

審査の結果の要旨

論文提出者氏名 朴 敬花

シリコン MOS (metal-oxide-semiconductor)型電界効果トランジスタは、超 LSI を構成する要素として、最も重要かつ不可欠のデバイスである。シリコン MOS トランジスタ中には、シリコン酸化膜とシリコン基板の界面に 2 次元的な自由度を持つ電子層が形成されることが知られており、電子の伝導特性は 1960 年代より活発な研究がなされてきた。しかし、現在でも 2 次元電子の伝導特性には未解明な点が多い。本論文は、”Mobilities and Energy Relaxation Mechanisms of Two-Dimensional Electrons in Si Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistors” (「Si-MOS トランジスタ 2 次元電子系の移動度とエネルギー緩和機構に関する研究」) と題し、シリコン MOS トランジスタ中の 2 次元電子の伝導特性における散乱や電子間相互作用の効果を精密な実験と理論計算により論じたものである。論文は 5 章より構成されており、英文で記されている。

第一章は序論であり、基本的なシリコン MOS トランジスタ構造の概要を説明するとともに、従来から議論されてきた 2 次元電子系の移動度の研究や最近の研究動向を紹介した後、本研究の目的を明らかにしている。

第二章では、シリコン 2 次元電子系の散乱機構を解明するため、ホール測定を用いて電子移動度の温度依存性や電子密度依存性を精密に調べている。その結果、不純物散乱が支配的な領域で非常に強い移動度の温度依存性が現れることを見出した。この特徴は、ガリウムヒ素など化合物半導体のトランジスタでは見られない現象である。シリコン中の電子は比較的重い有効質量を有している。さらに伝導帯に複数の谷を持つバンド構造を有している。従って、電子の状態密度が大きく、電子間相互作用により強いスクリーニング効果が期待される。しかし、一方、大きな状態密度のためフェルミエネルギーが小さくなり、温度上昇とともに容易に電子系の縮退が解け、スクリーニングが弱まる。このような強いスクリーニング効果と、その温度上昇による低下が複雑な移動度の温度依存性を発現させていることを説明している。さらに、音響フォノン散乱と界面ラフネス散乱も含めて、移動度と理論計算の比較を行い、スクリーニングの温度・電子密度依存性が、散乱に非常に大きな影響を与えており、一般に知られている簡単なべき乗の依存性とはかなり異なる複雑な依存性を示すことを明らかにしている。

第三章では、電界による電子の加熱効果を詳細に調べることにより、室温領域で重要な散乱となる音響フォノン散乱の強度に関して議論を行っている。電界を印加すると電子系はジュール損により加熱され、電子系の温度は上昇する。一方、温度が上がった電子系はフォノン放出して冷却する。このジュール熱による温度上昇とフォノン放出による冷却のバランスにより電子系の温度(電子温度)が定まる。本論文では、電界による入力電力と電子温度の関係を磁気抵抗測定により精密に測定し、その振る舞いを音響フォノン散乱の理論と比較することにより、電子温度の上昇が音響フォノンの放出により律速されていることを示している。さらに実験と理論の比較より、音響フォノン散乱の強度を決定する重要なパラメータであるシリコン伝導帯の変形ポテンシャルが 12 ± 2 eV であると決定している。この値は、従来、バルクシリコン中の電子移動度から決定された値(9 eV)よりも大きな値であり、この値を用いることによりシリコン MOS 2 次元電子系の移動度の実験値とよりよい一致を見ている。

第四章では、シリコン MOS トランジスタのゲート酸化膜の薄膜化による反転層中の電子の輸送特性について議論している。薄い酸化膜を持つシリコン MOS 2次元電子系の有効質量を磁気抵抗測定により精密に測定したところ、電子密度の低下とともに、電子の有効質量が増加するという現象を観測した。この依存性はバンドの非放物線性から予測されるものと逆の振る舞いである。電子密度が低下すると、電子間の平均距離よりも、電子とゲート中の正電荷との距離が近くなり、それによるクーロンドラッグを受けると考えられ、観測された現象が、反転層中の2次元電子系とゲート中の正電荷とのクーロン相互作用によるものであると示唆している。

第五章は結論であり、本研究で得られた成果をまとめている。

以上のように本論文は、シリコン MOS 構造内の2次元電子を対象に電気伝導測定と理論計算とを詳細に比較し、電子伝導の理解にはスクリーニング効果やフォノン散乱の強度を厳密に考慮することが必須であることを示すとともに、酸化膜が極薄の MOS 構造における電子の有効質量増大に関する新知見を提供しており、電子工学に貢献するところが少なくない。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。