

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年7月26日(26.07.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/134929 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 21/8246 (2006.01) H01L 27/105 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2017/001617

(22) 国際出願日: 2017年1月18日(18.01.2017)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(71) 出願人: 国立大学法人東北大学 (TOHOKU UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 Miyagi (JP).

(72) 発明者: 本庄 弘明 (HONJO Hiroaki); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 遠藤 哲郎 (ENDO Tetsuo); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 池田 正二 (IKEDA Shoji); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 佐藤 英夫 (SATO Hideo); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP). 大野 英男 (OHNO Hideo); 〒9808577 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内 Miyagi (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 英知国際特許事務所 (EICHI PATENT & TRADEMARK CORP.); 〒1120011 東京都文京区千石4丁目45番13号 Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

規則4.17に規定する申立て:

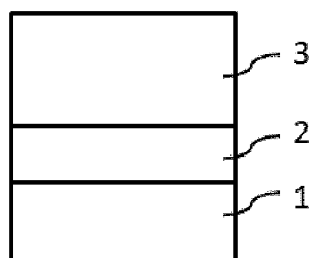
— 出願し及び特許を与えられる出願人の資格に関する申立て (規則4.17(ii))

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第21条(3))

(54) Title: MAGNETO-RESISTIVE EFFECT ELEMENT, MAGNETIC MEMORY, AND METHOD FOR MANUFACTURING MAGNETO-RESISTIVE EFFECT ELEMENT

(54) 発明の名称: 磁気抵抗効果素子、磁気メモリ及び磁気抵抗効果素子の製造方法



(57) Abstract: Provided are a magneto-resistive effect element which has a high thermal stability index Δ and in which the magnetization direction of a recording layer is vertical to a film surface, and a magnetic memory. Magnetic layers of the recording layer of the magneto-resistive effect element are divided into at least two, and these layers are stacked after changing the composition of Fe with respect to the sum total of the atomic fractions of magnetic elements in each of the magnetic layers.

(57) 要約: 記録層の磁化方向が膜面に対して垂直方向である磁気抵抗効果素子において、高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子及び磁気メモリを提供する。磁気抵抗効果素子の記録層の磁性層を少なくとも2つに分け、各磁性層中の磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成を変えて積層する。



WO 2018/134929 A1

明 細 書

発明の名称：

磁気抵抗効果素子、磁気メモリ及び磁気抵抗効果素子の製造方法

技術分野

[0001] 本発明は、磁気抵抗効果素子、特に記録層の磁化方向が膜面に対して垂直方向である磁気抵抗効果素子、及び、該磁気抵抗効果素子を備えた磁気メモリに関する。

背景技術

[0002] 次世代の高性能の不揮発性の磁気メモリとして開発が進むMRAM (M a g n e t i c R a n d o m A c c e s s M e m o r y) は、選択トランジスタと、磁気抵抗効果素子とが直列に電氣的に接続された構造を有する磁気メモリセルを備える。

選択トランジスタのソース電極はソース線に、ドレイン電極は磁気抵抗効果素子を介してビット線に、ゲート電極はワード線にそれぞれ電氣的に接続される。

磁気抵抗効果素子は、2つの磁性層（参照層、記録層）の間に非磁性層（障壁層）が挟まれた構造を基本としており、磁気トンネル接合（MTJ）を有するトンネル磁気抵抗（TMR）素子とも呼ばれる。磁性層の1つは磁化方向が固定された参照層であり、磁性層の他の1つは磁化方向が可変である記録層である。

[0003] 磁気抵抗効果素子の抵抗値は、参照層の磁性層の磁化方向と記録層の磁性層の磁化方向が平行に配置される場合には小さくなり、反平行に配置される場合には大きくなる。MRAMの磁気メモリセルは、この2つの抵抗状態をビット情報「0」と「1」に割り当てている。

[0004] MRAMに要求される主な特性は、（i）磁気抵抗効果素子のトンネル磁気抵抗比（TMR比）が大きいこと、（i i）書込み電流 I_{c0} が小さいこと、（i i i）熱安定性指数 Δ が大きいことである。（i）は高速での読出しに

対応するため、(i i)は高速での書込みに対応するため、(i i i)は磁気メモリの不揮発性のために必要な特性である。

[0005] 近年、MRAMの高集積化のため、磁気抵抗効果素子の微細化を求められるようになってきているが、磁気抵抗効果素子の磁性層（参照層）及び磁性層（記録層）を共に微細化すると、磁化が熱擾乱し、ビット情報が消失しやすくなるという問題があった。

つまり、磁気抵抗効果素子の微細化により高集積化したMRAMを実現するためには、磁気メモリには記録されたビット情報を10年間保持する不揮発性が要求され、上記(i i i)熱安定性指数 Δ を高めることが重要となる。

[0006] 非特許文献1～3には、磁気抵抗効果素子を微細化してもビット情報を保持するために、磁性層（参照層）及び磁性層（記録層）が70以上の高い熱安定性指数 Δ を有することが必要であり、かつ、参照層となる磁性層は記録層となる磁性層よりもさらに大きな熱安定性指数 Δ を有することが必要であることが開示されている。

[0007] また、非特許文献1には、磁気抵抗効果素子の磁性層の熱安定性指数 Δ は実効磁気異方性エネルギー密度 K_{eff} と相関があり、また、大きな磁気異方性（実効磁気異方性エネルギー密度 K_{eff} ）を有する物質に垂直磁気異方性を示すものが多いことから、MRAMの磁気メモリセルの磁気抵抗効果素子として垂直磁化TMR素子が用いられるようになってきていることが開示されている。

[0008] 非特許文献4には、薄膜化したCoFeB/MgO積層構造を垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子に適用することにより、記録層の磁性層において、接合サイズ直径40nmで熱安定性指数 Δ が約40の磁気抵抗効果素子が得られていることが開示されている。

さらに非特許文献6には、二重のCoFeB/MgO界面記録層構造にして記録層の磁性層を厚くすることにより、接合サイズ直径40nm台で熱安定性指数 Δ が80以上の磁気抵抗効果素子が得られているが、接合サイズ直

径 29 nm では熱安定性指数 Δ が約 59 の磁気抵抗効果素子となることが開示されている。

なお、磁性層の接合サイズとは、隣り合う非磁性層や電極と接する接合面上で、最も長い直線の長さである。磁性層が円柱状で接合面が円形の場合は、接合サイズは接合面の直径となる。接合サイズが接合面の直径の場合、接合サイズを特に接合サイズ直径という。

先行技術文献

非特許文献

[0009] 非特許文献1: N. Nishimura, T. Hirai, A. Koganei, T. Ikeda, K. Okano, Y. Sekiguchi, and Y. Osada, “Magnetic tunnel junction device with perpendicular magnetization films for high-density magnetic random access memory”, J. Appl. Phys. 2002, 91, 5246

非特許文献2: G. Kim, Y. Sakuraba, M. Oogane, Y. Ando and T. Miyazaki, “Tunneling magnetoresistance of magnetic tunnel junctions using perpendicular magnetization electrodes”, Appl. Phys. Lett. 2008, 92, 172502

非特許文献3: K. Mizunuma, S. Ikeda, J. H. Park, H. Yamamoto, H. D. Gan, K. Miura, H. Hasegawa, J. Hayakawa, F. Matsukura and H. Ohno, “MgO barrier-perpendicular magnetic tunnel junctions with CoFe/Pd multilayers and ferromagnetic insertion layers”, Appl. Phys. Lett. 2009, 95, 232516.

非特許文献4: S. Ikeda, K. Miura, H. Yamamoto, K. Mizunuma, H. D. Gan, M. Endo, S. Kanai, F. Matsukura, and H. Ohno, “A perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junction”, Nature Mater., 2010, 9, 721

非特許文献5: H. Sato, M. Yamanouchi, S. Ikeda, S. Fukami, F. Matsukura, and H. Ohno, “Perpendicular-anisotropy CoFeB-MgO magnetic tunnel junctions with a MgO/CoFeB/Ta/CoFeB/MgO recording structure”, Appl. P

hys. Lett. 2012, 101, 022414.

非特許文献6: H. Sato, M. Yamanouchi, S. Ikeda, S. Fukami, F. Matsukura, and H. Ohno, "MgO/CoFeB/Ta/CoFeB/MgO recording structure in magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis", IEEE Trans. Magn., 2013, 49, 4437

非特許文献7: H. Sato, T. Yamamoto, M. Yamanouchi, S. Ikeda, S. Fukami, K. Kinoshita, F. Matsukura, N. Kasai, and H. Ohno, "Comprehensive study of CoFeB-MgO magnetic tunnel junction characteristics with single- and double-interface scaling down to 1X nm", Tech. Dig. -Int. Electron Devices Meet. 2013, 3.2.1.

非特許文献8: S. Ikeda, R. Koizumi, H. Sato, M. Yamanouchi, K. Miura, K. Mizunuma, H. D. Gan, F. Matsukura, and H. Ohno, "Boron Composition Dependence of Magnetic Anisotropy and Tunnel Magnetoresistance in MgO/CoFe(B) Based Stack Structures", IEEE Trans. Magn., 2012, 48, 3829

特許文献

[0010] 特許文献1: 特開2011-258596号公報

特許文献2: PCT/JP2016/070850

特許文献3: 特願2016-150154

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0011] 本発明は、磁気抵抗効果素子の微細化により高集積化したMRAMにおいて、ビット情報を10年間記録保持する不揮発性を実現するため、従来技術よりさらに高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子及び磁気メモリを提供することを課題としている。

[0012] 磁気抵抗効果素子の熱安定性指数 Δ は、以下の式で表される。

[0013]

[数1]

$$\Delta = \frac{E}{k_B T} = \frac{K_{\text{eff}} t S}{k_B T}$$

[0014] 数1の式において、 E はエネルギー障壁、 k_B はボルツマン係数、 T は絶対温度、 K_{eff} は実効磁気異方性エネルギー密度、 S は記録層の面積、 t は記録層の膜厚である。

[0015] ここで、 x 軸、 y 軸を平面内、 z 軸を $x-y$ 平面に垂直な面直方向にとった座標において、実効磁気異方性エネルギー密度 K_{eff} と記録層の膜厚 t の積 $K_{\text{eff}} t$ は、以下の式により表される。

[0016] [数2]

$$K_{\text{eff}} t = K_i - \left[(N_z - N_x) \frac{M_s^2}{2\mu_0} - K_b \right] t$$

[0017] 数2の式において、 K_i は界面磁気異方性エネルギー密度、 N_z は z 軸の反磁界係数、 N_x は x 軸の反磁界係数、 M_s は飽和磁化、 μ_0 は真空の透磁率、 K_b はバルク（結晶）磁気異方性や磁気弾性効果に由来するバルク磁気異方性エネルギー密度である。

なお、 N_x は y 軸の反磁界係数 N_y と等しいとする。 N_z 及び N_x は記録層が円筒形の場合に厳密に求めることは難しく、楕円近似により数値計算で求めることができる。

$K_{\text{eff}} t$ が正の時は垂直磁気異方性を示し、負の時は面内磁気異方性を示す。すなわち、正の時は面直方向が磁化容易軸となる。

この点につき具体例を用いて詳述すれば、たとえばC o F e (B) / M g O接合において、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i をC o F e BとM g Oの界面に誘起させることにより、垂直磁気異方性（ $K_{\text{eff}} > 0$ ）を得ることができ

る。しかしながら、磁性層としてC o F e Bを用いた場合の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、Bを含まないC o F eを用いた場合の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i よりも低くなる。一方、Bを含まないC o F eを用いた場合は高い界面磁気異方性エネルギー密度 K_i が得られるものの、C o F eはC o F e Bに比べ飽和磁化 M_s が高いために反磁界 $(-(N_z - N_x) M_s / 2\mu_0)$ が大きく、面内磁気異方性 $(K_{\text{eff}} < 0)$ となり、垂直磁気異方性は得られない。

[0018] 数1の式より、熱安定性指数 Δ を大きくするには、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ を大きくすればよいことが分かる。

さらに、数2の式より、高い実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ を得るためには、非磁性層と磁性層の磁気トンネル接合(MTJ)界面における、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i を低下させないように記録層全体の飽和磁化 M_s を低くする必要があることが分かる。

[0019] なお、数2の式で実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ の検討において、実効磁気異方性は界面磁気異方性とバルク(結晶)磁気異方性の影響を受けることに留意する。

界面磁気異方性は、界面における電子軌道の混成により磁化しやすい方向が現れる性質であり、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の単位は J / m^2 で、界面磁気異方性の効果は記録層の磁性層の膜厚を薄くすると顕著になる。一方、バルク(結晶)磁気異方性は、結晶構造の非等方性により磁化しやすい方向が現れる性質であり、バルク(結晶)磁気異方性エネルギー密度 K_b の単位は J / m^3 である。

[0020] 本発明者らは、数1及び数2の式より、磁気抵抗効果素子の熱安定性指数 Δ を大きくするために、非磁性層と磁性層の界面における界面磁気異方性エネルギー密度 K_i を低下させないように記録層全体の飽和磁化 M_s を低くする様々な方法を検討している。たとえば、磁気抵抗効果素子の磁性層を少なくとも2つの領域(記録層を挟む非磁性層と接合する第1の磁性層、及び、記録層を挟む非磁性層とは接合しない第2の磁性層)に分け、第1の磁性層の磁性元素の組成を第2の磁性層の磁性元素の組成より大きくすれば、高い熱安

定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子が得られることを見出している（特許文献2等参照）。

[0021] 本発明は、上記課題の上記検討において、磁性層中の磁性元素の種類やその組成に着目することにより、さらに高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子が得られることを見出し、完成させるに至ったものである。

課題を解決するための手段

[0022] 上記課題を解決するために、本発明の磁気抵抗効果素子は、磁化方向が膜面垂直方向である第1の磁性層（2）と、前記第1の磁性層（2）に隣接して設けられる第1の非磁性層（1）と、前記第1の磁性層（2）の前記第1の非磁性層（1）とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層（3）と、を備え、前記第1の磁性層（2）は少なくともFeを含み、前記第1の磁性層（2）のFeの組成は前記第1の磁性層（2）の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上であり、前記第1の磁性層（2）の磁化方向は前記第1の非磁性層（1）との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向を向いており、前記第2の磁性層（3）はCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、前記第2の磁性層（3）のFeの組成は前記第2の磁性層（3）の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、前記第1の非磁性層（1）と前記第1の磁性層（2）との界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、前記第1の非磁性層（1）と前記第2の磁性層（3）とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i よりも大きく、前記第2の磁性層（3）の飽和磁化 M_s は前記第1の磁性層（2）の飽和磁化 M_s よりも低いことを特徴とする。

また、本発明の他の磁気抵抗効果素子は、前記第1の磁性層（2）と前記第2の磁性層（3）の間に隣接して、第1の非磁性挿入層（7）をさらに備えることを特徴とする。

さらに、本発明の磁気抵抗効果素子の製造方法は、第1の非磁性層（1）と、前記第1の非磁性層（1）と隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方

向である第1の磁性層(2)であって、前記第1の磁性層(2)は少なくともFeを含み、前記第1の磁性層(2)のFeの組成は第1の磁性層(2)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上である、第1の磁性層(2)と、前記第1の磁性層(2)の前記第1の非磁性層(1)とは反対側に隣接して設けられ、第1の金属からなる第1の非磁性挿入層(7)と、前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の磁性層(2)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層(3)であって、前記第2の磁性層(3)はCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、第2の磁性層(3)のFeの組成は前記第2の磁性層(3)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下である、第2の磁性層(3)と、前記第2の磁性層(3)の前記第1の非磁性挿入層(7)とは反対側に隣接して設けられ、第2の金属からなる第2の非磁性挿入層(8)と、前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第2の磁性層(3)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第3の磁性層(4)であって、前記第3の磁性層(4)は少なくともFeを含み、前記第3の磁性層(4)のFeの組成は前記第3の磁性層(4)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上である、第3の磁性層(4)と、前記第3の磁性層(4)の前記第2の非磁性挿入層(8)とは反対側に隣接して設けられた第2の非磁性層(5)と、を、この順に積層して作製する磁気抵抗効果素子の製造方法であって、前記第1の非磁性挿入層(7)を第1のスputteringガスを用いて成膜し、前記第2の非磁性挿入層(8)を第2のスputteringガスを用いて成膜し、前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の金属の質量数 M_T の前記第1のスputteringガスの質量数 M_G に対する比である第1の M_T/M_G 比は、前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第2の金属の質量数 M_T の前記第2のスputteringガスの質量数 M_G に対する比である第2の M_T/M_G 比より小さいことを特徴とする。

発明の効果

[0023] 第1の磁性層(2)の磁性元素中のFe組成を50at%以上にし、第2

の磁性層（３）の磁性元素中のＦｅ組成を５０ａｔ％以下にすることを特徴とする本発明によれば、熱安定性の高い磁気抵抗効果素子を提供することができる。

また、第１の磁性層（２）と第２の磁性層（３）の間に第１の非磁性挿入層（７）を挿入することを特徴とする本発明によれば、より熱安定性の高い磁気抵抗効果素子を提供することができる。

さらに、第１及び第２の非磁性挿入層の成膜時のスパッタリングガスについて、第１の M_T/M_G 比を第２の M_T/M_G 比より小さくすることを特徴とする本発明によれば、磁気抵抗効果素子のトンネル磁気抵抗比（ＴＭＲ比）を高めた上で、熱安定性の高い磁気抵抗効果素子を提供することができる。

図面の簡単な説明

[0024] [図１]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の一例を示す、縦断面図である。

[図２]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

[図３]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図４]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図５]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図６]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図７]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図８]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図９]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である。

[図１０]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図１１]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図１２]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図１３]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図14]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図15]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図16]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図17]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図18]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図19]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図20]本発明の磁気抵抗効果素子の構成の他の一例を示す、縦断面図である

。

[図21]垂直磁気異方性の特性評価に用いる $M_s t$ 値及び $K_{\text{eff}} t$ 値の求め方を示した、磁化曲線の概略図である。

[図22]磁性層の磁性元素中のF e 組成による特性評価に使用した、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図23A]記録層の $\text{F e}_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、 (b) 2.6 nm、 (c) 2.8 nm、 (d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23B]記録層の $(\text{C o}_{16.7}\text{F e}_{83.3})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、 (b) 2.6 nm、 (c) 2.8 nm、 (d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである

。

[図23C]記録層の $(\text{C o}_{20}\text{F e}_{80})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、 (b) 2.6 nm、 (c) 2.8 nm、 (d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23D]記録層の $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23E]記録層の $(\text{Co}_{33.3}\text{Fe}_{66.7})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23F]記録層の $(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23G]記録層の $(\text{Co}_{66.7}\text{Fe}_{33.3})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23H]記録層の $(\text{Co}_{83.3}\text{Fe}_{16.7})_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図23I]記録層の $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ 総膜厚が (a) 2.4 nm、(b) 2.6 nm、(c) 2.8 nm、(d) 3.0 nm の場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図24]実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ と膜厚 t の相関を示す。

[図25]界面磁気異方性エネルギー密度 K_i と磁性層の磁性元素に対する Fe 組成 (at %) の相関を示す。

[図26]飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と膜厚 t の相関を示す。

[図27]飽和磁化 M_s と磁性層の磁性元素に対する Fe 組成 (at %) の相関を示す。

[図28]非磁性挿入層を挿入していない磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図29]図28において、記録層の、 $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ と隣接する $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ の膜厚が(a) 0.2 nm、(b) 0.4 nm、(c) 0.6 nm、(d) 0.8 nm、(e) 1.0 nm、(f) 1.4 nmの場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図30]W層を非磁性挿入層とした、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図31]図30において、記録層の、W層の膜厚が(a) 0.0 nm、(b) 0.1 nm、(c) 0.2 nm、(d) 0.3 nm、(e) 0.4 nmの場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図32]W層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図33]W層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図34]Ta層を非磁性挿入層とした、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図35]図34において、記録層の、Ta層の膜厚が(a) 0.0 nm、(b) 0.2 nm、(c) 0.3 nm、(d) 0.4 nmの場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図36]Ta層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図37]Ta層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図38]Mo層を非磁性挿入層とした、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を

示す。

[図39]図37において、記録層の、Mo層の膜厚が(a) 0.0 nm、(b) 0.2 nm、(c) 0.3 nm、(d) 0.4 nmの場合の磁化曲線であり、垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示したものである。

[図40]Mo層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図41]Mo層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff} t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図42]非磁性挿入層を構成する元素種による、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図43]非磁性挿入層を構成する金属種による、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff} t$ と非磁性挿入層の挿入層膜厚 t の相関を示す。

[図44]成膜時のスパッタリングガスによる特性評価に使用した、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図45]スパッタリングガスがXe、Kr、Arの場合の磁化曲線を示す。

[図46]スパッタリングガスがXe、Kr、Arの場合のTMR比と挿入層膜厚の相関を示したものである。

[図47]非磁性挿入層の下側のCoFeB層の膜厚によるスパッタリングガス特性評価に使用した、磁気抵抗効果素子の構成の縦断面図を示す。

[図48]スパッタリングガスがXe、Kr、Arの場合のTMR比と非磁性挿入層の下側のCoFeB層の膜厚の相関を示したものである。

[図49](a)非磁性挿入層Wを磁性層CoFeB層上にArでスパッタした場合、(b)Krでスパッタした場合のイメージ図である。

発明を実施するための形態

[0025] 本発明の磁気抵抗効果素子及び磁気メモリについて、詳細を説明する。

なお、図は一例に過ぎず、また、符号を付して説明するが、本発明を何ら限定するものではない。

[0026] (磁性層の磁性元素中の Fe 組成による熱安定性指数 Δ に関する検討)

上述のとおり、数 1 の式より、熱安定性指数 Δ を大きくするには、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ を大きくすればよい。また、数 2 の式より、高い実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ を得るためには、非磁性層と磁性層の磁気トンネル接合 (MTJ) 界面における、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i を低下させないように記録層全体の飽和磁化 M_s を低くする必要がある。

さらに、本発明の磁気抵抗効果素子は、記録層の磁性層の膜厚が薄く、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の効果が顕著になるため、数 2 の式でバルク (結晶) 磁気異方性エネルギー密度 K_b はごく僅かと (ゼロと仮定) することができる。

[0027] 数 2 の式においてバルク (結晶) 磁気異方性エネルギー密度 K_b を無視できる構成を有する本発明の場合、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ と記録層の膜厚 t は、 y 切片 K_i 、傾き $(-(N_z - N_x) M_s^2 / 2\mu_0)$ の略線形の関係となる。

[0028] 上記実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ の値は、記録層の MTJ 膜面垂直方向に磁場を掃引した磁化曲線と、MTJ 膜面の面内方向に磁場を掃引した磁化曲線を測定することにより、求めることができる。

図 21 に磁化曲線の概念図を示す。縦軸に磁化と膜厚の積 $M t$ 、横軸に真空の透磁率と磁界の積 $\mu_0 H$ をとり、記録層の MTJ 膜面に対して垂直方向に磁場を掃引した場合の磁化曲線 (垂直 M-H ループ) を実線で示し、面内方向に磁場を掃引した場合の磁化曲線 (面内 M-H ループ) を点線で示す。このグラフにおいて、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ の値は、第 1 象限における垂直 M-H ループの磁場と磁化の大きさと囲まれる面積と面内 M-H ループの磁場と磁化の大きさと囲まれる面積の差で表される。

すなわち、記録層が垂直磁気異方性を持つ場合は、面内方向に磁場を傾けるのに大きなエネルギーが必要なため、面内 M-H ループの磁場と磁化の大

きさで囲まれる面積と垂直M-Hループの磁場と磁化の大きさを囲まれる面積の差は正になる。逆に面内磁気異方性を持つ場合はこの値は負となる。

[0029] 図22に、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ の値を求めるために使用した磁気抵抗効果素子の構成を示す。基体上にTa (5 nm) / CoFeB (1.0 nm) / MgO (1.0 nm) / CoFeB (1.4 nm) / W (0.5 nm) / CoFeB (1~1.6 nm) / MgO (1.0 nm) / CoFeB (1.0 nm) / Ru (5 nm) / Ta (5 nm) を積層した。記録層において上下のCoFeB層の間にW層 (0.5 nm) を挟み、下のCoFeB層の膜厚を1.4 nmに固定し、上のCoFeB層の膜厚を1.0 nm、1.2 nm、1.4 nm、1.6 nmに変え、上下のCoFeB層の膜厚の総和を2.4~3.0 nmに調整した。なお、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層を省略している。

上下のCoFeB層は、 $(\text{Co}_{100-x}\text{Fe}_x)_{75}\text{B}_{25}$ 、 $x = 0 \sim 100$ 、すなわち、記録層の磁性層の磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が0~100 at %の範囲となるように調整した。400℃において1時間アニール処理を行い、磁気抵抗効果素子を得た。

[0030] 各Fe組成、各膜厚における磁化曲線が図23A~図23Iである。垂直M-Hループを太線で、面内M-Hループを細線で示した。

得られた実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ の値と、記録層の膜厚 t の関係を、表1及び図24に示した。図24では、各Fe組成における線形近似曲線（回帰直線）で内挿及び外挿した。

[0031] [表1]

組成	Keff x t (mJ/m ²)				線形近似曲線(回帰直線)
	膜厚(nm)				
	2.4	2.6	2.8	3	
Fe75B25	0.7012	0.6149	0.5195	0.4665	y = -0.3996x + 1.6545
(Co16.7Fe83.3)75B25	0.5552	0.5276	0.3932	0.1028	y = -0.7457x + 2.408
(Co20Fe80)75B25	0.4848	0.4661	0.2585	0.1247	y = -0.644x + 2.0723
(Co25Fe75)75B25	0.4001	0.3875	0.3057	-0.0488	y = -0.7142x + 2.1894
(Co33.3Fe66.7)75B25	0.3127	0.2200	0.0687	-0.2535	y = -0.9245x + 2.5833
(Co50Fe50)75B25	0.1013	0.0945	-0.0701	-0.2919	y = -0.6721x + 1.773
(Co66.7Fe33.3)75B25	-0.0851	-0.0638	-0.2005	-0.3932	y = -0.5305x + 1.2466
(Co83.3Fe16.7)75B25	-0.1058	-0.1454	-0.3757	-0.5144	y = -0.7279x + 1.6801
Co75B25	-0.0604	-0.1404	-0.2297	-0.4748	y = -0.6662x + 1.5724

[0032] 上述したように、表 1 及び図 2 4 に示した線形近似曲線（回帰直線）の y 切片は界面磁気異方性エネルギー密度 K_i となる。

図 2 5 に、Fe 組成と界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の関係をプロットした。

図 2 5 より、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、磁性元素の原子分率の総和に対する Fe の組成が 60～80 at % 付近で極大となることが分かる。

[0033] 数 2 の式における飽和磁化 M_s の値も、記録層の MTJ 膜面垂直方向に磁場を掃引した磁化曲線と、MTJ 膜面の面内方向に磁場を掃引した磁化曲線を測定することにより、求めることができる。

図 2 1 に磁化曲線の概念図を示す。縦軸に磁化と膜厚の積 Mt 、横軸に真空の透磁率と磁界の積 $\mu_0 H$ をとり、記録層の MTJ 膜面に対して垂直方向に磁場を掃引した場合の磁化曲線（垂直 M-H ループ）を実線で示し、面内方向に磁場を掃引した場合の磁化曲線（面内 M-H ループ）を点線で示す。このグラフにおいて、飽和磁化 M_s と膜厚 t の積は、第 1 象限において垂直 M-H ループ又は面内 M-H ループの磁化が飽和する部分の磁化の値である。

[0034] 飽和磁化 M_s の値を求めるために使用した磁気抵抗効果素子の構成は、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{eff} t$ の値を求めるために使用した磁気抵抗効果素子の構成と同じである（図 2 2 参照）。記録層は上下の CoFeB 層の間に W 層（0.5 nm）を挟み、下の CoFeB 層の膜厚を 1.4 nm に固定し、上の CoFeB 層の膜厚を 1.0 nm、1.2 nm、1.4 nm、1.6 nm に変え、上下の CoFeB 層の膜厚の総和を 2.4～3.0 nm に調整した。なお、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層を省略している。

上下の CoFeB 層は、 $(Co_{100-x}Fe_x)_{75}B_{25}$ 、 $x = 0 \sim 100$ 、すなわち、記録層の磁性層の磁性元素の原子分率の総和に対する Fe の組成が 0～100 at % の範囲となるように調整した。400℃において 1 時間アニール処理を行い、磁気抵抗効果素子を得た。

[0035] 各 F e 組成、各膜厚における磁化曲線を図 2 3 A～図 2 3 I に示した。

得られた飽和磁化 M_s と膜厚 t の積 $M_s \cdot t$ の値と記録層の膜厚 t の関係を、表 2、表 3 及び図 2 6 に示した。図 2 6 では、各 F e 組成における線形近似曲線（回帰直線）で内挿及び外挿した。

なお、得られた飽和磁化と膜厚の積 $M_s \cdot t$ は、c g s 系単位 (emu / cm^2) を M K S ($\text{T} \cdot \text{nm}$) に変換した（表 2 及び表 3 参照）。変換式は $\text{T} \cdot \text{nm} = 4 \pi \times 1000 \text{ emu} / \text{cm}^2$ である。

[0036] [表2]

組成	$M_s \times t (10^{-4} \text{emu/cm}^2)$			
	膜厚(nm)			
	2.4	2.6	2.8	3.0
Fe75B25	1.8959	2.2712	2.5285	2.6615
(Co16.7Fe83.3)75B25	1.8805	2.2549	2.4677	2.6269
(Co20Fe80)75B25	1.8544	2.1442	2.5767	2.7559
(Co25Fe75)75B25	1.8396	2.2441	2.4990	2.6236
(Co33.3Fe66.7)75B25	1.9023	2.1113	2.3549	2.6337
(Co50Fe50)75B25	1.7622	1.8155	2.0202	2.1682
(Co66.7Fe33.3)75B25	1.3262	1.3962	1.6339	1.7908
(Co83.3Fe16.7)75B25	1.0077	1.2473	1.4606	1.5993
Co75B25	0.3250	0.5069	0.5960	0.8374

[表3]

組成	Ms x t (Tnm)				線形近似曲線(回帰直線)
	膜厚(nm)				
	2.4	2.6	2.8	3.0	
Fe75B25	2.3824	2.8540	3.1775	3.3446	y = 1.6049x - 1.3936
(Co16.7Fe83.3)75B25	2.3630	2.8336	3.1010	3.3010	y = 1.5406x - 1.2601
(Co20Fe80)75B25	2.3303	2.6945	3.2379	3.4631	y = 1.9709x - 2.3901
(Co25Fe75)75B25	2.3117	2.8200	3.1404	3.2969	y = 1.6381x - 1.5306
(Co33.3Fe66.7)75B25	2.3906	2.6532	2.9593	3.3096	y = 1.5316x - 1.3071
(Co50Fe50)75B25	2.2145	2.2815	2.5387	2.7247	y = 0.894x + 0.0261
(Co66.7Fe33.3)75B25	1.6666	1.7545	2.0533	2.2503	y = 1.025x - 0.8363
(Co83.3Fe16.7)75B25	1.2663	1.5674	1.8355	2.0088	y = 1.2493x - 1.7034
Co75B25	0.4084	0.6370	0.7489	1.0523	y = 1.0219x - 2.0474

[0037] 上述したように、表 3 及び図 2 6 に示した線形近似曲線（回帰直線）の傾きが記録層の C o F e B 層の飽和磁化 M_s となる。

図 2 7 に、F e 組成と飽和磁化 M_s の関係をプロットした。

図 2 7 より、飽和磁化 M_s は、磁性元素の原子分率の総和に対する F e の組

成が60～80at%付近で極大となることが分かる。

[0038] 上述のとおり、数2の式より、高い実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ を得るためには、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i を低下させないように記録層の飽和磁化 M_s を低くする必要がある。本発明の検討において、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i 、飽和磁化 M_s は共に、磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が60～80at%付近で極大となることが分かった。つまり、高い実効磁気異方性エネルギー密度 K_{eff} を得る場合、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i を高くする（Feの組成比を大きくすること）と、記録層の飽和磁化 M_s を低くする（Feの組成比を小さくすること）とはトレードオフの関係であることを意味する。

しかしながら、界面磁気異方性は界面における電子軌道の混成により磁化しやすい方向が現れる性質であり、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の値は、第1の非磁性層（図11ではMgO）と記録層の磁性層（図22では記録層中のCoFeB層）の界面の数原子レベルの層で決まる値である。つまり、それよりも離れた記録層の磁性層のFeの組成は、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の値に影響を与えない。

一方、飽和磁化 M_s の値は記録層の磁性層全体で決まる。表3及び図26に示すように、Feの組成が同じであれば、飽和磁化 M_s の値は膜厚の増加に伴って増大する。

そこで、記録層の磁性層を少なくとも2つに分け、第1の非磁性層（図22ではMgO）との界面に磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が50at%以上、好ましくは60at%以上、さらに好ましくは60～90at%である第1の磁性層を設け、磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が50at%以下、好ましくは40at%以下である非磁性層と接しない第2の磁性層を配置することで、より実効磁気異方性エネルギー密度 K_{eff} を有するMTJを作製することができ、該MTJを有する熱安定性指数 Δ の高い磁気抵抗効果素子を提供することが可能となる。

[0039] （非磁性挿入層を用いた熱安定性指数 Δ 向上に関する検討）

上記磁性層の磁性元素中のFe組成による熱安定性指数 Δ に関する検討において、実際に記録層の磁性層を少なくとも2つに分け、第1の非磁性層（図28では下部非磁性電極（E1）と第1の記録層（A1）に挟まれたMgO）との界面に磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が50at%以上、好ましくは60at%以上、さらに好ましくは60～90at%である第1の磁性層（図28では $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ ）を設け、磁性元素の原子分率の総和に対するFeの組成が50at%以下、好ましくは40at%以下である非磁性層と接しない第2の磁性層（図28では $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ ）を配置し、400℃において1時間アニール処理を行った磁気抵抗効果素子を使用し、熱安定性指数 Δ に影響を与える飽和磁化 M_s 及び実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ の増減を確認した。

磁気抵抗効果素子の構成を詳述すると、図28に示すように、下部非磁性電極（E1）／第1の非磁性層／第1の記録層（A1）／第2の非磁性層／上部非磁性電極（E2）の順に積層され、下部非磁性電極（E1）は基体／Ta（5nm）／CoFeB（1.0nm）の順に、第1の非磁性層はMgO（1.14nm）、第1の記録層（A1）は $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ （tnm、図28において矢印で示した層）／ $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ （（1.4-t）nm）／W（0.5nm）／ $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ （1nm）の順に、第2の非磁性層はMgO（1.0nm）、上部非磁性電極（E2）はCoFeB（1.0nm）／Ru（5nm）／Ta（5nm）の順に、積層されている。本実験での上部非磁性電極（E2）のCoFeBはキャップ層である。また、W層はArでスパッタリングされたものである。

本確認試験において、第1の磁性層の膜厚と第2の磁性層の膜厚の総和を1.4nmとし、第1の磁性層の膜厚tを0.2～1.4nmの範囲に設定した。

なお、 $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ は、層全体の原子分率の総和を100%とした場合、Coは18.75at%、Feは56.25at%、Bは25at%である。また、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層

を省略している。

[0040] 図29に、第1の磁性層 ($\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$) B_{25} の各膜厚における磁化曲線を示した。

また、これらの磁化曲線から求められる、飽和磁化 M_s 及び実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ を、表4に示した。

[0041] [表4]

膜厚 t (nm)	$M_s t$ (Tnm)	$K_{\text{eff}} \times t$ (mJ/m ²)
0.2	2.0528	0.1878
0.4	2.2515	0.1733
0.6	2.4105	0.1781
0.8	2.5366	0.2923
1.0	2.6832	0.2864
1.4	2.9297	0.3978

[0042] 図29及び表4より、MgO層に接する第1の磁性層 ($\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$) B_{25} の膜厚の第1の磁性層の膜厚と第2の磁性層の膜厚の総和に対する割合の増加すなわち第1の磁性層及び第2の磁性層トータルのFe組成の増加に比例して、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ 及び実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ がともに増加することが分かる。

ここで、飽和磁化 M_s については、第1の磁性層の膜厚の割合すなわち第1の磁性層及び第2の磁性層トータルのFe組成 ($a t \%$) が増加すれば、飽和磁化 M_s が増加することは図27等からも明らかである。

一方、実効磁気異方性エネルギー密度と記録層の膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ については、飽和磁化 M_s が下がった場合すなわち第1の磁性層の膜厚の割合が低い場合においても、界面磁気異方性エネルギー密度 K_i の寄与により、さらなる $K_{\text{eff}} t$ の増加が見込まれる。しかしながら、第1の磁性層及び第2の磁性層トータルのFe組成の増加に比例して、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ 及び実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ がともに増加することから、実際の成膜及び熱処理時に第1の磁性層及び第2の磁性層の構成元素が相互に拡散しやすいために、MgO層に接する第1の磁性層の界面磁気異方性エネルギー密

度 K_i の $K_{\text{eff}} t$ への寄与による効果を、十分に引き出せていないことが示唆された。

[0043] そこで、第1の磁性層と第2の磁性層の間に相互拡散を防止する非磁性挿入層を挿入し、飽和磁化 M_s 及び実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}} t$ への影響を調べる実験を行った。

[0044] 図30に、W層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の構成を示す。下部非磁性電極 (E1) / 第1の非磁性層 / 第1の記録層 (A1) / 第2の非磁性層 / 上部非磁性電極 (E2) の順に積層され、下部非磁性電極 (E1) は基体 / Ta (5 nm) / CoFeB (1.0 nm) の順に、第1の非磁性層はMgO (1.14 nm)、第1の記録層 (A1) は $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ (0.6 nm) / 非磁性挿入層であるW (0~0.4 nm) / $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ (0.8 nm) / 非磁性結合層であるW (0.5 nm) / $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ (1 nm) の順に、第2の非磁性層はMgO (1.14 nm)、上部非磁性電極 (E2) はCoFeB (1.0 nm) / Ru (5 nm) / Ta (5 nm) の順に、積層されている。本実験での上部非磁性電極 (E2) のCoFeBはキャップ層である。また、非磁性挿入層としてのW層はKrでスパッタリングされ、0.5 nmのW層はArでスパッタリングされた。なお、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層を省略している。

第1の記録層 (A1) の非磁性挿入層のW層 (図30において矢印で示した層) を、第1の磁性層 (図30では第1の非磁性層のMgOに接した $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ 、0.6 nm) と第2の磁性層 (図30では $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ 、0.8 nm) の間に挿入し、挿入層膜厚を0~0.4 nmの範囲に設定した。

積層された磁気抵抗効果素子は、400℃1時間アニール処理された。400℃アニール後に、下部非磁性電極 (E1) のCoFeB及び上部非磁性電極 (E2) のCoFeBは、隣接するTaあるいはRuのCoFeB中への拡散によって非磁性化する。

[0045] 図31に、W層の各挿入層膜厚における磁化曲線を示した。

また、これらの磁化曲線から求められる、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と挿入

層膜厚の相関を図32に、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ と挿入層膜厚の相関を図33に示した。

W層の挿入により、飽和磁化 M_s は減少し、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ は挿入層膜厚0.2nm付近で極大となることが分かる。

[0046] 図34に、Ta層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の構成を示す。下部非磁性電極(E1)/第1の非磁性層/第1の記録層(A1)/第2の非磁性層/上部非磁性電極(E2)の順に積層され、下部非磁性電極(E1)は基体/Ta(5nm)/CoFeB(1.0nm)の順に、第1の非磁性層はMgO(1.14nm)、第1の記録層(A1)は $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ (0.6nm)/Ta(0~0.4nm)/ $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ (0.8nm)/W(0.5nm)/ $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ (1nm)の順に、第2の非磁性層はMgO(1.14nm)、上部非磁性電極(E2)はCoFeB(1.0nm)/Ru(5nm)/Ta(5nm)の順に、積層されている。本実験での上部非磁性電極(E2)のCoFeBはキャップ層である。また、非磁性挿入層としてのTa層はKrでスパッタリングされ、0.5nmのW層はArでスパッタリングされた。なお、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層を省略している。

第1の記録層(A1)の非磁性挿入層のTa層(図34において矢印で示した層)を、第1の磁性層(図34では第1の非磁性層のMgOに接した $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ 、0.6nm)と第2の磁性層(図34では $\text{Co}_{75}\text{B}_{25}$ 、0.8nm)の間に挿入し、挿入層膜厚を0~0.4nmの範囲に設定した。

積層された磁気抵抗効果素子は、400℃1時間アニール処理された。400℃アニール後に、下部非磁性電極(E1)のCoFeB及び上部非磁性電極(E2)のCoFeBは、隣接するTaあるいはRuのCoFeB中への拡散によって非磁性化する。

[0047] 図35に、Ta層の各挿入層膜厚における磁化曲線を示した。

また、これらの磁化曲線から求められる、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と挿入層膜厚の相関を図36に、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{\text{eff}}t$ と

挿入層膜厚の相関を図37に示した。

Ta層の挿入により、飽和磁化 M_s は減少し、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff}t$ は増加することが分かる。

[0048] 図38に、Mo層を非磁性挿入層とした磁気抵抗効果素子の構成を示す。

下部非磁性電極(E1)/第1の非磁性層/第1の記録層(A1)/第2の非磁性層/上部非磁性電極(E2)の順に積層され、下部非磁性電極(E1)は基体/Ta(5nm)/CoFeB(1.0nm)の順に、第1の非磁性層はMgO(1.14nm)、第1の記録層(A1)は $(Co_{25}Fe_{75})_{75}B_{25}$ (0.6nm)/Mo(0~0.4nm)/ $Co_{75}B_{25}$ (0.8nm)/W(0.5nm)/ $(Co_{25}Fe_{75})_{75}B_{25}$ (1nm)の順に、第2の非磁性層はMgO(1.14nm)、上部非磁性電極(E2)はCoFeB(1.0nm)/Ru(5nm)/Ta(5nm)の順に、積層されている。本実験での上部非磁性電極(E2)のCoFeBはキャップ層である。また、非磁性挿入層としてのMo層はKrでスパッタリングされ、0.5nmのW層はArでスパッタリングされた。なお、本実験では、記録層のみの磁気特性を評価するため、参照層を省略している。

第1の記録層(A1)の非磁性挿入層のMo層(図38において矢印で示した層)を、第1の磁性層(図38では第1の非磁性層のMgO層に接した $(Co_{25}Fe_{75})_{75}B_{25}$ 、0.6nm)と第2の磁性層(図38では $Co_{75}B_{25}$ 、0.8nm)の間に挿入し、挿入層膜厚を0~0.4nmの範囲に設定した。

積層された磁気抵抗効果素子は、400℃1時間アニール処理された。400℃アニール後に、下部非磁性電極(E1)のCoFeB及び上部非磁性電極(E2)のCoFeBは、隣接するTaあるいはRuのCoFeB中への拡散によって非磁性化する。

[0049] 図39に、Mo層の各挿入層膜厚における磁化曲線を示した。

また、これらの磁化曲線から求められる、飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と挿入層膜厚の相関を図40に、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff}t$ と

挿入層膜厚の相関を図4 1 に示した。

M o 層の挿入により、飽和磁化 M_s は減少し、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff} t$ は増加することが分かる。

[0050] 非磁性挿入層としてM g 層、M g O 層を用い、同様な実験を行った。

飽和磁化と膜厚の積 $M_s t$ と挿入層膜厚の相関をまとめて図4 2 に、実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff} t$ と挿入層膜厚の相関をまとめて図4 3 に示した。なお、図中C o F e B 単層とは、M g O / C o F e B / T a / C o F e B / M g O の構成を有する層である（非特許文献6等参照）。

[0051] 図4 2 より、非磁性挿入層がない場合に比べて、非磁性挿入層がW、M o、T a の場合は飽和磁化 M_s が減少し、非磁性挿入層がM g、M g O の場合は飽和磁化 M_s が不変であることが分かる。

図4 3 より、非磁性挿入層を挿入することで、いずれの系においても実効磁気異方性エネルギー密度と膜厚の積 $K_{eff} t$ が増加する効果が見られ、垂直磁気異方性が向上していることが分かった。挿入層膜厚0. 3 n m の場合の $K_{eff} t$ 値は、M o > W > T a > M g O > M g の順に高い。

[0052] 以上の非磁性挿入層を用いた熱安定性指数 Δ 向上に関する検討により、非磁性挿入層に用いられる金属（非磁性挿入元素）としては、M o、W、T a、N b 等が好ましいことが分かった。さらにb c c（体心立方格子構造）を含む非磁性金属が適していることが分かった。なかでも原子半径が1 3 9 p m 以上の高融点金属が好ましい。

[0053]（高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子において、T M R 比も高めた成膜時のスパッタリングガスに関する検討）

上述したとおり、高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子において、磁性層の磁性元素中のF e 組成による熱安定性指数 Δ に関する検討、さらに、非磁性挿入層を用いた熱安定性指数 Δ 向上に関する検討を行ってきた。ここで、M R A M に要求される主な特性のひとつであるトンネル磁気抵抗比（T M R 比）も高めた、高い熱安定性指数 Δ を有する磁気抵抗効果素子を得るため、非磁性挿入層成膜時のスパッタリングガスに関する検討を行った。

[0054] トンネル磁気抵抗比（TMR比）は、 $(R_{ap} - R_p) / R_p$ （ここで、 R_p は障壁層に隣接する参照層の磁化と記録層の磁化とが平行に配列した時の抵抗値、 R_{ap} は障壁層に隣接する参照層の磁化と記録層の磁化とが反平行に配列した時の抵抗値）で定義される。たとえば、図4に示す記録層（A1）中の非磁性結合層（6）は、製造時のアニール処理により、隣接する第4及び第5の磁性層（3a、3b）に含まれるB（ボロン）を吸収し、第4及び第5の磁性層（3a、3b）の結晶化を促進し、TMR比を高めることができる。この作用は図5等にも示す第1及び第2の非磁性挿入層（7、8）においても同様である。

[0055] 一方、非磁性結合層（6）は第4の磁性層（3a）の上にスパッタ法により成膜されるが、スパッタ条件によっては、第4の磁性層（3a）が損傷し、あるいは非磁性結合層の元素が第4の磁性層（3a）内部に拡散し、TMR比の低下を引き起こす。詳細は後述する。

[0056] 図44に、CoFeB層間に挿入されたW層（図44において矢印で示した層）の、成膜時のスパッタリングガスの種類による特性評価を行った磁気抵抗効果素子の構成を示す。

W層の挿入層膜厚を0.2、0.3、0.5nmに調整し、スパッタリングガスをXe、Kr、Arにして、それぞれの磁気抵抗効果素子の特性を評価した。

図45に、スパッタリングガスの種類による磁気抵抗効果素子の磁化曲線を示す。

図46及び表5に、各W挿入層膜厚、及び、スパッタリングガスの種類によるTMR比を示す。

[0057] [表5]

TMR Ratio (%)			
W-thickness(nm)	0.2	0.3	0.5
Ar	117.9	127	35
Kr	191.7	176.9	163.1
Xe	186.1	186	176.9

[0058] 図46及び表5より、W層のスputタリングガスをArからKr、Xeにすることで、TMR比は増加することが分かる。また、図45より、W層のスputタリングガスをArからKr、Xeにすることで、垂直磁気異方性の劣化は防止されることが分かる。

[0059] 図47に、CoFeB層間に挿入される非磁性挿入層Wの挿入層膜厚を一定にし、非磁性挿入層の下側のCoFeB層（図47において矢印で示した層）の膜厚を変えた場合の、成膜時のスputタリングガス特性評価に用いた磁気抵抗効果素子の構成を示す。

W層の挿入層膜厚を0.3nm、非磁性挿入層の下側の $(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{75}\text{B}_{25}$ 層の膜厚を0.6～1.4nmの範囲に調整し、スputタリングガスをXe、Kr及びArにして、それぞれの磁気抵抗効果素子の特性を評価した。

図48及び表6に、下側のスputタリングガスがXe、Kr、Arの場合のTMR比と非磁性挿入層の下側のCoFeB層の膜厚の相関を示す。

[0060] [表6]

	TMR ratio (%)				
	Bottom CoFeB thickness t (nm)				
	0.6	0.8	1.0	1.2	1.4
Ar	64.0	95.3	139.3	156.6	157.6
Kr	127.5	151.5	162.0	165.8	168.1
Xe	140.0	161.4	170.8	174.5	170.9

[0061] 図48及び表6より、W層のスputタリングガスをArからKr、Xeにすることで、TMR比は増加することが分かる。また、スputタリングガスをArにして成膜した場合、下側のCoFeB層の膜厚が1.0nm以下になるとTMR比が急激に低下することが分かる。下側のCoFeB層の表面にスputタされたW原子が、アニール後に反跳ArによりCoFeB/MgO界面に拡散し、TMR比を低下させている。

[0062] 図49に、非磁性挿入層Wを磁性層CoFeB上にAr及びKrでスputタした場合の、イメージを示す。スputタリングガスの種類によりTMR比が異なるのは、スputタターゲットとなる挿入層の金属の質量数とスputタリングガスの質量数との関係で、反跳ガスが下側のCoFeB層表面に与え

るダメージの大小に基づく。

[0063] この点を詳述すると、スパッタ時にターゲットから反跳されるスパッタリングガスのエネルギー（ E ）は、ターゲットの質量数（ M_T ）とスパッタリングガスの質量数（ M_G ）の比（ M_T/M_G ）によって分類される。

スパッタリングガス及びターゲットに用いる元素及びその質量数を表 7 に示す。

[0064] [表7]

元素	質量数
アルゴン (Ar)	39.948
クリプトン (Kr)	83.798
キセノン (Xe)	131.293
モリブデン (Mo)	95.94
タンタル (Ta)	180.9479
タングステン (W)	183.84
ニオブ (Nb)	92.90638

[0065] たとえば、ターゲットがW、スパッタリングガスがArの場合、 M_T/M_G は約4.6（ $=183.84/39.948$ ）となる。また、ターゲットがW、スパッタリングガスがKrの場合、は約2.2である。反跳されるスパッタリングガスのエネルギーは、 M_T/M_G が大きいほど大きくなる。

このため、Arスパッタ時、高いエネルギーを有する反跳ガスは下側の磁性層CoFeBに侵入し、ダメージを与える（図49（a）参照）。一方で、Krスパッタ時は反跳ガスが有するエネルギーが小さいため、下側の磁性層CoFeBにダメージを与えにくく、その結果、TMR比を増加させることができる（図49（b）参照）。

[0066] スパッタリングガスの質量数、及び、ターゲットに用いる元素の質量数の比を、表 8 に示す。

[0067]

[表8]

		スパッタリングガス		
		アルゴン (Ar)	クリプトン (Kr)	キセノン (Xe)
Target	モリブデン(Mo)	2.40	1.14	0.73
	タンタル (Ta)	4.53	2.16	1.38
	タングステン (W)	4.60	2.19	1.40
	ニオブ(Nb)	2.33	1.11	0.71

[0068] 図46、図48、表5～8より、 M_T/M_B が2.2以下であることが、下側の磁性層C o F e Bへのダメージを抑え、高いTMR比を得るための条件となることが分かる。

逆に、 M_T/M_B が2.2より大きいことが、下側の磁性層C o F e Bにダメージを与えるための条件となる。

[0069] 以上より、図5、図6等の第1の非磁性挿入層(7)は、スパッタ時に下側となる第1の磁性層(2)のダメージを抑え、高いTMR比を得ることが要求されるため、 M_T/M_B が2.2以下となる非磁性挿入元素及びスパッタリングガスを選択する。たとえばMo、Ta、W又はNbからなる第1の非磁性挿入層(7)がKr又はXe等を用いてスパッタ法により成膜される場合、スパッタ時に下側となる第1の磁性層(2)はもちろん、非磁性挿入層(7)にもKr又はXe等のスパッタリング元素の反跳ガスは到達しにくく、第1の磁性層(2)や第1の非磁性挿入層(7)に残存しにくい(図49(b)参照)。

一方、第2の非磁性挿入層(8)は、第2の磁性層(3)がスパッタ時に下側となる。第2の磁性層(3)は先の検討において飽和磁化 M_s を低くする目的で配置されているものであり、寧ろ、反跳ガスによりダメージを与えてさらに飽和磁化 M_s を低くすることが優先される。よって、 M_T/M_B が2.2より大きくなる非磁性挿入元素及びスパッタリングガスを選択する。たとえばMo、Ta、W又はNbからなる第2の非磁性挿入層(8)がAr等を用いてスパッタ法により成膜される場合、第2の非磁性挿入層(8)やスパッタ時に下側となる第2の磁性層(3)にAr等のスパッタリング元素の反跳ガ

スが侵入しやすく、第2の磁性層（3）や第2の非磁性挿入層（8）に残存しやすい（図49（a）参照）。

実施例

[0070] 以下に本発明の実施例を、図面を参照して具体的に説明するが、本発明はこれらの実施例に何ら限定されるものではない。

[0071] （実施例1）

図1に、記録層の磁性層を2つ備え、そのうち1つの磁性層が非磁性層に隣接して設けられることを特徴とする、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0072] 実施例1は、磁化方向が膜面垂直方向である第1の磁性層（2）と、第1の磁性層（2）に隣接して設けられる第1の非磁性層（1）と、第1の磁性層（2）の第1の非磁性層（1）とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層（3）とを備えるものである。

図1に示すとおり、第1の磁性層（2）は第1の非磁性層（1）と第2の磁性層（3）の間に設けられる。

[0073] 第1の磁性層（2）の磁化方向は、第1の非磁性層（1）との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向である。また、第1の非磁性層（1）と第1の磁性層（2）との界面の界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）は、第1の非磁性層（1）と第2の磁性層（3）とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）よりも大きくなるように構成される。界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）は、後述する第1の磁性層（2）及び第2の磁性層（3）の組成等により調整される。

[0074] 第1の磁性層（2）は少なくともFeを含み、第1の磁性層（2）のFeの組成は第1の磁性層（2）の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上であり、好ましくは60at%以上、さらに好ましくは60～90at%である。Feの組成が50at%以上であると、大きな界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）を得ることができ、Feの組成が50at%未満であると、大きな界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）を得ることができない。

めである（図25等参照）。

[0075] 第2の磁性層（3）の飽和磁化（ M_s ）は、第1の磁性層（2）の飽和磁化（ M_s ）よりも低くなるように構成される。飽和磁化（ M_s ）は、第1の磁性層（2）及び第2の磁性層（3）の組成等により調整される。

[0076] 第2の磁性層（3）は、Co、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、第2の磁性層（3）のFeの組成は第2の磁性層（3）の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下、好ましくは40at%以下である。Feの組成が50at%以下であると、飽和磁化（ M_s ）を低くすることができ、Feの組成が50at%を超えると、飽和磁化（ M_s ）が大きくなってしまうからである（図27等参照）。

[0077] 第1の磁性層（2）は、磁性元素としてFeの他、Co、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素をさらに含んでもよい。

[0078] 第2の磁性層（3）は、V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでも、B、Vは、取り扱いやすさの面からも好ましい。これらの非磁性元素は、磁性層の飽和磁化（ M_s ）を低くすることができる。

[0079] 第1の磁性層（2）もV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでもB、Vが好ましい。

なお、第1の磁性層（2）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、第2の磁性層（3）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比は、1より小さくすることができる。飽和磁化（ M_s ）を低くすることに寄与することが知られている磁性層のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素の比を調整することで、第2の磁性層（3）の飽和磁化（ M_s ）が第1の磁性層（2）の飽和磁化（ M_s ）よりも低くなり磁性層全体として飽和磁化（ M_s ）を下げることができ、磁性層の磁性元素中

のFe組成の調整と併せ、さらに飽和磁化 (M_s) を下げることができるからである。

[0080] 第2の磁性層(3)の膜厚は、第1の磁性層(2)の膜厚に対する比が1以上であること、すなわち、第2の磁性層(3)の膜厚は第1の磁性層(2)の膜厚より大きいことが好ましい。第2の磁性層(3)は低い飽和磁化 (M_s) を得るために磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下、好ましくは40at%以下となっているが、第1の非磁性層(1)との界面で界面磁気異方性に資する第1の磁性層(2)のFeの組成は磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上となっており、記録層全体としては第2の磁性層(3)を相対的に厚くして低い飽和磁化 (M_s) を得ることが望ましいからである。

具体的には、第1の磁性層(2)の膜厚は0.2~1.0nmの範囲に、第2の磁性層(3)の膜厚は0.4~5.0nmの範囲に調整される。

[0081] 第1の非磁性層(1)の材料は、磁気抵抗効果素子の障壁層(絶縁層からなるトンネル接合層)となる場合、接合する2つの端面の材料の組み合わせで磁気抵抗変化率が大きく発現するよう、MgO、 Al_2O_3 、 SiO_2 、TiO、 Hf_2O 等の酸素を含む絶縁体が用いられ、好ましくはMgOが用いられる。

第1の非磁性層(1)及び第2の非磁性層(5)の膜厚は、0.1~1.0nm、好ましくは0.2~0.5nmの範囲に調整される。

[0082] 実施例1の具体例としては、第1の非磁性層(1)／第1の磁性層(2)／第2の磁性層(3)が、 $MgO / (Co_a Fe_b M_{100-a-b})_c N_{100-c} / (Co_d Fe_e M_{100-d-e})_f N_{100-f}$ (ただし、MはCo, Fe以外の磁性元素、Nは非磁性元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 100$ 、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$) が挙げられ、より具体的にはMgO/Co₂₅Fe₇₅/Co₅₀Fe₅₀、MgO/Co₂₅Fe₇₅/(Co₅₀Fe₅₀)₇₅B₂₅、MgO/(Co₂₅Fe₇₅)₈₀B₂₀/(Co₆₀Fe₄₀)₇₅B₂₅、MgO/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/Co₁₅Fe₄₀Ni₄₅、MgO/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/(Co₅₀Fe₄₅Ni₅)₇₅B₂₅等が

例示できる。

[0083] 図1に示した実施例1において、参照層が第1の非磁性層(1)と第1の磁性層(2)の反対側に隣接する場合、第1の非磁性層(1)は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層となり、第1の磁性層(2)及び第2の磁性層(3)は記録層の一部を構成する。

[0084] (実施例2)

図2に、2つの磁性層の間に非磁性挿入層を挿入した、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0085] 実施例2は、実施例1に加え、第1の非磁性挿入層(7)をさらに備えるものである。

図2に示すとおり、第1の非磁性層(1)、第1の磁性層(2)、第1の非磁性挿入層(7)、第2の磁性層(3)の順に積層したものである。

[0086] 実施例2の詳細は、以下の記載を除き、実施例1と同様である。

[0087] 第1の非磁性挿入層(7)は、第1の磁性層(2)と第2の磁性層(3)の構成元素の相互拡散を防止する目的で挿入される。相互拡散を防止する材料(非磁性挿入元素)であれば制限はないが、好ましくはMo、W、Ta、Nb等であり、より好ましくはbccを含む非磁性金属であり、さらに好ましくは原子半径が139pm以上である。

第1の非磁性挿入層(7)の挿入層膜厚は0.1~0.5nmである。挿入層膜厚が0.5nmより大きいと、第1の磁性層(2)と第2の磁性層(3)との磁気的な結合が弱くなり、熱安定性が低下するからである。

[0088] 第1の非磁性挿入層(7)はスパッタ法により第1のスパッタリングガスを用いて成膜されることが好ましい。

第1の非磁性挿入層(7)の金属の質量数(M_T)の、第1のスパッタリングガスの質量数(M_G)に対する比(第1の M_T/M_G 比)は、2.2以下となるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにXe、Kr等を選択する。

[0089] 実施例2の具体例としては、第1の非磁性層(1)/第1の磁性層(2)

／第１の非磁性挿入層（７）／第２の磁性層（３）が、 $\text{MgO} / (\text{Co}_a\text{Fe}_b\text{M}_{100-a-b})_c\text{N}_{100-c} / \text{Ni} / (\text{Co}_d\text{Fe}_e\text{M}_{100-d-e})_f\text{N}_{100-f}$ （ただし、 M は Co 、 Fe 以外の磁性元素、 N は非磁性元素、 Ni は非磁性挿入元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 100$ 、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$ ）が挙げられ、より具体的には $\text{MgO} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / \text{W} / \text{Co}_{50}\text{Fe}_{50}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / \text{Ta} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25}$ 、 $\text{MgO} / (\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20} / \text{Nb} / (\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40})_{75}\text{B}_{25}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / \text{W} / \text{Co}_{15}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{45}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / \text{Mo} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25}$ 等が例示できる。

[0090] 図２に示した実施例２において、参照層が第１の非磁性層（１）と第１の磁性層（２）の反対側に隣接する場合、第１の非磁性層（１）は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層を構成し、第１の磁性層（２）／第１の非磁性挿入層（７）／第２の磁性層（３）は記録層の一部を構成する。

[0091] （実施例３）

図３に、２つの非磁性層で記録層を挟んだ、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0092] 実施例３は、実施例１に加え、第２の磁性層（３）の第１の磁性層（２）とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第３の磁性層（４）と、第３の磁性層（４）の第２の磁性層（３）とは反対側に隣接して設けられる第２の非磁性層（５）と、を、さらに備えるものである。

図３に示すとおり、第１の磁性層（２）、第２の磁性層（３）、第３の磁性層（４）が第１の記録層（Ａ１）として構成され、第１の記録層（Ａ１）は第１の非磁性層（１）と第２の非磁性層（５）の間に挟まれた構成となっている。

[0093] 実施例３の詳細は、以下の記載を除き、実施例１と同様である。

[0094] 第３の磁性層（４）の磁化方向は、第２の非磁性層（５）との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向である。また、第２の非

磁性層（５）と第３の磁性層（４）との界面の界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）は、第２の非磁性層（５）と第２の磁性層（３）とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）よりも大きくなるように構成される。界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）は、後述する第３の磁性層（４）及び第２の磁性層（３）の組成等により調整される。

[0095] 第３の磁性層（４）は少なくともＦｅを含み、第３の磁性層（４）のＦｅの組成は第３の磁性層（４）の磁性元素の原子分率の総和に対して５０ａｔ％以上であり、好ましくは６０ａｔ％以上、さらに好ましくは６０～９０ａｔ％である。Ｆｅの組成が５０ａｔ％以上であると、大きな界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）を得ることができ、Ｆｅの組成が５０ａｔ％未満であると、大きな界面磁気異方性エネルギー密度（ K_i ）を得ることができないためである（図２５等参照）。

[0096] 第２の磁性層（３）の飽和磁化（ M_s ）は、第３の磁性層（４）の飽和磁化（ M_s ）よりも低くなるように構成される。飽和磁化（ M_s ）は、第３の磁性層（４）及び第２の磁性層（３）の組成等により調整される。

[0097] 第３の磁性層（４）は、磁性元素としてＦｅの他、Ｃｏ、Ｎｉ、Ｍｎ等の３ｄ強磁性遷移金属元素をさらに含んでもよい。

[0098] 第２の磁性層（３）は、Ｖ、Ｔｉ、Ｃｒ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｈｆ、Ｔａ、Ｗ、Ｓｉ、Ａｌ、Ｂ、Ｐｄ、Ｐｔ等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでも、Ｂ、Ｖは、取り扱いやすさの面からも好ましい。これらの非磁性元素は、磁性層の飽和磁化（ M_s ）を低くすることができる。

[0099] 第３の磁性層（４）もＶ、Ｔｉ、Ｃｒ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｈｆ、Ｔａ、Ｗ、Ｓｉ、Ａｌ、Ｂ、Ｐｄ、Ｐｔ等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでも、Ｂ、Ｖは、取り扱いやすさの面からも好ましい。

なお、第３の磁性層（４）のＶ、Ｔｉ、Ｃｒ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｈｆ、Ｔａ、Ｗ、Ｓｉ、Ａｌ、Ｂ、Ｐｄ、Ｐｔ等の非磁性元素組成の、第２の磁性層（３）のＶ、Ｔｉ、Ｃｒ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｈｆ、Ｔａ、Ｗ、Ｓｉ、Ａｌ、Ｂ、Ｐｄ、Ｐｔ等の非磁性元素組成に対する比は、１より小さくするこ

とができる。飽和磁化 (M_s) を低くすることに寄与することが知られている磁性層の V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt 等の非磁性元素の比を調整することで、第2の磁性層 (3) の飽和磁化 (M_s) が第3の磁性層 (4) の飽和磁化 (M_s) よりも低くなり磁性層全体として飽和磁化 (M_s) を下げることができ、磁性層の磁性元素中の Fe 組成の調整と併せ、さらに飽和磁化 (M_s) を下げることができるからである。

[0100] 第2の磁性層 (3) の膜厚は、第3の磁性層 (4) の膜厚に対する比が1以上であること、すなわち、第2の磁性層 (3) の膜厚は第3の磁性層 (4) の膜厚より大きいことが好ましい。第2の磁性層 (3) は低い飽和磁化 (M_s) を得るために磁性元素の原子分率の総和に対して 50 at % 以下となっているが、第2の非磁性層 (5) との界面で界面磁気異方性に資する第3の磁性層 (4) の Fe の組成は磁性元素の原子分率の総和に対して 50 at % 以上となっており、記録層全体としては第2の磁性層 (3) を相対的に厚くして低い飽和磁化 (M_s) を得ることが望ましいからである。

具体的には、第3の磁性層 (4) の膜厚は 0.2 ~ 1.0 nm の範囲に、第2の磁性層 (3) の膜厚は 0.4 ~ 5.0 nm の範囲に調整される。

[0101] 実施例3のより具体的な例としては、第1の非磁性層 (1) / 第1の磁性層 (2) / 第2の磁性層 (3) / 第3の磁性層 (4) / 第2の非磁性層 (5) が、 $MgO / (Co_a Fe_b M_{100-a-b})_c N_{100-c} / (Co_d Fe_e M_{100-d-e})_f N_{100-f} / (Co_g Fe_h M_{100-g-h})_i N_{100-i} / MgO$ (ただし、MはCo, Fe以外の磁性元素、Nは非磁性元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 100$ 、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$ 、 $0 \leq g \leq 50$ 、 $50 \leq h \leq 100$ 、 $30 \leq i \leq 100$) が挙げられ、より具体的には $MgO / Co_{25} Fe_{75} / Co_{50} Fe_{50} / Co_{25} Fe_{75} / MgO$ 、 $MgO / Co_{25} Fe_{75} / (Co_{50} Fe_{50})_{75} B_{25} / Co_{25} Fe_{75} / MgO$ 、 $MgO / (Co_{25} Fe_{75})_{80} B_{20} / (Co_{60} Fe_{40})_{75} B_{25} / (Co_{25} Fe_{75})_{80} B_{20} / MgO$ 、 $MgO / Co_{20} Fe_{75} Ni_5 / Co_{15} Fe_{40} Ni_{45} / Co_{20} Fe_{75} Ni_5 / MgO$ 、 $MgO / Co_{20} Fe_{75} Ni_5 / (Co_{15} Fe_{40} Ni_{45} / Co_{20} Fe_{75} Ni_5 / MgO)$ である。

$\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{5}$ B_{25} / $\text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_{5}$ / MgO 、 MgO / $\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$ / ($\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_{5}$) B_{25} / ($\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}$) B_{20} / MgO 等が例示できる。

[0102] 図3に示した実施例3において、参照層が第1の非磁性層(1)と第1の磁性層(2)の反対側に隣接する場合は第1の非磁性層(1)は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層となり、また、他の参照層が第2の非磁性層(5)と第3の磁性層(4)の反対側に隣接する場合は第2の非磁性層(5)は障壁層となる。第1の磁性層(2) / 第2の磁性層(3) / 第3の磁性層(4)は記録層を構成する。

[0103] (実施例4)

図4に、記録層の磁性層に極薄の非磁性結合層を挟んだ、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0104] 実施例4は図4に示すとおり、実施例3の第2の磁性層(3)を第4及び第5の磁性層(3a、3b)とし、第4及び第5の磁性層(3a、3b)の間に隣接して非磁性結合層(6)を備えた構造を有するものである。

[0105] 実施例4の詳細は、以下の記載を除き、実施例3と同様である。

[0106] 実施例3の第2の磁性層(3)と同様、第4及び第5の磁性層(3a、3b)はそれぞれCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、第4及び第5の磁性層(3a、3b)のFeの組成は第4及び第5の磁性層(3a、3b)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下、好ましくは40at%以下である。Feの組成が50at%以下であると、飽和磁化(M_s)を低くすることができ、Feの組成が50at%を超えると、飽和磁化(M_s)が大きくなってしまうからである(図27等参照)

[0107] 実施例3の第2の磁性層(3)と同様、第4の磁性層(3a)の飽和磁化(M_s)は、第1の磁性層(2)の飽和磁化(M_s)よりも低くなるように構成される。また、第5の磁性層(3b)の飽和磁化(M_s)は、第3の磁性層(4)の飽和磁化(M_s)よりも低くなるように構成される。飽和磁化(M_s)は、第1の磁性層(2)、第4及び第5の磁性層(3a、3b)、第3の磁性

層（４）の組成等により調整される。

[0108] 実施例３の第２の磁性層（３）と同様、第４及び第５の磁性層（３a、３b）は、V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでも、B、Vは、取り扱いやすさの面からも好ましい。これらの非磁性元素は、磁性層の飽和磁化（ M_s ）を低くすることができる。

[0109] 第１の磁性層（２）又は第３の磁性層（４）もV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素をさらに含んでもよい。なかでも、B、Vは、取り扱いやすさの面からも好ましい。

なお、第１の磁性層（２）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、第４の磁性層（３a）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比は、１より小さくすることができる。また、第３の磁性層（４）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、第５の磁性層（３b）のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比は、１より小さくすることができる。飽和磁化（ M_s ）を低くすることに寄与することが知られている磁性層のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素の比を調整することで、第４及び第５の磁性層（３a、３b）の飽和磁化（ M_s ）が第１の磁性層（２）及び第３の磁性層（４）の飽和磁化（ M_s ）よりも低くでき、磁性層の磁性元素中のFe組成の調整と併せ、さらに飽和磁化（ M_s ）を下げるからである。

[0110] 非磁性結合層（６）は、V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素を含み、W、Taがより好ましい。

[0111] 第4及び第5の磁性層(3a、3b)の間に挟まれた非磁性結合層(6)の膜厚は、0.1～1nmであることが望ましく、0.3～1nmであることがより好ましい。非磁性結合層(6)は、B等の非磁性元素の拡散の受け止め領域として作用するため、第4及び第5の磁性層(3a、3b)に含まれるB等の非磁性元素の濃度を制御する機能を有する。非磁性結合層(6)の膜厚が1nmより大きくなると、かかる制御による効果が得にくくなる。

[0112] 第4及び第5の磁性層(3a、3b)の膜厚の総和は、第1の磁性層(2)の膜厚に対する比が1以上であり、かつ、第3の磁性層(4)の膜厚に対する比が1以上であること、すなわち、第4及び第5の磁性層(3a、3b)の膜厚の総和は、第1の磁性層(2)の膜厚及び第3の磁性層(4)の膜厚より大きいことが好ましい。第4及び第5の磁性層(3a、3b)は低い飽和磁化(M_s)を得るために磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下となっているが、第1の非磁性層(1)との界面で界面磁気異方性に資する第1の磁性層(2)のFeの組成、及び、第2の非磁性層(5)との界面で界面磁気異方性に資する第3の磁性層(4)のFeの組成は磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上となっており、記録層全体としては第4及び第5の磁性層(3a、3b)を相対的に厚くして低い飽和磁化(M_s)を得ることが望ましいからである。なお、記録層の磁性層の飽和磁化(M_s)は、磁性層が非磁性層に分断されていても膜厚の総和と相関する。

具体的には、第1の磁性層(2)の膜厚及び第3の磁性層(4)の膜厚は0.2～1.0nmの範囲に、第4及び第5の磁性層(3a、3b)の膜厚の総和は0.4～5.0nmの範囲に調整される。

[0113] 実施例4のより具体的な例としては、第1の非磁性層(1)／第1の磁性層(2)／第4の磁性層(3a)／非磁性結合層(6)／第5の磁性層(3b)／第3の磁性層(4)／第2の非磁性層(5)が、 $\text{MgO} / (\text{Co}_a\text{Fe}_b\text{M}_{100-a-b})_c\text{N}_{100-c} / (\text{Co}_d\text{Fe}_e\text{M}_{100-d-e})_f\text{N}_{100-f} / \text{N} / (\text{Co}_d\text{Fe}_e\text{M}_{100-d-e})_f\text{N}_{100-f} / (\text{Co}_g\text{Fe}_h\text{M}_{100-g-h})_i\text{N}_{100-i} / \text{MgO}$ (ただし、MはCo、Fe以外の磁性元素、Nは非磁性元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 1$

00、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$ 、 $0 \leq g \leq 50$ 、 $50 \leq h \leq 100$ 、 $30 \leq i \leq 100$) が挙げられ、より具体的には $\text{MgO} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / \text{Co}_{50}\text{Fe}_{50} / \text{W} / \text{Co}_{50}\text{Fe}_{50} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / \text{MgO}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25} / \text{Ta} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / \text{MgO}$ 、 $\text{MgO} / (\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20} / (\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40})_{75}\text{B}_{25} / \text{W} / (\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40})_{75}\text{B}_{25} / (\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20} / \text{MgO}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / \text{Co}_{15}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{45} / \text{Ta} / \text{Co}_{15}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{45} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / \text{MgO}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25} / \text{W} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25} / \text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5 / \text{MgO}$ 、 $\text{MgO} / \text{Co}_{25}\text{Fe}_{75} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25} / \text{Ta} / (\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25} / (\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20} / \text{MgO}$ 等が例示できる。

[0114] 図4に示した実施例4において、参照層が第1の非磁性層(1)と第1の磁性層(2)の反対側に隣接する場合は第1の非磁性層(1)は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層となり、また、他の参照層が第2の非磁性層(5)と第3の磁性層(4)の反対側に隣接する場合は第2の非磁性層(5)は障壁層となる。第1の磁性層(2)/第4の磁性層(3a)/非磁性結合層(6)/第5の磁性層(3b)/第3の磁性層(4)は記録層を構成する。

[0115] (実施例5)

図5に、3つの磁性層の間の2か所に非磁性挿入層を挿入した、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0116] 実施例5は、実施例3に加え、第1の非磁性挿入層(7)及び第2の非磁性挿入層(8)をさらに備えるものである。

図5に示すとおり、第1の非磁性層(1)、第1の磁性層(2)、第1の非磁性挿入層(7)、第2の磁性層(3)、第2の非磁性挿入層(8)、第3の磁性層(4)、第2の非磁性層(5)の順に積層したものである。

[0117] 実施例5の詳細は、以下の記載を除き、実施例3と同様である。

[0118] 第1の非磁性挿入層(7)は第1の磁性層(2)と第2の磁性層(3)の

構成元素の相互拡散を、第2の非磁性挿入層（8）は第2の磁性層（3）と第3の磁性層（4）の構成元素の相互拡散を防止する目的で挿入される。相互拡散を防止する材料（非磁性挿入層）であれば制限はないが、好ましくはMo、W、Ta、Nb等であり、より好ましくはbccを含む非磁性金属であり、さらに好ましくは原子半径が139 pm以上である。

第1及び第2の非磁性挿入層（7、8）の挿入層膜厚は0.1～0.5 nmである。挿入層膜厚が0.5 nmより大きいと、第1の磁性層（2）と第2の磁性層（3）との磁気的な結合、第2の磁性層（3）と第3の磁性層（4）との磁気的な結合が弱くなり、熱安定性が低下するからである。

[0119] 第1及び第2の非磁性挿入層（7、8）はスパッタ法により第1及び第2のスパッタリングガスを用いて成膜されることが好ましい。

第1の非磁性挿入層（7）の金属の質量数（ M_T ）の、第1のスパッタリングガスの質量数（ M_G ）に対する比（第1の M_T/M_G 比）は、2.2以下となるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにXe、Kr等を選択する。

第2の非磁性挿入層（8）の金属の質量数（ M_T ）の、第2のスパッタリングガスの質量数（ M_G ）に対する比（第2の M_T/M_G 比）は、2.2より大きくなるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにAr等を選択する。

[0120] 実施例5のより具体的な例としては、第1の非磁性層（1）／第1の磁性層（2）／第1の非磁性挿入層（7）／第2の磁性層（3）／第2の非磁性挿入層（8）／第3の磁性層（4）／第2の非磁性層（5）が、 $MgO / (Co_a Fe_b M_{100-a-b})_c N_{100-c} / Ni / (Co_d Fe_e M_{100-d-e})_f N_{100-f} / Ni / (Co_g Fe_h M_{100-g-h})_i N_{100-i} / MgO$ （ただし、MはCo、Fe以外の磁性元素、Nは非磁性元素、Niは非磁性挿入元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 100$ 、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$ 、 $0 \leq g \leq 50$ 、 $50 \leq h \leq 100$ 、 $30 \leq i \leq 100$ ）が挙げられ、より具体的には $MgO / Co_{25} Fe_{75} / W / Co_{50} Fe_{50} / W / Co_{25} Fe_{75} / MgO$ 、

MgO/Co₂₅Fe₇₅/Mo/(Co₅₀Fe₅₀)₇₅B₂₅/Ta/Co₂₅Fe₇₅/MgO、MgO/(Co₂₅Fe₇₅)₈₀B₂₀/W/(Co₆₀Fe₄₀)₇₅B₂₅/Mo/(Co₂₅Fe₇₅)₈₀B₂₀/MgO、MgO/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/Mo/Co₁₅Fe₄₀Ni₄₅/W/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/MgO、MgO/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/Mo/(Co₅₀Fe₄₅Ni₅)₇₅B₂₅/Mo/Co₂₀Fe₇₅Ni₅/MgO、MgO/Co₂₅Fe₇₅/Ta/(Co₅₀Fe₄₅Ni₅)₇₅B₂₅/Nb/(Co₂₅Fe₇₅)₈₀B₂₀/MgO等が例示できる。

[0121] 図5に示した実施例5において、参照層が第1の非磁性層(1)と第1の磁性層(2)の反対側に隣接する場合は第1の非磁性層(1)は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層となり、また、他の参照層が第2の非磁性層(5)と第3の磁性層(4)の反対側に隣接する場合は第2の非磁性層(5)は障壁層となる。第1の磁性層(2)/第1の非磁性挿入層(7)/第2の磁性層(3)/第2の非磁性挿入層(8)/第3の磁性層(4)は記録層を構成する。

[0122] (実施例6)

図6に、非磁性挿入層を2か所に挿入した、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0123] 実施例6は、実施例4に加え、第1の非磁性挿入層(7)及び第2の非磁性挿入層(8)をさらに備えるものである。

図6に示すとおり、第1の非磁性層(1)、第1の磁性層(2)、第1の非磁性挿入層(7)、第4の磁性層(3a)、非磁性結合層(6)、第5の磁性層(3b)、第2の非磁性挿入層(8)、第3の磁性層(4)、第2の非磁性層(5)の順に積層したものである。

[0124] 実施例6の詳細は、以下の記載を除き、実施例4と同様である。

[0125] 第1の非磁性挿入層(7)は第1の磁性層(2)と第4の磁性層(3a)の構成元素の相互拡散を、第2の非磁性挿入層(8)は第5の磁性層(3b)と第3の磁性層(4)の構成元素の相互拡散を防止する目的で挿入される。相互拡散を防止する材料(非磁性挿入元素)であれば制限はないが、好ま

しくはMo、W、Ta、Nb等であり、より好ましくはbccを含む非磁性金属であり、さらに好ましくは原子半径が139 pm以上である。

第1の非磁性挿入層(7)の挿入層膜厚は0.1~0.5 nmである。挿入層膜厚が0.5 nmより大きいと、第1の磁性層(2)と第4の磁性層(3a)との磁気的な結合が弱くなり、熱安定性が低下するからである。

第2の非磁性挿入層(8)の挿入層膜厚は0.1~0.5 nmである。挿入層膜厚が0.5 nmより大きいと、第3の磁性層(4)と第5の磁性層(3b)との磁気的な結合が弱くなり、熱安定性が低下するからである。

[0126] 第1及び第2の非磁性挿入層(7、8)はスパッタ法により第1及び第2のスパッタリングガスを用いて成膜されることが好ましい。

第1の非磁性挿入層(7)の金属の質量数(M_T)の、第1のスパッタリングガスの質量数(M_G)に対する比(第1の M_T/M_G 比)は、2.2以下となるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにXe、Kr等を選択する。

第2の非磁性挿入層(8)の金属の質量数(M_T)の、第2のスパッタリングガスの質量数(M_G)に対する比(第2の M_T/M_G 比)は、2.2より大きくなるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにAr等を選択する。

[0127] 実施例6のより具体的な例としては、第1の非磁性層(1)/第1の磁性層(2)/第1の非磁性挿入層(7)/第4の磁性層(3a)/非磁性結合層(6)/第5の磁性層(3b)/第2の非磁性挿入層(8)/第3の磁性層(4)/第2の非磁性層(5)が、 $MgO/(Co_aFe_bM_{100-a-b})_cN_{100-c}/Ni/(Co_dFe_eM_{100-d-e})_fN_{100-f}/N/(Co_dFe_eM_{100-d-e})_fN_{100-f}/Ni/(Co_gFe_hM_{100-g-h})_iN_{100-i}/MgO$ (ただし、MはCo、Fe以外の磁性元素、Nは非磁性元素、Niは非磁性挿入元素、 $0 \leq a \leq 50$ 、 $50 \leq b \leq 100$ 、 $30 \leq c \leq 100$ 、 $0 \leq d \leq 100$ 、 $0 \leq e \leq 50$ 、 $30 \leq f \leq 100$ 、 $0 \leq g \leq 50$ 、 $50 \leq h \leq 100$ 、 $30 \leq i \leq 100$)が挙げられ、より具体的には $MgO/Co_{25}Fe_{75}/W/Co_{50}Fe_{50}/W/Co_{50}Fe_{50}/W/$

$\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{Ta}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25}/\text{Ta}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{50})_{75}\text{B}_{25}/\text{Mo}/\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20}/\text{Mo}/(\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40})_{75}\text{B}_{25}/\text{W}/(\text{Co}_{60}\text{Fe}_{40})_{75}\text{B}_{25}/\text{Mo}/(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20}/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5/\text{Ta}/\text{Co}_{15}\text{Fe}_{40}\text{Ni}_{45}/\text{Ta}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5/\text{Ta}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25}/\text{W}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25}/\text{Nb}/\text{Co}_{20}\text{Fe}_{75}\text{Ni}_5/\text{MgO}$ 、 $\text{MgO}/\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75}/\text{W}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25}/\text{Ta}/(\text{Co}_{50}\text{Fe}_{45}\text{Ni}_5)_{75}\text{B}_{25}/\text{W}/(\text{Co}_{25}\text{Fe}_{75})_{80}\text{B}_{20}/\text{MgO}$ 等が例示できる。

[0128] 図6に示した実施例6において、参照層が第1の非磁性層(1)と第1の磁性層(2)の反対側に隣接する場合は第1の非磁性層(1)は磁気抵抗効果素子の基本構造のうちの障壁層となり、また、他の参照層が第2の非磁性層(5)と第3の磁性層(4)の反対側に隣接する場合は第2の非磁性層(5)は障壁層となる。第1の磁性層(2)/第1の非磁性挿入層(7)/第4の磁性層(3a)/非磁性結合層(6)/第5の磁性層(3b)/第2の非磁性挿入層(8)/第3の磁性層(4)は記録層を構成する。

[0129] (実施例7)

図7に、下部非磁性電極/参照層/障壁層/記録層/上部非磁性電極を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0130] 実施例7の磁気抵抗効果素子は図7に示すとおり、下部非磁性電極(E1)、第1の参照層(B1)、障壁層である第1の非磁性層(1)、第1の記録層(A1)、第2の非磁性層(5)、上部非磁性電極(E2)の積層構造を有し、第1の記録層(A1)は実施例3の第1の磁性層(2)、第2の磁性層(3)、第3の磁性層(4)を備える。

[0131] 実施例7の詳細は、以下の記載を除き、実施例3と同様である。

[0132] 第1の参照層(B1)は、参照層全体として磁化方向が固定された磁性層である。参照層の磁性層は、磁性層と非磁性層の積層構造になっていてもよい。

[0133] 下部非磁性電極（E 1）は、第1の参照層（B 1）の第1の非磁性層（1）とは反対側の端面に接続されている。

下部非磁性電極（E 1）の積層構造はTa（5 nm）／Ru（5 nm）／Ta（10 nm）／Pt（5 nm）、Ta（5 nm）／Ta N（20 nm）等が例示される。

[0134] 第1の非磁性層（1）は、磁気抵抗効果素子の障壁層（絶縁層からなるトンネル接合層）であり、第1の磁性層（2）の第2の磁性層（3）とは反対側の端面と、第1の参照層（B 1）の下部非磁性電極（E 1）とは反対側の端面とに接合されている。また、第2の非磁性層（5）は、第3の磁性層（4）の第2の磁性層（3）とは反対側の端面と、上部非磁性電極（E 2）とに接合されている。

第1の非磁性層（1）及び第2の非磁性層（5）の材料には、第1の参照層（B 1）の下部非磁性電極（E 1）とは反対側の端面の材料と第1の磁性層（2）の材料との組み合わせで磁気抵抗変化率が大きく発現するよう、MgO、Al₂O₃、SiO₂、TiO、Hf₂O等の酸素を含む絶縁体が用いられ、好ましくはMgOが用いられる。

第1の非磁性層（1）及び第2の非磁性層（5）の膜厚は、0.1～5.0 nm、好ましくは0.5～2.0 nmの範囲に調整される。また、第1の非磁性層（1）を1.2 nm、第2の非磁性層（5）を1.0 nmとする等、膜厚に差をつけてもよい。

[0135] 上部非磁性電極（E 2）は、第2の非磁性層（5）の第3の磁性層（4）とは反対側の端面に接続されている。

上部非磁性電極（E 2）の積層構造は、Ta（50 nm）、Ta（5 nm）／Ru（50 nm）、Ru（1～50 nm）、Pt（1～50 nm）、CoFeB（0.2～1.5 nm）／Ru（5）／Ta（50 nm）等が例示される。

[0136] （実施例8）

図8に、下部非磁性電極／参照層／障壁層／記録層／上部非磁性電極を備

え、記録層が実施例4の積層構造である本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0137] 実施例8の磁気抵抗効果素子は図8に示すとおり、下部非磁性電極（E 1）、第1の参照層（B 1）、障壁層である第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）、上部非磁性電極（E 2）の積層構造を有し、第1の記録層（A 1）は実施例4の第1の磁性層（2）、第4の磁性層（3 a）、非磁性結合層（6）、第5の磁性層（3 b）、第3の磁性層（4）を備える。

[0138] 実施例8の詳細は、実施例4及び7と同様である。

[0139] （実施例9）

図9に、下部電極／参照層／障壁層／記録層／上部電極を備え、記録層が実施例5の積層構造である本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0140] 実施例9の磁気抵抗効果素子は図9に示すとおり、下部非磁性電極（E 1）、第1の参照層（B 1）、障壁層である第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）、上部非磁性電極（E 2）の積層構造を有し、第1の記録層（A 1）は実施例5の第1の磁性層（2）、第1の非磁性挿入層（7）、第2の磁性層（3）、第2の非磁性挿入層（8）、第3の磁性層（4）を備える。

[0141] 実施例9の詳細は、実施例5及び7と同様である。

[0142] （実施例10）

図10に、下部非磁性電極／参照層／障壁層／記録層／上部非磁性電極を備え、記録層が実施例6の積層構造である本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0143] 実施例10の磁気抵抗効果素子は図10に示すとおり、下部非磁性電極（E 1）、第1の参照層（B 1）、障壁層である第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）、上部非磁性電極（E 2）の積層構造を有し、第1の記録層（A 1）は実施例6の第1の磁性層（2）、第1の非磁性挿入層（7）、第4の磁性層（3 a）、非磁性結合層（6）、第5

の磁性層（３ｂ）、第２の非磁性挿入層（８）、第３の磁性層（４）を備える。

[0144] 実施例１０の詳細は、実施例６及び７と同様である。

[0145] （実施例１１）

図１１に、１つの記録層、２つの参照層及び２つの障壁層を備え、記録層が実施例３の記録層の積層構造である本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0146] 実施例１１の磁気抵抗効果素子は図１１に示すとおり、下部非磁性電極（Ｅ１）、第１の参照層（Ｂ１）、第１の非磁性層（１）、第１の記録層（Ａ１）、第２の非磁性層（５）、第２の参照層（Ｂ２）、上部非磁性電極（Ｅ２）の積層構造を有し、第１の記録層（Ａ１）は実施例２の第１の磁性層（２）、第２の磁性層（３）、第３の磁性層（４）を備える。

この実施例では、第１の非磁性層（１）及び第２の非磁性層（５）が障壁層となる。

[0147] 実施例１１の詳細は、以下の記載を除き、実施例３及び７と同様である。

[0148] 第２の参照層（Ｂ２）は、参照層全体として磁化方向が固定された磁性層である。参照層の磁性層は、磁性層と非磁性層の積層構造になっていてもよい。また、第２の参照層（Ｂ２）は、第１の参照層（Ｂ１）と各磁性層の磁化の配列状態を反対にしており、反平行結合参照層としての性質を有している。

[0149] （実施例１２）

図１２に、１つの記録層、２つの参照層及び２つの障壁層を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0150] 実施例１２の磁気抵抗効果素子は図１２に示すとおり、下部非磁性電極（Ｅ１）、第１の参照層（Ｂ１）、第１の非磁性層（１）、第１の記録層（Ａ１）、第２の非磁性層（５）、第２の参照層（Ｂ２）、上部非磁性電極（Ｅ２）の積層構造を有し、第１の記録層（Ａ１）は実施例４の第１の磁性層（２）、第４の磁性層（３ａ）、非磁性結合層（６）、第５の磁性層（３ｂ）

、第3の磁性層（4）を備える。

この実施例では、第1の非磁性層（1）及び第2の非磁性層（5）が障壁層となる。

[0151] 実施例12の詳細は、実施例4、8及び11と同様である。

[0152] （実施例13）

図13に、1つの記録層、2つの参照層及び2つの障壁層を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0153] 実施例13の磁気抵抗効果素子は図13に示すとおり、下部非磁性電極（E1）、第1の参照層（B1）、第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A1）、第2の非磁性層（5）、第2の参照層（B2）、上部非磁性電極（E2）の積層構造を有し、第1の記録層（A1）は実施例5の第1の磁性層（2）、第1の非磁性挿入層（7）、第2の磁性層（3）、第2の非磁性挿入層（8）、第3の磁性層（4）を備える。

この実施例では、第1の非磁性層（1）及び第2の非磁性層（5）が障壁層となる。

[0154] 実施例13の詳細は、実施例5、9及び11と同様である。

[0155] （実施例14）

図14に、1つの記録層、2つの参照層及び2つの障壁層を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0156] 実施例14の磁気抵抗効果素子は図14に示すとおり、下部非磁性電極（E1）、第1の参照層（B1）、第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A1）、第2の非磁性層（5）、第2の参照層（B2）、上部非磁性電極（E2）の積層構造を有し、第1の記録層（A1）は実施例6の第1の磁性層（2）、第1の非磁性挿入層（7）、第4の磁性層（3a）、非磁性結合層（6）、第5の磁性層（3b）、第2の非磁性挿入層（8）、第3の磁性層（4）を備える。

この実施例では、第1の非磁性層（1）及び第2の非磁性層（5）が障壁層となる。

[0157] 実施例 14 の詳細は、実施例 6、10 及び 11 と同様である。

[0158] (実施例 15)

図 15 に、2つの記録層、3つの参照層及び4つの障壁層を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0159] 実施例 15 の磁気抵抗効果素子は図 15 に示すとおり、下部非磁性電極 (E1)、第1の参照層 (B1)、第1の非磁性層 (1)、第1の記録層 (A1)、第2の非磁性層 (5)、第2の参照層 (B2)、第3の非磁性層 (9)、第2の記録層 (A2)、第4の非磁性層 (10)、上部非磁性電極 (E2) の積層構造を有する。

この実施例では、第1の非磁性層、及び第2の非磁性層 (5)、第3の非磁性層 (9) 及び第4の非磁性層 (10) が障壁層となる。

第1の記録層 (A1) 及び第2の記録層 (A2) は、実施例 3 乃至 6 に示された記録層の構成のいずれであってもよい。

[0160] 実施例 15 の詳細は、以下の記載を除き、実施例 1～14 と同様である。

[0161] 第3の非磁性層 (9) は、磁気抵抗効果素子の障壁層であり、第2の参照層 (B2) の第2の非磁性層 (5) とは反対側の端面と、第2の記録層 (A2) の第4の非磁性層 (10) とは反対側の端面とに接合されている。また、第4の非磁性層 (10) は、磁気抵抗効果素子の障壁層であり、第2の記録層 (A2) の第3の非磁性層 (9) とは反対側の端面と、第3の参照層 (B3) の上部非磁性電極 (E2) とは反対側の端面とに接合されている。

第3の非磁性層 (9) 及び第4の非磁性層 (10) の材料には、接合する2つの端面の材料の組み合わせで磁気抵抗変化率が大きく発現するよう、MgO、 Al_2O_3 、 SiO_2 、TiO、 Hf_2O 等の酸素を含む化合物が用いられ、好ましくはMgOが用いられる。

第3の非磁性層 (9) 及び第4の非磁性層 (10) の膜厚は、0.1～5.0 nm、好ましくは0.2～2.0 nmの範囲に調整される。また、第1の非磁性層 (1)、第2の非磁性層 (5)、第3の非磁性層 (9)、第4の非磁性層 (10) の膜厚に差をつけてもよい。

[0162] 第3の参照層（B3）は、参照層全体として磁化方向が固定された磁性層である。参照層の磁性層は、磁性層と非磁性層の積層構造になっていてもよい。また、第3の参照層（B3）は、第2の参照層（B2）と磁性層の磁化の配列状態を反対にしており、反平行結合参照層としての性質を有している。

[0163] 実施例15には2つの記録層、3つの参照層及び4つの障壁層で構成された磁気抵抗効果素子の一例を示したが、本発明の磁気抵抗効果素子はそれ以上の記録層、参照層及び障壁層を備えることができる。複数の参照層の利用により、多値化機能を提供することができる。

[0164] （実施例16）

図16に、下部非磁性電極（E1）、第1の参照層（B1）、第1の非磁性層（1）（第1の障壁層（T1）に相当）、第1の記録層（A1）、第2の非磁性層（5）、上部非磁性電極（E2）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

[0165] 実施例16の下部非磁性電極（E1）は基体上にTa（5nm）／Pt（3nm）が積層され、第1の参照層（B1）は、[Co（0.5nm）／Pt（0.3nm）]×4／Co（0.5nm）／Ru（0.9nm）／[Co（0.5nm）／Pt（0.3nm）]×2／Co（0.5nm）／W（0.3nm）／CoFeB（1.2nm）、第1の非磁性層（1）はMgO（1.0nm）である。第1の記録層（A1）は第1の磁性層（2）／第4の磁性層（3a）／非磁性結合層（6）／第5の磁性層（3b）／第3の磁性層（4）が（Co₂₅Fe₇₅）B（t）／（Co₅₀Fe₅₀）B（1.0nm）／W（0.5nm）／（Co₅₀Fe₅₀）B（1.0nm）／（Co₂₅Fe₇₅）B（t）の積層構造をとり、第2の非磁性層（5）はMgO（1.0nm）であり、上部非磁性電極（E2）は第2の非磁性層（5）側から順にCoFeB（1.0nm）／Ru（5nm）／Ta（50）の積層構造となっている。

[0166] （実施例17）

図17に、下部非磁性電極（E1）、第1の非磁性層（1）、第1の記録

層（A 1）、第2の非磁性層（5）（第1の障壁層（T 1）に相当）、第1の参照層（B 1）、上部非磁性電極（E 2）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

実施例17は図17に示すとおり、第1の記録層（A 1）に隣接した第2の非磁性層（5）が第1の障壁層（T 1）となっており、第2の非磁性層（5）と上部非磁性電極（E 2）との間に隣接して第1の参照層（B 1）を備えている。

[0167]（実施例18）

図18に、下部非磁性電極（E 1）、第1の参照層（B 1）、第1の非磁性層（1）（第1の障壁層（T 1）に相当）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）（第2の障壁層（T 2）に相当）、第2の参照層（B 2）、上部非磁性電極（E 2）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

実施例18は図18に示すとおり、第1の記録層（A 1）に隣接した第1の非磁性層（1）は第1の障壁層（T 1）となっており、第1の非磁性層（1）と下部非磁性電極（E 1）との間に隣接して第1の参照層（B 1）を備える。また、第1の記録層（A 1）に隣接した第2の非磁性層（5）は第2の障壁層（T 2）となっており、第2の非磁性層（t）と上部非磁性電極（E 2）との間に隣接して第2の参照層（B 1）を備えている。

[0168]（実施例19）

図19（a）に、下部非磁性電極（E 1）、第1の参照層（B 1）、第1の非磁性層（1）（第1の障壁層（T 1）に相当）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

図19（b）に、下部非磁性電極（E 1）、第1の非磁性層（1）、第1の記録層（A 1）、第2の非磁性層（5）（第1の障壁層（T 1）に相当）、第1の参照層（B 1）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

いずれの第1の記録層(A1)も、第1の磁性層(2)としてFe組成(濃度)が高いCoFeB層、第1の非磁性挿入層(7)、第2の磁性層(3)としてCo組成(濃度)が高いCoFeB層、第2の非磁性挿入層(8)、第3の磁性層(4)としてFe組成(濃度)が高いCoFeB層を備える。

第1及び第2の非磁性挿入層(7、8)はスパッタ法により第1及び第2のスパッタリングガスを用いて成膜されることが好ましい。

いずれの実施例においても、第1の非磁性挿入層(7)の金属の質量数(M_T)の、第1のスパッタリングガスの質量数(M_G)に対する比(第1の M_T/M_G 比)は、2.2以下となるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにXe、Kr等を選択する。これにより、スパッタ時に下側となる第1の磁性層(2)はもちろん、非磁性挿入層(7)にもKr又はXe等のスパッタリング元素の反跳ガスは到達しにくく、第1の磁性層(2)や第1の非磁性挿入層(7)に残存しにくい(図49(b)参照)。

いずれの実施例においても、第2の非磁性挿入層(8)の金属の質量数(M_T)の、第2のスパッタリングガスの質量数(M_G)に対する比(第2の M_T/M_G 比)は、2.2より大きくなるように選択される。たとえば、非磁性挿入元素がMo、W、Ta、Nbの場合は、スパッタリングガスにAr等を選択する。これにより、第2の非磁性挿入層(8)やスパッタ時に下側となる第2の磁性層(3)にAr等のスパッタリング元素の反跳ガスが侵入しやすく、第2の磁性層(3)や第2の非磁性挿入層(8)に残存しやすい(図49(a)参照)。下側の第2の磁性層は、スパッタリング元素の反跳ガスによりダメージを受け、かつ、反跳ガスとして侵入したスパッタリング元素が残存することにより、さらに飽和磁化 M_s を低くすることができる。

[0169] (実施例20)

図20に、下部非磁性電極(E1)、第1の参照層(B1)、第1の非磁性層(1)(第1の障壁層(T1)に相当)、第1の記録層(A1)、第2

の非磁性層（５）を備えた、本発明の磁気抵抗効果素子の一例を示す。

第１の記録層（Ａ１）は、第１の磁性層（２）としてＦｅ組成（濃度）が高いＣｏＦｅＢ層、第１の非磁性挿入層（７）、第４の磁性層（３ａ）としてＣｏ組成（濃度）が高いＣｏＦｅＢ層、非磁性結合層（６）、第５の磁性層（３ｂ）としてＣｏ組成（濃度）が高いＣｏＦｅＢ層、第２の非磁性挿入層（８）、第３の磁性層（４）としてＦｅ組成（濃度）が高いＣｏＦｅＢ層を備える。

[0170] なお、本発明の磁気抵抗効果素子の作製は、ターゲット組成の材料をスパッタリングして積層後にアニール処理する方法の他、分子線エピタキシャル成長法（ＭＢＥ法）等を用いることができるが、これに限定されるものではない。

また、本発明の磁気抵抗効果素子の接合サイズは素子全体で一定でなくてもよい。

[0171] 本発明の磁気抵抗効果素子は、磁気メモリとして開発が進むＭＲＡＭの磁気メモリに組み込まれる。磁気抵抗効果素子の下部非磁性電極（Ｅ１）又は上部非磁性電極（Ｅ２）のどちらかの電極が選択トランジスタのドレイン電極に電氣的に接続され、他の電極がビット線に電氣的に接続される。

符号の説明

- [0172]
- | | |
|-----|-----------|
| 1 | 第１の非磁性層 |
| 2 | 第１の磁性層 |
| 3 | 第２の磁性層 |
| 3 a | 第４の磁性層 |
| 3 b | 第５の磁性層 |
| 4 | 第３の磁性層 |
| 5 | 第２の非磁性層 |
| 6 | 非磁性結合層 |
| 7 | 第１の非磁性挿入層 |
| 8 | 第２の非磁性挿入層 |

- 9 第3の非磁性層
- 10 第4の非磁性層
- A1 第1の記録層
- A2 第2の記録層
- B1 第1の参照層
- B2 第2の参照層
- B3 第3の参照層
- E1 下部非磁性電極
- E2 上部非磁性電極
- T1 第1の障壁層
- T2 第2の障壁層

請求の範囲

[請求項1]

磁化方向が膜面垂直方向である第1の磁性層(2)と、
前記第1の磁性層(2)に隣接して設けられる第1の非磁性層(1)と、
前記第1の磁性層(2)の前記第1の非磁性層(1)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層(3)と、を備え、
前記第1の磁性層(2)は少なくともFeを含み、前記第1の磁性層(2)のFeの組成は前記第1の磁性層(2)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上であり、前記第1の磁性層(2)の磁化方向は前記第1の非磁性層(1)との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向を向いており、
前記第2の磁性層(3)はCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、前記第2の磁性層(3)のFeの組成は前記第2の磁性層(3)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、
前記第1の非磁性層(1)と前記第1の磁性層(2)との界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、前記第1の非磁性層(1)と前記第2の磁性層(3)とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_j よりも大きく、
前記第2の磁性層(3)の飽和磁化 M_s は前記第1の磁性層(2)の飽和磁化 M_s よりも低い、磁気抵抗効果素子。

[請求項2]

前記第1の磁性層(2)は、前記第1の磁性層(2)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、前記第2の磁性層(3)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比が1よりも小さい、請求項1に記載の磁気抵抗効果素子。

- [請求項3] 前記第1の磁性層(2)と前記第2の磁性層(3)の間に隣接して、第1の金属からなる第1の非磁性挿入層(7)をさらに備えた、請求項1に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項4] 前記第1の非磁性挿入層(7)の挿入層膜厚は0.1~0.5nmである、請求項3に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項5] 前記第1の非磁性挿入層(7)はスパッタ法により第1のスパッタリングガスを用いて成膜され、前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の金属の質量数 M_T の前記第1のスパッタリングガスの質量数 M_G に対する比である第1の M_T/M_G 比は2.2以下である、請求項3に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項6] 磁化方向が膜面垂直方向である第1の磁性層(2)と、
前記第1の磁性層(2)に隣接して設けられる第1の非磁性層(1)と、
前記第1の磁性層(2)の前記第1の非磁性層(1)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層(3)と、
前記第2の磁性層(3)の前記第1の磁性層(2)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第3の磁性層(4)と、
前記第3の磁性層(4)の前記第2の磁性層(3)とは反対側に隣接して設けられる第2の非磁性層(5)と、を備え、
前記第1の磁性層(2)は少なくともFeを含み、前記第1の磁性層(2)のFeの組成は前記第1の磁性層(2)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上であり、前記第1の磁性層(2)の磁化方向は前記第1の非磁性層(1)との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向を向いており、
前記第3の磁性層(4)は少なくともFeを含み、前記第3の磁性層(4)のFeの組成は前記第3の磁性層(4)の磁性元素の原子分

率の総和に対して50at%以上であり、前記第3の磁性層(4)の磁化方向は前記第2の非磁性層(5)との界面における界面垂直磁気異方性により膜面に対して垂直方向を向いており、

前記第1の非磁性層(1)と前記第1の磁性層(2)との界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、前記第1の非磁性層(1)と前記第2の磁性層(3)とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i よりも大きく、

前記第2の非磁性層(5)と前記第3の磁性層(4)との界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i は、前記第2の非磁性層(5)と前記第2の磁性層(3)とを接合させた場合の界面の界面磁気異方性エネルギー密度 K_i よりも大きく、

前記第2の磁性層(3)の飽和磁化 M_s は、前記第1の磁性層(2)の飽和磁化 M_s 及び前記第3の磁性層(4)の飽和磁化 M_s よりも低い、磁気抵抗効果素子。

[請求項7]

前記第1の磁性層(2)は、前記第1の磁性層(2)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、前記第2の磁性層(3)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比が1より小さく、

前記第3の磁性層(4)は、前記第3の磁性層(4)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、前記第2の磁性層(3)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比が1より小さい、請求項6に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項8]

前記第1の磁性層(2)と前記第2の磁性層(3)の間に隣接して、第1の金属からなる第1の非磁性挿入層(7)をさらに備え、

前記第3の磁性層(4)と前記第2の磁性層(3)の間に隣接して

、第2の金属からなる第2の非磁性挿入層（8）をさらに備えた、請求項6に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項9] 前記第1の非磁性挿入層（7）及び前記第2の非磁性挿入層（8）のそれぞれの挿入層膜厚は、0.1～0.5 nmである、請求項8に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項10] 前記第1の非磁性挿入層（7）はスパッタ法により第1のスパッタリングガスを用いて成膜され、前記第1の非磁性挿入層（7）の前記第1の金属の質量数 M_T の前記第1のスパッタリングガスの質量数 M_G に対する比である第1の M_T/M_G 比は2.2以下であり、

前記第2の非磁性挿入層（8）はスパッタ法により第2のスパッタリングガスを用いて成膜され、前記第2の非磁性挿入層（8）の前記第2の金属の質量数 M_T の前記第2のスパッタリングガスの質量数 M_G に対する比である第2の M_T/M_G 比は2.2より大きい、請求項8に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項11] 前記第2の磁性層（3）は、

前記第1の磁性層（2）の前記第1の非磁性層（1）とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜内垂直方向である第4の磁性層（3a）と、

前記第4の磁性層（3a）の前記第1の磁性層（2）とは反対側に隣接して設けられる非磁性結合層（6）と、

前記非磁性結合層（6）の前記第4の磁性層（3a）とは反対側に隣接して設けられ、かつ、前記第3の磁性層（4）の前記第2の非磁性層（5）とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜内垂直方向である第5の磁性層（3b）と、

を備えた構造を有し、

前記第4及び第5の磁性層（3a、3b）はそれぞれCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、前記第4の磁性層（3a）のFeの組成は前記第4の磁性層（3a）の磁

性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、前記第5の磁性層(3b)のFeの組成は前記第5の磁性層(3b)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、

前記非磁性結合層(6)は、V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素を少なくとも1つ含む、請求項6に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項12]

前記第1の磁性層(2)は、前記第1の磁性層(2)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成の、前記第4の磁性層(3a)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比が1より小さく、

前記第3の磁性層(4)は、前記第3の磁性層(4)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素の、前記第5の磁性層(3b)のV、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素組成に対する比が1より小さい、請求項11に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項13]

前記第1の磁性層(2)と前記第4の磁性層(3a)の間に隣接して、第1の金属からなる第1の非磁性挿入層(7)をさらに備え、

前記第3の磁性層(4)と前記第5の磁性層(3b)の間に隣接して、第2の金属からなる第2の非磁性挿入層(8)をさらに備えた、請求項11に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項14]

前記第1の非磁性挿入層(7)及び前記第2の非磁性挿入層(8)のそれぞれの挿入層膜厚は、0.1~0.5nmである、請求項13に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項15]

前記第1の非磁性挿入層(7)はスパッタ法により第1のスパッタリングガスを用いて成膜され、前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の金属の質量数 M_T の前記第1のスパッタリングガスの質量数 M_G

に対する比である第1の M_T/M_G 比は2.2以下であり、

前記第2の非磁性挿入層(8)はスパッタ法により第2のスパッタリングガスを用いて成膜され、前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第2の金属の質量数 M_T の前記第2のスパッタリングガスの質量数 M_G に対する比である第2の M_T/M_G 比は2.2より大きい、請求項13に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項16] 前記第1の非磁性挿入層(7)は、Xe又はKrを用いてスパッタ法により成膜されたMo、Ta、W又はNbからなり、

前記第2の非磁性挿入層(8)は、Arを用いてスパッタ法により成膜されたMo、Ta、W又はNbからなる、請求項13に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項17] 請求項1乃至請求項16のいずれか一項に記載の磁気抵抗効果素子を磁気メモリセルとする磁気メモリ。

[請求項18] 第1の非磁性層(1)と、

前記第1の非磁性層(1)と隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第1の磁性層(2)であって、前記第1の磁性層(2)は少なくともFeを含み、前記第1の磁性層(2)のFeの組成は第1の磁性層(2)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上である、第1の磁性層(2)と、

前記第1の磁性層(2)の前記第1の非磁性層(1)とは反対側に隣接して設けられ、第1の金属からなる第1の非磁性挿入層(7)と、

前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の磁性層(2)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第2の磁性層(3)であって、前記第2の磁性層(3)はCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、第2の磁性層(3)のFeの組成は前記第2の磁性層(3)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下である、第2の磁性層(3)と、

前記第2の磁性層(3)の前記第1の非磁性挿入層(7)とは反対側に隣接して設けられ、第2の金属からなる第2の非磁性挿入層(8)と、

前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第2の磁性層(3)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜面垂直方向である第3の磁性層(4)であって、前記第3の磁性層(4)は少なくともFeを含み、前記第3の磁性層(4)のFeの組成は前記第3の磁性層(4)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以上である、第3の磁性層(4)と、

前記第3の磁性層(4)の前記第2の非磁性挿入層(8)とは反対側に隣接して設けられた第2の非磁性層(5)と、

を、この順に積層して作製する磁気抵抗効果素子の製造方法であって、

前記第1の非磁性挿入層(7)を第1のスputタリングガスを用いて成膜し、

前記第2の非磁性挿入層(8)を第2のスputタリングガスを用いて成膜し、

前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の金属の質量数 M_T の前記第1のスputタリングガスの質量数 M_G に対する比である第1の M_T/M_G 比は、前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第2の金属の質量数 M_T の前記第2のスputタリングガスの質量数 M_G に対する比である第2の M_T/M_G 比より小さい、磁気抵抗効果素子の製造方法。

[請求項19] 前記第1の M_T/M_G 比は2.2以下であり、前記第2の M_T/M_G 比は2.2より大きい、請求項18に記載の磁気抵抗効果素子の製造方法。

[請求項20] Mo、Ta、W又はNbからなる前記第1の非磁性挿入層(7)を、Xe又はKrを用いてスputタ法により成膜し、

Mo、Ta、W又はNbからなる前記第2の非磁性挿入層(8)を

、A rを用いてスパッタ法により成膜する、請求項18に記載の磁気抵抗効果素子の製造方法。

[請求項21] 前記第1の非磁性挿入層(7)の前記第1の磁性層(2)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜内垂直方向である第4の磁性層(3a)と、

前記第4の磁性層(3a)の前記第1の非磁性挿入層(7)とは反対側に隣接して設けられる非磁性結合層(6)と、

前記非磁性結合層(6)の前記第4の磁性層(3a)とは反対側に隣接して設けられ、かつ、前記第2の非磁性挿入層(8)の前記第3の磁性層(4)とは反対側に隣接して設けられ、磁化方向が膜内垂直方向である第5の磁性層(3b)と、

からなる前記第2の磁性層(3)を、この順に積層して作製し、

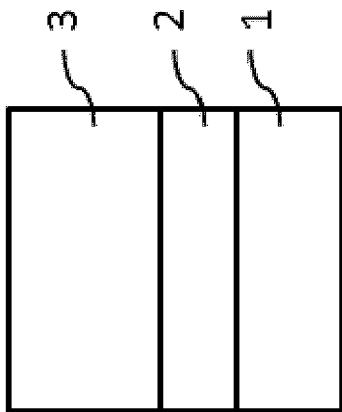
前記第4及び第5の磁性層(3a、3b)はそれぞれCo、Fe、Ni、Mn等の3d強磁性遷移金属元素を少なくとも1つ含み、前記第4の磁性層(3a)のFeの組成は前記第4の磁性層(3a)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、前記第5の磁性層(3b)のFeの組成は前記第5の磁性層(3b)の磁性元素の原子分率の総和に対して50at%以下であり、

前記非磁性結合層(6)は、V、Ti、Cr、Zr、Nb、Mo、Hf、Ta、W、Si、Al、B、Pd、Pt等の非磁性元素を少なくとも1つ含む、請求項18に記載の磁気抵抗効果素子の製造方法。

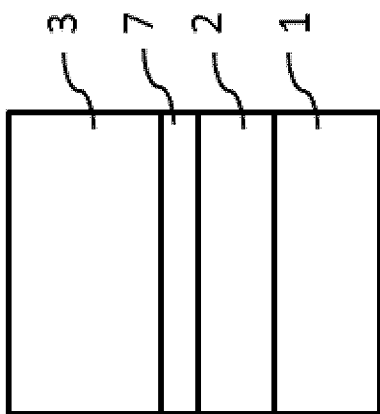
[請求項22] Mo、Ta、W又はNbからなる前記第1の非磁性挿入層(7)を、Xe又はKrを用いてスパッタ法により成膜し、

Mo、Ta、W又はNbからなる前記第2の非磁性挿入層(8)を、A rを用いてスパッタ法により成膜する、請求項21に記載の磁気抵抗効果素子の製造方法。

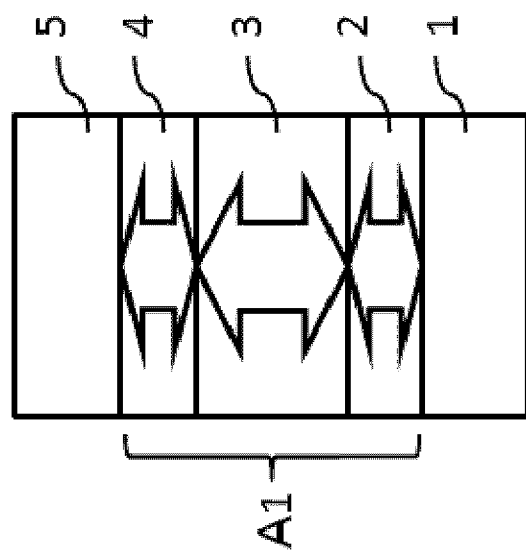
[図1]



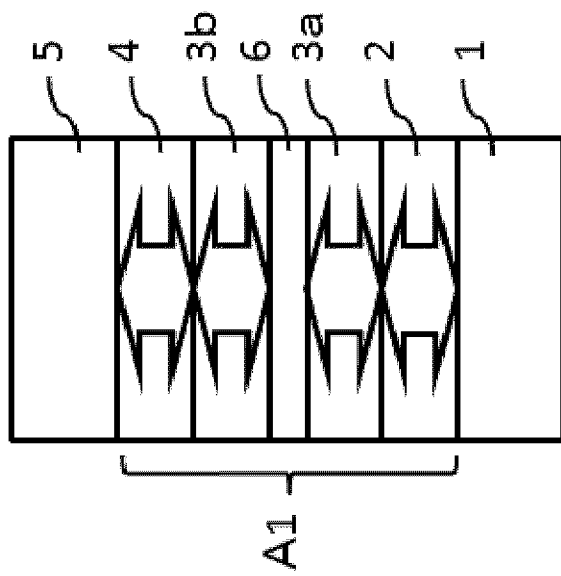
[図2]



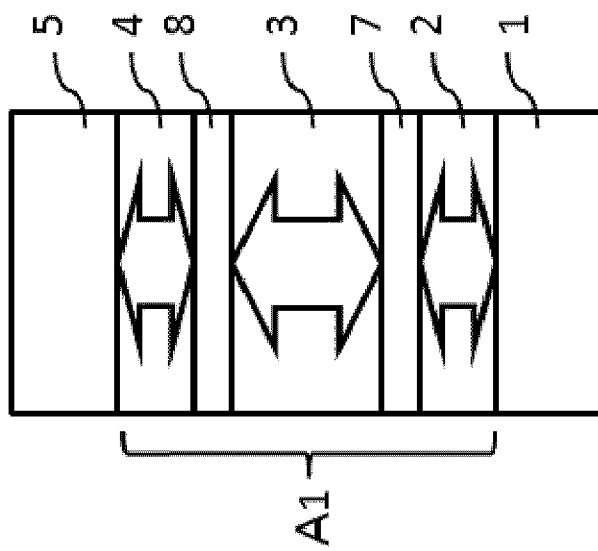
[図3]



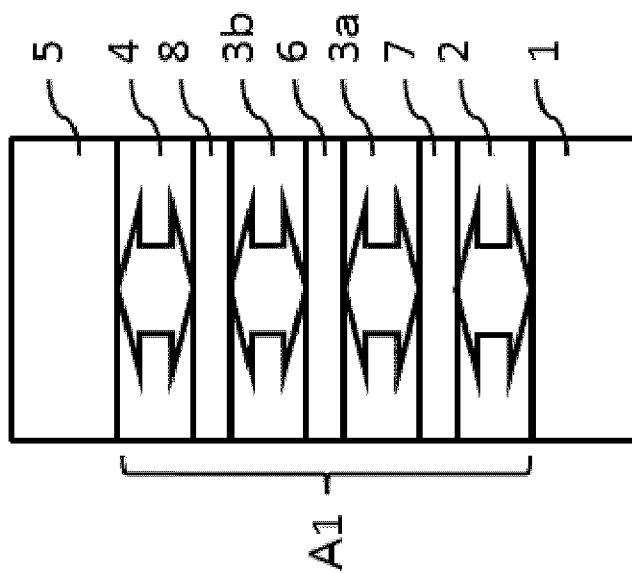
[図4]



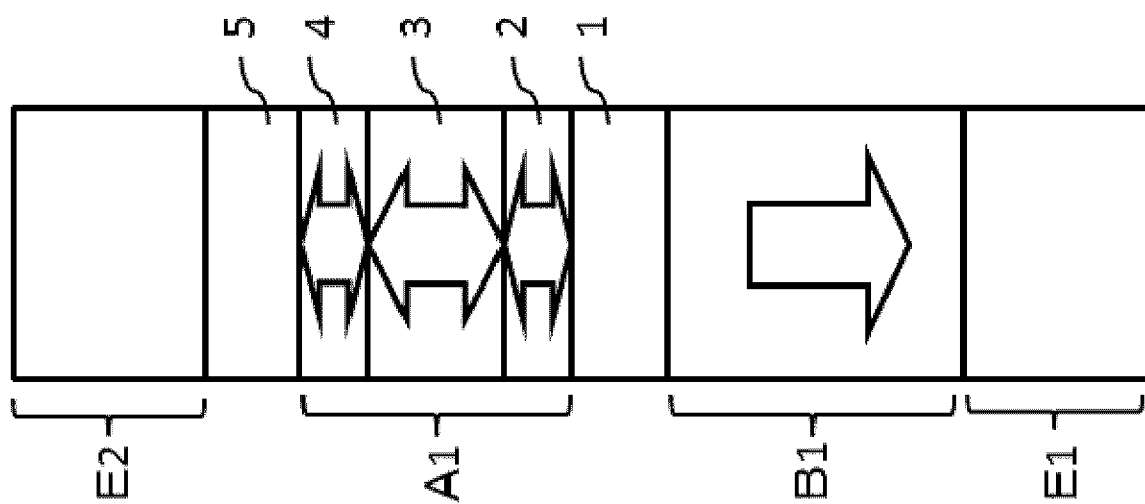
[図5]



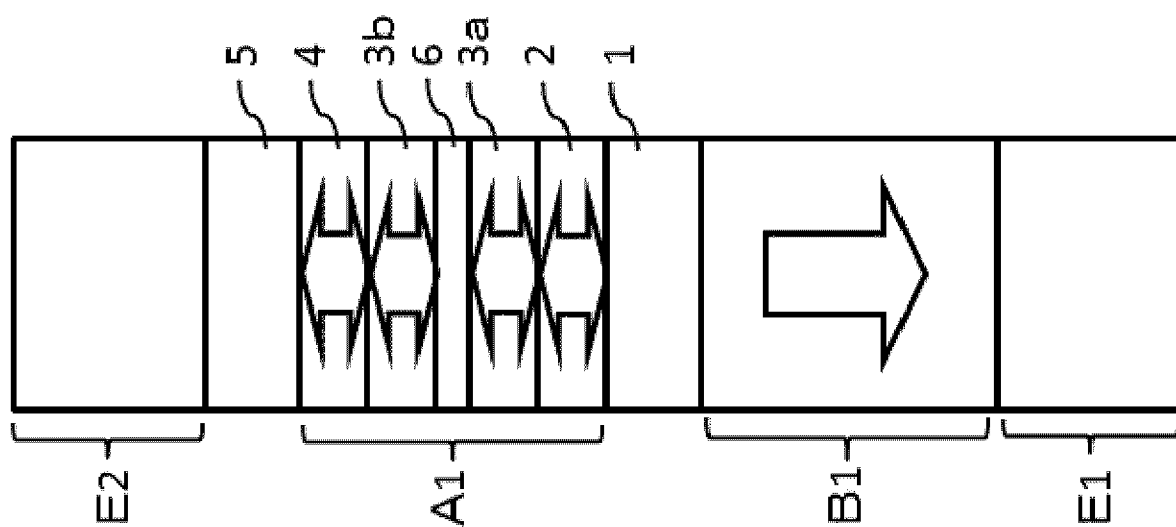
[図6]



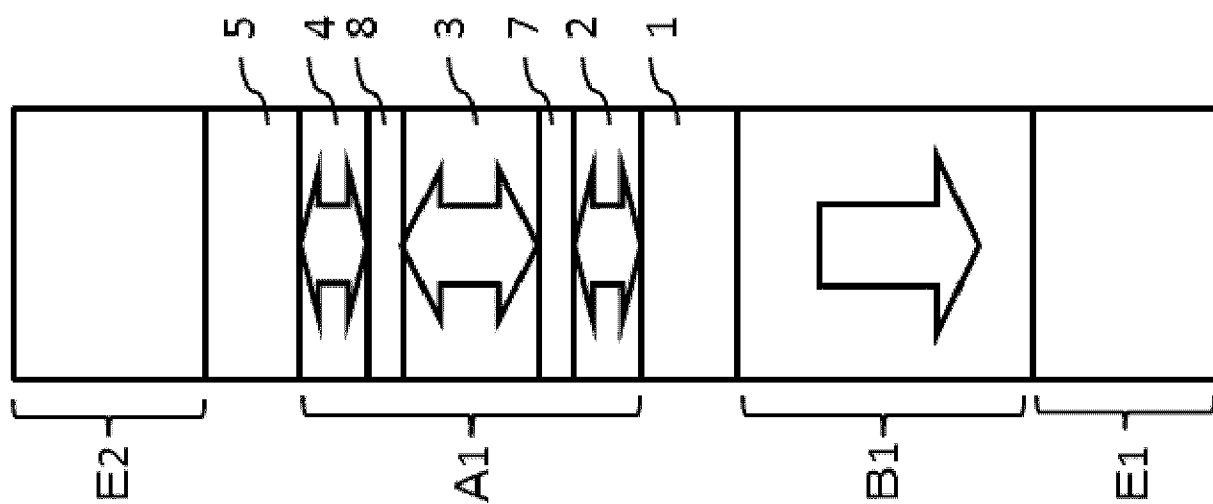
[図7]



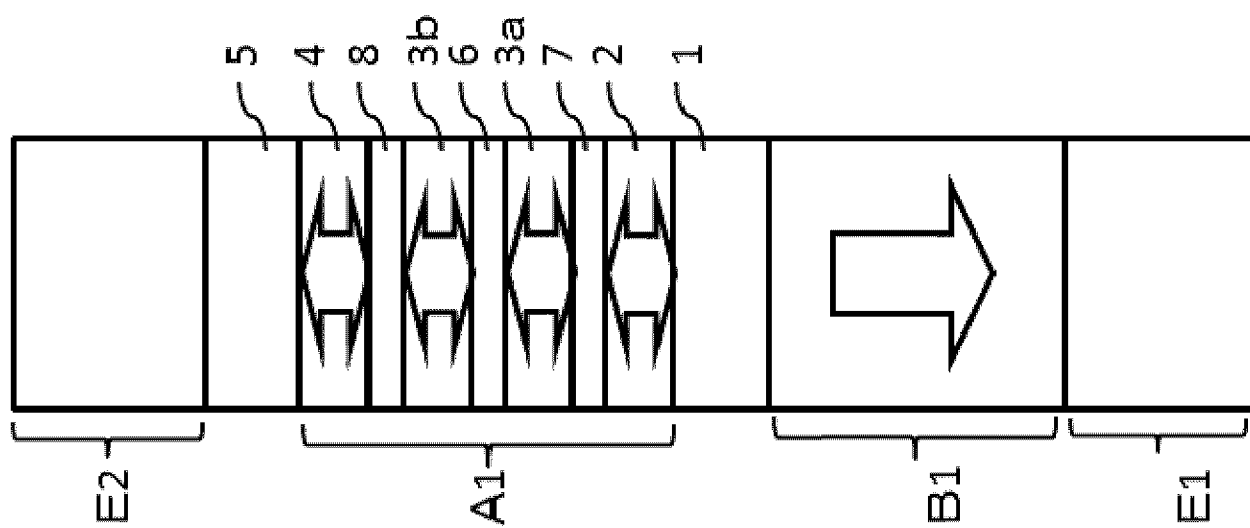
[図8]



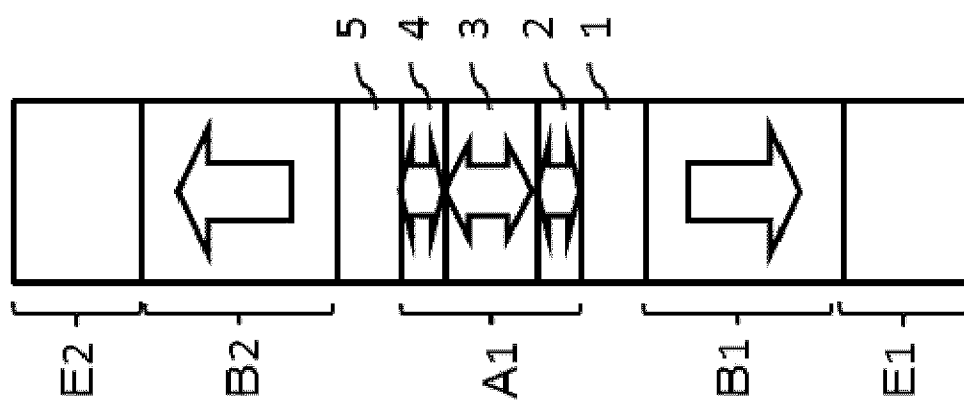
[図9]



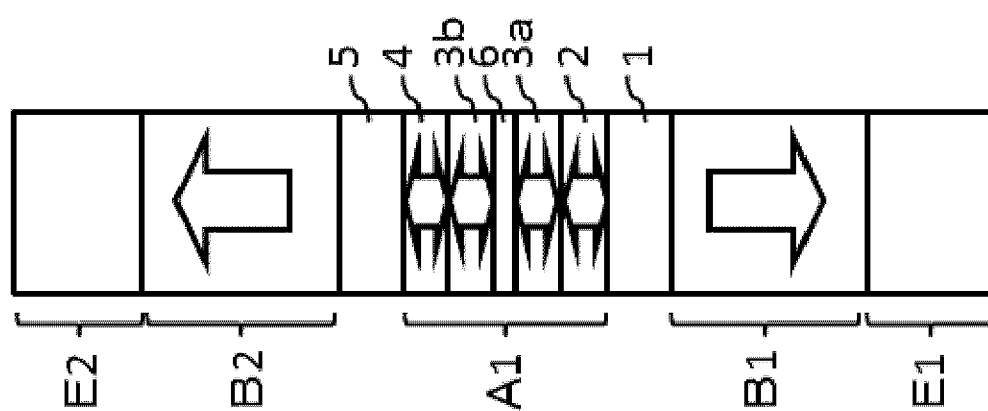
[図10]



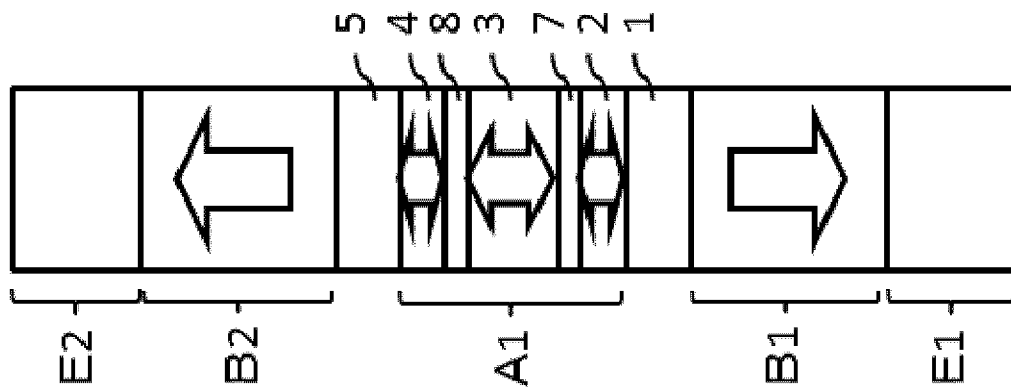
[図11]



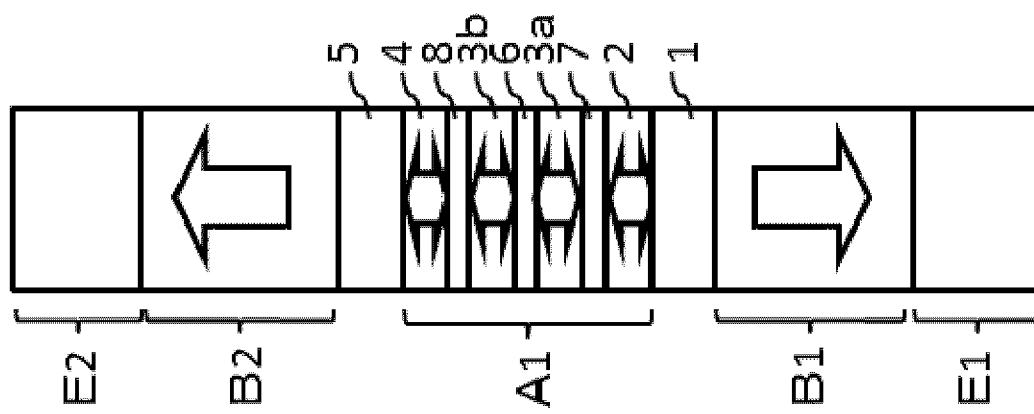
[図12]



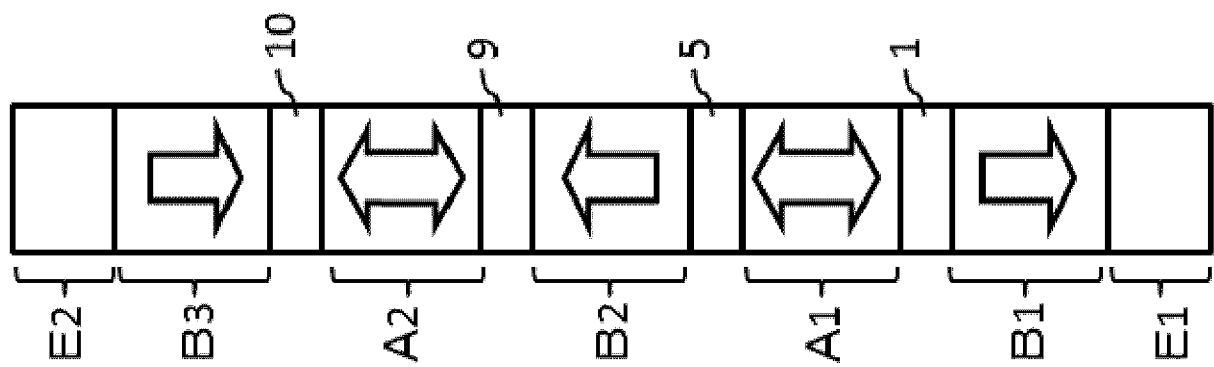
[図13]



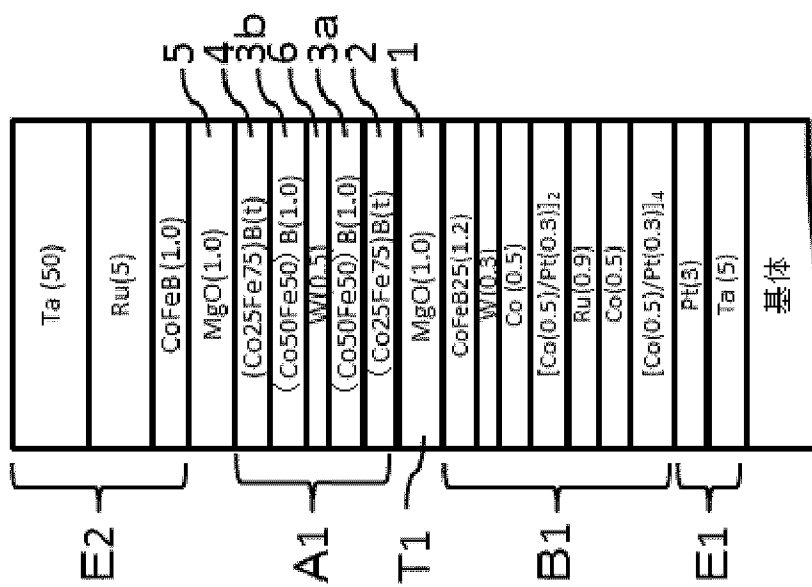
[図14]



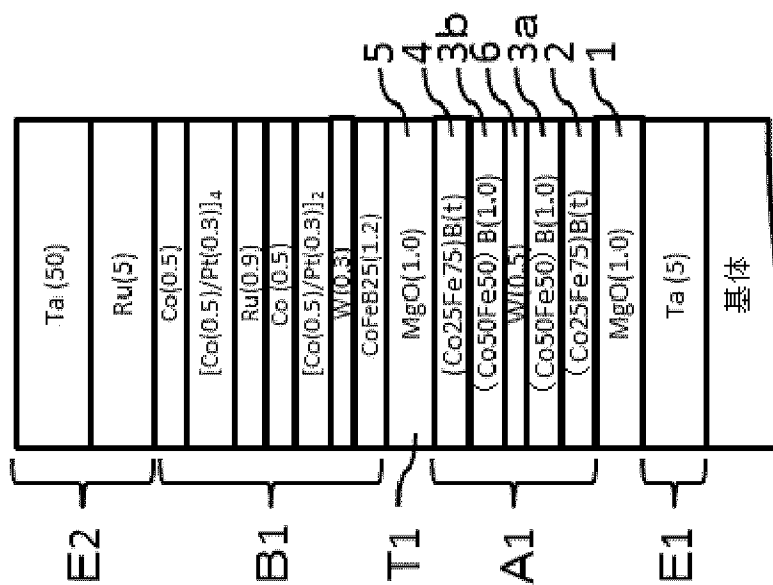
[図15]



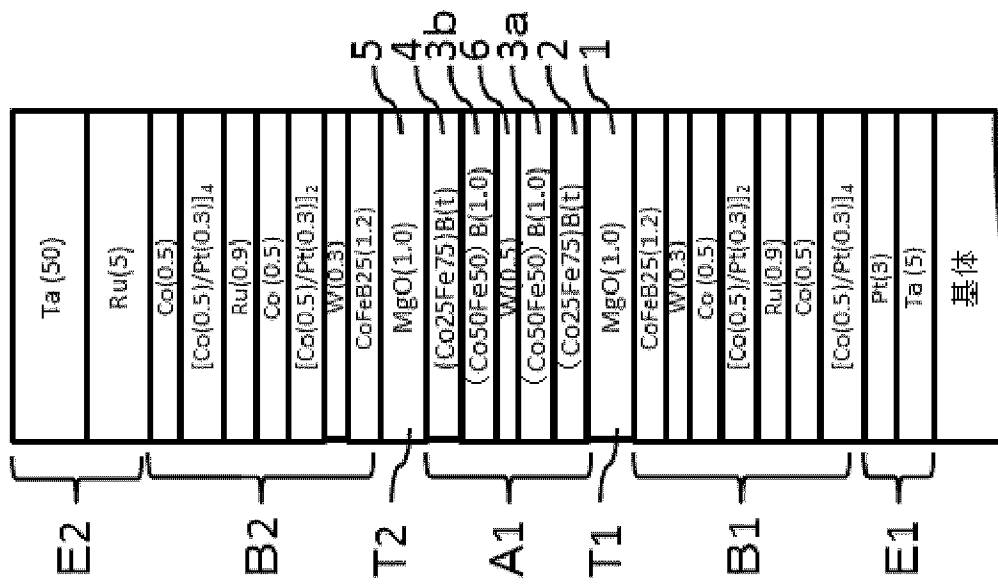
[図16]



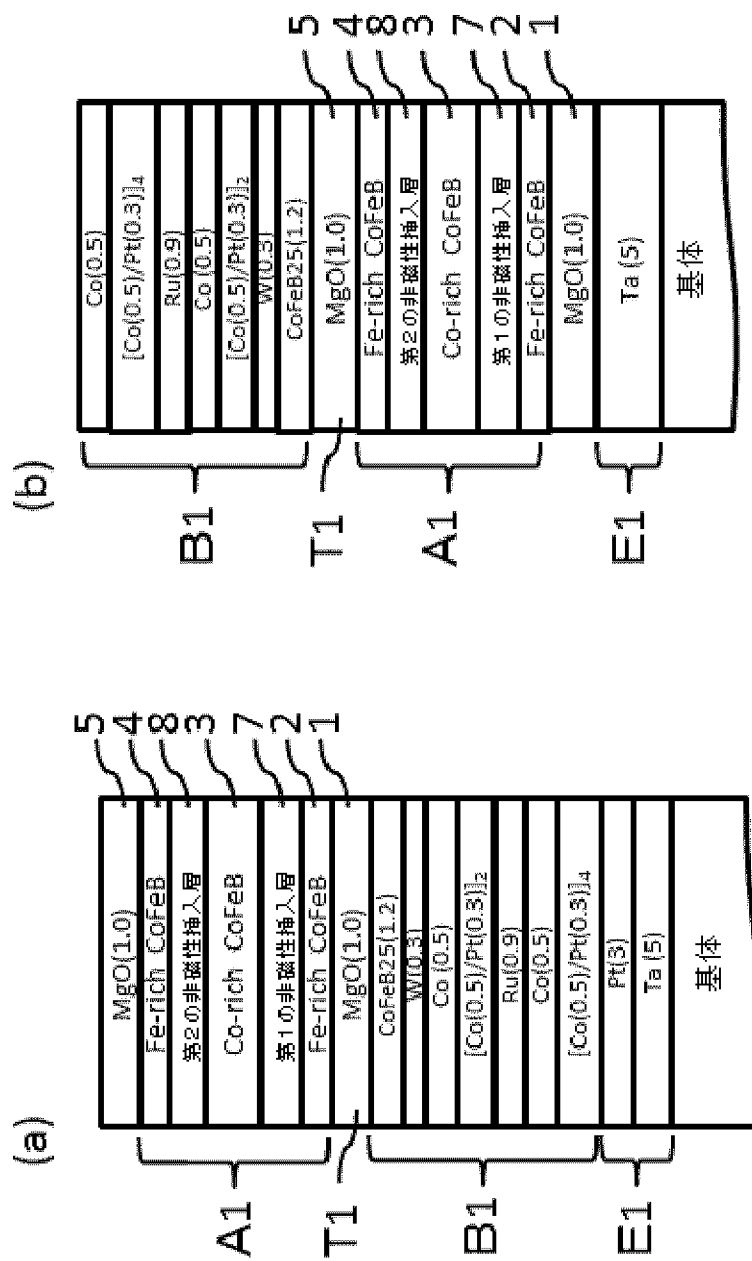
[図17]



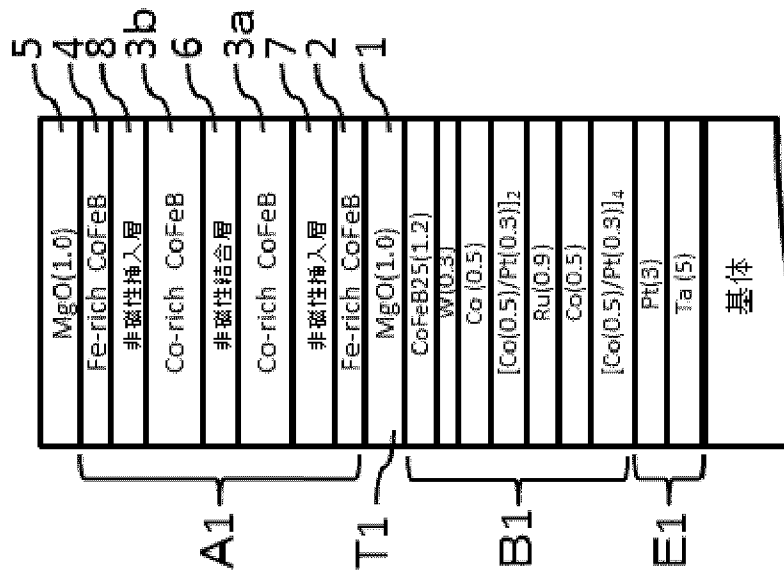
[図18]



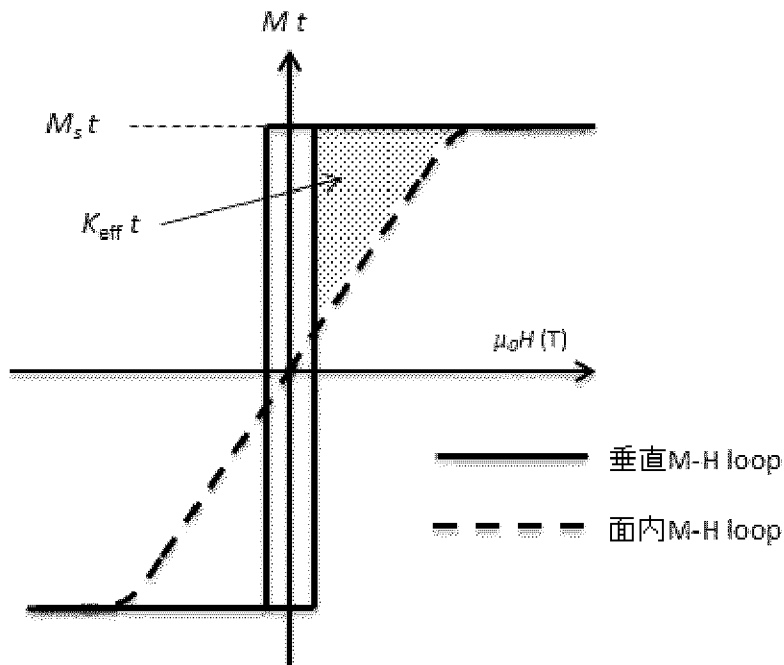
[図19]



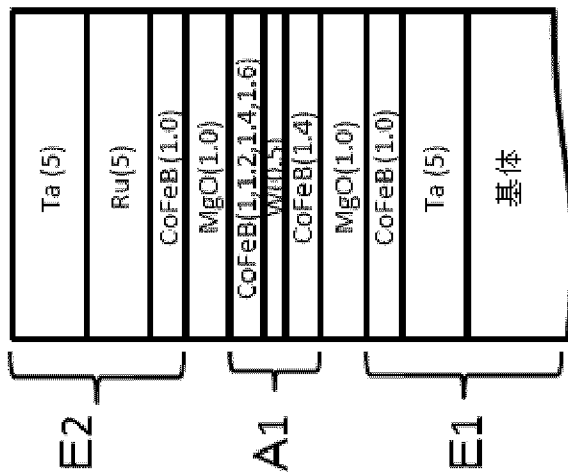
[図20]



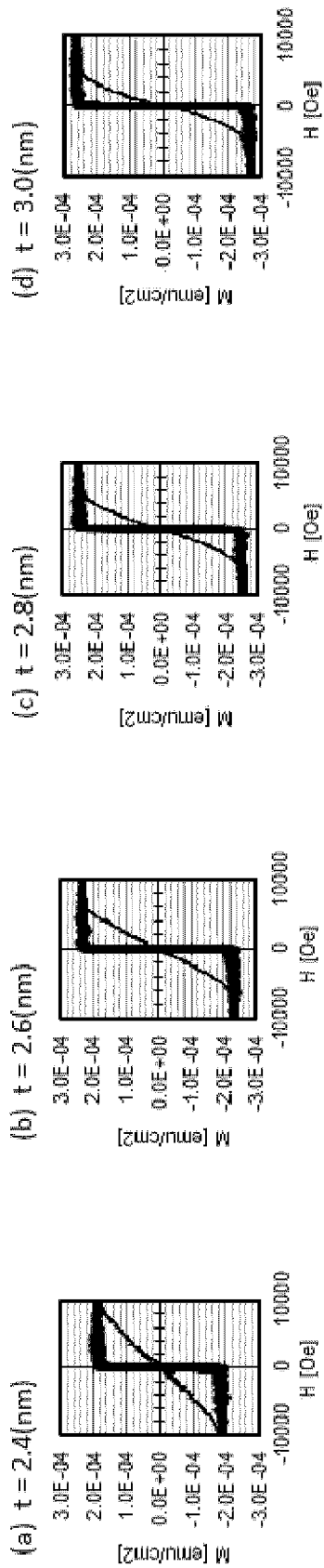
[図21]



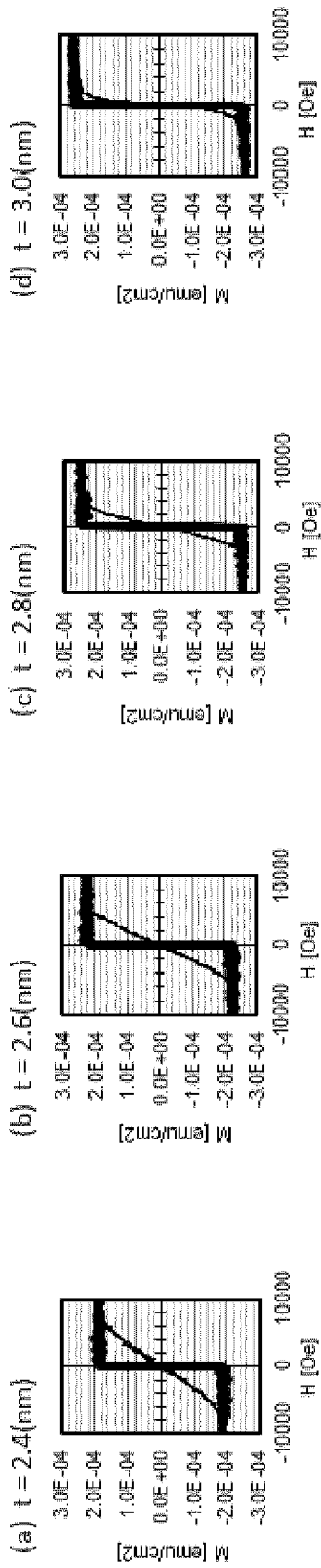
[図22]

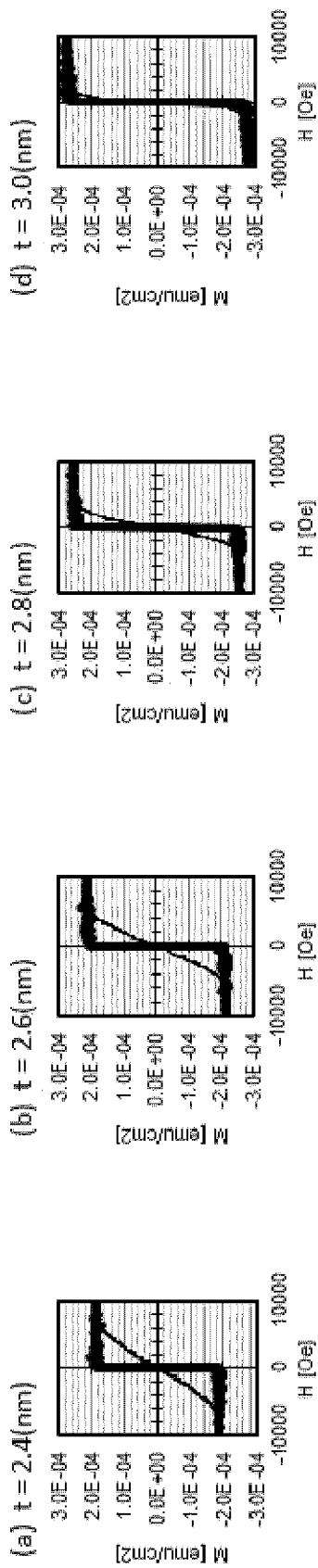


[図23A]

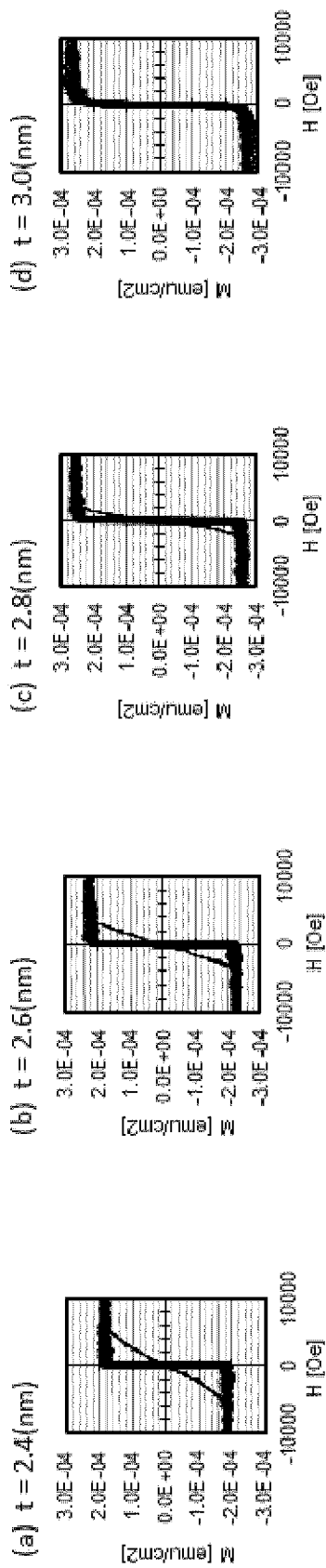


[図23B]

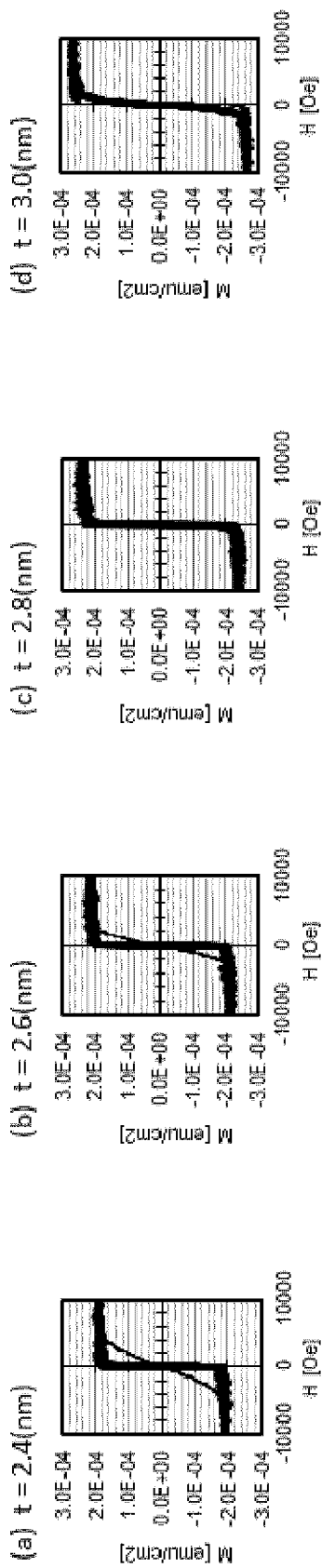


[ 23C]

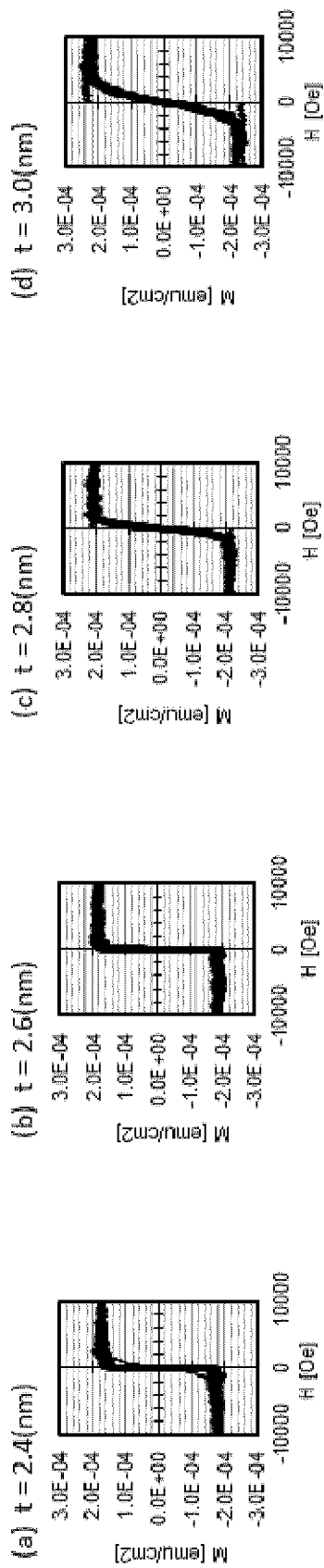
[図23D]

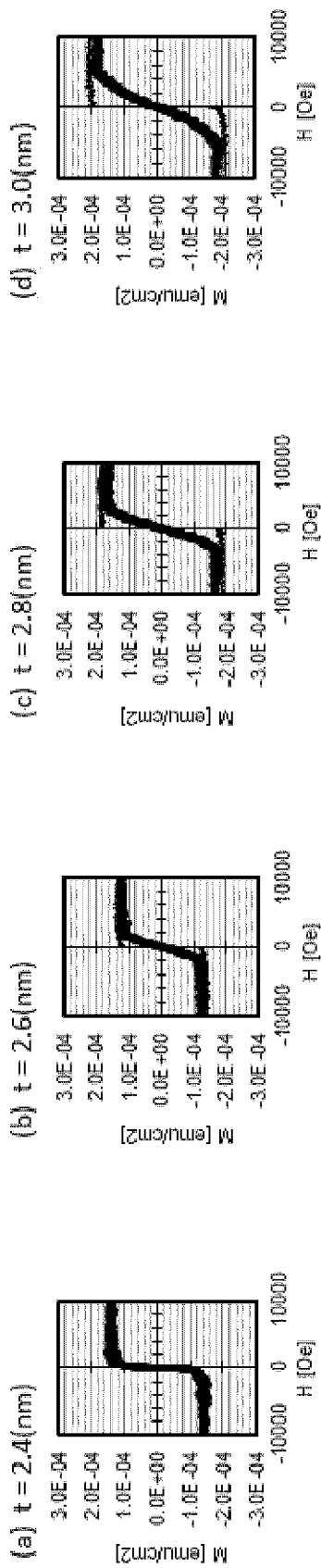


[図23E]

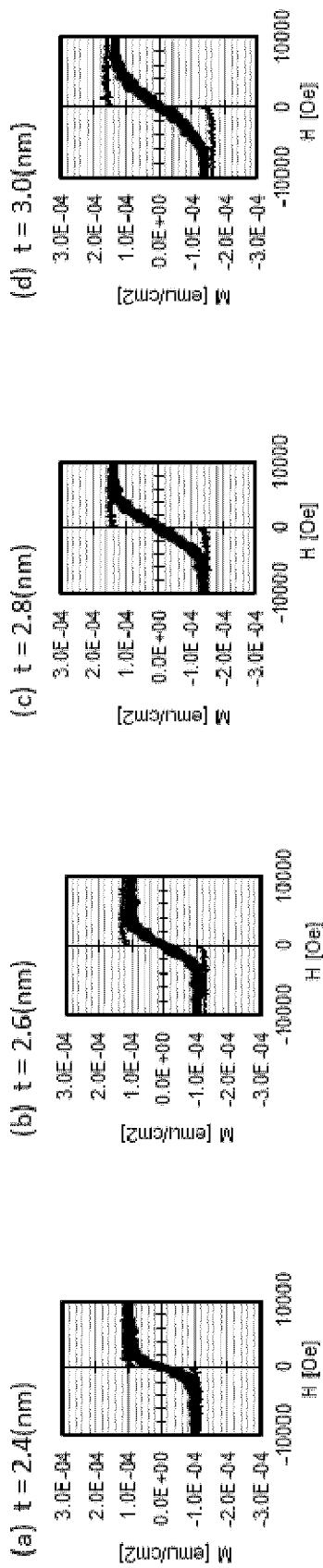


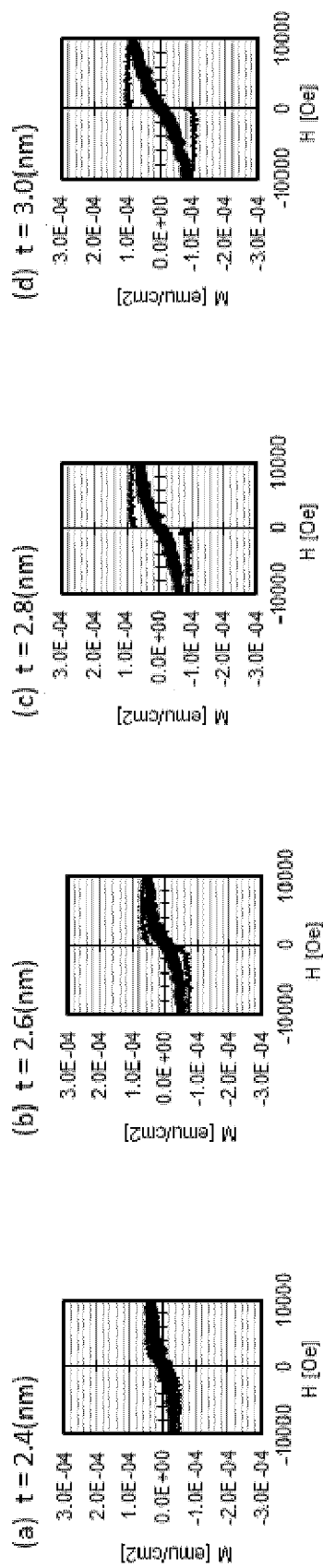
[図23F]



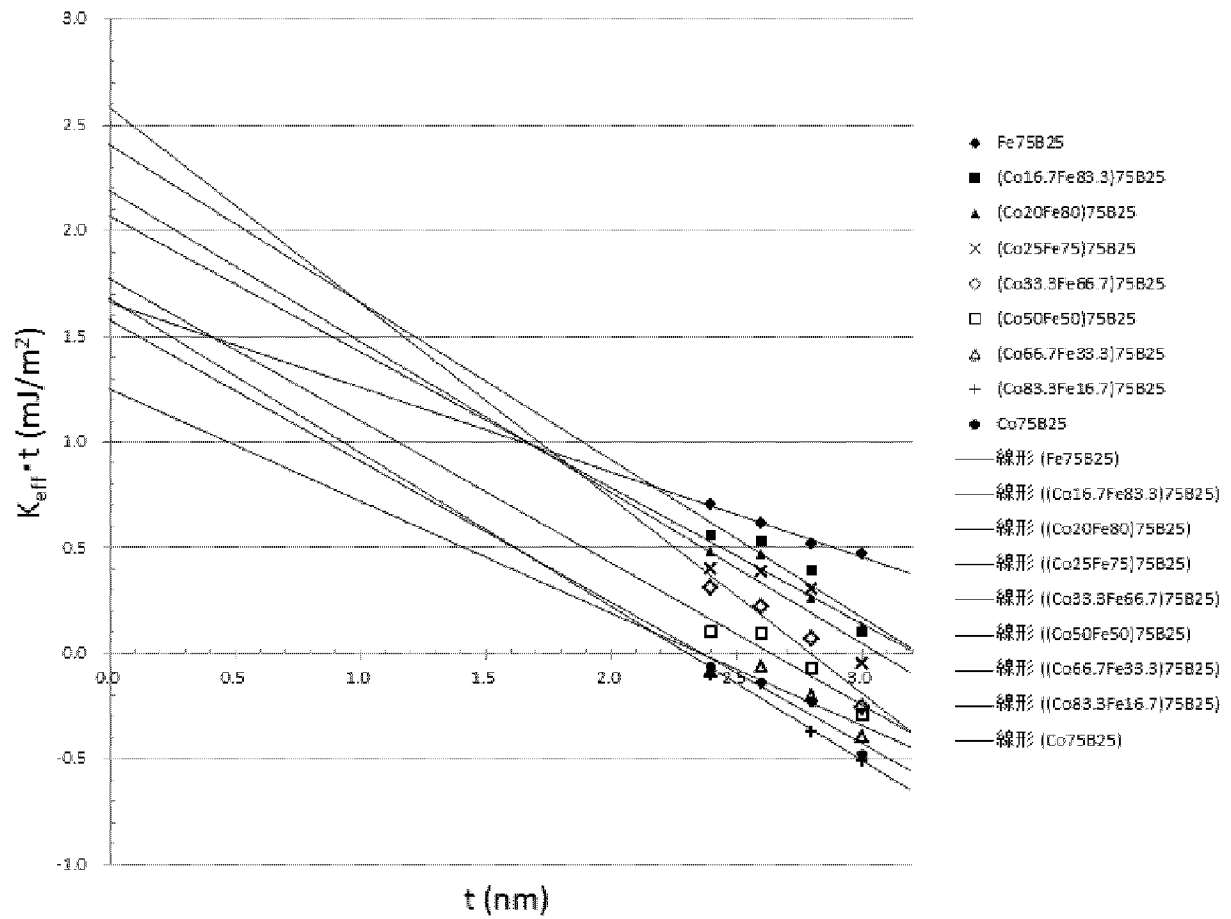
[ 23G]

[図23H]

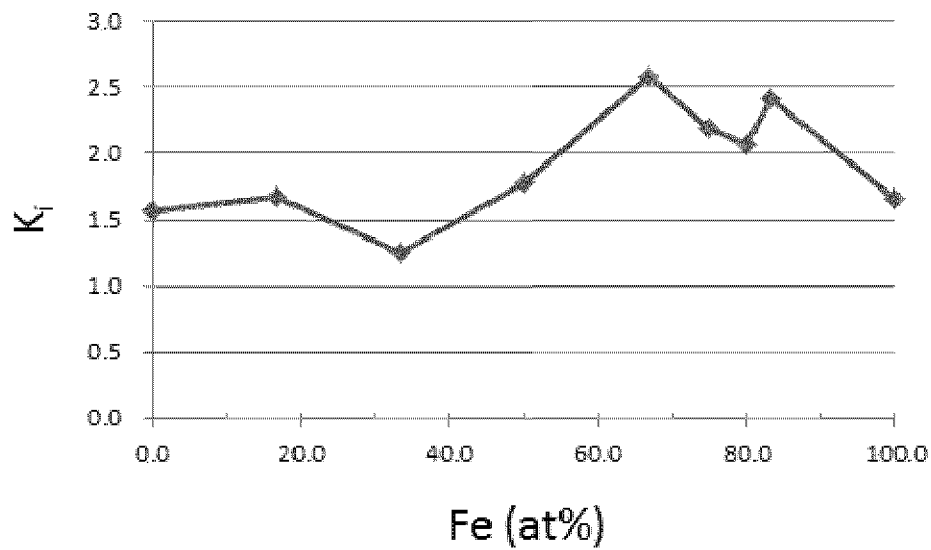


[23I]

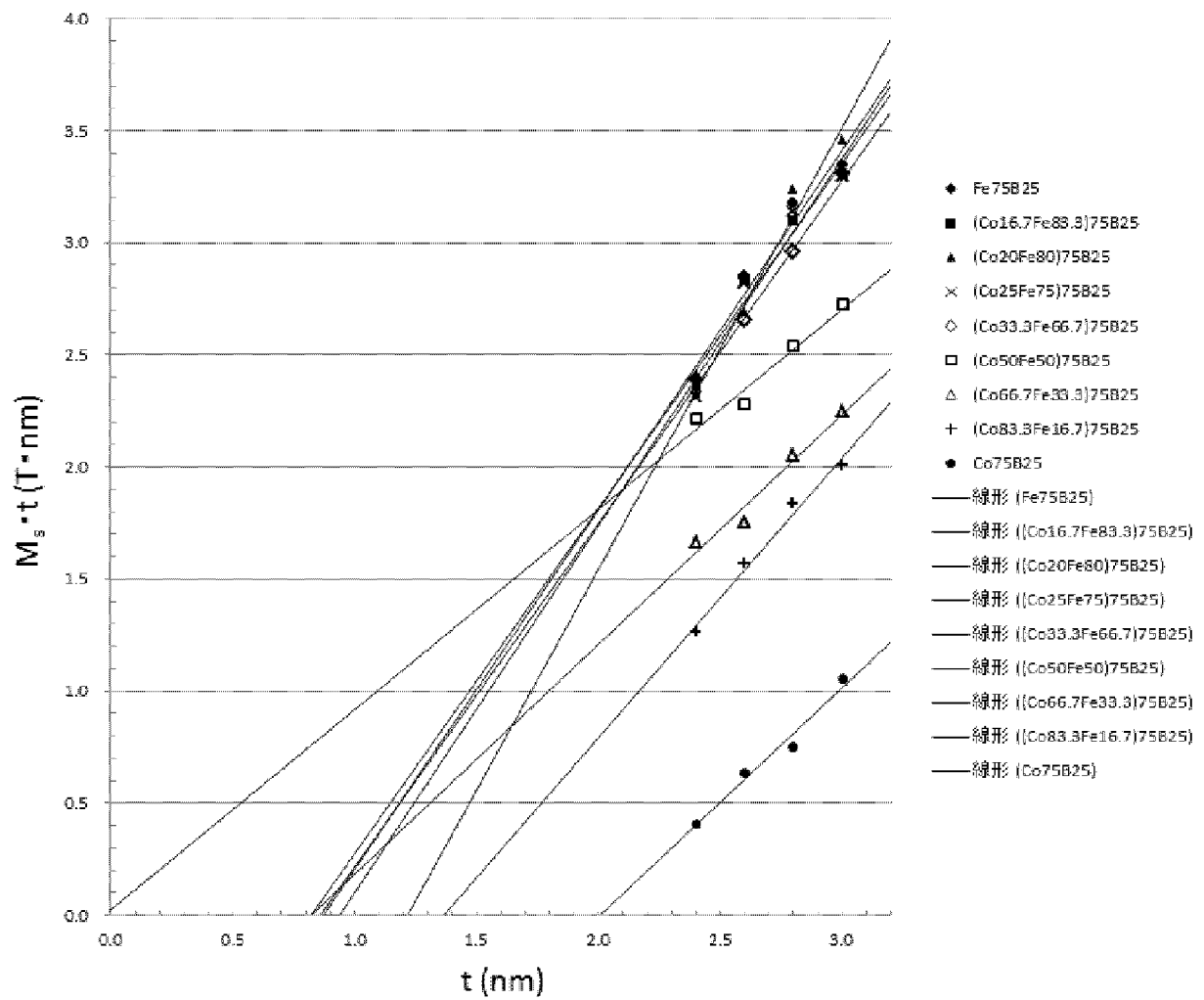
[図24]



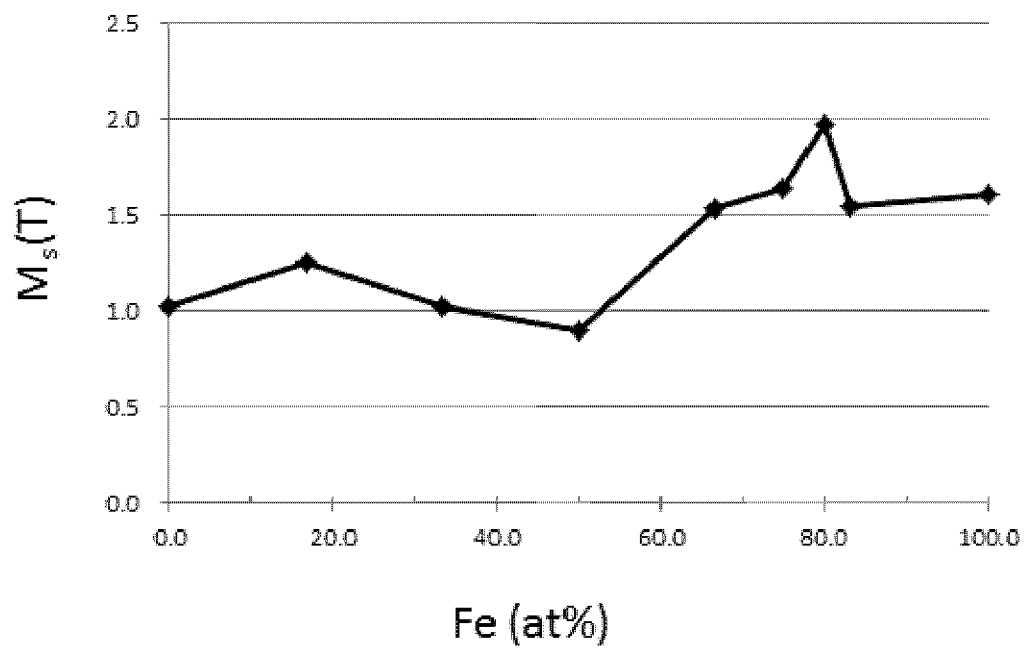
[図25]



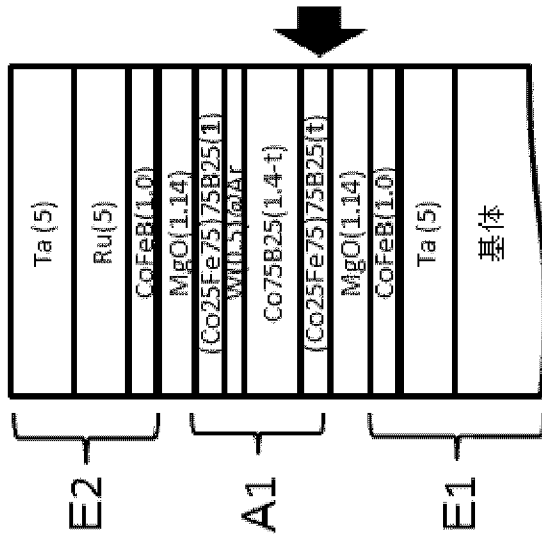
[図26]



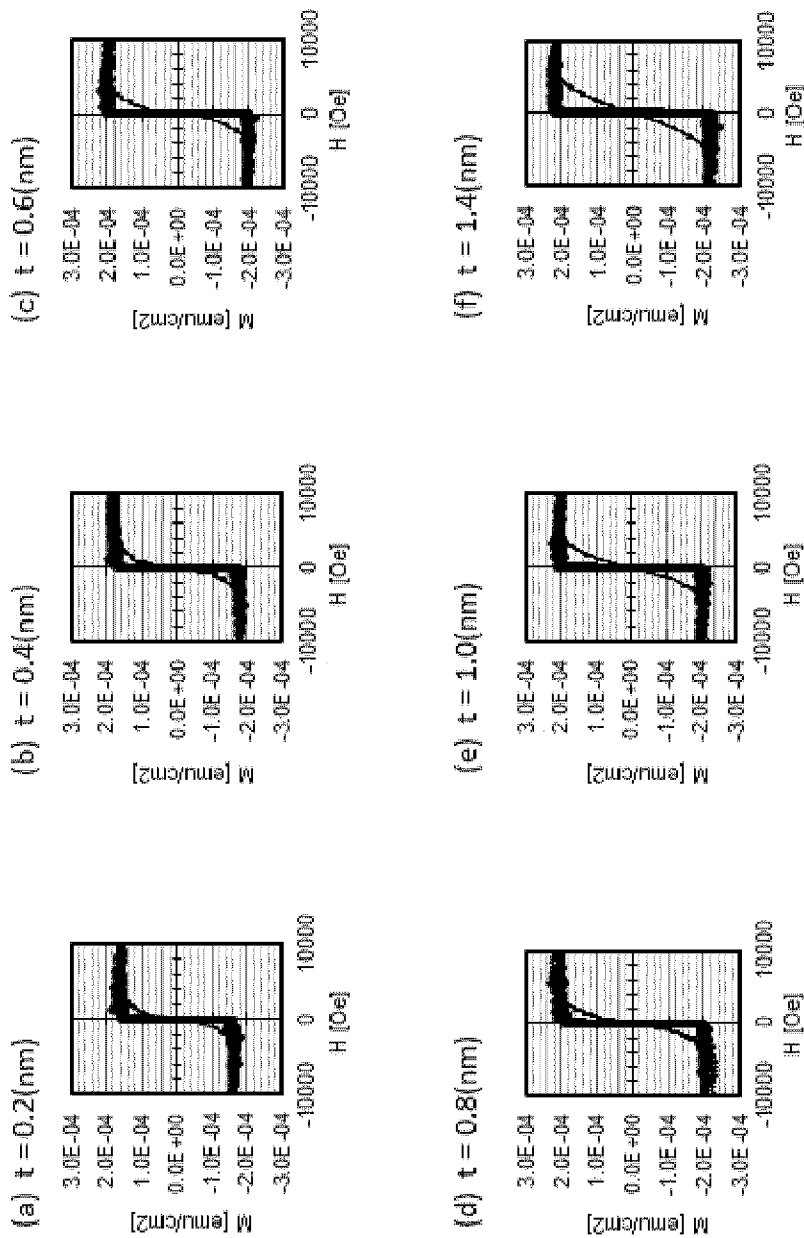
[図27]



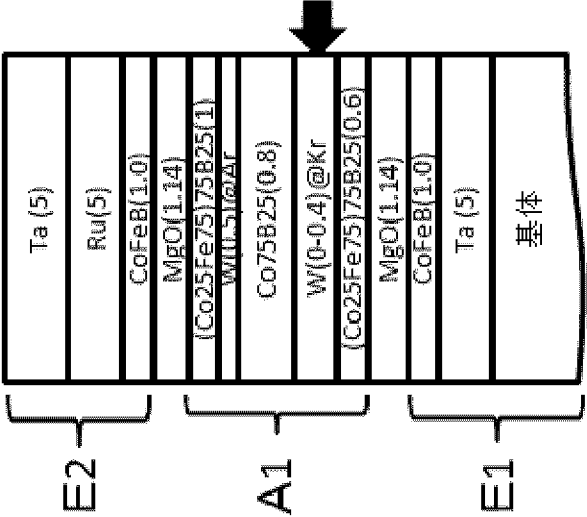
[図28]



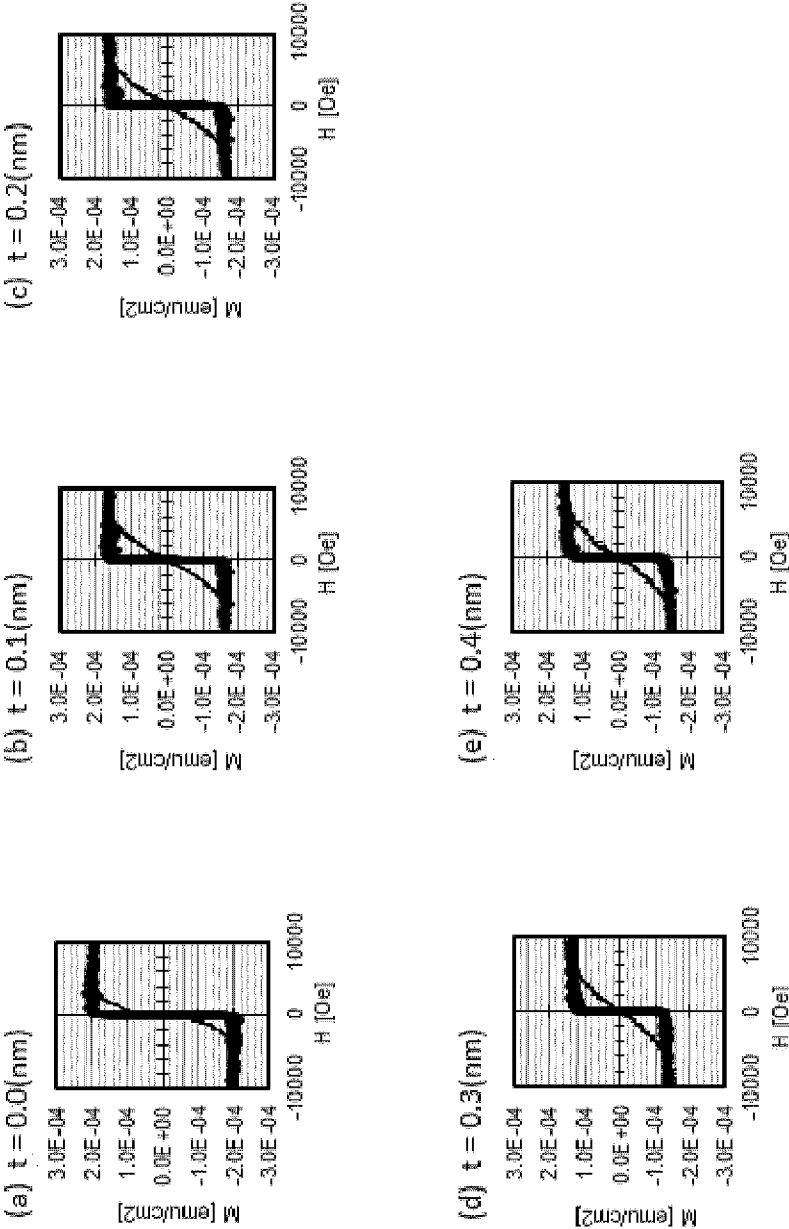
[図29]



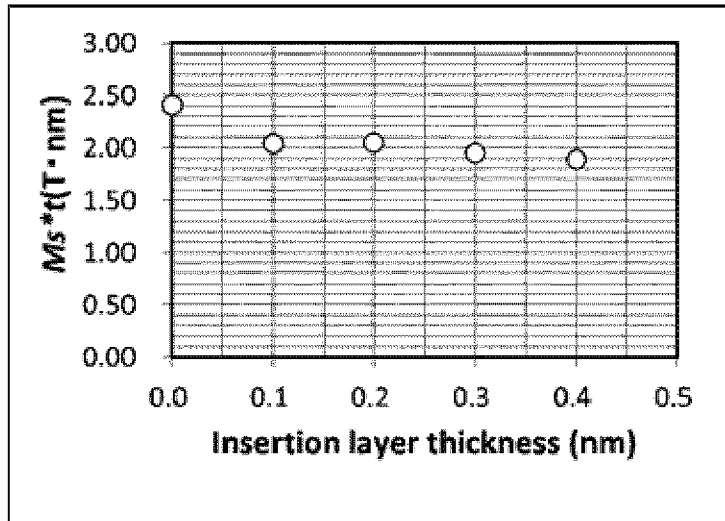
[図30]



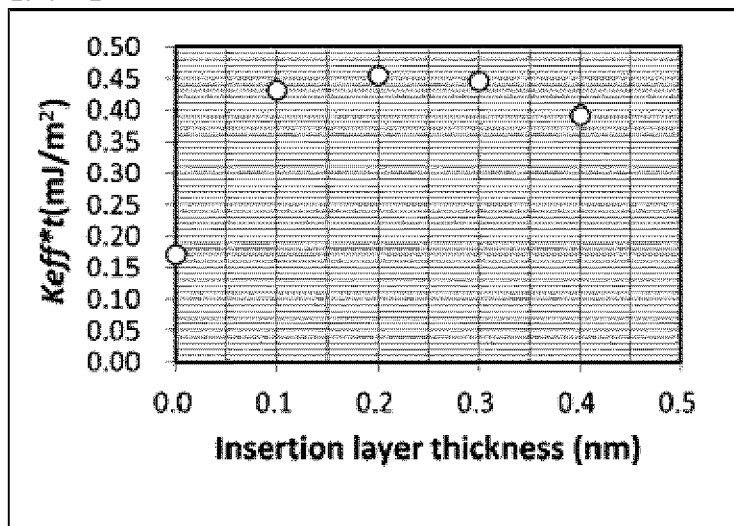
[図31]



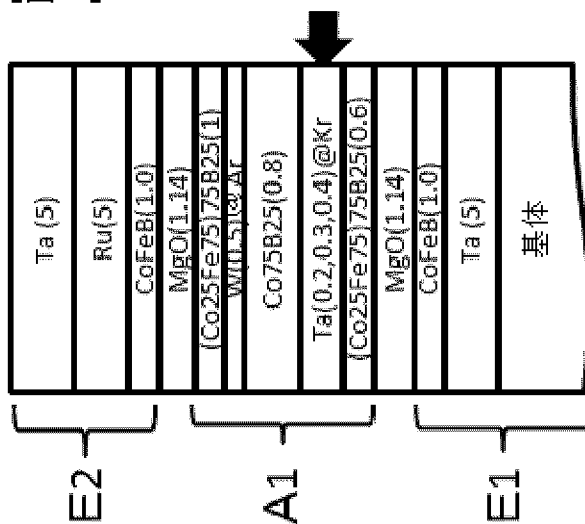
[図32]



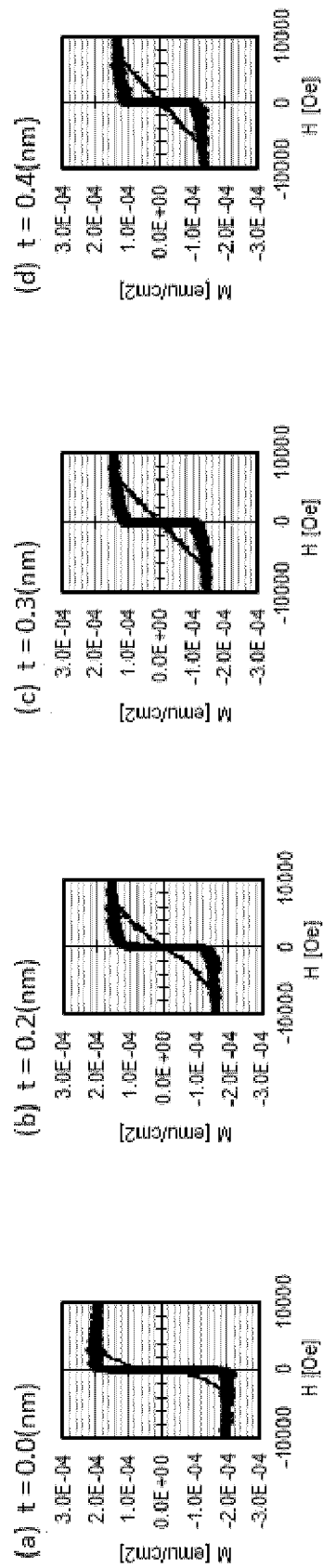
[図33]



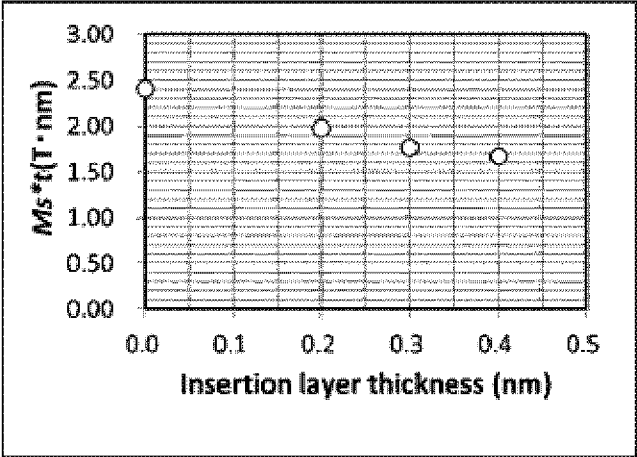
[図34]



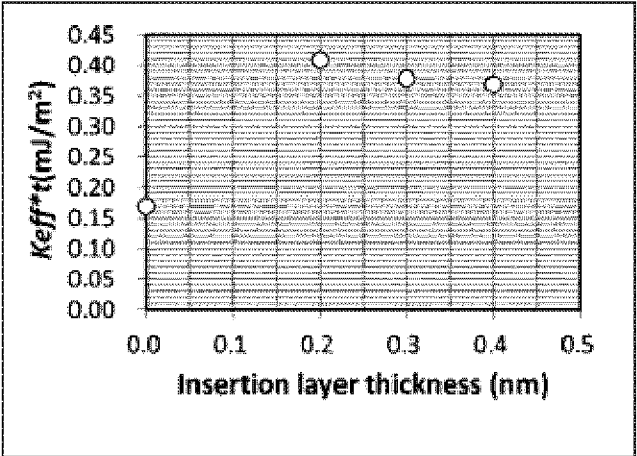
[図35]



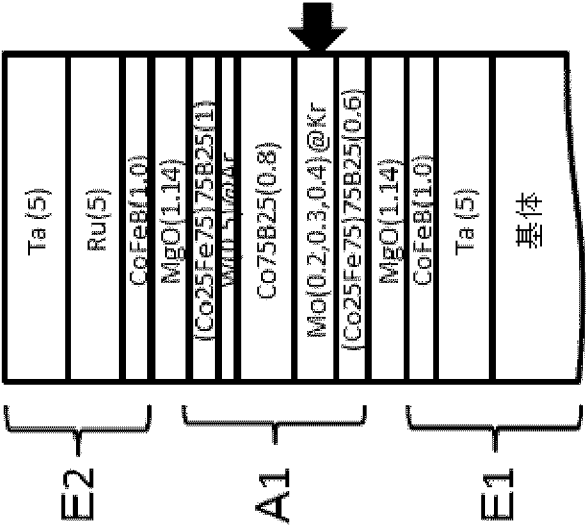
[図36]



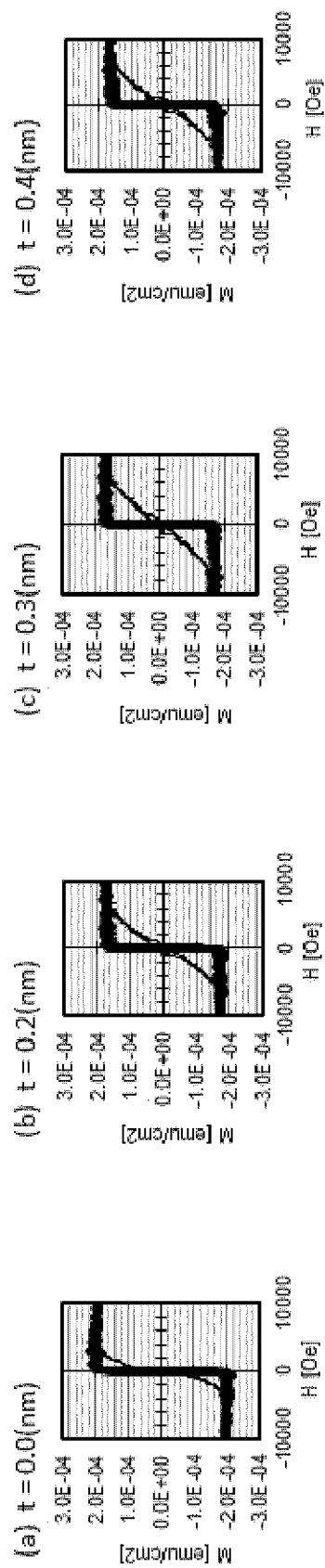
[図37]



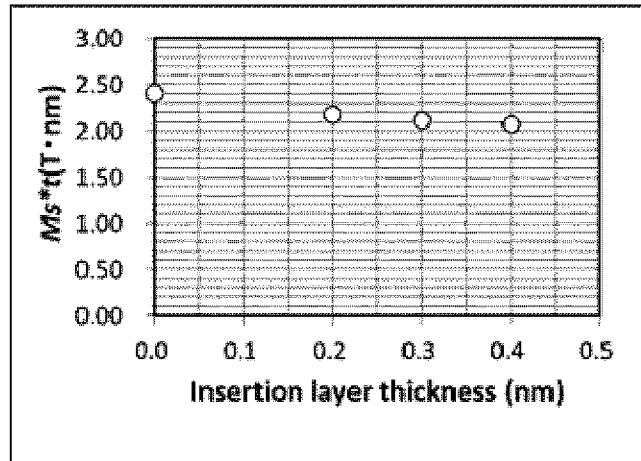
[図38]



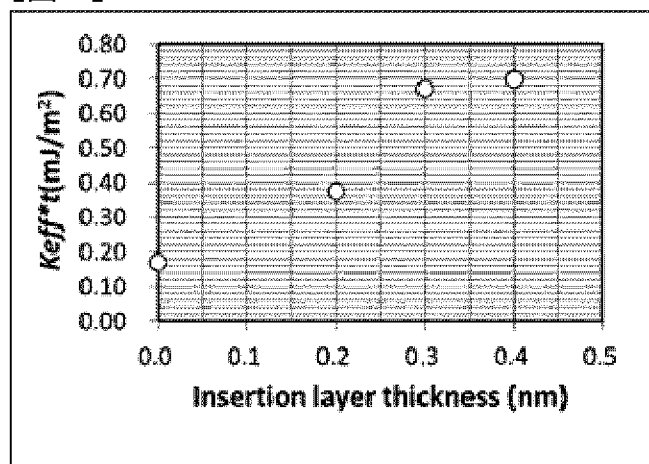
[図39]



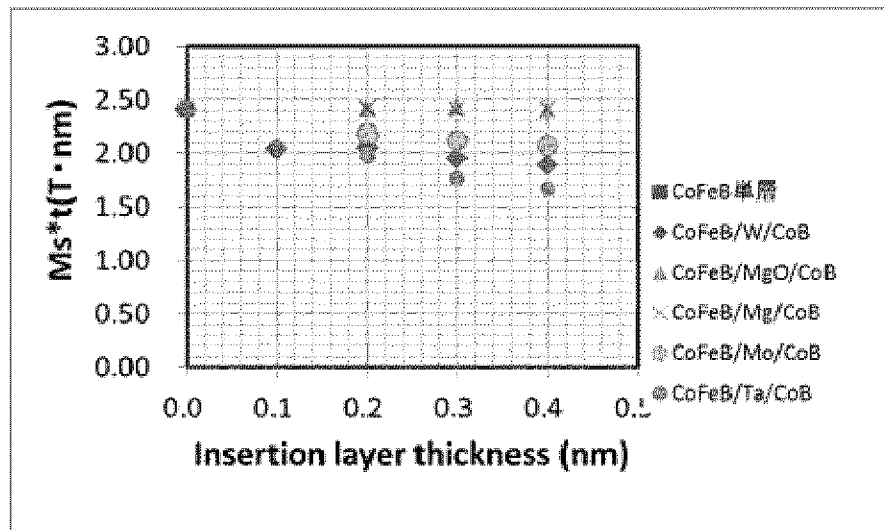
[図40]



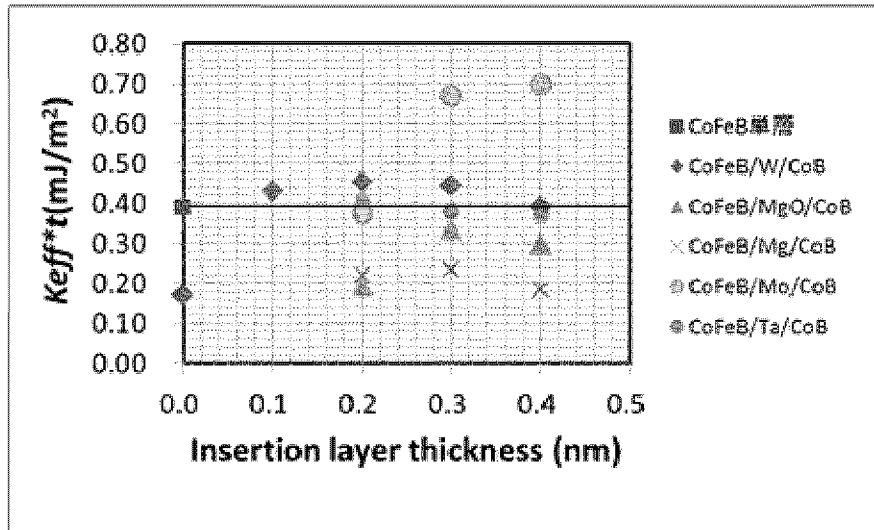
[図41]



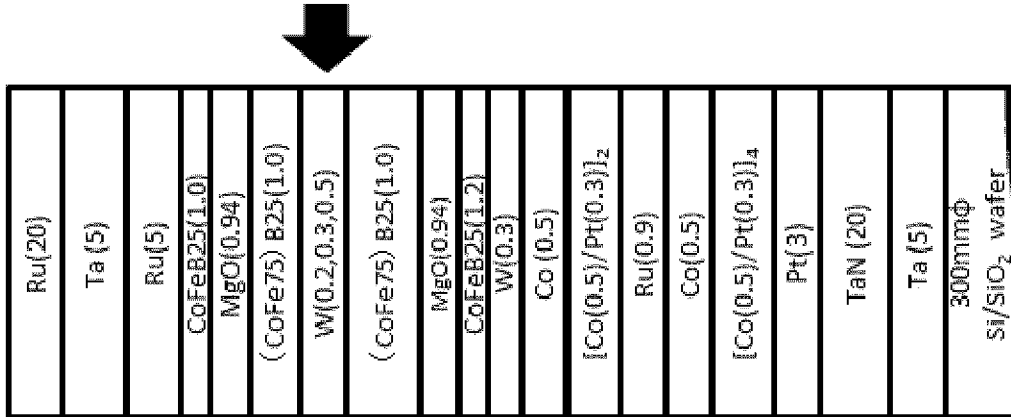
[図42]



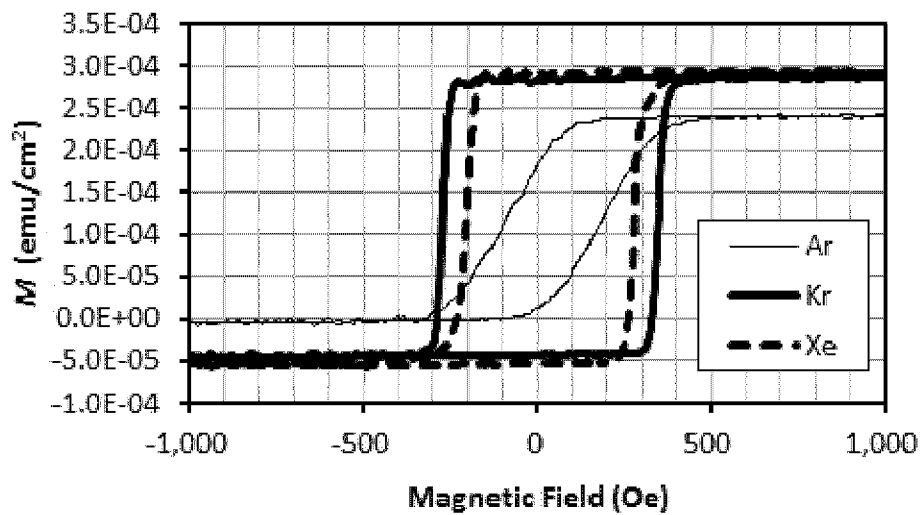
[圖43]



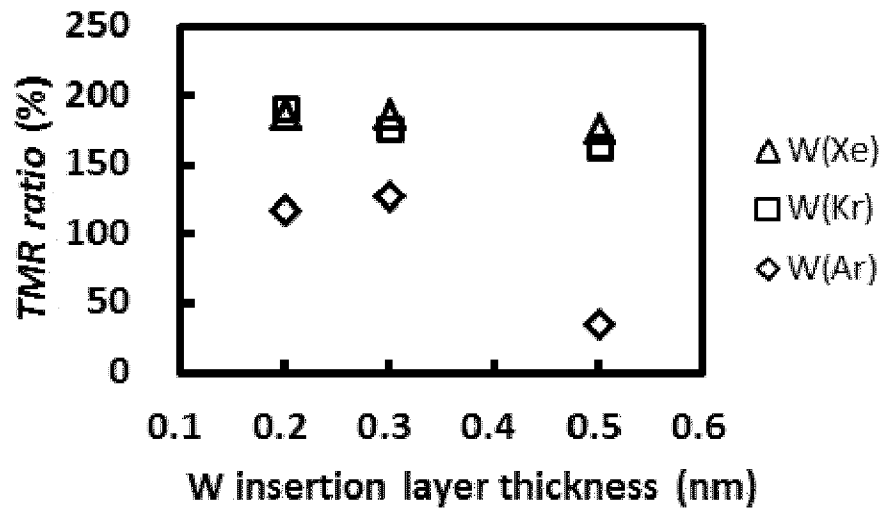
[圖44]



[圖45]



[図46]

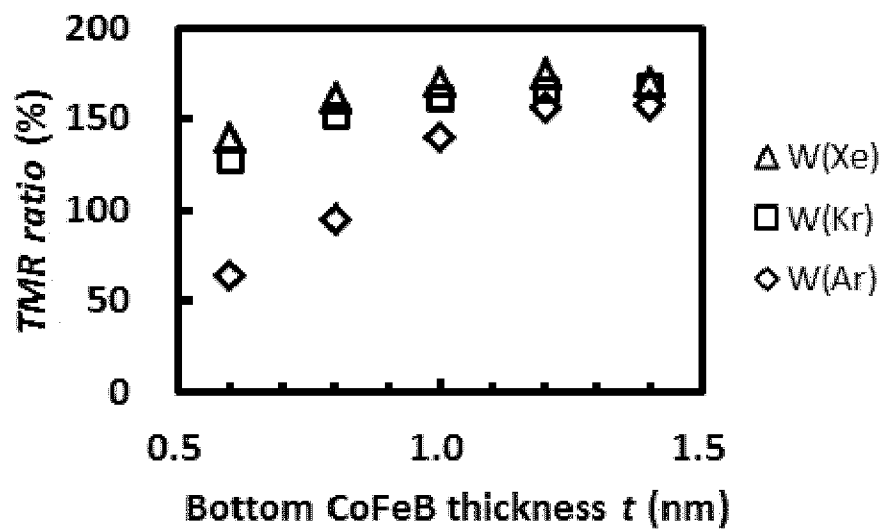


[図47]

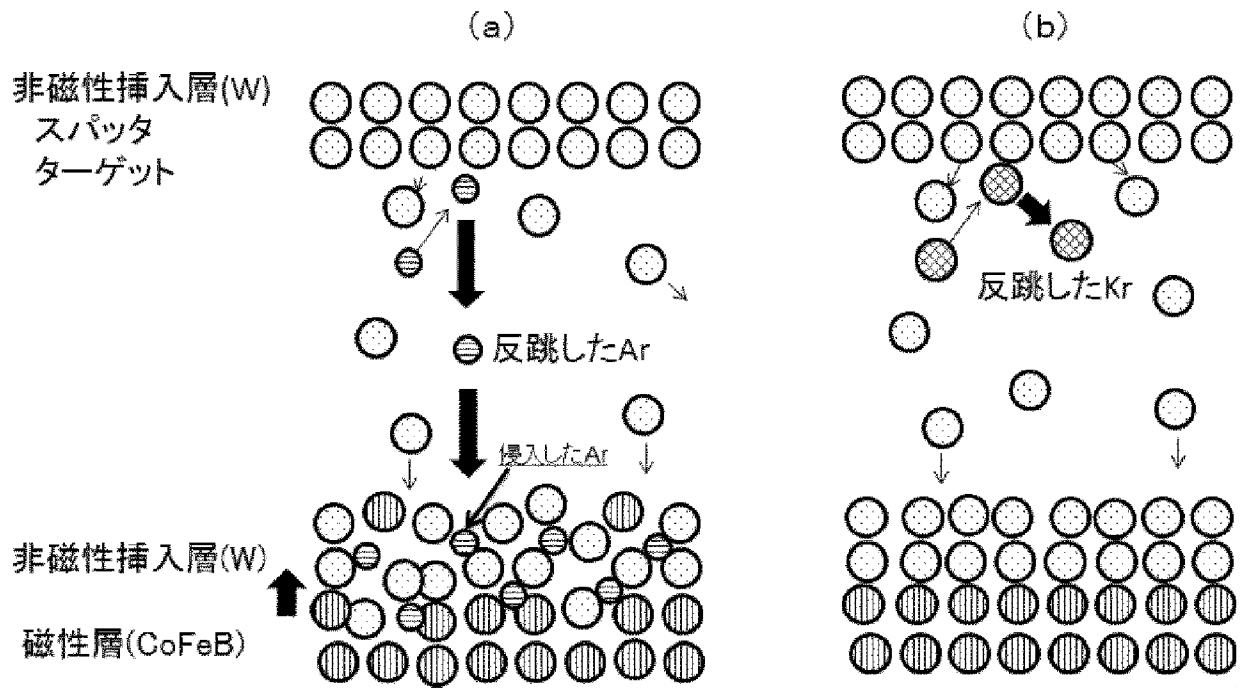


Ru(20)
Ta (5)
Ru(5)
CoFeB25(1.0)
MgO(1.14)
(CoFe75) B25(1.0)
W(0.3)
(CoFe75) B25(t)
MgO(1.14)
CoFeB25(1.2)
W(0.3)
Co (0.5)
[Co(0.5)/Pt(0.3)] ₂
Ru(0.9)
Co(0.5)
[Co(0.5)/Pt(0.3)] ₄
Pt(3)
TaN (20)
Ru(20)
Ta (5)
300mmφ Si/SiO ₂ wafer

[図48]



[図49]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/001617

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L21/8246(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01L21/8246, H01L27/105

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho	1922-1996	Jitsuyo Shinan Toroku Koho	1996-2017
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2017	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2017

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2013-16560 A (Toshiba Corp.), 24 January 2013 (24.01.2013), paragraphs [0019] to [0027], [0085] to [0087], [0101], [0120]; fig. 3 & US 2013/0001714 A1 paragraphs [0026] to [0036], [0108] to [0111], [0129], [0151]; fig. 3 & CN 102856489 A	1-22
A	JP 2015-176933 A (Toshiba Corp., Tohoku University), 05 October 2015 (05.10.2015), entire text; all drawings & US 2016/0380185 A1 entire text; all drawings & WO 2015/137021 A1	1-22

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C. ☐ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&" document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search
03 March 2017 (03.03.17)

Date of mailing of the international search report
14 March 2017 (14.03.17)

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2017/001617

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	JP 2015-176931 A (Toshiba Corp.), 05 October 2015 (05.10.2015), entire text; all drawings & US 2016/0380184 A1 entire text; all drawings & WO 2015/137234 A1	1-22
A	JP 2015-88520 A (Sony Corp.), 07 May 2015 (07.05.2015), entire text; all drawings & US 2016/0268496 A1 entire text; all drawings & WO 2015/064049 A1	1-22
E, A	WO 2017/010549 A1 (Tohoku University), 19 January 2017 (19.01.2017), entire text; all drawings (Family: none)	1-22

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01L21/8246(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01L21/8246, H01L27/105

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2017年
日本国実用新案登録公報	1996-2017年
日本国登録実用新案公報	1994-2017年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2013-16560 A (株式会社東芝) 2013.01.24, 段落[0019] - [0027], [0085] - [0087], [0101], [0120], 図3 & US 2013/0001714 A1, 段落[0026] - [0036], [0108] - [0111], [0129], [0151], 図3 & CN 102856489 A	1 - 22
A	JP 2015-176933 A (株式会社東芝、国立大学法人東北大学) 2015.10.05, 全文, 全図 & US 2016/0380185 A1, 全文, 全図 & WO 2015/137021 A1	1 - 22

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの
「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの
「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの
「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

03.03.2017

国際調査報告の発送日

14.03.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

小山 満

5 F

6313

電話番号 03-3581-1101 内線 3516

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	JP 2015-176931 A (株式会社東芝) 2015.10.05, 全文, 全図 & US 2016/0380184 A1, 全文, 全図 & WO 2015/137234 A1	1 - 22
A	JP 2015-88520 A (ソニー株式会社) 2015.05.07, 全文, 全図 & US 2016/0268496 A1, 全文, 全図 & WO 2015/064049 A1	1 - 22
E, A	WO 2017/010549 A1 (国立大学法人東北大学) 2017.01.19, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 22