

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第4538614号
(P4538614)

(45) 発行日 平成22年9月8日(2010.9.8)

(24) 登録日 平成22年7月2日(2010.7.2)

(51) Int.Cl.		F I	
HO 1 L 43/08 (2006.01)		HO 1 L 43/08	Z
HO 1 L 21/8246 (2006.01)		HO 1 L 27/10	4 4 7
HO 1 L 27/105 (2006.01)		G 1 1 C 11/15	1 1 2
G 1 1 C 11/15 (2006.01)			

請求項の数 8 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2007-267238 (P2007-267238)	(73) 特許権者	000003078 株式会社東芝 東京都港区芝浦一丁目1番1号
(22) 出願日	平成19年10月12日(2007.10.12)	(73) 特許権者	301021533 独立行政法人産業技術総合研究所 東京都千代田区霞が関1-3-1
(65) 公開番号	特開2009-99628 (P2009-99628A)	(74) 代理人	100058479 弁理士 鈴江 武彦
(43) 公開日	平成21年5月7日(2009.5.7)	(74) 代理人	100091351 弁理士 河野 哲
審査請求日	平成20年12月25日(2008.12.25)	(74) 代理人	100088683 弁理士 中村 誠
(出願人による申告)平成19年度独立行政法人新エネルギー・産業技術総合開発機構「スピントロニクス不揮発性機能技術プロジェクト」委託研究、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(74) 代理人	100108855 弁理士 蔵田 昌俊

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 磁気抵抗効果素子の設計方法及び磁気ランダムアクセスメモリの設計方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

膜面に対して垂直方向を向く第1の磁化を有する固定層と、膜面に対して垂直方向を向く第2の磁化を有し、磁化の方向を反転可能な記録層と、前記固定層および前記記録層間に設けられた非磁性層を具備する磁気抵抗効果素子の設計方法であって、

前記記録層の磁性材料の飽和磁化を M_s 、磁気異方性定数を K_u 、交換スティフネス係数を A 、前記記録層の膜厚を t 、前記磁気抵抗効果素子の素子直径を D 、真空の透磁率を μ_0 、 N_a を反磁界係数とした際に、前記素子直径 D が以下の条件式 (i)、(ii) を満たすことを特徴とする磁気抵抗効果素子の設計方法。

【数1】

$$D < \frac{24\mu_0}{M_s^2 N_a} \sqrt{AK_u} \quad \dots (i)$$

【数2】

$$N_a = \frac{(2D/3t)^2}{(2D/3t)^2 - 1} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}}{2D/3t} \right) \right] \quad \dots (ii)$$

【請求項2】

膜面に対して垂直方向を向く第1の磁化を有する固定層と、膜面に対して垂直方向を向

く第2の磁化を有し、磁化の方向を反転可能な記録層と、前記固定層および前記記録層間に設けられた非磁性層を具備する磁気抵抗効果素子の設計方法であって、

前記記録層の磁性材料の飽和磁化を M_s 、磁気異方性定数を K_u 、交換スティフネス係数を A 、前記記録層の膜厚を t 、前記磁気抵抗効果素子の素子直径を D 、真空の透磁率を μ_0 、 N_a を反磁界係数とした際に、前記素子直径 D が以下の条件式 (iii)、(iv) を満たすことを特徴とする磁気抵抗効果素子の設計方法。

【数3】

$$D < \frac{6}{K_u - \frac{M_s^2}{2\mu_0} \left(N_a - \frac{1}{2} \right)} \sqrt{AK_u} \quad \dots \text{(iii)}$$

10

【数4】

$$N_a = \frac{(2D/3t)^2}{(2D/3t)^2 - 1} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}}{2D/3t} \right) \right] \quad \dots \text{(iv)}$$

【請求項3】

前記記録層が、Fe, Co, Niのうち1つ以上の元素と、Pt, Pdのうち1つ以上の元素を含む磁性合金からなることを特徴とする請求項1または2に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法。

20

【請求項4】

前記記録層が少なくとも2層以上の磁性層から構成され、前記磁性層の一つはFe, Co, Niのうち一つ以上の元素と、Pt, Pdのうち一つ以上の元素を含む磁性合金からなり、前記磁性層の他の一つはFe, Co, Ni, Bのうち一つ以上の元素を含む磁性合金からなることを特徴とする請求項1または2に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法。

【請求項5】

前記記録層が、磁性材料と非磁性材料が少なくとも1層以上交互に積層された構造を持ち、前記磁性材料がFe, Co, Niのうち一つ以上の元素を含む合金であることを特徴とする請求項1または2に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法。

【請求項6】

前記記録層が、磁性材料と非磁性材料が少なくとも1層以上交互に積層された構造を持ち、前記磁性材料がCo, FeとBを含む合金であることを特徴とする請求項1または2に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法。

30

【請求項7】

磁気抵抗効果素子を記憶素子として含むメモリセルを複数個備えたメモリセルアレイと、
前記メモリセルに対して双方向に電流を供給する電流供給回路と、
を具備する磁気ランダムアクセスメモリの設計方法であって、
前記磁気抵抗効果素子は、請求項1に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法を用いて設計することを特徴とする磁気ランダムアクセスメモリの設計方法。

40

【請求項8】

磁気抵抗効果素子を記憶素子として含むメモリセルを複数個備えたメモリセルアレイと、
前記メモリセルに対して双方向に電流を供給する電流供給回路と、
を具備する磁気ランダムアクセスメモリの設計方法であって、
前記磁気抵抗効果素子は、請求項2に記載の磁気抵抗効果素子の設計方法を用いて設計することを特徴とする磁気ランダムアクセスメモリの設計方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

50

本発明は、磁気抵抗効果素子の設計方法及び磁気ランダムアクセスメモリの設計方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来から、様々のタイプの固体磁気メモリが提案されている。近年では、巨大磁気抵抗 (GMR: Giant Magneto Resistive) 効果を示す磁気抵抗素子を用いた磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM: Magnetic Random Access Memory) が提案されており、特に、トンネル磁気抵抗 (TMR: Tunneling Magneto Resistive) 効果を示す強磁性トンネル接合を用いた磁気ランダムアクセスメモリに注目が集まっている。

【0003】

強磁性トンネル接合のMTJ (Magnetic Tunnel Junction) 素子は、主に、第1の強磁性層/絶縁層/第2の強磁性層の3層膜で構成されている。そして、読み出し時に、絶縁層をトンネルして電流が流れる。この場合、接合抵抗値は、第1及び第2の強磁性層の磁化の相対角の余弦に応じて変化する。従って、接合抵抗値は、第1及び第2の強磁性層の磁化が平行のときに極小値、反平行のときに極大値をとる。これを、上述するTMR効果と呼ぶ。このTMR効果による抵抗値の変化は、室温において300%を超える場合もある。

【0004】

強磁性トンネル接合をメモリセルとして含む磁気メモリ素子においては、少なくとも1つの強磁性層を基準層(あるいは固定層、参照層、ピン層)とみなして、その磁化方向を固定し、他の強磁性層を記録層(あるいは磁気記録層、自由層、可変層)とする。このセルにおいて、基準層と記録層の磁化の配置が平行又は反平行に対し、2進情報の“0”, “1”を対応づけることで情報が記憶される。記録情報の書き込みは、このセルに対し別に設けた書き込み配線に電流を流して発生する磁場により記憶層の磁化を反転させる。または、素子に直接通電することにより、基準層から注入されるスピントルクにより記憶層の磁化を反転させる。読み出しは、強磁性トンネル接合に電流を流し、TMR効果による抵抗変化を検出することで行われる。このようなメモリセルを多数配置することで磁気メモリが構成される。実際の構成については、任意のセルを選択できるように、例えばDRAM同様に各セルに対しスイッチングトランジスタを配置し、周辺回路を組み込んで構成される。

【0005】

上述したスピントルクを利用した磁気メモリ素子としては、磁化が膜面方向を向いた面内磁化型のものが知られている。しかしながら、面内磁化型の磁気メモリ素子では、ハードディスク媒体で用いられているようなCo-Cr系合金を用いた面内媒体を用いる場合には、結晶軸が膜面内で回転してしまうために、膜面内方向の磁気異方性が大きく分散してしまう為、大容量メモリにおいては、素子間の特性にばらつきが生じ、望ましくない。

【0006】

一方、垂直磁化を持つ磁気記録層を用いた磁気メモリ素子が提案されている(例えば、特許文献1参照)。垂直磁化を持つ材料を用いると、結晶軸は膜面に垂直方向にあるため、結晶粒が膜面内で回転しても、面に垂直の方向の磁気異方性にばらつきを生じない。このため、垂直磁化型の磁気抵抗素子を用いることで、特性にバラつきが少ないメモリを実現できる優位性がある。

【0007】

しかしながら、垂直磁化膜を使用する場合の問題点として、多磁区状態の存在が挙げられる。一般に垂直磁化膜は、大きな磁気異方性を持つために磁壁幅が狭くなる。また、磁化が膜面に対して垂直方向を向いているために、磁区形成による静磁エネルギーの利得が大きい。これらの性質により、垂直磁化膜を用いた磁気抵抗効果素子では、多磁区状態が安定状態として残りやすく、中間値状態の発生などが課題として残されていた。

【0008】

さらに、大容量メモリを実現するには、素子を微細化し、チップ内におけるセル占有度

10

20

30

40

50

を上昇させることが必要となるが、一般にメモリセルの熱擾乱耐性は、素子の持つ磁気異方性と素子体積により決定されるため、素子を微細化すると、熱擾乱耐性が小さくなり、十分な記録保持特性が得られない問題がある。上述したように多磁区状態が存在すると、この多磁区状態が準安定状態となって実効的な熱擾乱耐性の低下等がさらに顕在化するという問題もある。

【特許文献1】特開2002-261352号公報

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明は、熱擾乱耐性が向上し、中間値状態の発生を抑制することが可能な磁気抵抗効果素子の設計方法及び磁気ランダムアクセスメモリの設計方法を提供することを目的とする。

10

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の第1の磁気抵抗効果素子の設計方法は、膜面に対して垂直方向を向く第1の磁化を有する固定層と、膜面に対して垂直方向を向く第2の磁化を有し、磁化の方向を反転可能な記録層と、前記固定層および前記記録層間に設けられた非磁性層を具備する磁気抵抗効果素子の設計方法であって、

前記記録層の磁性材料の飽和磁化を M_s 、磁気異方性定数を K_u 、交換スティフネス係数を A 、前記記録層の膜厚を t 、前記磁気抵抗効果素子の素子直径を D 、真空の透磁率を μ_0 、 N_a を反磁界係数とした際に、前記素子直径 D が以下の条件式(i)、(ii)を満たすことを特徴とする。

20

【0011】

【数5】

$$D < \frac{24\mu_0}{M_s^2 N_a} \sqrt{AK_u} \quad \dots (i)$$

【0012】

【数6】

$$N_a = \frac{(2D/3t)^2}{(2D/3t)^2 - 1} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}}{2D/3t} \right) \right] \quad \dots (ii)$$

30

【0013】

本発明の第2の磁気抵抗効果素子の設計方法は、膜面に対して垂直方向を向く第1の磁化を有する固定層と、膜面に対して垂直方向を向く第2の磁化を有し、磁化の方向を反転可能な記録層と、前記固定層および前記記録層間に設けられた非磁性層を具備する磁気抵抗効果素子の設計方法であって、

40

前記記録層の磁性材料の飽和磁化を M_s 、磁気異方性定数を K_u 、交換スティフネス係数を A 、前記記録層の膜厚を t 、前記磁気抵抗効果素子の素子直径を D 、真空の透磁率を μ_0 、 N_a を反磁界係数とした際に、前記素子直径 D が以下の条件式(iii)、(iv)を満たすことを特徴とする。

【0014】

【数 7】

$$D < \frac{6}{K_u - \frac{M_s^2}{2\mu_0} \left(N_a - \frac{1}{2} \right)} \sqrt{AK_u} \quad \dots \text{(iii)}$$

【0015】

【数 8】

$$N_a = \frac{(2D/3t)^2}{(2D/3t)^2 - 1} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}}{2D/3t} \right) \right] \quad \dots \text{(iv)} \quad 10$$

【0016】

本発明の第1の磁気ランダムアクセスメモリは、本発明の第1の磁気抵抗効果素子を記憶素子として含むメモリセルを複数個備えたメモリセルアレイと、前記メモリセルに対して双方向に電流を供給する電流供給回路とを具備することを特徴とする。

【0017】

本発明の第2の磁気ランダムアクセスメモリは、本発明の第2の磁気抵抗効果素子を記憶素子として含むメモリセルを複数個備えたメモリセルアレイと、前記メモリセルに対して双方向に電流を供給する電流供給回路とを具備することを特徴とする。 20

【発明の効果】

【0018】

本発明によれば、熱擾乱耐性が向上し、中間値状態の発生を抑制することが可能な磁気抵抗効果素子の設計方法及び磁気ランダムアクセスメモリの設計方法を提供することが可能である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0019】

以下、図面を参照して本発明の実施形態について説明する。説明に際し、全図にわたり、共通する部分には共通する参照符号を付す。 30

【0020】

まず、本発明の実施形態の磁気抵抗効果素子について説明する。本発明の実施形態の特徴は、記録層を構成する材料が持つ磁気異方性定数 K_u 、飽和磁化 M_s 、交換スティブネス係数 A 、記録層の膜厚 t を用いて、記録層の単磁区臨界直径 D_{s^*} および単磁区反転臨界直径 D_s を導出し、それに応じて最適な素子直径 D を決定することである。ここで、膜面上方から見たとき、記録層を含む磁気抵抗効果素子はほぼ円形形状を有する。素子直径 D とは、膜面上方から見たときの磁気抵抗効果素子の直径、すなわち記録層の直径をさす。また、以降に示す磁気抵抗効果素子において、記録保持状態の磁化は基本的に膜面に対して垂直方向である。

【0021】

[1] 単磁区臨界直径 D_{s^*}

まず、記録層の単磁区臨界直径 D_{s^*} について述べる。ここで、単磁区臨界直径 D_{s^*} は記録保持状態において単磁区状態が唯一の安定解である臨界直径として定義される。

【0022】

図1(a)、図1(b)は、記録保持状態の磁気抵抗効果素子における記録層の磁区状態を示す図である。単磁区臨界直径 D_{s^*} を導出するには、単磁区状態(図1(a)参照)のエネルギー E_s と二磁区状態(図1(b)参照)のエネルギー E_d の差をとり、 E_s が E_d を常に下回る臨界直径を求めればよい。一般に磁性体のエネルギーは、材料がもつ磁気異方性エネルギー、静磁エネルギー、磁壁エネルギーの和によって表される。まず、磁気異方性エネルギーは磁性体の体積を V として、 $K_u V$ で表される。単磁区状態と二磁 40 50

区状態では、それぞれの全磁化は材料がもつ一軸性の異方性軸と平行であるから、同一の磁気異方性エネルギーをもつ。次に、静磁エネルギーは磁性体の形状を反映した反磁界係数 N_a 、と飽和磁化 M_s の二乗と磁性体の体積 V の積で表される。反磁界係数 N_a は磁性体の円柱状形状を回転楕円体と近似することで解析的に計算することができる。このとき、近似に用いる回転楕円体の長軸方向直径は素子直径 D と同一であり、短軸方向直径は磁性体膜厚を t として $(3/2)t$ で表される。短軸方向直径の係数 $3/2$ は、近似した回転楕円体の体積と、円柱状の磁性体体積を同一とするための補正係数である。以上に述べた回転楕円体で近似することにより、磁性体の反磁界係数は以下の式 (1) で表される。

【 0 0 2 3 】

【数 9】

$$N_a = \frac{(2D/3t)^2}{(2D/3t)^2 - 1} \left[1 - \frac{1}{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}} \arcsin \left(\frac{\sqrt{(2D/3t)^2 - 1}}{2D/3t} \right) \right] \quad \dots (1)$$

10

【 0 0 2 4 】

最後に、磁壁エネルギーは、磁壁の面積を S として、 $4(AKu)^{0.5}S$ で表される。ここで、 A は交換スティフネス係数である。結晶軸と磁化方向が一致している場合には、磁気異方性エネルギー KuV は 0 となり、 E_s と E_d は以下のように表される。まず、単磁区状態のエネルギー E_s は、磁壁が存在していないことから、静磁エネルギーのみで表され、以下の式 (2) のように表される。

20

【 0 0 2 5 】

【数 1 0】

$$E_s = N_a \frac{M_s^2}{2\mu_0} V \quad \dots (2)$$

【 0 0 2 6 】

ここで、 μ_0 は真空透磁率である。

【 0 0 2 7 】

次に、二磁区状態のエネルギー E_d は以下の式 (3) のように表される。

30

【 0 0 2 8 】

【数 1 1】

$$E_d = \frac{N_a}{2} \frac{M_s^2}{2\mu_0} V + 4\sqrt{AK_u} S \quad \dots (3)$$

【 0 0 2 9 】

式 (3) において第一項は、静磁エネルギーを表し、第二項は磁壁エネルギーを表す。 V は素子の体積であり、 S は反磁界係数の計算に用いた回転楕円体の回転軸に対して平行かつ中心を通る断面の面積である。一般的に二磁区状態においては、二つの磁区の体積が同一である場合が最も静磁エネルギーが小さくなり、安定状態となる。式 (3) の第一項が式 (2) に対して半分となる理由は、二つの同一の体積を持つ磁区が形成されることにより、反磁界の影響が半分となるためである。

40

【 0 0 3 0 】

単磁区臨界直径 D_{s^*} はエネルギー E_s と E_d が等しくなる直径であるから、式 (1) と式 (2) を連立して解くことにより、単磁区臨界直径 D_{s^*} は式 (4) のように表される。

【 0 0 3 1 】

【数 1 2】

$$D_s^* = \frac{24\mu_0}{N_a M_s^2} \sqrt{AK_u} \quad \dots (4)$$

【0032】

本発明の第1実施形態は、垂直磁化をもつ材料の磁気異方性定数 K_u 、飽和磁化 M_s と交換スティフネス係数 A に応じて式(4)より単磁区臨界直径 D_s^* を導出し、 D_s^* 未満の直径を持つように、磁気抵抗効果素子を微細加工することで、中間値状態が発生しない垂直磁化型の磁気抵抗効果素子が形成できる。

10

【0033】

また、第2実施形態は、磁気抵抗効果素子の加工精度などの観点から決定される素子直径に応じて、単磁区臨界直径 D_s^* が素子直径よりも大きくなるような K_u 、 M_s と A を材料パラメータとしてもつ磁性材料を用いた磁気抵抗効果素子である。図2に例として、単磁区臨界直径 D_s^* を 80 nm とするのに必要な磁気異方性定数 K_u および飽和磁化 M_s を示す。このとき、交換スティフネス係数 A は $5 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 、記録層の膜厚 t は 2 nm として計算を行った。

【0034】

また、図2には合わせて、垂直条件である $K_u = 2 M_s^2$ を示した。これは膜面内に対して垂直方向の磁化を保つ為に必要な条件であり、磁気異方性定数 K_u が右辺に対して大きければ良い。式(4)からわかるように、磁気異方性定数 K_u を大きくするか、交換結合を大きくするか(交換スティフネス係数 A を大きくするか)、飽和磁化 M_s を小さくすることにより、単磁区臨界直径 D_s^* は増大する。一方で垂直条件を満たすには、図2における線に対して K_u を大きくするか、 M_s を小さくすればよい。

20

【0035】

これらの条件から垂直方向の磁化を保ちつつ、単磁区臨界直径 D_s^* を 80 nm 以上に保つことが可能な材料パラメータ K_u および M_s は、図2の斜線部の範囲に含まれていればよい。逆に言えば、この斜線部に含まれる K_u および M_s をもつ材料を用いて磁気抵抗効果素子を作成する場合、 80 nm 未満の直径に微細加工することにより、磁気記録状態において単磁区状態が唯一の安定解となり、中間値状態が発生しないことが保証される。

30

【0036】

[2] 単磁区反転臨界直径 D_s

次に、記録層の単磁区反転臨界直径 D_s について述べる。ここで、単磁区反転臨界直径 D_s は記録保持状態において単磁区状態が唯一の安定解であり、さらに磁化反転過程においても、常に単磁区状態を保つ臨界直径として定義される。図3(a)に、磁場反転過程において二磁区状態を経由する場合の、系がもつエネルギーのZ方向磁化 M_z に対する依存性を示す。Z方向磁化 M_z が -1 および $+1$ が、それぞれ記録情報 0 および 1 に対応する。磁場反転過程において二磁区状態を経由する場合、Z方向磁化 M_z が -1 から $+1$ に変化する際に、一方の磁区が傾いた状態でエネルギー最大値をとり、Z方向磁化 M_z がゼロの場合にエネルギーの極小をもつ。このとき記録層は、二磁区状態となりエネルギー E_d をもち、二つの磁区は互いに反平行の向きを持つ。

40

【0037】

一方、図3(b)に磁化反転過程において常に単磁区状態を持つ場合の、系がもつエネルギーのZ方向磁化 M_z に対する依存性を示す。この場合にはZ方向磁化 M_z が -1 から $+1$ に変化する際に、エネルギーが最大値をとるのはZ方向磁化 M_z がゼロの場合である。このとき、記録層の磁化は単磁区状態でかつ困難軸方向を向き、エネルギー E_h をもつ。したがって、磁化反転過程において常に単磁区状態を保つためには、単磁区状態で磁化が困難軸を向いた場合のエネルギー E_h と多磁区(二磁区)状態のエネルギー E_d の差をとり、 E_h が E_d を常に下回る臨界直径を求めればよい。 E_h が、磁区を形成した場合のエネルギーの極小点である E_d よりも小さければ、磁化反転中にも常に単磁区状態を保つ

50

ことが保証されるからである。回転楕円体モデルを用いた場合、 E_h は単磁区状態のエネルギーを記述するStoner-Worlfarthモデルにより以下の式(5)で表される。

【0038】

【数13】

$$E_h = K_u V + \left(\frac{1 - N_a}{2} \right) \frac{M_s^2}{2\mu_0} V \quad \dots (5)$$

【0039】

式(5)において第一項は磁化が困難軸方向を向いた場合の磁気異方性エネルギーを表し、第二項は磁化が困難軸方向を向いた場合の静磁エネルギーを表す。 10

【0040】

E_d は前述したのと同様に記述され以下の式(6)で表される。

【0041】

【数14】

$$E_d = \frac{N_a M_s^2}{2 \cdot 2\mu_0} V + 4\sqrt{AK_u} S \quad \dots (6)$$

【0042】

単磁区反転臨界直径 D_s はエネルギー E_h と E_d が等しくなる直径であるから、式(5)と式(6)を連立して解くことにより、単磁区反転臨界直径 D_s は式(7)のように表される。 20

【0043】

【数15】

$$D_s = \frac{6}{K_u - \frac{M_s^2}{2\mu_0} \left(N_a - \frac{1}{2} \right)} \sqrt{AK_u} \quad \dots (7)$$

【0044】

ここで、単磁区反転臨界直径 D_s と単磁区臨界直径 D_s^* の磁気抵抗効果素子に与える影響を、図4を用いて示す。図4は、磁気異方性定数 $K_u = 3 \times 10^6$ erg/cc、飽和磁化 $M_s = 500$ emu/cc、交換スティフネス係数 $A = 1 \times 10^{-6}$ erg/cm、記録層の膜厚 $t = 2$ nm の材料パラメータを用いて計算された、単磁区困難軸状態(磁化が困難軸と平行)のエネルギー密度、単磁区容易軸状態(磁化が容易軸と平行)のエネルギー密度、および二磁区状態のエネルギー密度の素子直径依存性を示している。 30

【0045】

素子直径が小さくなると、まず単磁区臨界直径 D_s^* において、単磁区容易軸状態のエネルギー密度曲線と二磁区状態のエネルギー密度曲線が交差し、単磁区臨界直径 D_s^* 未満の素子直径では、常に単磁区容易軸状態のエネルギーが低くなる。これは、単磁区臨界直径 D_s^* 未満の素子直径をもつ磁気抵抗効果素子においては、記録保持状態で二磁区状態を安定状態として取りえないことを示しており、中間値状態が存在しないことを保証するものである。 40

【0046】

さらに、素子直径が小さくなると、単磁区困難軸状態のエネルギー密度曲線と、二磁区状態のエネルギー密度曲線が単磁区反転臨界直径 D_s で交差し、 D_s 未満の素子直径においては常に単磁区困難軸状態のエネルギーが、二磁区状態のエネルギーよりも低くなる。これは、単磁区反転臨界直径 D_s 未満の素子直径においては、磁化反転途中においても常に単磁区状態を保ちつつ、磁化反転が行われることを示している。

【0047】

前述したように、Stoner-Wohlfarthモデルによると単磁区状態の反転が起こる場合は、磁化が困難軸を向いた状態でエネルギーが最も高くなり、エネルギーバリアはKuVで与えられる。このエネルギーバリアは磁気異方性定数Kuが決定されたときに理論的に予測される最も大きなエネルギーバリアに相当し、十分な熱擾乱耐性が磁気抵抗効果素子に与えられる。したがって、単磁区反転臨界直径Ds未満の素子直径をもつ磁気抵抗効果素子においては、記録状態において中間値状態が存在しないことを保証され、かつ材料から予測されるもっとも大きな熱擾乱耐性を持つことが保証されるものである。

【0048】

本発明の第3実施形態は、垂直磁化をもつ材料の磁気異方性定数Ku、飽和磁化Msと交換ステイフネス係数Aに応じて式(7)より単磁区反転臨界直径Dsを導出し、Ds以下の直径を持つように微細加工する。これにより、中間値状態が発生せず、十分な熱擾乱耐性をもつ垂直磁化型の磁気抵抗効果素子が形成できる。

10

【0049】

また、第4実施形態は、磁気抵抗効果素子の加工精度などの観点から決定される素子直径に応じて、単磁区反転臨界直径Dsが素子直径よりも大きくなるような、Ku、MsとAを材料パラメータとしてもつ磁性材料を用いた磁気抵抗効果素子である。

【0050】

図5に例として、単磁区反転臨界直径Dsを65nmとするのに必要な磁気異方性定数Kuおよび飽和磁化Msを示す。このとき、交換ステイフネス係数は 5×10^{-7} erg/cc、記録層の膜厚tは2nmとして計算を行った。また、図5には、合わせて前述した垂直条件である $Ku = 2 Ms^2$ を示している。式(7)からわかるように、Kuを小さくするか、交換結合を大きくするか(交換ステイフネス係数Aを大きくするか)、Msを大きくすることにより、単磁区反転臨界直径Dsは増大する。一方で垂直条件を満たすには、図5における垂直条件に対してKuを大きくするか、Msを小さくすればよい。これらの条件から垂直方向の磁化を保ちつつ、単磁区反転臨界直径Dsを65nm以上に保つことが可能な材料パラメータKuおよびMsは図5の斜線部の範囲に含まれていればよい。逆に言えば、この斜線部に含まれるKuおよびMsをもつ材料を用いて磁気抵抗素子を作成する場合、65nm未満に微細加工することにより、磁気記録状態において単磁区状態が唯一の安定解となり、中間値状態が発生せず、十分な熱擾乱耐性をもつことが保証される。

20

【0051】

[3] 合金磁気記録層

図6に、磁気抵抗効果素子の記録層として磁性合金を用いた構成例を示す。磁気抵抗効果素子10は、固定層11、非磁性層12、及び記録層13から構成されている。固定層11上には非磁性層12が形成され、この非磁性層12上には記録層13が形成されている。

30

【0052】

この構成において記録層13は、Fe, Co, Niのうち1つ以上の元素と、Pt, Pdのうち1つ以上の元素からなり、膜面垂直方向に磁化をもつ合金で構成される。例えば、L10型の規則合金FePdを用いる場合は、磁気異方性定数Kuは 2.0×10^6 erg/cc、飽和磁化Msは500 emu/cc、交換ステイフネス係数Aは 5×10^{-7} erg/cm程度、記録層の膜厚tは2nmである。この材料パラメータから式(4)と式(7)より計算される単磁区臨界直径Ds*および単磁区反転臨界直径Dsは、記録層13の膜厚が3nmの場合、それぞれ83nmおよび42nmである。従って、磁気抵抗効果素子10の素子直径を83nm未満にすることにより、中間値状態を抑制することができる。また、素子直径を42nm未満にすることで、材料が持つ最大の熱擾乱耐性を実現することができる。

40

【0053】

記録層の膜厚を変化させた場合についても、式(4)と式(7)より単磁区臨界直径Ds*および単磁区反転臨界直径Dsを計算し、それぞれの値以下に素子直径を設定することで、理想的な磁気抵抗効果素子を作成することができる。L10型の規則合金FePt

50

を用いる場合は、磁気異方性定数 K_u は 8.0×10^6 erg/cc、飽和磁化 M_s は 1000 e mu/cc、交換スティフネス係数 A は 5×10^{-7} erg/cm 程度である。この材料パラメータから式(4)と式(7)より計算される単磁区臨界直径 D_{s^*} および単磁区反転臨界直径 D_s は、記録層13の膜厚が 3 nm の場合、それぞれ 44.5 nm および 18 nm である。従って、磁気抵抗効果素子10の素子直径を 44.5 nm 未満にすることにより、中間値状態を抑制することができる。また、素子直径を 18 nm 未満にすることで、材料が持つ最大の熱擾乱耐性を実現することができる。

【0054】

[4] 合金積層磁気記録層

図7に、磁気抵抗効果素子の記録層として磁性合金の積層構造を用いた構成例を示す。磁気抵抗効果素子20は、固定層11、非磁性層12、及び記録層21から構成されている。固定層11上には非磁性層12が形成され、この非磁性層12上には記録層21が形成されている。記録層21は、非磁性層12上に形成された磁性層21Aと、この磁性層21A上に形成された磁性層21Bとの積層構造から形成されている。

10

【0055】

この構成において磁性層21Bは、Fe, Co, Niのうち1つ以上の元素と、Pt, Pdのうち1つ以上の元素を含み、膜面垂直方向に磁化をもつ合金で構成される。また、磁性層21Aは、Fe, Co, Ni, Bのうち一つ以上の元素を含む合金で構成される。例えば、図8中の磁性層21BとしてL10型の規則合金FePdもしくはFePtを用い、磁性層21AとしてCoFeB合金もしくはFeを用いる場合は、磁気異方性定数 K_u は 1.8×10^6 erg/cc 程度であり、飽和磁化 M_s は 500 emu/cc、交換スティフネス係数 A は 5×10^{-7} erg/cm 程度である。この材料パラメータから式(4)と式(7)より計算される単磁区臨界直径 D_{s^*} および単磁区反転臨界直径 D_s は、磁性層21Aと磁性層21Bの膜厚の和が 3 nm の場合、それぞれ 79 nm および 46 nm である。従って、磁気抵抗効果素子20の素子直径を 79 nm 未満にすることにより、中間値状態を抑制することができる。また、素子直径を 46 nm 未満にすることで、材料が持つ最大の熱擾乱耐性を実現することができる。

20

【0056】

図8(a), 図8(b)に磁性層21BとしてFePt合金、磁性層21AとしてFeを用いた磁気抵抗効果素子を試作した場合の、抵抗の磁場依存性を示した。図8(a)が素子直径 60 nm、図8(b)が素子直径 95 nm の場合を示す。まず、素子直径が 60 nm の場合は、高抵抗状態(反平行磁化状態)から初めて、負の方向に磁場を印加することで低抵抗状態(平行磁化状態)に変化する。その後、正の方向に磁場を印加することで、再び高抵抗状態に変化する。それぞれの抵抗変化は極めて急峻であり、素子直径が 60 nm の場合には平行状態と反平行状態の二種類しか安定状態が存在しないことを示している。

30

【0057】

一方、素子直径が 95 nm の場合には、図8(b)に示すように、高抵抗状態から始めて、負の方向に磁場を印加して低抵抗状態になる際にステップ状の抵抗変化を示す。図8(b)の点線は、負の方向に磁場を印加していきステップを示した磁場で一旦、磁場印加を中止し、再び正方向に磁場を印加していった場合の抵抗の磁場依存性を示している。このとき、抵抗が丁度高抵抗状態(反平行磁化状態)と低抵抗状態(平行磁化状態)のほぼ中間の値で安定な領域が存在する。これは、素子直径が 95 nm の場合には、二磁区状態が安定状態として存在することを示している。ここで前述したように、この系における単磁区臨界直径 D_{s^*} は 79 nm であることから、素子直径が 60 nm の場合は D_{s^*} 以下であるために、単磁区状態のみが安定状態であり、素子直径が 95 nm の場合は D_{s^*} 以上であるため二磁区状態が安定状態として存在することが実証された。

40

【0058】

磁性層21Aと磁性層21Bの各々の膜厚を変化させた場合についても式(4)と式(7)より単磁区臨界直径 D_{s^*} および単磁区反転臨界直径 D_s を計算し、それぞれの値以

50

下に素子直径を設定することで、理想的な磁気抵抗効果素子を作成することができる。

【0059】

[5] 人工格子磁気記録層

図9に、磁気抵抗効果素子の記録層として人工格子構造を用いた構成例を示す。磁気抵抗効果素子30は、固定層11、非磁性層12、及び記録層31から構成されている。固定層11上には非磁性層12が形成され、この非磁性層12上には記録層31が形成されている。記録層31は、非磁性層12上に形成された合金層31Aと、この合金層31A上に形成された合金層31Bとの積層構造から形成されている。

【0060】

この構成において記録層31は、Fe, Co, Niのうち1つ以上の元素を含む合金層(磁性材料層)31Aと、Pt, Pd, Ir, Rh, Ru, Os, Re, Au, Cuのうち1つ以上の元素を含む合金層(非磁性材料層)31Bとが少なくとも一度交互に積層された構造からなり、膜面垂直方向の磁化をもつ。このとき、合金層31Aと合金層31Bの膜厚比を調整することで、磁気エネルギー密度、飽和磁化を調整することが可能であるが、一般的な磁気異方性定数Kuは 1.8×10^6 erg/cc程度であり、飽和磁化Msは400 emu/cc、交換スティフネス係数Aは 5×10^{-7} erg/cm程度である。この材料パラメータから式(4)と式(7)より計算される単磁区臨界直径Ds*は118 nmであり、単磁区反転臨界直径Dsは38 nmである。従って、磁気抵抗効果素子30の素子直径を118 nm以下にすることにより、中間値状態を抑制することができる。また、熱擾乱耐性の観点からは、38 nm未満にすることが望ましい。すなわち、素子直径を38 nm未満にすることで、材料が持つ最大の熱擾乱耐性を実現することができる。なお、合金層31Aとして、さらにBを含ませることが可能であり、例えばCo、FeとBを含む合金等を用いることができる。

【0061】

[6] 磁気ランダムアクセスメモリ

本発明の実施形態の磁気抵抗効果素子を用いた磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM: magnetoresistive random access memory)について説明する。ここでは、実施形態の磁気抵抗効果素子10(あるいは20、30)を用いた、スピン注入書き込み型のMRAMについて述べる。

【0062】

図10は、本発明の実施形態のMRAMにおけるメモリセルの構成を示す断面図である。メモリセルは、磁気抵抗効果素子(MTJ素子)10と選択トランジスタ40を有している。図10に示すように、p型半導体基板41の表面領域には、素子分離絶縁層42が設けられ、この素子分離絶縁層42が設けられていない半導体基板41の表面領域が素子を形成する素子領域(active area)となる。素子分離絶縁層42は、例えばSTI(Shallow Trench Isolation)により構成される。STIとしては、例えば酸化シリコンが用いられる。

【0063】

半導体基板41の素子領域には、離隔したソース領域43S及びドレイン領域43Dが形成されている。このソース領域43S及びドレイン領域43Dは、それぞれ半導体基板41内に高濃度のN+型不純物を導入して形成されたN+型拡散領域から構成される。ソース領域43Sとドレイン領域43Dとの間の半導体基板41上には、ゲート絶縁膜44が形成されている。このゲート絶縁膜44上には、ゲート電極45が形成されている。このゲート電極45は、ワード線WLとして機能する。このように、半導体基板41には、選択トランジスタ40が設けられている。

【0064】

ソース領域43S上には、コンタクト46を介して配線層47が形成されている。配線層47は、ビット線/BLとして機能する。ドレイン領域43D上には、コンタクト48を介して引き出し線49が形成されている。

【0065】

10

20

30

40

50

引き出し線49上には、下部電極50及び上部電極51に挟まれたMTJ素子10が設けられている。上部電極51上には、配線層52が形成されている。配線層52は、ビット線BLとして機能する。また、半導体基板41と配線層52との間は、例えば酸化シリコンからなる層間絶縁層53で満たされている。

【0066】

次に、本発明の実施形態のMRAMの回路構成及びその動作について説明する。

【0067】

図11は、本発明の実施形態のMRAMの構成を示す回路図である。MRAMは、マトリクス状に配列された複数のメモリセルMCを有するメモリセルアレイ60を備えている。メモリセルアレイ60には、複数のビット線対BL、/BLがそれぞれ列(カラム)方向に配設されている。また、メモリセルアレイ60には、複数のワード線WLがそれぞれ行(ロウ)方向に配設されている。

10

【0068】

ビット線BLとワード線WLとの交差部分には、メモリセルMCが配置されている。各メモリセルMCは、MTJ素子10、及び例えばnチャンネルMOSトランジスタからなる選択トランジスタ40を備えている。MTJ素子10の一端は、ビット線BLに接続されている。MTJ素子10の他端は、選択トランジスタ40のドレインに接続されている。選択トランジスタ40のゲートは、ワード線WLに接続されている。さらに、選択トランジスタ40のソースは、ビット線/BLに接続されている。

【0069】

20

ワード線WLには、ロウデコーダ61が接続されている。ビット線対BL、/BLには、電流供給回路としての書き込み回路62及び読み出し回路63が接続されている。書き込み回路62及び読み出し回路63には、カラムデコーダ64が接続されている。各メモリセルMCは、ロウデコーダ61及びカラムデコーダ64により選択される。

【0070】

メモリセルMCへのデータの書き込みは、以下のように行われる。まず、データ書き込みを行うメモリセルMCを選択するために、このメモリセルMCに接続されたワード線WLが活性化される。これにより、選択トランジスタ40がターンオンする。

【0071】

ここで、MTJ素子10には、書き込みデータに応じて、双方向の書き込み電流Iwが供給される。具体的には、MTJ素子10にビット線BLからビット線/BLへ書き込み電流Iwを供給する場合、書き込み回路62は、ビット線BLに正の電圧を印加し、ビット線/BLに接地電圧を印加する。また、MTJ素子10にビット線/BLからビット線BLへ書き込み電流Iwを供給する場合、書き込み回路62は、ビット線/BLに正の電圧を印加し、ビット線BLに接地電圧を印加する。このようにして、メモリセルMCにデータ“0”、あるいはデータ“1”を書き込むことができる。

30

【0072】

次に、メモリセルMCからのデータ読み出しは、以下のように行われる。まず、選択されたメモリセルMCの選択トランジスタ40がターンオンする。読み出し回路63は、MTJ素子10に、例えばビット線/BLからビット線BLへ読み出し電流Irを供給する。そして、読み出し回路63は、この読み出し電流Irに基づいて、MTJ素子10の抵抗値を検出する。このようにして、検出したMTJ素子10の抵抗値からMTJ素子10に記憶されたデータを読み出すことができる。なお、磁気抵抗効果素子10を用いた場合を説明したが、磁気抵抗効果素子20または30を用いた場合の構成及び動作も同様である。

40

【0073】

なお、前述した各実施形態では、磁気抵抗効果素子において、固定層が下で、記録層が上に配置されている場合を示したが、固定層が上で、記録層が下に配置されていてもよい。すなわち、固定層と記録層とが上下に逆転した構成としてもよい。

【0074】

50

以上説明したように本発明の実施形態によれば、熱擾乱耐性が向上し、中間値状態の発生を抑制することが可能な磁気抵抗効果素子、及びこの磁気抵抗効果素子を用いた磁気ランダムアクセスメモリを提供することができる。また、メモリセルを微細化してもビット情報の高い熱擾乱耐性を保ち、大容量化を実現し得る磁気抵抗効果素子、及びこの磁気抵抗効果素子を用いた磁気ランダムアクセスメモリを提供できる。

【0075】

また、前述した各実施形態はそれぞれ、単独で実施できるばかりでなく、適宜組み合わせて実施することも可能である。さらに、前述した各実施形態には種々の段階の発明が含まれており、各実施形態において開示した複数の構成要件の適宜な組み合わせにより、種々の段階の発明を抽出することも可能である。

【図面の簡単な説明】

【0076】

【図1】磁気抵抗効果素子における記録層の磁区状態を示す図である。

【図2】単磁区臨界直径を80nmとするのに必要な磁気異方性エネルギーKuと飽和磁化Msとの関係を示す図である。

【図3】二磁区状態の磁化反転過程におけるエネルギーの磁化方向依存性と単磁区状態の磁化反転過程におけるエネルギーの磁化方向依存性を示す図である。

【図4】単磁区困難軸状態のエネルギー密度、単磁区容易軸状態のエネルギー密度、および二磁区状態のエネルギー密度の素子直径依存性を示す図である。

【図5】単磁区反転臨界直径を65nmとするのに必要な磁気異方性エネルギーKuと飽和磁化Msとの関係を示す図である。

【図6】磁気抵抗効果素子の記録層として磁性合金を用いた構成例を示す断面図である。

【図7】磁気抵抗効果素子の記録層として磁性合金の積層構造を用いた構成例を示す断面図である。

【図8】磁気抵抗効果素子の記録層として磁性合金の積層構造を用いて試作した素子の抵抗の磁場依存性を示す図である。

【図9】磁気抵抗効果素子の記録層として人工格子構造を用いた構成例を示す断面図である。

【図10】磁気抵抗効果素子を用いたMRAMにおけるメモリセルの構成を示す断面図である。

【図11】磁気抵抗効果素子を用いたMRAMの構成を示す回路図である。

【符号の説明】

【0077】

10, 20, 30...磁気抵抗効果素子(MTJ素子)、11...固定層、12...非磁性層、13, 21, 31...記録層、21A, 21B...磁性層、31A, 31B...合金層、40...選択トランジスタ、41...p型半導体基板、42...素子分離絶縁層、43S...ソース領域、43D...ドレイン領域、44...ゲート絶縁膜、45...ゲート電極、46, 48...コンタクト、47, 52...配線層、49...引き出し線、50...下部電極、51...上部電極、53...層間絶縁層、60...メモリセルアレイ、61...ロウデコーダ、62...書き込み回路、63...読み出し回路、64...カラムデコーダ、BL, /BL...ビット線対、MC...メモリセル、WL...ワード線。

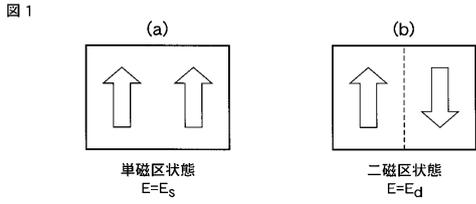
10

20

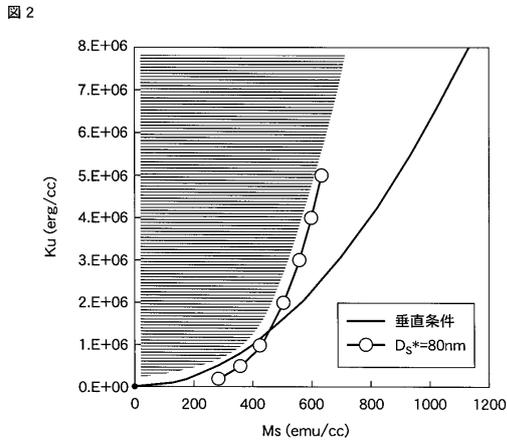
30

40

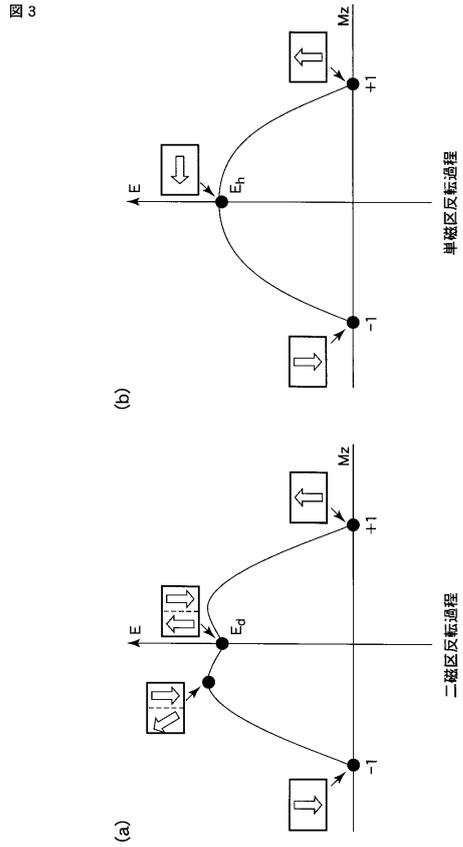
【 図 1 】



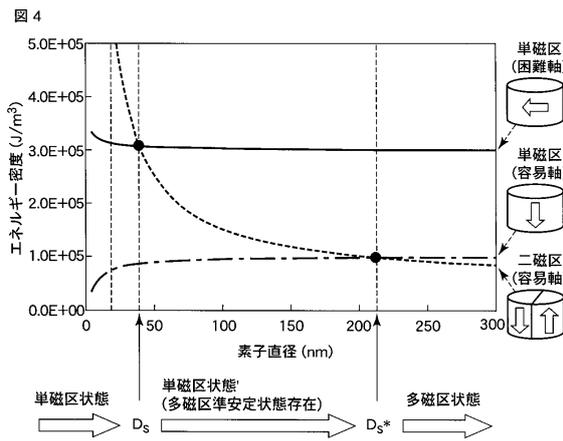
【 図 2 】



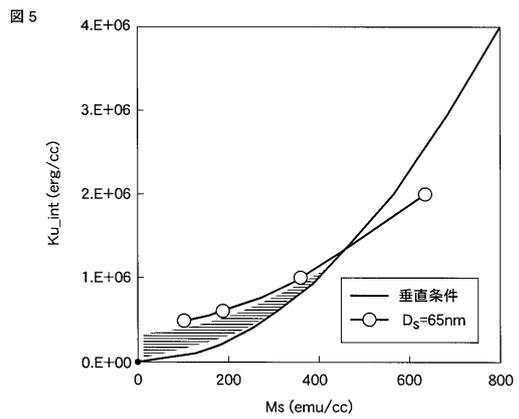
【 図 3 】



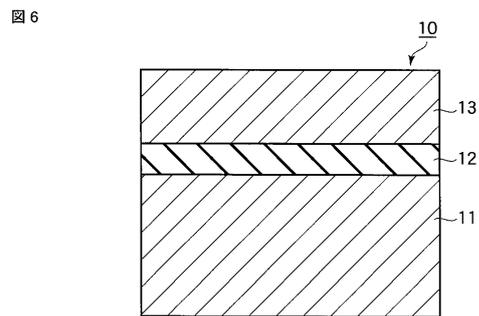
【 図 4 】



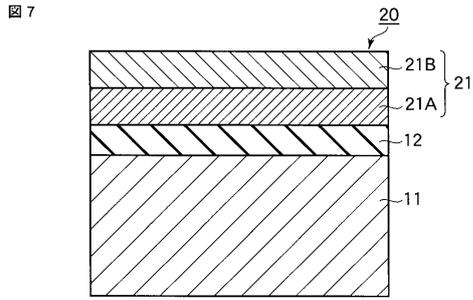
【 図 5 】



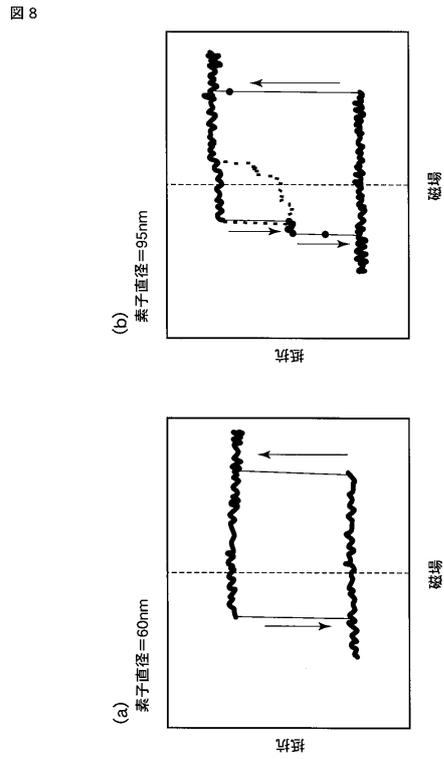
【 図 6 】



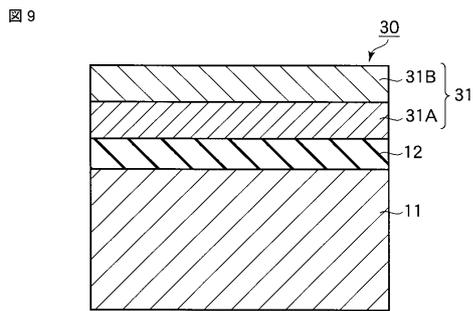
【図7】



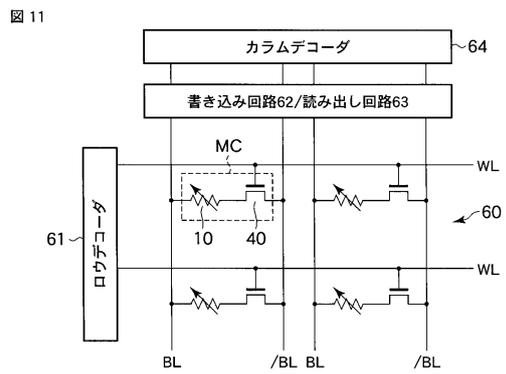
【図8】



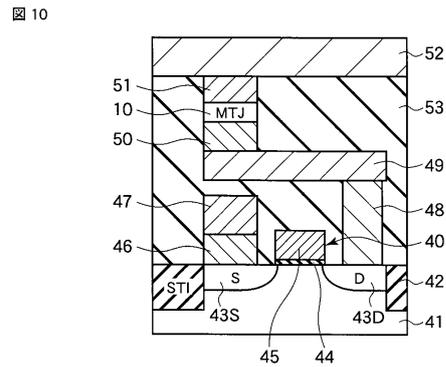
【図9】



【図11】



【図10】



フロントページの続き

- (74)代理人 100075672
弁理士 峰 隆司
- (74)代理人 100109830
弁理士 福原 淑弘
- (74)代理人 100084618
弁理士 村松 貞男
- (74)代理人 100092196
弁理士 橋本 良郎
- (72)発明者 中山 昌彦
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 葉師寺 啓
茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 池川 純夫
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 湯浅 新治
茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内
- (72)発明者 甲斐 正
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 永瀬 俊彦
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 天野 実
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 相川 尚徳
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 岸 達也
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内
- (72)発明者 與田 博明
東京都港区芝浦一丁目1番1号 株式会社東芝内

審査官 川村 裕二

- (56)参考文献 特開2007-266498(JP,A)
特開2007-142364(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 43/08
G11C 11/15
H01L 21/8246
H01L 27/105