

論文内容の要旨

博士論文題目

Interfacial properties of SiO₂/GaN metal-oxide-semiconductor structure and reduction of defects by high pressure water vapor annealing

SiO₂/GaN MOS 構造の界面特性評価および高圧水蒸気処理による欠陥の低減

氏名 古川 暢昭

(論文内容の要旨)

窒化ガリウム(GaN)を用いた金属-酸化物-半導体(Metal-oxide-semiconductor : MOS)構造の電界効果トランジスタ(Field-effect-transistor : FET)は、低損失かつ高出力動作が可能な次世代デバイスとして注目を集めている。その実用化に向けた課題として、絶縁膜中や絶縁膜/半導体界面に存在する欠陥起因の信頼性問題が挙げられる。本研究では、SiO₂/GaN MOS 構造の電荷分布を解析するとともに、高圧水蒸気処理による欠陥や電荷の低減を目的とした。

膜厚の異なる SiO₂/GaN MOS キャパシタを作製し、その C-V 特性から実効電荷密度 Q_{eff} を算出することで SiO₂/GaN MOS 構造中の電荷分布を評価した。解析結果から、界面近傍の固定電荷は正の値を、膜中のトラップ電荷は負の値をとることがわかった。また、熱処理はこれらの電荷両方の低減に有効である一方で、固定電荷の分布幅拡大という GaN 系 MOS 構造特有の現象を引き起こすことが明らかとなった。

また、SiO₂ 堆積時の原料流量比を変化させて MOS キャパシタを作製することで、欠陥の少ない高品質な SiO₂ 絶縁膜を堆積できる条件を見出した。

さらに、0.5 ~ 5 MPa で高圧水蒸気処理を行うことで SiO₂/GaN MOS 構造の特性向上を試みるとともに、その反応機構の解明にも取り組んだ。処理圧力の上昇は界面準位密度 D_{it} や Q_{eff} の低減に有効である一方で、SiO₂ 中への Ga 拡散とそれに伴う信頼性の低下を招くことがわかった。高圧水蒸気処理の高い酸化力は SiO₂/GaN MOS 構造の特性改善に有効であるが、界面の酸化が過度に進行すると GaN の結晶構造を損傷し、Ga の拡散と信頼性低下が生じ得ることが明らかとなった。

以上の結果より、SiO₂/GaN MOS 構造における電荷分布をモデル化することに成功した。さらに、高圧水蒸気処理の極めて高い酸化力は GaN の結晶構造を損傷し得るものの、処理圧力によってその酸化力を適正に制御すれば、非常に有効な GaN 系 MOS 界面の特性改善技術となることを示した。本研究で得られた知見は、GaN 系 MOS 構造において信頼性問題を引き起こす欠陥や電荷の本質的な理解を深めるものであり、さらにはそれらの低減にも大きく貢献すると期待される。

(論文審査結果の要旨)

本論文の提出者は、窒化ガリウム(GaN)を用いた金属-酸化物-半導体電界効果トランジスタ(MOSFET)の実用化に向け、 SiO_2/GaN MOS 構造中の欠陥に起因する電荷分布の解明及び、高圧水蒸気処理による高性能化に関する研究を行った。GaN 系 MOSFET は低損失かつ高出力動作が可能な次世代デバイスとして期待されているが、その実用化に向けては MOS 構造中の欠陥に起因する信頼性低下が問題となっている。こういった問題を本質的に解決するべく、MOS 構造における欠陥や電荷への理解を深めること、及び、これらの電荷を低減し SiO_2/GaN MOS 構造の特性を改善することの2点を目的として研究に取り組んだ。

本論文は、上記の背景と目的を述べた第1章から、総括を述べた第5章までの全5章から構成されている。

第2章では、 SiO_2/GaN MOS 構造における電荷分布の解明に取り組んだ。 SiO_2 膜厚の異なる SiO_2/GaN MOS キャパシタを作製し、その電気的特性を評価することで電荷分布のモデル化に成功した。固定電荷は正の値を、膜中トラップ電荷は負の値を持つことが明らかとなり、これら電荷の低減に電極形成後熱処理(PMA)が有効であることを見出した。また、PMA には固定電荷の分布幅を広げる効果もあることが明らかとなった。この現象は Si 系 MOS 構造では見られず、GaN に特有のものである。

第3章では、高品質な SiO_2 絶縁膜の堆積条件を検討した。堆積時の原料流量比を制御することで、欠陥の少ない高品質な絶縁膜を堆積可能な条件を見出した。

第4章では、様々な圧力で高圧水蒸気処理を施し、 SiO_2/GaN MOS 構造の特性向上及びその反応機構の解明に取り組んだ。0.5 ~ 1 MPa の比較的低压条件における高圧水蒸気処理では、絶縁膜中及び界面の電荷を効果的に低減することに成功した。一方で超高压条件(> 1 MPa)における高圧水蒸気処理では、絶縁膜中及び界面の電荷は低減されるものの、信頼性の低下を招き得ることが明らかとなった。物性評価から、この信頼性低下は SiO_2 中への Ga 拡散に起因していることが判明した。高圧水蒸気処理の高い酸化力は、GaN の結晶構造を損傷し SiO_2 中への Ga 拡散を引き起こす可能性があるものの、処理圧力によって酸化力を適正に制御すれば、GaN 系 MOS 界面の特性向上技術として非常に有効であることが示された。

以上より、本論文の要点は、GaN 系 MOS 構造における電荷分布を解明し電荷や欠陥の本質的理解を深めた点、及び、湿式熱処理の処理条件による MOS 構造特性の制御可能性を示した点である。これらの知見は GaN 系 MOSFET の実現に向けた重要課題である MOS 構造の高品質化に大きく貢献することが期待され、工学的に高い価値を有すると考えられる。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。