

論文審査の結果の要旨および担当者

報告番号	※ 甲 第 13610 号
------	---------------

氏 名 山田 真嗣

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)

論文審査担当者

主査	名古屋大学	教授	須田 淳
委員	名古屋大学	教授	天野 浩
委員	名古屋大学	教授	中塚 理
委員	名古屋大学	准教授	本田 善央
委員	名古屋大学	准教授	堀田 昌宏
委員	名古屋大学	特任教授	加地 徹

山田真嗣君提出の論文「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」は、高性能縦型GaNパワーデバイスを実現する鍵となるICP-RIEによるトレンチ形成プロセスに関する研究成果をまとめたものである。ICP-RIEによるトレンチの精密形状制御を行うとともに、ICP-RIEにより導入される欠陥をさまざまな手法により定量的に明らかにし、また、電氣的評価が困難なトレンチ側壁を独自の手法により評価を可能にした。得られたダメージの深さ分布をもとに多段バイアスエッチング法を確立し、低ダメージトレンチ形成プロセスを確立した。各章の概要は以下の通りである。

第1章では、研究の背景および本研究の目的及び本論文の構成について説明している。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、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により、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30Wと5Wの2段階エッチングの時は、9nm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。バイアスパワーを段階的、あるいは連続的に下げることで、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、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る技術である。SBDによる電氣的特性評価から、本研究で開発した技術による低ダメージ化の効果を実証することができた。

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した。

第5章では、本研究の結論を与えている。

以上のように本論文では、縦型GaNパワーデバイス実現に向けたICP-RIEによるトレンチ形成技術の確立を行い、GaNトレンチの精密形状制御とその低ダメージ化の実証に成功した。ここで得られた結果は、将来、超低損失縦型GaNパワーデバイスを実現するための基礎となるものであり、工学の発展に寄与するところが大きい。よって、本論文の提出者である山田真嗣君は博士 (工学) の学位を受けるに十分な資格があると判断した。