

論文内容の要旨

博士論文題目

窒化物半導体における金属-絶縁膜-半導体構造の
特性評価と界面制御に関する研究

氏 名 吉 嗣 晃 治

(論文内容の要旨)

窒化物半導体ヘテロ接合を用いた金属-絶縁膜-半導体(MIS)構造の高電子移動度トランジスタ(HEMT)は、高出力かつ高周波動作を可能にする超低損失な次世代パワー半導体として期待されている。MIS-HEMT ではゲートリーク電流の低減と入力ゲート電圧範囲の延伸が見込まれる一方、異種接合界面品質によって動作不安定性が生じることが問題となっており、界面制御技術の確立と界面物性の本質的理解は重要課題である。本研究では、窒化ガリウム(GaN)系 MIS 構造を用いてゲート誘電膜の形成手法と界面制御手法について検討を行い、電気的特性に対する影響を調べることで高信頼性 MIS-HEMT の実現を目指した。

本論文は第1章「序論」から第6章「結論」までの全6章で構成される。

第2章では、異なる酸化剤を用いて原子層堆積(atomic layer deposition, ALD)した GaN 上 Al₂O₃ 膜の絶縁性、電荷伝導機構及び化学結合状態について評価し、Al₂O₃ 誘電膜の形成手法について検討した結果を述べている。

第3章では、原子層堆積過程に O₂ プラズマを用いた Al₂O₃ 膜を有する MIS 構造で、フェルミレベルピニング現象が生じる原因について議論している。Al₂O₃/GaN 断面観察の結果、電気的活性なプラズマ誘起損傷層の形成が確認された。この損傷層の成分は EDS 元素分析より AlGaO_x であることを見出した。また、AlGaO_x 複合損傷層の導入機構について、プラズマ粒子の GaN 結晶中への非弾性衝突モデルを用いて説明した。

第4章では、ALD-Al₂O₃ 誘電膜の改質及び界面制御手法として、熱分解・再結合・脱水縮合・脱炭酸といった水熱反応を促進する、高圧水蒸気処理(high-pressure water vapor annealing, HPWVA)を提案した。HPWVA を施した Al₂O₃/GaN MIS キャパシタの界面準位密度を High-low C-V 法から算出した結果、 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-2} \text{ eV}^{-1}$ を下回る界面特性が得られた。同様に、ALD-Al₂O₃ 誘電膜の絶縁性や破壊寿命についても改善されることを見出した。本技術を用いて Al₂O₃/AlGaIn/GaN MIS-HEMT を作製し直流伝達特性を評価した結果、閾値電圧変動の抑制に成功した。

第5章では、GaN系HEMTにおける表面電荷状態や結晶欠陥に起因する電流コラプス抑制のための表面処理技術として、前章で提案したHPWVAについて検討した結果を述べている。ゲートパルスのオン時間依存性から電流コラプスの回復過程を評価したところ、表面処理無し試料の回復には1s以上要したのに対し、HPWVA処理試料では僅か 1×10^{-4} sを示し、顕著に抑制されることを見出した。また、SRH統計に基づくトラップ準位を算出した結果、HPWVAは $E_c - 0.64$ eVまでの比較的深いAlGaN表面準位を低減することを明らかにした。

以上の結果より、誘電膜形成過程においてGaNに導入されるプラズマ誘起損傷層の組成を明らかにし、水熱反応プロセスが窒化物半導体系異種接合界面の制御技術として有効であることを示した。本研究で得られた知見により、高出力且つ高信頼性を有するGaNMIS-HEMTの実現が可能になり、延いては界面物性科学の発展に貢献すると期待される。

(論文審査結果の要旨)

本論文は窒化ガリウム(GaN)系金属-絶縁膜-半導体高電子移動度トランジスタ(MIS-HEMT)の基幹プロセスをなす誘電膜形成手法と界面制御技術について検討し高出力かつ高信頼性パワー半導体の実現に向けて研究されたものであり、以下に示す成果を得ている。

(1) ゲート誘電膜材料として Al_2O_3 、誘電膜形成手法として原子層堆積(atomic layer deposition, ALD)法を取り上げ、絶縁性評価の観点から ALD 酸化剤依存性を評価した。その結果、高絶縁性で化学量論的組成の Al_2O_3 膜を形成するためには O_2 プラズマが適していることを見出した。一方、 H_2O や O_3 を用いた場合、膜中に内包する酸素欠損に起因してゲートリーク電流が増長されることを電荷伝導機構解析より示した。

(2) 容量-電圧(C-V)特性評価より、 O_2 プラズマを用いた ALD- Al_2O_3 /GaN 界面でフェルミレベルピンニング現象が確認された。断面構造観察を行った結果、 AlGaO_x から成るプラズマ誘起損傷層が形成されていることを明らかにした。GaN 結晶中へのプラズマ粒子の非弾性衝突モデルによってプラズマ損傷層の導入機構を考察した。

(3) 上記の結果を踏まえ、プラズマレスプロセスによる MIS 構造の形成を目的とし、堆積後熱処理の導入による、低質な ALD- Al_2O_3 誘電膜の改質と界面制御の 2 つの効果を目指した。論文では、高温高压の水蒸気を用いた高压水蒸気処理(high-pressure water vapor annealing, HPWVA)を提案し、高絶縁性、高破壊寿命、及び界面特性で顕著な改善効果を見出した。MIS 界面品質の影響が現れる AlGaIn/GaN MIS-HEMT での直流伝達特性において、閾値電圧の動作安定性の実証に成功した。物性評価からは、水熱反応で説明される酸化剤の高拡散等の特異的な現象が得られた。

(4) GaN 系 HEMT において問題となっている表面電荷状態に起因した電流コラプスの解決を目的として、HPWVA 処理による表面処理を検討した。ゲートパルスのオン時間依存性から電流コラプスの回復過程を評価した結果、HPWVA 処理試料ではオン抵抗の回復に 10^4 s 程度の時間しか要さず、 AlGaIn 表面準位の低減に HPWVA 処理が有効であることを見出した。

このように、本論文は窒化物半導体系トランジスタの MIS ゲート及び表面処理の高品質・高信頼性形成技術としての可能性を示した点で工学的に高い価値を有し、界面物性科学やデバイスプロセス工学の発展に大きく寄与するものと考えられる。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。