

Quantitative and systematic analysis of bias dependence of spin accumulation voltage in a nondegenerate Si-based spin valve

工学研究科電子工学専攻

白石研究室 李 垂範

現代電子産業を支える金属酸化物半導体電界効果トランジスタ (MOSFET) は電子の電荷を輸送する電子デバイスであり、デバイスをスケールダウンすることで高性能化と高集積化を図ってきた。しかし、ナノスケール以下の素子の微細化は量子トンネル効果という物理的な限界が存在するため、新たな性能向上の指針が強く望まれている。その中で電子の有する電荷とスピン角運動量を共に用いるスピントロニクスという分野が登場した。スピン角運動量は磁性の起源であり、当該領域ではメモリとして不揮発性である磁性体が利用可能である他、電流を加えスピンの流れであるスピン流を利用する低ジュール損な情報伝達の応用が期待されている。デバイス素子提案の一つとして従来の MOSFET 構造のソース・ドレイン領域を強磁性体電極にした「スピン MOSFET」について説明する(図 1)。強磁性体は自由電子のスピンの偏極しており、その偏極は磁性体の磁化方向に対応する。チャンネルの半導体は非磁性体であるが、強磁性体から電流を流せばスピン偏極した電流状態が実現し、チャンネル中をスピン流が流れる。この時、強磁性ドレイン電極も同様にスピン偏極しているため、ドレイン電極の磁化方向によってスピン流が感じる抵抗が変化し、この磁気抵抗効果をスピン信号と定義する。よって当該素子では、ソース・ドレイン強磁性電極の磁化配置を平行(P)・反平行(AP)と切り替えることにより、素子の抵抗を制御することができる。更に、半導体チャンネルでは外部電界(ゲート電圧)によって電気の通りやすさが制御されるので、ゲート電圧を印加することでソース・ドレイン間の電流とスピン流の ON・OFF 制御が可能となる。つまり、スピン MOSFET では従来の「電界効果」と「磁気抵抗効果」という二つの抵抗制御機構を有する。この特徴を利用すれば、少数の素子で再構成可能な論理回路の実現や多値化素子としての活用ができ、従来の MOSFET 基盤の電子産業の省電力化、高集積化、高速化が実現する。

本研究では、チャンネル材料としてシリコンに着目した。シリコンは軽元素であり、結晶構造が反転対称性を有するため、原子間移動中にスピンが感じるスピン軌道相互作用の影響が小さい。スピン軌道相互作用が強い物質ではスピン角運動量は軌道角運動量に移行され易く、スピンの情報を失ってしまう。すなわち、スピン軌道相互作用の小さいシリコンは長距離スピン輸送のためのチャンネルとして適している。また、シリコンは半導体であるため、電界効果による抵抗変調ができる他、シリコンは既存の集積回路技術との整合性が非常に高いという特徴もある。近年、シリコン基板のスピン MOSFET にて「電界効果」と「磁気抵抗効果」による素子の抵抗変調、即ちスピン MOSFET の動作実証に成功していることから、シリコンはスピン MOSFET 実現に向けた有望な

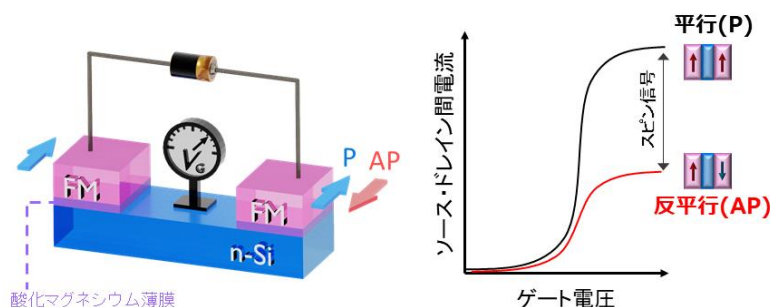


図 1. n 型シリコン (n-Si) の上に強磁性体/酸化膜の電極 (FM) が乗っているスピン MOSFET の概略図 (左) とゲート電圧 (V_G) 印加で期待される出力 (右)。

候補材料であると言える。

シリコンスピン MOSFET の実用化に向けた課題として、前述のスピン信号の大きさが挙げられる。報告されたシリコンスピン MOSFET におけるスピン信号の大きさは素子全体の抵抗に比べて 1 % 程度であり、実用化には 2 桁以上の信号強度の増大が求められる。先行研究では、物質中でソース・ドレイン間電界による電子の平均速度が速いとき、つまりソース・ドレイン間電流を大きくした際にスピンの輸送距離が増大するスピンドリフト効果を用いたスピン信号の増大を観測し、さらなる発展を求め物理的機構について検討した。具体的には、物質中のスピン輸送を表す理論式である「スピンドリフト拡散方程式」をスピン MOSFET を 1 次元的に表したモデルに適用して、理論計算と実験結果を定量的に比較した。しかし図 2 で示しているように、先行研究のスピンドリフト拡散モデルの計算（赤線）は低電流領域においては実験結果（黒点）を良く再現したが、ソース・ドレイン間電流の増加と共に徐々に実験結果を再現しなくなった。

以上の背景より本研究ではシリコンをチャンネルとしたスピン MOSFET におけるスピン信号のソース・ドレイン間電流依存性の実験結果と理論計算の不一致の物理的起源について調べた。一般に物質の界面のスピン流は抵抗の小さい物質へ流れやすい。シリコン中へのスピン流生成において、強磁性体金属・半導体間の電気伝導度の差に起因した強磁性体金属へのスピン流の再吸収を抑制するため、強磁性体とシリコンの間に絶縁体である酸化マグネシウムの原子レベルの薄膜 (0.8 nm) を挿入し、界面の抵抗を導入した。この時、絶縁薄膜を介した量子トンネル効果によってシリコン中にスピン流が生成されるが、酸化マグネシウムの抵抗により再吸収は防がれ、シリコンに流れ込む。しかし酸化マグネシウム薄膜に電界が印加されると、電圧の増加と共に界面抵抗が急激に減少し、シリコンと同程度まで抵抗が減少することが分かった。前述したようにスピン流は抵抗の低い物質へ流れやすいため、高電圧下での酸化マグネシウム薄膜はスピン偏極電子の強磁性体側への再吸収を防げなくなる。先行研究の理論計算では酸化マグネシウム薄膜は十分高い抵抗だと仮定していた為、本研究では実験から得た有限な界面抵抗の値を理論計算に導入した。図 2 での青点で示している界面抵抗の実験値を導入したスピンドリフト拡散モデルの計算結果は実験から得られたスピン MOSFET でのスピン信号の電流依存性（黒点）を再現した。本研究では強磁性体/酸化膜/シリコン界面の界面抵抗がバイアス電圧に対して大きい依存性を有し、スピン MOSFET の出力信号の入力電流依存性を明らかにした。この結果はシリコンだけではなく半導体にてスピン流を制御するデバイス全般に渡って、効率的なスピン流生成のために、延いては磁気抵抗効果による信号強度の向上のために強磁性体、非磁性体間の酸化膜の有限抵抗の変化の考慮が欠かせないことを示す。

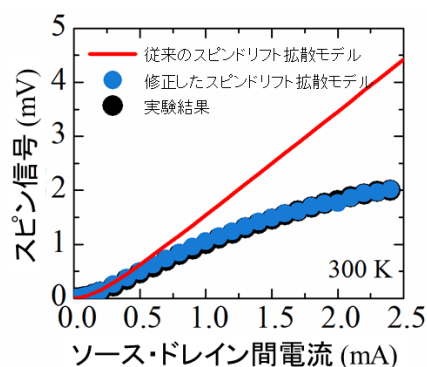


図 2. 室温 (300 K) におけるスピン信号のソース・ドレイン間電流依存性。赤線は従来の理論計算、青点は酸化マグネシウム膜の抵抗変化を考慮した理論計算、黒点は実験で得られたスピン MOSFET での出力信号（スピン信号）。