

## 論文の内容の要旨

### 論文題目 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)

氏名 朴 敬花

本論文は、現在 VLSI の主要な構成要素として用いられている Si-MOS トランジスタ内の 2次元電子系の散乱機構に関する研究について記している。様々な散乱機構が関与する 2次元電子系の移動度は、デバイスの性能を決定する重要なパラメータであり、実験と理論を詳細に比較することによって、電子系の支配的な散乱機構を明らかにした。また、外部から印加された電界による電子加熱効果を詳細に調べることによって、電子と結晶格子の相互作用の強さを特徴づける定数を求め、音響フォノン散乱の強度について議論する。さらに、薄い酸化膜を持つ Si MOSFETs の輸送特性を詳細に調べることにより、2次元電子系の電子有効質量の増加を観測し、ゲート酸化膜の薄膜化による影響についても議論する。

第一章は序論であり、Si-MOS トランジスタ構造の原理や現在進められている開発の傾向、さらに 2次元電子系の散乱機構などに関する従来の研究を紹介した後、本研究の目的を明らかにする。Si-MOS トランジスタの反転層内には、2次元的な伝導を示す電子系が形成され、VLSI の主要構成要素として用いられている。Si-MOS トランジスタ 2次元電子系では、不純物散乱、音響フォノン散乱、界面ラフネス散乱が支配的であることが知られており、それに関する様々な研究が従来から行われている。しかし、プロセスの技術の発展に伴い、これまで顕著に見られなかった伝導特性などが現れつつある。また、シリコン中の 2次元電子系ではスクリーニング効果が重要であり、各々の散乱機構に与えるスクリーニング効果の影響も詳細に検討する必要がある。また、トランジスタの室温付近の動作で重要な音響フォノン散乱に関しても、音響フォノン散乱の強さを表すシリコンの物理定数（変形ポテンシャル定数）は様々な異なる値が報告されており、精密にその値を決めることが必要である。さらに、Si-MOS トランジスタの微細化に伴い、酸化膜厚さが超薄膜化した場合、反転層の電子がゲート中に存在する正電荷から受けるクーロン力は大きくなり、その影響を検討することは重要である。

第二章では、シリコン 2次元電子系の散乱機構の解明のため、ホール効果により移動度を電子密度と温度の関数として系統的に調べた。その結果、不純物散乱が支配的な領域で

非常に強い温度依存性があることを見出した。そこで様々な散乱メカニズムの理論との比較を行い、温度上昇によるスクリーニングの低下を考慮することによって、移動度の強い温度依存性を説明できることを示した。高電子密度領域では界面ラフネス散乱が支配的であり、実験結果を最もよく説明する界面ラフネスの大きさは、これまで報告されている値より界面がより平坦であることを示すものであった。一方、温度が高くなると音響フォノン散乱が支配的になる。音響フォノン散乱の強度を決定するパラメータである変形ポテンシャル定数が、従来バルクシリコンについて報告されてきた値ではなく、本論文の第三章で議論するより大きな値 (12 eV) を仮定すると、良い一致が得られることがわかった。また、従来から移動度の電子密度依存性におけるユニバーサルな依存性が議論されているが、スクリーニング効果の温度・電子密度依存性を考慮すると、移動度は温度と電子密度の関数として複雑な振る舞いをするを明らかにした。

第三章では、シリコン MOS トランジスタ内の 2 次元電子の加熱効果を詳細に調べることによって、室温付近の主要な散乱である音響フォノン散乱に関する、より精密な議論を行った。電子系に電界を印加するとジュール熱により電子は加熱される。一方、加熱された電子系はフォノンを放出して冷却される。この加熱と冷却の釣り合いにより、電子系の温度が決定する。本研究では、磁気抵抗測定を用いて、電子系への入力電力と電子温度の関係を詳細に調べた。電子 1 個あたりの入力電力が  $3 \times 10^{-17} \text{ W}$  を越えると、電子温度が急激に上昇することを見出した。電子冷却課程には、フォノン散乱のみ関与するため、電子温度の上昇のデータとフォノン散乱による電子冷却の理論計算の比較により、音響フォノン散乱の強度を精密に決定することができる。そこで、フォノン散乱によるエネルギー損失レートの理論計算と実験の比較を行い、フォノン散乱の強度を決定するパラメータであるシリコン伝導帯の変形ポテンシャル定数を求めた。その結果、従来、バルクシリコンで用いられてきた変形ポテンシャル定数の値 (9 eV) より大きな値 ( $12 \pm 2 \text{ eV}$ ) の時に最もよく電子加熱の振る舞いを説明できることを見出した。さらに、この値を用いて室温付近の移動度を計算したところ、実験とのよりよい一致が得られた。

第四章では、薄いゲート酸化膜を持った Si-MOS トランジスタ反転層中のキャリア輸送特性を調べた。薄い酸化膜を持つ Si トランジスタ中の電子の有効質量を磁気抵抗の温度依存性より求めた。その結果、電子密度の低下に従い、電子の有効質量が増加する傾向が観測された。この電子密度依存性は反転層内の電子間の相互作用によるものと考えられている。さらに、25 nm と 5 nm の酸化膜を持つ試料について、電子の有効質量を比較したところ、薄い酸化膜を持つ試料中での有効質量の方が大きいことがわかった。この原因はまだ明らかではないが、薄い酸化膜を持つ構造中では、チャンネル中の電子とゲート酸化膜中の正電荷との相互作用が強くなり、それによるクーロンドラッグである可能性がある。

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。シリコン2次元電子系の移動度を系統的に調べることにより、スクリーニング効果の温度・電子密度依存性が重要であること、さらにそれにより移動度は温度や電子密度の関数として複雑な振る舞いをすることを明らかにした。また、電子系のエネルギー緩和機構を調べることにより、音響フォノン散乱の強度を表す重要な物理定数である変形ポテンシャル定数が、シリコンの伝導帯に対して  $12 \pm 2 \text{ eV}$  であることを決定した。さらに、薄い酸化膜を持つ Si-MOS トランジスタの輸送特性を調べることにより、電子の有効質量が増大する効果を観測した。

本研究による Si-MOS 構造内の2次元電子系の散乱機構の詳細な検討は、先端 Si-MOS トランジスタの伝導特性の理解に大きく貢献するものと考えられる。