

令和元年6月19日現在

機関番号：82108

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2018

課題番号：16H03852

研究課題名(和文) 界面におけるハーフメタル特性消失問題の解決とそれによる超巨大磁気抵抗素子の創製

研究課題名(英文) Development of magnetic tunnel junctions with huge tunnel magnetoresistance through improving half-metallic feature at junction interfaces

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拠点・主幹研究員

研究者番号：30462518

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,000,000円

研究成果の概要(和文)：ハーフメタルホイスラー合金とMgAl₂O₄バリアの間の界面構造に着目することで巨大トンネル磁気抵抗比の実現に必要な要素技術を開発した。(1)Alを含む合金超薄膜を用いるとAlがバリア層に固相拡散する現象から有望なFeAl系界面層を新しく見いだした。(2) MgAl₂O₄バリアを用いることで格子整合界面を達成し、ホイスラー合金がその上に極めて高品位に成長させることに成功した。(3)高度な第一原理伝導計算の道が拓かれた。特にMgAl₂O₄バリアの良好なバイアス電圧依存性の起源に迫ったこと、室温TMR向上に重要な高い交換スティフネス定数が得られるCo終端CoFeを見いだした。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本課題期間内では当初狙っていたTMR比の更新までは到達しなかったが、実現に向けた幅広い重要なMTJの要素技術確立が達成されたと考えられる。特に原子レベル固相拡散現象が高度な界面構造の作製に有効利用できることを見いだされ、これは新しいMTJ設計指針を与えるものである。また、MgAl₂O₄をバリアとして用いることの優位性が明確になった。当初予定していなかった多結晶素子化の技術も確立され、実用素子への急速な展開へも期待されることから磁気メモリー、磁気センサーへの活用にもつながると期待される。理論計算技術の向上もめざましく、幅広い観点からMTJの解析が可能になったことの学術的意義は大きい。

研究成果の概要(英文)：We developed elemental technologies toward huge tunnel magnetoresistance (TMR) by focusing on interface states at half-metallic Heusler alloys and an MgAl₂O₄ barrier. (1) We found a promising interface layer material, FeAl alloys, through solid-state Al atomic diffusion effect observed at an ultrathin Al-containing alloy layer and a barrier. (2) By using MgAl₂O₄ barriers, perfectly lattice-matched interfaces with Heusler alloys were achieved. Additionally, a very high quality Heusler alloy layer was successfully grown on the MgAl₂O₄ barrier. (3) Advanced first-principles-based transport calculation methods have been developed. Especially, the calculations revealed excellent bias voltage dependence of TMR in an MgAl₂O₄ barrier MTJ, and a large exchange stiffness constant in Co-terminated CoFe, which is one of the most important factors for observing large TMR ratio at room temperature.

研究分野：磁性薄膜

キーワード：スピントロニクス ハーフメタル 薄膜成長 強磁性トンネル接合 第一原理計算

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

トンネル磁気抵抗素子 (MTJ) はスピントロニクス of 主要な応用素子の一つであり、ハードディスクドライブの磁気ヘッドセンサーとして、また不揮発性磁気メモリ (MRAM) デバイスの記録ビットとして活用されている。また、超小型・高感度の磁気センサーとしての応用最も近期待が大きく膨らんでおり、その性能向上の要求はますます高まっている。

MTJ は磁性薄膜を有する多層膜構造からなり、磁気抵抗効果 (電気抵抗が外部磁場によって変化する現象) を用いて電流と磁場の相互変換を行う素子である。MTJ は強磁性層/極薄絶縁層 (バリア) /強磁性層の 3 層膜が基本構造であり、バリア層を介した膜面垂直方向に流れるトンネル電流が、2 つの強磁性体の相対磁化角度 (平行、反平行磁場配列等) に対して変化する現象であるトンネル磁気抵抗 (TMR) 効果を示す。この現象による抵抗変化率は TMR 比と呼ばれる大きな値が得られるほど応用上有利であることが知られている。

TMR 比は強磁性層のスピンの極率の絶対値 ($|P| \leq 1$) が大きくなると向上し、平行磁化状態 (R_P)、反平行状態抵抗 (R_{AP}) を用いて、 $TMR \text{ 比} [\%] = 100 * (R_{AP} - R_P) / R_P = 100 * 2P^2 / (1 - P^2)$ と記述される [1]。現在実用 MTJ 素子では CoFeB 強磁性層/結晶質 MgO バリア/CoFeB 構造が広く用いられている。結晶 MgO バリアを介したコヒーレントトンネルと呼ばれる物理機構によって実質的な P が向上する付加効果によって大きな TMR 比がもたらされており、室温において 600% を超える値も報告されている [2]。一方、この値は 10 年近くされて更新おらず、さらに大きな TMR 比を得るために $|P| \sim 1$ の完全スピン偏極したバンド構造を持つ特別な強磁性体「ハーフメタル」(Fig. 1 左図) の利用にますますの期待が集まっている。ハーフメタル層として高品位な Co 基ホイスラー合金 (Co_2MnSi 、 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ など) を用いることで 2000% を超える大きな TMR 比が低温において報告されている [3]。しかし、いくつかのグループの 10 年以上の努力にもかかわらず、室温において TMR 比は著しく低下してしまう問題によって実用的な素子の実現されていない (高々 300~400% 程度)。これは Fig. 1 右図に模式的に示すように、バリア層 (MgO) とホイスラー合金の界面近傍では、ハーフメタル特性がほとんど消失するため

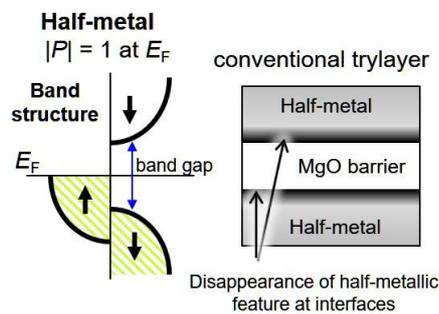


Fig. 1: ハーフメタルのバンド構造と、従来型 MTJ 素子の限界

であると理解されている。このため、バルク部分の P が室温で高く保持することのみならず、バリア層との界面の根本的な改善・再構築に迫られている。MTJ の特性は、界面近傍の電子構造に非常に敏感であり、TMR 比のみならず、界面誘起磁気異方性などの他の有用な機能性にも関わっている。

このような中、本研究の参画者の介川・三浦が実験・理論の両面から開発してきた新規バリア材料、 MgAl_2O_4 (スピネル) が界面構造の改善に役立つことに気がついた [4-6]。MgO とホイスラー合金には数%程度の格子不整合があり、この組み合わせの MTJ の界面品質向上には限界があった。一方、 MgAl_2O_4 は Co 基ホイスラー合金等とほぼ完全な格子整合が得られるため [4]、不整合欠陥を極限まで減らすことが可能である。このため、より理想的な界面が得られ、界面のハーフメタル性の消失、すなわちスピンの極率の大きな温度依存性という課題に立ち向かうための重要な要素技術として用いることができると期待した。

2. 研究の目的

本研究はスピントロニクスの発展の大きな壁となっている有限温度ではバリア層界面のハーフメタル特性が消失する問題を根本解決するための要素技術を開発することである。特にハーフメタル層とバリア界面に異なる極薄強磁性体を導入し、スピンの極率の温度依存性の抑制を目指す。このため、スピネルバリアの導入、界面極薄強磁性層の開発と共に、結晶成長技術の向上、高分解電子顕微鏡を用いたナノ構造解析の活用、第一原理伝導計算の精度向上を行う。すなわち、実験・理論・解析技術を高度にリンクさせることでハーフメタル界面の徹底的な分析・操作を実現し、室温での巨大トンネル磁気抵抗比の実証には何が不足しているのかを問う。

この課題ではこれまで散々行われてきたホイスラー合金 MTJ 作製と TMR 特性評価を単に繰り返すことでは達成できないと考え、各要素技術の根本的な実力向上を目指した。とりわけ実験では、ハーフメタル層として、 Co_2FeAl 、 $\text{Co}_2\text{FeAl}_{0.5}\text{Si}_{0.5}$ ホイスラー合金を用い、ハーフメタル性の向上のために高い合金規則度を成膜プロセスに改善によって達成すること、格子整合 MgAl_2O_4 バリア層の高品位化のため様々な成膜技術を開発すること、ハーフメタル性を失にくい界面強磁性層候補として新規 Fe 基材料を開発することに力を入れた。また、理論計算では、様々な強磁性材料やバリア材料を用いた複雑な系において第一原理伝導計算 (TMR 比) の精度を向上すること、通常行われるゼロバイアス電圧極限における計算だけではなく有限バイアス電圧印加時の非平衡状態の TMR 解析を行うこと、さらにバリア界面極近傍の強磁性体の電子構造や温度依存性に重要な交換スチッフネスの解析による界面最適設計を目指した。とりわけ、 MgAl_2O_4 のように大きな格子定数を持つバリアで期待されるバンド折りたたみ効果 [5] を考慮にいれ、実験にフィードバックを行うことを目的とした。

3. 研究の方法

(1) 薄膜作製とナノ解析

単結晶 MTJ 積層膜を基本構造として利用することで新材料・界面構造制御を行った。このため、MgO(001)単結晶基板を主として用い、エピタキシャルスパッタ成長技術を開発した。基本的な MTJ 膜構造は MgO 基板/Cr 下地(40 nm)/下部強磁性層(20-30 nm)/バリア層(1~ 2 nm)/上部強磁性層 (5~8 nm)/IrMn 反強磁性層(12 nm)/Ru 保護膜(10~20 nm)の(001)成長・面内磁化型とした。強磁性層には、純 Fe、CoFe 合金、及び Co 基ハーフメタルホイスラー合金 (Co₂FeAl、Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5})を用いた。ホイスラー合金、CoFe 合金は溶融ターゲットからスパッタ成膜を行った。また、バリア層として主に MgAl₂O₄ 層を用い、Mg/Mg-Al からなる 2 層膜をチャンバー内に 5 Pa の酸素ガスを導入し、自然酸化もしくはプラズマ酸化を行うことで得た。次に、バリア界面に挿入する界面層として、FeAl 合金超薄膜層に着目した。FeAl 層は Fe と Al の同時スパッタ成膜を用いて組成を変化させた。作製した膜の界面構造、原子組成分布を明らかにするために球面収差補正を備えた高分解能走査透過電子顕微鏡 (STEM) を用いて行った。Annular Dark Field (ADF)-STEM 像および、エネルギー分散型 X 線分光 (EDS)、ナノ電子線回折を用い、界面構造に特に注目した解析を行った。

(2) 第一原理計算

伝導計算技術の向上のため、過去に行った Fe/MgO/Fe(001)、Fe/MgAl₂O₄/Fe(001)の計算技術を元に、Cu(InGa)Se₂ 半導体バリアなど幅広い材料系に手を広げた。一般化勾配近似 (GGA) を用いたゼロバイアス極限の透過率計算に加え、非平衡グリーン関数法を用いた有限バイアス下での取り扱いを進め、特に MgAl₂O₄ におけるバンド折りたたみがある場合の TMR のバイアス電圧依存性の取り扱いによる実験結果との対比を行った。また、ハーフメタル層のバリアに接する領域の室温において高い *P* を保持するためには、界面近傍の強磁性層の交換スチッフネス定数が高いことが望まれている。このため様々な界面を仮定し、有望な界面の組み合わせのスクリーニングを行った。

4. 研究成果

本研究の開始直前に、MgO 基板上に作製された Co₂FeAl ホイスラー合金/MgAl₂O₄ バリア/Co₂FeAl 構造の MTJ が実現され、面内格子が下部から上部まで完全に整合した積層実現が実現されている。とりわけ、550°C の高温熱処理によって各層の規則構造の実現によって室温 TMR 比 ~ 340% の大きな値を得た [7]。この結果は MgAl₂O₄ バリアを用いた MTJ における現在までの最大の TMR 比であり、Co 基ホイスラー合金と MgAl₂O₄ バリアの組み合わせの有望性が示された。一方、この接合の小改善による TMR 比の向上を目指すことは限度があることも想定された。そこで本課題では根本的な界面構造の制御技術に力を置いた。以下に主要な成果を示すと共に将来展望を記す。

(1) 格子整合 Co₂FeAl/MgAl₂O₄ 積層構造の実現と原子拡散現象の解明

上記の通り Co₂FeAl/MgAl₂O₄ の積層構造の有望性が明らかになったことから、この界面の高分解ナノ構造解析による解明を行った。この観察によって Co₂FeAl 層を 1 nm 程度の極薄膜として形成した上に MgAl₂O₄ バリアを酸化プロセスによって作製すると (Fig. 2 a) Co₂FeAl 界面が過酸化状態になることによって特性を十分引き出せない問題が明らかになった。STEM 観察から、表面過酸化状態の Co₂FeAl 中の Al の大部分が MgAl₂O₄ 層へ拡散する現象が見いだされ、理想的な界面構造とは異なっていることがわかり、ホイスラー合金とバリア層間の問題点が明らかになった (Fig. 2 c, d) このことは界面構造の改善が達成されれば現在の TMR 比 (340%) を今後大幅に向上できる余地があることを示唆している。

(2) Co₂FeAl/MgAl₂O₄ 積層構造における高い垂直磁気異方性の観測

Co₂FeAl ホイスラー合金界面を過酸化させずに作製することが困難であるが、その一方で過酸化による Al 原子拡散が界面構造の再配列を促し、これによって強い界面磁気異方性を発現することが見いだされた (Fig. 3 b) Co₂FeAl 中の Fe と MgAl₂O₄ 中の O との間の軌道混成が適切な酸化状態において実現されたこと、格子不整合起因の面内磁気異方性成分を大きく低減できることの 2 つの効果によって達成されている。この高い垂直磁気異方性の付与は、メモリ応用に垂直磁化 MTJ がもたらされることから非常に有用な技術として転用できることが期待される。また、ハーフメタル/バリア界面において強固な強磁性層が形成できることを示しており、結果的に有効的な界面近傍の交換スチッフネス定数の向上が期待される。したがって最適設計ができれば、*P* の温度依存性を抑制するため界面層として有望と期待される。

(3) 格子整合 FeAl 合金界面層の発見と開発

Co₂FeAl/MgAl₂O₄ 界面において見いだされた Al 拡散現象は、界面構造作製に有効利用できれば強磁性界面層を得る有望な手段となり得ることがわかった。このため、Fe 基合金を中心に界面層を検討した結果、Co₂FeAl と類似結晶構造を持つ Fe₃Al 系を見いだした (特許申請)。FeAl から Al 拡散により、実質的に Fe/MgAl₂O₄ 格子整合界面構造を得ることに成功した。この界面では Fe 原子が界面構造構築大きな役割を果たしており、Co₂FeAl 界面層よりも大きな界面磁気異方性の観察に成功した。100%を超える TMR 比も得られ、界面層として好ましい特性を持つことがわかった。

(4) Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} の規則度・配向度改善

MgAl₂O₄ をバリア層だけではなく基板に用いることによって、4 元系合金 Co₂FeAl_{0.5}Si_{0.5} ホイスラー合金の大幅な結晶品質の改善を達成した。MgAl₂O₄ 基板とホイスラー合金層との間の

格子不整合が極めて小さく保たれること、従来の Cr 下地を取り除きスパッタプロセス改善が達成されたことにより、ほぼ完全なホイスラー合金規則度と極めて良好な(001)配向(X線回折ロッキング半値幅 0.1 度台)の達成がなされた。この結果は、MgAl₂O₄ バリアの上部層のホイスラー合金層の高品位化が可能であることも同時に示しており、バリア上下の界面を極めて高品位に保ちつつエピタキシャル成長する技術が確立したと考えられる。

(5) MgAl₂O₄ バリアの多結晶化

従来 MTJ 素子の最大の TMR 比はエピタキシャル素子ではなく、多結晶の CoFeB/MgO/CoFeB 構造で実現されている。CoFeB と MgO の間の格子不整合を低減するため MgAl₂O₄ 層の導入が有効と考えられるが MgAl₂O₄ 層の結晶化は従来 MgO 層に比べると容易ではなかった。本研究では MgO を MgAl₂O₄ バリアの下に極薄(0.1~0.5 nm)程度導入することでこの問題を解決した。各結晶粒内は良好な格子整合が実現し、多結晶型 CoFeB/MgAl₂O₄/CoFeB 構造が実質的に達成された。260%を超える比較的高い TMR 比と、スピネル系 MTJ の特長である良好な TMR 比のバイアス依存性も実現した。したがって、実用素子として好ましい多結晶型 MgAl₂O₄ バリア MTJ を実現できた。今後良好な格子整合を活用して、さらなる TMR 特性の向上が期待できる。(特許申請)

(6) スピネルバリア MTJ バイアス依存性の理論説明

MTJ はバイアス電圧印加で TMR 比が減少する問題があるが、スピネルバリア MTJ ではこのバイアス依存性が小さいという素子応用に好ましい特性が見いだされている。この現象の理論的再現ができれば大きく TMR 現象の解明が進むことが期待される。しかし、MgAl₂O₄ の格子定数は既存バリア材料 MgO の 2 倍であり、強磁性層に Fe 等の格子定数が小さいものを用いると、バンド折りたたみが起こるため計算が複雑になることが知られている[5]。本研究によって非平衡グリーン関数法を活用することで有限電圧における伝導計算技術が整備され取り扱うことができるようになった。その結果、Fe/MgAl₂O₄/Fe 構造における良好なバイアス依存性は理論的にはバンド折りたたみの効果によって多数の伝導チャンネルがトンネルに寄与することにより得られることが明らかになった (Fig. 4)。このことは実用素子にとって MgAl₂O₄ バリア MTJ が有効であることを指示している。

(7) B2-CoFe 界面の高い交換スティフネスの理論予測

室温 TMR 比向上には強磁性層のバリア界面における熱的な磁化揺らぎを低減する必要があり、指標として交換スティフネス定数が高いことが望まれる。様々な強磁性体と MgO 界面の交換スティフネス定数計算を行った結果、B2 構造を持つ CoFe 合金層の Co 終端面を用いたときに非常に高い値を示し、室温 TMR 向上に有望であることを見いだした。したがって、Co 基ハーフメタルと MgAl₂O₄ バリアの間に CoFe 合金を精度良く作製することが室温 TMR 比の大幅向上に重要であるという知見が得られた。

本課題期間内では当初狙っていた TMR 比の更新までは到達しなかったが、実現に向けた幅広い重要な要素技術確立が達成されたと考えられる。とりわけ、バリア層とハーフメタルホイスラー層間の結晶構造やその原子拡散までを活用する制御法を、材料開発、ナノ構造解析を組み合わせで見いだしたことは、新しい MTJ 設計指針を与えるものと考えられる。また、MgAl₂O₄ をバリアとして用いることで、単に格子整合が達成されるのみならず、ハーフメタルホイスラー合金の結晶品質・規則度の向上につながることは大きな実験技術上の進展と考えられる。さらに理論計算技術においても期間内に幅広い材料系において伝導計算の道が拓かれた。特に有限バイアス下という高度な非平衡状態の取り扱いを確立し、MgAl₂O₄ バリア MTJ の実験で見られていた良好なバイアス電圧依存性の起源に迫ること、界面の室温スピン分極率を高く保つ

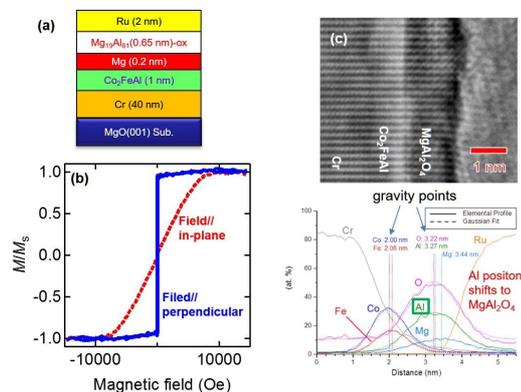


Fig. 2: Co₂FeAl/MgAl₂O₄ 格子整合接合の達成と Al 原子拡散。(a) 膜構成の模式図。(b) 磁化曲線、膜面垂直に強く磁化している。(c) 断面 STEM 像。完全格子整合界面が得られている。(d) EDS 法による STEM 像に対応する元素プロファイル。Al の重心位置が元の Co₂FeAl の中心 (Co、Fe の中心) から MgAl₂O₄ 側に移動していることがわかる。

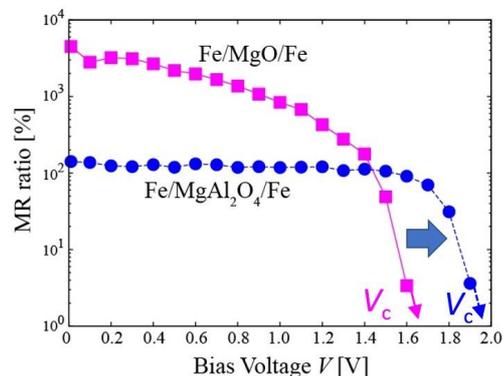


Fig. 3: 非平衡グリーン関数法を用いて計算した Fe/MgO/Fe および Fe/MgAl₂O₄/Fe(001) 接合の TMR 比のバイアス電圧依存性。V_c は TMR 比がゼロになるバイアス電圧であり MgAl₂O₄ バリアの高い電圧領域での優位性が理解できる。

ための高交換スティフネス定数を示す Co 終端 CoFe を見いだしたことが大きな進展である。以上から、巨大 TMR 化観測が近い将来実現できることが大いに期待される。

[1] M. Julliere, Phys. Lett. A **54**, 225 (1975). [2] S. Ikeda *et al.*, Appl. Phys. Lett. **93**, 082508 (2008). [3] H. Liu, *et al.*, J. Phys. D: Appl. Phys. **48**, 164001 (2015). [4] R. Shan *et al.*, Phys. Rev. Lett. **102**, 246601 (2009). [5] Y. Miura *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 024426 (2012). [6] H. Sukegawa *et al.*, Phys. Rev. B **86**, 184401 (2012). [7] T. Scheike *et al.*, Appl. Phys. Express **9**, 053004 (2016).

5 . 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 10 件)

M. Coll, H. Sukegawa *et al.* (著者 56 名), Towards Oxide Electronics: a Roadmap, 査読有, Appl. Surf. Sci. **482**, 1-93 (2019). DOI: 10.1016/j.apsusc.2019.03.312

Jason Paul Hadorn, Hiroaki Sukegawa, Tadakatsu Ohkubo, Seiji Mitani, Kazuhiro Hono, Microstructural evolution of perpendicular magnetization films with an ultra-thin $\text{Co}_2\text{FeAl/MgAl}_2\text{O}_4(001)$ structure, 査読有, Acta Mater. **145**, 306-315 (2018). DOI: 10.1016/j.actamat.2017.12.018

Ikhtiar, Hiroaki Sukegawa, Xiandong Xu, Mohamed Belmoubarik, Hwachol Lee, Shinya Kasai, Kazuhiro Hono, Giant tunnel magnetoresistance in polycrystalline magnetic tunnel junctions with highly textured $\text{MgAl}_2\text{O}_4(001)$ based barriers, 査読有, Appl. Phys. Lett. **112**, 022408 (2018). DOI: 10.1063/1.5013076

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Theoretical study on magnetic tunneling junctions with semiconductor barriers CuInSe_2 and CuGaSe_2 including a detailed analysis of band-resolved transmittances, 査読有, J. Magn. Soc. Jpn. **42**, 37-40 (2018). DOI: 10.3379/msjmag.1803r006

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Perpendicular magnetic anisotropy at the $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4$ interface: Comparative first-principles study with Fe/MgO , 査読有, Phys. Rev. B **98**, 224421 (2018). DOI: 10.1103/PhysRevB.98.224421

K. Masuda, Y. Miura, First-principles study on magnetic tunneling junctions with semiconducting CuInSe_2 and CuGaSe_2 barriers, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. **56**, 020306 (2017). DOI: 10.7567/JJAP.56.020306

Hiroaki Sukegawa, Jason Paul Hadorn, Zhenchao Wen, Tadakatsu Ohkubo, Seiji Mitani, Kazuhiro Hono, Perpendicular magnetic anisotropy at lattice-matched $\text{Co}_2\text{FeAl/MgAl}_2\text{O}_4(001)$ epitaxial interfaces, 査読有, Appl. Phys. Lett. **110**, 112403 (2017). DOI: 10.1063/1.4978663

Keisuke Masuda, Shinya Kasai, Yoshio Miura, Kazuhiro Hono, Giant interfacial perpendicular magnetic anisotropy in $\text{Fe/CuIn}_{1-x}\text{Ga}_x\text{Se}_2$ beyond Fe/MgO , 査読有, Phys. Rev. B **96**, 174401 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.174401

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Bias voltage effects on tunneling magnetoresistance in $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}(001)$ junctions: Comparative study with $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}(001)$ junctions, 査読有, Phys. Rev. B **96**, 054428 (2017). DOI: 10.1103/PhysRevB.96.054428

Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani, Li-substituted MgAl_2O_4 barriers for spin-dependent coherent tunneling, 査読有, Jpn. J. Appl. Phys. **55**, 110310-1~4 (2016). DOI:10.7567/JJAP.55.110310

〔学会発表〕(計 20 件)

介川 裕章、MRAM 応用に向けた強磁性トンネル素子用新材料の開発 (招待講演)、新世代研究所 2018 年度第 3 回スピントロニクス研究会、2019 年 3 月 22 日、新世代研究所会議室 (東京都)

Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, T. Ohkubo, Kazuhiro Hono, Seiji Mitani, Spin dependent transport in $\text{Co}_2\text{FeAl/MgAl}_2\text{O}_4/\text{CoFe}$ epitaxial magnetic tunnel junctions with and without CoFe insertion, 第 66 回応用物理学会春季学術講演会、2019 年 3 月 9 日-12 日、東工大大岡山キャンパス (東京都)

増田 啓介、三浦 良雄、スピネル型トンネルバリア MgAl_2O_4 を有する磁気トンネル接合の理論解析：界面磁気異方性と磁気抵抗効果の第一原理計算 (招待講演)、第 84 回日本磁気学会ナノマグネティクス専門研究会、2018 年 11 月 30 日、中央大学駿河台記念館 (東京都)

介川 裕章、アモルファス基板上に作製した MgAl_2O_4 障壁を持つ格子整合トンネル磁気抵抗素子 (招待講演)、中性子産業利用推進協議会平成 30 年度磁性材料研究会、2018 年 11 月 9 日、エッサム神田ホール (東京都)

Hiroaki Sukegawa, Synthesis of spinel tunnel barriers for advanced spintronics devices (Invited), The 21st International Conference on Magnetism (ICM2018), 16-20 July 2018, San Francisco (USA)

Ikhtiar, Hiroaki Sukegawa, Xiandong Xu, Mohamed Belmoubarik, Hwachol Lee, Shinya Kasai, Kazuhiro Hono, $\text{CoFeB/MgAl}_2\text{O}_4/\text{CoFeB}$ magnetic tunnel junctions with a large magnetoresistance over 240% at room temperature, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年 3 月 17-20 日、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都)

Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, Xiandong Xu, Kazuhiro Hono, Seiji Mitani, Large interfacial perpendicular magnetic anisotropy in epitaxial $\text{Fe}_{80}\text{Al}_{20}/\text{MgAl}_2\text{O}_4$ heterostructures, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年 3 月 17-20 日、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都)

Ikhtiar, 介川 裕章、徐 先東、Mohamed Belmoubarik, Hwachol Lee, 葛西 伸哉、宝野 和博、 $\text{CoFeB/MgAl}_2\text{O}_4/\text{CoFeB}$ magnetic tunnel junctions with a large magnetoresistance over 240% at room temperature, 第 65 回応用物理学会春季学術講演会、2018 年 3 月 17-20 日、早稲田大学西早稲田キャンパス (東京都)

Hiroaki Sukegawa, Kazuhiro Hono, Epitaxial oxide barriers for magnetic tunnel junctions (Invited), MP1308 TO-BE COST Action "Towards Oxide-Based Electronics" SPRING MEETING 2018, 12-14 Mar. 2018, Sant Feliu de Guixols (Spain)

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Bias voltage effects on tunneling magnetoresistance: a comparative theoretical study for $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}(001)$ and $\text{Fe/MgO}/\text{Fe}(001)$ junctions, Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM 2017), Oct. 2017, Pittsburgh (USA)

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Theory for bias voltage effects on spin-dependent transport properties in $\text{Fe/MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}(001)$ junctions, 第 78 回応用物理学会秋季学術講演会、2017 年 9 月 5-8 日、福岡国際会議場 (福岡県)

Hiroaki Sukegawa, Advanced magnetic tunnel junctions using spinel oxide barriers (Invited), The 28th Magnetic Recording Conference (TMRC2017), 2-4 Aug. 2017, Tsukuba (Japan)

Keisuke Masuda, Yoshio Miura, Theory of magnetic tunneling junctions with semiconductor barriers CuInSe₂ and CuGaSe₂, Intermag 2017, Apr. 2017, Dublin (Ireland)

増田 啓介、三浦 良雄、半導体バリア CuInSe₂, CuGaSe₂ を用いた磁気トンネル接合におけるスピン依存伝導特性の理論解析、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14 日、パシフィコ横浜（神奈川県）

Thomas Scheike, Hiroaki Sukegawa, Seiji Mitani, Magnetic tunnel junctions with a Li-substituted MgAl₂O₄ barrier、第 64 回応用物理学会春季学術講演会、2017 年 3 月 14 日、パシフィコ横浜（神奈川県）

介川 裕章、スピネル系トンネルバリアのスピンロニクス素子応用（招待講演） 応用物理学会 応用電子物性分科会・スピントロニクス研究会 共催研究会、2016 年 11 月 21 日、首都大学東京 秋葉原サテライトキャンパス（東京都）

K. Mukaiyama, K. Masuda, S. Kasai, Y. Takahashi, P. Cheng, Ikhtiar, Y. Miura, T. Ohkubo, S. Mitani, K. Hono, Magnetotransport properties in the magnetic junctions with a Cu(In_{0.8}Ga_{0.2})Se₂ semiconductor spacer and Co₂Fe(Ga_{0.5}Ge_{0.5}) ferromagnetic electrodes, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2016), Nov. 2016, New Orleans (USA)

Hiroaki Sukegawa, J.P. Hadorn, T. Ohkubo, S. Mitani, K. Hono, Interfacial perpendicular magnetization and atomic interdiffusion at Co₂FeAl/MgAl₂O₄ spinel interface, 61st Annual Conference on Magnetism and Magnetic Materials (MMM2016), Oct. 31 - Nov. 4, 2016, New Orleans (USA)

Hiroaki Sukegawa, MgAl₂O₄ spinel based magnetic tunnel junctions and related topics (Invited), 8th Joint European Magnetic Symposia (JEMS2016), 25 August 2016, 21-26 Aug. 2016, Glasgow (UK)

介川 裕章、三谷 誠司、強磁性トンネル接合用新規材料開発—格子整合スピネルバリアと高スピン分極ホイスラー合金—（招待講演）、日本磁気学会 第 208 回研究会/第 56 回化合物新磁性材料専門研究会、2016 年 6 月 9 日、中央大学駿河台記念館（東京都）

〔産業財産権〕

出願状況（計 2 件）

名称：垂直磁化膜の前駆体構造、垂直磁化膜構造、およびその製造方法、これらを用いた垂直磁化型トンネル磁気抵抗接合膜およびその製造方法、ならびにこれらを用いた垂直磁化型トンネル磁気抵抗接合素子

発明者：介川 裕章、シェーク トーマス、三谷 誠司

権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2017-174000

出願年：2017 年

国内外の別：国内

名称：強磁性トンネル接合体、これを用いたスピントロニクスデバイス、及び強磁性トンネル接合体の製造方法

発明者：介川 裕章、イクティアル、葛西 伸哉、宝野 和博、徐 先東

権利者：国立研究開発法人物質・材料研究機構

種類：特許

番号：特願 2017-116613

出願年：2017 年

国内外の別：国内

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名：三浦 良雄

ローマ字氏名：MIURA Yoshio

所属研究機関名：国立研究開発法人物質・材料研究機構

部局名：磁性・スピントロニクス材料研究拠点

職名：グループリーダー

研究者番号（8 桁）：10361198

(2) 研究協力者

研究協力者氏名：三谷 誠司

ローマ字氏名：MITANI Seiji

研究協力者氏名：増田 啓介

ローマ字氏名：MASUDA Keisuke

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。