

(19) 日本国特許庁(JP)

再公表特許(A1)

(11) 国際公開番号

W02009/048025

発行日 平成23年2月17日 (2011.2.17)

(43) 国際公開日 平成21年4月16日 (2009.4.16)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 27/105 (2006.01)	HO 1 L 27/10 4 4 7	4 M 1 1 9
HO 1 L 21/8246 (2006.01)	HO 1 L 43/08 S	5 E 0 4 9
HO 1 L 43/08 (2006.01)	HO 1 L 43/08 Z	5 F 0 9 2
HO 1 L 43/10 (2006.01)	HO 1 L 43/10	
G 1 1 C 11/15 (2006.01)	G 1 1 C 11/15 1 4 0	

審査請求 未請求 予備審査請求 有 (全 19 頁) 最終頁に続く

出願番号 特願2009-536988 (P2009-536988)  
 (21) 国際出願番号 PCT/JP2008/068044  
 (22) 国際出願日 平成20年10月3日 (2008.10.3)  
 (31) 優先権主張番号 特願2007-265747 (P2007-265747)  
 (32) 優先日 平成19年10月11日 (2007.10.11)  
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(71) 出願人 503360115  
 独立行政法人科学技術振興機構  
 埼玉県川口市本町四丁目1番8号  
 (71) 出願人 504157024  
 国立大学法人東北大学  
 宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号  
 (74) 代理人 100089635  
 弁理士 清水 守  
 (72) 発明者 大野 英男  
 日本国宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内  
 (72) 発明者 松倉 文▲礼▼  
 日本国宮城県仙台市青葉区片平二丁目1番1号 国立大学法人東北大学内

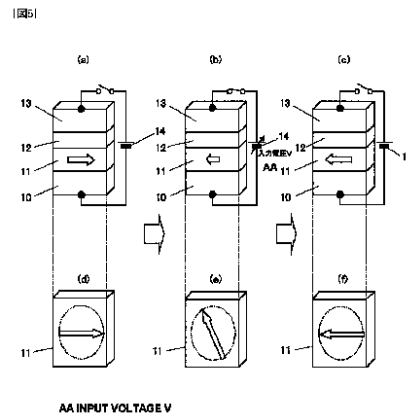
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリ

(57) 【要約】

キャリア濃度の増減で磁気異方性が変化する磁性体を利用し、磁性体の磁化容易軸方向（磁化が向きやすい方向）を、キャリア濃度を増減させることで制御することにより、超低消費電力の不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリを提供する。

磁性体からなる記録層（11）を備える不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリであって、前記記録層（11）のキャリア（電子・正孔）濃度を増加または減少させる操作若しくはそれらを組み合わせた操作を行なうことによって、磁化を回転または反転させて記録動作を実行するようにした。



## 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

磁性体からなる記録層を備える不揮発性固体磁気メモリの記録方法であって、前記記録層のキャリア（電子・正孔）濃度を増加または減少させる操作若しくはそれらを組み合わせた操作を行なうことによって、磁化を回転または反転させて記録動作を実行するようにしたことを特徴とする不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 2】

前記記録層としてキャリア誘起強磁性体を用いることを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 3】

前記不揮発性固体磁気メモリは、前記記録層を支持する所定の基板と、前記記録層の上方において電氣的絶縁層を介して設けられた金属電極層を備えることにより、キャパシタンス構造を呈するようにしたことを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 4】

前記記録層及び前記金属電極層は互いに符号の異なる電荷の蓄積層として機能するとともに、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより前記操作を行なうことを特徴とする請求項 3 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 5】

前記不揮発性固体磁気メモリは、前記記録層を支持する所定の基板と、前記記録層の上方において電氣的絶縁層を介して設けられた金属電極層を備えることにより、電界効果型トランジスタ構造を呈し、前記記録層はチャンネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより、前記操作を行うことを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 6】

前記記録層としてキャリア誘起強磁性半導体を用いることを特徴とする請求項 2 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 7】

前記記録層として I V 族、I I I - V 族、I I - V I 族、I I - V I - V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層を用いることを特徴とする請求項 6 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 8】

前記電氣的絶縁層として前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁を用いることを特徴とする請求項 7 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 9】

前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする請求項 1 ~ 8 の何れか一項に記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 10】

前記記録層として異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造を用いることを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 11】

前記操作が光照射によって行なわれることを特徴とする請求項 6 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 12】

- (a) 基板と、
- (b) 該基板上に形成される膜面内に磁化容易軸をもつ磁性体からなる記録層と、
- (c) 該記録層上に形成される電氣的絶縁層と、
- (d) 該電氣的絶縁層上に形成される金属電極層とを備え、

10

20

30

40

50

(e) 電界効果型トランジスタ構造を呈し、前記記録層はチャネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加する手段とを具備することを特徴とする不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 13】

前記記録層がキャリア誘起強磁性体層であることを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 14】

前記記録層が (Ga, Mn)As 層であることを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 15】

前記記録層が IV 族、III-V 族、II-VI 族、II-VI-V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層であることを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 16】

前記電氣的絶縁層が、前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁であることを特徴とする請求項 14 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 17】

前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【請求項 18】

前記記録層が異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造であることを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリに関するものである。

【背景技術】

【0002】

従来、強磁性体の磁化方向は磁気記録媒体のビットとして利用されている。例えば、不揮発性磁気メモリ (MRAM: Magnetoresistive Random Access Memory) では、トンネルバリアを二層の磁性薄膜 (フリー層とピン層) でサンドイッチしたトンネル磁気抵抗素子の上下層の磁化が平行か反平行かによって 0 と 1 の情報を区別している。一つの磁性ビット (以下セルと呼ぶ) の上下にはワード線とビット線が配線されており、両線に電流を流すことにより発生する合成磁場を利用してフリー層の磁化を反転することができる。

【0003】

強磁性体は微細化すればするほど反転磁場が高くなるため、セルサイズが小さくなると配線に流す電流を大きくしなければ磁化を反転することができなくなる。従って、この技術は高密度集積化に際して限界がある。

【0004】

これを打開するための手法として、スピン注入磁化反転がある。これはピン層からのスピン偏極した電流によって直接フリー層の磁化を反転させる技術である。反転に必要な電流密度は素子面積にあまり影響されないため、面積が小さければ小さいほど必要な電流が下がる。すなわち、一つのビットに書き込むために必要な消費電力は小さくなる。現段階で、必要な電流密度は 1 平方センチメートル当たり 10<sup>7</sup> A 程度であり、さらなる低減化が低消費電力化に向けての技術課題となっている。

【0005】

しかし、情報の読み出しのために必要な電流は書き込み電流を常に下回らなければなら

10

20

30

40

50

ないため、書き込み電流が低くなりすぎると今度は読み出しに必要な出力電圧を得ることが困難になるという課題も将来的には考慮していかなければならない。

【0006】

電流磁場による磁化反転を用いた不揮発性磁気メモリはすでに製品化されている（下記非特許文献1参照）。一方、スピン注入磁化反転を用いたメモリは試作段階である（下記非特許文献2参照）。

【非特許文献1】<http://www.freescale.com/>

【非特許文献2】Digest of technical papers of 2007 IEEE International Solid-State Circuits Conference (ISSCC 2007), pp. 480-481, February 2007

10

【発明の開示】

【0007】

本発明の特徴は、キャリア濃度の増減で磁気異方性が変化する磁性体を利用し、磁性体の磁化容易軸方向（磁化が向きやすい方向）を、キャリア濃度を増減させることで制御することにある。従って、無磁場での磁化の回転や反転が可能となる。また、キャリア濃度を増減するための手段として、電界を印加する手法を用いることにより、従来の磁化反転手法に比べると桁違いに小さな消費電力での書き込みが可能となり、超低消費電力の不揮発性固体磁気メモリを提供することができる。

【0008】

20

すなわち、本発明は、上記状況に鑑みて、キャリア濃度の増減で磁気異方性が変化する磁性体を利用し、磁性体の磁化容易軸方向（磁化が向きやすい方向）を、キャリア濃度を増減させることで制御することにより、超低消費電力の不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリを提供することを目的とする。

【0009】

本発明は、上記目的を達成するために、

〔1〕磁性体からなる記録層を備える不揮発性固体磁気メモリの記録方法であって、前記記録層のキャリア（電子・正孔）濃度を増加または減少させる操作若しくはそれらを組み合わせた操作を行なうことにより、磁化を回転または反転させて記録動作を実行するようにしたことを特徴とする。

30

【0010】

〔2〕上記〔1〕記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記記録層としてキャリア誘起強磁性体を用いることを特徴とする。

【0011】

〔3〕上記〔1〕記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記不揮発性固体磁気メモリは、前記記録層を支持する所定の基板と、前記記録層の上方において電氣的絶縁層を介して設けられた金属電極層を備えることにより、キャパシタンス構造を呈するようにしたことを特徴とする。

【0012】

〔4〕上記〔3〕記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記記録層及び前記金属電極層は互いに符号の異なる電荷の蓄積層として機能するとともに、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより前記操作を行なうことを特徴とする。

40

【0013】

〔5〕上記〔1〕記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記不揮発性固体磁気メモリは、前記記録層を支持する所定の基板と、前記記録層の上方において電氣的絶縁層を介して設けられた金属電極層を備えることにより、電界効果型トランジスタ構造を呈し、前記記録層はチャンネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより、前記操作を行うことを特徴とする。

【0014】

50

〔 6 〕 上記〔 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記記録層としてキャリア誘起強磁性半導体を用いることを特徴とする。

【 0 0 1 5 】

〔 7 〕 上記〔 6 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記記録層として I V 族、 I I I - V 族、 I I - V I 族、 I I - V I - V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層を用いることを特徴とする。

【 0 0 1 6 】

〔 8 〕 上記〔 7 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記電氣的絶縁層として前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁を用いることを特徴とする。

10

【 0 0 1 7 】

〔 9 〕 上記〔 1 〕 ~ 〔 8 〕 の何れか一項に記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする。

【 0 0 1 8 】

〔 1 0 〕 上記〔 1 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記記録層として異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造を用いることを特徴とする。

【 0 0 1 9 】

〔 1 1 〕 上記〔 6 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法において、前記操作が光照射によって行なわれることを特徴とする。

20

【 0 0 2 0 】

〔 1 2 〕 不揮発性固体磁気メモリにおいて、基板と、この基板上に形成される膜面内に磁化容易軸をもつ磁性体からなる記録層と、この記録層上に形成される電氣的絶縁層と、この電氣的絶縁層上に形成される金属電極層とを備え、電界効果型トランジスタ構造を呈し、前記記録層はチャネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加する手段とを具備することを特徴とする。

【 0 0 2 1 】

〔 1 3 〕 上記〔 1 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリにおいて、前記記録層がキャリア誘起強磁性体層であることを特徴とする。

30

【 0 0 2 2 】

〔 1 4 〕 上記〔 1 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリにおいて、前記記録層が ( G a , M n ) A s 層であることを特徴とする。

【 0 0 2 3 】

〔 1 5 〕 上記〔 1 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリにおいて、前記記録層が I V 族、 I I I - V 族、 I I - V I 族、 I I - V I - V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層であることを特徴とする。

【 0 0 2 4 】

〔 1 6 〕 上記〔 1 4 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリにおいて、前記電氣的絶縁層が、前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁であることを特徴とする。

40

【 0 0 2 5 】

〔 1 7 〕 上記〔 1 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリにおいて、前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする。

【 0 0 2 6 】

〔 1 8 〕 上記〔 1 2 〕 記載の不揮発性固体磁気メモリ前記記録層が異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造であることを特徴とする。

【 図面の簡単な説明 】

【 0 0 2 7 】

【 図 1 】 本発明に係る膜面内に磁化容易軸をもつ ( G a , M n ) A s の磁気異方性の特性

50

を示す図である。

【図2】本発明に係る各条件における磁化の角度、規格化磁気エネルギー、規格化磁気エネルギーの極小値のそれぞれの時間依存性を示す図である。

【図3】本発明に係る各ゲート電圧Vの印加による $h_{U1}$ と $h_{U2}$ の変調の度合いを表す係数a値のときの磁化の回転角度のマップを示す図である。

【図4】本発明に係るrのゲート電圧Vの印加による $h_{U1}$ と $h_{U2}$ の変調の度合いを表す係数aに対するrの依存性を示す図である。

【図5】本発明に係る素子構造の一例を示す図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0028】

本発明の磁性体を記録層として備える不揮発性固体磁気メモリの記録方法は、前記記録層のキャリア（電子・正孔）濃度を増加または減少させる操作若しくはそれらを組み合わせた操作を行なうことによって、磁化を回転または反転させて記録動作を実行するようにした。

【実施例】

【0029】

以下、本発明の実施の形態について詳細に説明する。

【0030】

まず、本発明の原理について説明する。

【0031】

強磁性体の磁化方向は磁気記録媒体のビットとして利用されている。不揮発性磁気メモリ（MRAM）ではトンネル磁気抵抗素子の上下の磁化が平行か反平行かによって0と1の情報を区別している。片方の磁化を電流によって発生する磁場によって反転させることで書き込みを行なうことができる。強磁性ビットのサイズがサブミクロンオーダーになると、スピントラント、すなわち、スピントランスファトルクを用いた磁化反転の方が消費電力の点で有利となる。それでも $10^{6-8} \text{ A/cm}^2$ 程度の密度の電流を要する。

【0032】

本願発明者らはキャリア誘起強磁性体の磁気異方性がキャリア濃度の関数であることを利用して、ゲート電界Eによってキャリア濃度を変調することで磁化方向を操作できる条件を調査した。正孔誘起強磁性体（Ga, Mn）Asの磁気特性は詳しく調べられており、複雑な磁気異方性を持つことが分かっている。また、正孔濃度p及びキュリー温度 $T_c$ はゲート電界Eにより制御できる。光照射による磁化方向の変化も観測されている。

【0033】

本願発明者らは基板上の膜面内に磁化容易軸をもつ（Ga, Mn）As層の磁気異方性を例にとって、外部磁場やスピントラントを必要としない超低消費電力の磁化方向操作（回転及び反転）を一斉磁化回転モデルを用いてシミュレートした。

【0034】

図1は本発明に係る膜面内に磁化容易軸をもつ（Ga, Mn）Asの磁気異方性の特性を示す図であり、図1（a）はその磁化の角度と結晶軸の関係を示す図、図1（b）はその素子構造の模式図、図1（c）はその入力電圧印加シーケンスを示す図、図1（d）はそれに伴う磁気異方性の変化の時間依存性を示す図である。

【0035】

図1（b）において、1は基板、2は基板1上の記録層としての（Ga, Mn）As層、3はその（Ga, Mn）As層2上の絶縁体層、4はその絶縁体層3上のゲート電極層である。また、図1（d）において、実線は $a = 2.0$ 、点線は $a = 1.5$ 、一点鎖線は $a = 1.0$ を示している。一般的に、基板1上に直接記録層2を直接堆積するのが困難であるために、記録層2の磁気的特性を予め最適化しておく。たとえば、基板1及び記録層2の双方と整合性が良いGaAsや（In, Ga）Asをバッファ層として基板1上に形成し、その上に記録層2を形成する。記録層2がその他のIV族、III-V族、II-V族、II-VI族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドー

10

20

30

40

50

ピングした強磁性半導体であった場合にも同様に基板 1 と記録層 2 の双方と整合性の良いバッファ層を用いることができる。

【 0 0 3 6 】

圧縮歪みを持つ (Ga, Mn) As 層 2 は基板 1 上の膜面内に [100] と [010] 方向に沿った二軸の立方磁気異方性 (B) と [100] もしくは [010] 方向に沿った一軸磁気異方性 (U1) と [110] 若しくは [-110] 方向に沿った一軸磁気異方性 (U2) をもつことが知られている。二軸の立方磁気異方性 (B) は (Ga, Mn) As 層 2 の価電子帯構造に起因した磁気異方性であると考えられている。一軸磁気異方性 (U1) による異方性磁場は非常に小さく、感度の高い測定を行なわないと検出できないばかりでなく、その起源も明らかではない。一軸磁気異方性 (U2) は正孔濃度 p と Mn 組成に依存してその符号 ([110] か [-110]) のどちらが容易軸になるかを示す) が変化することが報告されている。

10

【 0 0 3 7 】

外部磁場がゼロのときの系の磁気エネルギー F は以下の式で与えられる、

【 0 0 3 8 】

【 数 1 】

$$F = \frac{MH_B}{2} \left[ \frac{1}{4} \sin^2 2\phi + \left( \frac{H_{u1}}{H_B} \right) \sin^2 \phi + \left( \frac{H_{u2}}{H_B} \right) \sin^2 \left( \phi - \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad \dots (1)$$

20

【 0 0 3 9 】

ここでは、M は自発磁化、 $\phi$  は磁化の [100] 方向からの角度、 $H_B$ 、 $H_{U1}$  及び  $H_{U2}$  はそれぞれ二軸の立方磁気異方性 (B)、一軸磁気異方性 (U1、U2) による磁気異方性磁場である。自発磁化 M は、 $F / \sin^2 \phi = 0$ 、 $F / \sin^2 \left( \phi - \frac{\pi}{4} \right) > 0$  となる角度  $\phi$  を向く [図 1 (a) 参照]。一般的な (Ga, Mn) As 層 2 では、キュリー温度  $T_C$  より十分に低い温度では  $H_B > H_{U2} > H_{U1}$  となり、温度が上昇して、キュリー温度  $T_C$  に近づくと、 $H_B$  は大きく減少して、場合によっては  $H_B < H_{U2}$  となる。GaMnAs 電界効果素子 [図 1 (b) 参照] においては、ゲート電界 E の印加により、正孔濃度 p を制御できるため、 $H_B$ 、 $H_{U2}$ 、 $H_{U1}$  の各大きさや符号までもが制御可能であることが期待される。

30

【 0 0 4 0 】

ゲート電圧 V (= E d, ここで d はゲート絶縁体膜の厚み) を素子に入力すると、 $H_B$ 、 $H_{U1}$ 、 $H_{U2}$  はそれぞれ V の関数となる。

【 0 0 4 1 】

ここで、簡単にするため、 $H_{U1} / H_B$  (=  $h_{U1}$ ) および  $H_{U2} / H_B$  (=  $h_{U2}$ ) が V に比例して変化すると仮定し、入力電圧 V (t) (0 ≤ t ≤ 1)、(t は無次元の数) は三角波形状を持つとする [図 1 (c) 参照];

【 0 0 4 2 】

【 数 2 】

$$h_{Ui}(V(t)) = h_{Ui}(0) \left[ 1 - a \frac{V(t)}{V_{\max}} \right] \quad (i=1, 2) \quad \dots (2)$$

40

【 0 0 4 3 】

ここで、a はゲート電圧 V の印加による  $h_{U1}$  と  $h_{U2}$  の変調の度合いを表す係数であり、 $a > 1$  の場合、入力電圧によって一時的に異方性磁場の符号が変化する [図 1 (d) 参照]。  $V_{\max}$  は印加するゲート電圧 V の最大値である。V (t) の入力により磁気エネルギー F の依存性の極小値が時間的に変化するので自発磁化 M は回転若しくは反転する。

【 0 0 4 4 】

50

図2は本発明に係る各条件における磁化の角度、規格化磁気エネルギー、規格化磁気エネルギーの極小値のそれぞれの時間依存性を示す図であり、図2(a), (b)は $a = 2$ の場合の磁化の $[100]$ 方向からの角度の時間依存性と規格化磁気エネルギー $f = 2F / MH_B$ の磁化の $[100]$ 方向からの角度依存性の時間発展であり、図2(c), (d)は規格化磁気エネルギー $f$ の極小値( $= f_{min}$ )の時間依存性である。 $h_{U1}(0) = 0.1$ ,  $h_{U2}(0) = 0.5$ の場合、 $V(t)$ により自発磁化 $M$ は回転するが、 $t = 1$ で元の角度に戻る。 $h_{U1}(0) = 0.1$ ,  $h_{U2}(0) = 1$ の場合は自発磁化 $M$ が時計回りに回転し、 $t = 1$ で自発磁化 $M$ は初期角度と $180^\circ$ 反対を向く(反転)。この場合、規格化磁気エネルギーの最小値 $f_{min}(t)$ が $t = 0.5$ に対して対称ではなく、また、不連続な自発磁化 $M$ の回転が2度生じる。反転条件を調べるために、 $V(t)$ の入力前後の磁化の $[100]$ 方向からの角度の差をそれぞれの $h_{U1}(0)$ ,  $h_{U2}(0)$ について計算した。

10

## 【0045】

図3は本発明に係る各ゲート電圧 $V$ の印加による $h_{U1}$ と $h_{U2}$ の変調の度合いを表す係数 $a$ 値のときの磁化の回転角度のマップを示す図である。

## 【0046】

図3(a)は $a = 2$ のときのシミュレーション結果である。反転条件はアステロイド曲線で与えられることが分かる。

## 【0047】

$$h_{U1}^{2/3}(0) + h_{U2}^{2/3}(0) = r \cdot \dots (3)$$

20

ここで、 $r$ はアステロイド曲線の大きさに関する定数であり、図3でアステロイド曲線が縦軸および横軸と交わる点は $r^{3/2}$ になる。 $a = 2$ の場合には $r = 1$ である。また、反転が生じるときに、 $h_{U1}(0)$ と $h_{U2}(0)$ の積が正(負)の場合、自発磁化 $M$ は時計回り(反時計回り)に回転して反転する。 $a = 1.5$ の場合[図3(b)参照]は $r$ が大きくなる。

## 【0048】

図4は本発明に係る $r$ のゲート電圧 $V$ の印加による $h_{U1}$ と $h_{U2}$ の変調の度合いを表す係数 $a$ に対する $r$ の依存性を示す図である。

## 【0049】

$r$ は $a > 1$ で発散し、 $a = 1$ では反転が生じない(回転のみ)ことを示している。書き込み後、不揮発に情報を保持するため(入力電圧をオフしても磁化の向きが反転した状態のまま保持される)には反転を引き起こすことが応用上必要不可欠である。

30

## 【0050】

まとめると、ゲート電界 $E$ の印加により二つの一軸磁気異方性の符号を変化させることができること( $a > 1$ )、 $h_{U1}(0)$ 及び $h_{U2}(0)$ がアステロイド曲線の外側にあること[上記式(3)参照]が反転のための条件である。 $GaMnAs$ においては、比較的キュリー温度 $T_C$ に近い温度では $h_{U2}(0)$ が約1となる。また、 $T_C$ より十分に低温ではあるものの、 $h_{U1}(0)$ が約0.01であることが報告されている。従って、 $a$ を2に近づけられれば、磁化反転が十分に期待できる。また、例えば、 $(In, Mn)As$ など、同様な磁気異方性をもつキャリア誘起強磁性体を記録層として用いれば、同様な効果を期待することができる。

40

## 【0051】

スピントランスファートルクを用いたMRAM(SPRAM)では、スピントレントを発生するのに電流を必要とするため電力消費が生じる。本発明の電界誘起磁化反転RAMでは電流を必要としないため、消費電力は極めて小さいが、磁化反転のために消費されるわけではない外因的な電力消費、即ち電荷の充放電に伴う変位電流と絶縁膜への定常漏れ電流が発生する。一つのビットの面積及び印加電圧と時間が両手法を用いたビットで同じであるとして、磁化を反転させるのに必要な消費電力を比較すると、本発明のそれは非特許文献2で示されているSPRAMの百万分の1以下であることが見積られる。本発明の素子の場合には変位電流によって素子のシート抵抗程度の大きさの直列抵抗で消費される

50



電力と静電エネルギーによる電力が主な寄与である。

< 実施の形態 >

図5は本発明に係る素子構造の一例を示す図であり、図5(a)~(c)は素子の構造、図5(d)~(f)は磁性体層を上から見た図である。なお、磁性体層の矢印は磁化の向きを表している。

【0052】

図5に示すように、金属電極層13と絶縁体層12を持ち、基板10を有する磁性体層11(記録層)を準備する。これは金属電極層13-磁性体層11間に電源14から電圧を印加することにより、磁性体層11中のキャリア(電子若しくは正孔)濃度を増減することを目的としている。従って、このような目的に沿う構造であれば構わない。例えば磁性体層11に磁性半導体を用いれば、絶縁体層12部分はショットキーバリアとしてもよい。また、磁性半導体を用いた場合、光を照射することによってもキャリアを励起する(増やすあるいは場合によっては減らす)ことができる。この場合、金属電極層13と絶縁体層12に相当する部分は不要である。

10

【0053】

磁性体層11としては、キャリア濃度を増減することで、その磁化容易軸方向(磁気異方性)が変化するものを用いる。また、磁性体層11部分は、磁性体と非磁性体や異種の磁性体の複合構造としてもよい。例えば、磁性体層11の部分を磁性体11/絶縁体/磁性体11という複合構造に置き換えても、一方もしくは両方の磁性体のキャリア濃度が増減できればよい。

20

【0054】

電界でキャリア濃度を増減できる、図5に示したような素子を例にとって説明を進める。金属電極層13/絶縁体層12/磁性体層11がそれぞれ層状になっているとし、磁性体層11の磁化容易軸が磁性体層は面内のある方向にあるとする〔図5(a)参照〕。次に、電圧を金属電極層13-磁性体層11間に印加すると、キャリア濃度が増加(若しくは減少)するため磁化容易軸が変化し、磁化が回転する〔図5(b)参照〕。磁性体層11が複雑な磁気異方性を持っている場合、キャリア濃度を増減させるだけで磁化を回転だけではなく反転させることができる。具体的には、二方向の異なる一軸の容易軸(U1, U2)と二軸の容易軸(B)を同時に持つ場合である。一軸磁気異方性とは、180°周期で磁化の向きやすい方向(容易軸)と向きにくい方向(困難軸)が現れる異方性のこと

30

【0055】

容易軸と困難軸が入れ替わるとき、便宜的に異方性磁場の符号を負ととる。それらの大きさを示す異方性磁場をそれぞれ $H_{U1}$ ,  $H_{U2}$ ,  $H_B$ としたときに、 $H_{U1}/H_B$   $h_{U1}$ と $H_{U2}/H_B$   $h_{U2}$ のそれぞれの比が電圧印加により制御でき、 $h_{U1}$ と $h_{U2}$ の符号が反転して元に戻るような電圧印加シーケンスを与えると、磁化が反転する。具体例としては三角波やサイン波、鈍った矩形波状の電圧パルスが挙げられる。

【0056】

なお、本発明は上記実施例に限定されるものではなく、本発明の趣旨に基づき種々の変形が可能であり、これらを本発明の範囲から排除するものではない。

40

【0057】

本発明によれば、以下のような効果を奏することができる。

【0058】

本発明による電界誘起磁化反転法では、磁場による磁化反転法またはスピン電流による磁化反転法と比較して、磁化を反転させるのに必要な消費電力は、百万分の1以下であることが見積もられるので、極めて低消費電力の不揮発性固体磁気メモリの記録方法が実現できる。

【産業上の利用可能性】

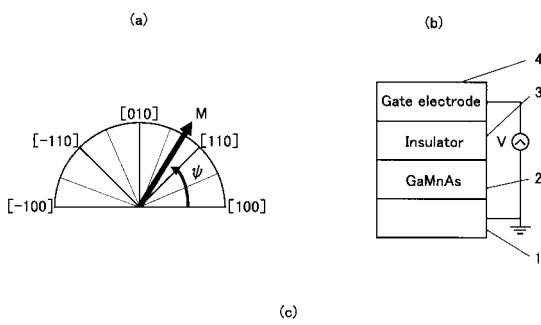
【0059】

本発明の不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリは、無磁場で

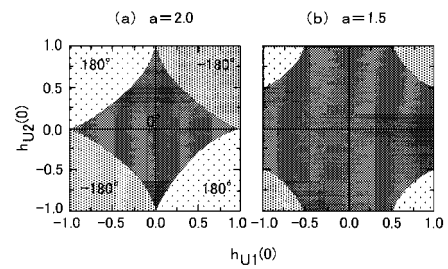
50

の磁化の回転や反転が可能となる不揮発性固体磁気メモリの記録方法及び不揮発性固体磁気メモリに利用可能である。

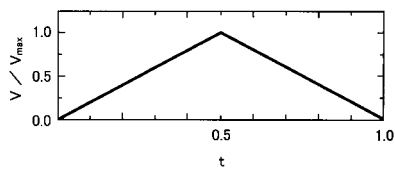
【 図 1 】



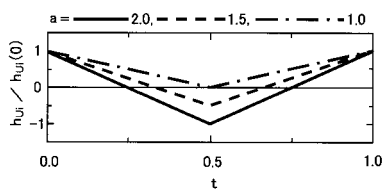
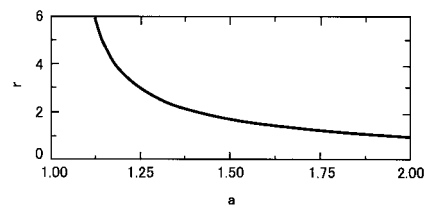
【 図 3 】



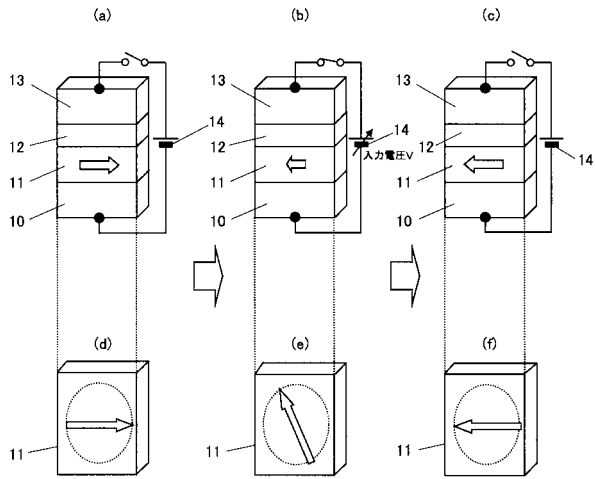
【 図 4 】



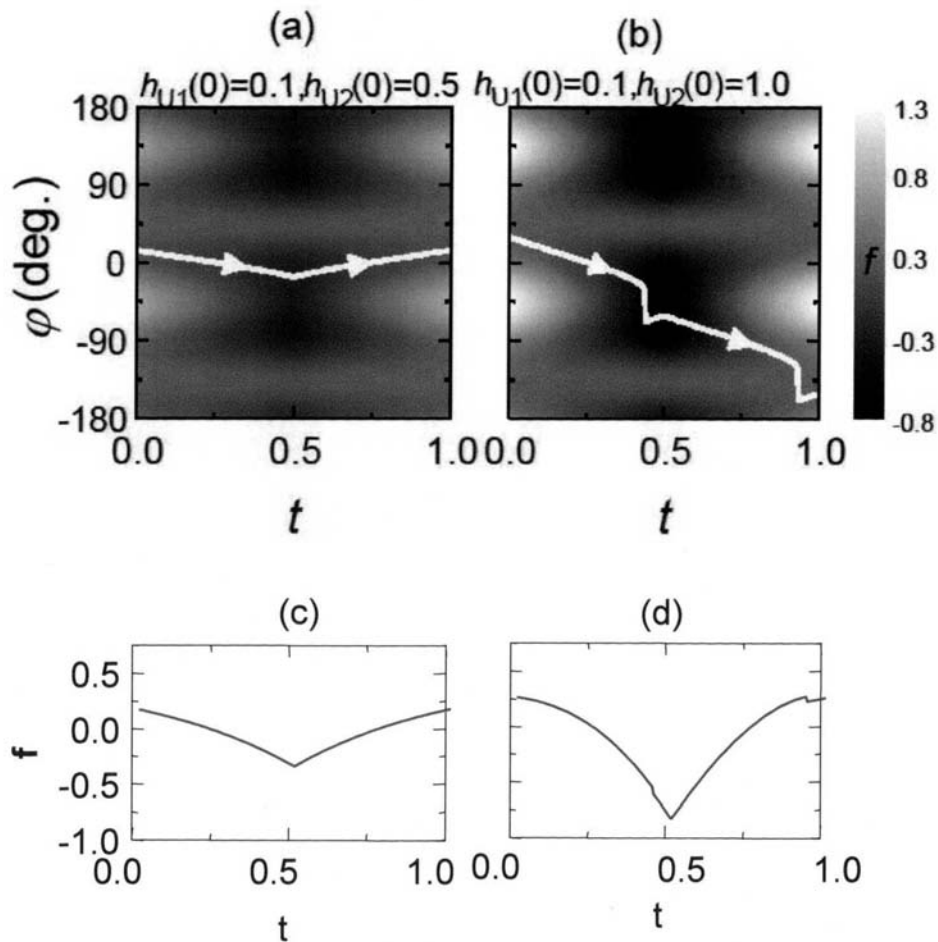
(d)



【 図 5 】



【 図 2 】



【 手続補正書 】

【 提出日 】 平成21年6月18日 (2009.6.18)

【 手続補正 1 】

【 補正対象書類名 】 特許請求の範囲

【 補正対象項目名 】 全文

【 補正方法 】 変更

【 補正の内容 】

【 特許請求の範囲 】

【 請求項 1 】

磁性体からなる記録層を備える不揮発性固体磁気メモリの記録方法であって、前記記録層は I V 族、 I I I - V 族、 I I - V I 族、 I I - V I - V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層からなり、前記記録層を支持する所定の基板と、前記記録層の上方において電気的絶縁層を介して設けられた金属電極層を備えることにより、キャパシタンス構造の絶縁層部分を、前記電気的絶縁層として前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁として用い、前記記録層のキャリア（電子・正孔）濃度を増加または減少させる操作若しくはそれらを組み合わせた操作を行なうことによって、磁化を回転または反転させて記録動作を実行するようにしたことを特徴とする不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

【 請求項 2 】

( 削除 )

## 【請求項 3】

(削除)

## 【請求項 4】

前記記録層及び前記金属電極層は互いに符号の異なる電荷の蓄積層として機能するとともに、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより前記操作を行なうことを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 5】

前記記録層はチャンネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加することにより、前記操作を行うことを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 6】

(削除)

## 【請求項 7】

(削除)

## 【請求項 8】

(削除)

## 【請求項 9】

前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする請求項 1、4 又は 5 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 10】

前記記録層として異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造を用いることを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 11】

前記操作が光照射によって行なわれることを特徴とする請求項 1 記載の不揮発性固体磁気メモリの記録方法。

## 【請求項 12】

(a) 基板と、  
(b) 該基板上に形成される膜面内に磁化容易軸をもつ、I V 族、I I I - V 族、I I - V I 族、I I - V I - V<sub>2</sub> 族、酸化物半導体に遷移金属元素または希土類金属元素をドーピングしたキャリア誘起強磁性半導体層からなる記録層と、  
(c) 該記録層上に形成される電氣的絶縁層と、  
(d) 該電氣的絶縁層上に形成される金属電極層とを備え、  
(e) 前記電氣的絶縁層は前記金属電極層と前記キャリア誘起強磁性半導体層からなる記録層の接合によって生じるショットキー障壁であり、かつ、  
(f) 電界効果型トランジスタ構造を呈し、前記記録層はチャンネル層として機能するとともに、前記金属電極層はゲート電極として機能し、電圧を前記記録層と前記金属電極層間に印加する手段とを具備することを特徴とする不揮発性固体磁気メモリ。

## 【請求項 13】

(削除)

## 【請求項 14】

(削除)

## 【請求項 15】

(削除)

## 【請求項 16】

(削除)

## 【請求項 17】

前記基板と前記記録層との間にバッファ層を有することを特徴とする請求項 12 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

## 【請求項 18】

前記記録層が異種磁性体同士の複合構造、非磁性体との複合構造であることを特徴とする

請求項 1 2 記載の不揮発性固体磁気メモリ。

## 【 国際調査報告 】

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2008/068044

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER H01L21/8246(2006.01)i, G11C11/15(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L29/82(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) H01L21/8246, G11C11/15, H01L27/105, H01L29/82, H01L43/08		
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 1996-2008 Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2008 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2008		
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 2003-007980 A (Sony Corp.), 10 January, 2003 (10.01.03), Full text & US 2003/0012050 A1	1-7, 10, 12-15, 18 9, 17 8, 11, 16
X A	JP 2005-011907 A (Japan Science and Technology Agency), 13 January, 2005 (13.01.05), Full text (Family: none)	1, 2, 6, 7, 11 3-5, 8-10, 12-18
Y A	JP 2004-055866 A (President of Tohoku University), 19 February, 2004 (19.02.04), Full text & US 2004/0085827 A1 & EP 1385203 A2	9, 12-18 1-8, 10, 11
<input checked="" type="checkbox"/> Further documents are listed in the continuation of Box C. <input type="checkbox"/> See patent family annex.		
* Special categories of cited documents: "A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance "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 25 December, 2008 (25.12.08)		Date of mailing of the international search report 13 January, 2009 (13.01.09)
Name and mailing address of the ISA/ Japanese Patent Office		Authorized officer
Facsimile No.		Telephone No.

## INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2008/068044

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT		
Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2006-286713 A (Osaka University), 19 October, 2006 (19.10.06), Par. Nos. [0056] to [0060]; Fig. 3 (Family: none)	12-18 1-11
A	JP 2003-197920 A (Toshiba Corp.), 11 July, 2003 (11.07.03), Full text & US 2005/0012129 A1	1-18
A	JP 2006-179891 A (Korea Advanced Institute of Science and Technology), 06 July, 2006 (06.07.06), Full text & US 2006/0133137 A1 & KR 10-2006-0071955 A	1-18
A	WO 2004/023563 A1 (Japan Science and Technology Agency), 18 March, 2004 (18.03.04), Full text & US 2006/0017080 A1 & EP 1548843 A1 & WO 2004/023563 A1	1-18
P,X	D. Chiba et al., Magnetization vector manipulation by electric fields, nature, 2008. 09.25, Vol.455, p.515-518	1-7,9,12-15, 17



国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 0 8 / 0 6 8 0 4 4	
A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (IPC)) Int.Cl. H01L21/8246(2006.01)i, G11C11/15(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L29/82(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. H01L21/8246, G11C11/15, H01L27/105, H01L29/82, 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 1971-2008年 日本国実用新案登録公報 1996-2008年 日本国登録実用新案公報 1994-2008年			
国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号	
X Y A	JP 2003-007980 A (ソニー株式会社) 2003.01.10, 全文 & US 2003/0012050 A1	1-7, 10, 12-15 , 18 9, 17 8, 11, 16	
X A	JP 2005-011907 A (独立行政法人 科学技術振興機構) 2005.01.13, 全文 (ファミリーなし)	1, 2, 6, 7, 11 3-5, 8-10, 12- 18	
<input checked="" type="checkbox"/> C欄の続きにも文献が列挙されている。 <input type="checkbox"/> パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「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 25.12.2008		国際調査報告の発送日 13.01.2009	
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) 川村 裕二	4M 3349
		電話番号 03-3581-1101 内線	3462

国際調査報告		国際出願番号 PCT/J P 2 0 0 8 / 0 6 8 0 4 4
C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求の範囲の番号
Y A	JP 2004-055866 A (東北大学長) 2004.02.19, 全文 & US 2004/0085827 A1 & EP 1385203 A2	9,12-18 1-8,10,11
Y A	JP 2006-286713 A (国立大学法人大阪大学) 2006.10.19, 段落【0056】-【0060】, 図3 (ファミリーなし)	12-18 1-11
A	JP 2003-197920 A (株式会社東芝) 2003.07.11, 全文 & US 2005/0012129 A1	1-18
A	JP 2006-179891 A (コリア アドバンスト インスティテュート オ ブ サイエンス アンド テクノロジー) 2006.07.06, 全文 & US 2006/0133137 A1 & KR 10-2006-0071955 A	1-18
A	WO 2004/023563 A1 (独立行政法人科学技術振興機構) 2004.03.18, 全文 & US 2006/0017080 A1 & EP 1548843 A1 & WO 2004/023563 A1	1-18
P, X	D. Chiba et al., Magnetization vector manipulation by electric fields, nature, 2008.09.25, Vol.455, p.515-518	1-7,9,12-15, 17

## フロントページの続き

(51) Int.Cl. F I テーマコード(参考)  
**H 0 1 F 10/193 (2006.01)** H 0 1 F 10/193

(81) 指定国 AP(BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), EA(AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), EP(AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OA(BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG), AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW

(72) 発明者 千葉 大地

日本国宮城県仙台市青葉区片平二丁目 1 番 1 号 国立大学法人東北大学内

Fターム(参考) 4M119 AA01 AA03 AA06 AA09 AA11 BB20 CC07 CC09 DD05  
 5E049 AA10 AC05 BA30 CB01 DB12  
 5F092 AA01 AB06 AC04 AD24 BB46 GA03

(注) この公表は、国際事務局(WIPO)により国際公開された公報を基に作成したものである。なおこの公表に係る日本語特許出願(日本語実用新案登録出願)の国際公開の効果は、特許法第184条の10第1項(実用新案法第48条の13第2項)により生ずるものであり、本掲載とは関係ありません。