

(43) 国際公開日
2007年2月8日 (08.02.2007)

PCT

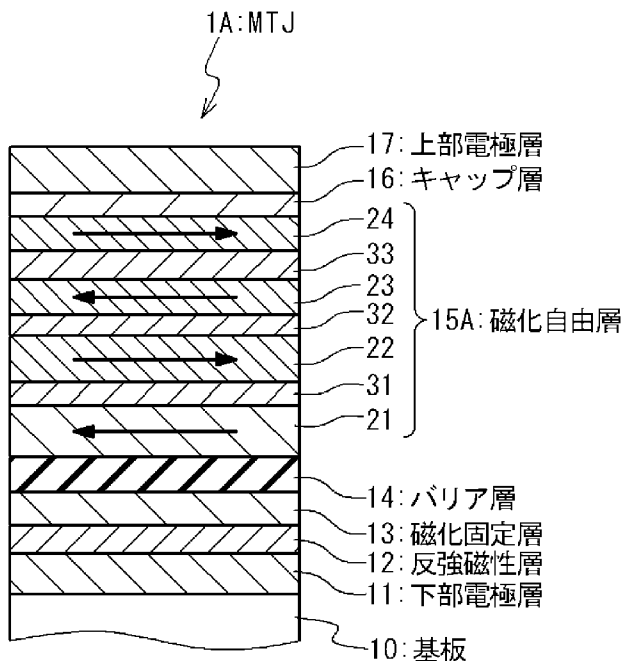
(10) 国際公開番号
WO 2007/015355 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 43/08 (2006.01) H01L 21/8246 (2006.01)
G11C 11/15 (2006.01) H01L 27/105 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2006/313847
- (22) 国際出願日: 2006年7月12日 (12.07.2006)
- (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2005-223625 2005年8月2日 (02.08.2005) JP
- (71) 出願人 (米国を除く全ての指定国について): 日本電気株式会社 (NEC CORPORATION) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人 (米国についてのみ): 福本 能之 (FUKU-MOTO, Yoshiyuki) [JP/JP]; 〒1088001 東京都港区芝五丁目7番1号 日本電気株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 工藤 実 (KUDOH, Minoru); 〒1400013 東京都品川区南大井六丁目2番10号カドヤビル6階 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, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, LY, MA, MD, MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY,

[続葉有]

(54) Title: MRAM

(54) 発明の名称: MRAM



10 SUBSTRATE
11 LOWER ELECTRODE LAYER
12 ANTIFERROMAGNETIC LAYER
13 MAGNETIZATION FIXED LAYER
14 BARRIER LAYER
15A MAGNETIZATION FREE LAYER
16 CAP LAYER
17 UPPER ELECTRODE LAYER

(57) Abstract: An MRAM has a reluctance element. A magnetization free layer of the reluctance element includes first through N-th ferromagnetic layers (N is 4 or an integer of 6 or above), and first through (N-1)-th nonmagnetic layers formed such that antiferromagnetic RKKY interaction occurs. The k-th nonmagnetic layer (k is an arbitrary integer between 1 and N-1) out of the first through (N-1)-th nonmagnetic layers is provided between the k-th ferromagnetic layer and the (k+1)-th ferromagnetic layer out of the first through N-th ferromagnetic layers. If the effective film thickness of the k-th ferromagnetic layer is t_k , its magnetization is M_k , and the anti-parallel coupling energy constant through the k-th nonmagnetic layer is J_k , $M_1 \times t_1$ is substantially equal to $M_2 \times t_2$ and $M_{N-1} \times t_{N-1}$ is substantially equal to $M_N \times t_N$. Furthermore, any one of following relations is satisfied: $M_1 \times t_1 > M_N \times t_N$ and $J_1 > J_{N-1}$, and $M_1 \times t_1 < M_N \times t_N$ and $J_1 < J_{N-1}$.

(57) 要約: 本発明に係るMRAMは、磁気抵抗素子を有する。その磁気抵抗素子の磁化自由層は、第1～第N強磁性層 (Nは4か、6以上の整数)、及び反強磁性的なRKKY相互作用を発現するように形成された第1～第N-1非磁性層とを含む。第1～第N-1非磁性層のうちの第k非磁性層 (kは、1以上N-1以下の任意の整数) は、第1～第N強磁性層のうちの第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の間に設けられる。第k強磁性層の実効膜厚を t_k 、磁化を M_k とする。また、第k非磁性層を介した反平行結合エネルギー一定数を J_k とする。この時、 $M_1 \times t_1$ と $M_2 \times t_2$ はほぼ等しく、且つ、

$M_{N-1} \times t_{N-1}$ と $M_N \times t_N$ はほぼ等しい。更に、次のいずれかの関係が満たされる: 「 $M_1 \times t_1 > M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 > J_{N-1}$ 」または「 $M_1 \times t_1 < M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 < J_{N-1}$ 」。

WO 2007/015355 A1



TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(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, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, NL, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR),

添付公開書類:

— 国際調査報告書

2文字コード及び他の略語については、定期発行される各PCTガゼットの巻頭に掲載されている「コードと略語のガイダンスノート」を参照。

明 細 書

MRAM

技術分野

- [0001] 本発明は、MRAM (Magnetic Random Access Memory) に関しており、特に、SAF (Synthetic Anti-Ferromagnet) を磁化自由層として使用する磁気抵抗素子をメモリセルとして使用するMRAMに関する。

背景技術

- [0002] MRAMは、高速書き込み／読み出しが可能な不揮発性メモリである。最も典型的には、MRAMは、磁化が反転可能な磁化自由層と、磁化が固定された磁化固定層と、その間に介設された非磁性層とで構成された磁気抵抗素子を、メモリセルとして利用する。データは、磁化自由層の磁化の向きとして記憶される。非磁性層が極めて薄い絶縁体で構成されている場合、磁気抵抗素子はTMR (Tunnel MagnetoResistance) 効果を示し、そのように構成された磁気抵抗素子は、しばしば、MTJ (Magnetic Tunnel Junction) 素子と呼ばれる。一方、非磁性層が非磁性の導電体で構成されている場合には、磁気抵抗素子はGMR (Giant MagnetoResistance) 効果を示し、そのように構成された磁気抵抗素子は、CPP-GMR (Current Perpendicular to Plane Giant MagnetoResistive) 素子と呼ばれる。
- [0003] データの書き込みは、磁化自由層に外部磁場を印加し、これにより磁化自由層の磁化を所望の方向に反転することによって行われる。一方、データの読み出しは、磁気抵抗素子が示す磁気抵抗効果を利用する。TMR効果、GMR効果のいずれを利用する場合でも、磁気抵抗素子の抵抗は、磁化自由層の磁化の向きに応じて変化する。磁気抵抗素子の抵抗の変化を利用して、磁化自由層の磁化の向き、即ち、書き込まれたデータが判別される。
- [0004] MRAMの一つの課題は、書き込み動作におけるメモリセルの選択性である。最もコンベンショナルなMRAMでは、磁化自由層の外部磁場に対する書き込み閾値曲線がアステロイド曲線となることを利用して書き込みが行われる。具体的には、各磁気抵抗素子の近傍に互いに直交するワード線、ビット線が設けられ、且つ、これらの書

き込み線は磁気抵抗素子の磁化自由層の容易軸、困難軸方向に延伸するように配置される。そして、選択されたメモリセルに交差するワード線、ビット線に電流が流され、発生した電流誘起磁場が同時にメモリセルに印加される。このときの合成磁場の大きさが、素子のもつ磁気異方性の大きさに決定する閾値曲線(アステロイド)の外側に達したとき、磁化自由層の磁化は容易軸方向に並行にて二つの向きのいずれかを向くように反転する。このとき対応するワード線、ビット線の一方にしか電流が流されていない非選択メモリセルの磁化が反転しない程度の書き込み電流値が設定される。実際のメモリセルにおいて書き込み磁場のばらつきが存在するので、このような方式による選択書き込みはメモリセルの選択性が良好ではない。最悪の場合、適切な選択電流値のマージンが存在しない場合も考えられ、誤書き込みを起こしやすくなる問題がある。

[0005] 書き込み動作時のメモリセル選択性を向上させるための一つの方法として、「トグル書き込み方式」が知られている(例えば、米国特許6, 545, 906号公報参照)。トグル書き込み方式とは、磁化自由層にSAFを使用し、書き込み磁場の方向を時系列で変化させる事により、選択性が高い書き込み動作を行う技術である;ここでSAFとは、複数の強磁性層を有し、隣接する強磁性層が磁氣的に反強磁性的に結合した構造体である。

[0006] 図1は、トグル書き込み方式を採用するMRAMの典型的な構成を示す平面図である。MRAMのメモリアレイには、ワード線103と、ワード線103に直交するビット線102が延設される。メモリセルとして使用されるMTJ素子101が、ワード線103とビット線102が交差する位置のそれぞれに設けられる。図2に示されるように、MTJ素子101は、典型的には、基板100の上方に設けられた下部電極層111、反強磁性層112、磁化固定層113、バリア層114、磁化自由層115、及び上部電極層116を備えている。図1に示されているように、MTJ素子101は、磁化固定層113と磁化自由層115の容易軸がワード線103及びビット線102と45°の角度をなすように、即ち、MTJ素子101の長手方向がワード線103及びビット線102と45°の角度をなすように配置される。

[0007] 図2を再度に参照して、磁化自由層115は、SAFで構成される。より具体的には、

磁化自由層115は、強磁性層121、122と、その間に介設された非磁性層123とを備えている。非磁性層123は、強磁性層121、122との間に、反強磁性的なRKKY(Rudermann, Kittel, Kasuya, Yoshida)相互作用を作用させるように構成される。非磁性層の材料及び膜厚を適切に選択することにより、上下に接合される強磁性層をRKKY相互作用によって反強磁性的に結合することができることは、当業者には周知である。

[0008] 図9は、RKKY相互作用による結合エネルギーの強さの非磁性層の膜厚に対する依存性を示すグラフである。ここでは、強磁性層121、122がNiFe膜で形成され、非磁性層123がRu膜で形成されているときのデータが示されている。図9中の J_{saf} は、「反平行結合エネルギー一定数」であり、SAF内の強磁性層の磁化を平行、或いは、反平行結合させている単位面積あたりのエネルギー(反強磁性結合エネルギー)を示している。強磁性層を反強磁性的に結合させる場合に結合エネルギーが正であると定義されていることに留意されたい。RKKY相互作用による結合エネルギー一定数 J_{saf} は、非磁性層の膜厚の増加と共に減衰振動し、ある範囲においては反強磁性的なRKKY相互作用が発現し、他の範囲においては、強磁性的なRKKY相互作用が発現する。ある特定の膜厚では、磁氣的相互作用が全く生じなくなる。非磁性層123の膜厚は、それらが反強磁性的なRKKY相互作用を発現するように選択される。磁化自由層115全体としての残留磁化(即ち、外部磁場が0である場合の磁化自由層115全体としての磁化)は可能な限り0に近づけられる。この条件は、例えば、2つの強磁性層121、122を同一の材料で、同一の磁氣的な体積を有するように形成することによって満足され得る。

[0009] トグル書き込み方式では、SAFの二つの強磁性体が、ほぼ等価な強磁性層で構成された場合に、SAFはスピンプロップを発現するという性質を利用して選択的なデータ書き込みが行われる。図3は、スピンプロップを発現する2層の強磁性層から構成されたSAFの磁化曲線を示している。SAFの容易軸方向に外部磁場が印加されても、その外部磁場が小さい場合にはSAFの磁化はゼロのままである。外部磁場が増加して磁場 H_{flop} に到達すると、突然、SAFに磁化が現れる。このとき、二つの強磁性層の磁化は、それらが 180° よりも小さいある角度をなすように磁気結合し、且つ、その

合成磁化が外部磁場の方向になるように配置される。この現象が「スピントロップ」と呼ばれ、スピントロップが発現する磁場 H_{flop} は「フロップ磁場」と呼ばれる。スピントロップは、全体としてのSAFの残留磁化が十分に小さい場合にのみ現れることに留意されたい。さらに外部磁場が増加すると、やがて二つの強磁性層の磁化は完全に平行に配置される。この磁場は「飽和磁場 H_s 」と呼ばれる。

[0010] 飽和磁場 H_s は、以下の式で表される:

$$H_s = 2J_{\text{saf}} / (M \cdot t) - 2K / M = H_j - H_k \quad \dots (1)$$

$$H_j = 2J_{\text{saf}} / (M \cdot t) \quad \dots (2)$$

$$H_k = 2K / M \quad \dots (3)$$

[0011] ここで、 H_k は「異方性磁場」であり、 K は「異方性エネルギー」である。 J_{saf} は前述の通り「反平行結合エネルギー定数」で、正値をとる。二つの強磁性層の磁化相対角度が θ である時、この反平行結合に起因したエネルギーは $J_{\text{saf}} \cos \theta$ で表される。反平行結合に起因したエネルギーは、反平行配置である $\theta = 180$ 度において $-J_{\text{saf}}$ と最も小さくなり、その場合にSAFは最も安定になる。 H_j は「反平行結合磁場」であり、反平行結合エネルギーによって反平行配置に結合した強磁性層の磁化同士が、平行配置となるまでに抗し得ることが可能な外部磁場値に相当する。言い換えると、反平行結合磁場 H_j は、SAFが有する反平行結合力を磁場に換算した量である。

[0012] また、フロップ磁場 H_{flop} は、上述の飽和磁場 H_s と異方性磁場 H_k を用いることにより、以下のように表される:

$$H_{\text{flop}} = 2 / M [K (J_{\text{saf}} / t - K)]^{0.5} \quad \dots (4a)$$

$$= (H_s \cdot H_k)^{0.5} \quad \dots (4b)$$

$$= [(H_j - H_k) \cdot H_k]^{0.5} \quad \dots (4c)$$

$$= [(2J_{\text{saf}} / (M \cdot t) - H_k) \cdot H_k]^{0.5} \quad \dots (4d)$$

[0013] 図4は、トグル書き込み方法の手順を説明する概念図であり、図5はトグル書き込みによるデータ書き込みが行われるときのワード線103、ビット線102に流される電流の波形を示すグラフである。図4において、磁化自由層115の強磁性層121、122の磁化が、それぞれ、記号 M_1 、 M_2 によって参照されていることに留意されたい。

[0014] トグル書き込み方式によるデータ書き込みは、磁化自由層115に印加される磁場の

方向を面内で回転させ、強磁性層121、122の磁化を所望の向きに向けることによって行われる。具体的には、まず、ワード線103に書き込み電流が流され、これによってワード線103に垂直な方向に磁場 H_{WL} が発生する(時刻 t_1)。続いて、ワード線103に書き込み電流が流されたまま、ビット線102に書き込み電流が流される(時刻 t_2)。これにより、ワード線103とビット線102との両方に 45° の角度をなす方向に、磁場 $H_{WL} + H_{BL}$ が発生する。更に続いて、ビット線に書き込み電流が流されたままワード線への書き込み電流の供給が停止される(時刻 t_3)。これにより、ビット線102に垂直な方向(即ち、ワード線103に平行な方向)に磁場 H_{BL} が発生する。このような手順でワード線103及びビット線102に書き込み電流が流されることにより、磁化自由層115に印加される磁場が回転し、これにより、強磁性層121、122の磁化を 180° 回転させることができる。

[0015] トグル書き込み方式では、ワード線103及びビット線102に書き込み電流が流されたときに磁化自由層115に印加される磁場が、上述のフロップ磁場 H_{flop} よりも大きく、飽和磁場 H_s よりも小さくなければならない。そうでなければ、SAFはスピnofロップを示さないので、トグル書き込みを行うことができない。

[0016] トグル書き込み方式の利点は、原理的にメモリセルの選択性が高いことである。ビット線とワード線による書き込み電流磁場 H_{WL} 、 H_{BL} に対する磁化反転モードが、図6に示されている。図6に示されているように、トグル書き込み方式によれば、ワード線103又はビット線102の一方にのみ書き込み電流が流された場合、SAFの磁化は原理的に反転しない(No Switching)。言い換えれば、半選択メモリセルの磁化は、原理的に不所望に反転しない。このことは、MRAMの書き込み選択性と信頼性を有効に向上させる。トグル反転領域(Toggle Switching)に対応する外部磁場が磁化自由層115に印加される場合、SAFはスピnofロップを示し、トグル書き込みが行われる。

[0017] さらに図6に示されるように、トグル反転領域の原点側に隣接する「ダイレクト反転領域(Direct Switching)」が存在する。ダイレクト反転モードでは、スピnofロップによるトグル書き込み反転が行われない。その代わりに、磁化自由層115の磁化が、磁化固定層113の磁化に対して、反平行もしくは平行配置のいずれかに直接反転する。

トグル書き込みでは、このようなダイレクト反転領域に、書き込み磁場が入ることを避けなければならない。もし書き込み磁場がダイレクト反転領域に入ると、不所望な磁化の向きへの強制的な磁化反転が生じ、誤書き込みが発生する。

[0018] このダイレクト反転領域は、磁化自由層115に含まれる強磁性層121、122が、磁氣的に等価でないことに起因して発生する。例えば、ダイレクト反転領域は、強磁性層121、122の磁化量の差に依存して生じると言われている。どちらか一方の強磁性層の磁化量が大きいほど、図6におけるダイレクト反転領域は広がり、トグル反転領域が減少する。ダイレクト反転領域が広がると、トグル反転が始まる閾値が高磁場側へシフトする。これは、書き込み磁場の増大と、書き込み磁場のマージンの減少を招き、問題である。従って、強磁性層121、122の磁化量の差を可能な限り小さくし、ダイレクト反転領域を縮小しなければならないと言われている。

[0019] ダイレクト反転領域を低減することは、トグル書き込み方式のMRAMを開発する上で最重要課題の一つである。

[0020] さて、SAFは様々な文献に記載されている。磁化自由層のSAFに含まれる強磁性層の数は、3以上であってもよい。そのような構造を有するSAFは、以下「多層SAF」と参照される。多層SAFに関連する従来技術として、次のものが知られている。

[0021] 米国特許6, 545, 906号に開示された技術によれば、SAFに含まれる強磁性層の数は3以上であって、且つ、SAFの残留磁化が飽和磁化の10%以内となるように構成されている。

[0022] 米国特許6, 714, 446号に開示された構成によれば、SAFに含まれる強磁性層の数が4である。また、1層目の強磁性層と2層目の強磁性層との間の反強磁性結合に関する飽和磁場や、3層目の強磁性層と4層目の強磁性層との間の反強磁性結合に関する飽和磁場と比較して、2層目の強磁性層と3層目の強磁性層との間の反強磁性結合に関する飽和磁場が小さい。

[0023] 特開2002-151758号に開示された技術によれば、熱揺らぎに対する安定性を高めるために、SAFは少なくとも5層以上の積層構造を有している。

[0024] 特開2005-85951号に開示された技術によれば、多層SAFは、非磁性層により分割された複数層の磁性層から成る。偶数番目の磁性層の磁化量の総和と、奇数

番目の磁性層の磁化量の総和とがほぼ等しい。

[0025] 特開2005-86015号に開示された構成によれば、磁化自由層のSAFに含まれる強磁性層の数が4である。また、1層目の強磁性層と2層目の強磁性層との間の反強磁性的な相互作用の強さが、3層目の強磁性層と4層目の強磁性層との間の反強磁性的な相互作用の強さとほぼ等しい。且つ、1層目の強磁性層と4層目の強磁性層の磁化量がほぼ等しく、2層目の強磁性層と3層目の強磁性層の磁化量がほぼ等しい。更に、磁化自由層のSAFに含まれる強磁性層の数が4層以上の偶数であり、各強磁性層の膜厚が上下方向にほぼ対称である構成も開示されている。

[0026] しかしながら、発明者の実験によれば、米国特許6,545,906号に従って多層SAFを実際に作製しても、それだけでは良好に動作することは殆ど無かった。殆どの磁化自由層は、全ての印加磁場に対して全くトグル動作を示さなかった。一部動作するような構成が得られたとしても、動作率が低い問題が存在する。また、多層SAFの動作マージン内の書き込み磁場が印加されたとき、一見すると良好に動作しているように見える素子についても、或る特定の印加磁場に対してはトグル動作を示さない場合があることも判明した。そのような素子は不良素子である。これらは通常の2層からなるSAFには見られなかった現象である。

[0027] また、特開2005-86015号に従って多層SAFを実際に作製するために、第1強磁性層と第2強磁性層の間の非磁性層と、第3強磁性層と第4強磁性層の間の非磁性層の材料、膜厚が等しく設定されても、やはり、トグル書き込み方式で動作することは少なかった。

[0028] 上述の通り、ダイレクト反転領域は、強磁性層の磁化量の差に依存して生じると言われてきた。強磁性層の磁化量とは、その強磁性層のうち実効的に磁化が含まれる体積(以下、「磁気体積 V 」と参照される)と、その強磁性層の磁化 M の積で定義される(磁化量=磁気体積 $V \times$ 磁化 M)。磁気体積 V を磁化自由層の平均面積で割った値は、実効的に磁化が含まれる膜厚であり、「実効膜厚 t 」と参照される。強磁性層の磁化 M と実効膜厚 t の積は、「磁化膜厚積」と参照される(磁化膜厚積=磁化 $M \times$ 実効膜厚 t)。磁化膜厚積は、単位面積あたりの磁化量であると言える。

[0029] ダイレクト領域を低減するために、実デバイスのSAF内の各強磁性層の磁化量を

調整する場合、同一の磁気体積を実現することは難しい。なぜならば、各強磁性層が接する非磁性層の材料に依存して、デッドレイヤーが形成されるからである。デッドレイヤーとは、強磁性層と非磁性層との界面周辺において、拡散などによりある程度の磁化が消失する領域である。このデッドレイヤーによって、各強磁性層の磁気体積が異なってしまうのである。また、加工プロセスで磁化自由層を加工する際、その側面を完全に垂直に加工することは困難である。例えば接合部側壁に傾斜が生じた場合、成膜時にたとえ同じ膜厚を有する強磁性層が形成されたとしても、各強磁性層の実効的な磁気体積が異なってしまう。

[0030] また、実デバイスの磁化自由層内では、残留磁化状態において、磁化が反平行を向いている強磁性層同士の膜質を可能な限り等価にすることが望ましい。例えば強磁性層の結晶配向性が異なると、結晶磁気異方性磁場や磁歪定数など強磁性層自身が持つ磁気特性が異なる。その結果、スピントロニクスで対となる強磁性層同士の磁気特性に差が生じてしまう。スピントロニクスで対となる強磁性層同士の磁気特性、例えば磁気異方性に差が生じ、磁氣的なエネルギーが等価でなくなると、ダイレクト反転領域が発生しやすくなる。更に、このような強磁性層の磁気特性の不均一性は、フロップ磁場や飽和磁場などの磁化反転特性のばらつきの発生要因となり得る。

[0031] 通常の2つの強磁性層からなるSAFでは、実デバイスにおけるこれらの問題はまだ深刻ではない。なぜならば、強磁性層の数は2であり、非磁性層を介して常に隣接しているため、これらの強磁性層同士は膜質的にも非常に近いからである。また、上述の接合部側壁部の加工形状などによる磁気体積の差に関しても、大きな差は生じにくい。万が一磁気体積に差が生じたとしても、一方の強磁性層の膜厚を固定し、もう一方の強磁性層の膜厚などを微調整すれば、ダイレクト反転領域を大幅に低減させることが可能である。

[0032] それに対して、多層SAFでは、実デバイスにおけるこれらの問題は深刻である。なぜならば、磁化自由層中で磁気体積を調整すべき層が3層以上であり、その総膜厚も厚くなるからである。本発明者らの実験によれば、多層SAF中では最下部と最上部でその結晶性に大きな差が生じた。特に、非磁性層の膜質とその反平行結合力に大きな差が生じた。実際に多層SAFを作製しようとする、成膜時においてすでに各

強磁性層や非磁性層の特性に差が生じてしまうことに加えて、接合部側壁部の加工形状による磁気体積の差も生じる。さらに2層のSAFのように、ある一層の強磁性層の体積のみを微調整してもダイレクト領域を低減できる保障はない。実際にどの強磁性層がどのような状態になっているのか把握することは困難である。

[0033] 特開2005-86015号で開示された4層からなる、(あるいはそれ以上の層からなる、)多層SAFは、このような多層SAFの困難性を多く内包している。その文献中で指摘されているように、残留磁化状態で、その磁気量が等しく、且つ、磁化が反平行を向いている強磁性層の組は、1層目の強磁性層と4層目の強磁性層の組と、2層目の強磁性層と3層目の強磁性層の組である。しかし、このような構造では、実デバイスにおいて、1層目の強磁性層と4層目の強磁性層という最も離れた強磁性層同士を常に等価にしなければならない。よって、加工により不可避に生じる体積差や、膜質が異なることによる磁気特性の差は深刻である。このことは、さらに微小なMTJに対応する上で、熱擾乱耐性を増すために強磁性層の層数が更に増加した時に、一層深刻になる。なぜならば、磁気特性の等価性が要求される強磁性層同士が、さらに離れて配置され、かつ、複数となるからである。

[0034] このように従来の多層SAFを実デバイス化してMRAMに適応させようとする、多層SAF内の強磁性層の磁気特性の差に起因したダイレクト領域の増大や反平行結合力の制御が困難となる問題が生じる。これらは不良素子の発生によるMRAMの動作率の低下(マイノリティビットエラーの発生)を招く。また、ダイレクト反転領域の増大やフロップ磁場のばらつきの増大は、書き込み電流値の増大を招く。これらはMRAM開発の上で深刻な問題である。

[0035] トグル書き込み方式に限らず、スピントロニクス特性を向上させることは、多層SAFを磁化自由層として使用するMRAMの性能を向上させる上で重要である。言い換えれば、多層SAFを磁化自由層として用いるMRAMにおいて、大きな飽和磁場 H_s を維持しつつフロップ磁場 H_{flop} を低減することは、書き込み磁場(反転磁場)の低減という観点から重要である。反転磁場の減少により書き込み電流は低減され、それはMRAMの高性能化につながる。また、SAFの反転磁場の減少は、電流誘起磁場を用いる書き込み方式に留まらず、SAFにスピン偏極電流(spin-polarized current)を供

給することにより磁化反転を起こす「スピン注入 (spin transfer) 方式」においても同様に、書き込み電流の低減につながるため重要である。

- [0036] 多層SAFを磁化自由層として用いるMRAMを歩留まりよく動作させることができることができる技術が望まれている。

発明の開示

- [0037] 従って、本発明の目的は、MRAMの動作率を向上させることができる多層SAFを提供することにある。また、本発明の目的は、その多層SAFを磁化自由層として用い、不良ビットが低減されたMRAMを提供することにある。
- [0038] 本発明の他の目的は、実デバイス上での磁気特性の制御性を容易にすることができる多層SAFを提供することにある。また、本発明の目的は、その多層SAFを磁化自由層として用い、書き込み特性が向上したMRAMを提供することにある。
- [0039] 本発明の更に他の目的は、MRAMの書き込みマージンを増大させることができる技術を提供することにある。
- [0040] 本願発明者は、実験を通して、多層SAFを歩留まりよく動作させる上で本質的に重要な点を究明した。それは、多層SAF中の最上部と最下部の非磁性層を介した反平行結合を、外部磁場に対して同時に解けるように設定することである。例えば従来指摘されてきたような、多層SAF内の各強磁性層の磁化量などの配分は本質的な点ではない。一般に、最上層と最下層の強磁性層に関しては、反平行結合を発現する非磁性層との結合が一つのみである。そのため、最上層と最下層の強磁性層に対する反平行結合は、外部磁場に対して不安定であり、最も外れやすくなる。このとき、最上層と最下層の強磁性層に対する反平行結合が同時に外れず、片方だけの反平行結合が外れると、外れた部分のSAF強磁性層対はただちに平行配置となり、多層SAF全体に大きな残留磁化が生じる。そして、残留磁化が大きい状態で次に弱い反平行結合が外れたときは、もはや、スピントロポットを起こしづらい状態になっている。本願発明者は、このことが動作率低下の原因の一つであることを究明した。最上部と最下部の非磁性層を介した反平行結合を同時に解けるようにすればよいことがわかると、従来構造が内包する問題を回避あるいは低減できるような新たな構造が可能となる。

[0041] 本発明に係るMRAMは、基板と磁気抵抗素子を備える。磁気抵抗素子は、固定された磁化を有する磁化固定層と、反転可能な磁化を有する磁化自由層と、磁化固定層と磁化自由層との間に介設され磁気抵抗効果を発現する非磁性層とを備える。磁化自由層は、第1～第N強磁性層(Nは4か、6以上の整数)、及び反強磁性的なRKKY相互作用を発現するように形成された第1～第N-1非磁性層とを含む。第1～第N-1非磁性層のうちの第k非磁性層(kは、1以上N-1以下の任意の整数)は、第1～第N強磁性層のうちの第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の間に設けられる。第1非磁性層は、第1～第N-1非磁性層のうちで基板に最も近く位置し、且つ、第N-1非磁性層は、第1～第N-1非磁性層のうちで基板から最も離れて位置する。

[0042] 第k強磁性層の体積(磁化体積)が V_k 、その磁化が M_k と表される。その体積 V_k を磁化自由層の平面方向の平均面積で割った値が、第k強磁性層の実効膜厚 t_k である。第k非磁性層を介した第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の磁化の向きの相対角度は θ_k で表される。第k非磁性層を介した第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の全反平行結合エネルギーは、正の値を持つ反平行結合エネルギー定数 J_k を用いて、 $J_k \cos \theta_k$ で表される。

[0043] 本発明によれば、 $M_1 \times t_1$ と $M_2 \times t_2$ はほぼ等しく、且つ、 $M_{N-1} \times t_{N-1}$ と $M_N \times t_N$ はほぼ等しい。更に、次のいずれかの関係が満たされる：

$$(A) M_1 \times t_1 > M_N \times t_N, \text{ 且つ、} J_1 > J_{N-1}$$

$$(B) M_1 \times t_1 < M_N \times t_N, \text{ 且つ、} J_1 < J_{N-1}$$

ここでパラメータ $M_k \times t_k$ が、第k強磁性層の磁化膜厚積である。

[0044] また、上記N=4であると好適である。その場合、磁化自由層の積層数が最も少なく、かつ、書き込みマージンが増大するという効果が得られる。その効果は、発明者によって、実デバイスにおいて実証されている。

[0045] また、本発明において、N層の強磁性層を含む磁化自由層であって、Nが3以上の奇数である磁化自由層も提供される。その場合、 $M_1 \times t_1$ と $M_N \times t_N$ の和が $M_{(N+1)/2}$ にほぼ等しい。更に、次のいずれかの関係が満たされる：

$$(A) M_1 \times t_1 > M_N \times t_N, \text{ 且つ、} J_1 > J_{N-1}$$

$$(B) M_1 \times t_1 < M_N \times t_N, \text{ 且つ、} J_1 < J_{N-1}$$

ここでパラメータ $M_k \times t_k$ が、第k強磁性層の磁化膜厚積である。

[0046] これらの磁化自由層の残留磁化は、その飽和磁化の10%以内であることが、スピ
ンフロップ動作を実現する上で必要である。また、トグル書き込み方式のMRAMは、
ワード線と、ワード線に直交するビット線と、ワード線とビット線との交差位置に記憶素
子として配置された上述の磁気抵抗素子を有する。磁気抵抗素子の磁化自由層の
容易軸の方向は、ワード線又はビット線の延伸方向に対して45度方向に設定される
。

[0047] 本発明の磁化自由層を構成する上で最も重要な点は、第1強磁性層と、第N強磁
性層に関して、外部磁場に対して反平行結合が解け始める磁場をほぼ等しく設定す
ることである。つまり、第1強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場は、
前記第N強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場と実質的に等しい。

[0048] そのためには、最上部の最下部の強磁性層及び非磁性層に関して、 $J_1 / (M_1 \times t_1)$
)と $J_{N-1} / (M_N \times t_N)$ がほぼ等しいことが好適である。より定量的には、 $\{J_1 / (M_1 \times t_1)$
) $\} / \{J_{N-1} / (M_N \times t_N)\}$ の比は、0.8以上1.2以下であることが望ましい。

[0049] また、第1、2、N-1、N強磁性層の全異方性磁場が大きく異なる場合は、次の通り
である。第k非磁性層を介した第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の平均全異方性磁
場を Hk_k とする。この時、式4(d)を参照して、第1非磁性層を介したSAFのフロップ
磁場は、 $[\{2J_1 / (M_1 \times t_1) - Hk_1\} \times Hk_1]$ で与えられる。また、第N-1非磁性層を
介したSAFのフロップ磁場は、 $[\{2J_{N-1} / (M_N \times t_N) - Hk_{N-1}\} \times Hk_{N-1}]$ で与えられ
る。 $[\{2J_1 / (M_1 \times t_1) - Hk_1\} \times Hk_1]$ と $[\{2J_{N-1} / (M_N \times t_N) - Hk_{N-1}\} \times Hk_{N-1}]$ は
、ほぼ等しくなるように設定される。さらに定量的には、 $[\{2J_1 / (M_1 \times t_1) - Hk_1\} \times Hk_1]$
 $]/ [\{2J_{N-1} / (M_N \times t_N) - Hk_{N-1}\} \times Hk_{N-1}]$ は、0.8以上1.2以下であることが
望ましい。

[0050] 本発明の磁化自由層の構成によれば、最上部の強磁性層と、最下部の強磁性層
の磁化膜厚積を等価にしなくても良い($M_1 \times t_1 \neq M_N \times t_N$ 、 $J_1 \neq J_{N-1}$ 、 $[J_1 / (M_1 \times t_1)]$
 $\neq [J_{N-1} / (M_N \times t_N)]$)。そのため、多層SAF全体として、残留磁化状態で反平行
配置を取る磁性層同士の磁化膜厚積、さらには磁気エネルギーまでも等価にすること
が可能である。このことは、実デバイスにおいて非常に有利な点である。従来技術

の特開2005-86015号で開示された4層SAFでも同様に、 $[J_1 / (M_1 \times t_1)] \div [J_{N-1} / (M_N \times t_N)]$ が満たされる。しかしながら、必ず $M_1 \times t_1 \div M_N \times t_N$ 、 $J_1 \div J_{N-1}$ であるため、実デバイスにおいて、反平行配置を取る磁性層同士の磁化膜厚積、さらには磁気エネルギーまでも等価にすることが難しい。

[0051] 本発明に係る多層SAFの有利な点の一つは、残留磁化状態で反平行配置を取る強磁性層同士の磁化膜厚積や磁気エネルギーを等価にすることができることである。その有利な点をより引き出すことが可能である磁化自由層構成として、次のものが考えられる。すなわち、Nが4以上の偶数の場合、第kと第k+1の強磁性層(kは奇数)は、ほぼ同じ磁化膜厚積を有するように設定される。

[0052] また、Nが4以上の偶数の場合、反平行結合エネルギー一定数 J_k は、 $K=N/2$ の場合にもっとも大きくなるように設定されると好適である。その場合、飽和磁場をより増大することが可能である。より定量的には、第N/2非磁性層を介したSAFの反平行結合エネルギー一定数 $J_{N/2}$ と、最上部の第N-1非磁性層が有する反平行結合エネルギー一定数 J_{N-1} は、次のパラメータ $[J_{N/2} \{1 / (M_{N/2} \times t_{N/2}) + 1 / (M_{N/2+1} \times t_{N/2+1})\}] / [2J_{N-1} / (M_N \times t_N)]$ が大きくなるように設定される。そのパラメータは、1より大きく設定されると好適である。その比率が大きく設定されるほど、多層SAF磁化自由層の飽和磁場が延伸し、書き込みマージンが広がる。発明者の実験によれば、そのパラメータが4未満の範囲で効果が実証されている。また、実証はされていないがこれより大きな値も可能である。少なくとも、第1非磁性層を挟む第1強磁性層及び第2強磁性層からなるSAF部と、記第N-1非磁性層を挟む第N-1強磁性層及び第N強磁性層からなるSAF部の飽和磁場を、第N/2非磁性層をはさむ第N/2強磁性層と第(N/2+1)強磁性層のSAF部が外部磁場に対して外れ始める磁場よりも大きく設定すれば、多層SAF中のスピントロップが途切れることがないので好適である。最下部の第1非磁性層に関しても同様である。その場合、上記パラメータとして、 $[J_{N/2} \{1 / (M_{N/2} \times t_{N/2}) + 1 / (M_{N/2+1} \times t_{N/2+1})\}] / [2J_1 / (M_1 \times t_1)]$ が用いられる。

[0053] また、全てのN-1個の非磁性層に対してより好適には、最下層と最上層の非磁性層以外の反平行結合エネルギー一定数 J_k (kは1、N-1以外の値)は、最下層と最上層のそれ(J_1 または J_{N-1})と比較して同等以上の大きさに設定される。そのような構成の

場合、常に最下層と最上層の強磁性層が、外部磁場に対して最初に反転しやすくなるため、安定した磁化自由層の動作が実現される。

[0054] 本発明の磁化自由層の磁氣的構成を実現する上で好適な膜構成として、次が考えられる。第 k 非磁性層が有するRKKY相互作用の反強磁性ピークの次数を α_k とする。第1非磁性層は、RKKY相互作用の第 α_1 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有する。第 $N-1$ 非磁性層は、RKKY相互作用の第 α_{N-1} 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有する。 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 < \alpha_{N-1}$ の関係が満たされ、 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 > \alpha_{N-1}$ の関係が満たされる。好適には、 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N-1} = \alpha_1 + 1$ の関係が満たされ、 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 = \alpha_{N-1} + 1$ の関係が満たされる。より具体的には、 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、第1非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、第 $N-1$ 非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成されると好適である。 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、第1非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、第 $N-1$ 非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成されると好適である。

[0055] さらに、本発明の磁化自由層では、最上部及び最下部の非磁性層の結合力と比較して、それよりも中央部側の非磁性層の反平行結合量を強めることで、一層の飽和磁場の延伸が期待できる。そのためには、 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、第2～第 $(N-2)$ 非磁性層のうちの少なくとも一の非磁性層が、第 $N-1$ の非磁性層よりも低次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有すると好適である。その場合、磁化自由層の中心部の反平行結合力が、最上部に対して2倍以上強まる。 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、第2～第 $(N-2)$ 非磁性層のうちの少なくとも一の非磁性層が、第1非磁性層よりも低次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有すると好適である。その場合、磁化自由層の中心部の反平行結合力が、最下部に対して2倍以上強まる。

[0056] そのような強い反平行結合力をもつ非磁性層は、磁化自由層の最中央層に設定することが望ましい。つまり、 N が偶数のときは、第 $(N/2)$ 非磁性層を強い反平行結合力を有するように設定することが望ましい。好適には、 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 < \alpha_{N-1}$ 、且つ、 $\alpha_{N/2} < \alpha_{N-1}$ の関係が満たされる。 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 > \alpha_{N-1}$ 、且つ、 $\alpha_{N/2} < \alpha_1$ の関係が満たされる。更に好適には、 $J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N/2} + 1 = \alpha_{N-1}$ の関

係が満たされ、 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N/2} + 1 = \alpha_1$ の関係が満たされる。具体的には、第 $(N/2)$ 非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、第1非磁性層あるいは第 $N-1$ 非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成される。または、第 $(N/2)$ 非磁性層は、0.7nm～1.2nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、第1非磁性層あるいは第 $N-1$ 非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成される。

[0057] 本発明に係る磁化自由層において、第1非磁性層と第 $N-1$ 非磁性層は、異なる構造を有してもよい。例えば、第1非磁性層と第 $N-1$ 非磁性層の膜厚や結晶配向性が異なっている。その場合、第1非磁性層の膜厚よりも、第 $N-1$ 非磁性層の膜厚の方が厚いことが好適である。さらに、それら非磁性層の直下に存在する、第1強磁性層と第 $N-1$ 強磁性層の結晶配向性も異なってもよい。また、第1強磁性層、第2強磁性層、第 $N-1$ 強磁性層、及び、第 N 強磁性層のうち少なくとも一層以上が、構成元素、または、構成元素組成が異なる膜が2層以上に積層された積層膜である。その積層膜の膜厚比率を変えることによって、第1非磁性層及び第 $N-1$ 非磁性層の反平行結合力が、所望の値になるように制御される。これにより、本発明に係る磁化自由層を実現することが可能である。そのような積層膜として、NiFe膜およびCoFe膜の積層膜が好適である。

[0058] また、第1非磁性層と第 $N-1$ 非磁性層は、ほぼ同一の構造を有していてもよい。その場合は、第1非磁性層の上下界面に直接接している全ての部分の元素構成比率を、第 $N-1$ 非磁性層の上下界面に直接接している全ての部分の元素構成比率と異なるように設定することで、反平行結合力を調整可能である。また、この場合においても、第1強磁性層、第2強磁性層、第 $N-1$ 強磁性層、及び、第 N 強磁性層のうち少なくとも一層以上が、構成元素、または、構成元素組成が異なる膜が2層以上に積層された積層膜である。その積層膜の膜厚比率を変えることによって、第1非磁性層及び第 $N-1$ 非磁性層の反平行結合力が、所望の値になるように制御される。これにより、本発明に係る磁化自由層を実現することが可能である。そのような積層膜として、NiFe膜およびCoFe膜の積層膜が好適である。

図面の簡単な説明

[0059] [図1]図1は、トグル書き込み方式に対応したMRAMの典型的な構成を示す平面図である。

[図2]図2は、トグル書き込み方式に対応したMRAMに組み込まれるMTJ素子の典型的な構成を示す断面図である。

[図3]図3は、スピンプロップを発現するSAFの典型的な磁化曲線を示すグラフである。

[図4]図4は、トグル書き込み方式によるデータ書き込みの手順を示す概念図である。

[図5]図5は、トグル書き込み方式によるデータ書き込みが行われるときにビット線、ワード線に流される書き込み電流の波形を示すグラフである。

[図6]図6は、トグル書き込み方式が採用されるMRAMの書き込み特性の書き込み磁場値依存性を示すグラフである。

[図7A]図7Aは、本発明の第1の実施形態に係るMRAMのMTJ素子の構成を示す断面図である。

[図7B]図7Bは、本発明の第2の実施形態に係るMRAMのMTJ素子の構成を示す断面図である。

[図7C]図7Cは、本発明の第3の実施形態に係るMRAMのMTJ素子の構成を示す断面図である。

[図8A]図8Aは、本発明の第4の実施形態に係るMRAMのMTJ素子の実デバイスにおける断面図である。

[図8B]図8Bは、本発明の第4の実施形態に係るMRAMに対する、比較例としての従来技術のMTJ素子の実デバイスにおける断面図である。

[図9]図9は、NiFeを強磁性層、Ruを非磁性層とした場合の、RKKY相互作用の結合エネルギー一定数の、非磁性層膜厚に対する依存性を示すグラフである。

[図10A]図10Aは、比較例1～7と実施例1～4の試料の磁化自由層の構成を示す表である。

[図10B]図10Bは、比較例1～7と実施例1～4の試料の磁化自由層の構成を示す表である。

[図11]図11は、比較例1～7と実施例1～4の試料の $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ の長円形MTJ

デバイスのトグル書き込み特性を示す表である。

[図12]図12は、比較例1、2と実施例2、4の試料の長円形MTJデバイスの詳細なトグル書き込み特性を示す表である。

[図13]図13は比較例3～7と実施例1～4の試料の第1非磁性層を介したSAFのみが示す飽和磁場、及び、第3非磁性層を介したSAFのみが示す飽和磁場を比較した図である。

[図14]図14は、比較例3～7と実施例1～4の試料と図13から得られた、 $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ のMTJデバイスのトグル書き込み動作率と、 $[J_1 / (M_1 \times t_1)] / [J_3 / (M_4 \times t_4)]$ 比率とを比較した図である。

発明を実施するための最良の形態

[0060] 以下、発明を実施するための最良の形態を説明する。本実施の形態では、本発明の本質を明確化するため、形状磁気異方性が弱くて考慮しなくて良い単純化された場合が想定される。より微細な素子では、強磁性層の形状磁気異方性や、強磁性層同士の反強磁性的静磁結合による補正をしなければならないことに留意されたい。

[0061] (第1の実施の形態)

図7Aは、本発明の第1の実施の形態に係るMRAMのメモリセルに採用されるMTJ素子1Aの構造を示す断面図である。MTJ素子1Aは、下部電極層11と、反強磁性層12と、磁化固定層13と、バリア層14と、磁化自由層15Aと、キャップ層16と、上部電極層17とを備えている。

[0062] MTJ素子1Aは、例えば、トグル書き込み方式に対応するように配置される。具体的には、図1に示されている従来のMRAMのMTJ素子101と同様に、MTJ素子1Aは、その長手方向が、ワード線(及びそれに直交するビット線)に対して45°の角度をなすように配置される。これにより、磁化固定層13及び磁化自由層15Aを構成する強磁性層の容易軸は、ワード線(及びそれに直交するビット線)に対して45°の角度をなす方向に向けられる。以下では、MTJ素子1Aの構成について詳細に説明する。

[0063] 下部電極層11は、MOSトランジスタ(図示されない)が集積化された基板10の上に形成されており、磁化固定層13への電氣的接続を提供する経路として機能する。

下部電極層11は、例えば、Ta、TaN、Ti、TiN、Nbで形成される。

[0064] 反強磁性層12は、例えば、PtMn、IrMn、NiMnのような反強磁性体で形成され、磁化固定層13の磁化を固定する役割を有している。

[0065] 磁化固定層13は、例えばCoFeのような磁氣的にハードな強磁性体で形成される。磁化固定層13の磁化は、反強磁性層12が作用する交換相互作用によって固定される。磁化固定層13は、上述のSAFによって構成されても良い。例えば、磁化固定層13は、2層のCoFe膜と、その間に挿入されたRu膜とで構成され得る。この場合、Ru膜は、反強磁性的なRKKY相互作用を発現するような膜厚を有するように形成される。

[0066] バリア層14は、トンネル電流を流す程度に薄い膜厚を有するアモルファスの絶縁体膜であることが多い。バリア層14がアモルファスである場合、後述されるように、それは磁化自由層15Aを構成する膜の結晶性に大きな影響を及ぼす。より具体的には、バリア層14は、例えば、アルミナ(AlO_x)、酸化マグネシウム(MgO)、酸化ジルコニウム(ZrO_2)、酸化ハフニウム(HfO_2)、酸化シリコン(SiO_2)、窒化アルミニウム(AlN)などで形成される。また、バリア層14は、アモルファスである必要はなく、例えばNaCl構造を有する単結晶MgOで形成されてもよい。

[0067] 磁化自由層15Aは、強磁性層の数が4であるSAFで構成されている。より具体的には、磁化自由層15Aは、強磁性層21～24と、その間に介設されている非磁性層31～33とを備えている。強磁性層21は、バリア層14の上に形成されており、非磁性層31は、強磁性層21の上に形成されている。非磁性層31の上に、強磁性層22、非磁性層32、強磁性層23、非磁性層33、及び強磁性層24が、この順で順次に形成されている。強磁性層21と強磁性層22の磁気体積と、強磁性層23と強磁性層24の磁気体積がほぼ等しく、かつ、強磁性層21と強磁性層24の磁気体積が異なるようにすることが本発明の重要なポイントの一つである。本実施形態においては、強磁性層21よりも強磁性層24の磁気体積が小さい場合が想定される。この時、非磁性層31よりも非磁性層33の反平行結合エネルギーを小さく設定しなければならない。そうでなければ、強磁性層21に関する反平行結合が、低い外部磁場で先に外れてしまう。

[0068] 本実施の形態に係る磁化自由層15Aは、トンネルバリア層14上の強磁性層21か

ら、キャップ層16下の強磁性層24まで次のような膜構成を有する：

トンネルバリア層／NiFe(4.8nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(4.8nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(3.3nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(3.7nm)／キャップ層。

[0069] 上記の構成において、強磁性層21と強磁性層22は、NiFe(4.8nm)／CoFe(0.35nm)に相当し、強磁性層23と強磁性層24は、それぞれNiFe(3.3nm)／CoFe(0.25nm)とNiFe(3.7nm)に相当する。強磁性層21と強磁性層22の磁化膜厚積は約4.72Tnmであり、強磁性層23と強磁性層24の磁化膜厚積は約3.15Tnmである。強磁性層21は強磁性層24と比較して、1.5倍の磁化膜厚積を有している。また、非磁性層31～33は、Ru(2.1nm)、Ru(2.1nm)、及びRu(3.5nm)に相当している。

[0070] 本実施形態では、非磁性層31～33を介した反平行結合エネルギーを設定する手段として、(I)強磁性層21～24を複数の材料で構成し、かつ、非磁性層の界面材料を変えることによる制御と、(II)非磁性層の膜厚を直接変えることによる制御とが、組み合わされている。

[0071] 前者に関して、具体的には、強磁性層は、NiFe／CoFe、CoFeB／CoFeNi、CoFe／NiFe／CoFeなどの2層または3層構造を有するように形成され、それらのうち非磁性層31～33に接する層(CoFeやCoFeNi)の膜厚が制御される。これは、非磁性層31～33と直接接する材料に依存してRKKY相互作用の強さが異なることを利用したものである。具体的には、Niリッチな材料よりも、Coリッチな材料の方がより大きな J_{SAF} が得られる。よって、NiFeを強磁性層の主成分として、非磁性層側に1nm以下のCoFeが薄く形成される。NiFe／Ru界面に挿入されるCoFeの膜厚が大きいほど、 J_{SAF} を増大させることが可能である。同様に、CoFeNiなど合金の場合、Niリッチな強磁性膜ほど J_{SAF} が減少する。また、CoFe、NiFeに限らず、他の複数の元素(非磁性元素を含む)を含有する積層膜や合金膜で構成することも可能である。尚、本明細書において、強磁性層とは、全体としての強磁性の磁化の向きが等しい層を意味しており、単一の強磁性膜で構成されていると限定して解釈されてはならない。例えば、NiFe／CoFeのような複数の強磁性膜からなる積層膜も1つの強磁性層である。

また、2つの強磁性膜と、その間に介設され2つの強磁性膜を強磁性的に結合する非磁性膜とで構成される積層体も、1つの強磁性層である。このような複数の強磁性膜の積層膜の場合の磁化膜厚積は、各強磁性膜が単独で持つ磁化膜厚積の総和で定義される。

[0072] 後者に関して、非磁性層の膜厚は、非磁性層の結晶性を考慮して設定されなければならない。図9に示されているように、RKKY相互作用の強さは、非磁性層の材料及び膜厚に依存する。よって、非磁性層31と非磁性層33が発現する反強磁性的なRKKY相互作用の強さを同一にするためには、非磁性層31と非磁性層33を同一の材料を用いて膜厚が同一になるように形成すればよいと考えられるかもしれない。しかし、発明者の実験によると、現実集積化されたMRAMでは、非磁性層31と非磁性層33が同一の材料、同一の膜厚で形成されても、非磁性層31と非磁性層33が発現するRKKY相互作用の強さは同一にならない。それは、非磁性層31と非磁性層33とで結晶性が異なってくるからである。磁化自由層15Aは、バリア層14の上に、強磁性層21、非磁性層31、強磁性層22、非磁性層32、強磁性層23、非磁性層33、及び強磁性層24を順次積層することによって形成されるので、先に形成される非磁性層31のRuよりも、後に形成される非磁性層33のRuの方がHCP (hexagonal close packed) $\langle 0001 \rangle$ の結晶配向性が高い。RKKY相互作用の強さは結晶配向性が良好であるほど強く、同一の材料、同一の膜厚で非磁性層31と非磁性層33が形成された場合、非磁性層31よりも非磁性層33の方が強いRKKY相互作用を発現するようになってしまう。それらRKKY相互作用の強さが離れすぎないように粗調整するためには、むしろ、非磁性層31を相対的に低次のピークに対応する範囲の膜厚を有するように形成し、非磁性層33を相対的に高次のピークに対応する範囲の膜厚を有するように形成することが好適である。これにより、非磁性層33が発現するRKKY相互作用の強さが良好な結晶性によって強められる効果と、相対的に高次のピークに対応する膜厚を有していることによって弱められる効果とがキャンセルされ、非磁性層31と非磁性層33が発現する反強磁性的なRKKY相互作用の強さが離れすぎないように粗調整できる。

[0073] 具体的には、本実施形態では、バリア層14がアモルファス AlO_x であり、その上に成

長させた磁化自由層15Aの非磁性層31がRKKY相互作用の第2次の反強磁性ピーク(反強磁性2ndピーク)に対応する範囲の膜厚を有しており、非磁性層32、33が第3次の反強磁性ピーク(反強磁性3rdピーク)に対応する範囲の膜厚を有している。より具体的には、非磁性層31～33がルテニウムで形成される場合には、非磁性層31は、その膜厚が1.8nmを超え、2.5nm未満であるように形成される。非磁性層33は、その膜厚が3.1nmを超え、3.9nm未満であるように形成される。最も好適には、非磁性層31は、反強磁性2ndピークに対応する2.1nmの膜厚を有するように形成され、非磁性層33は、反強磁性3rdピークに対応する3.5nmの膜厚を有するように形成される。このような膜厚の組み合わせは、非磁性層31と非磁性層33が発現する反強磁性的なRKKY相互作用の強さを、粗調整するために有効である。故に本実施形態では、非磁性層31がRu(2.1nm)で形成され、非磁性層33がRu(3.5nm)で形成されている。尚、非磁性層31が反強磁性2ndピークに設定された場合に限らず、大概是、非磁性層31に適用される反強磁性ピークに対して、非磁性層33に適用される反強磁性ピークが、1次だけ高次に設定されれば、それらの反平行結合力を同じオーダーに調整ことができる。

[0074] また、図7Aに示される積層磁化自由層において、非磁性層31～33のみでなく、強磁性層21～24に関しても、上層ほど結晶性が改善される。例えば、パーマロイを強磁性層21～24として使用し、ルテニウムを非磁性層31～33として使用した場合、強磁性層21と比較して強磁性層23のパーマロイは、FCC(face center cubic) <111>配向度が高い。そのため、その直上にそれぞれ成長している非磁性層31と非磁性層33のルテニウムに関しても、非磁性層31よりも非磁性層33のルテニウムの方がHCP<0001>配向度が高くなる。

[0075] 尚、このような技術は、上記のように積層磁化自由層がAlO_xバリア層の上に形成されている場合に特に有効であるが、それに限られるわけではない。例えば、トンネルバリア層の下側に磁化自由層が配置される場合においても、下地の平坦性を求めて、磁化自由層の下地に微結晶またはアモルファス材料を用いることもありうる。また、膜厚の制限により、十分な下地層を準備することが制限される場合も想定される。そのような場合にも、本発明に係る技術は有効である。また、磁化自由層の下地層の結

晶性が良好な場合であっても、その上に成長させるべき磁化自由層が、好適な結晶配向性を有しながら成長するとは限らない。むしろ、格子整合あるいは不整合により、不所望な結晶面への配向や凹凸成長などが生じる場合が一般的である。その場合においても、本技術は、特に有効となる。磁化自由層の最下層の非磁性層は、不所望な結晶面への結晶成長や凹凸成長の影響を避けがたいので、不所望な結晶性を有しRKKY相互作用が弱まる。しかし、最上層の非磁性層が成長するまでには、強磁性/非磁性の積層下地により、最上部の非磁性層は所望の結晶性を回復し、それによりRKKY相互作用が強まることが期待される。

[0076] 以上に説明されたように反平行結合力を調整した結果、本実施の形態において、非磁性層31及び33の J_{SAF} は、それぞれ約 $0.015\text{erg}/\text{cm}^2$ 、 $0.011\text{erg}/\text{cm}^2$ となる。これら反平行結合力を磁場の大きさに換算した $H_j (= 2J_{\text{SAF}} / (M \times t))$ (式(2)参照)は、それぞれ81Oe及び86Oeであり、ほぼ等しく設定されている。発明者の実験によれば、より定量的には、 H_j の差が2割程度の差に収められることが望ましい。つまり、非磁性層31と非磁性層33の H_j の比率に相当するパラメータ $[J_1 / (M_1 \times t_1)] / [J_3 / (M_4 \times t_4)]$ が、0.8以上1.2以下に設定されることが望ましい。また、より厳密に磁気異方性の相違まで考慮すると、強磁性層21及び22の平均異方性磁場 H_{k1} は、9.5Oeであり、強磁性層23及び24の平均異方性磁場 H_{k3} は7Oeである。この場合、非磁性層31及び33のフロップ磁場 $[(H_j - H_k) \times H_k]^{0.5}$ (式4(c)参照)は、それぞれ、26Oe及び23.5Oeとなり、僅かに差が広がる。この場合は、非磁性層33の J_{SAF} を若干増大させれば、より好適に動作させることが可能である。

[0077] 本実施の形態では、さらに付加的な効果を引き出す狙いとして、中央部の非磁性層32が最も大きい J_{SAF} を発現するように設定されている。非磁性層32に関しては、それ自身の材料構成や、上下に接する強磁性層界面の構成は非磁性層31とほぼ同等である。但し、非磁性層32の J_{SAF} は、約 $0.038\text{erg}/\text{cm}^2$ であり、SAF中の全ての非磁性層の中で最も大きい。それは、非磁性層32のRu(2.1nm)が、NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)の下地上に形成され、そのHCP<0001>の結晶配向性が大きくなっている為である。非磁性層32を介した反平行結合が外れる磁場は、非磁性層31及び非磁性層33

と比較して大きくなるため、磁化自由層の飽和磁場が大きく増大(延伸)する。その結果、書き込みマージンが拡大する。

[0078] ここで、非磁性層32を介する反平行結合は、強ければ強いほどよいというわけではない。なぜならば、その反平行結合があまりに強すぎると、非磁性層32を介した強磁性層同士がスピントロポロジーを起こす前に、非磁性層31あるいは33を介した強磁性層同士の磁化が飽和するからである。その場合、磁化自由層全体のスピントロポロジーが途切れてしまうため、書き込み不良の発生原因となる。よって、好適な反平行結合力を得るために、非磁性層32は、最も低い磁場でフロップする非磁性層33よりも、一つだけ低次の反強磁性ピークを使用することが望ましい。より具体的には、非磁性層32、非磁性層33がルテニウムで形成される場合には、非磁性層32は、その膜厚が1.8nmを超え、2.5nm未満であるように形成され、非磁性層33は、その膜厚が3.1nmを超え、3.9nm未満であるように形成される。或いは、非磁性層32は、その膜厚が0.7nmを超え、1.2nm未満であるように形成される場合は、非磁性層33は、その膜厚が1.8nmを超え、2.5nm未満であるように形成される。

[0079] 最も好適には、非磁性層31は、反強磁性2ndピークに対応する2.1nmの膜厚を有するように形成され、非磁性層33は、反強磁性3rdピークに対応する3.5nmの膜厚を有するように形成される。或いは非磁性層31は、反強磁性1stピークに対応する0.9nmの膜厚を有するように形成され、非磁性層33は、反強磁性2ndピークに対応する2.1nmの膜厚を有するように形成される。

[0080] キャップ層16は、磁化固定層13、バリア層14、及び磁化自由層15Aを保護するための層である。キャップ層16は、例えば、Ta、Ruで形成される。キャップ層16は、トンネル電流が流れる程度に極めて薄いAlO_xで形成されることも可能である。

[0081] 上部電極層17は、磁化自由層15Aへの電氣的接続を提供する経路として機能する。上部電極層17は、例えば、Ta、Ta₂N₃、TiN、Cu、Alで形成される。

[0082] (第2の実施の形態)

図7Bは、本発明の第2の実施の形態に係るMTJ素子1Bの構成を示す断面図である。図7Bに示されているMTJ素子1Bは、図7Aに示されているMTJ素子1Aと同様に、磁化自由層15Bが、4層の強磁性層21～24と3層の非磁性層31～33からなる

ような構成を有している。

- [0083] 相違点は磁化自由層中の、強磁性層21～24の磁気体積の設定と、非磁性層31～33を介した反平行結合力の設定である。第2の実施形態では磁化自由層15Bは、トンネルバリア層14上の強磁性層21から、キャップ層16下の強磁性層24まで次のような膜構成を有する：

トンネルバリア層／NiFe(3nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(3nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(4.6nm)／CoFe(0.45nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(4.6nm)／CoFe(0.45nm)／キャップ層。

- [0084] 強磁性層21と22の磁化膜厚積は同じ3.15Tnmであり、強磁性層23と24の磁化膜厚積は同じ4.72Tnmである。強磁性層21と比較して、強磁性層24の磁化膜厚積の方が1.5倍ほど磁気膜厚は大きい。また、非磁性層の31の反平行結合エネルギー J_1 はおおよそ $0.013\text{erg}/\text{cm}^2$ であり、非磁性層32の反平行結合エネルギー J_3 はおおよそ $0.021\text{erg}/\text{cm}^2$ である。このとき、非磁性層31に関連するHjは107Oe、非磁性層の33に関するHjは114Oeを有するように設定されており、ほぼ等しい。この結果、強磁性層21と強磁性層24の反平行結合はほぼ同時に外れることが可能となり、好適に動作する。また本実施の形態では、強磁性層21と22及び強磁性層23と24とは、全く同一構成を有し、さらにそれら結晶性も近いので好適である。

- [0085] また、第2の実施の形態では、非磁性層33に関して、非磁性層31よりも強い反平行結合力が求められているので、非磁性層33を2ndピークに対応するRu(2.1nm)としてもよい。その場合、非磁性層33をそのままRu(2.1nm)で置換すると、反平行結合力が強くなりすぎるので、例えば強磁性層23のCoFe(0.45nm)を減少させ、強磁性層23を殆どNiFeのみで構成することにより、非磁性層33の反平行結合力を好適な値に微調整することができる。このとき、非磁性層31と非磁性層33は、ほぼ同じ膜厚と材料で構成されるが、非磁性層31と非磁性層33の上下界面に直接接している全ての部分の元素構成比率は異なっている。具体的には、非磁性層31の上下界面にはNi, Fe, Coといった元素が直接接しているが、非磁性層33に関してはNiとFeのみである。非磁性層33と比較して、非磁性層31に接している部分の元素構成比率はCoリッチである。

[0086] (第3の実施の形態)

磁化自由層を構成するSAFに含まれる強磁性層の数が、第1, 第2の実施の形態と異なる場合や、その数が偶数ではなく奇数である場合にも、本発明は適用可能である。例えば、図7Cに示されているように、MTJ素子1Cの磁化自由層15Cが、3層の強磁性層21～23と、それらの間に挿入された非磁性層31、32で形成される例を説明する。

[0087] この場合、トンネルバリア層14上の強磁性層21から、キャップ層16下の強磁性層23までの膜構成の一例として、次のような構成が挙げられる：

トンネルバリア層／NiFe(4.6nm)／CoFe(0.45nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(8.4nm)／CoFe(0.4nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(3.7nm)／キャップ層。

[0088] 上記の構成で、強磁性層21はNiFe(4.6nm)／CoFe(0.45nm)に相当し、強磁性層23はNiFe(3.7nm)に相当し、強磁性層22はNiFe(8.4nm)／CoFe(0.4nm)に相当する。

[0089] また、第1の実施の形態と同様の理由で、HCP<0001>の結晶配向性の悪い非磁性層31に対してRu(2.1nm)の反強磁性2nd-peakを使用し、結晶配向性がやや改善されている非磁性層32に対してRu(3.5nm)の反強磁性3rd-peakを使用することにより、反平行結合力が粗調整されている。磁化膜厚積は、強磁性層21に対しては約4.72Tnm、強磁性層22に対しては約7.9Tnm、強磁性層23に対しては約3.15Tnmである。このように、強磁性層22の磁化膜厚積は、強磁性層21及び23の磁化膜厚積の和になるように設定されている。

[0090] また、より一般に、N個の強磁性層(Nは3以上の奇数)の多層SAF磁化自由層の場合、磁化自由層の最上層である第N強磁性層と最下層である第1強磁性層が持つ磁化膜厚積の和とほぼ同じになるように、最中央部である第 $((1+N)/2)$ 強磁性層の磁化膜厚積が設定されればよい。その理由は、次の通りである。Nが奇数の場合の多層SAFでは、常に最上部及び最下部の強磁性層が、残留磁化状態で平行配置となる。従って、第N強磁性層と第1強磁性層の磁化膜厚積をキャンセルする役目を、多層SAF中の最も中央部の強磁性層一層に担わせることにより、磁化自由層全体のスピントロップが安定化される。Nが奇数の場合、残留磁化状態において最中

中央層である第 $((1+N)/2)$ 強磁性層の磁化は、必ず、第 N 強磁性層及び第 1 強磁性層の磁化に対して反平行となる。また、特に $N=3$ 及び $N=5$ の多層SAFでは、最中央部の磁性層によって、最上部及び最下部の強磁性層の磁化を打ち消さなければ、磁化自由層全体の磁化を、残留磁化状態においてキャンセルできない。

[0091] 本実施の形態は、上記のとおり、磁化の調整方法以外は第 1 、第 2 、第 4 の実施形態と同じである。最上部及び最下部の強磁性層が、外部磁場に対して同時に外れるように設定されれば良い。本実施形態に示された例では、非磁性層 31 および非磁性層 32 の反平行結合エネルギー一定数は、それぞれ $J_1=0.02\text{erg}/\text{cm}^2$ 、 $J_2=0.014\text{erg}/\text{cm}^2$ 程度であり、それらを磁場に換算したパラメータ $J_1/(M_1 \times t_1)$ と $J_2/(M_3 \times t_3)$ は、それぞれ、 53Oe 及び 56Oe とほぼ等しくなるように設定されている。

[0092] (第 4 の実施の形態)

より一般的に、 N は 4 または 6 以上の整数とし、多層SAFが N 層の強磁性層と $N-1$ 層の非磁性層とからなる場合に、本発明の動作に必要な構成を説明する。最下層の強磁性層を第 1 強磁性層、最上層の強磁性層を第 N 強磁性層とし、最下層の強磁性層の直上の非磁性層を第 1 非磁性層、最上層の強磁性層直下の非磁性層を第 $N-1$ 非磁性層とする。最低限必要な条件として、 $M_1 \times t_1$ と $M_2 \times t_2$ は等しく、 $M_{N-1} \times t_{N-1}$ と $M_N \times t_N$ が等しいことが必要である。さらに、 $M_1 \times t_1 > M_N \times t_N$ であり、且つ、 $J_1 > J_N$ であること、あるいは、 $M_1 \times t_1 < M_N \times t_N$ で、且つ、 $J_1 < J_N$ であることが必要である。さらに、パラメータ $J_1/(M_1 \times t_1)$ と $J_N/(M_N \times t_N)$ とをほぼ等しくすれば、より好適に動作する。

[0093] また、第 1 強磁性層と第 2 強磁性層の平均の異方性磁場 Hk_1 が、第 $(N-1)$ 強磁性層と第 N 強磁性層との平均の異方性磁場 Hk_{N-1} に対して大きく異なる場合は、最上層と最下層のSAF結合部が単独に存在した場合のフロップ磁場に相当するパラメータ $[\{ 2J_1/(M_1 \times t_1) - Hk_1 \} \times Hk_1]$ と $[\{ 2J_{N-1}/(M_N \times t_N) - Hk_{N-1} \} \times Hk_{N-1}]$ とがほぼ等しいことが必要となる。このような用件を満たすように、非磁性層の膜厚や材料、磁性層／非磁性層の界面材料、磁性層の膜厚などを変更することによって、磁化自由層の各パラメータが制御されればよい。

[0094] N が奇数で 7 層、 9 層、 11 層など大きい磁化自由層の場合、既出の第 3 の実施形態

よりも第4の実施形態のほうが好適である。なぜならば、本実施形態によれば、最も隣接する強磁性同士(第1強磁性層と第2強磁性層、及び第N-1強磁性と第N強磁性層)が磁氣的に等価に設定され、磁化自由層内で、残留磁化状態で反平行配置をとる強磁性層同士を、磁氣的により等価にしやすいためである。

[0095] 第2～第(N-2)の非磁性層の J_{SAF} は、第1及び第N-1の非磁性層と比較して同等以上に設定することが好適である。さらに、磁化自由層の飽和磁場を一層延伸させる上で、第2～第(N-2)の非磁性層の中に、意図的に強い反平行結合力をもつ非磁性層を設けることが有効である。そのような非磁性層は最中央部に位置することが望ましく、Nが偶数の場合は第(N/2)非磁性層の反平行結合力がもっとも大きいことが好適である。具体的には、第(N/2)非磁性層の反強磁性ピークの次数は、第N-1非磁性層の次数と比較して一つだけ小さくなるように、各非磁性層の膜厚を設定することが好適である。

[0096] 具体例として、本発明のMRAM記憶ビット部40Aの断面が図8Aに示されている。このMRAM記憶ビット部40Aは、6層の強磁性層21～26と、それらの間に挿入された5層の非磁性層31～35で構成された磁化自由層15Dを有する。トンネルバリア層14上の強磁性層21から、キャップ層16下の強磁性層26までの好適な形態の1例として次のような膜構成が挙げられる：

トンネルバリア層／NiFe(4nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(4nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(2nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(2nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(3nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(3nm)／CoFe(0.25nm)／キャップ層。

[0097] 図8Aに示されるように、一般に実デバイスにおいては、MRAM記憶ビット部40A中の磁化自由層の側壁部は、垂直には加工されずに、傾斜を有している。このとき、磁気抵抗を決定する接合面積は、トンネルバリア層と第1強磁性層が接する界面の面積で規定される。各強磁性層が全く同じ厚さに成膜された場合、各強磁性層の実効的な磁気膜厚 $t_1 \sim t_6$ は、 $t_1 > t_2 > t_3 > t_4 > t_5 > t_6$ となる。よって、実デバイスの加工に起因した磁気体積差を考慮して、強磁性層21～26の成膜時の膜厚を調整しなければならない。本実施の形態によれば、非磁性層21であるRu(2.1nm)を介したS

AFの $J_1 / (M_1 \times t_1)$ と、非磁性層25であるRu(3.5nm)を介したSAFの $J_5 / (M_6 \times t_6)$ は、ほぼ等しくなるように設定される。強磁性層の等価性が要求される組は、隣接する強磁性層21と強磁性層22、強磁性層23と強磁性層24、及び強磁性層25と強磁性層26である。図8Aから明らかなように、それらの組に関しては、加工に起因した磁気体積差は生じづらく、また結晶性に起因した磁気特性の差も小さい。また、最中央の非磁性層23に関しては、Ru2.1nmの2nd反強磁性ピークが使用され、かつ、結晶性も良好であるため、最も大きな反強磁性結合力が得られる。従って、磁化自由層の飽和磁場が延伸し、書き込みマージンが広がる。

[0098] 比較として、従来技術に従って作製されたMRAM記憶ビット部40Bの断面が図8Bに示されている。このMRAM記憶ビット部40Bは、同様に6層の強磁性層21～26と、それらの間に挿入された5層の非磁性層31～35で構成された磁化自由層15Eを有する。トンネルバリア層14上の強磁性層21から、キャップ層16下の強磁性層26までの好適な膜構成の一例として、次のような構成が挙げられる：

トンネルバリア層／NiFe(4nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(2nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(3nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(2.1nm)／NiFe(3nm)／CoFe(0.25nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(2nm)／CoFe(0.35nm)／Ru(3.5nm)／NiFe(4nm)／CoFe(0.35nm)／キャップ層。

[0099] 非磁性層31と35の反平行結合力はほぼ等しく、かつ、強磁性層21～26の磁化膜厚積は上下方向に対称に設定される。しかし、成膜時にそのような磁化膜厚積となるように形成しても、図8Bより明らかなように、強磁性層の等価性が要求される組(強磁性層21と強磁性層26、強磁性層22と強磁性層25、強磁性層23と強磁性層24)に関しては、素子加工プロセスにより生じる体積差によって、磁気体積の等価性が大きく損なわれる。また、それらの強磁性層が形成されたSAF中の位置を考えても、結晶性に起因した磁気特性の差も大幅に生じうる。磁気体積の差に関しては、どの層がどれだけの磁気体積を持つのか把握することが難しく、接合側壁の形状がより複雑な場合では、磁気体積を把握することは不可能である。このように従来技術の多層SAFの磁気体積の差や膜質の差をキャンセルさせることは容易なことではない。

[0100] 以上、実施形態の説明において、第1非磁性層に対して、第(N-1)非磁性層の

膜厚が厚くなるような例が示された。第(N-1)非磁性層に対して、第1非磁性層の膜厚を厚くなるように構成されてもよい。また、例えば成膜条件などを工夫するなどして膜質の差が縮小した場合や、非磁性層の膜厚制御性を向上させ、非磁性膜厚のみによって厳密な反強磁性結合エネルギーを制御可能な場合は、このような構成が採用されなくてもよい。重要な点は、膜形態ではなく、実効的な反強磁性結合力の大きさである。

[0101] 以下、様々な磁化自由層構造を有するMRAMに対する動作実験例が実施例として示される。

[0102] 1. フロップ磁場、飽和磁場、及び書き込みマージンの評価

2層の強磁性層と1層の非磁性層からなる通常のSAFと、4層の強磁性層と3層の非磁性層からなる多層SAFを磁化自由層としたMTJが8インチ基板に複数作製された。100～120個のMTJ素子に関して、トグル書き込みが調べられ、フロップ磁場、飽和磁場と書き込みマージン及び動作率が評価された。磁化自由層の4層SAFは従来技術と本発明の技術を用いた試料が作製され、特性が比較された。MTJ素子の平面形状は主に $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ の長円形である。また一部 $0.4 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ の長円形の素子についても評価を行った。

[0103] ここで、 $\text{Al}(\alpha \text{ nm})\text{O}_x$ とは、 α (nm)のAl膜を酸化することによって形成された AlO_x 膜を意味している。また、基板の上に順次に形成されたTa膜、PtMn膜、CoFe/Ru/CoFe積層体、 $\text{Al}(0.9 \text{ nm})\text{O}_x$ 膜が、それぞれ、下部電極層11、反強磁性層12、磁化固定層13、バリア層14に相当しており、磁化自由層の上に形成された $\text{Al}(0.7 \text{ nm})\text{O}_x$ 膜、Ta膜が、キャップ層16、上部電極層17に相当していることに留意されたい。

[0104] 本実施例で作製されたMTJの構成は、次の通りである：

基板/Ta(20nm)/PtMn(20nm)/CoFe(2.5nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(2.5nm)/ $\text{Al}(0.9 \text{ nm})\text{O}_x$ /磁化自由層/ $\text{Al}(0.7 \text{ nm})\text{O}_x$ /Ta(100nm)。

[0105] 図10A及び図10Bは、各試料の磁化自由層の構成を示す表である。磁化自由層に含まれる強磁性層の数は、2または4であり、強磁性層の材料・膜厚は、磁化自由層の全体としての残留磁化が0であるように微調整されている。磁化自由層の非磁性

層は、いずれも、ルテニウムで形成されている。ここでNiFeとして、パーマロイ($\text{Ni}_{81}\text{Fe}_{19}$)が使用されている。以下では、各試料の特徴が概略的に説明される。

- [0106] 比較例1のMTJ素子の磁化自由層は、2層の強磁性層と1層の非磁性層を含むSAFで形成されている。非磁性層の膜厚は、反強磁性2ndピークに対応する2.1nmである。その他の試料はいずれも4層の強磁性層と3層の非磁性層を含むSAFで形成されている。第1非磁性層は反強磁性2ndピークに対応する2.1nmのルテニウムが用いられている。第2非磁性層に関しては2.1nmのルテニウムが用いられており、この非磁性層は、結晶配向性が良好で且つ反強磁性2ndピークであるため、他の非磁性層の3倍以上の反強磁性結合エネルギーを持つ。基板から離れて位置する第3非磁性層の膜厚は、反強磁性3rdピークに対応する3.5nmである。
- [0107] 比較例2の磁化自由層は、全ての強磁性層の磁化膜厚積がほぼ等しく、かつ、第1非磁性層及び第3非磁性層の反平行結合力はほぼ等しい。各強磁性層の磁化膜厚積は3.15Tnmである。
- [0108] 比較例3～7及び実施例1～4は、全て第1強磁性層と第2強磁性層の磁化膜厚積がほぼ4.72Tnmであり等しく、第3強磁性層と第4強磁性層の磁化膜厚積がほぼ3.15Tnmであり等しく、かつ第1強磁性層は第四強磁性層に対して1.5倍大きい磁化膜厚積を持つ。比較例3～6および実施例1～2の試料では、第1強磁性層中のNiFe/CoFeの比率を変化させて、第1非磁性層の反平行結合エネルギーのみを変化させている。また、比較例7および実施例3～4の試料では第3強磁性層中のNiFe/CoFeの比率を変化させて、第3非磁性層の反平行結合エネルギーのみを変化させている。いずれもCoFeの膜厚が増えるほど、その上部の非磁性層の反平行結合力は増大する。図10B中に第1、第3非磁性層直下の強磁性層界面に存在するCoFeの厚さが示されている。
- [0109] 図11には、比較例1～7及び実施例1～4の磁化自由層を用いた $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ トグルMRAMデバイスの動作率とフロップ磁場、飽和磁場が示されている。比較例1と比較例2を比較すると、フロップ磁場はそれぞれ、38(Oe)、37(Oe)の周囲に分布し、飽和磁場はそれぞれ、157(Oe)、570(Oe)の周囲に分布していた。強磁性層を2層から4層にすることで、書きこみマージンが大きく増大している。

[0110] 比較例3～6および実施例1～2の試料は、第3非磁性層の反平行結合力(反平行結合エネルギー一定数 J_3)が固定され、第1非磁性層の反平行結合力(反平行結合エネルギー一定数 J_1)のみが増大していく試料に相当する。最も J_1 が小さい試料に対応する比較例3では、ごく一部の素子でダイレクト反転を示す素子が存在したが、トグル反転を示す素子は全く存在しなかった。比較例4、5と、 J_1 が増大していくにつれてトグル動作率が向上していき、実施例1、2の試料において、それぞれトグル動作率が98%及び100%と非常に高歩留まりでトグル書き込みが行われた結果が得られた。更に J_1 が増加された試料である比較例6では、トグル動作率が65%と減少してしまった。実施例1の試料では、平均のフロップ磁場は42(Oe)、飽和磁場は602(Oe)であった。実施例2の試料では、平均のフロップ磁場は44(Oe)、飽和磁場は606(Oe)であった。

[0111] また、比較例5、実施例4、実施例3、比較例7の試料は、第1非磁性層の反平行結合力が固定され、第3非磁性層の反平行結合力のみが減少していく試料に相当する。第3非磁性層の反平行結合力が減少していくにつれて、トグル動作率が向上していき、実施例3、4の反平行結合力において、それぞれ動作率93%及び100%の結果が得られた。実施例3の試料では、平均のフロップ磁場は36(Oe)、飽和磁場は565(Oe)である。実施例4の試料では、平均のフロップ磁場は37(Oe)、飽和磁場は576(Oe)であった。書き込みマージンに相当する比率(飽和磁場/フロップ磁場)は、比較例1では4と小さいが、実施例1～4では、その比率は大幅に増大し全て10以上となる。本発明によって、高いトグル動作率を示し、かつ、フロップ磁場をほぼ一定としたまま、書き込みマージンの著しい向上が可能であることが実証された。

[0112] さらに比較例1及び2、実施例2、実施例4のトグル動作特性を詳細に比較した結果が、図12に示されている。図12中には、 $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ 素子のフロップ磁場と、そのばらつきに相当する標準偏差、飽和磁場、書き込みマージン、及びトグル書き込み動作率が示されている。さらに $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ 及び $0.4 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ 素子の間のダイレクト反転領域幅の差が示されている。ダイレクト領域幅もフロップ磁場及び飽和磁場と同様に、容易軸方向に対して測定したものである。

[0113] フロップ磁場のばらつき(標準偏差 σ_{flop})は、従来技術に係る4層SAF磁化自由層

である比較例2では、3.3(Oe)である。それに比べて、本発明に係る4層SAF磁化自由層である実施例2及び4では、フロップ磁場のばらつきの大きさはそれぞれ、2.5(Oe)および2.1(Oe)と小さい。これらの試料を、例えば1MビットMRAMに適用させた場合を考える。書き込み磁場値を「平均フロップ磁場値 $+5 \times \sigma_{\text{flop}}$ 」とすると、その書き込み磁場値は、比較例2の試料では53.5(Oe)、実施例2の試料では56.5(Oe)、実施例4の試料では47.5(Oe)となる。特に実施例4の試料では、フロップ磁場も小さく、ばらつきも小さいため、書き込み磁場が最も低減されている。

[0114] また $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ 及び $0.4 \times 0.8 \mu\text{m}^2$ 素子とのダイレクト領域幅の差に関しては、2層SAFから構成された通常のトグル磁化自由層からなる比較例1で2.2Oeと最も小さい。実施例2及び4でも、その差は、それぞれ2.8(Oe)及び3.1(Oe)と小さい。一方、比較例2では、その差が5.8(Oe)と最も大きかった。ダイレクト反転領域幅が素子サイズによって変わるということは、SAF中の各強磁性層の磁気体積の差が素子サイズによって変わっていることを意味する。これは、例えば図8A、図8Bに示されたような、加工プロセスによって生じる磁化自由層側壁部の磁気体積不均一性などの影響と考えられる。このように、本発明に係る多層SAF磁化自由層によれば、従来技術に係る多層SAF磁化自由層に比べて、フロップ磁場のばらつきも小さく、かつ、ダイレクト反転領域の大きさも素子サイズに影響しづらく、ダイレクト反転領域をより低減しやすい。

[0115] 2. RKKY相互作用による反強磁性的結合の評価

トグル書き込み特性評価の結果と、磁化自由層の反平行結合力や磁化膜厚積の関係が調べられた。

[0116] 比較例3～6及び実施例1～4の磁化自由層の“第1非磁性層”を介した反平行結合力を調べるために、以下の試料が作製され、磁化曲線が評価された：

基板/Ta(20nm)/PtMn(20nm)/CoFe(2.5nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(2.5nm)/Al(0.9nm)_xO/NiFe/CoFe/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/Ta(10nm)。

[0117] 比較例3～6及び実施例1～4の磁化自由層の“第3非磁性層”を介した反平行結合力を調べるために、以下の試料が作製され、磁化曲線が評価された：

基板/Ta(20nm)/PtMn(20nm)/CoFe(2.5nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(2.5nm)/Al(0.9nm)O_x/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.5nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.5nm)/NiFe/CoFe/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)/Al(0.7nm)O_x/Ta(10nm)

[0118] この試料では第1及び第2非磁性層のRu厚を2.5nmとし、反平行結合力をほぼ零とすることで、第3非磁性層と第3及び第4強磁性層で構成されたSAF部のみの磁化曲線を評価できる。このとき第3非磁性層の結晶性は、比較例3～6及び実施例1～4とほぼ同一である。

[0119] 図13は、上記のSAF部の磁化曲線から得られた飽和磁場と、各Ru非磁性層直下のCoFe膜厚との関係を示している。第1非磁性層及び第3非磁性層のSAF部の飽和磁場は、直下の強磁性層界面のCoFe厚の増大にほぼ比例して増加していることがわかる。飽和磁場は、ほぼ反平行結合エネルギーの大きさを反映しており、CoFe厚が増大するほど、それぞれの非磁性層の反平行結合エネルギーは増大していくことが示されている。

[0120] また、SAF中の各強磁性層の磁化膜厚積および異方性磁場を評価するために、以下の膜構成の積層膜が作製された：

基板/Ta(20nm)/Al(0.9nm)O_x/シード層/NiFe/CoFe/キャップ層/Ta(10nm)。

この積層膜が1×1cm²角にカットされた試料が作製され、磁化曲線が評価された。上記試料において、シード層に対しては、評価対象の強磁性層によってRu(2.1nm)が用いられるか、用いられなかった。また、キャップ層に関しては、評価対象の強磁性層によってRu(2.1nm)かAl(0.7nm)O_xのいずれかが選択された。

[0121] 磁化膜厚積、異方性磁場、図13に示された飽和磁場から、比較例3～6及び実施例1～4の磁化自由層中の J_1 、 J_3 、 $M_1 \times t_1$ 、 $M_4 \times t_4$ の値が求められた。各試料に関する比率 $[J_1 / (M_1 \times t_1)] / [J_3 / (M_4 \times t_4)]$ と、 $0.6 \times 1.2 \mu\text{m}^2$ 素子でのトグル動作率との関係が、図14に示されている。図14より、比較例3～6及び実施例1～4全ての素子のトグル動作率と比率 $[J_1 / (M_1 \times t_1)] / [J_3 / (M_4 \times t_4)]$ との間には、明確な相関があることがわかる。全ての試料について、 $J_1 / (M_1 \times t_1)$ や $J_3 / (M_4 \times t_4)$ の

値が異なっている、 $[J_1/(M_1 \times t_1)]/[J_3/(M_4 \times t_4)] = 1$ を中心として、トル動作率はピークを持つように変化する。また、比率 $[J_1/(M_1 \times t_1)]/[J_3/(M_4 \times t_4)]$ に対するトル動作率は、同じ曲線上にいる。 $[J_1/(M_1 \times t_1)]/[J_3/(M_4 \times t_4)] = 1$ の場合、トル動作率は100%である。また、特に $0.8 < [J_1/(M_1 \times t_1)]/[J_3/(M_4 \times t_4)] < 1.2$ の範囲で、100%のトル動作率か、それに近い値が得られている。その範囲は、実施例1～4に相当する範囲であり、素子特性として非常に良好である。これらの実験結果は、本発明の多層トルにおいて、最下層と最上層の非磁性層の磁場に換算した量に相当する $J_{SAF}/(M \times t)$ が等しいほど、言い換えると、最下層と最上層の強磁性層の反平行結合が、外部磁場に対して同時に外れるように設定するほど、多層SAFから構成された磁化自由層が、良好にトル動作するようになることを示唆している。

[0122] 最後に、実施例1～4の磁化自由層において大きな飽和磁場を実現している第2非磁性層の反平行結合力の大きさが、以下の試料を用いて評価された：

基板/Ta(20nm)/PtMn(20nm)/CoFe(2.5nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(2.5nm)/Al(0.9nm)_x/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.5nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/Ta(10nm)。

この試料では第1非磁性層のRu厚を2.5nmとし、反平行結合力をほぼ零とすることで、第2非磁性層と第2及び第3強磁性層で構成されたSAF部のみの磁化曲線を評価できる。

[0123] 上記のSAFの飽和磁場はおよそ255Oeであった。この飽和磁場値は、 $J_2[1/(M_2 \times t_2) + 1/(M_3 \times t_3)]$ に等しいので、反平行結合エネルギー一定数に換算すると $J_2 = 0.038 \text{ erg/cm}^2$ に相当する。実施例1～4において第3非磁性層のSAF部が示す $H_j = 2J_3/(M_4 \times t_4)$ は68Oe～132Oeの範囲であり、本実施例によって比率 $\{J_2[1/(M_2 \times t_2) + 1/(M_3 \times t_3)]\}/\{2J_3/(M_4 \times t_4)\}$ は1.9以上3.75以下の範囲で好適に動作することが実証された。この結果から、第2非磁性層と第3非磁性層との反平行結合エネルギー一定数の比率、 $\{J_2[1/(M_2 \times t_2) + 1/(M_3 \times t_3)]\}/\{2J_3/(M_4 \times t_4)\}$ は4以下の範囲で設定することが可能であることがいえる。本実施例ではこ

のように反平行結合力を設定することにより、低いフロップ磁場のまま大きな飽和磁場値、すなわち、書き込みマージンを実現している。

- [0124] 以上に説明されたように、本発明によれば、3層以上の強磁性層を含む多層SAFを磁化自由層として使用するMRAMが提供される。そのMRAMの動作率が向上し、不良ビットが低減される。また、本発明によれば、実デバイス上での磁気特性の制御性が容易になる。また、本発明によれば、MRAMの書き込み特性を改善し、書き込み電流値を低減することが可能となる。更に、本発明によれば、MRAMの書き込みマージンを増大させることが可能となる。

請求の範囲

- [1] 基板と、
 磁気抵抗素子と
 を具備し、
 前記磁気抵抗素子は、
 固定された磁化を有する磁化固定層と、
 反転可能な磁化を有する磁化自由層と、
 前記磁化固定層と前記磁化自由層との間に介設された非磁性層と
 を有し、
 前記磁化自由層は、
 第1～第N強磁性層 (Nは4、または6以上の整数) と、
 反強磁性的なRKKY相互作用を発現するように形成された第1～第N-1非磁性
 層と
 を含み、
 前記第1～第N-1非磁性層のうちの第k非磁性層 (kは、1以上N-1以下の整数)
 は、前記第1～第N強磁性層のうちの第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の間に設け
 られ、
 前記第1非磁性層は、前記第1～第N-1非磁性層のうちで前記基板に最も近く位
 置し、且つ、前記第N-1非磁性層は、前記第1～第N-1非磁性層のうちで前記基
 板から最も離れて位置し、
 前記第k強磁性層の体積、磁化及び実効膜厚が、それぞれ V_k 、 M_k 及び t_k で表され
 、ここで、前記実効膜厚 t_k は、前記体積 V_k を前記磁化自由層の平面方向の平均面
 積で割った値であり、
 前記第k強磁性層の磁化の向きと前記第(k+1)強磁性層の磁化の向きの相対角
 度が、 θ_k で表され、
 前記第k非磁性層を介した前記第k強磁性層と前記第(k+1)強磁性層の反平行
 結合エネルギーが、反平行結合エネルギー定数 J_k を用いて、 $J_k \cos \theta_k$ で表されるとき
 、

$M_1 \times t_1$ と $M_2 \times t_2$ は実質的に等しく、

$M_{N-1} \times t_{N-1}$ と $M_N \times t_N$ は実質的に等しく、

また、下記のいずれかの関係：

$M_1 \times t_1 > M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 > J_{N-1}$ 、または、

$M_1 \times t_1 < M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 < J_{N-1}$

が満たされる

MRAM。

[2] 前記Nは4である請求の範囲1に記載のMRAM。

[3] 基板と、

磁気抵抗素子と

を具備し、

前記磁気抵抗素子は、

固定された磁化を有する磁化固定層と、

反転可能な磁化を有する磁化自由層と、

前記磁化固定層と前記磁化自由層との間に介設された非磁性層と

を有し、

前記磁化自由層は、

第1～第N強磁性層 (Nは3以上の奇数) と、

反強磁性的なRKKY相互作用を発現するように形成された第1～第N-1非磁性層と

を含み、

前記第1～第N-1非磁性層のうちの第k非磁性層 (kは、1以上N-1以下の整数) は、前記第1～第N強磁性層のうちの第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の間に設けられ、

前記第1非磁性層は、前記第1～第N-1非磁性層のうちで前記基板に最も近く位置し、且つ、前記第N-1非磁性層は、前記第1～第N-1非磁性層のうちで前記基板から最も離れて位置し、

前記第k強磁性層の体積、磁化及び実効膜厚が、それぞれ V_k 、 M_k 及び t_k で表され

、ここで、前記実効膜厚 t_k は、前記体積 V_k を前記磁化自由層の平面方向の平均面積で割った値であり、

前記第 k 強磁性層の磁化の向きと前記第 $(k+1)$ 強磁性層の磁化の向きの相対角度が、 θ_k で表され、

前記第 k 非磁性層を介した前記第 k 強磁性層と前記第 $(k+1)$ 強磁性層の反平行結合エネルギーが、反平行結合エネルギー定数 J_k を用いて、 $J_k \cos \theta_k$ で表されるとき

、

$M_1 \times t_1$ と $M_N \times t_N$ の和は、 $M_{(N+1)/2}$ に実質的に等しく、

また、下記のいずれかの関係：

$M_1 \times t_1 > M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 > J_{N-1}$ 、または、

$M_1 \times t_1 < M_N \times t_N$ 、且つ、 $J_1 < J_{N-1}$

が満たされる

MRAM。

- [4] 請求の範囲1乃至3のいずれかに記載のMRAMであって、
前記磁化自由層の残留磁化は飽和磁場の10%以内である
MRAM。

- [5] 請求の範囲1乃至4のいずれかに記載のMRAMであって、
ワード線と、
前記ワード線に直交するビット線と、
前記ワード線と前記ビット線との交差点に設けられ、前記磁気抵抗素子を含む記憶素子

とを更に具備し、

前記磁気抵抗素子の前記磁化自由層の容易軸方向は、前記ワード線又は前記ビット線の延伸方向に対して45度の角をなす

MRAM。

- [6] 請求の範囲1又は2に記載のMRAMであって、
前記第1強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場は、前記第 N 強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場と実質的に等しい

MRAM。

- [7] 請求の範囲3に記載のMRAMであって、
前記第1強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場は、前記第N強磁性層に対する反平行結合が解け始める外部磁場と実質的に等しい

MRAM。

- [8] 請求の範囲6又は7に記載のMRAMであって、
 $J_1 / (M_1 \times t_1)$ と $J_{N-1} / (M_N \times t_N)$ とは実質的に等しい
MRAM。

- [9] 請求の範囲8に記載のMRAMであって、
 $\{J_1 / (M_1 \times t_1)\} / \{J_{N-1} / (M_N \times t_N)\}$ は0.8以上1.2以下である
MRAM。

- [10] 請求の範囲6又は7に記載のMRAMであって、
前記第k非磁性層を介した第k強磁性層と第(k+1)強磁性層の平均全異方性磁場が、 Hk_k で表されるとき、
 $[\{2J_1 / (M_1 \times t_1) - Hk_1\} \times Hk_1]$ と $[\{2J_{N-1} / (M_N \times t_N) - Hk_{N-1}\} \times Hk_{N-1}]$ とは実質的に等しい

MRAM。

- [11] 請求の範囲10に記載のMRAMであって、
 $[\{2J_1 / (M_1 \times t_1) - Hk_1\} \times Hk_1] / [\{2J_{N-1} / (M_N \times t_N) - Hk_{N-1}\} \times Hk_{N-1}]$ は0.8以上1.2以下である

MRAM。

- [12] 請求の範囲6に記載のMRAMであって、
前記Nが偶数であり、
前記kが1以上の奇数であり、
前記第k強磁性層と前記第k+1強磁性層は、実質的に同じ磁気体積を有する
MRAM。

- [13] 請求の範囲6に記載のMRAMであって、
前記Nは4以上の偶数であり、

前記反平行結合エネルギー一定数 J_k は、 $k=N/2$ の場合に最も大きくなるMRAM。

- [14] 請求の範囲13に記載のMRAMであって、
次の関係：

$$[J_{N/2} \{1/(M_{N/2} \times t_{N/2}) + 1/(M_{N/2+1} \times t_{N/2+1})\}] / [2J_{N-1} / (M_N \times t_N)] < 4$$

が満たされる

MRAM。

- [15] 請求の範囲13又は14に記載のMRAMであって、
前記第1非磁性層を挟む前記第1強磁性層及び前記第2強磁性層からなるSAFと、
前記第N-1非磁性層を挟む前記第N-1強磁性層及び前記第N強磁性層からなるSAFが示す飽和磁場は、

前記第N/2強磁性層と前記第N/2+1強磁性層との間の反平行結合が解け始める外部磁場よりも大きい

MRAM。

- [16] 請求の範囲6又は7に記載のMRAMであって、
前記反平行結合エネルギー一定数 J_k （前記 k は1、N-1以外）は、 J_1 または J_{N-1} と比較して同等以上の大きさである

MRAM。

- [17] 請求の範囲6又は7に記載のMRAMであって、
前記第 k 非磁性層に関するRKKY相互作用の反強磁性ピークの次数が α_k で表され、

前記第1非磁性層は、第 α_1 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有し、
前記第N-1非磁性層は、第 α_{N-1} 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有し、

$$J_1 > J_{N-1} \text{ の場合、 } \alpha_1 < \alpha_{N-1} \text{ の関係が満たされ、}$$

$$J_1 < J_{N-1} \text{ の場合、 } \alpha_1 > \alpha_{N-1} \text{ の関係が満たされる}$$

MRAM。

- [18] 請求の範囲17に記載のMRAMであって、

$J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N-1} = \alpha_1 + 1$ の関係が満たされ、
 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 = \alpha_{N-1} + 1$ の関係が満たされる
 MRAM。

[19] 請求の範囲18に記載のMRAMであって、

$J_1 > J_{N-1}$ の場合、
 前記第1非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、
 前記第N-1非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成
 され、

$J_1 < J_{N-1}$ の場合、
 前記第1非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、
 前記第N-1非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成
 される

MRAM。

[20] 請求の範囲17乃至19のいずれかに記載のMRAMであって、

$J_1 > J_{N-1}$ の場合、
 前記第2～第N-2非磁性層のうちの少なくとも一の非磁性層は、前記第N-1非
 磁性層よりも低次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有し、

$J_1 < J_{N-1}$ の場合、
 前記第2～第N-2非磁性層のうちの少なくとも一の非磁性層は、前記第1非磁性
 層よりも低次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有する

MRAM。

[21] 請求の範囲6に記載のMRAMであって、

前記Nは偶数であり、
 前記第k非磁性層に関するRKKY相互作用の反強磁性ピークの次数が α_k で表さ
 れ、

前記第1非磁性層は、第 α_1 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を有し、
 前記第N-1非磁性層は、第 α_{N-1} 次の反強磁性ピークに対応する範囲の膜厚を
 有し、

$J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 < \alpha_{N-1}$ 、且つ、 $\alpha_{N/2} < \alpha_{N-1}$ の関係が満たされ、
 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_1 > \alpha_{N-1}$ 、且つ、 $\alpha_{N/2} < \alpha_1$ の関係が満たされる
 MRAM。

[22] 請求の範囲21に記載のMRAMであって、

$J_1 > J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N/2} + 1 = \alpha_{N-1}$ の関係が満たされ、
 $J_1 < J_{N-1}$ の場合、 $\alpha_{N/2} + 1 = \alpha_1$ の関係が満たされる
 MRAM。

[23] 請求の範囲22に記載のMRAMであって、

前記第(N/2)非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、

前記第1非磁性層あるいは前記第N-1非磁性層は、3.1nm～3.9nmの厚さを有するルテニウム層で形成されている

MRAM。

[24] 請求の範囲22に記載のMRAMであって、

前記第(N/2)非磁性層は、0.7nm～1.2nmの厚さを有するルテニウム層で形成され、

前記第1非磁性層あるいは前記第N-1非磁性層は、1.8nm～2.5nmの厚さを有するルテニウム層で形成されている

MRAM。

[25] 請求の範囲1乃至11のいずれかに記載のMRAMであって、

前記第1非磁性層と前記第N-1非磁性層は異なる構造を有する

MRAM。

[26] 請求の範囲25に記載のMRAMであって、

前記第1非磁性層の膜厚と前記第N-1非磁性層の膜厚とが異なる

MRAM。

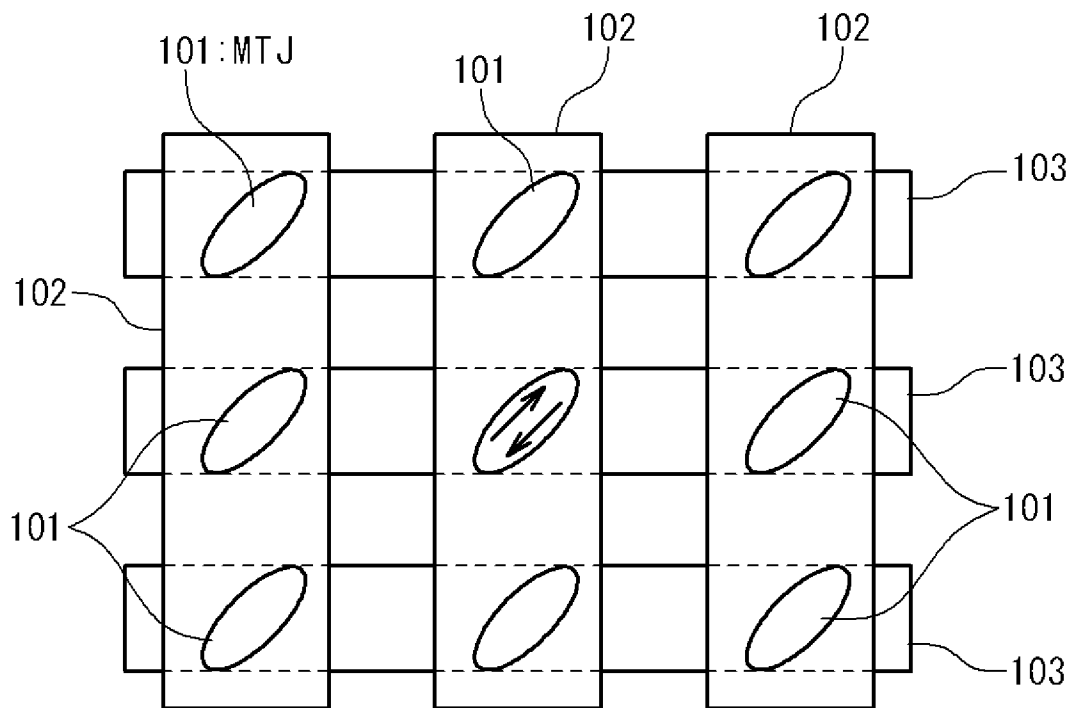
[27] 請求の範囲25に記載のMRAMであって、

前記第1非磁性層の結晶配向性と前記第N-1非磁性層の結晶配向性とが異なる

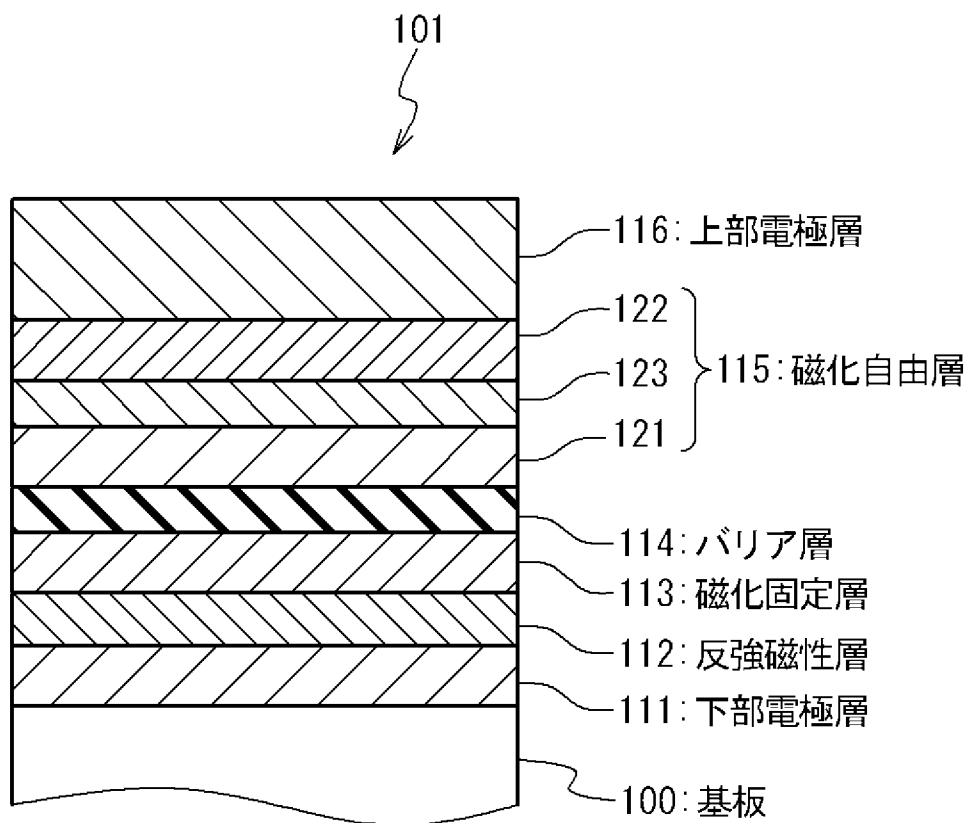
MRAM。

- [28] 請求の範囲27に記載のMRAMであって、
前記第1非磁性層の結晶配向性よりも、前記第N-1非磁性層の結晶配向性の方が高く、且つ、前記第1非磁性層よりも、前記第N-1非磁性層の膜厚の方が厚いMRAM。
- [29] 請求の範囲27に記載のMRAMであって、
前記第1強磁性層の結晶配向性と前記第N-1強磁性層の結晶配向性が異なるMRAM。
- [30] 請求の範囲25に記載のMRAMであって、
前記第1強磁性層、前記第2強磁性層、前記第N-1強磁性層、及び、前記第N強磁性層のうち少なくとも一層が、積層膜から構成されているMRAM。
- [31] 請求の範囲30に記載のMRAMであって、
前記積層膜は、NiFe膜とCoFe膜を含むMRAM。
- [32] 請求の範囲1乃至11のいずれかに記載のMRAMであって、
前記第1非磁性層と前記第N-1非磁性層は実質的に同一の構造を有し、且つ、前記第1非磁性層の上下界面に直接接している全ての部分の元素構成比率は、前記第N-1非磁性層の上下界面に直接接している全ての部分の元素構成比率と異なるMRAM。
- [33] 請求の範囲32に記載のMRAMであって、
前記第1強磁性層、前記第2強磁性層、前記第N-1強磁性層、及び、前記第N強磁性層のうち少なくとも一層が、積層膜から構成されているMRAM。
- [34] 請求の範囲33に記載のMRAMであって、
前記積層膜は、NiFe膜とCoFe膜を含むMRAM。

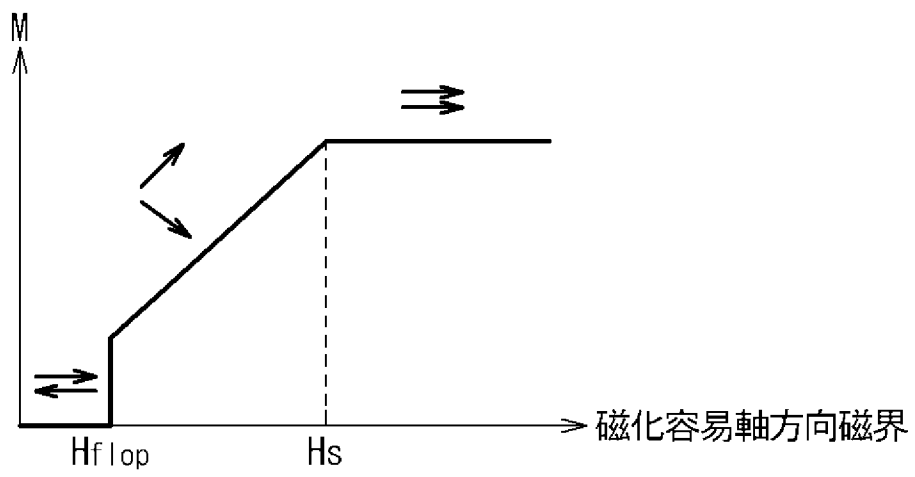
[図1]



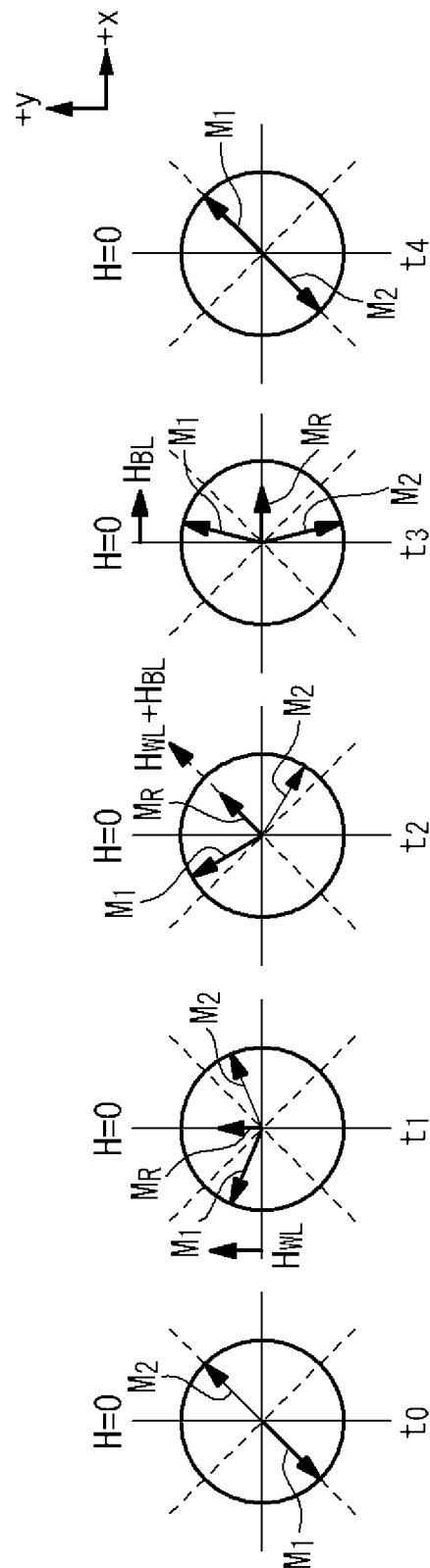
[図2]



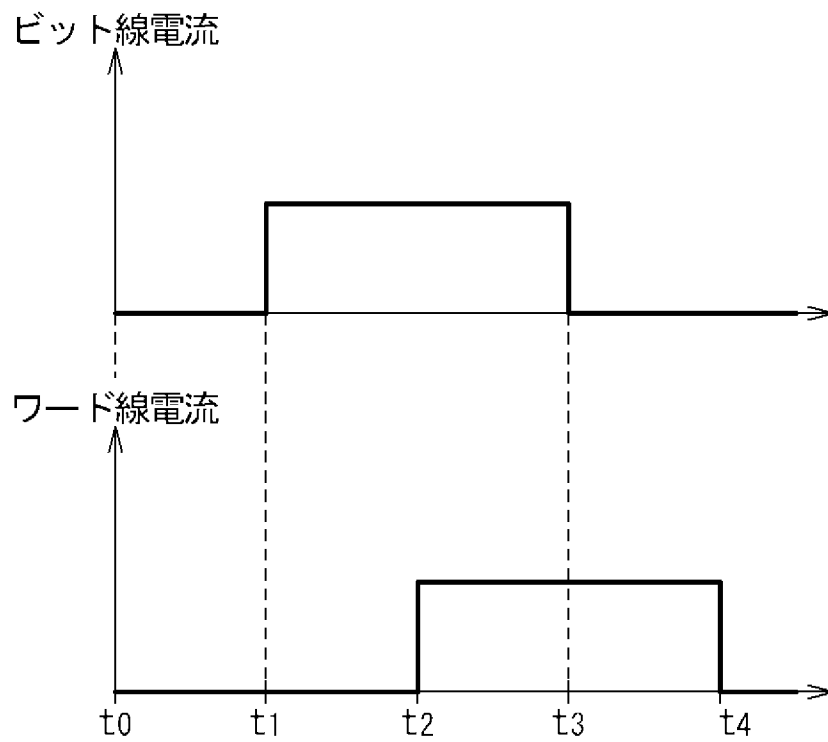
[図3]



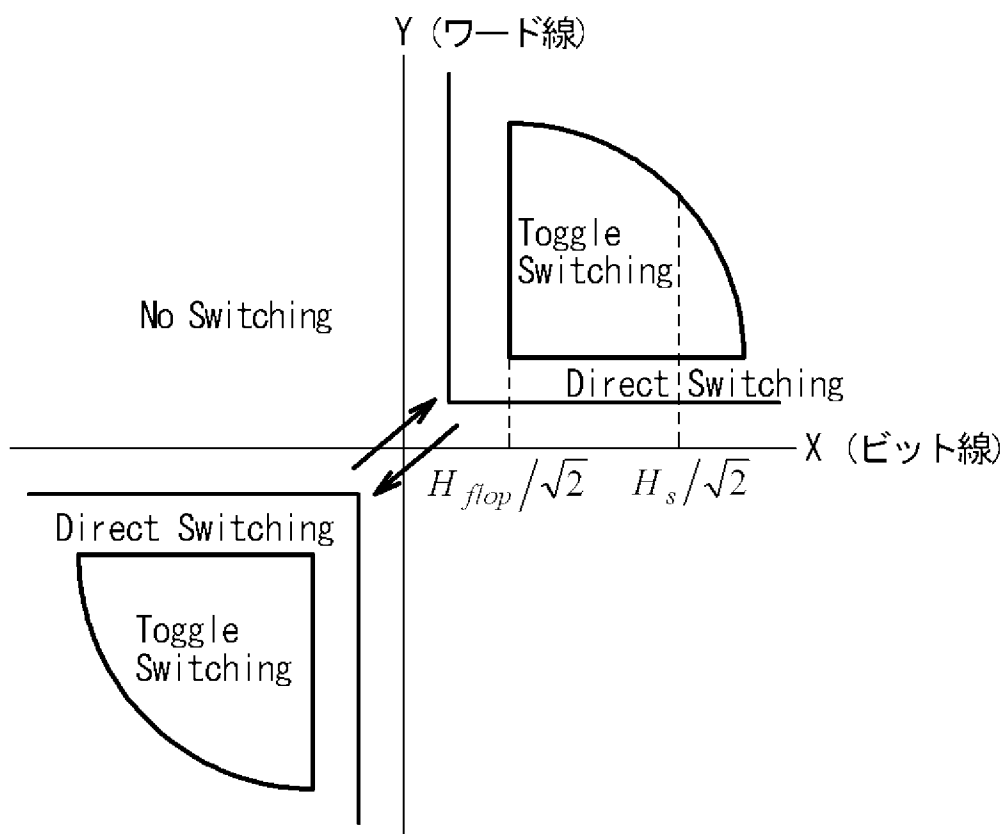
[図4]



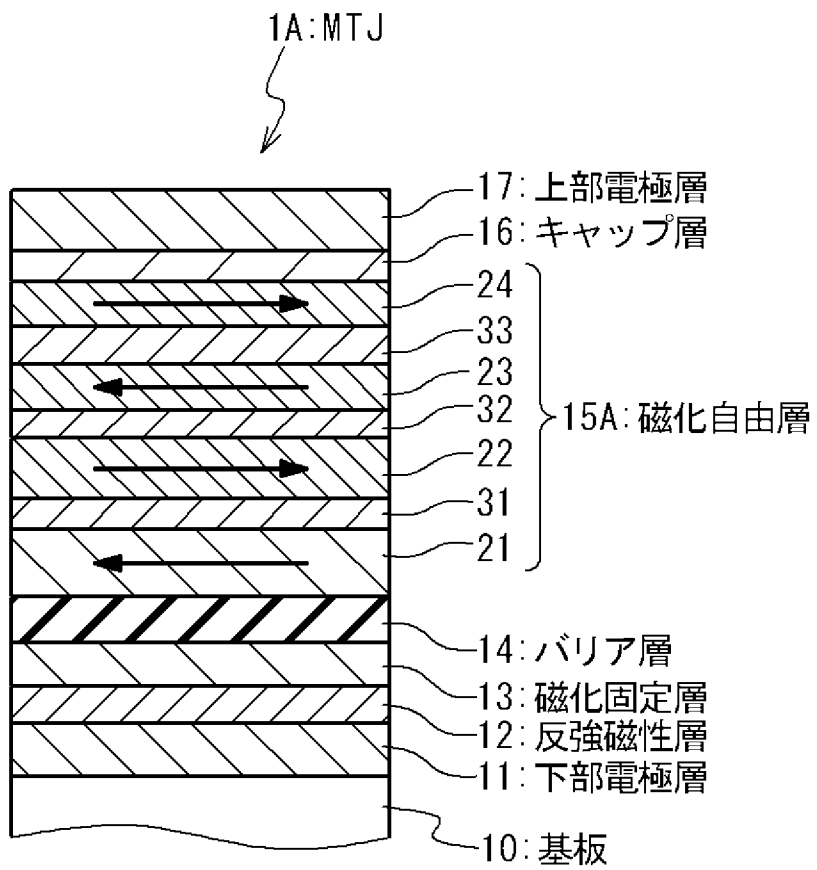
[図5]



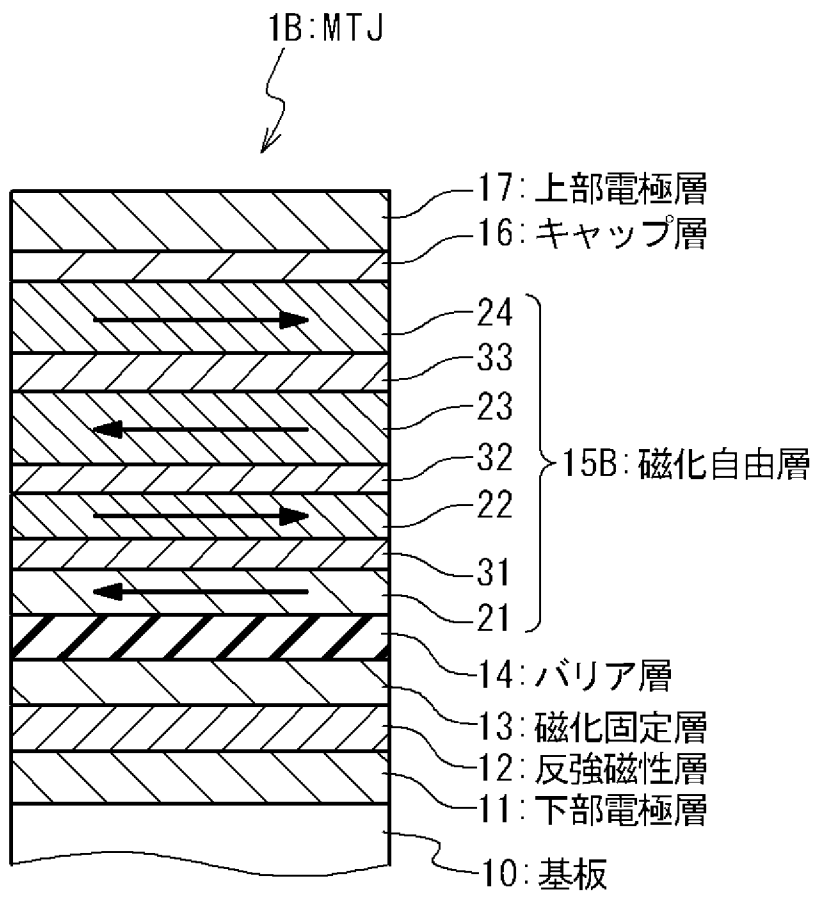
[図6]



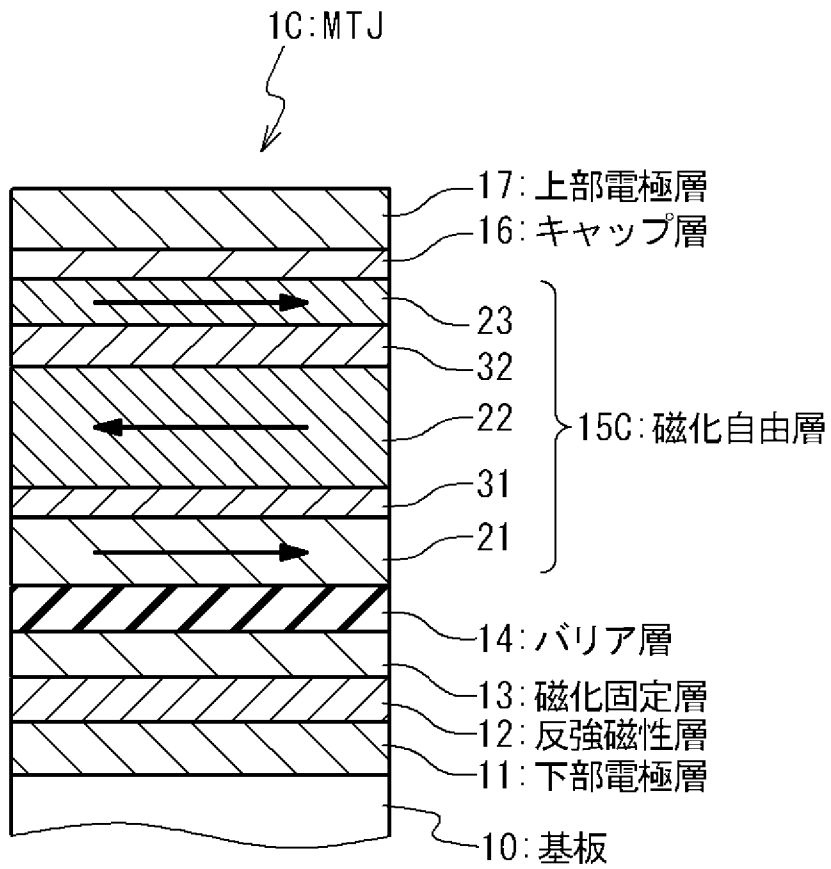
[図7A]



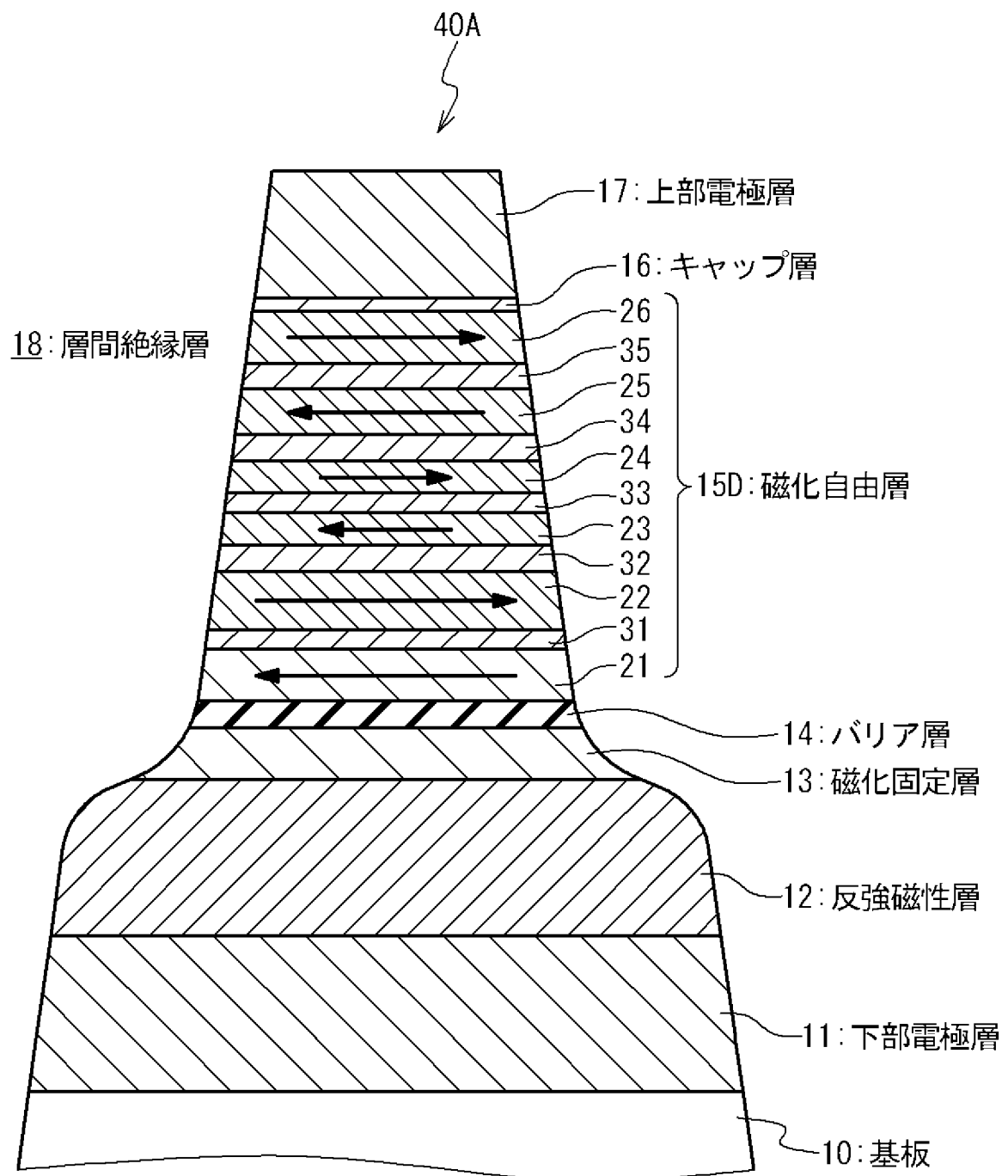
[図7B]



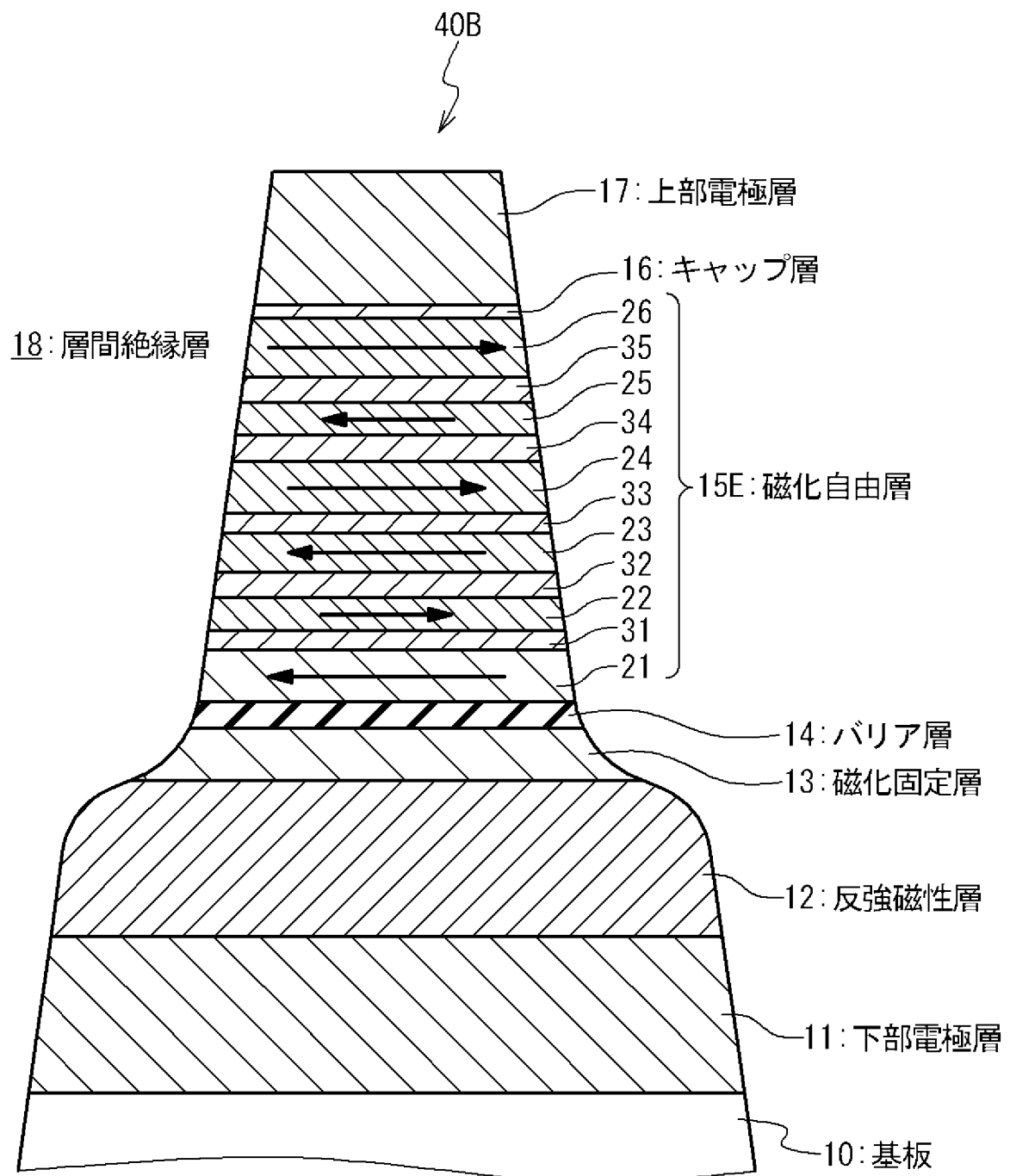
[図7C]



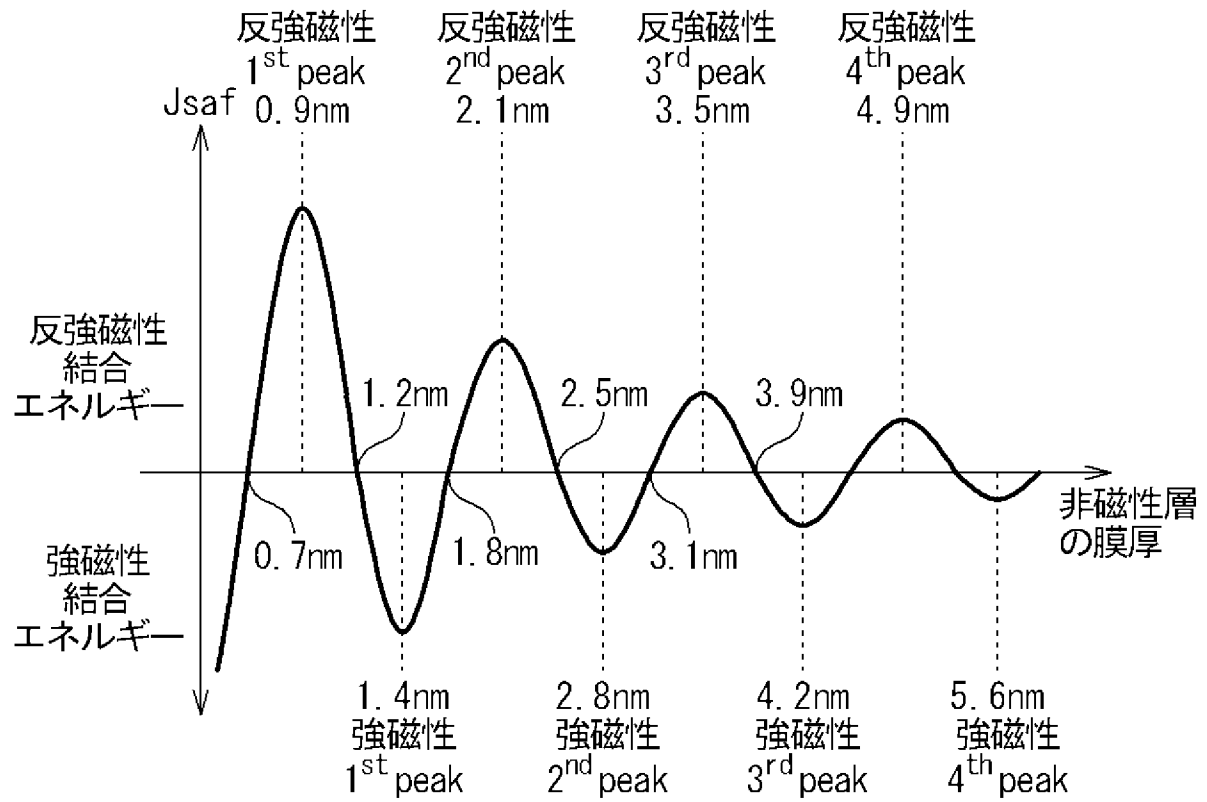
[図8A]



[図8B]



[図9]



[図10A]

試料	SAF 中の 強磁性 層数 N	磁化自由層の膜構成
比較例 1	2	AlOx tunnel barrier/ NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(3.7nm)/
比較例 2	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(5.1nm)/CoFe(0.2nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
比較例 3	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(5.1nm)/CoFe(0.2nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
比較例 4	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(5nm)/CoFe(0.25nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
比較例 5	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
実施例 1	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.6nm)/CoFe(0.45nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
実施例 2	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.4nm)/CoFe(0.55nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
比較例 6	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.1nm)/CoFe(0.7nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
実施例 3	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3.3nm)/CoFe(0.2nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
実施例 4	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3.2nm)/CoFe(0.25nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)
比較例 7	4	AlOx tunnel barrier/ NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/Ru(2.1nm)/NiFe(4.8nm)/CoFe(0.35nm)/ Ru(2.1nm)/NiFe(3.1nm)/CoFe(0.3nm)/Ru(3.5nm)/NiFe(3.7nm)

[図10B]

試料	強磁性層中の界面CoFe厚さ (nm)		磁化×磁気膜厚 (T·nm)	
	第1強磁性層/ 第1非磁性層	第3強磁性層/ 第3非磁性層	第1強磁性層, 第2強磁性層	第3強磁性層, 第4強磁性層
比較例1	0.35		3.15	
比較例2	0.35	0.35	3.15	3.15
比較例3	0.2	0.35	4.72	3.15
比較例4	0.25	0.35	4.72	3.15
比較例5	0.35	0.35	4.72	3.15
実施例1	0.45	0.35	4.72	3.15
実施例2	0.55	0.35	4.72	3.15
比較例6	0.7	0.35	4.72	3.15
実施例3	0.35	0.2	4.72	3.15
実施例4	0.35	0.25	4.72	3.15
比較例7	0.35	0.3	4.72	3.15

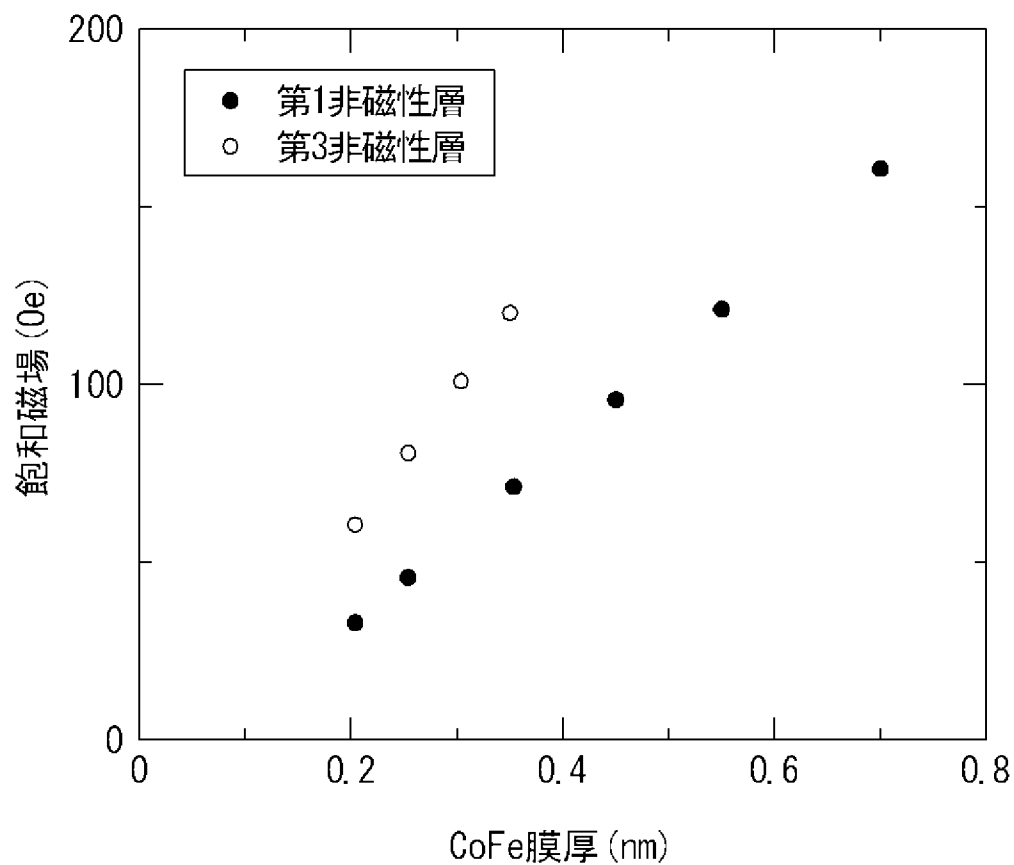
[図11]

試料	0.6×1.2 μm^2 MTJのトグル書き込み特性		
	フロップ磁場 (Oe)	飽和磁場 (Oe)	動作率(%)
比較例1	38	157	100
比較例2	37	570	100
比較例3			0
比較例4	62	325	2
比較例5	47	520	14
実施例1	42	602	98
実施例2	44	606	100
比較例6	52	65	56
実施例3	36	565	93
実施例4	37	576	100
比較例7	54	588	65

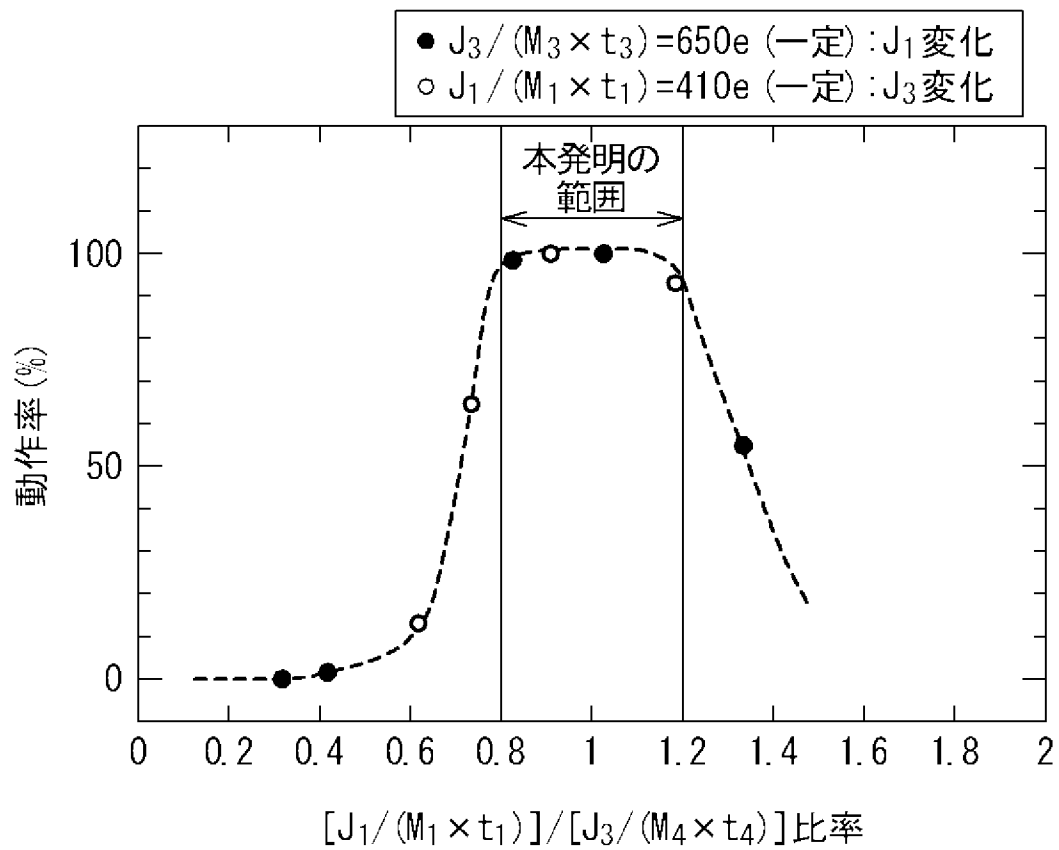
[図12]

試料	0.6×1.2 μm^2 MTJのトグル書き込み特性					
	フロップ 磁場 (Oe)	フロップ 磁場ばらつき (標準偏差) (Oe)	飽和磁場 (Oe)	書き込み マージン (Hs/ Hflop)	動作率 (%)	ダイレクト 反転領域幅 の変化量 (Oe)
比較例1	39	2.6	157	4.0	100	2.2
比較例2	37	3.3	570	15.4	100	5.8
実施例2	44	2.5	606	13.8	100	2.8
実施例4	37	2.1	576	15.6	100	3.1

[図13]



[図14]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/313847

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

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

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	1996-2006
Kokai Jitsuyo Shinan Koho	1971-2006	Toroku Jitsuyo Shinan Koho	1994-2006

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 2005-142508 A (Sony Corp.), 02 June, 2005 (02.06.05), Full text; all drawings (Family: none)	1-34
A	JP 2005-86015 A (Sony Corp.), 31 March, 2005 (31.03.05), Full text; all drawings (Family: none)	1-34
A	JP 2003-298023 A (Toshiba Corp.), 17 October, 2003 (17.10.03), Full text; all drawings (Family: none)	1-34

☒ 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
04 October, 2006 (04.10.06)

Date of mailing of the international search report
17 October, 2006 (17.10.06)

Name and mailing address of the ISA/
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2006/313847

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 2005-505889 A (Motorola, Inc.), 24 February, 2005 (24.02.05), Full text; all drawings & US 6545906 B1 & WO 2003/034437 A2 & EP 1474807 A2 & KR 2004-058244 A & CN 1610949 A	1-34
A	JP 2002-204010 A (Matsushita Electric Industrial Co., Ltd.), 19 July, 2002 (19.07.02), Full text; all drawings & EP 1182713 A2 & US 2002/0055016 A1 & CN 1340867 A & KR 2002-015295 A	1-34
A	JP 2002-151758 A (Hitachi, Ltd.), 24 May, 2002 (24.05.02), Full text; all drawings (Family: none)	1-34

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01L43/08(2006.01)i, G11C11/15(2006.01)i, 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 (I P C))

Int.Cl. H01L43/08, G11C11/15, 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	1971-2006年
日本国実用新案登録公報	1996-2006年
日本国登録実用新案公報	1994-2006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 請求の範囲の番号
A	J P 2005-142508 A (ソニー株式会社) 2005.06.02, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-34
A	J P 2005-86015 A (ソニー株式会社) 2005.03.31, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-34
A	J P 2003-298023 A (株式会社東芝) 2003.10.17, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-34

☒ 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

04.10.2006

国際調査報告の発送日

17.10.2006

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / 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)

小川 将之

4M

9634

電話番号 03-3581-1101 内線 3462

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 請求の範囲の番号
A	J P 2 0 0 5 - 5 0 5 8 8 9 A (モトローラ・インコーポレイ テッド) 2 0 0 5 . 0 2 . 2 4 , 全文, 全図 & U S 6 5 4 5 9 0 6 B 1 & W O 2 0 0 3 / 0 3 4 4 3 7 A 2 & E P 1 4 7 4 8 0 7 A 2 & K R 2 0 0 4 - 0 5 8 2 4 4 A & C N 1 6 1 0 9 4 9 A	1 - 3 4
A	J P 2 0 0 2 - 2 0 4 0 1 0 A (松下電器産業株式会社) 2 0 0 2 . 0 7 . 1 9 , 全文, 全図 & E P 1 1 8 2 7 1 3 A 2 & U S 2 0 0 2 / 0 0 5 5 0 1 6 A 1 & C N 1 3 4 0 8 6 7 A & K R 2 0 0 2 - 0 1 5 2 9 5 A	1 - 3 4
A	J P 2 0 0 2 - 1 5 1 7 5 8 A (株式会社日立製作所) 2 0 0 2 . 0 5 . 2 4 , 全文, 全図 (ファミリーなし)	1 - 3 4