

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2018年11月1日(01.11.2018)



(10) 国際公開番号

WO 2018/198713 A1

(51) 国際特許分類:

H01L 29/82 (2006.01) H01L 27/105 (2006.01)
H01F 10/16 (2006.01) H01L 43/08 (2006.01)
H01L 21/8239 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2018/014605

(22) 国際出願日: 2018年4月5日(05.04.2018)

(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 2017-090398 2017年4月28日(28.04.2017) JP

(71) 出願人: 国立研究開発法人産業技術総合研究所(NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) [JP/JP]; 〒1008921 東京都千代田区霞が関 1丁目3番1号 Tokyo (JP).

(72) 発明者: 松本利映 (MATSUMOTO, Rie); 〒3058568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 野崎 隆行 (NOZAKI, Takayuki); 〒3058568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 湯浅 新治 (YUASA, Shinji); 〒3058568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP). 今村 裕志 (IMAMURA, Hiroshi); 〒3058568 茨城県つくば市梅園 1-1-1 中央第2 国立研究開発法人産業技術総合研究所内 Ibaraki (JP).

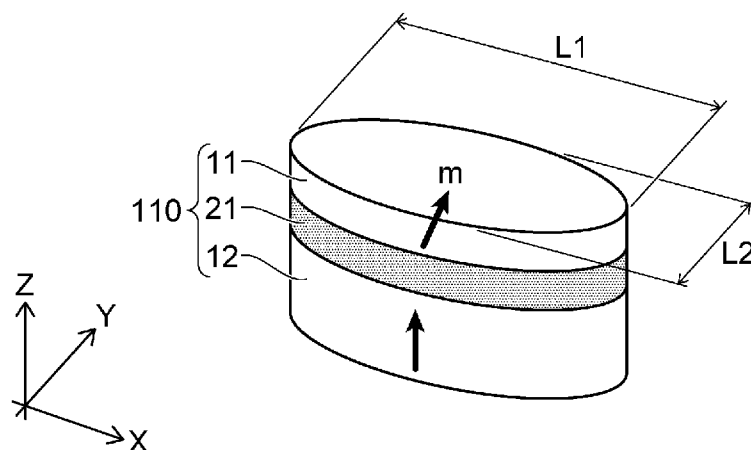
(74) 代理人: 日向寺 雅彦, 外(HYUGAJI, Masahiko et al.); 〒2318966 神奈川県横浜市中区桜木町一丁目1番地8 日石横浜ビル Kanagawa (JP).

(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,

(54) Title: MAGNETIC ELEMENT

(54) 発明の名称: 磁気素子

[図1]



(57) Abstract: According to an embodiment of the invention, this magnetic element comprises a first magnetic layer and a first non-magnetic layer. In a state wherein substantially no voltage or magnetic field is applied to the first magnetic layer, the angle θ_0 , between a first direction oriented from the first non-magnetic layer to the first magnetic layer, and the magnetization direction of the first magnetic layer, satisfies $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ or $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$. The surface resistance of the first non-magnetic layer is $10 \Omega \mu\text{m}^2$ or higher.

[続葉有]



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, JO, JP, KE, KG, KH, KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

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

添付公開書類:

- 一 国際調査報告(条約第21条(3))

(57) 要約: 実施形態によれば、磁気素子は、第1磁性層と、第1非磁性層と、を含む。前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たす。前記第1非磁性層の面積抵抗は、 $10\Omega\mu\text{m}^2$ 以上である。

明 細 書

発明の名称：磁気素子

技術分野

[0001] 本発明の実施形態は、磁気素子に関する。

背景技術

[0002] 記憶される情報に応じて磁性層の磁化方向を変化させる磁気素子が知られている。磁気素子において、安定した動作が得られることが望ましい。

先行技術文献

特許文献

[0003] 特許文献1：国際公開第2009／133650号

特許文献2：特開2014－67929号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0004] 本発明の実施形態は、動作安定性を向上できる磁気素子を提供する。

課題を解決するための手段

[0005] 本発明の実施形態によれば、磁気素子は、第1磁性層と、第1非磁性層と、を含む。前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たす。前記第1非磁性層の面積抵抗は、 $10\Omega\mu\text{m}^2$ 以上である。

発明の効果

[0006] 本発明の実施形態によれば、動作安定性を向上できる磁気素子が提供できる。

図面の簡単な説明

[0007] [図1]図1は、実施形態に係る磁気素子を例示する模式的斜視図である。

[図2]図2（a）および図2（b）は、実施形態に係る磁気素子の特性を例示する模式的斜視図である。

[図3]図3は、実施形態に係る磁気素子を例示する模式的断面図である。

[図4]図4（a）及び図4（b）は、第1磁性層の特性を例示する模式図である。

[図5]図5は、第1磁性層の特性を例示する模式図である。

[図6]図6は、第1磁性層に関するシミュレーション結果を表す図である。

[図7]図7は、第1磁性層に関するシミュレーション結果を表す図である。

[図8]図8（a）～図8（c）は、第1磁性層に関するシミュレーション結果を表す図である。

[図9]図9は、第1磁性層に関する別のシミュレーション結果を表す図である。

[図10]図10（a）及び図10（b）は、第1磁性層に関する別のシミュレーション結果を表す図である。

[図11]図11は、スイッチング様式を表す相図である。

[図12]図12（a）～図12（c）は、実施形態に係る磁気記憶装置の動作を例示する模式図である。

発明を実施するための形態

[0008] 以下に、本発明の各実施の形態について図面を参照しつつ説明する。

図面は模式的または概念的なものであり、各部分の厚さと幅との関係、部分間の大きさの比率などは、必ずしも現実のものと同一とは限らない。同じ部分を表す場合であっても、図面により互いの寸法や比率が異なって表される場合もある。

本願明細書と各図において、既出の図に関して前述したものと同様の要素には同一の符号を付して詳細な説明は適宜省略する。

[0009] 図1は、実施形態に係る磁気素子を例示する模式的斜視図である。

図2（a）及び図2（b）は、第1実施形態に係る磁気素子の特性を例示する模式図である。

図3は、実施形態に係る磁気素子を例示する模式的断面図である。

- [0010] 実施形態に係る第1磁気素子110は、第1磁性層11、第1非磁性層21、及び第2磁性層12を含む。
- [0011] 第1非磁性層21から第1磁性層11に向かう第1方向をZ軸方向とする。Z軸方向に対して垂直な1つの方向をX軸方向とする。Z軸方向及びX軸方向に対して垂直な方向をY軸方向とする。Z軸からはかった角度を極角 θ とし、X軸からはかったXY平面上での角度を方位角 ϕ とする。
- [0012] 第2磁性層12は、第1非磁性層21を介して第1磁性層11と反対側に設けられる。第1非磁性層21は、Z軸方向において、第1磁性層11と第2磁性層12との間に位置する。第1磁性層11、第1非磁性層21、及び第2磁性層12は、例えば、X-Y平面に平行に広がる。
- [0013] Z軸方向に対して交差する面内の第1磁性層11の異方性磁界 H_k は、 $H_k \neq 0$ を満たす。例えば、図1に表したように、X軸方向における第1磁性層11の長さ L_1 は、Y軸方向における第1磁性層11の長さ L_2 と異なる。これにより、第1磁性層11に形状磁気異方性磁界が生じ、 $H_k \neq 0$ となる。
- [0014] 第1磁性層11に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、Z軸方向と、第1磁性層11の磁化方向 m と、の間の角度 θ_0 は、図2(a)に表したように、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、Z軸方向から傾斜している。X軸方向と磁化方向 m との間の角度 ϕ は、 $H_k \neq 0$ の場合では H_k と同じ方位角である。
- [0015] 第1磁性層11は、強磁性材料を含む。第1磁性層11に含まれる強磁性材料のc軸は、例えばZ軸方向に沿う。例えば微細加工前で $H_k = 0$ の状態では、第1磁性層11の磁化方向 m は、図2(b)に表したように、c軸(Z軸方向)に対して角度 θ_0 傾斜した円錐面上のいずれかの位置にある。このような、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たす磁化状態は、コーン磁化状態と呼ばれる。
- [0016] 第1非磁性層21は、例えばトンネル絶縁層である。第1非磁性層21の面積抵抗(RA: Resistance area product)は、 $10 \Omega \mu m^2$ 以上であるこ

とが好ましい。これにより、例えば、電圧書き込み動作において、低い消費電力が得られる。第1非磁性層21の面積抵抗に関する情報は、例えば、素子の抵抗の測定結果と、SEM (Scanning Electron Microscope) またはTEM (Transmission Electron Microscope) などによる素子のサイズの測定結果、などから得られる。

[0017] 第1非磁性層21の面積抵抗は、例えば、 $20\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ よりも大きくてもよい。これにより、例えば、電流書き込み動作の場合の $1/2$ の、低い消費電力が得られる。第1非磁性層21の面積抵抗は、例えば、 $100\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 以上でもよい。これにより、例えば、電流書き込み動作の場合の $1/10$ の、さらに低い消費電力が得られる。第1非磁性層21の面積抵抗は、例えば、 $500\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 以上でもよい。これにより、例えば、電流書き込み動作の場合の $1/50$ の、さらに低い消費電力が得られる。第1非磁性層21の面積抵抗が $20\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 以下になると、書き込みに要するエネルギーが急激に増大する。第1非磁性層21の面積抵抗が $10\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 未満になると、書き込みに要するエネルギーの増大は、さらに加速する。

[0018] 一方、電圧読み出し動作においては、第1非磁性層21の面積抵抗が大きいほど、読み出しに要する時間は長くなる。例えば、第1非磁性層21の面積抵抗が $20\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 、 $100\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 、 $500\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ である場合、読み出しに要する時間はそれぞれ2倍、10倍、50倍と長くなる。このため、高速読み出しの観点からは、第1非磁性層21の面積抵抗は、前記の値よりも低い方が好ましい。実際の磁気記憶装置においては、個々の応用で要求される消費電力と読み出し速度を両立するために最適な第1非磁性層21の面積抵抗を用いればよい。

[0019] 図3に表した例では、第1磁気素子110は、磁気記憶装置210に含まれる。磁気記憶装置210は、例えば、第2磁気素子120、第1導電層31、第2導電層32、第3導電層33、第4導電層34、絶縁部40、制御部70、第1配線71、及び第2配線72をさらに含む。第2磁気素子120は、第3磁性層13、第4磁性層14、及び第2非磁性層22を含む。

- [0020] 第3磁性層13は、X軸方向において、第1磁性層11から離間している。第3磁性層13は、例えば、第1磁性層11と同様の構造を有する。すなわち、Z軸方向に対して交差する面内の第3磁性層13の異方性磁界は、0よりも大きい。第3磁性層13に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、Z軸方向と第3磁性層13の磁化方向との間の角度は、0°よりも大きく90°よりも小さいか、もしくは90°よりも大きく180°よりも小さい。
- [0021] 第4磁性層14は、X軸方向において第2磁性層12から離間している。第2非磁性層22は、Z軸方向において、第3磁性層13と第4磁性層14との間に設けられる。
- [0022] 第1磁性層11は、Z軸方向において、第1導電層31と第1非磁性層21との間に設けられる。第1導電層31は、例えば、第1磁性層11と接する。第2磁性層12は、Z軸方向において、第2導電層32と第1非磁性層21との間に設けられる。
- [0023] 第3磁性層13は、Z軸方向において、第3導電層33と第2非磁性層22との間に設けられる。第3導電層33は、例えば、第3磁性層13と接する。第4磁性層14は、Z軸方向において、第4導電層34と第2非磁性層22との間に設けられる。
- [0024] 磁気記憶装置210には、第1磁性層11及び第3磁性層13の磁化方向に実質的な影響を与えない範囲で、地磁気などの微弱な磁界が印加されていても良い。ここでは、地磁気などの微弱な磁界が印加された状態も、実質的に磁界が印加されていない状態に含む。
- [0025] 絶縁部40は、X軸方向において、第1磁気素子110と第2磁気素子120との間に設けられる。
- [0026] 第1導電層31及び第3導電層33は、第1配線71と電氣的に接続される。第2導電層32及び第4導電層34は、第2配線72と電氣的に接続される。第2導電層32と第2配線72の間には、例えば第1スイッチ72aが設けられる。第4導電層34と第2配線72の間には、例えば第2ス

イッチ 7 2 b が設けられる。第 1 スイッチ 7 2 a と第 2 スイッチ 7 2 b は、例えば選択トランジスタである。このように、電流経路上にスイッチなどが設けられている状態も、電氣的に接続される状態に含まれる。第 1 スイッチ 7 2 a 及び第 2 スイッチ 7 2 b は、それぞれ、第 1 導電層 3 1 と第 1 配線 7 1 との間および第 3 導電層 3 3 と第 1 配線 7 1 との間に設けられていても良い。

[0027] 制御部 7 0 は、第 1 配線 7 1 と第 2 配線 7 2 との間に電圧を印加し、第 1 スイッチ 7 2 a または第 2 スイッチ 7 2 b をオンさせることで、第 1 磁気素子 1 1 0 または第 2 磁気素子 1 2 0 に選択的に電圧を印加する。第 1 磁気素子 1 1 0 に適切な極性の電圧が印加されると、第 1 磁性層 1 1 の磁化方向が X 軸方向を中心に歳差運動し、磁化方向の Z 軸方向成分は正負の反転を繰り返す。第 1 磁気素子 1 1 0 への電圧の印加時間を適切に制御することで、第 1 磁性層 1 1 の磁化方向を所望の方向に制御することができる。すなわち、磁気記憶装置 2 1 0 では、第 1 非磁性層 2 1 を介して第 1 磁性層 1 1 に単極性の電圧を印加することにより、双方向の情報書き込みを行うことが可能である。

[0028] 本実施形態によれば、Z 軸方向と第 1 磁性層 1 1 の磁化方向 m との間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たす。第 1 磁性層 1 1 に電圧が印加された際に、例えば第 1 磁性層 1 1 の異方性磁界 H_k により、第 1 磁性層 1 1 の磁化方向を変化させるトルクが与えられる。この結果、電圧印加時に外部磁界が実質的に無い状態で、第 1 磁性層 1 1 の磁化方向が変化する。

[0029] 従って、実施形態に係る磁気記憶装置 2 1 0 は、第 1 磁性層 1 1 に面内方向の磁界を印加するための磁性層等を含んでいる必要は無い。例えば、磁気記憶装置 2 1 0 は、面内方向に磁化容易軸を有する磁性層を含んでいない。第 1 磁性層 1 1 に磁界を印加するための構成を含んでいないことで、磁気記憶装置 2 1 0 の製造が容易となる。さらに、外部磁界の強度のばらつきに基づく、第 1 磁性層 1 1 の磁化方向の変化のばらつきを抑制できるため、磁気

記憶装置 210 の動作安定性を向上させることができる。

[0030] 以上で説明した磁気記憶装置 210 に含まれる各磁性層の磁化方向は、例えば、スピン偏極 SEM を用いて観察することができる。

[0031] 以下で、各構成要素の具体的な例について説明する。

第 1 磁性層 11、第 2 磁性層 12、第 3 磁性層 13、及び第 4 磁性層 14 は、例えば、Fe、Co、Ni、Cr、Mn、Gd、Nd、Sm、及び Tb からなる群から選択された少なくとも 1 つを含む。第 1 磁性層 11、第 2 磁性層 12、第 3 磁性層 13、及び第 4 磁性層 14 のそれぞれの厚さは、例えば、0.5 nm 以上 10 nm 以下である。

[0032] または、第 1 磁性層 11 及び第 3 磁性層 13 は、第 1 領域と第 2 領域を含んでいても良い。第 1 領域は Co を含み、第 2 領域は Pt 及び Pd からなる群より選択された少なくとも 1 つを含む。この場合、第 1 領域は、第 1 非磁性層 21 と第 2 領域との間に設けられる。

または、第 1 磁性層 11 及び第 3 磁性層 13 は、Z 軸方向において交互に設けられた複数の第 1 領域および複数の第 2 領域を含んでいても良い。この場合、第 1 領域は、六方最密充填構造 (hcp) 構造または面心立方格子 (fcc) (111) 構造を有することが望ましい。第 2 領域は、fcc (111) 構造を有することが好ましい。または、第 1 領域は fcc (001) 構造を有し、第 2 領域は fcc (001) 構造を有していても良い。Pt を含む第 2 領域の上に積層される第 1 領域の 1 層の厚さ (Z 軸方向における長さ) は、Co 原子の大きさの 10 ~ 15 個分に相当することが好ましい。Pd を含む第 2 領域の上に積層される第 1 領域の 1 層の厚さは、Co 原子の大きさの 4.5 ~ 6 個分に相当することが好ましい。

[0033] 第 1 領域は Co を含み、第 2 領域は Pt を含んでいても良い。例えば、この場合、第 1 領域の厚さは 0.9 nm 以上 1.1 nm 以下であり、第 2 領域の厚さは 2 nm である。一例として、第 1 領域と第 2 領域は、Z 軸方向において交互に 8 つずつ設けられる。または、第 1 領域は、1 または 2 原子層の Co であり、第 2 領域は、1 または 2 原子層の Pt であっても良い。この場

合、第1領域と第2領域は、例えば、Z軸方向において交互に数層から数十層ずつ設けられても良い。

または、第1磁性層11及び第3磁性層13は、hcp構造のCoを含んでいても良い。

[0034] または、第1磁性層11及び第3磁性層13は、Z軸方向に磁化容易軸を有する第1磁性膜と、面内方向に磁化容易軸を有する第2磁性膜と、を積み重ねることで構成されていても良い。この場合、第1磁性層11及び第3磁性層13の磁化方向が全体としてZ軸方向から傾くように、第1磁性膜及び第2磁性膜は比較的薄いことが好ましい。

[0035] 第2磁性層12及び第4磁性層14の磁化方向は、変化し難い。第1磁性層11及び第3磁性層13の磁化方向は、第2磁性層12及び第4磁性層14の磁化方向に比べて、変化し易い。

[0036] 第1非磁性層21及び第2非磁性層22は、Mg、Si、Al、Ti、Zr、Hf、Ta、Zn、Sr、及びBaからなる群から選択された少なくとも1つを含む酸化物または窒化物またはフッ化物を含む。第1非磁性層21及び第2非磁性層22のそれぞれの厚さは、例えば、0.5nm以上4nm以下である。

[0037] 第1導電層31、第2導電層32、第3導電層33、及び第4導電層34は、非磁性である。第1導電層31、第2導電層32、第3導電層33、及び第4導電層34は、例えば、Ta、Ru、W、Ir、Au、Ag、Cu、Al、Cr、Pt、及びPdからなる群から選択された少なくとも1つを含む。第1導電層31、第2導電層32、第3導電層33、及び第4導電層34のそれぞれの厚さは、例えば、1nm以上200nm以下である。より好ましくは、これらの導電層の厚さは、第1磁性層11の長さL1または長さL2より長く、200nm以下である。これにより、良好な平坦性と、低い抵抗値と、が得られる。

[0038] 絶縁部40は、例えば、非磁性の絶縁性化合物を含む。この絶縁性化合物は、例えば、Si、Al、Ti、Mg、及びTaからなる群より選択された

少なくともいずれかの元素の、酸化物、窒化物、または弗化物である。

[0039] 以下で、第1磁性層11について具体的に説明する。

図4(a)、図4(b)、及び図5は、第1磁性層の特性を例示する模式図である。

図4(a)、図4(b)、及び図5は、第1磁気素子110に電圧が実質的に印加されていない状態における第1磁性層11の特性を表す。

[0040] 図4(a)及び図4(b)において、横軸は、第1磁性層11の磁化方向とZ軸方向との間の角度 θ を表し、縦軸は、異方性エネルギー ε_u を表している。図4(a)において、実線は、異方性エネルギーの1次の項 ε_1 を表し、破線は、異方性エネルギーの2次の項 ε_2 を表している。1次の項の $K_{1,eff}$ は、実効的な1次の異方性定数である。 $K_{1,eff}$ では一軸性の1次の異方性定数 K_{u1} から反磁界エネルギーの寄与が差し引かれている。2次の項の K_{u2} は一軸性の2次の異方性定数である。図4(b)は、図4(a)に表した、異方性エネルギーの1次の項 ε_1 及び2次の項 ε_2 の和を表す。

[0041] 図4(b)に表したように、第1磁性層11において、異方性エネルギー ε_u が極小となる角度 θ が複数存在する。具体的には、 $0^\circ < \theta < 90^\circ$ 及び $90^\circ < \theta < 180^\circ$ において、異方性エネルギー ε_u が極小となる角度 θ が存在する。 ε_u が極小となる角度 θ を θ_0 と表す。すなわち、第1磁性層11の磁化方向は、これらの磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態において、Z軸方向から傾いている。

[0042] 図5は、第1磁性層11の磁化方向とZ軸方向との間の角度 θ_0 の $K_{1,eff}$ と K_{u2} に対する依存性を等高線図として示している。図5において、下側の横軸は、実効的な1次の異方性定数 $K_{1,eff}$ を表し、縦軸は、一軸性の2次の異方性定数 K_{u2} を表す。右側のカラーバーは、 θ_0 の大きさを表している。 θ_0 は $90^\circ < \theta_0 \leq 180^\circ$ にもなりえるが、図5では $0^\circ \leq \theta_0 \leq 90^\circ$ の範囲に着目して表示している。また、 θ_0 と $360^\circ - \theta_0$ は等価であるので、 $180^\circ < \theta_0 \leq 360^\circ$ の場合については説明を割愛する。

[0043] 図5は、1次の異方性定数が $K_{1,eff} < 0$ を満たし、2次の異方性定数が K

$u_2 > -(1/2) K_{1, \text{eff}}$ を満たすときに、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ を満たすことを表している。すなわち、これらの条件を満たすことで、第1磁性層11のコーン磁化状態が得られる。

[0044] θ_0 が 90° に近いほど、後述するようにプリセSSIONアルスイッチングがより安定して起こりやすく、安定した書き込みが可能になる。たとえば $5^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$ あるいは $90^\circ < \theta_0 \leq 175^\circ$ の場合、比較的安定した書き込みが可能となる。 $15^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$ あるいは $90^\circ < \theta_0 \leq 165^\circ$ の場合、より安定した書き込みが可能となる。 $30^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$ あるいは $90^\circ < \theta_0 \leq 150^\circ$ の場合、さらに安定した書き込みが可能となる。 $45^\circ \leq \theta_0 < 90^\circ$ あるいは $90^\circ < \theta_0 \leq 135^\circ$ の場合、さらに一層安定した書き込みが可能となる。

[0045] 一方、読み出し時の出力信号の大きさは $\cos \theta_0$ の絶対値に比例する。このため、 θ_0 が 0° あるいは 180° に近いほど読み出し出力信号が大きくなり、より高速な読み出しが可能となる。このため、高速読み出しの観点では、たとえば $0^\circ < \theta_0 \leq 60^\circ$ あるいは $120^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$ の場合、比較的高速な読み出しが可能となる。 $0^\circ < \theta_0 \leq 45^\circ$ あるいは $135^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$ の場合、より高速な読み出しが可能となる。 $0^\circ < \theta_0 \leq 30^\circ$ あるいは $150^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$ の場合、さらに高速な読み出しが可能となる。 $0^\circ < \theta_0 \leq 15^\circ$ あるいは $165^\circ \leq \theta_0 < 180^\circ$ の場合、さらに一層高速な読み出しが可能となる。

[0046] 磁気記憶装置210においては、各応用で要求される書き込みの安定性と読み出し速度を上手くバランスできる θ_0 を実現するために、各構成要素の材料および構造を調整すればよい。

[0047] (実施例)

図6から図11は、第1磁性層に関するシミュレーション結果を表す図である。

ここでは、磁気記憶装置210に電圧が実質的に印加されていない状態における、第1磁性層11の磁気エネルギー密度 $\varepsilon^{(0)}$ を、以下の「式1」で表

した。ここで、 μ_0 は透磁率、 M_s は飽和磁化、である。 (N_x, N_y, N_z) は反磁界係数、 (m_x, m_y, m_z) は単位磁化ベクトルであり、添え字の x, y, z は、 X 軸方向成分、 Y 軸方向成分、 Z 軸方向成分をそれぞれ表す。 (m_x, m_y, m_z) と (θ, ϕ) とは、 $(m_x, m_y, m_z) = (\sin \theta \cos \phi, \sin \theta \sin \phi, \cos \theta)$ の関係にある。 $K_{u1}^{(0)}$ 及び $K_{u2}^{(0)}$ は、それぞれ、電圧が実質的に印加されていない状態における1次と2次の異方性定数である。有限の電圧を印加した状態における第1磁性層11の磁気エネルギー密度 ε を、以下の「式2」で表した。「式2」における K_{u1} 及び K_{u2} は、それぞれ、電界効果を考慮した1次と2次の異方性定数である。 K_{u1} 及び K_{u2} が電界 E に対して線形に変化する場合は、 K_{u1} 及び K_{u2} は、それぞれ、「式3」及び「式4」で表される。 E は電界を表す。 η_1 と η_2 は、それぞれ、 K_{u1} と K_{u2} に対する電界効果を表す。 t_{11} は第1磁性層11の厚さを表す。

(式1)

$$\varepsilon^{(0)} = \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 (N_x m_x^2 + N_y m_y^2 + N_z m_z^2) + K_{u1}^{(0)} (1 - m_z^2) + K_{u2}^{(0)} (1 - m_z^2)^2$$

(式2)

$$\varepsilon = \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 (N_x m_x^2 + N_y m_y^2 + N_z m_z^2) + K_{u1} (1 - m_z^2) + K_{u2} (1 - m_z^2)^2$$

(式3)

$$K_{u1} = \frac{K_{u1}^{(0)} t_{11} - \eta_1 E}{t_{11}}$$

(式4)

$$K_{u2} = \frac{K_{u2}^{(0)} t_{11} - \eta_2 E}{t_{11}}$$

[0048] 図6から図11の計算では、第1磁性層11の条件は以下の通りに設定した。

第1磁性層11の厚さ $t_{11} = 1$ [nm]、第1磁性層11の長さ $L_1 = 6$

0 [nm]、第1磁性層11の長さ $L_2 = 46$ [nm]、 $N_x = 0.0242$ 、 $N_y = 0.0351$ 、 $N_z = 0.9407$ 、面内の形状磁気異方性磁界 $H_k = M_s (N_y - N_x) = 15.2$ [kA/m] (192 [Oe])、第1磁性層11の第1非磁性層21と接する面の面積 $A = \pi (d_1/2) (d_2/2)$ [nm²]、第1磁性層11の飽和磁化 $M_s = 1400$ [kA/m] (=1400 [emu/cm³])、第1磁気素子110への印加電圧 $V = 0$ における第1磁性層11の界面及び結晶の磁気異方性定数について、1次の異方性定数 $K_{u1}^{(0)} = 1109$ [kJ/m³]、2次の異方性定数 $K_{u2}^{(0)} = 135$ [kJ/m³]、温度300 [K]では熱耐性 $\Delta_0 = 60.6$ 、第1非磁性層21の厚さ $t_{21n} = 1$ [nm]、電界の大きさ $E = V/t_{21n}$ [V/m]、外部磁界 $H_{ext} = 0$ [kA/m]。磁化方向(m_x , m_y , m_z)の時間発展の計算には、LLG方程式を用いた。

[0049] 図6は、上記条件における印加電圧 $V = 0$ のときの、磁気エネルギー密度 $\varepsilon^{(0)}$ の等高線を表すシミュレーション結果である。 $m_z = 0$ 付近で最もエネルギー密度が高く、 m_z が-1または1付近に近づくと、エネルギー密度が低下しているように見える。より正しくは、(m_x , m_y , m_z) = ($m_x^{(0)}$, $m_y^{(0)}$, $m_z^{(0)}$) = ($\sin \theta_0 \cos \phi_0$, $\sin \theta_0 \sin \phi_0$, $\cos \theta_0$)でエネルギー密度は最低値を取っており、 $m_z^{(0)} = \cos \theta_0$ は0.96または-0.96である。 ϕ_0 は0°か180°である。シミュレーション結果から、第1磁性層11の磁化方向 θ_0 は、Z軸方向からX軸方向に15.8°か164.2°傾くことがわかる。すなわち、コーン磁化状態が実現されていることが分かる。図6において、初期磁化状態で磁化は、例えば、位置P0を向く。図7から図10では、初期磁化方向をP0とした。図6、図7(a)、図8、図9、図10(a)ではP0を白丸で表している。

[0050] 図7(a)及び図7(b)は、図6に表した状態の第1磁気素子110に電圧を印加したときのシミュレーション結果を表す。図7(a)は、磁化方向の変化の軌跡を表す。0 nsから50 nsまでの時間範囲の軌跡を示している。図7(b)において、横軸は時間を表し、縦軸は磁化方向のX軸方向

成分 m_x 及び Z 軸方向成分 m_z を表す。実線は、Z 軸方向成分 m_z を表し、破線は、X 軸方向成分 m_x を表す。このシミュレーションにおいて、条件を以下の通りに設定した。

K_{u1} に対する電界効果は $\eta_1 = -20 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ 、 K_{u2} に対する電界効果は $\eta_2 = 150 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ 、第 1 磁性層 11 のギルバートダンピング定数は $\alpha = 0.005$ 。

[0051] 図 7 (a) 及び図 7 (b) に表したように、電圧が印加されると、第 1 磁性層 11 の磁化方向が X 軸方向を中心に歳差運動する。図 7 (b) に表したように、電圧が印加されると、Z 軸方向成分 m_z は、正と負の間で周期的に反転していることが分かる。すなわち、このシミュレーション結果から、外部磁界 $H_{ext} = 0 \text{ [kA/m]}$ において電圧を印加することで、第 1 磁性層 11 の磁化方向が、Z 軸方向において反転していることが分かる。

[0052] 図 8 (a) ~ 図 8 (c) は、印加電圧を変化させたときの、エネルギー等高線の変化を表すシミュレーション結果である。ここでエネルギーは「式 2」で表した磁気エネルギー密度 ε である。図 7 と同様に、 K_{u1} に対する電界効果は $\eta_1 = -20 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ 、 K_{u2} に対する電界効果は $\eta_2 = 150 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ と設定した。

図 8 (a) ~ 図 8 (c) は、それぞれ、印加電圧 $V = 0.88 \text{ V}$ 、 0.89 V 、及び 0.90 V のときのエネルギー等高線を表している。各図において、太い実線は、初期磁化方向での ε と等しいエネルギー等高線を表している。

[0053] 図 8 (a) では、初期磁化方向を通るエネルギー等高線が、 $m_z < 0$ の領域を通過せず、磁化方向が反転しない。図 8 (b) 及び図 8 (c) では、初期磁化方向を通るエネルギー等高線が、 $m_z < 0$ の領域を通り、磁化方向が反転する。この結果から、磁化方向の反転が生じる閾電圧は $V_c = 0.89 \text{ V}$ であることが分かる。閾電圧 V_c は、初期磁化方向を通るエネルギー等高線が、 $(m_x, m_y, m_z) = (1, 0, 0)$ を通る電圧として求めることができる。

[0054] 閾電圧 V_c は、閾電界 E_c に第 1 非磁性層 21 の厚さ t_{21n} を掛けた値で表すこともできる。すなわち、 $V_c = E_c \cdot t_{21n}$ よりも大きな電圧を第 1 磁気素子 110 に印加することで、第 1 磁性層 11 の磁化方向を反転させることができる。閾電界 E_c は、以下の「式 5」及び「式 6」を用いて表すことができる。

(式 5)

$$E_c = \frac{K_{1,\text{eff}}^{(0)} + K_{u2}^{(0)} \left(1 - \frac{K_{1,\text{eff}}^{(0)}}{2K_{u2}^{(0)}} \right)}{\eta_1 + \eta_2 \left(1 - \frac{K_{1,\text{eff}}^{(0)}}{2K_{u2}^{(0)}} \right)} \cdot t_{11}$$

(式 6)

$$K_{1,\text{eff}}^{(0)} = K_{u1}^{(0)} - \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 (N_z - N_x)$$

[0055] 図 9、図 10 (a)、及び図 10 (b) は、第 1 磁性層に関する別のシミュレーション結果を表す図である。印加電圧は $V = 0.78 \text{ V}$ である。図 10 (a) は 0 ns から 50 ns までの時間範囲の軌跡を示している。

ここでは、 K_{u1} に対する電界効果 $\eta_1 = 10 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ 、 K_{u2} に対する電界効果 $\eta_2 = 150 \text{ fJ} / (\text{V} \cdot \text{m})$ に設定した。このとき「式 5」を用いて見積もられる閾電圧は 0.73 V であり、印加電圧は閾電圧より大きい。さらに図 10 では、第 1 磁性層 11 のギルバートダンピング定数を $\alpha = 0.005$ に設定した。その他の条件は、図 6 及び図 7 に表したシミュレーション結果と同じである。したがって、印加電圧 $V = 0$ のときの磁気エネルギー密度 $\varepsilon^{(0)}$ の等高線図は、図 6 と同じである。

[0056] 図 9 は、上記条件における印加電圧 $V = 0.78 \text{ V}$ のときの、エネルギー等高線を表すシミュレーション結果である。ここでエネルギーは、「式 2」で表した磁気エネルギー密度 ε である。 $m_y = 1$ または -1 、かつ $m_z = 0$ で最もエネルギー密度が高い。太い実線は、初期磁化方向での ε と等しいエネルギー等高線を表している。

[0057] 図10(a)及び図10(b)に表したように、このシミュレーション結果では、第1磁性層11の磁化方向が、まずZ軸方向を中心に回転した後、Z軸方向において反転していることが分かる。この場合、図10(b)に表したように、磁化反転が生じるまでの時間が、図7(b)に表したシミュレーション結果よりも遅い。すなわち、図7に表したシミュレーション結果は、反転速度の観点から、図10に表したシミュレーション結果よりも好ましい。図7に表したスイッチングは、プリセッションルスイッチング (precessional switching) と呼ばれる。

[0058] 図11は、スイッチング様式を表す相図である。

図11において、横軸は、 K_{u1} に対する電界効果 η_1 を表し、縦軸は、 K_{u2} に対する電界効果 η_2 を表す。図11において、灰色の領域は、プリセッションルスイッチングが起こる領域を表し、白い領域は、プリセッションルスイッチングが起こらない領域を表す。図11において、破線は、 $D=0$ となる (η_1, η_2) を表す。 D は、以下の「式7」及び「式8」を用いて表すことができる。「式7」及び「式8」では、 K_{u1} および K_{u2} は、「式5」で求められる閾電界 E_c における異方性定数である。また、図11において、実線は、以下の「式9」を表す。

(式7)

$$D = \left[\frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 (N_z - N_y) - K_{u1} - 2K_{u2} \right]^2 - 4K_{u2} \left[\frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 N_y + K_{u1} + K_{u2} - \varepsilon_i \right]$$

(式8)

$$\varepsilon_i = \frac{1}{2} \mu_0 M_s^2 \left\{ N_x \left[1 - (m_z^{(0)})^2 \right] + N_z (m_z^{(0)})^2 \right\} + K_{u1} \left[1 - (m_z^{(0)})^2 \right] + K_{u2} \left[1 - (m_z^{(0)})^2 \right]^2$$

(式9)

$$\eta_2 = \eta_1 \frac{K_{u2}^{(0)}}{K_{1,\text{eff}}^{(0)}}$$

[0059] これらの「式7」～「式9」及び図11から、閾電圧において、初期磁化

状態を通るエネルギー ε_i の等高線が $m_x = 0$ に到達しなければ、プリセッションナルスイッチングが起こることが分かる。この条件を満たすためには、例えば、 $D < 0$ であれば良い。上述した通り、プリセッションナルスイッチングは、別のスイッチングに比べて反転速度が速く、さらに一定のパルス幅の電圧印加に対して安定してスイッチングに成功するため、図 11 に表した灰色の領域に含まれるように、 η_1 及び η_2 を設定することが好ましい。

[0060] η_1 及び η_2 の設定だけでなく、 θ_0 の設定によっても書き込みの安定性を向上させることができる。「式 9」から、 $K_{u2}^{(0)}$ が小さいほど図 11 の実線の傾きの絶対値が小さくなり、灰色の領域が広がることがわかる。 $K_{u2}^{(0)}$ が小さくなることは、 θ_0 が 90° に近づくことに対応することは図 5 からわかる。「式 7」及び「式 8」を用いた計算からも、 θ_0 が 90° に近い状態ほど図 11 の破線の傾きの絶対値が小さくなり、灰色の領域が広がる結果が得られる。また、電界 E に対して K_{u1} 及び K_{u2} が線形に変化しない場合であっても、 θ_0 が 90° に近いほどより広い (K_{u1} , K_{u2}) の範囲でプリセッションナルスイッチングが起こる。したがって、 θ_0 が 90° に近いほど、プリセッションナルスイッチングが起こりやすく、安定した書き込みが可能になる。

[0061] 以上では、第 1 磁性層 11 の具体例について説明したが、第 3 磁性層 13 が同様の特性を有していても良い。

[0062] (動作例)

実施形態に係る磁気記憶装置の動作例について説明する。

図 12 (a) ~ 図 12 (c) は、実施形態に係る磁気記憶装置の動作を例示する模式図である。

これらの図の横軸は、時間を表す。これらの図の縦軸は、第 1 配線 71 と第 2 配線 72 との間に加わる信号 S_1 の電位を表す。信号 S_1 は、第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間または第 3 磁性層 13 と第 4 磁性層 14 との間に加わる信号に実質的に対応する。

[0063] 図 12 (a) に表したように、制御部 70 は、第 1 配線 71 と第 2 配線 72 との間に、第 1 パルス P_1 (例えば書き換えパルス) を印加する第 1 動作

OP1を実施する。第1動作OP1において、第1磁性層11と第2磁性層12との間に、第1パルスP1が供給される。例えば、第1パルスP1により、記憶された情報が書き換えられる。これにより、第1磁性層11と第2磁性層12との間の電気抵抗が変化する。

[0064] 例えば、第1動作OP1の後における第1磁性層11と第2磁性層12との間の第2電気抵抗は、第1動作OP1の前における第1磁性層11と第2磁性層12との間の第1電気抵抗とは、異なる。

[0065] この電気抵抗の変化は、例えば、第1パルスP1（書き換えパルス）による第1磁性層11の磁化方向の変化に基づく。第1磁性層11と第2磁性層12との間において、磁化方向の相対関係が、第1パルスP1（書き換えパルス）により変化する。電気抵抗が異なる複数の状態は、それぞれ、記憶される情報に対応する。

[0066] 図12（a）に示すように、制御部70は、第2動作OP2をさらに実施しても良い。第2動作OP2において、制御部70は、第1動作OP1の前に第1磁性層11と第2磁性層12との間（第1配線71と第2配線72との間）に、第2パルスP2（読み出しパルス）を印加する。読み出しパルスにより得られた第1磁性層11と第2磁性層12との間の第3電気抵抗は、第1動作の後の第1磁性層11と第2磁性層12との間の第2電気抵抗は、とは異なる。第3電気抵抗は、書き換え前の電気抵抗である。第2電気抵抗は、書き換え後の電気抵抗である。第3電気抵抗は、例えば、第1電気抵抗と同じである。

[0067] 例えば、第2パルスP2（読み出しパルス）の極性は、第1パルスP1（書き換えパルス）の極性に対して逆である。このような逆極性の第2パルスP2（読み出しパルス）を用いる場合、第2パルスP2の第2パルス高さH2の絶対値は、第1パルスP1（書き換えパルス）の第1パルス高さH1の絶対値よりも小さくても良く、同じでも良く、大きくても良い。磁性層の磁気異方性が電圧により制御される場合は、逆極性の読み出しパルスを用いることで、読み出し時に磁性層の磁化方向が変化することを抑制できる。

[0068] 磁気記憶装置 210 が上記特性を有する場合には、以下ようになる。

制御部 70 は、第 1 動作 OP1 において、第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間に、第 1 パルス P1 を印加する。第 1 動作 OP1 の後における第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間の第 2 電気抵抗は、第 1 動作 OP1 の前における第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間の第 1 電気抵抗とは、異なる。第 1 パルス P1 は、第 1 極性と、第 1 パルス幅 T1 と、第 1 パルス高さ H1 と、を有する。

[0069] このとき、第 1 極性とは逆の第 2 極性と、第 1 パルス幅 T1 と、第 1 パルス高さ H1 と同じ絶対値のパルス高さと、を有する別のパルスを印加した場合に、以下となる。

この別のパルスを第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間に印加した後の第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間の第 3 電気抵抗と、この別のパルスを第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間に印加する前の第 4 電気抵抗と、の差の絶対値は、第 2 電気抵抗と第 1 電気抵抗との差の絶対値よりも小さい。すなわち、第 1 パルス P1 の印加により情報の書き換えが実行され、別のパルスの印加によっては情報の書き換えが生じない。

[0070] 第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間の電気抵抗は、第 1 磁性層 11 と電氣的に接続されている第 1 配線 71 と、第 2 磁性層 12 と電氣的に接続されている第 2 配線 72 と、の間の電気抵抗に対応する。

[0071] 記憶されている情報を書き換えないときには、図 12 (b) に示すように、制御部 70 は、第 2 動作 OP2 の後に第 3 動作 OP3 を実施する。第 3 動作 OP3 においては、上記の第 1 パルス P1 が印加されない。このときには、書き換えが生じない。

[0072] 適切な第 1 パルス P1 が印加されたときに、情報の書き換えが可能になる。適切な第 1 パルス P1 が印加されると、第 1 磁性層 11 と第 2 磁性層 12 との間の電気抵抗は、高抵抗状態から低抵抗状態に、又は、低抵抗状態から高抵抗状態に、変化する。一方、適切ではないパルスが印加された場合は、高抵抗状態は、所望の低抵抗状態にならない。適切ではないパルスが印加さ

れた場合は、低抵抗状態は、所望の高抵抗状態にならない。

[0073] 適切ではないパルスのパルス幅は、例えば、適切な第1パルス幅 T_1 の約2倍である。適切ではないパルスが第1磁性層11と第2磁性層12との間に印加された場合には、抵抗の変化が生じる確率が低い。

[0074] 例えば、制御部70は、第1動作OP1において、第1磁性層11と第2磁性層12との間に上記の第1パルスP1を印加する。第1パルスP1は、第1パルス幅 T_1 と、第1パルス高さ H_1 と、を有する。この第1パルスP1により、書き換えが適切に行われる。すなわち、第1動作OP1の後における第1磁性層11と第2磁性層12との間の第2電気抵抗は、第1動作OP1の前における第1磁性層11と第2磁性層12との間の第1電気抵抗とは、異なる。このとき、図12(c)に示すような別のパルス P_{1x} が印加される場合には、電気抵抗の変化が実質的に生じない。別のパルス P_{1x} は、第1パルス幅 T_1 の2倍のパルス幅と、第1パルス高さ H_1 と、を有する。

[0075] このような別のパルス P_{1x} を第1磁性層11と第2磁性層12との間に印加した後の第1磁性層11と第2磁性層12との間の第3電気抵抗と、別のパルス P_{1x} を第1磁性層11と第2磁性層12との間に印加する前の第4電気抵抗と、の差の絶対値は、第2電気抵抗と第1電気抵抗との差の絶対値よりも小さい。すなわち、別のパルス P_{1x} を印加したときには、電気抵抗は実質的に変化しない。または、別のパルス P_{1x} を印加したときの電気抵抗の変化は、第1パルスP1を印加したときの電気抵抗の変化よりも小さい。

[0076] 複数回の動作における平均値を用いることで、上記の電気抵抗の変化を、より確実に比較できる。例えば、上記の第1パルスP1を印加し、その前後の電気抵抗の変化を検出するプロセスを複数回実施する。このときの電気抵抗の変化の絶対値の平均値を求める。一方、上記の別のパルス P_{1x} を印加し、その前後の電気抵抗の変化を検出するプロセスを複数回実施する。このときの電気抵抗の変化の絶対値の平均値を求める。上記の2つの平均値を比

較することで、別のパルス $P1x$ を印加したときの電気抵抗の変化が第1パルス $P1$ を印加したときの電気抵抗の変化よりも小さいことが、より確実に分かる。

[0077] 実施形態に係る磁気記憶装置 210 においては、例えば、上記の別のパルス $P1x$ を印加したときの電気抵抗の変化が、上記の第1パルス $P1$ を印加したときの電気抵抗の変化よりも小さい。

[0078] 以上で説明した各実施形態によれば、動作安定性が向上した磁気記憶装置を提供することができる。

[0079] 実施形態は、以下の構成（案）を含んでも良い。

（構成1）

第1磁性層と、

第1非磁性層と、

を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層の面積抵抗が $10\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 以上であることを特徴とする、磁気素子。

（構成2）

第1磁性層と、

第1非磁性層と、

を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層を介して前記第1磁性層に単極性の電圧を印加すること

により双方向の情報書き込みを行うことを特徴とする、磁気素子。

(構成3)

第1磁性層と、

第1非磁性層と、

を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層の面積抵抗が $10\ \Omega\ \mu\text{m}^2$ 以上であり、

前記第1非磁性層を介して前記第1磁性層に単極性の電圧を印加することにより双方向の情報書き込みを行うことを特徴とする、磁気素子。

(構成4)

前記第1方向に対して交差する面内の前記第1磁性層の異方性磁界 H_k が、 $H_k \neq 0$ を満たすことを特徴とする、構成1～3のいずれか1つに記載の磁気素子。

(構成5)

前記第1非磁性層がトンネル絶縁層であることを特徴とする、構成1～4のいずれか1つに記載の磁気素子。

(構成6)

前記第1非磁性層が、Mg、Si、Al、Ti、Zr、Hf、Ta、Zn、Sr、及びBaからなる群から選択された少なくとも1つを含む酸化物または窒化物またはフッ化物を含むことを特徴とする、構成1～5のいずれか1つに記載の磁気素子。

(構成7)

前記第1非磁性層を介して前記第1磁性層と反対側に設けられた第2磁性層をさらに備えたことを特徴とする、構成1～6のいずれか1つに記載の磁気素子。

(構成 8)

前記第 1 磁性層がコーン磁化状態を持つことを特徴とする、構成 1 ～ 7 のいずれか 1 つに記載の磁気素子。

[0080] 本願明細書において、「垂直」及び「平行」は、厳密な垂直及び厳密な平行だけではなく、例えば製造工程におけるばらつきなどを含むものであり、実質的に垂直及び実質的に平行であれば良い。

[0081] 以上、具体例を参照しつつ、本発明の実施の形態について説明した。しかし、本発明は、これらの具体例に限定されるものではない。例えば、磁気記憶装置に含まれる第 1 磁性層、第 1 非磁性層、第 2 磁性層、第 3 磁性層、第 2 非磁性層、第 4 磁性層、第 1 導電層、第 2 導電層、第 3 導電層、第 4 導電層、絶縁部、制御部、第 1 配線、第 2 配線、第 1 スイッチ、第 2 スイッチなどの各要素の具体的な構成に関しては、当業者が公知の範囲から適宜選択することにより本発明を同様に実施し、同様の効果を得ることができる限り、本発明の範囲に包含される。

[0082] また、各具体例のいずれか 2 つ以上の要素を技術的に可能な範囲で組み合わせたものも、本発明の要旨を包含する限り本発明の範囲に含まれる。

[0083] その他、本発明の実施の形態として上述した磁気記憶装置を基にして、当業者が適宜設計変更して実施し得る全ての磁気記憶装置も、本発明の要旨を包含する限り、本発明の範囲に属する。

[0084] その他、本発明の思想の範疇において、当業者であれば、各種の変更例及び修正例に想到し得るものであり、それら変更例及び修正例についても本発明の範囲に属するものと了解される。

符号の説明

[0085] 1 1 第 1 磁性層、 1 2 第 2 磁性層、 1 3 第 3 磁性層、 1 4 第 4 磁性層、 2 1 第 1 非磁性層、 2 2 第 2 非磁性層、 3 1 第 1 導電層、 3 2 第 2 導電層、 3 3 第 3 導電層、 3 4 第 4 導電層、 4 0 絶縁部、 7 0 制御部、 7 1 第 1 配線、 7 2 第 2 配線、 7 2 a 第 1 スイッチ、 7 2 b 第 2 スイッチ、 1 1 0 第 1 磁気素子、 1 2 0 第 2 磁

気素子、 2 1 0 磁気記憶装置、 m 磁化方向

請求の範囲

[請求項1]

第1磁性層と、
第1非磁性層と、
を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層の面積抵抗が $10\Omega\mu\text{m}^2$ 以上であることを特徴とする、磁気素子。

[請求項2]

第1磁性層と、
第1非磁性層と、
を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層を介して前記第1磁性層に単極性の電圧を印加することにより双方向の情報書き込みを行うことを特徴とする、磁気素子。

[請求項3]

第1磁性層と、
第1非磁性層と、
を備え、

前記第1磁性層に電圧および磁界が実質的に印加されていない状態で、前記第1非磁性層から前記第1磁性層に向かう第1方向と、前記第1磁性層の磁化方向と、の間の角度 θ_0 は、 $0^\circ < \theta_0 < 90^\circ$ または $90^\circ < \theta_0 < 180^\circ$ を満たし、

前記第1非磁性層の面積抵抗が $10\Omega\mu\text{m}^2$ 以上であり、

前記第 1 非磁性層を介して前記第 1 磁性層に単極性の電圧を印加することにより双方向の情報書き込みを行うことを特徴とする、磁気素子。

[請求項4] 前記第 1 方向に対して交差する面内の前記第 1 磁性層の異方性磁界 H_k が、 $H_k \neq 0$ を満たすことを特徴とする、請求項 1 記載の磁気素子。

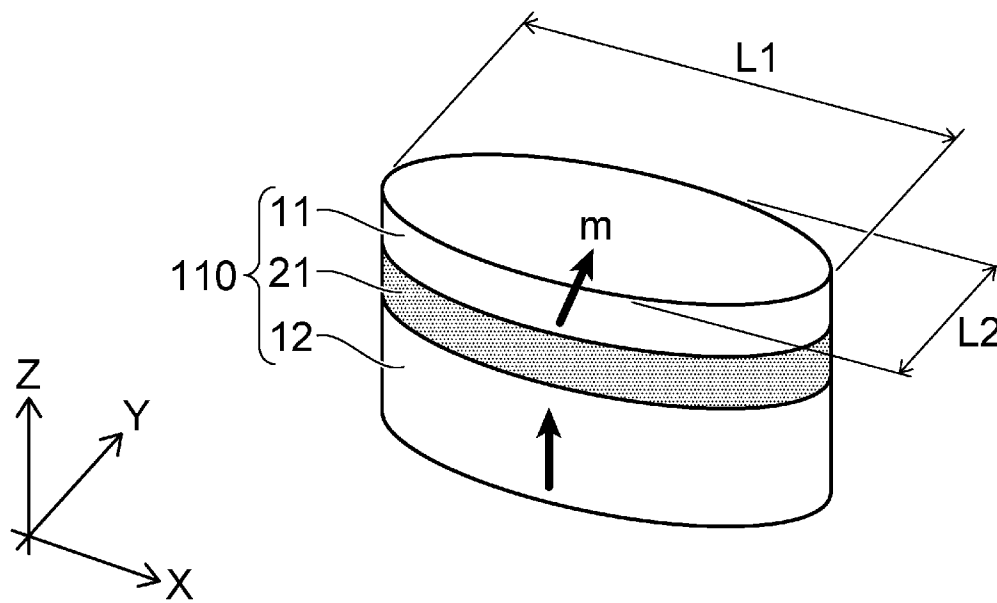
[請求項5] 前記第 1 非磁性層がトンネル絶縁層であることを特徴とする、請求項 1 記載の磁気素子。

[請求項6] 前記第 1 非磁性層が、Mg、Si、Al、Ti、Zr、Hf、Ta、Zn、Sr、及びBaからなる群から選択された少なくとも1つを含む酸化物または窒化物またはフッ化物を含むことを特徴とする、請求項 1 記載の磁気素子。

[請求項7] 前記第 1 非磁性層を介して前記第 1 磁性層と反対側に設けられた第 2 磁性層をさらに備えたことを特徴とする、請求項 1 記載の磁気素子。

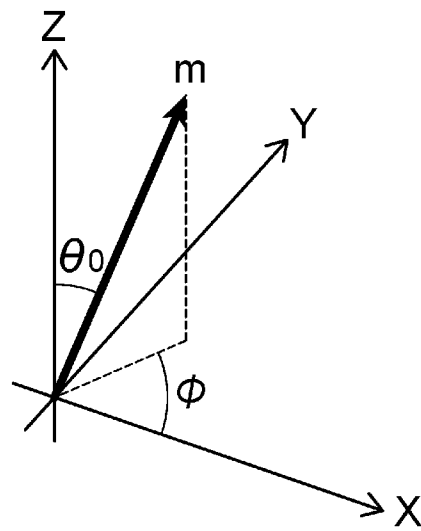
[請求項8] 前記第 1 磁性層がコーン磁化状態を持つことを特徴とする、請求項 1 記載の磁気素子。

[図1]

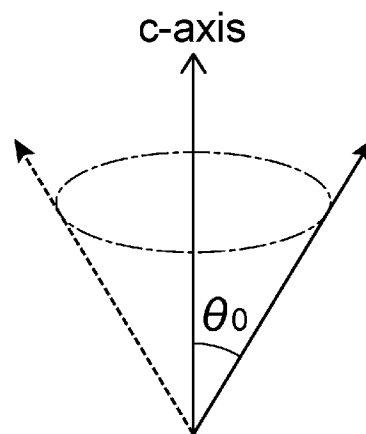


[図2]

(a)

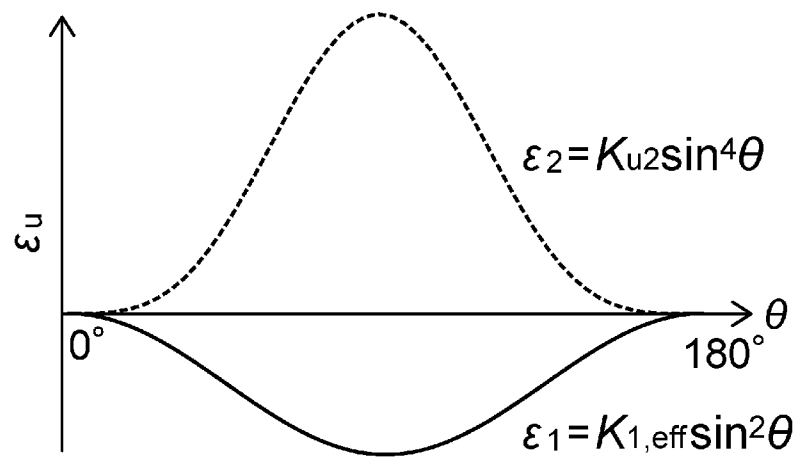


(b)

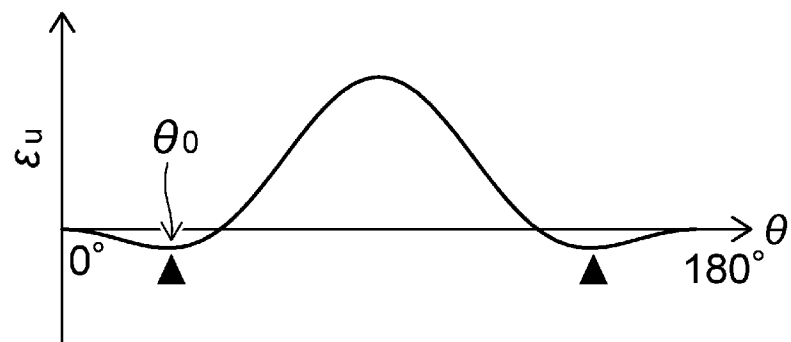


[図4]

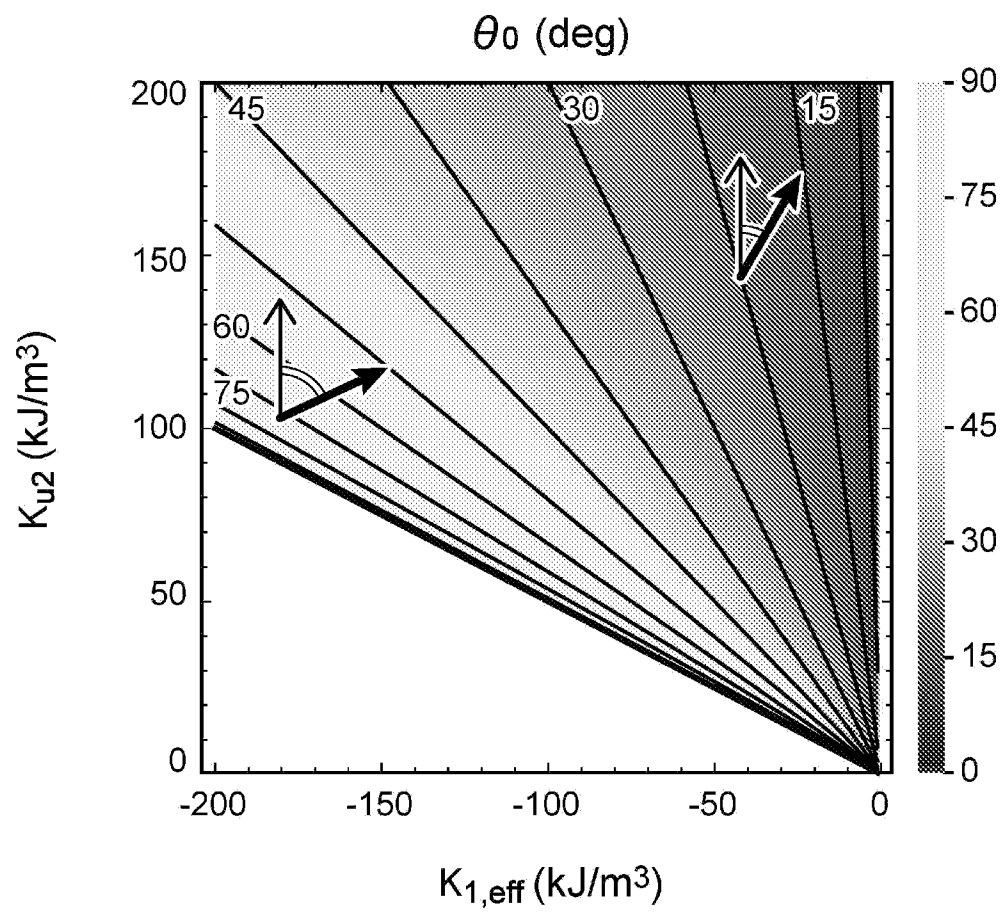
(a)



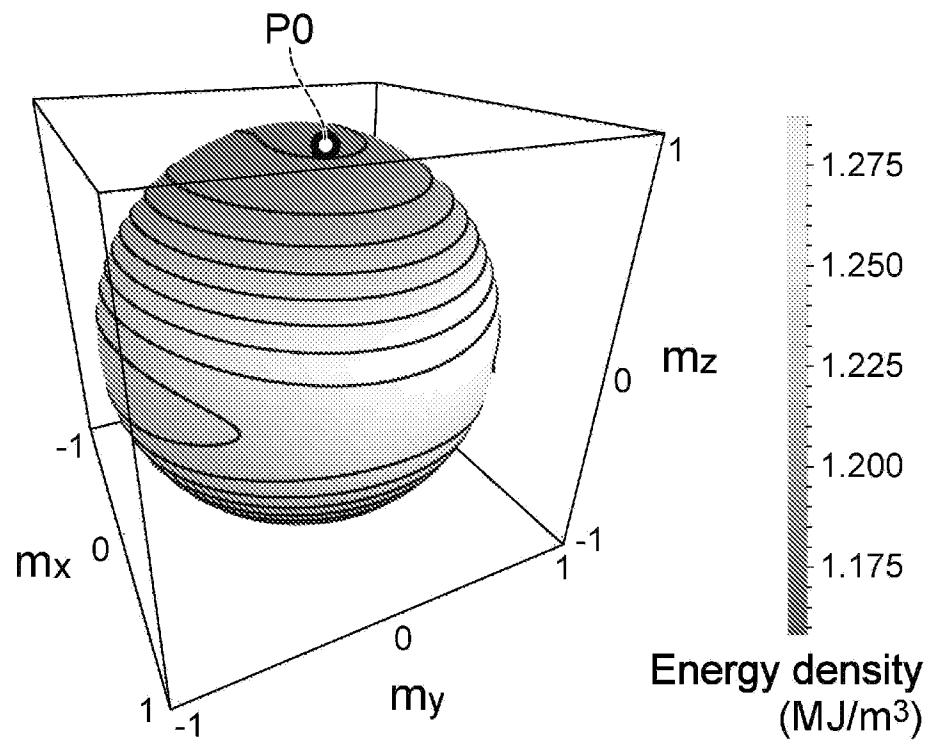
(b)



[図5]

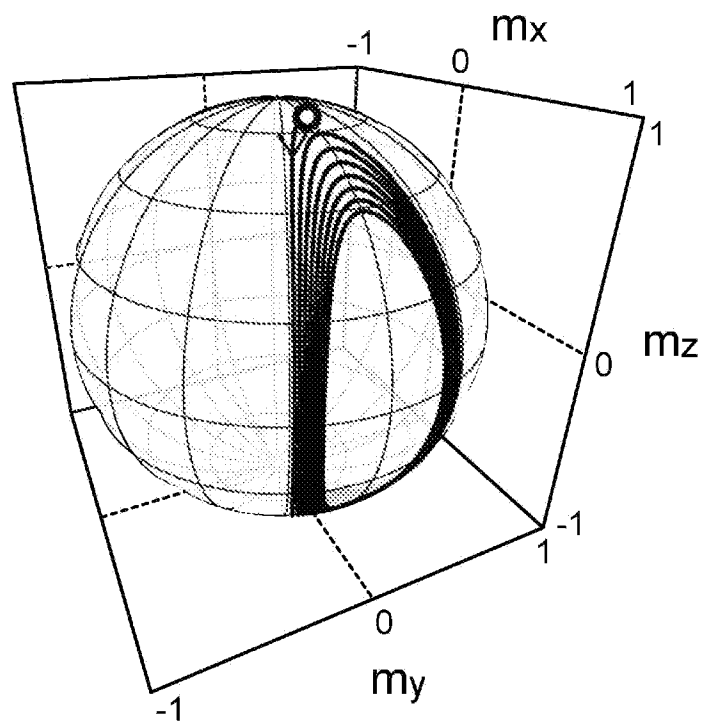


[図6]

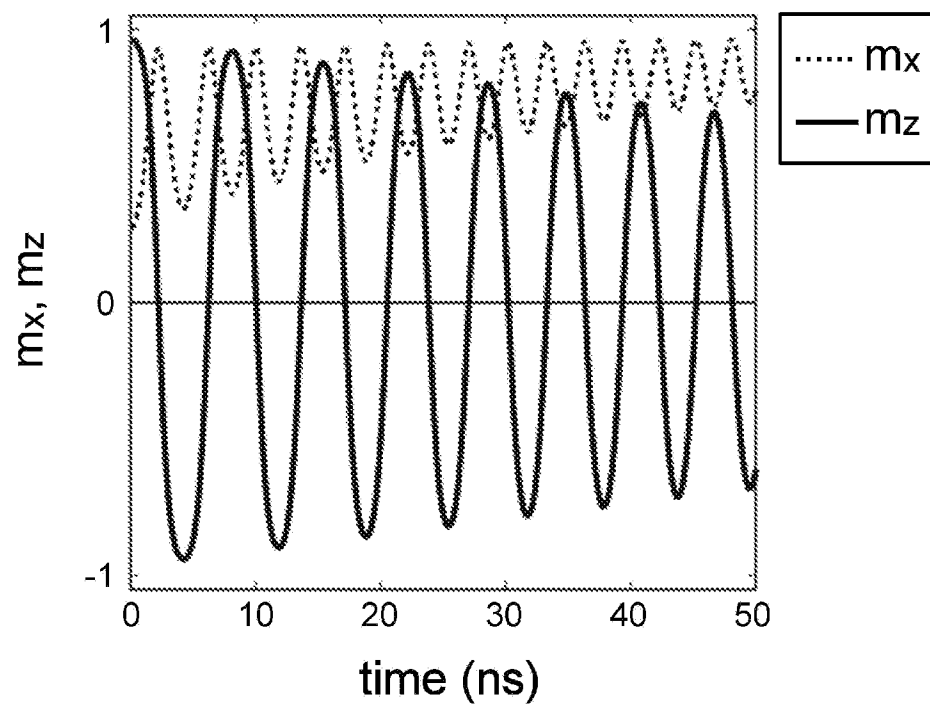


[図7]

(a)

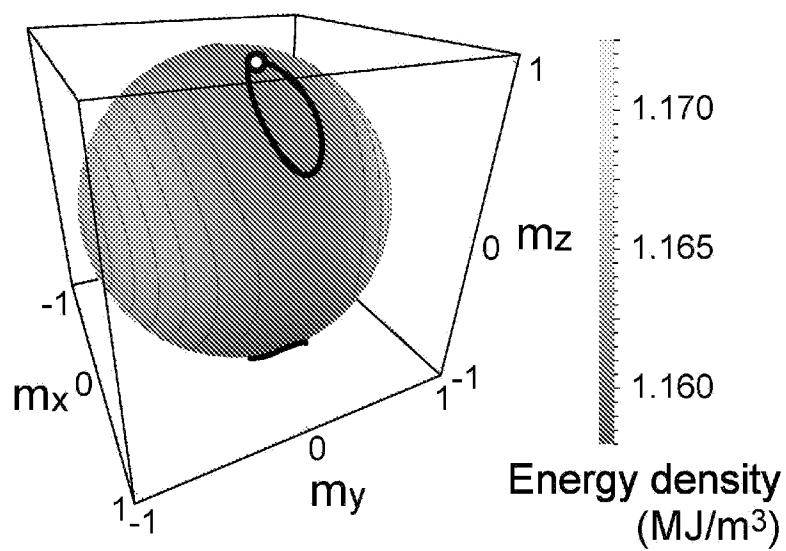


(b)

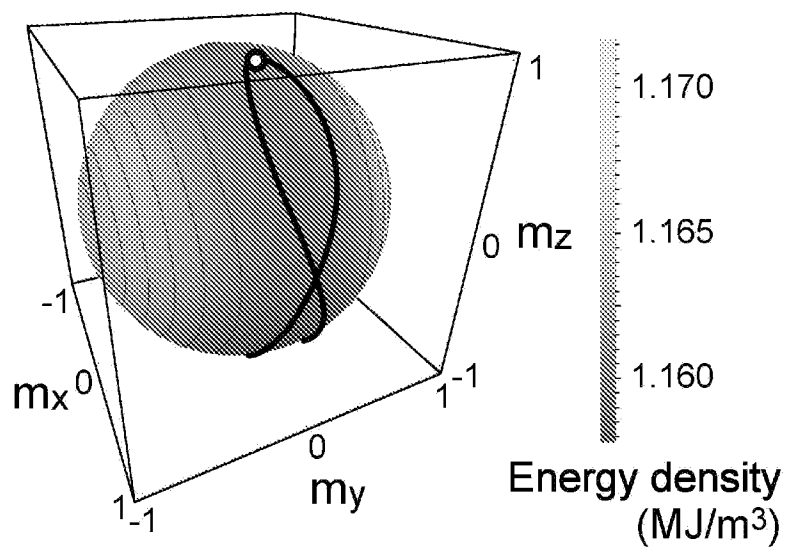


[図8]

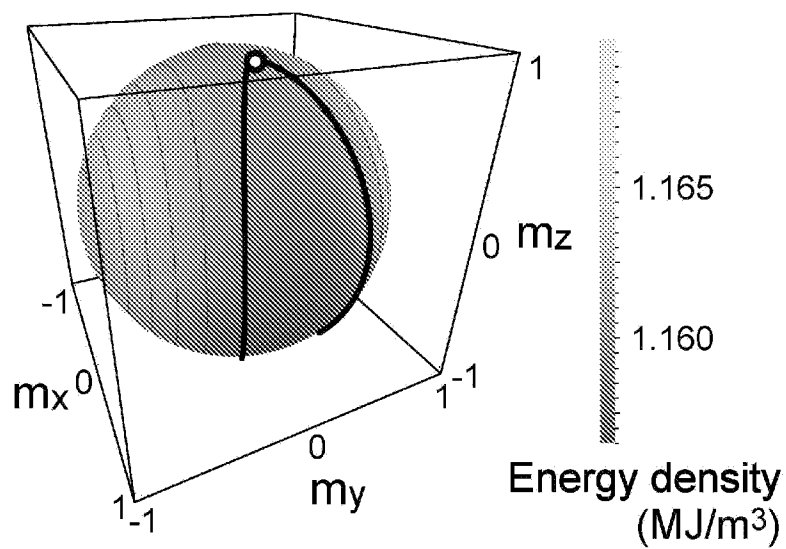
(a)



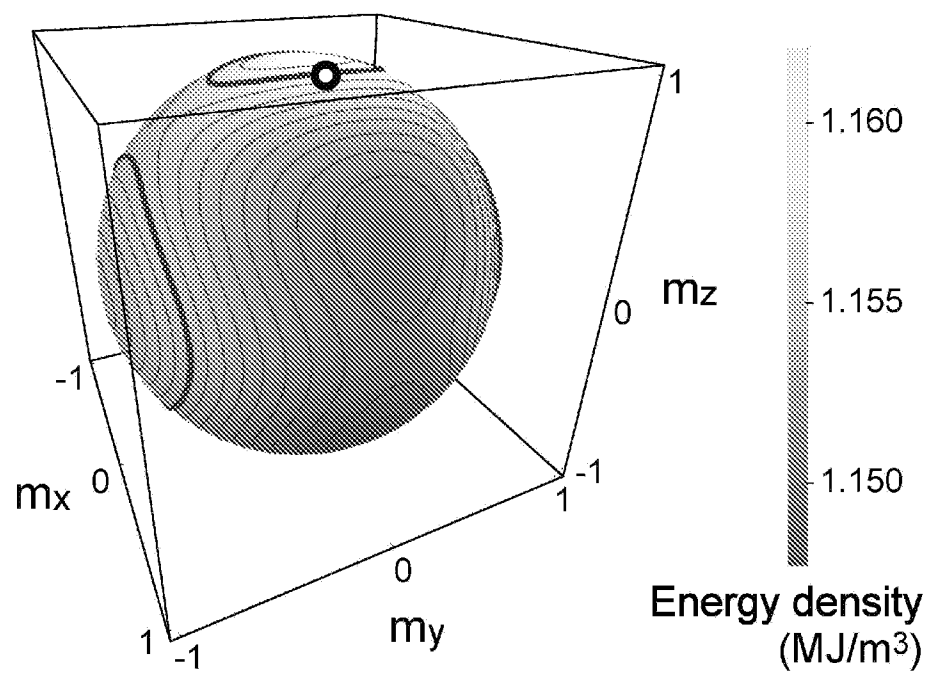
(b)



(c)

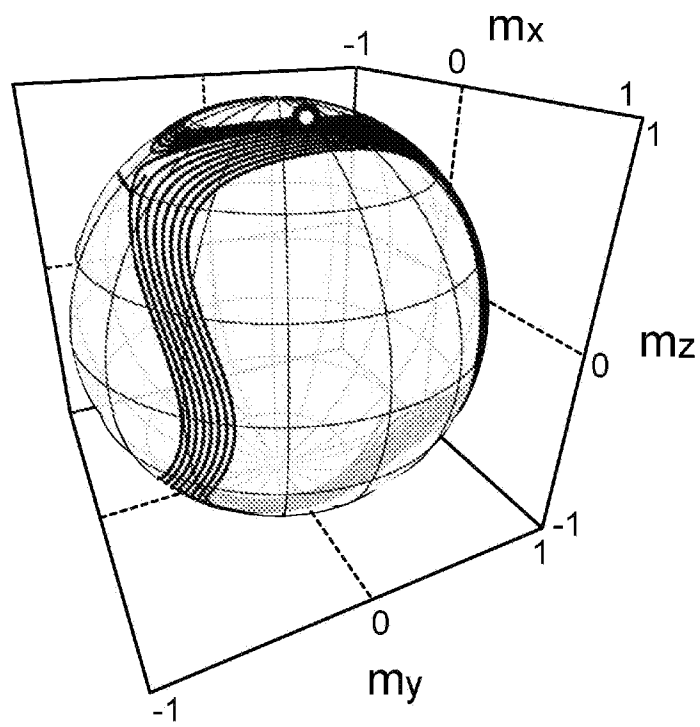


[図9]

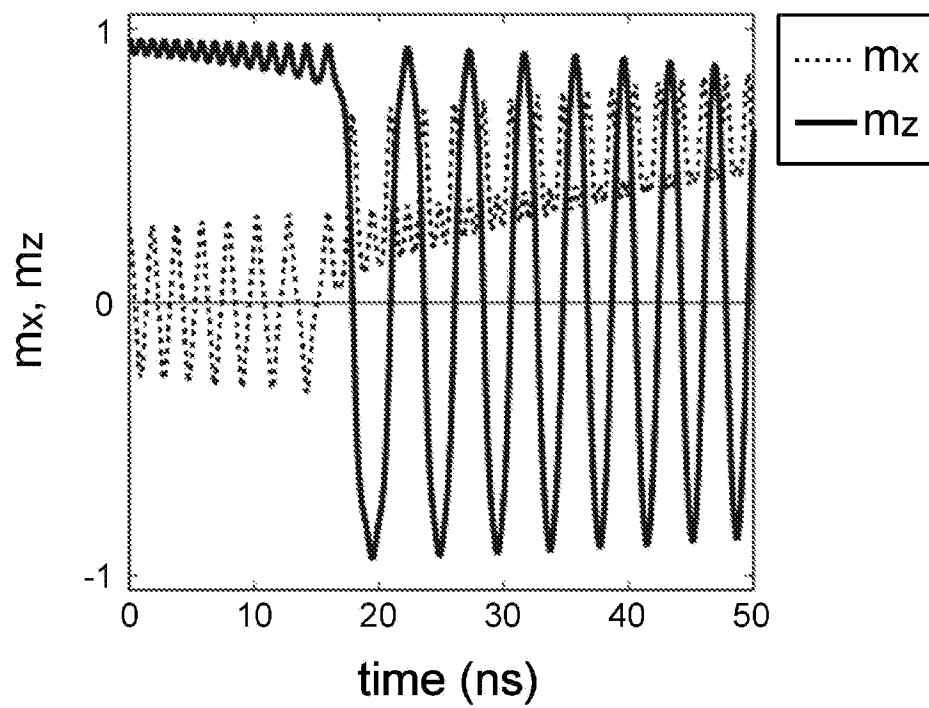


[図10]

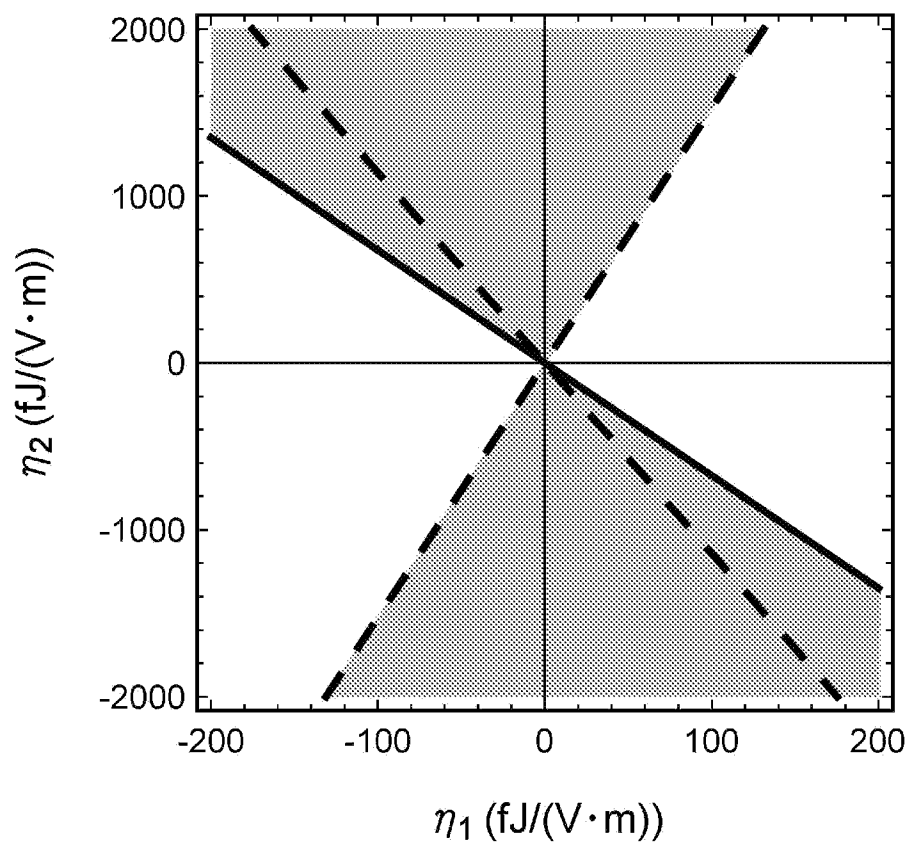
(a)



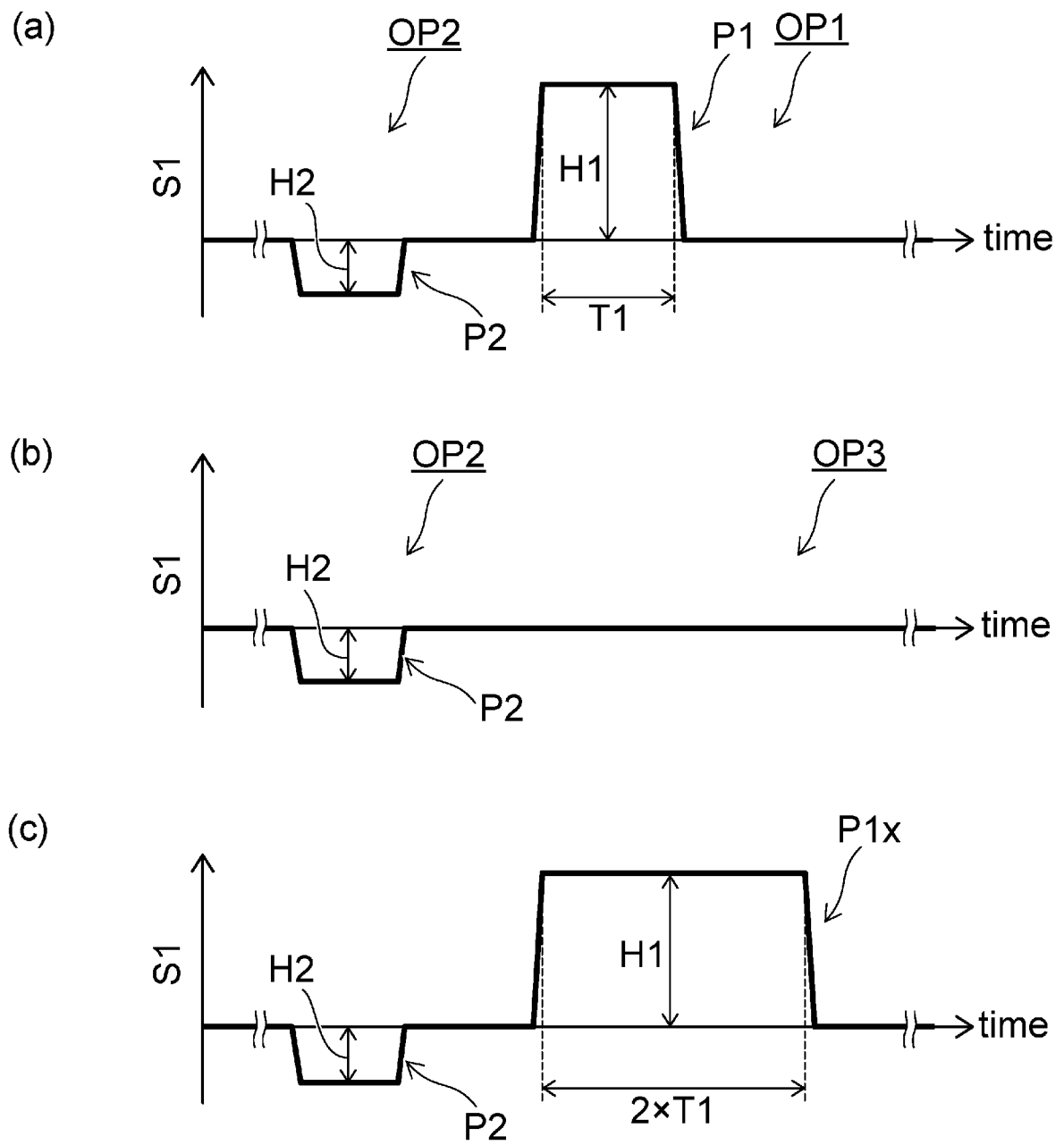
(b)



[図11]



[図12]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2018/014605

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H01L29/82(2006.01)i, H01F10/16(2006.01)i, H01L21/8239(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L43/08(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)

Int.Cl. H01L29/82, H01F10/16, H01L21/8239, H01L27/105, H01L43/08

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	1971-2018
Registered utility model specifications of Japan	1996-2018
Published registered utility model applications of Japan	1994-2018

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.
Y	WO 2016/186178 A1 (NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE AND TECHNOLOGY) 24 November 2016, paragraphs [0015], [0019], [0021], [0034], fig. 1-8 (Family: none)	1-8
Y	JP 2013-45840 A (NATIONAL INSTITUTE OF ADVANCED INDUSTRIAL SCIENCE & TECHNOLOGY) 04 March 2013, paragraphs [0041], [0045], fig. 1-26 & US 2015/0085569 A1, paragraphs [0102], [0112], fig. 1-26 & WO 2013/027479 A1	1, 3-8



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
15.06.2018

Date of mailing of the international search report
26.06.2018

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/JP2018/014605

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	JP 2014-502423 A (NEW YORK UNIVERSITY) 30 January 2014, paragraphs [0018], [0028], fig. 1-13 & US 2012/0294078 A1, paragraphs [0030], [0040], fig. 1-13 & WO 2012/068309 A2	2, 3
Y	US 2017/0084322 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA) 23 March 2017, paragraphs [0028], [0032], fig. 1-10 (Family: none)	2, 3
A	JP 2016-225633 A (HGST NETHERLANDS B V) 28 December 2016, paragraphs [0022]-[0035], fig. 1-7 & US 2016/0358973 A1, paragraphs [0030]-[0043], fig. 1-7	1-8
A	WO 2009/078202 A1 (FUJI ELECTRIC CO., LTD.) 25 June 2009, paragraphs [0042], [0058], fig. 1-9 & US 2010/0284217 A1, paragraphs [0043], [0066], fig. 1-9 & EP 2224477 A1	1-8

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01L29/82(2006.01)i, H01F10/16(2006.01)i, H01L21/8239(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L43/08(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. H01L29/82, H01F10/16, H01L21/8239, H01L27/105, H01L43/08

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	1971-2018年
日本国実用新案登録公報	1996-2018年
日本国登録実用新案公報	1994-2018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
Y	WO 2016/186178 A1（国立研究開発法人産業技術総合研究所） 2016.11.24, 段落 0015, 0019, 0021, 0034, 図 1-8 （ファミリーなし）	1-8
Y	JP 2013-45840 A（独立行政法人産業技術総合研究所） 2013.03.04, 段落 0041, 0045, 図 1-26 & US 2015/0085569 A1, 段落 0102, 0112, 図 1-26 & WO 2013/027479 A1	1, 3-8

☑ 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

15.06.2018

国際調査報告の発送日

26.06.2018

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
Y	JP 2014-502423 A (ニュー・ヨーク・ユニヴァーシティ) 2014.01.30, 段落 0018, 0028, 図 1-13 & US 2012/0294078 A1, 段落 0030, 0040, 図 1-13 & WO 2012/068309 A2	2, 3
Y	US 2017/0084322 A1 (THE REGENTS OF THE UNIVERSITY OF CALIFORNIA) 2017.03.23, 段落 0028, 0032, 図 1-10 (ファミリーなし)	2, 3
A	JP 2016-225633 A (エイチジーエスティーネザーランドビービー) 2016.12.28, 段落 0022-0035, 図 1-7 & US 2016/0358973 A1, 段落 0030-0043, 図 1-7	1-8
A	WO 2009/078202 A1 (富士電機ホールディングス株式会社) 2009.06.25, 段落 0042, 0058, 図 1-9 & US 2010/0284217 A1, 段落 0043, 0066, 図 1-9 & EP 2224477 A1	1-8