

平成 30 年 5 月 26 日現在

機関番号：11301

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06081

研究課題名(和文)磁性体/絶縁体界面磁気異方性の電界制御の研究

研究課題名(英文)Electric field control of the interfacial magnetism in ferromagnet/insulator structure

研究代表者

金井 駿 (Kanai, Shun)

東北大学・電気通信研究所・助教

研究者番号：40734546

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 9,900,000円

研究成果の概要(和文)：磁気異方性の電界制御を利用した磁性メモリの磁化反転方式である、電界誘起磁化反転方式は、動作に寄与しないトンネル電流による発熱により、消費エネルギーは必要エネルギーの約1,000倍となっている。本研究では動作に作用しない電力を低減しCMOSと同程度のfJ/bitのレベルまで低減することを主な目的とした。絶縁膜及び磁性体、加えて動作電圧を設計することにより、CMOSと同程度で、かつ磁性メモリとして世界最小の動作時消費電力を達成した。加えて、CoFeB/MgO接合における各種磁性の電界制御について解明した。電界による磁性の制御を利用したナノメートルスケールの極微細磁性素子の特性を調べた。

研究成果の概要(英文)：The electric-field-induced magnetization reversal, in which magnetization is reversed with a torque induced through the electric-field control of the magnetic anisotropy, the switching energy is three orders larger than inevitably consumed charging energy by the electric-field application. This work aims to reduce the switching energy by reducing tunnel current and resulting Joule heating by designing materials properties of ferromagnet and insulator in the electric-field-effect device. We have revealed the proper composition, annealing temperature, and insulator thickness for the reversal, and demonstrated the switching energy less than 10 fJ/bit, which is the smallest switching energy ever achieved in magnetic memory, and as low as that with CMOS.

We also have revealed other electric field control of magnetism e.g., electric-field-effect in the magnetic stiffness constant by using nano-scale magnetic tunnel junctions through the electric-field-induced ferromagnetic resonance.

研究分野：スピントロニクス

キーワード：スピントロニクス

## 1. 研究開始当初の背景

物質中の電荷とスピン両方を操作するスピントロニクス素子は、メモリや論理回路に組み込まれ、実用化に向けた研究が行われている。2010年、高性能MRAMの構成材料である、CoFeB/MgO接合の磁気異方性が電界印加により変化することが見出された。この発見を応用し、2012年には直径80nmの微細磁気トンネル接合(MTJ)素子に電界を印加し、磁化容易軸方向を切り替えることでMTJのビットを書き換え、0.5ナノ秒の高速なビット制御が実証された。研究開始当初すでに商品化されていた、電流磁界によるMTJのビットの操作は、素子の高記録密度化に伴う必要動作電力の増大が課題であった。一方、電界印加によるビット制御方式の必要動作電力は、絶縁体を分極させるエネルギー $\epsilon E^2 V/2$ であり( $\epsilon$ は絶縁体の誘電率、 $E$ は印加電界、 $V$ は素子体積)、素子微細化に伴い減少する。数十nm径への微細化とCMOS並みの動作電力 $\leq$  fJ/bitを両立可能であると考えられ、nsを切る高速動作も実証されたことから、電界印加方式は国際半導体技術ロードマップ(ITRS 2013)に掲載され、新世代実用スピントロニクス素子として応用される気運が高まっている。

## 2. 研究の目的

電界印加方式の著しい低消費電力は、動作電圧印加時のトンネル電流の抑制により実現可能である。一方で、研究開始当初に実証されていた、電界誘起磁化反転時に発生する、典型的なトンネル電流による素子の発熱は、必要な動作電力の約1,000倍であった。本研究ではこの動作に作用しない電力を低減しCMOSと同程度のfJ/bitのレベルまで低減することを主な目的とした。加えて、CoFeB/MgO接合における各種磁性の電界制御について解明し、その物理を明らかにすること、電界による磁性の制御を利用したnmスケールの極微細磁性素子の特性評価を行った。

## 3. 研究の方法

上記目的のうち、消費電力の低減は素子抵抗を20倍向上する、または印加電界を3倍低減することにより達成可能である。磁性体と絶縁膜を最適化することによりこれらを達成し、半導体メモリ並の超低動作電力デバイスを揮発性メモリで実現することを目指した。

## 4. 研究成果

(1) **CoFeB/MgO接合における、磁性の電界変調効果のCoFeB組成、熱処理温度依存性** CoFeB/MgOの磁気異方性の電界による磁性変調効果は、熱処理の有無により大きく変化することがこれまでに分かっており(参考文献[1])、CoFeBの結晶状態が重要な役割を果たすことが予想される。熱処理温度及

び、組成を変化させた一連の電界効果素子を作製することにより、その特性を系統的に調べた。熱酸化膜付きSi基板上にTa(5nm)/Ru(10nm)/Ta(5nm)/CoFeB(0-2nm)/MgO(2nm)をrfマグネトロンスパッタリング法により成膜し、温度 $T_a = 200, 250, 300, 350^\circ\text{C}$ で真空中1時間の熱処理を施した。フォトリソグラフィによりチャネル幅30 $\mu\text{m}$ のHallバー形状に加工後、原子層堆積法(ALD)によりZrO<sub>2</sub>(45nm)を作製、Cr(5nm)/Au(50nm)を真空蒸着し、電界効果素子を作製した。CoFeB組成はCo<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.6</sub>B<sub>0.2</sub>またはCo<sub>0.4</sub>Fe<sub>0.4</sub>B<sub>0.2</sub>とした。膜面垂直方向へ磁場を印加し、Hall抵抗により、各電界印加時の磁気異方性を測定した。電界による磁気異方性変調量 $\xi$ (J/Vm)の熱処理温度、CoFeB組成依存性を調べた。特に、 $T_a = 250^\circ\text{C}$ 、Co<sub>0.2</sub>Fe<sub>0.6</sub>B<sub>0.2</sub>で $\xi$ は最大値73fJ/Vmとなった。(図1)薄膜CoFeBの結晶化温度は350 $^\circ\text{C}$ であることが知られている。最大の $\xi$ が得られた $T_a$ は、結晶化温度より約50 $^\circ\text{C}$ 低く、完全に結晶化する前に電界効果が最大となることを明らかにした。

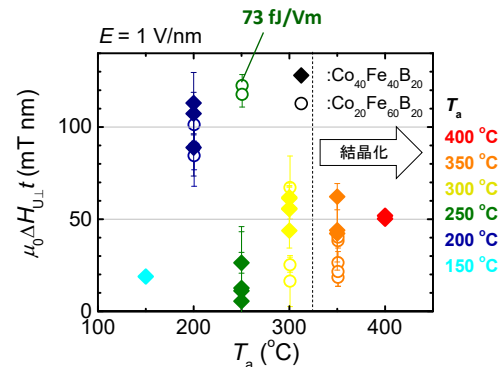


図1: CoFeB/MgO接合における1V/nmの電界を印加した際の磁気異方性の変調量の熱処理温度及び、CoFeB組成依存性。

(2) **CMOS並みの消費電力を実現する高性能磁気トンネル接合素子の実現** 通常、磁気トンネル接合(MTJ)の電流誘起磁化反転における消費電力の大半は、素子を通る電流によるJoule熱によるものである。電界誘起磁化反転においては、電流によるトルクがない場合にも磁化反転が可能であるため、素子の高抵抗化により、消費電力を低減可能である。サファイア基板上に、Ta(5nm)/Pt(5nm)/[Co(0.34nm)/Pt(0.4nm)]<sub>6</sub>/Co(0.4nm)/Ru(0.42nm)/[Co(0.34nm)/Pt(0.4nm)]<sub>2</sub>/Co(0.34nm)/Ta(0.3nm)/CoFeB(1nm)/MgO(1.0-2.8nm)/CoFeB(1.8nm)/Ta(5nm)/Ru(5nm)をdc/rfマグネトロンスパッタリング法により成膜し、フォトリソグラフィ及び電子線描画、アルゴンイオンミリングを用いて直径60nmまたは150nmの磁気トンネル接合素子に加工した。MgO絶縁膜を厚くすることにより、トンネル抵抗は指数関数的に増大する。スピン注入磁化反転方式においてよく用いられる磁気ト

ンネル接合と比較して約 3 倍の膜厚(2.8 nm)を持つ MgO 絶縁膜を用い、素子抵抗-面積積 176 k $\Omega$ m<sup>2</sup> の MTJ を作製した。外部面内磁界を印加しながら、電圧パルスを入力することにより、パルス電界継続時間依存性に対する磁化反転確率の明瞭な振動を観測した。従って高抵抗の磁気トンネル接合素子においても電界による磁化反転が可能であることを示した。一方で、MgO 絶縁膜膜厚の増大により、Fouler-Nordheim(FN)効果等による素子抵抗のバイアス依存性が増大し、動作時の素子抵抗が低下することを明らかにした。 $E = 1.3$  V/nm の電界を用いた場合、絶縁膜膜厚の増大により達成可能な消費電力の最小値は 200 fJ 程度であり、電界誘起磁化反転で必須となる数 100 aJ 程度の電荷蓄積のエネルギーと比較して数 1,000 倍大きい。この FN 効果は印加電圧の減少に対して指数関数的に抑制される。絶縁膜膜厚の増大に加え、印加電界強度を 0.78 V/nm まで低下させることにより、CMOS と同程度で、かつ磁性メモリとして世界最小の動作時消費電力を達成した。(図 2)

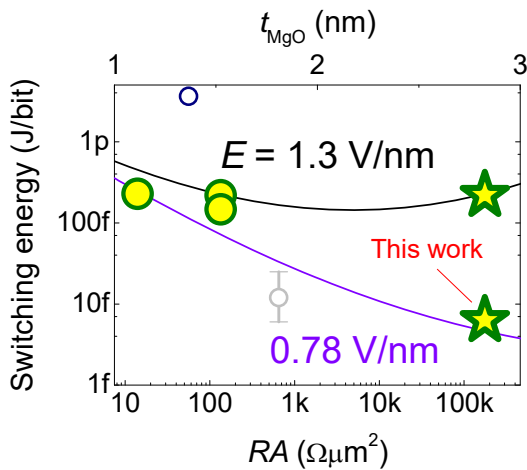


図 2 : 素子の非動作時の抵抗×面積に対する電界誘起磁化反転時の消費エネルギー。プロットは報告値である。本研究では動作時に抵抗が減少する効果を加味し、CMOS 並の消費エネルギーを実現した。

(3) 電界による磁性体ビットの消磁 (1)において、最大の電界効果を得た条件( $T_a = 250^\circ\text{C}$ ,  $\text{Co}_{0.2}\text{Fe}_{0.6}\text{B}_{0.2}$ )で、電界( $E$ )を印加することで、磁化容易方向を膜面垂直(垂直)/膜面平行(面内)で切り替えた。図 3 に示すように、 $E = -5.2$  MV/cm では明瞭なヒステリシスを描くのに対して、 $E = +5.2$  MV/cm ではヒステリシスが消失している。これは磁気異方性が電界により変化し、正電界では面内磁化容易ないしは超常磁性的になっていることを意味している。 $E = -5.2$  MV/cm を印加し、垂直磁化容易とする。外部垂直磁界  $\mu_0 H = 50$  mT により垂直方向に磁化を飽和させた後、 $\mu_0 H =$

0 mT とする。図 3 に示すように、 $E$  を  $-5.2$  MV/cm から  $+5.2$  MV/cm へ掃引することにより Hall 抵抗がゼロとなり、これは再び  $E$  を  $-5.2$  MV/cm としても変化しない。多磁区状態となって電界による消磁が達成されたと考えられる。 $E = -5.2$  MV/cm の状態で、外部垂直磁界を  $\mu_0 H = 0$  mT 方向から正方向へ掃引することで、磁化率が徐々に増大しながら飽和する。これは磁壁移動により磁化が飽和していることを示している。この新たな機能性は、電界を用いた消磁や、電界によるアナログメモリとしての動作を可能とする。

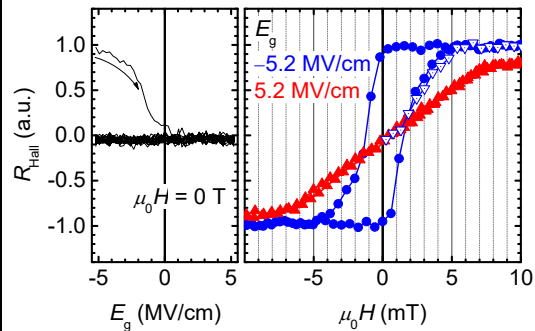


図 3 : Hall 抵抗  $R_{\text{Hall}}$  の電界  $E$  依存性(左)と、各印加電界における Hall 抵抗  $R_{\text{Hall}}$  の外部垂直磁界  $\mu_0 H$  依存性(右)。

(4) 交換スティフネス定数の電界による変調の実証 電界による磁気交換スティフネス定数の制御を試みた。交換スティフネス定数は、隣接する磁性体原子同士のスピン方向のねじれが生じるエネルギーであり、磁区幅や、スピン波のエネルギーと関係がある。我々は、これまでに、磁気光学効果顕微鏡を用いて電界印加下の磁区構造を観察し、磁区幅の電界による変調効果から、鋼管スティフネス定数の電界依存性を明らかにした。(参考論文[2])微細な磁気トンネル接合を作製し、スピン波励起周波数の電界依存性により、スティフネス定数の電界効果について調べた。サファイア基板上に、Ta (5 nm)/ Pt (5 nm)/ [Co (0.34nm)/Pt (0.4nm)]<sub>6</sub>/ Co (0.34 nm)/ Ru (0.44 nm)/ [Co (0.34 nm)/ Pt (0.4 nm)]<sub>2</sub>/ Co (0.34 nm)/ Ta (0.3 nm)/  $\text{Co}_{0.19}\text{Fe}_{0.56}\text{B}_{0.25}$  (1.0 nm)/ MgO(1.6 nm)/  $\text{Co}_{0.19}\text{Fe}_{0.56}\text{B}_{0.25}$  (1.8 nm)/ Ta (5 nm)/ Ru (5 nm)を dc/rf マグネトロンスパッタリング法により成膜し、直径 70 nm の磁気トンネル接合を作製した。rf 電界を印加することにより、磁気異方性の変調を介した磁気共鳴(FMR)を誘起する。MTJ に入射された rf 電界は、MTJ の歳差振幅に応じて反射され、dc 電圧( $V_{\text{DC}}$ )として検出される。dc 電圧の周波数、外部磁界依存性を測定することにより、Kittel(一様)モード、及びスピン波励起モードの FMR 周波数を測定した。図 4 は、 $V_{\text{DC}}$  の外部磁界  $\mu_0 H$  依存性である。明瞭なスピン波及び、Kittel モードの共鳴ピークが観測される。ピーク磁界の差  $\Delta H_{00-10}$  は、スティフネス定数  $A_s$  に依

存する。 $\Delta H_{00-10}$ の電界依存性を測定することにより、 $A_s$ の電界依存性を測定した。 $A_s$ は、1 V/nmの電界印加により、1.4 pJ/m変化した。(図4)磁区観察実験により求められた、 $A_s$ の電界変調量と比較して、数倍小さいが、オーダでは等しい。素子構造、熱処理温度やCoFeB組成の違いがこれらの違いを誘起している可能性がある。

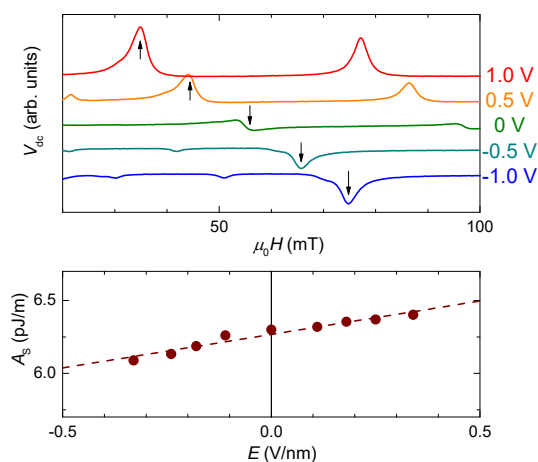


図4: ホモダイン検出電界誘起強磁性共鳴スペクトルの印加電圧依存性(上)。鋼管ステイプネス定数の印加電界依存性(下)。

#### 参考文献

- [1] S. Kanai, M. Endo, S. Ikeda, F. Matsukura, and H. Ohno, "Magnetic anisotropy modulation in Ta/CoFeB/MgO structure by electric fields," *J. Phys.: Conf. Ser.* **266**, 012092 (2011).
- [2] T. Dohi, S. Kanai, A. Okada, F. Matsukura, and H. Ohno, "Effect of electric-field modulation of magnetic parameters on domain structure in MgO/CoFeB," *AIP Advances* **6**, 075017 (2016).

#### 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計8件)

- ① Atsushi Okada, Shun Kanai, Shunsuke Fukami, Hideo Sato, and Hideo Ohno, "Electric-field effect on the easy cone angle of the easy-cone state in CoFeB/MgO investigated by ferromagnetic resonance," *Applied Physics Letters* **112**, 172402 (2018). DOI: 10.1063/1.4753816 査読有
- ② Shun Kanai, Fumihiko Matsukura, and Hideo Ohno, "Electric-field-induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions," *Japanese Journal of Applied Physics* **58**, 0802A3 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.0802A3 査読有
- ③ Takaaki Dohi, Shun Kanai, Fumihiko Matsukura, and Hideo Ohno, "Electric-field effect on spin-wave resonance in a nanoscale CoFeB/MgO magnetic tunnel junction,"

*Applied Physics Letters* **111**, 027403 (2017). DOI: 10.1063/1.4999312 査読有

- ④ Motoya Shinozaki, Eriko Hirayama, Shun Kanai, Hideo Sato, Fumihiko Matsukura, and Hideo Ohno, "Damping constant in a free layer in nanoscale CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions," *Applied Physics Express* **10**, 013001 (2016). DOI: 10.7567/APEX.10.013001 査読有

〔学会発表〕(計47件)

- ① 金井 駿、佐藤 英夫、仲谷 栄伸、松倉 文礼、大野 英男、"Thermal fluctuation in electric-field induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions observed by transmitted voltage," (poster), 第64回応用物理学会春季学術講演会、パシフィコ横浜、平成29年3月14日~17日
- ② S. Kanai, Y. Nakatani, M. Shinozaki, H. Sato, F. Matsukura, and H. Ohno, "Thermal Agitation and Speed of Switching in Electric-field Induced Magnetization Reversal of CoFeB/MgO Magnetic Tunnel Junctions," 14th RIEC workshop on SPINTRONICS, Sendai, Japan 17-19 November, 2016. (招待)
- ③ Y. Nakatani, M. Hayashi, S. Kanai, S. Fukami, and H. Ohno, "Electric field control of Skyrmions in magnetic nanodisks," 4th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Sendai, Japan, 19-20 November 2016. (招待)
- ④ A. Okada, S. He, B. Gu, S. Kanai, *et al.*, "Temperature and thickness dependencies of ferromagnetic resonance spectra of MgO/CoFeB/MgO," 4th JSPS Core-to-Core Workshop on "New-Concept Spintronic Devices", Sendai, Japan, 19-20 November 2016. (招待)
- ⑤ S. Kanai, F. Matsukura, H. Ohno, "Electric-field induced magnetization switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junction with thick MgO barrier," (oral), 応用物理学会秋季学術講演会、朱鷺メッセ、新潟市、平成28年9月13日~16日
- ⑥ S. Kanai, F. Matsukura, and H. Ohno "Electric-field induced magnetization precession and switching in CoFeB/MgO magnetic tunnel junctions," 2016 Joint Seminar: Tohoku University - University of York Prospect of Future Spintronics from physics to devices, Sendai, Japan, 29-30 August 2016. (招待)
- ⑦ S. Kanai, F. Matsukura, and H. Ohno, "How low energy the electric-field induced magnetization switching can be made? -A case of CoFeB/MgO/CoFeB magnetic tunnel junction," (oral), 3rd Workshop of the Core-to-core Project

Tohoku-York-Kaiserslautern, New concepts for future spintronic devices, Kaiserslautern, Germany, June 22-24, 2016. (招待)

[産業財産権]

○出願状況(計 1 件)

- ① 名称：記憶素子及び記憶素子の駆動方法  
発明者：金井 駿、松倉 文礼、大野 英男  
権利者：国立大学法人東北大学  
種類：特許  
番号：特願 2017-554424  
出願年月日：2017 年 3 月 29 日  
国内外の別：国内

○取得状況(計 1 件)

- ① 名称：記憶素子及び記憶素子の駆動方法  
発明者：金井 駿、松倉 文礼、大野 英男  
権利者：国立大学法人東北大学  
種類：特許  
番号：特許第 6256965 号  
取得年月日：2017 年 12 月 15 日  
国内外の別：国内

## **6. 研究組織**

(1) 研究代表者

金井 駿 (KANAI, Shun)  
東北大学・電気通信研究所・助教  
研究者番号：40734546