

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5867030号
(P5867030)

(45) 発行日 平成28年2月24日(2016.2.24)

(24) 登録日 平成28年1月15日(2016.1.15)

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

請求項の数 12 (全 25 頁)

(21) 出願番号	特願2011-263289 (P2011-263289)
(22) 出願日	平成23年12月1日 (2011.12.1)
(65) 公開番号	特開2013-115401 (P2013-115401A)
(43) 公開日	平成25年6月10日 (2013.6.10)
審査請求日	平成26年11月20日 (2014.11.20)

(73) 特許権者	000002185 ソニー株式会社 東京都港区港南1丁目7番1号
(74) 代理人	100086841 弁理士 脇 篤夫
(74) 代理人	100114122 弁理士 鈴木 伸夫
(74) 代理人	100167704 弁理士 中川 裕人
(72) 発明者	山根 一陽 東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内
(72) 発明者	細見 政功 東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】記憶素子、記憶装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される記憶層と、上記記憶層に記憶された情報の基準となる、膜面に垂直な磁化を有する磁化固定層と、上記記憶層と上記磁化固定層の間に設けられる非磁性体による中間層と、を有する層構造を備え、

上記層構造の積層方向に電流を流すことによって上記記憶層の磁化の向きが変化して、上記記憶層に対して情報の記録が行われるとともに、

上記記憶層は、正の磁歪定数を持つ磁性層を有し、

上記層構造に加えてさらに、上記記憶層に隣接するキャップ層に負熱膨張材料層が設けられ、

上記記憶層に接する上記中間層と、該中間層とは反対側で上記記憶層が接する他方の層は、少なくとも上記記憶層と接する界面が酸化物層とされている記憶素子。

【請求項 2】

上記他方の層の上記酸化物層が、上記負熱膨張材料層である請求項 1 に記載の記憶素子。

【請求項 3】

上記他方の層の、上記記憶層と接する界面以外の層として、上記負熱膨張材料層が設けられている請求項 1 又は請求項 2 に記載の記憶素子。

【請求項 4】

10

20

さらに、上記記憶層における上記磁性層のヤング率よりも高いヤング率の材料による高ヤング率層が上記キャップ層の上部に設けられる請求項1乃至請求項3のいずれかに記載の記憶素子。

【請求項5】

上記負熱膨張材料層は、導電材料であるMn₃(x)Nを有して形成されている請求項1乃至請求項4のいずれかに記載の記憶素子。

【請求項6】

上記xは、Zn-Sn、Cu-Ge、又はCu-Snのいずれかである請求項5に記載の記憶素子。

【請求項7】

上記負熱膨張材料層は、ZrW₂O₈、BiNiO₃、Li₂O-Al₂O₃-nSiO₂のいずれか1つを少なくとも有して形成されている請求項1乃至請求項6のいずれかに記載の記憶素子。

【請求項8】

上記正の磁歪定数を持つ磁性層は、Co-Fe-B磁性層である請求項1乃至請求項7のいずれかに記載の記憶素子。

【請求項9】

上記記憶層は、Co-Fe-B磁性層と、少なくとも1つの非磁性層を有し、

上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層及び上記非磁性層を含んで、酸化物層、上記Co-Fe-B磁性層、上記非磁性層が積層された積層構造部が形成されている請求項1乃至請求項8のいずれかに記載の記憶素子。

【請求項10】

上記中間層の酸化物層と、上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層と、上記記憶層の上記非磁性層により、上記積層構造部が形成されている請求項9に記載の記憶素子。

【請求項11】

上記他方の層の酸化物層と、上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層と、上記記憶層の上記非磁性層により、上記積層構造部が形成されている請求項9又は請求項10に記載の記憶素子。

【請求項12】

情報を磁性体の磁化状態により保持する記憶素子と、

互いに交差する2種類の配線とを備え、

上記記憶素子は、

膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される記憶層と、

上記記憶層に記憶された情報の基準となる、膜面に垂直な磁化を有する磁化固定層と、上記記憶層と上記磁化固定層の間に設けられる非磁性体による中間層と、

を有する層構造を備え、

上記層構造の積層方向に電流を流すことによって上記記憶層の磁化の向きが変化して、上記記憶層に対して情報の記録が行われるとともに、

上記記憶層は、正の磁歪定数を持つ磁性層を有し、

上記層構造に加えてさらに、上記記憶層に隣接するキャップ層に負熱膨張材料層が設けられ、

上記記憶層に接する上記中間層と、該中間層とは反対側で上記記憶層が接する他方の層は、少なくとも上記記憶層と接する界面が酸化物層とされている構成とされ、

上記2種類の配線の間に上記記憶素子が配置され、

上記2種類の配線を通じて、上記記憶素子に上記積層方向の電流が流れる記憶装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本開示は、複数の磁性層を有し、スピントルク磁化反転を利用して記録を行う記憶素子及び記憶装置に関する。

10

20

30

40

50

【先行技術文献】

【特許文献】

【0002】

【特許文献1】特開2003-17782号公報

【特許文献2】米国特許第6256223号明細書

【特許文献3】特開2008-227388号公報

【非特許文献】

【0003】

【非特許文献1】Physical Review B, 54, 9353(1996)

【非特許文献2】Journal of Magnetism and Magnetic Materials, 159, L1(1996) 10

【非特許文献3】Nature Materials., 5, 210(2006)

【背景技術】

【0004】

モバイル端末から大容量サーバに至るまで、各種情報機器の飛躍的な発展に伴い、これを構成するメモリやロジックなどの素子においても高集積化、高速化、低消費電力化など、さらなる高性能化が追求されている。特に半導体不揮発性メモリの進歩は著しく、大容量ファイルメモリとしてのフラッシュメモリは、ハードディスクドライブを駆逐する勢いで普及が進んでいる。一方、コードストレージ用さらにはワーキングメモリへの展開を睨み、現在一般に用いられているNORフラッシュメモリ、DRAMなどを置き換えるべくFeRAM(Ferroelectric Random Access Memory)、MRAM(Magnetic Random Access Memory)、PCRAM(Phase-Change Random Access Memory)などの開発が進められている。これらのうち一部はすでに実用化されている。

【0005】

なかでもMRAMは、磁性体の磁化方向によりデータ記憶を行うために高速かつほぼ無限(10^{15} 回以上)の書換えが可能であり、すでに産業オートメーションや航空機などの分野で使用されている。MRAMはその高速動作と信頼性から、今後コードストレージやワーキングメモリへの展開が期待されているものの、現実には低消費電力化、大容量化に課題を有している。これはMRAMの記録原理、すなわち配線から発生する電流磁界により磁化を反転させるという方式に起因する本質的な課題である。

【0006】

この問題を解決するための一つの方法として、電流磁界によらない記録、すなわち磁化反転方式が検討されている。なかでもスピントルク磁化反転に関する研究は活発である(例えば、特許文献1、2、3、非特許文献1、2参照)。

【0007】

スピントルク磁化反転の記憶素子は、MRAMと同じくMTJ(Magnetic Tunnel Junction)により構成されている場合が多い。

この構成は、ある方向に固定された磁性層を通過する спин偏極電子が、他の自由な(方向を固定されない)磁性層に進入する際にその磁性層にトルクを与えること(これをスピントransファトルクとも呼ぶ)を利用してるので、あるしきい値以上の電流を流せば自由磁性層が反転する。0/1の書換えは電流の極性を変えることにより行う。

この反転のための電流の絶対値は0.1 μm程度のスケールの素子で1mA以下である。しかもこの電流値が素子体積に比例して減少するため、スケーリングが可能である。さらに、MRAMで必要であった記録用電流磁界発生用のワード線が不要であるため、セル構造が単純になるという利点もある。

以下、スピントルク磁化反転を利用したMRAMを、ST-MRAM(Spin Torque-Magnetic Random Access Memory)と呼ぶ。スピントルク磁化反転は、またスピノ注入磁化反転と呼ばれることもある。高速かつ書換え回数がほぼ無限大であるというMRAMの利点を保ったまま、低消費電力化、大容量化を可能とする不揮発メモリとして、ST-MRAMに大きな期待が寄せられている。

【発明の概要】

10

20

30

40

50

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

ところでMRAMの場合は、記憶素子とは別に書き込み配線（ワード線やビット線）を設けて、書き込み配線に電流を流して発生する電流磁界により、情報の書き込み（記録）を行っている。そのため、書き込み配線に、書き込みに必要となる電流量を充分に流すことができる。

一方、ST-MRAMにおいては、記憶素子に流す電流によりスピントルク磁化反転を行い、記憶層の磁化の向きを反転させる必要がある。

そして、このように記憶素子に直接電流を流して情報の書き込み（記録）を行うことから、書き込みを行うメモリセルを選択するために、記憶素子を選択トランジスタと接続してメモリセルを構成する。この場合、記憶素子に流れる電流は、選択トランジスタに流すことが可能な電流（選択トランジスタの飽和電流）の大きさに制限される。
10

【0009】

このため、選択トランジスタの飽和電流以下の電流で書き込みを行う必要があり、トランジスタの飽和電流は微細化に伴って低下することが知られているため、ST-MRAMの微細化のためには、スピントランスマニアの効率を改善して、記憶素子に流す電流を低減させる必要がある。

【0010】

また、読み出し信号を大きくするためには、大きな磁気抵抗変化率を確保する必要があり、そのためには上述のようなMTJ構造を採用すること、すなわち記憶層に接している中間層をトンネル絶縁層（トンネルバリア層）とした記憶素子の構成にすることが効果的である。
20

このように中間層としてトンネル絶縁層を用いた場合には、トンネル絶縁層が絶縁破壊することを防ぐために、記憶素子に流す電流量に制限が生じる。すなわち記憶素子の繰り返し書き込みに対する信頼性の確保の観点からも、スピントルク磁化反転に必要な電流を抑制しなくてはならない。

なお、スピントルク磁化反転に必要な電流は、また、反転電流、記録電流などと呼ばれることがある。

【0011】

また一方で、ST-MRAMは不揮発メモリであるから、電流によって書き込まれた情報を安定に記憶する必要がある。つまり、記憶層の磁化の熱揺らぎに対する安定性（熱安定性）を確保する必要がある。
30

記憶層の熱安定性が確保されていないと、反転した磁化の向きが、熱（動作環境における温度）により再反転する場合があり、書き込みエラーとなってしまう。

ST-MRAMにおける記憶素子は、従来のMRAMと比較して、スケーリングにおいて有利、すなわち記憶層の体積を小さくすることが可能であるという利点があることを記録電流値の観点で上述した。しかしながら、体積が小さくなることは、他の特性が同一であるならば、熱安定性を低下させる方向にある。

ST-MRAMの大容量化を進めた場合、記憶素子の体積は一層小さくなるので、熱安定性の確保は重要な課題となる。
40

【0012】

そのため、ST-MRAMにおける記憶素子において、熱安定性は非常に重要な特性であり、体積を減少させてもこの熱安定性が確保されるように設計する必要がある。

すなわち、ST-MRAMが不揮発メモリとして存在し得るために、スピントルク磁化反転に必要な反転電流をトランジスタの飽和電流やトンネルバリアが破壊される電流以下に減らし、また、書き込まれた情報を保持するための熱安定性を確保する必要がある。しかしながら、磁性体の性質上、環境温度が上がったときに本質的に熱安定性が低下していくという課題を有している。

【0013】

そこで本開示では、環境温度によらずに熱安定性を確保できるST-MRAMとしての
50

記憶素子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】

【0014】

本開示の記憶素子は、膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される記憶層と、上記記憶層に記憶された情報の基準となる、膜面に垂直な磁化を有する磁化固定層と、上記記憶層と上記磁化固定層の間に設けられる非磁性体による中間層とを有する層構造を備える。そして上記層構造の積層方向に電流を流すことで上記記憶層の磁化の向きが変化して、上記記憶層に対して情報の記録が行われる。さらに、上記記憶層は、正の磁歪定数を持つ磁性層を有し、上記層構造に加えてさらに、上記記憶層に隣接するキャップ層に負熱膨張材料層が設けられる。さらに、上記記憶層に接する上記中間層と、該中間層とは反対側で上記記憶層が接する他方の層は、少なくとも上記記憶層と接する界面が酸化物層とされている

10

【0015】

また、本開示の記憶装置は、情報を磁性体の磁化状態により保持する記憶素子と、互いに交差する2種類の配線とを備え、記憶素子は上記の構成の記憶素子であり、2種類の配線の間に記憶素子が配置され、二種類の配線を通じて、記憶素子に積層方向の電流が流れれる。

【0016】

本開示の記憶素子によれば、情報を磁性体の磁化状態により保持する記憶層を有し、この記憶層に対して、中間層を介して磁化固定層が設けられており、積層方向に流れる電流に伴って発生するスピントルク磁化反転を利用して記憶層の磁化を反転させることにより情報の記録が行われるので、積層方向に電流を流すことで情報の記録を行うことができる。このとき、記憶層が垂直磁化膜であることにより、記憶層の磁化の向きを反転させるために必要となる書き込み電流値を低減することができる。

20

一方で、垂直磁化膜の有する強い磁気異方性エネルギーのために体積の小さい記憶層においても熱安定性を十分に保つことができる。さらに、室温より高い状態での熱安定性も高い状態に保つことができる。

熱安定性は、磁性体の性質上、環境温度が上がったときに低下していく。このため本開示では、温度上昇に伴って収縮していく負熱膨張材料による層を設ける。

垂直磁化磁性体は面方向に引っ張られると保磁力が上昇する。温度上昇によって記憶層の保磁力は低下し、熱安定性は低下するが、その一方で、負熱膨張材料層が収縮して記憶層が引っ張られることで保磁力は上昇する。これによって、保磁力の低下を弱め、熱安定性が大きく低下しないように維持できる。

30

【0017】

また、本開示の記憶装置の構成によれば、2種類の配線を通じて、記憶素子に積層方向の電流が流れ、スピントランスマニアが起こることにより、2種類の配線を通じて記憶素子の積層方向に電流を流してスピントルク磁化反転による情報の記録を行うことができる。

また、環境温度によらず上記記憶層の熱安定性を保つことができるため、記憶素子に記録された情報を安定に保持し、かつ記憶装置の微細化、信頼性の向上、低消費電力化を実現することが可能になる。

40

【発明の効果】

【0018】

本開示によれば、室温より高い温度でも高い垂直磁気異方性を有する記憶素子が得られるため、情報保持能力である熱安定性を充分に確保して、広い温度領域で特性バランスに優れた記憶素子を構成することができる。

これにより、動作エラーをなくして、記憶素子の動作マージンを充分に得ることができる。従って、安定して動作する、信頼性の高いメモリを実現することができる。

また、書き込み電流を低減して、記憶素子に書き込みを行う際の消費電力を低減することが可能になる。

従って、記憶装置全体の消費電力を低減することが可能になる。

50

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】本開示の実施の形態の記憶装置の説明図である。

【図2】実施の形態の記憶装置の断面図である。

【図3】実施の形態の記憶素子の構造の説明図である。

【図4】実施の形態の記憶素子の具体例の説明図である。

【図5】実施の形態の記憶素子の具体例の説明図である。

【図6】実施の形態の積層構造部の説明図である。

【図7】実験試料の層構造の説明図である。

【図8】実験試料の熱安定性指標 $K_V / k_B T$ と測定環境温度の関係の説明図である。 10

【図9】実施の形態の磁気ヘッド適用例の説明図である。

【発明を実施するための形態】

【0020】

以下、本発明の実施の形態を次の順序で説明する。

<1. 実施の形態の記憶装置の構成>

<2. 実施の形態の記憶素子の概要>

<3. 実施の形態の具体的構成>

<4. 実験>

<5. 変形例>

【0021】

<1. 実施の形態の記憶装置の構成> 20

まず、本開示の実施の形態となる記憶装置の構成について説明する。

実施の形態の記憶装置の模式図を、図1及び図2に示す。図1は斜視図、図2は断面図である。

【0022】

図1に示すように、実施の形態の記憶装置は、互いに直交する2種類のアドレス配線（例えばワード線とビット線）の交点付近に、磁化状態で情報を保持することができるS T - M R A Mによる記憶素子3が配置されて成る。

即ち、シリコン基板等の半導体基体10の素子分離層2により分離された部分に、各記憶装置を選択するための選択用トランジスタを構成する、ドレイン領域8、ソース領域7、並びにゲート電極1が、それぞれ形成されている。このうち、ゲート電極1は、図中前後方向に延びる一方のアドレス配線（ワード線）を兼ねている。 30

【0023】

ドレイン領域8は、図1中左右の選択用トランジスタに共通して形成されており、このドレイン領域8には、配線9が接続されている。

そして、ソース領域7と、上方に配置された、図1中左右方向に延びるビット線6との間に、スピントルク磁化反転により磁化の向きが反転する記憶層を有する記憶素子3が配置されている。この記憶素子3は、例えば磁気トンネル接合素子（M T J素子）により構成される。 40

【0024】

図2に示すように、記憶素子3は2つの磁性層15、17を有する。この2層の磁性層15、17のうち、一方の磁性層を磁化M15の向きが固定された磁化固定層15として、他方の磁性層を磁化M17の向きが変化する磁化自由層即ち記憶層17とする。

また、記憶素子3は、ビット線6と、ソース領域7とに、それぞれ上下のコントクト層4を介して接続されている。

これにより、2種類のアドレス配線1、6を通じて、記憶素子3に上下方向の電流を流して、スピントルク磁化反転により記憶層17の磁化M17の向きを反転させることができる。

【0025】 50

このような記憶装置では、選択トランジスタの飽和電流以下の電流で書き込みを行う必要があり、トランジスタの飽和電流は微細化に伴って低下することが知られているため、記憶装置の微細化のためには、スピントランスマニアの効率を改善して、記憶素子3に流す電流を低減させることが好適である。

【0026】

また、読み出し信号を大きくするためには、大きな磁気抵抗変化率を確保する必要があり、そのためには上述のようなMTJ構造を採用すること、すなわち2層の磁性層15、17の間に中間層をトンネル絶縁層（トンネルバリア層）とした記憶素子3の構成にすることが効果的である。

このように中間層としてトンネル絶縁層を用いた場合には、トンネル絶縁層が絶縁破壊することを防ぐために、記憶素子3に流す電流量に制限が生じる。すなわち記憶素子3の繰り返し書き込みに対する信頼性の確保の観点からも、スピントルク磁化反転に必要な電流を抑制することが好ましい。なお、スピントルク磁化反転に必要な電流は、反転電流、記憶電流などと呼ばれることがある。

【0027】

また記憶装置は不揮発メモリ装置であるから、電流によって書き込まれた情報を安定に記憶する必要がある。つまり、記憶層の磁化の熱揺らぎに対する安定性（熱安定性）を確保する必要がある。

記憶層の熱安定性が確保されていないと、反転した磁化の向きが、熱（動作環境における温度）により再反転する場合があり、書き込みエラーとなってしまう。

本記憶装置における記憶素子3（ST-MRAM）は、従来のMRAMと比較して、スケーリングにおいて有利、すなわち体積を小さくすることは可能であるが、体積が小さくなることは、他の特性が同一であるならば、熱安定性を低下させる方向にある。

ST-MRAMの大容量化を進めた場合、記憶素子3の体積は一層小さくなるので、熱安定性の確保は重要な課題となる。

そのため、ST-MRAMにおける記憶素子3において、熱安定性は非常に重要な特性であり、体積を減少させてもこの熱安定性が確保されるように設計する必要がある。

【0028】

<2. 実施の形態の記憶素子の概要>

次に実施の形態となる記憶素子の概要について説明する。

実施の形態の記憶素子3は、前述したスピントルク磁化反転により、記憶層の磁化の向きを反転させて、情報の記録を行うものである。

記憶層は、強磁性層を含む磁性体により構成され、情報を磁性体の磁化状態（磁化の向き）により保持するものである。

【0029】

記憶素子3は、例えば図3に一例を示す層構造とされ、少なくとも2つの強磁性体層としての記憶層17、磁化固定層15を備え、またその2つの磁性層の間の中間層16を備える。

記憶層17は、膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される。

磁化固定層15は、記憶層17に記憶された情報の基準となる膜面に垂直な磁化を有する。

中間層16は、非磁性体であって、記憶層17と磁化固定層15の間に設けられる。

【0030】

そして記憶層17、中間層16、磁化固定層15を有する層構造の積層方向にスピニ偏極した電子を注入することにより、記憶層17の磁化の向きが変化して、記憶層17に対して情報の記録が行われる。

【0031】

ここでスピントルク磁化反転について簡単に説明する。

電子は2種類のスピニ角運動量をもつ。仮にこれを上向き、下向きと定義する。非磁性

10

20

30

40

50

体内部では両者が同数であり、強磁性体内部では両者の数に差がある。S T - M R A Mを構成する2層の強磁性体である磁化固定層15及び記憶層17において、互いの磁気モーメントの向きが反方向状態のときに、電子を磁化固定層15から記憶層17への移動させた場合について考える。

【0032】

磁化固定層15は、高い保磁力のために磁気モーメントの向きが固定された固定磁性層である。

磁化固定層15を通過した電子はスピン偏極、すなわち上向きと下向きの数に差が生じる。非磁性層である中間層16の厚さが充分に薄く構成されていると、磁化固定層15の通過によるスピン偏極が緩和して通常の非磁性体における非偏極（上向きと下向きが同数）状態になる前に他方の磁性体、すなわち記憶層17に電子が達する。
10

【0033】

記憶層17では、スピン偏極度の符号が逆になっていることにより、系のエネルギーを下げるために一部の電子は反転、すなわちスピン角運動量の向きをかえさせられる。このとき、系の全角運動量は保存されなくてはならないため、向きを変えた電子による角運動量変化の合計と等価な反作用が記憶層17の磁気モーメントにも与えられる。

電流すなわち単位時間に通過する電子の数が少ない場合には、向きを変える電子の総数も少ないので記憶層17の磁気モーメントに発生する角運動量変化も小さいが、電流が増えると多くの角運動量変化を単位時間内に与えることができる。
20

【0034】

角運動量の時間変化はトルクであり、トルクがあるしきい値を超えると記憶層17の磁気モーメントは歳差運動を開始し、その一軸異方性により180度回転したところで安定となる。すなわち反方向状態から同方向状態への反転が起こる。

磁化が同方向状態にあるとき、電流を逆に記憶層17から磁化固定層15へ電子を送る向きに流すと、今度は磁化固定層15で反射される際にスピン反転した電子が記憶層17に進入する際にトルクを与え、反方向状態へと磁気モーメントを反転させることができる。ただしこの際、反転を起こすのに必要な電流量は、反方向状態から同方向状態へと反転させる場合よりも多くなる。

【0035】

磁気モーメントの同方向状態から反方向状態への反転は直感的な理解が困難であるが、磁化固定層15が固定されているために磁気モーメントが反転できず、系全体の角運動量を保存するために記憶層17が反転する、と考えてもよい。このように、0/1の記録は、磁化固定層15から記憶層17の方向またはその逆向きに、それぞれの極性に対応する、あるしきい値以上の電流を流すことによって行われる。
30

【0036】

情報の読み出しが、従来型のM R A Mと同様、磁気抵抗効果を用いて行われる。すなわち上述の記録の場合と同様に膜面垂直方向に電流を流す。そして、記憶層17の磁気モーメントが、磁化固定層15の磁気モーメントに対して同方向であるか反方向であるかに従い、素子の示す電気抵抗が変化する現象を利用する。

【0037】

磁化固定層15と記憶層17の中間に中間層16として用いる材料は金属でも絶縁体でも構わないが、より高い読み出し信号（抵抗の変化率）が得られ、かつより低い電流によって記録が可能とされるのは、中間層として絶縁体を用いた場合である。このときの素子を強磁性トンネル接合（Magnetic Tunnel Junction：M T J）と呼ぶ。
40

【0038】

スピントルク磁化反転によって、磁性層の磁化の向きを反転させるときに、必要となる電流の閾値 I_c は、磁性層の磁化容易軸が面内方向であるか、垂直方向であるかによって異なる。

本実施の形態の記憶素子は垂直磁化型であるが、従前の面内磁化型の記憶素子の場合における磁性層の磁化の向きを反転させる反転電流を I_{c_para} とする。
50

同方向から逆方向に反転させる場合、

$$I_{c_para} = (A \cdot M_s \cdot V / g(0) / P) (H_k + 2 M_s)$$

となり、逆方向から同方向に反転させる場合、

$$I_{c_para} = - (A \cdot M_s \cdot V / g() / P) (H_k + 2 M_s)$$

となる。

なお、同方向、逆方向とは、磁化固定層の磁化方向を基準としてみた記憶層の磁化方向である。平行、反平行とも呼ばれる。

【0039】

一方、本例のような垂直磁化型の記憶素子の反転電流を I_{c_perp} とすると、同方向から逆方向に反転させる場合、

$$I_{c_perp} = (A \cdot M_s \cdot V / g(0) / P) (H_k - 4 M_s)$$

となり、逆方向から同方向に反転させる場合、

$$I_{c_perp} = - (A \cdot M_s \cdot V / g() / P) (H_k - 4 M_s)$$

となる。

【0040】

ただし、A は定数、 γ はダンピング定数、 M_s は飽和磁化、V は素子体積、P はスピン分極率、 $g(0)$ 、 $g()$ はそれぞれ同方向時、逆方向時にスピントルクが相手の磁性層に伝達される効率に対応する係数、 H_k は磁気異方性である。

【0041】

上記各式において、垂直磁化型の場合の ($H_k - 4 M_s$) と面内磁化型の場合の ($H_k + 2 M_s$) とを比較すると、垂直磁化型が低記憶電流化により適していることが理解できる。

【0042】

ここで、反転電流 I_c は熱安定性の指標 α との関係で表すと次の(数1)により表される。

【数1】

$$I_c = \left(\frac{4e k_B T}{\hbar} \right) \left(\frac{\alpha \Delta}{\eta} \right)$$

10

20

30

但し e は電子の電荷、 α はスピン注入効率、バー付きの \hbar は換算プランク定数、 η はダンピング定数、 k_B はボルツマン定数、T は温度である。

【0043】

本実施の形態では、磁化状態により情報を保持することができる磁性層(記憶層17)と、磁化の向きが固定された磁化固定層15とを有する記憶素子を構成する。

メモリとして存在し得るためには、書き込まれた情報を保持することができなければならない。情報を保持する能力の指標として、熱安定性の指標 α ($= KV / k_B T$) の値で判断される。この α は(数2)により表される。

【数2】

$$\Delta = \frac{KV}{k_B T} = \frac{M_s V H_K}{2k_B T}$$

ここで、 H_k は実効的な異方性磁界、 k_B はボルツマン定数、T は温度、 M_s は飽和磁

50

化量、 V は記憶層の体積、 K は異方性エネルギーである。

【0044】

実効的な異方性磁界 H_k には、形状磁気異方性、誘導磁気異方性、結晶磁気異方性等の影響が取り込まれており、単磁区の一斉回転モデルを仮定した場合、これは保磁力と同等となる。

【0045】

熱安定性の指標 Δ と電流の閾値 I_c とは、トレードオフの関係になることが多い。そのため、メモリ特性を維持するには、これらの両立が課題となることが多い。

記憶層の磁化状態を変化させる電流の閾値は、実際には、例えば記憶層 17 の厚さが 2 nm であり、平面パターンが直径 100 nm 円形の TMR 素子において、百～数百 μA 程度である。10

これに対して、電流磁場により磁化反転を行う通常の MRAM では、書き込み電流が数 mA 以上必要となる。

従って、ST-MRAM の場合には、上述のように書き込み電流の閾値が充分に小さくなるため、集積回路の消費電力を低減するために有効であることが分かる。

また、通常の MRAM で必要とされる、電流磁界発生用の配線が不要となるため、集積度においても通常の MRAM に比較して有利である。

【0046】

そして、スピントルク磁化反転を行う場合には、記憶素子に直接電流を流して情報の書き込み（記録）を行うことから、書き込みを行うメモリセルを選択するために、記憶素子を選択トランジスタと接続してメモリセルを構成する。20

この場合、記憶素子に流れる電流は、選択トランジスタで流すことが可能な電流（選択トランジスタの飽和電流）の大きさによって制限される。

【0047】

記録電流を低減させるためには、上述のように垂直磁化型を採用することが望ましい。また垂直磁化膜は一般に面内磁化膜よりも高い磁気異方性を持たせることが可能であるため、上述の を大きく保つ点でも好ましい。

【0048】

垂直異方性を有する磁性材料には希土類 - 遷移金属合金（TbCoFe など）、金属多層膜（Co / Pd 多層膜など）、規則合金（FePt など）、酸化物と磁性金属の間の界面異方性の利用（Co / MgO など）等いくつかの種類があるが、希土類 - 遷移金属合金は加熱により拡散、結晶化すると垂直磁気異方性を失うため、ST-MRAM 用材料としては好ましくない。30

また金属多層膜も加熱により拡散し、垂直磁気異方性が劣化することが知られており、さらに垂直磁気異方性が発現するのは面心立方の (111) 配向となっている場合であるため、MgO やそれに隣接して配置する Fe、CoFe、CoFeB などの高分極率層に要求される (001) 配向を実現させることが困難となる。L10 規則合金は高温でも安定であり、かつ (001) 配向時に垂直磁気異方性を示すことから、上述のような問題は起こらないものの、製造時に 500 以上の十分に高い温度で加熱する、あるいは製造後に 500 以上の高温で熱処理を行うことで原子を規則配列させる必要があり、トンネルバリア等積層膜の他の部分における好ましくない拡散や界面粗さの増大を引き起こす可能性がある。40

【0049】

これに対し、界面磁気異方性を利用した材料、すなわちトンネルバリアである MgO 上に Co 系あるいは Fe 系材料を積層させたものは上記いずれの問題も起こり難く、このため ST-MRAM の記憶層材料として有望視されている。

【0050】

ところで上記（数 2）で示したように、熱安定性指標 $K_V / k_B T$ は実効的な異方性磁界 H_k を使って表現されるが、一般に、同一の記憶層を用いる場合、実効的な異方性磁界 H_k と保磁力 H_c は対応した関係にあるため、保磁力 H_c の増大は実効的な異方性磁界 H 50

k_B の増大も意味している。

通常、記憶層の保磁力 : H_{c_MTJ} は環境温度の上昇とともに減少してしまう。

このため、環境温度が上昇すると熱安定性指標 $KV/k_B T$ は室温で得られていた値より、小さくなってしまう。

従って、環境温度が上昇すると、ST-MRAM を安定して動作させることが難しくなる。

【0051】

この課題を解決するため、発明者らは、膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される記憶層と、上記記憶層に記憶された情報の基準となる、膜面に垂直な磁化を有する磁化固定層と、上記記憶層と上記磁化固定層の間に設けられる非磁性体による中間層とを有する層構造を備え、上記層構造の積層方向にスピン偏極した電子を注入することにより、上記記憶層の磁化の向きが変化して、上記記憶層に対して情報の記録が行われるとともに、上記記憶層は、正の磁歪定数を持つ磁性層を有し、上記層構造に加えてさらに、負熱膨張材料層が設けられる記憶素子を見出した。

ここで、負熱膨張材料とは温度上昇とともに体積が縮小する材料である。なお、逆に温度上昇とともに体積が増加する材料は正熱膨張材料という。

【0052】

外部から応力などによる歪みが加えられる場合の ST-MRAM に用いる記憶層 17 の保磁力 H_c は下記(数3)により表される。

【数3】

$$H_c = H_{c_MTJ} + \frac{3\sigma\lambda}{Ms}$$

ここで、 H_{c_MTJ} : 記憶層の本質的な保磁力 H_c 、 σ : 記憶層を構成する材料の磁歪定数、 λ : 磁化容易軸(記憶層膜面直方向)に沿った記憶層における応力(正の値は引張応力、負の値は圧縮応力である。)、 Ms : 定数である。

【0053】

上記(数3)の右辺第一項は記憶層 17 を構成する材料固有の値であり、MTJ を構成する材料によって決定される。(数3)の右辺第二項は記憶層の内部応力に起因した値であり、MTJ の周辺材料の歪みなどで変化させることができる。

【0054】

一般に、物質は環境温度が上昇すると、膨張する(正熱膨張)。それに対して、特殊な材料系では、室温より大きなある温度範囲で縮小する(負熱膨張)。

すなわち、トンネルバリアとは反対側で記憶層 17 と接する層近傍の材料に記憶層 17 の磁歪定数の符号に合わせて、磁歪定数が正の場合、引張応力が加わる負熱膨張材料を配することにより、環境温度上昇による熱安定性の低下を抑制できる。

そこで本実施の形態では、記憶層 17 は磁歪定数が正である Co-Fe-B をベースとする。そして図3に示したように、キャップ層 18 に、負熱膨張材料の層を設けるようとする。

【0055】

また、界面磁気異方性を起源とする垂直磁気異方性は、酸化物に含まれる酸素と Co あるいは Fe とが界面において結合することで生じると言われているが、規則合金が示す結晶磁気異方性や希土類系が示す一イオン異方性等と比較し、異方性エネルギー自体が小さい上に、磁性層厚が厚くなるに従って低下するという課題を有する。

この課題を解決するために、発明者は、酸化物を磁性金属の両側に配置し、酸化物と磁性金属の界面の数を増やすことで、記憶層 17 の垂直磁気異方性を高められることを見出した。

10

20

30

40

50

例えば、基板 / 下地層 14 / 磁化固定層 15 / 中間層 16（酸化物によるトンネルバリア層）/ 記憶層 17 / 少なくとも界面が酸化物のキャップ層という構造を採用することで、記憶層 17 の異方性を高めることができる。

また、酸化物層、Co - Fe - B 磁性層、非磁性層（非磁性添加材料）が積層された積層構造部をすくなくとも一つ含む層構造を採用することも、記憶層 17 の異方性を高めることができる。

【0056】

さらに、選択トランジスタの飽和電流値を考慮して、記憶層 17 と磁化固定層 15 との間の非磁性の中間層 16 として、絶縁体から成るトンネル絶縁層を用いて磁気トンネル接合（MTJ）素子を構成する。

10

トンネル絶縁層を用いて磁気トンネル接合（MTJ）素子を構成することにより、非磁性導電層を用いて巨大磁気抵抗効果（GMR）素子を構成した場合と比較して、磁気抵抗変化率（MR比）を大きくすることができ、読み出し信号強度を大きくすることができるためである。

そして、特に、このトンネル絶縁層としての中間層 16 の材料として、酸化マグネシウム（MgO）を用いることにより、磁気抵抗変化率（MR比）を大きくすることができる。

【0057】

また、一般に、スピントランスマニアの効率はMR比に依存し、MR比が大きいほど、スピントランスマニアの効率が向上し、磁化反転電流密度を低減することができる。

20

従って、トンネル絶縁層の材料として酸化マグネシウムを用い、同時に上記の記憶層 17 を用いることにより、スピントルク磁化反転による書き込み閾値電流を低減することができ、少ない電流で情報の書き込み（記録）を行うことができる。また、読み出し信号強度を大きくすることができる。

これにより、MR比（TMR比）を確保して、スピントルク磁化反転による書き込み閾値電流を低減することができ、少ない電流で情報の書き込み（記録）を行うことができる。また、読み出し信号強度を大きくすることができる。

【0058】

このようにトンネル絶縁層を酸化マグネシウム（MgO）膜により形成する場合には、MgO膜が結晶化していて、001方向に結晶配向性を維持していることがより望ましい。

30

なお、本実施の形態において、記憶層 17 と磁化固定層 15 との間の中間層 16（トンネル絶縁層）は、酸化マグネシウムから成る構成とする他にも、例えば酸化アルミニウム、窒化アルミニウム、SiO₂、Bi₂O₃、MgF₂、CaF、SrTiO₃、AlLaO₃、Al-N-O等の各種の絶縁体、誘電体、半導体を用いて構成することもできる。

【0059】

トンネル絶縁層の面積抵抗値は、スピントルク磁化反転により記憶層 17 の磁化の向きを反転させるために必要な電流密度を得る観点から、数十 μm^2 程度以下に制御する必要がある。

そして、MgO膜から成るトンネル絶縁層では、面積抵抗値を上述の範囲とするために、MgO膜の膜厚を1.5 nm以下に設定する必要がある。

40

【0060】

また、記憶層 17 に隣接するキャップ層 18 は酸化物を有するが、キャップ層 18 の酸化物としては、たとえばMgO、酸化アルミニウム、TiO₂、SiO₂、Bi₂O₃、SrTiO₂、AlLaO₃、Al-N-O等を用いることができる。

【0061】

また、記憶層 17 の磁化の向きを、小さい電流で容易に反転できるように、記憶素子 3 を小さくすることが望ましい。

従って、好ましくは、記憶素子 3 の面積を0.01 μm^2 以下とする。

【0062】

50

また記憶層17には、元素を添加することも可能である。

異種元素の添加により、拡散の防止による耐熱性の向上や磁気抵抗効果の増大、平坦化に伴う絶縁耐圧の増大などの効果が得られる。この場合の添加元素の材料としては、B、C、N、O、F、Mg、Si、P、Ti、V、Cr、Mn、Ni、Cu、Ge、Nb、Ru、Rh、Pd、Ag、Ta、Ir、Pt、Au、Zr、Hf、W、Mo、Re、Osまたはそれらの合金および酸化物を用いることができる。

【0063】

なお、記憶層17は組成の異なる他の強磁性層を直接積層させることも可能である。また、強磁性層と軟磁性層とを積層させたり、複数層の強磁性層を軟磁性層や非磁性層を介して積層させたりすることも可能である。このように積層させた場合でも、本開示でいう効果が得られる。10

特に複数層の強磁性層を非磁性層に介して積層させた構成としたときには、強磁性層の層間の相互作用の強さを調整することが可能になるため、磁化反転電流が大きくならないよう抑制することが可能になるという効果が得られる。この場合の非磁性層の材料としては、Ru、Os、Re、Ir、Au、Ag、Cu、Al、Bi、Si、B、C、Cr、Ta、Pd、Pt、Zr、Hf、W、Mo、Nbまたはそれらの合金を用いることができる。

【0064】

磁化固定層15及び記憶層17のそれぞれの膜厚は、0.5nm～30nmであることが好ましい。20

記憶素子のその他の構成は、スピントルク磁化反転により情報を記録する記憶素子の従来公知の構成と同様とすることができます。

【0065】

磁化固定層15は、強磁性層のみにより、或いは反強磁性層と強磁性層の反強磁性結合を利用することにより、その磁化の向きが固定された構成とすることが出来る。

また、磁化固定層15は、単層の強磁性層から成る構成、或いは複数層の強磁性層を非磁性層を介して積層した積層フェリピン構造とすることが出来る。

【0066】

積層フェリピン構造の磁化固定層15を構成する強磁性層の材料としては、Co、CoFe、CoFeB等を用いることができる。また、非磁性層の材料としては、Ru、Re、Ir、Os等を用いることができる。30

反強磁性層の材料としては、FeMn合金、PtMn合金、PtCrMn合金、NiMn合金、IrMn合金、NiO、Fe₂O₃等の磁性体を挙げることができる。

また、これらの磁性体に、Ag、Cu、Au、Al、Si、Bi、Ta、B、C、O、N、Pd、Pt、Zr、Hf、Ir、W、Mo、Nb等の非磁性元素を添加して、磁気特性を調整したり、その他の結晶構造や結晶性や物質の安定性等の各種物性を調整したりすることができる。

【0067】

また、記憶素子3の膜構成は、記憶層17が磁化固定層15の下側に配置される構成でも問題ない。つまり図3とは記憶層17と磁化固定層15の位置を入れ替わった構造である。40

この場合は、キャップ層18ではなく、負熱膨張材料による層が、下地層14側に設けられ、また下地層14において記憶層17に接する界面は酸化物層とされているようとする。

【0068】

<3. 実施の形態の具体的構成>

続いて、実施の形態の具体的構成について説明する。

記憶装置の構成は先に図1、図2で述べたとおり、直交する2種類のアドレス配線1、6（例えばワード線とビット線）の交点付近に、磁化状態で情報を保持することができる50

記憶素子 3 が配置されるものである。

そして 2 種類のアドレス配線 1、6 を通じて、記憶素子 3 に上下方向の電流を流して、スピントルク磁化反転により記憶層 17 の磁化の向きを反転させることができる。

【 0 0 6 9 】

図 3 は実施の形態の記憶素子 3 (S T - M R A M) の層構造の例を表している。

記憶素子 3 は、下層側から順に、下地層 14、磁化固定層 15、中間層 16、記憶層 17、キャップ層 18 が積層されている。

この場合、スピノ注入により磁化 M 17 の向きが反転する記憶層 17 に対して、下層に磁化固定層 15 を設けている。

スピノ注入型メモリにおいては、記憶層 17 の磁化 M 17 と磁化固定層 15 の磁化 M 15 の相対的な角度によって情報の「0」「1」を規定している。 10

【 0 0 7 0 】

記憶層 17 と磁化固定層 15との間には、トンネルバリア層(トンネル絶縁層)となる中間層 16 が設けられ、記憶層 17 と磁化固定層 15 とにより、MTJ 素子が構成されている。

【 0 0 7 1 】

記憶層 17 は、磁化 M 17 の方向が層面垂直方向に自由に変化する磁気モーメントを有する強磁性体から構成されている。磁化固定層 15 は、磁化 M 15 が膜面垂直方向に固定された磁気モーメントを有する強磁性体から構成されている。

情報の記憶は一軸異方性を有する記憶層 17 の磁化の向きにより行う。書き込みは、膜面垂直方向に電流を印加し、スピントルク磁化反転を起こすことにより行う。このように、スピノ注入により磁化の向きが反転する記憶層 17 に対して、下層に磁化固定層 15 が設けられ、記憶層 17 の記憶情報(磁化方向)の基準とされる。 20

本実施の形態では、記憶層 17、磁化固定層 15 は、磁歪定数が正である Co - Fe - B をベースとする垂直磁化膜である。

また記憶層 17 は、Co - Fe - B 磁性層に加え、非磁性層が含まれていてもよい。例えば Ta 層である。この非磁性層は V、Nb、Cr、W、Mo、Ti、Zr、Hf のいずれかでもよい。

【 0 0 7 2 】

磁化固定層 15 は情報の基準であるので、記録や読み出しによって磁化の方向が変化してはいけないが、必ずしも特定の方向に固定されている必要はなく、記憶層 17 よりも保磁力を大きくするか、膜厚を厚くするか、あるいは磁気ダンピング定数を大きくして記憶層 17 よりも動きにくくすればよい。 30

【 0 0 7 3 】

中間層 16 は、例えば酸化マグネシウム(MgO)層とされる。この場合には、磁気抵抗変化率(MR 比)を高くすることができる。

このように MR 比を高くすることによって、スピノ注入の効率を向上して、記憶層 17 の磁化 M 17 の向きを反転させるために必要な電流密度を低減することができる。

なお中間層 16 は、酸化マグネシウムから成る構成とする他にも、例えば酸化アルミニウム、窒化アルミニウム、SiO₂、Bi₂O₃、MgF₂、CaF、SrTiO₃、Al₂O₃、Al-N-O 等の各種の絶縁体、誘電体、半導体を用いて構成することもできる。

【 0 0 7 4 】

下地層 14 およびキャップ層 18 としては、Ta、Ti、W、Ru 等各種金属および TiN 等の導電性窒化物を用いることができる。また、下地層 14 およびキャップ層 18 は単層で用いても良いし、異なる材料を複数積層しても良い。

【 0 0 7 5 】

本実施の形態の場合、キャップ層 18 には、負熱膨張材料層が形成されている。

負熱膨張材料としては、例えば導電材料である Mn₃(x)N である。より具体的な例としては、Mn₃(Zn - Sn)N、Mn₃(Cu - Ge)N、Mn₃(Cu - Sn)N な

どである。 $Mn_3(Cu-Sn)N$ の場合、 $Cu : 0.5$ 、 $Sn : 0.5$ の比率とすることが考えられる。

また負熱膨張材料は、絶縁材料である ZrW_2O_8 、 $BiNiO_3$ 、シリコン酸化物($Li_2O - Al_2O_3 - nSiO_2$)なども用いることができる。

【0076】

また、キャップ層18は、中間層16とは反対側で記憶層17に接する他方の層となるが、キャップ層18において少なくとも記憶層17との界面の層は、酸化物層とされている。この場合の酸化物は、 MgO とされたり、或いは負熱膨張材料の酸化物として、 ZrW_2O_8 、 $BiNiO_3$ 、 $Li_2O - Al_2O_3 - nSiO_2$ などを用いることができる。

【0077】

この図3の構造において、特に、記憶層17が受ける実効的な反磁界の大きさが記憶層17の飽和磁化量 M_s よりも小さくなるように、記憶層17の組成が調整されている。

即ち、記憶層17の強磁性材料 $Co - Fe - B$ 組成を選定し、記憶層17が受ける実効的な反磁界の大きさを低くして、記憶層17の飽和磁化量 M_s よりも小さくなるようにする。

【0078】

図3の記憶素子3は、下地層14からキャップ層18までを真空装置内で連続的に形成して、その後エッチング等の加工により記憶素子3のパターンを形成することにより、製造することができる。

【0079】

ここで、キャップ層18の構成例としての各種具体例を図4に示す。

本実施の形態では、例えばキャップ層18は酸化物と非磁性金属の積層膜からなる。

図4Aは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、負熱膨張酸化物層18a、非磁性金属層18bから成る例を示している。

負熱膨張酸化物層18aは、例えば ZrW_2O_8 、 $BiNiO_3$ 、 $Li_2O - Al_2O_3 - nSiO_2$ などの層である。

非磁性金属層18bは、例えばTa、Ti、W、Ru等である。

【0080】

図4Bは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、酸化物層18c、負熱膨張金属層18dから成る例を示している。

酸化物層18cは、例えば MgO などの層である。

負熱膨張金属層18dは、例えば $Mn_3(Zn-Sn)N$ 、 $Mn_3(Cu-Ge)N$ 、 $Mn_3(Cu-Sn)N$ 等である。

【0081】

図4Cは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、負熱膨張酸化物層18a、負熱膨張金属層18dから成る例を示している。

【0082】

図4A、図4B、図4Cのいずれの例も、キャップ層18は負熱膨張材料層(18a又は18d)を有している。

$Co - Fe - B$ をベースとする記憶層17は磁歪定数が正であるが、温度上昇に伴って引張応力が加わる負熱膨張材料層をキャップ層18内に設けることにより、環境温度上昇による熱安定性の低下を抑制できる。

なお図4Cの場合は、キャップ層18を構成する酸化物、非磁性金属の両方を負熱膨張材料としているが、この構造は2種類の負熱膨張材料を組み合わせることにより、キャップ層18の熱膨張係数を調整できるといったメリットを有する。

【0083】

また図4A、図4B、図4Cのいずれの例も、キャップ層18は、少なくとも記憶層17と接する界面は酸化物層(18a又は18c)とされている。

このため中間層16の MgO と合わせて、酸化物が記憶層17の両側に配置されることとなり、酸化物と磁性金属($Co - Fe - B$)の界面の数が増える。これにより記憶層1

10

20

30

40

50

7 の垂直磁気異方性を高めることができる。

【0084】

図5は、キャップ層18のさらに他の構成例を示している。

図5Aは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、負熱膨張酸化物層18a、非磁性金属層18b、高ヤング率材料層18eから成る例を示している。

図5Bは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、酸化物層18c、負熱膨張金属層18d、高ヤング率材料層18eから成る例を示している。

図5Cは、キャップ層18が、記憶層17側からみて、負熱膨張酸化物層18a、負熱膨張金属層18d、高ヤング率材料層18eから成る例を示している。

即ち図5A、図5B、図5Cは、図4A、図4B、図4Cの構成に高ヤング率材料層18eを加えた例である。 10

【0085】

高ヤング率材料層18eとは、記憶層17の磁性材料より高いヤング率の材料の層である。

本例の場合、記憶層17の磁性材料はCo - Fe - Bであり、Co - Fe - Bのヤング率は200GPaである。

この場合の高ヤング率材料層18eの材料としては、Ir(ヤング率：529GPa)

、
Re(ヤング率：460GPa)、Rh(ヤング率：359GPa)、Ru(ヤング率：
414GPa)、Mo(ヤング率：324GPa)、W(ヤング率：345GPa)、TiN(ヤング率：
590GPa)、ZrN(ヤング率：510GPa)などが考えられる。
。

そしてキャップ層18の上部に記憶層17よりも高いヤング率を持つ材料を配することにより、負熱膨張材料の収縮効果を記憶層17に集中させることができると、負熱膨張材料層による記憶層17への応力付与の効果を増大させることができる。

【0086】

ここで、図3(図4、図5)の構造において、記憶層17は、Co - Fe - B磁性層と、Ta等の少なくとも1つの非磁性層を有する構造としてもよい。

この場合、図4、図5の構造を採用すると、酸化物層、Co - Fe - B磁性層、非磁性層が積層された積層構造部が形成される。 30

【0087】

図6で説明する。

図6は、記憶層17がCo - Fe - B磁性層17a、Taによる非磁性層17b、Co - Fe - B磁性層17cが積層されて成る構成を示している。

なお非磁性層17bは、V、Nb、Cr、W、Mo、Ti、Zr、Hf等の金属元素で形成されてもよく、また複数の金属元素が積層されていてもよい。

またキャップ層18は、上述のように少なくとも記憶層17に接する界面が、酸化物層(18a又は18c)とされている。

また中間層16は、上述のようにMgO層とされ、記憶層17に接する界面が酸化物層となっている。 40

【0088】

つまり、中間層16の酸化物層(MgO)と、記憶層17のCo - Fe - B磁性層17aと、記憶層17の非磁性層17bにより、酸化物層/Co - Fe - B磁性層/非磁性層の積層構造部U1が形成されている。

また中間層16とは反対側で記憶層17が接するキャップ層18は、記憶層17と接する界面が酸化物層(18a又は18c)であることから、キャップ層18の酸化物層(18a又は18c)と、記憶層17のCo - Fe - B磁性層17cと、記憶層17の非磁性層17bにより、酸化物層/Co - Fe - B磁性層/非磁性層の積層構造部U2が形成されている。

【0089】

このように下層側からいうと、酸化物／磁性体／非磁性体の積層構造部U1、非磁性体／磁性体／酸化物の積層構造部U2が、設けられることで、より熱安定性を向上させることができる。

【0090】

以上の本実施の形態によれば、記憶素子3の記憶層17が垂直磁化膜であるため、記憶層17の磁化M17の向きを反転させるために必要となる、書き込み電流量を低減することができる。

垂直磁気異方性を高めるためには、酸化物が記憶層17の両側に配置されるようにすることが好適である。

つまり、酸化物を記憶層17との界面に用いること、また上記の積層構造部U1、U2を設けることは、熱安定性向上と書き込み電流低減を両立に好適である。 10

【0091】

さらに、負熱膨張材料層(18a、18d)を設けることで、環境温度上昇によっても、熱安定性の低下を抑制できる。また高ヤング率材料層18eを設けることで、負熱膨張材料層(18a、18d)による記憶層17への応力付与の効果を増大させることができる。これらの構成により、環境温度によらずに熱安定性を維持できる。

【0092】

このように環境温度によらずに、情報保持能力である熱安定性を充分に確保することができるため、特性バランスに優れた記憶素子3を構成することができる。

これにより、動作エラーをなくして、記憶素子3の動作マージンを充分に得ることができ、記憶素子3を安定して動作させることができる。 20

従って、安定して動作する、信頼性の高いメモリを実現することができる。

また、書き込み電流を低減して、記憶素子3に書き込みを行う際の消費電力を低減することが可能になる。

従って、本実施の形態の記憶素子3によりメモリセルを構成した、メモリ全体の消費電力を低減することが可能になる。

従って、情報保持特性が優れた、安定して動作する信頼性の高いメモリを実現することができ、記憶素子3を備えたメモリにおいて、消費電力を低減することができる。

また、図3～図6で説明した記憶素子3を備え、図1に示した構成の記憶装置は、記憶装置を製造する際に、一般の半導体MOS形成プロセスを適用できるという利点を有している。従って、本実施の形態のメモリを、汎用メモリとして適用することが可能になる。 30

【0093】

<4. 実験>

ここで、図3に示した本実施の形態の記憶素子3の構成において、試料を作製し、その特性を調べた。

実際の記憶装置には、図1に示したように、記憶素子3以外にもスイッチング用の半導体回路等が存在するが、ここでは、キャップ層18に隣接する記憶層17の磁化反転特性を調べる目的で、記憶素子のみを形成したウェハにより検討を行った。

【0094】

厚さ0.725mmのシリコン基板上に、厚さ300nmの熱酸化膜を形成し、その上に図3に示した構成の記憶素子3の試料1～試料3を形成した。 40

図7に試料1～試料3の材料及び膜厚を示す。なお試料1は比較例とし、試料2、試料3が本実施の形態に該当する。

【0095】

比較例を含む全ての試料1～試料3は、以下の構造は同様とした。

- ・下地層14：膜厚10nmのTa膜と膜厚25nmのRu膜の積層膜。
- ・磁化固定層15：CoPt：2nm/Ru：0.8nm/CoFeB：2nmの積層膜。
- ・中間層（トンネル絶縁層）16：膜厚0.9nmの酸化マグネシウム膜。 50

・記憶層17：図7Dに拡大して示すように、CoFeB／非磁性層／CoFeBの積層膜で、トータル膜厚を2.0nmとした。

【0096】

キャップ層18は以下のとおりである。

図7Aに示すように、比較例としての試料1のキャップ層18は、MgO：0.8nm/Ta：3nm/Ru：3nm/Ta：3nmの積層構造とした。つまり負熱膨張材料層を設けない例である。

一方、実施の形態の試料2では、図7Bに示すように、キャップ層18は、MgO：0.8nm/Mn₃(CuSn)N：3nm/Ru：3nm/Ta：3nmの積層構造とした。これは図4Bに相当する構造となる。

10

また実施の形態の試料3では、図7Cに示すように、キャップ層18は、ZrW₂O₈：0.8nm/Ta：3nm/Ru：3nm/Ta：3nmの積層構造とした。これは図4Aに相当する構造となる。

なお、Mn₃(CuSn)N、ZrW₂O₈は、温度25～120の範囲で負の熱膨張係数を持っている。

【0097】

各試料において、磁化固定層15、記憶層17のCo-Fe-B合金の組成は、(Co30% - Fe70%)80% - B20%（いずれも原子%）とした。

酸化マグネシウム(MgO)膜から成る中間層16、ならびにキャップ層18中の酸化物およびMn(ZnSn)NはRFマグнетロンスパッタ法を用いて成膜し、その他の膜はDCマグネットロンスパッタ法を用いて成膜した。

20

【0098】

以上のように作製した記憶素子3の各試料に対して、以下のようにして、スピノ注入磁化反転の評価を行った。

測定に先立ち、反転電流のプラス方向とマイナス方向の値を対称になるよう制御することを可能にするため、記憶素子3に対して、外部から磁界を与えることができるよう構成した。

また、記憶素子3に印加される電圧が、絶縁層16が破壊しない範囲内の1Vまでとなるように設定した。

【0099】

30

・反転電流値及び熱安定性の測定>

記憶素子3の熱安定を評価する目的で、反転電流値のパルス幅依存性(10μsから100msのパルス幅)を測定した。

この電流値のパルス幅依存性をパルス幅1nsに外挿した値を、反転電流値とした。

また、反転電流値のパルス幅依存性の傾きは、記憶素子3の前述した熱安定性の指標(KV/k_BT)に対応する。反転電流値がパルス幅によって変化しない（傾きが小さい）ほど、熱の擾乱に強いことを意味する。

そして、記憶素子3間のばらつきを考慮するために、同一構成の記憶素子3を20個程度作製して、上述の測定を行い熱安定性の指標KV/k_BTの平均値を求めた。

基板を加熱し、任意の温度に設定することで、各環境温度での特性を評価した。

40

各試料の室温[=25]でのKV/k_BTは比較例の試料1が65、実施の形態に相当する試料2が65、試料3が63であった。

【0100】

各試料の熱安定性指標KV/k_BTと測定環境温度の関係を図8に示す。

図8より、比較例の試料1と、実施の形態の試料2、試料3では、熱安定性指標KV/k_BTの温度上昇に対する減少率に違いが生じていることが分かる。

一般に、記憶層17の磁性の保磁力（異方性磁界）Msは、温度の上昇とともに減少するため、熱安定性指標KV/k_BTも温度の上昇と共に減少する。

ここで、実施例の形態の試料2、試料3では、正の磁歪定数を持った記憶層17の近傍に負熱膨張材料が存在し、環境温度の上昇とともに記憶層17に磁化容易軸に沿って引張

50

応力を付与することにより、 $KV/k_B T$ の温度依存性を緩和する。

【0101】

これによって、比較例試料1と実施例の形態の試料2, 試料3では、試料2, 試料3の方が高温で高い $KV/k_B T$ を保つことが可能となる。

例えば、不揮発性メモリの動作補償範囲の高温側の目安である75では、比較例試料1が室温から15%程度熱安定性が低下しているのに対して、実施の形態の試料2, 試料3では7%程度しか低下していない。

また、環境温度：120までの範囲では、温度が上昇するにつれて、試料1と、試料2及び試料3との、 $KV/k_B T$ の差は広がっていく。

【0102】

なお、この実験例では、キャップ層18に負熱膨張材料層を用いていない比較例の試料1を含めて、比較的高い $KV/k_B T$ （室温で60以上）が得られている。

比較例を含めて全ての試料1～試料3では、上述した積層構造部U1, U2を備える構造となっている。

界面磁気異方性を起源とする垂直磁気異方性は、酸化物に含まれる酸素とCo或いはFeとが、界面において結合することで生じると言われているが、一方で、酸化物とは反対側の界面において接する非磁性材料も非常に重要な役割を果たす。

つまり最も基本的な単位としては、酸化物／磁性体／非磁性体、非磁性体／磁性体／酸化物の組み合わせが重要である。

試料1～試料3では、記憶層17に、この重要な基本単位を2つ（上述の積層構造部U1, U2）を組み込むことにより、より大きな $KV/k_B T$ を得ることに成功したと考えられる。

【0103】

以上をまとめると、酸化物／磁性体／非磁性体、非磁性体／磁性体／酸化物の組み合わせを備えることで、熱安定性を高めるのに有効であり、かつ低電圧で磁化反転を生じさせることができる。これは上述の熱安定性の指標と磁化反転の閾値のトレードオフ関係の改善を意味しており、熱安定性向上と同時に低消費電力化も達成している。

その上で、負熱膨張材料層を備えることで、環境温度の上昇によっても熱安定性の低下を抑制できる。

【0104】

<5. 変形例>

以上実施の形態について説明してきたが、本開示の技術は、上述の実施の形態で示した記憶素子3の層構成に限らず、様々な層構成を採用することが可能である。

例えば実施の形態では、記憶層17と磁化固定層15のCo-Fe-Bの組成を同一のものとしたが、上述の実施の形態に限定されるものではなく、本開示の要旨を逸脱しない範囲でその他様々な構成が取り得る。

また図4, 図5では、積層構造部U1, U2の両方を備えた層構造例を示したが、少なくとも積層構造部U1, U2の一方を備える場合も、熱安定性の向上効果は得られる。

【0105】

また負熱膨張材料層の材料には、実験で用いたMn₃(CuSn)N, ZrW₂O₈に限らず、他の材料でもよい。例えばMn₃xN（ここでxはZn-Sn, Cu-Ge, Cu-Sn）などの組成、BiNiO₃、シリコン酸化物：(Li₂O-Al₂O₃-nSiO₂)でも同様の効果を得ることができる。また、他の負熱膨張材料を用いることも可能である。

【0106】

また、実験で用いた記憶層17はTaが添加されたCo-Fe-Bであったが、Taに代えてW、Mo、V、Nb、Cr、Ti、Zr、Hfの単独もしくは共添加でもよい。さらに、垂直磁気異方性が損なわれない範囲で、他の金属元素や酸化物を同時に添加することも可能である。その他の元素の例としては、Hf、Nb、Zr、Cr、Ti、V、

10

20

30

40

50

Mo、W、酸化物としてはMgO、Al-O、SiO₂、Liベース酸化物が挙げられる。

【0107】

さらに、記憶層17を構成する正の磁歪定数を持つ垂直磁化材料としてCo-Fe-Bを挙げたが、正の磁歪定数を持つ垂直磁化材料としは、FePt、FePd、CoPt、CoPd等もある。これらをベースに用いて記憶層17を構成してもよい。

【0108】

また、下地層14やキャップ層18は、単一材料でも複数材料の積層構造でも良い。

また磁化固定層15は、単層でも、2層の強磁性層と非磁性層から成る積層フェリピン構造を用いても良い。また積層フェリピン構造膜に反強磁性膜を付与した構造でもよい。

10

【0109】

なお本開示の記憶素子3の構造は、TMR (Tunneling Magneto Resistance) 素子等の磁気抵抗効果素子の構成となるが、このTMR素子としての磁気抵抗効果素子は、上述の記憶装置のみならず、磁気ヘッド及びこの磁気ヘッドを搭載したハードディスクドライブ、集積回路チップ、さらにはパーソナルコンピュータ、携帯端末、携帯電話、磁気センサ機器をはじめとする各種電子機器、電気機器等に適用することが可能である。

【0110】

一例として図9A、図9Bに、上記記憶素子3の構造の磁気抵抗効果素子101を複合型磁気ヘッド100に適用した例を示す。なお、図9Aは、複合型磁気ヘッド100について、その内部構造が分かるように一部を切り欠いて示した斜視図であり、図9Bは複合型磁気ヘッド100の断面図である。

20

複合型磁気ヘッド100は、ハードディスク装置等に用いられる磁気ヘッドであり、基板122上に、本開示の技術を適用した磁気抵抗効果型磁気ヘッドが形成されてなるとともに、当該磁気抵抗効果型磁気ヘッド上にインダクティブ型磁気ヘッドが積層形成される。ここで、磁気抵抗効果型磁気ヘッドは、再生用ヘッドとして動作するものであり、インダクティブ型磁気ヘッドは、記録用ヘッドとして動作する。すなわち、この複合型磁気ヘッド100は、再生用ヘッドと記録用ヘッドを複合して構成されている。

【0111】

複合型磁気ヘッド100に搭載されている磁気抵抗効果型磁気ヘッドは、いわゆるシールド型MRヘッドであり、基板122上に絶縁層123を介して形成された第1の磁気シールド125と、第1の磁気シールド125上に絶縁層123を介して形成された磁気抵抗効果素子101と、磁気抵抗効果素子101上に絶縁層123を介して形成された第2の磁気シールド127とを備えている。絶縁層123は、Al₂O₃やSiO₂等のような絶縁材料からなる。

30

第1の磁気シールド125は、磁気抵抗効果素子101の下層側を磁気的にシールドするためのものであり、Ni-Fe等のような軟磁性材からなる。この第1の磁気シールド125上に、絶縁層123を介して磁気抵抗効果素子101が形成されている。

【0112】

磁気抵抗効果素子101は、この磁気抵抗効果型磁気ヘッドにおいて、磁気記録媒体からの磁気信号を検出する感磁素子として機能する。そして、この磁気抵抗効果素子101は、上述した記憶素子3と同様な膜構成とされる。

40

この磁気抵抗効果素子101は、略矩形状に形成されてなり、その一側面が磁気記録媒体対向面に露呈するようになされている。そして、この磁気抵抗効果素子101の両端にはバイアス層128、129が配されている。またバイアス層128、129と接続されている接続端子130、131が形成されている。接続端子130、131を介して磁気抵抗効果素子101にセンス電流が供給される。

さらにバイアス層128、129の上部には、絶縁層123を介して第2の磁気シールド層127が設けられている。

【0113】

以上のような磁気抵抗効果型磁気ヘッドの上に積層形成されたインダクティブ型磁気ヘ

50

ッドは、第2の磁気シールド127及び上層コア132によって構成される磁気コアと、当該磁気コアを巻回するように形成された薄膜コイル133とを備えている。

上層コア132は、第2の磁気シールド127と共に閉磁路を形成して、このインダクティブ型磁気ヘッドの磁気コアとなるものであり、Ni-Fe等のような軟磁性材からなる。ここで、第2の磁気シールド127及び上層コア132は、それらの前端部が磁気記録媒体対向面に露呈し、且つ、それらの後端部において第2の磁気シールド127及び上層コア132が互いに接するように形成されている。ここで、第2の磁気シールド127及び上層コア132の前端部は、磁気記録媒体対向面において、第2の磁気シールド127及び上層コア132が所定の間隙gをもって離間するように形成されている。

すなわち、この複合型磁気ヘッド100において、第2の磁気シールド127は、磁気抵抗効果素子101の上層側を磁気的にシールドするだけでなく、インダクティブ型磁気ヘッドの磁気コアも兼ねており、第2の磁気シールド127と上層コア132によってインダクティブ型磁気ヘッドの磁気コアが構成されている。そして間隙gが、インダクティブ型磁気ヘッドの記録用磁気ギャップとなる。

【0114】

また、第2の磁気シールド127上には、絶縁層123に埋設された薄膜コイル133が形成されている。ここで、薄膜コイル133は、第2の磁気シールド127及び上層コア132からなる磁気コアを巻回するように形成されている。図示していないが、この薄膜コイル133の両端部は、外部に露呈するようになされ、薄膜コイル133の両端に形成された端子が、このインダクティブ型磁気ヘッドの外部接続用端子となる。すなわち、磁気記録媒体への磁気信号の記録時には、これらの外部接続用端子から薄膜コイル133に記録電流が供給されることとなる。

【0115】

以上のような複合型磁気ヘッド100は、再生用ヘッドとして磁気抵抗効果型磁気ヘッドを搭載しているが、当該磁気抵抗効果型磁気ヘッドは、磁気記録媒体からの磁気信号を検出する感磁素子として、本開示の技術を適用した磁気抵抗効果素子101を備えている。そして、本開示の技術を適用した磁気抵抗効果素子101は、上述したように非常に優れた特性を示すので、この磁気抵抗効果型磁気ヘッドは、磁気記録の更なる高記録密度化に対応することができる。

【0116】

なお本技術は以下のような構成も採ることができる。

(1) 膜面に垂直な磁化を有し、情報に対応して磁化の向きが変化される記憶層と、上記記憶層に記憶された情報の基準となる、膜面に垂直な磁化を有する磁化固定層と、上記記憶層と上記磁化固定層の間に設けられる非磁性体による中間層と、
を有する層構造を備え、

上記層構造の積層方向に電流を流すことで上記記憶層の磁化の向きが変化して、上記記憶層に対して情報の記録が行われるとともに、

上記記憶層は、正の磁歪定数を持つ磁性層を有し、

上記層構造に加えてさらに、負熱膨張材料層が設けられる記憶素子。

(2) 上記記憶層に接する上記中間層と、該中間層とは反対側で上記記憶層が接する他方の層は、少なくとも上記記憶層と接する界面が酸化物層とされている上記(1)に記載の記憶素子。

(3) 上記他方の層の上記酸化物層が、上記負熱膨張材料層である上記(2)に記載の記憶素子。

(4) 上記他方の層の、上記記憶層と接する界面以外の層として、上記負熱膨張材料層が設けられている上記(2)又は(3)に記載の記憶素子。

(5) さらに、上記記憶層における上記磁性層のヤング率よりも高いヤング率の材料による高ヤング率層が設けられる上記(1)乃至(4)に記載の記憶素子。

(6) 上記負熱膨張材料層は、導電材料であるMn₃(X)Nを有して形成されている上記(1)乃至(5)に記載の記憶素子。

10

20

30

40

50

(7) 上記Xは、Zn-Sn、Cu-Ge、又はCu-Snのいずれかである上記(6)に記載の記憶素子。

(8) 上記負熱膨張材料層は、 ZrW_2O_8 、 $BiNiO_3$ 、 $Li_2O - Al_2O_3 - nSiO_2$ のいずれか1つを少なくとも有して形成されている上記(1)乃至(7)に記載の記憶素子。

(9) 上記正の磁歪定数を持つ磁性層は、Co-Fe-B磁性層である上記(1)乃至(8)に記載の記憶素子。

(10) 上記記憶層は、Co-Fe-B磁性層と、少なくとも1つの非磁性層を有し、上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層及び上記非磁性層を含んで、酸化物層、上記Co-Fe-B磁性層、上記非磁性層が積層された積層構造部が形成されている上記(1)乃至(9)に記載の記憶素子。 10

(11) 上記中間層の酸化物層と、上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層と、上記記憶層の上記非磁性層により、上記積層構造部が形成されている上記(10)に記載の記憶素子。

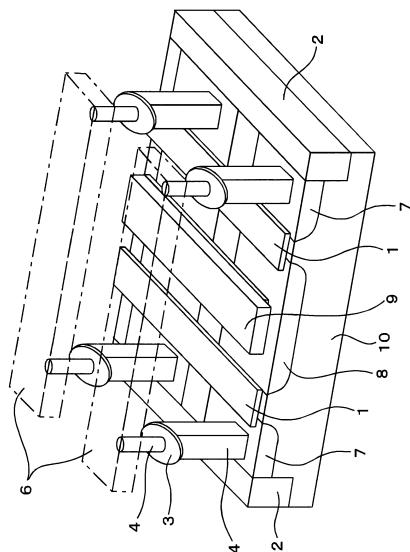
(12) 上記他方の層の酸化物層と、上記記憶層の上記Co-Fe-B磁性層と、上記記憶層の上記非磁性層により、上記積層構造部が形成されている上記(10)又は(11)に記載の記憶素子。 20

【符号の説明】

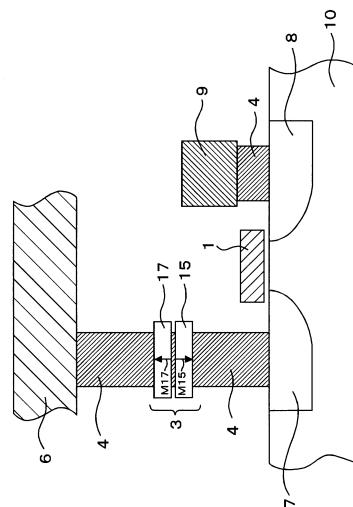
【0117】

3 記憶素子、14 下地層、15 磁化固定層、16 中間層、17 記憶層、17
a, 17c Co-Fe-B磁性層 17b 非磁性層、18 キャップ層、18a 負
熱膨張酸化物層、18b 非磁性金属層、18c 酸化物層、18d 負熱膨張金属層、
18e 高ヤング率材料層

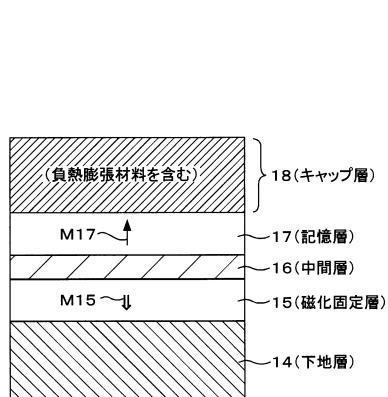
【図1】



【図2】

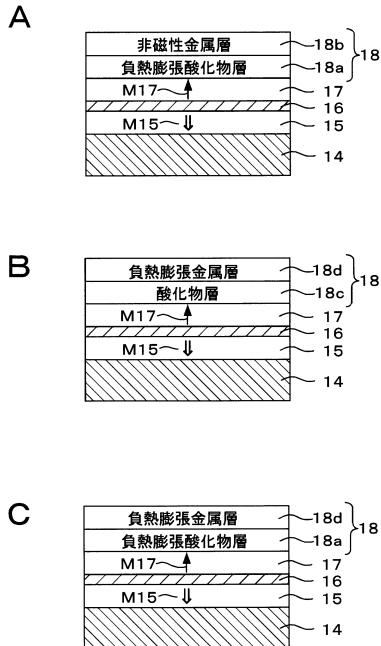


【図3】

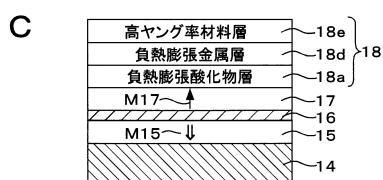


3

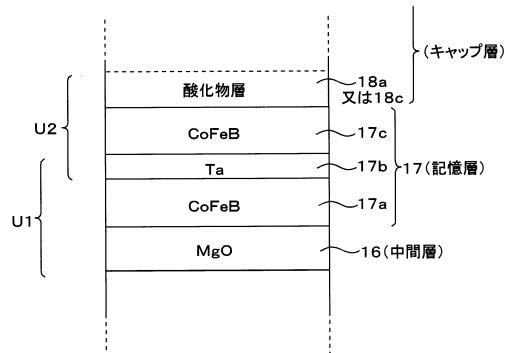
【図4】



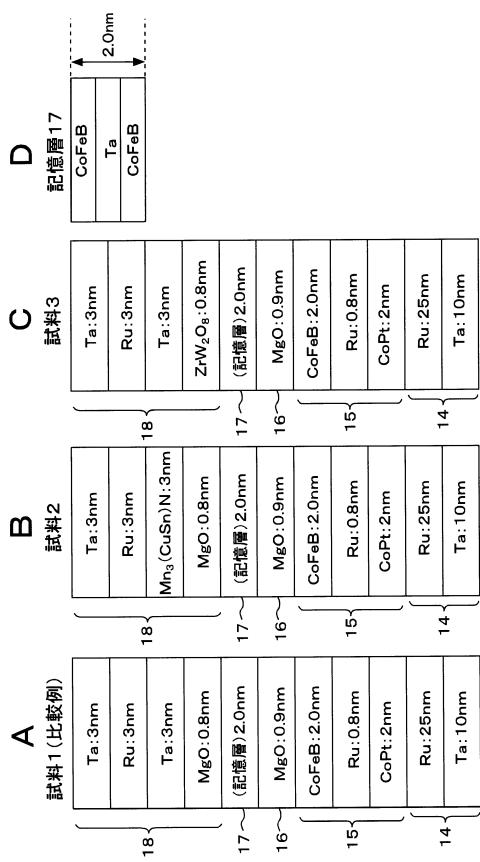
【図5】



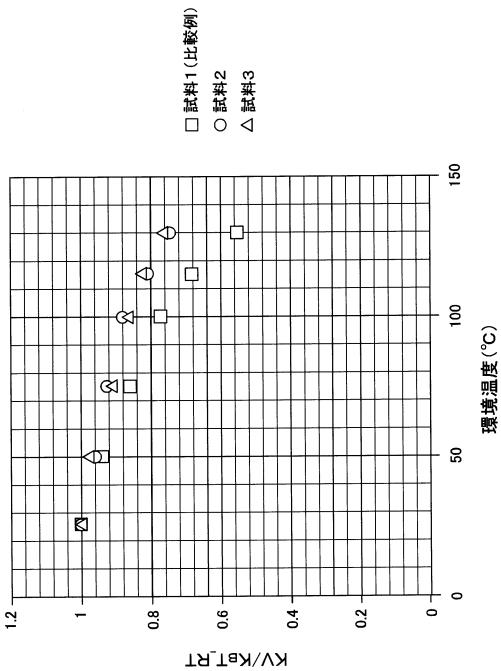
【図6】



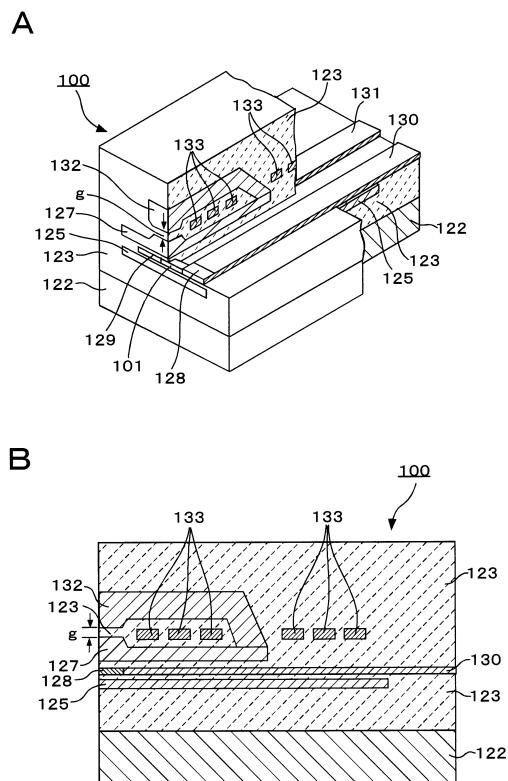
【図7】



【図8】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 大森 広之
東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 別所 和宏
東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 肥後 豊
東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 浅山 徹哉
東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

(72)発明者 内田 裕行
東京都港区港南1丁目7番1号 ソニー株式会社内

審査官 小山 満

(56)参考文献 國際公開第2010/134378 (WO, A1)
米国特許出願公開第2012/0075922 (US, A1)
欧州特許出願公開第02434540 (EP, A1)
特開2009-026944 (JP, A)
國際公開第2011/111473 (WO, A1)
特開2008-130807 (JP, A)
特開2011-009551 (JP, A)
國際公開第2010/026831 (WO, A1)
特開2007-266498 (JP, A)
特開2008-098523 (JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 01 L 43 / 08
H 01 L 21 / 8246
H 01 L 27 / 105
H 01 L 29 / 82
H 01 L 43 / 10