

令和 6 年 6 月 20 日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2021～2023

課題番号：21H01750

研究課題名（和文）パリスティックスピン伝導制御による巨大トンネル抵抗変化の発現

研究課題名（英文）Observation of giant tunnel magnetoresistance change by ballistic spin transport control

研究代表者

介川 裕章（SUKEGAWA, Hiroaki）

国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究センター・グループリーダー

研究者番号：30462518

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 13,500,000円

研究成果の概要（和文）：単結晶薄膜の技術を駆使することで、強磁性トンネル接合（MTJ）におけるトンネル磁気抵抗比（TMR比）の大きな増大を実現した。（001）方位に成長させたCoFe/MgO/CoFe構造のMTJ積層に注目し、MgO界面へのナノ挿入層の導入や追加酸化プロセスの導入等による界面エンジニアリング技術の開拓に伴いTMR比の増大が観察され、最終的に室温TMR比の最高記録となる631%の値が得られた。これは界面電子状態の改善によってパリスティック伝導が顕著化し、非常に高いトンネルスピン分極率を実現されたためである。本成果は将来のスピントロニクスデバイスの大幅な性能向上の可能性を示すものである。

研究成果の学術的意義や社会的意義

室温におけるTMR比の増大は磁気センサーや磁気メモリ（MRAM）を含む幅広いスピントロニクス応用にとって重要な課題である。しかし長い間TMR比の増大は停滞しており、短期間での増大は見込めない状態にあった。本課題では、MTJのバリア層の界面に着目した開発を行ったことで、15年ぶりに室温TMR比の最高値を更新しMTJの高出力化の筋道を示した。これによって、スピントロニクス素子の電気出力の大幅な増大による近い将来のセンサー感度向上やメモリ素子の高密度化・高速動作につながる事が期待できる。

研究成果の概要（英文）：A significant enhancement in the tunnel magnetoresistance (TMR) ratio in magnetic tunnel junctions (MTJs) has been achieved using single crystal thin film technology. Focusing on MTJ stacks with CoFe/MgO/CoFe structures grown in (001) orientation, an enhancement in the TMR ratio was observed by developing interface engineering techniques through introducing nano-insertion layers and additional oxidation processes at the MgO barrier interfaces. Finally, the room temperature TMR ratio record of 631% was achieved. This giant TMR ratio is due to the improvement of the electronic states at the interfaces, leading to a pronounced ballistic spin-transport and a resulting very high tunneling spin polarization. This achievement indicates the potential for significant performance improvements in future spintronic devices.

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 強磁性トンネル接合 トンネル磁気抵抗効果 エピタキシャル成長 磁性薄膜

### 1. 研究開始当初の背景

強磁性トンネル接合 (MTJ) は磁性薄膜を用いた微細電子デバイスであり、ハードディスクドライブにおけるリードヘッドや、情報不揮発性を持つ固体メモリである MRAM のメモリセルとして現在活用されている。MTJ の基本構造は図 1(a) に模式的に示す通り、2 層の強磁性層 (鉄 Fe、コバルト Co 等) の間にバリアと呼ばれる極薄の絶縁層を挟んだものである。これらの応用では、強磁性層の磁化相対角度によってバリアを介するトンネル抵抗値が変化する現象であるトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果が利用される。例えば図 1(b) に示すように、平行磁化状態 (P) と反平行磁化状態 (AP) を外部磁場によって切り替えることができ、この時の最大の抵抗変化率の大きさは TMR 比と呼ばれる。P 時の抵抗を  $R_P$ 、AP 時の抵抗を  $R_{AP}$  とすると TMR 比 (%) =  $100 \times (R_{AP} - R_P) / R_P$  とあらわされる。一般的に TMR 比が大きいほど磁気センサーの感度の向上やメモリ動作の高速化が可能になるなどデバイス性能が向上する。このため、特に室温における TMR 比の向上のための開発競争が 1990 年代後半から繰り広げられてきた (図 6(b) も参照)。MTJ のバリア層には開発初期にはアモルファスのアルミが用いられ、2004 年以降は MgO が多く用いられるようになった。MgO バリアは (001) 配向した構造として得られやすく、この配向 MgO を介したコヒーレントトンネル効果と呼ばれるメカニズムによって TMR 比が大きく増大する (S. S. P. Parkin *et al.*, Nat. Mater. **3**, 862 (2004), S. Yuasa *et al.*, Nat. Mater. **3**, 868 (2004))。MgO バリアを用いることで 2008 年には 604% の室温 TMR 比が報告されている (S. Ikeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008))。

TMR 比の大きさは素子の電気出力に直結するため、現在もデバイス応用にとって重要な性能指数の一つである。しかし、TMR 比の増大は長く停滞しており、実用素子に用いることができる TMR 比は現在も 100~200% 程度にとどまっている。したがって、スピントロニクス応用、ひいてはナノエレクトロニクスの進展のためには、真に巨大な TMR 比を実現することは極めて重要な課題である。このため、我々は顕著なコヒーレントトンネル効果が期待できる Fe/MgO/Fe(001) 型の MTJ 構造に改めて着目した。MgO の上下界面の改善を進めた結果、従来の実験値のほぼ 2 倍となる 417% の室温 TMR 比を観測した (T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Lett. **118**, 042411 (2021))。また低温では 900% を超える TMR 比が実現し、Fe/MgO/Fe の理論伝導計算で得られる典型値である 1000% に迫る値を達成した。したがって、Fe/MgO/Fe のバリア層界面周辺の構造を高度に制御して作製する技術を開拓することで、さらに大きな増大が期待できると認識するに至った。さらに、興味深いことに TMR 増大に伴い TMR 振動という現象が増大することもわかった。この現象は MgO バリア厚によって TMR 比がおおよそ 0.3 nm 周期で振動的に変動するものであるが、理論計算では十分再現されていない。TMR 比の実験値は理論値に近づく一方で、その振る舞いには理論との乖離が逆に大きくなり、TMR 効果の本質的な理解が不足していることもわかってきた。

### 2. 研究の目的

そこで、本研究課題では、バリア界面構造の改善を進めることで TMR 比向上を目指すことを目的とした。特に、界面における不整合欠陥の抑制のため Fe などの磁性層と格子整合性が非常に良い MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> 系スピネルバリアの導入を目指した。また、磁性層とバリアの界面において化学的に急峻な界面を得るため、磁性層とバリア間のナノ原子層挿入や、バリア内の酸素欠陥抑制のための追酸化の手法の開発を目指した。また、界面の改善に伴う TMR 振動現象の影響を詳細に解析することで振動メカニズムの解明も目指した。

### 3. 研究の方法

MTJ ウェハは超高真空マグネトロンスパッタ装置 (到達真空度  $10^{-7}$  Pa 台) を用いて、MgO(001) 単結晶基板上に Cr をバッファ層とし、下部磁性層、バリア層、上部磁性層、IrMn 反強磁性層からなる積層を基本構造とした。バリア成膜には高品位界面を得やすい電子線蒸着を用い、他の層

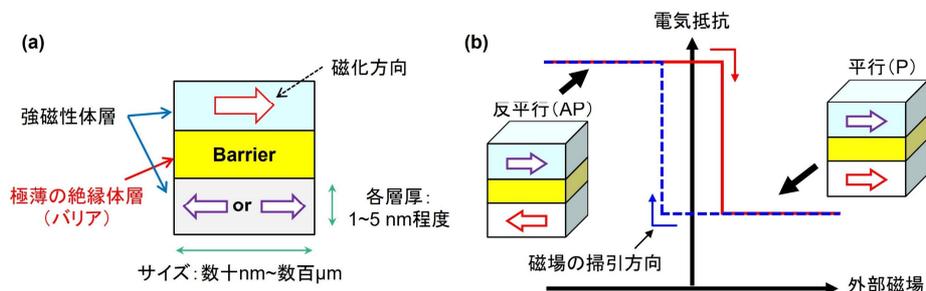


図 1 (a) 強磁性トンネル接合 (MTJ) の構造の模式図。 (b) MTJ の TMR 効果。磁場により P と AP 状態が切り替わるとバリアを介した電気抵抗が変化する。

はマグネトロンスパッタによる室温成膜を行った。各層は平坦化や結晶性改善のためポストアニールを行った。

まず、(1) 格子整合性の改善による効果を探るため、磁性層を Fe に固定しバリア層には  $Mg_4Al-Ox$  を新規開発した。 $Mg_4Al-Ox$  焼結体から電子線蒸着を行うことで Fe/ $Mg_4Al-Ox$ /Fe(001) 構造の MTJ ウェハを作製した。

次に、(2) バリア層には MgO を用い、MgO バリアの上下界面に  $Co_{50}Fe_{50}$  (CoFe) 層を導入することで有効的なトンネルスピントランスミッタ率増大による TMR 向上を目指した。図 2(a)に模式的に示すように、下部 MgO 界面には Mg 層の挿入、MgO 成膜後には後酸化を行いバリア近傍の酸素濃度の精密な調整を行った。(1) (2) いずれにおいてもリニア駆動シャッターを用いてウェハ内でバリア膜厚を連続的に変調させた傾斜膜として得ることで微細加工後に TMR 比のバリア膜厚に対する振動を精密に観測できるように工夫した (図 2 (b))。

作製した MTJ ウェハは 2 kOe の磁場中で真空熱処理を行い上部磁性層に交換バイアスを付与することで、P と AP 状態を磁場掃引により分離可能にした。ウェハの TMR 比と面積抵抗値 (RA) の評価には面内電流測定法 (CIPT) を用いた。また、フォトリソグラフィ、アルゴンイオンミリングを用いて  $10 \times 5 \mu m^2$  サイズの円柱状素子に微細加工し、直流四端子測定によってより精密な電気抵抗値及び TMR 比を測定した。

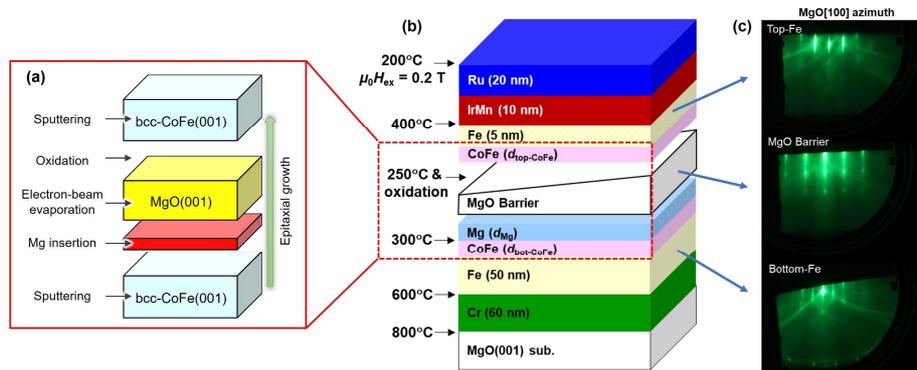


図 2 (a) TMR 比増大に向けた CoFe/MgO/CoFe 型 MTJ の各層の作製プロセスの模式図。(b) 作製した積層構造の模式図。左側の数字はポストアニール温度。(c) 上部 Fe、MgO バリア、下部 Fe 各層の熱処理後表面の RHEED パターン。

#### 4. 研究成果

(1) Fe/ $Mg_4Al-Ox$ /Fe による TMR 振動の顕著化 (Appl. Phys. Lett. **120**, 032404 (2022))

図 3 に Fe/MgO/Fe と Fe/ $Mg_4Al-Ox$ /Fe の室温 TMR 比 (a)及び RA の対数値 (b)のバリア層膜厚依存性を示した。これらは 10 mV 以下の低バイアス領域で測定したものである。Fe/MgO/Fe は以前の研究代表者らにより同一の装置で作製した素子の結果である (Appl. Phys. Lett. **118**, 042411 (2021))。  $Mg_4Al-Ox$  では TMR 比の最大値は MgO の 417% から 429% に増大した。TMR 振動幅も増大し MgO の 80% から  $Mg_4Al-Ox$  では 125% になった。一方、振動周期はおおよそ 0.3 nm であり、バリア組成による有意な変化は見られなかった。興味深いことに、 $Mg_4Al-Ox$  における TMR 振動の形状が MgO でみられる正弦波型に代わり、ノコギリ波状に変化していることがわかる。従来、TMR 振動は高品位 Fe/MgO/Fe 構造などで観察されてきたが、正弦波からの大きな乖離がみられたのは初めてである。TMR 振動幅の増大と形状の変化は  $\log(RA)$  のバリア膜厚依存性からも理解できる。MgO の場合あまり大きな振動成分がみられない。一方、 $Mg_4Al-Ox$  では線形から大きく外れ、階段状に変化するほど大きな振動成分が RA プロットに重畳していることがわかる。TMR 比の振動的変動は、RA の P と AP の振動周期の差はみられず、代わりにピークのわずかなずれ (振動の位相ずれ) によるものであることもわかった。

次に Fe/ $Mg_4Al-Ox$ /Fe の TMR 比を低温 (10 K) で計測したところ 1034% が得られた。この値は Fe/MgO/Fe における典型的な理論 TMR 比である 1000% 以上の領域に到達したといえる。これらの結果から、MgO から  $Mg_4Al-Ox$  にバリア

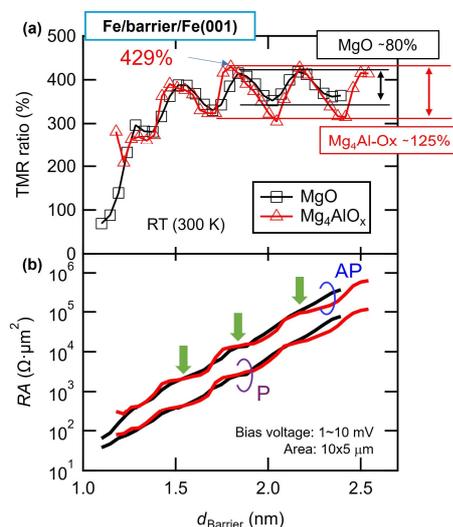


図 3 Fe/MgO/Fe 及び Fe/ $Mg_4Al-Ox$ /Fe 構造の単結晶 MTJ のバリア厚さ ( $d_{Barrier}$ ) 依存性 (室温)。(a) TMR 比、(b) 面積抵抗 RA。P と AP に分けて示した。

ア層を置き換えることによって TMR 比の向上に加え、TMR 振動の増大にもつながっている。Mg<sub>4</sub>Al-Ox は MgO と同じ岩塩構造を取っており、Al を含むため MgO よりも格子定数が低減される。これによって Fe と MgO (不整合 3.8%) よりも界面欠陥の抑制が実現されたことが TMR 比、振動増大に寄与していると考えられる。

## (2) CoFe/MgO/CoFe による室温 TMR 比の更新 (Appl. Phys. Lett. **122**, 112404 (2023))

CoFe/MgO/CoFe 型素子の作製では図 2 (a)に示すように MgO 界面近傍の作製手法を工夫し、微調整を行った。図 2(c)に上下 Fe 層表面及び MgO バリアポストアニール後の反射高速電子線回折 (RHEED) パターンを示した。長く細いストリーク形状がみられ、高い品質かつ平坦なエピタキシャル膜が実現していることがわかる。MgO 上下の CoFe 層、MgO 下部の Mg 層の膜厚の精密な制御を行い、TMR 比の最大化を図った。図 4 (a)には Fe/MgO/Fe の MgO 下部に 0.5 nm 厚の金属 Mg を挿入し、下部側 CoFe 厚 ( $d_{\text{bot-CoFe}}$ )を変化させたときの室温 TMR 比を示した (TMR 振動があるためウェハ内最大値をプロット)。この図から  $d_{\text{bot-CoFe}} = 0$  nm (すなわち Fe/MgO/Fe) から  $d_{\text{bot-CoFe}}$  増加に伴い TMR 比の増大が観測され、2 nm 程度で飽和する。最大で  $d_{\text{bot-CoFe}} = 3.3$  nm において室温 502% が得られた。次に図 4 (b)に  $d_{\text{bot-CoFe}} \sim 2.3$  nm (16 原子面) に固定し、上部 CoFe 厚さ ( $d_{\text{top-CoFe}}$ ) Mg 厚さ ( $d_{\text{Mg}}$ ) による変化を示した。 $d_{\text{Mg}} = 0.5$  nm の時、 $d_{\text{top-CoFe}} = 0.56$  nm (4 原子面) で最大を示すことがわかる。これは上部 CoFe 層を MgO 上に高品質に作製することが下部側に比べ困難であることと関係している。この  $d_{\text{top-CoFe}} = 0.56$  nm において  $d_{\text{Mg}} = 0.6$  nm としたときにさらに TMR 比が増大し、最大となる 631% が得られた。このウェハでは微細加工前の状態における CIPT 測定でも 617% の値を得ており、室温 TMR 比の最大値の更新が確認された。この時の TMR 曲線 (磁場による抵抗変化) を図 5 (a)に示した。P と AP のスイッチが明瞭であり、TMR 比 631%、抵抗変化にすると 7.3 倍が得られていることがわかる。興味深いことに、TMR 振動の振幅幅は CoFe/MgO/CoFe においてさらに増大がみられた。図 5 (b)に Fe/MgO/Fe との比較を示した。振動周期はほぼ同一であるが、振幅幅は 141% に達しており、この振動現象が MTJ の伝導を強く支配しているといえる。

本研究課題では、MTJ の各層の結晶品質の大幅な改善に加え、界面の精密な制御により極めて欠陥が少ない理想に近い構造が得られたことが TMR 比の増大に寄与している。図 6 (a)に Fe/バリア/Fe 構造の MTJ における室温、低温での TMR 比の推移を示した。MgO バリアを用いた界面エンジニアリングによる室温 TMR 比の倍増に加え、本課題で発見された Mg<sub>4</sub>Al-Ox バリアにより低温 TMR 比は 1000% を超え理論値に近づきつつある。また、図 6 (b)にはバリア材料別の室温 TMR 比の推移を示した。スピネル (MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub>) 系バリアの開発によって培われた単結晶 MTJ 技術を活用し室温 631% の達成につながった。本研究課題によって長らく停滞していた TMR 比の向上の可能性が改めて示されたことは、MTJ を活用する多くのスピントロニクス応用の飛躍

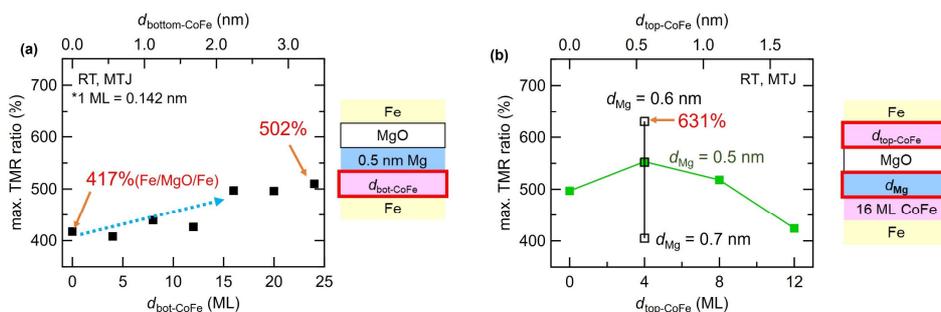


図 4 (a) Fe/CoFe ( $d_{\text{bot-CoFe}}$ )/Mg (0.5 nm)/MgO/Fe 積層における室温 TMR 比の  $d_{\text{bot-CoFe}}$  依存性。(b) Fe/CoFe (16 ML)/Mg ( $d_{\text{Mg}}$ )/MgO/CoFe ( $d_{\text{top-CoFe}}$ )/Fe 積層における室温 TMR 比の  $d_{\text{top-CoFe}}$ 、 $d_{\text{Mg}}$  依存性。

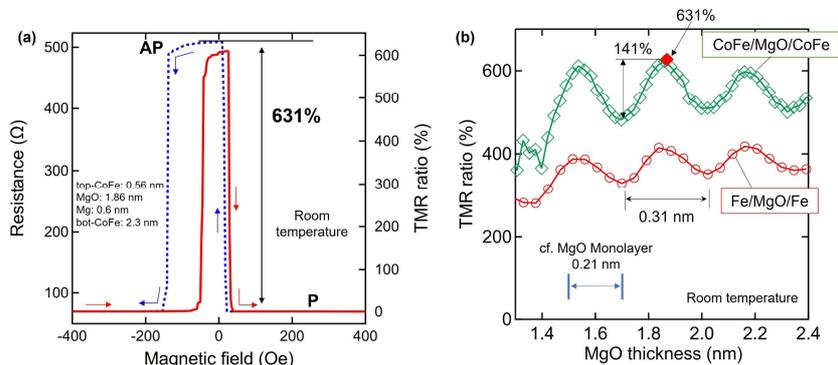


図 5 (a) 最大の室温 TMR 比を示した CoFe/MgO/CoFe 型 MTJ の電気抵抗 (左軸) 及び TMR 比 (右軸) の外部磁場依存性。(b) 室温 TMR 比の MgO バリア膜厚依存性。Fe/MgO/Fe と CoFe/MgO/CoFe を示した。左下: MgO 原子面厚さに対応するスケールを参考に示した。

に寄与するものと期待できる。一方で、理論で十分再現されていない TMR 振動がより顕著になることが新たに見出された。今後、特に界面構造に着目した実験、理論両面の進展が必要である。

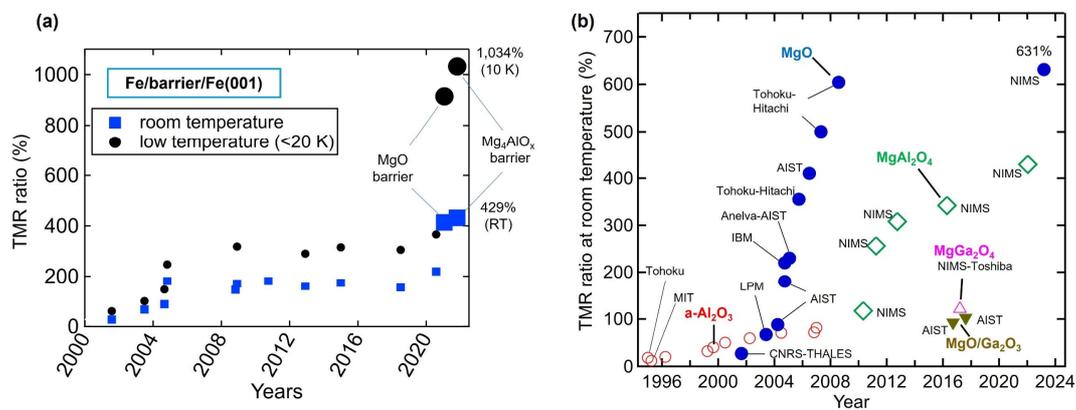


図 6 (a) Fe 磁性層を用いた MTJ の室温 (四角) 及び低温 (丸) の TMR 比報告値。(b) バリア材料別の室温 TMR 比レコードの推移。

## 5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計10件（うち査読付論文 10件 / うち国際共著 0件 / うちオープンアクセス 5件）

1. 著者名 Tang Ke, He Cong, Wen Zhenchao, Sukegawa Hiroaki, Ohkubo Tadakatsu, Nozaki Yukio, Mitani Seiji	4. 巻 12
2. 論文標題 Enhanced orbital torque efficiency in nonequilibrium Ru50Mo50(0001) alloy epitaxial thin films	5. 発行年 2024年
3. 雑誌名 APL Materials	6. 最初と最後の頁 031131-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0195775	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 He Cong, Masuda Keisuke, Song Jieyuan, Scheike Thomas, Wen Zhenchao, Miura Yoshio, Ohkubo Tadakatsu, Hono Kazuhiro, Mitani Seiji, Sukegawa Hiroaki	4. 巻 261
2. 論文標題 Nano-crystal domains in Co-based fcc(111) epitaxial magnetic junctions and their impact on tunnel magnetoresistance	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Acta Materialia	6. 最初と最後の頁 119394 ~ 119394
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.actamat.2023.119394	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 Song Jieyuan, He Cong, Scheike Thomas, Wen Zhenchao, Sukegawa Hiroaki, Ohkubo Tadakatsu, Nozaki Yukio, Mitani Seiji	4. 巻 34
2. 論文標題 Charge-to-spin conversion in fully epitaxial Ru/Cu hybrid nanolayers with interface control	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nanotechnology	6. 最初と最後の頁 365704 ~ 365704
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1088/1361-6528/acda36	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 Koizumi Hiroki, Yamasaki Yuichi, Yanagihara Hideto	4. 巻 14
2. 論文標題 Quadrupole anomalous Hall effect in magnetically induced electron nematic state	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Nature Communications	6. 最初と最後の頁 8074-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1038/s41467-023-43543-1	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Kobayashi Soki, Koizumi Hiroki, Yanagihara Hideto, Okabayashi Jun, Kondo Takahiro, Kubota Takahide, Takanashi Koki, Sonobe Yoshiaki	4. 巻 19
2. 論文標題 Perpendicular Magnetic Anisotropy of an Ultrathin Fe Layer Grown on NiO(001)	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Physical Review Applied	6. 最初と最後の頁 064005-1-8
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevApplied.19.064005	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 Hidaka Atsushi, Koizumi Hiroki, Yanagihara Hideto	4. 巻 62
2. 論文標題 Magnetic and electric properties of spinel oxide CoV <sub>2</sub> O <sub>4</sub> (001) films	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 053001 ~ 053001
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/acd1c9	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 Scheike Thomas, Wen Zhenchao, Sukegawa Hiroaki, Mitani Seiji	4. 巻 122
2. 論文標題 631% room temperature tunnel magnetoresistance with large oscillation effect in CoFe/MgO/CoFe(001) junctions	5. 発行年 2023年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 112404-1 ~ 6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0145873	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Masuda Keisuke, Itoh Hiroyoshi, Sonobe Yoshiaki, Sukegawa Hiroaki, Mitani Seiji, Miura Yoshio	4. 巻 106
2. 論文標題 Band-folding-driven high tunnel magnetoresistance ratios in (111)-oriented junctions with SrTiO <sub>3</sub> barriers	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review B	6. 最初と最後の頁 134438-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevB.106.134438	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Scheike Thomas, Wen Zhenchao, Sukegawa Hiroaki, Mitani Seiji	4. 巻 120
2. 論文標題 Enhanced tunnel magnetoresistance in Fe/Mg4Al-Ox/Fe(001) magnetic tunnel junctions	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Applied Physics Letters	6. 最初と最後の頁 032404 ~ 032404
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/5.0082715	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている (また、その予定である)	国際共著 -

1. 著者名 Yoshihara Shintaro, Yanagihara Hideto	4. 巻 61
2. 論文標題 Magnetoelastic constant of thin films determined by a four-point bending apparatus	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Japanese Journal of Applied Physics	6. 最初と最後の頁 036502 ~ 036502
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.35848/1347-4065/ac4928	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 -

〔学会発表〕 計37件 (うち招待講演 14件 / うち国際学会 20件)

1. 発表者名 介川裕章, T. Scheike, Z. Wen, 三谷誠司
2. 発表標題 巨大室温トンネル磁気抵抗比631%の観測
3. 学会等名 2024年第71回 応用物理学会春季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Ke Tang, Cong He, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo, Yukio Nozaki, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Nonequilibrium RuMo alloy epitaxial thin films exhibiting enhanced orbital torque efficiency
3. 学会等名 2024年第71回 応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2024年

1. 発表者名 Jieyuan Song, Thomas Scheike, Cong He, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Epitaxial (111) Barrier Magnetic Tunnel Junctions with Fcc-CoFe Electrodes
3. 学会等名 MRM2023/IUMRS-ICA2023 Grand Meeting (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Record for tunnel magnetoresistance of 631% at room temperature with barrier interface control technology
3. 学会等名 The 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Cong He, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Giant oscillatory tunnel magnetoresistance: an unsolved spin dependent tunneling puzzle
3. 学会等名 The 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Cong He, Keisuke Masuda, Jieyuan Song, Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, Yoshio Miura, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Three Types of Nano Crystal Domain Structures in Fully Epitaxial fcc-Co/MgO/Co(111) Magnetic Tunnel Junctions.
3. 学会等名 The 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Ke Tang, Cong He, Zhenchao Wen, 介川 裕章, 大久保 忠勝, 能崎 幸雄, 三谷 誠司
2. 発表標題 Epitaxial Ru-Mo(0001) Thin Films with Nano-Scale Resistivity Gradient for Charge-Spin Conversion
3. 学会等名 The 68th Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2023) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani
2. 発表標題 CoFe/MgO/CoFe(001) magnetic tunnel junctions with giant tunnel magnetoresistance exceeding 630% at room temperature
3. 学会等名 第47回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 金澤 朋希, Thomas Scheike, 埋橋 淳, 大久保 忠勝, 介川 裕章, 三谷 誠司, 柳原 英人
2. 発表標題 垂直型強磁性トンネル接合のためのエピタキシャルMgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> /L1 <sub>0</sub> -FePt(001)構造の作製
3. 学会等名 第47回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 シャイケ トーマス, 温 振超, 介川 裕章, 三谷 誠司
2. 発表標題 630%を超える室温トンネル磁気抵抗比の観測
3. 学会等名 2023年第84回応用物理学会秋季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Development of spinel barriers for high performance magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 The 6th International Conference of Asian Union of Magnetics Societies (IcAUMS2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Room temperature tunnel magnetoresistance new record of 631%, toward new spintronic devices
3. 学会等名 The 34th Magnetic Recording Conference (TMRC 2023) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Analysis of large oscillations in tunnel magnetoresistance and resistance of Fe/Mg <sub>4</sub> Al- <sub>0</sub> x/Fe magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 MML2023 (11th International Symposium on Metallic Multilayers) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 H. Sukegawa, Z. Wen, S. Kasai, J. Uzuhashi, T. Ohkubo, K. Hono, S. Mitani, S. Ichikawa, K. Nakada
2. 発表標題 Improved dielectric breakdown of magnetic tunnel junctions using a lattice-matched MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub> barrier
3. 学会等名 MML2023 (11th International Symposium on Metallic Multilayers) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Advancing TMR through Epitaxial Technology: Reaching 631% at Room Temperature
3. 学会等名 The 2023 Spintronics Workshop on LSI (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Jieyuan Song, Thomas Scheike, Cong He, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Co90Fe10/Mg-Al-O/Co90Fe10 magnetic tunnel junctions with a fully epitaxial fcc (111) structure
3. 学会等名 Intermag 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Shinya Kasai, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Sawtooth-like giant oscillation of tunnel magnetoresistance in epitaxial Fe/Mg4Al-Ox/Fe(001) magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 Intermag 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Zhenchao Wen, Jieyuan Song, Cong He, Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo, Yukio Nozaki, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Spin current generation in highly conductive Ru/Cu epitaxial heterostructures
3. 学会等名 Intermag 2023 (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideto Yanagihara
2. 発表標題 Interfacial Perpendicular Magnetic Anisotropy at Fe/NiO(001)
3. 学会等名 the 6th International Conference on Asian Union Magnetics Societies (IcAUMS) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hideto Yanagihara
2. 発表標題 Magnetic anisotropy in magnetic oxide films with spinel structure
3. 学会等名 the 2023 Korean Magnetics Society Winter Conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani
2. 発表標題 Giant tunnel magnetoresistance of 429% at 300 K and 1,034% at 10 K in Fe/Mg-rich Mg-Al-O/Fe(001) junctions
3. 学会等名 24th International Colloquium on Magnetic Films and Surfaces (ICMFS-2022) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 介川 裕章, シャイケ トーマス, 温 振超, 葛西 伸哉, 三谷 誠司
2. 発表標題 Fe/MgAlO/Fe(001)単結晶トンネル接合における巨大トンネル磁気抵抗効果
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 ソン ジェユアン, シャイケ トーマス, ハ ツオン, 温 振超, 介川 裕章, 大久保 忠勝, 宝野 和博, 三谷 誠司
2. 発表標題 fcc-Co90Fe10/MgAlO/Co90Fe10(111)フルエピタキシャル強磁性トンネル接合の開発
3. 学会等名 第46回日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Jieyuan SONG, Thomas SCHEIKE, Cong HE, ZhenChao WEN, Hiroaki SUKEGAWA, Tadakatsu OHKUBO, Kazuhiro HONO, Seiji MITANI
2. 発表標題 Fcc(111) epitaxial magnetic tunnel junctions with a Co90Fe10/Mg-Al-O/Co90Fe10 structure
3. 学会等名 第83回応用物理学会秋季学術講演会 (招待講演)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Giant Tunnel Magnetoresistance at Room Temperature: Recent Progress and Prospect
3. 学会等名 The 6th Symposium for the Core Research Clusters for Materials Science and Spintronics, and The 5th Symposium on International Joint Graduated Program in Materials Science, Online (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 Keisuke Masuda, Hiroyoshi Itoh, Yoshiaki Sonobe, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani, and Yoshio Miura
2. 発表標題 Large tunnel magnetoresistance in (111)-oriented junctions with a SrTiO3 barrier
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Shinya Kasai, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani
2. 発表標題 Staircase-like tunnel resistance increase with barrier thickness in epitaxial Fe/Mg4Al-Ox/Fe(001) magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 介川 裕章, シャイケ トーマス, 温 振超, 葛西 伸哉, 三谷 誠司
2. 発表標題 面内スピンバルブ型CoFeB/MgO/CoFeB 強磁性トンネル接合における高効率データ取得と多層構造最適化
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa
2. 発表標題 Frontier of giant tunnel magnetoresistance effect for future spintronic applications
3. 学会等名 The 1st Y-KAST International Conference, Jeju, Korea (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 嶋山 潤, 日高 温志, 柳原 英人, 介川 裕章
2. 発表標題 NiO(001)上のFe極薄膜における磁気異方性の電界制御
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 日高 温志, 柳原 英人, 介川 裕章
2. 発表標題 金属/強磁性絶縁体界面における磁気層間結合の電圧制御
3. 学会等名 第70回応用物理学会春季学術講演会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 Hiroaki Sukegawa, Thomas Scheike, Qingyi Xiang, and Zhenchao Wen, Tadakatsu Ohkubo, Kazuhiro Hono, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Revisiting Fe/MgO/Fe(001): Giant tunnel magnetoresistance up to ~420% at room temperature
3. 学会等名 The 32nd Magnetic Recording Conference (TMRC2021) (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 介川 裕章
2. 発表標題 トンネル磁気抵抗効果の新展開
3. 学会等名 電気学会、光・熱・電気との相互作用を活用した高機能磁気デバイス技術調査専門委員会 5月研究会 (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 介川 裕章
2. 発表標題 磁気トンネル接合のトンネルバリア開発による巨大磁気抵抗の実現
3. 学会等名 2021年日本電子材料技術協会セミナー (招待講演)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 シェーク トーマス, 向 清懿, 温 振超, 介川 裕章, 大久保 忠勝, 宝野 和博, 三谷 誠司
2. 発表標題 Fe/MgO/Fe(001) : 室温400%・低温900%を超えるトンネル磁気抵抗比の観測
3. 学会等名 第45回 日本磁気学会学術講演会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 T. Scheike, H. Sukegawa, Q. Xiang, Z. Wen, T. Ohkubo, K. Hono, S. Mitani
2. 発表標題 Giant tunnel magnetoresistance ratio and oscillation Fe/MgO/Fe(001) and Fe/MgAlO/Fe(001) magnetic tunnel junctions
3. 学会等名 2022 Joint MMM & Intermag conference (国際学会)
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Thomas Scheike, Zhenchao Wen, Hiroaki Sukegawa, and Seiji Mitani
2. 発表標題 Giant tunnel magnetoresistance in Fe/Mg4Al-Ox/Fe(001) magnetic tunnel junctions
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

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

NIMS 磁性・スピントロニクス材料研究センターHP <a href="https://www.nims.go.jp/mmu/index_j.html">https://www.nims.go.jp/mmu/index_j.html</a>
---

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	三浦 良雄  (MIURA Yoshio)  (10361198)	国立研究開発法人物質・材料研究機構・磁性・スピントロニクス材料研究センター・グループリーダー    (82108)	
研究分担者	柳原 英人  (YANAGIHARA Hideto)  (50302386)	筑波大学・数理物質系・教授    (12102)	

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