

博士論文(要約)

Spin-dependent transport in ferromagnetic metal/insulator/silicon structures: Towards
the realization of spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors

(スピン MOS 電界効果トランジスタの実現に向けた強磁性金属/絶縁体/シリコン構造
におけるスピン依存伝導現象の研究)

平成 30 年 11 月 30 日提出
指導教員 田中 雅明 教授

東京大学大学院工学系研究科
電気系工学専攻
37117081
佐藤彰一

本論文ではスピン MOS 電界効果トランジスタの実現を目的とし、その実現のために強磁性金属/絶縁体/シリコン構造におけるスピン依存伝導現象の研究を行った。

第一章では、現在の高度情報化社会における電子デバイス、磁気デバイスの重要性と現状の問題点を指摘し、さらなる発展に必要なロードマップを示した。電子デバイス・磁気デバイスの両方の性質を持つ MOS 電界効果トランジスタの基本的な動作原理と、そのインパクトについて論じた。

第2章ではスピン MOS 電界効果トランジスタの動作に必要なスピン注入減少について、Valet-Fert model に基づいてその基本方程式を整理した。またシリコン中のスピンの拡散・緩和・歳差運動について、デバイスの形状や測定手法、電界効果などを取り入れた解析式を示し、スピン注入現象の統一的な評価手法を示した。

第3章では、強磁性 Fe/SiO₂/Si 構造における磁気伝導測定を行い、スピン注入現象を評価した。シグナルの磁場角依存性を正確に記述する新たなモデル(デッドレイヤーモデル)を提案し、Fe/SiO₂ 界面に形成されたデッドレイヤーが高効率スピン注入を妨げている可能性を指摘した。

第4章では、第3章で提案したデッドレイヤーモデルに基づき、様々な材料系における磁気伝導特性から、スピン注入に適した条件の調査を行った。

第5章では、Fe/Mg/MgO/Si 構造における、スピン注入現象を評価した。Mg 依存性から、我々の提案したデッドレイヤーモデルとスピン注入効率、そして磁化測定が互いに整合することを確認した。

第6章では、Fe/Mg/MgO/SiO_x/Si 構造における、スピン注入現象を評価した。SiO_x はプラズマ酸化によって形成し、その酸化時間を最適化することで、ほぼ理想的なスピン注入効率が達成された。コンダクタンス測定を行い、Mg 挿入によりデッドレイヤーの形成だけでなく、MgO 中への Fe の拡散が抑制され、そして SiO_x により MgO/Si 界面の電子準位密度が減少したことが明らかになった。デッドレイヤーを拡張した新たな

モデルを提案し、これらを統一的に説明した。

第7章では薄膜チャネルをもつ横型デバイスにおいて、スピン輸送現象の確認と、デバイスの形状によるシグナルの変化(形状効果)の評価を行った。形状効果を考慮しない場合、スピン注入効率の測定に大きな誤差が生じる可能性を指摘した。

第8章では有限の大きさをもつ電極からシリコン基板へのスピン注入を行い、その三次元的な拡散が磁気伝導特性に与える影響を評価した。数値計算によりその影響を評価し、簡便な解析手法を提案した。

第9章では、ショットキーバリア型 SpinMOSET を作成し、スピン MOSFET の室温動作を確認した。電気特性と磁気特性を組み合わせることで評価することにより、ショットキーバリアを介したスピン注入現象について新たな知見を得た。また、MOS 界面におけるスピン寿命と電子運動量寿命についても評価を行った。

第10章では本論文の総括を行い、スピン MOSFET 実現に必要な今後の課題を議論した。。