(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
2015 年 4 月 30 日(30.04.2015)

WIPO | PCT

(10) 国際公開番号
WO 2015/060239 A1

(51) 国際特許分類:
H01L 43/08 (2006.01) *H01L 27/105* (2006.01)
G11C 11/15 (2006.01) *H01L 29/82* (2006.01)
H01L 21/8246 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2014/077816

(22) 国際出願日: 2014 年 10 月 20 日(20.10.2014)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:
特願 2013-219675 2013 年 10 月 22 日(22.10.2013) JP

(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: 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). 深見 俊輔(Fukami Shunsuke); 〒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). 山ノ内 路彦(Yamanouchi Michihiko); 〒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). 松倉 文▲礼▼(Matsukura Fumihiro); 〒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). 石川 慎也(Ishikawa Shinya); 〒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).

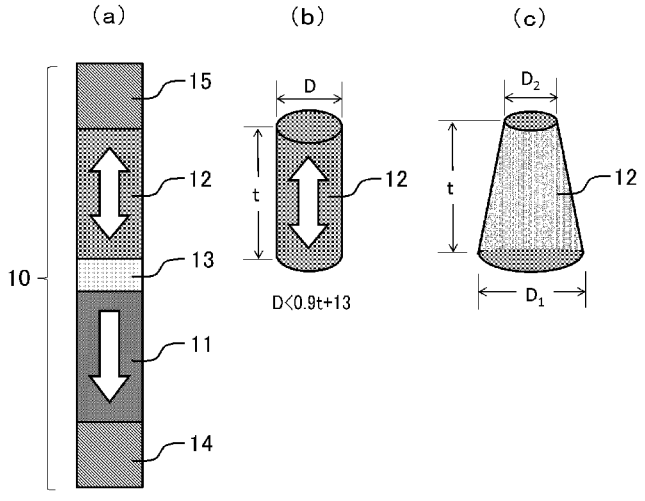
(74) 代理人: 須田 篤, 外(SUDA Atsushi et al.); 〒9800021 宮城県仙台市青葉区中央二丁目１番３０号 須田ビル５Ｆ Miyagi (JP).

(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, 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, KN, KP, KR, 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.

[続葉有]

(54) **Title**: MAGNETORESISTANCE EFFECT ELEMENT AND MAGNETIC MEMORY

(54) 発明の名称 : 磁気抵抗効果素子および磁気メモリ



(57) **Abstract**: [Problem] To provide a magnetoresistance effect element having thermal stability with a thermal stability exponent of 70 or more even in the case of a minute junction size, and a magnetic memory. [Solution] A magnetoresistance effect element is provided with a first magnetic layer (11) which constitutes a reference layer and has an invariable magnetization direction, a second magnetic layer (12) which constitutes a recording layer and has a variable magnetization direction, and a first nonmagnetic layer (13) which is disposed between the first magnetic layer (11) and the second magnetic layer (12) along the thickness direction of the first magnetic layer (11) and the second magnetic layer (12). The first magnetic layer (11) and/or the second magnetic layer (12) has a relationship of D<0.9t+13 between a junction size (D) (nm) that is the length of the longest straight line on an end face perpendicular to the thickness direction and a layer thickness (t) (nm), and the junction size is 30 nm or less.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2015/060239 A1

(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:

— 発明者である旨の申立て (規則 4.17(iv))

添付公開書類:

— 国際調査報告（条約第 21 条(3)）

【課題】微細な接合サイズであっても熱安定性指数７０以上の熱安定性を有する磁気抵抗効果素子および磁気メモリを提供する。 【解決手段】参照層を構成する、磁化方向が不変である第１の磁性層１１と、記録層を構成する、磁化方向が可変である第２の磁性層１２と、第１の磁性層１１および第２の磁性層１２の厚さ方向に沿って、第１の磁性層１１と第２の磁性層１２との間に配置された第１の非磁性層１３とを備えている。第１の磁性層１１および第２の磁性層１２の少なくともいずれか一方は、厚さ方向に垂直な端面上で最も長い直線の長さである接合サイズＤ（ｎｍ）と、層厚ｔ（ｎｍ）との間に、Ｄ＜０．９ｔ＋１３ の関係を有しており、その接合サイズは３０ｎｍ以下である。

明　細　書

発明の名称 ： 磁気抵抗効果素子および磁気メモリ

技術分野

[0001] 本発明は、磁気抵抗効果素子および磁気メモリに関する。

背景技術

[0002] 図１４に示すように、従来の磁気抵抗効果素子を有する磁気メモリ（Ｍａｇｎｅｔｉｃ　Ｒａｎｄｏｍ　Ａｃｃｅｓｓ　Ｍｅｍｏｒｙ：ＭＲＡＭ）の磁気メモリセル１０５は、磁気抵抗効果素子１１０と選択トランジスタ１０９とが直列に電気的に接続された構造を有している。選択トランジスタ１０９のソース電極はソース線１０２に、ドレイン電極は磁気抵抗効果素子１１０を介してビット線１０４に、ゲート電極はワード線１０３にそれぞれ電気的に接続されている。磁気抵抗効果素子１１０は、第１の強磁性層１１１と第２の強磁性層１１２との間に非磁性層１１３が挟まれた３層構造を基本としている。磁気抵抗効果素子１１０の抵抗値は、第１の強磁性層１１１の磁化と第２の強磁性層１１２の磁化とが平行配置の場合に小さくなり、反平行配置の場合に大きくなる。ＭＲＡＭのメモリセルでは、この２つの抵抗状態をビット情報「０」「１」に割り当てている。

[0003] ＭＲＡＭは、高集積化のために、年々、磁気抵抗効果素子１１０が微細化されている。磁気抵抗効果素子１１０の第１の強磁性層１１１および第２の強磁性層１１２は共に、微細化すると磁化が熱擾乱し、ビット情報が消失してしまうことが懸念される。そこで、微細化してもビット情報を保持するために、記録層となる第２の強磁性層１１２は７０以上の熱安定性指数（Ｅ／k_BＴ）を有し、参照層となる第１の強磁性層１１１は第２の強磁性層１１２よりも大きな熱安定性指数（Ｅ／k_BＴ）を有することが必要である。ここで、Ｅは、磁化反転に要するエネルギー障壁であり、第１の強磁性層１１１もしくは第２の強磁性層１１２の磁気異方性エネルギー密度K_{eff}と体積Ｖとの積（Ｅ＝K_{eff}Ｖ）である。また、k_Bはボルツマン係数、Ｔは絶対温度であ

る。

[0004] 高い熱安定性Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔを得るためには、第１の強磁性層１１１もしくは第２の強磁性層１１２の実効磁気異方性エネルギー密度Ｋ$_{eff}$を増加させる必要がある。この観点から、第１の強磁性層１１１もしくは第２の強磁性層１１２が垂直磁化容易軸を有する垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子が注目されている。このような垂直磁気異方性電極として、希土類基アモルファス合金、Ｌ１$_{0}$－規則系（Ｃｏ、Ｆｅ）－Ｐｔ合金、Ｃｏ／（Ｐｄ、Ｐｔ）多層膜等が研究されている（例えば、非特許文献１、２または３参照）。

[0005] また、本発明者等により、ＣｏＦｅＢ／ＭｇＯ積層構造において、ＣｏＦｅＢの薄層化により垂直磁気異方性が発現することが見出され（例えば、特許文献１参照）、この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、記録層の第２の強磁性層１１２において、接合サイズ直径４０ｎｍで、Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔ≒４０が得られている（例えば、非特許文献４参照）。さらに、熱安定性の向上を目指し、２重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、記録層の第２の強磁性層１１２において、接合サイズ直径４０ｎｍ台のとき、Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔが８０以上、接合サイズ直径２９ｎｍのとき、Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔ≒５９が得られている（例えば、非特許文献５参照）。ここで、強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。非特許文献４および５では、強磁性層が円柱形状を成し、接合面が円形であるため、接合サイズは接合面の直径となる。

[0006] なお、図１５（ａ）に示すように、非特許文献４に記載の垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子は、第１の強磁性層１１１と第２の強磁性層１１２との間に非磁性層１１３が挟まれた３層構造に、下部非磁性電極１１４と上部非磁性電極１１５とを接続した基本構造を有している。ここで、記録層である第２の強磁性層１１２は、図１５（ｂ）に示すように、接合サイズＤが強磁性層厚ｔよりも大きくなっているという特徴を有している。

[0007] また、図１５（ｃ）に示すように、非特許文献５に記載の垂直磁気異方性

磁気抵抗効果素子は、非磁性層１１３上の第２の強磁性層１１２に第２の非磁性層１１６を積層し、その上に第３の強磁性層１１７を積層し、第３の強磁性層１１７の上に、第３の強磁性層１１７との間に界面磁気異方性が発生する第３の非磁性層１１８を積層した５層構造を有している。非特許文献５には、この５層構造を用いることで、熱安定性を向上できることが記載されている。この構造においても、第２の非磁性層１１６を介して磁気的結合した第２の強磁性層１１２と第３の強磁性層１１７との合計の記録層の厚さｔは、接合サイズＤよりも小さいという特徴を有している。

先行技術文献

非特許文献

[0008] 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. Matsukur

a, and H. Ohno, “MgO/CoFeB/Ta/CoFeB/MgO recording structure in magnetic tunnel junctions with perpendicular easy axis”, IEEE Trans. Magn., 2013, 49, 4437

特許文献

[0009] 特許文献1：特開２０１１－２５８５９６号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0010] 微細化により高集積化された大容量の磁気メモリを実現するためには、記録されたビット情報を１０年間保持する不揮発性が必要である。そのためには、記録層となる強磁性層は、熱安定性指数７０以上の熱安定性を有する必要がある。非特許文献４に記載の垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子では、記録層の接合サイズ直径４０ｎｍで熱安定性指数が約４０であり、熱安定性指数が７０以下である。また、非特許文献５に記載の垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子では、記録層の接合サイズ直径４０ｎｍ台のとき、熱安定性指数が８０以上になっているが、接合サイズ直径２９ｎｍのとき、熱安定性指数が約５９で熱安定性指数７０以下である。微細化により高集積化された大容量の磁気メモリを実現するためには、微細な接合サイズでの熱安定性をさらに向上させる必要があるという課題があった。

[0011] 本発明は、このような課題に着目してなされたもので、微細な接合サイズであっても熱安定性指数７０以上の熱安定性を有する磁気抵抗効果素子および磁気メモリを提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0012] 磁気抵抗効果素子の高熱安定性を実現するために、本発明者等は、以下の原理に基づいて検討を行った。すなわち、磁気抵抗効果素子のビット情報の保持性能を決める、記録層として機能する強磁性層の熱安定性指数Ｅ／k_BＴにおいて、エネルギー障壁Ｅは、磁気異方性エネルギー密度Ｋと記録層の体積Ｖとの積で表される。ここで、ｘ軸，ｙ軸を平面内、ｚ軸をその平面に垂

直な面直方向にとった座標において、磁気異方性エネルギー密度Ｋは、以下の（１）式のように表される。

[0013] [数1]

$$K = K_{\mathrm{b}} - (N_z - N_x)\frac{M_{\mathrm{S}}^2}{2\mu_0} + \frac{K_{\mathrm{i}}}{t} \qquad (1)$$

ここで、K_bは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、N_zおよびN_xはそれぞれｚ軸およびｘ軸の反磁界係数、M_sは記録層の飽和磁化、μ_0は真空の透磁率、K_iは界面磁気異方性エネルギー密度、ｔは記録層の層厚である。なお、N_xはｙ軸の反磁界係数N_yと等しいとする。Ｋは、正符号の時に面直方向に磁化容易軸となる。

[0014] また、反磁界係数N_z、N_xは、以下の関係にある。

Ｄ＞ｔ　のとき、（N_z－N_x）＞０

Ｄ＜ｔ　のとき、（N_z－N_x）＜０

[0015] この関係および（１）式から、接合サイズＤより記録層の層厚ｔを大きくすることにより、Ｋの値を大きくすることができ、熱安定性を高めることができることがわかる。これは、Ｄ＜ｔとすることで、形状磁気異方性により、磁化が接合面に対して垂直方向に向くことを助長するためであると考えられる。これに対し、図１５に示す非特許文献４および非特許文献５に記載のような従来の磁気抵抗効果素子では、記録層である強磁性層の層厚ｔが接合サイズＤよりも小さく（Ｄ＞ｔ）、垂直に向いた磁化を不安定にする方向に反磁界が影響するため、熱安定性を低下させてしまうものと考えられる。

[0016] （１）式において、K_bをゼロと仮定し、K_iを３ｍＪ／ｍ^{2}と仮定し、M_sを非特許文献４および５の磁気抵抗効果素子で用いられているＣｏＦｅＢの１．４５Ｔとしたときの、接合サイズＤおよび層厚ｔに対する、熱安定性指数（Ｅ／k_BＴ＝ＫＶ／k_BＴ）を計算し、その計算結果を図１（ａ）に示す。図１（ａ）に示すように、Ｄ＞０．９ｔ＋１３のほとんどの領域では、面内容易軸となり、磁化が接合面に対して垂直方向には向かない。一方、Ｄ＜

０．９ｔ＋１３の領域では、接合サイズＤに対して層厚ｔが大きくなるに従って、熱安定性指数Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔも大きくなっていくことがわかる。また、Ｄ＜０．９ｔ＋１３の領域では、接合サイズＤが比較的小さいときでも、大きい熱安定性指数Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔが得られている。例えば、Ｄ＝３０ｎｍのとき、ｔ≧２０ｎｍとすれば、Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔ≧７０を得ることができる。図１（ａ）を非特許文献４および５の結果と比較すると、Ｄ＜０．９ｔ＋１３とすることにより、より小さい接合サイズＤでも、非特許文献４および５よりも大きい熱安定性指数が得られることがわかる。なお、図１（ａ）のＤ＜０．９ｔ＋１３の領域で、Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔ≧７０が得られていない領域においても、強磁性層のＭ$_{s}$を増加させることにより、熱安定性指数Ｅ／ｋ$_{B}$Ｔの増大を図ることができる。

[0017] なお、（１）式において、Ｋ$_{b}$およびＫ$_{i}$を０ｍＪ／ｍ^{2}と仮定し、Ｍ$_{s}$を１．４５Ｔとしたときの熱安定性指数の計算結果を図１（ｂ）に示す。図１（ｂ）に示すように、Ｄ＞ｔの領域では面内容易軸となり、Ｄ＜ｔの領域では垂直磁化容易軸となっている。これを図１（ａ）と比較すると、Ｋ$_{i}$の値がゼロに近くなるに従って、図中での面内容易軸と垂直磁化容易軸との境界線が、下方に移動するとともに、その傾きがやや急になることがわかる。図１（ｂ）の結果から、Ｋ$_{i}$の値が不明の場合や、ゼロに近いと考えられる場合には、Ｄ＜ｔとすることにより、確実に大きい熱安定性指数を得ることができるといえる。

[0018] 以上の検討結果から、本発明者等は本発明に至った。

すなわち、本発明に係る磁気抵抗効果素子は、磁化方向が不変である第１の磁性層と、磁化方向が可変である第２の磁性層と、前記第１の磁性層および前記第２の磁性層の厚さ方向に沿って、前記第１の磁性層と前記第２の磁性層との間に配置された第１の非磁性層とを備える磁気抵抗効果素子において、前記第１の磁性層および前記第２の磁性層の少なくともいずれか一方は、前記厚さ方向に垂直な端面上で最も長い直線の長さである接合サイズＤ（ｎｍ）と、層厚ｔ（ｎｍ）との間に、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有してい

ることを特徴とする。

[0019] 本発明に係る磁気抵抗効果素子は、磁化方向が不変である第１の磁性層が参照層として機能し、磁化方向が可変である第２の磁性層が記録層として機能するようになっている。本発明に係る磁気抵抗効果素子は、第１の磁性層および第２の磁性層の少なくともいずれか一方が、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有しているため、熱安定性を高めることができる。接合サイズおよび層厚を適切に定めることにより、熱安定性指数７０以上の熱安定性を得ることができる。特に、記録層として機能する第２の磁性層を、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有するよう形成することにより、優れた熱安定性が得られる。

[0020] 熱安定性指数７０以上の熱安定性を得るために、一般にK_bを増加させた材料や薄層化によりK_iを増加させた材料を磁性層に適用する方法がある。このような、K_bやK_iを増加させた材料では、磁気ダンピング定数が大きいことが知られている。スピン注入磁化反転方式では、熱安定性を増加させ且つビット情報を書込むときの書込み電流を低減するためには、磁気ダンピング定数を小さくする必要がある。したがって、K_bやK_iの大きな材料を適用した磁気抵抗効果素子では、書込み電流を低減することが困難である。これに対して、本発明に係る磁気抵抗効果素子は、K_bやK_iの大きな材料を用いずに、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　とすることで高い熱安定性を得ることができるため、低磁気ダンピング定数の磁性層を適用することができ、書込み電流を小さくすることができる。

[0021] 特に、本発明に係る磁気抵抗効果素子で、選択トランジスタに流せる電流の制約から、高い熱安定性を維持しつつ接合サイズを小さくして書込み電流を低減するためには、Ｄ＜０．９ｔ＋１３の関係を有する前記第１の磁性層および／または前記第２の磁性層は、前記接合サイズが３０ｎｍ以下であることが好ましい。また、図１（ａ）から、磁性層がＣｏＦｅＢの場合に熱安定性指数７０以上の熱安定性を得るために、Ｄ＜０．９ｔ＋１３の関係を有する第１の磁性層および／または第２の磁性層は、さらに層厚が１０ｎｍ以

上であることが好ましい。なお、強磁性層のＭｓを増加させることにより熱安定性を増加させることができ、接合サイズを小さくしつつ膜厚も１０ｎｍ以下にすることができる。このように、本発明に係る磁気抵抗効果素子は、接合サイズが３０ｎｍ以下の微細な接合サイズであっても熱安定性指数７０以上の熱安定性を得ることができる。

[0022] なお、本発明に係る磁気抵抗効果素子で、K_iの値が不明の場合や、ゼロに近いと考えられる場合には、第１の磁性層および／または第２の磁性層は、Ｄ＜ｔの関係を有していることが好ましい。この場合、確実に高い熱安定性を得ることができる。また、高い熱安定性を維持しつつ接合サイズを小さくして書込み電流を低減するためには、Ｄ＜ｔの関係を有する第１の磁性層および／または第２の磁性層は、接合サイズが３０ｎｍ以下であることが好ましい。また、図１（ｂ）から、磁性層がＣｏＦｅＢの場合に熱安定性指数７０以上の熱安定性を得るために、Ｄ＜ｔの関係を有する第１の磁性層および／または第２の磁性層は、さらに層厚が２０ｎｍ以上であることが好ましい。

[0023] 本発明に係る磁気抵抗効果素子で、第１の磁性層および第２の磁性層は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されることが好ましい。第１の非磁性層は、例えば、ＭｇＯ、Al_2O_3、SiO_2、ＴｉＯ、Hf_2Oなどの酸素を含む化合物を有する材料など、第１の磁性層および第２の磁性層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材料から構成されることが好ましい。

[0024] なお、本発明に係る磁気抵抗効果素子で、接合サイズとは、強磁性層の厚さ方向に垂直な端面、すなわち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り、接合面が円形のときにはその直径、楕円形のときにはその長径、四角形のときにはその対角線の長い方となる。

[0025] 本発明に係る磁気抵抗効果素子は、前記第１の磁性層と前記第１の非磁性層との間に配置された、磁化方向が不変である第３の磁性層と、前記第１の磁性層と前記第３の磁性層との間に配置された第２の非磁性層とを、有して

いてもよい。この場合、第２の非磁性層に隣接する第１の磁性層の部分と、第３の磁性層とを磁気的に結合するとともに、第１の磁性層の結晶性を反映しない程度に、第２の非磁性層の厚さを調整することにより、大きな磁気抵抗変化率を得ることができる。第３の磁性層は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されることが好ましい。第２の非磁性層は、Ｔａ、Ｗ、Ｈｆ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｒｉ、Ｖ、Ｃｒの内のいずれか一つを含む材料で構成されていてもよい。

[0026] 本発明に係る磁気抵抗効果素子で、前記第１の磁性層は、磁化が互いに反平行になるよう、２つの磁性層が非磁性層を介して結合された反平行結合積層構造を有していてもよい。この場合、第１の磁性層が一方向の磁化方向のみを有する場合と比べて、第２の磁性層の磁化方向の向きによらず、高い熱安定性を得ることができる。第１の磁性層の２つの磁性層は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されることが好ましい。また、その２つの磁性層は、垂直磁化容易軸を有する合金膜や多層膜から成っていてもよく、全ての膜厚を接合サイズよりも大きくして、形状磁気異方性により垂直磁化容易軸を付与した合金膜や多層膜から成っていてもよい。第１の磁性層中の非磁性層は、Ｒｕ、Ｒｈ、Ｉｒ、Ｃｒ、Ｃｕの内のいずれか一つを含む材料で構成されていてもよい。

[0027] 本発明に係る磁気抵抗効果素子で、前記第２の磁性層は、互いに異なる材料から成る複数の磁性層を有していてもよい。この場合、第２の磁性層の各磁性層の磁化方向やキュリー温度を適切に設定することにより、スピン注入磁化反転による書込み電流を低減することができる。

[0028] 本発明に係る磁気抵抗効果素子は、前記第２の磁性層の前記厚さ方向に沿った側面に電界を印加可能に設けられた電界印加手段を有していてもよい。この場合、スピン注入磁化反転方式ではなく、電界誘起磁化反転方式でビット情報の書込みを行うことができる。これにより、スピン注入磁化反転方式のときよりも、低消費電力化を図ることができる。

[0029] 本発明に係る磁気メモリは、互いに平行に配置された複数のソース線と、

前記ソース線と交差する方向に、互いに平行に配置された複数のワード線と、前記ソース線に平行に配置された複数のビット線と、ゲート電極が前記ワード線に電気的に接続され、ソース電極が前記ソース線に電気的に接続された選択トランジスタと、前記ビット線と前記ワード線とが交差する部分に配置され、前記第１の磁性層および前記第２の磁性層のいずれか一方が前記選択トランジスタのドレイン電極に電気的に接続され、他方が前記ビット線に電気的に接続された本発明に係る磁気抵抗効果素子とを備え、前記厚さ方向に沿って前記磁気抵抗効果素子に電流を印加可能に構成されていることを特徴とする。

[0030] 本発明に係る磁気メモリは、本発明に係る磁気抵抗効果素子を有しているため、熱安定性指数７０以上の熱安定性を得ることができる。

発明の効果

[0031] 本発明によれば、微細な接合サイズであっても熱安定性指数７０以上の熱安定性を有する磁気抵抗効果素子および磁気メモリを提供することができる。

図面の簡単な説明

[0032] [図1]磁気抵抗効果素子の記録層を構成する強磁性層の、接合サイズＤおよび層厚ｔに対する熱安定性指数（Ｅ／k_BＴ）の計算結果を示す（ａ）K_iを３ｍＪ／m^2と仮定したときのグラフ、（ｂ）K_iを０ｍＪ／m^2と仮定したときのグラフである。

[図2]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す（ａ）縦断面図、（ｂ）第２の磁性層の斜視図、（ｃ）両端面の接合サイズが異なる第２の磁性層の斜視図である。

[図3]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第１の変形例を示す縦断面図である。

[図4]図３に示す磁気抵抗効果素子の第１の変形例の、素子抵抗と面直磁界との関係を示す（ａ）Ｄ＝１０ｎｍ（Ｄ＜０．９ｔ＋１３、かつＤ＜ｔ）のときのグラフ、（ｂ）Ｄ＝４０ｎｍ（Ｄ＞０．９ｔ＋１３、かつＤ＞ｔ）のと

きのグラフである。

[図5]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第２の変形例を示す縦断面図である。

[図6]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第３の変形例を示す縦断面図である。

[図7]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第４の変形例を示す縦断面図である。

[図8]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第５の変形例を示す縦断面図である。

[図9]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第６の変形例を示す（ａ）第２の磁性層の縦断面図、（ｂ）Ｄ＜０．９ｔ$_1$＋１３で、温度ＴがＴ$_{C1}$＞Ｔ＞Ｔ$_{C2}$のときの第２の磁性層の縦断面図、（ｃ）Ｄ＜０．９（ｔ$_1$＋ｔ$_2$）＋１３かつＤ＞０．９ｔ$_1$＋１３で、温度ＴがＴ$_{C1}$＞Ｔ＞Ｔ$_{C2}$のときの第２の磁性層の縦断面図である。

[図10]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第７の変形例を示す（ａ）第２の磁性層の縦断面図、（ｂ）Ｄ＜０．９ｔ$_1$＋１３かつＤ＞０．９ｔ$_3$＋１３で、温度ＴがＴ$_{C1}$≧Ｔ$_{C3}$＞Ｔ＞Ｔ$_{C2}$のときの第２の磁性層の縦断面図である。

[図11]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第８の変形例を示す縦断面図である。

[図12]本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子の第８の異なる変形例を示す縦断面図である。

[図13]本発明の実施の形態の磁気メモリを示す回路ブロック図である。

[図14]従来の磁気抵抗効果素子を有する磁気メモリの磁気メモリセルを示す回路図である。

[図15]（ａ）従来の垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子を示す縦断面図、（ｂ）第２の強磁性層の斜視図、（ｃ）他の従来の垂直磁気異方性磁気抵抗効果素子を示す縦断面図である。

発明を実施するための形態

[0033] 以下、図面に基づき、本発明の実施の形態について説明する。

図２は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子を示している。

図２（ａ）に示すように、磁気抵抗効果素子１０は、第１の磁性層１１と第２の磁性層１２と第１の非磁性層１３と下部非磁性電極１４と上部非磁性電極１５とを有している。

[0034] 第１の磁性層１１は、円柱状を成し、磁化方向が厚さ方向に沿って上向きまたは下向きで不変であり、参照層として機能するよう構成されている。第１の磁性層１１は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。

[0035] 第２の磁性層１２は、円柱状を成し、磁化方向が厚さ方向に沿って上下に可変であり、記録層として機能するよう構成されている。図２（ｂ）に示すように、第２の磁性層１２は、接合サイズＤ（ｎｍ）と、層厚ｔ（ｎｍ）との間に、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有するよう形成されている。また、第２の磁性層１２は、接合サイズＤが３０ｎｍ以下である。ここで、第２の磁性層１２の接合サイズＤは、円形を成す両端面の直径である。第２の磁性層１２は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。

[0036] 図２（ａ）に示すように、第１の非磁性層１３は、円柱状を成し、第１の磁性層１１および第２の磁性層１２の厚さ方向に沿って、第１の磁性層１１と第２の磁性層１２との間に配置されている。第１の非磁性層１３は、両端面がそれぞれ第１の磁性層１１と第２の磁性層１２とに接合されている。第１の非磁性層１３は、第１の磁性層１１および第２の磁性層１２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、Al_2O_3、SiO_2、ＴｉＯ、Hf_2Oなどの酸素を含む化合物を有する材料で構成されている。

[0037] 下部非磁性電極１４は、第１の磁性層１１の、第１の非磁性層１３が接する端面とは反対側の端面に接続されている。上部非磁性電極１５は、第２の

磁性層１２の、第１の非磁性層１３が接する端面とは反対側の端面に接続されている。

[0038] 次に、作用について説明する。

磁気抵抗効果素子１０は、第２の磁性層１２がＤ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有しているため、形状磁気異方性により第２の磁性層１２の磁化が垂直に向くように助長され、熱安定性を高めることができる。また、磁気抵抗効果素子１０は、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　とした熱安定性が高い状態で、接合サイズＤをできる限り小さくすることにより、ビット情報を書込むときの書込み電流を小さくすることができる。第２の磁性層１２の接合サイズＤが３０ｎｍ以下であるため、熱安定性指数７０以上の熱安定性を得ることができる。

[0039] なお、磁気抵抗効果素子１０は、第１の磁性層１１も、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　の関係を有するよう形成されていてもよい。この場合、より熱安定性を高めることができる。また、図２（ｃ）に示すように、通常のエッチングでは、両端面の接合サイズは、$D_1 > D_2$となり、一定にならない。この場合には、両端面の直径の大きい方を接合サイズと規定する。また、両端面の形状が円形でない場合もあり、その場合には、両端面上の最も長い直線の長さを接合サイズと規定する。

[0040] ［第１の変形例］

図３は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第１の変形例を示している。

図３に示す第１の変形例では、大きな磁気抵抗変化率を得るために、以下の構成を有している。

[0041] この第１の変形例では、図３に示すように、第１の磁性層１１と第１の非磁性層１３との間に配置された、磁化方向が不変である第３の磁性層１６と、第１の磁性層１１と第３の磁性層１６との間に配置された第２の非磁性層１７とを有している。

[0042] 第３の磁性層１６は、第１の磁性層１１の磁化方向と同じ磁化方向を有し

ている。また、第３の磁性層１６は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。

[0043] 第２の非磁性層１７は、隣接する第１の磁性層１１と第３の磁性層１６とを磁気的に結合するとともに、第１の磁性層１１の結晶性を反映しない程度に、厚さが調整されている。第２の非磁性層１７は、Ｔａ、Ｗ、Ｈｆ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｒｉ、Ｖ、Ｃｒの内のいずれか一つを含む材料で構成されているが、第１の磁性層１１と第３の磁性層１６とが磁気的に結合されている限り、必ずしもこのような材料で構成される必要はない。なお、この第１の変形例では、第１の磁性層１１の上部に第２の非磁性層１７と第３の磁性層１６とを積層させた構造として説明しているが、第２の非磁性層１７と第３の磁性層１６とが第１の磁性層１１に含まれていると考えることもできる。

[0044] 次に、この第１の変形例について、以下の磁気抵抗効果素子１０を作製し、素子抵抗と磁界との関係を調べる実験を行った。

Ｔａ（５）／Ｐｔ（５）／［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{\times 20}$／Ｃｏ（０．３）／Ｔａ（０．４）／$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（１）／ＭｇＯ（１．０）／$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）／Ｔａ（１）／Ｒｕ（５）／Ｔａ（５０）

［小括弧内は層厚（単位：ｎｍ）である］

ここで、［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{\times 20}$／Ｃｏ（０．３）が第１の磁性層１１、Ｔａ（０．４）が第２の非磁性層１７、$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（１）が第３の磁性層１６、ＭｇＯ（１．０）が第１の非磁性層１３、$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）が第２の磁性層１２に対応している。第２の磁性層１２の層厚ｔは、２０ｎｍである。

[0045] 磁気抵抗効果素子１０として、接合サイズＤが１０ｎｍのもの（Ｄ＜０．９ｔ＋１３、かつＤ＜ｔ）と、４０ｎｍのもの（Ｄ＞０．９ｔ＋１３、かつＤ＞ｔ）とを作製し、面直磁界±０．７５Ｔでスイープして実験を行った。

また、素子抵抗は、直流４端子法で、印加電圧を１０ｍＶとして測定を行った。図４（ａ）および（ｂ）に、それぞれＤ＝１０ｎｍおよび４０ｎｍの磁気抵抗効果素子１０の素子抵抗（Ｒ）と面直磁界（$\mu_0 H$）との関係を示す。図４中に、面直磁界±０．７５Ｔでスイープした方向を矢印で示している。また、第１の磁性層１１および第２の磁性層１２の磁化の向きを、白抜きの矢印で示している。

[0046] 図４（ａ）に示すように、Ｄ＝１０ｎｍの磁気抵抗効果素子１０では、記録層および参照層がどちらも垂直磁化容易軸を有することを反映し、明瞭な磁化スイッチングに対応する素子抵抗－面直磁界曲線が得られている。これに対し、図４（ｂ）に示すように、Ｄ＝４０ｎｍの磁気抵抗効果素子１０では、第２の磁性層１２に対応するＣｏＦｅＢ記録層の磁化が面直方向を向くことができず、面直磁界に対し徐々に磁化の傾きが変わることを示唆する抵抗変化が得られている。これらの結果から、第２の磁性層１２の層厚ｔと接合サイズＤとの関係を、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　とすることにより、磁化が垂直方向に向いた第２の磁性層１２が得られることが確認できた。また、この構造において、磁界パルスによる磁化反転確率から見積った結果、第２の磁性層１２の層厚ｔと接合サイズＤとの関係を、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　とすることにより、熱安定性指数が７０以上になることもわかった。

[0047] ［第２の変形例］

図５は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第２の変形例を示している。

この第２の変形例では、図５に示すように、第１の磁性層１１は、第１の磁性層２１と第２の磁性層２２と非磁性層２３とから構成されている。第１の磁性層１１は、磁化が厚さ方向に沿って互いに反平行になるよう、第１の磁性層２１および第２の磁性層２２が非磁性層２３を介して結合された反平行結合積層構造を有している。

[0048] 第１の磁性層２１および第２の磁性層２２は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている

。なお、第１の磁性層２１および第２の磁性層２２は、垂直磁化容易軸を有する合金膜や多層膜から成っていてもよく、全ての膜厚ｔと接合サイズＤとの関係を、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　として、形状磁気異方性により垂直磁化容易軸を付与した合金膜や多層膜から成っていてもよい。

[0049] 非磁性層２３は、Ｒｕ、Ｒｈ、Ｉｒ、Ｃｒ、Ｃｕの内のいずれか一つを含む材料で構成されている。なお、非磁性層２３は、第１の磁性層２１の磁化と第２の磁性層２２の磁化とが反平行になる場合、必ずしもこのような材料で構成される必要はない。

[0050] 第１の磁性層１１の磁化が厚さ方向に沿って一方向に固定されている場合、第１の磁性層１１の磁化の向きと第２の磁性層１２の磁化の向きとが反平行配列しているときに、第１の磁性層１１からの磁界が第２の磁性層１２の磁化の向きを不安定にするように働く。このため、反平行配列時の熱安定性が低下してしまう。これに対し、図５に示す第２の変形例では、第１の磁性層１１を反平行結合積層構造にすることにより、第１の磁性層１１からの磁界を弱めることができ、第２の磁性層２２の磁化と第２の磁性層１２の磁化とが反平行時の熱安定性を改善することができる。このように、第２の変形例では、図２（ａ）および図３の磁気抵抗効果素子１０と比べて、第２の磁性層１２の磁化方向の向きによらず、高い熱安定性を得ることができる。

[0051] ［第３の変形例］

図６は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第３の変形例を示している。図６に示す第３の変形例では、第２の変形例と比べて大きな磁気抵抗変化率を得るために、以下の構成を有している。

[0052] この第３の変形例では、図６に示すように、第２の変形例の第１の磁性層１１と第１の非磁性層１３との間に配置された、磁化方向が不変である第３の磁性層１６と、第１の磁性層１１と第３の磁性層１６との間に配置された第２の非磁性層１７とを有している。

[0053] 第３の磁性層１６は、第１の磁性層１１の第２の磁性層２２の磁化方向と同じ磁化方向を有している。また、第３の磁性層１６は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ

、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。

[0054] 第２の非磁性層１７は、隣接する第１の磁性層１１の第２の磁性層２２と、第３の磁性層１６とを磁気的に結合するとともに、第２の磁性層２２の結晶性を反映しない程度に、厚さが調整されている。第２の非磁性層１７は、Ｔａ、Ｗ、Ｈｆ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｒｉ、Ｖ、Ｃｒの内のいずれか一つを含む材料で構成されているが、第２の磁性層２２と第３の磁性層１６とが磁気的に結合されている限り、必ずしもこのような材料で構成される必要はない。なお、この第３の変形例では、第１の磁性層１１の上部に第２の非磁性層１７と第３の磁性層１６とを積層させた構造として説明しているが、第２の非磁性層１７と第３の磁性層１６とが第１の磁性層１１に含まれていると考えることもできる。

[0055] 第２の磁性層１２として、$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）を使用し、反平行結合構造を有する第１の磁性層１１を変更した以下の構造の場合について、第１の実施例と同様の実験を行った。

基板／Ｔａ（５）／Ｐｔ（５）／［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{x6}$
／Ｃｏ（０．３）／Ｒｕ（０．４）
／［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{x2}$／Ｃｏ（０．３）
／Ｔａ（０．４）／$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（１）／ＭｇＯ（１．０）
／$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）／Ｔａ（１）／Ｒｕ（５）／Ｔａ（５０）

［小括弧内は層厚（単位：ｎｍ）である］

ここで、［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{x6}$／Ｃｏ（０．３）が第１の磁性層１１の第１の磁性層２１、Ｒｕ（０．４）が非磁性層２３、［Ｃｏ（０．３）／Ｐｔ（０．４）］$_{x2}$／Ｃｏ（０．３）が第２の磁性層２２、Ｔａ（０．４）が第２の非磁性層１７、$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（１）が第３の磁性層１６、ＭｇＯ（１．０）が第１の非磁性層１３、$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）

が第２の磁性層１２に対応している。実験の結果、図４と同様の垂直磁化容易軸を反映した素子抵抗－磁界曲線が得られた。

[0056] さらに、第２の磁性層１２を$Co_{20}Fe_{60}B_{20}$（２０）から$Co_{50}Fe_{50}$（２０）に変更した場合にも、図４と同様の結果が得られた。

また、これらの構造において、磁界パルスによる磁化反転確率から見積った結果、第２の磁性層１２の層厚ｔと接合サイズＤとの関係を、Ｄ＜０．９ｔ＋１３　とすることにより、熱安定性指数が７０以上になることもわかった。

[0057] ［第４の変形例］

図７は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第４の変形例を示している。図７に示す第４の変形例では、第３の変形例よりもさらに大きな磁気抵抗変化率を得るために、以下の構成を有している。

[0058] この第４の変形例では、図７に示すように、第２の磁性層１２は、第１の磁性層２４と非磁性層２５と第２の磁性層２６とをこの順序で積層した複合記録層として構成されている。第１の磁性層２４および第２の磁性層２６は、磁化方向が厚さ方向に沿って上下に可変である。第１の磁性層２４および第２の磁性層２６は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。

[0059] 非磁性層２５は、隣接する第１の磁性層２４と第２の磁性層２６との磁気的結合を保ち、かつ第２の磁性層２６の結晶性を反映しない程度に、厚さが調整されている。非磁性層２５は、Ｔａ、Ｗ、Ｈｆ、Ｚｒ、Ｎｂ、Ｍｏ、Ｒｉ、Ｖ、Ｃｒの内のいずれか一つを含む材料で構成されているが、第１の磁性層２４と第２の磁性層２６とが磁気的に結合されている限り、必ずしもこのような材料で構成される必要はない。

[0060] ［第５の変形例］

図８は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第５の変形例を示している。図８に示す第５の変形例では、記録層の書込みに要する電流を低減するために、以下の構成を有している。

[0061] この第５の変形例では、図８に示すように、第２の磁性層１２の上部に、第３の非磁性層１８と、第１の磁性層１１の磁化と逆方向に磁化させた第４の磁性層１９とを積層させた構造を有している。第３の非磁性層１８は、ＭｇＯ、Al_2O_3、SiO_2、ＴｉＯ、Hf_2Oなどの酸素を含む化合物から成り、第１の非磁性層１３に対して膜厚差を有している。なお、第３の非磁性層１８は、Ｃｕ、Ａｇ、Ａｕ等から成っていてもよい。第４の磁性層１９は、Ｃｏ、Ｆｅ、Ｎｉ、Ｍｎなどの３ｄ強磁性遷移金属元素を少なくとも一つ含んだ材料で構成されている。第４の磁性層１９は、第１の磁性層１１に対して保磁力差を有している。

[0062] この第５の変形例では、上下の参照層である第１の磁性層１１および第４の磁性層１９から流出する多数スピンが、記録層である第２の磁性層１２に作用してスピントルクが働くため、スピン注入磁化反転による書込み電流を低減することができる。

[0063] なお、この第５の変形例で、第１の磁性層１１を図５や図６に示す反平行結合積層構造等にしたとき、第４の磁性層１９を、その反平行結合積層構造と逆の順序に積層し、第１の磁性層１１の磁化と第４の磁性層１９の磁化とを反対方向に配列させてもよい。また、この第５の変形例では、第２の磁性層１２の上部に第３の非磁性層１８と参照層の第４の磁性層１９とを積層させた構造として説明しているが、第２の磁性層１２が、磁化方向が可変の記録層と、第３の非磁性層１８と参照層の第４の磁性層１９とを積層した構造から成るものと考えることもできる。

[0064] ［第６の変形例］

図９は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第６の変形例を示している。図９に示す第６の変形例では、記録層の書込みに要する電流を低減するために、以下の構成を有している。

[0065] この第６の変形例では、図９（ａ）に示すように、第２の磁性層１２は、厚さt_1の下部磁性層３１と厚さt_2の上部磁性層３２とから形成され、下部磁性層３１のキュリー温度T_{C1}が上部磁性層３２のキュリー温度T_{C2}よりも

高くなるよう構成されている。

[0066] この第６の変形例では、図９（ｂ）に示すように、Ｄ＜０．９ｔ$_1$＋１３で、温度ＴがＴ$_{C1}$＞Ｔ＞Ｔ$_{C2}$のとき、上部磁性層３２は常磁性となり、下部磁性層３１のみ磁化反転すればよいため、モーメントの総和が減少し、スピン注入磁化反転を低電流で行うことができる。また、図９（ｃ）に示すように、Ｄ＜０．９（ｔ$_1$＋ｔ$_2$）＋１３かつＤ＞０．９ｔ$_1$＋１３で、温度ＴがＴ$_{C1}$＞Ｔ＞Ｔ$_{C2}$のとき、上部磁性層３２は常磁性となり、下部磁性層３１は形状磁気異方性の寄与がなくなり面内に磁化が向く。このため、下部磁性層３１のみ９０°磁化反転すればよく、この構造においてもスピン注入磁化反転を低電流で行うことができる。

[0067] なお、記録層である第２の磁性層１２は、２層以上の磁性層で構成されていてもよい。また、温度の上昇は、配線に流す電流によるジュール熱によるものであってもよい。図９では、下部磁性層３１と上部磁性層３２との間でキュリー温度が異なる例を示しているが、より一般的には、キュリー温度以外の物性が異なっていてもよい。例えば、第１の非磁性層１３と接する下部磁性層３１は、磁気抵抗効果による抵抗変化が大きくなるように特化した材料で構成され、下部磁性層３１の上部に設けられる上部磁性層３２は、スピン注入磁化反転を低電流で行えることに特化した材料で構成されていてもよい。具体的には、下部磁性層３１には、Ｃｏ－Ｆｅ－Ｂ合金を用い、上部磁性層３２には、ダンピング定数の小さいＦｅを用いることにより、良好な書込み特性と読み出し特性とを両立することができる。

[0068] ［第７の変形例］

図１０は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第７の変形例を示している。図１０に示す第７の変形例では、記録層の書込みに要する電流を低減するために、以下の構成を有している。

[0069] この第７の変形例では、図１０（ａ）に示すように、第２の磁性層１２は、厚さｔ$_1$の下部磁性層３３と、厚さｔ$_2$の中間磁性層３４と、上部磁性層３５とから形成され、下部磁性層３３のキュリー温度Ｔ$_{C1}$、中間磁性層３４の

キュリー温度T_{C2}、および上部磁性層３５のキュリー温度T_{C3}が、$T_{C1} \geqq T_{C3} > T_{C2}$の関係になるよう構成されている。

[0070] この第７の変形例では、図１０（ｂ）に示すように、$D < 0.9t_1 + 13$かつ$D > 0.9t_3 + 13$で、温度Ｔが$T_{C1} \geqq T_{C3} > T > T_{C2}$のとき、中間磁性層３４は常磁性となり、上部磁性層３５が面内に磁化が向いた面内磁化分極層となり、下部磁性層３３の磁化反転をアシストするように働くため、スピン注入磁化反転を低電流で行うことができる。

[0071] ［第８の変形例］

図１１および図１２は、本発明の実施の形態の磁気抵抗効果素子１０の、第８の変形例を示している。

スピン注入磁化反転方式よりも電界誘起磁化反転方式の方が書込みの低消費電力化を図ることができると期待されているため、第８の変形例では、電界誘起磁化反転方式の構成を有している。

[0072] この第８の変形例では、図１１に示すように、記録層である第２の磁性層１２の側面を覆う絶縁層４１と、絶縁層４１の外側に、第２の磁性層１２の側面に電界を印加可能に設けられた電界印加手段４２とを有している。第２の磁性層１２の層厚ｔと接合サイズＤとの関係を、$D < 0.9t + 13$　とした構造では、側面の面積が大きくなるため、電界印加手段４２により記録層に電界をかけることにより、電界誘起磁化反転を助長することができる。

[0073] また、図１２に示すように、第２の磁性層１２の側面だけでなく、上面にも絶縁層４１と電界印加手段４２とを設けてもよい。この場合、より電界誘起磁化反転を助長することができる。

[0074] ［本発明の実施の形態の磁気メモリ１］

図１３は、本発明の実施の形態の磁気メモリ（ＭＲＡＭ）を示している。

図１３に示すように、磁気メモリ１は、それぞれ複数から成るソース線２とワード線３とビット線４とメモリセル５とを有している。

[0075] 各ソース線２は、互いに平行に配置されている。各ワード線３は、各ソース線２と垂直に交差する方向に、互いに平行に配置されている。各ビット線

４は、各ソース線２に平行に、互いに平行に配置されている。各ソース線２および各ビット線４は、互いに平行に、横方向に交互に並んで配置されている。各ソース線２および各ビット線４の一端は、電圧印加のためのライトドライバ６およびセンス増幅器７に電気的に接続されている。各ワード線３の一端は、ワードドライバ８に電気的に接続されている。

[0076] 各メモリセル５は、各ビット線４と各ワード線３との各交点に配置されている。各メモリセル５は、選択トランジスタ９と磁気抵抗効果素子１０とを有している。選択トランジスタ９は、ゲート電極がワード線３に電気的に接続され、ソース電極が配線層を介してソース線２に電気的に接続されている。磁気抵抗効果素子１０は、下部非磁性電極１４または上部非磁性電極１５を介して、第１の磁性層１１および第２の磁性層１２のいずれか一方が選択トランジスタ９のドレイン電極に電気的に接続され、他方がビット線４に電気的に接続されている。磁気抵抗効果素子１０は、図２～図３または図５～図１２のいずれか１つから成っている。磁気メモリ１は、厚さ方向に沿って磁気抵抗効果素子１０に電流を印加可能に構成されている。

[0077] 次に、作用について説明する。

「１」の書込み動作では、ライトドライバ６からソース線２に電圧を印加するとともに、ワードドライバ８からワード線３に電圧を印加することによって、ソース線２から磁気抵抗効果素子１０を介してビット線４に電流を流す。このとき、磁気抵抗効果素子１０の磁化方向が可変の記録層である第２の磁性層１２の磁化方向と、磁化方向が固定された参照層である第１の磁性層１１の磁化方向とが反平行状態となる。これにより、磁気抵抗効果素子１０は高抵抗状態となり、磁気抵抗効果素子１０の保持する情報は「１」となる。

[0078] 一方、「０」の書込み動作では、ライトドライバ６からビット線４に電圧を印加するとともに、ワードドライバ８からワード線３に電圧を印加することによって、ビット線４から磁気抵抗効果素子１０を介してソース線２に電流を流す。このとき、磁気抵抗効果素子１０の磁化方向が可変の記録層であ

る第２の磁性層１２の磁化方向と、磁化方向が固定された参照層である第１の磁性層１１の磁化方向とが平行状態となる。これにより、磁気抵抗効果素子１０は低抵抗状態となり、磁気抵抗効果素子１０の保持する情報は「０」となる。

[0079] 読み出し時は、センス増幅器７を用いて、抵抗変化による信号の違いを読み取る。このようなメモリアレイを用いることにより、磁気抵抗変化率が大きく、書込み電流が小さく、従来構造よりも熱安定性が高い磁気抵抗効果素子１０を具備するＭＲＡＭを実現することができる。

符号の説明

[0080]
１ 磁気メモリ
２ ソース線
３ ワード線
４ ビット線
５ メモリセル
６ ライトドライバ
７ センス増幅器
８ ワードドライバ
９ 選択トランジスタ
１０ 磁気抵抗効果素子
１１ 第１の磁性層
２１ 第１の磁性層
２２ 第２の磁性層
２３ 非磁性層
１２ 第２の磁性層
２４ 第１の磁性層
２５ 非磁性層
２６ 第２の磁性層
３１ 下部磁性層

３２　上部磁性層

３３　下部磁性層

３４　中間磁性層

３５　上部磁性層

１３　第１の非磁性層

１４　下部非磁性電極

１５　上部非磁性電極

１６　第３の磁性層

１７　第２の非磁性層

１８　第３の非磁性層

１９　第４の磁性層

４１　絶縁層

４２　電界印加手段

請求の範囲

[請求項1] 磁化方向が不変である第１の磁性層と、磁化方向が可変である第２の磁性層と、前記第１の磁性層および前記第２の磁性層の厚さ方向に沿って、前記第１の磁性層と前記第２の磁性層との間に配置された第１の非磁性層とを備える磁気抵抗効果素子において、

前記第１の磁性層および前記第２の磁性層の少なくともいずれか一方は、前記厚さ方向に垂直な端面上で最も長い直線の長さである接合サイズＤ（ｎｍ）と、層厚ｔ（ｎｍ）との間に、

Ｄ＜０．９ｔ＋１３

の関係を有していることを特徴とする磁気抵抗効果素子。

[請求項2] 前記第１の磁性層および前記第２の磁性層の少なくともいずれか一方は、Ｄ＜ｔの関係を有していることを特徴とする請求項１記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項3] Ｄ＜０．９ｔ＋１３の関係を有する前記第１の磁性層および／または前記第２の磁性層は、前記接合サイズが３０ｎｍ以下であることを特徴とする請求項１記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項4] Ｄ＜ｔの関係を有する前記第１の磁性層および／または前記第２の磁性層は、前記接合サイズが３０ｎｍ以下であることを特徴とする請求項２記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項5] 前記第１の磁性層は、磁化が互いに反平行になるよう、２つの磁性層が非磁性層を介して結合された反平行結合積層構造を有していることを特徴とする請求項１乃至４のいずれか１項に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項6] 前記第１の磁性層と前記第１の非磁性層との間に配置された、磁化方向が不変である第３の磁性層と、

前記第１の磁性層と前記第３の磁性層との間に配置された第２の非磁性層とを、

有することを特徴とする請求項１乃至５のいずれか１項に記載の磁

気抵抗効果素子。

[請求項7] 前記第２の磁性層は、互いに異なる材料から成る複数の磁性層を有することを特徴とする請求項１乃至６のいずれか１項に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項8] 前記第２の磁性層の前記厚さ方向に沿った側面に電界を印加可能に設けられた電界印加手段を有することを特徴とする請求項１乃至７のいずれか１項に記載の磁気抵抗効果素子。

[請求項9] 互いに平行に配置された複数のソース線と、

前記ソース線と交差する方向に、互いに平行に配置された複数のワード線と、

前記ソース線に平行に配置された複数のビット線と、

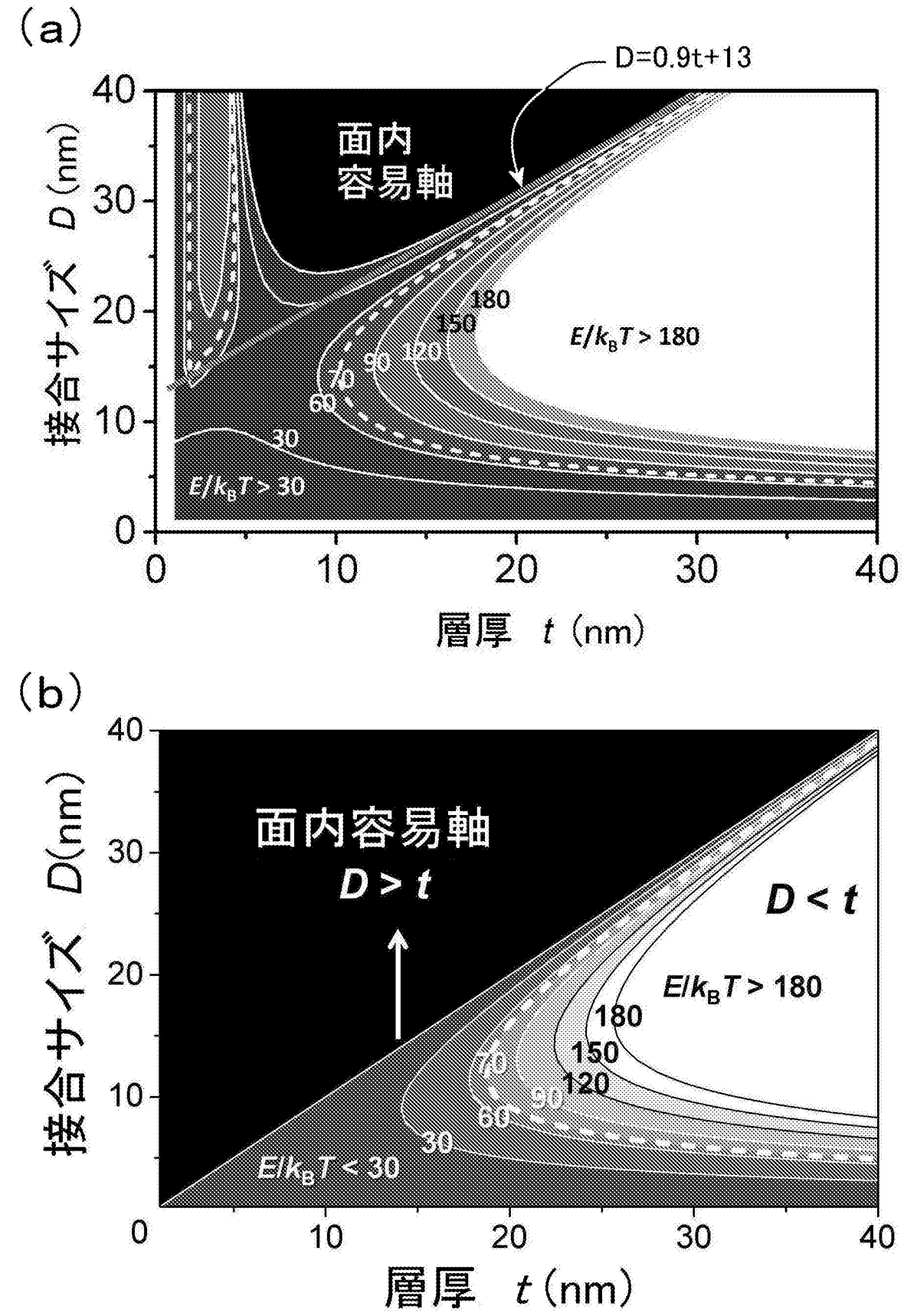
ゲート電極が前記ワード線に電気的に接続され、ソース電極が前記ソース線に電気的に接続された選択トランジスタと、

前記ビット線と前記ワード線とが交差する部分に配置され、前記第１の磁性層および前記第２の磁性層のいずれか一方が前記選択トランジスタのドレイン電極に電気的に接続され、他方が前記ビット線に電気的に接続された請求項１乃至８のいずれか１項に記載の磁気抵抗効果素子とを備え、

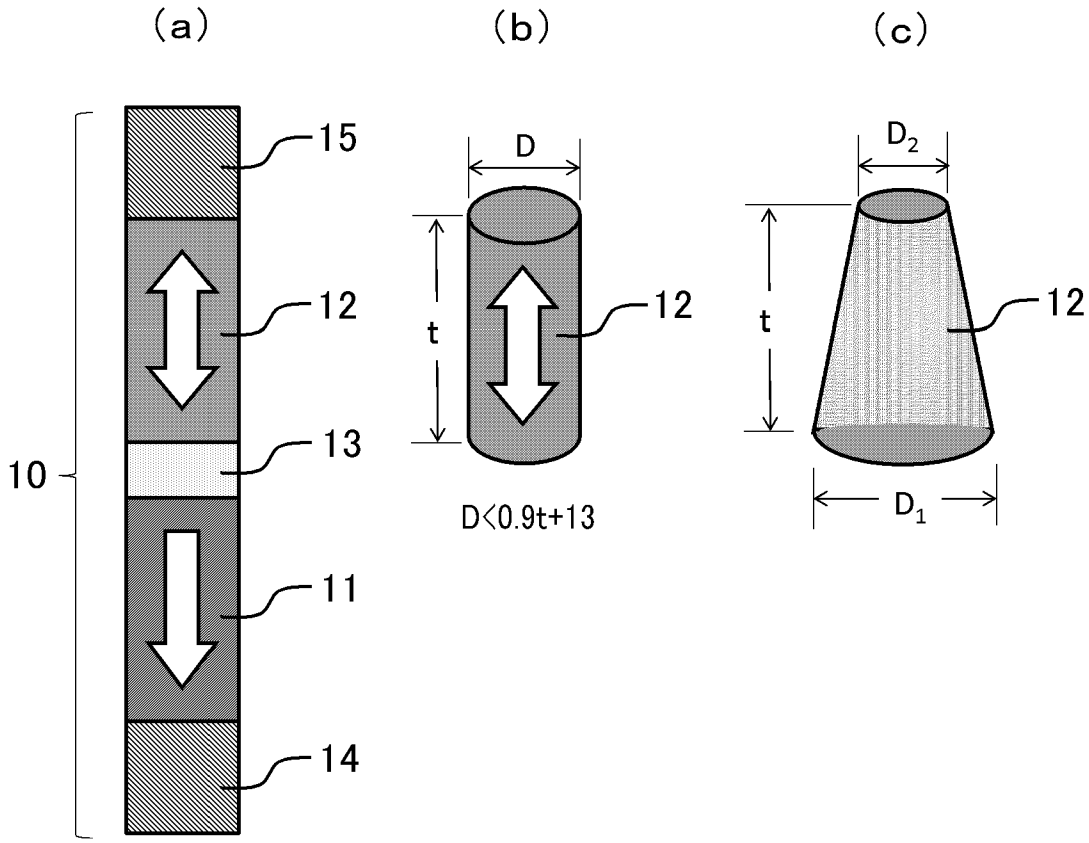
前記厚さ方向に沿って前記磁気抵抗効果素子に電流を印加可能に構成されていることを

特徴とする磁気メモリ。

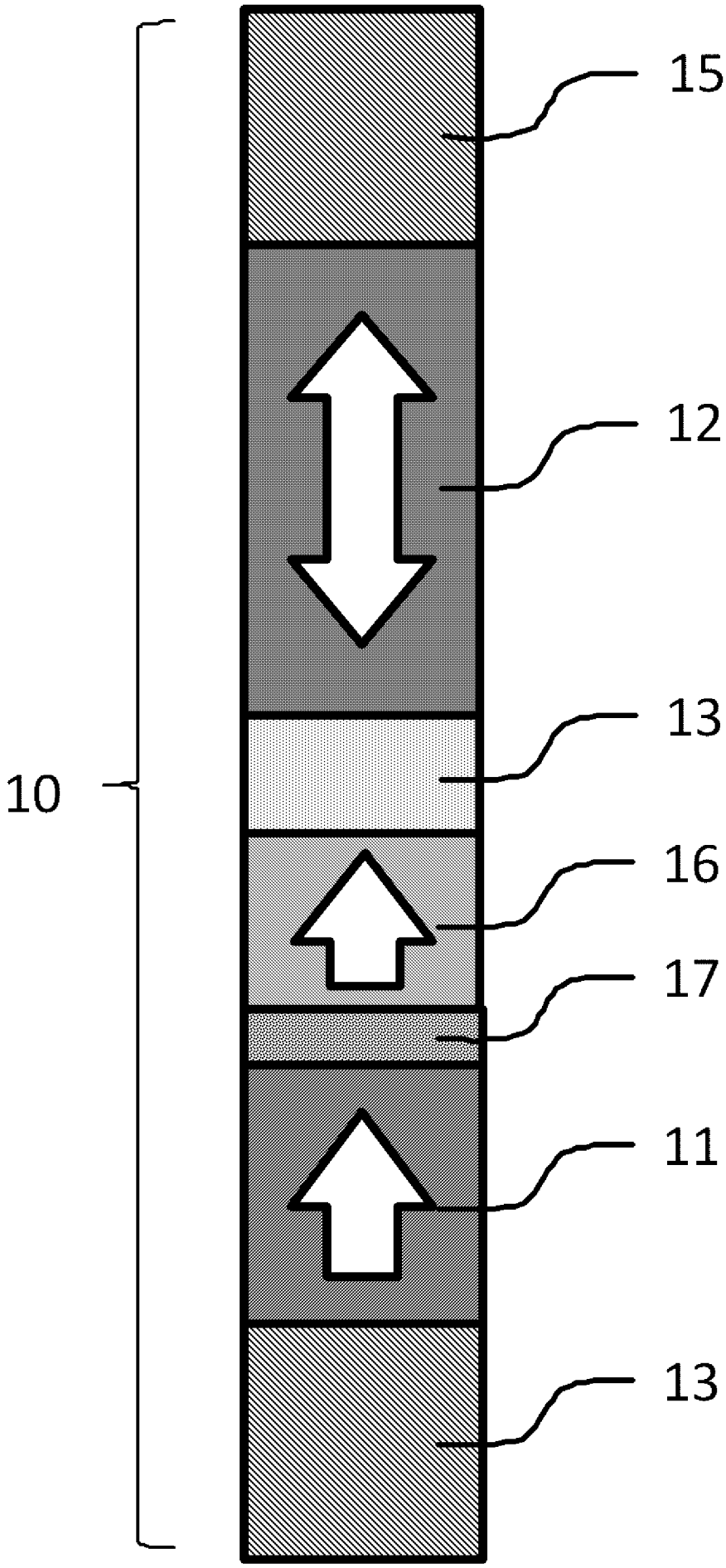
[図1]


(a)
D=0.9t+13
面内
容易軸
接合サイズ D(nm)
層厚 t (nm)
180
150
120
90
70
60
30
E/k_BT > 180
E/k_BT > 30
0
10
20
30
40
(b)
面内容易軸
D > t
D < t
E/k_BT > 180
E/k_BT < 30
接合サイズ D(nm)
層厚 t (nm)

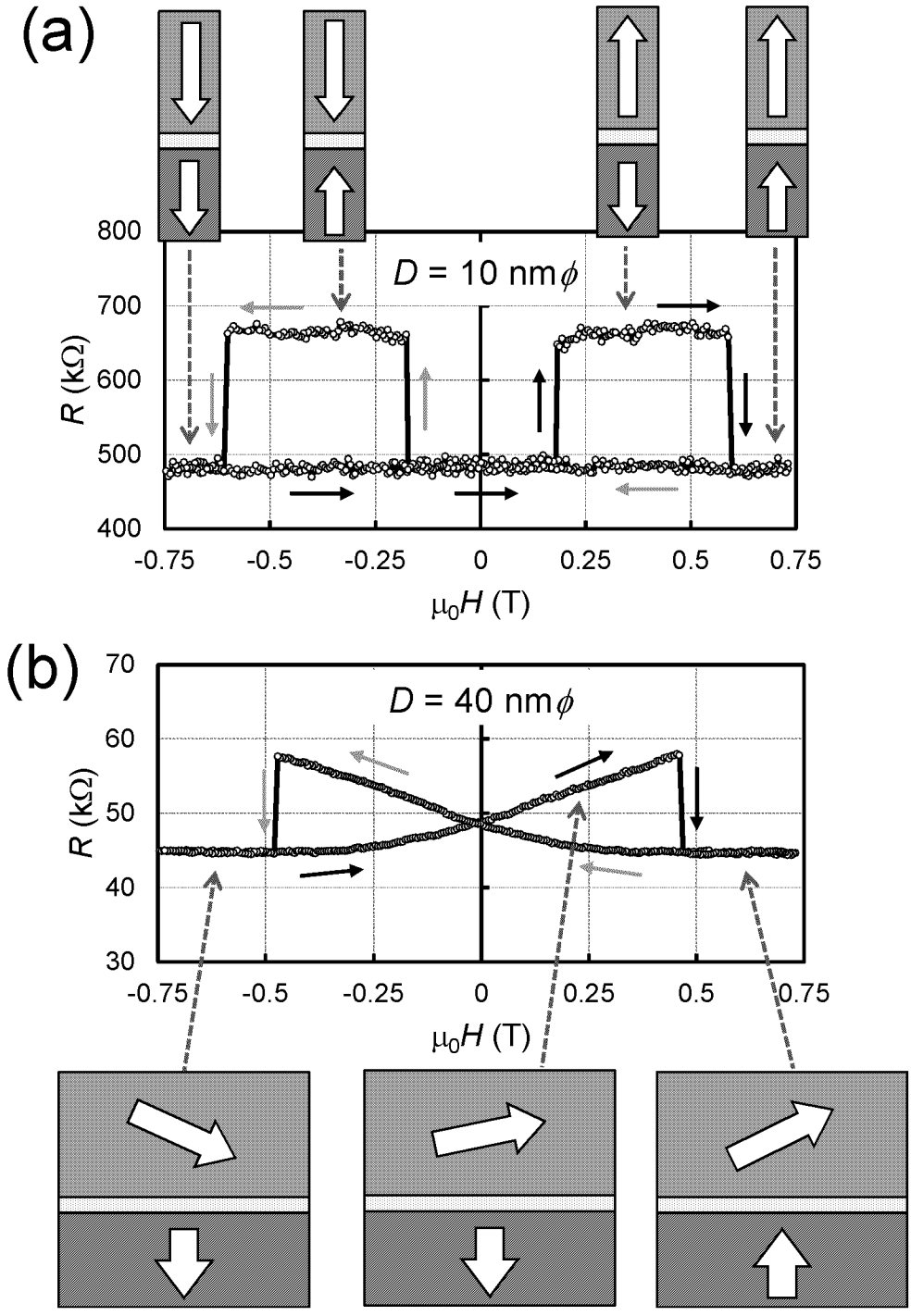
[図2]



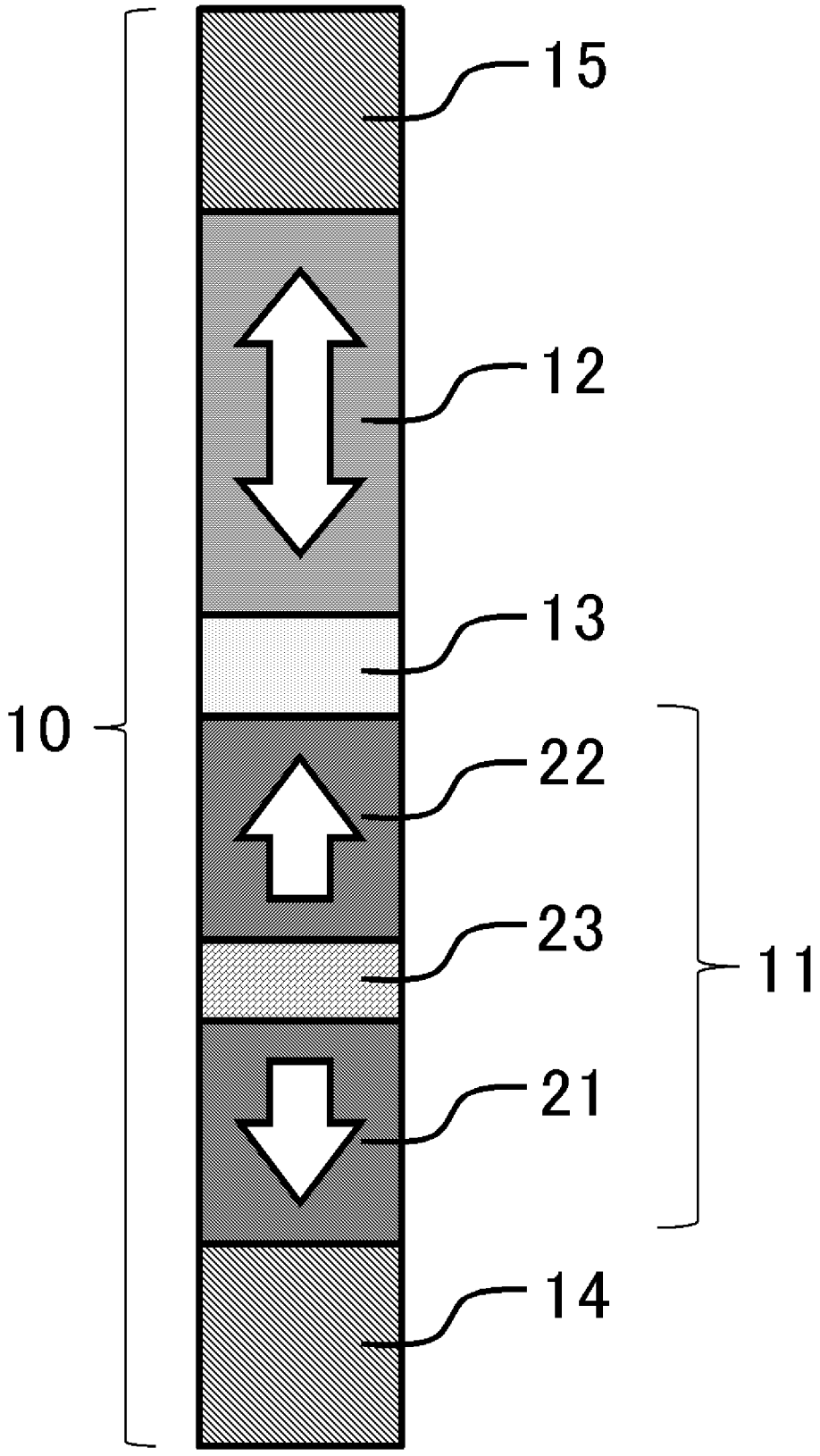
[図3]



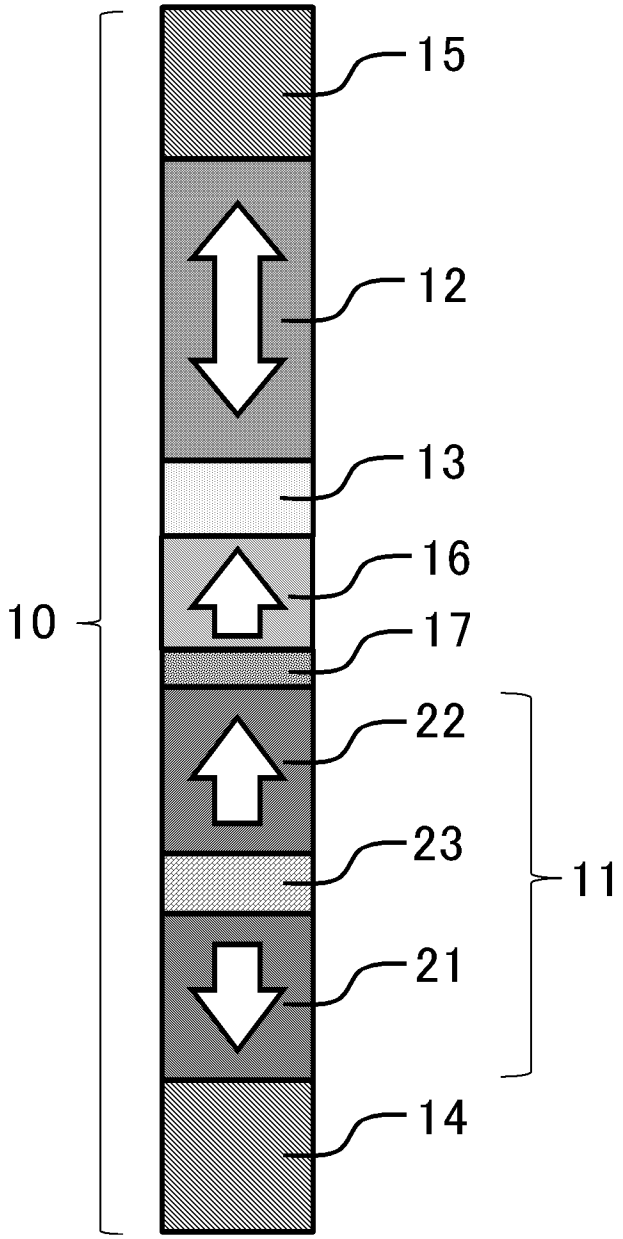
[図4]


(a)
D = 10 nmϕ
R (kΩ)
800
700
600
500
400
-0.75
-0.5
-0.25
0
0.25
0.5
0.75
μ0H (T)
(b)
D = 40 nmϕ
R (kΩ)
70
60
50
40
30
-0.75
-0.5
-0.25
0
0.25
0.5
0.75
μ0H (T)

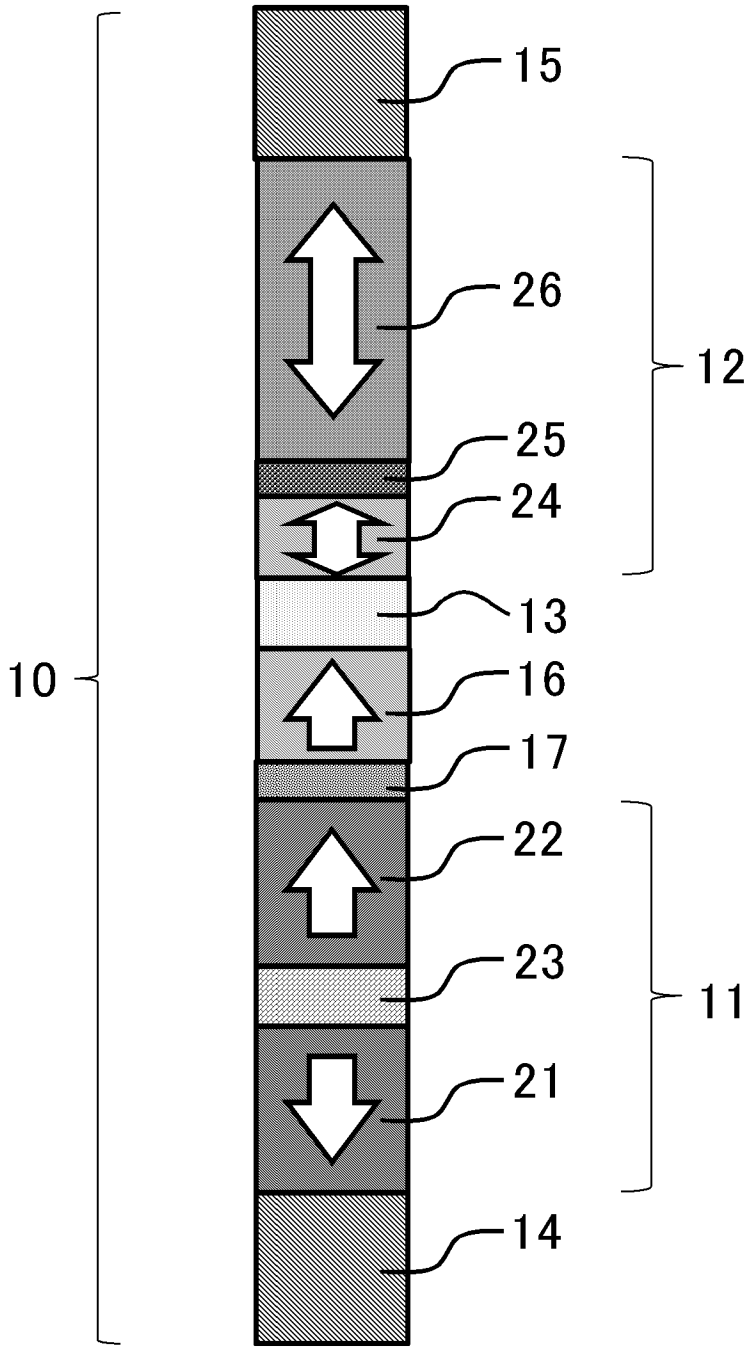
[図5]



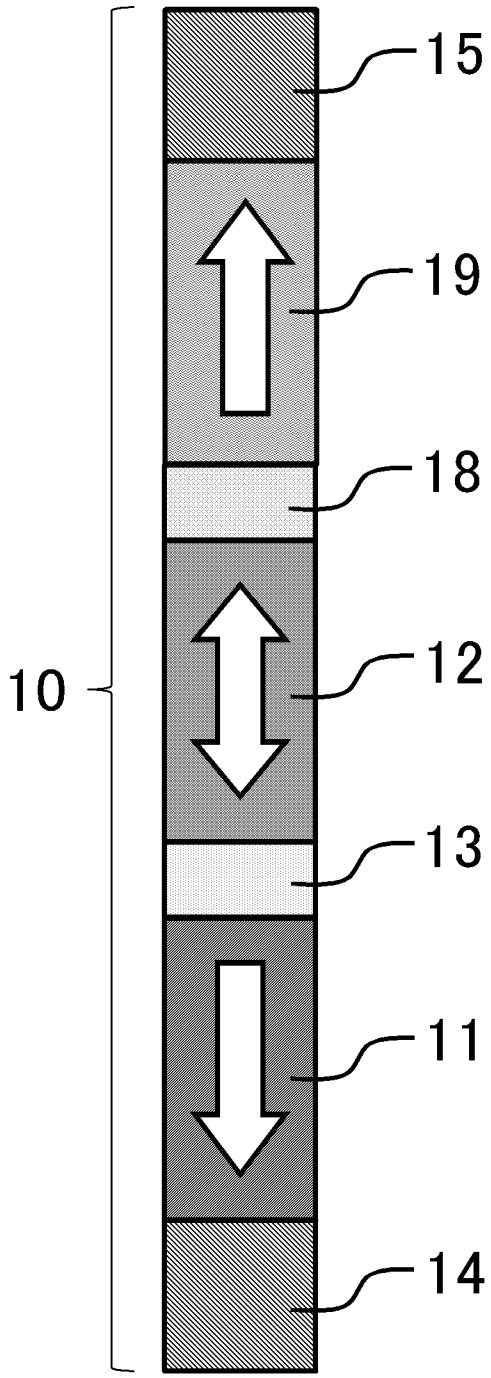
[図6]



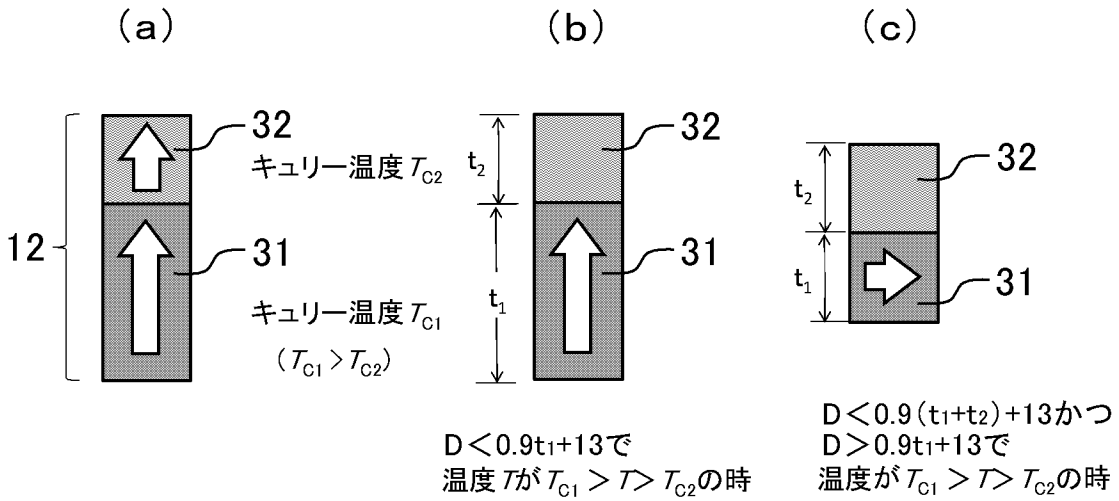
[図7]



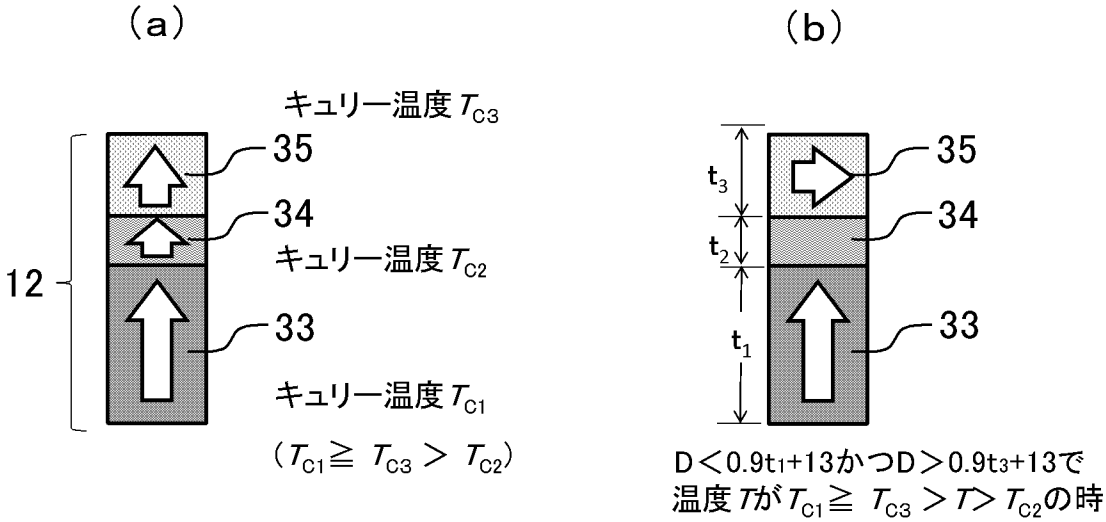
[図8]



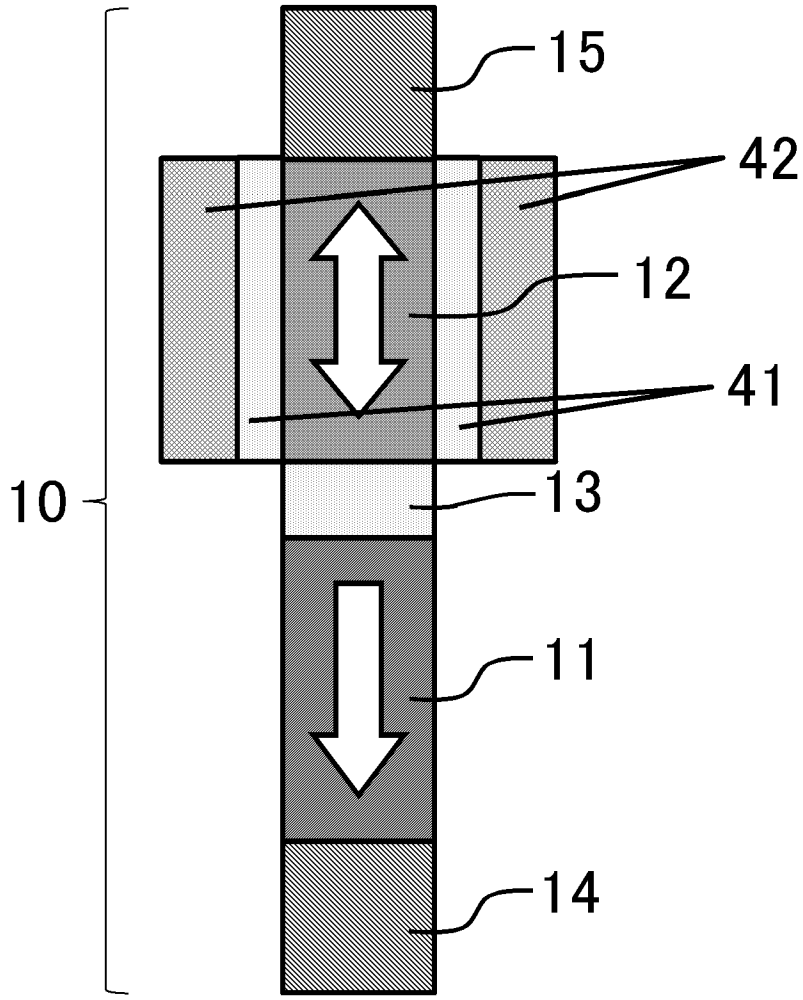
[図9]


(a)
(b)
(c)
12
32
キュリー温度 T_{C2}
31
キュリー温度 T_{C1}
($T_{C1} > T_{C2}$)
t_2
t_1
D＜0.9t_1+13で
温度 Tが $T_{C1} > T > T_{C2}$の時
D＜0.9(t_1+t_2)+13かつ
D＞0.9t_1+13で
温度が $T_{C1} > T > T_{C2}$の時

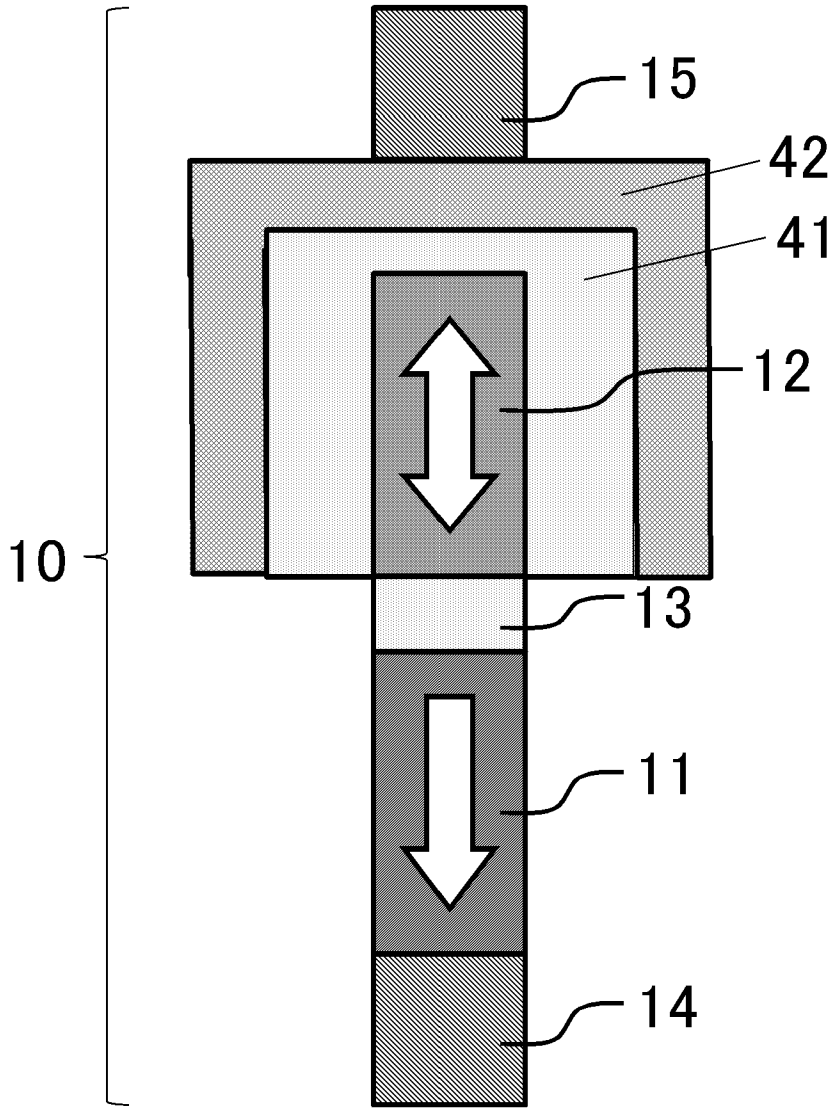
[図10]


(a)
(b)
キュリー温度 T_{C3}
35
34
キュリー温度 T_{C2}
12
33
キュリー温度 T_{C1}
($T_{C1} \geqq T_{C3} > T_{C2}$)
t_3
t_2
t_1
D＜0.9t_1+13かつD＞0.9t_3+13で
温度 Tが $T_{C1} \geqq T_{C3} > T > T_{C2}$の時

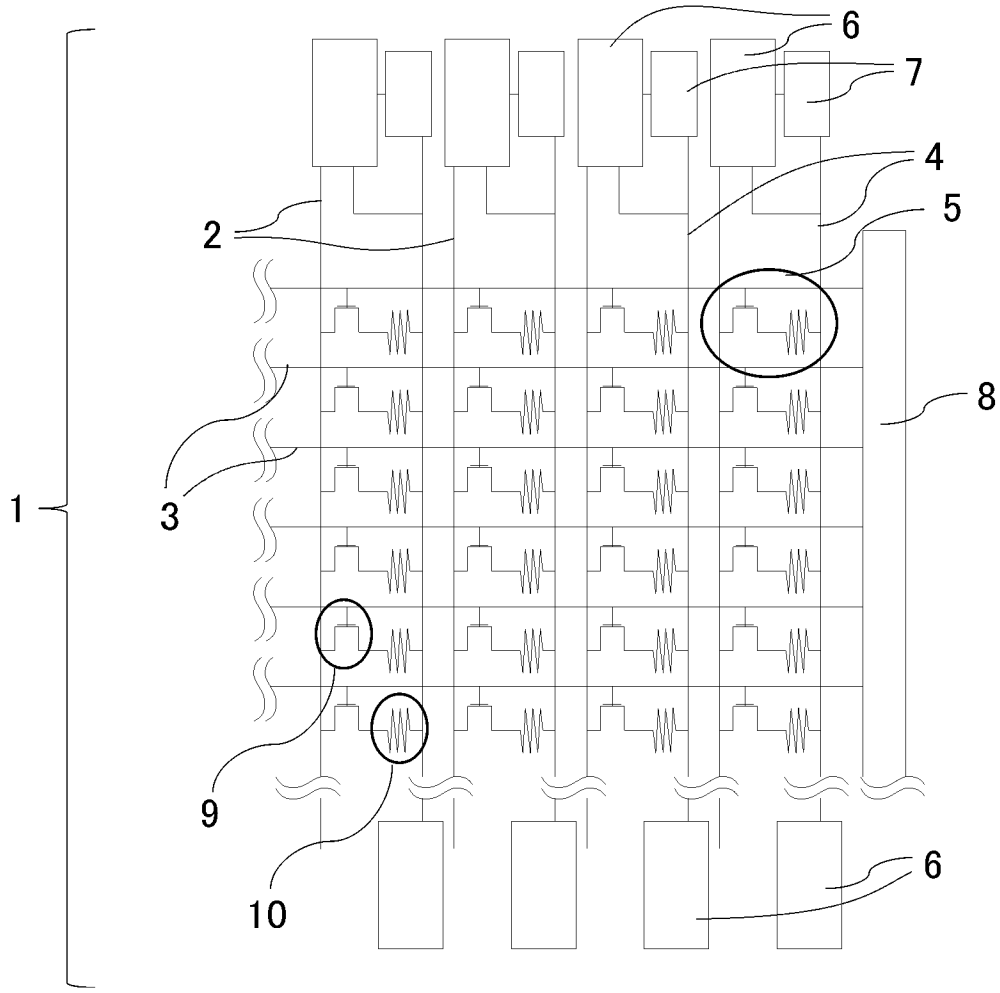
[図11]



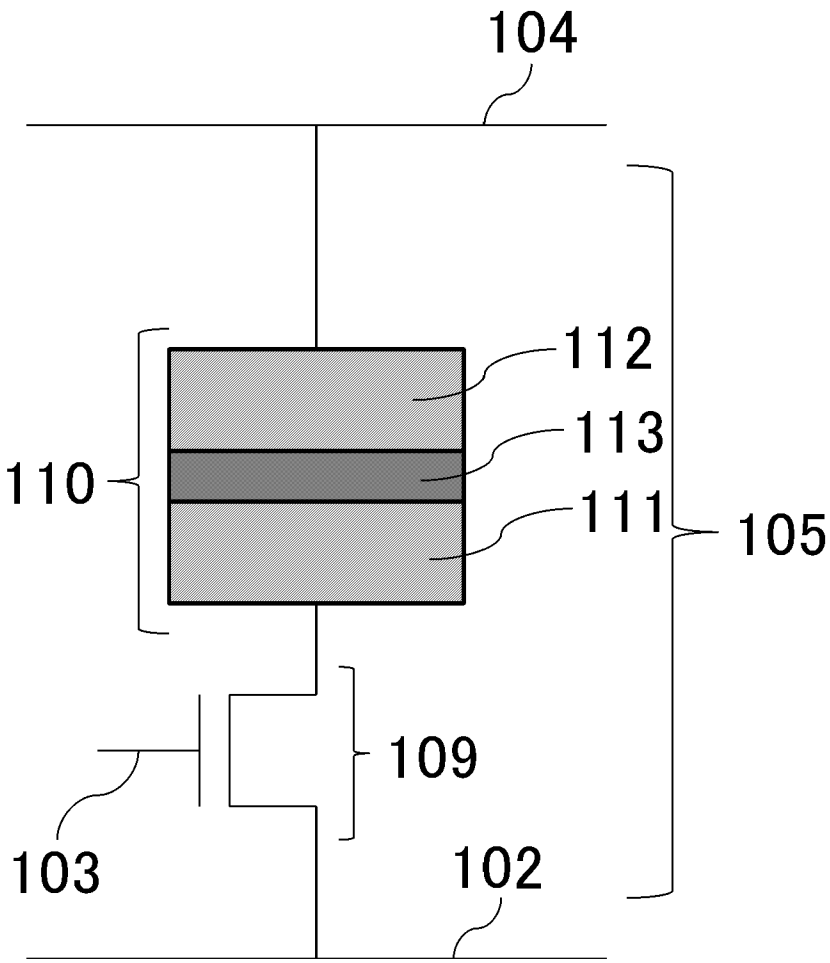
[図12]



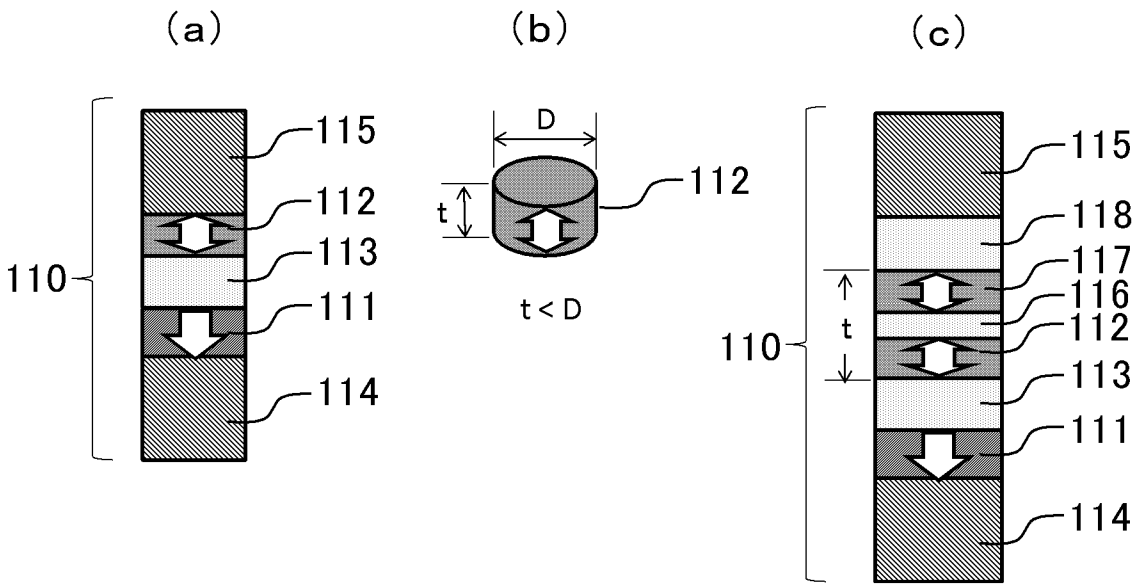
[図13]



[図14]


104
112
113
110
111
105
109
103
102

[図15]


(a)
(b)
(c)
115
112
113
110
111
114
D
t
112
t < D
115
118
117
116
t
112
110
113
111
114

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/JP2014/077816

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER
H01L43/08(2006.01)i, *G11C11/15*(2006.01)i, *H01L21/8246*(2006.01)i, *H01L27/105*(2006.01)i, *H01L29/82*(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)
H01L43/08, G11C11/15, H01L21/8246, H01L27/105, H01L29/82

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	1996-2014
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2014	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2014

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.
X Y A	JP 2012-195485 A (Toshiba Corp.), 11 October 2012 (11.10.2012), paragraphs [0164] to [0220]; fig. 1, 20 to 22 & US 2012/0236633 A1	1,3,9 5-8 2,4
Y A	WO 2009/107780 A1 (NEC Corp.), 03 September 2009 (03.09.2009), paragraphs [0017] to [0056]; fig. 1 to 7 (Family: none)	5-8 2,4
A	JP 2001-196661 A (Sony Corp.), 19 July 2001 (19.07.2001), entire text; all drawings & US 6480412 B1 & EP 1096500 A1 & DE 60021335 D	1-9

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

* Special categories of cited documents:
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date
"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)
"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
"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
"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
"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
"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search	Date of mailing of the international search report
01 December 2014 (01.12.14)	16 December 2014 (16.12.14)
Name and mailing address of the ISA/ Japan Patent Office Facsimile No.	Authorized officer Telephone No.

国際調査報告

国際出願番号　ＰＣＴ／ＪＰ２０１４／０７７８１６

Ａ．　発明の属する分野の分類（国際特許分類（ＩＰＣ））

Int.Cl.　H01L43/08(2006.01)i, G11C11/15(2006.01)i, H01L21/8246(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L29/82(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.　H01L43/08, G11C11/15, H01L21/8246, H01L27/105, H01L29/82

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	１９７１－２０１４年
日本国実用新案登録公報	１９９６－２０１４年
日本国登録実用新案公報	１９９４－２０１４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
X Y A	JP 2012-195485 A（株式会社東芝）2012.10.11, 【０１６４】－【０２２０】及び第１，２０－２２図 & US 2012/0236633 A1	1,3,9 5-8 2,4
Y A	WO 2009/107780 A1（日本電気株式会社）2009.09.03, 【００１７】－【００５６】及び第１－７図（ファミリーなし）	5-8 2,4
A	JP 2001-196661 A（ソニー株式会社）2001.07.19, 全文及び全図面 & US 6480412 B1 & EP 1096500 A1 & DE 60021335 D	1-9

☐　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	国際調査報告の発送日
０１．１２．２０１４	１６．１２．２０１４

国際調査機関の名称及びあて先
日本国特許庁（ＩＳＡ／ＪＰ）
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）　５Ｏ　３６５４
境　周一
電話番号　０３－３５８１－１１０１　内線　３５５９