

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7055480号

(P7055480)

(45)発行日 令和4年4月18日(2022.4.18)

(24)登録日 令和4年4月8日(2022.4.8)

(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 0 1 L 43/08 (2006.01)

H 0 1 L 43/08

Z

請求項の数 12 (全20頁)

(21)出願番号	特願2020-541866(P2020-541866)	(73)特許権者	510273880
(86)(22)出願日	平成30年6月29日(2018.6.29)		コリア ユニバーシティ リサーチ アンド
(65)公表番号	特表2021-513220(P2021-513220		ビジネス ファウンデーション
	A)		KOREA UNIVERSITY RE
(43)公表日	令和3年5月20日(2021.5.20)		SEARCH AND BUSINESS
(86)国際出願番号	PCT/KR2018/007449		FOUNDATION
(87)国際公開番号	WO2019/177204		大韓民国、0 2 8 4 1 ソウル、ソンプ
(87)国際公開日	令和1年9月19日(2019.9.19)		ク - グ、アナム - ロ 1 4 5
審査請求日	令和2年7月31日(2020.7.31)	(74)代理人	100114775
(31)優先権主張番号	10-2018-0030023		弁理士 高岡 亮一
(32)優先日	平成30年3月15日(2018.3.15)	(74)代理人	100121511
(33)優先権主張国・地域又は機関	韓国(KR)		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】 低電力テラヘルツ磁気ナノ発振素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板上に配置された強磁性層と、
前記強磁性層上に積層された非磁性導電層と、
前記非磁性導電層上に積層された反強磁性層と、
前記強磁性層と前記非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第1、第2電極と、を含み、
前記反強磁性層は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、
前記強磁性層は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化され、
前記第1、第2電極を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、
前記反強磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記反強磁性層の副格子の磁化歳差運動を発生させることを特徴とする磁気ナノ発振素子。

【請求項2】

前記反強磁性層上に配置された磁気トンネル接合をさらに含み、
前記磁気トンネル接合は、自由層/トンネル絶縁層/固定層を含み、
前記磁気トンネル接合の前記自由層は、前記反強磁性層と交換相互作用することを特徴とする請求項1に記載の磁気ナノ発振素子。

【請求項3】

前記強磁性層は、Fe、Co、Ni、B、Si、Zr及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項1に記載のナノ発振素子。

【請求項 4】

前記反強磁性層は、I r、P t、M n、C r、F e M n、N i O、F e₂O₃ 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項 1 に記載のナノ発振素子。

【請求項 5】

前記非磁性導電層は、C u、T a、P t、W、T i、B i 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項 1 に記載のナノ発振素子。

【請求項 6】

前記第 1、第 2 電極は、C u、T a、P t、W、T i、B i、I r 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項 1 に記載のナノ発振素子。

10

【請求項 7】

基板上に配置された強磁性層と、
前記強磁性層上に積層された非磁性導電層と、
前記非磁性導電層上に積層されたフェリ磁性層と、
前記強磁性層と前記非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極と、を含み、
前記フェリ磁性層は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、
前記強磁性層は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化され、
前記第 1、第 2 電極を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、
前記フェリ磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記
フェリ磁性層の副格子の磁化歳差運動を発生させることを特徴とする磁気ナノ発振素子。

20

【請求項 8】

前記フェリ磁性層上に配置された磁気トンネル接合をさらに含み、
前記磁気トンネル接合は、自由層 / トンネル絶縁層 / 固定層を含み、
前記磁気トンネル接合の前記自由層は、前記フェリ磁性層と交換相互作用することを特徴とする請求項 7 に記載の磁気ナノ発振素子。

【請求項 9】

前記フェリ磁性層は、C o、G d、T b、M n、I r、G e、S e、C r、Y、F e、柘榴石、希土類—遷移金属 (R E - T M) 合金及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項 7 に記載のナノ発振素子。

30

【請求項 10】

基板上に配置された第 1 強磁性層と、
前記第 1 強磁性層に配置された第 1 非磁性導電層と、
前記第 1 非磁性導電層上に配置された第 2 強磁性層と、
前記第 2 強磁性層上に配置された第 2 非磁性導電層と、
前記第 2 非磁性導電層上に配置された第 3 強磁性層と、
前記第 1 強磁性層と前記第 1 非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極と、を含み、
前記第 1 強磁性層は、固定磁化方向を有し、膜面に対して平行な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、
前記第 2 強磁性層と前記第 3 強磁性層は、前記第 2 非磁性導電層によって反強磁性交換相互作用する薄膜であり、
前記第 1、第 2 電極を通じて、前記第 1 強磁性層と前記第 1 非磁性導電層に注入された面内電流は、前記第 2 強磁性層と前記第 3 強磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを
含むスピン電流を提供して前記第 2 強磁性層と前記第 3 強磁性層の磁化歳差運動をそれぞれ発生させることを特徴とする磁気ナノ発振素子。

40

【請求項 11】

前記第 3 強磁性層上に配置された磁気トンネル接合をさらに含み、
前記磁気トンネル接合は、トンネル絶縁層 / 固定層を含むことを特徴とする請求項 10 に記載の磁気ナノ発振素子。

50

【請求項 12】

前記第 1 強磁性層、前記第 2 強磁性層、及び前記第 3 強磁性層は、Fe、Co、Ni、B、Si、Zr 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなり、

前記第 1 非磁性導電層は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなり、

前記第 2 非磁性導電層は、Ru、Ta、Rh、Ir、Cr、Re、Mo、W、V 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなることを特徴とする請求項 10 に記載のナノ発振素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

10

【0001】

本発明は、低電力テラヘルツ (THz) ナノ発振素子に関するものとして、より詳細には、強磁性層 / 非磁性層積層構造に面内電流を印可して隣接する反強磁性層 (又はフェリ磁性層) の副格子 (sub-lattice) 磁化の歳差運動を発生させるナノ発振素子に関する。

【背景技術】

【0002】

図 1 は、通常の磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【0003】

図 1 に示すように、磁気ナノ発振素子 100 は、導線 120 に流れる面内電流によって発生するスピンホールスピントルクと反強磁性体 130 を用いる。磁気ナノ発振素子 100 は導線 120 / 反強磁性層 130 を含み、反強磁性層 130 の歳差運動 (precession motion) は導線 120 に面内方向に流れる電流によって誘導される。導線 120 に存在するスピン軌道結合 (spin-orbit coupling) を通じてアップスピンとダウンスピンの電子は互いに反対方向に偏極される。これによって、外部から加わる電流方向 (x 方向) に垂直な z 方向にスピン電流が発生する。このとき、スピン電流が伝達するスピンは、外部電流方向 (x 方向) 及びスピン電流方向 (y 方向) のいずれにも垂直な y 方向の成分を有する。このスピン成分が隣接する強磁性体に流れ込むと、前記強磁性体はスピン伝達トルクを受ける。このようなトルクをスピンホールスピントルク (spin Hall spin torque) という。

20

30

【0004】

しかし、スピンホールスピントルクと反強磁性体を用いたナノ発振素子は、非常に大きい電流密度を必要とする。また、振動数の調整性に限界がある。これを克服するために低い電流密度でも発振するナノ発振素子が求められる。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

本発明が解決しようとする技術的課題は、磁気発振のために求められる電流を低減することである。このために、強磁性層 / 非磁性層構造を有する導線が導入される。強磁性層 / 非磁性層 / 反強磁性層 (又はフェリ磁性層) を有するナノ発振素子を用いると、低い電流密度と振動数の調整性 (frequency tunability) を向上させることができる。

40

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子は、基板上に配置された強磁性層と、前記強磁性層上に積層された非磁性導電層と、前記非磁性導電層上に積層された反強磁性層と、前記強磁性層と前記非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極と、を含む。前記反強磁性層は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、前記強磁性層は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化され、前記第 1、第 2 電極を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、前記反強磁性層

50

に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記反強磁性層の副格子の磁化歳差運動を発生させる。

【0007】

本発明の一実施例において、前記反強磁性層上に配置された磁気トンネル接合 (magnetic tunnel junction) をさらに含み、前記磁気トンネル接合は、自由層 / トンネル絶縁層 / 固定層を含み、前記磁気トンネル接合の前記自由層は、前記反強磁性層と交換相互作用する。

【0008】

本発明の一実施例において、前記強磁性層は、Fe、Co、Ni、B、Si、Zr及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

10

【0009】

本発明の一実施例において、前記反強磁性層は、Ir、Pt、Mn、Cr、FeMn、NiO、Fe₂O₃及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【0010】

本発明の一実施例において、前記非磁性導電層は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【0011】

本発明の実施例において、前記第1、第2電極は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi、Ir及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【0012】

本発明の一実施例によるナノ発振素子は、基板上に配置された強磁性層と、前記強磁性層上に積層された非磁性導電層と、前記非磁性導電層上に積層されたフェリ磁性層と、前記強磁性層と前記非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第1、第2電極と、を含む。前記フェリ磁性層は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、前記強磁性層は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化され、前記第1、第2電極を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、前記フェリ磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記フェリ磁性層の副格子の磁化歳差運動を発生させる。

20

【0013】

本発明の一実施例において、前記反強磁性層上に配置された磁気トンネル接合をさらに含み、前記磁気トンネル接合は、自由層 / トンネル絶縁層 / 固定層を含み、前記磁気トンネル接合の前記自由層は、前記反強磁性層と交換相互作用する。

30

【0014】

本発明の実施例において、前記フェリ磁性層は、Co、Gd、Tb、Mn、Ir、Ge、Se、Cr、Y、Fe、希土類—遷移金属 (RE-TM) 合金及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【0015】

本発明の一実施例によるナノ発振素子は、基板上に配置された第1強磁性層と、前記第1強磁性層に配置された第1非磁性導電層と、前記第1非磁性導電層上に配置された第2強磁性層と、前記第2強磁性層上に配置された第2非磁性導電層と、前記第2非磁性導電層上に配置された第3強磁性層と、前記第1強磁性層と前記第1非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第1、第2電極と、を含む。前記第1強磁性層は、固定磁化方向を有し、膜面に対して平行な方向に磁化される物質からなる薄膜である。前記第2強磁性層と前記第3強磁性層は、前記第2非磁性導電層によって反強磁性交換相互作用 (antiferromagnetic exchange interaction) する薄膜である。前記第1、第2電極を通じて、前記第1強磁性層と前記第1非磁性導電層に注入された面内電流は、前記第2強磁性層と前記第3強磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記第2強磁性層と前記第3強磁性層の磁化歳差運動をそれぞれ発生させる。

40

【0016】

50

本発明の一実施例において、前記第3強磁性層上に配置された磁気トンネル接合をさらに含み、前記磁気トンネル接合は、トンネル絶縁層/固定層を含む。

【0017】

本発明の一実施例において、前記第1強磁性層、前記第2強磁性層、及び前記第3強磁性層は、Fe、Co、Ni、B、Si、Zr及びこれらの混合物の中から選択される物質からなり、前記第1非磁性導電層は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi及びこれらの混合物の中から選択される物質からなり、前記第2非磁性導電層は、Ru、Ta、Rh、Ir、Cr、Re、Mo、W、V及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【発明の効果】

【0018】

本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子は、面内電流が強磁性層と非磁性層を通りながら強磁性層と非磁性層との間の界面でスピン偏極されて生じるスピン電流(spin-polarized spin current)を生成し、スピン電流は反強磁性層(又はフェリ磁性層)に界面スピン軌道トルク(interfacial spin-orbit torque)を伝達し、前記界面スピン軌道トルク(interfacial spin-torque)は反強磁性層(フェリ磁性層)の副格子の磁化歳差運動を誘導する。

【0019】

本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子は、反強磁性層(又はフェリ磁性層)の副格子の磁化歳差運動を誘導することによって臨界電流密度を低下させ、振動数の調整性を向上させることができる。

【0020】

本発明による磁気ナノ発振素子は、強磁性層、非磁性層、反強磁性交換相互作用をしている層を含み、前記強磁性層は、固定磁化方向を有し、膜面に対して平行な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、強磁性層と非磁性層の界面で発生するスピン電流によって反強磁性交換相互作用をしている層の磁化歳差運動が誘導されることを特徴とする。

【図面の簡単な説明】

【0021】

【図1】通常の磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【図2】本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【図3】図2の磁気ナノ発振素子の発振を説明する斜視図である。

【図4】本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子200において、反強磁性層(又はフェリ磁性層)の規格化した磁化(normalized magnetization、N)の軌跡を示すシミュレーション結果である。

【図5】図4の磁気ナノ発振素子200において、印加電流に対するz方向のスピンを伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

【図6】図4の磁気ナノ発振素子200において、電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【図7】本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子の概念図である。

【図8】図7の磁気ナノ発振素子の発振を説明する斜視図である。

【図9】印加電流に対するz方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

【図10】電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【図11】本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【図12】図11の磁気ナノ発振素子200aにおいて、印加電流に対するz方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

【図13】図11の磁気ナノ発振素子200aにおいて、電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【図14】本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子の概念図である。

【発明を実施するための形態】

【0022】

10

20

30

40

50

強磁性体は、外部から強い磁場を印可しなくても、自発的に磁化 (s p o n t a n e o u s m a g n e t i z a t i o n) している物質をいう。強磁性体の共鳴振動数は、磁気異方性磁場 (m a g n e t i c a n i s o t r o p y f i e l d) によって決まり、この時の振動数 f は数式 1 で表される。

【数 1】

[数 1]

$$f = \gamma B_k / 2\pi$$

10

前記数式 1 において、 $\gamma = 2 \times 10^{11} \text{ T}^{-1} \text{ s}^{-1}$ は磁気回転定数 (g y r o m a g n e t i c r a t i o)、 B_k は強磁性体の磁気異方性磁場を意味する。一般的な強磁性体における磁気異方性磁場の大きさは、1 T 程度である。したがって、強磁性体を用いたナノ発振素子の振動数は、数十ギガヘルツ (G H z) に制限される。

【0023】

2つの強磁性体の間に非磁性体を挿入したスピンバルブ構造 (第 1 磁性体 / 非磁性体 / 第 2 磁性体)、あるいは2つの強磁性体の間に絶縁体を挿入した磁気トンネル接合構造 (第 1 磁性体 / 絶縁体 / 第 2 磁性体) から垂直 (厚さ) 方向に電流を印加すると、第 1 磁性体 (固定磁性層) によってスピン分極された電流が第 2 磁性体 (自由磁性層) を通過しながら、それ自身のスピン角運動量 (s p i n - a n g u l a r m o m e n t u m) を伝達する。このようなスピン角運動量の伝達によって磁化が感じるトルクをスピン伝達トルク (S p i n - t r a n s f e r - t o r q u e) という。スピン伝達トルクを用いて自由磁性層の磁化を反転させ、又は磁化を持続的に回転させる磁化歳差運動を可能にする。しかし、強磁性体を用いた磁気ナノ発振素子は、低い動作振動数 (l o w o p e r a t i n g f r e q u e n c y) を有するという限界がある。

20

【0024】

反強磁性体 (a n t i f e r r o m a g n e t i c m a t e r i a l) は原子単位で隣接する磁気モーメント (M a g n e t i c m o m e n t) が互いに反対方向を維持しようとする反強磁性交換相互作用 (A n t i - f e r r o m a g n e t i c e x c h a n g i n t e r a c t i o n) のある物質をいう。また、反強磁性体は隣接する磁気モーメントの大きさが同じ物質をいう。

30

【0025】

フェリ磁性体 (f e r r i m a g n e t i c m a t e r i a l) は隣接する磁気モーメントの大きさ又は方向が異なる物質をいう。一部のフェリ磁性体は隣接する2つの磁気モーメント間に反強磁性交換相互作用が存在し、したがって反強磁性体と同様に隣接する磁気モーメントの方向が互いに反対方向であるか又は反対に近い方向を有する。本発明において、フェリ磁性体はこのように反強磁性の特性を有するフェリ磁性体を意味する。

【0026】

原子単位において、磁気モーメントが反強磁性の状態で結合していると、共鳴振動数は数式 2 で表される。

40

【数 2】

[数 2]

$$f = \gamma (B_k B_{ex})^{1/2} / 2\pi$$

前記数式 2 において、 B_{ex} は反強磁性 (フェリ磁性) 体の反強磁性交換磁場 (a n t i - f e r r o m a g n e t i c e x c h a n g e f i e l d) を意味する。磁気異方性

50

磁場が 1 T 程度である反面、反強磁性交換磁場は 1 0 0 T ないし 1 0 0 0 T 程度である。したがって、反強磁性（フェリ磁性）体を用いたナノ発振素子の振動数は、数テラヘルツ（THz）領域を有する。

【0027】

現在、電磁スペクトルで振動数が数十 GHz 以下の領域で、発振は電子素子を用いて行われる。数十 THz 以上の領域で、発振は光学素子を用いて行われる。しかし、0.1 ~ 1 0 THz 領域で信号の生成、感知、調節する適切な素子を見出すことができない。0.1 ~ 1 0 THz 領域の信号は人体に無害であり、物質によって THz 信号の透過率などの特性が異なって高い物質選択性（material selectivity）を有し、多くの分子の共鳴振動数に相応する。したがって、0.1 ~ 1 0 THz 領域の信号は分子スペクトル分析に使用する。したがって、共鳴振動数が 0.1 ~ 1 0 THz 領域に該当する反強磁性層（又はフェリ磁性層）を備える磁気発振素子は、低い電流密度と振動数の調整性を向上させる必要がある。

10

【0028】

本発明の一実施例によるナノ発振素子は、順次に積層された強磁性層 / 非磁性導電層 / 反強磁性層（又はフェリ磁性層）を含む。反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子の磁化歳差運動は、強磁性層と非磁性導電層を通じて面内方向に流れる電流によって誘導される。ここで反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子の磁化方向は、面内平行な方向又は面内方向に垂直な方向に整列されている。強磁性層と非磁性導電層の界面で発生したスピン電流は、反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子の磁化歳差運動を誘導する。

20

【0029】

本発明の一実施例によるナノ発振素子は、順次に積層された第 1 強磁性層 / 第 1 非磁性導電層 / 第 2 強磁性層 / 第 2 非磁性導電層 / 第 3 強磁性層を含む。第 2 強磁性層と第 3 強磁性層は、中間の第 2 非磁性導電層による反強磁性交換相互作用を通じて互いに反平行（anti-parallel）な磁化方向を有する構造である。第 1 強磁性層と第 1 非磁性導電層の界面で発生したスピン電流によって、反強磁性交換相互作用をしている第 2 強磁性層と第 3 強磁性層の磁化歳差運動を誘導する。

【0030】

以下、好ましい実施例を挙げ、本発明をさらに詳細に説明する。しかし、この実施例は、本発明をより具体的に説明するためのもので、実験条件、物質の種類などによって本発明が制限又は限定されないことは、当業界の通常の知識を有する者にとって自明である。

30

【0031】

図 2 は、本発明の一実施例による磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【0032】

図 3 は、図 2 の磁気ナノ発振素子の発振を説明する斜視図である。

【0033】

図 2 及び図 3 に示すように、磁気ナノ発振素子 2 0 0 は基板 2 0 2 上に順次に積層された強磁性層 2 1 0、非磁性導電層 2 2 0、及び反強磁性層 2 3 0 を含む。前記強磁性層 2 1 0 と前記非磁性層 2 2 0 の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極 2 4 0 a、2 4 0 b は、面内電流 I を提供する。面内電流 I は、前記強磁性層 2 1 0 と前記非磁性層 2 2 0 の界面スピン軌道結合によって、前記反強磁性層 2 3 0 に厚さ方向に分極したスピン σ_z を含むスピン電流 J_s を提供する。前記強磁性層 2 1 0 は固定磁化方向を有し、膜面に対して平行な方向に磁化される物質から成る薄膜である。前記反強磁性層 2 3 0 の副格子は固定された磁化方向を有する。前記反強磁性層 2 3 0 は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜である。前記強磁性層 2 1 0 は前記強磁性層 2 1 0 の膜面に水平な方向に磁化される。前記第 1、第 2 電極 2 4 0 a、2 4 0 b を通じて前記強磁性層 2 1 0 と前記非磁性導電層 2 2 0 に注入された面内電流は、前記反強磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流 J_s を提供して前記反強磁性層 2 3 0 の副格子の磁化歳差運動を発生させる。

40

【0034】

50

スピン電流 J_S は、強磁性体 / 非磁性体界面効果 (i n t e r f a c i a l e f f e c t) によって発生し、前記スピン電流は y 方向と z 方向のスピン方向を同時に有する。

【 0 0 3 5 】

前記スピン電流 J_S のスピンによって発生する界面スピン軌道トルク (i n t e r f a c i a l s p i n o r b i t t o r q u e) は、反強磁性層 (又はフェリ磁性層) の磁化を歳差運動させる。

【 0 0 3 6 】

反強磁性層 2 3 0 はフェリ磁性層で代替される。前記反強磁性層 (又はフェリ磁性層) で副格子 (s u b l a t t i c e) の磁化歳差運動は、強磁性層 2 1 0 と非磁性導電層 2 2 0 を通じて面内方向に流れる電流によって誘導される。強磁性層 2 1 0 の磁化方向は、 $+x$ 方向に整列されている。電流は強磁性層 2 1 0 と非磁性導電層 2 2 0 を通じて流れるようになり、界面に存在する界面スピン軌道結合によって反強磁性層 (又はフェリ磁性層) にスピン電流が流れるようになる。

【 0 0 3 7 】

電流が強磁性層 2 1 0 と非磁性導電層 2 2 0 を通じて流れる場合、膜面に平行な磁化を有する強磁性層 2 1 0 / 非磁性導電層 2 2 0 構造において、スピン軌道結合によって y 方向 σ_y 、 z 方向 σ_z のスピンを有し、厚さ方向 (z 方向) に流れるスピン電流 J_S が発生する。このスピン電流が反強磁性層 (又はフェリ磁性層) に y 方向 σ_y 、 z 方向 σ_z のスピンを伝達して反強磁性層 (又はフェリ磁性層) 磁化の歳差運動を誘発する。

【 0 0 3 8 】

すなわち、界面に垂直な方向にスピン電流 J_S が流れる。この時、界面を通過する電子のスピンと界面に蓄積されたスピン分極 (s p i n p o l a r i z a t i o n) の相互作用によって、反強磁性層 (又はフェリ磁性層) に y 方向のスピン σ_y と z 方向のスピン σ_z が伝達される。すなわち、 z 軸方向に流れるスピン電流 J_S の中で z 方向のスピンは z 方向のスピンがない場合に比べて臨界電流密度 (t h r e s h o l d c u r r e n t d e n s i t y) を減少させる。

【 0 0 3 9 】

本発明では、 y 方向のスピン σ_y によって発生する既存のスピンホールスピントルク (S p i n H a l l T o r q u e) と区分するために、上述のように強磁性層 / 非磁性導電層界面効果によって発生し、 y 方向と z 方向を同時に有するスピンによって発生するスピントルクを界面スピン軌道トルク (i n t e r f a c i a l s p i n o r b i t t o r q u e) と命名する。

【 0 0 4 0 】

反強磁性層 (又はフェリ磁性層) に伝達された y 方向のスピン σ_y と z 方向のスピン σ_z の大きさによって反強磁性層 (又はフェリ磁性層) の副格子の磁化歳差運動に必要な電流密度の大きさが変わり、振動数の調整性も変わる。

【 0 0 4 1 】

基板 2 0 2 は半導体基板である。前記基板 2 0 2 はシリコン基板である。

【 0 0 4 2 】

前記強磁性層 2 1 0 は前記基板 2 0 2 上でライン状にパターンニングされ、Fe、Co、Ni、B、Si、Zr 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【 0 0 4 3 】

前記非磁性導電層 2 2 0 は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。前記強磁性層と前記非磁性導電層は、互いに垂直に整列される。

【 0 0 4 4 】

前記反強磁性層 2 3 0 は、前記非磁性導電層 2 2 0 上に局部的に配置される。又は、前記反強磁性層 2 3 0 は、前記非磁性導電層 2 2 0 互いに垂直に整列するように変形される。前記反強磁性層 2 3 0 はIr、Pt、Mn、Cr、FeMn、NiO、Fe₂O₃、及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。前記反強磁性層 2 3 0 の副格子は、面

10

20

30

40

50

に垂直な方向に磁化される。

【0045】

前記第1電極240a及び前記第2電極240bはCu、Ta、Pt、W、Ti、Bi、Ir及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。前記第1電極240a及び前記第2電極240bは、前記強磁性層210と前記非磁性導電層220の両端にそれぞれ連結されて電流を注入する。前記電流は、前記強磁性層210と前記非磁性導電層220で構成された導線に沿って流れる。

【0046】

磁気トンネル接合250は前記反強磁性層230上に配置される。前記磁気トンネル接合250は自由層252/トンネル絶縁層254/固定層256を含み、前記磁気トンネル接合の前記自由層252は前記反強磁性層230と交換相互作用(exchange interaction)する。磁気トンネル接合250はトンネル抵抗(tunneling resistance)によって発振信号(oscillating signal)を出力する。前記自由層252及び前記固定層256は、配置平面から垂直磁化される。

10

【0047】

前記第3電極260は、前記磁気トンネル接合250上に配置される。前記第3電極260は、発振信号を他の回路に連結するための配線に連結される。前記第3電極260は、Cu、Ta、Pt、W、Ti、Bi、Ir及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【0048】

反強磁性体(又はフェリ磁性体)の副格子磁化(sub-lattice Magnetization)の運動方程式は、数式3で表される。

20

【数3】

[数3]

$$\frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial t} = -\gamma \mathbf{M}_i \times \mathbf{H}_{eff,i} + \frac{\alpha}{M_{s,i}} \mathbf{M}_i \times \frac{\partial \mathbf{M}_i}{\partial t} + \frac{1}{M_{s,i}} \frac{\gamma \hbar J}{2eM_{s,i}t} \mathbf{M}_i \times [\mathbf{M}_i \times (\eta \hat{\mathbf{y}} + \delta \hat{\mathbf{z}})]$$

数式3において、 $\mathbf{M}_i$ は反強磁性層(フェリ磁性層)の*i*番目副格子(sub-lattice)の磁化ベクトル、 γ は磁気回転比(gyromagnetic ratio)、 $M_{s,i}$ は反強磁性層(又はフェリ磁性層)の*i*番目副格子の磁化値、 $\mathbf{H}_{eff,i}$ は反強磁性層(又はフェリ磁性層)の副格子のすべての有効磁場ベクトル(effective magnetic field vector)、 α はGilbert減衰定数(damping constant)である。副格子は、第1副格子又は第2副格子である。 η は強磁性層と非磁性導電層の界面で形成される印加電流に対する*y*方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率であり、 δ は強磁性層と非磁性導電層の界面で形成される印加電流に対する*z*方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率である。

30

【数4】

$\hbar$

40

($= 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s e c}$)はプランク定数を 2π で割った値であり、 J は印可された電流密度であり、 e ($= 1.6 \times 10^{-19} \text{ C}$)は電子の電荷量であり、 t は反強磁性層(又はフェリ磁性層)の厚さを表す。 x 方向は反強磁性層(又はフェリ磁性層)が基板上で延長される方向であり、 z 方向は反強磁性層(又はフェリ磁性層)の厚さ方向である。

【0049】

反強磁性層(又はフェリ磁性層)に*z*方向のスピン σ_z が伝達されず、*y*方向のスピン σ_y のみ伝達される場合、臨界電流密度 J_{th} は数式4で表される。

50

【数 5】

[数 4]

$$J_{th} = \frac{2Ket}{\hbar\eta}$$

ここで、

【数 6】

$$\hbar$$

10

はプランク定数を 2π で割った値、 e は電子の電荷量、 t は反強磁性（フェリ磁性）層の厚さ、 K は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の磁気異方性エネルギー密度（magnetic anisotropy energy density、magnetic anisotropy constant）、 η は印可電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率である。

【0050】

数式 4 に該当する臨界電流密度より高い値を有する電流密度によって誘起される反強磁性層（又はフェリ磁性層）の発振振動数は、数式 5 で表される。

20

【数 7】

[数 5]

$$f = \frac{\gamma \hbar \eta}{4eM_s t \pi \alpha} J$$

ここで、 γ は磁気回転比であり、 J は電流密度、

【数 8】

$$\hbar$$

30

はプランク定数を 2π で割った値、 e は電子の電荷量、 t は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の厚さ、 M_s は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子の飽和磁化値、 α は Gilbert 減衰定数、 η は印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率である。

【0051】

反強磁性層（又はフェリ磁性層）に z 方向のスピン σ_z が伝達されず、 y 方向のスピン σ_y のみ伝達される場合、規格化した磁化 N は xz 平面で回転する。印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η はゼロではなく、印加電流に対する z 方向のスピンを伝達するスピン電流の比率 δ はゼロである。

40

【0052】

スピン電流 J_S は、 z 方向のスピン σ_z 成分を有する。反強磁性層（又はフェリ磁性層）に y 方向のスピン σ_y が伝達されず、 z 方向のスピン σ_z のみ伝達される場合の臨界電流密度は次のように与えられる。

【数 9】

[数 6]

$$J_{th} = \frac{4\alpha e t}{\hbar \delta d} \sqrt{AK}$$

ここで、

【数 1 0】

$$\hbar$$

10

はプランク定数を 2π で割った値、 e は電子の電荷量、 t は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の厚さ、 K は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の磁気異方性エネルギー密度、 A は反強磁性交換相互作用定数、 α は G i l b e r t 減衰定数、 d は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子間の距離、 δ は印可電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率である。

【0 0 5 3】

数式 6 に該当する臨界電流密度より高い値を有する電流密度に対して反強磁性層（又はフェリ磁性層）の発振振動数は、数式 7 で表される。

【数 1 1】

20

[数 7]

$$f = \frac{\gamma \hbar \delta}{4eM_s t \pi \alpha} J$$

ここで、 γ は磁気回転比であり、 J は電流密度、

【数 1 2】

$$\hbar$$

30

はプランク定数を 2π で割った値、 e は電子の電荷量、 t は反強磁性（フェリ磁性）層の厚さ、 M_s は反強磁性層（又はフェリ磁性層）の副格子の飽和磁化量、 α は G i l b e r t 減衰定数、 η は印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率である。

【0 0 5 4】

本発明の一実施例によると、界面スピン軌道トルクによって、反強磁性層（又はフェリ磁性層）に y 方向のスピン σ_y と z 方向のスピン σ_z の両方が伝達される。この場合の臨界電流密度は、数式 4 と数式 6 に該当する臨界電流密度のうち低い臨界電流密度で決定される。このとき発振できる振動数は、数式 8 で表される。

【数 1 3】

[数 8]

$$f = \frac{\gamma \hbar \sqrt{\delta^2 + \eta^2}}{4eM_s t \pi \alpha} J$$

40

印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η はゼロではなく、印

50

加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ はゼロではない。反強磁性層（又はフェリ磁性層）に z 方向のスピン σ_z 及び y 方向のスピン σ_y が全て伝達される場合、規格化した磁化 N は $x-y$ 平面成分及び $x-z$ 平面成分を有するように回転する。

【0055】

図4は、本発明の実施例による磁気ナノ発振素子200において、反強磁性層（又はフェリ磁性層）の規格化した磁化 N の軌跡を示すシミュレーション結果である。

【0056】

図4に示すように、磁気ナノ発振素子の効果は、磁化の運動方程式を用いたマクロスピン微小磁気モデリング (macro spin micromagnetic simulation) を通じて確認された。

10

【0057】

磁気ナノ発振素子の構造と物性の値は、以下の通りである。

【0058】

全体構造の断面積 = $0.8 \times 20 \text{ nm}^2$ 。

【0059】

反強磁性層230：“厚さ $t = 3 \text{ nm}$ 、飽和磁化値 $M_s = 400 \text{ emu/cm}^3$ 、Gilbert減衰定数 $\alpha = 0.01$ 、磁気回転比 $\gamma = 1.76 \times 10^7 \text{ Oe} \cdot \text{s}^{-1}$ 、反強磁性交換相互作用定数 A (antiferromagnetic exchange interaction constant、antiferromagnetic exchange stiffness) = $1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 、有効磁気異方性エネルギー定数 K (effective magnetic anisotropy energy constant、effective magnetic anisotropy constant) = $1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ ”。

20

【0060】

印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η は0.1であり、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ は0.1である。この場合、規格化した磁化 N は $x-y$ 平面に投影された楕円成分と $x-z$ 平面に投影された楕円成分とを含む。これによって、規格化した磁化 N は、 $y-z$ の平面に投影された場合、一定の傾きを有する直線で表示される。

【0061】

30

図5は、図4の磁気ナノ発振素子200において、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

【0062】

図6は、図4の磁気ナノ発振素子200において、電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【0063】

図5に示すように、印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η は0.1である。反強磁性層230は、配置平面に垂直な方向（厚さ方向）の副格子磁化を有する。磁気ナノ発振素子200に対して界面スピン軌道トルクが印可されたとき、 z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ と臨界電流密度 J_{th} が表示される。

40

【0064】

δ がゼロである場合、 z 方向のスピンがなく、臨界電流密度は $0.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ である。 δ が0.9である場合、臨界電流密度 J_{th} は $0.1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ である。 z 方向のスピン σ_z の比率が増加することに伴い、臨界電流密度 J_{th} が減少する。すなわち、界面スピン軌道トルクを増加させるように強磁性層/非磁性導電層を設計すると、臨界電流密度 J_{th} が減少する。

【0065】

図6に示すように、印加電流に対する y 方向のスピンを伝達するスピン電流の比率 η は0.1に固定され、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ を変化させると、印加電流密度 J と発振周波数が表示される。

50

【 0 0 6 6 】

δ が増加するほど、電流密度 J に対する周波数の傾きが増加する。したがって、小さい電流密度 J の変化で大きい周波数の差を提供することができる。 $\delta = 1$ である場合、発振素子は電流密度によって 0.1 THz ないし 0.7 THz の範囲で発振する。

【 0 0 6 7 】

図 7 は、本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子の概念図である。

【 0 0 6 8 】

図 8 は、図 7 の磁気ナノ発振素子の発振を説明する斜視図である。

【 0 0 6 9 】

図 9 は、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

10

【 0 0 7 0 】

図 10 は、電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【 0 0 7 1 】

図 7 ないし図 10 に示すように、磁気ナノ発振素子 300 は、基板 202 上に配置された強磁性層 210 と、前記強磁性層上に積層された非磁性導電層 220 と、前記非磁性導電層 220 上に積層された反強磁性層 330 と、前記強磁性層 210 と前記非磁性導電層 220 の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極 240a、240b と、を含む。前記反強磁性層 330 は、膜面に対して水平な方向に磁化される物質からなる薄膜であり、前記強磁性層 210 は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化される。前記第 1、第 2 電極 240a、240b を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、前記反強磁性層 330 に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記反強磁性層 330 の副格子の磁化歳差運動を発生させる。前記反強磁性層 330 は面内方向に磁化される。

20

【 0 0 7 2 】

磁気トンネル接合 250 は、前記反強磁性層 330 上に配置される。前記磁気トンネル接合 250 は、自由層 252 / トンネル絶縁層 254 / 固定層 256 を含み、前記磁気トンネル接合の前記自由層 252 は前記反強磁性層 330 と交換相互作用する。前記自由層及び前記固定層は、配置平面内で磁化される。

【 0 0 7 3 】

図 9 に示すように、印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η は 0.1 である。反強磁性層 330 は配置平面内で副格子磁化を有する。反強磁性層 330 の磁化容易軸は y 軸である。磁気ナノ発振素子 300 に対して界面スピン軌道トルクが印可されたとき、臨界電流密度 J_{th} 及び発振振動数 f は、次のような条件でシミュレーションされた。

30

【 0 0 7 4 】

素子の構造と物性の値は、以下の通りである。

【 0 0 7 5 】

全体構造の断面積 = $0.8 \times 0.8 \text{ nm}^2$ 、

【 0 0 7 6 】

反強磁性層 330: “ 厚さ $t = 3 \text{ nm}$ 、飽和磁化値 $M_s = 400 \text{ emu/cm}^3$ 、Gilbert 減衰定数 $\alpha = 0.01$ 、磁気回転比 $\gamma = 1.76 \times 10^7 \text{ Oe} \cdot \text{s}^{-1}$ 、反強磁性交換相互作用定数 $A = 1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 、有効磁気異方性エネルギー定数 $K = 1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ ”

40

【 0 0 7 7 】

δ がゼロである場合、 z 方向のスピン σ_z がなく、臨界電流密度は $0.9 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ である。 δ が 0.9 である場合、臨界電流密度 J_{th} は $0.1 \times 10^8 \text{ A/cm}^2$ である。 z 方向のスピン σ_z の比率が増加することに伴い、臨界電流密度 J_{th} が減少する。すなわち、界面スピン軌道トルクを増加させるように強磁性層 / 非磁性層を設計すると、臨界電流密度 J_{th} が減少する。

50

【 0 0 7 8 】

図 1 0 に示すように、印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η は 0.1 で固定され、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ を変化させると、印加電流密度 J と発振周波数が表示される。

【 0 0 7 9 】

δ が増加するほど、電流密度 J に対する周波数の傾きが増加する。したがって、小さい電流密度 J の変化で大きい周波数の差を提供することができる。

【 0 0 8 0 】

図 1 1 は、本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子を示す概念図である。

【 0 0 8 1 】

図 1 2 は、図 1 1 の磁気ナノ発振素子 2 0 0 a において、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ による臨界電流密度を示すグラフである。

【 0 0 8 2 】

図 1 3 は、図 1 1 の磁気ナノ発振素子 2 0 0 a において、電流密度による発振周波数を示すグラフである。

【 0 0 8 3 】

図 1 1 ないし図 1 3 に示すように、磁気ナノ発振素子 2 0 0 a は、基板 2 0 2 上に配置された強磁性層 2 1 0 と、前記強磁性層上に積層された非磁性導電層 2 2 0 と、前記非磁性導電層上に積層されたフェリ磁性層 2 3 0 a と、前記強磁性層と前記非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極 2 4 0 a、2 4 0 b と、を含む。前記フェリ磁性層 2 3 0 a は、膜面に対して垂直あるいは水平な方向に磁化される物質からなる薄膜である。前記強磁性層 2 1 0 は、前記強磁性層の膜面に水平な方向に磁化される。前記第 1、第 2 電極を通じて前記強磁性層と前記非磁性導電層に注入された面内電流は、前記フェリ磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記フェリ磁性層の副格子の磁化歳差運動を発生させる。

【 0 0 8 4 】

ナノ発振素子 2 0 0 a の構造と物性値は、以下の通りである。

【 0 0 8 5 】

全体構造の断面積 = $0.8 \times 20 \text{ nm}^2$ 。

【 0 0 8 6 】

フェリ磁性層 2 3 0 a: “ 厚さ $t = 3 \text{ nm}$ 、副格子 1 の飽和磁化値 $M_{S,1} = 400 \text{ emu/cm}^3$ 、副格子 2 の飽和磁化値 $M_{S,2} = 350 \text{ emu/cm}^3$ 、副格子 1 の磁気回転比 $\gamma_1 = 1.936 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、副格子 2 の磁気回転比 $\gamma_2 = 1.76 \times 10^7 \text{ Oe}^{-1} \text{ s}^{-1}$ 、Gilbert 減衰定数 $\alpha = 0.01$ 、反強磁性交換相互作用定数 $A = 1 \times 10^{-7} \text{ erg/cm}$ 、有効磁気異方性エネルギー定数 $K = 1 \times 10^5 \text{ erg/cm}^3$ ”

【 0 0 8 7 】

フェリ磁性層 2 3 0 a は、Co、Gd、Tb、Mn、Ir、Ge、Se、Cr、Y、Fe、石榴石、希土類—遷移金属 (RE-TM) 合金及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

【 0 0 8 8 】

界面スピン軌道トルクを増加させるように強磁性層 / 非磁性導電層を設計すると、臨界電流密度 J_{th} が減少する。

【 0 0 8 9 】

印加電流に対する y 方向のスピン σ_y を伝達するスピン電流の比率 η は 0.1 で固定され、印加電流に対する z 方向のスピン σ_z を伝達するスピン電流の比率 δ を変化させると、印加電流密度 J と発振周波数が表示される。

【 0 0 9 0 】

δ が増加するほど、電流密度 J に対する周波数の傾きが増加する。したがって、小さな電流密度 J の変化で大きな周波数の差を提供することができる。 $\delta = 1$ である場合、発振素子は電流密度によって 0.1 THz ないし 0.9 THz の範囲で発振する。

10

20

30

40

50

【 0 0 9 1 】

図 1 4 は、本発明のもう一つの実施例による磁気ナノ発振素子の概念図である。

【 0 0 9 2 】

図 1 4 に示すように、磁気ナノ発振素子 4 0 0、基板 2 0 2 上に配置された第 1 強磁性層 2 1 0 と、前記第 1 強磁性層 2 1 0 に配置された第 1 非磁性導電層 2 2 0 と、前記第 1 非磁性導電層 2 2 0 上に配置された第 2 強磁性層 3 3 2 と、前記第 2 強磁性層 3 3 2 上に配置された第 2 非磁性導電層 3 3 4 と、前記第 2 非磁性導電層 3 3 4 上に配置された第 3 強磁性層 3 3 6 と、前記第 1 強磁性層と前記第 1 非磁性導電層の両側面にそれぞれ接触する第 1、第 2 電極 2 4 0 a、2 4 0 b と、を含む。前記第 1 強磁性層 2 1 0 は、固定磁化方向を有し、膜面に対して平行な方向に磁化される物質からなる薄膜である。前記第 2 強磁性層 3 3 2 と前記第 3 強磁性層 3 3 6 は、前記第 2 非磁性導電層によって反強磁性交換相互作用する薄膜である。前記第 2 強磁性層 3 3 2 と前記第 3 強磁性層 3 3 6 は、膜面に平行又は垂直に磁化される。前記第 1、第 2 電極を通じて、前記第 1 強磁性層と前記第 1 非磁性導電層に注入された面内電流は、前記第 2 強磁性層と前記第 3 強磁性層に伝達される薄膜の厚さ方向のスピンを含むスピン電流を提供して前記第 2 強磁性層と前記第 3 強磁性層の磁化歳差運動をそれぞれ発生させる。

10

【 0 0 9 3 】

前記第 1 強磁性層 2 1 0 と前記第 1 非磁性導電層 2 2 0 は、垂直に整列される。

【 0 0 9 4 】

また、前記第 2 強磁性層 3 3 2、第 2 非磁性導電層 3 3 4、及び第 3 強磁性層 3 3 6 は、垂直に整列され、反強磁性交換相互作用によって結合される。前記第 2 強磁性層 3 3 2 と前記第 3 強磁性層 3 3 6 は、常に反平行結合 (a n t i f e r r o m a g n e t i c c o u p l i n g) を維持しながら歳差運動する。

20

【 0 0 9 5 】

磁気トンネル接合 4 5 0 は、前記第 3 反強磁性層 3 3 6 上に配置される。前記磁気トンネル接合 2 5 0 はトンネル絶縁層 2 5 4 / 固定層 2 6 5 を含み、前記磁気トンネル接合の前記固定層 2 5 6 は前記第 3 強磁性層 3 3 6 と相互作用して、トンネル磁気抵抗信号を生成する。前記固定層 2 5 6 は、面内で平行又は垂直に磁化する。

【 0 0 9 6 】

前記第 1 強磁性層 2 1 0、前記第 2 強磁性層 3 3 2、及び前記第 3 強磁性層 3 3 6 は、F e、C o、N i、B、S i、Z r 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。前記第 1 非磁性導電層 2 2 0 は、C u、T a、P t、W、T i、B i 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。前記第 2 非磁性導電層 3 3 4 は、R u、T a、R h、I r、C r、R e、M o、W、V 及びこれらの混合物の中から選択される物質からなる。

30

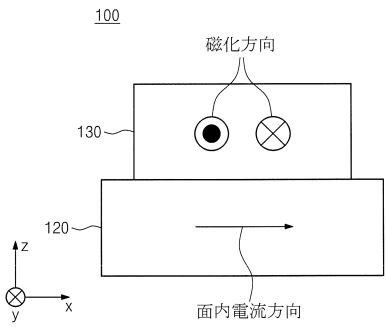
【 0 0 9 7 】

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いて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。

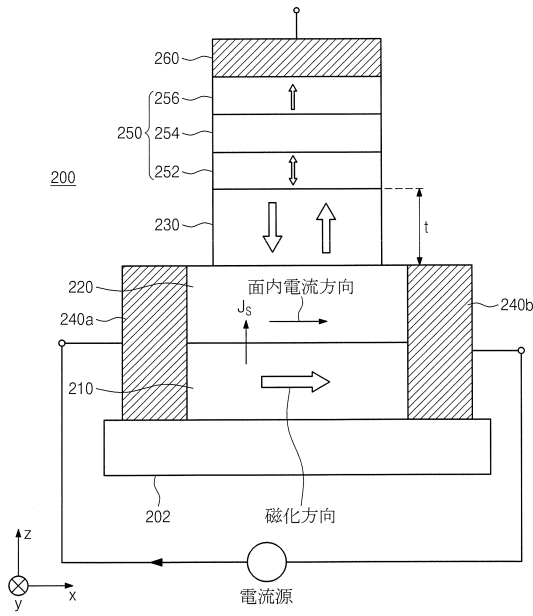
40

【図面】

【図 1】



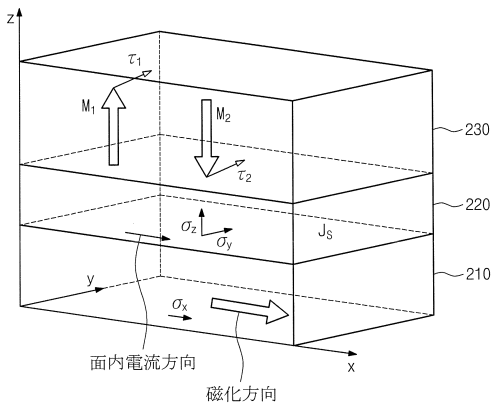
【図 2】



10

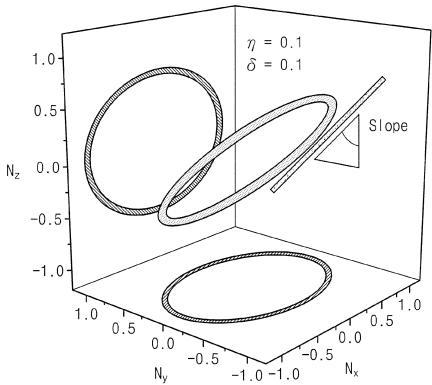
20

【図 3】



【図 4】

シミュレーション結果 - スピン y + スピン z ($\eta \neq 0, \delta \neq 0$)

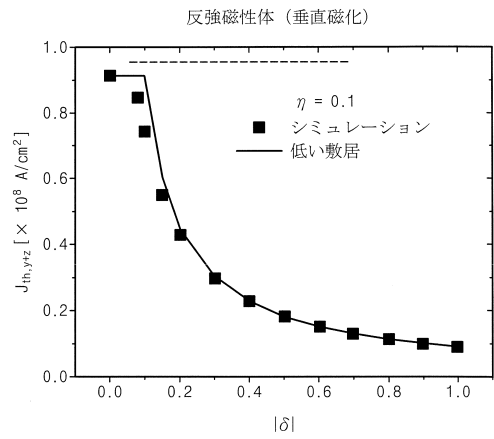


30

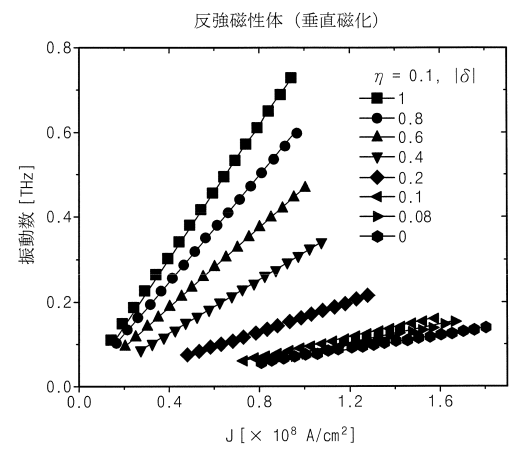
40

50

【図 5】

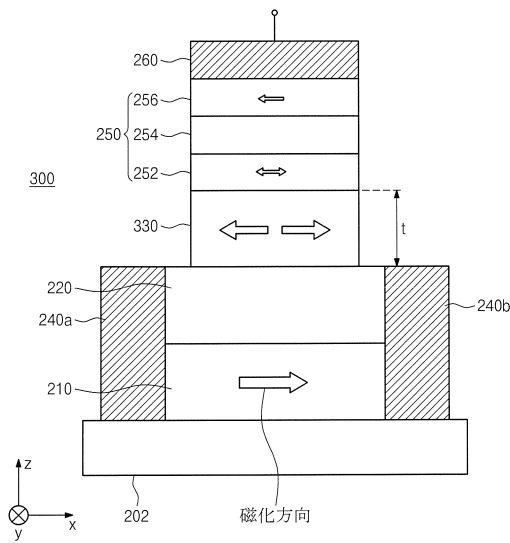


【図 6】

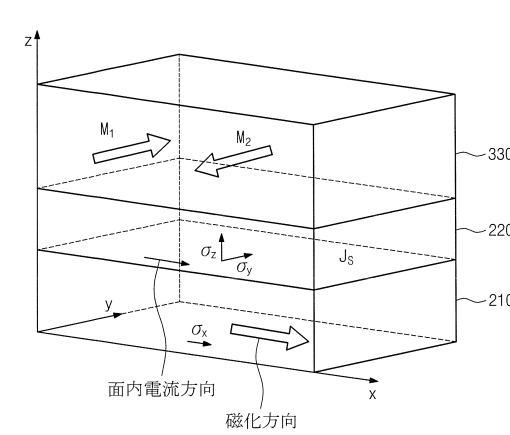


10

【図 7】



【図 8】



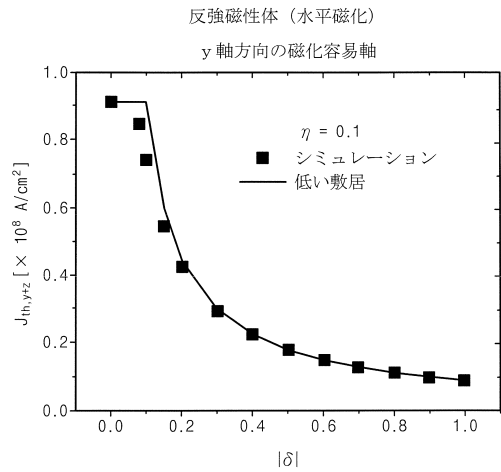
20

30

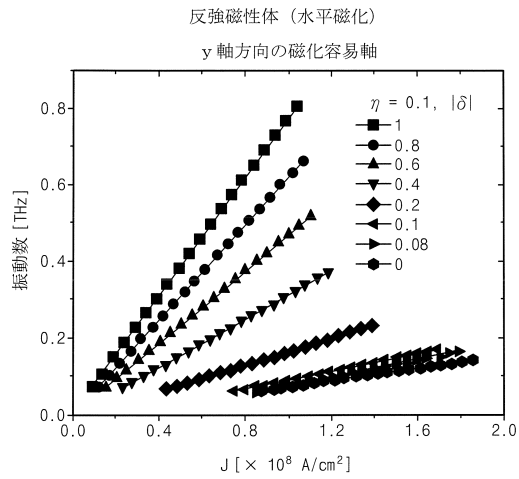
40

50

【図 9】

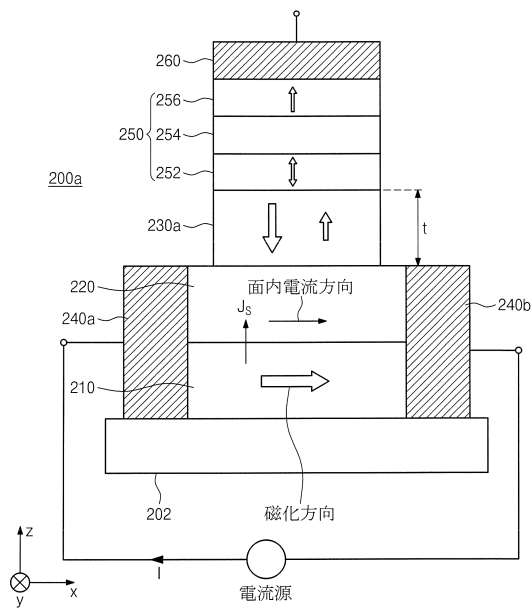


【図 10】

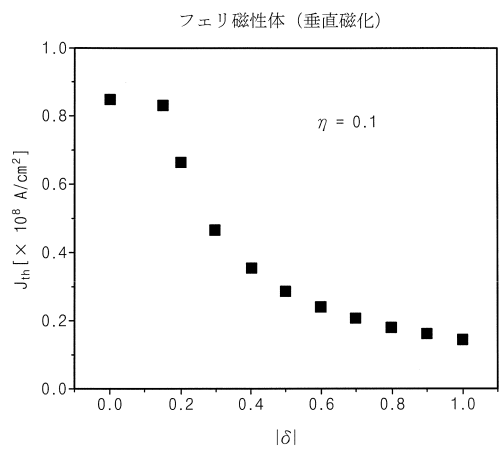


10

【図 11】



【図 12】



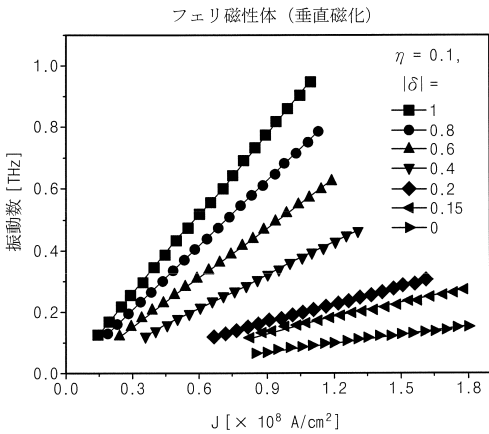
20

30

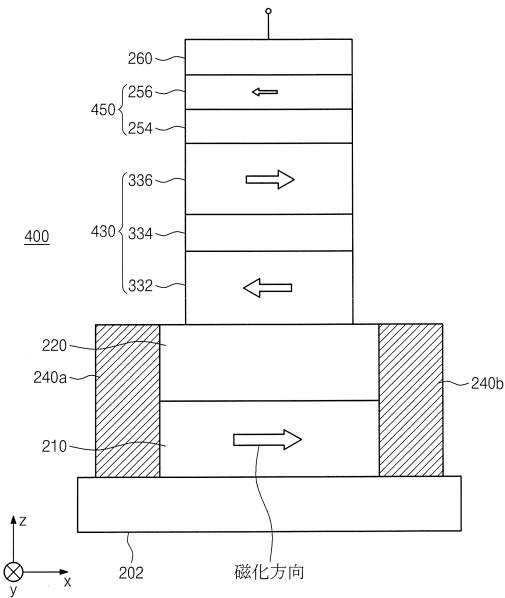
40

50

【図 1 3】



【図 1 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 リ, キュン - ジン
大韓民国, ソウル 0 1 7 3 5 , ノウォン - ク , 1 9 5 チュンギェ - ロ , 1 0 5 - 3 0 5
(72)発明者 バク, ピョン ガク
大韓民国, テジョン 3 4 1 2 1 , ユソン - ク , 1 4 ムンジ - ロ , 1 - 3 0 1
(72)発明者 リ, ドン - キュ
大韓民国, ソウル 0 2 5 7 8 , トンデムン - ク , 4 0 ムハク - ロ 4 5 ギル , 2 0 1
審査官 加藤 俊哉
(56)参考文献 特開 2 0 1 7 - 2 0 4 8 3 3 (J P , A)
特開 2 0 1 1 - 1 0 1 0 1 5 (J P , A)
中国特許出願公開第 1 0 6 2 5 2 5 0 3 (C N , A)
米国特許出願公開第 2 0 1 5 / 0 0 4 1 9 3 4 (U S , A 1)
米国特許出願公開第 2 0 1 6 / 0 2 7 6 0 0 6 (U S , A 1)
Ran Cheng, et al. , Terahertz Antiferromagnetic Spin Hall Nano-Oscillator , Physical Review Letters , 米国 , American Physical Society , 2016年05月20日 , Vol.116,Iss 20 , pp.207603-1 - 207603-5
(58)調査した分野 (Int.Cl. , D B 名)
H 0 1 L 2 9 / 8 2
H 0 1 L 4 3 / 0 8