

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号

特許第7258332号

(P7258332)

(45)発行日 令和5年4月17日(2023.4.17)

(24)登録日 令和5年4月7日(2023.4.7)

(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 3 B 15/00 (2006.01)

H 0 3 B 15/00

H 1 0 N 50/10 (2023.01)

H 1 0 N 50/10

U

H 1 0 N 50/10

Z

請求項の数 7 (全11頁)

(21)出願番号 特願2018-218165(P2018-218165)
(22)出願日 平成30年11月21日(2018.11.21)
(65)公開番号 特開2020-88088(P2020-88088A)
(43)公開日 令和2年6月4日(2020.6.4)
審査請求日 令和3年10月15日(2021.10.15)
特許法第30条第2項適用 刊行物名 平成29年度卒業論文 スピントルク発振素子における電氣的位相同期
公開者 安藤拓己 発行年月日 平成30年2月5日〔刊行物等〕 刊行物名 平成29年度卒業論文 スピントルク
発振素子における電氣的位相同期 公開者 安藤拓己、鈴木大貴 発行年月日 平成30年2月5日〔刊行物等〕
集会名 2017年度電子工学コース卒論最終発表会 公開者 安藤拓己、鈴木大貴 開催年月日 平成30年2月10日
(出願人による申告)平成29年度、総務省、「スピ
最終頁に続く

(73)特許権者 301021533
国立研究開発法人産業技術総合研究所
東京都千代田区霞が関1-3-1
(72)発明者 常木 澄人
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
国立研究開発法人産業技術総合研究所内
(72)発明者 福島 章雄
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
国立研究開発法人産業技術総合研究所内
(72)発明者 久保田 均
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
国立研究開発法人産業技術総合研究所内
(72)発明者 安藤 拓己
茨城県つくば市梅園1-1-1 中央第1
国立研究開発法人産業技術総合研究所内
最終頁に続く

(54)【発明の名称】 スピントルク発振素子

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

C o F e Bを含む磁化固定層と、M g Oを含むトンネル障壁層と、F e Bからなる磁化自由層が順番に積層された積層構造において、前記磁化固定層と前記トンネル障壁層との間に各々に接するように配置したN i F e Bを含むパーマロイ層を備える、スピントルク発振素子。

【請求項2】

前記N i F e BにおけるN i組成比は76～85at%の範囲にある、請求項1に記載のスピントルク発振素子。

【請求項3】

前記パーマロイ層は略5 の厚さを有する、請求項1または2に記載のスピントルク発振素子。

【請求項4】

前記磁化固定層は略23 の厚さを有し、前記トンネル障壁層は略10 の厚さを有し、前記磁化自由層は略50 の厚さを有する、請求項1～3のいずれか1項に記載のスピントルク発振素子。

【請求項5】

請求項1～4のいずれか1項に記載の複数のスピントルク発振素子を直列、並列、または直並列に配列したスピントルク発振素子アレイ。

【請求項6】

10

20

前記複数のスピントルク発振素子の同期幅は、 $9 \sim 11 \text{ MHz}$ の範囲にある、請求項5に記載のスピントルク発振素子アレイ。

【請求項7】

前記複数のスピントルク発振素子に印加する磁界が $360 \sim 390 \text{ mT}$ で、直流電圧が $270 \sim 300 \text{ mV}$ の場合に前記同期幅が得られる、請求項6に記載のスピントルク発振素子アレイ。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、一般的にはマイクロ波発振器に関し、より具体的には、マイクロ波発振器として用いるスピントルク発振素子（STO）に関する。

10

【背景技術】

【0002】

携帯電話やタブレット、ノートパソコンなどの携帯型電子機器は、内部の発振器によって高周波（マイクロ波）信号を生成して高速な演算や無線通信を行っている。最近、携帯型電子機器の高速化、無線信号の高周波化などが一層進んだことから、より小型なマイクロ波発振器の必要性が高まっている。

【0003】

従来の半導体とLC共振器を用いたマイクロ波発振器は、小型のものでもそのサイズはマイクロメートル（ μm ）レベルである。一方、スピントルク発振素子（以下、STOと呼ぶ）は、そのサイズをナノメートル（ nm ）レベルまで小型化できる。したがって、STOは有望な小型のマイクロ波発振器として着目されている。例えば、非特許文献1は、自由層（発振層）に垂直磁化膜、固定層に面内磁化膜を用いたTMR素子を用いて、発振パワー $0.55 \mu\text{W}$ 、半値幅 47 MHz のマイクロ波を発振させることができるSTOを開示している。

20

【0004】

STOは、印加する磁界や電圧によって発振周波数等を制御することができる。しかし、非特許文献1のSTOを含め従来のSTOでは、その発振パワーが $1 \mu\text{W}$ 程度である。したがって、携帯型電子機器への搭載等の実用化にあたって、小型でかつより高出力なSTOが求められている。

30

【0005】

STOの出力（発振パワー）を高めるために、複数のSTOを配列化することが提案されている（例えば特許文献1）。配列化では各STOの発振周波数およびその位相が同じ場合にのみ大きな出力が望める。しかし、STOは nm レベルの非常に小さな素子であるため、製造ばらつきに起因するわずかなサイズの違いによって発振周波数が変わってしまう。STOの発振周波数の製造ばらつきに起因する個体間のばらつきは例えば 8 MHz （1の場合）程度ある。その結果、STO間で同期するマイクロ波が歪んでしまい大きな出力を得ることができない。

【0006】

この問題を解決するために、STO間の発振周波数を揃えることができる位相同期という現象を利用する技術が提案されている。この複数の発振素子を位相同期させる技術として、例えば、特許文献2には、複数の高周波の発振を行うスピンバルブ素子において位相同期させる際にインピーダンスマッチングを実現するため、絶縁体または非磁性体からなる中間層を一对の強磁性層により挟持した磁性素子を複数含む並列または直列磁性素子群を、さらに直列または並列につないでスピンバルブ素子を得て、並列と直列とを組み合わせで接続する磁性素子群を用いることにより、スピンバルブ素子のインピーダンスを所望の値にマッチングさせることができることを開示している。

40

【0007】

しかし、特許文献2に示す技術は、各素子で発生する高周波磁場の相互作用に起因する位相ロッキング現象を前提とした技術であって、直接的な相互作用の効果を高めるためには

50

、各素子間で相互に作用するパラメータ等を考慮して最適化をする必要があり、大規模最適化問題となり容易ではない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【文献】特開2008-53915号公報

国際公開WO2009/054182

【非特許文献】

【0009】

【文献】H. Kubota et al., Appl. Phys. Express 6, 103003 (2013)

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

本発明の目的は、STOの構造の最適化を図ることにより、STOの高周波出力を利用した相互作用に起因するSTO間の位相同期を採ることができる周波数差（以下、同期幅と呼ぶ）を広げて製造ばらつきによる影響を緩和しSTOの出力（発振パワー）を向上させることである。

【課題を解決するための手段】

【0011】

本発明の一実施形態のSTOは、CoFeBを含む磁化固定層と、MgOを含むトンネル障壁層と、FeBを含む磁化自由層が順番に積層された積層構造において、NiFeBを含むパーマロイ層を磁化固定層とトンネル障壁層の間に設けたことを特徴とする。

20

【0012】

本発明の一実施形態のSTOにおいて、例えば、NiFeBにおけるNi組成比は76～87at%の範囲にあり、パーマロイ層は略5の厚さを有し、磁化固定層は略23の厚さを有し、トンネル障壁層は略10の厚さを有し、あるいは磁化自由層は略50の厚さを有することができる。

【0013】

本発明の他の一実施形態として、上述した一実施形態のSTOの複数を配列したSTOアレイを提供する。そのSTOアレイでは、STO間の同期幅は、例えば9～11MHzの範囲にある。その同期幅は、STOに印加する磁界が360～390mTで、電圧が270～300mVの場合に得られる。

30

【発明の効果】

【0014】

本発明のSTOによれば、簡易な構造及びその動作制御によって、STO間の同期幅を例えば9～11MHzの範囲のように広げることができる。その結果、製造ばらつきによる影響を緩和し複数のSTO（STOアレイ）において同期現象によってその出力（パワースペクトル密度）を向上させることが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

40

【図1】STOの位相同期の状態（a：現状（従来）、b：目標）を示す模式図である。

【図2】本発明の一実施形態のSTOの構成を示す斜視図である。

【図3】本発明の一実施形態のSTOの測定回路の構成を示す模式図である。

【図4】本発明の一実施形態のSTOの周波数とパワースペクトル密度PSDの関係を示す図である。

【図5】本発明の一実施形態のSTOの周波数 f_{STO} と掃引周波数 f_{ac} の関係を示す図である。

【図6】本発明の一実施形態のSTOの印加電圧と同期幅の関係を示す図である。

【図7】本発明の一実施形態のSTOの印加磁界と同期幅の関係を示す図である。

【図8】本発明の一実施形態のSTOの印加電圧と印加磁界と同期幅の関係を示す図であ

50

る。

【図 9】本発明の一実施形態の S T O の N i F e B の N i 組成比と同期幅の関係を示す図である。

【図 10】本発明の一実施形態の S T O アレイの構成を示す模式図である。

【発明を実施するための形態】

【0016】

図面を参照しながら本発明の実施の形態を説明する。最初に図 1 を参照しながら本発明が対象とする S T O の位相同期の状態について説明する。図 1 (a) は現状 (従来) の S T O の同期前と同期後の出力 (パワースペクトル密度、 P S D) を示す図である。上側の 2 つのスペクトル A、B は位相同期前の 2 つの S T O (A、B) の P S D である。両者の同期幅 f は 1 M H z 程度と狭く、製造ばらつきによる 2 つの S T O (A、B) の位相同期前の周波数差に比べて同期幅 f が狭いため下側の同期後の大きな出力 (P S D) を得ることができない。(b) は本発明が目標とする S T O の同期前と同期後の出力 (P S D) を示す図である。上側の 2 つのスペクトル A、B は位相同期前の 2 つの S T O (A、B) の P S D である。この場合は、両者の同期幅 f は広く、少なくとも 8 M H z 以上、例えば 9 ~ 11 M H z 程度であり、製造ばらつきによる 2 つの S T O (A、B) の位相同期前の周波数差に比べて同期幅 f が広いため下側の同期後の大きな出力 (P S D) を得ることができる。本発明は、(b) に示すような同期幅 f の広い高出力な S T O / S T O アレイを提供する。

【0017】

図 2 に本発明の一実施形態の S T O の構成を示す。図 2 では、例として円柱形の S T O 10 を示しているが、形状は円柱形に限定されず、例えばその断面が楕円、正方形、長方形その他の形状であっても良い。S T O 10 は、強磁性体からなる磁化固定層 1 及び磁化自由層 4 と、両者の中間にある非磁性層からなるトンネル障壁層 3 と、さらに磁化固定層 1 とトンネル障壁層 3 の間にパーマロイ層 2 を含む。磁化固定層 1 は、例えば C o F e B を含み、磁化自由層 4 は F e B を含み、トンネル障壁層 3 は M g O を含み、パーマロイ層 2 は N i F e B を含む。この本発明の一実施形態の S T O 10 では、磁化固定層 1 とトンネル障壁層 3 の間にパーマロイ層 (N i F e B) 2 を設けたことが 1 つの特徴である。

【0018】

図 2 の本発明の一実施形態の S T O 10 の構成についてはさらに後述するが、その前に S T O 10 の測定回路について説明する。図 3 は、本発明の一実施形態の S T O の同期現象の測定回路の構成を示す模式図である。測定回路では、S T O 10 を発振させるための、磁界 H を印加するための高周波用プローバー (図示無し) と、直流電圧 V_{DC} を印加するための直流電源 12 とに加えて、同期現象を起こすために外部から S T O 10 に高周波信号 f_{ac} を印加するための高周波信号発生器 13 と、S T O 10 の発振信号 (周波数 f_{STO} 、P S D) を測定するためのスペクトラムアナライザ 14 を含む。これらの各機器はパーソナルコンピュータ (P C) 15 によって制御することができる。

【0019】

図 3 の測定回路では、さらに直流電源 12 による信号が S T O 10 以外へ行かないようにするために、インダクタ L とコンデンサ C からなるバイアスティーを含む。一般的に、高周波信号発生器 13 の信号強度は S T O 10 の高周波信号に比べて大きい。このため、高周波信号発生器 13 から出力する高周波信号の周波数 F_{ac} と S T O 10 の発振周波数 f_{STO} をほぼ同じにする同期実験を行うと、S T O 10 の信号を解析できなくなってしまう。

【0020】

これを回避するために、高周波信号発生器 13 から出力する高周波信号の周波数 F_{ac} は、S T O 10 の周波数 f_{STO} に対しておおよそ 2 通倍になるように値を設定している。周波数 f_{ac} を $f_{ac} = F_{ac} / 2$ と定義し、この周波数 f_{ac} を高周波信号発生器 13 の周波数 f_{ac} として説明に用いる。同期幅の評価では、 $|f_{ac} - f_{STO}|$ が同期幅 f に対して十分に大きくなるように f_{ac} を掃引している。また、高周波信号発生器 13 の高周波信号を S T O 10 に入力し、同時に S T O 10 の発振信号を測定するために、パワー

ディバイダ 16 を用いることができる。図 3 の各機器は同軸ケーブルを用いて接続している。

【0021】

図 2 の本発明の一実施形態の S T O 10 の構成において、パーマロイ層に N i F e B を用い、その組成比と膜厚を変えて実際に S T O を作製した。その際の N i F e B の N i 組成比 (a t %) と膜厚 () を下記の表 1 に示す。N i 組成比はより正確には N i の原子組成百分率 (a t %) を意味する。例えば、表中の 70 N i / F e B は、N i F e B 中の N i 組成比は 70 a t % であり、F e B が 30 a t % であることを示している。F e B は F e (鉄) と B (ボロン) の合金であり、その原子組成百分率 (a t %) の比は 80 : 20 である。作製した円柱形の S T O 10 の直径は約 350 nm である。磁化固定層 1 は C o F e B で約 23 の厚さを有し、トンネル障壁層 3 は M g O で約 10 の厚さを有し、磁化自由層 4 は F e B で約 50 の厚さを有する。

【表 1】

表 1

	組成比		
	70Ni/FeB	78Ni/FeB	85Ni/FeB
膜厚(Å)	2.5	2.5	2.5
	5		
	10		

【0022】

図 4 に、作製した S T O について図 3 の測定回路を用いた位相同期実験の結果 (周波数とパワースペクトル密度 P S D の関係) を示す。図 4 は表 1 の N i の組成比が 85 a t % (85 N i / F e B) の S T O において、磁界 $H = 360 \text{ mT}$ 、直流電圧 $V_{DC} = 270 \text{ mV}$ を印加した状態で、 f_{ac} を持つ高周波信号を S T O に印加した際の S T O のパワースペクトル密度 P S D の変化を示している。図 4 の A では、 $f_{ac} = 373.5 \text{ MHz}$ において同期がとれていない、すなわち S T O の発振周波数 $f_{STO} \neq f_{ac}$ の状態である。

【0023】

f_{ac} を 373.5 MHz から大きくしていくと、図 4 の B、C、D に示すように、P S D のスペクトルは f_{ac} ($= 377 \text{ MHz}$ 、 381.5 MHz 、 386 MHz) に追従していく形、つまり $f_{STO} = f_{ac}$ となり同期している状態となる。そこからさらに f_{ac} を高周波数へ掃引していくと、図 4 の E に示すように、 $f_{ac} = 390.5 \text{ MHz}$ では既に同期していない P S D のスペクトルに戻っている。図 4 の A ~ E の各グラフから同期現象が確かに起きていることがわかる。

【0024】

図 4 の結果に最小二乗法を用いてローレンツ関数の曲線回帰を行い、S T O の発振周波数 f_{STO} を評価し、高周波信号発生器 13 の周波数 f_{ac} を横軸にプロットした結果を図 5 に示す。図 5 の中央の右上がりの直線部分が S T O 10 と高周波信号発生器 13 が同期している $f_{STO} = f_{ac}$ である状態を示している。この時の同期幅は 376 MHz 程度から 387 MHz 程度の範囲の 11 MHz 近くとなっている。これは、図 1 (a) を参照しながら説明した従来の同期幅 $\Delta f = 1 \text{ MHz}$ 程度に比べて約 10 倍広い同期幅が得られていることを示している。

【0025】

図 6 に作製した本発明の一実施形態の S T O の印加電圧と同期幅の関係を例示する。図 6 は、表 1 の N i の組成比が 78 a t % (78 N i / F e B) の S T O において、磁界 $H =$

380 mTを印加した状態で、印加する直流電圧 V_{DC} を250 ~ 300 mVまで変化させた場合の同期幅(MHz)を示している。STOに印加する直流電圧 V_{DC} の変化に応じて同期幅が大きく変化していることがわかる。図6から例えば同期幅9 MHz以上を得るには約270 ~ 300 mVの範囲の直流電圧 V_{DC} を印加する必要があることがわかる。
【0026】

図7に作製した本発明の一実施形態のSTOの印加磁界と同期幅の関係を例示する。図7は、図6の場合と同じ表1のNiの組成比が78 at% (78 Ni / Fe B)のSTOにおいて、直流電圧 V_{DC} = 290 mVを印加した状態で、印加する磁界Hを360 ~ 600 mTまで変化させた場合の同期幅(MHz)を示している。この場合もSTOに印加する磁界Hの変化に応じて同期幅が大きく変化していることがわかる。図7から例えば同期幅9 MHz以上を得るには約360 ~ 390 mTの範囲の磁界Hを印加する必要があることがわかる。

10

【0027】

図8に作製した本発明の一実施形態のSTOの印加電圧と印加磁界と同期幅の関係を示す。図8は、図6と図7のグラフを1つの図にまとめたもので、図中の斜線で囲んだ範囲が図6、図7でも例示した同期幅が広い約9 MHz以上の範囲を示している。その範囲は、磁界Hが約360 ~ 390 mTで、直流電圧が約270 ~ 300 mVの範囲である。図6 ~ 図8に測定結果を示した表1のNiの組成比が78 at% (78 Ni / Fe B)のSTOの最大同期幅は約10.2 MHzであった。

【0028】

20

図9に本発明の一実施形態のSTOのNi Fe BのNi組成比と同期幅の関係を示す。図9(a)の表は上記した表1と同じである。(b)のグラフは、Ni Fe Bの膜厚が2.5で同じでNiの組成比を70、78、85 at%と変えた場合の最大同期幅を示している。図9のグラフからNiが70 at%のSTOでは大きな同期幅を得られないが、Niが85 at%で約9 MHz、78 at%で約10 MHz以上の同期幅を得ることができる。図9のグラフから例えば9 MHz以上の同期幅を得るにはNiの組成比が約76 ~ 85 at%の範囲であればよい。

【0029】

これらの結果は、図1(a)に例示した従来の同期幅(約1 MHz)の約10倍という非常に大きな同期幅を得ることができることを示している。また、図示はしていないが、Ni Fe BのNi組成比が70 at%で膜厚を2.5 ~ 10の範囲で変えて最大同期幅を比較した場合、約5の膜厚で最も広い同期幅を得ることができたが、組成比を変えた場合に比べて大きな変化は見られなかった。

30

【0030】

以上述べた実際に作製したSTOの同期現象の測定結果から、Fe B / Mg O / Ni Fe B / Co Fe Bの構成を有するSTOにおいて、Ni Fe BのNi組成比を約76 ~ 85 at%の範囲とすることによりSTOの同期幅を9 ~ 11 MHzと広くすることができることがわかった。その際のNi Fe Bの膜厚は約5であることが望ましく、また、STOに印加する磁界は約360 ~ 390 mTで、直流電圧は約270 ~ 300 mVの範囲である必要があることがわかった。

40

【0031】

実際に位相同期をとり出力を高めるには複数の本発明のSTOを配列しSTOアレイとして、上述した条件で各STOを発振させる必要がある。その際起こる位相同期現象によりSTO間の周波数が相互作用を通じて揃い合って出力が大きくなる。図10にそのSTOアレイの配列例を示す。図10では、STO10と直流電圧を印加するための直流電源のみを記載している。また、図中の各STO10では、磁化固定層とトンネル障壁層と磁化自由層の3層のみを示し、トンネル障壁層と磁化自由層の間に在る薄いパーマロイ層は省略している。

【0032】

図10(a)は、3つのSTO10を並列接続した構成である。(b)は3つのSTO1

50

0を直列接続した構成である。(c)は(a)の3つのSTO10を並列接続した構成を3組(3行)直列接続して直並列接続構成である。(d)は(b)の3つのSTO10を直列接続した構成を3組(3列)並列接続した直並列接続構成である。なお、いずれの場合もSTOの数は3に限定されず、それぞれ少なくとも2以上の任意の数のSTOを用いることができる。

【0033】

本発明の実施形態について、図を参照しながら説明をした。しかし、本発明はこれらの実施形態に限られるものではない。さらに、本発明はその趣旨を逸脱しない範囲で当業者の知識に基づき種々なる改良、修正、変形を加えた態様で実施できるものである。

【産業上の利用可能性】

10

【0034】

本発明のSTO/STOアレイは小型で高出力な発振素子として携帯電話、タブレットあるいはノートパソコン等の携帯型電子機器などに幅広く利用することができる。

【符号の説明】

【0035】

- 1 磁化固定層(CoFeB)
- 2 パーマロイ層(NiFeB)
- 3 トンネル障壁層(MgO)
- 4 磁化自由層(FeB)
- 10 スピントルク発振素子(STO)
- 12 直流電源
- 13 高周波信号発生器
- 14 スペクトラムアナライザ
- 15 パーソナルコンピューター(PC)
- 16 パワーディバイダ

20

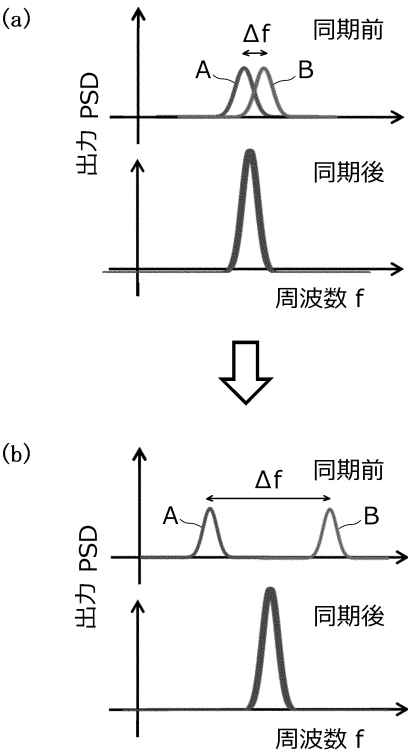
30

40

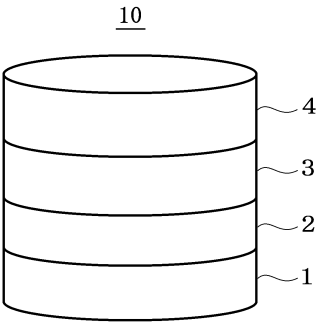
50

【 図 面 】

【 図 1 】

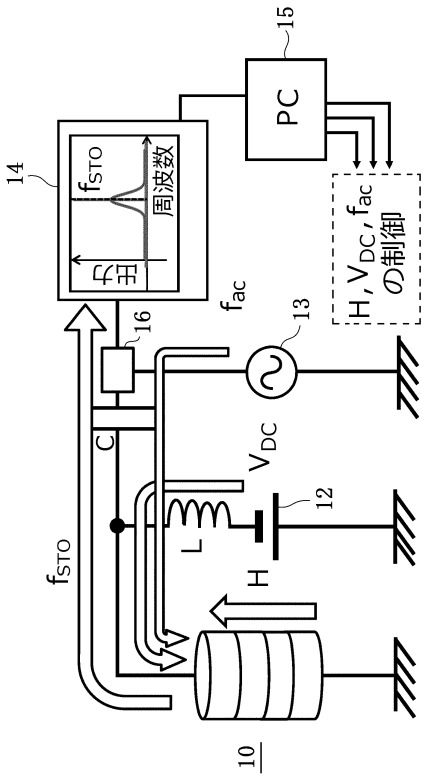


【 図 2 】

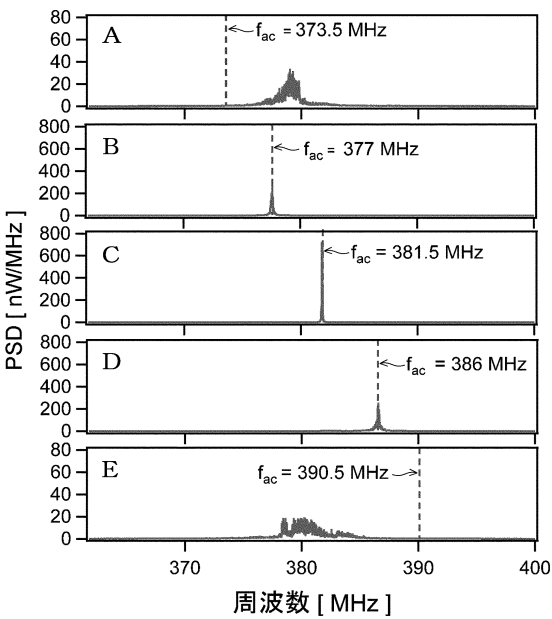


10

【 図 3 】



【 図 4 】

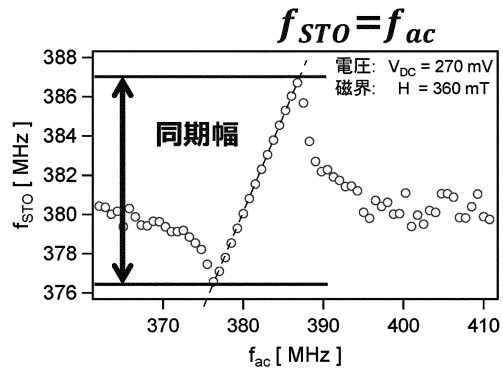


30

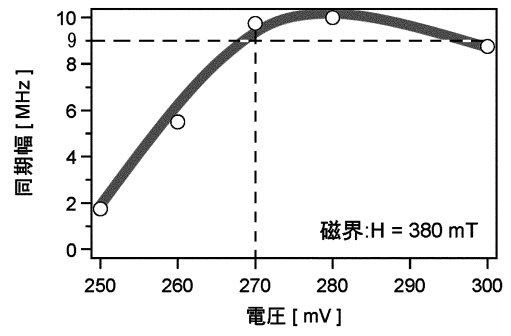
40

50

【図 5】

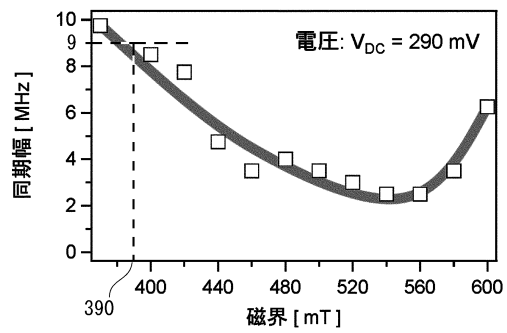


【図 6】

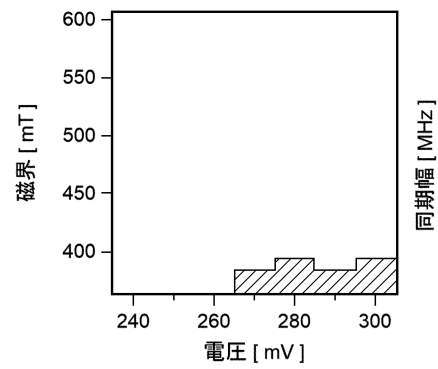


10

【図 7】



【図 8】



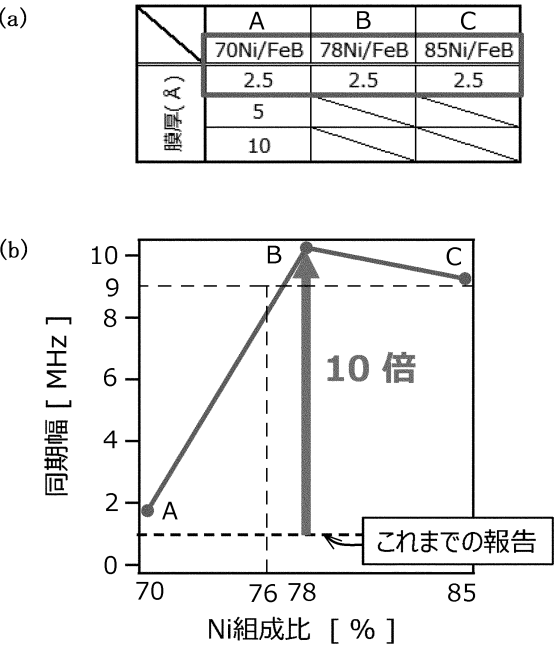
20

30

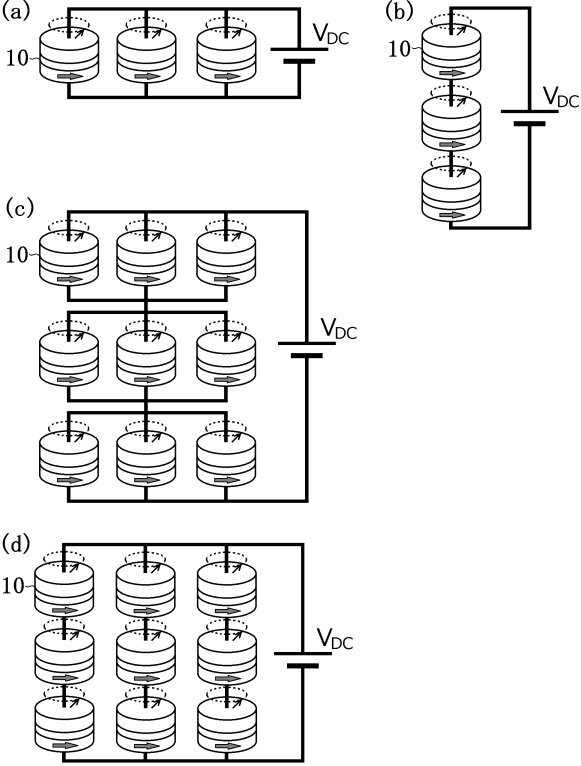
40

50

【図 9】



【図 10】



10

20

30

40

50

フロントページの続き

ンアソシエイティブメモリの研究」委託研究開発、産業技術力強化法第 19 条の適用を受ける特許出願

(72)発明者 鈴木 大貴

茨城県つくば市梅園 1 - 1 - 1 中央第 1 国立研究開発法人産業技術総合研究所内

審査官 宮本 博司

(56)参考文献 特開 2012 - 204682 (JP, A)

特開 2002 - 231904 (JP, A)

国際公開第 2009 / 054182 (WO, A1)

特開 2012 - 253344 (JP, A)

特開 2015 - 060939 (JP, A)

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB 名)

H01L 29 / 82

H10N 50 / 10

H03B 15 / 00