなる、すなわち、GaN 表面近傍にダメージ層が形成されていることを実験的に確認した。本章では、各バイアスパワーにおけるダメージ深さ分布の定量評価を行い、とりわけ浅いダメージ層の評価には、電気化学(PEC)エッチングを用いた手法が有効であることを示し、バイアスパワーが 30 W の時は、ダメージ深さが 40~50 nm 程度、バイアスパワーが 30 W と 5 W の 2 段階エッチングの時は、9 nm 以下であることを定量的に実証できた。

第3章の後半では、低ダメージ化とエッチング高速化の両立のために、多段バイアスドライエッチング技術とスロープダウンバイアスドライエッチング技術の開発に取り組んだ。まず、ICP-RIE 装置の下部電極に繋がれた高周波 RF 電源(12.5 MHz)に関して、数 W の極低バイアスパワーを~0.1 W 単位で精密に出力制御することを可能にした。また、極低バイアス用に調整した整合器(マッチングボックス)を専用ユニットとして ICP-RIE 装置に搭載した。多段バイアスドライエッチング技術は、バイアスパワーを段階的に下げることで、高いバイアスパワーで導入されたダメージ層を低いバイアスパワーで除去しながらエッチングを行う技術であり、スロープダウンバイアスドライエッチング技術は、低いバイアスパワーでの処理を連続的に下げることで可能にした技術である。いずれの技術も高いバイアスパワーでの処理を行うことで、エッチングの高速化を確保しつつ、低いバイアスパワーでの処理による低ダメージ化を図った技術であり、各々再度 SBD による電気的特性評価から、低ダメージ化の効果を実証することができた。また極低バイアスパワー(~2.5 W 以下)の領域では、反応性イオンの直進性が弱まり、等方的なエッチングの進行によるエッチング表面の表面粗さの改善の傾向も確認された。

第4章では、従来評価が難しいとされてきた GaN トレンチ側壁に導入されるダメージの直接評価の検討を行った。また、本章では、第2~3章で得られた研究成果をすべて取り入れた実験を行った。トレンチ側壁に導入されるダメージを評価するために、トレンチ側壁 SBD 構造を新たに考案し、

その作製プロセスを確立した。その構造を用いることで、トレンチ側壁のダメージ評価を行った。その結果、a 面と m 面いずれのトレンチ側壁に対しても多段バイアスドライエッチング技術による低ダメージ化の効果を確認した。加えて、m 面トレンチ側壁に関しては、多段バイアスドライエッチング技術と追加の 400 °C 熱処理を行うことで、m 面劈開 GaN 表面(未エッチング処理面)と同等のショットキー障壁高さの値が得られ、本論文で開発した技術の有効性を実証することができた。また、断面 TEM 像分析によるトレンチ側壁表面の原子像観察によっても、側壁のダメージを低減可能なことを確認できた。

第 5 章では、結論として本研究のまとめと今後の課題について述べた。今後の展開として、極低バイアスパワー領域の有効活用や過渡容量分光法などによるダメージとして誘起されている欠陥準位の種類と密度の特定、そして、実際のトレンチゲート縦型 MOSFET の素子特性との相関調査について取り組むべき内容や方向性について提案した。

以上のように本研究では、縦型 GaN パワーデバイス実現に向けたトレンチ形成技術の確立を行い、精密な GaN トレンチの形状制御とその低ダメージ化の実証に成功した。