

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7278250号
(P7278250)

(45)発行日 令和5年5月19日(2023.5.19)

(24)登録日 令和5年5月11日(2023.5.11)

(51)国際特許分類	F I
H 0 1 L 29/82 (2006.01)	H 0 1 L 29/82 Z
H 1 0 B 61/00 (2023.01)	H 1 0 B 61/00
H 1 0 N 50/10 (2023.01)	H 1 0 N 50/10 Z
H 0 1 F 10/30 (2006.01)	H 0 1 F 10/30

請求項の数 6 (全27頁)

(21)出願番号	特願2020-199673(P2020-199673)	(73)特許権者	510273880
(22)出願日	令和2年12月1日(2020.12.1)		コリア ユニバーシティ リサーチ アンド
(65)公開番号	特開2021-150639(P2021-150639 A)		ビジネス ファウンデーション
(43)公開日	令和3年9月27日(2021.9.27)		KOREA UNIVERSITY RE
審査請求日	令和2年12月1日(2020.12.1)		SEARCH AND BUSINESS
(31)優先権主張番号	10-2020-0033574		FOUNDATION
(32)優先日	令和2年3月19日(2020.3.19)		大韓民国、0 2 8 4 1 ソウル、ソンプ
(33)優先権主張国・地域又は機関	韓国(KR)	(74)代理人	ク - グ、アナム - ロ 1 4 5
前置審査		(74)代理人	100114775
			弁理士 高岡 亮一
		(74)代理人	100121511
			弁理士 小田 直
		(74)代理人	100202751
			弁理士 岩堀 明代
		(74)代理人	100208580
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 タングステン窒化物を有するスピン軌道トルクスイッチング素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

固定された磁化方向を有する固定層と、
 スwitchingされる磁化方向を有する自由層と、
 前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、
 面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層と、
 を含む磁気素子であって、
 前記スピン電流は、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスitchingし、
 前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、
 前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン - 窒化物層を含み、
 前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置され、
 前記タングステン - 窒化物層において窒素の原子パーセント (a t o m i c p e r c e n t) が 5 % ないし 4 2 % であることを特徴とする磁気素子。

10

【請求項 2】

固定された磁化方向を有する固定層と、
 スwitchingされる磁化方向を有する自由層と、
 前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、
 面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層と、
 を含む磁気素子であって、

20

前記スピントルクは、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングし、前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、

前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン - 窒化物層を含み、

前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置され、

前記タングステン - 窒化物層において窒素の原子パーセント (atomic percent) は、2%ないし29%であり、

前記タングステン - 窒化物層の厚さは0.2 nmないし0.8 nmであることを特徴とする磁気素子。

【請求項3】

固定された磁化方向を有する固定層と、

スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、

前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、

面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピントルクを注入するスピントルク発生層と、を含む磁気素子であって、

前記スピントルクは、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングし、前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、

前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン - 窒化物層を含み、

前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置され、

前記タングステン - 窒化物層において窒素の原子パーセント (atomic percent) は、2%ないし5%であり、

前記タングステン - 窒化物層の厚さは0.2 nmないし3 nmであることを特徴とする磁気素子。

【請求項4】

固定された磁化方向を有する固定層と、

スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、

前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、

面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピントルクを注入するスピントルク発生層と、を含む磁気素子であって、

前記スピントルクは、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングし、前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、

前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン - 窒化物層を含み、

前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置され、

前記タングステン - 窒化物層は結晶質W₂N(111)相を含むか、又は、

前記タングステン - 窒化物層は、結晶質W₂N(111)相及び結晶質WN(100)相を含むことを特徴とする磁気素子。

【請求項5】

固定された磁化方向を有する固定層と、

スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、

前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、

面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピントルクを注入するスピントルク発生層と、を含む磁気素子であって、

前記スピントルクは、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングし、前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、

前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン - 窒化物層を含み、

前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置され、

前記スピントルク発生層は、面内磁気異方性を有する強磁性層をさらに含み、

10

20

30

40

50

前記タングステン層は、前記強磁性層と前記タングステン - 窒化物層との間に配置されることを特徴とする磁気素子。

【請求項 6】

固定された磁化方向を有する固定層と、
 スwitchingされる磁化方向を有する自由層と、
 前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、
 面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピントルクを注入するスピントルク発生層と、
 を含む磁気素子であって、

前記スピントルクは、スピントルクによって前記自由層の磁化方向をswitchingし、
 前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、

前記スピントルク発生層はタングステン - 窒化物層を含み、

前記タングステン - 窒化物層において窒素の原子パーセント (atomic percent) は、2%ないし5%であり、

前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置されることを特徴とする磁気素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、スピントルク (spin-orbit torque; SOT) 基盤のswitching素子に関するものとして、より詳細には、低い電流でスピントルク (spin-orbit torque, SOT) switchingができるタングステン層/タングステン窒化物層多層薄膜を含むスピントルク (spin-orbit torque; SOT) 基盤のswitching素子に関する。

【背景技術】

【0002】

スピントルク (spin-orbit torque; SOT) switching基盤の磁気ランダムアクセスメモリ (Magnetic Random Access Memory; MRAM) は、磁気トンネル接合 (magnetic tunnel junction; MTJ) を核心素子として有する。

【0003】

図1は、通常の磁気トンネル接合 (magnetic tunnel junction; MTJ) を示す。

【0004】

図1に示すように、磁気トンネル接合10 (magnetic tunnel junction; MTJ) は、スピントルク発生層/自由層/トンネルバリア層/固定層で構成される。

【0005】

自由層14と固定層18の相対的な磁化方向によってトンネルバリア層16を通過するトンネリング電流の電気抵抗値が変わる。磁気トンネル接合10は、このようなトンネル磁気抵抗 (tunneling magnetoresistance; TMR) 現象を用いて情報を保存する。

【0006】

磁気トンネル接合10は、高いトンネル磁気抵抗 (TMR) 比 (ratio)、高い書き込み安定性、低い書き込み電流、及び高集積化を実現するために、垂直磁気異方性 (perpendicular magnetic anisotropy; PMA) 特性を有する。垂直磁気異方性は、磁性層の磁化方向が磁性層面に垂直であることを意味する。

【0007】

自由層14に隣接するスピントルク発生層12に面内電流 I_c が流れるとき、スピントルク発生層12はスピントルク (spin-orbit torque; SOT) によってスピントルク効果 (spin Hall effect) 又はラシュバ効果 (Rashba

10

20

30

40

50

effect)を用いて自由層のスイッチングを誘導する。スピン軌道トルクはスピン伝達トルク(spin-transfer torque; STT)の書き込み(writing)方式より高速、低電流、及び低消費電力で情報を書き込む。

【0008】

しかし、スピン軌道トルク(SOT)MRAMが商用化されるために、より低い電流注入によって自由層の磁化反転を誘導できるスピントルク発生層の物質及び構造が求められる。

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の解決しようとする課題は、低いスイッチング臨界電流において書き込み動作を行うSOT-MRAMを提供することである。自由層に接触して面内電流を提供するスピントルク発生層がタングステン層/タングステン窒化物層の多層薄膜を含む場合、SOT-MRAMのスピン軌道トルク効果が増強され、書き込み動作のためのスイッチング臨界電流が減少する。タングステン窒化物層は、窒素がドーピングされたタングステン又はタングステン窒化物を含む。

10

【0010】

本発明の解決しようとする課題は、スピンホール発生層としてタングステン層/タングステン窒化物層構造を使用したとき、タングステン窒化物層の所定の厚さと所定の窒素濃度で垂直磁気異方性が発現するSOT-MRAMを提供することである。

【0011】

本発明の解決しようとする課題は、低温と高温の過酷な環境下でも動作し、その後常温に戻った後も正常作動するSOT-MRAMを提供することである。

20

【0012】

本発明の解決しようとする課題は、低い臨界電流を有するとともに無磁場スイッチング動作を行うSOT-MRAMを提供することである。

【課題を解決するための手段】

【0013】

本発明の一実施例による磁気素子は、固定された磁化方向を有する固定層と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層と、を含む。前記スピン電流は、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングする。前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、前記スピントルク発生層は、順次積層されたタングステン層及びタングステン-窒化物層を含む。前記タングステン-窒化物層は、前記自由層に隣接して配置される。

30

【0014】

本発明の一実施例において、前記タングステン-窒化物層の厚さは0.2nmであり、前記タングステン窒化物層において窒素の原子パーセント(atomic percent)が5%ないし42%である。

【0015】

本発明の一実施例において、前記タングステン窒化物層において窒素の原子パーセント(atomic percent)は、2%ないし29%であり、前記タングステン-窒化物層の厚さは0.2nmないし0.8nmである。

40

【0016】

本発明の一実施例において、前記タングステン窒化物層において窒素の原子パーセント(atomic percent)は、2%ないし5%であり、前記タングステン-窒化物層の厚さは0.2nmないし3nmである。

【0017】

本発明の一実施例において、前記タングステン-窒化物層は結晶質 $W_2N(111)$ 相を含むか、又は、前記タングステン-窒化物層は、結晶質 $W_2N(111)$ 相及び結晶質 $WN(100)$ 相を含む。

50

【 0 0 1 8 】

本発明の一実施例において、前記タングステン層は、前記自由層と垂直に整列される。

【 0 0 1 9 】

本発明の一実施例において、前記スピントルク発生層は、面内磁気異方性を有する強磁性層をさらに含み、前記タングステン層は、前記強磁性層と前記タングステン窒化物層との間に配置される。

【 0 0 2 0 】

本発明の一実施例において、前記タングステン - 窒化物層の比抵抗は $350 \mu \cdot \text{cm}$ 以上である。

【 0 0 2 1 】

本発明の一実施例による磁気素子は、固定された磁化方向を有する固定層と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層と、前記自由層と前記スピントルク発生層との間に配置されたタングステン窒化物層を含む。前記スピン電流は、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングする。前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、前記スピントルク発生層はタングステン層を含み、前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層と垂直に整列される。

10

【 0 0 2 2 】

本発明の一実施例による磁気素子は、固定された磁化方向を有する固定層と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層と、前記固定層と前記自由層との間に介在するトンネル絶縁層と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層と、を含む。前記スピン電流は、スピン軌道トルクによって前記自由層の磁化方向をスイッチングする。前記固定層及び前記自由層は、垂直磁気異方性を有し、前記スピントルク発生層はタングステン - 窒化物層を含み、前記タングステン - 窒化物層において窒素の原子パーセント (atomic percent) は、2%ないし5%であり、前記タングステン - 窒化物層は、前記自由層に隣接して配置される。

20

【発明の効果】

【 0 0 2 3 】

本発明の実施例によれば、タングステン層 / タングステン窒化物層の多層構造を用いた SOT スwitching 素子は、従来の単一タングステン層を使用した素子より低い書き込み電流で作動する。

30

【 0 0 2 4 】

本発明の実施例によれば、自由層に接触して面内電流を提供するスピントルク発生層がタングステン層 / タングステン窒化物層を含む場合、SOT - MRAM のスピン軌道トルク効果が増強され、書き込み動作のためのスイッチング臨界電流が減少する。

【 0 0 2 5 】

本発明の実施例によれば、SOT - MRAM は低温と高温の過酷な環境下でも作動し、その後常温に戻った後にも正常作動する。

【 0 0 2 6 】

本発明の実施例によれば、面内磁化強磁性層タングステン層 / タングステン窒化物層の多層構造は、低い臨界電流を有するとともに無磁場スイッチング動作を行う SOT - MRAM を提供する。

40

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 7 】

【図 1】通常の磁気トンネル接合 (magnetic tunnel junction ; MTJ) を示す。

【図 2】本発明の一実施例による磁気素子を示す断面図である。

【図 3 A】本発明の一実施例による磁気素子を示す図面である。

【図 3 B】図 3 A の断面図である。

50

【図4】本発明の一実施例によるSOTスイッチング挙動を測定するための磁気素子である。

【図5】本発明の一実施例によるN₂ガスの流量比Qに伴うタングステン窒化物層の窒素の原子パーセント(nitrogen atomic percent)を示す。

【図6】本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の窒素の原子パーセントn(nitrogen atomic percent)に伴う有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ を示す。

【図7】本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の厚さ t_{W-N} による有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ を示す。

【図8】本発明の一実施例による窒素の原子パーセントnに伴うスピンホール角度の絶対値 $|D_L|$ を示す。 10

【図9】本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の厚さ t_{W-N} に伴うスピンホール角度の絶対値 $|D_L|$ を示す。

【図10】 $t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}$ でnの条件別電流に伴う抵抗を示す。

【図11】 $t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}$ でnの条件別外部磁場に伴うスイッチング電流を示す。

【図12】 $t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}$ でnに伴う規格化されたスイッチング電流及び垂直磁気異方性を示す。

【図13】 $n = 29\%$ からnに伴う規格化されたスイッチング電流及び垂直磁気異方性を示す。

【図14】 $W(5 \text{ nm}) / W_{N_x}(t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}) / \text{CoFeB}(0.9 \text{ nm}) / \text{MgO}(1 \text{ nm}) / \text{Ta}(2 \text{ nm})$ 構造でnの関数として比抵抗 $\chi_x(\text{resistivity})$ を示す。 20

【図15】厚さ40nmのタングステン窒化物層のGIXRD(Grazing Incidence X-ray Diffraction)結果を示す。

【図16】nの関数として40nmの厚さを有するタングステン窒化物層の比抵抗を図示する。

【図17】 $n = 5\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。

【図18】 $n = 34\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。 30

【図19】 $n = 42\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。

【図20】+200 Oeの外部磁場Hex下で様々な温度で面内電流に伴う抵抗を示す。

【図21】様々な温度で外部磁場に伴うスイッチング電流を示す。

【図22】本発明の一実施例による $W(5 \text{ nm}) / W_{N_x}(t_{W-N}; n) / \text{CoFeB}(0.9 \text{ nm}) / \text{MgO}(1 \text{ nm}) / \text{Ta}(2 \text{ nm})$ 構造における窒素の含量nと W_{N_x} 層の厚さに伴う実験結果を示す。 40

【図23】本発明のもう一つの実施例による磁気素子を示す断面図である。

【図24】本発明のもう一つの実施例による磁気素子を示す断面図である。

【発明を実施するための最良の形態】

【0028】

非磁性層NM/強磁性層FM構造において、強磁性層NMの磁化は、面内電流が非磁性層NMに注入される際に生成されたスピン軌道トルク(SOT)によって反転される。SOT-スイッチング基盤メモリ又はロジック素子は、従来のスピン-伝達-トルク-スイッチングされたデバイス(spin-transfer-torque-switched devices)に比べ、エネルギー消費減少及び高速スイッチングのメリットを提供する。しかし、商用化のためには2つの主要な障害物を解決しなければならない。すなわち、 50

外部磁場がない状態で決定的スイッチング (deterministic switching) と非常に低いスイッチング電流が求められる。

【0029】

スピン軌道トルク (Spin-orbit torque; SOT) は、面内電流を注入することによって、非磁性層 NM / 強磁性層 FM 構造における強磁性層の磁化を反転させることに使用される。スピン軌道トルクは、磁気ランダムアクセスメモリのための新しいメカニズムとして相当な関心を集めた。様々な重金属の中で、 π -相 (π -phase) タングステン膜は比較的高い SOT 効率を示す。したがって、 π -相 (π -phase) タングステン膜は、スピン電流発生層の潜在的な材料 (potential material) として考慮される。

10

【0030】

本発明の一実施例によれば、我々は、W / WN_x / CoFeB / MgO ホールバ (Hall bar) 構造で向上した SOT 及びより低い SOT 誘導スイッチング電流を報告する。CoFeB 層は垂直磁化された。前記 WN 層は窒素反応性環境 (nitrogen reactive environment) でスパッタリング蒸着される。前記 WN_x 層の組成は微細構造及び電気的特性に影響を与える。測定された SOT 効率は 0.54 であり、スイッチング電流は 40% ないし 42% の窒素原子パーセントを含むサンプルで、前記 WN 層を含まないサンプルより約 1 / 5 に減少する。

【0031】

本発明の一実施例によれば、W / WN / CoFeB / MgO 構造は、低いスイッチング電流を提供する。面内磁化強磁性層がタングステン層下部に配置された場合、無磁場スイッチングが実現される。

20

【0032】

以下、添付した図面を参照して本発明の好ましい実施例を詳細に説明する。しかし、本発明は、ここで説明される実施例に限られるものではなく、異なる形態で具体化されることもある。むしろ、ここで紹介される実施例は、開示された内容が徹底かつ完全になるよう、そして当業者に本発明の思想が十分伝えるように提供されるものである。図面において、構成要素は、正確を期するために誇張されたものである。明細書全体に亘って、同一の要素は、同一の参照番号で表される。

【0033】

図 2 は、本発明の一実施例による磁気素子を示す断面図である。

30

【0034】

図 2 に示すように、磁気素子 100 は、固定された磁化方向を有する固定層 150 と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層 130 と、前記固定層と前記固定層との間に介在されるトンネル絶縁層 140 と、面内電流 I_c が流れるいつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層 120 と、を含む。前記スピン電流は、スピン軌道トルクによって前記自由層 130 の磁化方向をスイッチングする。前記固定層 150 及び前記自由層 130 は、垂直磁気異方性を有する。前記スピントルク発生層 120 は、順次積層されたタングステン層 122 及びタングステン - 窒化物層 124 を含む。前記タングステン - 窒化物層 124 は、前記自由層 130 に隣接して配置される。前記磁気素子 100 は、SOT-MRAM である。前記固定層 150、前記トンネル絶縁層 140、及び前記自由層 130 は、磁気トンネル接合を構成する。

40

【0035】

固定層 150 は、固定された磁化方向を有し、垂直磁気異方性を有する強磁性層を含む。前記固定層 150 は、単層構造又は多層構造である。

【0036】

自由層 130 は、垂直磁気異方性を有し、SOT によって磁化方向をスイッチングする。前記自由層 130 は 0.9 nm 厚さの CoFeB である。前記自由層 130 は、単層構造又は多層構造に変形される。

【0037】

50

トンネル絶縁層 140 は、トンネル電流が流れる絶縁体として、1 nm 厚さの MgO である。前記トンネル絶縁層 140 は、前記固定層 150 と自由層 130 との間に配置される。

【0038】

スピントルク発生層 120 は、非磁性導電性金属を含む。前記スピントルク発生層 120 は、順次積層されたタングステン層 122 及びタングステン - 窒化物層 124 を含む。前記スピントルク発生層 120 に面内電流 I_c が流れると、前記スピントルク発生層 120 は、配置平面に垂直な方向（自由層方向）にスピン電流 I_s を提供する。前記スピン電流 I_s は、スピンホール効果（Spin Hall effect; SHE）又はスピンホール効果（Spin Hall effect; SHE）によって SOT 生成する。前記 SOT は、前記自由層 130 の磁化をスイッチングする。スピントルク発生層 120 の両端は、

10

接続電極 120a、120b を介して面内電流を印加する外部回路に連結される。

【0039】

前記タングステン - 窒化物層 124 の厚さと組成に応じてスイッチング電流が変化する。また、前記タングステン - 窒化物層 124 の厚さと組成に応じて、前記自由層の磁化特性が変更される。すなわち、タングステン - 窒化物層 124 の厚さと組成は、所定の範囲内で前記自由層 130 に垂直磁化異方性特性を提供する。前記自由層 140 が垂直磁気異方性を発現する場合、タングステン - 窒化物層 124 の厚さが減少し、窒素の濃度が増加するにつれてスイッチング電流が減少する。

【0040】

具体的に、前記タングステン - 窒化物層 124 の厚さは 0.2 nm であり、前記タングステン - 窒化物層 124 において窒素の原子パーセント（atomic percent）が 5 % ないし 42 % である。この場合、前記自由層 130 は垂直磁気異方性を維持しつつ、窒素の原子パーセント（atomic percent）が増加するにつれてスイッチング電流が減少する。一方、窒素の原子パーセント（atomic percent）が 42 % を超える場合、前記自由層 130 は垂直磁気異方性が消失し、面内磁気異方性を有する。

20

【0041】

前記タングステン - 窒化物層 124 において窒素の原子パーセント（atomic percent）は 2 % ないし 29 % であり、前記タングステン - 窒化物層 124 の厚さは 0.2 nm ないし 0.8 nm である。この場合、前記自由層 130 は、垂直磁気異方性を維持する

30

。

【0042】

前記タングステン - 窒化物層 124 において窒素の原子パーセント（atomic percent）は 2 % ないし 5 % であり、前記タングステン - 窒化物層の厚さは 0.2 nm ないし 3 nm である。この場合、前記自由層 130 は、垂直磁気異方性を維持する。

【0043】

前記タングステン - 窒化物層 124 は、結晶質 $W_2N(111)$ 相（phase）を含むか、又は、前記タングステン - 窒化物層 124 は結晶質 $W_2N(111)$ 相及び結晶質 $WN(100)$ 相を含む。この場合、前記自由層 130 は、垂直磁気異方性を維持する。

【0044】

電極 160 は、前記固定層 150 上に配置されて外部回路に連結される。

40

【0045】

図 3A は、本発明の一実施例による磁気素子を示す図面である。

【0046】

図 3B は、図 3A の断面図である。

【0047】

図 3A 及び図 3B に示すように、磁気素子 200 は、スイッチングされる磁化方向を有する自由層 130 と、前記自由層下部に配置されたトンネル絶縁層 140 と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピン電流を注入するスピントルク発生層 120 と、を含む。前記固定層及び前記自由層 130 は垂直磁気異方性を有し、前記スピントルク発生層 120 は順次積層されたタングステン層 122 及びタングステン - 窒化物層 124 を含む。前

50

記タングステン - 窒化物層 124 は、前記自由層 130 に隣接して配置される。キャッピング層 162 は、前記トンネル絶縁層 140 上に配置され、前記トンネル絶縁層 140 を保護する。前記キャッピング層 162 はタンタルである。

【0048】

SOT は、非磁性層 NM 又はスピントルク発生層のスピホール効果 (Spin Hall effect; SHE) 又は非磁性層 NM / 強磁性層 FM インタフェースの Rashba - Edelstein 効果によって発生する。非磁性層 NM / 強磁性層 FM 構造において、非磁性層 NM / 強磁性層 FM インタフェースに垂直な方向が z 方向であり、x 方向に沿って非磁性層 NM に面内電流 I_c が注入されると、この 2 つの効果のため y 方向のスピが蓄積される。この場合、SOT によって発生したトルクは、下記のように

10

【数 1】

磁化方向 \hat{m}

と

【数 2】

スピン方向 \hat{s}

の 2 つの成分として表現される。

20

【数 3】

$$\begin{aligned}\tau_{DL} &= \hat{m} \times (\hat{s} \times \hat{m}) \\ \tau_{FL} &= \hat{m} \times \hat{s}\end{aligned}$$

【0049】

ここで τ_{DL} は、ダンピング - ライク (damping-like; DL) - SOT である。 τ_{FL} はフィールド - ライク (field-like; FL) - SOT である。いかなる SOT が磁化反転 (magnetization reversal) に及ぼす影響が支配的なのは論争の余地がある。しかし、本発明の課題は、SOT のサイズを増加させてスイッチング電流を減らすことである。

30

【0050】

SOT の効率で定義される注入面内電流密度 J_c に対するスピン電流密度 J_s の比率をスピホール角度 (Spin Hall Angle; SHA、 $\theta_{SH} = J_s / J_c$) という。スピホール角度 θ_{SH} が増加するにつれて、磁化を逆転させるためにはより低いスイッチング電流が必要となる。重金属 (heavy metal) の場合、スピホール角度 θ_{SH} は大きいことが知られており、スピホール角度 θ_{SH} はタングステン W で ~ 0.33 、タンタリウム Ta で ~ 0.15 及び白金 Pt で ~ 0.10 の水準である。

【0051】

本発明の一実施例によれば、スイッチング電流を減らすためにタングステン窒化物層 124 が非磁性層 NM と強磁性層 FM との間に挿入され、タングステン窒化物層 124 の厚さと組成を制御した。それに応じて、スピホール角度 θ_{SH} が 0.54 に増加する。また、電流 - 誘導 SOT スwitching 挙動がタングステン窒化物層 124 がない値の約 1/5 に減少する。とても薄いタングステン窒化物層 124 (厚さ 0.2 nm) でも SOT スwitching 挙動は窒素原子 N 含量に応じて変わる。

40

【0052】

本発明の一実施例によれば、Si100 ウェハ上に 300 nm 厚さの SiO₂ 層が蒸着される。前記 SiO₂ 層上に W / WN_x / CoFeB / MgO / Ta 層が順次積層される。タングステン層 122 及びタングステン - 窒化物層 124 は DC マグネトロンスパッタリングシステムによって蒸着される。

50

【0053】

DCマグネトロンスパッタリングシステムは、 5×10^{-9} Torrの初期真空で金属蒸着のために使用された。作業圧力 (working pressure) はArガス雰囲気中で1.3 mTorrである。前記タングステン窒化物層124は、反応性スパッタリングによって蒸着された。注入されたAr及びN₂ガスの比率は、一定の作動圧力で制御された。DC電力密度は、 2.5 W/cm^2 に固定される。

【0054】

RFマグネトロンスパッタリングシステムは、 5×10^{-9} Torrの初期真空及び6 mTorrの作動圧力でトンネル絶縁層140の蒸着に使用された。前記トンネル絶縁層130はMgOである。RF電力密度は 1.6 W/cm^2 に固定される。

10

【0055】

磁気素子の積層構造は、Si/SiO₂/W(5 nm)/WN_x(t_{W-N})/CoFeB(0.9 nm)/MgO(1 nm)/Ta(2 nm)である。タングステン窒化物層124の厚さt_{W-N}は、0ないし3 nmに変わり、タングステン窒化物層124の組成は、Qを0ないし50%に変化させて調整した。ここで、Qはスパッタリングの間、総ガス流量[Ar+N₂]に対するN₂ガス流量[N₂]の比 $Q = [N_2] / [Ar + N_2]$ である。

【0056】

自由層130は、CoFeB(0.9 nm)である。前記キャッピング層162の蒸着の後、すべてのサンプルは 10^{-6} Torrで1時間摂氏300度のファーンイス (furnace) でアニーリングされた。前記キャッピング層162は、保護層として動作する。

20

【0057】

アニーリングの後、磁気特性は振動試料型磁力計 (vibrating sample magnetometer; VSM) を使用して室温で測定された。電気的特性を測定するために、幅5 μm及び長さ35 μmのホールバ (Hall bar) 構造を有する素子は、フォトリソグラフィを用いて製造される。高調波測定 (harmonics measurement) を使用してSOT効率が測定される。測定中に、注入された交流電流AC及び周波数fはそれぞれ1 mA及び13.7 Hzにそれぞれ固定された。

【0058】

図4は、本発明の一実施例によるSOTスイッチング挙動を測定するための磁気素子である。

30

【0059】

図4に示すように、SOTスイッチング挙動を決定するために、直径4 μmのドット型パターンは、ホールバ構造でキャッピング層162、トンネル絶縁層140、及び自由層130を順次に異方性エッチングして形成される。スイッチング特性は、プローブステーション (probe station) を使用して測定される。10 μsのパルス幅を有するパルス電流I_{pulse}が素子にx方向に印加され、結晶性スイッチング (deterministic switching) のために外部磁場H_{ex}がx軸方向に印加された。磁気素子200aは、ホールバ構造でドット型の自由層130、トンネル絶縁層140、及びキャッピング層162を有する。

【0060】

タングステン窒化物層124の抵抗は、4点プローブ (four-point probe) を使用して測定された。タングステン窒化物層124の組成を確認するためにラザフォード後方散乱 (Rutherford backscattering; RBS) 分析を行った。前記タングステン窒化物層124の微細構造は、0.5度の固定角ですれすれ入射X線回折装置 (grazing incidence X-ray diffraction device) を使用して分析された。前記タングステン窒化物層124の微細構造は、透過電子顕微鏡を使用して観測された。

40

【0061】

図5は、本発明の一実施例によるN₂ガスの流量比Qに伴うタングステン窒化物層の窒素の原子パーセント (nitrogen atomic percent) を示す。

50

【 0 0 6 2 】

図 5 に示すように、 Q はスパッタリングの間、総ガス流量 $[Ar + N_2]$ に対する N_2 ガス流量 $[N_2]$ の比 $Q = [N_2] / [Ar + N_2]$ である。タングステン窒化物層 1 2 4 の窒素原子の原子パーセント (nitrogen atomic percent) は、ラザフォード後方散乱装置によって測定された。

【 0 0 6 3 】

タングステン窒化物層 1 2 4 の窒素原子含量を分析した。 N_2 ガス流量の比 Q は 0、4、8、15、20、30、40、そして 50% である。ラザフォード後方散乱 (RBS) を使用して検査した 40 nm の厚さのタングステン窒化物薄膜の Q の関数として窒素の原子パーセント n を示す。 $Q = 4\%$ で、窒素の原子パーセント n は 5% でとても小さい。 $Q = 8\%$ で、 N の原子パーセント n は 29% で急激に増加する。 $Q = 20\%$ で、窒素の原子パーセント n は 33% である。しかし、 $Q = 20\%$ と $Q = 30\%$ との間で、窒素の原子パーセント n は再び 40% で急激に増加する。 $Q = 40\%$ で、窒素の原子パーセント n は 42% である。

10

【 0 0 6 4 】

図 6 は、本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の窒素の原子パーセント n (nitrogen atomic percent) に伴う有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ を示す。

【 0 0 6 5 】

図 6 に示すように、磁気素子 200 は、 $W / (5 \text{ nm}) / WN_x (0.2 \text{ nm}) / CoFeB (0.9 \text{ nm}) / MgO (1 \text{ nm}) / Ta (2 \text{ nm})$ 構造を有する。前記タングステン窒化物層 1 2 4 の窒素の原子パーセント n (nitrogen atomic percent) に伴う有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ が分析された。タングステン窒化物層 1 2 4 の窒素の原子パーセント n (nitrogen atomic percent) は、0 ~ 42% の範囲で変更された。有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ は、 n が増加するにつれて減少する。タングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ t_{W-N} が 0.2 nm で固定されたとき、垂直磁気異方性 PMA は窒素の原子パーセント n が 0% ないし最大 42% の範囲内で発生した。しかし、窒素の原子パーセント n が 42% を超えると、PMA は発生しなかった。有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ は、 $n = 0\%$ で $2.87 \text{ Mer g / cm}^3$ であり、 $n = 42\%$ で $1.81 \text{ Mer g / cm}^3$ に減少した。したがって、 n が増加するにつれて PMA の強度は減少した。有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ は、平面内 (in-plane) 及び平面外 (out-of-plane) M-H ループの面積を用いて計算された。

20

30

【 0 0 6 6 】

図 7 は、本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の厚さ t_{W-N} による有効異方性エネルギー $K_{u, eff}$ を示す。

【 0 0 6 7 】

図 7 に示すように、磁気素子 200 は、 $W (5 \text{ nm}) / WN_x (t_{W-N}) / CoFeB (0.9 \text{ nm}) / MgO (1 \text{ nm}) / Ta (2 \text{ nm})$ 構造を有する。我々はタングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ t_{W-N} を 0.2 nm ~ 3 nm の範囲で変更した。

【 0 0 6 8 】

タングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ t_{W-N} が $t_{W-N} = 0.4 \text{ nm}$ の場合、垂直磁気異方性 PMA は $n = 29\%$ に対してのみ発現した。 $n = 29\%$ で、タングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ t_{W-N} が 1 nm より大きいとき、垂直磁気異方性 PMA は消えた。

40

【 0 0 6 9 】

タングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ t_{W-N} が 1.0 nm を超えると、 n に関係なく垂直磁気異方性 PMA が消えた。

【 0 0 7 0 】

垂直磁気異方性 PMA は高密度磁気ランダムアクセスメモリ MRAM に必須であるため、我々は垂直磁気異方性 PMA が現れる範囲で、タングステン窒化物層 1 2 4 の厚さ及び組成を有する構造で SOT を照射した。磁気輸送特性 (magneto-transport)

50

t characterization) を照射するために、垂直磁気異方性 PMA を有する磁気素子は、フォトリソグラフィを使用して幅 $5 \mu\text{m}$ 及び長さ $35 \mu\text{m}$ のホールバ構造で製造された。

【0071】

我々は、PMA 磁気素子で SOT の評価に広く使用される高調波方法によって磁気輸送特性を測定した。AC 電流が磁気素子に注入され、外部磁場 H_{ex} の下で磁化が平衡状態にあるとき、第 1 高調波成分は次のように極角 θ 及び

【数 4】

方位角 φ

10

を用いて表現される。

【0072】

[数 1]

$$R_{xy}^{\omega} = R_{AHE} \cos \theta + R_{PHE} \sin^2 \theta \sin 2\varphi$$

ここで、 R_{AHE} は異常ホール抵抗 (anomalous Hall resistance) を表し、 R_{PHE} は平面ホール抵抗 (planar Hall resistance) を表す。熱電電圧 (thermoelectric voltage) に関連する 2 次高調波成分 (second harmonic component; R_{xy}^2) は次の通りである。

20

【0073】

[数 2]

$$R_{xy}^{2\omega} = [R_{AHE} - 2R_{PHE} \cos \theta \sin 2\varphi] \frac{d \cos \theta}{dB_I} \cdot B_I + R_{PHE} \sin^2 \theta \frac{d \sin 2\varphi}{dB_I} \cdot B_I + I_0 \alpha \nabla T \sin \theta \cos \varphi$$

30

【0074】

ここで、 I_0 は AC 電流の振幅を表し、 α は異常な Nernst 効果係数を表し、 ∇T はジュール熱 (Joule heating) による熱寄与度 (thermal contribution) を表す。

【0075】

$B_I = B_{DL} + B_{FL} + B_{Oe}$ は、電流誘導フィールドの合計 (sum of the current-induced field) を表す。ここで、 B_{DL} はダンピング-ライクフィールド (damping-like field)、 B_{FL} はフィールド-ライクフィールド (field-like field)、 B_{Oe} は Oersted フィールドである。 B_{DL} 及び B_{FL} は、それぞれ DL-SOT 及び FL-SOT によって生成された有効磁場である。磁化は、有効磁場の方向に振動する。

40

【0076】

面内磁化状態 $\theta = \pi/2$ において、DL-SOT 及び FL-SOT は、磁化が平面でそれぞれ垂直及び水平に振動するように誘発する。数式 2 は、次のように再作成する。

[数 3]

$$R_{xy}^{2\omega} = \left[\left(R_{AHE} \frac{B_{DL}}{B_{ext}} + I_0 \alpha \nabla T \right) \cos \varphi + 2R_{PHE} (2 \cos^3 \varphi - \cos \varphi) \frac{B_{FL} + B_{Oe}}{B_{ext}} \right]$$

50

【 0 0 7 7 】

異方性磁場 H_K より十分大きい外部磁場 B_{ext} が印可されると、磁化がフィルムの平面内にある場合、熱勾配 (thermal gradient) による抵抗の寄与は一定であると仮定できる。平面ホール効果 (planar Hall effect) の 2 次項 (second term) は、

【 数 5 】

$$\varphi = 45^\circ$$

の時に消滅する。このような仮定の下で、数式 3 は DL - SOT による有効フィールドである、 B_{DL} を計算するために近似化する。その次に $B_{FL} + B_{Oe}$ が得られる。

10

【 数 4 】

$$B_{DL} = \left[R_{DL}^{2w} / \cos\varphi \frac{dR_{xy}^W}{d\theta_B} \right] B_{ext}, \quad B_{FL} + B_{Oe} = \left[R_{FL}^{2w} / \cos\varphi \frac{dR_{xy}^W}{d\varphi_B} \right] B_{ext}.$$

【 0 0 7 8 】

その後、我々は SOT 効率を計算することができる。スピンホール角度 (Spin Hall Angle、) は、次の通りである。

【 数 5 】

20

$$\xi_{DL(FL)} = \frac{2e}{h} M_S t_{FM} \frac{B_{DL(FL)}}{J_e},$$

【 0 0 7 9 】

ここで、 e は電磁電荷を表し、 h はプランク定数を表し、 M_S は自由層の飽和磁化を表し、 t_{FM} は自由層の厚さを表し、 J_e は電流密度を表す。

【 0 0 8 0 】

スピンホール角度 θ_{DL} を得るために、我々は外部磁場 B_{ext} の方向を変化させて高調波測定を行った。我々は、磁気素子の異方性磁場 H_K 値の 2 倍より大きい約 13 - 18 kOe の外部磁場 B_{ext} を印加する。

30

【 0 0 8 1 】

タングステンの FL - SOT 効率が DL - SOT 効率より約 10 倍小さいことが知られているため、本発明では DL - SOT によるスピンホール角度 θ_{DL} のみを考慮する。

【 0 0 8 2 】

図 8 は、本発明の一実施例による窒素の原子パーセント n に伴うスピンホール角度の絶対値 $|\theta_{DL}|$ を示す。

【 0 0 8 3 】

図 9 は、本発明の一実施例によるタングステン窒化物層の厚さ t_{W-N} に伴うスピンホール角度の絶対値 $|\theta_{DL}|$ を示す。

40

【 0 0 8 4 】

図 8 及び図 9 に示すように、 $|\theta_{DL}|$ は、 n が増加するにつれて漸進的に増加して、 $n = 40\%$ で最大 0.54 に到達する。このスピンホールの角度は、タングステン単独のものより遥かに大きい。 $n = 40\%$ の場合、 $|\theta_{DL}|$ は若干減る。

【 0 0 8 5 】

W (5 nm) / CoFeB / MgO 構造 ($n = 0\%$ 、 $t_{W-N} = 0$ nm) において、5 nm 厚さの W 薄膜は - 相 W であると予想され、スピンホール角度の絶対値 $|\theta_{DL}|$ は 0.32 ± 0.02 である。

【 0 0 8 6 】

50

W (5 n m) / W N _x (t_{W-N}) / C o F e B (0.9 n m) / M g O (1 n m) / T a (2 n m) 構造で、 | D_L | は、 n = 29 % の条件で t_{W-N} によって変化する。 | D_L | は、 t_{W-N} = 0.2 n m でタングステン窒化物層 1 2 4 が無いより若干高い。しかし、 0.2 n m より大きいタングステン窒化物層 1 2 4 の厚さで、 t_{W-N} が増加するにつれて、 | D_L | は次第に減少する。この結果は、とても薄いタングステン窒化物層 1 2 4 が S O T 特性を向上させることができることを示す。

【 0 0 8 7 】

しかし、 t_{W-N} が 0.2 n m を超えるとき、バルクタングステン窒化物の特性が次第に現れて、 S O T 効率がタングステン窒化物層 1 2 4 が無いよりも低い。それにもかかわらず、 t_{W-N} が 0.2 n m を超えるとき、スイッチングのための臨界電流は減少する。

10

【 0 0 8 8 】

図 1 0 は、 t_{W-N} = 0.2 n m で n の条件別電流に伴う抵抗を示す。

【 0 0 8 9 】

図 1 0 に示すように、外部磁場 H_{ex} = + 2 0 0 O e が磁気素子 2 0 0 a に x 軸方向に印加された場合、自由層 1 3 0 の決定的なスイッチングは n にかかわらず発生する。

【 0 0 9 0 】

スイッチング電流 I_{sw} は、 n が増加するにつれて減少し、スイッチング方向は、 n が変化するにつれて反時計回りに一定に維持される。

【 0 0 9 1 】

タングステン窒化物層 1 2 4 が無い W / C o F e B / M g O 構造 (n = 0 %) において、スイッチング電流 I_{sw} は、 8.58 ± 0.08 mA であり、スイッチング電流密度 J_{sw} は 33.0 MA cm²) である。スイッチング電流 I_{sw} は、 n が増加するにつれて次第に減少し、 n = 40 % から 1.49 ± 0.16 mA であり、タングステン窒化物層 1 2 4 のない構造より 5 倍小さい。

20

【 0 0 9 2 】

図 1 1 は、 t_{W-N} = 0.2 n m で n の条件別外部磁場に伴うスイッチング電流を示す。

【 0 0 9 3 】

図 1 1 に示すように、スイッチング動作の外部磁場の依存性が表示される。全ての窒素含量 n において、外部磁場 H_{ex} が増加するにつれて、スイッチング電流 I_{sw} は減少する傾向がある。外部磁場 H_{ex} 方向が + x から - x に変更されると、スイッチング方向が時計回りに変更されるが、スイッチング電流 I_{sw} はほぼ同一に維持される。この結果は、良好な電流 - 誘導 S O T スwitching動作が発生することを確認させる。また、タングステン窒化物層 1 2 4 が S O T - M R A M に適用される場合、電力消費を減少させる。

30

【 0 0 9 4 】

次に、スイッチング電流 I_{sw} の減少が | D_L | 上昇に起因する。 S O T によるスイッチング電流 I_{sw}^{SO} は、次のように表現される。

[数 6]

$$I_{sw}^{SO} = \frac{2e}{h\kappa_{SH}} M_S t_{FM} A_{NM} \left(\frac{H_{K,eff}}{2} - \frac{H_{ex}}{\sqrt{2}} \right),$$

40

【 0 0 9 5 】

ここで、 A_{NM} は、電流が注入される非磁性層 (又はスピンホール発生層) の厚さを表し、 H_K、 e_{ff} は、異方性磁場を表す。 t_{FM} は、自由層の厚さである。 M_S は、自由層の飽和磁化である。 H_{ex} は、外部磁場である。

【 0 0 9 6 】

数式 6 で、 H_{ex} は H_K、 e_{ff} に比べて小さく、 M_S H_K、 e_{ff} / 2 が有効異方性エネルギー K_u、 e_{ff} と同じであるため無視してよい。したがって、 t_{FM} 及び A_{NM} が固定されると、 S O T によるスイッチング電流 I_{sw}^{SO} は有効異方性エネルギー K_u、 e_{ff} に正比例する。

50

【0097】

タングステン窒化物層124の挿入が $K_{u,eff}$ の劣化(degradation)に影響を与えるため、我々はスイッチング電流 I_{SW} が有効異方性エネルギー $K_{u,eff}$ の減少によって影響を受ける可能性を調べる。

【0098】

図12は、 $t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}$ で n に伴う規格化されたスイッチング電流及び垂直磁気異方性を示す。

【0099】

図13は、 $n = 29\%$ で n に伴う規格化されたスイッチング電流及び垂直磁気異方性を示す。

10

【0100】

図12及び13に示すように、それぞれ n 及び t_{W-N} の関数として I_{SW} 及び $K_{u,eff}$ の正規化された値を示す。

【0101】

図12に示すように、スイッチング電流 I_{SW} と有効異方性エネルギー $K_{u,eff}$ が n の増加するにつれて減少するが、その減少率はか相当異なることを示す。 $n = 34\%$ で始まり、スイッチング電流 I_{SW} は有効異方性エネルギー $K_{u,eff}$ よりも急速に減少し始め、この差は n が増加するにつれて大きくなる。

【0102】

再び、図9に示すように、 $|D_L|$ はタングステン窒化物層124の厚さ t_{W-N} が増加するにつれて減少する。それにもかかわらず、図13に示すように、スイッチング電流 I_{SW} のタングステン窒化物層124の厚さ t_{W-N} が増加するにつれて減少する。

20

【0103】

しかし、 t_{W-N} が変わるにつれて I_{SW} の減少は n を増加させる場合と異なって、 $K_{u,eff}$ の割合とほぼ同一の傾向がある。したがって、SOT効率向上ではなく、 $K_{u,eff}$ の変化によって、 t_{W-N} が増加するにつれて I_{SW} は減少する。この結果は、 n の増加による I_{SW} の減少が向上したSOT効率及び $K_{u,eff}$ の減少によって大きく影響を受けることを表す。とても薄いタングステン窒化物層124の挿入は、SOTスイッチング効率を向上させる。したがって、窒素の原子パーセント n が約40%である薄いタングステン窒化物層124は、SOT-MRAMの電力消費の側面で相当な利点を提供する。

30

【0104】

FM/NMインタフェースで挿入されたタングステン窒化物層124の構成がSOT効率にいかなる影響を及ぼすかを議論する。向上した効率の可能な原因の一つは、不純物が存在するため電気抵抗の変化である。スピンホール効果SHEの可能な原因である真性及びサイドジャンプ散乱(Intrinsic and side-jump scattering)は、材料の比抵抗 ρ_x と関連がある。

【0105】

材料の不純物は、散乱と ρ_x 値を増加させ、 S_H を向上させることができる。我々はHall bar素子で ρ_x を測定し、 $|D_L|$ の向上がW-N層で n が増加するにつれて ρ_x が増加したためであることを証明する。

40

【0106】

図14は、 $W(5 \text{ nm}) / W N_x(t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}) / CoFeB(0.9 \text{ nm}) / MgO(1 \text{ nm}) / Ta(2 \text{ nm})$ 構造で n の関数として比抵抗 ρ_x (resistivity)を示す。

【0107】

図14に示すように、 ρ_x を $t_{W-N} = 0.2 \text{ nm}$ で n の関数で表す。 ρ_x 値は、たいていの n 値でほぼ一定であるが、 $n = 40\%$ で急速に増加する。 $n = 40\%$ で、 $|D_L|$ は最大である。この結果は、 $|D_L|$ に対する抵抗の影響を無視することはできないが、 $|D_L|$ が $W / W N_x / CoFeB / MgO$ 構造の抵抗に正確に比例しなかったことを示す。したがって、抵抗以外の他の要素がSOT効率に影響を及ぼすものと解釈される。

50

【0108】

もう一つの可能な原因は、結晶性 (crystallinity) 又は相 (phase) のようなタングステン窒化物層 124 の微細構造の影響である。この仮定を確認するために、 n が増加するにつれて W フィルムの微細構造変化を観察した。

【0109】

しかし、0.2 nm の厚さの超薄膜タングステン窒化物層の微細構造変化を分析することが非常に難しい。したがって、約 40 nm 厚さのタングステン窒化物フィルムを分析して、このような変化が超薄層 (ultrathin layer) でも発生すると仮定した。

【0110】

図 15 は、厚さ 40 nm のタングステン窒化物層の GIXRD (Grazing Incidence X-ray Diffraction) 結果を示す。 10

【0111】

図 15 に示すように、スパッタリング中に N_2 ガスが注入されなければ ($n = 0\%$)、W ピークが $2\theta = 40$ 度近くで明確に表す。ここで、我々が SOT 測定に用いた 5 nm 厚さの W フィルムは、 β -W 相 (phase) であり、40 nm 厚さの WN_x フィルムは β -W 相 (phase) である。40 nm 厚さの WN_x フィルムで、 n が 5% に増加した後、W (110) ピークは急激に減少し、線幅は広がり、ピークは左側に移動して W_2N ピークに接近する。この結果は、 n が増加するにつれて W_2N が形成し始め、W の結晶性が減少することを表す。

【0112】

次に、 n がさらに増加するにつれて、ピークの線幅はさらに広がり、ピークは次第に左側に移動して $n = 34\%$ で W_2N (111) ピークとほぼ一致する。これは、 n が 30% を超えると W 相が殆どなくなり、ナノ結晶質 W_2N 薄膜だけが存在することを表す。 20

【0113】

n が 40% を超えると、ピークは左側にさらに移動して WN (100) ピークに接近し、 $n = 42\%$ でピークがより鮮やかになって結晶性が向上することを表す。この結果は、W-N バイナリ位相ダイアグラム (binary phase diagram) と一致する。

【0114】

窒素原子の含量が増加するにつれて、段階は W $W+W_2N$ W_2N W_2N+WN の順で表れる。ここで、 W_2N はおよそ $n = 34\%$ で表れる。位相イアグラムは、実験結果とほぼ一致する。 30

【0115】

次に、タングステン窒化物フィルムの比抵抗を測定し、以前の研究で報告されたものと比較した。

【0116】

図 16 は、 n の関数として 40 nm の厚さを有するタングステン窒化物層の比抵抗を図示する。

【0117】

図 16 に示すように、点線は XRD 分析によって予測されたタングステン窒化物相変化 (phase change) の境界を示す。タングステン窒化物層の比抵抗が $n = 29\%$ になるまで、 $200 - 260 \mu \cdot cm$ で維持されるが、 $n = 30\%$ で $350 \mu \cdot cm$ 以上に急速に増加する。 40

【0118】

n が 40% を超えると、比抵抗が再び $500 \mu \cdot cm$ 以上に急激に増加する。スパッタリングされたタングステン窒化物層の抵抗は、圧力、スパッタリング電力及び温度のような蒸着条件に大きく依存する。しかし、一般的に総ガス流量 [$Ar + N_2$] に対する N_2 ガス流量 [N_2] の比 Q が増加するにつれて、比抵抗が増加する。また、結晶性が増加するにつれて非抵抗が減少する。これは我々の実験の結果と一致する。

【0119】

実験結果は、 $n = 40\%$ まで比抵抗 (resistivity) が増加した後、 $n = 42$ 50

%で決定性が増加するにつれて比抵抗が若干減少することを示す。

【0120】

ピーク強度が小さすぎてXRDを使用して位相を安定的に索引化できなかったため、XRD分析以外にも、我々はナノ結晶のように見えるため、TEMを使用して40nm厚さのタングステン窒化物層を分析する。

【0121】

図17は、 $n = 5\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。

【0122】

図17に示すように、 $n = 5\%$ のとき、多結晶グレイン(polycrystalline grains)がナノ結晶質マトリックスに表れる。

【0123】

$n = 5\%$ のとき、SADパターンは、Wと W_2N が共存することを示す。内側の点線円は、 $W_2N(111)$ グレインを表す。 $W_2N(111)$ グレインは、高速フーリエ変換イメージで $W_2N(111)$ に索引された(indexed)リングパターンにマスクを適用することによって識別される。

【0124】

多結晶グレイン(polycrystalline grains)は、 W_2N であり、窒素が注入されるときW薄膜が殆どナノ結晶(nanocrystalline)になることを表す。

【0125】

図18は、 $n = 34\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。

【0126】

図18に示すように、明確なリングパターンを有するTEM及びSADイメージは、ナノ結晶性 $W_2N(111)$ のみが $n = 34\%$ で存在することを表す。

【0127】

図19は、 $n = 42\%$ の場合、平面内のTEMイメージ(in-plane TEM images)と選択された領域回折(selected area diffraction; SAD)パターンを示す。

【0128】

図19に示すように、 $n = 42\%$ の場合、ナノ結晶質マトリックスに他のグレインが形成される。SADパターンに $WN(100)$ が表れる。したがって、XRDとTEMの結果は一致し、 WN_x 薄膜の位相が n に依存することを確認する。

【0129】

改善されたSOT効果の原因を探するために、我々はタングステン窒化物層の挿入に対する n の影響を調べた。

【0130】

図14及び図16に示すように、磁気素子の比抵抗 ρ_{xx} 値と40nm厚さのタングステン窒化物フィルムの比抵抗は若干異なる。しかし、磁気素子の比抵抗 ρ_{xx} 値と40nm厚さのタングステン窒化物フィルムの比抵抗は、いずれも $n = 40\%$ で最大値を示す。

【0131】

図14の磁気素子において、0.2nm厚さのタングステン窒化物層は、他のフィルムの総厚さに比べてとても薄い。したがって、比抵抗に対する0.2nm厚さのタングステン窒化物層の影響は支配的でない。

【0132】

また、微細構造分析を超薄膜に完全な正確度で適用することは難しいが、 n の値はタングステン窒化物層の微細構造に影響を及ぼすと予想される。

10

20

30

40

50

【0133】

相 (p h a s e) 及び結晶度 (c r y s t a l l i n i t y) の変化のような微細構造変化は非抵抗の変化を伴う。したがって、比抵抗と微細構造は別途考慮されにくい。

【0134】

タングステン窒化物層の窒素含量を調整すると、 $|D_L|$ を増加させ、 I_{SW} を減少させる。しかし、タングステン窒化物層に依存する向上したSOTスイッチング動作の物理的起源に対する追加研究が必要である。

【0135】

MRAMアプリケーションに対する W/WN_x ($t_{W-N} = 0.4 \text{ nm}$) / CoFeB / MgO構造の適合性を確認するために、低温及び高温での磁気素子温度の安定性に対して議論する。

10

【0136】

スイッチング電流の温度依存性を決定するために、次の順序で温度を変化させる $t_{W-N} = 0.4 \text{ nm}$ 及び $n = 29\%$ を有する素子で試験を行った。

(1) 室温 (RT) (2) -100 (3) RT (4) $+100$ (5) RT .

【0137】

図20は、 $+2000 \text{ e}$ の外部磁場 H_{ex} 下で様々な温度で面内電流に伴う抵抗を示す。

【0138】

図20に示すように、SOTによるスイッチングは、全ての温度で反時計回りにうまく行われる。

20

【0139】

図21は、様々な温度で外部磁場に伴うスイッチング電流を示す。

【0140】

図21に示すように、温度が(1)室温(RT)で(2) -100 に減少すると、スイッチング電流が増加する。温度が(3)室温(RT)で $+(4) 100$ に増加するとスイッチング電流が減少する。SOT-誘導スイッチング電流は、熱変動によって低温より高温で減少することが広く知られている。しかし、スイッチング電流は、(1)初期室温状態、(3)冷却後室温状態及び(5)加熱後室温状態で一定に維持される。このような結果は、素子が多様な温度の劣悪な環境で作動することができ、低温及び高温環境を経験した後にも作動電流を変更せずに正常に作動することを確認した。したがって、これは、 WN_x 層を使用する構造がSOT-MRAM応用に適することを意味する。

30

【0141】

我々は、タングステン窒化物層を有する W/WN_x / CoFeB / MgO構造のインターフェースエンジニアリングによって、SOTの向上及びSOT-誘導スイッチング電流の減少を調査した。タングステン窒化物層の窒素含量が40%に増加したとき、我々は0.54の高いSOT効率と $W/CoFeB/MgO$ 構造の値の約1/5でスイッチング電流の減少を観察した。

【0142】

XRD及びTEMを通じて多様な窒素含量を有するフィルムの微細構造を分析した。結果は、SOT向上がタングステン窒化物層の組成に依存する比抵抗だけでなく、微細構造変化(タングステンが W_2N 及び WN 上に変化するとき)によって引き起こされることを突き止めた。

40

【0143】

図22は、本発明の一実施例による $W(5 \text{ nm}) / WN_x(t_{W-N}; n) / CoFeB(0.9 \text{ nm}) / MgO(1 \text{ nm}) / Ta(2 \text{ nm})$ 構造における窒素の含量 n と WN_x 層の厚さに伴う実験結果を示す。

【0144】

図22に示すように、PMAは垂直磁気異方性を表し、IMAは面内異方性を表す。 WN_x 層において原子パーセント(atomic percent)は、2%ないし29%であ

50

り、前記WN層の厚さは0.2 nmないし0.8 nmである。この場合、前記自由層(CoFeB(0.9 nm))は、垂直磁気異方性を維持する。

【0145】

前記WN_x層において窒素の原子パーセント(atomic percent)は、2%ないし5%であり、前記WN_x層の厚さは0.2 nmないし3 nmである。この場合、前記(CoFeB(0.9 nm))は、垂直磁気異方性を維持する。

【0146】

前記WN_x層は結晶質W₂N(111)相を含むか、又は、前記WN_x層は結晶質W₂N(111)相及び結晶質WN(100)相を含む。この場合、前記自由層(CoFeB(0.9 nm))は、垂直磁気異方性を維持する。

10

【0147】

一方、タングステン層がなく、5 nmのWN_x層のみある磁気素子の場合、窒素の含量nが2%ないし5%でのみ、自由層は垂直磁気異方性を表す。

【0148】

図23は、本発明のもう一つの実施例による磁気素子を示す断面図である。

【0149】

図23に示すように、磁気素子300は、固定された磁化方向を有する固定層150と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層130と、前記固定層と前記自由層との間に介在されるトンネル絶縁層140と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピントルクを注入するスピントルク発生層320と、前記自由層と前記スピントルク発生層との間に配置されたタングステン-窒化物層324と、を含む。前記スピントルクによって前記自由層130の磁化方向をスイッチングする。前記固定層150及び前記自由層130は、垂直磁気異方性を有し、前記スピントルク発生層320は、タングステン層を含み、前記タングステン-窒化物層324は、前記自由層と垂直に整列される。

20

【0150】

前記タングステン-窒化物層324の厚さと組成に応じてスイッチング電流が変化される。また、前記タングステン-窒化物層324の厚さと組成に応じて、前記自由層の磁化特性が変更される。すなわち、タングステン-窒化物層324の厚さと組成は、所定の範囲内で前記自由層130に垂直磁化異方性特性を提供する。前記自由層140が垂直磁気異方性を発現する場合、タングステン-窒化物層324の厚さが減少し、窒素の濃度が増加するにつれてスイッチング電流が減少する。

30

【0151】

具体的に、前記タングステン-窒化物層324の厚さは、0.2 nmであり、前記タングステン-窒化物層324において窒素の原子パーセント(atomic percent)が5%ないし42%である。この場合、前記自由層130は垂直磁気異方性を維持しつつ、窒素の原子パーセント(atomic percent)が増加するにつれてスイッチング電流が減少する。一方、窒素の原子パーセント(atomic percent)が42%を超える場合、前記自由層130は垂直磁気異方性を消失し、面内磁気異方性を有する。

【0152】

前記タングステン-窒化物層324において窒素の原子パーセント(atomic percent)は2%ないし29%であり、前記タングステン-窒化物層324の厚さは0.2 nmないし0.8 nmである。この場合、前記自由層130は、垂直磁気異方性を維持する。

40

【0153】

前記タングステン-窒化物層324において窒素の原子パーセント(atomic percent)は2%ないし5%であり、前記タングステン-窒化物層の厚さは0.2 nmないし3 nmである。この場合、前記自由層130は、垂直磁気異方性を維持する。

【0154】

前記タングステン-窒化物層324は、結晶質W₂N(111)相(phase)を含み、又は前記タングステン-窒化物層324は結晶質W₂N(111)相及び結晶質WN(

50

1 0 0) 相を含む。この場合、前記自由層 1 3 0 は、垂直磁気異方性を維持する。

【 0 1 5 5 】

スピントルク発生層 3 2 0 の両端は、面内電流を印加する外部回路に連結される。

【 0 1 5 6 】

図 2 4 は、本発明のもう一つの実施例による磁気素子を示す断面図である。

【 0 1 5 7 】

図 2 4 に示すように、磁気素子 (4 0 0) は、固定された磁化方向を有する固定層 1 5 0 と、スイッチングされる磁化方向を有する自由層 1 3 0 と、前記固定層と前記自由層との間に介在されるトンネル絶縁層 1 4 0 と、面内電流が流れるにつれて前記自由層にスピ
ン電流を注入するスピントルク発生層 4 2 0 と、を含む。前記スピ
ン電流は、スピ
ン軌道トルクによって前記自由層 1 3 0 の磁化方向をスイッチングする。前記固定層 1 5 0 及び前記自由層 1 3 0 は、垂直磁気異方性を有し、前記スピ
ントルク発生層 4 2 0 は順次積層されたタングステン層 1 2 2 及びタングステン - 窒化物層 1 2 4 を含む。前記タングステン - 窒化物層 1 2 4 は、前記自由層 1 3 0 に隣接して配置される。

10

【 0 1 5 8 】

前記スピ
ントルク発生層 4 2 0 は、面内磁気異方性を有する強磁性層 4 2 1 をさらに含む。前記タングステン層 1 2 2 は、前記強磁性層 4 2 1 と前記タングステン - 窒化物層 1 2 4 との間に配置される。前記強磁性層 4 2 1 の磁化方向は、前記面内電流が流れる方向と平行又は反平行である。前記強磁性層と前記タングステン層との間で界面発生スピ
ン電流が生成される。前記界面発生スピ
ン電流は、z 軸成分のスピ
ン分極を有する。これに応じ
て、面内外磁場なしでスピ
ン - 軌道トルクスイッチングが実現できる。

20

【 0 1 5 9 】

スピ
ントルク発生層 4 2 0 の両端は、接続電極 1 2 0 a、1 2 0 b を介して面内電流を印加する外部回路に連結される。

【 0 1 6 0 】

以上、本発明を特定の好ましい実施例に対して図示して説明したが、本発明はこのような実施例に限らず、当該発明の属する技術分野における通常の知識を有する者が特許請求範囲で請求する本発明の技術的思想を逸脱しない範囲内で実施できる様々な形態の実施例を全て含む。

【 符号の説明 】

30

【 0 1 6 1 】

1 0 0 : 磁気素子

1 2 0 : スピ
ントルク発生層

1 2 2 : タングステン層

1 2 4 : タングステン - 窒化物層

1 3 0 : 自由層

1 4 0 : トンネル絶縁層

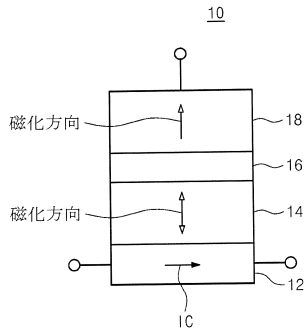
1 5 0 : 固定層

40

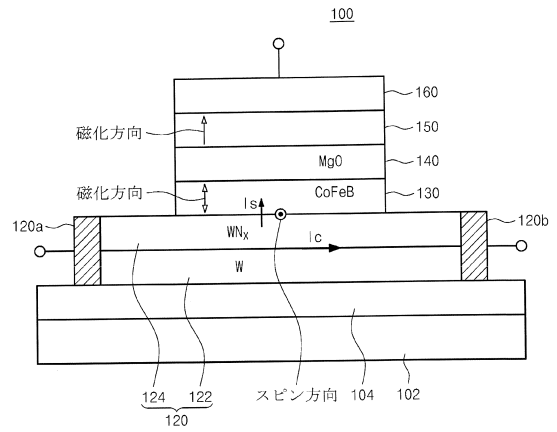
50

【図面】

【図 1】

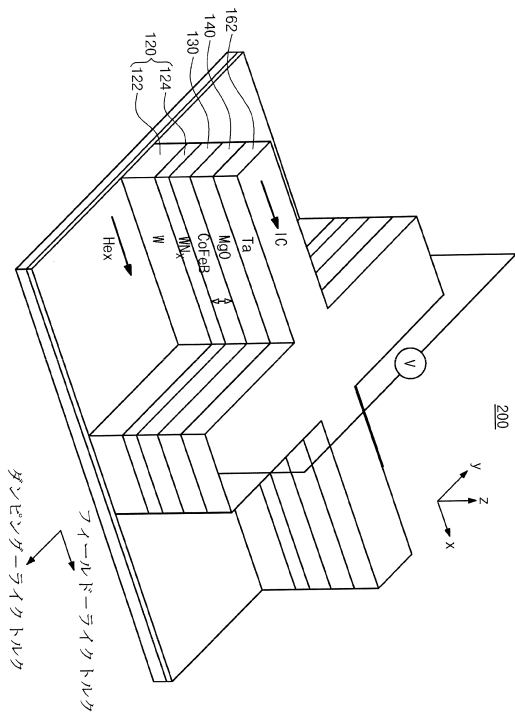


【図 2】

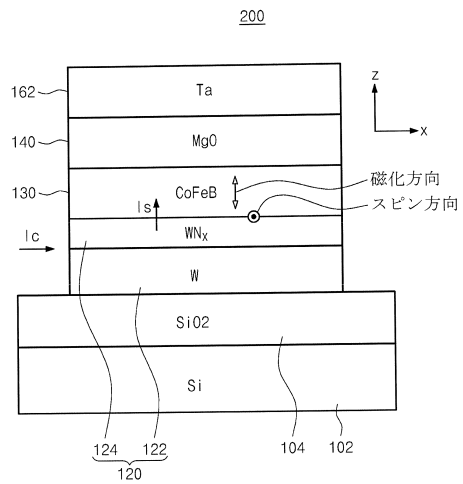


10

【図 3 A】



【図 3 B】



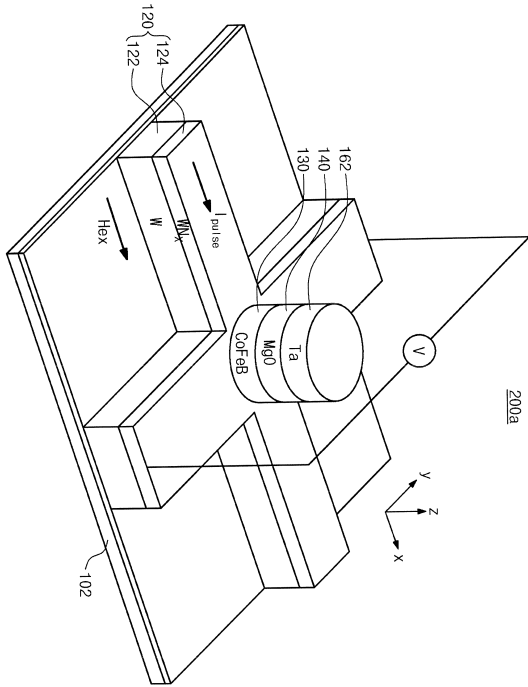
20

30

40

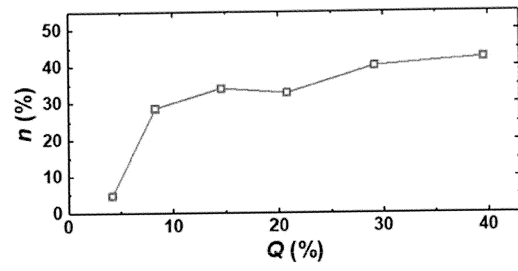
50

【 4 】



【 5 】

W(5nm)/WN_x(t_{W-N} =0.2 nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)

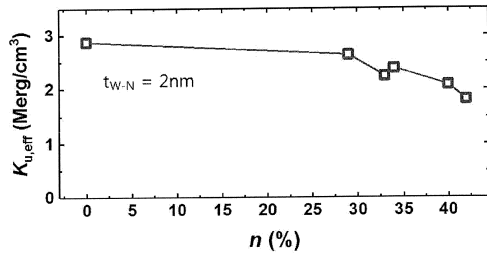


10

20

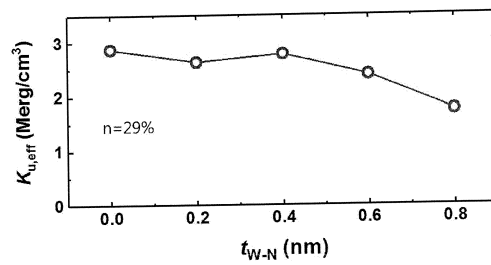
【 6 】

W(5nm)/WN_x(t_{W-N} =0.2 nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)



【 7 】

W(5nm)/WN_x(n =29%)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2nm)

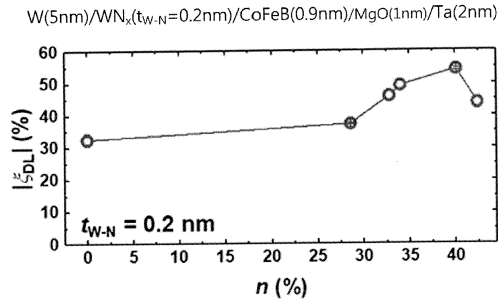


30

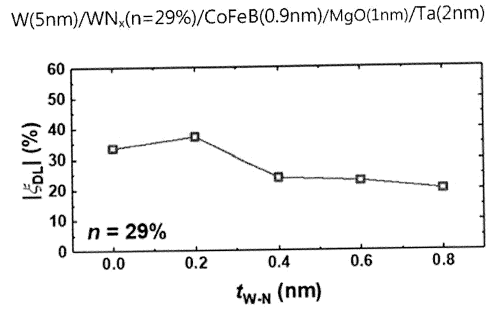
40

50

【 8 】

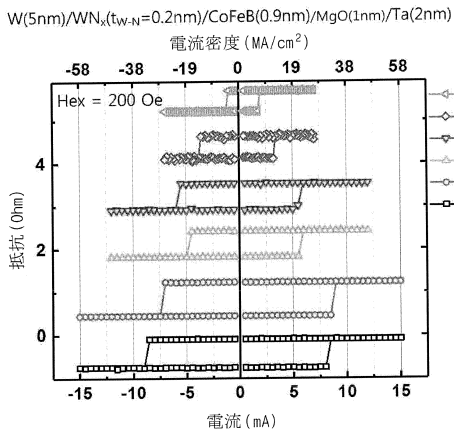


【 9 】

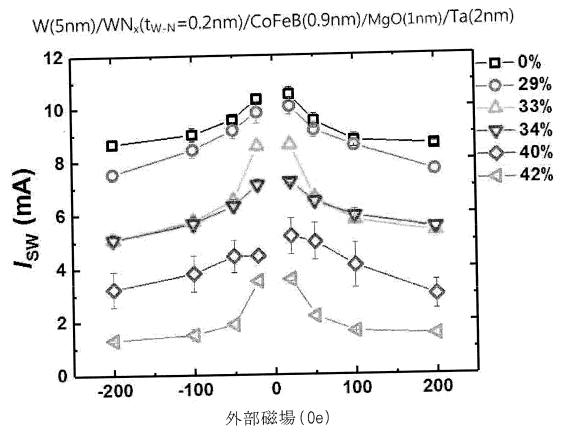


10

【 10 】

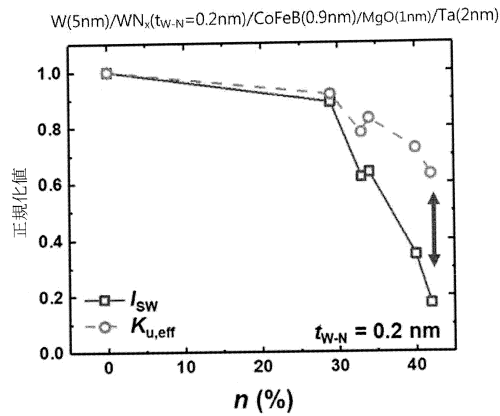


【 11 】

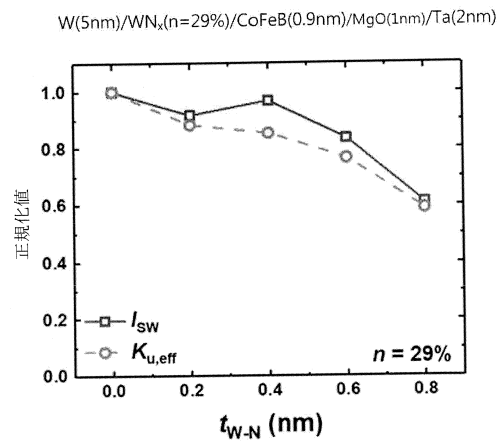


20

【 12 】



【 13 】

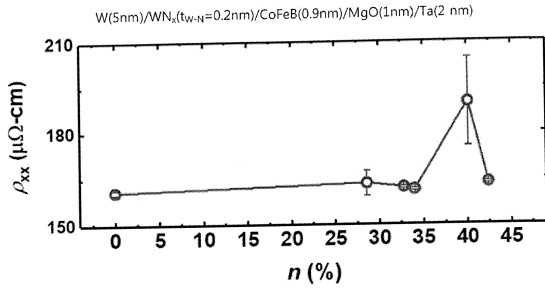


30

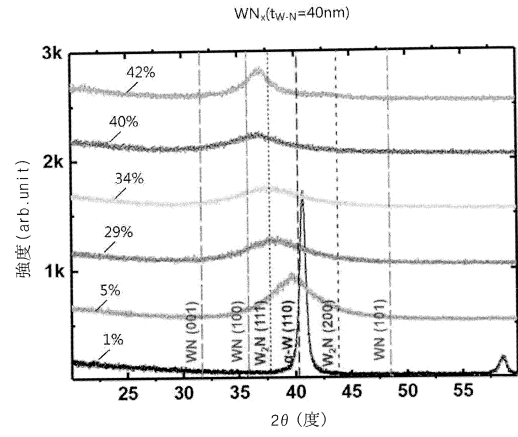
40

50

【 図 1 4 】

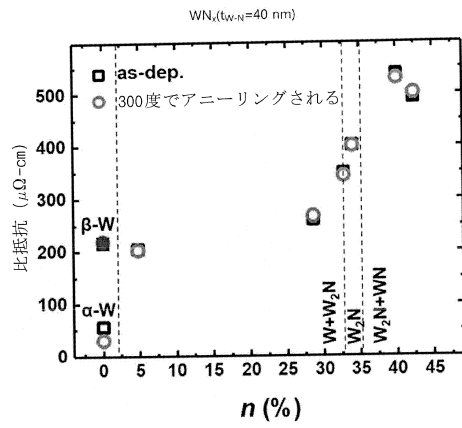


【 図 1 5 】

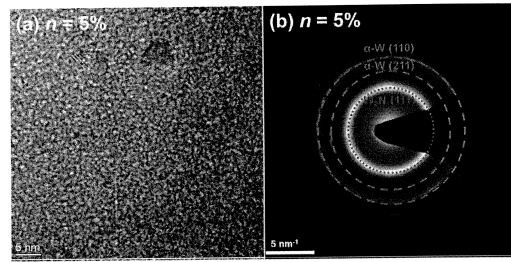


10

【 図 1 6 】

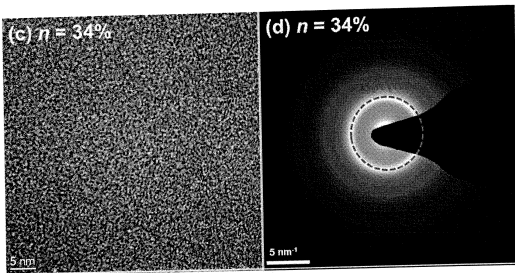


【 図 1 7 】

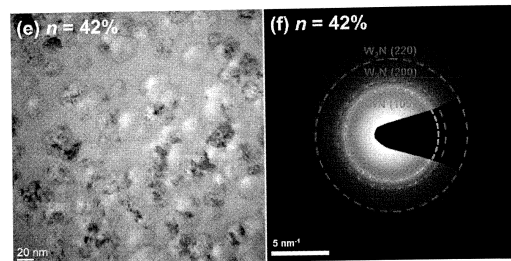


20

【 図 1 8 】



【 図 1 9 】



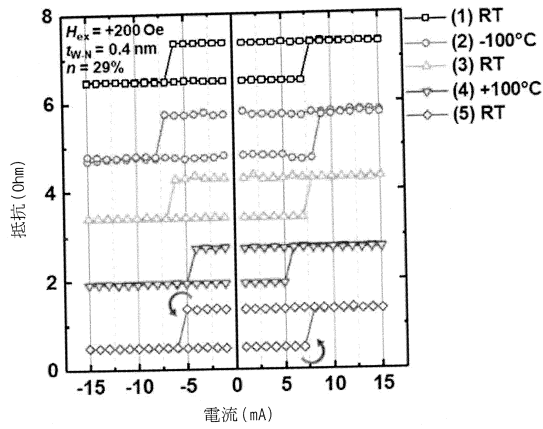
30

40

50

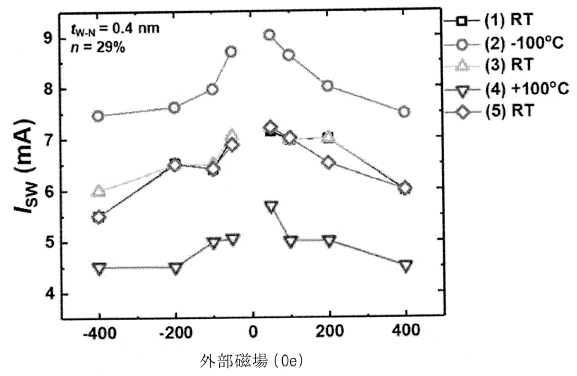
【圖 2 0】

W(5nm)/WN_x(t_{W-N}=0.4nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2 nm)



【圖 2 1】

W(5nm)/WN_x(t_{W-N}=0.4nm)/CoFeB(0.9nm)/MgO(1nm)/Ta(2 nm)

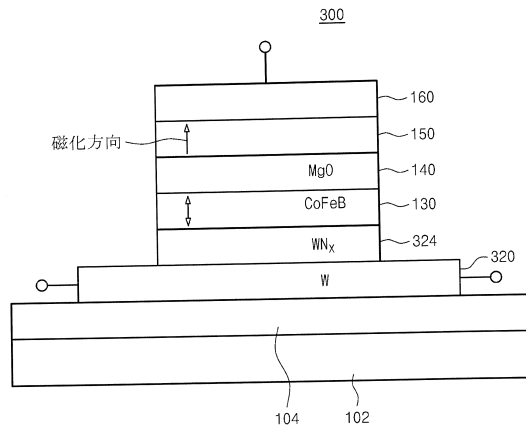


10

【圖 2 2】

n	t _{W-N}	W/WN _x (t _{W-N} =n)/CoFeB/Ta									
		0.2 nm	0.4 nm	0.6 nm	0.8 nm	1.0 nm	1.5 nm	2.0 nm	3.0 nm	5.0 nm (no W)	
2%		PMA									PMA
5%		PMA	PMA								PMA
29%		PMA	PMA	PMA							PMA
35%		PMA	IMA	IMA	IMA						IMA
34%		PMA									
40%		PMA									
42%		PMA									
42% 超過		IMA	IMA								IMA

【圖 2 3】




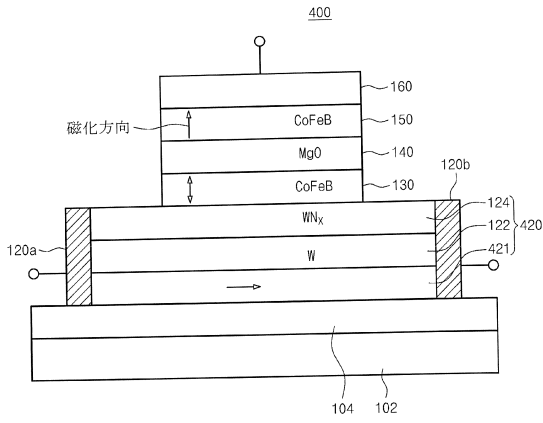
20

30

40

50

【 2 4】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

- 弁理士 三好 玲奈
(74)代理人 100191086
弁理士 高橋 香元
(72)発明者 キム, ヨン グン
大韓民国, ソウル 06009, カンナム - グ, アプグジョン - ロ 61 - ギル, 37, 72 - 1109
(72)発明者 キム, ヨン ジン
大韓民国, ソウル 06093, カンナム - グ, ソウルン - ロ 120 - ギル, 4 - 3, 402
(72)発明者 イ, ミン ヒョク
大韓民国, キョンサンナム - ド 50653, ヤンサン - シ, ヤリ - ロ ムルグム - ウプ, 76, 206 - 1101
審査官 宮本 博司
(56)参考文献 特開2017 - 059594 (JP, A)
特開2019 - 110326 (JP, A)
特開2016 - 046492 (JP, A)
特開2017 - 059679 (JP, A)
国際公開第2019 / 187674 (WO, A1)
特開2017 - 059634 (JP, A)
特開2020 - 035975 (JP, A)
中国特許出願公開第108232010 (CN, A)
(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 29 / 82
H10B 61 / 00
H10N 50 / 10
H01F 10 / 30