

磁性トポロジカル絶縁体素子の電圧制御磁化反転における 書き込みエラー率の数値解析

Numerical analysis of write-error rate of voltage-controlled magnetization switching in magnetic-topological-insulator-based devices

○小峰 啓史¹, 綿引 詩門¹, 千葉 貴裕² (1. 茨城大, 2. 福島高専)

○Takashi Komine¹, Shimon Watahiki¹, Takahiro Chiba²

(1. Ibaraki Univ., 2. Fukushima NIT)

E-mail: takashi.komine.nfm@vc.ibaraki.ac.jp

電圧制御磁気異方性効果^[1]を利用した磁化反転制御は, その低消費電力性から電圧駆動型磁気メモリへの応用が期待されている^[2]. しかし, 磁化反転確率は電圧パルス形状に敏感であり, 書き込みエラー率 (Write-Error-Rate, WER) 低減が実用化の鍵となっている. 近年, 我々は磁性トポロジカル絶縁体 (MTI) の接合界面に形成される2次元ディラック電子系を活用したFET型磁気デバイス (Fig.1) を提案し, 界面状態由来のスピン軌道トルク (SOT), 及び, 垂直磁気異方性 (PMA) の電圧制御により低消費電力な磁化反転制御が可能であることを示した^[3]. しかし, 本素子におけるパルス形状や雑音が WER に及ぼす影響は明らかではない. 本研究では, パルス形状や雑音が磁化反転確率に及ぼす影響をマイクロマグネティックシミュレーションにより解析し, 素子の動作特性を理解することを目的とする.

WER の解析には, LLG 方程式に基づくマクロスピンモデルを用い, FET 型磁気デバイスのソース・ドレイン電場 E_{sd} およびゲート電圧 V_g の関数として, SOT 及び異方性磁場を考慮した^[3]. また, 磁化の熱揺らぎの影響を熱揺らぎ磁場として表現した. 本素子の理想的な動作は, E_{sd} とパルス幅 τ_g の矩形波ゲート電圧 V_g を与えることで, PMA および SOT が作用し, 磁化反転が起こる. 実際の素子では, 矩形波の歪みが WER に影響すると考えられることから, 矩形波をカットオフ周波数 f_c の一次遅れ回路を通すことで波形歪みの影響を考慮した. 素子寸法は $1\mu\text{m} \times 1\mu\text{m} \times 7\text{nm}$, ゲート電圧 $V_g = 0.39\text{ V}$ とし, 素子温度 $T = 10\text{ K}$, 基本的な物性値は文献^[3] のものを用いた.

カットオフ周波数を変え, 各パラメータで磁化反転シミュレーションを 10^5 回行い, WER を算出した. WER のカットオフ周波数 f_c 依存性を Fig.2 に示す. 結果として, ゲートパルスに $f_c = 1.7\text{ GHz}$ 程度の一次遅れ回路を通して十分な反転確率が得られることを示した. また, SOT 強度 E_{sd} の違いにより, カットオフ周波数を調整する必要があることがわかる. 講演では, WER の SN 比, 熱雑音依存性についても議論し, 素子の基本的な動作特性を議論する予定である.

【謝辞】本研究の一部は, JSPS 科学研究費補助金 (基盤研究 (B), 若手研究) の支援により行われました. ここに深謝致します.

[1] T. Maruyama, *et al.*, *Nat. Nanotech.* **4**, 158 (2009).

[2] Y. Shiota, *et al.*, *Nat. Mater.* **11**, 39 (2012); *Appl. Phys. Express* **9**, 013001 (2016).

[3] T. Chiba, T. Komine, *Phys. Rev. Appl.* **14**, 034031 (2020); T. Chiba, A. O. Leon, T. Komine, *Appl. Phys. Lett.* **118**, 252402 (2021).

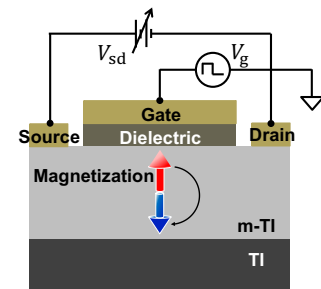


Fig.1 FET-like device with a MTI / TI heterostructure.

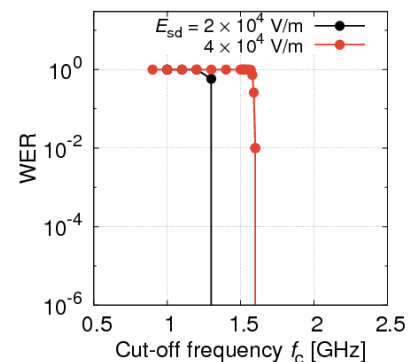


Fig.2 WER as a function of cut-off frequency f_c . The black and red circles indicate E_{sd} of 2×10^4 and $4 \times 10^4\text{ V/m}$, respectively.