

(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
2017年6月1日(01.06.2017)



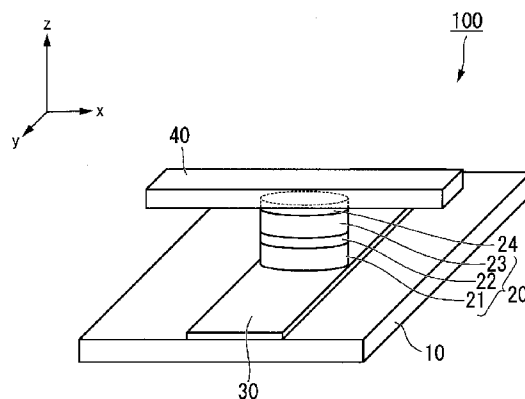
(10) 国際公開番号
WO 2017/090733 A1

- (51) 国際特許分類:
H01L 43/08 (2006.01) *H01L 27/105* (2006.01)
G11B 5/39 (2006.01) *H01L 29/82* (2006.01)
H01L 21/8246 (2006.01) *H03B 15/00* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2016/084979
- (22) 国際出願日: 2016年11月25日(25.11.2016)
- (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 2015-232334 2015年11月27日(27.11.2015) JP
特願 2016-053072 2016年3月16日(16.03.2016) JP
特願 2016-056058 2016年3月18日(18.03.2016) JP
特願 2016-210531 2016年10月27日(27.10.2016) JP
特願 2016-210533 2016年10月27日(27.10.2016) JP
- (71) 出願人: TDK株式会社(TDK CORPORATION)
[JP/JP]; 〒1080023 東京都港区芝浦三丁目9番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者: 佐々木 智生(SASAKI Tomoyuki); 〒1080023 東京都港区芝浦三丁目9番1号 TDK株式会社内 Tokyo (JP).
- (74) 代理人: 棚井 澄雄, 外(TANAI Sumio et al.); 〒1006620 東京都千代田区丸の内一丁目9番2号 Tokyo (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JP, KE, KG, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

[続葉有]

(54) Title: MAGNETORESISTIVE EFFECT ELEMENT, MAGNETIC MEMORY, MAGNETIZATION REVERSAL METHOD, AND SPIN CURRENT MAGNETIZATION REVERSAL ELEMENT

(54) 発明の名称: 磁気抵抗効果素子、磁気メモリ、磁化反転方法、及び、スピン流磁化反転素子



(57) Abstract: This magnetoresistive effect element is provided with: a magnetoresistive effect element comprising a first strongly magnetic metal layer in which the orientation of magnetization is fixed, a second strongly magnetic metal layer in which the orientation of magnetization is variable, and a non-magnetic layer sandwiched between the first strongly magnetic metal layer and the second strongly magnetic metal layer; and spin orbital torque wiring that extends in a direction intersecting the layering direction of the magnetoresistive effect element and that is joined to the second strongly magnetic metal layer. Electrical current that flows through the magnetoresistive effect element and electrical current that flows through the spin orbital torque wiring either merge or are distributed at the part at which the magnetoresistive effect element and the spin orbital torque wiring are joined.

(57) 要約:

[続葉有]

WO 2017/090733 A1



添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

この磁気抵抗効果素子では、磁化の向きが固定された第 1 強磁性金属層と、磁化の向きが可変な第 2 強磁性金属層と、第 1 強磁性金属層及び第 2 強磁性金属層に挟持された非磁性層とを有する磁気抵抗効果素子と、該磁気抵抗効果素子の積層方向に対して交差する方向に延在し、前記第 2 強磁性金属層に接合するスピン軌道トルク配線と、を備え、前記磁気抵抗効果素子と前記スピン軌道トルク配線とが接合する部分において、前記磁気抵抗効果素子に流れる電流と前記スピン軌道トルク配線に流れる電流が合流し、または、分配されるものである。

明 細 書

発明の名称：

磁気抵抗効果素子、磁気メモリ、磁化反転方法、及び、スピン流磁化反転素子

技術分野

[0001] 本発明は、磁気ヘッドや高周波フィルタなどの高周波電子部品、及び磁気メモリなどに適用できる磁気抵抗効果素子、磁気メモリ、磁化反転方法及び、スピン流磁化反転素子に関する。

本願は、２０１５年１１月２７日に、日本に出願された特願２０１５－２３２３３４号、２０１６年３月１６日に、日本に出願された特願２０１６－５３０７２号、２０１６年３月１８日に、日本に出願された特願２０１６－５６０５８号、２０１６年１０月２７日に、日本に出願された特願２０１６－２１０５３１号、２０１６年１０月２７日に、日本に出願された特願２０１６－２１０５３３号に基づき優先権を主張し、その内容をここに援用する。

背景技術

[0002] 強磁性層と非磁性層の多層膜からなる巨大磁気抵抗（GMR）素子及び非磁性層として絶縁層（トンネルバリア層、バリア層）を用いたトンネル磁気抵抗（TMR）素子が知られている。一般に、TMR素子はGMR素子と比較して素子抵抗が高いものの、TMR素子の磁気抵抗（MR）比はGMR素子のMR比より大きい。そのため、磁気センサ、高周波部品、磁気ヘッド及び不揮発性ランダムアクセスメモリ（MRAM）用の素子として、TMR素子に注目が集まっている。

[0003] MRAMの書き込み方式としては、電流が作る磁場を利用して書き込み（磁化反転）を行う方式や磁気抵抗素子の積層方向に電流を流して生ずるスピントランスファートルク（STT）を利用して書き込み（磁化反転）を行う方式が知られている。

磁場を利用する方式では、素子サイズが小さくなると、細い配線に流すことができる電流では書き込みができなくなるという問題がある。

これに対して、スピントランスファートルク（S T T）を利用する方式では、一方の強磁性層（固定層、参照層）が電流をスピン分極させ、その電流のスピンがもう一方の強磁性層（自由層、記録層）の磁化に移行され、その際に生じるトルク（S T T）によって書き込み（磁化反転）が行われるが、素子サイズが小さくなるほど書き込みに必要な電流が小さくて済むという利点がある。

先行技術文献

非特許文献

- [0004] 非特許文献1：I. M. Miron, K. Garello, G. Gaudin, P. -J. Zermatten, M. V. Costache, S. Auffret, S. Bandiera, B. Rodmacq, A. Schuhl, and P. Gambardella, Nature, 476, 189 (2011).

発明の概要

発明が解決しようとする課題

- [0005] S T Tを用いたTMR素子の磁化反転はエネルギーの効率の観点から考えると効率的ではあるが、磁化反転をさせるための反転電流密度が高い。

TMR素子の長寿命の観点からはこの反転電流密度は低いことが望ましい。この点は、GMR素子についても同様である。

従って、TMR素子及びGMR素子のいずれの磁気抵抗効果素子においても、この磁気抵抗効果素子に流れる電流密度を低減することが望まれる。

- [0006] 近年、スピン軌道相互作用して生成された純スピン流を利用した磁化反転も応用上可能であると提唱されている（例えば、非特許文献1）。スピン軌道相互作用によって生じた純スピン流は、スピン軌道トルク（S O T）を誘起し、S O Tの大きさにより磁化反転を起こすことができる。純スピン流は

上向きスピンの電子と下向きスピン電子が同数で互いに逆向きに流れることで生み出されるものであり、電荷の流れは相殺されているため磁気抵抗効果素子に流れる電流としてはゼロである。この純スピン流だけで磁化反転させることができれば、電流はゼロなので磁気抵抗効果素子の長寿命化を図ることができる。あるいは、磁化反転に S T T も利用し、かつ、純スピン流による S O T を利用することができれば、純スピン流による S O T を利用する分、S T T に使う電流を低減することができ、磁気抵抗効果素子の長寿命化を図ることができると考えられる。S T T 及び S O T を両方利用する場合も、S O T を利用する割合が高いほど、磁気抵抗効果素子の長寿命化を図ることができると考えられる。

[0007] 本発明は上記問題に鑑みてなされたものであり、純スピン流による磁化反転を利用するスピン流磁化反転素子、磁気抵抗効果素子及び磁気メモリを提供することを目的とする。また磁気抵抗効果素子の磁化反転を純スピン流を利用して行う磁化反転方法を提供することを目的とする。

課題を解決するための手段

[0008] 本発明は、上記課題を解決するため、以下の手段を提供する。

[0009] (1) 本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子は、磁化の向きが固定された第1強磁性金属層と、磁化の向きが可変な第2強磁性金属層と、第1強磁性金属層及び第2強磁性金属層に挟持された非磁性層とを有する磁気抵抗効果素子と、該磁気抵抗効果素子の積層方向に対して交差する方向に延在し、前記第2強磁性金属層に接合するスピン軌道トルク配線と、を備え、前記磁気抵抗効果素子と前記スピン軌道トルク配線とが接合する部分において、前記磁気抵抗効果素子に流れる電流と前記スピン軌道トルク配線に流れる電流が合流し、または、分配される。

[0010] (2) 上記(1)に記載の磁気抵抗効果素子において、前記スピン軌道トルク配線は、最外殻に d 電子又は f 電子を有する原子番号 39 以上の非磁性金属を含んでもよい。

[0011] (3) 上記(1)又は(2)のいずれかに記載の磁気抵抗効果素子において

、前記スピン軌道トルク配線は、純スピン流を生成する材料からなる純スピン流生成部と、該純スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる低抵抗部とからなり、該純スピン流生成部の少なくとも一部が前記第2強磁性金属層と接していてもよい。

[0012] (4) 上記(1)～(3)に記載の磁気抵抗効果素子において、記スピン軌道トルク配線は、磁性金属を含んでもよい。

[0013] (5) 上記(1)～(4)のいずれか一つに記載の磁気抵抗効果素子において、前記スピン軌道トルク配線と前記第2強磁性金属層との間にキャップ層を有し、前記スピン軌道トルク配線と前記第2強磁性金属層とは前記キャップ層を介して接合されていてもよい。

[0014] (6) 上記(1)～(5)のいずれか一つに記載の磁気抵抗効果素子において、前記スピン軌道トルク配線は、前記第2強磁性金属層の側壁に接合する側壁接合部を有してもよい。

[0015] (7) 本発明の一態様に係る磁気メモリは、上記(1)～(6)のいずれか一つに記載の磁気抵抗効果素子を複数備える。

[0016] (8) 本発明の一態様に係る磁化反転方法は、上記(1)～(6)に記載の磁気抵抗効果素子において、前記スピン軌道トルク配線に流れる電流密度が $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 未満とする。

[0017] (9) 本発明の一態様に係る磁化反転方法は、上記(1)～(6)に記載の磁気抵抗効果素子において、前記スピン軌道トルク配線の電源に電流が印加した後に、前記磁気抵抗効果素子の電源に電流を印加する。

[0018] (10) 本発明の一態様に係るスピン流磁化反転素子は、磁化の向きが可変な第2強磁性金属層と、前記第2強磁性金属層の面直方向に対して交差する方向に延在し、前記第2強磁性金属層に接合するスピン軌道トルク配線と、を備え、

前記スピン軌道トルク配線は、純スピン流を生成する材料からなる純スピン流生成部と、該純スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる低抵抗部とからなり、該純スピン流生成部の少なくとも一部が前記第2強磁性金

属層と接している。

発明の効果

[0019] 本発明の磁気抵抗効果素子によれば、磁気抵抗効果素子を流れる反転電流密度を低減できる。

図面の簡単な説明

[0020] [図1]本発明の一実施形態に係る磁気抵抗効果素子を模式的に示した斜視図である。

[図2]スピンホール効果について説明するための模式図である。

[図3]スピン軌道トルク配線の一実施形態を説明するための模式図であり、（a）は断面図であり、（b）は平面図である。

[図4]スピン軌道トルク配線の他の実施形態を説明するための模式図であり、（a）は断面図であり、（b）は平面図である。

[図5]スピン軌道トルク配線の他の実施形態を説明するための模式図であり、（a）は断面図であり、（b）は平面図である。

[図6]スピン軌道トルク配線の他の実施形態を説明するための模式図であり、（a）は断面図であり、（b）は平面図である。

[図7]本発明の一実施形態に係る磁気抵抗効果素子を y z 平面で切断した断面模式図である。

[図8]本発明の他の実施形態に係る磁気抵抗効果素子を y z 平面で切断した断面模式図である。

[図9]本発明の他の実施形態に係る磁気抵抗効果素子を y z 平面で切断した断面模式図である。

[図10]本発明の一実施形態に係る磁気抵抗効果素子を模式的に示した斜視図である。

[図11]本発明の一実施形態に係るスピン流磁化反転素子を模式的に示した斜視図である。

[図12]本発明の他の実施形態に係るスピン流磁化反転素子を模式的に示した斜視図である。

発明を実施するための形態

[0021] 以下、本発明について、図を適宜参照しながら詳細に説明する。以下の説明で用いる図面は、本発明の特徴をわかりやすくするために便宜上特徴となる部分を拡大して示している場合があり、各構成要素の寸法比率などは実際とは異なっていることがある。以下の説明において例示される材料、寸法等は一例であって、本発明はそれらに限定されるものではなく、本発明の効果を奏する範囲で適宜変更して実施することが可能である。

[0022] (磁気抵抗効果素子)

図1は、本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子を模式的に示した斜視図である。

本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子100は、磁気抵抗効果素子20と、該磁気抵抗効果素子20の積層方向に対して交差する方向に延在し、磁気抵抗効果素子20に接合するスピン軌道トルク配線40とを有する。

図1を含めて以下では、スピン軌道トルク配線が磁気抵抗効果素子の積層方向に対して交差する方向に延在する構成の例として、直交する方向に延在する構成の場合について説明する。

図1においては、磁気抵抗効果素子20の積層方向に電流を流すための配線30と、その配線30を形成する基板10と、キャップ層も示している。

以下、磁気抵抗効果素子20の積層方向をz方向、z方向と垂直でスピン軌道トルク配線40と平行な方向をx方向、x方向及びz方向と直交する方向をy方向とする。

[0023] <磁気抵抗効果素子>

磁気抵抗効果素子20は、磁化の向きが固定された第1強磁性金属層21と、磁化の向きが可変な第2強磁性金属層23と、第1強磁性金属層21及び第2強磁性金属層23に挟持された非磁性層22とを有する。

第1強磁性金属層21の磁化が一方向に固定され、第2強磁性金属層23の磁化の向きが相対的に変化することで、磁気抵抗効果素子20として機能する。保磁力差型（擬似スピバルブ型；Pseudo spin valve 型）のMRAM

に適用する場合には、第1強磁性金属層の保持力は第2強磁性金属層の保磁力よりも大きいものであり、また、交換バイアス型（スピンバルブ；spin valve型）のMRAMに適用する場合には、第1強磁性金属層では反強磁性層との交換結合によって磁化の向きが固定される。

また、磁気抵抗効果素子20は、非磁性層22が絶縁体からなる場合は、トンネル磁気抵抗（TMR：Tunneling Magnetoresistance）素子であり、非磁性層22が金属からなる場合は巨大磁気抵抗（GMR：Giant Magnetoresistance）素子である。

[0024] 本発明が備える磁気抵抗効果素子としては、公知の磁気抵抗効果素子の構成を用いることができる。例えば、各層は複数の層からなるものでもよいし、第1強磁性金属層の磁化の向きを固定するための反強磁性層等の他の層を備えてもよい。

第1強磁性金属層21は固定層や参照層、第2強磁性金属層23は自由層や記憶層などと呼ばれる。

[0025] 第1強磁性金属層21及び第2強磁性金属層23は、磁化方向が層に平行な面内方向である面内磁化膜でも、磁化方向が層に対して垂直方向である垂直磁化膜でもいずれでもよい。

[0026] 第1強磁性金属層21の材料には、公知のものを用いることができる。例えば、Cr、Mn、Co、Fe及びNiからなる群から選択される金属及びこれらの金属を1種以上含み強磁性を示す合金を用いることができる。またこれらの金属と、B、C、及びNの少なくとも1種以上の元素とを含む合金を用いることもできる。具体的には、Co-FeやCo-Fe-Bが挙げられる。

[0027] また、より高い出力を得るためには Co_2FeSi などのホイスラー合金を用いることが好ましい。ホイスラー合金は、 X_2YZ の化学組成をもつ金属間化合物を含み、Xは、周期表上でCo、Fe、Ni、あるいはCu族の遷移金属元素または貴金属元素であり、Yは、Mn、V、CrあるいはTi族の遷移金属でありXの元素種をとることもでき、Zは、III族からV族の典型

元素である。例えば、 Co_2FeSi 、 Co_2MnSi や $\text{Co}_2\text{Mn}_{1-a}\text{Fe}_a$ 、 $\text{Al}_b\text{Si}_{1-b}$ などが挙げられる。

- [0028] また、第1強磁性金属層21の第2強磁性金属層23に対する保磁力をより大きくするために、第1強磁性金属層21と接する材料として IrMn 、 PtMn などの反強磁性材料を用いてもよい。さらに、第1強磁性金属層21の漏れ磁場を第2強磁性金属層23に影響させないようにするため、シンセティック強磁性結合の構造としてもよい。
- [0029] さらに第1強磁性金属層21の磁化の向きを積層面に対して垂直にする場合には、 Co と Pt の積層膜を用いることが好ましい。具体的には、第1強磁性金属層21は $[\text{Co} (0.24 \text{ nm}) / \text{Pt} (0.16 \text{ nm})]_6 / \text{Ru} (0.9 \text{ nm}) / [\text{Pt} (0.16 \text{ nm}) / \text{Co} (0.16 \text{ nm})]_4 / \text{Ta} (0.2 \text{ nm}) / \text{FeB} (1.0 \text{ nm})$ とすることができる。
- [0030] 第2強磁性金属層23の材料として、強磁性材料、特に軟磁性材料を適用できる。例えば、 Cr 、 Mn 、 Co 、 Fe 及び Ni からなる群から選択される金属、これらの金属を1種以上含む合金、これらの金属と B 、 C 、及び N の少なくとも1種以上の元素とが含まれる合金等を用いることができる。具体的には、 Co-Fe 、 Co-Fe-B 、 Ni-Fe が挙げられる。
- [0031] 第2強磁性金属層23の磁化の向きを積層面に対して垂直にする場合には、第2強磁性金属層の厚みを 2.5 nm 以下とすることが好ましい。第2強磁性金属層23と非磁性層22の界面で、第2強磁性金属層23に垂直磁気異方性を付加することができる。また、垂直磁気異方性は第2強磁性金属層23の膜厚を厚くすることによって効果が減衰するため、第2強磁性金属層23の膜厚は薄い方が好ましい。
- [0032] 非磁性層22には、公知の材料を用いることができる。
- 例えば、非磁性層22が絶縁体からなる場合（トンネルバリア層である場合）、その材料としては、 Al_2O_3 、 SiO_2 、 Mg 、及び、 MgAl_2O_4 等を用いることができる。またこれらの他にも、 Al 、 Si 、 Mg の一部が、 Zn 、 Be 等に置換された材料等も用いることができる。これらの中でも、

MgOやMgAl₂O₄はコヒーレントトンネルが実現できる材料であるため、スピンを効率よく注入できる。

また、非磁性層22が金属からなる場合、その材料としては、Cu、Au、Ag等を用いることができる。

[0033] また、第2強磁性金属層23の非磁性層22と反対側の面には、図1に示すようにキャップ層24が形成されていることが好ましい。キャップ層24は、第2強磁性金属層23からの元素の拡散を抑制することができる。またキャップ層24は、磁気抵抗効果素子20の各層の結晶配向性にも寄与する。その結果、キャップ層24を設けることで、磁気抵抗効果素子20の第1強磁性金属層21及び第2強磁性金属層23の磁性を安定化し、磁気抵抗効果素子20を低抵抗化することができる。

[0034] キャップ層24には、導電性が高い材料を用いることが好ましい。例えば、Ru、Ta、Cu、Ag、Au等を用いることができる。キャップ層24の結晶構造は、隣接する強磁性金属層の結晶構造に合わせて、fcc構造、hcp構造またはbcc構造から適宜設定することが好ましい。

[0035] また、キャップ層24には、銀、銅、マグネシウム、及び、アルミニウムからなる群から選択されるいずれかを用いることが好ましい。詳細は後述するが、キャップ層24を介してスピン軌道トルク配線40と磁気抵抗効果素子20が接続される場合、キャップ層24はスピン軌道トルク配線40から伝播するスピンを散逸しないことが好ましい。銀、銅、マグネシウム、及び、アルミニウム等は、スピン拡散長が100nm以上と長く、スピンの散逸しにくいことが知られている。

[0036] キャップ層24の厚みは、キャップ層24を構成する物質のスピン拡散長以下であることが好ましい。キャップ層24の厚みがスピン拡散長以下であれば、スピン軌道トルク配線40から伝播するスピンを磁気抵抗効果素子20に十分伝えることができる。

[0037] <スピン軌道トルク配線>

スピン軌道トルク配線は、磁気抵抗効果素子の積層方向に対して交差する方

向に延在する。スピン軌道トルク配線は、該スピン軌道トルク配線に磁気抵抗効果素子の積層方向に対して直交する方向に電流を流す電源に電氣的に接続され、その電源と共に、磁気抵抗効果素子に純スピン流を注入するスピン注入手段として機能する。

スピン軌道トルク配線40は、第2強磁性金属層23に直接接続されていてもよいし、他の層を介して例えば、図1に示すようにキャップ層24を介して接続されていてもよい。

[0038] スピン軌道トルク配線は、電流が流れるとスピnhall効果によって純スピン流が生成される材料からなる。かかる材料としては、スピン軌道トルク配線中に純スピン流が生成される構成のものであれば足りる。従って、単体の元素からなる材料に限らないし、純スピン流が生成される材料で構成される部分と純スピン流が生成されない材料で構成される部分とからなるもの等であってもよい。

スピnhall効果とは、材料に電流を流した場合にスピン軌道相互作用に基づき、電流の向きに直交する方向に純スピン流が誘起される現象である。

[0039] 図2は、スピnhall効果について説明するための模式図である。図2に基づいてスピnhall効果により純スピン流が生み出されるメカニズムを説明する。

[0040] 図2に示すように、スピン軌道トルク配線40の延在方向に電流Iを流すと、上向きスピン S^+ (S_1)と下向きスピン S^- (S_2)はそれぞれ電流と直交する方向に曲げられる。通常のホール効果とスピnhall効果とは運動（移動）する電荷（電子）が運動（移動）方向を曲げられる点で共通するが、通常のホール効果は磁場中で運動する荷電粒子がローレンツ力を受けて運動方向を曲げられるのに対して、スピnhall効果では磁場が存在しないのに電子が移動するだけ（電流が流れるだけ）で移動方向が曲げられる点で大きく異なる。

非磁性体（強磁性体ではない材料）では上向きスピン S^+ の電子数と下向きスピン S^- の電子数とが等しいので、図中で上方向に向かう上向きスピン S^+ の

電子数と下方向に向かう下向きスピン S^- の電子数が等しい。そのため、電荷の正味の流れとしての電流はゼロである。この電流を伴わないスピン流は特に純スピン流と呼ばれる。

これに対して、強磁性体中に電流を流した場合にも上向きスピン電子と下向きスピン電子が互いに反対方向に曲げられる点は同じであるが、強磁性体中では上向きスピン電子と下向きスピン電子のいずれかが多い状態であるため、結果として電荷の正味の流れが生じてしまう（電圧が発生してしまう）点で異なる。従って、スピン軌道トルク配線の材料としては、強磁性体だけからなる材料は含まれない。

[0041] ここで、上向きスピン S^+ の電子の流れを $J_{\uparrow}$ 、下向きスピン S^- の電子の流れを $J_{\downarrow}$ 、スピン流を J_s と表すと、 $J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow}$ で定義される。図2においては、純スピン流として J_s が図中の上方向に流れる。ここで、 J_s は分極率が100%の電子の流れである。

図2において、スピン軌道トルク配線40の上面に強磁性体を接触させると、純スピン流は強磁性体中に拡散して流れ込むことになる。

本発明では、このようにスピン軌道トルク配線に電流を流して純スピン流を生成し、その純スピン流がスピン軌道トルク配線に接する第2強磁性金属層に拡散する構成とすることで、従来のSTTを利用する磁気抵抗効果素子において強磁性金属層の磁化反転のアシスト手段あるいは主力手段として用いることもできるし、純スピン流によるSOTのみで強磁性金属層の磁化反転を行う新規の磁気抵抗効果素子において用いることもできる。。

[0042] 磁化反転をアシストする方法としては、外部磁場を印加する方法、電圧を加える方法、熱を加える方法及び物質の歪みを利用する方法が知られている。しかしながら、外部磁場を印加する方法、電圧を加える方法及び熱を加える方法の場合、外部に新たに配線、発熱源等を設ける必要があり、素子構成が複雑化する。また、物質の歪みを利用する方法の場合、一旦生じた歪みを使用態様中に制御することが難しく、制御性よく磁化反転を行うことができない。

[0043] スピン軌道トルク配線40は、非磁性の重金属を含んでもよい。ここで、重金属とは、イットリウム以上の比重を有する金属の意味で用いている。スピン軌道トルク配線40は、非磁性の重金属だけからなってもよい。

この場合、非磁性の重金属は最外殻にd電子又はf電子を有する原子番号39以上の原子番号が大きい非磁性金属であることが好ましい。かかる非磁性金属は、スピンホール効果を生じさせるスピン軌道相互作用が大きいからである。スピン軌道トルク配線40は、最外殻にd電子又はf電子を有する原子番号39以上の原子番号が大きい非磁性金属だけからなってもよい。

通常、金属に電流を流すとすべての電子はそのスピンの向きに関わりなく、電流とは逆向きに動くのに対して、最外殻にd電子又はf電子を有する原子番号が大きい非磁性金属はスピン軌道相互作用が大きいためにスピンホール効果によって電子の動く方向が電子のスピンの向きに依存し、純スピン流 J_s が発生しやすい。

[0044] また、スピン軌道トルク配線40は、磁性金属を含んでもよい。磁性金属とは、強磁性金属、あるいは、反強磁性金属を指す。非磁性金属に微量な磁性金属が含まれるとスピン軌道相互作用が増強され、スピン軌道トルク配線40に流す電流に対するスピン流生成効率を高くできるからである。スピン軌道トルク配線40は、反強磁性金属だけからなってもよい。

スピン軌道相互作用はスピン軌道トルク配線材料の物質の固有の内場によって生じるため、非磁性材料でも純スピン流が生じる。スピン軌道トルク配線材料に微量の磁性金属を添加すると、磁性金属自体が流れる電子スピンを散乱するためにスピン流生成効率が向上する。ただし、磁性金属の添加量が増大し過ぎると、発生した純スピン流が添加された磁性金属によって散乱されるため、結果としてスピン流が減少する作用が強くなる。したがって、添加される磁性金属のモル比はスピン軌道トルク配線における純スピン生成部の主成分のモル比よりも十分小さい方が好ましい。目安で言えば、添加される磁性金属のモル比は3%以下であることが好ましい。

[0045] また、スピン軌道トルク配線40は、トポロジカル絶縁体を含んでもよい。

スピン軌道トルク配線40は、トポロジカル絶縁体だけからなってもよい。トポロジカル絶縁体とは、物質内部が絶縁体、あるいは、高抵抗体であるが、その表面にスピン偏極した金属状態が生じている物質である。物質にはスピン軌道相互作用という内部磁場のようなものがある。そこで外部磁場が無くてもスピン軌道相互作用の効果で新たなトポロジカル相が発現する。これがトポロジカル絶縁体であり、強いスピン軌道相互作用とエッジにおける反転対称性の破れにより純スピン流を高効率で生成することができる。

トポロジカル絶縁体としては例えば、 SnTe , $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$, TlBiSe_2 , Bi_2Te_3 , $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ などが好ましい。これらのトポロジカル絶縁体は、高効率でスピン流を生成することが可能である。

[0046] <基板>

基板10は、平坦性に優れることが好ましい。平坦性に優れた表面を得るために、材料として例えば、 Si 、 AlTiC 等を用いることができる。

[0047] 基板10の磁気抵抗効果素子20側の面には、下地層（図示略）が形成されていてもよい。下地層を設けると、基板10上に積層される第1強磁性金属層21を含む各層の結晶配向性、結晶粒径等の結晶性を制御することができる。

[0048] 下地層は、絶縁性を有していることが好ましい。配線30等には流れる電流が散逸しないようにするためである。下地層には、種々のものを用いることができる。

例えば1つの例として、下地層には(001)配向した NaCl 構造を有し、 Ti 、 Zr 、 Nb 、 V 、 Hf 、 Ta 、 Mo 、 W 、 B 、 Al 、 Ce の群から選択される少なくとも1つの元素を含む窒化物の層を用いることができる。

[0049] 他の例として、下地層には ABO_3 の組成式で表される(002)配向したペロブスカイト系導電性酸化物の層を用いることができる。ここで、サイトAは Sr 、 Ce 、 Dy 、 La 、 K 、 Ca 、 Na 、 Pb 、 Ba の群から選択された少なくとも1つの元素を含み、サイトBは Ti 、 V 、 Cr 、 Mn 、 Fe 、

Co、Ni、Ga、Nb、Mo、Ru、Ir、Ta、Ce、Pbの群から選択された少なくとも1つの元素を含む。

[0050] 他の例として、下地層には(001)配向したNaCl構造を有し、かつMg、Al、Ceの群から選択される少なくとも1つの元素を含む酸化物の層を用いることができる。

[0051] 他の例として、下地層には(001)配向した正方晶構造または立方晶構造を有し、かつAl、Cr、Fe、Co、Rh、Pd、Ag、Ir、Pt、Au、Mo、Wの群から選択される少なくとも1つの元素を含む層を用いることができる。

[0052] また、下地層は一層に限られず、上述の例の層を複数層積層してもよい。下地層の構成を工夫することにより磁気抵抗効果素子20の各層の結晶性を高め、磁気特性の改善が可能となる。

[0053] <配線>

配線30は、磁気抵抗効果素子20の第1強磁性金属層21に電氣的に接続され、図1においては、配線30とスピン軌道トルク配線40と電源(図示略)とで閉回路を構成し、磁気抵抗効果素子20の積層方向に電流が流される。

[0054] 配線30は、導電性の高い材料であれば特に問わない。例えば、アルミニウム、銀、銅、金等を用いることができる。

[0055] 図3～図6は、スピン軌道トルク配線の実施形態を説明するための模式図であり、それぞれ、(a)は断面図であり、(b)は平面図である。

[0056] 本発明の磁気抵抗効果素子において、純スピン流によるSOTのみで磁気抵抗効果素子の磁化反転を行う構成(以下、「SOTのみ」構成ということがある)であっても、従来のSTTを利用する磁気抵抗効果素子において純スピン流によるSOTを併用する構成(以下、「STT及びSOT併用」構成ということがある)であっても、スピン軌道トルク配線に流す電流(以下、「SOT反転電流」ということがある。)は電荷の流れを伴う通常の電流であるため、電流を流すとジュール熱が発生する。

図3～図6に示すスピン軌道トルク配線の実施形態は、上述の材料以外の構成によって、SOT反転電流によるジュール熱を低減する構成の例である。

[0057] 「STT及びSOT併用」構成において、本発明の磁気抵抗効果素子の磁化反転のために流す電流としては、STT効果を利用するために磁気抵抗効果素子に直接流す電流（以下、「STT反転電流」ということがある。）の他に、SOT効果を利用するためにスピン軌道トルク配線に流す電流（「SOT反転電流」）がある。いずれの電流も電荷の流れを伴う通常の電流であるため、電流を流すとジュール熱が発生する。

この構成においては、STT効果による磁化反転とSOT効果による磁化反転を併用するため、STT効果だけで磁化反転を行う構成に比べてSTT反転電流は低減されるが、SOT反転電流の分のエネルギーを消費することになる。

[0058] 純スピン流を生成しうる材料である重金属は、通常の配線として用いられる金属に比べて電気抵抗が大きい。

そのため、SOT反転電流によるジュール熱を低減する観点では、スピン軌道トルク配線はすべてが純スピン流を生成しうる材料だけからなるよりも、電気抵抗が小さい部分を有することが好ましい。すなわち、この観点では、スピン軌道トルク配線は純スピン流を生成する材料からなる部分（スピン流生成部）と、このスピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる部分（低抵抗部）とからなるのが好ましい。

[0059] スピン流生成部は、純スピン流を生成しうる材料からなっていればよく、例えば、複数種類の材料部分からなる構成等であってもよい。

低抵抗部は、通常の配線として用いられる材料を用いることができる。例えば、アルミニウム、銀、銅、金等を用いることができる。低抵抗部は、スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなっていればよく、例えば、複数種類の材料部分からなる構成等であってもよい。

なお、低抵抗部において純スピン流が生成されても構わない。この場合、ス

ピン流生成部と低抵抗部との区別は、本明細書中にピン流生成部及び低抵抗部の材料として記載したものからなる部分はピン流生成部または低抵抗部であるとして区別できる。また、純ピン流を生成する主要部以外の部分であって、その主要部より電気抵抗が小さい部分は低抵抗部として、ピン流生成部と区別できる。

[0060] スピン流生成部は、非磁性の重金属を含んでもよい。この場合、純ピン流を生成しうる重金属を有限に含んでいけばよい。さらにこの場合、ピン流生成部は、ピン流生成部の主成分よりも純ピン流を生成しうる重金属が十分少ない濃度領域であるか、または、純ピン流を生成しうる重金属が主成分例えば、90%以上であることが好ましい。この場合の重金属は、純ピン流を生成しうる重金属が最外殻にd電子又はf電子を有する原子番号39以上の非磁性金属100%であることが好ましい。

ここで、ピン流生成部の主成分よりも純ピン流を生成しうる重金属が十分少ない濃度領域とは、例えば、銅を主成分とするピン流生成部において、モル比で重金属の濃度が10%以下を指す。ピン流生成部を構成する主成分が上述の重金属以外からなる場合、ピン流生成部に含まれる重金属の濃度はモル比で50%以下であることが好ましく、10%以下であることがさらに好ましい。これらの濃度領域は、電子のスピンス散乱の効果が有効に得られる領域である。重金属の濃度が低い場合、重金属よりも原子番号が小さい軽金属が主成分となる。なお、この場合、重金属は軽金属との合金を形成しているのではなく、軽金属中に重金属の原子が無秩序に分散していることを想定している。軽金属中ではスピントラ相互作用が弱いため、スピントラ効果によって純ピン流は生成しにくい。しかしながら、電子が軽金属中の重金属を通過する際に、軽金属と重金属の界面でもスピンス散乱される効果があるため重金属の濃度が低い領域でも純ピン流が効率よく発生させることが可能である。重金属の濃度が50%を超えると、重金属中のスピントラ効果の割合は大きくなるが、軽金属と重金属の界面の効果が低下するため総合的な効果が減少する。したがって、十分な界面の効果が期待できる

程度の重金属の濃度が好ましい。

[0061] また、上述のスピントルク配線が磁性金属を含む場合、スピントルク配線におけるスピントルク生成部を反強磁性金属をからなるものとすることができる。反強磁性金属は重金属が最外殻に d 電子又は f 電子を有する原子番号 39 以上の非磁性金属 100% の場合と同等の効果を得ることができる。反強磁性金属は、例えば、IrMn や PtMn が好ましく、熱に対して安定な IrMn がより好ましい。

また、上述のスピントルク配線がトポロジカル絶縁体を含む場合、スピントルク配線におけるスピントルク生成部をトポロジカル絶縁体からなるものとすることができる。トポロジカル絶縁体としては例えば、 SnTe , $\text{Bi}_{1.5}\text{Sb}_{0.5}\text{Te}_{1.7}\text{Se}_{1.3}$, TlBiSe_2 , Bi_2Te_3 , $(\text{Bi}_{1-x}\text{Sb}_x)_2\text{Te}_3$ などが好ましい。これらのトポロジカル絶縁体は高効率でスピントルクを生成することが可能である。

[0062] スピントルク配線で生成された純スピントルクが実効的に磁気抵抗効果素子に拡散していくためにはスピントルク生成部の少なくとも一部が第 2 強磁性金属層に接触している必要がある。キャップ層を備える場合には、スピントルク生成部の少なくとも一部がキャップ層に接触している必要がある。図 3～図 6 に示すスピントルク配線の実施形態はすべて、スピントルク生成部は少なくとも一部が第 2 強磁性金属層に接触した構成である。

[0063] 図 3 に示す実施形態では、スピントルク配線 40 は、第 2 強磁性金属層との接合部 40' がすべてスピントルク生成部 41 からなり、スピントルク生成部 41 が低抵抗部 42A、42B に挟まれた構成である。

[0064] ここで、スピントルク生成部と低抵抗部とが電氣的に並列に配置する場合には、スピントルク配線に流れる電流はスピントルク生成部及び低抵抗部の抵抗の大きさの逆比の割合に分かれてそれぞれの部分を流れることになる。

SOT 反転電流に対する純スピントルク生成効率の観点で、スピントルク配線に流れる電流がすべてスピントルク生成部を流れるようにするためには、スピントルク生成部と低抵抗部とが電氣的に並列に配置する部分がなく、すべて電氣

的に直列に配置するようにする。

図3～図6に示すスピン軌道トルク配線は、磁気抵抗効果素子の積層方向からの平面視で、スピン流生成部と低抵抗部とが電氣的に並列に配置する部分がない構成であり、(a)で示す断面を有する構成の中で、SOT反転電流に対する純スピン流生成効率が最も高い構成の場合である。

[0065] 図3に示すスピン軌道トルク配線40は、そのスピン流生成部41が磁気抵抗効果素子20の積層方向から平面視して第2強磁性金属層23の接合部23'を含むように重畳し、かつ、その厚さ方向はスピン流生成部41だけからなり、電流の流れる方向に低抵抗部42A、42Bがスピン流生成部41を挟むように配置する構成である。図3に示すスピン軌道トルク配線の変形例として、スピン流生成部が磁気抵抗効果素子の積層方向から平面視して第2強磁性金属層の接合部に重なるように重畳し、それ以外は図3に示すスピン軌道トルク配線と同じ構成がある。

[0066] 図4に示すスピン軌道トルク配線40は、そのスピン流生成部41が磁気抵抗効果素子20の積層方向から平面視して第2強磁性金属層23の接合部23'の一部に重畳し、かつ、その厚さ方向はスピン流生成部41だけからなり、電流の流れる方向に低抵抗部42A、42Bがスピン流生成部41を挟むように配置する構成である。

[0067] 図5に示すスピン軌道トルク配線40は、そのスピン流生成部41が磁気抵抗効果素子20の積層方向から平面視して第2強磁性金属層23の接合部23'を含むように重畳し、かつ、その厚さ方向には第2強磁性金属層側からスピン流生成部41と低抵抗部42Cが順に積層し、電流の流れる方向に低抵抗部42A、42Bがスピン流生成部41及び低抵抗部42Cが積層する部分を挟むように配置する構成である。図5に示すスピン軌道トルク配線の変形例として、スピン流生成部が磁気抵抗効果素子の積層方向から平面視して第2強磁性金属層の接合部に重なるように重畳し、それ以外は図5に示すスピン軌道トルク配線と同じ構成がある。

[0068] 図6に示すスピン軌道トルク配線40は、スピン流生成部41が第2強磁性

金属層側の一面全体に形成された第1スピンドット生成部41Aと、第1スピンドット生成部の上に積層され、磁気抵抗効果素子20の積層方向から平面視して第2強磁性金属層23の接合部23'を含むように重畳し、かつ、その厚さ方向はスピンドット生成部だけからなる第2スピンドット生成部41Bと、電流の流れる方向に第2スピンドット生成部41Bを挟むように配置する低抵抗部42A、42Bとからなる構成である。図6に示すスピンドット軌道トルク配線の変形例として、第2スピンドット生成部が磁気抵抗効果素子の積層方向から平面視して第2強磁性金属層の接合部を重なるように重畳し、それ以外は図6に示すスピンドット軌道トルク配線と同じ構成がある。

図6に示す構成では、スピンドット生成部41と低抵抗部42とが接する面積が広いので、スピンドット生成部41を構成する原子番号の大きい非磁性金属と低抵抗部42を構成する金属との密着性が高い。

[0069] 本発明の磁気抵抗効果素子は公知の方法を用いて製造することができる。以下、図3～図6に図示した磁気抵抗効果素子の製造方法について説明する。

まず、磁気抵抗効果素子20例えば、マグネトロンスパッタ装置を用いて形成することができる。磁気抵抗効果素子20がTMR素子の場合、例えば、トンネルバリア層は第1強磁性金属層上に最初に0.4～2.0nm程度のアルミニウム、及び複数の非磁性元素の二価の陽イオンとなる金属薄膜をスパッタし、プラズマ酸化あるいは酸素導入による自然酸化を行い、その後の熱処理によって形成される。成膜法としてはマグネトロンスパッタ法のほか、蒸着法、レーザアブレーション法、MBE法等の薄膜作成法を用いることができる。

磁気抵抗効果素子20の成膜及び形状の形成を行った後、スピンドット生成部41を最初に形成することが好ましい。これはスピンドット生成部41から磁気抵抗効果素子20に純スピンドット流の散乱をできるだけ抑制できる構造にすることが高効率化に繋がるからである。

磁気抵抗効果素子20の成膜及び形状の形成を行った後、加工後の磁気抵抗

効果素子 20 の周囲をレジスト等で埋めて、磁気抵抗効果素子 20 の上面を含む面を形成する。この際、磁気抵抗効果素子 20 の上面を平坦化することが好ましい。平坦化することで、スピン流生成部 41 と磁気抵抗効果素子 20 の界面におけるスピン散乱を抑制することができる。

次に、平坦化した磁気抵抗効果素子 20 の上面にスピン流生成部 41 の材料を成膜する。成膜はスパッタ等を用いることができる。

次に、スピン流生成部 41 を作製したい部分にレジストまたは保護膜を設置し、イオンミリング法または反応性イオンエッチング（RIE）法を用いて不要部を除去する。

次に、低抵抗部 42 を構成する材料をスパッタ等で成膜し、レジスト等を剥離することで、スピン軌道トルク配線 40 が作製される。スピン流生成部 41 の形状が複雑な場合は、レジストまたは保護膜の形成と、スピン流生成部 41 の成膜を複数回に分けて形成してもよい。

[0070] 図 7 は、本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子を yz 平面で切断した断面模式図である。

図 7 に基づいて、本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子 100 の作用について説明する。

[0071] 図 7 に示すように磁気抵抗効果素子 100 には 2 種類の電流がある。一つは、磁気抵抗効果素子 20 をその積層方向に流れ、スピン軌道トルク配線 40 及び配線 30 に流れる電流 I_1 （STT 反転電流）である。図 7 においては、電流 I_1 はスピン軌道トルク配線 40、磁気抵抗効果素子 20、配線 30 の順に流れるものとする。この場合、電子は配線 30、磁気抵抗効果素子 20、スピン軌道トルク配線 40 の順に流れる。

もう一つは、スピン軌道トルク配線 40 の延在方向に流れる電流 I_2 （SOT 反転電流）である。

電流 I_1 と電流 I_2 とは互いに交差（直交）するものであり、磁気抵抗効果素子 20 とスピン軌道トルク配線 40 とが接合する部分（符号 24' は磁気抵抗効果素子 20（キャップ層 24）側の接合部を示し、符号 40' はスピン

軌道トルク配線40側の接合部を示す)において、磁気抵抗効果素子20に流れる電流とスピン軌道トルク配線40に流れる電流が合流し、または、分配される。

[0072] 電流 I_1 を流すことより、第1強磁性金属層(固定層)21の磁化と同じ方向を向いたスピンを有する電子が第1強磁性金属層(固定層)21からスピンの向きを維持したまま、非磁性層22を通過し、この電子は、第2強磁性金属層(自由層)23の磁化 M_{23} の向きを第1強磁性金属層(固定層)21の磁化 M_{21} の向きに対して反転して平行にするようにトルク(STT)を作用する。

[0073] 一方、電流 I_2 は図2に示す電流 I に対応する。すなわち、電流 I_2 を流すと、上向きスピン S^+ と下向きスピン S^- がそれぞれスピン軌道トルク配線40の端部に向かって曲げられ純スピン流 J_s が生じる。純スピン流 J_s は、電流 I_2 の流れる方向と垂直な方向に誘起される。すなわち、図における z 軸方向や x 軸方向に純スピン流 J_s が生じる。図7では、第2強磁性金属層23の磁化の向きに寄与する z 軸方向の純スピン流 J_s のみを図示している。

[0074] スピン軌道トルク配線40に図の手前側に電流 I_2 を流すことにより生じた純スピン流 J_s は、キャップ層24を介して第2強磁性金属層23に拡散して流れ込み、流れ込んだスピンは第2強磁性金属層23の磁化 M_{23} に影響を及ぼす。すなわち、図7では、 $-x$ 方向に向いたスピンが第2強磁性金属層23に流れ込むことで $+x$ 方向に向いた第2強磁性金属層23の磁化 M_{23} の磁化反転を起こそうとするトルク(SOT)が加わる。

[0075] 以上の通り、第1電流経路 I_1 に流れる電流によって生じるSTT効果に、第2電流経路 I_2 に流れる電流によって生じた純スピン流 J_s によるSOT効果が加わって、第2強磁性金属層23の磁化 M_{23} を磁化反転させる。

[0076] STT効果のみで第2強磁性金属層23の磁化を反転させようとする(すなわち、電流 I_1 のみに電流が流れる)と、磁気抵抗効果素子20には所定の電圧以上の電圧を印加する必要がある。TMR素子の一般的な駆動電圧は数V以下と比較的小さいが、非磁性層22は数nm程度の非常に薄い膜であり

、絶縁破壊が生じることがある。非磁性層 22 に通電を続けることで、確率的に非磁性層の弱い部分（膜質が悪い、膜厚が薄い等）が破壊される。

[0077] これに対して、本発明の「S T T 及び S O T 併用」構成の場合の磁気抵抗効果素子は、S T T 効果の他に、S O T 効果を利用する。これにより、磁気抵抗効果素子に印加する電圧を小さくすることができ、かつスピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度も小さくすることができる。磁気抵抗効果素子に印加する電圧を小さくすることで、素子の長寿命化を図ることができる。またスピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度を小さくすることで、エネルギー効率が著しく低下することを避けることができる。

[0078] スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度は $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 未満であることが好ましい。スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度が大きすぎると、スピン軌道トルク配線に流れる電流によって熱が生じる。熱が第 2 強磁性金属層に加わると、第 2 強磁性金属層の磁化の安定性が失われ、想定外の磁化反転等が生じる場合がある。このような想定外の磁化反転が生じると、記録した情報が書き換わるという問題が生じる。すなわち、想定外の磁化反転を避けるためには、スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度が大きくなりすぎないようにすることが好ましい。スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度は $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 未満であれば、少なくとも発生する熱により磁化反転が生じることを避けることができる。

[0079] 図 8 は、本発明の他の実施形態に係る磁気抵抗効果素子を示すものである。

図 8 に示す磁気抵抗効果素子 200 において、スピン軌道トルク配線 50 は磁気抵抗効果素子 20 の積層方向に備えた上面接合部 51（上述のスピン軌道トルク配線 40 に相当）の他に、第 2 強磁性金属層 23 の側壁に接合する側壁接合部 52 を有する。

[0080] スピン軌道トルク配線 50 に電流を流すと、上面接合部 51 で生成される純スピン流 J_s に加えて、側壁接合部 52 で純スピン流 J_s' が生成される。従って、純スピン流 J_s が磁気抵抗効果素子 20 の上面からキャップ層 24 を

介して第2強磁性金属層23に流れ込むだけでなく、純スピン流 J_s' が第2強磁性金属層23の側壁から流れ込むので、SOT効果が増強される。

[0081] 図9は、本発明の他の実施形態に係る磁気抵抗効果素子を示すものである。

図9に示す磁気抵抗効果素子300では、基板10側にスピン軌道トルク配線40を有する。この場合、固定層である第1強磁性金属層23と自由層である第2強磁性金属層24の積層順が図1に示す磁気抵抗効果素子100とは逆になる。

このように、本発明の磁気抵抗効果素子は、この構成のようにトップピン構造であってもよいし、図1に示したようなボトムピン構造であってもよい。

[0082] 図9に示す磁気抵抗効果素子300では、基板10、スピン軌道トルク配線40、第2強磁性金属層23、非磁性層22、第1強磁性金属層21、キャップ層24、配線30の順で積層される。第2強磁性金属層23は、第1強磁性金属層21よりも先に積層されるため、格子歪等の影響を受ける可能性が磁気抵抗効果素子100より低い。その結果、磁気抵抗効果素子300では、第2強磁性金属層23の垂直磁気異方性を高められている。第2強磁性金属層23の垂直磁気異方性が高まると、磁気抵抗効果素子のMR比を高めることができる。

[0083] 図10は、図1に示した磁気抵抗効果素子100において、磁気抵抗効果素子20の積層方向に電流を流す第1電源110と、スピン軌道トルク配線40に電流を流す第2電源120とを示したものである。

[0084] 第1電源110は、配線30とスピン軌道トルク配線40とに接続される。第1電源110は磁気抵抗効果素子100の積層方向に流れる電流を制御することができる。

第2電源120は、スピン軌道トルク配線40の両端に接続されている。第2電源120は、磁気抵抗効果素子20の積層方向に対して直交する方向に流れる電流である、スピン軌道トルク配線40に流れる電流を制御すること

ができる。

[0085] 上述のように、磁気抵抗効果素子 20 の積層方向に流れる電流は S T T を誘起する。これに対して、スピン軌道トルク配線 40 に流れる電流は S O T を誘起する。S T T 及び S O T はいずれも第 2 強磁性金属層 23 の磁化反転に寄与する。

[0086] このように、磁気抵抗効果素子 20 の積層方向と、この積層方向に直行する方向に流れる電流量を 2 つの電源によって制御することで、S O T と S T T が磁化反転に対して寄与する寄与率を自由に制御することができる。

[0087] 例えば、デバイスに大電流を流すことができない場合は磁化反転に対するエネルギー効率の高い S T T が主となるように制御することができる。すなわち、第 1 電源 110 から流れる電流量を増やし、第 2 電源 120 から流れる電流量を少なくすることができる。

また、例えば薄いデバイスを作製する必要がある、非磁性層 22 の厚みを薄くせざる得ない場合は、非磁性層 22 に流れる電流を少なくことが求められる。この場合は、第 1 電源 110 から流れる電流量を少なくし、第 2 電源 120 から流れる電流量を多くし、S O T の寄与率を高めることができる。

[0088] 第 1 電源 110 及び第 2 電源 120 は公知のものをを用いることができる。

[0089] 上述のように、本発明の一態様に係る磁気抵抗効果素子によれば、S T T 及び S O T の寄与率を、第 1 電源及び第 2 電源から供給される電流量により自由に制御することができる。そのため、デバイスに要求される性能に応じて、S T T と S O T の寄与率を自由に制御することができ、より汎用性の高い磁気抵抗効果素子として機能することができる。

[0090] (磁気メモリ)

本発明の磁気メモリ (M R A M) は、本発明の磁気抵抗効果素子を複数備える。

[0091] (磁化反転方法)

本発明の一態様に係る磁化反転方法は、本発明の磁気抵抗効果素子において、スピン軌道トルク配線に流れる電流密度が $1 \times 10^7 \text{ A} / \text{cm}^2$ 未満とする

ものである。

スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度が大きすぎると、スピン軌道トルク配線に流れる電流によって熱が生じる。熱が第2強磁性金属層に加わると、第2強磁性金属層の磁化の安定性が失われ、想定外の磁化反転等が生じる場合がある。このような想定外の磁化反転が生じると、記録した情報が書き換わるという問題が生じる。すなわち、想定外の磁化反転を避けるためには、スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度が大きくなりすぎないようにすることが好ましい。スピン軌道トルク配線に流す電流の電流密度は $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 未満であれば、少なくとも発生する熱により磁化反転が生じることを避けることができる。

[0092] 本発明の一態様に係る磁化反転方法は、本発明の磁気抵抗効果素子において、スピン軌道トルク配線の電源に電流を印加した後に、磁気抵抗効果素子の電源に電流を印加するものである。

アシスト工程と磁化反転工程は、同時に行ってもよいし、アシスト工程を事前に行った後に磁化反転工程を加えて行ってもよい。すなわち、図7に示す磁気抵抗効果素子200においては、第1電源110と第2電源120から電流を同時に供給してもよいし、第2電流120から電流を供給後に、加えて第1電源110から電流を供給してもよいが、SOTを利用した磁化反転のアシスト効果をより確実に得るためには、スピン軌道トルク配線の電源に電流が印加した後に、磁気抵抗効果素子の電源に電流を印加することが好ましい。すなわち、第2電流120から電流を供給後に、加えて第1電源110から電流を供給することが好ましい。

[0093] (スピン流磁化反転素子)

図11に、本発明の一実施形態に係るスピン流磁化反転素子の一例の模式図を示す。図11(a)は平面図であり、図11(b)は図11(a)のスピン軌道トルク配線2の幅方向の中心線であるX-X線で切った断面図である。

本発明の一態様に係るスピン流磁化反転素子は、図1に示すスピン流磁化

反転素子 101 は、磁化の向きが可変な第 2 強磁性金属層 1 と、第 2 強磁性金属層 1 の面直方向である第 1 方向（z 方向）に対して交差する第 2 方向（x 方向）に延在し、第 2 強磁性金属層 1 の第 1 面 1a に接合するスピン軌道トルク配線 2 と、を備える。

ここで、スピン軌道トルク配線 2 と第 2 強磁性金属層 1 との接合は、「直接」接合してもよいし、上述したようにキャップ層のような「他の層を介して」接合してもよく、スピン軌道トルク配線 2 で発生した純スピン流が第 2 強磁性金属層 1 に流れ込む構成であれば、スピン軌道トルク配線と第 1 強磁性金属層との接合（接続あるいは結合）の仕方に限定はない。

[0094] スピン軌道トルク配線 2 は、図 12 に示すように、純スピン流を生成する材料からなる純スピン流生成部 2A と、該純スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる低抵抗部 2B とからなり、該純スピン流生成部の少なくとも一部が第 2 強磁性金属層 1 と接する構成にすることができる。

図 12 に示す構成は、図 3 に示したスピン軌道トルク配線の構成を本発明のスピン流磁化反転素子に適用した例である。本発明のスピン流磁化反転素子に図 4～図 6 に示したスピン軌道トルク配線の構成を適用することができる。

[0095] 本発明のスピン流磁化反転素子の適用例として、主に磁気抵抗効果素子を挙げることができる。従って、本発明のスピン流磁化反転素子が備える構成要素において、上述の磁気抵抗効果素子等の構成要素と同等のものはすべて適用することができる。

[0096] また、本発明のスピン流磁化反転素子の用途としては磁気抵抗効果素子に限られず、他の用途にも適用できる。他の用途としては、例えば、スピン流磁化反転素子を各画素に配設して、磁気光学効果を利用して入射光を空間的に変調する空間光変調器においても用いることができるし、磁気センサにおいて磁石の保磁力によるヒステリシスの効果を避けるために磁石の磁化容易軸に印可する磁場をスピン流磁化反転素子に置き換えてもよい。

符号の説明

[0097] 1…第2強磁性金属層、2…スピン軌道トルク配線、10…基板、20…磁気抵抗効果素子、21…第1強磁性金属層、22…非磁性層、23…第2強磁性金属層、23'…接合部（第2強磁性金属層側）、24…キャップ層、24'…接合部（キャップ層側）、30…配線、40、50、51、52…スピン軌道トルク配線、40'…接合部（スピン軌道トルク配線側）、41、41A、41B…スピン流生成部、42A、42B、42C…低抵抗部、100、200、300…磁気抵抗効果素子、101…スピン流磁化反転素子、I…電流、S1…上向きスピン、S2…下向きスピン、 M_{21} 、 M_{23} …磁化、 I_1 …第1電流経路、 I_2 …第2電流経路、110…第1電源、120…第2電源

請求の範囲

- [請求項1] 磁化の向きが固定された第1強磁性金属層と、磁化の向きが可変な第2強磁性金属層と、第1強磁性金属層及び第2強磁性金属層に挟持された非磁性層とを有する磁気抵抗効果素子と、
該磁気抵抗効果素子の積層方向に対して交差する方向に延在し、前記第2強磁性金属層に接合するスピン軌道トルク配線と、を備え、
前記磁気抵抗効果素子と前記スピン軌道トルク配線とが接合する部分において、前記磁気抵抗効果素子に流れる電流と前記スピン軌道トルク配線に流れる電流が合流し、または、分配される磁気抵抗効果素子。
- [請求項2] 前記スピン軌道トルク配線は、最外殻にd電子又はf電子を有する原子番号39以上の非磁性金属を含む請求項1に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項3] 前記スピン軌道トルク配線は、純スピン流を生成する材料からなる純スピン流生成部と、該純スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる低抵抗部とからなり、該純スピン流生成部の少なくとも一部が前記第2強磁性金属層と接している請求項1又は2のいずれかに記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項4] 前記スピン軌道トルク配線は、磁性金属を含む請求項1～3のいずれか一項に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項5] 前記スピン軌道トルク配線と前記第2強磁性金属層との間にキャップ層を有し、前記スピン軌道トルク配線と前記第2強磁性金属層とは前記キャップ層を介して接合されている請求項1～4のいずれか一項に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項6] 前記スピン軌道トルク配線は、前記第2強磁性金属層の側壁に接合する側壁接合部を有する請求項1～5のいずれか一項に記載の磁気抵抗効果素子。
- [請求項7] 請求項1～6のいずれか一項に記載の磁気抵抗効果素子を複数備え

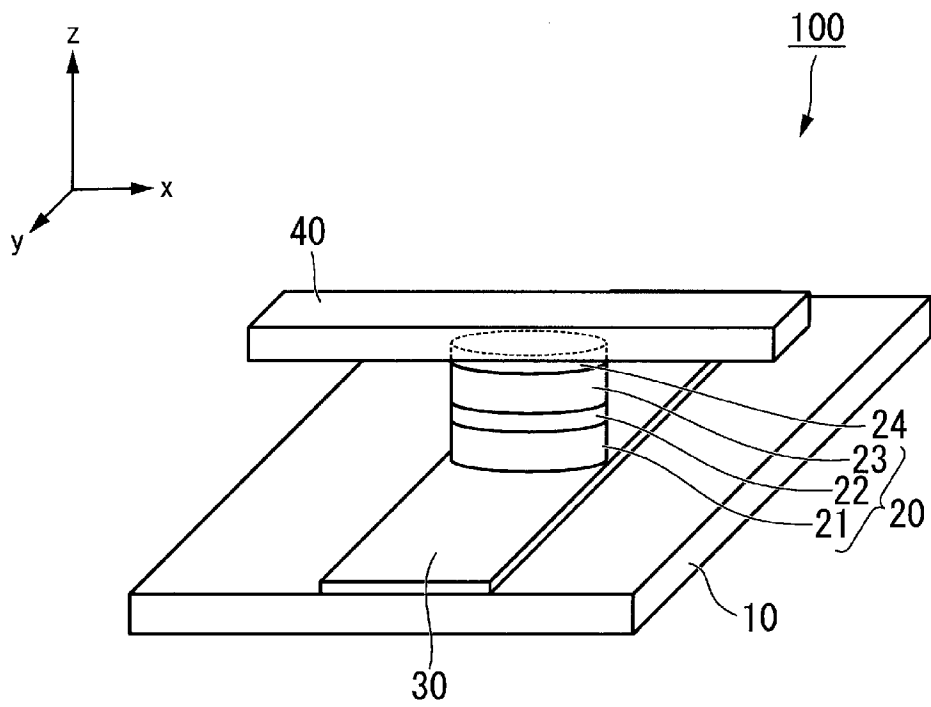
た磁気メモリ。

[請求項8] 前記スピン軌道トルク配線に流れる電流密度が $1 \times 10^7 \text{ A/cm}^2$ 未満とすることを特徴とする請求項1～6に記載の磁気抵抗効果素子における磁化反転方法。

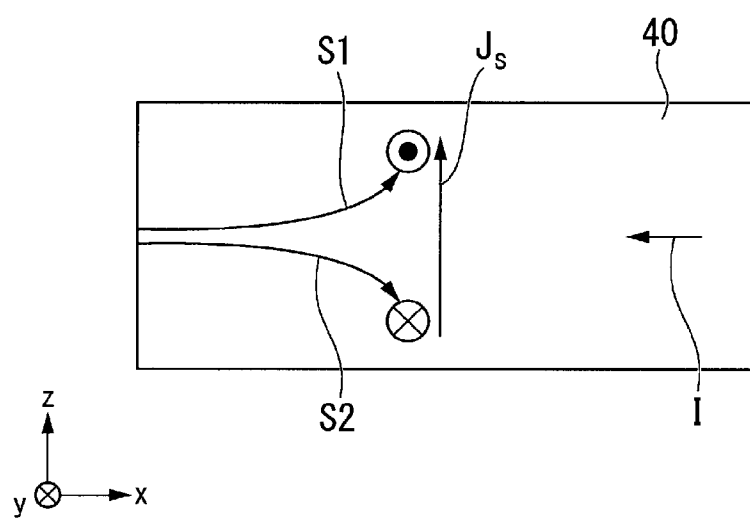
[請求項9] 前記スピン軌道トルク配線の電源に電流を印加した後に、前記磁気抵抗効果素子の電源に電流を印加することを特徴とする請求項1～6に記載の磁気抵抗効果素子における磁化反転方法。

[請求項10] 磁化の向きが可変な第2強磁性金属層と、
前記第2強磁性金属層の面直方向に対して交差する方向に延在し、
前記第2強磁性金属層に接合するスピン軌道トルク配線と、を備え、
前記スピン軌道トルク配線は、純スピン流を生成する材料からなる純スピン流生成部と、該純スピン流生成部よりも電気抵抗が小さい材料からなる低抵抗部とからなり、該純スピン流生成部の少なくとも一部が前記第2強磁性金属層と接しているスピン流磁化反転素子。

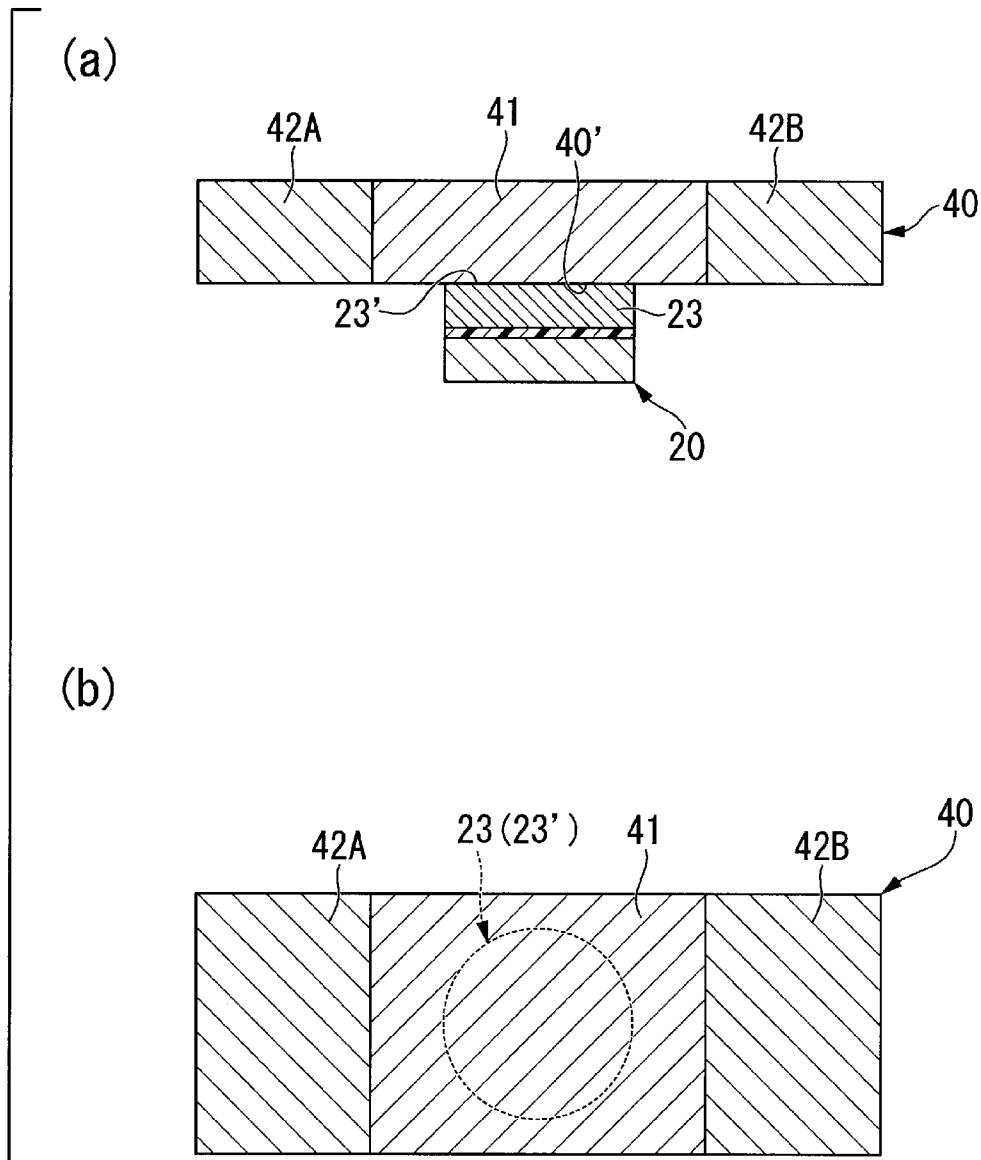
[図1]



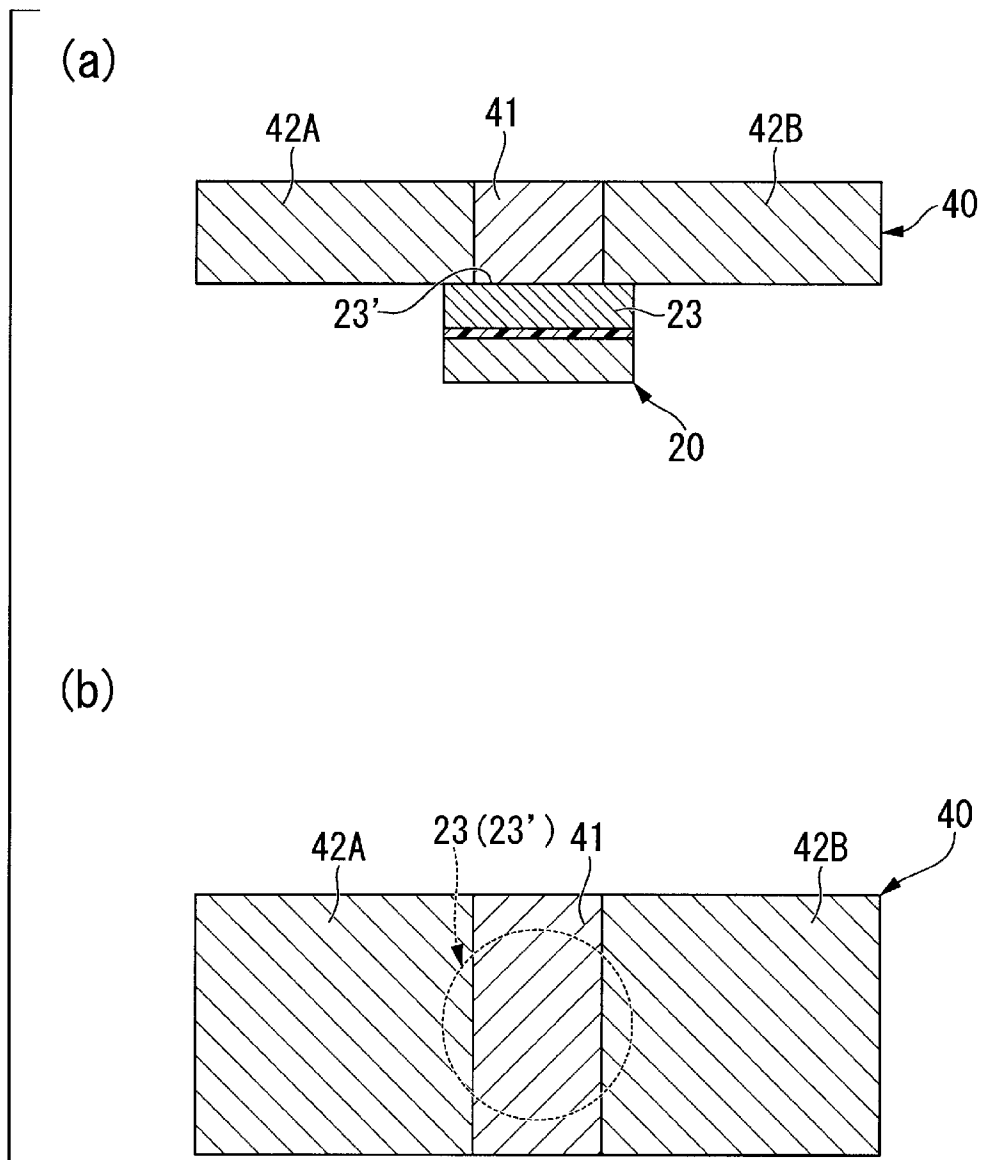
[図2]



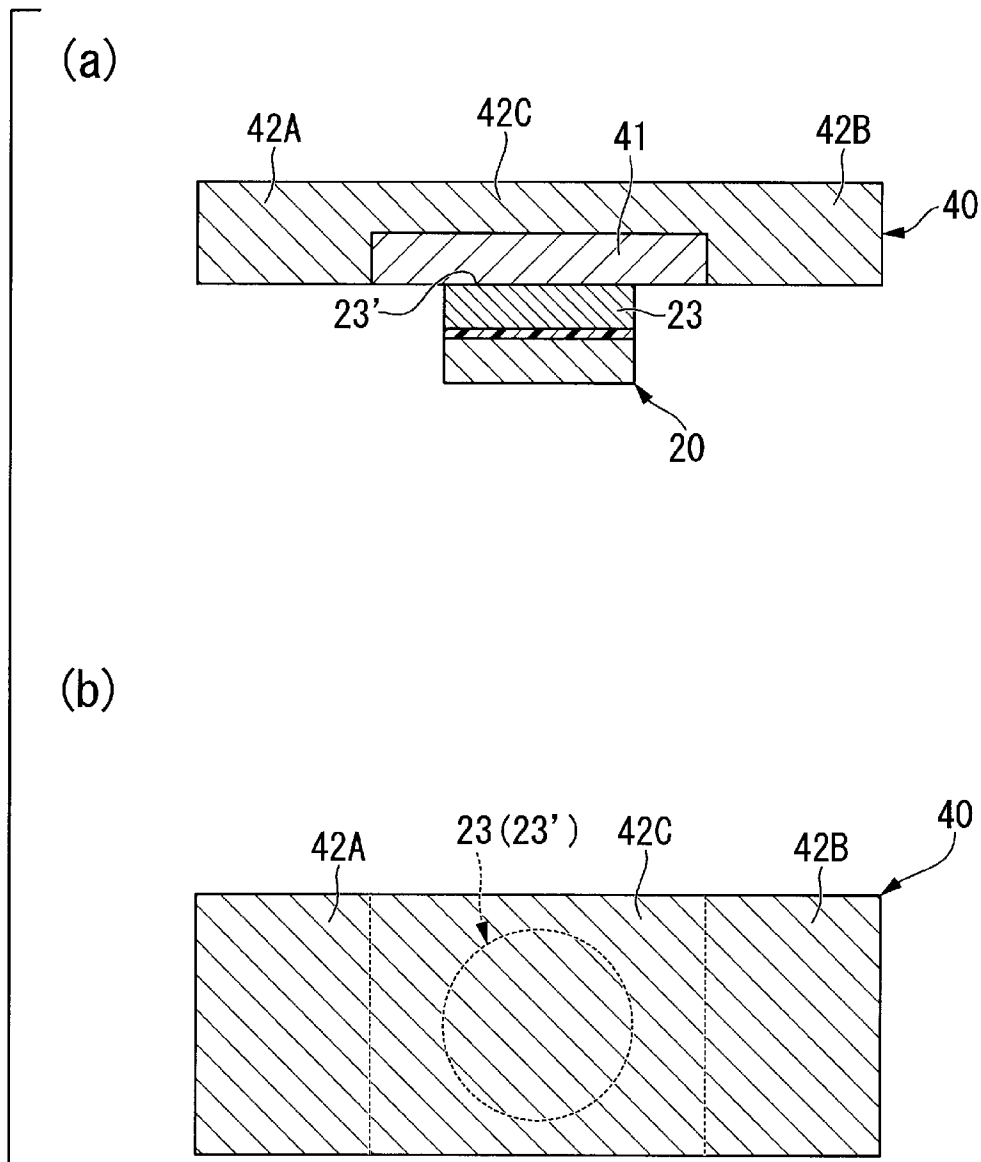
[図3]



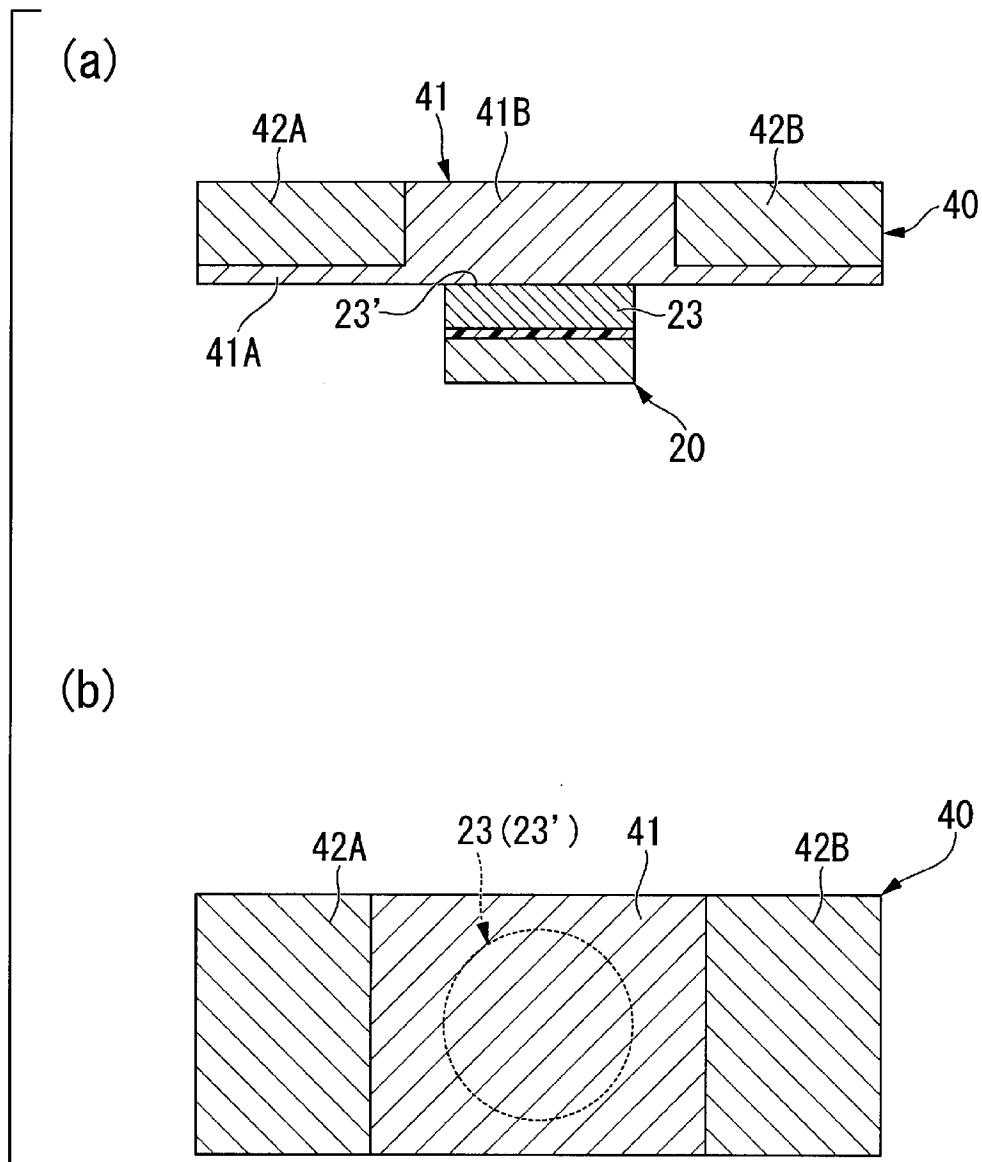
[図4]



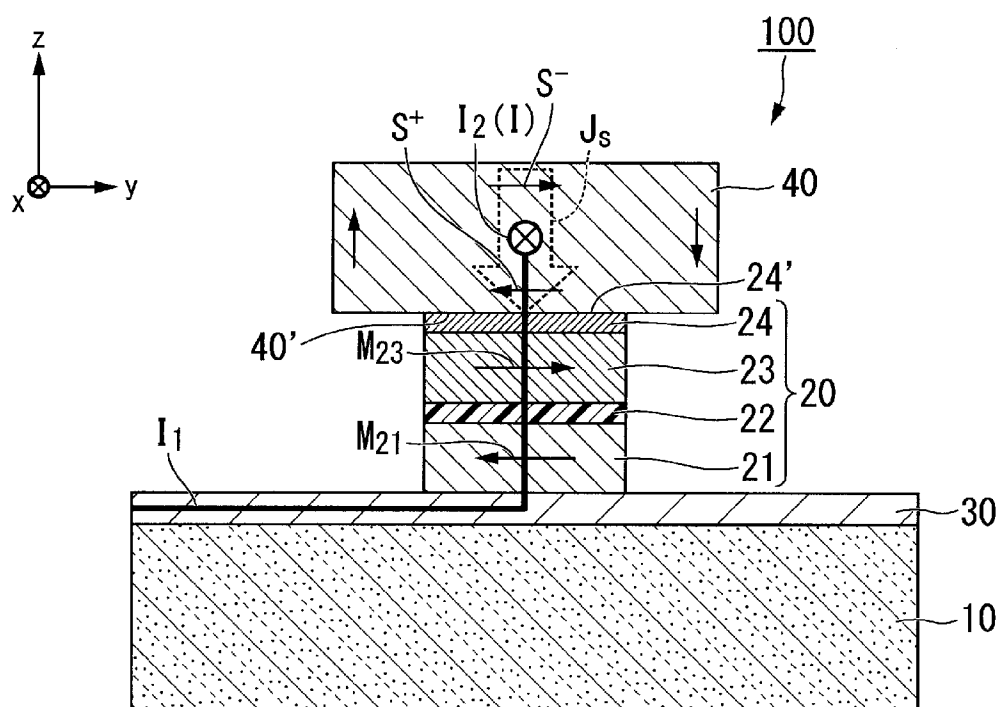
[図5]



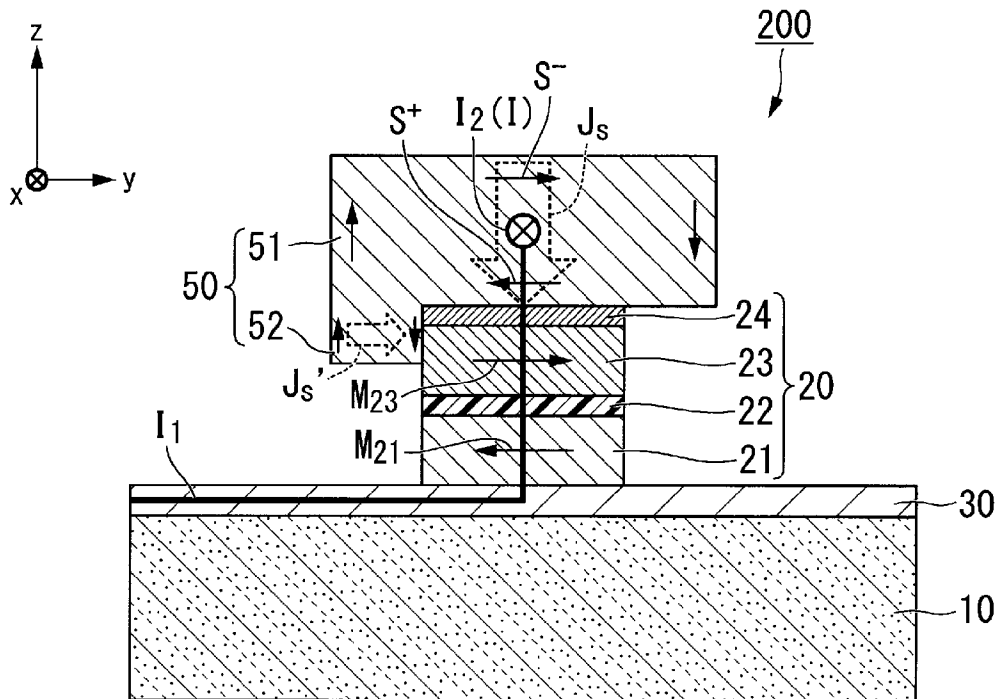
[図6]



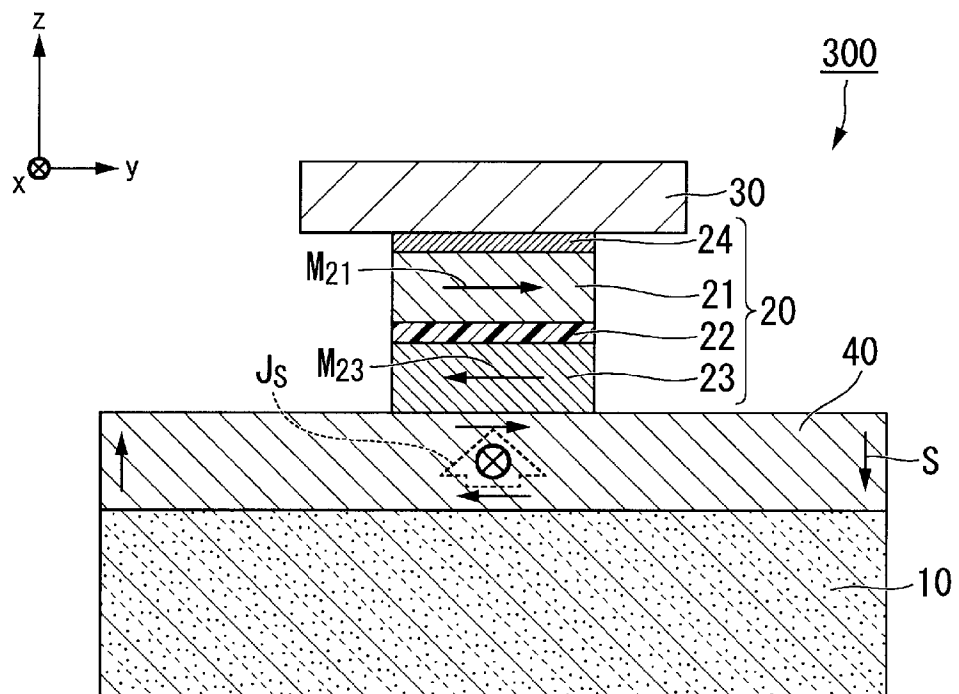
[図7]



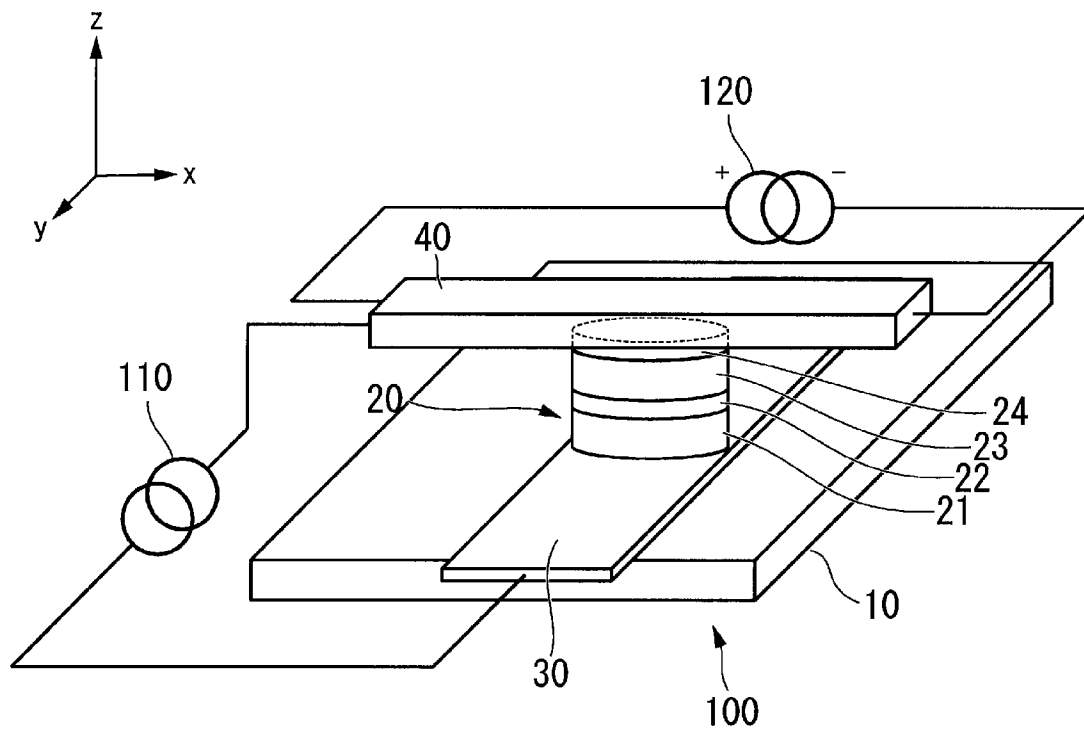
[図8]



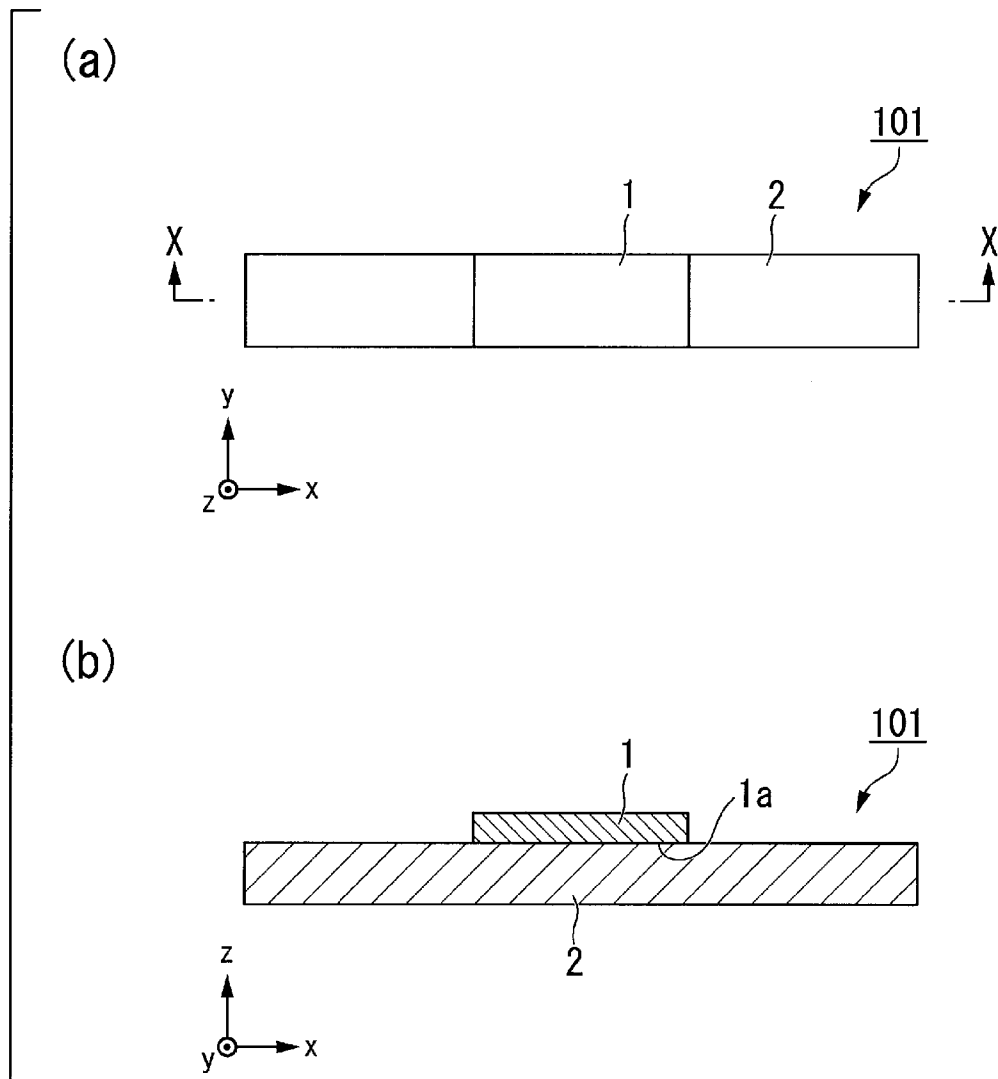
[図9]



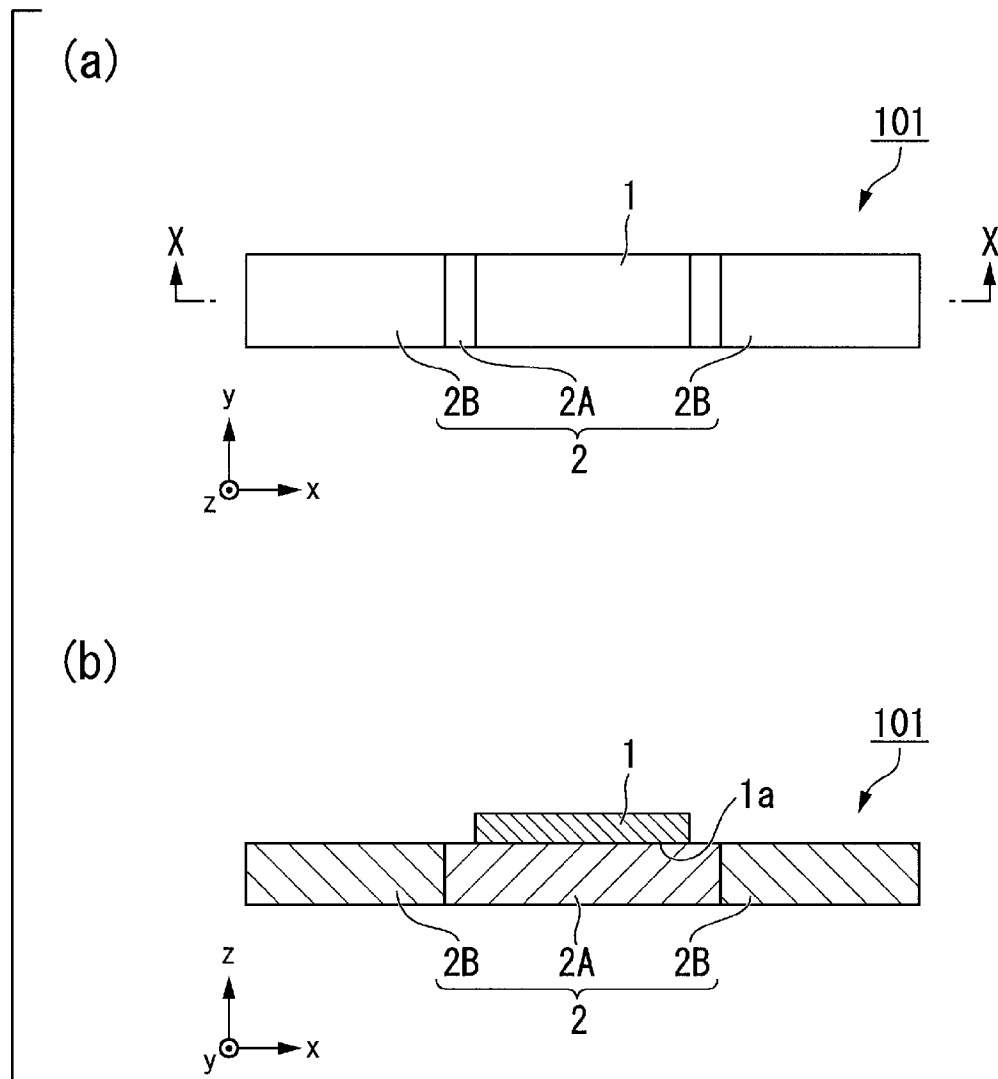
[図10]



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/084979

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01L43/08(2006.01)i, G11B5/39(2006.01)i, H01L21/8246(2006.01)i,
H01L27/105(2006.01)i, H01L29/82(2006.01)i, H03B15/00(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, G11B5/39, H01L21/8246, H01L27/105, H01L29/82, H03B15/00

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

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

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

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2014-45196 A (Samsung Electronics Co., Ltd.), 13 March 2014 (13.03.2014), paragraphs [0002], [0063], [0066], [0068], [0081], [0088], [0089], [0102]; fig. 1 to 20 & US 2014/0056060 A1 paragraphs [0001], [0036], [0039], [0040], [0050], [0057], [0058], [0071]; fig. 1 to 20	1, 2, 4, 5, 7-9 3, 10 6
X Y	US 2015/0041934 A1 (Samsung Electronics Co., Ltd.), 12 February 2015 (12.02.2015), paragraphs [0002], [0030], [0031], [0034], [0037], [0040], [0043]; fig. 1 to 18 (Family: none)	1, 2, 4, 5, 7 3, 10

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

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

Date of the actual completion of the international search
03 February 2017 (03.02.17)

Date of mailing of the international search report
14 February 2017 (14.02.17)

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

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2016/084979

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y	US 2015/0200003 A1 (CORNELL UNIVERSITY), 16 July 2015 (16.07.2015), paragraphs [0004], [0029], [0030], [0033], [0039]; fig. 1 to 14 & WO 2014/025838 A1	1, 2, 7 3, 10
Y	US 2015/0036415 A1 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES), 05 February 2015 (05.02.2015), paragraph [0037]; fig. 1 to 5 & EP 2833364 A2	3, 10
Y	US 2015/0213869 A1 (QUALCOMM INC.), 30 July 2015 (30.07.2015), paragraph [0040]; fig. 1 to 9 & WO 2015/116417 A1	3, 10

A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L43/08(2006.01)i, G11B5/39(2006.01)i, H01L21/8246(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L29/82(2006.01)i, H03B15/00(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (IPC))

Int.Cl. H01L43/08, G11B5/39, H01L21/8246, H01L27/105, H01L29/82, H03B15/00

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

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

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

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X Y A	JP 2014-45196 A (三星電子株式会社) 2014.03.13, 段落 0002, 0063, 0066, 0068, 0081, 0088, 0089, 0102, 図 1-20 & US 2014/0056060 A1, 段落 0001, 0036, 0039, 0040, 0050, 0057, 0058, 0071, 図 1-20	1, 2, 4, 5, 7-9 3, 10 6
X Y	US 2015/0041934 A1 (SAMSUNG ELECTRONICS CO., LTD.) 2015.02.12, 段落 0002, 0030, 0031, 0034, 0037, 0040, 0043, 図 1-18 (ファミリーなし)	1, 2, 4, 5, 7 3, 10

☑ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

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

の日の後に公表された文献

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

国際調査を完了した日

03.02.2017

国際調査報告の発送日

14.02.2017

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (ISA/J P)
郵便番号 100-8915
東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官 (権限のある職員)

小山 満

5 F

9458

電話番号 03-3581-1101 内線 3516

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	US 2015/0200003 A1 (CORNELL UNIVERSITY)	1, 2, 7
Y	2015.07.16, 段落 0004, 0029, 0030, 0033, 0039, 図 1-14 & WO 2014/025838 A1	3, 10
Y	US 2015/0036415 A1 (COMMISSARIAT A L'ENERGIE ATOMIQUE ET AUX ENERGIES ALTERNATIVES) 2015.02.05, 段落 0037, 図 1-5 & EP 2833364 A2	3, 10
Y	US 2015/0213869 A1 (QUALCOMM INCORPORATED) 2015.07.30, 段落 0040, 図 1-9 & WO 2015/116417 A1	3, 10