

(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  
2025年4月17日(17.04.2025)



(10) 国際公開番号

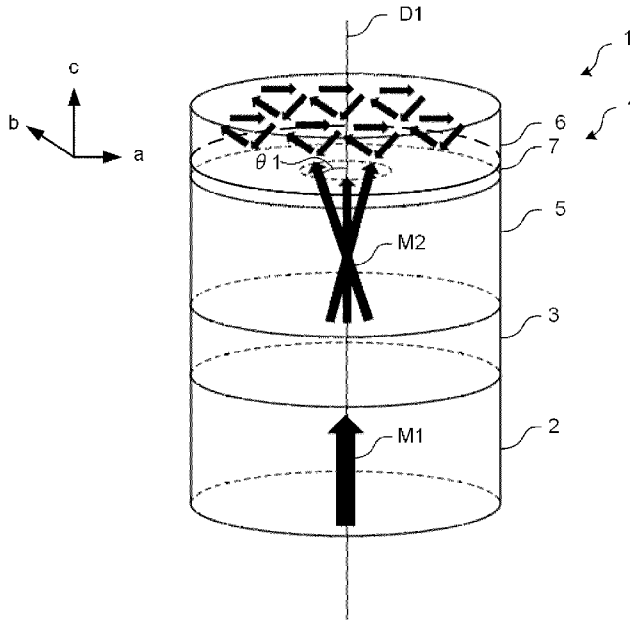
WO 2025/079734 A1

- (51) 国際特許分類:  
*H10B 61/00* (2023.01) *H10N 50/10* (2023.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2024/036724
- (22) 国際出願日: 2024年10月15日(15.10.2024)
- (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 2023-177351 2023年10月13日(13.10.2023) JP
- (71) 出願人: T o p o L o g i c 株式会社  
(**TOPOLOGIC INC.**) [JP/JP]; 〒1138485 東京都  
文京区本郷七丁目3番1号 (JP).
- (72) 発明者: 大森 広之 (**OHMORI, Hiroyuki**);  
〒1138485 東京都文京区本郷七丁目3番1号  
T o p o L o g i c 株式会社内 (JP).
- (74) 代理人: 弁理士法人 I P X (**IPX PATENT  
PARTNERS**); 〒1070052 東京都港区赤坂八  
丁目5番34号 T O D A B U I L D  
I N G 青山5階 (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, CV, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC,  
EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR,  
HU, ID, IL, IN, IQ, IR, IS, IT, JM, JO, JP, KE, KG,  
KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU,

(54) Title: MAGNETIC MEMORY ELEMENT

(54) 発明の名称: 磁気メモリ素子

[図1]



(57) Abstract: An embodiment of the present invention provides a magnetic memory element comprising a fixed layer and a storage layer, wherein: the fixed layer is configured to have spontaneous magnetization along a lamination direction; the magnetization direction of the fixed layer is configured to be fixed regardless of data written to the magnetic memory element; the storage layer is laminated on the fixed layer along the lamination direction, with a barrier layer having electric insulation properties interposed therebetween, and comprises a first ferromagnetic layer and an antiferromagnetic



WO 2025/079734 A1

LY, MA, MD, MG, MK, MN, MU, 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, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, WS, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, CV, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SC, 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, ME, 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).

添付公開書類：

一 国際調査報告 (条約第21条(3))

layer; the first ferromagnetic layer is configured to have spontaneous magnetization along the lamination direction; the magnetization direction of the first ferromagnetic layer is configured to be invertible in accordance with data written to the magnetic memory element by using a tunnel current via the fixed layer and the storage layer; the antiferromagnetic layer includes an antiferromagnetic material that exhibits an abnormal Hall effect by forming a non-collinear or non-coplanar magnetic order in an ab plane defined by an a-axis and a b-axis, which are perpendicular to a c-axis serving as the easy axis of magnetization; and the antiferromagnetic material includes at least a domain in which the c-axis follows the lamination direction.

(57) 要約：本発明の一態様によれば、磁気メモリ素子であって、固定層と、記憶層と、を備え、固定層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該固定層の磁化方向は、当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータによらず固定されるように構成され、記憶層は、積層方向に沿って、電気絶縁性を有するバリア層を介して固定層に積層され、第1の強磁性層と、反強磁性層とを備え、第1の強磁性層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該第1の強磁性層の磁化方向は、固定層および記憶層を介したトンネル電流を用いて当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータに応じて反転可能に構成され、反強磁性層は、磁化容易軸となるc軸に垂直なa軸およびb軸によって規定されるa-b面内に非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体を含み、反強磁性体は、少なくとも、c軸が積層方向に沿っているドメインを含む、磁気メモリ素子が提供される。

## 明 細 書

発明の名称：磁気メモリ素子

### 技術分野

[0001] 本発明は、磁気メモリ素子に関する。

### 背景技術

[0002] 特許文献1には、少ない電流で高速に動作させることが可能な磁気メモリ素子1を提供するための技術が開示されている。

[0003] 当該磁気メモリ素子1は、磁化の向きが膜面に垂直な方向の垂直磁化層と、非磁性層と、膜面内方向に磁化容易軸を有し、磁化の向きが膜面に垂直な方向から15度以上45度以下の角度で傾斜している、強磁性層と、垂直磁化層と強磁性層とが非磁性層を介して積層され、垂直磁化層と強磁性層とが磁氣的結合して成る記憶層と、磁化の向きが膜面に垂直な方向に固定された磁化固定層と、記憶層および磁化固定層の間に配置された、非磁性の中間層とを含み、各層の積層方向に電流を流すことにより情報の記録が行われるように構成される。

### 先行技術文献

#### 特許文献

[0004] 特許文献1：特開2012-009538号公報

### 発明の概要

#### 発明が解決しようとする課題

[0005] しかし、このようなトンネル磁気抵抗効果を利用した磁気メモリ素子により効率的にデータを書き込むための技術には、未だ改善の余地がある。

#### 課題を解決するための手段

[0006] 本発明の一態様によれば、磁気メモリ素子であって、固定層と、記憶層と、を備え、固定層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該固定層の磁化方向は、当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータによらず固定されるように構成され、記憶層は、積層方向に沿って、電気絶縁性を

有するバリア層を介して固定層に積層され、第1の強磁性層と、反強磁性層とを備え、第1の強磁性層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該第1の強磁性層の磁化方向は、固定層および記憶層を介したトンネル電流を用いて当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータに応じて反転可能に構成され、反強磁性層は、磁化容易軸となるc軸に垂直なa軸およびb軸によって規定されるab面内に非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体を含み、反強磁性体は、少なくとも、c軸が積層方向に沿っているドメインを含む、磁気メモリ素子が提供される。

[0007] このような構成によれば、より効率的にデータを書き込むことが可能な、新規な磁気メモリ素子を提供することができる。

### 図面の簡単な説明

[0008] [図1]磁気メモリ素子の構成例を示す図である。

[図2]第1の強磁性層5の磁気モーメントM2が積層方向D1に対して傾いている場合における、回転ヒステリシス測定による記憶層3の磁化の傾斜角 $\theta_1$ の測定例である。

[図3]第1の強磁性層5の磁気モーメントM2が積層方向D1に対して傾いていない場合における、回転ヒステリシス測定による記憶層3の磁化の傾斜角 $\theta_1$ の測定例である。

[図4]直径50nmの第1の強磁性層5のみで計算を行った場合の磁化M2の反転履歴を示す。

[図5]第1の強磁性層5に反強磁性層6を磁氣的に結合させた場合の磁化M2の反転履歴を示す。

[図6]反強磁性層6の磁気モーメントの向きの変化履歴を表す図である。

[図7]パルス幅(PW)と反転電流Icとの関係に関する計算結果を示す図である。

[図8]反強磁性層6中の反強磁性体がc軸に配向した場合における、電流に応じたエラー率の変化を示す図である。

[図9]反強磁性層6中の反強磁性体がランダムに配向した多結晶の場合における電流に応じたエラー率の変化を示す図である。

[図10]反強磁性層6中の反強磁性体がa軸またはb軸に配向した場合における電流に応じたエラー率の変化を示す図である。

[図11]パルス幅5 nsの場合におけるエラー率の計算結果を示す。

[図12]パルス幅1 nsの場合におけるエラー率の計算結果を示す。

[図13]比較例に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。

[図14]実施例1に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。

[図15]実施例2に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。

[図16]実施例3に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。

### 発明を実施するための形態

[0009] 以下、図面を用いて本発明の実施形態について説明する。以下に示す実施形態中で示した各種特徴事項は、互いに組み合わせ可能である。

[0010] ところで、一実施形態に登場するソフトウェアを実現するためのプログラムは、コンピュータが読み取り可能な非一時的な記録媒体（Non-Transitory Computer-Readable Medium）として提供されてもよいし、外部のサーバからダウンロード可能に提供されてもよいし、外部のコンピュータで当該プログラムを起動させてクライアント端末でその機能を実現（いわゆるクラウドコンピューティング）するように提供されてもよい。

[0011] また、一実施形態に係る種々の情報処理において、入力と、入力に応じた出力とが実現されうる。ここで、入力の結果として出力が得られれば、かかる情報処理において参照される情報（以下、参照情報と称する。）の態様は、限定されない。参照情報は、例えば、データベース、ルックアップテーブル、所定の関数（統計学的手法によって構築された、回帰式等の判定式を含む。）等のルールベースの情報でもよいし、入力と出力との相関を予め学習させた学習済みモデルでもよいし、プロンプトを入力することで所望の結果を出力可能な大規模言語モデルでもよい。

[0012] また、一実施形態において「部」とは、例えば、広義の回路によって実施されるハードウェア資源と、これらのハードウェア資源によって具体的に実現されうるソフトウェアの情報処理とを合わせたものも含みうる。また、一実施形態においては様々な情報を取り扱うが、これら情報は、例えば電圧・電流を表す信号値の物理的な値、0又は1で構成される2進数のビット集合体としての信号値の高低、又は量子的な重ね合わせ（いわゆる量子ビット）によって表され、広義の回路上で通信・演算が実行されうる。

[0013] さらに、広義の回路とは、回路（Circuit）、回路類（Circuitry）、プロセッサ（Processor）、及びメモリ（Memory）等を少なくとも適当に組み合わせることによって実現される回路である。また、プロセッサは、汎用プロセッサでもよいし、専用の回路でもよい。すなわち、特定用途向け集積回路（Application Specific Integrated Circuit: ASIC）、プログラマブル論理デバイス（例えば、単純プログラマブル論理デバイス（Simple Programmable Logic Device: SPLD）、複合プログラマブル論理デバイス（Complex Programmable Logic Device: CPLD）、及びフィールドプログラマブルゲートアレイ（Field Programmable Gate Array: FPGA））等を含むものである。

[0014] 1. 磁気メモリ素子の構成例

図1は、磁気メモリ素子の構成例を示す図である。図1に示すように、磁気メモリ素子1は、固定層2と、トンネルバリア層3と、記憶層4と、を備える。これらの層11~13は、積層方向D1に沿って積層され、積層構造の両端には、不図示の一对の電極が設けられている。

[0015] は、一对の電極の間で積層方向D1に沿った電流を流すことにより、情報の読取および書込が行われるように構成される。本実施形態の磁気メモリ素子1は、いわゆるSpin Transfer Torque (STT) - RAMである。

- [0016] 固定層2は、積層方向D1に沿って自発磁化M1を有するように構成される。当該固定層2の磁化方向は、当該磁気メモリ素子1に書き込まれるデータによらず固定されるように構成される。固定層2は、例えば、ピン層を形成する垂直磁化層であり、自発磁化M1の磁化方向が積層方向D1とほぼ一致している。
- [0017] トンネルバリア層3は、巨大磁気抵抗(TMR)を発現するために設けられる非磁性体の絶縁層である。トンネルバリア層3は、例えば、MgO、AlO<sub>x</sub>、TiO<sub>x</sub>等、絶縁層として機能するものであれば特に限定されない。
- [0018] 記憶層4は、積層方向D1に沿って、電気絶縁性を有するトンネルバリア層3を介して固定層2に積層される。これにより、固定層2と記憶層4の間には、トンネルバリア層3を介してトンネル電流を流すことができる。記憶層4は、第1の強磁性層5と、反強磁性層6とを備える。
- [0019] 第1の強磁性層5は、積層方向D1に沿って自発磁化M2を有するように構成される。当該第1の強磁性層5の自発磁化M2の磁化方向は、固定層2および記憶層4を介したトンネル電流を用いて当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータに応じて反転可能に構成される。第1の強磁性層5は、垂直磁気異方性を有することが好ましい。第1の強磁性層5は、例えば、CoやNi、Pd、Pt等を繰り返し積層した膜でもよく、FePt、FePd等のL<sub>10</sub>型の結晶構造に由来する結晶磁気異方性を利用した合金膜でもよく、TbFeCo、GdFe等の希土類を含んだ非晶質材料でもよく、CoFeB、FeCo等の磁性体とMgO、Mg<sub>2</sub>AlO<sub>4</sub>等の酸化物膜との界面に生じる界面磁気異方性を利用するものでもよく、磁性体を縦長の円柱の形状とすることで生じさせる形状磁気異方性を利用するものでもよい。第1の強磁性層5は上記で説明したものの中の一つでもよいし、複数を組み合わせてもよい。特に第1の強磁性層5は、少なくとも磁性元素としてCo元素を含むことが好ましい。
- [0020] 第1の強磁性層5の自発磁化は、膜面に対する垂直方向(ここでは、積層方向D1)から傾斜し得る。第1の強磁性層5の自発磁化M1の傾きは、膜

面に対する垂直方向（例えば、積層方向D1）から0.5度以上45度以下、より好ましくは0.7度以上40度以下、より好ましくは0.9度以上35度以下、さらに好ましくは1度以上30度以下、である。特に、当該傾きが1度以上であると、短パルスにおける反転特性の改善効果がより得られやすい磁気メモリ素子1を提供することができる。角度が30度以下であると、保持特性や磁気抵抗変化率がより高い磁気メモリ素子1を提供することができる。

[0021] 反強磁性層6は、磁化容易軸となるc軸に垂直なa軸およびb軸によって規定されるab面内に非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体を含む。

[0022] 反強磁性体は、少なくとも、c軸が積層方向D1に沿っているドメインを含む。反強磁性体は、c軸が積層方向D1に延びるような結晶配向性を有するように構成され得る。結晶配向性は、具体的には、反強磁性体は、c軸が積層方向D1に沿っているドメインにより構成され得る。このような構成によれば、第1の強磁性層5に寄与する内部磁場をより強めることができるため、さらに高速にデータの書込みが可能な磁気メモリ素子を提供することができる。c軸が積層方向D1に沿っているとは、積層方向に対するドメインのc軸がなす角度が45度未満であることを含み得る。当該角度は、35度未満、であることが好ましく、25度未満であることがより好ましく、15度未満であることがより好ましく、5度未満であることがさらに好ましい。反強磁性体は、c軸と積層方向D1とがほぼ一致している、単結晶であることが特に好ましい。

[0023] c軸配向性は、例えば、透過電子線回折やX線回折等の単結晶構造解析手法によって得られる3次元方位分布に基づき評価され得る。例えば、c軸への結晶配向性は、特定の反射スポット（例えば、 $Mn_3Sn$ における(002)反射スポット）の半値幅によって評価され得る。そのため、反強磁性体がc軸が積層方向D1に延びるような結晶配向性を有することは、当該特定の反射スポットの半値幅が、30度以下、好ましくは10度以下であること

を意味し得る。半値幅10度以下の反強磁性層6は高配向膜、10度より大きく30度以下の反強磁性層6は中配向膜、30度より大きい反強磁性層6は低配向膜で、比較的ランダムな配向性を有する状態である。

[0024] このような、非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体は、一例として、*ab*面内で三角格子やカゴメ格子のようなスピンプラストレーション系を構成するように構成され得る。例えば、反強磁性体は、*c*軸方向に6回回転軸を有する六方晶系であり、特に空間群 $P6_3/mmc$ であることが好ましい。このような反強磁性体は、 $Mn_3Sn$ 、 $Mn_3Pt$ 、 $Mn_3Ge$ 、 $Mn_3Ga$ 、および $Mn_3Ir$ の群より選ばれる1または2以上の物質により構成され得る。例えば、*ab*面内で三角格子状に原子が配置され、磁気モーメントが配置される、六方晶系の場合、各原子の磁気モーメントは*ab*面内に沿っているので、結晶の*c*軸を積層方向D1に向けるように形成することが好ましい。ただし、磁気モーメントは、*c*軸方向に揃っていない配向あるいはランダム配向であってもよい。このような三角磁化構造はMnおよびGe、Ga、Snのうちの少なくとも一種の合金によって実現しうるが、合金の種類はこれに限定されない。また、上記のような合金を用いなくとも磁性元素と非磁性元素との周期的な積層構造を作ることによって、六方晶構造と同様な磁気モーメントの三角配置を作り出すこともできる。

[0025] 当該反強磁性体の異常ホール係数の符号が当該磁気メモリ素子1への書き込みによって反転しないように構成されることが好ましい。このような構成によれば、内部磁場の向きが大きく変わりにくくなることにより、記憶層4に含まれる第1の強磁性層5のスピンの挙動を安定させることができる。したがって、磁気メモリ素子の動作をより安定化させやすくなる。一例として、異常ホール係数の符号、言い換えれば、ある電流の向きに対する異常ホール効果に基づく起電力の向き、は、非共線的または非共面的な磁気秩序によってスピнкаイラリティ（例えば、ベクトルスピнкаイラリティやスカラースピнкаイラリティ等）が有限の値を取ることに起因することがある。その

ため、異常ホール係数の符号が反転しないことは、スピнкаイラリティを規定する隣接するスピン（特に電子スピン）の相対的な向きが反転しないことに対応し得る。したがって、異常ホール係数の符号が反転しないことは、必ずしも各サイトにおけるスピンのみが単独で回転しないことを意味するものに限られず、スピнкаイラリティを規定するスピン同士の相対的な向きを維持するように回転すること（例えば、 $a$   $b$  面内で同一角度だけ回転すること）を含み得る。また、非共面的な磁気構造を有する反強磁性体（特に  $c$  軸方向に磁化容易軸を有する傾角強磁性体）の場合、 $c$  軸方向の磁化反転によってスピнкаイラリティの反転に伴う異常ホール係数の反転が生じることがある。そのため、反強磁性体は、当該磁気メモリ素子 1 への書き込みによって  $c$  軸方向（言い換えれば積層方向  $D$  1）の磁化が反転しないように構成されることが好ましい。

[0026] 一例として、このような反強磁性体では、各磁性原子の磁化が約  $120$  度の角度をもって三角形配置されているので、実効的な磁化量がほとんどない。しかしながら、例えば  $DO_{19}$  型の結晶構造を有する  $Mn_3Sn$  などのワイル磁性体はそのバンド構造に由来する大きな内部磁場が存在し、その磁化量に対して不釣り合いな大きなホール効果や磁気カー効果を示すことが知られている。これらの反強磁性体は、例えば、「ノンコリニア反強磁性体」である。また、三角形に配置している原子の磁化面には磁化の向きが変えやすく、垂直方向には変えにくい特徴がある。この三角形磁化を有する反強磁性体は三角面内に磁気モーメントが束縛されているので、反強磁性層の原子磁気モーメントと垂直磁気異方性を有する第 1 の強磁性層 5 の磁化とをほぼ垂直になるように磁気結合させれば、第 1 の強磁性層 5 の磁化方向が面内方向に傾斜し、さらに面内ほぼ等方的に回転するようになると考えられる。また、反強磁性層を薄くしてもその磁化が垂直方向に大きく向くことがないので、ほぼ一原子層の  $0.3$  nm まで反強磁性層 6 を薄くしても効果が得られる。反強磁性層 6 の厚さは、特に限定されないが、 $20$  nm 以下であることが好ましく、 $10$  nm 以下であることがさらに好ましい。

磁気メモリ素子1は、第1の強磁性層5と反強磁性層6との間に中間層7を備えていてもよい。中間層7は、例えば、B、C、N、O、F、Mg、Al、Si、P、Ti、V、Cr、Cu、Zn、Ga、Ge、Y、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Hf、Ta、W、Re、Os、IrPt、Auなど一もしくは複数の非磁性元素または化合物により構成され得る。このような構成によれば、第1の強磁性層5と反強磁性層6との間の磁気結合の大きさを制御することができる。中間層7は、PtMn、IrMn等の磁気モーメントが反平行に配列した反強磁性体により構成される層を含んでいてもよい。

[0027] また、中間層7は、例えば、Fe、Co、Ni等の磁性元素を、第1の強磁性層5の垂直磁化が大きく劣化させない程度に含んでいてもよい。このような構成によれば、第1の強磁性層5と反強磁性層6との間により安定した界面を形成することができる。また、別の観点では、第1の強磁性層5と反強磁性層6との界面での磁気劣化層の生成を抑えることができる。

[0028] さらに、例えば、磁気メモリ素子1は、トンネルバリア層3と記憶層4（具体的には第1の強磁性層5）との間に、例えば、B、C、Fe、Co、W、Mo、Ir、Rh等の元素を挿入してもよい。これにより、磁気抵抗（MR）効果や耐熱性を改善することができる。

[0029] 以上のような構成によれば、反強磁性層6は、ab面内に形成される反強磁性的な磁気秩序に起因して、c軸方向に沿って仮想的な内部磁場を内部に発生させる。当該内部磁場は、第1の強磁性層と反強磁性層6との間の相互作用を通じて、第1の強磁性層の自発磁化を担うスピンの運動（例えば、積層方向D1を軸とする歳差運動）に影響を与える。ここで、当該反強磁性体は、c軸が積層方向D1に沿っているドメインを有することにより、積層方向D1に沿った内部磁場を発生させる。当該内部磁場は、第1の強磁性層中のスピンに対して、積層方向D1から傾いた状態での積層方向D1を軸とする歳差運動を誘起する。これにより、第1の強磁性層中のスピンの反転の際に歳差運動を誘起する時間が短縮されるため、従来技術に比べてスピンの

反転速度を高めることができる。したがって、より高速にデータの書込みが可能な磁気メモリ素子を提供することができる。

[0030] 2. 第1の強磁性層5の自発磁化M2の傾きについて

次に、第1の強磁性層5の自発磁化M2の傾きについて説明する。なお、ここでは説明の便宜上、自発磁化M2の傾きは、積層方向D1に対して自発磁化を表す磁気モーメントM2の方向がなす角度 $\theta_1$ によって規定される。以下、当該角度 $\theta_1$ を、傾斜角 $\theta_1$ という。

[0031] 傾斜角 $\theta_1$ は、磁気メモリ素子1の回転ヒステリシス損の測定によって推定され得る。図2は、第1の強磁性層5の磁気モーメントM2が積層方向D1に対して傾いている場合における、回転ヒステリシス測定による記憶層3の磁化の傾斜角 $\theta_1$ の測定例である。図3は、第1の強磁性層5の磁気モーメントM2が積層方向D1に対して傾いていない場合における、回転ヒステリシス測定による記憶層3の磁化の傾斜角 $\theta_1$ の測定例である。

[0032] 回転磁場中での抵抗の変化率の測定により、磁化の傾斜角 $\theta_1$ を求められる。記憶層（第1の強磁性層5）の磁化の傾斜角 $\theta_1$ と、磁場の印加角度が同じになったときに、抵抗変化が起こらない。例えば、回転磁場中での抵抗測定では、スピンの傾いている場合、印加磁場を変えて測定すると、傾斜角 $\theta_1$ の点で、複数の印加磁場の抵抗曲線どうしの交差が起きる。一方で、磁化の傾きが無い場合は、角度が0度の点でそれぞれの抵抗曲線が重なるが交差は起こらない。このようにして磁化の傾斜角 $\theta_1$ を求めることができる。このように、本開示の技術によれば、少ない電流で高速動作可能な不揮発メモリを実現できる。

[0033] 3. 磁気モーメントM2の挙動に関するシミュレーション例

次に、上記実施形態をさらに具体化した系における、第1の強磁性層5の磁気モーメントM2の挙動に関するシミュレーション（以下、本シミュレーションという。）の手順と結果について、図4～図6を用いて説明する。なお、以下の図4～図6における磁気モーメントM2の向きを示すx方向、y方向、およびz方向は、それぞれ、a軸の方向、b軸の方向、およびc軸の

方向に対応する。すなわち、 $x$   $y$  平面は、 $a$   $b$  面を示す。

[0034] 本願発明者は、まず、ランダウ・リフシッツ・ギルバート (LLG) 方程式によるスピントルク磁化反転のシミュレーションの計算を行った。強磁性層として、磁化量  $1000 \text{ emu} / \text{cm}^3$ 、厚さ  $1.5 \text{ nm}$ 、垂直磁気異方性を  $5 \text{ kOe}$ 、ダンピング定数  $0.01$ 、スピン注入効率  $50\%$  として計算を行った。反強磁性層として、実効的な磁化はないと仮定し、反強磁性原子の磁気モーメントは三角形に配置され面内異方性がないものとし、面内への束縛磁場は  $100$  テスラ、ダンピング定数は  $0.01$  とした。

[0035] 図4は、直径  $50 \text{ nm}$  の第1の強磁性層5のみで計算を行った場合の磁化  $M_2$  の反転履歴を示す。磁化  $M_2$  の反転は、 $z$  軸に沿って正から負への反転として、印加パルス幅は  $5 \text{ ns}$  とした。一方で、図5は、第1の強磁性層5に反強磁性層6を磁氣的に結合させた場合の磁化  $M_2$  の反転履歴を示す。第1の強磁性層5の特性は、図5で用いたものと同じである。第1の強磁性層5と反強磁性層6との磁氣的結合強度は、第1の強磁性層5への実効磁場が  $1 \text{ kOe}$  相当となるようにした。反強磁性層6の厚さを  $3 \text{ nm}$  として計算した。

[0036] 図5に示すように、強磁性層131と反強磁性層6とを積層して磁気結合させた場合、第1の強磁性層5の磁化  $M_2$  が  $z$  軸方向（すなわち積層方向  $D_1$ ）からある程度角度を保った状態で揺らいでいることが確認された。これは、反強磁性層6によるスピントルクが第1の強磁性層5の磁気モーメント  $M_2$  を傾けることに対して効率的に作用することを示唆している。

[0037] 図6は、反強磁性層6の磁気モーメントの向きの変化履歴を表す図である。反強磁性層6の磁気モーメントはほぼ  $a$   $b$  面内を保ったままに回転するため、リング状の磁化の軌跡を示した。また、この結果は、各磁気モーメント（言い換えればスピン）は、 $120$  度構造を保ったまま  $a$   $b$  面内で回転を行うことを示唆しており、反強磁性層6においてベクトルスピンカイラリティ等のスピンカイラリティの符号が反転していないことを示唆している。

[0038] 次に、前述の条件下でパルス幅 (PW) を変えながら反転電流  $I_c$  を計算

した結果について説明する。図7は、パルス幅(PW)と反転電流 $I_c$ との関係に関する計算結果を示す図である。本計算例では、(a)記憶層4が第1の強磁性層5のみにより構成されている場合と、(b)記憶層4が第1の強磁性層5と反強磁性層6とにより構成されている場合との2つの場合で、計算を行った。図7に示すように、強磁性層131と反強磁性層6とを積層した場合の反転電流 $I_c$ は、第1の強磁性層5単層の場合に比べて反転電流 $I_c$ が低下することが示される。なお、上記の計算は三角磁気モーメントが膜面内に配列している場合のものである。

[0039] 次に、反強磁性層6を構成する反強磁性体が、三角磁気モーメントに直交する軸をc軸、面内の軸をa軸、b軸とした六方晶の結晶であると仮定して、反強磁性層6中の反強磁性体が(a)c軸に配向した場合、(b)ランダムに配向した多結晶の場合、および(c)a軸またはb軸に配向した場合、の3通りについて、強磁性層131と反強磁性層6との間に働く磁気結合強度 $E_x$ を変えたとき(具体的には、 $E_x = 0, 0.1, 0.3, 1, 2 \text{ kOe}$ )の、磁気メモリ素子1に流す反転電流に応じた反転エラー率の計算を行った。パルス幅は2nsであり、その他の条件は前述の計算と同じである。図8は、反強磁性層6中の反強磁性体がc軸に配向した場合における、電流に応じたエラー率の変化を示す図である。図9は、反強磁性層6中の反強磁性体がランダムに配向した多結晶の場合における電流に応じたエラー率の変化を示す図である。図10は、反強磁性層6中の反強磁性体がa軸またはb軸に配向した場合における電流に応じたエラー率の変化を示す図である。図8~図10では、反転電流が横軸に、エラー率が対数スケールで縦軸に表示されている。

[0040] c軸配向とランダム配向の場合には磁気結合強度の強さを大きくすると反転電流が低下すると同時にエラー率の傾きが急峻になるが、a軸またはb軸配向の場合は磁気結合を強くしてもエラー率の低下はほとんど見られない。また、c軸配向およびランダム配向では磁気結合強度の大きさを大きくすると強磁性層の磁化が面直方向から傾きやすくなる。例えば、c軸配向の場合

、傾斜角 $\theta 1$ は、反強磁性層6との磁気結合を通じて第1の強磁性層5内に生じる内部磁場である磁気結合磁場 $H_{ex}$ および、第1の強磁性層5の異方性磁場 $H_k$ を用いて、 $\theta 1 = \tan(H_{ex}/H_k)$ となる。完全なc軸配向でない場合、同じ磁気結合磁場の強度でも傾斜角 $\theta 1$ は完全なc軸配向と比較して小さくなる。

[0041] 次に、反強磁性層6の厚さ $t$ を変えた場合( $t = 0.3, 1, 3, 10 \text{ nm}$ )の計算を示す。図11は、パルス幅 $5 \text{ ns}$ の場合におけるエラー率の計算結果を示す。図12は、パルス幅 $1 \text{ ns}$ の場合におけるエラー率の計算結果を示す。反強磁性層6の厚さ $t$ が薄いほど、パルス幅 $5 \text{ ns}$ での反転電流が低くなる傾向が見られた。一方、パルス幅 $1 \text{ ns}$ では、反強磁性層6の厚さ $t$ に対する反転電流の変化が小さい傾向が見られた。

[0042] 4. 磁気メモリ素子1の実施例および比較例について

次に、上述した磁気メモリ素子1をさらに具体化した実施例および比較例について説明する。各実施例および比較例は、Si基板上にスパッタリングによって種々の層を積層した。なお、以下で述べる各層の厚さは、各層の厚さの平均値である。

[0043] 4. 1. 実施例および比較例の準備について

[比較例]

[0044] 図13は、比較例に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。比較例に係る磁気メモリ素子1は、下地層9、ピン層10、反強磁性磁気結合層11、参照層12、トンネルバリア層13、記憶層を構成する強磁性層14、キャップ層15により構成される。

[0045] 下地層9は、厚さ $2 \text{ nm}$ のTa層の上に、厚さ $5 \text{ nm}$ のRu層を積層することにより得られた。

[0046] 固定層に対応するピン層10は、厚さ約 $4 \text{ nm}$ のCoおよびPtの複合層を、Ru層に積層することにより得られた。複合層は、約 $0.8 \text{ nm}$ のCo層と約 $0.6 \text{ nm}$ のPt層とが交互に積層されるように構成された。

[0047] 反強磁性磁気結合層11は、ピン層10と参照層12の磁化を反平行に結

合させるための層であり、本比較例では厚さ0.6 nmのRu層により構成した。

[0048] 参照層12は、記憶層を構成する強磁性層14の判定基準となる層であり、本比較例では自発磁化を有する、厚さ1 nmのCoFeB層により構成された。

[0049] トンネルバリア層13は、トンネル電流を流すことが可能な絶縁体であり、本実施例では厚さ0.7 nmのMgOにより構成された。

[0050] 記憶層を構成する強磁性層14は、厚さ1.5 nmのCoFeB層をトンネルバリア層13に積層することにより構成された。

[0051] キャップ層15は、強磁性層14に厚さ1 nmのMo層、厚さ0.5 nmのMgO層、厚さ1 nmのRu層、および厚さ5 nmのTa層を順に積層することにより構成された。

[0052] その後、比較例に係る磁気メモリ素子1を直径70 nmの円形に形成し、両端に電極を接続することにより、実施例1に係る測定試料を得た。

[0053] [実施例1]

図14は、実施例1に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。実施例1に係る磁気メモリ素子1は、下地層16、ピン層17、反強磁性磁気結合層18、参照層19、トンネルバリア層20、記憶層を構成する強磁性層21、記憶層を構成する反強磁性層22、およびキャップ層23により構成される。下地層16、ピン層17、反強磁性磁気結合層18、参照層19、およびトンネルバリア層20は、比較例に係る磁気メモリ素子1のものと共通である。

[0054] 実施例1に係る強磁性層21は、厚さ1.3 nmのCoFeB層と、厚さ0.2 nmのTa層と、厚さ0.5 nmのCo層とを順にトンネルバリア層20に積層することにより得られた。反強磁性層22は、厚さ5 nmのMn<sub>3</sub>Snを、強磁性層21のCo層に積層することにより得られた。キャップ層23は、厚さ5 nmのTa層を反強磁性層22に積層することにより得られた。

[0055] その後、実施例1に係る磁気メモリ素子1を直径70nmの円形に形成し、両端に電極を接続することにより、実施例1に係る測定試料を得た。

[0056] [実施例2]

図15は、実施例2に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。実施例2に係る磁気メモリ素子1は、下地層24、ピン層25、ピン層と参照層の磁化を反平行に結合させるための反強磁性磁気結合層26、参照層27、トンネルバリア層28、記憶層を構成する強磁性層29、記憶層を構成する2種類の反強磁性層30、31、およびキャップ層32により構成される。下地層24、ピン層25、参照層27、およびトンネルバリア層28は、比較例に係る磁気メモリ素子1のものと共通である。

[0057] 実施例2に係る反強磁性磁気結合層26は、厚さ0.6nmのIr層と、厚さ0.3nmのMo層とをピン層25に順に積層することにより得られた。

[0058] 実施例2に係る強磁性層29は、厚さ0.3nmのカーボン(C)層と、厚さ1.3nmのCoFe層とをトンネルバリア層28に順に積層することにより得られた。

[0059] 実施例2に係る反強磁性層30、31は、厚さ2nmのMnIr層30と、厚さ3nmのMn<sub>3</sub>Sn層31とを、強磁性層29に順に積層することにより得られた。

[0060] 実施例2に係るキャップ層32は、厚さ0.5nmのMgO層と、厚さ5nmのRu層とを、Mn<sub>3</sub>Sn層31に順に積層することにより得られた。実施例2に係る磁気メモリ素子1の両端の層には、不図示の電極が接続されている。

[0061] その後、実施例2に係る磁気メモリ素子1を直径70nmの円形に形成し、両端に電極を接続することにより、実施例2に係る測定試料を得た。

[0062] [実施例3]

図16は、実施例3に係る磁気メモリ素子1の層構造を示す図である。実施例3に係る磁気メモリ素子1は、下地層33、記憶層を構成する第1の強

磁性層 34、記憶層を構成する反強磁性層 35、記憶層を構成する第 1 の反強磁性磁気結合層 36、記憶層を構成する第 2 の強磁性層 37、トンネルバリア層 38、参照層 39、ピン層 41 と参照層 39 の磁化を反平行に結合させるための第 2 の反強磁性磁気結合層 40、ピン層 41、およびキャップ層 42 により構成される。

[0063] 実施例 3 に係る下地層 33 は、厚さ 2 nm の Ta 層と、厚さ 3 nm の Ru 層と、厚さ 0.5 nm の MgO 層とを、順に Si 基板に積層することにより得られた。

[0064] 実施例 3 に係る第 1 の強磁性層 34 は、厚さ 0.6 nm の Co 層を下地層 33 の MgO 層に積層することにより得られた。

[0065] 実施例 3 に係る反強磁性層 35 は、厚さ 1 nm の Mn<sub>3</sub>Sn 層を、第 1 の強磁性層 34 に積層することにより得られた。

[0066] 実施例 3 に係る第 1 の反強磁性磁気結合層 36 は、厚さ 0.6 nm の Re 層と厚さ 0.2 nm の W 層とを反強磁性層 35 に積層することにより得られた。

[0067] 実施例 3 に係る第 2 の強磁性層 37 は、厚さ 1 nm の CoFeB 層を、第 1 の反強磁性磁気結合層 36 の W 層に積層することにより得られた。

[0068] 実施例 3 に係るトンネルバリア層 38 は、厚さ 0.7 nm の MgO 層を、第 2 の強磁性層 37 に積層することにより得られた。

[0069] 実施例 3 に係る参照層 39 は、厚さ 1 nm の CoFeB 層と、厚さ 0.3 nm の Ta 層と、厚さ 0.5 nm の Co 層とを、第 2 の強磁性層 37 に積層することにより得られた。

[0070] 実施例 3 に係る第 2 の反強磁性磁気結合層 40 は、厚さ 0.8 nm の Ru 層を、参照層 39 の Co 層に積層することにより得られた。このように、記憶層 4 は、さらに第 2 の強磁性層を含んでもよい。第 2 の強磁性層は、反強磁性層 6 を介して第 1 の強磁性層 5 に積層されてもよい。このような構成によれば、記憶層 4 におけるスピンの挙動をさらに安定化させることができる。

[0071] 実施例3に係るピン層41は、厚さ5nmのCoおよびPtの複合層を、Ru層に積層することにより得られた。複合層は、約0.8nmのCo層と約0.6nmのPt層とが交互に積層されるように構成された。実施例3に係る複合層におけるCo層とPt層との積層順序は、実施例1、2及び比較例と反対であった。

[0072] キャップ層42は、厚さ5nmのRu層をピン層41に積層することにより得られた。

[0073] その後、実施例3に係る磁気メモリ素子1を直径70nmの円形に形成し、両端に電極を接続することにより、実施例3に係る測定試料を得た。

[0074] 4. 2. 実施例および比較例に係る磁気メモリ素子の評価方法および評価結果について

次に、上述のように準備された実施例および比較例のそれぞれに係る磁気メモリ素子の評価方法および評価結果について説明する。本願発明者らは、各実施例および比較例のそれぞれに係る磁気メモリ素子の両端に設けられた電極を通じて、磁気メモリ素子1に対してパルス電圧を印加し、磁気メモリ素子1に流れる電流を測定した。パルス電圧の最大電圧値は、1.2Vであり、パルス電圧のパルス幅(PW)は、10nsまたは2nsであった。これにより得られた電流電圧測定に基づき、記憶層を構成する強磁性層の磁化がピン層の磁化と平行な状態(P)と反平行な状態(AP)とで変化する際の電圧(反転電圧)を計算した。PとAPとでは磁気抵抗効果によって磁気メモリ素子1の抵抗値が異なることから、電流値が非線形に変化する際の電圧値を反転電圧とした。

[0075] また、本願発明者らは、各実施例および比較例のそれぞれに係る磁気メモリ素子に対して磁場印加プローバーを用いて積層方向D1のM-H履歴の測定を行った。測定の際には、室温において積層方向D1に沿って10kOeから+10kOeまでの磁場を印加した。これにより得られたM-H曲線に基づき、各磁気メモリ素子の保持力を計算した。

[0076] 以下の表は、上記評価方法に基づく実施例および比較例の実験結果として

、比較例および実施例に係る磁気メモリ素子の保磁力、並びにパルス幅 10 ns および 2 ns で平行から反平行 (P→AP) および反平行から平行 (AP→P) に反転させた際の反転電圧を示す。

[表1]

	比較例	実施例 1	実施例 2	実施例 3
保磁力	2850 Oe	2740 Oe	2440 Oe	2900 Oe
反転電圧 (P→AP)PW=10ns	0.44 V	0.31 V	0.29 V	0.3 V
反転電圧 (AP→P)PW=10ns	0.51 V	0.33 V	0.3 V	0.32 V
反転電圧 (P→AP)PW=2ns	0.81 V	0.42 V	0.4 V	0.43 V
反転電圧 (AP→P)PW=2ns	0.85 V	0.44V	0.42 V	0.45 V

[0077] 上記表に示されるように、実施例 1～3 は比較例に対して同等の保磁力を持ちながら、パルス幅 10 ns で 30%程度反転電流の低減、パルス幅 2 ns では反転電圧がほぼ半減する特性を示した。実施例 1～3 のいずれもが、反強磁性層を有するのに対して、比較例のみがこのような反強磁性層を有しないことから、記憶層が強磁性層と反強磁性層とを含むことが、比較例に対する実施例 1～3 での反転電圧の減少に寄与しているものと考えられる。このような結果は、上述のような反強磁性層 6 が、第 1 の強磁性層 5 の磁気モーメント M2 の初期の傾斜角  $\theta_1$  を強めることを示唆している。

[0078] 具体的には、上記の評価結果から、情報の基準となる固定層 2 と情報が記録される記憶層 4 とがトンネルバリア層 3 を介して積層された磁気メモリ素子 1 において、固定層 2 が垂直磁化膜であり、記憶層 4 が垂直磁化容易軸を有する第 1 の強磁性層 5 と原子の磁気モーメントが約 120 度の角度に配列した反強磁性体との積層膜で構成することで、第 1 の強磁性層 5 の磁化が磁化容易軸からある程度の角度で傾いた円錐状の磁化容易方向を形成でき、小

さい電流かつ短い記録時間での記録が可能となることが示唆された。

[0079] [その他]

上記実施形態は、例えば、以下の各態様を技術的に矛盾しない範囲で適宜組み合わせて実施され得る。

[0080] 磁気メモリ素子 1 に含まれる積層構造は、スパッタリング法に限られず、分子ビームエピタキシー法等の任意の方法により構成可能である。

[0081] 磁気メモリ素子 1 は、電極等が接続されているものに限られない。言い換えれば、第 1 の強磁性層 5 と、反強磁性層 6 とを含む記憶層 4 がトンネルバリア層 3 を介して固定層 2 に接続されていれば、その構造や流通態様は任意である。

[0082] 上記磁気メモリ素子 1 等は、次に記載の各態様で提供されてもよい。

[0083] (1) 磁気メモリ素子であって、固定層と、記憶層と、を備え、前記固定層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該固定層の磁化方向は、当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータによらず固定されるように構成され、前記記憶層は、前記積層方向に沿って、電気絶縁性を有するバリア層を介して前記固定層に積層され、第 1 の強磁性層と、反強磁性層とを備え、前記第 1 の強磁性層は、前記積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該第 1 の強磁性層の磁化方向は、前記固定層および前記記憶層を介したトンネル電流を用いて当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータに応じて反転可能に構成され、前記反強磁性層は、磁化容易軸となる c 軸に垂直な a 軸および b 軸によって規定される a b 面内に非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体を含み、前記反強磁性体は、少なくとも、前記 c 軸が前記積層方向に沿っているドメインを含む、磁気メモリ素子。

[0084] このような構成によれば、反強磁性層は、a b 面内に形成される反強磁性的な磁気秩序に起因して、c 軸方向に沿って仮想的な内部磁場を内部に発生させる。当該内部磁場は、第 1 の強磁性層と反強磁性層との間の相互作用を通じて、第 1 の強磁性層の自発磁化を担うスピンの運動（例えば、積層方向

を軸とする歳差運動)に影響を与える。ここで、当該反強磁性体は、c軸が積層方向に沿っているドメインを有することにより、積層方向に沿った内部磁場を発生させる。当該内部磁場は、第1の強磁性層中のスピンの対して、積層方向から傾いた状態での積層方向を軸とする歳差運動を誘起する。これにより、第1の強磁性層中のスピンの反転の際に歳差運動を誘起する時間が短縮されるため、従来技術に比べてスピンの反転速度を高めることができる。したがって、より高速にデータの書込みが可能な磁気メモリ素子を提供することができる。

[0085] (2) 上記(1)に記載の磁気メモリ素子において、前記反強磁性体は、当該反強磁性体の異常ホール係数の符号が当該磁気メモリ素子に書き込みによって反転しないように構成される、磁気メモリ素子。

[0086] このような構成によれば、内部磁場の向きが大きく変わりにくくなることにより、記憶層に含まれる第1の強磁性層のスピンの挙動を安定させることができる。したがって、磁気メモリ素子の動作をより安定化させやすくなる。

[0087] (3) 上記(1)または(2)に記載の磁気メモリ素子において、前記反強磁性体は、前記c軸が前記積層方向に延びるような結晶配向性を有するように構成される、磁気メモリ素子。

[0088] (4) 上記(1)～(3)の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、前記反強磁性体は、前記c軸が前記積層方向に沿っているドメインにより構成される、磁気メモリ素子。

[0089] このような構成によれば、第1の強磁性層に寄与する内部磁場をより強めることができるため、さらに高速にデータの書込みが可能な磁気メモリ素子を提供することができる。

[0090] (5) 上記(1)～(4)の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、前記反強磁性体は、前記c軸に沿った6回回転軸を有する六方晶系である、磁気メモリ素子。

[0091] (6) 上記(1)～(5)の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、

前記反強磁性体は、 $Mn_3Sn$ 、 $Mn_3Pt$ 、 $Mn_3Ge$ 、 $Mn_3Ga$ 、および  $Mn_3Ir$  の群より選ばれる 1 または 2 以上の物質により構成される、磁気メモリ素子。

[0092] (7) 上記 (1) ~ (6) の何れか 1 つに記載の磁気メモリ素子において、前記第 1 の強磁性層は、少なくとも磁性元素として Co 元素を含む、磁気メモリ素子。

[0093] (8) 上記 (1) ~ (7) の何れか 1 つに記載の磁気メモリ素子において、前記記憶層は、さらに第 2 の強磁性層を含み、前記第 2 の強磁性層は、前記反強磁性層を介して前記第 1 の強磁性層に積層される、磁気メモリ素子。

[0094] このような構成によれば、記憶層におけるスピンの挙動をさらに安定化させることができる。

もちろん、この限りではない。

[0095] 例えば、上記各態様と独立して、または組み合わせて以下の態様で提供され得る。

[0096] (項目 1)

磁化の向きによって情報を記録する磁気メモリ素子において、磁化が一方方向に固定された磁化固定層と情報に対応して磁化の向きが変化する記憶層とを有し、該記憶層と固定層とがトンネルバリア層を介して対向し、該トンネルバリア層を介して固定相と記憶層との間に電流を流すことで記録を行い、該固定層が垂直磁化膜であり、該記憶層が垂直磁化容易軸を有する垂直磁化強磁性層と、ノンコリニア反強磁性体からなる反強磁性層との積層膜からなることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0097] (項目 2) 項目 1 の磁気メモリ素子において、上記記憶層の垂直磁化層と反強磁性層の間に磁気的な相互作用を有することを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目 3) 項目 1 または 2 の磁気メモリ素子において、反強磁性層が Mn と Sn、Ge、Ga の少なくとも一種からなる合金であることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0098] (項目4) 項目3の磁気メモリ素子において、反強磁性層の結晶構造が六方晶構造でc軸が面直方向に配向していることを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目5) 項目1から4のいずれか1項の磁気メモリ素子において、反強磁性層の厚さが0.3nm以上20nm以下であることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0099] (項目6) 項目1から5のいずれか1項の磁気メモリ素子において、上記記憶層の垂直磁化層と反強磁性層の間に非磁性層が挿入されていることを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目7) 項目6の磁気メモリ素子において、該非磁性層がB、C、N、O、F、Mg、Al、Si、P、Ti、V、Cr、Cu、Zn、Ga、Ge、Y、Zr、Nb、Mo、Ru、Rh、Pd、Ag、Cd、In、Sn、Sb、Hf、Ta、W、Re、Os、IrPt、Auの少なくとも一種あるいはそれらの化合物であることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0100] (項目8) 項目1から7のいずれか1項の磁気メモリ素子において、上記記憶層の垂直磁化層と反強磁性層の間に第二の反強磁性層が挿入されていることを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目9) 項目8の磁気メモリ素子において、該第二の反強磁性層がMnおよびB、C、N、O、F、Al、Si、Cr、Ga、Ge、Ru、Rh、Pd、In、Sn、Sb、Re、Os、Ir、Ptのうちの少なくとも一種あるいはそれらの化合物であることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0101] (項目10) 項目1から9のいずれか1項の磁気メモリ素子において、反強磁性層の磁性原子の磁気モーメントがほぼ面内に向いていることを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目11) 項目1から10のいずれか1項の磁気メモリ素子において、垂直磁化層の磁化の方向が垂直方向から1度以上30度以下の傾きであることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0102] (項目12) 項目1から11のいずれか1項の磁気メモリ素子において、

2つの以上の垂直磁化層を有し、垂直磁化層の間の少なくとも一つに反強磁性層が配置していることを特徴とする磁気メモリ素子。

(項目13) 項目1から12のいずれか1項の磁気メモリ素子において、該トンネルバリア層と該記憶層との間に、B、C、Fe、Co、W、Mo、Ir、Rhのうちの少なくとも一種あるいはそれらの化合物からなる物質が含まれることを特徴とする磁気メモリ素子。

[0103] (項目14) 項目1から13のいずれか1項の磁気メモリ素子を有するメモリデバイス。

なお、上述した磁気メモリ素子1により解決し得る課題は、上述のものに限られない。例えば、当該課題は、以下のような態様であってもよい。

[0104] コンピュータなどでの情報機器ではランダム・アクセス・メモリ(RAM)として、動作が高速で、高密度なDRAMが広く使われている。しかし、DRAMは電源を切ると情報が消えてしまう揮発性メモリであるため、情報が消えない不揮発のメモリが望まれている。

[0105] 不揮発メモリの候補として、磁性体の磁化で情報を記録する磁気ランダム・アクセス・メモリ(MRAM)が注目され、開発が進められている。近年磁化を反転する方法としてトンネルバリアを介して磁性体間に電流を流すことによって、スピントルクを注入して磁化を反転させるスピントルク型のMRAM(STT-MRAM)が主流になっている。スピントルクにおいて、スピン注入効率は固定層と記憶層の磁化のなす角度に依存して角度が完全に平行あるいは反平行の時スピン注入効率はゼロになる。

[0106] 現在記憶層として主に用いられているCoFeB等の磁性体とMgO等の酸化物の界面に生成される界面磁気異方性はその特性上膜面垂直方向に優位な磁気異方性を有していて、垂直磁気記憶層として優れていて、安定した保持特性が得られる。しかしながら、反面短パルスでの反転電流増加が大きく、高速書き込みが難しい。

[0107] これを解決する方向として、例えば、上述した特許文献1のように記憶層の磁化を面内方向に傾けながら回転しやすくした磁化状態の磁気メモリが検

討されている。

[0108] しかしながら、複数の強磁性体を積層して傾いた磁化を実現しようとする  
と、磁性層間の磁気結合の強さの制御が難しく、また素子を微細化した場合  
に強磁性層間の静磁気的な結合の影響で想定した効果が得られなくなる等の  
課題がある。

[0109] 本技術は、このような認識に基づいてなされたものである。すなわち、そ  
の目的は微細な素子においても低い電流で高速に動作可能な磁気メモリ素子  
を実現することである。

[0110] 上述した目的を達成するために、検討を重ねた結果、磁気メモリ素子を構  
成する記憶層を、垂直磁化を有する垂直磁化層と各磁性原子が120度に配  
置した三角磁性反強磁性体との積層膜で構成することで、垂直磁化層の磁化  
を面内に傾け、固定層と記憶層の磁化のなす角度をスピントルクが常に一定  
以上の効率で作用し続ける状態を実現できた。これにより、例えば、反転時  
間の短縮と反転時間のばらつき低減が可能である。

[0111] 最後に、本開示に係る種々の実施形態を説明したが、これらは、例として  
提示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。当該新  
規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明  
の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができ  
る。当該実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特  
許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれるものである。

## 符号の説明

[0112] 1：磁気メモリ素子， 2：固定層， 3：トンネルバリア層， 4：記憶層， 5  
：第1の強磁性層， 6：反強磁性層， 7：中間層， 9：下地層， 10：ピン  
層， 11：反強磁性磁気結合層， 12：参照層， 13：トンネルバリア層，  
14：強磁性層， 15：キャップ層， 16：下地層， 17：ピン層， 18：  
反強磁性磁気結合層， 19：参照層， 20：トンネルバリア層， 21：強磁  
性層， 22：反強磁性層， 23：キャップ層， 24：下地層， 25：ピン層  
， 26：反強磁性磁気結合層， 27：参照層， 28：トンネルバリア層， 2

9 : 強磁性層, 30 : MnIr層, 31 : Mn<sub>3</sub>Sn層, 32 : キャップ層, 33 : 下地層, 34 : 第1の強磁性層, 35 : 反強磁性層, 36 : 第1の反強磁性磁気結合層, 37 : 第2の強磁性層, 38 : トンネルバリア層, 39 : 参照層, 40 : 第2の反強磁性磁気結合層, 41 : ピン層, 42 : キャップ層, 42 : 反強磁性層, D1 : 積層方向, M1 : 自発磁化, M2 : 自発磁化,  $\theta 1$  : 傾斜角

## 請求の範囲

[請求項1]

磁気メモリ素子であって、

固定層と、記憶層と、を備え、

前記固定層は、積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該固定層の磁化方向は、当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータによらず固定されるように構成され、

前記記憶層は、前記積層方向に沿って、電気絶縁性を有するバリア層を介して前記固定層に積層され、第1の強磁性層と、反強磁性層とを備え、

前記第1の強磁性層は、前記積層方向に沿って自発磁化を有するように構成され、当該第1の強磁性層の磁化方向は、前記固定層および前記記憶層を介したトンネル電流を用いて当該磁気メモリ素子に書き込まれるデータに応じて反転可能に構成され、

前記反強磁性層は、磁化容易軸となるc軸に垂直なa軸およびb軸によって規定されるab面内に非共線的または非共面的な磁気秩序を形成することによって異常ホール効果を発現する反強磁性体を含み、

前記反強磁性体は、少なくとも、前記c軸が前記積層方向に沿っているドメインを含む、磁気メモリ素子。

[請求項2]

請求項1に記載の磁気メモリ素子において、

前記反強磁性体は、当該反強磁性体の異常ホール係数の符号が当該磁気メモリ素子に書き込みによって反転しないように構成される、磁気メモリ素子。

[請求項3]

請求項1または請求項2に記載の磁気メモリ素子において、

前記反強磁性体は、前記c軸が前記積層方向に延びるような結晶配向性を有するように構成される、磁気メモリ素子。

[請求項4]

請求項1～請求項3の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、

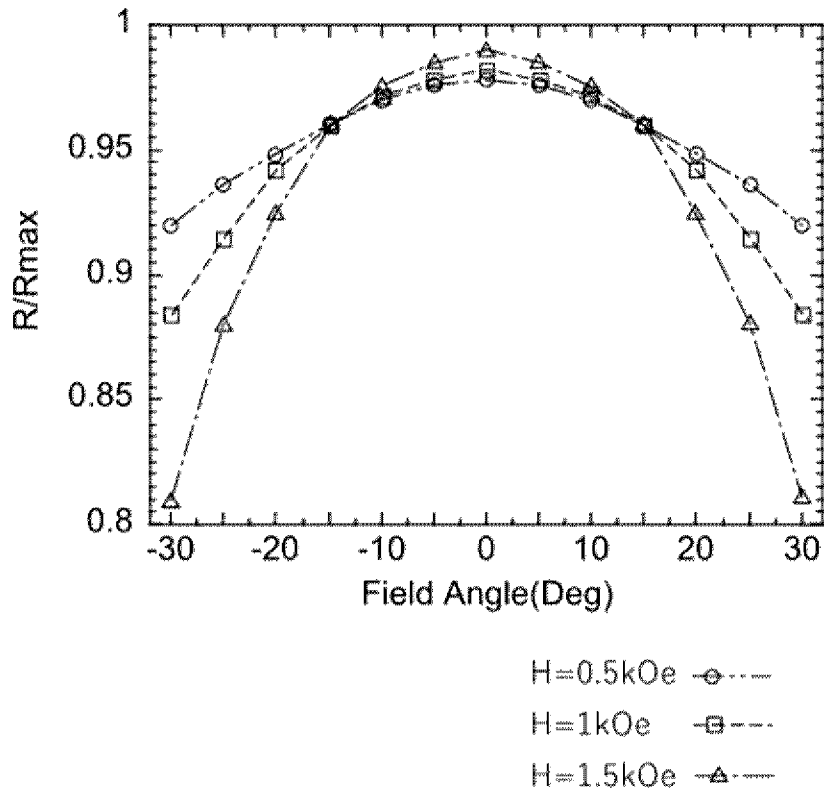
前記反強磁性体は、前記c軸が前記積層方向に沿っているドメインにより構成される、磁気メモリ素子。

- [請求項5] 請求項1～請求項4の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、  
前記反強磁性体は、前記c軸に沿った6回回転軸を有する六方晶系である、磁気メモリ素子。
- [請求項6] 請求項1～請求項5の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、  
前記反強磁性体は、 $Mn_3Sn$ 、 $Mn_3Pt$ 、 $Mn_3Ge$ 、 $Mn_3Ga$ 、および $Mn_3Ir$ の群より選ばれる1または2以上の物質により構成される、磁気メモリ素子。
- [請求項7] 請求項1～請求項6の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、  
前記第1の強磁性層は、少なくとも磁性元素としてCo元素を含む、磁気メモリ素子。
- [請求項8] 請求項1～請求項7の何れか1つに記載の磁気メモリ素子において、  
前記記憶層は、さらに第2の強磁性層を含み、  
前記第2の強磁性層は、前記反強磁性層を介して前記第1の強磁性層に積層される、磁気メモリ素子。



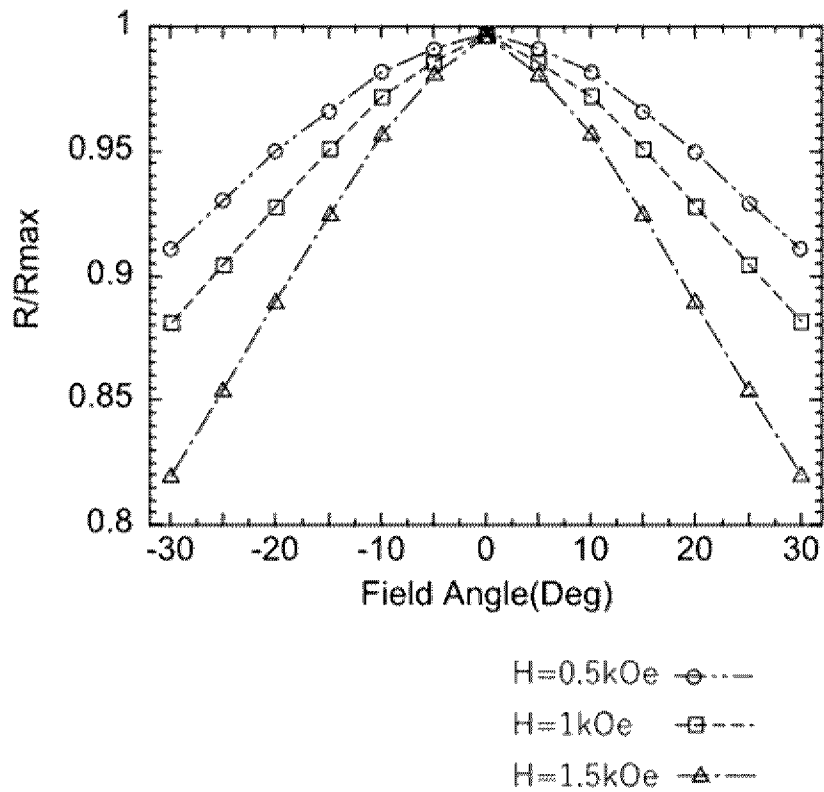
[図2]

スピンの傾いている場合

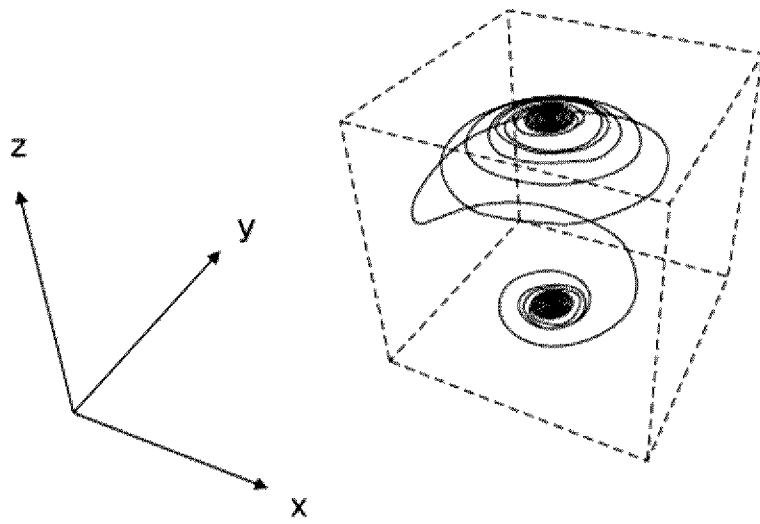


[図3]

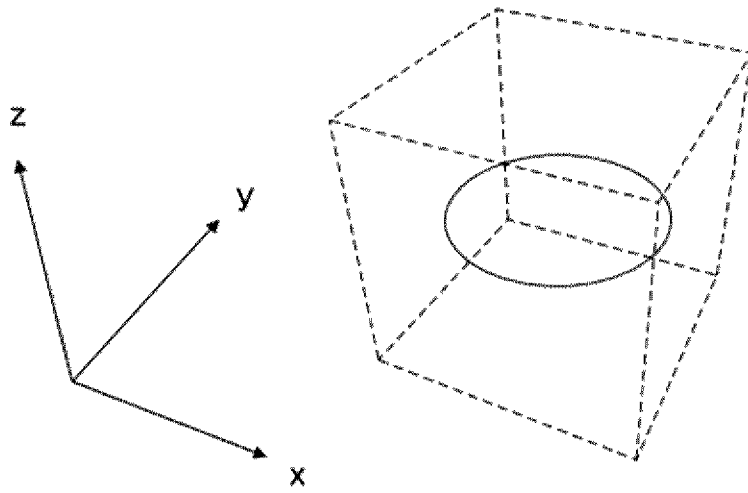
スピンの傾いていない場合



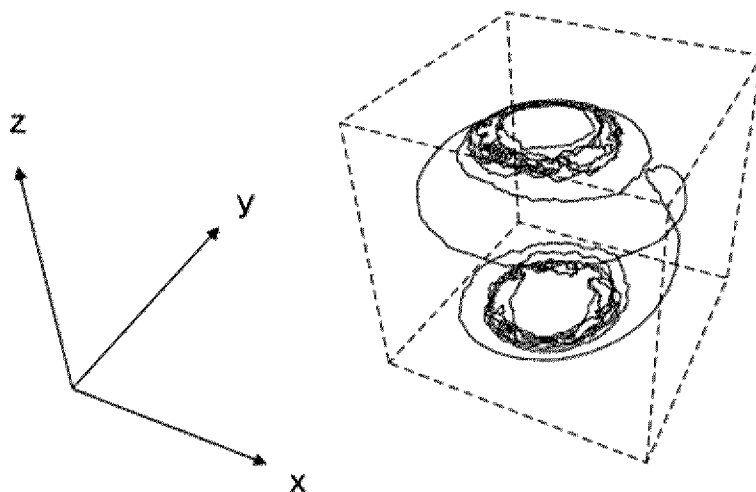
[図4]



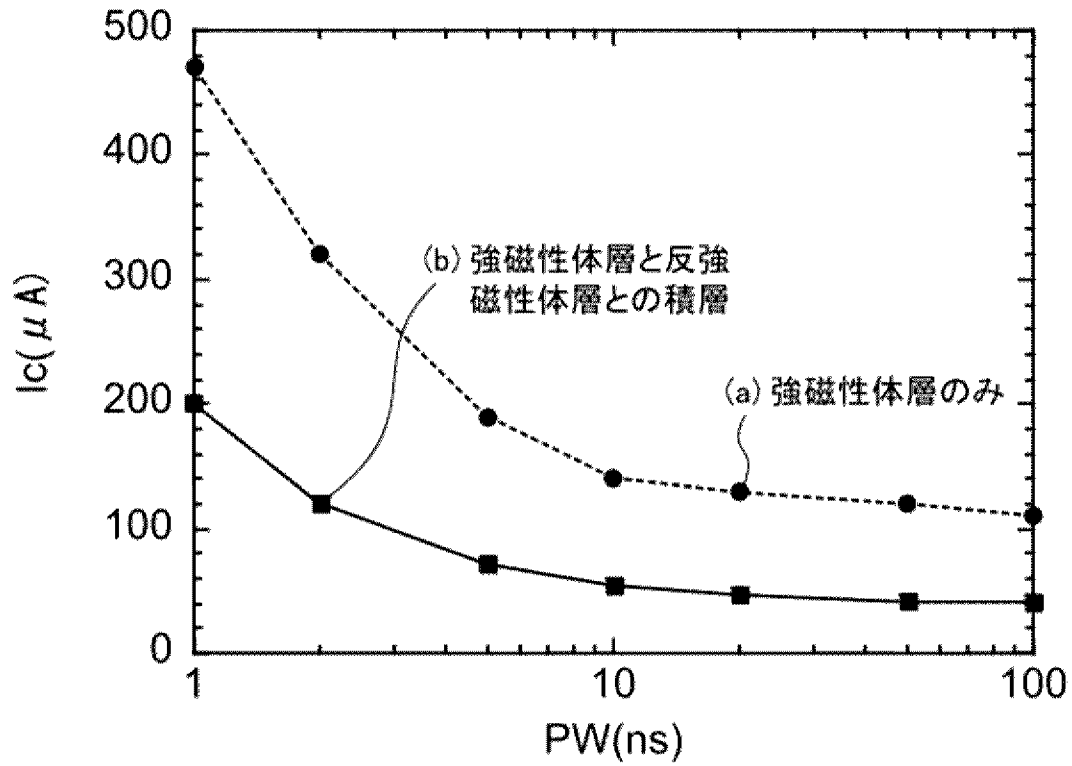
[図5]



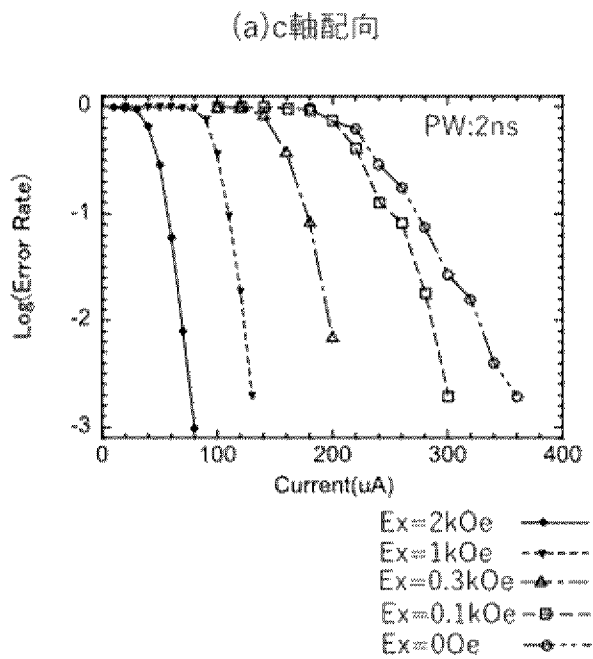
[図6]



[図7]

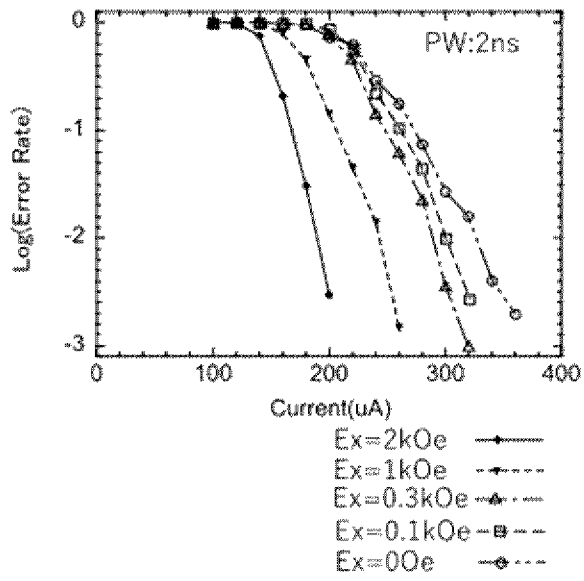


[図8]



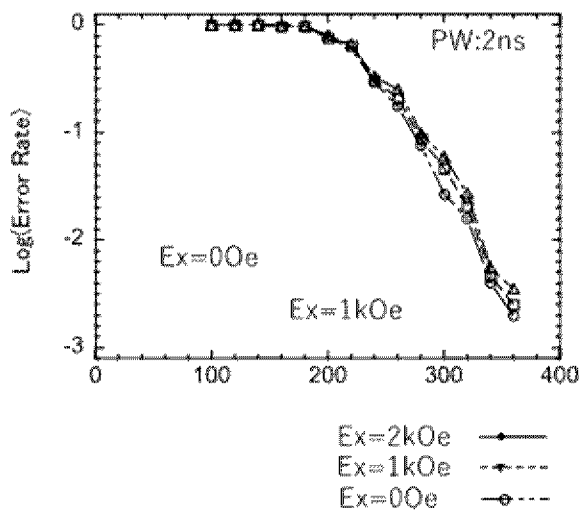
[図9]

(b) ランダム配向



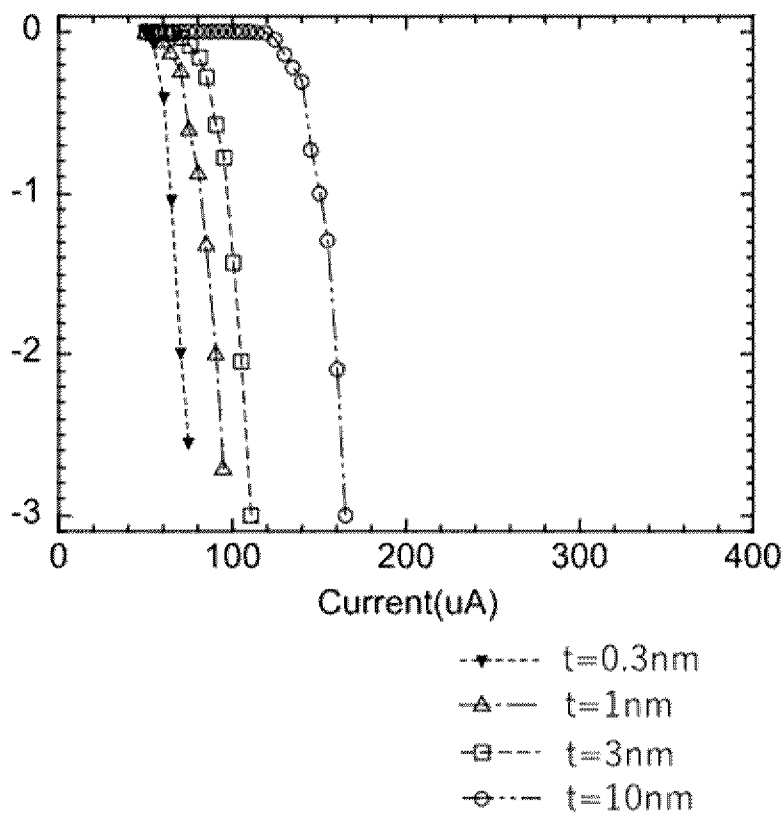
[図10]

(c) a軸、b軸配向



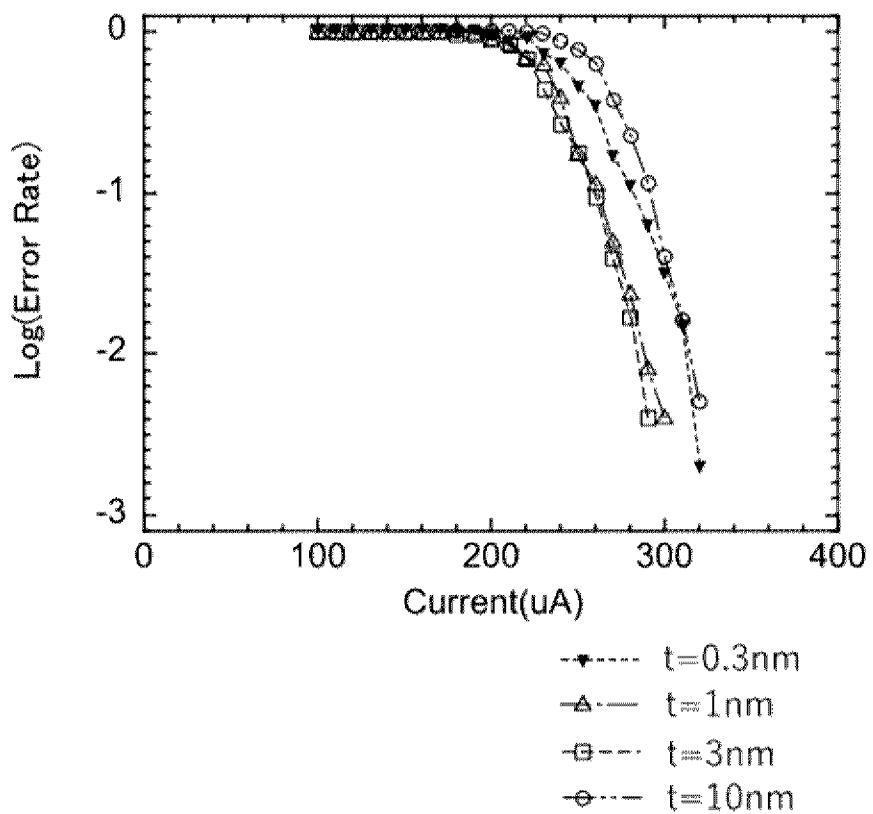
[圖11]

(a) PW:5ns



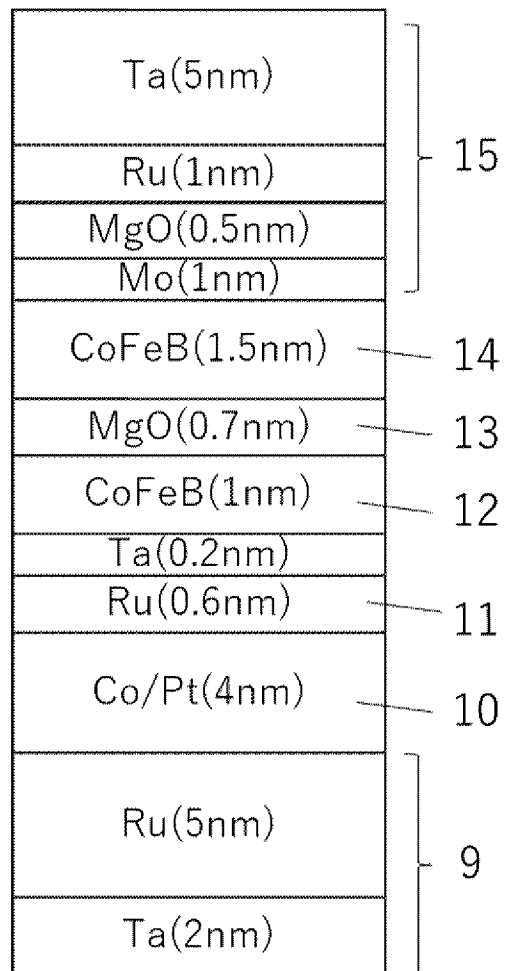
[圖12]

(b) PW:1ns



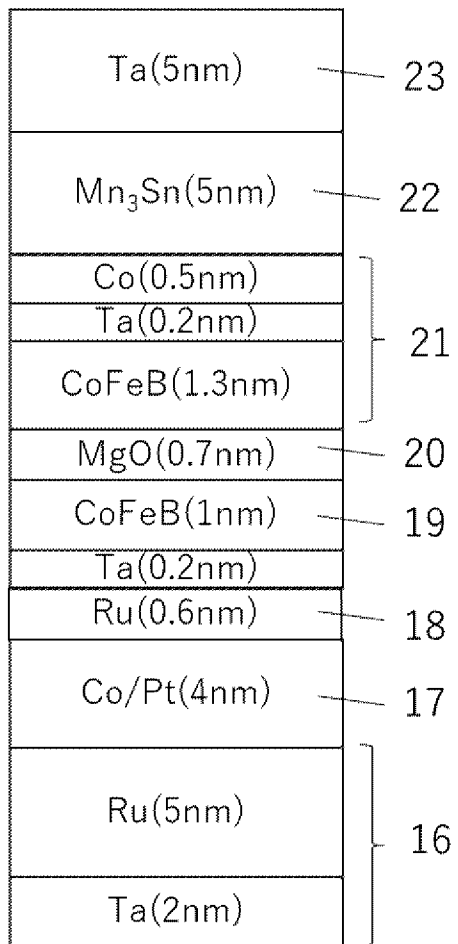
[図13]

## 比較例



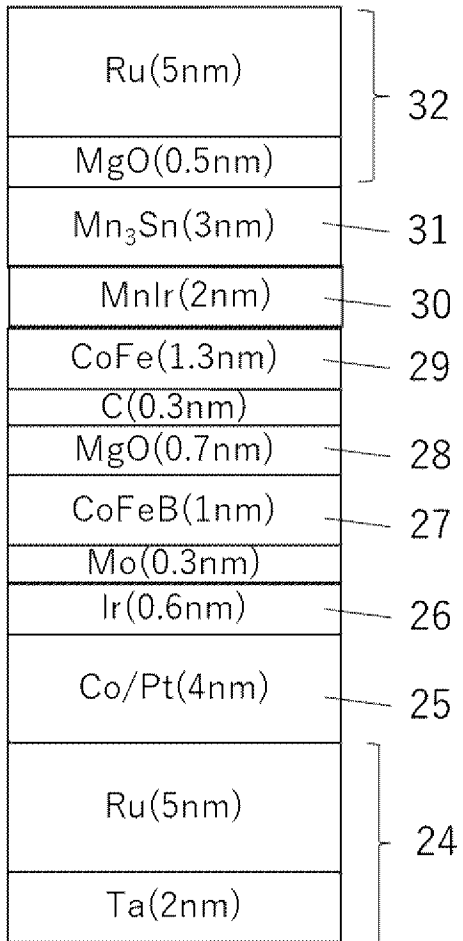
[図14]

## 実施例 1



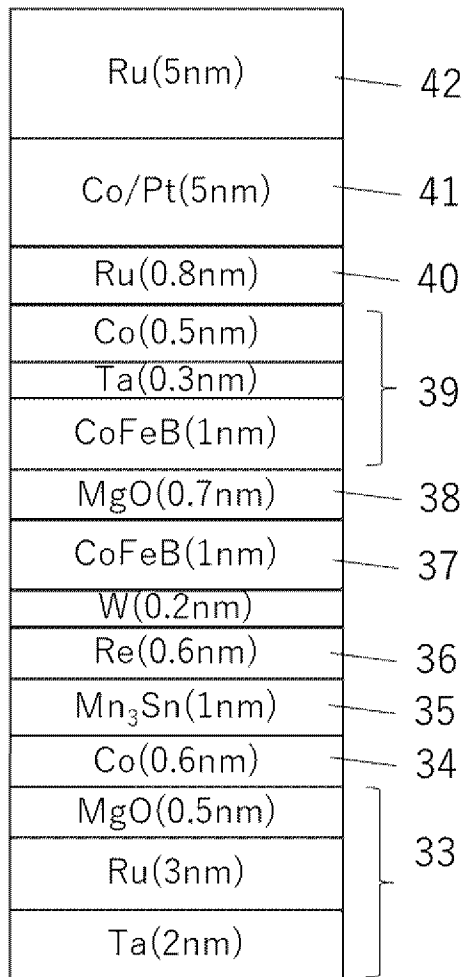
[図15]

## 実施例 2



[図16]

## 実施例 3



## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

**PCT/JP2024/036724**

<b>A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER</b>		
<i>H10B 61/00</i> (2023.01)i; <i>H10N 50/10</i> (2023.01)i FI: H10B61/00; H10N50/10 Z		
According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC		
<b>B. FIELDS SEARCHED</b>		
Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols) H10B61/00; H10N50/10		
Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched Published examined utility model applications of Japan 1922-1996 Published unexamined utility model applications of Japan 1971-2024 Registered utility model specifications of Japan 1996-2024 Published registered utility model applications of Japan 1994-2024		
Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)		
<b>C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT</b>		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 2017/018391 A1 (THE UNIVERSITY OF TOKYO) 02 February 2017 (2017-02-02) entire text, all drawings	1-8
A	JP 2022-166395 A (TOHOKU UNIVERSITY) 02 November 2022 (2022-11-02) entire text, all drawings	1-8
<input type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input checked="" type="checkbox"/> 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 "D" document cited by the applicant in the international application "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 <b>25 November 2024</b>		Date of mailing of the international search report <b>03 December 2024</b>
Name and mailing address of the ISA/JP <b>Japan Patent Office (ISA/JP) 3-4-3 Kasumigaseki, Chiyoda-ku, Tokyo 100-8915 Japan</b>		Authorized officer  Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**  
**Information on patent family members**

International application No.

**PCT/JP2024/036724**

Patent document cited in search report			Publication date (day/month/year)	Patent family member(s)			Publication date (day/month/year)
WO	2017/018391	A1	02 February 2017	US	2018/0301177	A1	
				entire text, all drawings			
JP	2022-166395	A	02 November 2022	CN	117178372	A	
				entire text, all drawings			
				KR	10-2023-0172458	A	

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC）） H10B 61/00(2023.01)i; H10N 50/10(2023.01)i FI: H10B61/00; H10N50/10 Z		
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）） H10B61/00; H10N50/10		
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 - 2024年 日本国実用新案登録公報 1996 - 2024年 日本国登録実用新案公報 1994 - 2024年		
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）		
C. 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
A	WO 2017/018391 A1 (国立大学法人東京大学) 02.02.2017 (2017 - 02 - 02) 全文, 全図	1-8
A	JP 2022-166395 A (国立大学法人東北大学) 02.11.2022 (2022 - 11 - 02) 全文, 全図	1-8
<input type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input checked="" type="checkbox"/> 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 “D” 国際出願で出願人が先行技術文献として記載した文献 “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抵触するものではなく、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 25. 11. 2024	国際調査報告の発送日 03. 12. 2024	
名称及びあて先 日本国特許庁 (ISA/JP) 〒100-8915 日本国 東京都千代田区霞が関三丁目4番3号	権限のある職員（特許庁審査官） 渡邊 佑紀 5F 2680 電話番号 03-3581-1101 内線 3514	

国際調査報告  
パテントファミリーに関する情報

国際出願番号

PCT/JP2024/036724

引用文献	公表日	パテントファミリー文献	公表日
WO 2017/018391 A1	02.02.2017	US 2018/0301177 A1 全文, 全図	
JP 2022-166395 A	02.11.2022	CN 117178372 A 全文, 全図	
		KR 10-2023-0172458 A	