

論文内容の要旨

博士論文題目

Interfacial and insulating properties of GaN metal-oxide-semiconductor structure with Al₂O₃ gate oxide

(Al₂O₃絶縁膜を用いた GaN MOS 構造における界面と絶縁膜の特性評価)

氏 名 藤本裕太

(論文内容の要旨)

金属-絶縁膜-半導体構造を有する窒化ガリウム(GaN)系電界効果トランジスタ(MOSFET)は、高効率かつ低損失をめざす次世代のパワーデバイスの実現に向けて魅力的である。MOS 構造は絶縁膜/GaN とのバンドオフセットにより漏れ電流抑制と絶縁破壊電界の向上に効果的であるとしてパワーデバイスへの導入が検討されている。一方で、GaN 系 MOS 構造における界面品質の問題によって閾値電圧変動などの信頼性低下が報告されており、界面制御技術の確立や界面物性の理解は喫緊の課題である。本研究では、自立 GaN 基板と絶縁膜として原子層堆積(ALD)を用いた ALD-Al₂O₃/GaN MOS 構造における絶縁膜及び界面品質改善と共にその効果の機構解明を試みた。

本論文は第 1 章「序論」から第 5 章「結論」までの全 5 章で構成される。

第 2 章では、Al₂O₃/GaN MOS 構造における絶縁膜及び界面品質改善として堆積後熱処理である高圧水蒸気処理 (HPWVA) を提案し、電気特性とその効果の検証をおこなった。HPWVA は水熱反応に起因する低温度域での高い酸化力が特徴である。HPWVA 条件として 400 °C、30 min、0.5 MPa で処理した場合、実行固定電荷密度は $1.2 \times 10^{11} \text{ cm}^{-2}$ 、及び界面準位密度は $6.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ を示すなど、電気特性の改善を確認した。この改善効果は、HPWVA 由来の H₂O モノマーによる反応で Al₂O₃膜の欠陥終端や再酸化の促進や界面酸化が起因していると考えた。しかし、1.0 MPa を超えると表面荒れと共に Al₂O₃/GaN 界面から酸化ガリウムが成長し電気特性の劣化を確認した。よって、HPWVA は圧力条件に敏感であり、表面荒れが発生しない範囲では電気的特性の改善が期待できることがわかった。更にデバイス応用に向けた 200 °C の高温域測定においても HPWVA の改善効果が発揮された。

第 3 章では、SPRING-8 の 2 次元表示角度分解型光電子分析器 (DIANA) を利用した光電子回折パターン(PIAD)により Al₂O₃/GaN 局所界面における原子構造の解明を試みた。Ga3p 及び N1s では GaN 基板に由来する PIAD を確認し、更に Al2p の PIAD は Ga3p と類似した

結果を示した。ALD- Al_2O_3 膜はアモルファス構造を有していることから PIAD を有さないはずだが、今回の結果から GaN 最表面で Ga サイト中に Al 原子が入っていることが示唆された。これらの結果から $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面に極めて薄い AlGaIn 遷移層が形成されていることがわかった。

第 4 章では、ALD 前駆体としてトリメチルアルミニウム (TMA) に代わり、1 つのメチル基が水素基に置換したジメチルアルミニウムヒドライド (DMAH) を使用した $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造の特性を検証した。その結果、絶縁膜の品質劣化に影響する膜中残留炭素が減少し電気特性の改善効果を示した。更にこれに HPWVA を施すことで固定電荷と界面準位密度が測定限界以下にまで低減し、良好な絶縁膜・界面品質を確認できた。したがって、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造において DMAH は TMA と比較して良好な前駆体であることを実証した。

以上より、本研究は、次世代のパワーデバイス実現に向けて、絶縁膜/GaN 界面の品質を低温で制御できる技術を確立し、また、光電子分光法によってその機構の一部を解明することができた。これらの知見は今後の高性能、高信頼性素子の開発に貢献できるものと考えられる。

(論文審査結果の要旨)

本論文は高効率かつ低損失である次世代パワーデバイスの実現に向けて、金属-絶縁膜-半導体構造を有する窒化ガリウム(GaN)系電界効果トランジスタ(MOSFET)における界面制御技術の確立や界面物性の解析についての研究である。本研究では自立 GaN 基板と絶縁膜として原子層堆積法(ALD)を用いた ALD- $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造における絶縁膜及び界面の品質改善とその機構に関してまとめており、以下に示す成果を得た。

(1) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造における絶縁膜及び界面品質の改善を目的として、堆積後熱処理(PDA)に着目した。水熱反応を利用した低温度域での高い酸化力が特徴である高圧水蒸気処理(HPWVA)を提案し、電気特性とその効果を評価している。その結果、電気特性は圧力依存性が高いことが明らかとなった。圧力条件 0.5 MPa (400 °C、30 min)の場合は、高絶縁性、高破壊寿命、及び絶縁膜・界面特性において顕著な電気特性の改善を確認した。この効果は HPWVA 由来の H_2O モノマーによる反応で Al_2O_3 膜の欠陥終端や再酸化の促進、及び界面酸化に起因している。しかし、圧力が高く(1.0 MPa~)なるにつれ、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面からの酸化ガリウムの発現により界面荒れが生じ電気特性が劣化した。よって、HPWVA は圧力条件に敏感であり条件制御により電気特性の改善効果がある事を見出し、200 °C での比較的低い温度領域においても電気特性の改善効果を確認した。

(2) $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 局所界面物性の解析を目的として、SPring-8 の 2 次元表示角度分解型光電子分析器を利用した光電子回折パターン(PIAD)により界面原子構造を評価した。ALD- Al_2O_3 膜はアモルファス構造を有していることから PIAD を有さないはずなのに対し Al2p の PIAD は Ga3p と類似した結果を示した。この結果から GaN 最表面で Ga サイト中に Al 原子が入っていることが示唆され、 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面に極めて薄い AlGaN 遷移層が形成されていることを見出した。

(3)絶縁膜及び界面品質改善として HPWVA に加え ALD の前駆体材料に着目した。トリメチルアルミニウム (TMA) に代わり 1 個のメチル基が水素基に置換されたジメチルアルミニウムハイドライド (DMAH) を利用することで、絶縁膜品質劣化に影響する残留炭素を低減でき電気特性の改善効果を確認した。更に HPWVA を施すことで固定電荷と界面準位密度を測定限界以下にまで低減でき、良好な絶縁膜・界面品質を得ることができた。

このように、本論文において報告された $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ MOS 構造における絶縁膜及び界面制御技術は工学的に高い価値を有しており、GaN 系パワーデバイス発展に向けて、独創的な形成技術としての可能性を示している。よって審査員一同は本論文が博士(工学)の学位論文として価値あるものと認めた。