

## 審査の結果の要旨

氏名 佐藤 彰一 (さとう しょういち)

本論文は、Spin-dependent transport in ferromagnetic metal/insulator/silicon structures: Towards the realization of spin metal-oxide-semiconductor field-effect transistors (スピンドット 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ドット依存伝導現象の研究) と題し、全 10 章より成り、英文で書かれている。本論文では、強磁性金属/絶縁体/シリコン構造における電子スピンドット輸送現象をスピンドット効果 (印加磁場によるスピンドットの歳差運動現象) により評価し、さらにデバイス形状や Si 中の空乏電界によるスピンドットシグナルの変化、および Metal-oxide-silicon(MOS)界面に形成された 2 次元電子チャネルでのスピンドット緩和についての研究成果を述べている。

第 1 章は「Introduction」であり、電子スピンドット自由度を利用した次世代デバイス Spin-MOSFET と、その実現に必要な Si へのスピンドット注入・検出に関する研究背景と研究目的を述べている。その中で、Si へのスピンドット注入・検出に関するこれまでの研究の経緯と課題について述べ、本論文の研究対象としての位置づけと研究目的を示している。

第 2 章は「Theoretical analysis of the electrical spin injection and detection」であり、様々な測定手法、デバイス形状、電界分布に対応可能な電氣的スピンドット注入・検出の基本的方程式を導出している。三次元的なスピンドット拡散・歳差運動現象を複素スピンドット拡散長とグリーン関数を用いて解き、電界効果、形状効果を考慮したスピンドット効果の表式を解析的に導出し、従来用いられてきたスピンドット効果の表式との差異を指摘している。さらに、電氣的スピンドット注入測定で現れる特異な磁気抵抗現象、ブローダースピンドット効果についてその経緯と特徴を紹介している。

第 3 章は「Electron transport in Fe/SiO<sub>2</sub>/Si junctions under magnetic field」であり、Fe/SiO<sub>2</sub>/n<sup>+</sup>-Si トンネル接合素子におけるブローダースピンドット効果についての知見を得ている。磁場角度依存性を詳細に解析することで、ブローダースピンドット効果の特異な磁場依存性を表す表式を新たに導出している。様々な SiO<sub>2</sub> 膜厚を持つトンネル接合素子を評価することで、ブローダースピンドット効果の起源が Fe/SiO<sub>2</sub> 界面に形成されている磁氣的なデッドレイヤーによるスピンドット散乱であると結論し、新たなモデルを提案している。

第 4 章は「Electron transport in various ferromagnetic/tunnel barrier/Si junctions under magnetic field dependent」であり、様々な強磁性/絶縁体/n<sup>+</sup>-Si トンネル接合素子においてブローダースピンドット効果を測定し、デッドレイヤーの変化を調べている。強磁性金属を第 3 章で用いた Fe から異なる磁化特性を持つ Ni 及び Co に変化したトンネル接合素子では、第 3 章で提案したモデルと整合する結果を得ている。また、絶縁体を第 3 章で用いた SiO<sub>2</sub> から Mg/SiO<sub>2</sub>、Mg/MgO/SiO<sub>2</sub>、および Mg/MgO に変えたトンネル接合素子では、Mg/MgO 構造が最も Fe とのデッドレイヤーを作りにくいとの知見を得ている。これは Fe/MgO/n<sup>+</sup>-Si 構造がスピンドット注入によく用いられている事実と整合している。

第 5 章は「Electron transport in Fe/Mg/MgO/Si junctions under magnetic field」であり、Fe/Mg/MgO/n<sup>+</sup>-Si トンネル接合素子におけるスピンドット注入効率とデッドレイヤーの関係を Mg 挿入膜厚依存性により調べている。Fe と MgO 界面に薄い Mg 層を挿入することでデッドレイヤーの形成が抑制され、それに伴いブローダースピンドット効果の振幅と磁気秩序が回復すること、そしてこの結果が磁化測定の結果と整合することを明らかにしている。そして Mg 挿入膜厚 1 nm においてスピンドット注入効率が最大の 16% となることを示し

ている。

第6章は「Corrected trap-assisted tunneling model」であり、スピン注入効率とブローダーハシル効果の関係を統一的に説明するモデルを提案し、実験的にその有効性を検証している。Fe/Mg/MgO/SiO<sub>x</sub>/n<sup>+</sup>-Si トンネル接合素子におけるスピン注入効率、ブローダーハシル効果、電気抵抗の温度依存性、そして MgO/Si 界面及び MgO 膜中の電子トラップ準位密度を系統的に測定し、ブローダーハシル効果が準位を介した伝導と相関があり、一方スピン注入効率は準位を介さない直接トンネル伝導との相関があることを示している。これらの実験事実に基づいて新たなスピン伝導モデルを提案し、実験結果を解析することで、電子トラップ準位が非常に短いスピン緩和時間を有しており、そしてトラップを介した伝導では効率的にスピン注入ができないと結論している。

第7章は「Geometrical effect in four-terminal lateral devices fabricated on SOI substrates」であり、薄膜横型デバイスにおけるハシル効果の形状依存性を Silicon-on-insulator (SOI) 基板上に作成した薄膜横型デバイスを用いて実験的に検証している。第2章で新たに導出した薄膜横型デバイスにおけるスピン輸送方程式を用いて実験結果を解析し、チャンネル幅や電極長さといったデバイス形状を考慮することで正確なスピン注入効率、およびチャンネル中のスピン緩和時間が推定できることを示している。

第8章は「Geometrical effects in three-terminal vertical device fabricated on bulk Si substrates」であり、バルク Si 基板上に形成した縦型デバイスにおけるハシル効果の電極形状依存性を、理論計算と縦型デバイスを用いた実験により検証している。縦型デバイスにおけるスピン注入効率とスピン緩和時間の推定値が、その電極の大きさによって変化することを数値計算によって示している。そしてその変化量から、真のスピン注入効率とスピン緩和時間を推定する手法を提案し、Fe/Mg/SiON/n<sup>+</sup>-Si トンネル接合素子を用いてその手法の有効性を実験的に検証している。

第9章は「Spin lifetime and momentum lifetime in Si two-dimensional accumulation channel」であり、Fe/Mg/MgO/n-Si 接合を有するショットキー接合型スピン MOSEFET を作製し、スピン MOSFET の動作実証と2次元蓄積チャンネルでのスピン緩和時間の推定を行っている。作製した素子は室温において、高いオンオフ比（ $\sim 10^6$ ）のトランジスタ特性と0.003%の磁気抵抗変化比を得ている。チャンネル中の電子運動量緩和時間はホール測定と量子効果を考慮した自己整合計算を用いて推定し、スピン緩和時間はスピバルブ効果のチャンネル長依存性から推定している。様々なゲート電界において各緩和時間を比較することでその比がゲート電界によらず一定であることを示し、2次元蓄積チャンネル中でのスピンの緩和機構について議論している。さらに、Fe/Mg/MgO/n-Si 接合の Si 表面に形成された空乏電界によるスピン輸送について、拡散ドリフト方程式を用いて解析を行い、実験結果と整合性する結果を得ている。

第10章は、「結論と展望」であり、本論文で得られた結果のまとめと今後の展望を述べている。

以上これを要するに、強磁性金属 Fe から Si への電气的スピン注入現象を実験と理論、両方の側面から詳細に評価を行い、界面の磁氣的デッドレイヤーと電子捕獲準位との関係、また Si チャンネル中の空乏電界、およびデバイスの形状によるハシル効果の変化を明らかにし、さらにスピン MOSFET デバイスを作製してその動作を示すとともに、2次元蓄積チャンネル中のスピン緩和時間と運動量緩和時間を比較することでスピンの緩和機構を評価する手法を示したもので、スピントロニクスおよび電子工学の発展に寄与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。