

令和 5 年 5 月 30 日現在

機関番号：11301

研究種目：基盤研究(A)（一般）

研究期間：2019～2022

課題番号：19H00844

研究課題名（和文）高効率スピン軌道トルク電圧制御デバイス創製を目指したナノ構造エンジニアリング

研究課題名（英文）Nanostructure engineering for realization of highly efficient spin-orbit torque device controlled by gate voltage

研究代表者

斉藤 好昭（Saito, Yoshiaki）

東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授

研究者番号：80393859

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 34,600,000円

研究成果の概要（和文）：重金属配線ナノ構造とスピン軌道トルク(SOT)の大きさの相関を調べることにより、SOTメモリデバイスの有力候補であるW/CoFeB系およびPt/Co系の2つの系の要素技術を確認した。重金属配線層として、W/Hf多層膜、Pt/Ir/Ptスペーサを有するsynthetic反強磁性構造を提案し、開始当時困難と考えられていた低抵抗・重金属配線で高効率SOT磁化反転を可能とすることに成功した。最も高効率なSOT磁化反転が観測された垂直磁化方式synthetic反強磁性重金属層の磁性層界面に、ジャロシンスキー守谷相互作用を導入することにより、室温で外部磁場無しでのSOT磁化反転の観測にも成功した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究により、これまで困難とされてきた「低抵抗で高効率な重金属配線技術」、「垂直磁化を有する強磁性層の無磁場でのスピン反転技術」の確立に成功した。また書き込み電流は、現行のスピントルク(STT)-MRAMよりも大きいですが、今回開発したSynthetic AF重金属配線材料は低抵抗であるため、本SOTの消費電力はSTTの1/2以下に低減できたことになる。また、大容量化に有効な垂直磁化を有する強磁性層の無磁場での磁化反転にも成功し、SOT-MRAMの社会での関心が高まっている。直磁気異方性の増大、反強磁性結合の消失、無磁場での磁化反転のメカニズムの理解など、ここで得られた学術的な意義も大きい。

研究成果の概要（英文）：We have established low-power and high-density technologies for the two systems, W/CoFeB and Pt/Co systems, which are candidates for high-speed spin-orbit torque (SOT)-MRAM device by investigating the correlation between nanostructure of heavy metals and magnitude of SOT. We have been proposed a W/Hf-multilayer structure and synthetic antiferromagnetic (AF) heavy-metal (HM) structure with Pt/Ir/Pt spacer layer, and succeed in establishing an efficient SOT magnetization switching technology for low resistive HM wiring, which was considered difficult to achieve at the time of the start of this “kiban-A” project. The most energy efficient SOT reversal has been observed in the synthetic AF systems. We have also succeeded in observing field-free switching at room temperature by using the effective field of Dzyaloshinskii-Moriya interaction at the interface of the magnetic layer of perpendicularly magnetized synthetic AF systems.

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 スピン軌道トルク ナノ構造エンジニアリング 電圧制御 低抵抗高効率重金属配線 ジャロシンスキー守谷相互作用

## 1. 研究開始当初の背景

スピン軌道トルク(SOT)-MRAM は、IoT や AI 技術の低消費電力化・高速化を実現する信頼性の高い技術として大きな期待が寄せられている。しかし、SOT-MRAM は 3 端子素子のため 2 端子の STT-MRAM に比べて 1bit 当たりのセル面積が大きく、現状、書込みの消費電力が STT-MRAM に比べて大きいという課題がある。多くのグループが SOT-MRAM 素子の書込み効率の向上を検討しており、本研究開発開始当時、高抵抗の重金属配線を用いることで高効率化に成功していた。しかしながら、LSI 分野で重要な低抵抗配線で高効率な書込みを実現することは容易ではなく、ブレークスルーが必要であった。また、大容量素子として向いているアスペクト比 1 が可能な垂直磁化膜を有するスピントネル接合素子を SOT スピン反転しようとした場合、外部磁場の印加が必要であり、LSI(Large scale integration)の実用に活用可能な、垂直磁化膜を無磁場でスピン反転する技術は見出されていないのが現状であった。

## 2. 研究の目的

本課題では、重金属配線および界面制御層のナノ構造とスピン軌道トルクの大きさの相関を調べることによりスピン伝導メカニズムを解明し、超低消費電力・高速スピンメモリデバイスであるスピン軌道トルク電圧制御デバイスの実現を目指した要素技術開発を推進することを目的とした。具体的には、下記の 3 点を目的として研究を進めた。

- (1) 低抵抗・重金属配線の高効率 SOT 磁化反転技術の確立
- (2) 垂直磁気異方性を有する強磁性層を外部磁場無しでスピン反転する技術の開拓
- (3) 垂直磁化方式のスピンデバイスを電圧制御によりセル選択するアーキテクチャ技術の開拓

## 3. 研究の方法

①垂直磁気異方性を有する強磁性層を用いることが MRAM で主流となっていること、②結晶成長の相性、③垂直磁気異方性を有する強磁性膜の SOT 反転ではダンピング定数  $\alpha$  の依存性が低いことの 3 つを考慮すると、W/CoFeB 系および Pt/Co 系の 2 つの系が SOT デバイスの材料系の有力候補となる。また、重金属の比抵抗( $\rho_{xx}$ )を増大させると、重金属材料のスピン生成効率であるスピンホール角  $\theta_{SH} = J_s / J_c$  ( $J_s$ : スピン流  $J_c$ : 書込み電流) が、外因性および内因性メカニズムに起因して増大することが知られており、 $|\theta_{SH}| = \sigma_{SH} \rho_{xx}$  の関係が実験でも確認されている。ここで、 $\sigma_{SH}$  はスピン伝導度である。しかし、LSI への応用を考慮すると配線の比抵抗  $\rho_{xx}$  の増大は好ましくない。したがって、比抵抗  $\rho_{xx}$  を増大させずに  $|\theta_{SH}|$  を増大させる、つまり、 $\sigma_{SH}$  を増大させる材料を探索することが重要となる。

本課題では、スピン軌道トルクの深い理解と学理を追求し、新しいアイデアを導入した技術構築を進め、W/CoFeB 系および Pt/Co 系の 2 つの系に関し、 $\sigma_{SH}$  を増大させる材料・構造を探索することとする。また、見出した低抵抗・高効率 SOT 材料を用いた垂直磁化方式のスピンデバイスを作製し、外部磁場無しでスピン反転する技術の研究開発を進めるとともに、電圧制御によりセル選択するアーキテクチャ技術の開発にも取り組む。

## 4. 研究成果

### (1) 低抵抗・重金属配線の高効率 SOT 磁化反転技術の確立

#### ① W系の低抵抗・高効率 SOT 重金属材料の発見

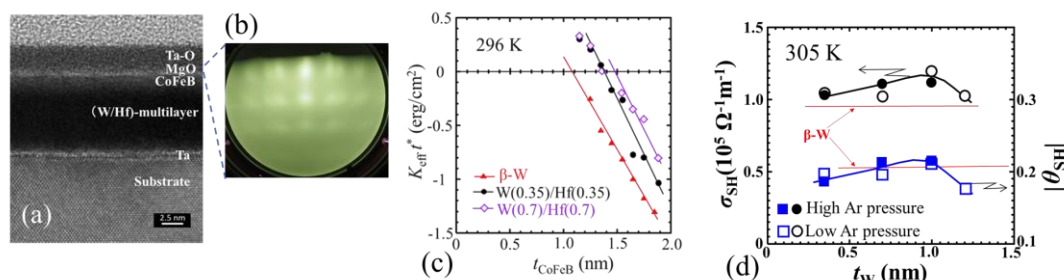
W系は  $\beta$  相、 $\alpha$  相の 2 つの結晶構造を有することが知られている。ここでは、第一原理計算で内因性メカニズムによるスピンホール効果の増大が予想されている  $\beta$  相、 $\alpha$  相  $W_{100-x}Ta_x$  合金の探索、および、ナノ構造エンジニアリングを導入した(W/Hf)多層膜アモルファス重金属配線の探索の 2 つのアプローチを試みた結果を示す。

$\beta$  相、 $\alpha$  相  $W_{100-x}Ta_x$  合金重金属は、ある Ta 濃度で、 $|\theta_{SH}|$  が最大値を示すことが明らかとなった。また、 $\beta$  相に関しては、Ta 濃度を増大すると  $W_{100-x}Ta_x$  の比抵抗の絶対値は単調減少することも明らかとなり、それに伴い、 $\sigma_{SH}$  も増大する。観測された  $\sigma_{SH}$  の最大は、第一原理計算で予想された内因性メカニズムによるスピンホール効果の増大傾向と一致していることから、これに起因していると考えられる。評価したスピン拡散長( $\lambda_s$ )は、 $\beta$  構造の方が  $\alpha$  構造より長く、 $\beta$  構造で Ta 濃度の増大とともに観測された  $\lambda_s$  の急激な減少は、 $\beta$ -W 構造(A15)から  $\beta$ -Ta 構造(tetragonal  $P42/mnm$ )への変化に起因していると考えられる。本成果は、Y. Saito et al., Appl. Phys. Exp. 12, 053008-1/6 (2019)に掲載された。

図 1 に、新規重金属配線材料である(W/Hf)多層膜を有する(W/Hf)多層膜/CoFeB/MgO-SOT デバイスを作製した結果を示す。(W/Hf)多層膜はアモルファス構造を取り、非常に平坦性が良いことが明らかになった。また、(W/Hf)多層膜上に良好な MgO(100)配向膜を有するアスペクト比 1 の垂直磁化方式の SOT デバイスを作製する技術の構築に成功し、トンネル磁気抵抗を観測した。

また、 $\beta$  相 W/CoFeB/MgO/Ta と (W/Hf) 多層膜/CoFeB/MgO/Ta の有効磁気異方性エネルギー  $K_{eff}$  を評価した結果、(W/Hf) 多層膜上の CoFeB は垂直磁気異方性が増大し、熱安定性が

良い記録層を作製できることが明らかとなった。(W/Hf)多層膜の比抵抗は、 $\beta$ 相Wに比べて低いことが明らかとなり、 $|\theta_{SH}|$ 、 $\sigma_{SH}$ の結果より、(W/Hf)多層膜は、低消費電力化に有効な重金属配線であることが明らかとなった。これら成果は、Y. Saito et al., Appl. Phys. Lett. 116, 132401-1/5 (2020)、Y. Saito et al., AIP Advances, 11, 025007-1/6 (2021)に掲載された。



**図1** 作製した(W/Hf)多層膜/CoFeB/MgO/Taの(a)断面TEM写真と(b) MgOトンネル障壁のRHEED回折像。(c) 有効磁気異方性エネルギーのCoFeB膜厚依存性、(d) スピン伝導度( $\sigma_{SH}$ )、スピンHall角( $\theta_{SH}$ )のW膜厚依存性

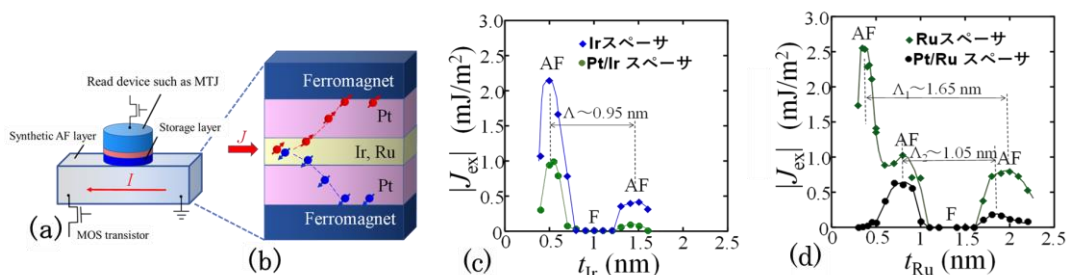
## ② Pt系の低抵抗・高効率SOT重金属材料の発見

Pt系重金属の研究開発として、重金属の比抵抗を増大させずに、スピン生成効率であるスピンホール角 $\theta_{SH}$ を増大するため、第一原理計算で内因性メカニズムによるスピンホール効果の増大が予想されているPt<sub>100-x</sub>Au<sub>x</sub>合金の探索、および、ナノ構造エンジニアリングを導入した(Pt/Ir)多層膜、新しい多層膜重金属構造(Synthetic反強磁性構造)の3つのアプローチを試みた。

Pt<sub>100-x</sub>Au<sub>x</sub>は、あるAu濃度で $|\theta_{SH}|$ 、 $\sigma_{SH}$ が最大値を示すことが明らかとなった。この $\sigma_{SH}$ が最大を取る振る舞いは、第一原理計算で予想された内因性メカニズムによるスピンホール効果の増大と傾向が一致しているため、これに起因していると考えられる。本成果は、Y. Saito et al., AIP Advances, 9, 125312-1/5 (2019)に掲載された。

また、(Pt/Ir)多層膜では、①(Pt/Ir)多層膜の $\rho_{xx}$ は、Pt膜の $\rho_{xx}$ に比べて低いこと、② $\theta_{SH}$ の大きさはPt膜に比べて大きなPt、Ir膜厚( $t_{Pt}$ 、 $t_{Ir}$ )領域があること、③ $\sigma_{SH}$ の大きさは(Pt/Ir)重金属多層膜の(Pt膜厚 $t_{Pt} \geq 0.8$  nm、Ir膜厚 $t_{Ir} \geq 0.8$  nm)の領域でPt単層膜より大きくなることが明らかとなった。以上の結果より、(Pt/Ir)多層膜を用いることで、Pt単層膜を用いた場合に比べて消費電力を著しく低減できることが明らかになった。本成果は、Y. Saito et al., Phys. Rev. B 104, 064439-1/11 (2021)に掲載された。

見出した(Pt/Ir)多層膜を活用し、独自のsynthetic反強磁性重金属構造を提案した(図2)。また、Pt層を介しても、Ir、Ruともに磁性層間に反強磁性交換結合を示すIr、Ru膜厚領域があることが明らかとなった。Irの場合、Pt、Irともに面心立方構造(fcc)を有するため、反強磁性の振動周期( $\Lambda \sim 0.95$  nm)に変化は無いが、Ruの場合、Ruは六方最密充填構造(hcp)であるため、fccのPtを挿入することにより反強磁性の振動周期の1つ( $\Lambda_1 \sim 1.65$  nm)は消失することが明らかとなった(図2(d))。また、Co/Pt/Ir(0.5 nm)/Pt/Co、Co/Pt/Ru(0.7 nm)/Pt/Coともに比較的厚いPt膜厚(0.8 nm)においてもCo層間に反強磁性層間結合が働いていることが明らかとなった。Hallバー素子を作製し、Pt単層膜/Co (Sample I)、(P/Ir)多層膜/Co (Sample II)、Co/Pt/Ir/Pt/Co synthetic反強磁性多層膜 (Sample III)のswitching特性を評価した(図3)。異常Hall効果の大きさは、Hall曲線の値と一致していることから、Pt単層膜/Co、(P/Ir)多層膜/CoはCo膜全体がスピン反転し、Co/Pt/Ir/Pt/Co synthetic反強磁性多層膜は上下のCoが反強磁性結合を保ったまま、電流パルスにより同時に反転していることが明らかになった。反転電流密度の大きさの外部磁場 $H_y = 0$  Oeへの外挿値は、Sample I~IIIのそれぞれに対して、 $J_c(H_y = 0) = 7.9 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>、 $6.3 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>、 $4.2 \times 10^7$  A/cm<sup>2</sup>と求まり、(P/Ir)多層膜/Co、Co/Pt/Ir/Pt/Co synthetic反強磁性多層膜のスピン反転電流密度はPt単層膜/Coのそれに比べて、約3/4倍、約



**図2** 提案した(a)SOT-MRAMのメモリセル構造、(b)Pt/NS/Ptスペーサ(NS = Ir, Ru)層を有するsynthetic反強磁性重金属配線、(Co/Pt)<sub>4.5</sub>/NS/(Co/Pt)<sub>4.5</sub>多層膜とCo/Pt(0.6 nm)/NS/Co多層膜(NS = Ir, Ru)の層間結合強度( $J_{ex}$ )の(c)Ir膜厚依存性、(d)Ru膜厚依存性

1/2 倍に低減されることが明らかになった。また、 $\theta_{SH}$  の大きさを評価した結果、Sample I~III それぞれに対して、 $\theta_{SH} = 7\%$ ,  $10.2\%$ ,  $15.6\%$  と求まり、synthetic 反強磁性多層膜のスピントルクの効率は、Pt 単層膜より 2 倍大きくなることを見出した。

Pt 膜厚を固定 ( $t_{Pt} = 0.6$  nm) して Ir 膜厚を振った ( $t_{Ir} = 0.5, 0.52, 0.56, 0.58, 0.6$  nm) Co/Pt/Ir/Pt/Co 積層薄膜を作製し、スピン反転効率の層間の交換結合強度依存性を調べた。結果、 $t_{Ir}$  の減少 ( $|J_{ex}|$  の増大) とともに  $\theta_{SH}$  が増大することが明らかとなった。Ir 材料の  $\theta_{SH}$  が小さいこと、 $t_{Ir}$  を変化させた厚さが  $0.1$  nm 以下と小さいことから、Ir 材料自体を薄膜化したことによる synthetic 反強磁性膜の  $\theta_{SH}$  の減少効果は小さく、図 4 は synthetic 反強磁性膜の  $\theta_{SH}$  の  $|J_{ex}|$  依存性を反映していると考えられる。synthetic 反強磁性膜の  $\theta_{SH}$  は、少なくとも  $|J_{ex}|$  が  $0.35$  mJ/m<sup>2</sup> 以下の範囲では、 $|J_{ex}|$  の増大とともに直線的に増大(最大の  $\theta_{SH} = 45.8\%$ )することが明らかとなった(図 4)。今回得られた実験結果は、定性的には LLG シミュレーションの結果と consistent な結果となっている。

以上に示したように、提案した synthetic 反強磁性膜において、スピントルクの効率を、Pt 単層膜より 6.5 倍大きくすることに成功した。得られた最大のスピントルク効率と比抵抗の値より、スピン伝導度の値は  $\sigma_{SH} = 1.12 \times 10^6 \Omega \cdot m^{-1}$  と求まる。この値は、synthetic 反強磁性膜を用いると、SRAM の書き込みの動的パワーの値(37.5 fJ)と同等のエネルギーで SOT-MRAM の書き込みが可能であることを示している(現行の MRAM のスピントネル接合のフィーチャーサイズ(F=38 nm)と、1nsec 書き込みパルス幅、10 nm の重金属配線厚さを仮定した)。したがって、Co/Pt/NS/Pt/Co synthetic 反強磁性 (NS = Ir, Ru) 多層膜は、将来の高速・低消費電力 SOT-MRAM のための有望技術であると考えられる。本成果は、Y. Saito et al., Phys. Rev. B 104, 064439-1/11 (2021), Y. Saito et al., Appl. Phys. Lett. 119, 142401-1/7 (2021), Y. Saito et al., Phys. Rev. B 105, 054421-1/11 (2022), Y. Saito et al., Appl. Phys. Exp. 16, 013002-1/6 (2023) と、次々に掲載された。

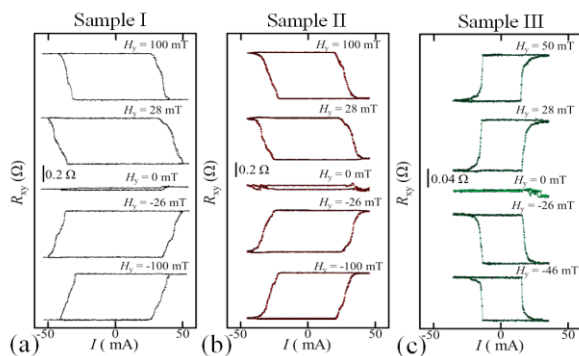


図3 (a) Sample I, (b) Sample II, (c) Sample III の SOT磁化反転

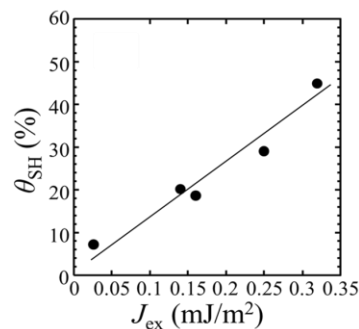


図4 スピンHall角 ( $\theta_{SH}$ ) の層間の交換結合強度 ( $J_{ex}$ ) 依存性

## (2) 垂直磁気異方性を有する強磁性層を外部磁場無しでスピン反転する技術の開拓

垂直磁化膜を有する synthetic 反強磁性膜を、外部磁場無しでスピン反転する技術を検討した。開発した垂直磁気異方性を有する Co/Pt/Ir/Pt/Co 系 synthetic 反強磁性重金属中の Pt, Ir は Co との界面でジャロシンスキー守谷相互作用が大きく働くことが知られている。そこで、Co の界面で働くジャロシンスキー守谷相互作用磁場  $H_{DM}$  の大きさを変え、垂直磁化膜を有する synthetic 反強磁性重金属配線は無磁場で反転できないか検討を行った。LLG シミュレーションから、synthetic 反強磁性重金属中の 2 つの強磁性層(Co 層)に  $H_{DM}$  を作用させた場合、作用している  $H_{DM}$  の大きさが小さい Co 層からスピン反転が始まることが予想されている。一方、Pt/Co、Ir/Co の  $H_{DM}$  の大きさは同程度で、なおかつ符号が同じであることが知られていた。したがって、Pt/Co と Co/Ir 界面では Co 層に作用する  $H_{DM}$  の符号が逆になるため、Pt/Co/Ir 積層構造では  $H_{DM}$  の大きさを小さな値にすることができる (Y. Saito et al., Phys. Rev. B 105, 054421-1/11 (2022))。ここでは、もう片方の Co の界面の構造を様々に変えることにより  $H_{DM}$  の大きさを変え、switching 特性に与える影響を調べた。結果、W, Ta, IrMn-capping 層、ならびに IrMn underlayer 層を用いた反強磁性重金属配線構造において、無磁場( $H_y = 0$  mT)でのスピン反転が可能であることが明らかとなった(図 5)。Pt と W、Pt と Ta は  $H_{DM}$  の符号が反対であることが知られているため、Pt/Co/W、Pt/Co/Ta 構造では、界面に生じるジャロシンスキー守谷相互作用による有効磁場の大きさ  $H_{DM}$  が大きい。この有効磁場により、垂直磁化膜は面内の-x 方向(書き込み電流が流れる方向)に少し傾き、磁化は  $m_x$  成分を持つことになる(図 6)。上下の Co 層は反強磁性結合していること、 $m_x$  成分に対応する stray field が生じることを考慮すると、もう一方の  $H_{DM}$  の大きさを小さく設計した Co 層の+x 方向に有効磁場( $H_{eff} = H_{interAF} + H_{strayF}$ )が印可されることになる。この有効磁場( $H_{eff}$ )が垂直磁化膜を有する synthetic 反強磁性重金属配線の無磁場でのスピン反転の起源であると考えられる。本成果は現在、論文投稿中である。

一方、無磁場反転が観測された W、Pt、IrMn-capping 層を付与した synthetic 反強磁性重金属配線では、スピン反転効率の低下が観測され、「垂直磁化膜の無磁場反転と、高効率スピン反転効率の両立」という新たな課題が存在することが明らかになった。今後、この課題解決に向け、更なる努力を継続していきたい。

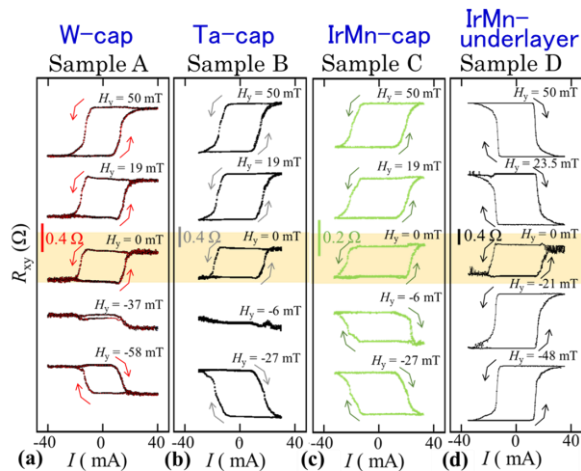


図5 (a) Sample A, (b) Sample B, (c) Sample C, (d) Sample DのSOT磁化反転

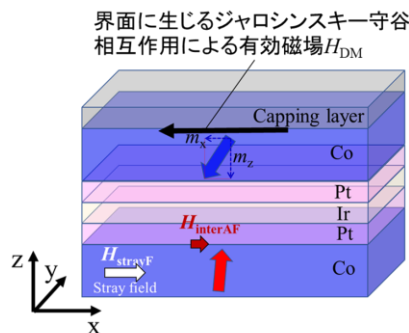


図6 SOTの無磁場での電流磁化反転の起源に関する説明図

### (3) 垂直磁化方式のスピンドバイスを電圧制御によりセル選択するアーキテクチャ技術の開拓

Synthetic 反強磁性重金属配線を用いて、電圧制御によりセル選択するアーキテクチャ技術を確認できるか検討した。図 7(a)のように、重金属配線に synthetic 反強磁性重金属を用い、Gate 電圧で synthetic 反強磁性の磁気異方性を制御できれば、電圧でスピン反転制御ができることが期待できるので、大容量 SOT-MRAM アーキテクチャの応用へ道を開くことができる。

まず、synthetic 反強磁性を作製するために今まで用いてきた厚い下地を無くし、synthetic 反強磁性構造を薄膜化し、直接 [強磁性層/スペーサ層/強磁性層] synthetic 反強磁性構造に電圧を印可できる膜構成を検討した。結果、CoFeB/Ru/CoFeB および CoFeB/Pt/Ru/Pt/CoFeB 構造において、反強磁性結合の観測に成功した。CoFeB/Ru/CoFeB の成果は、N. Tezuka, Y. Saito et al., accepted for publication in IEEE Xplore に掲載されることになっている。

本構造を、作製したバック Gate の熱酸化 Si 上に成膜し、図 7(b)構造の SOT 電圧制御デバイスを作製した。異常 Hall 効果の Gate 電圧依存性の評価を行った結果、電圧による Hall 抵抗曲線のわずかな変化を観測したものの、応用に活用可能な大きな変化は観測されなかった。低抵抗重金属電極に電圧印可する場合、重金属電極をかなり極薄にしないと電圧制御は実現しない (Nature Comm.9, 3118 (2018))との報告がある。本研究開発において、応用に必須な低抵抗で高効率なスピン反転効が可能な synthetic 反強磁性重金属を見出したが、低抵抗であるが故に、電圧がかかりにくいという両立が難しい課題があることが判明した。現在、重金属に酸化・窒化膜を付加した新たな電極構造のアイデアを導入した研究開発の準備を行っている。ここで得られた成果、作製技術、評価技術を発展させ、今後、さらなる努力を継続し、SOT-MRAM の大容量化への道を開く理想的な技術を完成していきたい。

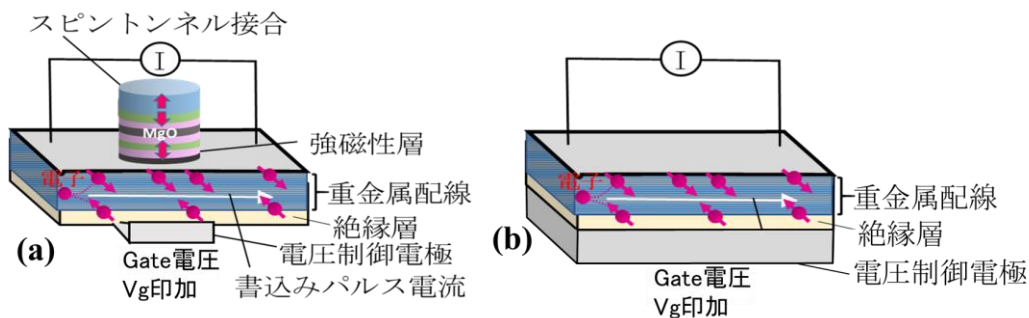


図7 (a) スピン軌道トルク電圧制御デバイス構造の模式図と、(b)動作原理確認のために作製したデバイス構造の模式図

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計8件（うち査読付論文 8件/うち国際共著 3件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Saito Yoshiaki, Tezuka Nobuki, Ikeda Shoji, Endoh Tetsuo	4. 巻 104
2. 論文標題 Antiferromagnetic interlayer exchange coupling and large spin Hall effect in multilayer systems with Pt/Ir/Pt and Pt/Ir layers	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 064439-1/11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.104.064439	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Yoshiaki, Ikeda Shoji, Endoh Tetsuo	4. 巻 119
2. 論文標題 Synthetic antiferromagnetic layer based on Pt/Ru/Pt spacer layer with 1.05 nm interlayer exchange oscillation period for spin/orbit torque devices	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 142401 ~ 142401
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/5.0063317	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Nguyen T. V. A., Saito Y., Naganuma H., Ikeda S., Endoh T., Endo Y.	4. 巻 12
2. 論文標題 Effect of oxygen incorporation on dynamic magnetic properties in Ta-O/Co-Fe-B bilayer films under out-of-plane and in-plane magnetic fields	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 035133 ~ 035133
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/9.0000297	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 Saito Yoshiaki, Ikeda Shoji, Endoh Tetsuo	4. 巻 105
2. 論文標題 Enhancement of current to spin-current conversion and spin torque efficiencies in a synthetic antiferromagnetic layer based on a Pt/Ir/Pt spacer layer	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 054421-1/11
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1103/PhysRevB.105.054421	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda, and T. Endoh	4. 巻 11
2. 論文標題 W thickness dependence of spin Hall effect for (W/Hf)-multilayer electrode/CoFeB/MgO systems with flat and highly (100) oriented MgO layer	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 025007-1/6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/9.0000011	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Saito Yoshiaki, Tezuka Nobuki, Ikeda Shoji, Sato Hideo, Endoh Tetsuo	4. 巻 12
2. 論文標題 Increase in spin-Hall effect and influence of anomalous Nernst effect on spin-Hall magnetoresistance in $\alpha$ -phase and $\beta$ -phase W <sub>100-x</sub> Tax/CoFeB systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Applied Physics Express	6. 最初と最後の頁 053008 ~ 053008
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.7567/1882-0786/ab1a66	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Saito Yoshiaki, Tezuka Nobuki, Ikeda Shoji, Sato Hideo, Endoh Tetsuo	4. 巻 9
2. 論文標題 Spin Hall effect investigated by spin Hall magnetoresistance in Pt <sub>100-x</sub> Aux/CoFeB systems	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 AIP Advances	6. 最初と最後の頁 125312 ~ 125312
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5129889	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Saito Yoshiaki, Tezuka Nobuki, Ikeda Shoji, Endoh Tetsuo	4. 巻 116
2. 論文標題 Large spin Hall effect and increase in perpendicular magnetic anisotropy in artificially synthesized amorphous W/Hf multilayer/CoFeB system	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 132401 ~ 132401
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0002642	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

[学会発表] 計14件(うち招待講演 0件/うち国際学会 9件)

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, S. DuttaGuppa, Y. Saito, K. V. De Zoysa, S. Fukami, S. Ikeda, T. Endoh, Y. Endo
2. 発表標題 Spin-orbit torque in naturally oxidized Ta-0/Co-Fe-B/Mg-0/Ta structures
3. 学会等名 IEEE International magnetic conference 2021 (Intermag 2021) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, Y. Saito, S. Ikeda, T. Endoh, Y. Endo
2. 発表標題 Effect of surface treatment on damping constant in Ta-0/Co-Fe-B heterostructures
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Saito, S. Ikeda, and T. Endoh
2. 発表標題 Co/Pt/NS/Pt/Co (NS= Ru, Ir) synthetic antiferromagnetic layers for spin-orbit torque switching originating from the spin-Hall effect
3. 学会等名 2022 Joint MMM-Intermag Conference (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, DuttaGuppa, Y. Saito, K. V. De Zoysa, S. Fukami, H. Naganuma, S. Ikeda, T. Endoh, Y. Endo
2. 発表標題 Evaluation of resistivity in Ta-0/Co-Fe-B multilayers with the presence of interfacial scattering
3. 学会等名 第 82回 応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2021年



1. 発表者名 赤谷一, 松浦昌志, 手束展規, 杉本諭
2. 発表標題 垂直磁化強磁性 / 非磁性 / 強磁性多層膜の磁化過程とスピン軌道トルク磁化反転
3. 学会等名 日本金属学会 2021年秋期講演 (第 169 回)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, Y. Saito, H. Naganuma, S. Ikeda, T. Endoh, Y. Endo
2. 発表標題 Dependence of dynamic magnetic properties on the Co-Fe-B layer thickness for Ta/Co-Fe-B and Ta-O/Co-Fe-B bilayers
3. 学会等名 2022年第69回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda and T. Endoh
2. 発表標題 Flat and highly (100) texture of MgO tunnel barrier and W/Hf thickness ratio dependence in MgO/CoFeB/(W/Hf)-multilayer large spin Hall effect electrode system
3. 学会等名 65th annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda and T. Endoh
2. 発表標題 Large spin Hall effect and enhancement of perpendicular magnetic anisotropy in artificially synthesized W/Hf multilayers/CoFeB system
3. 学会等名 IEEE International magnetic conference 2020 (Intermag 2020) (国際学会)
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 T. V. A. Nguyen, DuttaGuppa, Y. Saito, K. V. De Zoysa, S. Fukami, S. Ikeda, T. Endoh, Y. Endo
2. 発表標題 Investigation of spin-orbit torque induced magnetization switching in Ta-0/Co-Fe-B heterostructures
3. 学会等名 第 68回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda, H. Sato and T. Endoh
2. 発表標題 Spin Hall effect in $\alpha$ -phase and $\beta$ -phase W <sub>100-x</sub> Tax/CoFeB systems
3. 学会等名 10th International symposium on Metallic Multilayers (MML2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Y. Saito, N. Tezuka, S. Ikeda, H. Sato and T. Endoh
2. 発表標題 Spin Hall effect investigated by spin Hall magnetoresistance in Pt <sub>100-x</sub> Aux/CoFeB/MgO systems
3. 学会等名 64th annual Magnetism & Magnetic Materials Conference (MMM2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 斉藤好昭、手束展規、池田正二、佐藤英夫、遠藤哲郎
2. 発表標題 相および W-Ta合金/CoFeB積層系のスピホール磁気抵抗効果
3. 学会等名 日本磁気学会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Tezuka, S. Fujikawa, H. Akatani, M. Matsuura and S. Sugimoto, Y. Saito
2. 発表標題 Magnetic Switching Properties for Synthetic Antiferromagnetic Layers with Perpendicular Easy Magnetic Anisotropy
3. 学会等名 IEEE International magnetic conference 2023 (Intermag 2023 Conference) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Y. Saito, S. Ikeda, and T. Endoh
2. 発表標題 Enhancement of Damping-Like Spin-Orbit-Torque Efficiency in Synthetic Antiferromagnetic System using Pt-Cu Alloy
3. 学会等名 IEEE International magnetic conference 2023 (Intermag 2023 Conference) (国際学会)
4. 発表年 2023年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	手束 展規 (Tezuka Nobuki)  (40323076)	東北大学・工学研究科・准教授  (11301)	
研究分担者	池田 正二 (Ikeda Shoji)  (90281865)	東北大学・国際集積エレクトロニクス研究開発センター・教授  (11301)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------