

論文審査の結果の要旨

氏名 三浦 喜直

本論文は、高微細化シリコン MOS 型電界効果トランジスタ (MOSFET) のゲート酸化膜材料として用いられる極薄シリコン酸窒化膜 (SiON 膜) における欠陥の微視的諸特性を、素子特性および信頼性の観点から、詳細な物理分析手法を用いて明らかにしたことを述べたものであり、全7章からなる。

第1章は序論であり、シリコン MOSFET のさらなる高性能化にはゲート酸化膜への窒素添加や高窒素濃度化が極めて有効であることを述べ、窒素添加プロセスの種類とその特徴、絶縁特性および信頼性の課題について概観するとともに、SiON 膜開発での微視的構造評価の重要性を述べている。

第2章では、極薄 SiON 膜界面近傍の窒素濃度分布および微視的構造の窒化プロセス依存性について、X線光電子分光法 (XPS) を用いて解析した結果を述べている。

界面が選択的に窒化される NO 窒化酸化膜における測定より、界面窒素と膜中窒素での N 1s ピークのケミカルシフトが界面からの距離によらず 0.4 eV であることを明らかにし、この差異が界面と膜中における窒素の第2近接原子の違いに起因していることを示している。表面側から窒化が進むプラズマ窒化シリコン酸化膜において、界面窒素に対応するピークが観測されない結果とも整合している。界面窒素は MOSFET の移動度低下を招くことから、界面窒素量の少ないプラズマ窒化酸化膜が、従来の NO 窒化酸化膜に比べて優れているとしている。

第3章では、スピン依存トンネル分光法 (SDT) が絶縁膜中の微量なトラップ準位の構造を知るための有効な手段であることを述べた上で、これを極薄 CVD SiN ゲート絶縁膜に適用した結果を述べている。過剰なゲートリーク電流に対応して観測される SDT スペクトルの特徴から、トラップアシスト (TAT) 電流の原因となる SiN 膜中のトラップ準位が Si 結合欠陥 (K 中心) によるものであることを明らかにしている。また K 中心は SiN の化学量論組成からのずれに起因するとされることから、SiON 膜の高窒素濃度化においても化学量論組成を保つことが重要であることを述べている。

第4章では、プラズマ酸化膜・酸窒化膜中に含まれる欠陥が MOSFET の絶縁特性に及ぼす影響を、SDT 測定によって評価した結果を述べている。過剰なゲートリーク電流に対応して SDT 電流が観測され、これが膜中トラップ準位を介した非弾性的 TAT 電流に起因するものであることを示した。また SDT スペクトルの特徴から、トラップ準位が、プラズマ酸化プロセスで発生した膜中の酸素欠損欠陥 (E' 中心の一種) であることを推測している。またベース酸化膜の酸素欠損密度を最小限とすることにより、プラズマ窒化酸化膜の絶縁特性を十分高められるとしている。

第5章では、SiO₂/Si(100)界面において知られる欠陥構造である P_b 中心 (P_{b0}, P_{b1}) が界面窒化により受ける影響を、NO 窒化酸化膜における電子スピン共鳴 (ESR) 測定により調べた結果を述べている。界面窒素濃度が高くなるとともに、P_{b0} は減少してホットキャリア耐性など絶縁膜の信頼性の向上に寄与するが、一方 P_{b1} は、窒化に伴う構造変化を通じて、ゲート負バイアス温度不安定性 (NBTI) 劣化要因となっている可能性があることを指摘している。

第6章では、プラズマ窒化酸化膜において、窒素添加で加速する NBTI の微視的機構について、 P_b 中心の挙動に基づき解析した結果を述べている。SiON 膜の NBTI には潜在的な界面欠陥 (P_b -H) からの水素脱離が関与しており、界面欠陥の構造変化、密度増加が NBTI の原因であるとしている。また、プラズマ窒化法の更なる高性能化と高信頼化のためには、界面への窒素到達量の低減と潜在的な界面準位の低減が課題であることを述べている。

第7章は、本研究の結論を述べており、ゲート絶縁膜への窒素添加がシリコン MOSFET の特性や信頼性に及ぼす影響を総括している。さらにゲート絶縁膜の微視的構造評価が、次世代の新構造・新材料の導入において一層重要となるという展望を示している。

なお、本論文の第2章に述べられた内容は小野春彦、安藤公一との、第3章、第4章および第5章に述べられた内容は藤枝信次との、また第6章に述べられた内容は、藤枝信次、西藤哲史、長谷川英司、小山晋、安藤公一との共同研究によるものであるが、いずれも論文提出者が主体となって実験および解析を行ったもので、本人の寄与が十分であると判断される。

以上、本論文は、シリコン MOSFET のゲート絶縁膜材料として用いられる極薄シリコン酸窒化膜における欠陥の微視的諸特性を明らかにし、先端 MOSFET の高性能化および高信頼性化の指針を示したという点で、物質科学への寄与は極めて大きい。よって、博士 (科学) の学位を授与できると認められる。