

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 27 日現在

機関番号：14303

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420281

研究課題名(和文) 正方晶ホイスラー合金をベースとした垂直型磁気抵抗素子の理論設計

研究課題名(英文) Theoretical design of perpendicularly magnetized magnetic tunnel junctions on the basis of the tetragonal Heusler alloys

研究代表者

三浦 良雄 (Miura, Yoshio)

京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授

研究者番号：10361198

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、高スピン偏極率・垂直磁気異方性・低ダンピング定数を併せ持つ貴金属フリーな磁気抵抗素子(MTJ)を実現するために、第一原理電子状態計算および電気伝導計算による物性機能設計を行った。特に、正方晶ホイスラー合金Mn₃Gaに着目し、GaをGeで置換したMn₃Geや、Mn_{25%}をFeに置換した(Mn₃,Fe)Ga₂は、MgO障壁の中で減衰の遅い1バンドに関してハーフメタルであることを明らかにした。以上の結果よりMn₃GaのMnやGaを価電子数の多いFeやGeで置換することにより強い垂直磁気異方性と大きなトンネル磁気抵抗比を併せもつ新規なスピントロニクス材料を理論設計することに成功した。

研究成果の概要(英文)：Magnetic materials with high perpendicular magneto-crystalline anisotropy (MCA) have great advantage in the reduction of the switching current. Among the magnetic materials with perpendicular MCA, DO22-Mn₃Ga alloys have attractive features, which are high perpendicular MCA ($K_u > 1.0$ MJ/m³), the high Curie temperature ($T_C = 730$ K) and the small saturation magnetization ($M_S = 0.25$ μ B/atom) due to the antiferromagnetic behavior. We investigated spin dependent transport properties of magnetic tunnel junctions (MTJs) with Mn₃Ga or Mn₃Ge using the first-principles calculations. We found that tunneling magnetoresistance (TMR) ratios of Mn₃Ga/MgO MTJs is very small, which is about 40% for MnGa termination. On the other hand, we obtained over 4000% TMR ratios both for MnMn and MnGe terminations of Mn₃Ge-based MTJs due to the half-metallic electronic structure on the state. We concluded that Mn₃Ge is a promising material providing large TMR effects as well as strong perpendicular magnetic anisotropy.

研究分野：磁性理論

キーワード：スピントロニクス 第一原理計算

1. 研究開始当初の背景

大容量・超高速・低消費電力が期待される電子スピndeバイス(不揮発性スピンメモリ、不揮発性ロジック等)において、スピン注入磁化反転における閾値電流の低減が求められている。直径 20nm の spin-RAM を実現するには、 $0.5\text{MA}/\text{cm}^2$ 以下の電流注入磁化反転の閾値電流密度が必要とされる。電流注入磁化反転における閾値電流は $\alpha\text{MS}/P$ (MS は飽和磁化、 α は磁性体のダンピング定数、P はスピン偏極率) に比例するため、その低減には高スピン偏極率・垂直磁気異方性・低ダンピング定数・小さい飽和磁化・高いキュリー温度といったさまざまな物性を併せ持つ強磁性材料が求められる。

近年、これらのすべてを満足する強磁性材料として、正方晶ホイスラー合金の D_{022} 型 Mn_3Ga が注目されている。 Mn_3Ga は 2 つの異なる Mn サイトのスピンが反強磁性的に結合するフェリ磁性体であり、その $M_s(\approx 3\mu_B/\text{f.u.})$ は小さいがキュリー温度は比較的高く 700K [1]である。また、マルテンサイト相が安定のため正方晶に歪んでおり、スピン軌道相互作用が比較的小さい元素から成る合金にも関わらず大きな垂直磁気異方性 ($1\times 10^7\text{erg}/\text{cc}$) を有する。更にスピン軌道相互作用と飽和磁化が小さいことに起因して磁化ダンピング定数も小さい ($\alpha\approx 0.008$) ことが実験[2]で確認されており、次世代のスピンロニクスデバイスが要求する多くの物性を兼ね備えた材料といえる。

一方 Mn_3Ga のスピン依存伝導に関していくつかの問題点がある。近年 $\text{Mn}_3\text{Ga}/\text{MgO}/\text{CeFe}(001)$ の磁気トンネル接合(MTJ)が作製され、トンネル磁気抵抗(TMR)効果が得られているがその値は室温で 9.8%程度と非常に低い[3]。その要因の1つとして、 Mn_3Ga が Δ_1 バンドに関してハーフメタルではないことが挙げられる[3]。つまり、多数スピン状態・少数スピン状態の両方において、 Δ_1 バンドがフェルミ準位を交差するため、Fe/MgO系 MTJ のような Δ_1 バンドのコヒーレント伝導による高い TMR 効果が得られない。したがって原子置換による Mn_3Ga バンド構造の変調などにより Δ_1 バンドのスピン偏極率を大きくすることが重要である。

$\text{Mn}_3\text{Ga}/\text{MgO}$ 系 MTJ のもう 1 つの問題点として、 $\text{Mn}_3\text{Ga}(a=3.85\text{Å})$ と $\text{MgO}(a=4.23\text{Å})$ との大きな格子不整合(約 10%)が挙げられる。このため、 Mn_3Ga と格子整合性の良い絶縁体障壁の探索が急務となっている。その有力な候補として、スピネル構造の MgAl_2O_4 [4]が挙げられる。 MgAl_2O_4 は格子定数が 8.08Å であるが、 Mn_3Ga の 2 倍の格子定数($a=7.70\text{Å}$)との格子不整合は MgO より改善される。またスピネル構造の MgAl_2O_4 では、Mg と Al の組成比を変えることにより格子定数を変調できることが実験[4]で報告されており、更に良い格子整合性を得ることも期待できる。私は、これまで $\text{Fe}/\text{MgAl}_2\text{O}_4/\text{Fe}(001)$ 系のスピン依存

電気伝導特性を第一原理計算によって解析し、バンドの折り畳み効果がこの系のスピン依存伝導に大きな影響を与えることを明らかにしている[5]。

[1] S. Balke, et al., Appl. Phys. Lett. 90, 152504 (2007).

[2] S. Mizugami, et al., Phys. Rev. Lett. 106, 117201 (2011).

[3] T. Kubota, Y. Miura, et al., Applied Physics Express 4, 043002 (2011).

[4] H. Sukegawa, et al., Appl. Phys. Lett. 96, 212505 (2010).

[5] Y. Miura, et al., Phys. Rev. B 86, 024426 (2012).

2. 研究の目的

本研究では、正方晶ホイスラー合金をベースとした垂直磁化の磁気トンネル接合の理論設計を行う。特に、 Mn_3Ga が持つバルクの物性の優位性(大きな垂直磁気異方性・小さいダンピング定数・小さい飽和磁化・大きなキュリー温度)を残しながら、大きなスピン偏極電流を得るための指針を明らかにすることを目的とする。そのために、 Mn_3Ga バルク物性の原子置換効果及びスピネル障壁を用いた磁気トンネル接合のスピン依存伝導特性に着目して研究を行う。

3. 研究の方法

以下の点について明らかにする。

(1) 正方晶ホイスラー合金(Mn_3Ga)電子構造の原子置換効果

Mn_3Ga の Γ 点における[001]方向のバンド構造では Δ_1 バンドが多数スピン・少数スピンの両方でフェルミ準位(EF)を交差している。しかし、その重心はずれており多数スピン状態では E_F が Δ_1 バンドの中心付近にあるが、少数スピン状態では E_F が Δ_1 バンドの上端付近に位置する。よって、 Mn_3Ga に電子ドープすることにより Δ_1 バンドに関してハーフメタルな電子構造を得ることが期待できる。ここでは、Mn の 1 つを Co や Ni などに置換することにより、そのバンド構造及び電子状態の変化を明らかにする。また、非磁性元素の Ga を In や Ge 等で置換することでバンド構造を変調することも試みる。

(2) 正方晶ホイスラー合金の結晶磁気異方性及び磁化ダンピング定数の原子置換効果

上記の原子置換により結晶磁気異方性の変化及び磁化ダンピング定数の変化を明らかにする。特に、スピン軌道相互作用の 2 次摂動による解析を用いて、結晶磁気異方性と磁化ダンピングの相関について明らかにする。

(3) 正方晶ホイスラー合金とスピネル障壁 MgAlO の磁気トンネル接合のスピン依存伝導

スピネル障壁の格子定数は Mn_3Ga の格子定数の約 2 倍であるため、 $\text{Mn}_3\text{Ga}/\text{MgAlO}$ 系の MTJ では Mn_3Ga の面内バンドが折り畳まれスピン依存伝導に寄与することが考えられ

る。上記の原子置換を施した正方晶ホイスラー合金とスピネル障壁 MgAlO を用いた MTJ のスピン依存伝導におけるバンドの折り畳み効果を明らかにし、もっとも大きな TMR 効果が得られる合金を理論設計する。

(4) 正方晶ホイスラー合金を用いた MTJ のスピン依存伝導におけるスピン揺らぎの効果

室温におけるトンネル磁気抵抗比は、界面原子のスピン揺らぎの影響を大きく受ける。正方晶ホイスラー合金を用いた MTJ における障壁層との界面での交換結合定数を解析することにより TMR 比の温度依存性を明らかにする。

(5) 正方晶ホイスラー合金と非磁性金属界面のスピン流

近年、強磁性金属/非磁性金属界面において、非磁性金属から純スピン流を強磁性金属に注入することにより、電流注入磁化反転の閾値電流密度を下げる試みが行われている。よって正方晶ホイスラー合金との界面において大きなスピン流が得られる非磁性金属を第一原理計算によって探索しそのメカニズムを明らかにする。

上記のシステムに対し、具体的に以下の計算手法を用いたナノ材料接合系の理論設計を行う。

(1) 結晶磁気異方性エネルギーの計算：電子状態計算はスピン軌道相互作用を含む相対論効果を取り入れた密度汎関数理論に基づく第一原理計算によって行う。接合界面での構造最適化を効果的に行うため、基底関数には平面波を用い、内殻電子を近似的に取り扱うウルトラソフト擬ポテンシャル法を採用する。交換・相関項には、局所スピン密度近似、およびバンドギャップ過小評価改善のため、局所密度近似に自己相互作用補正を取り入れた計算も行う。以上の計算は、イタリアの SISSA の研究グループが開発した第一原理計算コード Quantum -Espresso を用いて行う。

(2) ノンコリニアスピン系電気伝導計算：電気伝導度の計算には、半無限系の境界条件下で散乱方程式を直接解く手法を用いる[PRB 59, 2267 (1999).]。ノンコリニアスピン系におけるスピン密度行列は、コリニアスピン系における対角的なスピン密度行列のユニタリー変換により求める。この場合、コリニア系のスピン量子化軸（ここでは、伝導電子スピンの量子化軸）に対する局在スピンの量子化軸の向きを与える動径角・方位角をそれぞれ θ, φ とすると、系のスピン密度行列および電子有効ポテンシャルの非対角項が $\sin\theta\cos\varphi \pm i\sin\theta\sin\varphi$ に比例する形で与えられ、伝導電子にスピン反転の効果を与える。また、界面での交換結合は、界面原子の局在スピンモーメントを有限角度傾けることによるエネルギー変化から見積もる。私は既に、自身がオリジナルに開発したノンコリニア

スピン系での電気伝導の第一原理計算コードを用いて、MTJ 界面における局在スピンの熱揺らぎがスピン依存電気伝導に与える効果を解明している[PRB 83, 214411 (2011).]。

(3) 磁化ダンピング(摩擦)の計算：磁化ダンピングの計算には Kambersky によるトルク補正モデル[PRB 76, 134416 (2007).]を用いる。このモデルではスピン軌道相互作用による磁化のオ差運動に伴う伝導電子の非弾性散乱として磁化ダンピングが記述される。したがって、磁化ダンピング定数は各 k 点における角運動量演算子の行列要素 $\langle n, k | L_i | m, k \rangle (i=x, y, z)$ を計算することにより得られる。

(4) スピン流の計算：スピン流は、スピン軌道相互作用を取り入れた系の電気伝導度テンソルの非対角要素によって与えられる。第一原理計算から得られた波動関数を用いて久保公式[PRL 92, 037204(2004)]を使ってヘテロ接合系の電気伝導度テンソルを求めることにより、正方晶ホイスラー合金/非磁性金属界面におけるスピン流を求める。

4. 研究成果

(1) $D0_{22}-Mn_3Z (Z=Ga, Ge)$ のトンネル磁気抵抗比の第一原理計算

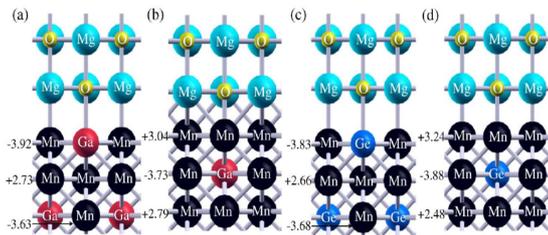


図 1: $Mn_3Ga(Ge)/MgO(001)$ の界面構造

図 1 に Mn_3Ga と Mn_3Ge と MgO との(001)界面原子構造と磁気構造をボーア磁子(μ_B)単位で示す。 MgO との(001)界面には $MnGa(Ge)$ 終端面と Mn 終端面の 2 種類がある。 $MnGa(Ge)$ 終端面構造の場合の MgO の酸素との原子間距離は約 2.6 Å、 Mn 終端面の場合は約 2.0 Å であり、 Mn 終端面の方が酸素との結合間距離が短くなっている。また Mn 原子の界面での局所磁気モーメントはバルク中と比較して、0.2-0.3 μ_B 程度大きくなっている。これは、他のホイスラー合金(Co_2MnSi)と MgO との界面でも同様の傾向がみられており、界面における Mn 電子状態の局在化が要因と考えられる。また、注目したいのは、 $Mn_3Ga(Ge)$ はフェリ磁性体であり、 $Ga(Ge)$ と同じ(001)面にある $Mn(Mn$ と定義)は、(001)面において Mn 原子のみ(Mn と定義)に対して逆向きのスピン配列を持つ。よって、 $MnGa(Ge)$ 終端面が形成されるか Mn 終端面が形成されるかにより界面のスピン配列の向きが異なり、これがスピン依存伝導やトンネル磁気抵抗 (TMR) 比の終端面依存性をもたらす。

表 1: Mn₃Ga(Ge)/MgO(001)の形成エネルギー

	Formation energy [eV]	
	Mn-rich	Mn-poor
Mn ₃ Ga/MgO(MnMn term.)	2.42	3.46
Mn ₃ Ga/MgO (MnGa term.)	-	-
Mn ₃ Ge/MgO (MnMn term.)	3.49	4.55
Mn ₃ Ge/MgO (MnGe term.)	-	-

表 1 は Mn₃Ga(Ge)/MgO(001)界面の MnGa および MnGe 終端面を基準とした Mn 終端面の形成エネルギーを Mn-rich な条件と Mn-poor な条件に対して示している。形成エネルギーが小さいほどその界面が熱平衡状態で安定であることを示している。この値が正に出ているということは、Mn 終端面より MnGa および MnGe 界面の方が安定であることがわかる。このことは、Mn₃Ga(Ge)の(001)表面では、異なる原子が同じ面にあることで構造緩和の自由度が増え、Mn 終端面より MnGa および MnGe 終端面の方が安定であることに起因していると考えられる。

次に、電気伝導計算の結果をについて示す前に、Mn₃Ga と Mn₃Ge のバルクの電子状態について述べる。図 2 はバルクの D0₂₂-Mn₃Ga と Mn₃Ge に対する[001]方向のバンド図の太線で示したのが、MgO 障壁の中で減衰の遅い \uparrow バンドである。この \uparrow バンドに関するハーフメタル性が高い TMR 比を得るうえで重要となる。

図 2 より Mn₃Ga のバンド構造は多数スピンと少数スピンともにフェルミ準位に \uparrow バンドがかかっており、 \uparrow バンドに関してハーフメタルではない。一方、Mn₃Ge では Ge が

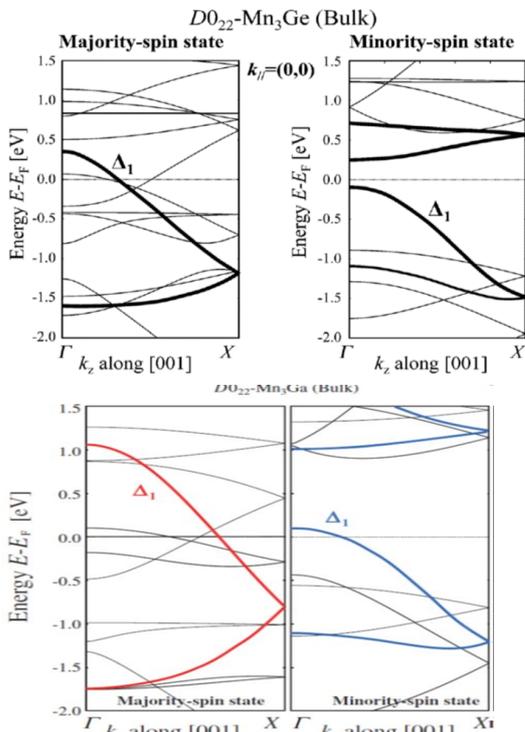


図 2: Mn₃Ga(上)と Mn₃Ge(下)の[001]方向のバンド分散

Ga より価電子数が1つ多いためフェルミ準位が高エネルギー側にシフトして少数スピン状態の \uparrow バンドのギャップにフェルミ準位が位置し、 \uparrow バンドに関してハーフメタルになっている。バルクのバンド構造の解析結果からは、Mn₃Ga より Mn₃Ge の方が高い TMR 比をもたらす可能性が高いといえる。

次に、Mn₃Ga(Ge)/MgO/Mn₃Ga(Ge)(001)の磁気トンネル接合におけるトンネル磁気抵抗効果を理論的に明らかにするため、MTJ に対して電子状態計算と電気伝導計算を行った。表 2 に得られた平行磁化配置と反平行磁化配置の多数スピン及び少数スピン状態に対するコンダクタンス[S/ μm^2]と対応する TMR 比を示した。表 2 から、Mn₃Ga の TMR 比は終端面依存性が大きく、Mn 終端面では 630%と比較的大きいが、MnGa 終端面では 40%と小さくなっている。これは、界面におけるスピンモーメントの向きが終端面によって異なることが要因と考えられる。Mn 終端面の場合は界面の Mn 原子が+3.02 μB の磁気モーメントを持つため、これは全体の磁化と同じ方向であり、スピン分極率の符号と一致している。よって、少数スピン状態の電子が多数スピン状態の電子よりも界面で強く散乱されてコンダクタンスのスピン偏極率は増大する。一方、MnGa 終端の場合は、界面の Mn 原子の磁気モーメントが全体の磁化と反対方向を向いており、スピン分極率の符号と逆である。よって多数スピン電子の方が少数スピンの電子よりも界面で強く散乱されてコンダクタンスのスピン偏極率は減少する。これがスピン依存コンダクタンスおよび TMR 比の終端面依存性の要因である。いずれにせよ、Mn₃Ga/MgO/Mn₃Ga のは Mn 終端面では 600%の TMR 比が期待できるが、MnGa 終端面では 40%と TMR 比は小さい。先ほど述べたように表 2 より形成エネルギーは MnGa 終端面の方が Mn 終端面より小さいので、実際には MnGa 終端面が形成されやすいと考えられ、これが Mn₃Ga を用いた MTJ で実験的に大きな TMR 比が得られない要因の1つと考えられる。

一方、Mn₃Ge/MgO/Mn₃Ge では、Mn₃Ge が完全に \uparrow バンドに関してハーフメタルであるため、終端面構造に関係なく 4000%以上の高い TMR 比が得られている。以上の結果より、実験において大きな TMR 比を得るためには、Mn₃Ga よりも Mn₃Ge が適していることと結論づけることができる。

表 2: Mn₃Ga(Ge)/MgO/Mn₃Ga(Ge)(001)の MTJ に対する TMR 比

	TMR ratio [%]
Mn ₃ Ga/MgO(MnMn term.)	6.3×10^2
Mn ₃ Ga/MgO (MnGa term.)	4.0×10^1
Mn ₃ Ge/MgO (MnMn term.)	4.6×10^3
Mn ₃ Ge/MgO (MnGe term.)	1.4×10^5

(2) 正方晶ホイスラー合金(Mn₃Ga)電子構造と TMR 比の原子置換効果

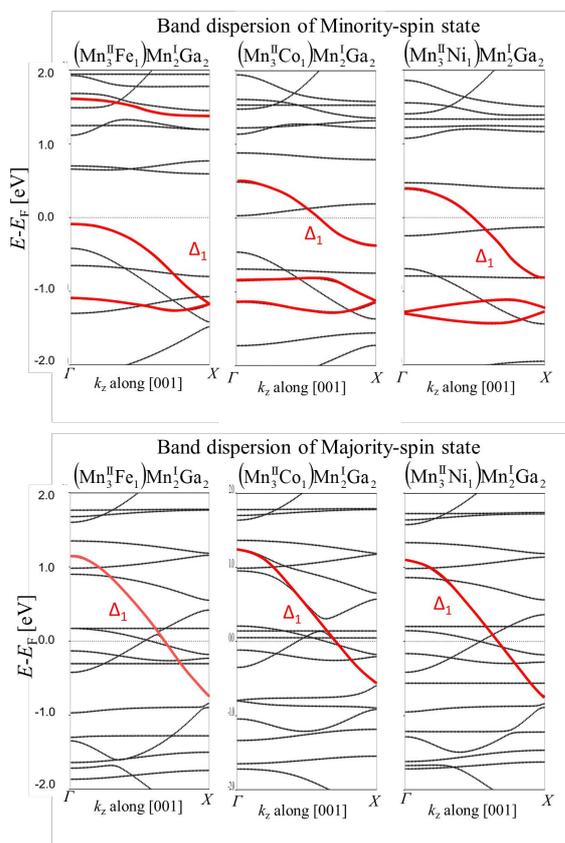


図 3:(Mn₃,X)Ga₂(X=Fe,Co,Ni)のバンド構造

図 2 のように Mn₃Ga の Ga を Ge に置換し価電子数を 1 つ増やすことにより Δ₁ バンドに関してハーフメタル性を有するバンド構造がられ、高い TMR 比が期待できる材料となり得ることがわかった。そこで Mn₃Ga の価電子数を増やす手法として他に Mn を Fe,Co,Ni で置換することが考えられる。そこで、Mn₃Ga に Fe,Co,Ni をドーブした系の電子構造について解析した。まず、Mn₃Ga における Fe,Co,Ni の Mn 置換のサイトを形成エネルギーにより調べた。Mn サイトとしては Mn サイト (-2.2μ_B)と Mn サイト(+2.6μ_B)の 2 つがある。形成エネルギーの計算より、Fe,Co,Ni のいずれの置換に対しても、Mn サイト(+2.6μ_B)を置換する方が熱平衡状態では安定になることが分かった。そこで、ここでは Mn サイト置換のみを扱う。図 3 に Mn₃Ga の Mn サイトの 25%を Fe,Co,Ni で置換した場合の[001]方向のバンド分散を示す。多数スピン状態に対しては、Mn を Fe,Co,Ni のどれで置換しても大きな分散を持つ Δ₁ バンドがフェルミ準位をクロスする状況は変化しないことがわかる。これにより平行磁化配置において大きなコンダクタンスが期待できる。一方、少数スピン状態に対しては、Mn を Fe で置換した場合は価電子数が増えるため Mn₃Ga のフェルミ準位が高エネルギー側にシフトし、少数スピン状態のフェルミ準位には Δ₁ バンドがない。しかしながら、Mn を Co と Ni で置換し

た場合は更にフェルミ準位が高エネルギー側にシフトし、今度はエネルギーが高い方の Δ₁ バンドにフェルミ準位がかかってしまう。結果、Co と Ni による 25%の Mn 置換では Δ₁ バンドに関するハーフメタル性は得られない。以上の結果は、Mn の 25%置換に対する結果であり、Fe,Co,Ni のドーブ量を変化させればまた違った結果になるであろう。いずれにせよ、Mn₃Ga のバンド構造に対してある程度価電子数に対するリジッドバンドモデルが成立することがこの結果から読み取れる。続いて Mn₃Ga の 25%の Mn を Fe,Co,Ni をドーブした系における MgO 障壁を用いた MTJ の TMR 比の第一原理計算を行った。その結果、バンド構造から予測されたように Fe をドーブした (Mn₃,Fe)Mn₂Ga₂ に対しては 10000%を超える非常に高い TMR 比が得られたが、Co をドーブした (Mn₃,Co)Mn₂Ga₂ に対しては 170%、Ni をドーブした (Mn₃,Ni)Mn₂Ga₂ に対しては 40%と小さな TMR 比が得られた。以上の結果より、Mn₃Ga に対しては Fe ドーブが大きな TMR 比を得るために有効であることがわかった。

(3) 正方晶ホイスラー合金(Mn₃Ga)の結晶磁気異方性と磁気ダンピング

D0₂₂-Mn₃Ga は正方晶の構造をもち大きな垂直結晶磁気異方性を有し、かつ磁気ダンピングは小さい理想的な材料である。特に Mn はスピン軌道相互作用が小さいにも関わらず大きな結晶磁気異方性を有する。このメカニズムを明らかにするため、結晶磁気異方性と磁気ダンピングの第一原理計算、および 2 次摂動モデルによる元素分解の結晶磁気異方性の解析を行った。Forth Theorem を用いた第一原理計算より Mn₃Ga の 1 軸結晶磁気異方性エネルギーは K_v=2.8×10⁷[erg/cm²]であることがわかった。これは L1₀-FePt や CoPt に匹敵する大きな垂直磁気異方性であるといえる。実験では薄膜で水上ら[S. Mizugami, *et al.*, PRB 85, 014416 (2012).]により K_v=1.5×10⁷[erg/cm²]が得られているため、実験値とも近い値が得られている。図 4 に Mn₃Ga の結晶磁気異方性エネルギーに対する Mn サイトと

Contribution to MAE at each atomic site

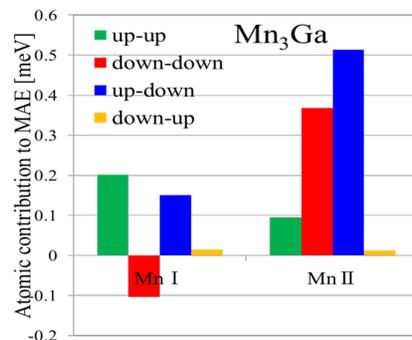


図 4:Mn₃Ga 結晶磁気異方性への各原子サイトとスピン遷移過程の寄与

Mn サイトの各原子あたりの寄与と、それぞれのスピン遷移過程に分解した寄与を示す。まず、Mn サイトより Mn サイトの方が結晶磁気異方性への寄与が大きいことがわかる。また、スピン分解した結果より、2次摂動における up スピン-down スピンのスピン反転プロセスが down スピン-down スピンのスピン保存プロセスよりも寄与が大きい。この傾向は交換相互作用の大きな Fe 系合金とは正反対に異なる結果であり Mn 系合金に特徴的な傾向といえる。Mn₃Ga はこの大きなスピン反転項の寄与により大きな垂直磁気異方性を有する材料であると結論づけることができる。

最後に Mn₃Ga の磁気ダンピングの計算結果を図 5 に示す。Mn₃Ga はフェリ磁性のため磁化が小さくそれゆえ磁気ダンピングも小さい材料として知られている。計算により求めた散乱因子 $\delta=0.1\text{eV}$ におけるギルバートダンピング定数は $\alpha=0.00076$ であり、Fe 系の合金と比較して 1 ケタから 2 ケタ小さな値となることがわかった。この値は水上らの実験結果($\alpha=0.008$)より 1 ケタ小さな値である。一般に Kambersky のトルク相関モデルを用いた磁気ダンピング第一原理計算では電子構造からくる intrinsic な磁気ダンピングのみを考慮するため実験値よりは小さくなる傾向にある。実験ではその他にフォノンの効果や組成の不均一性などの影響が入るため磁気ダンピングは大きくなる傾向になる。

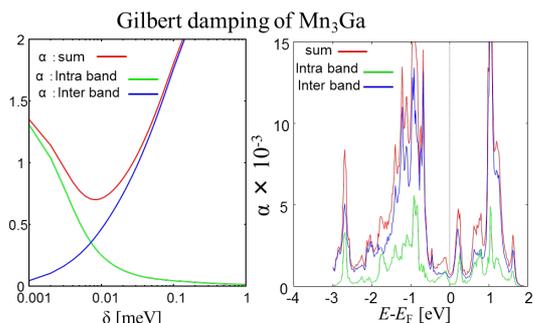


図 5: Mn₃Ga の磁気ダンピングの散乱因子 δ 依存性とエネルギー依存性

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 2 件)

1. Y. Miura, M. Tsujikawa, and M. Shirai, Journal of Applied Physics, 113, 233908/1-6 頁, 2014 年. 査読有, DOI: 10.1063/1.4811685.

2. Y. Miura and M. Shirai, IEEE Transactions on Magnetics, 50 巻, 1400504/1-4 頁, 2014 年, 査読有 DOI: 10.1109/TMAG.2013.2276625

[学会発表](計 5 件)

1. Y. Miura and M. Shirai, International Symposium on Advanced Magnetic Materials and Applications (ISAMMA2013), 2013 年 7 月 21 ~ 25 日, Taichung, Taiwan.

2. Y. Miura, M. Tsujikawa, and M. Shirai, JSPS Core-to-Core Program Workshop of Computational Nano-Materials Design on Green Energy, 2013 年 6 月 16 日 ~ 19 日, 淡路市

3. 谷林慧, 三浦良雄, 白井正文, 日本物理学会第 69 回年次大会, 2014 年 3 月 27 日 ~ 30 日, 東海大学, 平塚市

4. 三浦良雄, 第 62 回応用物理学会春季学術講演会, 2015 年 3 月 11 日 ~ 14 日, 東海大学, 平塚市

5. Y. Miura, Workshop on Computational Nano-Materials Design and Realization for Energy-Saving and Energy-Creation Materials, 2016 年 3 月 25 日 ~ 26 日, 大阪大学, 豊中市

[図書](計 0 件)

[産業財産権]
出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

[その他]
ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者
三浦 良雄 (MIURA YOSHIO)
京都工芸繊維大学・電気電子工学系・准教授
研究者番号: 10361198

(2) 研究分担者
()

研究者番号:

(3) 連携研究者
()

研究者番号: