

報告番号	甲 第 12307 号
------	-------------

主論文の要旨

論文題目 Study on Electronic States of Surfaces and Interfaces of Wide Bandgap Materials: SiC and GaN
(ワイドバンドギャップ半導体 SiC 及び GaN における表面及び界面の電子状態に関する研究)

氏名 Nguyen Xuan Truyen

論文内容の要旨

省エネルギー社会の実現において、パワーデバイスは非常に重要な役割を担う。現在のパワーデバイスの性能を更に向上させるため、SiC及びGaNなどのワイドバンドギャップ半導体に注目が集まっている。そこで本研究では、SiC表面及び絶縁膜/GaN界面の化学構造及び電子状態を制御することを目的とし、低温プロセスかつプラズマダメージが抑制可能なリモートプラズマに着目し、表面・界面制御を試みている。更に本研究において、ワイドバンドギャップ半導体のギャップ内に分布する界面準位密度をより広いエネルギー範囲で評価する手法として、光電子収率分光法(PYS)を提案した。PYSや光電子分光法、電気特性($C-V$ 、 $I-V$)等を組み合わせて、SiCおよびGaNの表面・界面特性を明らかにするとともに、その表面・界面の制御性について詳細に議論している。

本論文の各章における概要は下記の通りである。

第1章では、社会的な低消費電力化の要求から導かれるパワーデバイスの低損失化の必要性、ワイドバンドギャップ半導体 (SiC及びGaN) がもたらす低損失化の可能性、ワイドバンドギャップ半導体パワーデバイスが抱える課題および本研究の目的について述べる。

第2章では、本研究の推進する上で重要な役割を果たすリモートプラズマ装置の概要、光電子収率分光法 (PYS) 及び電気特性評価の原理を説明する。

第3章では、リモートH₂プラズマ処理がSiC表面の化学結合状態及び電子状態に与える影響を議論する。具体的には、プラズマ処理前後における表面形状、化学結合状態お

よび電子占有欠陥密度の変化をそれぞれ、原子間力顕微鏡(AFM)、X線光電子分光法(XPS)およびPYSを用いて評価し、それらについて議論した。その結果として、水素プラズマ処理はSiC表面のクリーニングに有効であるが、長時間の処理によりC原子の選択エッチングが進行する事が明らかとなった。また、PYSの結果から、水素プラズマ照射により欠陥準位密度が増大することが分かった。生成された欠陥は主にC空孔、格子間への水素の混入に起因した欠陥であると考えられる。そこで、C空孔の生成を抑制するために1分間の水素プラズマ処理、更にその後850 °Cでの熱処理(窒素雰囲気中)により欠陥密度の低減を試みた。その結果として、熱処理後のSiC表面は清浄な状態を維持し、かつ、水素プラズマ照射により導入された欠陥が減少していることが明らかとなった。

第4章では、リモートO₂/Arプラズマ支援CVD(ROPE-CVD)を用いて形成したSiO₂/GaN構造の化学結合状態及び電子占有欠陥の深さ方向分析の結果について議論する。ここではサファイア基板にエピタキシャル成長したGaN表面上にSiH₄及びリモート酸素プラズマを用いたROPE-CVDにより膜厚約5.2 nmのSiO₂を堆積した。XPSの分析により、ROPE-CVDと同条件で励起したリモート酸素プラズマでGaN表面を処理した場合には、表面酸化が進行するのに対して、ROPE-CVDによりSiO₂を堆積した場合には、組成急峻なSiO₂/GaN界面が形成されることが分かった。また、価電子帯スペクトル分析より、SiO₂/GaN界面のエネルギーバンドアライメントを決定した。さらに、希釈HF(0.1%)処理によるSiO₂の薄膜化及びPYS分析の組み合わせにより、プラズマ照射によるGa表面のダメージが小さいことがわかった。PYSから見積もったSiO₂/GaN界面の電子占有欠陥準位密度がミッドギャップにおいて約 $2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 程度であることを明らかにした。

第5章では、前章で形成したSiO₂/GaN構造の電気特性を議論する。ホモエピタキシャル成長したGaN基板上に約5 - 20 nmのSiO₂膜を堆積した。化学結合状態の評価からROPE-CVDにより形成したSiO₂/GaN界面は堆積膜厚に対して顕著な表面酸化の進行が認められず、組成急峻性が維持される。その様な界面を有するGaN MOSキャパシタのC-Vカーブから、正の固定電荷がSiO₂/GaN界面近傍に局在し、その密度は約 $1.4 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2}$ 程度であることが明らかとなった。更に、高周波C-V (1 MHz) からターマン法により求めた界面準位密度は、伝導帯下端から0.25 eVにおいて約 $3.3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ 程度と低く、良好なMOS界面が形成されていることが明らかとなった。

第6章では、ROPE-CVDで形成したSiO₂/GaN構造の熱安定性について議論する。膜厚20 nmのSiO₂膜を堆積した後に600 °C、700 °C及び800 °Cにおいて窒素雰囲気中で熱処理(Post Deposition Annealing: PDA)を行った。ROPE-CVDにより形成したSiO₂/GaN構造では800 °CまでのPDA処理においてSiO₂/GaN界面の化学結合状態に顕著な変化が認められず、組成急峻性が保持されることがわかった。また、光電子分光法及び電気特性からPDA処理によりSiO₂/GaN構造中の正の固定電荷密度が減少し、800 °CのPDAにより $3.5 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ まで低減す

ることが明らかとなった。さらに、 C - V カーブから界面準位密度分布を評価し、 $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ のPDAを施した場合には、伝導帯下端から 0.18eV 付近において界面準位密度は約 $1\times 10^{11}\text{ cm}^{-2}\text{eV}^{-1}$ 程度まで減少した。また、 I - V 特性から $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ のPDAにより SiO_2 の絶縁特性の向上が認められた。

第7章では、リモート O_2/He プラズマ支援CVD SiO_2/GaN 構造の化学結合状態及び電気特性に与える影響を述べる。まず発行分光分析(OES)によりAr及びHe希釈酸素プラズマの発光スペクトルの違いを明らかにした。それらのプラズマを用いて形成した SiO_2/GaN 構造の表面形状像、化学結合状態と電気特性の評価を行った。結果としてリモート酸素/ArプラズマCVDにより形成した SiO_2 は酸素/HeプラズマCVDにより形成した SiO_2 よりも表面ラフネスが大きいことがわかった。化学結合状態分析からArまたはHeの希釈ガスに依存せず形成した SiO_2/GaN 構造はGaN表面に顕著な酸化が認められず組成急峻であることがわかった。また、 O_2/Ar 及び O_2/He プラズマにより形成したGaN MOSキャパシタの C - V カーブはヒステリシス及び周波数分散が小さく、理想 C - V カーブとよく一致し、非常に良い界面特性を示した。これら2種類のプラズマの差は、 I - V 特性に顕著に現れることが明らかとなった。

第8章では、本論文の総括及び今後の課題、展望について述べる。本研究において、ワイドバンドギャップ材料であるSiCおよびGaNの表面・界面構造制御に関する研究を行った。リモートプラズマおよびPDAにより、化合物半導体においても、良好な表面・界面構造の形成が可能であることを示した。これらの結果は、化合物半導体を用いた様々なデバイスの発展さらには、省エネルギー社会の実現といった観点から大きな意義があると考えられる。