博士論文（要約）

# 高誘電率ゲート絶縁膜を有する MOS 型電界効果トランジスタの反転層キャリアの電子状態と輸送に関する研究

氏名　　飯島　良介

過去数十年にわたる LSI の集積度と性能の向上は、基本素子である MOSFET の継続的な微細化により支えられてきた。昨今の著しい微細化により素子に関わる諸寸法は、原子間距離などの半導体材料固有の特性長と同程度になっている。結果として寸法縮小という旧来の微細化だけでは更なる性能向上が原理的に困難な状況にある。MOSFET の心臓部に当たるゲート絶縁膜に関しても、その厚みが数ナノメーターの領域にまで低減され、これは従来材料の $SiO_2$ 数原子層に相当する。このような薄膜領域では基板とゲート電極の間に量子力学的な効果によって無視できない量の漏れ電流が流れるため、もはや絶縁性を充分に維持することができない。そこで $SiO_2$ よりも誘電率が高い（High-k）材料をゲート絶縁膜とすることで、絶縁膜の電気的容量は維持したまま物理的厚みを大きくしゲート漏れ電流を抑制する技術が検討されている。これが High-k ゲート絶縁膜であり本論文の主題である。イオン性材料である High-k 膜は旧来の $SiO_2$ 膜とは誘電率、禁制帯幅を含め様々な材料物性が本質的に大きく異なる。このような材料の性質の違いは、絶縁膜と隣り合って存在する MOSFET の反転層キャリアの電子状態や輸送に影響を与える。特に反転層容量とキャリア移動度に対する影響は、MOSFET の性能指標である駆動電流に深く関わるため、本質的な理解が極めて重要である。

本論文ではこのような状況を踏まえ、MOSFET の微細化が進みゲート絶縁膜として従来の $SiO_2$ 膜に代わり新たな材料である High-k 膜を用いた場合に、$SiO_2$ とは異なる High-k 材料の材料物性が MOSFET の反転層容量と反転層キャリア移動度に与える本質的な影響を系統的に明らかにする。High-k 材料として最も有望視されているハフニウムを母材とする（珪）酸化物を絶縁膜とする MOSFET を検討の対象とし、High-k 材料の選定や成膜プロセスの最適化は議論の範囲外とする。

本論文は 6 つの章で構成される。以下で各章の概要を説明する。

第 1 章は「序論」であり、MOSFET の微細化に伴いロジック CMOS 向け MOSFET のゲート絶縁膜として High-k 膜を用いることの必要性、High-k 膜の材料物性、High-k MOSFET 開発における課題を述べた。

第 2 章では、誘電率が高く禁制帯幅は狭い High-k 膜の材料的性質が反転層容量に与える影響を、特に界面特有の効果である鏡像効果とキャリアの染み出し効果に注目し、理論と実験の両面から検討した。精度良く評価することが難しい High-k MOSFET の反転層容量を、定量的に決定するための新たな電気的測定手法を整備した。また染み出し効果と鏡像効果それぞれの寄与を実験に基づき分離するための解析手法を、両効果の影響を数値的計算により徹底比較することで構築した。結果として、$SiO_2$ 膜に換えて High-k 膜を用いた場合には、ゲート絶縁膜のポテンシャル障壁高さの低下にともなう染み出し効果に起因して反転層容量が増大することを初めて実証した。さらに加えて、High-k 膜の等価酸化膜厚が

1nm を下回る領域まで積極的に低減した場合に High-k 膜の組成等が反転層容量に与える影響を調査した。その結果、反転層容量を意図的に制御することは難しく、染み出し効果による反転層容量増大を MOS の縦方向微細化に活用するには更なる検討が必要である。

第 3 章では、High-k MOSFET の移動度低下の主要因である High-k 膜中の固定電荷によるクーロン散乱（遠隔チャージ散乱）に関して、先端的素子構造であるダブルゲート MOSFET に High-k 膜を適用した場合を想定して移動度に与える影響を議論した。ダブルゲート MOSFET における重要な構造パラメーターはシリコンボディーの厚みとシリコン結晶面の選択である。量子力学的閉じ込めやキャリアの有効質量と遠隔チャージ散乱の間の関係性を実験に基づき系統的に調査した結果、遠隔チャージ散乱が与える影響は MOSFET の構造によらず、反転層キャリアと固定電荷の間の平均的距離を指標として統一的に理解できることを明らかにした。この知見に基づき計算実験を進め、ボディー薄膜化を進めたダブルゲート MOSFET では固定電荷とキャリアの平均的距離が縮まるため、基板のドーパント濃度が高いバルク MOSFET と同様に、遠隔チャージ散乱による移動度の顕著な低下が発生することが分かった。ただし固定電荷とキャリアの平均的距離がバルク MOSFET の場合には法線方向の有効質量に応じて変化するのに対して、ダブルゲート MOSFET ではボディー厚みにより物理的に規定される。このため法線方向の有効質量が異なる(100)面と(110)面の間の移動度の結晶面依存性が、ダブルゲート MOSFET とバルク MOSFET とで異なることを初めて明らかにした。遠隔チャージ散乱によって制限される移動度の MOSFET 構造に応じた変化を本質的に理解することは、多様な構造をとりうる先端的な High-k MOSFET を適切に設計する手立てを与えるため、応用上重要な意味を持つ。

第 4 章では、従来の移動度評価法が抱える課題を解決した新しいパルス測定法を構築し、更にその測定法を活用することで High-k MOSFET における移動度ユニバーサリティーの検証を行った。従来の移動度評価法では、High-k 膜中の欠陥準位によるキャリア捕獲を測定中に抑制することと、MOSFET 各端子の電位を完全に管理することを両立して移動度を決定することが難しかった。そのため多様なバイアス条件下で、キャリア密度が高い領域の移動度を精度良く決定することができない問題があった。これらの問題を全て解決した新しいパルス測定法を構築し、MOSFET のドーパント濃度や基板バイアス条件と移動度の関係性を系統的に調べることによって、キャリア密度が高い領域における移動度の実効電界依存性を定量的に明らかにした。$SiO_2$ MOSFET の場合と同様に、High-k MOSFET の移動度は実効電界の関数として一意的に定まること、すなわち移動度ユニバーサリティーの成立を初めて実証した。この結果は実効電界に応じて支配的散乱機構が変化する $SiO_2$ MOSFET の場合と類似した枠組みで、High-k MOSFET の移動度の制限要因を系統的に整理することができる可能性を示唆する。

第 5 章では、HfSiON MOSFET における遠隔光学フォノン散乱や表面ラフネス散乱といった High-k 固有の散乱機構が反転層キャリア移動度に与える影響を議論した。遠隔チャージ散乱の影響との切り分けと、過去の検討では充分とは言えなかった移動度の測定精度に対処することで、High-k 膜としてシリケート（HfSiON）を利用した場合の各散乱要因の影響をより定量的に再検証した。移動度の測定結果を、数値的に計算した遠隔チャージ散乱の移動度成分と徹底比較したところ、遠隔チャージ散乱だけでは実際の HfSiON MOSFET の移動度低下を説明できないことが確認された。遠隔チャージ散乱とは別の High-k 膜特有な散乱機構の関与が示唆される。我々が提案した新しいパルス測定法を最大限に活用して、実効電界の高い領域の移動度を幅広い温度範囲で精度良く評価し、移動度制限要因を系統的に解析した。その結果、表面ラフネスの形状変化に起因すると考えらえる移動度の変化が電子と正孔両方に確認された。さらに遠隔光学フォノン散乱に起因すると考えられる移動度の低下が電子のみに現れることが示唆された。High-k 膜としてシリケート（HfSiON）を利用した場合、酸化物（$HfO_2$）の場合ほどに大きくはないものの、遠隔光学フォノン散乱が移動度低下の無視できない要因となる可能性がある。これらの結果に基づき High-k MOSFET の全電界領域における移動度決定の枠組みを $SiO_2$ MOSFET と対比的に整理した。このことは移動度を的確に予測するために移動度モデリングの基礎を固めた意味で応用上重要な意味を持つ。

第 6 章は「結論」であり、各章で議論された内容を総括した。High-k 材料の材料物性が反転層容量とキャリア移動度に与える影響を定量的に考慮した先端的 MOSFET の構造設計の必要性を述べ、さらに将来の展望について言及し本論文をまとめた。