

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6532946号
(P6532946)

(45) 発行日 令和1年6月19日(2019.6.19)

(24) 登録日 令和1年5月31日(2019.5.31)

(51) Int. Cl.	F I
HO 1 L 43/12 (2006.01)	HO 1 L 43/12
HO 1 L 21/8239 (2006.01)	HO 1 L 27/105 4 4 7
HO 1 L 27/105 (2006.01)	HO 1 L 29/82 Z
HO 1 L 29/82 (2006.01)	HO 1 L 43/08 Z
HO 1 L 43/08 (2006.01)	HO 1 L 43/10

請求項の数 19 (全 23 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号	特願2017-531503 (P2017-531503)	(73) 特許権者	595168543
(86) (22) 出願日	平成27年12月18日 (2015.12.18)		マイクロン テクノロジー, インク.
(65) 公表番号	特表2018-502450 (P2018-502450A)		アメリカ合衆国, アイダホ州 83716
(43) 公表日	平成30年1月25日 (2018.1.25)		-9632, ボイズ, サウス フェデラル
(86) 国際出願番号	PCT/US2015/066828		ウェイ 8000
(87) 国際公開番号	W02016/114900	(74) 代理人	100074099
(87) 国際公開日	平成28年7月21日 (2016.7.21)		弁理士 大菅 義之
審査請求日	平成29年8月9日 (2017.8.9)	(74) 代理人	100106851
(31) 優先権主張番号	14/597, 903		弁理士 野村 泰久
(32) 優先日	平成27年1月15日 (2015.1.15)	(72) 発明者	シディック, マンザール
(33) 優先権主張国	米国 (US)		アメリカ合衆国, アイダホ州 83706
			, ボイズ, サウス アップル ストリート
			3318

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 半導体デバイス、磁気トンネル接合およびその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

電子デバイスを形成する方法であって、

ベース材料上の電極の上に磁気材料を形成することと、

前記磁気材料が結晶化されない温度で、前記磁気材料の上に第一のトンネルバリア材料を形成することと、

前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料をアニールすることにより、前記磁気材料の結晶構造を前記第一のトンネルバリア材料の結晶構造に整合させることと、

前記アニールされた第一のトンネルバリア材料の上に第二のトンネルバリア材料を前記第一のトンネルバリア材料よりも高い温度で形成することと、

前記第二のトンネルバリア材料の上に別の磁気材料を形成することと、

前記別の磁気材料の上に別の電極を形成することと、

を含む、

方法。

【請求項2】

前記ベース材料の上にメモリセルのレイを形成することをさらに含み、各メモリセルは、前記磁気材料と、前記第一のトンネルバリア材料と、前記第二のトンネルバリア材料と、前記別の磁気材料とを含む、

請求項1に記載の方法。

【請求項3】

前記磁気材料の上に第一のトンネルバリア材料を形成することは、酸化マグネシウム、酸化アルミニウム、二酸化チタン、酸化タンタル、酸化ルテニウムのうちの少なくとも一つを前記磁気材料の上に形成することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 4】

第一のトンネルバリア材料を形成することは、スパッタ蒸着によって酸化マグネシウムを形成することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 5】

前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料をアニールすることは、同一の結晶構造を示すように前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料を結晶化することを含む、請求項 1 に記載の方法。

10

【請求項 6】

前記アニールされた第一のトンネルバリア材料の上に第二のトンネルバリア材料を形成することは、前記第一のトンネルバリア材料と同一の材料を含む前記第二のトンネルバリア材料を形成することを含む、請求項 1 に記載の方法。

【請求項 7】

第一のトンネルバリア材料を形成することは、前記第二のトンネルバリア材料の約 1 . 0 倍から約 1 . 5 倍の厚さに前記第一のトンネルバリア材料を形成することを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

20

【請求項 8】

前記磁気材料の上に第一のトンネルバリア材料を形成することは、約 2 0 から約 2 5 度の間の温度で前記第一のトンネルバリア材料を形成することを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 9】

前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料をアニールすることは、約 3 0 0 から約 6 0 0 の間の温度に前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料を晒すことを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

30

【請求項 1 0】

前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料をアニールすることは、前記第一のトンネルバリア材料の上に前記第二のトンネルバリア材料を形成する前に、前記磁気材料および前記第一のトンネルバリア材料をアニールすることを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 1】

前記アニールされた第一のトンネルバリア材料の上に第二のトンネルバリア材料を形成することは、約 3 0 0 から約 6 0 0 の温度で前記第二のトンネルバリア材料を形成することを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

40

【請求項 1 2】

第一のトンネルバリア材料を形成することは、約 0 から約 2 5 の間の温度で前記第一のトンネルバリア材料を形成することを含む、

第二のトンネルバリア材料を形成することは、約 3 0 0 から約 6 0 0 の間の温度で前記第二のトンネルバリア材料を形成することを含む、請求項 1 から 6 のいずれか一項に記載の方法。

【請求項 1 3】

磁気セル構造のアレイであって、各磁気セル構造は、ベース材料の上の電極の上に磁気トンネル接合を含み、各磁気トンネル接合は、

50

前記ベース材料の上の磁気材料と、
前記磁気材料の結晶構造と同じ結晶構造を有する前記磁気材料の上の第一のトンネルバリア材料と、

前記第一のトンネルバリア材料の上の第二のトンネルバリア材料であって、前記第二のトンネルバリア材料は前記第一のトンネルバリア材料よりも高い温度で形成され、前記第一のトンネルバリア材料層よりも酸素空孔が少なく密度が高い、第二のトンネルバリア材料と、

前記第二のトンネルバリア材料の上の別の磁気材料であって、各磁気トンネル接合は、約 $8 \mu\text{m}^2$ 未満の抵抗面積積で、約 180% から約 600% の間のトンネル磁気抵抗を示すように構成される、別の磁気材料と、

前記別の磁気材料の上の別の電極と、
 を含む、

電子デバイス。

【請求項 14】

前記磁気材料の上の前記第一のトンネルバリア材料は、酸化マグネシウムを含む、
 請求項 13 に記載の電子デバイス。

【請求項 15】

前記第一のトンネルバリア材料および前記第二のトンネルバリア材料の各々は酸化マグネシウムを含む、
 請求項 13 に記載の電子デバイス。

【請求項 16】

各磁気トンネル接合は、約 $4 \mu\text{m}^2$ から約 $8 \mu\text{m}^2$ の間の抵抗面積積で、約 180% から約 205% の間のトンネル磁気抵抗を示すように構成される、
 請求項 13 から 15 のいずれか一項に記載の電子デバイス。

【請求項 17】

各磁気トンネル接合は、約 $6 \mu\text{m}^2$ から約 $7 \mu\text{m}^2$ の間の抵抗面積積で、約 180% から約 300% の間のトンネル磁気抵抗を示すように構成される、
 請求項 13 から 15 のいずれか一項に記載の電子デバイス。

【請求項 18】

前記第二のトンネルバリア材料の厚さに対する前記第一のトンネルバリア材料の厚さの比率は、約 1.0 から約 1.5 の間である、
 請求項 13 から 15 のいずれか一項に記載の電子デバイス。

【請求項 19】

前記第二のトンネルバリア材料は、前記第一のトンネルバリア材料よりも高密度を示す、
 請求項 13 から 15 のいずれか一項に記載の電子デバイス。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

[優先権主張]

本出願は、2015年1月15日に出願された、米国特許出願整理番号 14/597,903 “Semiconductor Devices, Magnetic Tunnel Junctions, and Methods of Fabrication Thereof” の出願日の利益を享受する権利を主張する。

【0002】

本明細書に開示された実施形態は、磁気トンネル接合を有する磁気メモリセルを含む半導体デバイスと、そのようなデバイスおよび磁気トンネル接合を形成する方法に関する。より具体的には、本明細書に開示される実施形態は、高いトンネル磁気抵抗において低い抵抗面積積を示す磁気トンネル接合、磁気トンネル接合を含む半導体デバイス、磁気トンネル接合および半導体デバイスを形成する方法に関する。

10

20

30

40

50

【背景技術】

【0003】

磁気ランダムアクセスメモリ(MRAM)は、磁気抵抗に基づいた不揮発性メモリ技術である。MRAMの一種は、スピントルクトランスファーマRAM(STT-MRAM)であり、磁気セルコアは、例えば、“固定領域”および“自由領域”の少なくとも二つの磁気領域と、その間の非磁気領域(例えば、トンネルバリア材料)とを有する磁気トンネル接合(“MTJ”)サブ構造を含む。自由領域および固定領域は、領域の厚さに対して、水平に方向づけられる(“平面内”)か、または垂直に方向づけられる(“平面外”)かのいずれかの磁気配向を示すことができる。固定領域は、実質的に固定された(例えば、スイッチング不可能な)磁気配向を有する磁気材料を含む。一方、自由領域は、セルの動作中に、“平行”構造と“アンチ平行”構造との間でスイッチングされることができる磁気配向を有する磁気材料を含む。平行構造においては、固定領域および自由領域の磁気配向は、同一方向(例えば、其々、北と北、東と東、南と南または西と西)に方向づけられる。“アンチ平行”構造においては、固定領域および自由領域の磁気配向は、反対方向(例えば、其々、北と南、東と西、南と北または西と東)に方向づけられる。平行構造においては、STT-MRAMセルは、磁気抵抗素子(例えば、固定領域および自由領域)にわたってより低い電気抵抗を示し、MRAMセルの“0”論理状態を規定する。アンチ平行構造においては、STT-MRAMセルは、磁気抵抗素子にわたってより高い電気抵抗を示し、STT-MRAMセルの“1”論理状態を規定する。

10

20

【0004】

自由領域の磁気配向のスイッチングは、固定領域および自由領域を含む磁気セルコアにプログラム電流を流すことによって達成されることができる。固定領域は、プログラミング電流の電子スピンを分極させ、コアをスピンドル電流が通ると、トルクが生成される。スピンドル電流された電子の流れは、自由領域に対してトルクを及ぼす。スピンドル電流された電子の流れのトルクが自由領域の臨界スイッチング電流密度(J_c)より大きくなると、自由領域の磁気配向の方向はスイッチングされる。このように、プログラミング電流は、磁気領域にわたる電気抵抗を変化させるために用いられることができる。結果として生じる磁気抵抗素子にわたる高い抵抗状態または低い電気抵抗状態は、MRAMセルの書き込みおよび読み出し動作を可能とする。所望の論理状態に関連付けられる平行構造とアンチ平行構造とのうちの一つを達成するために、自由領域の磁気配向をスイッチングした後、MRAMセルが異なる構造(即ち、ことなる論理状態)に書き換えられるときまでは、自由領域の磁気配向は、“保存”段階の間は維持されることが通常望ましい。

30

【0005】

MTJを含む磁気メモリセルの自由領域の磁気配向のスイッチングは、セルのトンネル磁気抵抗(“TMR”)と、抵抗面積積(“RA”)とによって影響されることがある。MTJのTMRは、高い電気抵抗状態と低い電気抵抗状態とにおいて、MTJが間に配置される上部電極と底部電極との間の抵抗の関数である。具体的には、TMRは、 R_p に対して、アンチ平行構造におけるセルの電気抵抗(R_{ap})と、平行構造におけるその電気抵抗(R_p)との間の差を測定する(即ち、 $TMR = (R_{ap} - R_p) / R_p$)。したがって、TMRは、自由層の磁気状態を変化させることによって観察される抵抗の変化に等価である。一般的に、その磁気材料の微細構造内にほとんど構造的欠陥を有さない、均質な結晶構造(例えば、bcc(001)結晶構造)を有するMTJは、構造的欠陥を有するMTJよりも高いTMRを有する。高いTMRを有するセルは、高い読み出し信号を有することができ、それは、動作中にMRAMセルの読み出しを高速化することができる。より高いTMRは、セルのオン状態とオフ状態との間のより大きい信号差を生成するために、信頼性の高い読み出し動作に対して望ましい。換言すると、TMRがより高いと、デバイスはより高感度になり、関連するメモリセルの論理状態を区別するのがより容易になる。

40

【0006】

50

磁気メモリセルコアの別の顕著な特徴はRAを含む。磁気メモリセルのRAは、プログラミング中に自由領域の磁気配向をスイッチングするために用いられる電圧（例えば、閾値スイッチング電圧）の指標である。磁気メモリセルのRAの増加は、より高い閾値スイッチング電圧を用いることによってセルの性能が劣化させることがあり、セルの有効寿命を短縮する。RAは、トンネルバリア材料の厚さを減らすことによって減少させることができる。しかしながら、トンネルバリア材料の厚さを減らすことは、またTMRも減少させることがある。したがって、高いTMRおよび低いRAが望ましいが、一般的には、MTJのTMRの増加は、より高いRAの代償として得られる。従来のMTJは、約4 μm^2 より大きいRAにおいて、約120%未満のTMRを示す。

【0007】

低いRAを維持しながらMTJのTMRを増加させるための努力は、MTJの結晶構造における構造的欠陥を減少させるための試みを含む。例えば、酸化マグネシウムトンネルバリア材料は、温度が上昇しても形成されることができ、化学量論比率と、最小の酸素空孔または格子間酸素を有するトンネルバリア材料を生成する。しかしながら、上昇した温度は、望ましくない結晶配向で下にある磁気材料を結晶化させることがある。磁気材料の結晶配向とトンネルバリア材料との不整合は、不必要にRAを増加させ、MTJのTMRを減少させる。RAの増加は、プログラミング中に自由領域の磁気配向をスイッチングするために必要な電圧を増加させ、接合抵抗を増加させ、デバイスの閾値スイッチング電圧を増加させる。TMRの減少は、それらがMTJを通過すると、電子の有効なスピン分極を減少させ、MTJを通るトンネル現象を減少させる。

【0008】

あるいは、トンネルバリア材料は、より低い温度で形成されることができ。しかしながら、トンネルバリア材料がより低い温度で形成されると、トンネルバリア材料内の酸素空孔および格子間酸素原子などの欠陥は、増加する。トンネルバリア材料内の原子欠陥は、それらがMTJを通ると、電子を散乱させ、MTJのTMRを減少させることによってデバイスの性能を劣化させることがある。

【図面の簡単な説明】

【0009】

【図1】本開示の一実施形態による磁気セル構造の簡略化断面図である。

【図2】磁気材料と導電性材料との交互の部分を含む磁気材料の簡略化断面図である。

【図3】本開示の別の実施形態による磁気セル構造の簡略化断面図である。

【図4】本開示の一実施形態による磁気セル構造の簡略化断面図であって、固定領域および自由領域は平面内磁気配向を示す。

【図5A】図1の磁気セル構造を形成するための方法の一実施形態に対する異なる処理段階を図示する簡略化断面図である。

【図5B】図1の磁気セル構造を形成するための方法の一実施形態に対する異なる処理段階を図示する簡略化断面図である。

【図5C】図1の磁気セル構造を形成するための方法の一実施形態に対する異なる処理段階を図示する簡略化断面図である。

【図6】本開示の一実施形態による磁気セル構造を有するメモリセルを含むSTT-MRAMセルの概略図である。

【図7】本開示の一実施形態による磁気セル構造を有するメモリセルを含む半導体デバイスの簡略化ブロック図である。

【図8】本開示の一つ以上の実施形態により実装されるシステムの簡略化ブロック図である。

【図9】本開示の一実施形態により形成された磁気トンネル接合のTMRとRAとを比較するグラフ図であって、磁気トンネル接合は、従来の方法によって形成される。

【図10】本開示の実施形態により形成された磁気トンネル接合のTMRとRAとのグラフ図である。

10

20

30

40

50

【発明を実施するための形態】

【0010】

本明細書に含まれる図は、任意の特定のシステムまたは半導体構造の実際の外観を意味するものではなく、本明細書に記述された実施形態を記述するために用いられる単なる理想的な表現に過ぎない。図面間で共通の要素および特徴は、同一の参照記号を維持することがある。

【0011】

以下の記述は、本明細書で記述された実施形態の十分な記述を提供するために、材料種、材料の厚さおよび処理条件などの特定の詳細事項を提供する。しかしながら、本明細書に開示される実施形態は、これらの特定の詳細事項を用いなくても実施されることができることを当業者は理解するだろう。実際には、実施形態は、半導体産業で用いられる従来の製造技術と組み合わせて実施されることができる。さらに、本明細書で提供される記述は、半導体デバイス、磁気トンネル接合または磁気メモリセルを製造するための完全なプロセスフローを記述するものではなく、以下に記述される半導体デバイス、磁気トンネル接合および磁気メモリセルは、完全な半導体デバイス、磁気トンネル接合または磁気メモリセルを形成しない。本明細書に記述された実施形態を理解するために必要なそれらのプロセス動作および構造のみが、以下に詳細に記述される。完全な半導体デバイスおよび半導体デバイスを含む磁気メモリセルを形成するためのさらなる動作は、従来の技術によって実施されることができる。

【0012】

幾つかの実施形態により、半導体デバイスは、MTJを含む磁気セル構造を含むことができる。MTJは、隣接する磁気材料間に配置されるトンネルバリア材料を含むことができる。磁気材料は、基板の上にあることができ、トンネルバリア材料は、磁気材料の上にあることができる。別の磁気材料は、トンネルバリア材料の上にあることができる。トンネルバリア材料は、隣接する磁気材料と同一の結晶配向を示すことができる。MTJを含む半導体デバイスは、約 $8 \mu\text{m}^2$ 未満など、低いRAにおいて、約180%を超えるなどの高いTMRを示すことができる。

【0013】

本開示の実施形態によるトンネルバリア材料は、少なくとも二つの部分を含むことができる。トンネルバリア材料の第一部分は、第一の温度で磁気材料の上に形成されることができる。トンネルバリア材料の第一部分と磁気材料は、磁気材料を結晶化させ、トンネルバリア材料の第一部分の結晶構造と整合をとって磁気材料の結晶構造を方向づけるためにアニールされることができる。磁気材料と、トンネルバリア材料の第一部分は、磁気材料を結晶化させるのに十分な期間、約300 から約600 の間の温度でアニールされることができる。アニール後、トンネルバリア材料の第二部分は、第二の温度で第一部分の上に形成されることができ、第二の温度は、トンネルバリア材料の第一部分が形成される第一の温度よりも高い。第一部分および第二部分を含むトンネルバリア材料は、従来のトンネルバリア材料よりも、約 $8 \mu\text{m}^2$ 未満の低いRAにおいて、約180%を超えるより高いTMRを示すことができる。トンネルバリア材料は、また、低いRAを維持しながら、従来のトンネルバリア材料よりもより厚く、高いTMRを示すことができる。幾つかの実施形態においては、トンネルバリア材料のRAは、約 $4 \mu\text{m}^2$ から約 $8 \mu\text{m}^2$ の間であり、トンネルバリア材料のTMRは約180%から約205%の間である。

【0014】

図1を参照すると、幾つかの実施形態による磁気セルコア101を含む磁気メモリセル100が示される。磁気セルコア101は、磁気トンネル接合150を含むことができ、基板102の上の下部電極104と上部電極126との間に配置されることができる。MTJ150は、磁気領域および別の磁気領域、例えば、其々“自由領域110”および“固定領域”140を含むことができる。トンネルバリア材料130は、自由領域110と固定領域140との間に配置されることができる。

【0015】

基板102は、メモリセル内などコンポーネントが形成されるベース材料または他の構造を含むことができる。基板102は、半導体基板、支持基板上のベース半導体材料、金属電極またはその上に形成された一つ以上の材料、構造、もしくは領域を有する半導体基板とすることができる。基板102は、従来のシリコン基板または半導体材料を含む他のバルク基板とすることができる。本明細書で用いられるように、“バルク基板”とは、シリコンウェーハのみならず、とりわけ、シリコン・オン・サファイア(“SOS”)基板もしくはシリコン・オン・ガラス(“SOG”)基板などのシリコン・オン・インシュレータ(“SOI”)基板、ベース半導体基盤上のシリコンのエピタキシャル層、または、シリコン・ゲルマニウム($Si_{1-x}Ge_x$ 、ここでxは例えば、0.2から0.8の間のモル分率である)、ゲルマニウム(Ge)、ヒ化ガリウム(GaAs)、窒化ガリウム(GaN)もしくはリン化インジウム(InP)などの他の半導体もしくは光電子材料も意味し、含む。さらに、以下の記述においては、“基板”に対して参照が行われる場合、以前の処理段階は、材料、領域、または接合をベース半導体構造もしくは基盤内に形成するために用いられることができる。

【0016】

下部電極104は、基板102の上にあることができる。下部電極104は、銅、タングステン、プラチナ、パラジウム、チタン、タンタル、ニッケル、窒化チタン(TiN)、窒化タンタル(TaN)、窒化タングステン(WN)などの金属、ポリシリコン、金属シリサイド、金属合金またはその組み合わせを含むことができる。

【0017】

一つ以上の下部中間領域106は、任意で、磁気領域(例えば、自由領域110および固定領域140)の下に配置されることができる。下部中間領域106は、含まれる場合には、下部電極104と、下部電極104の上にある材料との間の種の拡散を抑制するように構成されることができる。下部中間領域106は、銅、タンタル、チタン、タングステン、ルテニウム、窒化タンタルおよび窒化チタンのうちの一つ以上などの導電性材料を含むことができる。

【0018】

シード材料108は、存在する場合には下部中間領域106の上にあることができ、下部中間領域106が存在しない場合、下部電極104の上にあることができる。シード材料108は、タンタル、プラチナ、ルテニウム、鉄、ニッケル、コバルト、クロム、チタン、ジルコニウム、バナジウム、銅、亜鉛、ロジウム、銀、ハフニウム、タングステン、イリジウム、窒化タンタルおよびその組み合わせを含むことができる。限定しない例として、シード材料108は、タングステンと、鉄、コバルト、ニッケル、または別の適切な材料のうち少なくとも一つとを含むことができる。他の実施形態においては、シード材料108は、鉄とコバルトとを含むことができ、タンタル、プラチナ、ルテニウム、ニッケル、クロム、チタン、ジルコニウム、バナジウム、銅、亜鉛、ロジウム、銀、ハフニウムおよびタングステンなどの少なくとも一つの遷移元素をさらに含むことができる。さらに他の実施形態においては、シード材料108は、FeHfなど、ハフニウム、ジルコニウムおよびタンタルのうち少なくとも一つと、鉄、コバルト、ニッケルのうち少なくとも一つとを含むことができる。シード材料108は、シード材料108の均質な合成物とすることができ、または、タンタル、プラチナ、ルテニウム、鉄、ニッケル、コバルト、クロム、チタン、ジルコニウム、バナジウム、銅、亜鉛、ロジウム、銀、ハフニウム、タングステンおよびイリジウムのうちの別の個別部分に隣接した、タンタル、プラチナ、ルテニウム、鉄、ニッケル、コバルト、クロム、チタン、ジルコニウム、バナジウム、銅、亜鉛、ロジウム、銀、ハフニウム、タングステンおよびイリジウムのうちの一つ以上の個別部分を含むことができる。

【0019】

自由領域110は、シード材料108の上にあることができる。幾つかの実施形態においては、自由領域110はシード材料108のすぐ上にあり接触する。自由領域110は、磁気メモリセル100の使用および動作中に、矢印109によって示されるように、ス

10

20

30

40

50

イッチング可能な磁気配向を示す磁気材料を含むことができる。スイッチング可能な磁気配向は、磁気メモリセル100に電流または電界を印加することによって、平行構造とアンチ平行構造との間でスイッチングされることができる。

【0020】

幾つかの実施形態においては、自由領域110は、従来の自由領域とすることができる。他の実施形態においては、自由領域110は、磁気材料と導電性材料との交互の部分を含むことができる。しかしながら、自由領域110は、そのように限定されることはなく、スイッチング可能な磁気配向を示す他の適切な磁気材料を含むことができる。

【0021】

幾つかの実施形態においては、自由領域110は、コバルト(Co)および鉄(Fe)のうちの少なくとも一つを含む強磁性材料(例えば、 Co_xFe_y 、ここで、 $x=10$ から80、 $y=10$ から80)を含むことができ、幾つかの実施形態においては、ホウ素(B)(例えば、 $Co_xFe_yB_z$ 、ここで、 $x=10$ から80、 $y=10$ から80、 $z=0$ から50)も含むことができる。したがって、自由領域110は、Co、FeおよびBのうちの少なくとも一つ(例えば、CoFeB材料、CoFe材料、FeB材料、CoB材料など)を含むことができる。本明細書で用いられるように、“CoFeB材料”という語は、コバルト、鉄およびホウ素を含む材料(例えば、 $Co_xFe_yB_z$ 、ここで、 $x=10$ から80、 $y=10$ から80、 $z=0$ から50)を意味し、含む。CoFeB材料は、その構造(例えば、その厚さ)によって、磁性を示してもよいし、示さなくてもよい。他の実施形態においては、自由領域110は、代替的または追加的にニッケル(Ni)(例えば、NiB材料)を含むことができる。幾つかの実施形態においては、自由領域110は、ホウ素が実質的になくてもよく、例えば、CoFeを含むことができる。CoFeは、CoFeBとして形成されることができ、ホウ素は、その形成後に自由領域110から拡散されるか、またはCoFeは、如何なるホウ素もなく、CoFeとして形成される(堆積される)ことができる。

【0022】

自由領域110は、均質とすることができ、または一つ以上のサブ領域を含むことができる(例えば、異なる相対的原子比率のCo、FeおよびBを有するサブ領域を有するCoFeB材料)。

【0023】

トンネルバリア材料130は、自由領域110の上にあることができる。幾つかの実施形態においては、トンネルバリア材料130は、自由領域のすぐ上にあり、接触する。トンネルバリア材料130は、酸化マグネシウム(MgO)、酸化アルミニウム(Al_2O_3)、二酸化チタン(TiO_2)、酸化タンタル(Ta_2O_5)、酸化ルテニウム(RuO_2)、酸化ホウ素(B_2O_3)またはその組み合わせなどの、非磁気結晶材料を含むことができる。トンネルバリア材料130は、自由領域110および固定領域140内の界面磁気異方性を誘発するように構成されることができ、自由領域110、トンネルバリア材料130、固定領域140の相互作用によって影響されるMTJ150のトンネル領域として機能するように構成されることもできる。

【0024】

トンネルバリア材料130は、第一部分112と第二部分114とを含むことができる。第一部分112は、自由領域110の上にあることができる。幾つかの実施形態においては、第一部分112は、自由領域110のすぐ上にあり、接触する。第一部分112は、自由領域110とトンネルバリア材料130との間の界面111を形成するために、自由領域110の上に形成されることができる。MTJ150の結晶配向は、第一部分112と自由領域110との間の界面111において変化し得ない。例示として、限定ではなく、自由領域110および第一部分112の各々は、bcc(001)結晶構造を示すことができる。以下により詳細に記述されるように、第一部分112および自由領域110の各々は、形成されると、非晶質(例えば、結晶質ではない)とすることができ、所望の結晶構造はアニール後に生じる。幾つかの実施形態においては、第一部分112は、酸化

10

20

30

40

50

物材料であり、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 RuO_2 、 B_2O_3 またはその組み合わせを含むことができる。

【0025】

第二部分114は、第一部分112の上にあることができる。幾つかの実施形態においては、第二部分114は、第一部分のすぐ上にあり、接触する。第一部分112と第二部分114との間の界面113は、滑らかであって、第一部分112および自由領域110と同一の結晶配向（例えば、bcc(001)結晶構造）を示すことができる。第二部分114は、酸化物材料とすることができ、 MgO 、 Al_2O_3 、 TiO_2 、 Ta_2O_5 、 RuO_2 、 B_2O_3 またはその組み合わせを含むことができる。第一部分112および第二部分114は、同一材料を含むことができる。幾つかの実施形態においては、第一部分112および第二部分114は MgO を含む。幾つかのこのような実施形態においては、第二部分114は、第一部分112よりも定比により近い、（例えば、1:1）マグネシウムに対する酸素の割合を含む。したがって、第二部分114は、より酸素空孔および格子間酸素が少なく、また、第一部分112よりも高密度を有することができる。第二部分114は、第一部分112よりも構造的欠陥が少なく、幾つかの実施形態においては、第一部分112よりも高いTMRおよび低いRAを示すことができる。

10

【0026】

トンネルバリア材料130は、約10 から約15 の間、約15 から約20 の間、約20 から約25 の間、または約25 から約30 の間など、約10 から約30 の間の総厚（即ち、第一部分112の厚さと第二部分114の厚さとの和）を有することができる。トンネルバリア材料130は、約10 から約20 の間の厚さを有することができる。幾つかの実施形態においては、トンネルバリア材料130の厚さは、約18 である。

20

【0027】

第一部分112および第二部分114は、同一の厚さを有することができ、第一部分112は、第二部分114よりも大きい厚さを有することができるか、または第二部分114は第一部分112よりも大きい厚さを有することができる。MTJ150のRAおよびTMRは、トンネル接合材料130の第二部分114の厚さに対して、第一部分112の厚さを変化させることによって調整されることができる。第二部分114の厚さに対する第一部分112の厚さの比率は、約0.9から約1.0の間、約1.0から約1.25の間、約1.25から約1.5の間、約1.2から約1.8の間または約1.5から約2.0の間など、約0.9から約2.0の間とすることができる。幾つかの実施形態においては、比率は、約1.0から約1.5の間であって、トンネルバリア材料130の総厚は、約18 である。

30

【0028】

第一部分112および第二部分114を有するトンネルバリア材料130は、約180%から約200%の間、約180%から約225%の間、約180%から約300%の間、約200%から約220%の間、約220%から約250%の間、約250%から約300%の間、約300%から約400%の間、または約400%から約600%の間など、約180%から約600%の間のTMRを示すことができる。幾つかの実施形態においては、TMRは、約180%から約300%の間である。トンネルバリア材料130は、約3 μm^2 から約4 μm^2 の間、約4 μm^2 から約5 μm^2 の間、約5 μm^2 から約6 μm^2 の間、約6 μm^2 から約7 μm^2 の間、または約7 μm^2 から約8 μm^2 の間など、約3 μm^2 から約8 μm^2 の間のRAを示すことができる。幾つかの実施形態においては、RAは、約6 μm^2 から約7 μm^2 の間である。他の実施形態においては、トンネルバリア材料130は、約4 μm^2 から約8 μm^2 の間のRAと、約180%から約205%の間のTMRとを示す。限定しない例として、トンネルバリア材料130は、約10 から約20 の間の厚さで、約4 μm^2 のRAと、約180%のTMR、または約8 μm^2 のRAと約205%のTMRを示すことができる。

40

【0029】

50

固定領域 140 は、トンネルバリア材料 130 の上にあることができる。幾つかの実施形態においては、固定領域 140 は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 のすぐ上にあり、接触する。

【0030】

固定領域 140 は、一つ以上の磁気材料と、任意で一つ以上の非磁気材料とを含むことができる。例えば、固定領域 140 は、磁気サブ領域によって隣接されたルテニウムまたはタンタルのサブ領域を含む合成反強磁性体として構成されることができる。磁気サブ領域は、コバルト、パラジウムおよびプラチナのうちの少なくとも一つ、その組み合わせ、CoFeB 材料、その組み合わせを含む材料を含むことができる。あるいは、固定領域 140 は、磁気材料とカプラ材料との交互のサブ領域の構造で構成されることができる。磁気サブ領域の各々は、一つ以上の材料と一つ以上のその中の領域とを含むことができる。別の例として、固定領域 140 は、単一で均質の磁気材料として構成されることができる。したがって、固定領域 140 は、均一の磁化または、磁気メモリセル 100 の使用および動作中に固定された磁気配向を有する固定領域 140 を全体としてもたらず異なる磁化のサブ領域を有することができる。

10

【0031】

固定領域 140 は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 の上の第一の磁気部分 116 と、第一の磁気部分 116 の上のカップリング材料 118 と、カップリング材料 118 の上の第二の磁気部分 120 とを含むことができる。幾つかの実施形態においては、第一の磁気部分 116 は、第二部分 114 の上にある CoFeB 材料を含むことができる。第一の磁気サブ領域 116a と、第一部分 116a の上にあるタンタル材料を含むことができるスペーサ 116b と、スペーサ 116b の上にコバルトとパラジウムおよびプラチナのうちの少なくとも一つとを含む材料を含むことができる第二の磁気サブ領域 116c とを含む。カップリング材料 118 は、第一の磁気部分 116 の第二の磁気サブ領域 116c の上にあるルテニウム材料を含むことができる。第二の磁気部分 120 は、コバルト、パラジウム、プラチナ、コバルトとパラジウムおよびプラチナのうちの少なくとも一つなどその組み合わせを含む材料を含むことができる。幾つかの実施形態においては、第二の磁気部分 120 は、第一の磁気部分 116 の第二の磁気サブ領域 116c と同一の材料を含む。

20

【0032】

他の実施形態においては、第一の磁気部分 116 は、人工超格子構造を含み、第二の磁気部分 120 は、カップリング材料 118 の上にある別の人工超格子構造を含む。図 2 を参照すると、第一の磁気部分 116 の人工超格子構造は、磁気材料 117 と導電性材料 115 との交互の部分を含むことができる。導電性材料 115 は、垂直方向の異方性（即ち、垂直方向の磁気配向）を磁気材料 117 が示すことを可能にすることができる。磁気材料 117 は、コバルト、鉄およびその組み合わせを含むことができる。導電性材料 115 は、プラチナ、パラジウム、ニッケルおよびイリジウムの少なくとも一つを含むことができる。幾つかの実施形態においては、磁気材料 117 は、コバルトを含み、導電性材料 115 はプラチナを含む。図 2 は、第一の磁気部分 116 内に 6 個の磁気材料 117 の領域と、6 個の導電性材料 115 の領域とを示しているが、第一の磁気部分 116 の人工超格子構造は、そのように限定されることはなく、任意の数（例えば、1、2、3、4、5 個など）の磁気材料 117 および導電性材料 115 の交互の領域を含むことができる。

30

40

【0033】

幾つかの実施形態においては、第一の磁気部分 116 の導電性材料 115 の領域は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 のすぐ上にあり、接触することができる。例えば、導電性材料 115 の領域は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 のすぐ上にあり、接触することができる。他の実施形態においては、磁気材料 117 の領域は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 のすぐ上にあり、接触することができる。

【0034】

再度図 1 を参照すると、カップリング材料 118 は、第一の磁気部分 116 の上にある

50

ことができる。幾つかの実施形態においては、カップリング材料 118 は、第一の磁気部分 116（例えば、第一の磁気部分 116 の第二の磁気サブ領域 116c）のすぐ上にあり、接触する。カップリング材料 118 は、タンタル、ルテニウム、ロジウムおよびその組み合わせを含むことができる。幾つかの実施形態においては、カップリング材料 118 は、ルテニウムである。カップリング材料 118 は、約 1 から約 10 の間の厚さを有することができる。幾つかの実施形態においては、カップリング材料 118 は、約 4 から約 5 の間の厚さを有する。

【0035】

第二の磁気部分 120 は、カップリング材料 118 のすぐ上にあることができる。第二の磁気部分 120 は、第一の磁気部分 116 の少なくとも一部と同一の材料を含むことができ、実質的に同一であってもよい。幾つかの実施形態においては、第二の磁気部分 120 は、コバルトと、パラジウムおよびプラチナのうちの少なくとも一つを含む材料を含み、第一の磁気部分 116 の第二の磁気サブ領域 116c と同一の材料を含むことができる。

10

【0036】

固定領域 140 の第一の磁気部分 116 および第二の磁気部分 120 は、矢印 119 によって示されるように、固定された磁気配向を示すことができる。固定された磁気配向は、北、南、東、西等とすることができる。第一の磁気部分 116 および第二の磁気部分 120 の固定された磁気配向は、同一であってもよいし、異なってもよい。

【0037】

一つ以上の上部中間領域 124 は、固定領域 140 の上に任意で配置されることができる。上部中間領域 124 は、含まれる場合には、メモリセルの動作中に上部電極 126 と下部の材料との間の種の拡散を抑制するように構成されることができる。上部中間領域 124 は、導電性キャッピング領域を形成することができる導電性材料（例えば、銅、タンタル、チタン、タングステン、ルテニウム、窒化タンタル、窒化チタンなどの一つ以上の材料）を含むことができる。

20

【0038】

上部電極 126 は、上部中間領域 124 の上にあることができる。上部電極 126 は、銅、タングステン、プラチナ、パラジウム、チタン、タンタル、ニッケル、窒化チタン、窒化タンタル、窒化タングステン、ポリシリコン、金属シリサイド、金属合金またはその組み合わせを含むことができる。幾つかの実施形態においては、上部電極 126 は、下部電極 104 と同一の材料を含む。

30

【0039】

図 1 の磁気メモリセル 100 は、“トップピン”メモリセル（即ち、自由領域 110 の上に固定領域 140 が配置されるメモリセル）として構成される。しかしながら、図 3 などの他の実施形態においては、自由領域 110' は、固定領域 140' の上にあることができる。したがって、図 3 を参照すると、MTJ 150' を含む磁気メモリセル 100' は、“ボトムピン”メモリセルとして構成されることができる。磁気メモリセル 100' は、下部電極 104 と上部電極 126 との間に配置された磁気セルコア 101' を含むことができる。

40

【0040】

磁気メモリセル 100' は、下部電極 104 の上にある下部中間領域 106 を含むことができる。シード材料 108 は、存在する場合には下部中間領域 106 の上にあることができる。他の実施形態においては、シード材料 108 は、下部電極 104 のすぐ上にあり、接触することができる。シード材料 108 は、図 1 を参照して上述されたのと同じとすることができる。

【0041】

固定領域 140' は、シード材料 108 のすぐ上にあり、接触することができる。固定領域 140' は、矢印 119 によって示されるように、固定された磁気配向を含むことができる。固定領域 140' は、固定領域 140 について上述されたのと同じの材料を含む

50

ことができる。幾つかの実施形態においては、固定領域 140' は、第二の磁気部分 120' と、カップリング材料 118' と、第一の磁気部分 116' とを含む。第一の磁気部分 116' は、第一の磁気サブ領域 116a' と、スペーサ 116b' と、第二の磁気サブ領域 116c' と、を含むことができる。第一の磁気サブ領域 116a' と、スペーサ 116b' と、第二の磁気サブ領域 116c' は、図 1 を参照して上述されたように、第一の磁気サブ領域 116a と、スペーサ 116 と、第二の磁気サブ領域 116c とそれぞれ同一とすることができる。第一の磁気部分 116' と、カップリング材料 118' と、第二の磁気部分 120' は、図 1 を参照して上述されたように、第一の磁気部分 116 と、カップリング材料 118 と、第二の磁気部分 120 とそれぞれ同一とすることができる。しかしながら、固定領域 140' は、図 1 の磁気メモリセル 100 におけるように、トンネルバリア材料 130 のすぐ上にあることはできない。むしろ、固定領域 140' の第二の磁気部分 120' は、下部のシード材料 108 のすぐ上にあり、接触することができる。カップリング材料 118' は、第二の磁気部分 120' の上にあることができ、第一の磁気部分 116' は、カップリング材料 118' の上にあることができる。

10

【0042】

トンネルバリア材料 130 は、固定領域 140' の上にあることができる。トンネルバリア材料 130 の第一部分 112 は、固定領域 140' のすぐ上にあり、接触することができる。第一部分 112 は、固定領域 140' の上に形成されることができ、固定領域 140' とトンネルバリア材料 130 との間に界面 111' を形成する。固定領域 140' は、第一部分 112 の結晶構造と整合をとられた結晶構造を示すことができる。例示として限定することはなく、第一部分 112 および固定領域 140' の各々は、界面 111' における MTJ 150' の結晶構造の変化なく、bcc(001) 結晶構造を示すことができる。

20

【0043】

トンネルバリア材料 130 は、図 1 を参照して上述されたのと同じ材料を含むことができる。したがって、トンネルバリア材料 130 の第一部分 112 および第二部分 114 の各々は、図 1 を参照して上述されたのと同じとすることができる。第一部分 112 と第二部分 114 との間の界面 113' は、滑らかにすることができ、第一部分 112 が形成される界面 111' と同一の結晶配向を示すことができる。トンネルバリア材料 130 は、固定領域 140' と自由領域 110' との間に直接配置されることができる。

30

【0044】

自由領域 110' は、トンネルバリア材料 130 のすぐ上にあり、接触することができる。幾つかの実施形態においては、自由領域 110' は、トンネルバリア材料 130 の第二部分 114 のすぐ上にあり、接触する。自由領域 110' は、図 1 を参照して上述されたのと同じ材料を含むことができる。自由領域 110' は、矢印 109 によって示されるようにスイッチング可能な磁気配向を含むことができる。

【0045】

任意の上部中間領域 124 は、自由領域 110' の上にあることができる。上部電極 126 は、存在する場合には、上部中間領域 124 の上にあることができる。

【0046】

本開示の実施形態のメモリセルは、“平面外”STT-MRAMセルとして構成されることができる。“平面外”STT-MRAMセルは、垂直方向（例えば、其々の領域の幅および長さに対して垂直な方向、またはSTT-MRAMセルが配置される基板の主表面に対して垂直な方向）に主に方向づけられる磁気配向を示す磁気領域を含むことができる。例えば、図 1 および図 3 に示されるように、STT-MRAMセル（例えば、磁気メモリセル 100、磁気メモリセル 100'）は、磁気領域（例えば、自由領域 110、110' および固定領域 140、140'）の少なくとも一つにおいて垂直方向の磁気配向を示すように構成されることができる。図 1 および図 3 に示されるように、自由領域 110、110' および固定領域 140、140' の各々は、矢印 109 および矢印 119 によって示されるような垂直方向の磁気配向を示すことができる。固定領域 140、140'

40

50

の磁気配向は、例えば、矢印 119 によって示される方向において、STT-MRAMセルの使用および動作中に、実質的に同一方向に方向づけられたままとすることができる。一方、自由領域 110、110' の磁気配向は、矢印 109 によって示されるように、平行構造とアンチ平行構造との間でセルの使用および動作中にスイッチングされることができる。別の例として、図 4 に示されるように、磁気セルコア 101" を含む平面内磁気メモリセル 100" は、自由領域 110" における矢印 109' および固定領域 140" における矢印 119' によって示されるように、MTJ 150" の磁気領域（例えば、自由領域 110" および固定領域 140"）の少なくとも一つにおいて水平方向の磁気配向を示すように構成されることができる。

【0047】

半導体デバイスは、一对の電極間に配置された本開示の磁気セルコア 101、101'、101" を含む少なくとも一つの磁気メモリセルを含むことができる。

【0048】

このように、半導体デバイスが開示される。半導体デバイスは、基板上的シード材料の上に磁気トンネル接合を含み、磁気トンネル接合は、約 180% から約 300% の間のトンネル磁気抵抗を示し、シード材料の上の磁気材料と、磁気材料の上の酸化物材料と、酸化物材料の上の別の酸化物材料と、別の酸化物材料の上の別の磁気材料と、を含み、酸化物材料および別の酸化物材料は、約 10 から約 20 の間の厚さを有する。

【0049】

図 5A から図 5C を参照すると、図 1 の磁気メモリセル 100 を形成する方法が示される。方法は、基板 202 の上に磁気メモリセル 200 を形成することを含むことができる。下部電極材料 204 は、基板 202 の上に形成されることができる。下部電極材料は、下部電極 104 について上述された材料のうちの任意の材料を含むことができる。

【0050】

中間領域材料 206 は、下部電極材料 204 の上に任意で形成されることができる。下部中間領域材料 206 は、下部中間領域 106 について上述された材料のうちの任意の材料から形成されることができる。幾つかの実施形態においては、下部中間領域材料 206 は、下部電極材料 204 の導電性材料と一体とすることができる。例えば、下部中間領域材料 206 は、下部電極材料 204 の最上部サブ領域とすることができる。

【0051】

シード材料 208 は、存在する場合には、下部中間領域材料 206 の上に、または下部電極材料 204 の上に形成されることができる。シード材料 208 は、図 1 を参照して上述されたように形成されることができる。シード材料 208 の各部分は、マグネトロンスパッタリング（例えば、高出力インパルスマグネトロンスパッタリング（HIPIMS）、dc マグネトロンスパッタリングなど）、イオンビームスパッタリング、または他の PVD 法などのスパッタリング蒸着によって形成されることができる。シード材料 208 は、原子層堆積（ALD）、化学蒸着（CVD）、プラズマ増強化学蒸着（PECVD）、低圧化学蒸着（LPCVD）または他の薄膜蒸着プロセスのうちの少なくとも一つによって形成されることもできる。

【0052】

自由領域材料 210 は、シード材料 208 の上に形成されることができる。自由領域材料 210 は、自由領域 110 について上述された材料のうちの任意の材料で形成されることができる。例えば、自由領域材料 210 は、CoFeB 材料を含むことができる。他の実施形態においては、自由領域材料 210 は、図 2 の第一の磁気部分 116 について上述されたように、磁気材料 117 と導電性材料 115 との交互の部分で形成された人工超格子構造を含むことができる。自由領域材料 210 は、形成されたときに非晶質とすることができる。自由領域材料 210 が非晶質状態のままであるような温度で形成されることができる。自由領域材料 210 は、矢印 209 によって示されるようにスイッチング可能な磁気配向を示すことができる。

【0053】

10

20

30

40

50

図5 Aおよび図5 Bに示されるように、トンネルバリア材料230は、自由領域材料210の上に形成されることができる。トンネルバリア材料230は、第一部分212と第二部分214とを含むことができる。トンネルバリア材料230の第一部分212は、界面211を形成するように、自由領域材料210の上に形成されることができる。トンネルバリア材料230の第一部分212は、トンネルバリア材料130の第一部分112について上述されたのと同一の材料から形成されることができる。

【0054】

第一部分212は、ALD、CVD、PECVD、LPCVD、PVDまたは他の薄膜蒸着プロセスのうち少なくとも一つによって形成されることができる。幾つかの実施形態においては、第一部分212は、マグネトロンスパッタリング（例えば、高出力インパルスマグネトロンスパッタリング（HIPIMS）、DCスパッタリングなど）、RFスパッタリング、電子ビーム物理蒸着、イオンビーム反応性スパッタリングまたは他のPVD法などのスパッタ蒸着によって形成される。幾つかの実施形態においては、第一部分212はMgOから形成される。第一部分212は、マグネシウム部分を酸化条件に暴露することによってその後MgOに酸化されるマグネシウム部分として形成されるのではなく、MgOから形成されることができる。MgOのソースは、単一の結晶MgOまたは多結晶MgO蒸着ソースまたはスパッタリングターゲットとすることができる。

【0055】

第一部分212は、下部の自由領域210が結晶化されないような第一の温度で自由領域材料210の上に形成されることができる。換言すると、自由領域材料210は、トンネルバリア材料230の第一部分212の形成中に非晶質のままであり得る。形成されると、第一部分212は非晶質または結晶質とすることができる。幾つかの実施形態においては、自由領域材料210は、第一部分212の形成中に非晶質のままであるCoFeB材料を含む。幾つかの実施形態においては、第一部分212は、最初に形成されたときに結晶質である。第一部分212は、約-150 から約0 の間、約0 から約25 の間、約20 から約25 の間、約25 から約50 の間または約50 から約150 の間など、約-150 から約150 の間の温度で形成されることができる。幾つかの実施形態においては、第一部分212は、室温（例えば、約20 から約25度の間）で形成される。第一部分212が、室温で形成される場合、下部の自由領域材料210は、非晶質状態のままであり得る。

【0056】

自由領域材料210の上にトンネルバリア材料230の第一部分212を形成した後、自由領域材料210および第一部分212は、熱アニールなどによってアニールされることができる。自由領域材料210および第一部分212をアニーリング条件に晒すことは、自由領域材料210を通して界面211から自由領域材料210を結晶化することができる。第一部分212および自由領域材料210をアニールした後、自由領域材料210は、第一部分212の結晶構造と整合のとれ（即ちマッチングされた）結晶構造を有することができる。幾つかの実施形態においては、CoFeB自由領域材料210は、界面211から結晶化され、MgOを含む第一部分212と同一の結晶構造を含む。第一部分212のアニールは、また、第一部分212内のあらゆる酸素空孔を酸素で充填させ、トンネルバリア材料230の第一部分212の化学量論比を増加させる。限定しない例として、第一部分212がMgOを含む場合、第一部分212をアニールすることは、第一部分212に酸素を引き付けることができ、第一部分212の低温形成中に形成され得たあらゆる酸素空孔を充填する。

【0057】

自由領域材料210および第一部分212をアニールするために、自由領域材料210および第一部分212は、十分な期間、自由領域材料210を結晶化するために十分な温度に晒されることができる。第一部分212をアニーリング条件に晒すことは、第一部分212の結晶品質を向上させることができ、より詳細に以下に記述されるように、第二部分214は、その後形成されることができる。アニーリングは、また、第一部分212の

10

20

30

40

50

滑らかな表面を形成することができ、その表面上に第二部分 2 1 4 が形成される。自由領域材料 2 1 0 および第一部分 2 1 2 は、約 3 0 0 から約 6 0 0 の間の温度に約 6 0 秒から約 1 時間 (1 h r) の間暴露されることができる。自由領域材料 2 1 0 および第一部分 2 1 2 は、約 3 0 0 から約 3 5 0 の間、約 3 5 0 から約 4 0 0 度の間、約 4 0 0 から約 5 0 0 の間、または約 5 0 0 から約 6 0 0 の間の温度に暴露されることができる。暴露時間は、約 6 0 秒から約 5 分の間、約 5 分から約 1 5 分の間、約 1 5 分から約 3 0 分の間または約 3 0 分から約 6 0 分の間とすることができる。

【 0 0 5 8 】

図 5 B を参照すると、自由領域材料 2 1 0 および第一部分 2 1 2 のアニールの後、トンネルバリア材料 2 3 0 の第二部分 2 1 4 が形成されることができる。第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 の上に直接形成され、第一部分 2 1 2 と接触することができる。第二部分は、第二部分 1 1 4 について上述されたのと同じ材料で形成されることができる。幾つかの実施形態においては、第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 と同一の材料で形成される。アニールされたトンネルバリア材料 2 3 0 の第一部分 2 1 2 は、第二部分 2 1 4 が形成されるシードとして機能することができ、第二部分 2 1 4 の結晶構造が第一部分 2 1 2 の結晶構造とマッチングするようにする。第一部分 2 1 2 の露出表面は、第一部分 2 1 2 および自由領域材料 2 1 0 と同一の結晶配向に第二部分 2 1 4 が形成されるシードとすることができる。第一部分 2 1 2 および第二部分 2 1 4 は、界面 2 1 3 において同一の結晶配向を示すことができる。

【 0 0 5 9 】

トンネルバリア材料 2 3 0 の第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 が形成される第一の温度よりも高い第二の温度で形成されることができる。第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 を形成するために上述されたのと同じ方法のうちの一つによって形成されることができる。例えば、第二部分 2 1 4 は、ALD、CVD、PECVD、LPCVD、PVD または他の薄膜蒸着プロセスのうちの一つなど、スパッタ蒸着によって形成されることができる。幾つかの実施形態においては、第二部分 2 1 4 は、マグネトロンスパッタリング (例えば、高出力インパルスマグネトロンスパッタリング (HIPIMS)、DC スパッタリングなど)、RF スパッタリング、電子ビーム物理蒸着、イオンビーム反応性スパッタリングまたは他の PVD 法など、スパッタ蒸着によって形成される。しかしながら、第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 が形成されるのとは異なる、より高い温度で形成されることができる。例えば、第二部分 2 1 4 は、上述されたように、約 3 0 0 から約 6 0 0 の間の温度で形成されることができる。第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 および自由領域材料 2 1 0 がアニールされる温度と同一の温度で形成されることができる。他の実施形態においては、第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 および自由領域材料 2 1 0 がアニールされる温度とは異なる温度で形成されることができる。限定しない例として、第二部分 2 1 4 は、約 3 0 0 から約 3 5 0 の間、約 3 5 0 から約 4 0 0 の間、約 4 0 0 から約 5 0 0 の間、または約 5 0 0 から約 6 0 0 の間などの約 3 0 0 から約 6 0 0 度の間の温度で形成されることができる。第二部分 2 1 4 を高い温度で形成することは、結晶品質の向上した、より化学量論的に定比な材料を形成することができる。例えば、第二部分 2 1 4 が MgO を含む場合、第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 よりも少ない酸素空孔と少ない格子間酸素を有する化学量論的な量の酸素を含むことができる。幾つかの実施形態においては、第一部分 2 1 2 および第二部分 2 1 4 の各々は、おおよそ 1 対 1 の割合の酸素に対するマグネシウムの比を有する。

【 0 0 6 0 】

第二部分 2 1 4 は、第一部分 2 1 2 と同一の厚さ、第一部分 2 1 2 よりも大きい厚さ、または第一部分 2 1 2 よりも小さい厚さに形成されることができる。幾つかの実施形態においては、割合は、約 1 . 5 であり、トンネルバリア材料 1 3 0 の総厚は、約 1 8 である。第二部分 2 1 4 に対する第一部分 2 1 2 の厚さの割合は、TMR を増加させ、トンネルバリア材料 2 3 0 の RA を減少させるように調整されることができる。トンネルバリア材料 2 3 0 は、トンネルバリア材料 1 3 0 について上述されたように、約 1 8 0 % から約

10

20

30

40

50

600%のTMRと、約3 μm^2 から約8 μm^2 のRAとを示すように形成されることができる。幾つかの実施形態においては、第二部分214の厚さは、第一部分212の厚さよりも小さい。

【0061】

図5Cを参照すると、固定領域材料240は、トンネルバリア材料230の第二部分214の上に形成されることができる。固定領域材料240は、トンネルバリア材料230の第二部分214の上の第一の磁気材料216と、第一の磁気材料216の上のカップリング材料218と、カップリング材料218の上の第二の磁気材料220とを含むことができる。第一の磁気材料216は、第一の磁気サブ領域216aと、スペーサ材料216bと、第二の磁気サブ領域216cとを含むことができる。磁気サブ領域216a、スペーサ材料216b、第二の磁気サブ領域216cの各々は、上述されたような第一の磁気サブ領域116a、スペーサ116b、第二の磁気サブ領域116cと其々同一の材料で形成されることができる。第一の磁気材料216、カップリング材料218および第二の磁気材料220の各々は、上述されたような、それぞれ第一の磁気部分116、カップリング材料118および第二の磁気部分120と同一の材料形成されることができる。固定領域材料240の第一の磁気材料216および第二の磁気材料220は、矢印219によって示されるように固定された磁気配向を含むことができる。

10

【0062】

カップリング材料218は第一の磁気材料216の上に（例えば、第一の磁気材料216の第二の磁気サブ領域216cの上に）形成されることができる。カップリング材料218は、第一の磁気材料216と第二の磁気材料220との間に形成されることができる。カップリング材料218は、ALD、CVD、PVD、PECVD、LPCVD、または他の薄膜蒸着プロセスのうちの一つによって形成されることができる。

20

【0063】

第二の磁気材料220は、カップリング材料218の直接上に形成されることができる。第二の磁気材料220は、第一の磁気材料216と同一の方法で同一の材料から形成されることができる。

【0064】

上部中間領域材料224は、第二の磁気材料220の上に任意で形成されることができる。下部中間領域材料206と同一の材料を含むことができる。上部電極材料226は、存在する場合には、上部中間領域材料224の上に、または第二の磁気材料220の上に形成されることができる。上部電極材料226は、上部電極126について上述されたのと同様の材料で形成されることができる。

30

【0065】

磁気メモリセル200は、図1に示されるように磁気メモリセル100を形成するために処理されることができる。磁気メモリセル200の構造は、従来のフォトリソグラフィ、材料除去、エッチングまたは本明細書には詳細に記述されない他のプロセスによって処理されることができる。

【0066】

図5Aから図5Cを参照して記述された磁気メモリセル200は、図1の磁気メモリセル100を形成することを記述しているが、図3の磁気メモリセル100'は、類似の方法によって形成されることができる。しかしながら、固定領域材料240は、シード材料208の上に形成され、トンネルバリア材料230の第一部分212は、固定領域材料240の上に形成され、自由領域材料210は、トンネルバリア材料230の第二部分214の上に形成され、結果として、図3の磁気メモリセルを生じる。他の実施形態においては、図4の磁気メモリセル100''は、自由領域材料210および固定領域材料240を形成することによって形成されることができ、水平方向の磁気配向を示す。

40

【0067】

第一部分212および第二部分214からトンネルバリア材料230を形成することは、磁気トンネル接合のTMRを増加させ、RAを減少させることができる。MTJ150

50

は、トンネルバリア材料 230 の結晶構造内の酸素空孔または格子間酸素などの欠陥が実質的にないことがある。トンネルバリア材料 230 は、したがって、高い TMR および低い RA でトンネリング特性の改善を示すことができる。

【0068】

このように、半導体デバイスを形成する方法が開示される。方法は、基板上の電極の上に磁気材料を形成することと、磁気材料の上に第一のトンネルバリア材料を形成することと、磁気材料および第一のトンネルバリア材料をアニールすることと、アニールされた第一のトンネルバリア材料の上に第二のトンネルバリア材料を形成することと、第二のトンネルバリア材料の上に別の磁気材料を形成することと、別の磁気材料の上に別の電極を形成することと、を含む。

10

【0069】

このように、磁気トンネル接合を形成する方法が開示される。方法は、磁気材料の上にバリア材料を第一の温度で形成することと、バリア材料および磁気材料をアニールすることと、アニールされたバリア材料の上に別のバリア材料を第二の温度で形成することと、別のバリア材料の上に別の磁気材料を形成することと、を含む。

【0070】

このように、半導体デバイスを形成する方法が開示される。方法は、基板の上にシード材料を形成することと、シード材料の上に磁気材料を形成することと、磁気材料の上に酸化物材料を第一の温度で形成することと、第一の温度よりも高い第二の温度で、酸化物材料の上に別の酸化物材料を形成することと、別の酸化物材料の上に別の磁気材料を形成することと、を含む。

20

【0071】

図 6 を参照すると、STT-MRAMセル 614 と動作可能なように通信する周辺デバイス 612 を含む STT-MRAM システム 600 が図示され、その集合は、システム要件および製造技術によって、多数の行および列を含むグリッドパターンで、または様々な他の配置でメモリセルのアレイを形成するように製造されることができる。STT-MRAMセル 614 は、磁気セルコア 601 と、アクセスランジスタ 603 と、データ/センス線 604 (例えば、ビット線) として機能することができる導電性材料と、アクセス線 605 (例えば、ワード線) として機能することができる導電性材料と、ソース線 606 として機能することができる導電性材料と、を含むことができる。STT-MRAM システムの周辺デバイス 612 は、読み出し/書き込み回路 607 と、ビット線基準 608 と、センス増幅器 609 とを含むことができる。磁気セルコア 601 は、上述された磁気セルコア 101、101'、101" のうちの任意の一つとすることができる。セルコア 601 の構造、製造方法またはその双方によって、STT-MRAMセル 614 は、高い TMR および低い抵抗 (例えば、低い RA 積) を有することができる。

30

【0072】

使用および動作においては、STT-MRAMセル 614 がプログラムされるように選択されると、プログラミング電流が STT-MRAMセル 614 に印加され、電流は磁気セルコア 601 の固定領域によってスピン分極され、セルコア 601 の自由領域に対してトルクを及ぼし、これによって、自由領域の磁化をスイッチングして、STT-MRAMセル 614 に“書き込む”かまたは“プログラムする”。STT-MRAMセル 614 の読み出し動作においては、電流は、磁気セルコア 601 の抵抗状態を検出するために用いられる。

40

【0073】

STT-MRAMセル 614 のプログラミングを開始するために、読み出し/書き込み回路 607 は、データ/センス線 604 およびソース線 606 に対して書き込み電流 (即ちプログラミング電流) を生成することができる。データ/センス線 604 とソース線 606 との間の電圧の極性は、磁気セルコア 601 の自由領域の磁気配向におけるスイッチングを決定する。スピン分極で自由領域の磁気配向を変化させることによって、自由領域は、プログラミング電流のスピン極性に従って磁化され、プログラムされた論理状態が S

50

STT-MRAMセル614に書き込まれる。

【0074】

STT-MRAMセル614を読み出すために、読み出し/書き込み回路607は、セルコア601およびアクセストランジスタ603を通じて、データ/センス線604およびソース線606に対して読み出し電圧を生成する。STT-MRAMセル614のプログラムされた状態は、セルコア601にわたる電気抵抗に関連し、これは、データ/センス線604とソース線606との間の電圧差によって決定されることができる。幾つかの実施形態においては、電圧差は、ビット線基準608に対して比較されて、センス増幅器609によって増幅されることができる。

【0075】

図6は、少なくとも一つの磁気メモリセルを含むSTT-MRAMシステム600の一例を示す。しかしながら、磁気領域を有する磁気セルコアを組み込むために構成されたSTT-MRAMシステム内に、磁気セルコア101、101'、101"が組み込まれることができ、この中で用いられることができると考えられる。また、磁気セルコア101、101'、101"がSTT-MRAMセルの他に、他の磁気メモリセルで用いられることができることも考えられる。

【0076】

図7を参照すると、本明細書に記述された一つ以上の実施形態により実装された半導体デバイス700の簡略化されたブロック図が示される。半導体デバイス700は、メモリアレイ702と、制御論理コンポーネント704とを含む。メモリアレイ702は、上述された磁気セルコア（例えば、其々、図1、図3および図4の磁気セルコア101、101'、101"）のうちの任意のものを含む複数のSTT-MRAMセル614（図6）を含むことができ、磁気セルコア（例えば、磁気セルコア101、101'、101"）は、上述された方法に従って形成されたものであって、上述された方法に従って動作することができる。制御論理コンポーネント704は、メモリアレイ702内の任意のまたは全てのメモリセル（例えば、STT-MRAMセル614（図6））から読み出し、そこに書き込むために、メモリアレイ702と動作可能なように相互作用するように構成されることができる。

【0077】

このように、半導体デバイスが開示される。半導体デバイスは、磁気セル構造のアレイを含み、各磁気セル構造は、基板上の電極の上に磁気トンネル接合を含み、各磁気トンネル接合は、基板の上の磁気材料と、磁気材料の上の第一のトンネルバリア材料と、第一のトンネルバリア材料の上の第二のトンネルバリア材料と、第二のトンネルバリア材料の上の別の磁気材料と、を含み、各磁気トンネル接合は、約180%から約600%の間のトンネル磁気抵抗と、約8 μm^2 未満の抵抗面積積とを示すように構成される。半導体デバイスは、別の磁気材料の上に別の電極をさらに含む。

【0078】

図8を参照すると、プロセッサベースのシステム800が示される。プロセッサベースのシステム800は、本開示の実施形態により製造された様々な電子デバイスを含むことができる。プロセッサベースのシステム800は、コンピュータ、ページャ、携帯電話、パーソナルオーガナイザ、制御回路、または他の電子デバイスなどの様々な種類のうちの任意の種類とすることができる。プロセッサベースのシステム800は、マイクロプロセッサなど、プロセッサベースのシステム800内のシステム機能および要求の処理を制御するための一つ以上のプロセッサ802を含むことができる。プロセッサ802およびプロセッサベースのシステム800の他のサブコンポーネントは、本開示の実施形態により製造された磁気メモリデバイスを含むことができる。

【0079】

プロセッサベースのシステム800は、プロセッサ802と動作可能なように通信する電源804を含むことができる。例えば、プロセッサベースのシステム800がポータブルシステムである場合、電源804は、燃料電池、電力掃気デバイス、永久電池、取外し

10

20

30

40

50

可能な電池および再充電可能な電池のうちの一つ以上を含むことができる。電源 804 は、また、AC アダプタを含むことができ、したがって、プロセッサベースのシステム 800 は、例えば、壁のコンセントにプラグを挿されることができる。電源 804 は、また、DC アダプタを含むことができ、プロセッサベースのシステム 800 は、例えば、自動車のシガレットライター、または自動車の電源ポートにプラグを挿されることができるようにする。

【0080】

様々な他のデバイスは、プロセッサベースのシステム 800 が実施する機能によって、プロセッサ 802 に結合されることができる。例えば、ユーザインターフェイス 806 は、プロセッサ 802 に結合されることができる。ユーザインターフェイス 806 は、ボタン、スイッチ、キーボード、ライトペン、マウス、デジタイザおよびスタイラス、タッチスクリーン、音声認識システム、マイクまたはその組み合わせなどの入力デバイスを含むことができる。ディスプレイ 808 は、また、プロセッサ 802 に結合されることができる。ディスプレイ 808 は、LCD ディスプレイ、SED ディスプレイ、CRT ディスプレイ、DLP ディスプレイ、プラズマディスプレイ、OLED ディスプレイ、LED ディスプレイ、三次元投影、オーディオディスプレイ、またはその組み合わせを含むことができる。さらに、RF サブシステム/ベースバンドプロセッサ 810 が、またプロセッサ 802 に結合されることができる。RF サブシステム/ベースバンドプロセッサ 810 は、RF 受信機および RF 送信機（図示せず）に結合されたアンテナを含むことができる。通信ポート 812 または 2 以上の通信ポート 812 は、また、プロセッサ 802 に結合されることができる。通信ポート 812 は、モデム、プリンタ、コンピュータ、スキャナもしくはカメラなどの一つ以上の周辺デバイス 814 に対して、または、例えば、ローカルエリアネットワーク、リモートエリアネットワーク、イントラネットもしくはインターネットなどのネットワークに対して結合されるように適合されることができる。

【0081】

プロセッサ 802 は、メモリ内に格納されたソフトウェアプログラムを実装することによってプロセッサベースのシステム 800 を制御することができる。ソフトウェアプログラムは、例えば、オペレーティングシステム、データベースソフトウェア、ドラフティングソフトウェア、ワープロソフトウェア、メディア編集ソフトウェア、またはメディア再生ソフトウェアを含むことができる。メモリは、様々なプログラムの実行を格納し、容易にするために、プロセッサ 802 に動作可能なように結合される。例えば、プロセッサ 802 は、システムメモリ 816 に結合されることができ、システムメモリ 816 は、スピントルクトランスファー磁気ランダムアクセスメモリ (STT-MRAM)、磁気ランダムアクセスメモリ (MRAM)、ダイナミックランダムアクセスメモリ (DRAM)、スタティックランダムアクセスメモリ (SRAM)、レーストラックメモリおよび他の既知のメモリ種類の一つ以上を含むことができる。システムメモリ 816 は、揮発性メモリ、不揮発性メモリまたはその組み合わせを含むことができる。システムメモリ 816 は、動的にロードされたアプリケーションおよびデータを格納することができるように、典型的には大型である。幾つかの実施形態においては、システムメモリ 816 は、上述された図 7 の半導体デバイス 700 などの半導体デバイス、図 1、図 3 および図 4 の其々の磁気セルコア 101、101'、101''、またはその組み合わせを含むことができる。

【0082】

プロセッサ 802 は、また、不揮発性メモリ 818 にも結合されることができ、このことは、システムメモリ 816 が必ずしも揮発性であることを示唆するものではない。不揮発性メモリ 818 は、システムメモリ 816 と組み合わせて用いられるような、STT-MRAM、MRAM、EPROM、抵抗性リードオンリーメモリ (RRAM) などのリードオンリーメモリ (ROM)、フラッシュメモリのうちの一つ以上を含むことができる。不揮発性メモリ 818 のサイズは、あらゆる必要なオペレーティングシステム、アプリケーションプログラムおよび固定データを格納するのにちょうど十分な大きさとなるように典型的には選択される。さらに、不揮発性メモリ 818 は、例えば、抵抗メモリまたは、

他の種類の不揮発性ソリッドステートメモリを含むハイブリッドドライブなどの、ディスクドライブメモリなどの高容量メモリを含むことができる。不揮発性メモリ 818 は、図 7 の半導体デバイス 700 などの半導体デバイス、図 1、図 3 および図 4 の其々の磁気セルコア 101、101'、101" のうちの任意のものを含むメモリセル、またはその組み合わせを含むことができる。

【0083】

[例]

図 9 は、従来の方法によって形成された MTJ に対して、本開示の実施形態により形成された MTJ の RA と TMR とを比較するグラフ図である。MgO トンネルバリア材料は、CoFeB 磁気材料の上に約 20 nm で RF スパッタリングによって形成された。MgO および CoFeB は、MgO と同一の結晶配向で CoFeB 磁気材料を結晶化するために、約 500 °C の温度でアニールされた。第二の MgO トンネルバリア材料は、アニールされた MgO の上に約 500 nm で RF スパッタリングによって形成された。別の CoFeB 材料は、第二の MgO トンネルバリア材料の上に形成された。タンタル材料は、CoFeB 磁気材料の上に形成され、コバルト/パラジウム磁気材料は、MTJ 構造を完成させるためにタンタルの上に形成された。従来 MTJ は、室温で CoFeB 磁気材料の上に MgO トンネルバリア材料を形成することによって形成された。MgO および CoFeB は、約 500 °C の温度でアニールされた。別の CoFeB 磁気材料は、MgO の上に形成された。MTJ 構造の TMR および RA は従来技術を用いて測定された。図 9 の左上の線は、本開示の実施形態により形成された MTJ の TMR および RA を示し、右下の線は、従来の方法によって形成された MTJ の TMR および RA を示す。グラフに示されるように、本明細書に開示された方法によって形成された MTJ は、従来の方法によって形成された MTJ よりも高い TMR および低い RA を示す。

【0084】

図 10 は、本開示により形成された MTJ の TMR 対 RA のグラフ図である。第一の MgO トンネルバリア材料は、CoFeB 磁気材料の上に第一の厚さ ("X") に形成された。MgO は、約 20 nm で RF スパッタリングによって形成された。MgO および CoFeB は MgO と同一の結晶配向に CoFeB を結晶化するために、約 500 °C の温度でアニールされた。第二の MgO トンネルバリア材料は、アニールされた MgO の上に約 500 nm で RF スパッタリングによって形成された。第二の MgO トンネルバリア材料は、第二の厚さ ("Y") に形成された。別の CoFeB 磁気材料は、第二の MgO トンネルバリア材料の上に形成された。タンタル材料は、CoFeB 磁気材料の上に形成され、コバルト/パラジウム磁気材料は、MTJ 構造を完成させるために、タンタルの上に形成された。MTJ 構造の TMR および RA は、従来技術によって測定された。図 10 は、第二の MgO トンネルバリア材料の厚さに対する、第一の MgO トンネルバリア材料の厚さの異なる比率 (即ち、X/Y) を有する MTJ の TMR および RA のグラフである。このように、X/Y の比率は、所望の RA において所望の TMR を示す MTJ を形成するために調整されることができる。

【0085】

ある例示的实施形態が図面に関連して記述されてきたが、本開示に包含される実施形態は、本明細書に明示的に示され、記述されたこれらの実施形態に限定されないことを当業者は認識し、理解するだろう。むしろ、本明細書に記述された実施形態に対する多くの追加、削除および改変は、法的均等物を含み、この後に請求されるような本開示に包含される実施形態の範囲から逸脱することなく行われることができる。さらには、開示された一実施形態による特徴は、本開示の範囲内に依然包含されながら、別の開示された実施形態の特徴と組み合わせられることができる。

【 図 1 】

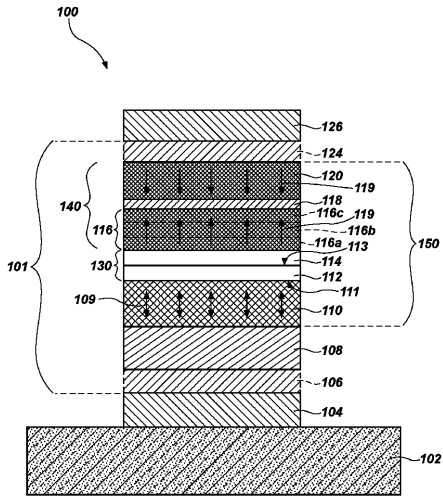


FIG. 1

【 図 3 】

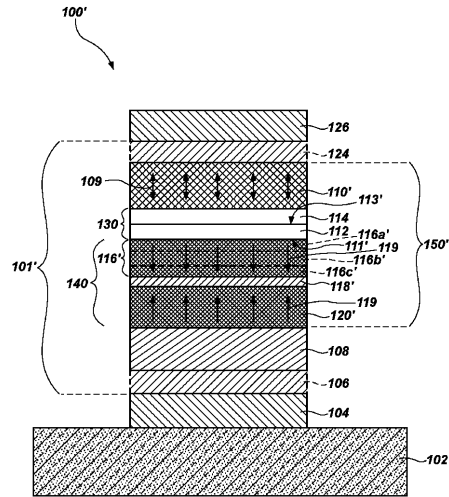


FIG. 3

【 図 2 】

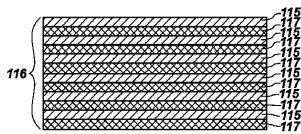


FIG. 2

【 図 4 】

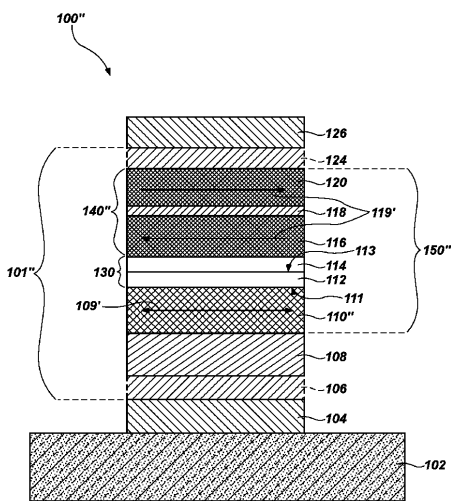


FIG. 4

【 図 5 A 】

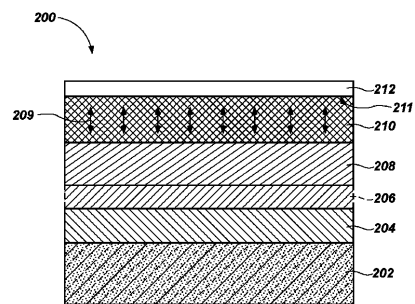


FIG. 5A

【 図 5 B 】

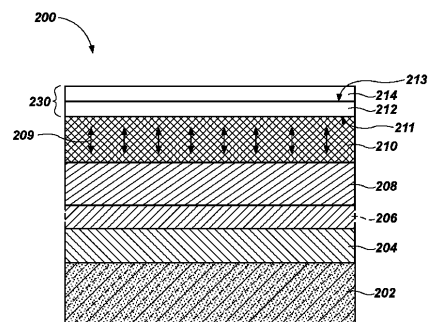


FIG. 5B

【図5C】

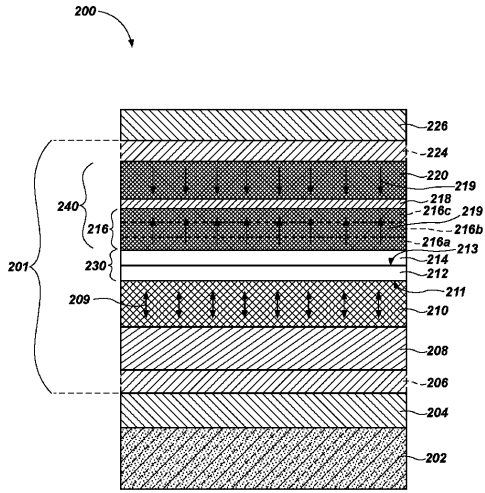


FIG. 5C

【図6】

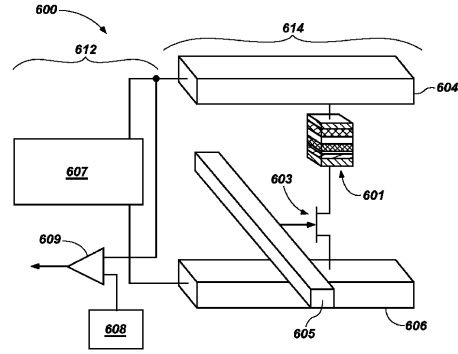


FIG. 6

【図7】

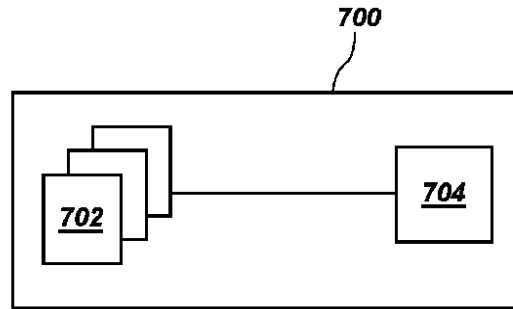
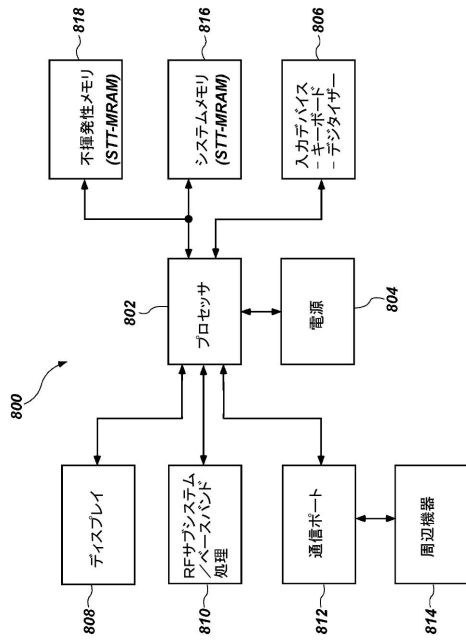
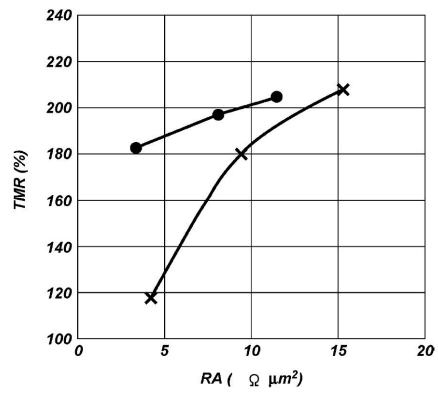


FIG. 7

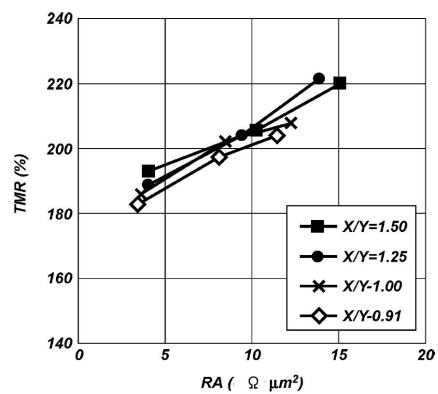
【図8】



【図9】



【図10】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 L 43/10 (2006.01)

(72)発明者 クラ, ヴィトルド
アメリカ合衆国, カリフォルニア州 9 5 0 2 0, ギルロイ, ニュー アベニュー 9 6 8 5
(72)発明者 ラマラジャン, スレシュ
シンガポール共和国, シンガポール 7 5 7 7 0 6, センパワン ロード 5 0 1, セレタリス
コンドミニアム 0 3 - 0 2

審査官 小山 満

(56)参考文献 特開2007-173843(JP, A)
特開2013-145846(JP, A)
特開2010-087355(JP, A)
米国特許出願公開第2007/0148786(US, A1)
欧州特許出願公開第01801895(EP, A2)
国際公開第2009/110608(WO, A1)
米国特許第8492169(US, B2)
特開2008-263031(JP, A)
国際公開第2014/097510(WO, A1)
MAEHARA, Hiroki et al., Tunnel Magnetoresistance above 170% and Resistance-Area Product of $1 (\mu\text{m})^2$ Attained by In situ Annealing of Ultra-Thin MgO Tunnel Barrier, Applied Physics Express, 2011年 3月25日, Vol.4, No.3, pp.033002.1-033002.3

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)
H 0 1 L 4 3 / 1 2
H 0 1 L 4 3 / 0 8
H 0 1 L 4 3 / 1 0
H 0 1 L 2 9 / 8 2
H 0 1 L 2 7 / 1 0 5
H 0 1 L 2 1 / 8 2 3 9