

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第4714918号

(P4714918)

(45) 発行日 平成23年7月6日 (2011.7.6)

(24) 登録日 平成23年4月8日 (2011.4.8)

(51) Int. Cl.

F I

H O 1 L 29/82 (2006.01)

H O 1 L 29/82 Z

H O 1 L 43/08 (2006.01)

H O 1 L 43/08 Z A A Z

H O 1 L 21/8246 (2006.01)

H O 1 L 27/10 4 4 7

H O 1 L 27/105 (2006.01)

G 1 1 B 5/39

G 1 1 B 5/39 (2006.01)

G O 1 R 33/06 R

請求項の数 6 (全 12 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2002-349262 (P2002-349262)
 (22) 出願日 平成14年11月29日 (2002.11.29)
 (65) 公開番号 特開2004-186274 (P2004-186274A)
 (43) 公開日 平成16年7月2日 (2004.7.2)
 審査請求日 平成17年6月10日 (2005.6.10)

(73) 特許権者 503360115
 独立行政法人科学技術振興機構
 埼玉県川口市本町四丁目1番8号
 (74) 代理人 100082876
 弁理士 平山 一幸
 (72) 発明者 猪俣 浩一郎
 宮城県仙台市青葉区栗生1-7-12
 (72) 発明者 前川 禎通
 宮城県仙台市青葉区川内元支倉45-8-403
 (72) 発明者 高橋 三郎
 宮城県岩沼市土ヶ崎4-3-5

審査官 川村 裕二

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スピン注入素子及びスピン注入素子を用いた磁気装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

超伝導体を共通の電極とし、他方の電極を強磁性体とする第1のトンネル接合と第2のトンネル接合とを、備え、

上記第1のトンネル接合と上記第2のトンネル接合とが、上記超伝導体のスピン拡散長よりも短い間隔を置いて該超伝導体上に配置され、

上記第1のトンネル接合は、上記強磁性体から上記超伝導体にスピンを注入するトンネル接合であり、

上記第2のトンネル接合は、上記第1のトンネル接合のスピン注入に伴う電圧を上記強磁性体と上記超伝導体の間で検出するトンネル接合であることを特徴とする、スピン注入素子。

【請求項2】

前記第1のトンネル接合と前記第2のトンネル接合の少なくとも1つが、前記超伝導体上に、絶縁体と強磁性体と非磁性金属と強磁性体とを順に積層したトンネル接合構造になっており、上記非磁性金属の両側の強磁性体が、上記非磁性金属を介して反平行に磁気結合していることを特徴とする、請求項1に記載のスピン注入素子。

【請求項3】

前記非磁性金属を介して反平行に磁気結合している反平行結合膜のアスペクト比が1であることを特徴とする、請求項2に記載のスピン注入素子。

【請求項4】

10

20

前記電圧を検出する第2のトンネル接合の前記強磁性体の上に、反強磁性体が配設され、該反強磁性体は前記強磁性体のスピンを固定することを特徴とする、請求項1～3の何れかに記載のスピ注入素子。

【請求項5】

前記スピ注入素子が、基板上に形成されていることを特徴とする、請求項1～4の何れかに記載のスピ注入素子。

【請求項6】

請求項1～5の何れかに記載のスピ注入素子を有することを特徴とする、スピ注入素子を用いた磁気装置。

【発明の詳細な説明】

10

【0001】

【産業上の利用分野】

本発明は、スピ注入素子及びスピ注入素子を用いた磁気装置に関する。

【0002】

【従来の技術】

金属や半導体に外部磁界を印加したときに、その抵抗が変化する磁気抵抗効果は、磁気ヘッドや磁気センサなどに使用されている。より大きな磁気抵抗を得るために、トンネル接合を用いた磁気抵抗効果素子があり、強磁性スピントンネル接合(MTJ)素子及びスピ注入素子が注目されている。

近年、これらのトンネル接合を用いた磁気抵抗効果素子が、新しい磁界センサや不揮発性磁気メモリ(MRAM)のメモリ素子として注目されている。

20

【0003】

従来のMTJ素子では、強磁性層／絶縁体層／強磁性層の順に積層した積層構造からなる強磁性スピントンネル接合を有している。

外部磁界によって2つの強磁性層の磁化を互いに平行あるいは反平行に制御することにより、膜面垂直方向のトンネル電流の大きさが互いに異なる、いわゆるトンネル磁気抵抗(TMR)効果が室温で得られる(非特許文献1参照)。

このトンネル接合におけるTMRは、用いる強磁性体と絶縁体との界面におけるスピ分極率Pに依存し、二つの強磁性体のスピ分極率をそれぞれ、 P_1 、 P_2 とすると、一般に下記(1)式で与えられることが知られている(非特許文献2参照)。

30

$$TMR = 2 P_1 P_2 / (1 - P_1 P_2) \quad (1)$$

ここで、強磁性層のスピ分極率Pは、 $0 < P \leq 1$ の値をとる。

現在、MTJ素子において、室温で得られているTMRの最大値は、スピ分極率が約0.5のCoFe合金を用いたときの約50%である。

【0004】

MTJ素子は、ハードディスク用読み出しヘッドやMRAMへの応用が期待されている。MRAMではMTJ素子をマトリックス状に配置し、別に設けた配線に電流を流して磁界を印加することで、各MTJ素子を構成する二つの磁性層を互いに平行及び反平行に制御することにより、1、0を記録させる。読み出しはTMR効果を利用して行う。

【0005】

40

一方、強磁性体から非磁性金属に電流を流すと、非磁性金属の長さがスピ拡散長より十分短い場合には、非磁性金属中にスピが溜まること、すなわち、スピ蓄積が知られている。このように、強磁性体から非磁性金属に電流を流すことをスピ注入という。これは、強磁性体が一般にフェルミ準位において異なるスピ密度(アップスピ電子とダウンスピ電子の数が違う)をもつため、強磁性体から非磁性金属に電流を流すとスピ偏極電子が注入され、アップスピ電子とダウンスピ電子のケミカルポテンシャルが異なることに起因していることが報告されている(非特許文献3参照)。

【0006】

このスピ注入が生じる強磁性金属／非磁性金属からなる系において、この非磁性金属に接して第2の強磁性体を配置すると、非磁性金属にスピが溜まっている場合、非磁性金

50

属と第2の強磁性金属の間に電圧が誘起される。この電圧は、第1の強磁性体と第2の強磁性体の磁化を互いに平行あるいは反平行に制御することで、電圧の極性が正と負に反転することが報告されている。そして、この原理を利用したスピントランジスタが提案されている（非特許文献参照4）。

【0007】

上記のスピン注入を用いたトンネル磁気抵抗素子として、スピン注入素子が提案されている（非特許文献5参照）。

図5及び図6は従来のスピン注入素子の構成と動作原理を説明する図である。図5はその断面図であり、図6はその平面図である。図5に示すように、従来のスピン注入素子50は、スピン注入をさせる第1のトンネル接合51と、スピン電流による電圧を検出する第2のトンネル接合52とがスピン拡散長 L_s よりも短い間隔 L_4 で、共通の電極となる非磁性金属53上に配設されている。

第1のトンネル接合51は、非磁性金属53上に絶縁体54と第1の強磁性体55とが順次積層された構造からなり、第2のトンネル接合52は、非磁性金属53上に絶縁体54と第2の強磁性体56とが順次積層された構造からなっている。

直流電源58は、第1のトンネル接合51の非磁性金属53側を正とし、強磁性体55側を負とするように印加され、このとき第1のトンネル接合に流れる電流が I である。一方、電圧検出側の第2のトンネル接合の強磁性体56と、非磁性金属53には、電圧計59が接続されている。

【0008】

図6は図5の平面図であり、基板57上にスピン注入素子50が配設されている。そして、外部磁界60が基板57の面内に平行に印加されている。この外部磁界60が印加されたときに、第1のトンネル接合51の強磁性体55と、第2のトンネル接合52の強磁性体8に生じる磁化が、それぞれ、磁化61、磁化62である。

図示するように、第1のトンネル接合51と第2のトンネル接合52と非磁性金属53のパターンの長辺は、それぞれ L_1 、 L_2 、 L_3 であり、短辺は、それぞれ W_1 、 W_2 、 W_3 である。

【0009】

次に、上記の従来のスピン注入素子の動作について説明する。

従来のスピン注入素子50の第1のトンネル接合51に直流電源58を印加して、トンネル電子によりスピンを注入する。このスピン注入されたスピン電流（図5の I_s ）は、スピン拡散長よりも短い距離 L_4 にある第2のトンネル接合52と電圧計59の接続された閉回路に流れる。それに伴う誘起電圧が、第2のトンネル接合52における強磁性金属56と非磁性金属53に接続した電圧計59により検出される。

ここで、二つのトンネル接合（51、52）に用いられる強磁性体（55、56）の磁化（62、63）が、互いに平行及び反平行になるように外部磁界60を制御することで、誘起電圧の符号を変えることができるために、電圧検出が容易となる。このため、第2の従来のスピン注入素子は、雑音に強いトンネル接合を用いた磁気抵抗効果素子として期待されている。

【0010】

【非特許文献1】

T. Miyazaki et. al, "Spin polarized tunneling in ferromagnet/insulator/ferromagnet junctions", 1995, J. Magn. Magn. Mater., Springer, Vol. 151, p.403

【非特許文献2】

M. Julliere, "Tunneling between ferromagnetic films", 1975, Phys. Lett., Vol. 54 A, p.225

【非特許文献3】

M. Johnson et. al, "Interfacial Charge-Spin Coupling: Injection and Detection of Spin Magnetism in Metal", 1985, Phys. Rev. Lett., American Physical Society, Vol. 55, p.1790

【非特許文献 4】

M. Johnson et. al, "Spin Accumulation", 1993, Phys. Rev. Lett., American Physical Soceiety, Vol. 70, p.2142

【非特許文献 5】

F. E. Jedema et al., "Electrical detection of spin precession in a metallic mesoscopic spin valve", 2002, Nature, Vol. 416, p.713

【0011】

【発明が解決しようとする課題】

上記の従来のスピン注入素子において、検出される出力抵抗 R_S は、下記 (2) 式で測定される。

$$R_S = (V_{AP} - V_P) / I_S = V_S / I_S \quad (2)$$

ここで、 V_{AP} 及び V_P はそれぞれ、二つのトンネル接合の強磁性層 (55, 56) の磁化が反平行及び平行のときの誘起電圧である。そして $V_S = V_{AP} - V_P$ であり、 I_S は第2のトンネル接合52を流れる電流である。

従来のスピン注入素子においては、共通電極である非磁性金属53の抵抗が小さいため、検出される出力抵抗 R_S が $10\text{ m}\Omega$ 以下と小さく、実用上十分大きな信号電圧が得られないという課題がある。

【0012】

また、従来のスピン注入素子の積層構造においては、スピン注入する側の第1のトンネル接合51の強磁性体55の磁化61を反転させ、他方の検出する側の第2のトンネル接合52の強磁性体56の磁化62は固定させる必要があるために、第1のトンネル接合51と第2トンネル接合52の大きさを、互いに変える必要があった。このために、第2のトンネル接合52の強磁性体56のアスペクト比 (長さ/幅) を第1のトンネル接合51のそれよりも大きくすることが必要であった。

【0013】

また、従来のスピン注入素子50では、第1のトンネル接合51と第2のトンネル接合52の間隔である L_4 は、スピン拡散長 λ_N よりも小さくしなければならない。ここで、 λ_N は、一般に $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下である。従って、トンネル接合を形成する強磁性体 (55, 56) の大きさも $1\text{ }\mu\text{m}$ 以下で、さらに、サブ μm 以下でなければならない。このように、強磁性体の寸法が小さくなると外部磁界を印加したときに強磁性体の反磁界が増大するため、磁化反転に必要な外部磁界の大きさである、磁化反転磁界が増大する。

これにより、従来のスピン注入素子は、強磁性体の寸法が小さくなると、磁化反転磁界が大きくなり、低磁界で動作しないという課題がある。

【0014】

さらに、従来のスピン注入素子をMRAMのメモリ素子として利用する場合に、メモリの大容量化をするためには、1個のスピン注入素子の素子寸法はできるだけ小さくしたいという要求がある。

しかし、上述したように、従来のスピン注入素子50の強磁性体 (55, 56) の寸法が小さくなると磁化反転磁界が増大する。従って、MRAM内に別に設ける磁界を発生させる配線に大きな電流を流して、外部磁界を印加する必要がある、消費電力の増大を招く。一方、外部磁界を発生させる配線における消費電力を抑えるために、従来のスピン注入素子50におけるスピン注入をさせる第1のトンネル接合51を低磁界で磁化反転させるためには、その強磁性体51の面積をある程度大きくする必要がある。

従って、従来のスピン注入素子50を、例えば、メモリのMRAMの記憶素子に使用すると、磁化反転磁界を低下させることと、素子面積を小さくすることは、トレードオフの関係にあった。このため、例えば、磁化反転磁界を低下させる場合には、トンネル接合の素子面積が大きくなり、大容量化に限界が生じるという課題がある。

【0015】

本発明は、上記課題に鑑み、低電流、かつ、低磁界でスピン注入に伴う抵抗変化が大きく、大きな信号電圧が得られ、かつ、素子寸法を微細化しても低磁界で磁化反転ができるス

10

20

30

40

50

ピン注入素子及びスピン注入素子を用いた磁気装置を提供することを目的としている。

【0016】

【課題を解決するための手段】

本発明者らは、スピン注入素子の非磁性金属のスピン蓄積の理論研究を行い、非磁性金属を半導体、半金属、超伝導体のいずれかを選択して用いれば、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s を、従来のスピン注入素子の非磁性導体が金属であった場合に比べて、著しく大きくなることを見出し本発明を完成するに至った。

【0018】

上記目的を達するため、本発明のスピン注入素子は、超伝導体を共通の電極とし、他方の電極を強磁性体とする第1のトンネル接合と第2のトンネル接合とを、備え、第1のトンネル接合と第2のトンネル接合とが、超伝導体のスピン拡散長よりも短い間隔を置いて超伝導体上に配置され、第1のトンネル接合は、強磁性体から超伝導体にスピンを注入するトンネル接合であり、第2のトンネル接合は、第1のトンネル接合のスピン注入に伴う電圧を強磁性体と超伝導体の間で検出するトンネル接合であることを特徴とする。

10

【0019】

上記構成において、第1のトンネル接合と第2のトンネル接合の少なくとも1つが、超伝導体上に、絶縁体と強磁性体と非磁性金属と強磁性体とを順に積層したトンネル接合構造でなっており、非磁性金属の両側の強磁性体が、非磁性金属を介して反平行に磁気結合していてもよい。

また、非磁性金属を介して反平行に磁気結合している反平行結合膜のアスペクト比が1であることが好ましい。

20

また、電圧を検出する第2のトンネル接合の強磁性体の上に、反強磁性体が配設され、反強磁性体は強磁性体のスピンを固定することが好ましい。また、スピン注入素子が、基板上に形成されていればよい。

【0020】

上記構成によれば、本発明のスピン注入素子は、キャリア密度が非磁性金属に比べて小さい超伝導体を用いることで、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s を、従来のスピン注入素子の非磁性導体が金属であった場合に比べて著しく大きくすることができる。

そして、低電流、かつ、低磁界で、スピン注入に伴う抵抗変化が大きいため大きな信号電圧が得られる。さらに、素子寸法を微細化しても低磁界で磁化反転ができるスピン注入素子を提供できる。

30

【0021】

また、本発明の磁気装置は、上記構成のスピン注入素子を有することを特徴とする。この構成によれば、本発明のスピン注入素子は、低磁界、かつ、低電流で大きな出力抵抗 R_s を有し、さらに、素子寸法の微細化ができるので、高感度の磁界センサ、高感度磁気ヘッド、信号電圧の大きい大容量MRAMなどの磁気装置を提供することができる。

【0022】

【発明の実施の形態】

以下、本発明によるスピン注入素子及びスピン注入素子を用いた磁気素子の実施の形態を図面により詳細に説明する。

40

図1は、本発明のスピン注入素子の構成と動作原理を示す断面図である。図1に示すように、本発明のスピン注入素子1は、スピン注入をさせる第1のトンネル接合2と、スピン電流による電圧を検出する第2のトンネル接合3が、スピン拡散長 L_s よりも短い間隔 L_4 で、共通の電極となる非磁性導電体4または超伝導体4'上に配設されている。

第1のトンネル接合2は、非磁性導電体4または超伝導体4'上に、絶縁体5と、第1の強磁性体6と、が順次積層された構造からなっている。第2のトンネル接合3は、非磁性導電体4または超伝導体4'上に、絶縁体5と、第2の強磁性体7と、反強磁性体8と、が順次積層された構造からなっている。

直流電源9は、第1のトンネル接合2の非磁性導電体4または超伝導体4'側を正とし、強磁性体6側を負とするように印加され、このとき第1のトンネル接合に流れる電流が

50

Iである。一方、検出側の第2のトンネル接合の反強磁性体8と非磁性導電体4または超伝導体4'には、電圧計10が接続されている。

ここで、非磁性導電体4は、半導体、半金属のいずれか1つである。なお、非磁性導電体4と超伝導体4'は、置き換えができるので差し支えない限り、非磁性導電体4として説明する。

【0023】

図2は、図1に対応する平面図であり、例えば、絶縁物で被覆された基板11上に、本発明のスピン注入素子1が配設されている。そして、外部磁界12が基板11の面内に平行に印加されている。図には、外部磁界12が印加されたときの第1のトンネル接合の強磁性体6に生じる磁化13と、第2のトンネル接合の強磁性体8に生じる磁化14を示している。

10

図示するように、第1のトンネル接合2と第2のトンネル接合3と非磁性導電体4のパターンの長辺は、それぞれ、L1、L2、L3であり、短辺は、それぞれW1、W2、W3である。

【0024】

ここで、本発明が、従来のスピン注入素子50と異なるのは、2つのトンネル接合(2, 3)の共通電極を非磁性金属ではなく非磁性導電体4または超伝導体4'とすることと、検出側の第2のトンネル接合3が、強磁性体7上にさらに、反強磁性体8が積層されていることである。

最初に、非磁性導電体4として、半導体または半金属を用いる理由について説明する。

20

本発明者らは、本発明のスピン注入素子の理論計算を行い、非磁性導電体4が半導体と半金属のような電気伝導体の場合、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s は以下の(3)式で与えられることを見出した。

$$R_s = P_j^2 R_N \exp(-L_4 / \lambda_N) \quad (3)$$

ここで、 P_j はトンネル接合を形成している強磁性体(6, 7)のスピン分極率(ここでは二つの強磁性体(6, 7)は同じ材質としている)、 R_N は非磁性導電体4の抵抗、 L_4 は第1のトンネル接合2と第2のトンネル接合3間の距離、 λ_N は非磁性導電体4のスピン拡散長である。

【0025】

この(3)式から、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s は、強磁性体(6, 7)のスピン分極率が決まれば、非磁性導電体4の抵抗 R_N が大きいほど、そして、 L_4 は λ_N に比べて十分小さくすれば大きくすることができる。

30

非磁性導電体4として、半導体または半金属を用いれば、これらは、従来のスピン注入素子50の非磁性金属53に用いられていた通常の金属よりもキャリア密度が小さく抵抗が高いので、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s を大きくすることができる。

【0026】

さらに、共通電極として超伝導体4'を用いた場合においては、スピン蓄積によって得られる出力抵抗 R_s' は、以下の(4)式及び(5)式で与えられることを見出した。

$$R_s' = P_j^2 R_N \exp(-L / \lambda_N') / 2 f_0(\Delta) \quad (4)$$

$$f_0(\Delta) = 1 / [\exp(\Delta / k_B T) + 1] \quad (5)$$

40

ここで、 R_N は超伝導体4'の抵抗、 λ_N' は超伝導体のスピン拡散長、 $f_0(\Delta)$ は、超伝導体4'のエネルギーギャップ Δ に関係する式であり、 k_B はボルツマン定数、 T は絶対温度(K)である。

【0027】

$f_0(\Delta)$ は、 Δ が0のときは超伝導体4'でなくなり、このとき $f_0(\Delta) = 1/2$ となるので、(4)式は(3)式と同じになる。

通常の超伝導体4'では、 $f_0(\Delta)$ は $1/2$ より小さいので、(4)式及び(5)式から、超伝導体4'を用いると通常の金属よりもキャリア密度が小さく抵抗が高いので、スピン蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s を大きくすることができる。また、その値は Δ が大きい程大きくすることができる。

50

以上のことから、本発明のスピンの注入素子の非磁性導電体 4 が半導体、半金属、超伝導体のいずれの場合においても、従来のスピン注入素子 50 の非磁性金属 53 に用いられていた通常の金属よりスピンの溜まり易く、結果として出力抵抗 R_s を大きくすることができる。

【0028】

次に、検出側の第 2 のトンネル接合 3 の強磁性体 7 上に、さらに、反強磁性体 8 が配設される理由について説明する。

第 2 のトンネル接合 3 においては、強磁性体 7 と反強磁性体 8 との交換相互作用によるスピンのバルブ効果により、強磁性体 7 の磁化 14 によるスピンの 1 方向に固定される。このため、従来のスピン注入素子 50 のように、第 2 のトンネル接合 52 の強磁性層 56 のアスペクト比（長さ/幅）を第 1 のトンネル接合 51 のそれよりも大きくする必要がなくなり、素子寸法を小さくできる。

10

【0029】

次に、本発明のスピンの注入素子の別の実施の形態について説明する。

図 3 は、本発明の別の実施の形態のスピンの注入素子の構成と動作原理を示す断面図である。

本発明のスピンの注入素子 20 は、スピンの注入をさせる第 1 のトンネル接合 21 と、スピンの電流による電圧を検出する第 2 のトンネル接合 22 が、スピンの拡散長 L_s よりも短い間隔 L_4 で、共通の電極となる非磁性導電体 4 又は超伝導体 4' 上に配設されている。

本発明のスピンの注入素子 20 が、スピンの注入素子 1（図 1 参照）と異なっているのは、第 1 のトンネル接合 21 と第 2 のトンネル接合 22 が、非磁性導電体 4 または超伝導体 4' 上に絶縁体 5 と、第 1 の強磁性体 23 と、非磁性金属 24 と、第 2 の強磁性体 25 と、が順次積層された構造からなっている点である。第 1 のトンネル接合 21 と第 2 のトンネル接合 22 においては、非磁性金属 24 の両側の二つの強磁性層（23, 25）は、図示するように反平行に磁気結合している。他の構成と対応する平面図は、図 1 及び図 2 と同じであるので、説明は省略する。

20

【0030】

次に、本発明の実施の形態であるスピンの注入素子 20 の変形例について説明する。

図 4 は、本発明のスピンの注入素子の変形例の構成と動作原理を示す断面図である。本発明のスピンの注入素子 30 においては、スピンの注入をさせる第 1 のトンネル接合 21（図 3 参照）とスピンの電流による電圧を検出する第 2 のトンネル接合 3（図 1 参照）が、スピンの拡散長 L_s よりも短い間隔 L_4 で、共通の電極となる非磁性導電体 4 または超伝導体 4' 上に配設されている。他の構成と対応する平面図は、図 1～図 3 と同じであるので、説明は省略する。

30

【0031】

次に、上記の構成のスピンの注入素子（20, 30）における二つのトンネル接合のうち少なくとも一つを、非磁性金属 24 を介して反平行に磁気結合した二つの強磁性層（23, 25）を用いた第 1 のトンネル接合 21 とする理由について述べる。

スピンの注入素子（20, 30）の第 1 のトンネル接合 21 において、非磁性金属 24 を介して反平行に磁気結合した二つの強磁性体（23, 25）を用いることで、外部磁界 12 を印加したときに強磁性体（23, 25）に生じる反磁界が低減し、外部磁界 12 が低いときでも強磁性体（23, 25）の磁化が容易に行うことができる。

40

これにより、第 1 のトンネル接合 21 が低磁界で磁化反転される、すなわち、磁化反転磁界が小さくなるので、素子寸法の微細化が可能となる。特に、アスペクト比が 1 の反平行結合膜を用いると反磁界係数がゼロになるため、磁化反転磁界を著しく低減できる。従って、この場合には、さらに、スピンの注入素子の素子寸法を小さくできる。

【0032】

次に、本発明のスピンの注入素子を用いた磁気装置に係る実施の形態を示す。

図 1 乃至図 4 に示すように、本発明のスピンの注入素子は、低電流、かつ、低磁界においてスピンの蓄積によって得られる出力抵抗値 R_s が非常に大きくなる。本発明のスピンの注入素

50

子は、低電流、かつ、低磁界において大きな出力抵抗値 R_s を示すので、大きな出力電圧が得られ、磁気抵抗センサとして用いれば、感度の高い磁気素子を得ることができる。

また、本発明のスピン注入素子は、低電流、かつ、低磁界において大きな出力抵抗値 R_s を示すので、大きな出力電圧が得られ、感度の高い読み出し用の磁気装置である磁気ヘッドを構成することができる。

また、本発明のスピン注入素子をマトリックス状に配置し、別に設けた配線に電流を流して外部磁界を印加することで、スピン注入素子を構成する第1のトンネル接合の強磁性体の磁化を、外部磁界により互いに平行と反平行に制御することにより、第2のトンネル接合に誘起される電圧の符号が正の状態と負の状態となり、保持、即ち記録ができる。

これを1、0として記録させることで、MRAMなどの磁気装置を構成することができる。また、本発明のスピン注入素子においては、素子面積を小さくできるので、MRAMなどの磁気装置の大容量化が達成できる。

【0033】

次に、本発明のスピン注入素子の実施例について説明する。

(実施例1)

本発明の実施の形態によるスピン注入素子1（図1参照）を以下のようにして製作した。

基板11として半絶縁性GaAs基板を用い、この基板上に、膜厚100nmのSiを不純物として添加した非磁性導電体4となるGaAs薄膜を分子線エピタキシャル成長法（Molecular Beam Epitaxy：MBE）法を用いて成長させた。

このGaAs薄膜上に、Alを1.2nm成膜した。このAl膜をプラズマ酸化法を用いて酸化させAl酸化物として、絶縁体5とした。次に、Al酸化物上に強磁性体（6，7）となるCoを3nm、反強磁性体8としてIrMnを10nm堆積した。

上記多層膜を、電子線リソグラフィとArイオンミリングを用いて微細加工し、図1に模式的に示したような、SiドープGaAs膜を一方の非磁性導電体4とする二つのトンネル接合（2，3）を配置した構造を作製した。

ここで、SiドープGaAs膜の幅 W_3 は0.25 μm で、長さ L_3 は2 μm である。第1のトンネル接合2と第2のトンネル接合3の大きさは、共に、0.5 μm ×1.5 μm とした。また、二つのトンネル接合間の距離 L_4 は、1 μm 以下で種々変えた。

【0034】

このようにして製作した、本発明のスピン注入素子1の第1のトンネル接合2において、CoからAl酸化膜を介してSiドープGaAs膜に電流Iを流し、第2のトンネル接合のCoとSiドープGaAs膜の間の電圧を測定した（図1参照）。

図2に示すように、外部磁界12を印加して、第1のトンネル接合2のCoの磁化13を反転させ、二つのCo層の磁化が互いに平行及び反平行の状態での電圧測定を行い、（2）式の出力抵抗 R_s を求めた。 $L_4 = 0.2\mu\text{m}$ の場合、 $R_s = 1.5\Omega$ であった。この出力抵抗 R_s の値は、通常の金属を用いた従来のスピン注入素子50の場合よりも、約2桁大きな値である。なお、Co膜の磁化反転磁界の値は、約100Oe（エルステッド）であった。

【0035】

(実施例2)

本発明の実施の形態によるスピン注入素子1（図1参照）を以下のようにして製作した。

基板11として熱酸化膜を被覆したSi（シリコン）基板を用い、このSi基板上に、膜厚100nmの超伝導体4'となるNb（ニオブ）の金属薄膜を超高真空スパッタ装置を用いて堆積し、このNb薄膜上に、Alを1.5nm成膜した。

このAl膜をプラズマ酸化法を用いて酸化し、絶縁体5となるAl酸化物とした。次に、Al酸化物上に強磁性体（6，7）となるCo₉₀Fe₁₀合金膜を5nm、反強磁性体8としてIrMnを10nm堆積した。

上記多層膜を、電子線リソグラフィとArイオンミリングを用いて微細加工し、図1

10

20

30

40

50

に模式的に示したような、Nb薄膜を一方の非磁性導電体4とする二つのトンネル接合（2，3）を配置した構造を作製した。

ここで、Nb薄膜の幅W3は0.25 μmで、長さL3は2 μmである。第1のトンネル接合2と第2のトンネル接合3の大きさは、共に、0.5 μm×1.5 μmとした。また、二つのトンネル接合間の距離L4は、1 μm以下で種々変えた。

【0036】

このようにして製作した本発明のスピン注入素子1の第1のトンネル接合2において、1.5 Kの温度で、Co₉₀Fe₁₀合金膜6からAl酸化膜を介してNb薄膜に電流Iを流し、第2のトンネル接合3のCo₉₀Fe₁₀合金膜8とNb薄膜の間の電圧を測定した（図1参照）。 10

図2に示すように、外部磁界12を印加して、第1のトンネル接合2のCo₉₀Fe₁₀合金膜の磁化13を反転させ、二つのCo₉₀Fe₁₀合金膜の磁化が互いに平行及び反平行の状態 で電圧測定を行い、（2）式の出力抵抗R_Sを求めた。

L4=0.2 μmの場合、R_S 20 Ωであった。この出力抵抗R_Sは、通常の金属を用いた従来のスピン注入素子50の場合よりも、約3桁大きな値であった。なお、Co膜の磁化反転に必要な外部磁界の値は、約100 Oe（エルステッド）であった。

【0037】

（実施例3）

本発明の実施の形態によるスピン注入素子20を以下のようにして製作した。

実施例2における第1のトンネル接合2のCo₉₀Fe₁₀合金を、Co₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）の3層からなる積層膜にした以外は、実施例2と同様にして、第1のトンネル接合21と第2のトンネル接合22の強磁性体（23，25）が非磁性金属24を介して反平行に磁性結合したスピン注入素子20を作製した（図3参照）。 20

製作の際には、Co₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）の積層構造において、Ruを介して結合する2つの強磁性体であるCo₉₀Fe₁₀の磁化が互いに反平行結合していることを確認した。

【0038】

このようにして製作した本発明のスピン注入素子20の第1のトンネル接合21において、1.5 Kの温度で、Co₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）積層膜からAl酸化膜を介してNb膜に電流Iを流した。そして、第2のトンネル接合22のCo₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）積層膜とNb膜の間の電圧を測定した（図3参照）。 30

外部磁界を印加して、第1のトンネル接合21のCo₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）膜の磁化を反転させ、非磁性金属24であるRuに接した二つのCo₉₀Fe₁₀合金膜の磁化が互いに平行及び反平行の状態 で電圧測定を行い、（2）式の出力抵抗R_Sを求めた。

L4=0.2 μmの場合、R_S 20 Ωであった。この出力抵抗R_Sは、通常の金属を用いた従来のスピン注入素子50の場合よりも、約3桁大きな値であった。

【0039】

ここで、第1のトンネル接合21のCo₉₀Fe₁₀（5 nm）／Ru（0.45 nm）／Co₉₀Fe₁₀（3 nm）の積層膜の磁化13が、反平行を保ったまま反転するときの磁化反転磁界の大きさは、約30 Oeであった。 40

この磁化反転磁界の大きさは、上記の実施例2における第1のトンネル接合2において強磁性体6としてCo₉₀Fe₁₀（厚さ5 nm）を用いたときの磁化反転磁界である100 Oeに比べると、1／3以下であった。

【0040】

本発明は、上記実施例に限定されることなく、特許請求の範囲に記載した発明の範囲内で種々の変形が可能であり、それらも本発明の範囲内に含まれることはいうまでもない。例えば、上記実施例では、非磁性導電体として半導体を用いたが、Bi，FeSiなど半金 50

属に適用し得ることは勿論である。また、本発明のスピン注入素子を用いた磁気装置は、磁気抵抗センサ、MRAM、磁気ヘッドについて説明したが、他の磁気装置などに適用し得ることは言うまでもない。

【0041】

【発明の効果】

以上の説明から理解されるように、本発明のスピン注入素子によれば、低電流、かつ、低外部磁界で、非常に大きな出力抵抗 R_s が得られる。

また、本発明のスピン注入素子は、低磁界で非常に大きな出力抵抗 R_s が得られるので、従来のスピン注入素子よりもはるかに微細化が可能である。

【0042】

さらに、このスピン注入素子は、磁気装置に使用することで新規な磁気装置を提供することができる。このスピン注入素子を磁気装置に使用すれば、高感度磁気ヘッドや信号電圧の大きいMRAMを実現できるほか、各種高感度の磁界センサなどが提供できることになる。

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明のスピン注入素子の構成と動作原理を示す断面図である。

【図2】図1の平面図である。

【図3】本発明の別の実施の形態のスピン注入素子の構成と動作原理を示す断面図である。

。

【図4】本発明のスピン注入素子の変形例の構成と動作原理を示す断面図である。

【図5】従来のスピン注入素子の構成と動作原理を示す断面図である。

【図6】図5の平面図である。

【符号の説明】

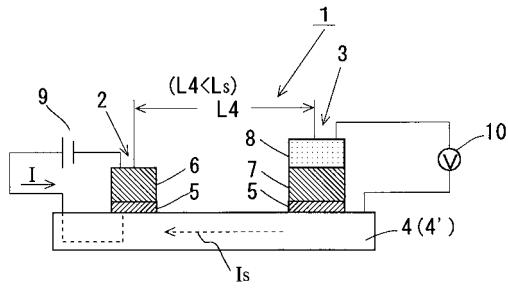
- 1, 20, 30 スピン注入素子
- 2, 21 スピン注入をさせる第1のトンネル接合
- 3, 22 スピン電流を検出する第2のトンネル接合
- 4 非磁性導電体
- 4' 超伝導体
- 5 絶縁体
- 6, 23 第1の強磁性体
- 7, 25 第2の強磁性体
- 8 反強磁性体
- 9 直流電源
- 10 電圧計
- 11 基板
- 12 外部磁界
- 13 第1のトンネル接合に生じる磁化
- 14 第2のトンネル接合に生じる磁化
- 24 非磁性金属

10

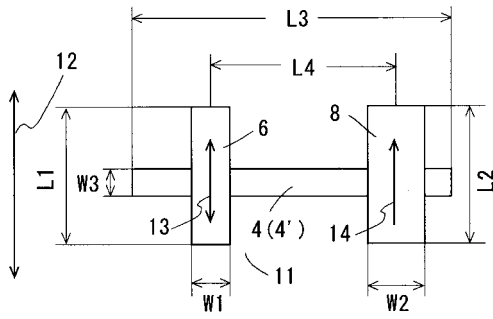
20

30

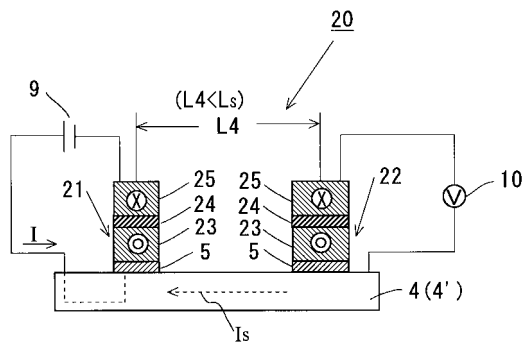
【図 1】



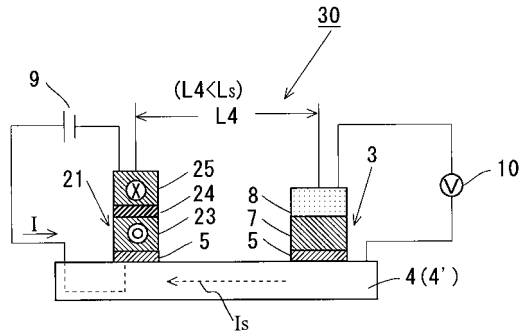
【図 2】



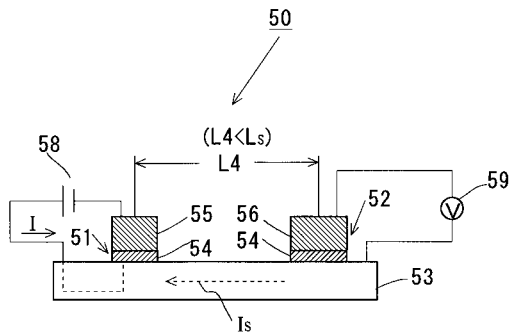
【図 3】



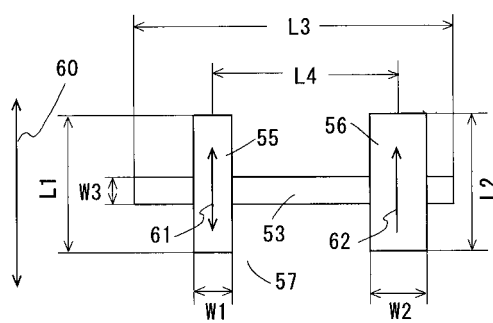
【図 4】



【図 5】



【図 6】



フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
G 0 1 R 33/09 (2006.01) H 0 1 L 39/22 Z
H 0 1 L 39/22 (2006.01)

(56)参考文献 特開平08-249875 (JP, A)
特開2002-280637 (JP, A)
特開2002-026417 (JP, A)
特開2000-113418 (JP, A)
F.J. Jedema et al., Electrical detection of spin precession in a metallic mesoscopic spin valve, NATURE, 2002年 4月18日, Vol.416, P.713-716
F.J. Jedema et al., Electrical spin injection and accumulation at room temperature in an all-metal mesoscopic spin valve, NATURE, 2001年 3月15日, Vol.410, P.345-348

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L 29/82
G01R 33/09
G11B 5/39
H01L 21/8246
H01L 27/105
H01L 39/22
H01L 43/08