

ゲート電圧制御による磁化反転機構の提案

A new scheme for magnetization reversal controlled by gate voltages

○池田昌樹¹, 胡桃聡², 鈴木薫², 松田健一²Masaki Ikeda¹, Satoshi Kurumi², Kaoru Suzuki², Ken-ichi Matsuda²

Abstract: スピントロニクスデバイスの一つである磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)の動作には、高速で確実な磁化反転技術が必要とされている。本研究では、磁化反転の新しい機構として、MOSFET 型のデバイス構造を利用した磁化反転の可能性について検討した。デバイスのソースおよびドレイン電極部分に強磁性体金属を配置し、ゲート直下の反転層のキャリア密度を制御することで、強磁性体電極の相対的な磁化方向が変化する可能性があることを見出した。

1. 研究背景

現在の半導体トランジスタの技術は、さらなる高速化や高集積化が今後困難になると指摘され、また消費電力の増加も問題となっている。これらの問題に対し、次世代デバイスの一つとして、磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)が注目されている。MRAM は、高速動作、高集積化が可能で、なおかつ不揮発性を有することから、従来の問題点を解決することが可能であると考えられている。

MRAM の基本構造は、図 1 に示す強磁性トンネル接合 (MTJ) である[1]。薄い絶縁層を強磁性体電極で挟み込んだ三層構造である。この強磁性体電極間の相対的な磁化方向が平行・反平行状態のときのトンネル磁気抵抗の変化をメモリとして利用する。従って、MRAM の動作には、強磁性体電極の高速で確実な磁化方向反転技術が必要とされている。

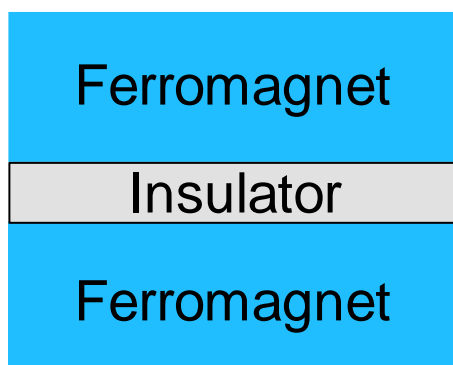


図 1 : 強磁性トンネル接合 (MTJ) の概略図。薄い絶縁層を強磁性体電極で挟み込んだ三層構造。強磁性電極間の相対的な磁化方向が平行状態と反平行状態でトンネル磁気抵抗が低い状態から高い状態に変化することを利用する。

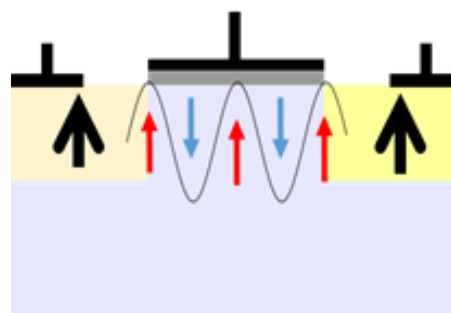


図 2 : MOSFET 型スピン注入磁化反転機構。ソース・ドレイン部分に強磁性体を配置する。ゲート電圧によって相対的な磁化方向を制御する。

従来の研究ではこの磁化方向制御に関して様々な方法が試行されてきたが、近年はスピン注入磁化反転が有望な方法と考えられている。この方法では電子スピン偏極した電流を MRAM の強磁性体電極に注入・抽出することで磁化方向制御を行う。実際、この方法はかなり実用的な成功を収めており、すでに垂直磁化膜を利用したギガビット級の MRAM の試作等にも利用されている。一方、この方法はまだ改善の余地があり、特に注入電流密度が高くなってしまおうという点や、ロジックを形成した場合の書き換え可能性の問題がある。

本研究の目的は、より低いスピン注入電流密度による確実な磁化反転を実現すること、ロジックの書き換えの自由度を確保することを目指し、図 2 に示すような MOSFET 型の構造における磁化反転の可能性について検討することである。

2. 基本原理

本研究で提案する磁化反転機構の基本的な原理は、いわゆる反強磁性結合三層構造と呼ばれるものに見出すことができる。通常、Ru 層などを中間層として両側に強磁性金属を接合すると、Ru 層の厚みによって両強磁性体の相対的な磁化方向が変化することが知られている[2]。これは、Ru 中の局在スピンによる電子散乱に起因した電子スピン密度の振動的空間分布が引き起こすと考えられている。またその振動周期はフェルミ波長、すなわちキャリア密度に依存している。

本研究では、MOS 構造部分にスピン散乱を引き起こす不純物を添加した構造を想定した。単純に、ゲート電圧によるキャリア密度の変化がフェルミ波長の変化を引き起こすと考え、一定のゲート長 (4 nm) の元でゲート電圧によるスピン密度の空間依存性の変化を調べた。

3. 結果と考察

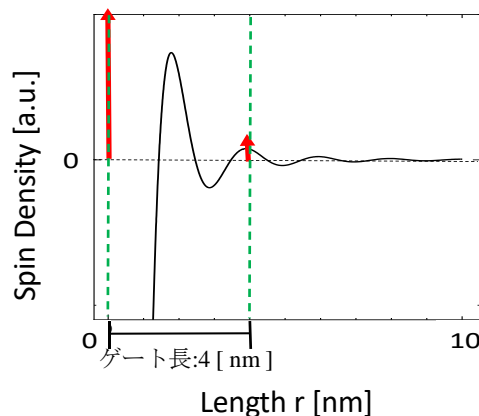
計算は、単純なボルン近似の範囲で、一電子が局在スピンによって散乱された場合のスピン密度の空間分布を求めた。これはいわゆる RKKY 相互作用の起源と同様のものである。その電子スピン密度の空間分布は以下の (1) 式によって与えられ、周期的に振動しながら減衰する。

$$\rho_{\text{spin}} = \frac{-Jm}{4\pi\hbar^2 r^4} \left[\frac{4\pi r}{\lambda_F} \cos\left(\frac{4\pi r}{\lambda_F}\right) - \sin\left(\frac{4\pi r}{\lambda_F}\right) \right], \quad (1)$$

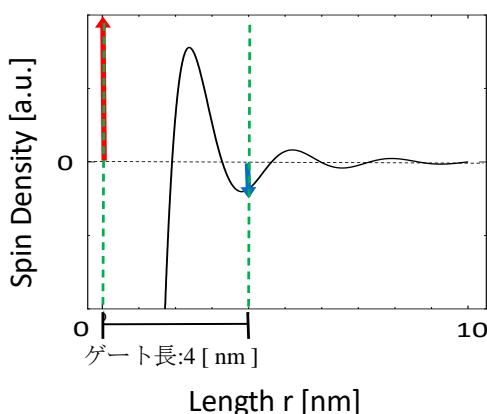
ここで J はスピン間の相互作用定数、 m は電子質量、 r は散乱体からの距離、 λ_F はフェルミ波長である。

もし一方の強磁性体電極から発せられた電子がこのような散乱を受けるとき、ゲート電極の直下では電子スピンの空間分布がそのキャリア密度に依存して生じる。そしてもう一方の強磁性体電極に到達したときにどちらのスピン状態になるのかによって、反強磁性結合三層構造と同様な相対的な磁化方向の差が生じると考えられる。

図 3 に、二つのキャリア密度に対応した電子スピン密度の空間変化を示す。図 3 (a) はキャリア密度を $n = 10^{26} \text{ m}^{-3}$ 、図 3 (b) は $n = 5.5 \times 10^{25} \text{ m}^{-3}$ とした時のスピン密度分布の波形である。それぞれフェルミ波長 λ_F は 4.0 nm, 5.33 nm となる。どちらも振動しながら減衰している様子がわかる。両者の分布を比較すると、ゲート長を 4 nm と仮定した場合、図 3 (a) の場合は磁化平行状態を、図 3 (b) では磁化反平行状態となる可能性を示唆している。



(a) キャリア密度 $n = 10^{26} \text{ [m}^{-3}]$ 時のスピン密度分布



(b) キャリア密度 $n = 5.5 \times 10^{25} \text{ [m}^{-3}]$ 時のスピン密度分布

図 3. 磁化固定層からの距離に対するスピン密度分布。緑線の間をゲート長とする。黒線はスピン密度分布を表し、各矢印は磁化方向を表している。

5. まとめ

本研究では、MRAM における磁化反転の新しい機構として、MOSFET 型の構造におけるゲート電圧による磁化反転について検討した。散乱を受けた電子のスピン密度の空間依存性を計算によって求める事により、一定のゲート長の元でゲート電圧によって強磁性体電極の相対的な磁化方向が変化するという事実を見出すことができた。

6. 参考文献

- [1] T. Miyazaki, et al., J. Magn. Mag. Mater, **139**, L231 (1995). J. S. Moodera, et al., Phys. Rev. Lett. **74**, 3273 (1995).
- [2] D. Houssameddine, et al., Appl. Phys. Lett. **96**, 072511 (2010).