

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5030888号
(P5030888)

(45) 発行日 平成24年9月19日(2012.9.19)

(24) 登録日 平成24年7月6日(2012.7.6)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 43/08 (2006.01)	HO 1 L 43/08 Z
HO 1 L 43/10 (2006.01)	HO 1 L 43/10
HO 1 L 27/105 (2006.01)	HO 1 L 27/10 4 4 7
HO 1 L 21/8246 (2006.01)	HO 1 L 29/82 Z
HO 1 L 29/82 (2006.01)	HO 1 F 10/32

請求項の数 7 (全 22 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2008-205905 (P2008-205905)	(73) 特許権者 000005108 株式会社日立製作所 東京都千代田区丸の内一丁目6番6号
(22) 出願日 平成20年8月8日(2008.8.8)	(73) 特許権者 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
(65) 公開番号 特開2010-45060 (P2010-45060A)	(74) 代理人 100091096 弁理士 平木 祐輔
(43) 公開日 平成22年2月25日(2010.2.25)	(72) 発明者 大野 英男 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
審査請求日 平成20年8月13日(2008.8.13)	(72) 発明者 池田 正二 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
(出願人による申告) 平成18年度、文部科学省、高機能・超低消費電力メモリの開発 委託事業、産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願	最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 共鳴トンネル磁気抵抗効果素子、磁気メモリセル及び磁気ランダムアクセスメモリ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

障壁層と、

前記障壁層を挟んで設けられた強磁性自由層と強磁性固定層と、

前記強磁性自由層と強磁性固定層のいずれか一方に隣接して設けられた量子井戸形成層と、

電流を膜面垂直方向に流すための一对の電極とを備え、

前記量子井戸形成層の共鳴準位電圧に相当する電圧を前記一对の電極に印加し、

スピントランスファートルクにより、前記強磁性自由層の磁化方向を回転する機能を有するトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項2】

請求項1記載のトンネル磁気抵抗効果素子において、前記強磁性自由層と強磁性固定層の少なくとも一方は、非磁性層を挟んで設けられた2層の強磁性膜からなり、前記2層の強磁性膜の磁化は反平行結合していることを特徴とするトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項3】

請求項1記載のトンネル磁気抵抗効果素子において、反強磁性層が前記強磁性固定層に隣接積層されていることを特徴とするトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項4】

請求項1記載のトンネル磁気抵抗効果素子において、前記強磁性固定層と前記強磁性自由層は、前記強磁性固定層と前記強磁性自由層は、Co, Fe, Niのうち少なくとも一

つの元素とBを含有する体心立方構造の膜を有することを特徴とするトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項5】

請求項1記載のトンネル磁気抵抗効果素子において、前記量子井戸形成層は、Cr, Ru, Cu, MgO, ZnOの少なくとも一つ含むことを特徴とするトンネル磁気抵抗効果素子。

【請求項6】

障壁層と、前記障壁層を挟んで設けられた強磁性自由層と強磁性固定層と、前記強磁性自由層と強磁性固定層のいずれか一方に隣接して設けられた量子井戸形成層と、電流を膜面垂直方向に流すための一对の電極とを備え、前記量子井戸形成層の共鳴準位電圧に相当する電圧を前記一对の電極に印加し、スピントランスファートルクにより、前記強磁性自由層の磁化方向を回転する機能を有するトンネル磁気抵抗効果素子と、

前記トンネル磁気抵抗効果素子に流れる電流をオン・オフ制御するスイッチング素子とを備えることを特徴とする磁気メモリセル。

【請求項7】

複数の磁気メモリセルと、所望の磁気メモリセルを選択する手段とを備える磁気ランダムアクセスメモリにおいて、

前記磁気メモリセルは、障壁層と、前記障壁層を挟んで設けられた強磁性自由層と強磁性固定層と、前記強磁性自由層と強磁性固定層のいずれか一方に隣接して設けられた量子井戸形成層と、電流を膜面垂直方向に流すための一对の電極とを備え、前記量子井戸形成層の共鳴準位電圧に相当する電圧を前記一对の電極に印加し、スピントランスファートルクにより、前記強磁性自由層の磁化方向を回転する機能を有するトンネル磁気抵抗効果素子と、前記トンネル磁気抵抗効果素子に流れる電流をオン・オフ制御するスイッチング素子とを備えることを特徴とする磁気ランダムアクセスメモリ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、高い出力と低電流スピントルク磁化反転機能を有する共鳴トンネル磁気抵抗素子及びそれを装備した高速・低消費電力不揮発磁気メモリに関するものである。

【背景技術】

【0002】

将来の高集積磁気メモリに適用されるトンネル磁気抵抗効果素子として、Alの酸化物を絶縁体に用いたトンネル磁気抵抗効果素子(T. Miyazaki and N. Tezuka, J. Magn. Mater. 139, L231 (1995))よりも数倍大きい磁気抵抗比が得られる絶縁膜に酸化マグネシウムを用いたトンネル磁気抵抗効果素子がS. Yuasa. et al., Nature Material 3, 868 (2004)や特開2007-59879号公報に開示されている。また、従来の不揮発性磁気メモリは、MOSFET上にトンネル磁気抵抗効果素子を形成したメモリセルにより構成される。スイッチングはMOSFETを利用し、ビット線とワード線に通電させることにより発生する電流誘起の空間磁場を使ってトンネル磁気抵抗効果素子の磁化方向を回転させ、情報を書込み、トンネル磁気抵抗効果素子の出力電圧により情報を読み出す方式である。また、上記電流誘起の空間磁場を使った磁化回転のほかに、直接磁気抵抗効果素子に電流を流すことにより磁化を回転させるいわゆるスピントランスファートルク磁化反転あるいは同義であるスピン注入磁化反転方式があり、例えば米国特許第5,695,864号明細書あるいは特開2002-305337号公報に開示されている。

【0003】

【非特許文献1】J. Magn. Mater. 139, L231 (1995)

【非特許文献2】Nature Material 3, 868 (2004)

【特許文献1】特開2007-59879号公報

【特許文献2】米国特許第5,695,864号明細書

【特許文献3】特開2002-305337号公報

10

20

30

40

50

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

高速・低消費電力不揮発性磁気メモリの実現には、高いトンネル磁気抵抗比（TMR比）と低電流によるスピントランスファートルク磁化反転書込み方式とを同時に満足する技術を開発する必要がある。

【0005】

本発明は、このような要請に応えることのできる共鳴トンネル効果をもつトンネル磁気抵抗効果素子及びそれを用いた不揮発性磁気メモリを提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

10

【0006】

本発明は、トンネル磁気抵抗効果素子に以下の2方式を適用した共鳴トンネル磁気抵抗効果素子を提供する。一つは、トンネル磁気抵抗効果素子の絶縁層をエネルギーギャップの異なる少なくとも2層の絶縁層により形成する方式である。もう一つは、トンネル磁気抵抗効果素子の強磁性層の少なくとも一方に量子井戸形成層を積層させる方式である。これらの手段を適用することにより、トンネル磁気抵抗効果素子に適当な電圧を印加したとき共鳴トンネル効果が現れ、その電圧において、500%を超えるTMR比と 2×10^6 A/cm²より小さな電流密度でのスピントルク磁化反転を実現できる。

【0007】

本発明のトンネル磁気抵抗効果素子は、磁気メモリセルや磁気ランダムアクセスメモリに適用することができる。

20

【発明の効果】

【0008】

本発明によると、トンネル磁気抵抗効果素子に適当な電圧を印加したとき共鳴トンネル効果が現れ、その電圧において、500%を超えるTMR比と 2×10^6 A/cm²より小さな電流密度でのスピントルク磁化反転を実現できる。

【0009】

本発明のトンネル磁気抵抗効果素子は、磁気メモリセルや磁気ランダムアクセスメモリに適用し、高速・低消費電力磁気メモリを実現することが可能となる。

【発明を実施するための最良の形態】

30

【0010】

以下、図面を参照して本発明の実施の形態を説明する。以下に述べるトンネル磁気抵抗効果素子では、その強磁性自由層の磁化反転（スイッチング）を、トンネル磁気抵抗効果素子中を流れるスピン偏極した電流のスピンが強磁性自由層の磁気モーメントにトルクを与えることにより行う。このスピン偏極した電流は、トンネル磁気抵抗効果素子に電流を流すこと自体で発生する。したがって、トンネル磁気抵抗効果素子に外部から電流を流すことによりスピントランスファートルク磁化反転が実現する。以下では、スピントランスファートルク磁化反転の起こる電流密度の閾値を J_c と定義した。

【0011】

[実施例1]

40

図1は、本発明によるトンネル磁気抵抗効果素子の一例を示す断面模式図である。本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、スパッタリング法を用いて作製した。このトンネル磁気抵抗効果素子は、電極400側から、配向制御膜300、強磁性固定層301、第一の障壁層3021、第二の障壁層3022、第三の障壁層3023、強磁性自由層303、保護膜304、電極401がこの順に形成され、適当な温度で熱処理することによりTMR比と J_c が最適化される。

【0012】

ここで、強磁性固定層301と強磁性自由層303について、以下に述べる構成1-2から構成1-5を用いることが可能である。

【0013】

50

構成 1 - 2 は、図 1 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 1 4 】

構成 1 - 3 は、図 1 における強磁性自由層 3 0 3 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 1 5 】

構成 1 - 4 は、図 1 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 3 0 3 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

10

【 0 0 1 6 】

構成 1 - 5 は、図 1 における強磁性固定層 3 0 1 に反強磁性層を隣接し、強磁性固定層 3 0 1 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にした構成である。また、構成 1 - 5 における強磁性自由層 3 0 3 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合していてもよい。

【 0 0 1 7 】

20

本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、上記した構成を組み合わせてもよい。そのいくつかの例を、以下に説明する。

【 0 0 1 8 】

図 2 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、図 1 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層 3 0 1 1、非磁性層 3 0 1 2、第二の強磁性固定層 3 0 1 3 により形成され、第一の強磁性固定層 3 0 1 1 に反強磁性層 5 0 0 が隣接している例である。ここで、第一の強磁性固定層 3 0 1 1 と第二の強磁性固定層 3 0 1 3 の磁化方向は互いに反平行に結合している。

【 0 0 1 9 】

図 3 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、図 2 における強磁性自由層 3 0 3 が第一の強磁性自由層 3 0 3 1、非磁性層 3 0 3 2、第二の強磁性自由層 3 0 3 3 により形成され、第一の強磁性自由層 3 0 3 1 と第二の強磁性自由層 3 0 3 3 の磁化方向は互いに反平行に結合している例である。

30

【 0 0 2 0 】

図 4 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、電極 4 0 0 側から、配向制御膜 3 0 0、強磁性自由層 3 0 3、第一の障壁層 3 0 2 1、第二の障壁層 3 0 2 2、第三の障壁層 3 0 2 3、強磁性固定層 3 0 1、保護膜 3 0 4、電極 4 0 1 がこの順に形成される。強磁性固定層 3 0 1 と強磁性自由層 3 0 3 について、以下に述べる構成 4 - 2 から構成 4 - 6 を用いることが可能である。

【 0 0 2 1 】

40

構成 4 - 2 は、図 4 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 2 2 】

構成 4 - 3 は、図 4 における強磁性自由層 3 0 3 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 2 3 】

構成 4 - 4 は、図 4 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方

50

向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0024】

構成 4 - 5 は、図 4 における強磁性固定層 301 に反強磁性層 500 を隣接し、強磁性固定層 301 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にした構成である。また、構成 4 - 5 において、強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合していてもよい。さらに、構成 4 - 5 において、強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合していてもよい。

10

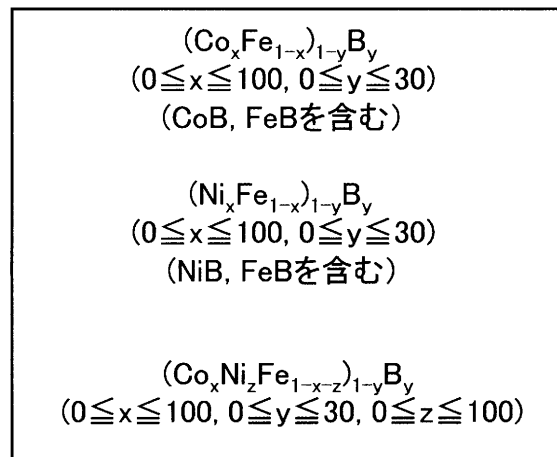
【0025】

ここで、本実施例のトンネル磁気抵抗素子の典型的な作製方法について用いて述べる。まず強磁性固定層 301 (3011, 3013) について述べる。強磁性固定層には Co, Fe, Ni の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、その例を表 1 に示した。強磁性固定層の材料は具体的には、第一の障壁層 3021、第二の障壁層 3022、第三の障壁層 3033 に用いる材料により選択される。次に、強磁性自由層 303 の材料について述べる。強磁性自由層 303 (3031, 3033) は、強磁性固定層 301 (3011, 3013) と同様に Co, Fe, Ni の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、表 1 に示した材料が選択されるが、具体的には、第一の障壁層 3021、第二の障壁層 3022、第三の障壁層 3033 に用いる材料により選択される。

20

【0026】

【表 1】



30

【0027】

次に障壁層 (3021, 3022, 3023) の材料選択について述べる。表 2 の左欄に示したような材料を用いることが望ましい。このうち第一の障壁層 3021 と第三の障壁層 3023 に MgO、第二の障壁層 3022 に ZnO を用いた場合に効率的な共鳴トンネル効果が期待される。第一の障壁層 3021 と第三の障壁層 3023 に MgO を用いた場合、MgO に接する強磁性固定層と強磁性自由層には体心立方格子の CoFeB を用いることがもっとも望ましく、さらに MgO と CoFeB の (001) 結晶配向を選択することにより良好な共鳴トンネル効果が得られる。これは、(001) 配向した MgO 障壁内では、トンネル電流中のスピンの選択性が大きいためである。

40

【0028】

【表 2】

障壁層	E_g (V)
Al_2O_3	8.3
SnO_2	2.5
TiO_2	3.0-3.7
In_2O_3	2.8
Cu_2O	2.2
WO_3	2.6
ZnO	3.4
NiO	3.6
$BaTiO_3$	3.5
MgO	8.0

10

20

【0029】

本実施例のシリーズでは反強磁性層500としてMnIrを用いたが、MnPt, CrMnPt, CrMnIrやMnFeなどの反強磁性膜を用いてもよい。

【0030】

配向制御膜300は、その直上に隣接する材料によって選択される。例えば配向制御膜300上に、CoFeBが選択される場合、5nm以下を用いることが望ましいが、CuN、Ta₂Nなどの非結晶材料を用いてもよい。また、配向制御膜300上に、反強磁性層500があり、それが面心立方格子(Fcc)の(111)配向膜である場合、配向制御膜300としてTa/NiFeなどの2層膜構成を適用してもよい。この場合、NiFeが、反強磁性膜500のFcc(111)結晶方位を優先的に成長させる役割を果たす。

30

【0031】

このように形成したトンネル磁気抵抗効果膜は、フォトリソグラフィとイオンミリングを用いることによって、 $0.1\mu m \times 0.15\mu m$ の面積をもつトンネル磁気抵抗効果素子に形成される。また、適当な温度において熱処理を行うことにより、高TMR比と低 J_c の最適化が行われるが、強磁性固定層、強磁性自由層にCoFeBを、障壁層にMgOを用いた場合は特に350以上の熱処理が望ましい。熱処理は、上記トンネル磁気抵抗効果膜を製膜した後に実施してもよいし、微細加工を施したあとに行ってもかまわない。

【0032】

次に、上記共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における高TMR比と低電流(電圧)の原理について説明する。図9は、本実施例のシリーズで示した共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における第一の障壁層3021、第二の障壁層3022、第三の障壁層3023の部分で形成される絶縁特性を示す。図9は、横軸を各障壁層の膜厚とし、縦軸にエネルギーギャップ($E_g(1)$ 、 $E_g(2)$ 、 $E_g(3)$)を表した模式図である。本実施例のシリーズでは、 $E_g(1)$ 、 $E_g(3) > E_g(2)$ であることが特徴であり、各障壁層に用いる材料として表2に示す材料を選択することが望ましい。例えば、第一の障壁層、第三の障壁層にMgO、第二の障壁層にZnOなどが選択可能である。

40

【0033】

このようなエネルギー状態が形成されることにより、共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の

50

電極 400 と電極 401 の間に発生する電流 - 印加電圧の関係は図 11 のようになり、 $E_g(2)$ に相当する電圧（この電圧を共鳴準位電圧と呼ぶ）において、電流が局所的に大きくなる。障壁層が一層の従来構造（例えば、図 1 の構成において第二の障壁層 3022 及び第三の障壁層 3023 が無いトンネル磁気抵抗効果素子）では、このような特定の電圧における電流の急峻な増大は観測されることがない。この電流の増大は、共鳴トンネルによるものである。共鳴トンネルは、電極 400 と電極 401 の間に流れる電流が共鳴を起こし電流の透過率が増大するためにおきる現象である。このとき、図 12A に示すように、 $E_g(2)$ に相当する電圧において TMR 比の顕著な増大が生じる。その TMR 比は、500% を超えることが期待され、従来値に比べ一桁以上の改善が期待される。この TMR 比の増大は、共鳴準位において、流れる電子のスビンの方向選択性が増大するためである。従って、本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子に印加する電圧は、 $E_g(2)$ に相当する電圧とする。

10

【0034】

図 12B は、TMR 比とスピントランスファートルク磁化反転における閾値電流密度 J_c の関係を示す図である。従来 TMR 比 100% の素子では、 J_c は 2×10^6 (A/cm^2) であるのに対して、500% 以上の TMR 比では、 2×10^6 (A/cm^2) より小さい J_c が実現できる。

【0035】

[実施例 2]

図 5 から図 8 に、実施例 2 のトンネル磁気抵抗効果素子のシリーズを示す。ここに示す実施例 2 のシリーズは、実施例 1 のシリーズで示した 3 層の障壁層を用いる構成に代えて、異なる 2 層の障壁層材料 3021, 3022 を用いる構成である。

20

【0036】

図 5 に示した本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、図 1 に示したトンネル磁気抵抗効果素子から第三の障壁層 3023 を除いたものに相当する。同様に、図 6、図 7、図 8 に示した本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、図 2、図 3、図 4 に示したトンネル磁気抵抗効果素子から第三の障壁層 3023 を除いたものに相当する。

【0037】

本実施例のシリーズにおいても、各層を構成する具体的材料の選択は実施例 1 と同様である。一方、障壁層部分で形成されるエネルギー状態は、図 10 に示すとおりであり、この場合も実施例 1 のシリーズと同様に図 11、図 12A、12B で説明した現象及び素子としての効果が得られる。

30

【0038】

[実施例 3]

図 13 は、本発明によるトンネル磁気抵抗効果素子の他の例を示す断面模式図である。本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、スパッタリング法を用いて作製した。このトンネル磁気抵抗効果素子は、電極 400 側から、配向制御膜 300、強磁性固定層 301、障壁層 302、強磁性自由層 303、量子井戸形成層 600、保護膜 304、電極 401 がこの順に形成され、適当な温度で熱処理することにより TMR 比と J_c が最適化される。

40

【0039】

ここで、強磁性固定層 301 と強磁性自由層 303 について、以下に示す構成 3-2 から構成 3-16 の構成を用いることが可能であり、これらを実施例 3 のシリーズとする。

【0040】

構成 3-2 は、図 13 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0041】

構成 3-3 は、図 13 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化

50

方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性自由層に隣接して積層している。

【0042】

構成 3-4 は、図 13 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性自由層 303 に隣接して積層している。

【0043】

構成 3-5 は、図 13 における強磁性固定層 301 に反強磁性層を隣接し、強磁性固定層 301 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にする構成である。

【0044】

構成 3-6 は、構成 3-5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層に反強磁性層が隣接している構成である。第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している。

【0045】

構成 3-7 は、構成 3-5 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性自由層に隣接して積層している。

【0046】

本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、上記した構成を組み合わせてもよい。そのいくつかの例を、以下に説明する。

【0047】

図 14 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、構成 3-5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層 3011、非磁性層 3012、第二の強磁性固定層 3013 により形成され、第一の強磁性固定層 3011 に反強磁性層 500 が隣接している。ここで、第一の強磁性固定層 3011 と第二の強磁性固定層 3013 の磁化方向は互いに反平行に結合している。さらに、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層 3031、非磁性層 3032、第二の強磁性自由層 3033 により形成され、第一の強磁性自由層 3031 と第二の強磁性自由層 3033 の磁化方向は互いに反平行に結合している。また、量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性自由層 3033 に隣接して積層している。

【0048】

図 15 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、電極 400 側から、配向制御膜 300、量子井戸形成層 600、強磁性自由層 303、障壁層 302、強磁性固定層 301、保護膜 304、電極 401 がこの順に形成される。このトンネル磁気抵抗効果素子の膜構成に関し、以下に述べる変形例が可能である。

【0049】

構成 3-8 は、図 15 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0050】

構成 3-9 は、図 15 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性自由層に隣接して積層している。

【0051】

10

20

30

40

50

構成 3 - 1 0 は、図 1 5 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 3 0 3 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 6 0 0 は、第一の強磁性自由層に隣接して積層している。

【 0 0 5 2 】

構成 3 - 1 1 は、図 1 5 における強磁性固定層 3 0 1 に反強磁性層を隣接し、強磁性固定層 3 0 1 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にした構成である。

10

【 0 0 5 3 】

構成 3 - 1 2 は、構成 3 - 1 1 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 5 4 】

構成 3 - 1 3 は、構成 3 - 1 1 における強磁性自由層 3 0 3 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 6 0 0 は、第一の強磁性自由層に隣接して積層している。

20

【 0 0 5 5 】

構成 3 - 1 4 は、構成 3 - 1 1 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 3 0 3 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 6 0 0 は、第一の強磁性自由層に隣接して積層している。

【 0 0 5 6 】

ここで、実施例 3 のシリーズに示したトンネル磁気抵抗素子の典型的作製方法について述べる。

【 0 0 5 7 】

まず、強磁性固定層 3 0 1 (3 0 1 1 , 3 0 1 3) について述べる。強磁性固定層には、C o 、 F e 、 N i の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、その例は上記表 1 に示したとおりである。強磁性固定層の材料は具体的には、障壁層 3 0 2 に用いる材料により選択される。次に、強磁性自由層 3 0 3 の材料について述べる。強磁性自由層 3 0 3 (3 0 3 1 , 3 0 3 3) は、強磁性固定層 3 0 1 (3 0 1 1 , 3 0 1 3) と同様に C o , F e , N i の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、表 1 に示した材料から選択されるが、具体的には、障壁層 3 0 2 に用いる材料により選択される。

30

【 0 0 5 8 】

次に、障壁層 3 0 2 の材料選択について述べる。本実施例においても表 2 の左欄に示したような材料を用いることが望ましい。障壁層 3 0 2 に M g O を用いた場合、M g O に接する強磁性固定層と強磁性自由層には体心立方格子の C o F e B を用いることがもっとも望ましく、さらに M g O と C o F e B の (0 0 1) 結晶配向を選択することにより、良好な共鳴トンネル効果が得られる。これは、(0 0 1) 配向した M g O 障壁内では、トンネル電流中のスピンの選択性が大きいためである。

40

【 0 0 5 9 】

本実施例のシリーズでは反強磁性層 5 0 0 として M n I r を用いたが、M n P t , C r M n P t , C r M n I r や M n F e などの反強磁性膜を用いてもよい。

【 0 0 6 0 】

配向制御膜 3 0 0 は、その直上に隣接する材料によって選択される。例えば配向制御膜

50

300上に、CoFeBが選択される場合、5nm以下とすることが望ましいが、CuN、TaNなどの非結晶材料を用いてもよい。また、配向制御膜300上に、反強磁性層500があり、それが面心立方格子(Fcc)の(111)配向膜である場合、配向制御膜300としてTa/NiFeなどの2層膜構成を適用してもよい。この場合、NiFeが、反強磁性膜500のFcc(111)結晶方位を優先的に成長させる役割を果たす。

【0061】

本実施例において共鳴トンネル効果を発現する起源となるのは量子井戸形成層600である。量子井戸形成層600は、Cr, Ru, Cu, MgO, ZnOなどの材料からなる層や、それらの多層構造が適用される。例えば、強磁性固定層301や強磁性自由層303にCoFeBを用いた場合、CrやMgO/Crを量子井戸形成層600に用いることが望ましい。ここで、CoFeBや、CoFeなどを強磁性固定層301、強磁性自由層303に適用したときに、FeのCoに対する組成比Fe/Coが、0.5以上(つまりFe組成が大きい)の場合、量子井戸形成層600にCrを用いることが好まれる。一方、Fe/Coが0.5より小さい場合は量子井戸形成層600にCuを使用することが好ましい。

10

【0062】

このように形成したトンネル磁気抵抗効果膜は、フォトリソグラフィとイオンミリングを用いることによって、 $0.1\mu\text{m} \times 0.15\mu\text{m}$ の面積をもつトンネル磁気抵抗効果素子に形成される。また、適当な温度において熱処理を行うことにより、高TMR比と低 J_c の最適化が行われる。熱処理は、上記トンネル磁気抵抗効果膜を製膜した後に実施してもよいし、微細加工を施したあとに行ってもかまわない。

20

【0063】

次に、上記共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における高TMR比と低電流(電圧)の原理について説明する。

【0064】

図23は、本実施例のシリーズで示した共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の障壁層302と強磁性自由層303(あるいは強磁性固定層301)と量子井戸形成層600によって形成されるエネルギー状態を示す図である。本実施例のシリーズでは、量子井戸形成層においてエネルギー状態が離散的になることが特徴である。例えば、 V_1, V_2, V_3 のように3状態が形成される。このようなエネルギー状態が形成されることにより、共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の電極400と電極401の間に発生する電流-印加電圧の関係は図25のようになり、 V_1, V_2, V_3 に相当する共鳴準位電圧において、電流が局所的に大きくなる。量子井戸形成層のない従来構造、例えば、電極400、配向制御膜300、強磁性固定層301、障壁層302、強磁性自由層303、保護膜304、電極401がこの順に積層されたトンネル磁気抵抗効果素子では、このような特定の電圧における電流の急峻な増大は観測されることがない。この電流の増大は、共鳴トンネルによるものである。共鳴トンネルは、電極400と電極401の間に流れる電流が共鳴を起こし、電流の透過率が増大するためにおきる現象である。

30

【0065】

このとき、図25に示すように、 V_1, V_2, V_3 に相当する電圧においてTMR比の顕著な増大が生じる。そのTMR比は、500%以上が期待され、従来値に比べ一桁以上の改善が期待される。このTMR比の増大は、共鳴準位において、流れる電子のスピンの方向選択性が増大するために生じる。従って、本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子に印加する電圧は、 V_1, V_2, V_3 のいずれかとする。

40

【0066】

本実施例においても、図12Bに示したTMR比とスピントランスファートルク磁化反転における閾値電流密度 J_c の関係のように、従来素子のTMR比100%では、 J_c は 2×10^6 (A/cm^2) であるのに対して、500%以上のTMR比では、 1×10^6 (A/cm^2) 以下の J_c が実現できる。

【0067】

50

[実施例 4]

図 1 6 から図 1 8 に、実施例 4 のトンネル磁気抵抗効果素子のシリーズを示す。ここに示す実施例 4 のシリーズは、前記実施例 3 のシリーズで示した図 1 3 から図 1 5 の構成において量子井戸形成層 6 0 0 が、障壁層 3 0 2 と隣接し、強磁性自由層 3 0 3 に接して形成される形態である。

【 0 0 6 8 】

図 1 6 に示した本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、図 1 3 に示したトンネル磁気抵抗効果素子に対して、強磁性自由層 3 0 3 と量子井戸形成層 6 0 0 の積層順を逆にし、障壁層 3 0 2 と強磁性自由層 3 0 3 の間に量子井戸形成層 6 0 0 を形成したものに相当する。同様に、図 1 7 に示したトンネル磁気抵抗効果素子は、図 1 4 に示したトンネル磁気抵抗効果素子に対して、強磁性自由層 3 0 3 と量子井戸形成層 6 0 0 の積層順を逆にし、障壁層 3 0 2 と第一の強磁性自由層 3 0 3 1 の間に量子井戸形成層 6 0 0 を形成したものに相当する。また、図 1 8 に示したトンネル磁気抵抗効果素子は、図 1 5 に示したトンネル磁気抵抗効果素子に対して、強磁性自由層 3 0 3 と量子井戸形成層 6 0 0 の積層順を逆にし、強磁性自由層 3 0 3 と障壁層 3 0 2 の間に量子井戸形成層 6 0 0 を形成したものに相当する。

【 0 0 6 9 】

そのほかにも、前記実施例 3 のシリーズで示した構成 3 - 2 から構成 3 - 1 4 の構成において量子井戸形成層 6 0 0 が、障壁層と隣接して、強磁性自由層に接して形成される形態を用いることも可能である。これらの構成例を、実施例 4 のシリーズとする。

【 0 0 7 0 】

本実施例のシリーズにおいても、各層を構成する具体的材料の選択は実施例 3 で述べたのと同様である。一方、量子井戸形成層部分で形成されるエネルギー状態は図 2 4 に示すようになり、この場合も実施例 3 のシリーズと同様に図 2 5、図 2 6、図 1 2 B に示した効果が得られる。

【 0 0 7 1 】

[実施例 5]

図 1 9 は、本発明によるトンネル磁気抵抗効果素子の一例を示す断面模式図である。本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、スパッタリング法を用いて作製した。このトンネル磁気抵抗効果素子は、電極 4 0 0 側から、配向制御膜 3 0 0、量子井戸形成層 6 0 0、強磁性固定層 3 0 1、障壁層 3 0 2、強磁性自由層 3 0 3、保護膜 3 0 4、電極 4 0 1 がこの順に形成され、量子井戸形成層 6 0 0 が強磁性固定層 3 0 1 に隣接していることが特徴である。本実施例においても、適当な温度で熱処理することにより TMR 比と J_c が最適化される。

【 0 0 7 2 】

ここで、強磁性固定層 3 0 1 と強磁性自由層 3 0 3 について、以下に示す構成 5 - 2 から構成 5 - 8 の構成を用いることが可能であり、これらを実施例 5 のシリーズとする。

【 0 0 7 3 】

構成 5 - 2 は、図 1 9 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 6 0 0 は、第一の強磁性固定層に隣接している。

【 0 0 7 4 】

構成 5 - 3 は、図 1 9 における強磁性自由層 3 0 3 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【 0 0 7 5 】

構成 5 - 4 は、図 1 9 における強磁性固定層 3 0 1 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 3 0 3 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第

10

20

30

40

50

二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層に隣接して積層している。

【0076】

構成 5-5 は、図 19 に示したトンネル磁気抵抗効果素子において強磁性固定層 301 と強磁性自由層 303 の位置が入れ替わり、量子井戸形成層 600 が保護膜 304 側において強磁性固定層 301 に隣接している構成である。すなわち、電極 400 側から、配向制御膜 300、強磁性自由層 303、障壁層 302、強磁性固定層 301、量子井戸形成層 600、保護膜 304 がこの順に形成される構成である。

【0077】

構成 5-6 は、構成 5-5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層に隣接している構成である。

【0078】

構成 5-7 は、構成 5-5 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0079】

構成 5-8 は、構成 5-5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層に隣接して積層している。

【0080】

ここで、実施例 5 のシリーズに示したトンネル磁気抵抗素子の典型的作製方法について用いて述べる。

【0081】

まず、強磁性固定層 301 (第一の強磁性固定層、第二の強磁性固定層) について述べる。強磁性固定層には、Co, Fe, Ni の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、その例を表 1 に示した。強磁性固定層の材料は具体的には、障壁層 302 に用いる材料により選択される。次に、強磁性自由層 303 の材料について述べる。強磁性自由層 303 (第一の強磁性自由層、第二の強磁性自由層) は、強磁性固定層と同様に Co, Fe, Ni の少なくとも一つの元素と B を含む材料を用いることが望ましく、表 1 に示した材料が選択されるが、具体的には、障壁層 302 に用いる材料により選択される。

【0082】

次に、障壁層 302 の材料選択について述べる。本実施例においても表 2 の左欄に示したような材料を用いることが望ましい。障壁層 302 に MgO を用いた場合、MgO に接する強磁性固定層と強磁性自由層には体心立方格子の CoFeB を用いることがもっとも望ましく、さらに MgO と CoFeB の (001) 結晶配向を選択することにより良好な共鳴トンネル効果が得られる。これは、(001) 配向した MgO 障壁内では、トンネル電流中のスピンの選択性が大きいためである。

【0083】

配向制御膜 300 は、その直上に隣接する材料によって選択される。例えば配向制御膜 300 上に、CoFeB が選択される場合、5 nm 以下とするのが望ましいが、CuN, TaN などの非結晶材料を用いてもよい。

【0084】

本実施例 5 において共鳴トンネル効果を発現する起源となるのは量子井戸形成層 600

10

20

30

40

50

である。量子井戸形成層600として用いられる材料は、Cr, Ru, Cu, MgO, ZnOなどの材料やそれらの多層構造が適用される。例えば、強磁性固定層301や強磁性自由層303にCoFeBを用いた場合CrやMgO/Crを量子井戸形成層600に用いることが望ましい。ここで、CoFeBや、CoFeなどを強磁性固定層301、強磁性自由層303に適用したときに、FeのCoに対する組成比Fe/Coが、0.5以上（つまりFe組成が大きい）の場合、量子井戸形成層600にCrを用いることが好まれる。一方、Fe/Coが0.5より小さい場合は量子井戸形成層600にCuを使用することが好ましい。

【0085】

このように形成したトンネル磁気抵抗効果膜は、フォトリソグラフィとイオンミリングを用いることによって、 $0.1\ \mu\text{m} \times 0.15\ \mu\text{m}$ の面積をもつトンネル磁気抵抗効果素子に形成される。また、適当な温度において熱処理を行うことにより、高TMR比と低 J_c の最適化が行われる。熱処理は、上記トンネル磁気抵抗効果膜を製膜した後に実施してもよいし、微細加工を施したあとに行ってもかまわない。

10

【0086】

本実施例のシリーズにおいても、各層を構成する具体的材料の選択は実施例3と同様である。本実施例のシリーズにおいても、各層を構成する具体的材料の選択は実施例3と同様である。一方、量子井戸形成層部分で形成されるエネルギー状態は図23に示すとおりであり、この場合も実施例3のシリーズと同様に図25、図26、図12Bに示した効果が得られる。

20

【0087】

[実施例6]

図20は、本発明によるトンネル磁気抵抗効果素子の一例を示す断面模式図である。本実施例のトンネル磁気抵抗効果素子は、スパッタリング法を用いて作製した。このトンネル磁気抵抗効果素子は、電極400側から、配向制御膜300、強磁性固定層301、量子井戸形成層600、障壁層302、強磁性自由層303、保護膜304、電極401がこの順に形成され、量子井戸形成層600が、障壁層302と隣接して、強磁性固定層301に接して形成されていることが特徴である。本実施例においても適当な温度で熱処理することによりTMR比と J_c が最適化される。

30

【0088】

ここで、強磁性固定層301と強磁性自由層303について、以下に示す図21と構成6-2から構成6-14の構成を用いることが可能であり、これらを実施例6のシリーズとする。

【0089】

構成6-2は、図20における強磁性固定層301が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層600は、第二の強磁性固定層に隣接する。

【0090】

構成6-3は、図20における強磁性自由層303が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

40

【0091】

構成6-4は、図20における強磁性固定層301が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層303が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層600は、第二の強磁性固定層に隣接して積層している。

【0092】

50

構成 6 - 5 は、図 20 における強磁性固定層 301 に反強磁性層を隣接し、強磁性固定層 301 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にした構成である。

【0093】

構成 6 - 6 は、構成 6 - 5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層に反強磁性層が隣接している構成である。ここで、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している。量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性固定層に隣接する。

【0094】

構成 6 - 7 は、構成 6 - 5 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0095】

図 21 に示したトンネル磁気抵抗効果素子は、構成 6 - 5 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層 3011、非磁性層 3012、第二の強磁性固定層 3013 により形成され、第一の強磁性固定層 3011 に反強磁性層 500 が隣接している。ここで、第一の強磁性固定層 3011 と第二の強磁性固定層 3013 の磁化方向は互いに反平行に結合している。さらに、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層 3031、非磁性層 3032、第二の強磁性自由層 3033 により形成され、第一の強磁性自由層 3031 と第二の強磁性自由層 3033 の磁化方向は互いに反平行に結合している。また、量子井戸形成層 600 は、第二の強磁性固定層 3013 に隣接して積層している。

【0096】

図 22 に示すトンネル磁気抵抗効果素子は、電極 400 側から、配向制御膜 300、強磁性自由層 303、障壁層 302、強磁性固定層 301、量子井戸形成層 600、保護膜 304、電極 401 がこの順に形成される。

【0097】

構成 6 - 8 は、図 22 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層 3011 に隣接する。

【0098】

構成 6 - 9 は、図 22 における強磁性自由層 303 が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0099】

構成 6 - 10 は、図 22 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層 303 が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層に隣接して積層している。

【0100】

構成 6 - 11 は、図 22 における強磁性固定層 301 に反強磁性層を隣接し、強磁性固定層 301 の磁化方向を一方向に固定し、トンネル磁気抵抗効果素子における動作を安定にした構成である。

【0101】

構成 6 - 12 は、構成 6 - 11 における強磁性固定層 301 が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合している。量子井戸形成層 600 は、第一の強磁性固定層に隣接している構成である。

10

20

30

40

50

【0102】

構成6-13は、構成6-11における強磁性自由層303が、第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。

【0103】

構成6-14は、構成6-11における強磁性固定層301が、第一の強磁性固定層、非磁性層、第二の強磁性固定層により形成され、第一の強磁性固定層と第二の強磁性固定層の磁化方向は互いに反平行に結合し、強磁性自由層303が第一の強磁性自由層、非磁性層、第二の強磁性自由層により形成され、第一の強磁性自由層と第二の強磁性自由層の磁化方向は互いに反平行に結合している構成である。量子井戸形成層600は、第一の強磁性固定層に隣接して積層している。

10

【0104】

ここで、実施例6のシリーズに示したトンネル磁気抵抗素子の典型的作製方法について用いて述べる。

【0105】

まず強磁性固定層301(3011, 3013)について述べる。強磁性固定層には、Co, Fe, Niの少なくとも一つの元素とBを含む材料を用いることが望ましく、その例を表1に示した。強磁性固定層の材料は具体的には、障壁層302に用いる材料により選択される。次に、強磁性自由層303の材料について述べる。強磁性自由層303(3031, 3033)は、強磁性固定層301(3011, 3013)と同様にCo, Fe, Niの少なくとも一つの元素とBを含む材料を用いることが望ましく、表1に示した材料が選択されるが、具体的には、障壁層302に用いる材料により選択される。

20

【0106】

次に、障壁層302の材料選択について述べる。本実施例においても表2の左欄に示したような材料を用いることが望ましい。障壁層302にMgOを用いた場合、MgOに接する強磁性固定層と強磁性自由層には体心立方格子のCoFeBを用いることが最も望ましく、さらにMgOとCoFeBの(001)結晶配向を選択することにより良好な共鳴トンネル効果が得られる。これは、(001)配向したMgO障壁内では、トンネル電流中のスピンの選択性が大きいためである。

【0107】

本実施例のシリーズでは反強磁性層500としてMnIrを用いたが、MnPt, CrMnPt, CrMnIrやMnFeなどの反強磁性膜を用いてもよい。

30

【0108】

配向制御膜300は、その直上に隣接する材料によって選択される。例えば配向制御膜300上に、CoFeBが選択される場合、5nm以下とすることが望ましいが、CuN, TaNなどの非結晶材料を用いてもよい。また、配向制御膜300上に、反強磁性層500があり、それが面心立方格子(Fcc)の(111)配向膜である場合、配向制御膜300としてTa/NiFeなどの2層膜構成を適用してもよい。この場合、NiFeが、反強磁性膜500のFcc(111)結晶方位を優先的に成長させる役割を果たす。

【0109】

本実施例において共鳴トンネル効果を発現する起源となるのは量子井戸形成層600である。量子井戸形成層600として用いられる材料は、Cr, Ru, Cu, MgO, ZnOなどの材料やそれらの多層構造が適用される。例えば、強磁性固定層301や強磁性自由層303にCoFeBを用いた場合CrやMgO/Crを量子井戸形成層600に用いることが望ましい。ここで、CoFeBや、CoFeなどを強磁性固定層301、強磁性自由層303に適用したときに、FeのCoに対する組成比Fe/Coが、0.5以上(つまりFe組成が大きい)の場合、量子井戸形成層600にCrを用いることが好まれる。一方、Fe/Coが0.5より小さい場合は量子井戸形成層600にCuを使用することが好ましい。

40

【0110】

50

このように形成したトンネル磁気抵抗効果膜は、フォトリソグラフィとイオンミリングを用いることによって、 $0.1\ \mu\text{m} \times 0.15\ \mu\text{m}$ の面積をもつトンネル磁気抵抗効果素子に形成される。また、適当な温度において熱処理を行うことにより、高TMR比と低 J_c の最適化が行われる。熱処理は、上記トンネル磁気抵抗効果膜を製膜した後に実施してもよいし、微細加工を施したあとに行ってもかまわない。

【0111】

本実施例のシリーズにおいても、各層を構成する具体的材料の選択は実施例3と同様である。一方、量子井戸形成層部分で形成されるエネルギー状態は図24に示すとおりであり、この場合も実施例3のシリーズと同様に図25、図26、図12Bに示した効果が得られる。

【0112】

[実施例7]

図27と図28は、本発明による磁気メモリセルの構成例を示す断面模式図である。この磁気メモリセルは、メモリセルとして実施例1から6に示したトンネル磁気抵抗効果素子200を搭載している。

【0113】

C-MOS100は、2つのn型半導体101、102と一つのp型半導体103からなる。n型半導体101にドレインとなる電極121が電氣的に接続され、電極141、147を介してグラウンドに接続されている。n型半導体102には、ソースとなる電極122が電氣的に接続されている。ゲート電極123のON/OFFにより、ソース電極122とドレイン電極121の間の電流のON/OFFを制御する。上記ソース電極122に電極145、144、143、142、400が積層され、電極400にトンネル磁気抵抗効果素子の配向制御膜300が接続されている。

【0114】

ビット線401は上記トンネル磁気抵抗効果素子200の保護膜304に接続されている。本実施例の磁気メモリセルでは、トンネル磁気抵抗効果素子200に流れる電流、いわゆるスピントランスファートルクによりトンネル磁気抵抗効果素子200の強磁性自由層の磁化方向を回転し磁気的情報を記録する。スピントランスファートルクは空間的な外部磁界ではなく、主としてトンネル磁気抵抗効果素子中を流れるスピン偏極した電流のスピンがトンネル磁気抵抗効果素子の強磁性自由層の磁気モーメントにトルクを与える原理である。このスピン偏極した電流は、トンネル磁気抵抗効果素子に電流を流すこと自身で発生するメカニズムをもつ。したがって、トンネル磁気抵抗効果素子に外部から電流を供給する手段を備え、その手段から電流を流すことによりスピントランスファートルク磁化反転は実現される。本実施例では、ビット線401と電極147の間に電流が流れることによりトンネル磁気抵抗効果素子200中の強磁性自由層にスピントランスファートルクが作用する。スピントランスファートルクにより書込みを行った場合、書込み時の電力は電流磁界を用いた場合に比べ百分の一程度まで低減可能である。

【0115】

図29は、上記磁気メモリセルを配置した磁気ランダムアクセスメモリの構成例を示す図である。ゲート電極123とビット線401がメモリセル700に電氣的に接続されている。本発明の磁気メモリは超高速・低消費電力で動作が可能であり、ギガビット級の高密度磁気ランダムアクセスメモリを実現可能である。

【図面の簡単な説明】

【0116】

【図1】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図2】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図3】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図4】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図5】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図6】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

10

20

30

40

50

【図 7】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 8】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 9】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における 3 層で構成される障壁層のエネルギーギャップ関係の模式図。

【図 10】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における 2 層で構成される障壁層のエネルギーギャップ関係の模式図。

【図 11】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における電流と印加電圧の関係を示す図。

【図 12 A】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における TMR 比と印加電圧の関係を示す図。

【図 12 B】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における書込み電流密度 J_c と TMR 比の関係を示す図。

【図 13】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 14】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 15】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 16】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 17】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 18】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 19】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 20】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 21】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 22】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子の構成例を示した図。

【図 23】本発明の量子井戸形成層を用いた共鳴トンネル磁気抵抗効果素子におけるエネルギーギャップ関係の模式図。

【図 24】本発明の量子井戸形成層を用いた共鳴トンネル磁気抵抗効果素子におけるエネルギーギャップ関係の模式図。

【図 25】本発明の量子井戸形成層を用いた共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における電流と印加電圧の関係を示す図。

【図 26】本発明の量子井戸形成層を用いた共鳴トンネル磁気抵抗効果素子における TMR 比と印加電圧の関係を示す図。

【図 27】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気メモリセルの構成例を示す図。

【図 28】本発明の共鳴トンネル磁気抵抗効果素子を用いた磁気メモリセルの構成例を示す図。

【図 29】本発明の共鳴トンネル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の構成例を示す図。

【符号の説明】

【0117】

100 ... トランジスタ、200 ... 共鳴トンネル磁気抵抗効果素子、101 ... 第一の n 型半導体、102 ... 第二の n 型半導体、103 ... p 型半導体、122 ... ソース電極、401 ... ビット線、121 ... ドレイン電極、123 ... ゲート電極、141 ... 電極配線、142 ... 電極配線、143 ... 電極配線、144 ... 電極配線、145 ... 電極配線、300 ... 配向制御膜、301 ... 強磁性固定層、3011 ... 第一の強磁性固定層、3012 ... 非磁性層、3013 ... 第二の強磁性固定層、302 ... 障壁層、3021 ... 第一の障壁層、3022 ... 第二の障壁層、3023 ... 第三の障壁層、303 ... 強磁性自由層、3031 ... 第一の強磁性自由層、3032 ... 非磁性層、3033 ... 強磁性自由層、304 ... 保護膜、400, 401 ... 電極、500 ... 反強磁性層、600 ... 量子井戸形成層、700 ... 磁気メモリセル

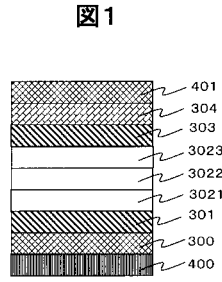
10

20

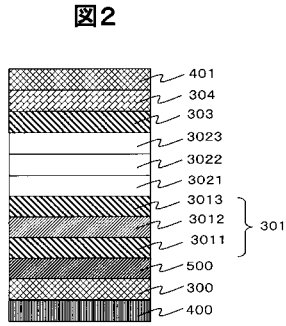
30

40

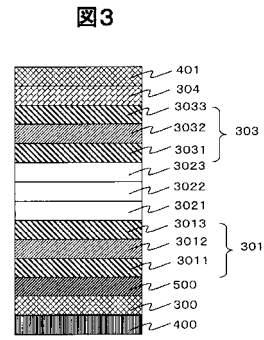
【 図 1 】



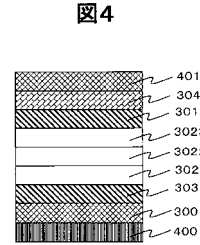
【 図 2 】



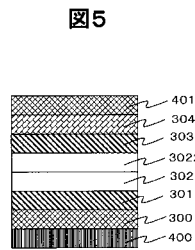
【 図 3 】



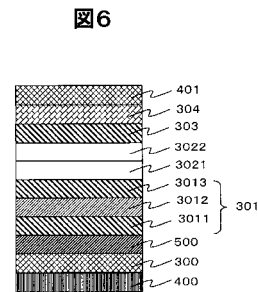
【 図 4 】



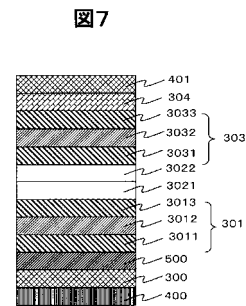
【 図 5 】



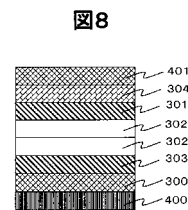
【 図 6 】



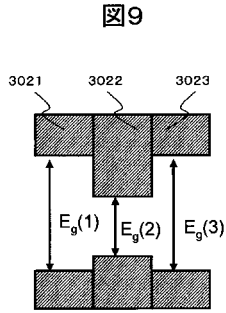
【 図 7 】



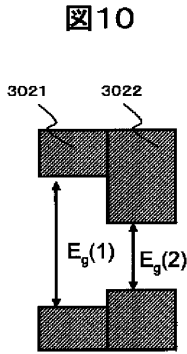
【 図 8 】



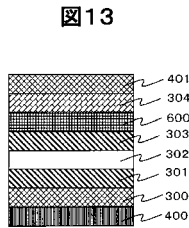
【 図 9 】



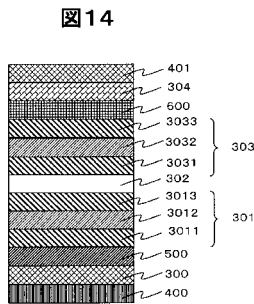
【 図 10 】



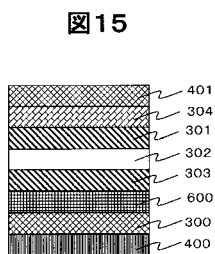
【 図 13 】



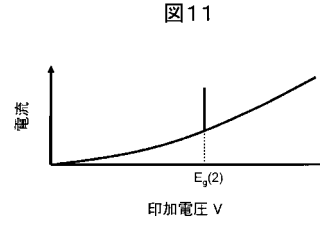
【 図 14 】



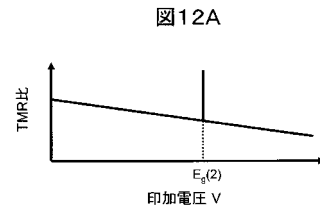
【 図 15 】



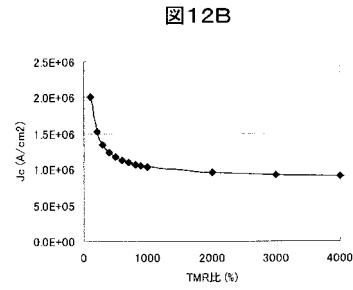
【 図 11 】



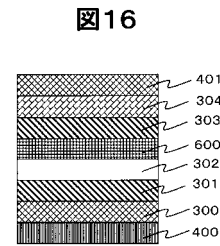
【 図 12 A 】



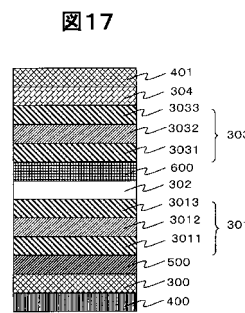
【 図 12 B 】



【 図 16 】

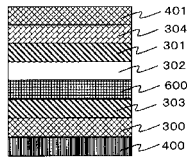


【 図 17 】



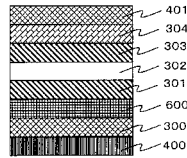
【 图 18 】

图18



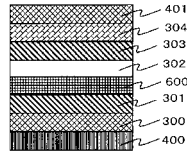
【 图 19 】

图19



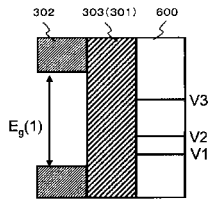
【 图 20 】

图20



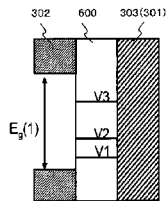
【 图 23 】

图23



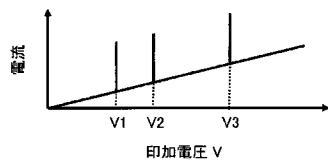
【 图 24 】

图24



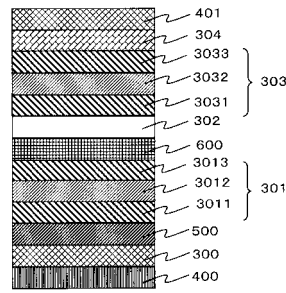
【 图 25 】

图25



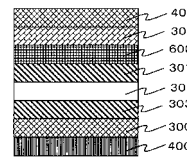
【 图 21 】

图21



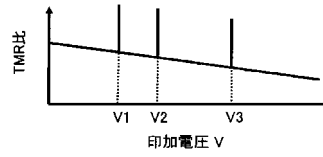
【 图 22 】

图22



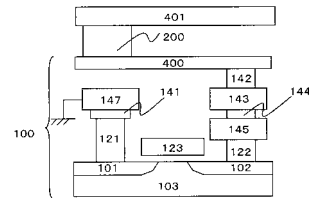
【 图 26 】

图26



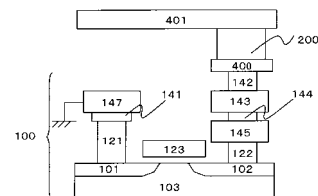
【 图 27 】

图27



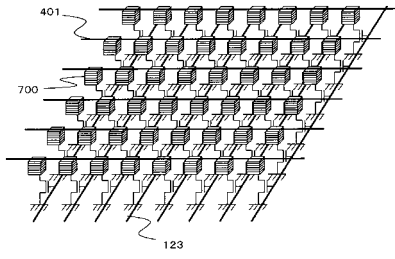
【 图 28 】

图28



【 図 29 】

図29



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 F 10/32 (2006.01) H 0 1 F 10/30
H 0 1 F 10/30 (2006.01)

(72)発明者 早川 純
埼玉県比企郡鳩山町赤沼 2 5 2 0 番地 株式会社日立製作所 基礎研究所内

審査官 橘 均憲

(56)参考文献 特開 2 0 0 7 - 3 0 5 6 1 0 (J P , A)
特開 2 0 0 8 - 1 6 0 0 3 1 (J P , A)
特表 2 0 0 9 - 5 1 2 2 0 4 (J P , A)
大下 淳一, “連載『メモリーの将来像を読む』 第4回 ポストDRAMの座を狙う 新型RAMの開発競争が激化”, NIKKEI MICRODEVICES, 日本, 日経マイクロデバイス, 2 0 0 8 年
2月 1日, 第272号, p.55-p.60

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 L 4 3 / 0 8
H 0 1 F 1 0 / 3 0
H 0 1 F 1 0 / 3 2
H 0 1 L 2 1 / 8 2 4 6
H 0 1 L 2 7 / 1 0 5
H 0 1 L 2 9 / 8 2
H 0 1 L 4 3 / 1 0