

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6607737号
(P6607737)

(45) 発行日 令和1年11月20日(2019.11.20)

(24) 登録日 令和1年11月1日(2019.11.1)

(51) Int.Cl.	F I
H O 1 L 29/82 (2006.01)	H O 1 L 29/82 Z
H O 1 L 21/8239 (2006.01)	H O 1 L 27/105 4 4 7
H O 1 L 27/105 (2006.01)	H O 1 F 41/30
H O 1 F 41/30 (2006.01)	

請求項の数 6 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2015-163431 (P2015-163431)	(73) 特許権者	503359821
(22) 出願日	平成27年8月21日 (2015. 8. 21)		国立研究開発法人理化学研究所
(65) 公開番号	特開2017-41580 (P2017-41580A)		埼玉県和光市広沢 2 番 1 号
(43) 公開日	平成29年2月23日 (2017. 2. 23)	(74) 代理人	110000877
審査請求日	平成30年8月14日 (2018. 8. 14)		龍華国際特許業務法人
特許法第30条第2項適用	平成27年6月1日「 http://arxiv.org/abs/1506.00363 」で公開	(72) 発明者	大池 広志
特許法第30条第2項適用	平成27年6月1日「RIKEN-AIST joint workshop」(https://www.cems.riken.jp/2015riken-aist_ws/index.html)で公開		埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法人理化学研究所内
		(72) 発明者	賀川 史敬
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法人理化学研究所内
		(72) 発明者	十倉 好紀
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開発法人理化学研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気素子、スキルミオンメモリ及び演算処理装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

安定状態において、螺旋型の磁気構造を有する磁性体と、
 前記螺旋型の磁気構造を有する前記磁性体にエネルギーを供給することにより、前記磁性体にスキルミオンを発生させるスキルミオン制御部と
 を備え、
 前記スキルミオン制御部は、前記磁性体に熱エネルギーのパルスを供給することにより前記磁性体を非安定状態にし、
 前記スキルミオン制御部は、前記磁性体の磁気相図において、平衡スキルミオン相よりも高温側に前記磁性体を加熱し、
前記スキルミオン制御部は、前記磁性体へのエネルギー供給後、前記磁性体を 20 K / s 以上の冷却速度で前記磁性体を急冷することにより、前記スキルミオンを発生させる磁気素子。

【請求項 2】

前記スキルミオン制御部は、前記磁性体の磁気相図において、前記平衡スキルミオン相よりも低温側に前記磁性体を冷却する

請求項 1 に記載の磁気素子。

【請求項 3】

前記スキルミオン制御部は、前記磁性体の加熱を終了することにより、前記磁性体を冷却する

請求項 1 又は 2 に記載の磁気素子。

【請求項 4】

安定状態において、螺旋型の磁気構造を有する磁性体と、

前記螺旋型の磁気構造を有する前記磁性体にエネルギーを供給することにより、前記磁性体にスキルミオンを発生させるスキルミオン制御部と

を備え、

前記スキルミオン制御部は、前記磁性体に熱エネルギーのパルスを提供することにより前記磁性体を非安定状態にし、

前記スキルミオン制御部は、前記磁性体にエネルギーを供給することにより、前記磁性体に発生した前記スキルミオンを消去し、

前記スキルミオン制御部は、スキルミオン生成時のパルス強度よりも小さなパルス強度であって、前記スキルミオン生成時のパルス幅よりも大きなパルス幅により前記スキルミオンを消去する

磁気素子。

【請求項 5】

請求項 1 から 4 のいずれか一項に記載の磁気素子を備え、前記スキルミオン制御部は、前記スキルミオンの有無を検出する

スキルミオンメモリ。

【請求項 6】

請求項 5 に記載のスキルミオンメモリを備える演算処理装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気素子、スキルミオンメモリ及び演算処理装置に関する。

【背景技術】

【0002】

熱エネルギーを印加することによりデータを記録する装置の例として、DVD+RWがある。画像記録装置に用いるDVD+RWの記憶容量は、ブルーレーザの登場により、数十GB容量と飛躍的に増加した。このDVD+RWは書き換えが可能である相変化型メモリを用いる（特許文献1）。

【0003】

相変化型メモリの場合、情報を書き込むときは局所熱によりGeTeなどの材料の一部を結晶相からアモルファス相に相変化させる。結晶相の低抵抗状態とアモルファス相の高抵抗状態との抵抗変化をビット情報として利用する（特許文献1）。

〔先行技術文献〕

〔特許文献〕

〔特許文献1〕 特開2006-221712号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、従来の相変化型メモリでは、結晶相からアモルファス相への転移時間に限界があり、転移時間以上に高速化できない。また、アモルファス相から結晶相への転移時間の短縮化には、アモルファス相の部分を従来よりもさらに細くする等の技術開発課題がある。

【課題を解決するための手段】

【0005】

本発明の第1の態様においては、安定状態において、螺旋型の磁気構造を有する磁性体と、螺旋型の磁気構造を有する磁性体にエネルギーを供給することにより、磁性体にスキルミオンを発生させるスキルミオン制御部とを備える磁気素子を提供する。

【0006】

10

20

30

40

50

本発明の第２の態様においては、第１の態様に係る磁気素子を備えるスキルミオンメモリを提供する。

【０００７】

本発明の第３の態様においては、第２の態様に係るスキルミオンメモリを備える演算処理装置を提供する。

【０００８】

なお、上記の発明の概要は、本発明の特徴の全てを列挙したものではない。また、これらの特徴群のサブコンビネーションもまた、発明となりうる。

【図面の簡単な説明】

【０００９】

【図１】磁性体１０に生成されたスキルミオン４０の一例を示す模式図である

【図２】ヘリシテイが異なるスキルミオンを示す図である。

【図３】安定状態における磁性体１０の磁気相図の一例を示す。

【図４】準安定状態を含む磁性体１０の磁気相図の一例を示す。

【図５】電流加熱による準安定スキルミオン状態の設定とリセットの説明図である。

【図６】光吸収加熱方式の磁気素子１００の構成の一例を示す。

【図７】ジュール加熱方式の磁気素子１００の構成の一例を示す。

【図８】温度２３Ｋにおける、スキルミオン４０に応じた抵抗率の変化を示す。

【図９】温度２０Ｋにおける、スキルミオン４０に応じた抵抗率の変化を示す。

【図１０】温度１０Ｋにおける、スキルミオン４０に応じた抵抗率の変化を示す。

【図１１】温度５Ｋにおける、スキルミオン４０に応じた抵抗率の変化を示す。

【図１２】急冷スキルミオン相の消滅に関する緩和時間を示す。

【図１３】急冷スキルミオン相の緩和時間の温度依存性を示す。

【図１４】試料ホルダの温度５Ｋでの抵抗率分布を示す。

【図１５】試料ホルダの温度１０Ｋでの抵抗率分布を示す。

【図１６】試料ホルダの温度２３Ｋでの抵抗率分布を示す。

【図１７】スキルミオン相の設定工程及びリセット工程を示す。

【図１８】スキルミオン相の設定工程及びリセット工程のスイッチング動作を示す。

【図１９】演算処理装置３００の構成例を示す。

【発明を実施するための形態】

【００１０】

以下、発明の実施の形態を通じて本発明を説明するが、以下の実施形態は特許請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

【００１１】

図１は、磁性体１０に生成されたスキルミオン４０の一例を示す模式図である。図１において、各矢印は、スキルミオン４０における磁気モーメントの向きを示す。ｘ軸及びｙ軸は互いに直交する軸であり、ｚ軸はｘｙ平面に直交する軸である。

【００１２】

磁性体１０は、ｘｙ平面に平行な平面を有する。磁性体１０中に配置したあらゆる向きを向く磁気モーメントは、スキルミオン４０を構成する。本例では、磁性体１０に印加する磁場の向きはプラスｚ方向である。この場合に、本例のスキルミオン４０の最外周の磁気モーメントは、プラスｚ方向に向く。

【００１３】

スキルミオン４０において、磁気モーメントを最外周から内側へ向けて渦巻状に回転していくように配置する。さらに磁気モーメントの向きは、当該渦巻き状の回転に伴い渦の中心に向かって徐々にプラスｚ方向からマイナスｚ方向へ向きを変える。

【００１４】

スキルミオン４０は中心から最外周の間において、磁気モーメントの向きが連続的にねじれる。つまり、スキルミオン４０は、磁気モーメントの渦巻き構造を有するナノスケー

10

20

30

40

50

ル磁気構造体である。スキルミオン 40 が存在する磁性体 10 が薄い板状固体材料の場合、スキルミオン 40 を構成する磁気モーメントをその厚さ方向は同じ向きの磁気モーメントで構成している。すなわち板の深さ方向（z 方向）には表面から裏面まで同じ向きの磁気モーメントからなる。本例において最外周とは、図 1 に示した外部磁場と同一の方向を向く磁気モーメントの円周を指す。

【0015】

スキルミオン数 N_{sk} は、渦巻構造を有するナノスケール磁気構造体であるスキルミオン 40 を特徴づける。以下の [数 1] 及び [数 2] は、スキルミオン数 N_{sk} を表現する。[数 2] において、磁気モーメントと z 軸との間の極角 (r) は、スキルミオン 40 の中心からの距離 r の連続関数である。極角 (r) は、 r を 0 から まで変化させたとき、 からゼロまで又はゼロから まで変化する。

10

【0016】

【数 1】

$$N_{sk} = \frac{1}{4\pi} \iint d^2r \, n(r) \cdot \left[\left(\frac{\partial n(r)}{\partial x} \right) \times \left(\frac{\partial n(r)}{\partial y} \right) \right]$$

【0017】

【数 2】

$$n(r) = (\cos\Phi(\varphi)\sin\theta(r), \sin\Phi(\varphi)\sin\theta(r), \cos\theta(r))$$

$$\Phi(\varphi) = m\varphi + \gamma$$

20

ベクトル量 $n(r)$ は、位置 r におけるスキルミオン 40 の磁気モーメントの向きを表す。

【0018】

[数 2] において、 m はボルテシテイ、 γ はヘリシテイである。[数 1] 及び [数 2] から、 (r) が r を から まで変化させ、 からゼロまで変化するとき $N_{sk} = -m$ となる。

【0019】

図 2 は、ヘリシテイ が異なるスキルミオン 40 を示す模式図である。特に、スキルミオン数 $N_{sk} = -1$ の場合の一例を図 2 に示す。

30

【0020】

図 2 (E) は、磁気モーメント n の座標のとりかた（右手系）を示す。なお、右手系であるので、 n_x 軸及び n_y 軸に対して n_z 軸は、紙面の裏から手前の向きに取る。また、濃淡と磁気モーメントの向きとの関係を、図 2 (E) に示す。

【0021】

図 2 (A) から図 2 (D) において、濃淡は磁気モーメントの向きを示す。図 2 (A) から図 2 (D) における各矢印は、スキルミオン 40 の中心から所定の距離だけ離れた磁気モーメントを示す。図 2 (A) から図 2 (D) に示す磁気構造体は、スキルミオン 40 を定義する状態にある。図 2 (A) から図 2 (D) の最外周のように、濃淡が最も淡い領域は、紙面の裏面から手前方向の磁気モーメントを示している。なお、図では当該磁気モーメントを白色で表す。図 2 (A) から図 2 (D) の中心のように、濃淡が最も濃い領域は、紙面の手前から裏面方向の磁気モーメントを示している。なお、図では当該磁気モーメントを黒色で表す。

40

【0022】

図 2 (A) ($\gamma = 0$) の各磁気モーメントに対して、図 2 (B) ($\gamma = \pi$) の各磁気モーメントの向きは、図 2 (A) の各磁気モーメントを 180° 回転した向きである。図 2 (A) ($\gamma = 0$) の各磁気モーメントに対して、図 2 (C) ($\gamma = \pi/2$) の各磁気モーメントの向きは、図 2 (A) の各磁気モーメントを -90° 度（右回りに 90° 度）回転した向きである。

【0023】

50

図 2 (A) ($\theta = 0$) の各磁気モーメントに対して、図 2 (D) ($\theta = \pi/2$) の各磁気モーメントの向きは、図 2 (A) の各磁気モーメントを 90 度 (左回りに 90 度) 回転した向きである。なお、図 2 (D) に示すヘリシティ $\theta = \pi/2$ のスキルミオン 40 が、図 1 のスキルミオン 40 に相当する。

【 0 0 2 4 】

図 2 (A) ~ (D) に図示した 4 例の磁気構造は異なるように見えるが、トポロジ的には同一の磁気構造体である。図 2 (A) ~ (D) の構造を有するスキルミオン 40 は、一度生成すると安定して存在し、外部磁場を印加した磁性体 10 中で情報伝達を担うキャリアとして働く。

【 0 0 2 5 】

図 3 は、安定状態における磁性体 10 の磁気相図の一例を示す。横軸は、磁性体 10 の温度 (K) を示し、縦軸は、磁性体 10 に外部から印加する磁場 (T) を示す。本明細書において、安定状態とは、予め定められた温度と磁場が与えられた場合において、磁性体 10 の磁気構造が安定している状態を指す。安定状態における磁性体 10 の磁気構造は、磁性体 10 の温度及び印加する磁場に応じて強磁性相、コニカル相、ヘリカル相、平衡スキルミオン相に大きく分けられる。また、本明細書において、コニカル相及びヘリカル相の磁気構造をまとめて螺旋型の磁気構造と称する。安定状態において、磁性体 10 がどのような磁気構造を取るかは、主に磁性体 10 の材料によって決まる。

【 0 0 2 6 】

平衡スキルミオン相は、磁性体 10 にスキルミオン 40 が安定的に生じる相である。平衡スキルミオン相は、磁気相図において、強磁性相、コニカル相及びヘリカル相の境界付近に位置する。また、平衡スキルミオン相は、磁気相図において、コニカル相及びヘリカル相よりも高温側に位置する。平衡スキルミオン相は、他の相と比較して磁気相図における範囲が狭い。そのため、平衡スキルミオン相においてスキルミオン 40 を生成するには、磁性体 10 の温度及び印加する磁場に関し、多くの制約が伴う。また、平衡スキルミオン相において、スキルミオン 40 の生成及び消去を制御することは困難である。

【 0 0 2 7 】

図 4 は、準安定状態を含む磁性体 10 の磁気相図の一例を示す。本明細書において、準安定状態とは、真の安定状態ではないが、大きなエネルギーが供給されない限り安定的に存在できる状態を指す。

【 0 0 2 8 】

準安定状態は、磁性体 10 を安定状態から非安定状態に状態を一度変化させることにより設定する。例えば、準安定状態は、磁性体 10 に熱エネルギーを供給した後、所定の冷却速度以上で磁性体 10 を急冷することにより生じる。このように、非安定状態に設定された磁性体 10 を急冷することにより準安定状態として急冷スキルミオン相が生じる。本明細書において急冷とは、例えば、20 K / s 以上の冷却速度で磁性体 10 を冷却することを指す。なお、磁性体 10 へのエネルギーの供給は、熱エネルギーに限られず、光エネルギー、磁気エネルギー等の他のエネルギーであってよい。

【 0 0 2 9 】

急冷スキルミオン相は、磁性体 10 を急冷することにより生じる、準安定状態のスキルミオン相である。急冷スキルミオン相は、磁性体 10 の温度、磁性体 10 に印加する磁場の大きさ、冷却速度等の所定の条件を満たすことにより生じる。即ち、急冷スキルミオン相の磁気相図における範囲は、これらの条件に応じて変化する。本例の急冷スキルミオン相は、磁性体 10 の加熱、冷却時に磁性体 10 に印加する磁場を一定とし、磁性体 10 に熱エネルギーを供給した場合に生じる。一方、磁性体 10 の加熱、冷却時に磁性体 10 に印加する磁場を変更してもよいが、この場合、急冷スキルミオン相の領域が本例の急冷スキルミオン相と異なる領域になり得る。

【 0 0 3 0 】

急冷時の冷却速度は、安定状態における磁性体 10 の温度 (即ち、加熱前の磁性体 10 の温度) 、磁性体 10 の加熱温度 (即ち、加熱後の磁性体 10 の温度) 及び磁性体 10 の

10

20

30

40

50

材料の物性等に応じて決まる。本例の磁気相図は、磁性体 10 の加熱を終了することにより急冷を開始する場合の磁気相図である。この場合、磁性体 10 の加熱量が大きいほど、安定状態における磁性体 10 との温度差が大きくなるので、冷却速度が大きくなる。

【0031】

図 5 は、電流加熱による準安定スキルミオン状態の設定とリセットを説明するための図である。図 5 は、磁性体 10 の温度を制御することにより、スキルミオン相とコニカル相との間で自由に相転移を制御できることを示す。本例のポテンシャル図は、ボールが右側の安定領域にある場合にスキルミオン相となり、ボールが左側の安定領域にある場合にコニカル相となることを示す。

【0032】

領域 A は、磁性体 10 が熱力学的にスキルミオン相を安定に形成する温度範囲を示す。領域 A の範囲は、磁性体 10 の材料及び磁性体 10 に印加する磁場の大きさによって変化する。本例の領域 A は、温度 27 K 以上 29 K 以下の範囲である。即ち、領域 A は、磁気相図において、平衡スキルミオン相付近の温度である。

【0033】

領域 B は、磁性体 10 が熱力学的にコニカル相を比較的安定に形成する温度範囲を示す。領域 B の範囲は、磁性体 10 の材料及び磁性体 10 に印加する磁場の大きさによって変化する。本例の領域 B は、温度 27 K より低い範囲である。領域 B の高温側では、領域 B の低温側よりもコニカル相で安定化しやすい。つまり、領域 B の高温側に所定の期間保持することにより、スキルミオン相からコニカル相に相転移する。

【0034】

スキルミオン 40 を生成する場合、磁性体 10 の磁気相図において、領域 A よりも高温側に磁性体 10 を加熱する。その後、磁性体 10 を領域 B に急冷することにより、磁性体 10 をスキルミオン相に設定できる。即ち、磁性体 10 を急冷することにより、領域 B の高温側での保持期間が短くなるので、コニカル相に相転移することなくスキルミオン相を保持できる。よって、所定の急冷条件を満たせば高い確率でスキルミオン 40 を生成できる。磁性体 10 の磁気相図において、平衡スキルミオン相よりも高温側に磁性体 10 を加熱し、その後、平衡スキルミオン相よりも低温側に磁性体 10 を急冷することが重要である。

【0035】

一方、徐冷の場合、領域 B の高温側での保持期間が長くなるので、徐冷時にスキルミオン相からコニカル相に相転移してしまう。そのため、徐冷時にはスキルミオン相が安定化されず、スキルミオン 40 を生成することができない。

【0036】

スキルミオン 40 を消去する場合、磁性体 10 を加熱することにより、領域 B の高温側で磁性体 10 を保持する。領域 B の高温側では、特に、コニカル相が安定となるので、一定期間、領域 B の高温側で磁性体 10 を保持することにより磁性体 10 をコニカル相に設定できる。これにより、磁性体 10 は、スキルミオン相からコニカル相に相転移する。なお、領域 B の高温側で磁性体 10 を保持する期間を長くすることにより、磁性体 10 がコニカル相に相転移する確率が高くなる。

【0037】

なお、本明細書において、特に実験条件を指定していない場合、スキルミオン 40 の生成及び消去には、磁性体 10 に印加する磁場を一定とし、磁性体 10 の温度のみを変化させている。また、磁性体 10 の急冷は、磁性体 10 への熱エネルギーの供給を停止することにより実現されている。

【0038】

図 6 は、光吸収加熱方式の磁気素子 100 の構成の一例を示す。磁気素子 100 は、磁性体 10、磁場発生部 20 及びスキルミオン制御部 30 を備える。本例のスキルミオン制御部 30 は、レーザ光源 31 を有する。

【0039】

磁性体 10 は、安定状態において、螺旋型の磁気構造を有する。磁性体 10 は、エネルギーの供給によりスキルミオン 40 を生成及び消去する。磁性体 10 は、薄層状に形成される。例えば、磁性体 10 は、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 又はスパッター等の技術を用いて、500nm 以下の厚さに形成される。本例の磁性体 10 は、FeGe や MnSi 等で形成している。磁性体 10 は、第 1 面 12 及び第 2 面 14 を有する。第 1 面 12 及び第 2 面 14 は、x-y 面と平行な平面である。

【0040】

磁場発生部 20 は、予め定められた大きさの磁場を発生する。例えば、磁場発生部 20 は、薄膜状に形成された強磁性体である。磁場発生部 20 は、磁性体 10 の第 1 面 12 に対向して設けられる。即ち、磁場発生部 20 は、磁性体 10 よりもマイナス z 方向に配置する。本例の磁場発生部 20 は、磁性体 10 の第 1 面 12 からマイナス z 方向に離間して、第 1 面 12 に対して略平行に配置される。これにより、磁場発生部 20 は、発生させた磁場を、磁性体 10 の第 1 面 12 から第 2 面 14 の方向に、磁性体 10 と略垂直に印加する。磁場発生部 20 は、0 T 以上 0.5 T 以下程度の磁場を発生するものであればよい。即ち、磁場発生部 20 の材料として、一般的な磁石材料を用いることができる。なお、磁場発生部 20 が強磁性体の絶縁体である場合、磁性体 10 と磁場発生部 20 とを接触させてもよい。

【0041】

スキルミオン制御部 30 は、磁性体 10 にエネルギーを供給することにより、磁性体 10 にスキルミオン 40 を発生させる。例えば、スキルミオン制御部 30 は、エネルギーとして熱エネルギーを磁性体 10 に供給する。熱エネルギーの供給は、光吸収及びジュール加熱等の方法により行われる。

【0042】

レーザ光源 31 は、磁性体 10 の第 2 面 14 に対してレーザ光 32 を照射する。レーザ光 32 の照射により、磁性体 10 の第 2 面 14 の一部が加熱される。本例のレーザ光源 31 は、第 2 面 14 に対して局所的な熱エネルギーを供給したが、より広範囲の領域にレーザ光 32 を照射してもよい。つまり、スキルミオン 40 の直径等に応じて最適な照射径を選択すればよい。例えば、局所的な熱エネルギーを生成するための熱エネルギーを出力する装置として、集束コイルで集束した電子線を出力する集束電子線発生装置を用いてもよい。

【0043】

図 7 は、ジュール加熱方式の磁気素子 100 の構成の一例を示す。磁気素子 100 は、磁性体 10、磁場発生部 20、スキルミオン制御部 30 及び絶縁体 50 を備える。本例のスキルミオン制御部 30 は、スキルミオン 40 の書き込み、消去及び読み出しを行うことができる。即ち、本例の磁気素子 100 は、スキルミオンメモリ 200 として動作する。なお、絶縁体 50 は、磁場発生部 20 が絶縁体で形成される場合は不要である。

【0044】

スキルミオン制御部 30 は、第 1 電極 33、第 2 電極 34、電源 37 及び電流計 38 を備える。スキルミオン制御部 30 は、レーザ光源 31 を用いる代わりに、磁性体 10 に電流を流し、スキルミオン 40 の生成及び消去を実現する。また、スキルミオン制御部 30 は、スキルミオン 40 の存在の有無に応じた磁性体 10 の抵抗値の変化を検出することにより、スキルミオン 40 を検出する。なお、スキルミオン 40 の検出は、ディスク上部にトンネル磁気抵抗 (TMR: Tunneling Magnetoresistance) 素子などのセンサーを配置することによっても実現できる。

【0045】

第 1 電極 33 は、磁性金属 35 及び絶縁体 36 を有する。磁性金属 35 は、円柱状の磁性金属である。例えば、磁性金属 35 は、強磁性体金属である Co、Ni、Fe、又は、これら強磁性体金属からなる積層強磁性体金属薄膜である。磁性金属 35 の断面形状は、生成されるスキルミオン 40 の直径の大きさに応じて適宜変更される。絶縁体 36 は、磁性体 10 の第 2 面 14 と磁性金属 35 との間に設けられる。

【 0 0 4 6 】

第2電極34は、磁性体10の第1面12と接して設けられた金属からなる。第2電極34は、強磁性金属であってもよく、非磁性金属のCu、W、Ti、Al、Pt、Au、TiN、及びAlSi等であってもよい。なお、第2電極34は、スキルミオン40を生成する磁性体金属であってもよい。この場合、磁性体10と第2電極34とが同一の材料で形成されてもよい。但し、磁性体10を構成する磁性体金属の抵抗値が高い場合、より抵抗値の低い材料により、第2電極34を形成することが好ましい。本例の第2電極34の断面は、第1電極33の断面よりも大きい。但し、第2電極34の断面は、第1電極33の断面と同じサイズであってもよい。

【 0 0 4 7 】

電源37は、第1電極33と第2電極34との間にパルス的な電流を流す。電源37は、電流のオンオフを切り替えるために、FETトランジスタ等で形成された切替スイッチを有する。電源37は、パルス的に磁性体10に電流を流すことにより、磁性体10をジュール加熱する。なお、電源37はスキルミオンメモリ200の構成要素ではなく、外部に設けられてもよい。

【 0 0 4 8 】

電流計38は、磁性体10に流れる電流の電流値を測定する。磁性体10の抵抗値は、磁性体10におけるスキルミオン40の有無に応じて変化する。即ち、電流計38は、磁性体10の抵抗値に応じた電流値の変化を測定することにより、スキルミオン40の有無を読み取ることができる。なお、電流計38はスキルミオンメモリ200の構成要素ではなく、外部に設けられてもよい。

【 0 0 4 9 】

磁性体10にスキルミオン40が存在しない場合、磁性金属35の磁気モーメントは、磁性金属35が強磁性体金属からなるので、磁場発生部20からの垂直磁化(z方向)に 응답してz方向となる。また、磁性体10にスキルミオン40が存在しない場合、磁性体10の磁気モーメントも同様にz方向となる。この場合、磁性金属35の磁気モーメントと磁性体10の磁気モーメントは上向きに揃う。このため、絶縁体36を流れるトンネル電流は、磁性金属35の磁気モーメントと磁性体10の磁気モーメントの向きが揃わない場合と比較して大きい電流値を示す。

【 0 0 5 0 】

一方、磁性体10にスキルミオン40が存在する場合、磁性体10にはスキルミオン40の螺旋状の磁気モーメントが存在するので、+z方向以外の多くの向きの磁気モーメントが存在する。このため、磁性体10にスキルミオン40が存在すると、トンネル電流に大きな散乱効果を与えるので、磁性体10の抵抗が大きくなる。したがって、絶縁体36に流れるトンネル電流は、スキルミオン40が存在しない場合と比較して小さくなる。

【 0 0 5 1 】

以上の通り、磁気素子100は、スキルミオン40の生成及び消去を制御するスキルミオン制御部30を備える。また、磁気素子100は、磁性体10にスキルミオン40が存在するか否かに応じた電流値を検出することができる。例えば、磁気素子100は、ビット情報"1"のときはスキルミオン40の"生成"、ビット情報"0"のときはスキルミオン40の"生成なし"とする。つまり、磁気素子100は、ビット情報に同期させてスキルミオン40を生成することにより、スキルミオンメモリ200として動作できる。

【 0 0 5 2 】

また、磁気素子100は、ビット情報を、磁性体10において等間隔のスキルミオン40の有無に変換することができる。例えば、円板形状の磁性体10を一定の速さで回転させて、磁性体10の第2面14に熱エネルギーを供給する。これにより、ビット情報を、スキルミオン40の有無として、高速で回転する磁性体10に保持できる。ここで、スキルミオン40は、磁性体10の第2面14だけではなく第1面12まで同じ渦構造をもつ磁気モーメントであるから、安定にビット情報を保持できる。

【 0 0 5 3 】

図 8 は、温度 23 K における、スキルミオン 40 に応じた抵抗率の変化を示す。横軸は磁性体 10 に印加される磁場 (T) を示し、縦軸はスキルミオン制御部 30 が検知する抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を示す。本例の磁性体 10 は、温度 23 K に保持される。なお、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ は、ホール電圧の測定により得られる。

【0054】

磁場 0 T ~ 0.6 T の範囲において、スキルミオン 40 が生成されていない場合、磁場の増加と共に抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が線形的に増加する。また、磁場 0.6 T 程度よりも大きくなると抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が減少する。ここで、図面の x 印において、磁性体 10 に電流パルス印加した場合の抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を○印で示す。磁性体 10 に電流パルスが印加されると、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が増加する。即ち、電流パルスの印加によりスキルミオン 40 が生じたことを示す。

10

【0055】

図 9 は、温度 20 K における、スキルミオン 40 に応じた抵抗率の変化を示す。横軸は磁性体 10 に印加される磁場 (T) を示し、縦軸はスキルミオン制御部 30 が検知する抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を示す。本例の磁性体 10 は、温度 20 K に保持される。なお、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ は、ホール電圧の測定により得られる。

【0056】

磁場 0 T ~ 0.7 T の範囲において、スキルミオン 40 が生成されていない場合、磁場の増加と共に抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が線形的に増加する。また、磁場 0.7 T 程度よりも大きくなると抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が減少する。ここで、図面の x 印において、磁性体 10 に電流パルス印加した場合の抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を○印で示す。磁性体 10 に電流パルスが印加されると、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が増加する。即ち、電流パルスの印加によりスキルミオン 40 が生じたことを示す。

20

【0057】

図 10 は、温度 10 K における、スキルミオン 40 に応じた抵抗率の変化を示す。横軸は磁性体 10 に印加される磁場 (T) を示し、縦軸はスキルミオン制御部 30 が検知する抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を示す。本例の磁性体 10 は、温度 10 K に保持される。なお、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ は、ホール電圧の測定により得られる。

【0058】

磁場 0 T ~ 1.0 T の範囲において、スキルミオン 40 が生成されていない場合、磁場の大きさによらずほぼ一定の抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を示す。ここで、図面の x 印において、磁性体 10 に電流パルス印加した場合の抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を○印で示す。磁性体 10 に電流パルスが印加されると、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が増加する。即ち、電流パルスの印加によりスキルミオン 40 が生じたことを示す。

30

【0059】

図 11 は、温度 5 K における、スキルミオン 40 に応じた抵抗率の変化を示す。横軸は磁性体 10 に印加される磁場 (T) を示し、縦軸はスキルミオン制御部 30 が検知する抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を示す。本例の磁性体 10 は、温度 5 K に保持される。なお、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ は、ホール電圧の測定により得られる。

【0060】

磁場 0 T ~ 1.0 T の範囲において、スキルミオン 40 が生成されていない場合、磁場が増加するにつれてわずかに抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が減少する。ここで、図面の x 印において、磁性体 10 に電流パルス印加した場合の抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ を○印で示す。磁性体 10 に電流パルスが印加されると、抵抗率 - $\rho_{yx}(n, cm)$ が増加する。即ち、電流パルスの印加によりスキルミオン 40 が生じたことを示す。

40

【0061】

以上の通り、スキルミオン制御部 30 は、スキルミオン 40 の存在の有無を抵抗率の大きさの変化により検出する。また、スキルミオン制御部 30 は、磁性体 10 の温度によらず、スキルミオン 40 の存在の有無を検出する。本例のスキルミオン制御部 30 は、抵抗率の変化を分かりやすくするために、多数 (例えば、数十億個) のスキルミオン 40 の生

50

成を検出している。しかしながら、スキルミオン40が多数の場合と同一の原理により、単一のスキルミオン40の存在の有無を抵抗率の大きさの変化により検出できる。

【0062】

図12は、急冷スキルミオン相の消滅に関する緩和時間を示す。横軸は時間(s)を示し、縦軸はスキルミオン制御部30が検知する抵抗率 $\rho_y \times (n \text{ cm})$ を示す。本例の磁性体10には、0.22 Tの磁場が印加される。また、各曲線は、スキルミオン40を消去するための加熱温度がそれぞれ異なる。加熱温度は、それぞれ23.0 K、23.5 K、24.0 K、24.5 Kである。

【0063】

緩和時間とは、準安定状態のスキルミオン40を有する磁性体10に、消去用のパルスを印加してから、スキルミオン40が消去されるまでに要する時間である。各温度における緩和時間は、スキルミオン40が存在する場合の抵抗率である約36(n cm)から、スキルミオン40の消去後の抵抗率(n cm)に低下するまでにかかる時間により表される。スキルミオン40が消去されると、抵抗率(n cm)が低下しなくなり一定の値となる。温度23.0 K ~ 24.5 Kの緩和時間をそれぞれ比較すると、温度が小さくなるにつれて緩和時間が大きくなることが分かる。

【0064】

図13は、急冷スキルミオン相の緩和時間の温度依存性を示す。横軸は磁性体10の温度(K)を示し、縦軸は緩和時間(s)を示す。本例の磁性体10には、0.22 Tの磁場が印加される。また、本例のグラフは、図12のグラフのフィッティング結果から算出される。

【0065】

緩和時間は、磁性体10の温度が上昇するにつれて、指数関数的に減少する。即ち、磁性体10は、高温の熱運動により、比較的短時間で熱力学的に安定な状態に落ち着く。例えば、磁性体10の加熱温度を27 Kにすることにより、緩和時間を10 s以下とすることも可能である。なお、本例では、所定の領域に多数(例えば、数十億個)のスキルミオン40を生成し、それらを一度に消去している。つまり、実際にスキルミオンメモリ200として動作させる場合には、1つのスキルミオン40を制御すればよいことになるので、さらに短時間でスキルミオン40を消去できる。

【0066】

図14は、試料ホルダの温度5 Kでの抵抗率分布を示す。横軸は電流密度($\times 10^6 \text{ A m}^{-2}$)及び電流密度に対応する推定サンプル温度(K)を示す。縦軸は、磁性体10に印加される磁場(T)を示す。本例のグラフは、抵抗率 $\rho_y \times (n \text{ cm})$ の分布を示し、色が濃くなるにつれて抵抗率が大きくなる。即ち、色の濃い領域では、スキルミオン40を生成する確率が高いことを示す。例えば、抵抗率30(n cm)以上の濃い領域では、ほぼ100%の確率でスキルミオン40の生成に成功していることを示す。

【0067】

磁場0.16 T ~ 0.26 Tの領域において、サンプル温度が25 K程度以上となるように電流密度を印加した場合に、スキルミオン40の生成確率が高い。また、磁場0.19 T ~ 0.24 Tの領域において、サンプル温度が27 K程度以上となるように電流密度を印加すると、ほぼ100%の確率でスキルミオン40を生成できる。このように、スキルミオン40の生成確率を高めるためには、電流密度と磁場の大きさを最適な大きさに設定する必要がある。

【0068】

図15は、試料ホルダの温度10 Kでの抵抗率分布を示す。試料ホルダの温度以外の条件は、図14と同様である。

【0069】

磁場0.16 T ~ 0.26 Tの領域において、サンプル温度が25 K程度以上となるように電流密度を印加した場合に、スキルミオン40の生成確率が高いことが分かる。また、磁場0.19 T ~ 0.24 Tの領域において、サンプル温度が27 K程度以上となるよ

10

20

30

40

50

うに電流密度を印加すると、ほぼ100%の確率でスキルミオン40を生成できる。このように、スキルミオン40の生成確率を高めるためには、電流密度と磁場の大きさを最適な大きさに設定する必要がある。

【0070】

図16は、試料ホルダの温度23Kでの抵抗率分布を示す。試料ホルダの温度以外の条件は、図14及び図15と同様である。但し、本例では、抵抗率10(n/cm)以上の濃い領域では、ほぼ100%の確率でスキルミオン40の生成に成功していることを示す。

【0071】

磁場0.18T~0.25Tの領域において、サンプル温度が27K程度以上となるように電流密度を印加した場合に、スキルミオン40の生成確率が高いことが分かる。また、磁場0.20T~0.24Tの領域において、サンプル温度が27K程度以上となるように電流密度を印加すると、ほぼ100%の確率でスキルミオン40を生成できる。このように、スキルミオン40の生成確率を高めるためには、電流密度と磁場の大きさを最適な大きさに設定する必要がある。

【0072】

図17は、スキルミオン相の設定工程及びリセット工程を示す。横軸は時間(s)を示し、縦軸は抵抗率 ρ_x (n/cm)及び電流密度($\times 10^6$ A m⁻²)を示す。本例の磁性体10は10Kの温度に保持され、0.22Tの磁場が印加される。

【0073】

設定工程は、磁性体10をコニカル相からスキルミオン相に相転移させる工程である。設定工程において、スキルミオン制御部30は、予め定められたパルス強度及びパルス幅の電流パルスを磁性体10に印加する。パルス強度は、電流密度に対応する。本例のスキルミオン制御部30は、電流密度 3.1×10^6 A m⁻²の電流を100msのパルス幅で磁性体10に印加する。

【0074】

リセット工程は、磁性体10をスキルミオン相からコニカル相に相転移させる工程である。リセット工程において、スキルミオン制御部30は、予め定められた電流密度及びパルス幅の電流パルスを磁性体10に印加する。例えば、スキルミオン制御部30は、設定工程におけるパルス強度よりも小さなパルス強度の電流パルスを磁性体10に印加する。また、スキルミオン制御部30は、設定工程における電流パルスよりも大きなパルス幅の電流パルスを磁性体10に印加する。即ち、スキルミオン制御部30は、リセット工程において、設定工程よりも低い温度で、長時間、磁性体10を加熱することが好ましい。本例のスキルミオン制御部30は、電流密度 1.7×10^6 A m⁻²の電流を10sのパルスで磁性体10に印加する。

【0075】

図18は、スキルミオン相の設定工程及びリセット工程のスイッチング動作を示す。横軸は時間(s)を示し、縦軸は抵抗率 ρ_x (n/cm)を示す。本例の磁性体10は、10Kの温度に保持され、0.22Tの磁場が印加される。抵抗率が30(n/cm)の場合にスキルミオン相が設定され、抵抗率が2(n/cm)の場合にスキルミオン相がリセットされてコニカル相が設定される。本グラフより、所定の周期でスキルミオン相の設定及びリセットの繰り返しが可能であることが分かる。このように、スキルミオンメモリ200は、電流による発熱を利用して磁性体10の温度を制御し、準安定状態のスキルミオン40の生成及び消滅を制御できる。

【0076】

本例のスイッチング動作では、所定の領域にスキルミオン40を形成することにより、多数(例えば、数十億個)のスキルミオン40を一度に生成及び消去している。しかしながら、実際にスキルミオンメモリ200として動作させる場合は、個別のスキルミオン40を単独にスイッチングさせればよいので、より短時間にスキルミオン40の生成及び消去を制御できる。スキルミオン40の生成及び消去は磁気モーメントの制御により行われ

10

20

30

40

50

るので、アモルファス相と結晶相との間で状態を変化させる従来の相変化メモリと比較して、短時間のスイッチングを実現できる。

【0077】

図19は、演算処理装置300の構成例を示す。演算処理装置300は、スキルミオンメモリ200及び中央演算処理デバイス310を備える。

【0078】

中央演算処理デバイス310は、例えば、Si基板上に形成したCMOS LSIデバイスである。中央演算処理デバイス310は、各種の演算処理データをスキルミオンメモリ200へ書き込む。また、中央演算処理デバイス310は、スキルミオンメモリ200からのデータ処理基本ソフトウェアプログラム及び各種データの読み出しの機能を有してよい。

10

【0079】

以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更または改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、特許請求の範囲の記載から明らかである。

【0080】

特許請求の範囲、明細書、および図面中において示した装置、システム、プログラム、および方法における動作、手順、ステップ、および段階等の各処理の実行順序は、特段「より前に」、「先立って」等と明示しておらず、また、前の処理の出力を後の処理で用いるのでない限り、任意の順序で実現しうることに留意すべきである。特許請求の範囲、明細書、および図面中の動作フローに関して、便宜上「まず、」、「次に、」等を用いて説明したとしても、この順で実施することが必須であることを意味するものではない。

20

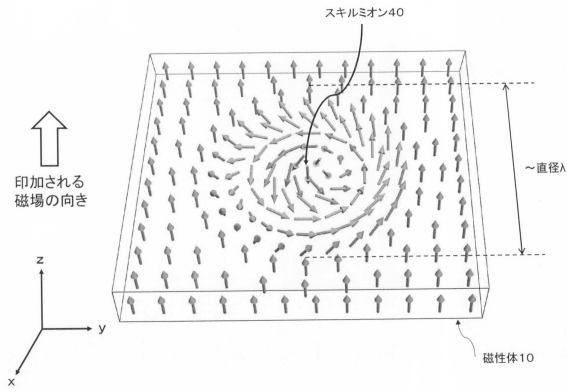
【符号の説明】

【0081】

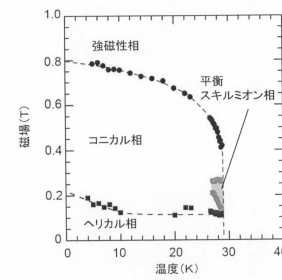
10・・・磁性体、12・・・第1面、14・・・第2面、20・・・磁場発生部、30・・・スキルミオン制御部、31・・・レーザ光源、32・・・レーザ光、33・・・第1電極、34・・・第2電極、35・・・磁性金属、36・・・絶縁体、37・・・電源、38・・・電流計、40・・・スキルミオン、50・・・絶縁体、100・・・磁気素子、200・・・スキルミオンメモリ、300・・・演算処理装置、310・・・中央演算処理デバイス

30

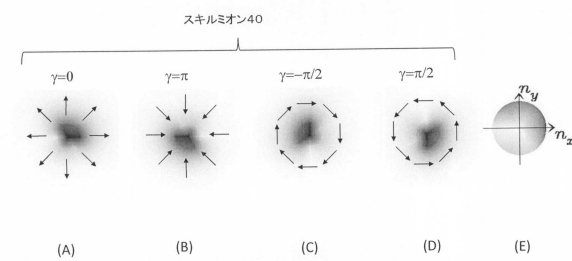
【図 1】



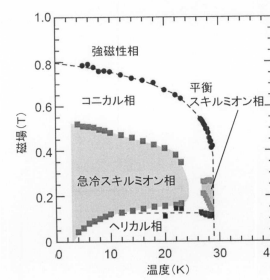
【図 3】



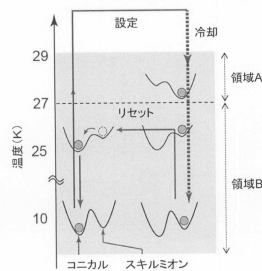
【図 2】



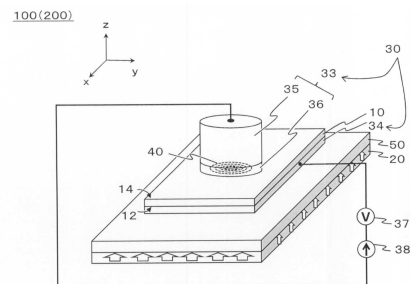
【図 4】



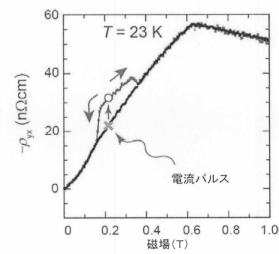
【図 5】



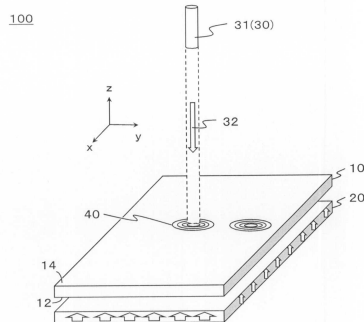
【図 7】



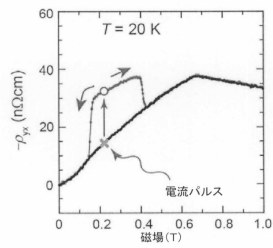
【図 8】



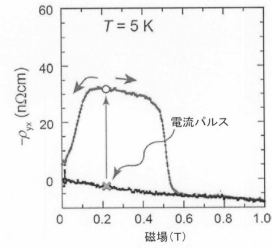
【図 6】



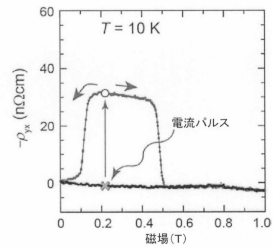
【図 9】



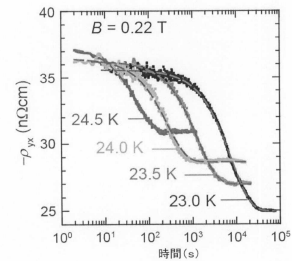
【図 11】



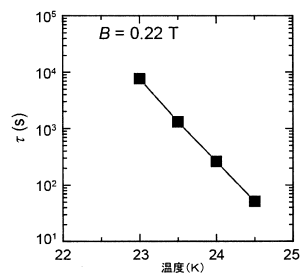
【図 10】



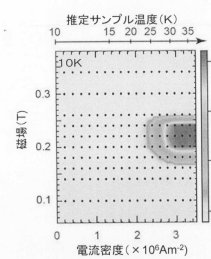
【図 12】



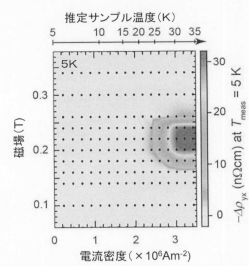
【図 13】



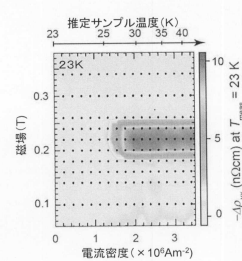
【図 15】



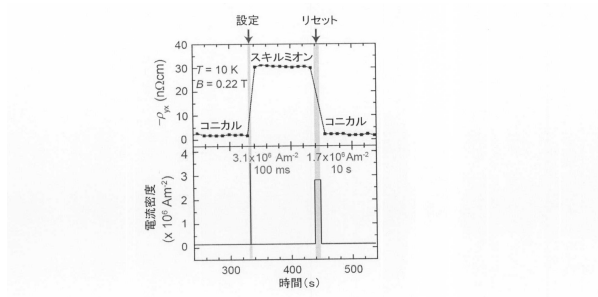
【図 14】



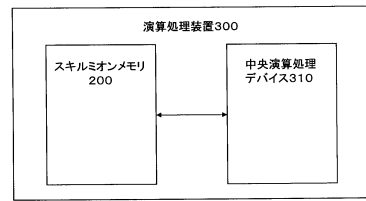
【図 16】



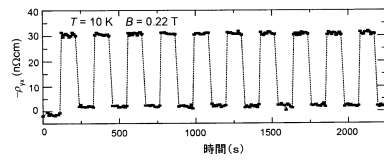
【図 17】



【図 19】



【図 18】



フロントページの続き

審査官 小山 満

- (56)参考文献 特開 2 0 1 4 - 0 8 6 4 7 0 (J P , A)
国際公開第 2 0 1 5 / 1 1 8 7 4 8 (W O , A 1)
米国特許出願公開第 2 0 1 6 / 0 3 5 1 2 4 2 (U S , A 1)
望月維人, スキルミオンを作る・消す・動かす, まぐね, 2 0 1 5 年 8 月 1 日, Vol.10, No
.4, p.192-198
Wataru KOSHIBAE, Creation of skyrmions and antiskyrmions by local heating, NATURE COMM
UNICATIONS, 2 0 1 4 年 1 0 月 1 7 日, p.1-11

(58)調査した分野(Int.Cl., D B 名)

H 0 1 L 2 9 / 8 2
H 0 1 L 2 1 / 8 2 3 9
H 0 1 L 2 7 / 1 0 5
H 0 1 F 4 1 / 3 0