

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2007-281247

(P2007-281247A)

(43) 公開日 平成19年10月25日(2007.10.25)

(51) Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO 1 L 21/8246 (2006.01)	HO 1 L 27/10 4 4 7	4 M 1 1 9
HO 1 L 27/105 (2006.01)	HO 1 L 43/08 Z	5 F O 9 2
HO 1 L 43/08 (2006.01)	HO 1 L 29/82 Z	
HO 1 L 29/82 (2006.01)		

審査請求 有 請求項の数 31 O L (全 54 頁)

(21) 出願番号 特願2006-106491 (P2006-106491)
 (22) 出願日 平成18年4月7日(2006.4.7)

(出願人による申告)平成17年度、文部科学省、独立行政法人科学技術振興機構「自己差動増幅検出メモリ素子およびその検出法の開発」委託研究、産業活力再生特別措置法第30条の適用を受ける特許出願

(71) 出願人 000003078
 株式会社東芝
 東京都港区芝浦一丁目1番1号
 (74) 代理人 100058479
 弁理士 鈴江 武彦
 (74) 代理人 100091351
 弁理士 河野 哲
 (74) 代理人 100088683
 弁理士 中村 誠
 (74) 代理人 100108855
 弁理士 蔵田 昌俊
 (74) 代理人 100075672
 弁理士 峰 隆司
 (74) 代理人 100109830
 弁理士 福原 淑弘

最終頁に続く

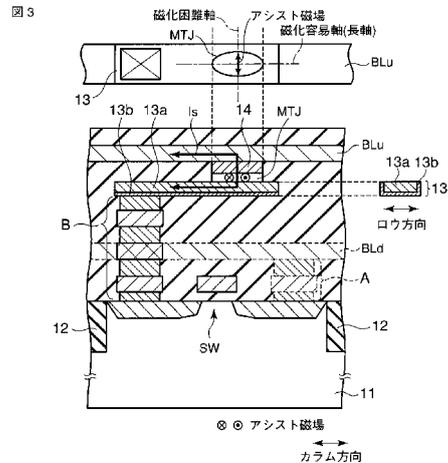
(54) 【発明の名称】 スピンメモリ

(57) 【要約】

【課題】熱揺らぎ耐性を有する低消費電力、低電流書き込み及び高信頼性のスピンメモリを提供する。

【解決手段】本発明の例に関わるスピンメモリは、第1及び第2導電線13、BLuと、第1導電線13の一端と第2導電線BLuとの間に配置される磁気抵抗効果素子MTJと、第1導電線13の他端に接続されるスイッチ素子SWと、第1及び第2導電線13、BLuを介して磁気抵抗効果素子MTJにスピントルクによる磁化反転のためのスピン注入電流Isを流すドライバ/シンカーとを備え、磁気抵抗効果素子MTJは、磁化方向が可変の磁気記録層と、磁化方向が固着される磁気固着層とを有し、磁気記録層の磁化容易軸と第1導電線13の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ である。

【選択図】図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

第 1 及び第 2 導電線と、前記第 1 導電線の一端と前記第 2 導電線との間に配置される第 1 磁気抵抗効果素子と、前記第 1 導電線の他端に接続されるスイッチ素子と、前記第 1 及び第 2 導電線を介して前記第 1 磁気抵抗効果素子にスピントルクによる磁化反転のためのスピン注入電流を流すドライバ/シンカーとを具備し、前記第 1 磁気抵抗効果素子は、磁化方向が可変の磁気記録層と、磁化方向が固着される第 1 磁気固着層とを有し、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第 1 導電線の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ であることを特徴とするスピメモリ。

【請求項 2】

前記第 1 磁気抵抗効果素子は、前記磁気記録層及び前記第 1 磁気固着層の間のトンネルバリア層を有し、前記磁気記録層は、2つの磁性体と、これらの間の非磁性体とを有し、かつ、これら2つの磁性体が反強磁性結合することを特徴とする請求項 1 に記載のスピメモリ。

10

【請求項 3】

前記第 1 磁気抵抗効果素子は、磁化方向が固着される第 2 磁気固着層をさらに有し、前記磁気記録層は、前記第 1 及び第 2 磁気固着層の間に配置されることを特徴とする請求項 2 に記載のスピメモリ。

【請求項 4】

前記第 1 及び第 2 磁気固着層の少なくとも1つは、2つの磁性体と、これらの間の非磁性体とを有し、かつ、これら2つの磁性体が反強磁性結合することを特徴とする請求項 3 に記載のスピメモリ。

20

【請求項 5】

前記第 1 及び第 2 磁気固着層の磁化方向は、それぞれ、反強磁性層により固着されることを特徴とする請求項 3 又は 4 に記載のスピメモリ。

【請求項 6】

前記第 1 及び第 2 磁気固着層において、前記磁気記録層側の磁性体の磁化は、互いに反対方向を向き、前記非磁性体は、Ruであることを特徴とする請求項 3 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のスピメモリ。

【請求項 7】

前記第 1 及び第 2 磁気固着層において、前記磁気記録層側の磁性体の磁化は、互いに同じ方向を向き、前記非磁性体は、Cu, Ag, Auのグループから選択される1つであることを特徴とする請求項 3 乃至 5 のいずれか 1 項に記載のスピメモリ。

30

【請求項 8】

前記磁気記録層を構成する前記2つの磁性体の反強磁性結合の強さは、 0.52 erg/cm^2 以上であることを特徴とする請求項 2 乃至 7 のいずれか 1 項に記載のスピメモリ。

【請求項 9】

前記磁気記録層を構成する前記2つの磁性体の厚さは、互いに異なることを特徴とする請求項 2 乃至 8 のいずれか 1 項に記載のスピメモリ。

【請求項 10】

前記第 1 磁気固着層が前記磁気記録層よりも前記第 1 導電線側にあり、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第 1 磁気固着層の磁化容易軸とが実質的に同じ方向を向き、前記第 1 磁気固着層の前記磁気記録層側の磁性体の磁化が前記第 1 導電線の他端側よりも一端側に近い方向を向いている場合、前記磁気記録層及び前記第 1 磁気固着層の磁化容易軸は、前記第 2 導電線側から前記第 1 導電線側を見て、前記長軸と一致している状態から左回転で前記角度だけ回転していることを特徴とする請求項 2 乃至 9 のいずれか 1 項に記載のスピメモリ。

40

【請求項 11】

前記第 1 磁気固着層が前記磁気記録層よりも前記第 1 導電線側にあり、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第 1 磁気固着層の磁化容易軸とが実質的に同じ方向を向き、前記第 1

50

磁気固着層の前記磁気記録層側の磁性体の磁化が前記第1導電線の一端側よりも他端側に近い方向を向いている場合、前記磁気記録層及び前記第1磁気固着層の磁化容易軸は、前記第2導電線側から前記第1導電線側を見て、前記長軸と一致している状態から右回転で前記角度だけ回転していることを特徴とする請求項2乃至9のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項12】

前記第1磁気抵抗効果素子の磁化状態を平行にするときは、前記スピン注入電流を前記第1導電線の一端から他端に向かって流し、反平行にするときは、前記スピン注入電流を前記第1導電線の他端から一端に向かって流すことを特徴とする請求項10又は11に記載のスピンメモリ。

10

【請求項13】

前記磁気記録層が前記第1磁気固着層よりも前記第1導電線側にあり、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第1磁気固着層の磁化容易軸とが実質的に同じ方向を向き、前記第1磁気固着層の前記磁気記録層側の磁性体の磁化が前記第1導電線の他端側よりも一端側に近い方向を向いている場合、前記磁気記録層及び前記第1磁気固着層の磁化容易軸は、前記第2導電線側から前記第1導電線側を見て、前記長軸と一致している状態から右回転で前記角度だけ回転していることを特徴とする請求項2乃至9のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項14】

前記磁気記録層が前記第1磁気固着層よりも前記第1導電線側にあり、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第1磁気固着層の磁化容易軸とが実質的に同じ方向を向き、前記第1磁気固着層の前記磁気記録層側の磁性体の磁化が前記第1導電線の一端側よりも他端側に近い方向を向いている場合、前記磁気記録層及び前記第1磁気固着層の磁化容易軸は、前記第2導電線側から前記第1導電線側を見て、前記長軸と一致している状態から左回転で前記角度だけ回転していることを特徴とする請求項2乃至9のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

20

【請求項15】

前記第1磁気抵抗効果素子の磁化状態を平行にするときは、前記スピン注入電流を前記第1導電線の他端から一端に向かって流し、反平行にするときは、前記スピン注入電流を前記第1導電線の一端から他端に向かって流すことを特徴とする請求項13又は14に記載のスピンメモリ。

30

【請求項16】

前記第1導電線を流れる前記スピン注入電流の向きと前記第2導電線を流れる前記スピン注入電流の向きとは、互いに異なることを特徴とする請求項1乃至15のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項17】

前記スイッチ素子は、MISFETであることを特徴とする請求項1乃至16のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項18】

前記第1及び第2導電線の少なくとも1つは、ヨーク構造を有することを特徴とする請求項1乃至17のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

40

【請求項19】

前記第2導電線は、ビット線として機能し、センスアンプに接続されることを特徴とする請求項1乃至18のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項20】

前記第1及び第2導電線は、同じ方向に延びることを特徴とする請求項1乃至19のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

【請求項21】

前記第1及び第2導電線は、異なる方向に延びることを特徴とする請求項1乃至19のいずれか1項に記載のスピンメモリ。

50

【請求項 22】

前記スピン注入電流により発生する磁場により前記スピントルクによる磁化反転がアシストされることを特徴とする請求項 1 乃至 21 のいずれか 1 項に記載のスピンメモリ。

【請求項 23】

第 3 導電線と、前記第 1 導電線の一端と前記第 3 導電線との間に配置される第 2 磁気抵抗効果素子とをさらに具備し、前記第 1 導電線は、前記第 2 及び第 3 導電線の間に配置されることを特徴とする請求項 1 乃至 22 のいずれか 1 項に記載のスピンメモリ。

【請求項 24】

前記第 1 及び第 2 磁気抵抗効果素子の構造は、同じタイプであることを特徴とする請求項 23 に記載のスピンメモリ。

10

【請求項 25】

前記第 1 及び第 2 磁気抵抗効果素子には、それぞれ独立にデータが書き込まれることを特徴とする請求項 23 又は 24 に記載のスピンメモリ。

【請求項 26】

前記第 1 及び第 2 磁気抵抗効果素子には、相補データが書き込まれることを特徴とする請求項 23 又は 24 に記載のスピンメモリ。

【請求項 27】

前記磁性体は、Ni-Fe, Co-Fe, Co-Fe-Ni のグループから選択される合金、(Co, Fe, Ni)-(B), (Co, Fe, Ni)-(B)-(P, Al, Mo, Nb, Mn), Co-(Zr, Hf, Nb, Ta, Ti) のグループから選択されるアモルファス材料、及び、Co-Cr-Fe-Al, Co-Cr-Fe-Si, Co-Mn-Si, Co-Mn-Al のグループから選択されるホイスラー材料のうちの少なくとも 1 つから構成されることを特徴とする請求項 1 乃至 26 のいずれか 1 項に記載のスピンメモリ。

20

【請求項 28】

第 1 及び第 2 導電線と、前記第 1 導電線の一端と前記第 2 導電線との間に配置される磁気抵抗効果素子と、前記第 1 導電線の他端に接続されるスイッチ素子と、前記第 1 及び第 2 導電線を介して前記磁気抵抗効果素子にスピントルクによる磁化反転のためのスピン注入電流を流すドライバ/シンカーと、前記スピントルクによる磁化反転をアシストする磁場を発生させるアシスト電流が流れる第 3 導電線とを具備し、前記磁気抵抗効果素子は、磁化方向が可変の磁気記録層と、磁化方向が固着される磁気固着層とを有し、前記磁気記録層の磁化容易軸と前記第 1 導電線の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ であることを特徴とするスピンメモリ。

30

【請求項 29】

前記アシスト電流は、前記スピン注入電流を流している期間の中間点よりも前に遮断することを特徴とする請求項 28 に記載のスピンメモリ。

【請求項 30】

前記第 2 及び第 3 導電線は、同じ方向に延びることを特徴とする請求項 28 又は 29 に記載のスピンメモリ。

【請求項 31】

前記第 2 及び第 3 導電線は、異なる方向に延びることを特徴とする請求項 28 又は 29 に記載のスピンメモリ。

40

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、磁気抵抗効果 (magneto-resistive effect) を利用するスピンメモリに係わる。

【背景技術】

【0002】

磁気抵抗効果は、磁気ヘッドや磁気センサなどで利用される一方、磁気ランダムアクセスメモリ (magnetic random access memory) に代表されるスピンメモリへの適用が検討されている。

50

【0003】

例えば、磁気ランダムアクセスメモリでは、データを磁性層の磁化状態により記憶し、磁気抵抗効果によりデータの読み出しを行う磁気抵抗効果素子をメモリセルとする。磁気ランダムアクセスメモリは、高速、不揮発のRAMとして注目されるが、実用化のために解決しなければならない課題も多い。

【0004】

その一つに書き込み電流の低減がある。書き込み電流により発生する磁場を用いて磁化反転を行う書き込み方式では、メモリセルが縮小(shrink)されるに従い、磁化反転に必要な書き込み電流の値が大きくなる問題がある。

【0005】

そこで考案された技術がスピン注入磁化反転による書き込み方式である(例えば、特許文献1を参照)。

【0006】

この方式は、スピン偏極された電子を磁性層に注入し、スピン偏極された電子と磁性層内の電子との間に生じるトルクにより磁化反転を行うもので、メモリセルが縮小されるに従い、磁化反転に必要なスピン注入電流の値が小さくなる特長を有する。

【0007】

しかし、スピン注入磁化反転による書き込み方式では、スピン注入電流による磁気抵抗効果素子のトンネル絶縁膜の破壊が問題となる。即ち、磁気抵抗効果素子の信頼性を維持するためには、磁化反転に必要なスピン注入電流の電流密度の低減が必須である。

【0008】

最終的な目標としては、スケーラビリティ(scalability)を確保するために、メモリセルが微細化されても、熱揺らぎなく、また、低消費電力及び高信頼性を維持しつつ、低電流密度での磁化反転が可能な技術の開発が望まれる。

【特許文献1】米国特許第6,256,223号

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

本発明の例では、メモリセルが微細化されても、熱揺らぎ耐性を有し、低消費電力及び高信頼性を維持しつつ、低電流密度での磁化反転が可能なスピンメモリを提供する。

【課題を解決するための手段】

【0010】

本発明の例に関わるスピンメモリは、第1及び第2導電線と、第1導電線の一端と第2導電線との間に配置される第1磁気抵抗効果素子と、第1導電線の他端に接続されるスイッチ素子と、第1及び第2導電線を介して第1磁気抵抗効果素子にスピントルクによる磁化反転のためのスピン注入電流を流すドライバ/シンカーとを備え、第1磁気抵抗効果素子は、磁化方向が可変の磁気記録層と、磁化方向が固着される第1磁気固着層とを有し、磁気記録層の磁化容易軸と第1導電線の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ である。

【0011】

本発明の例に関わるスピンメモリは、第1及び第2導電線と、第1導電線の一端と第2導電線との間に配置される磁気抵抗効果素子と、第1導電線の他端に接続されるスイッチ素子と、第1及び第2導電線を介して磁気抵抗効果素子にスピントルクによる磁化反転のためのスピン注入電流を流すドライバ/シンカーと、スピントルクによる磁化反転をアシストする磁場を発生させるアシスト電流が流れる第3導電線とを備え、磁気抵抗効果素子は、磁化方向が可変の磁気記録層と、磁化方向が固着される磁気固着層とを有し、磁気記録層の磁化容易軸と第1導電線の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ である。

【発明の効果】

【0012】

本発明の例によれば、メモリセルが微細化されても、熱揺らぎ耐性を有し、低消費電力及び高信頼性を維持しつつ、低電流密度での磁化反転が可能なスピンメモリを実現できる

10

20

30

40

50

。

【発明を実施するための最良の形態】

【0013】

以下、図面を参照しながら、本発明の例を実施するための最良の形態について詳細に説明する。

【0014】

1. 概要

本発明の例に関わるスピンメモリは、スピントルクにより磁化反転を行うと共に、磁場を磁化反転のアシストとして用いる書き込み方式を前提とし、その特徴は、磁場によるアシスト効果が最も大きくなる磁気抵抗効果素子のレイアウトにある。具体的には、磁気抵抗効果素子の磁化容易軸(axis of easy magnetization)と導電線の長軸とのなす角度を $0^\circ < \theta < 45^\circ$ にする。

10

【0015】

この導電線は、その一端に磁気抵抗効果素子が配置され、他端にスイッチ素子が接続される導電線のことであり、例えば、磁気抵抗効果素子が直接接触する下部電極がこれに相当する。スイッチ素子は、リード/ライト時に磁気抵抗効果素子を選択する機能を有し、例えば、磁気抵抗効果素子の下部に配置される。

【0016】

このようなレイアウトによれば、スピントルクにより磁化反転を行う際に、磁場による磁化反転のアシスト効果を最大にすることが可能となるため、スピン注入電流の電流密度を飛躍的に小さくできる。

20

【0017】

尚、磁気抵抗効果素子は、SAF (synthetic anti-ferromagnetic) - フリー層構造とするのが好ましい。また、磁場については、スピン偏極された電子を発生させるためのスピン注入電流を利用して発生させてもよいし、スピン注入電流とは異なるアシスト電流により発生させてもよい。

【0018】

具体的な書き込みシーケンスと最大のアシスト効果を発揮するために必要な磁気抵抗効果素子の向きについては、実施の形態のなかで詳細に説明する。

【0019】

30

2. 参考例

(1) 磁気抵抗効果素子

図1は、スピンメモリのメモリセルとして用いられる磁気抵抗効果素子の構造例を示している。

【0020】

同図(a)は、磁気抵抗効果素子の基本構造である。

【0021】

電極M1上には、下地層(Ru)が配置され、下地層上には、磁気抵抗効果素子が配置される。磁気抵抗効果素子は、磁気記録層としてのフリー層($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)、磁気固着層としてのピンド(pinned)層($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)、及び、これらの間のトンネルバリア層(MgO)から構成される。ピンド層の磁化方向は、反強磁性層(IrMn)により固着される。反強磁性層上には、保護層としてのキャップ層(Ru/Ta)が配置される。

40

【0022】

同図(b)は、SAF - フリー層構造の磁気抵抗効果素子である。

【0023】

電極M1上には、下地層(Ru)が配置され、下地層上には、磁気抵抗効果素子が配置される。磁気抵抗効果素子は、磁気記録層としてのフリー層($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}/\text{Ru}/\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)、磁気固着層としてのピンド(pinned)層($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)、及び、これらの間のトンネルバリア層(MgO)から構成される。

【0024】

50

フリー層は、2つの磁性体($\text{Co}_{90}\text{Fe}_{10}$)とこれらの間の非磁性体(Ru)とから構成され、2つの磁性体は、非磁性体を介して互いに反強磁性結合している。

【0025】

ピンド層の磁化方向は、反強磁性層(IrMn)により固着される。反強磁性層上には、保護層としてのキャップ層(Ru/Ta)が配置される。

【0026】

S A F - フリー層構造を採用すると、図2に示すように、特に、2つの磁性体の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合の強さ) J_{EX} が

$$J_{EX} = 0.52 \text{ erg/cm}^2$$

のときの熱擾乱耐性が良くなり、スケラビリティが確保される。

10

【0027】

(2) メモリセル構造

図3及び図4は、メモリセル構造の例を示している。

【0028】

半導体基板11内には、S T I (shallow trench isolation)構造の素子分離絶縁層12が配置される。素子分離絶縁層12により囲まれた素子領域内には、スイッチ素子S Wとして、例えば、M I S F E T (M O S F E Tを含む)が配置される。スイッチ素子S Wの一端は、コンタクトパーツAを介して、導電線としての下部ビット線B L dに接続される。下部ビット線B L dは、例えば、カラム方向に延びる。

【0029】

20

導電線13は、ヨーク構造を有し、導電体13aと、導電体13aの下面と側面とを覆う軟磁性体13bとから構成される。磁気抵抗効果素子M T Jは、導電線13の一端に配置される。導電線13の他端は、コンタクトパーツBを介して、スイッチ素子S Wの他端に接続される。

【0030】

導電線13に関して、図3の例では、カラム方向に延び、図4の例では、カラム方向とこれに垂直なロウ方向との間の斜め方向に延びる。

【0031】

磁気抵抗効果素子M T J上には、ビアプラグ(via plug)、金属ハードマスクなどのコンタクトパーツ14を介して、導電線としての上部ビット線B L uが配置される。上部ビット線B L uは、例えば、カラム方向に延びる。

30

【0032】

ここで、磁気抵抗効果素子M T Jは、以下のようにレイアウトされる。

磁気抵抗効果素子M T Jの磁化容易軸(axis of easy magnetization)は、導電線13の長軸(longitudinal direction)に合わせる。磁気抵抗効果素子M T Jの磁化困難軸(axis of hard magnetization)は、磁化容易軸に垂直となる。

【0033】

また、スピン注入電流I sは、導電線13、上部ビット線B L u及び下部ビット線B L dを介して、磁気抵抗効果素子M T Jに与える。本例では、導電線13に流れるスピン注入電流I sの向きと上部ビット線B L uに流れるスピン注入電流I sの向きとが90°以上(図3の例では180°)異なっているが、上部ビット線B L uに流れるスピン注入電流I sの方向を変えて、これを90°以下(図3の例では同じ向き)にしてもよい。

40

【0034】

上述の磁気抵抗効果素子M T Jのレイアウトによれば、図3及び図4の例のいずれにおいても、導電線13に流れるスピン注入電流I sにより発生する磁場(アシスト磁場)の磁力線は、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化困難軸方向に延びる形となる。また、導電線13は、磁力線を収束し易いようにヨーク構造を有する。

【0035】

従って、スピン注入書き込み時に、磁化困難軸方向の磁場が磁気抵抗効果素子M T Jに効率的に作用し、磁化反転がアシストされる。

50

【0036】

図5は、アシスト磁場によるスピン反転エネルギーバリアの低減について示している。同図からは、磁化困難軸方向のアシスト磁場 H_y の値が大きいほど、スピン反転エネルギーバリアが低くなることが分かる。

【0037】

図6のアストロイド曲線 (astroid curve) を持つ磁気抵抗効果素子に対してスピン注入書き込みを実行する場合、磁化反転に必要なスピン注入電流の電流密度は、図7に示すようになる。

【0038】

図8は、スピン注入電流の電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示している。 10

【0039】

試料は、フリー層が単層 (CoFeB:2nm) である磁気抵抗効果素子、IrMn:10nm/ CoFe:3nm/ Ru:0.9nm/ CoFeB:4nm/ MgO:1nm/ CoFeB:2nm とする。この試料に対して、磁化困難軸方向の磁場 (アシスト磁場) の強さをパラメータに、スピン注入電流の電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係をプロットすると、同図に示すようになる。

【0040】

同図から明らかのように、アシスト磁場 H_{hard} が、0 20 25[0e] と大きくなるに従い、磁化反転に必要なスピン注入電流の電流密度が低減される。

【0041】

そこで、このようなことがSAF - フリー層構造を有する磁気抵抗効果素子に対しても言えるか否かを検討する。 20

【0042】

図9及び図10は、SAF - フリー層構造の磁気抵抗効果素子から構成されるメモリセル構造の例を示している。

図9及び図10は、図3及び図4に対応する。

【0043】

SAF - フリー層構造を採用すると、図11に示すように、アストロイド曲線は、磁化困難軸から離れた形となる。

【0044】

この場合、磁化反転に必要なスピン注入電流の電流密度は、磁化困難軸方向の磁場 (アシスト磁場) H_{hard} によっては、ほとんど低減されなくなる。 30

【0045】

その原因は、スピン注入による書き込み原理と磁場による書き込み原理との違いにあると考えられる。スピン注入による書き込みでは、SAF - フリー層を構成する2つの磁性体の厚さの差は、小さいか、若しくは、零 (2つの磁性体の厚さが同じ) であることが好ましい。

【0046】

しかし、磁場による書き込みでは、SAF - フリー層を構成する2つの磁性体の厚さの差が小さいと、磁化反転が行い難くなる。特に、磁化困難軸方向の磁場 H_{hard} のみが存在し、2つの磁性体の厚さが同じ場合には、2つの磁性体間に生じる磁気相互作用 J_{EX} により、磁性スピンのモーメントの方向はより傾き難くなる。 40

【0047】

スピン注入磁化反転による書き込み方式を前提とする場合、SAF - フリー層を構成する2つの磁性体の厚さの差 t は、0nm t 2nmの範囲内に設定することが好ましい。2つの磁性体の厚さの差 t が2nmを越えると、スピン注入効率が下がるためである。

【0048】

この場合、図12に示すように、アシスト磁場 H_{hard} を、0 20 25[0e] 次第に大きくしていても、磁化反転に必要なスピン注入電流の電流密度は、ほとんど低減されない。

【0049】

従って、S A F - フリー層構造を有する磁気抵抗効果素子に対しては、単に、磁化困難軸方向のアシスト磁場を与えるだけでは、スピン注入電流の電流密度の低減という目的を達成できない。

【0050】

3. 実施の形態

以下の実施の形態では、特に、S A F - フリー層構造を有する磁気抵抗効果素子に対して、アシスト磁場による磁化反転のアシスト効果を最大に発揮させるための技術の例について説明する。

【0051】

尚、最大のアシスト効果を発揮する、という効果は、S A F - フリー層構造に限られず、フリー層が単層からなる構造（単層フリー）にも生じるため、これについても、後半において説明する。

【0052】

(1) 第1実施の形態

第1実施の形態は、磁気抵抗効果素子のレイアウトに関する。

【0053】

図13及び図14は、第1実施の形態に関わるレイアウトを示している。

図13は、図9に対応し、図14は、図10に対応する。

【0054】

磁気抵抗効果素子M T Jは、S A F - フリー層構造を有し、導電線（下部電極）13の一端上に配置される。導電線13に関して、図13の例では、カラム方向に伸び、図14の例では、互いに直交するロウ方向とカラム方向との間の斜め方向に伸びる。

【0055】

導電線13の他端は、図9及び図10に示すように、スイッチ素子S Wに接続される。上部ビット線B L uは、カラム方向に伸びる。

【0056】

磁気抵抗効果素子M T Jの磁化容易軸と導電線13の長軸とのなす角度は、 $0^\circ <$
 45° に設定される。

【0057】

このようなレイアウトによれば、スピントルクにより磁化反転を行う際に、磁場による磁化反転のアシスト効果を最大にすることが可能となるため、スピン注入電流の電流密度を飛躍的に小さくできる。

【0058】

図15は、磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線の長軸とのなす角度が 45° のときのアストロイド曲線を示している。

最も単純な場合、即ち、他の条件を考慮しない場合には、磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線の長軸とのなす角度を 45° にしたとき、アストロイド曲線の形状が最も窪むため、この時、アシスト磁場Hhardによる磁化反転のアシスト効果が最大となる。

【0059】

ところで、スピントルクの強さ（効率）は、図16に示すように、MR比(magneto-resistive ratio)に依存する。

【0060】

MR比が約50%以上のとき、スピントルクの強さは、ピンド層とフリー層とのスピン相対角度の関数となり、一定範囲内で最大値をとる。そこで、S A F - フリー層構造を用いる場合には、角度は、MR比に基づいて、スピントルクの強さが最大になる値に設定される。

【0061】

また、MR比が約50%未満のときには、磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線の長軸とのなす角度は、アストロイド曲線の形状に基づいて、上述のように、 45° にする。

【0062】

従って、磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線の長軸とのなす角度は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲内の値にする。

【0063】

(2) 第2実施の形態

第2実施の形態は、磁気抵抗効果素子の構造に関する。

【0064】

図17(a), (b)は、磁気抵抗効果素子の第1例を示している。

【0065】

同図(a)は、ボトムピン型である。

【0066】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、トンネルバリア層を介して、SAF-フリー層が形成される。

【0067】

SAF-フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0068】

この磁気相互作用の強さ J_{EX} の値が大きいと、磁気抵抗効果素子の熱安定性が向上すると共に、磁化反転をコヒーレント(coherent)に行うことができる。

【0069】

SAF-フリー層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0070】

同図(b)は、トップピン型である。

【0071】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、SAF-フリー層が形成される。SAF-フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0072】

SAF-フリー層上には、トンネルバリア層を介して、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0073】

図18及び図19は、磁気抵抗効果素子の第2例を示している。

【0074】

これら磁気抵抗効果素子の特徴は、フリー層の上下にピンド層を形成し、フリー層の上下に電子スピンの反射機能を付加することで磁化反転効率を向上させる点にある。

【0075】

図18は、ボトムピン型である。

【0076】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、トンネルバリア層を介して、SAF-フリー層が形成される。

【0077】

SAF-フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0078】

SAF-フリー層上には、非磁性層を介して、ピンド層が形成される。非磁性層は、ト

10

20

30

40

50

ンネルバリア層よりも薄い誘電体層とルテニウム(Ru)とから構成される。ピンド層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成される。ピンド層を構成する2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用は、反強磁性結合であってもよいし、また、強磁性結合であってもよい。

【0079】

ピンド層上には、ピン層としての反強磁性層が形成され、反強磁性層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0080】

図19は、トップピン型である。

【0081】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、非磁性層を介して、SAF-フリー層が形成される。非磁性層は、ルテニウム(Ru)とトンネルバリア層よりも薄い誘電体層とから構成される。

【0082】

SAF-フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0083】

SAF-フリー層上には、トンネルバリア層を介して、ピンド層が形成される。ピンド層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成される。ピンド層を構成する2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用は、反強磁性結合であってもよいし、また、強磁性結合であってもよい。

【0084】

ピンド層上には、ピン層としての反強磁性層が形成され、反強磁性層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0085】

第2例の磁気抵抗効果素子によれば、スピン反射層により、スピントルクがフリー層の上下でそれぞれ生じるため、磁化反転効率が向上し、スピン注入電流の電流密度の低減に貢献できる。

【0086】

尚、スピン反射層としての非磁性層がRuから構成される場合には、2つのピン層の磁化方向(SAF結合している場合には、トンネルバリア層側の磁性層の磁化方向)を逆向きにするのが好ましい。

【0087】

また、スピン反射層としての非磁性層がCu, Ag, Auのうちの1つから構成される場合には、2つのピン層の磁化方向(SAF結合している場合には、トンネルバリア層側の磁性層の磁化方向)を同じ向きにするのが好ましい。

【0088】

図20及び図21は、磁気抵抗効果素子の第3例を示している。

【0089】

これら磁気抵抗効果素子の特徴も、第2例と同様に、フリー層の上下にピンド層を形成する点にある。

【0090】

図20は、ボトムピン型である。

【0091】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、トンネルバリア層を介して、SAF-フリー層が形成される。

【0092】

10

20

30

40

50

S A F - フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0093】

S A F - フリー層上には、非磁性層を介して、ピンド層が形成される。非磁性層は、トンネルバリア層よりも薄い誘電体層と、銅(Cu)、銀(Ag)、金(Au)のグループから選択される1つの材料とから構成される。

【0094】

ピンド層上には、ピン層としての反強磁性層が形成され、反強磁性層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0095】

図21は、トップピン型である。

【0096】

導電線(下部電極)M1上には、下地層が形成され、下地層上には、ピン層としての反強磁性層が形成される。反強磁性層上には、ピンド層としての強磁性層が形成され、ピンド層上には、非磁性層を介して、S A F - フリー層が形成される。非磁性層は、銅(Cu)、銀(Ag)、金(Au)のグループから選択される1つの材料と、トンネルバリア層よりも薄い誘電体層とから構成される。

【0097】

S A F - フリー層は、2つの強磁性層と、これらの間の非磁性層とから構成され、2つの強磁性層の間に生じる磁気相互作用(反強磁性結合)の強さ J_{EX} は、 0.52 erg/cm^2 以上の値に設定される。

【0098】

S A F - フリー層上には、トンネルバリア層を介して、ピンド層が形成される。ピンド層上には、ピン層としての反強磁性層が形成され、反強磁性層上には、保護層としてのキャップ(cap)層が形成される。

【0099】

第3例の磁気抵抗効果素子においても、スピン反射層により、スピントルクがフリー層の上下でそれぞれ生じるため、磁化反転効率が向上し、スピン注入電流の電流密度の低減に貢献できる。

【0100】

尚、スピン反射層としての非磁性層がCu, Ag, Auのうちの1つから構成される場合には、2つのピン層の磁化方向(S A F結合している場合には、トンネルバリア層側の磁性層の磁化方向)を同じ向きにするのが好ましい。

【0101】

また、スピン反射層としての非磁性層がRuから構成される場合には、2つのピン層の磁化方向(S A F結合している場合には、トンネルバリア層側の磁性層の磁化方向)を逆向きにするのが好ましい。

【0102】

(3) 第3実施の形態

第3実施の形態は、メモリセルアレイ構造に関する。

【0103】

図22は、第3実施の形態に関わるメモリセルアレイを示している。

【0104】

メモリセルは、直列接続される磁気抵抗効果素子M T Jとスイッチ素子(例えば、M I S F E T) S Wとから構成される。

【0105】

ワード線W Lは、ロウ方向に延び、スイッチ素子S Wの制御端子に接続される。ワード線W Lの一端は、ワード線ドライバ・デコーダ15に接続される。

【0106】

10

20

30

40

50

上部ビット線 B L u は、カラム方向に延び、磁気抵抗効果素子 M T J に接続される。上部ビット線 B L u の一端は、スイッチ素子（例えば、M I S F E T）S T 1 を経由して、ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 6 に接続される。スイッチ素子 S T 1 のオン/オフは、例えば、書き込み制御信号 W により制御される。

【 0 1 0 7 】

上部ビット線 B L u の他端は、スイッチ素子（例えば、M I S F E T）S T 2 を経由して、センスアンプ S / A に接続される。スイッチ素子 S T 2 のオン/オフは、例えば、カラム選択信号 C S L 1 , . . . C S L n により制御される。センスアンプ S / A は、例えば、差動アンプから構成される。

【 0 1 0 8 】

下部ビット線 B L d は、カラム方向に延び、スイッチ素子 S W に接続される。下部ビット線 B L d の一端は、スイッチ素子（例えば、M I S F E T）S T 3 を経由して、ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 7 に接続される。スイッチ素子 S T 3 のオン/オフは、例えば、書き込み制御信号 W により制御される。

【 0 1 0 9 】

下部ビット線 B L d の他端は、スイッチ素子（例えば、M I S F E T）S T 4 を経由して、接地点に接続される。スイッチ素子 S T 4 のオン/オフは、例えば、読み出し制御信号 R により制御される。

【 0 1 1 0 】

図 2 3 は、図 2 2 のメモリセルアレイを具体化したものである。

【 0 1 1 1 】

磁気抵抗効果素子 M T J は、導電線（下部電極）1 3 と上部ビット線 B L u との間に配置される。磁気抵抗効果素子 M T J の磁化容易軸と導電線 1 3 の長軸とのなす角度 θ は、 $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲内の値に設定される。

【 0 1 1 2 】

ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 6 は、電源端子 V d d , V s s の間に直列接続される P チャネル M I S F E T P 1 及び N チャネル M I S F E T N 1 から構成される。

【 0 1 1 3 】

ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 7 は、電源端子 V d d , V s s の間に直列接続される P チャネル M I S F E T P 2 及び N チャネル M I S F E T N 2 から構成される。

【 0 1 1 4 】

書き込み時には、書き込み制御信号 W が “ H ” になり、読み出し制御信号 R 及び全てのカラム選択信号 C S L i が “ L ” になる。また、選択された口ウに対応するワード線 W L のレベルが “ H ” になり、その他のワード線のレベルは、“ L ” を維持する。

【 0 1 1 5 】

制御信号 A , C が “ L ”、制御信号 B , D が “ H ” のとき、スピン注入電流は、ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 6 からビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 7 に向かって流れる。

【 0 1 1 6 】

制御信号 A , C が “ H ”、制御信号 B , D が “ L ” のとき、スピン注入電流は、ビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 7 からビット線ドライバ/シンカー・デコーダ 1 6 に向かって流れる。

【 0 1 1 7 】

読み出し時には、読み出し制御信号 R が “ H ” になり、書き込み制御信号 W が “ L ” になる。また、選択された口ウに対応するワード線 W L のレベル及び選択されたカラムに対応するカラム選択信号 C S L i がそれぞれ “ H ” になり、その他のワード線のレベル及びカラム選択信号は、“ L ” を維持する。

【 0 1 1 8 】

10

20

30

40

50

読み出し電流は、例えば、センスアンプ S / A からスイッチ素子 S T 4 を経由して接地点に向かって流れる。読み出し電位 V_r の値は、磁気抵抗効果素子 M T J の磁化状態に応じて変化するため、これを参照電位 V_{ref} と比較することにより、データ値を判定する。

【 0 1 1 9 】

(4) 第 4 実施の形態

第 4 実施の形態は、磁化反転メカニズムに関する。

【 0 1 2 0 】

図 2 4 は、メモリセル構造の例を示している。

磁化反転メカニズムは、様々なファクターによって変わるので、ここでは、特に、磁気抵抗効果素子 M T J の構造(ボトムピン型又はトップピン型)と、ピンド層の磁化方向とに着目し、磁化反転メカニズムを説明する。

【 0 1 2 1 】

A. ボトムピン型(ピンド層右向き)

図 2 5 及び図 2 6 は、ボトムピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【 0 1 2 2 】

ここで、説明を簡単にするため、フリー層の磁化容易軸とピンド層の磁化容易軸とは実質的に同じ方向を向いていると仮定する。

【 0 1 2 3 】

ピンド層右向きとは、ピンド層の磁化が導電線 1 3 の他端側(スイッチ素子 S W が接続される側)よりも一端側(磁気抵抗効果素子 M T J が配置される側)に近い方向を向いている状態をいう。また、ピンド層が S A F 構造を有している場合には、ピンド層の磁化とは、ピンド層のフリー層側の磁性体の磁化のことをいう。

【 0 1 2 4 】

磁気抵抗効果素子 M T J がボトムピン型(ピンド層右向き)の場合、磁気抵抗効果素子 M T J のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(上部ビット線側から導電線 1 3 側をみて)、導電線(下部電極) 1 3 の長軸と一致した状態から左回転で角度 $(0 < \theta < 45^\circ)$ だけ傾ける。

【 0 1 2 5 】

そして、磁気抵抗効果素子 M T J の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図 2 5 に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線 1 3 の一端から他端に向かって流す。ここで、上述のように、導電線 1 3 の一端とは、磁気抵抗効果素子 M T J が配置される側の端部であり、他端とは、スイッチ素子 S W が接続される側の端部である。

【 0 1 2 6 】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 M T J のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【 0 1 2 7 】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 1 3 の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 M T J に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \theta < 135^\circ$ となる方向である。

【 0 1 2 8 】

従って、小さな電流密度で S A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 M T J の磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【 0 1 2 9 】

また、磁気抵抗効果素子 M T J の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図

10

20

30

40

50

26に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。ここで、導電線13の一端及び他端については、図25で定義した通りである。

【0130】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピントルクを与える。

【0131】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJに対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

10

【0132】

従って、小さな電流密度でSAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJの磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【0133】

B. ボトムピン型(ピンド層左向き)

図27及び図28は、ボトムピン型(ピンド層左向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

20

【0134】

ここで、説明を簡単にするため、フリー層の磁化容易軸とピンド層の磁化容易軸とは実質的に同じ方向を向いていると仮定する。

【0135】

ピンド層左向きとは、ピンド層の磁化が導電線13の一端側(磁気抵抗効果素子MTJが配置される側)よりも他端側(スイッチ素子SWが接続される側)に近い方向を向いている状態をいう。また、ピンド層がSAF構造を有している場合には、ピンド層の磁化とは、ピンド層のフリー層側の磁性体の磁化のことをいう。

【0136】

磁気抵抗効果素子MTJがボトムピン型(ピンド層左向き)の場合、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(上部ビット線側から導電線13側をみて)、導電線(下部電極)13の長軸と一致した状態から右回転で角度 $(0 < \text{角度} < 45^\circ)$ だけ傾ける。

30

【0137】

そして、磁気抵抗効果素子MTJの磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図27に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の一端から他端に向かって流す。

【0138】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJのピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピントルクを与える。

40

【0139】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線13の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJに対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0140】

従って、小さな電流密度でSAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJの磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

50

【0141】

また、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図28に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。

【0142】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子M T Jのフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0143】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子M T Jに対して右向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0144】

従って、小さな電流密度でS A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【0145】

C. トップピン型(ピンド層右向き)

図29及び図30は、トップピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0146】

フリー層の磁化容易軸とピンド層の磁化容易軸とは実質的に同じ方向を向いていると仮定する。また、ピンド層右向きの定義は、上述と同じとする。

【0147】

磁気抵抗効果素子M T Jがトップピン型(ピンド層右向き)の場合、磁気抵抗効果素子M T Jのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(上部ビット線側から導電線13側をみて)、導電線(下部電極)13の長軸と一致した状態から右回転で角度($0 < \text{角度} < 45^\circ$)だけ傾ける。

【0148】

そして、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図29に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。ここで、導電線13の一端及び他端については、図25で定義した通りである。

【0149】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子M T Jのピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0150】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子M T Jに対して右向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0151】

従って、小さな電流密度でS A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【0152】

また、磁気抵抗効果素子M T Jの磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図30に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の一端から他端に向かって流す。

10

20

30

40

50

【0153】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 MTJ のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、 SAF -フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0154】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 13 の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 MTJ に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、 SAF -フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

10

【0155】

従って、小さな電流密度で SAF -フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 MTJ の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【0156】

C. トップピン型(ピンド層左向き)

図31及び図32は、トップピン型(ピンド層左向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0157】

フリー層の磁化容易軸とピンド層の磁化容易軸とは実質的に同じ方向を向いていると仮定する。また、ピンド層左向きの定義は、上述と同じとする。

20

【0158】

磁気抵抗効果素子 MTJ がトップピン型(ピンド層左向き)の場合、磁気抵抗効果素子 MTJ のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(上部ビット線側から導電線13側をみて)、導電線(下部電極)13の長軸と一致した状態から左回転で角度 ($0 < \theta < 45^\circ$) だけ傾ける。

【0159】

そして、磁気抵抗効果素子 MTJ の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図31に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。

【0160】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 MTJ のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、 SAF -フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

30

【0161】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 MTJ に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、 SAF -フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

40

【0162】

従って、小さな電流密度で SAF -フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 MTJ の磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【0163】

また、磁気抵抗効果素子 MTJ の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図32に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の一端から他端に向かって流す。

【0164】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 MTJ のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、 SAF -フリー層の

50

トンネルバリア層側の磁性体内の電子スピんにトルクを与える。

【0165】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 13 の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 MTJ に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、SAF - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き (磁化方向) に対して $90^\circ < \text{相対角} x < 135^\circ$ となる方向である。

【0166】

従って、小さな電流密度で SAF - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 MTJ の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

10

【0167】

E. まとめ

このように、磁化反転のスタート時において、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H の方向と、SAF - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き (磁化方向) との相対角 x を、 $90^\circ < \text{相対角} x < 135^\circ$ にすることで、アシスト効果を最大に発揮することができる。

【0168】

尚、本実施の形態では、SAF - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体は、トンネルバリア層に接触する磁性体としているが、これに限定されることはない。

【0169】

SAF - フリー層を構成する 2 つの磁性体の体積の差は、その上部からみた場合の面積が等しい場合には、2 つの磁性体の厚さの差と考えてもよい。

20

【0170】

磁気抵抗効果素子 MTJ は、SAF - フリー層構造を有するものの他、単層から構成されるフリー層 (単層フリー) を有するものでもよい。

【0171】

また、磁気抵抗効果素子 MTJ は、アシスト磁場を発生させるための導電線 (下部電極) の上部に配置されることを前提としたが、その導電線の下部に配置してもよい。

【0172】

ボトムピン型及びトップピン型には、当然に、図 18 乃至図 21 に示したようなスピン反射層を持つものを含む。

30

【0173】

(5) 第 5 実施の形態

第 5 実施の形態では、磁気抵抗効果素子を傾ける方向 (左回転又は右回転) とアシスト効果との関係について考察する。

【0174】

A. ボトムピン型 (ピンド層右向き)

図 33 及び図 34 は、ボトムピン型 (ピンド層右向き) の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

【0175】

図 33 のシーケンスは、磁気抵抗効果素子 MTJ を反平行状態から平行状態にするときのものであり、図 34 のシーケンスは、磁気抵抗効果素子 MTJ を平行状態から反平行状態にするときのものである。

40

【0176】

CASE 1 は、磁気抵抗効果素子 MTJ の上面からみて、磁気抵抗効果素子 MTJ のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線 (下部電極) の長軸と一致した状態から角度 ($0 < \text{角度} < 45^\circ$) だけ左回転させた場合であり、CASE 2 は、右回転させた場合である。

【0177】

磁化反転期間におけるその他の条件は、第 4 実施の形態と同じとする。

【0178】

50

CASE 1とCASE 2で異なる点は、スピン注入電流により発生する磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時におけるSAF - フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積(厚さ大)を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)との関係にある。磁場Hの向き自体は、CASE 1とCASE 2で同じであるが、磁気抵抗効果素子MTJの回転方向が異なるため、両者の関係が異なる。

【0179】

即ち、CASE 1では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層(厚さ大)内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、 $90^\circ < \text{相対角 } \alpha < 135^\circ$ であるのに対し、CASE 2では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層(厚さ大)内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、 $45^\circ < \text{相対角 } \alpha < 90^\circ$ である。

10

【0180】

この場合、CASE 1では、スピン注入電流を流し続けている磁化反転期間(A~B)のほぼ全てにおいて磁場Hによる磁化反転のアシストがあるが、CASE 2では、磁化反転期間の初期、即ち、スピン注入電流(磁場アシスト)の発生初期(A)においてのみ磁場Hによる磁化反転のアシストがある。

【0181】

具体的には、CASE 2の場合、磁場Hの発生時から、大きな体積を持つ磁性層の磁化方向が磁場Hの方向と同じになるまでの初期においては、磁場Hは、磁化反転をアシストするが、それ以降は、磁場Hは、磁化反転をディスターブするものとなる。即ち、磁場Hの方向と、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層の磁化方向との相対角が小さいため、アシスト期間も短くなる。

20

【0182】

これに対し、CASE 1の場合には、磁場Hの方向と、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層の磁化方向との相対角が大きいため、スピン注入電流により発生する磁場Hは、磁化反転期間の終盤までスピン注入による磁化反転をアシストする。

【0183】

このように、磁気抵抗効果素子を傾ける方向(左回転又は右回転)により、アシスト磁場によるスピン注入磁化反転のアシスト効果が異なる。

【0184】

本例より、ボトムピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 θ だけ左回転させればよいことが分かる。

30

【0185】

B. ボトムピン型(ピンド層左向き)

図35及び図36は、ボトムピン型(ピンド層左向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

【0186】

図35のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを反平行状態から平行状態にするときのものであり、図36のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを平行状態から反平行状態にするときのものである。

40

【0187】

CASE 1は、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 θ ($0 < \theta < 45^\circ$)だけ右回転させた場合であり、CASE 2は、左回転させた場合である。

【0188】

磁化反転期間におけるその他の条件は、第4実施の形態と同じとする。

【0189】

CASE 1では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層(厚さ大)内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、 $90^\circ < \text{相対角 } \alpha < 135^\circ$ で

50

あるのに対し、CASE 2では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層（厚さ大）内の電子スピンの向き（磁化方向）との相対角 α は、 45° 相対角 $\alpha < 90^\circ$ である。

【0190】

この場合、ボトムピン型（ピンド層右向き）と同様に、CASE 1では、スピン注入電流を流し続けている磁化反転期間（A～B）のほぼ全てにおいて磁場Hによる磁化反転のアシストがあるが、CASE 2では、磁化反転期間の初期、即ち、スピン注入電流（磁場アシスト）の発生初期（A）においてのみ磁場Hによる磁化反転のアシストがある。

【0191】

尚、ボトムピン型（ピンド層右向き）とボトムピン型（ピンド層左向き）とで異なる点は、前者については、SAFフリー層の磁化が右回りで反転するのに対し、後者については、SAFフリー層の磁化が左回りで反転することである。

10

【0192】

このように、磁気抵抗効果素子を傾ける方向（左回転又は右回転）により、アシスト磁場によるスピン注入磁化反転のアシスト効果が異なる。

【0193】

本例より、ボトムピン型（ピンド層左向き）の場合には、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線（下部電極）の長軸と一致した状態から角度 θ だけ右回転させればよいことが分かる。

【0194】

20

C. トップピン型（ピンド層右向き）

図37及び図38は、トップピン型（ピンド層右向き）の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

【0195】

図37のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを反平行状態から平行状態にするときのものであり、図38のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを平行状態から反平行状態にするときのものである。

【0196】

CASE 1は、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線（下部電極）の長軸と一致した状態から角度 θ （ $0 < \theta < 45^\circ$ ）だけ右回転させた場合であり、CASE 2は、左回転させた場合である。

30

【0197】

磁化反転期間におけるその他の条件は、第4実施の形態と同じとする。

【0198】

CASE 1とCASE 2で異なる点は、スピン注入電流により発生する磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時におけるSAFフリー層の2つの磁性体のうち大きな体積（厚さ大）を持つ磁性体内の電子スピンの向き（磁化方向）との関係にある。磁場Hの向き自体は、CASE 1とCASE 2で同じであるが、磁気抵抗効果素子MTJの回転方向が異なるため、両者の関係が異なる。

【0199】

40

即ち、CASE 1では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層（厚さ大）内の電子スピンの向き（磁化方向）との相対角 α は、 $90^\circ < \text{相対角 } \alpha < 135^\circ$ であるのに対し、CASE 2では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層（厚さ大）内の電子スピンの向き（磁化方向）との相対角 α は、 $45^\circ < \text{相対角 } \alpha < 90^\circ$ である。

【0200】

この場合、CASE 1では、スピン注入電流を流し続けている磁化反転期間（A～B）のほぼ全てにおいて磁場Hによる磁化反転のアシストがあるが、CASE 2では、磁化反転期間の初期、即ち、スピン注入電流（磁場アシスト）の発生初期（A）においてのみ磁場Hによる磁化反転のアシストがある。

50

【0201】

具体的には、CASE 2の場合、磁場Hの発生時から、大きな体積を持つ磁性層の磁化方向が磁場Hの方向と同じになるまでの初期においては、磁場Hは、磁化反転をアシストするが、それ以降は、磁場Hは、磁化反転をディスターブするものとなる。即ち、磁場Hの方向と、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層の磁化方向との相対角が小さいため、アシスト期間も短くなる。

【0202】

これに対し、CASE 1の場合には、磁場Hの方向と、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層の磁化方向との相対角が大きいため、スピン注入電流により発生する磁場Hは、磁化反転期間の終盤までスピン注入による磁化反転をアシストする。

10

【0203】

このように、磁気抵抗効果素子を傾ける方向(左回転又は右回転)により、アシスト磁場によるスピン注入磁化反転のアシスト効果が異なる。

【0204】

本例より、トップピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 だけ右回転させればよいことが分かる。

【0205】

D. トップピン型(ピンド層左向き)

図39及び図40は、トップピン型(ピンド層左向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

20

【0206】

図39のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを反平行状態から平行状態にするときのものであり、図40のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを平行状態から反平行状態にするときのものである。

【0207】

CASE 1は、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 ($0 < \theta < 45^\circ$) だけ左回転させた場合であり、CASE 2は、右回転させた場合である。

【0208】

磁化反転期間におけるその他の条件は、第4実施の形態と同じとする。

30

【0209】

CASE 1では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層(厚さ大)内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、 $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ であるのに対し、CASE 2では、磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時における大きな体積を持つ磁性層(厚さ大)内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、 $45^\circ < \alpha < 90^\circ$ である。

【0210】

この場合、トップピン型(ピンド層右向き)と同様に、CASE 1では、スピン注入電流を流し続けている磁化反転期間(A~B)のほぼ全てにおいて磁場Hによる磁化反転のアシストがあるが、CASE 2では、磁化反転期間の初期、即ち、スピン注入電流(磁場アシスト)の発生初期(A)においてのみ磁場Hによる磁化反転のアシストがある。

40

【0211】

尚、トップピン型(ピンド層右向き)とトップピン型(ピンド層左向き)とで異なる点は、前者については、SAFフリー層の磁化が左回りで反転するのに対し、後者については、SAFフリー層の磁化が右回りで反転することである。

【0212】

このように、磁気抵抗効果素子を傾ける方向(左回転又は右回転)により、アシスト磁場によるスピン注入磁化反転のアシスト効果が異なる。

【0213】

50

本例より、トップピン型(ピンド層左向き)の場合には、磁気抵抗効果素子MTJの上面からみて、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 だけ左回転させればよいことが分かる。

【0214】

E. まとめ

このように、アシスト効果は、磁気抵抗効果素子MTJを傾ける方向によって異なるが、その傾ける方向は、磁気抵抗効果素子MTJ構造(ボトムピン型又はトップピン型)や、ピンド層の磁化方向などのファクターによって異なる。

【0215】

重要な点は、第4実施の形態で説明したように、磁化反転のスタート時において、スピン注入電流により発生する磁場の方向と、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α が $90^\circ < \alpha < 135^\circ$ となるようにすることである。

【0216】

(6) 第6実施の形態

第6実施の形態は、アシスト磁場をスピン注入電流とは異なるアシスト電流により発生する技術に関する。

【0217】

即ち、スピン注入電流の経路とアシスト電流の経路とを分離し、アシスト電流を流す導電線(書き込み線)を新たに設ける。

【0218】

A. 構造

図41及び図42は、第6実施の形態のメモリセル構造を示している。

【0219】

半導体基板11内には、STI構造の素子分離絶縁層12が配置される。素子分離絶縁層12により囲まれた素子領域内には、スイッチ素子SWとして、例えば、MISFETが配置される。スイッチ素子SWの一端は、コンタクトパーツAを介して、導電線としての下部ビット線BLdに接続される。下部ビット線BLdは、例えば、カラム方向に延びる。

【0220】

磁気抵抗効果素子MTJは、導電線13の一端に配置される。導電線13の他端は、コンタクトパーツBを介して、スイッチ素子SWの他端に接続される。導電線13に関して、図41の例では、カラム方向とこれに垂直なロウ方向との間の斜め方向に延び、図42の例では、カラム方向に延びる。

【0221】

磁気抵抗効果素子MTJ上には、ビアプラグ(via plug)、金属ハードマスクなどのコンタクトパーツ14を介して、導電線としての上部ビット線BLuが配置される。上部ビット線BLuは、例えば、カラム方向に延びる。

【0222】

導電線(書き込み線)18は、ヨーク構造を有し、導電体18aと、導電体18aの下面と側面とを覆う軟磁性体18bとから構成される。導電線18に関して、図41の例では、カラム方向に延び、図42の例では、ロウ方向に延びる。

【0223】

ここで、磁気抵抗効果素子MTJは、その磁化容易軸と導電線13の長軸とのなす角度が $0^\circ < \alpha < 45^\circ$ の範囲内の値になるようにレイアウトされる。

【0224】

また、磁気抵抗効果素子MTJを傾ける方向については、原則として、第5実施の形態に従うものとする。

【0225】

但し、第6実施の形態では、アシスト磁場を発生させるための導電線18を独立に設け

たことにより、磁気抵抗効果素子 M T J を傾ける方向によらず、角度 θ の条件を満たしてれば、最大のアシスト効果を常に得ることができる。

【0226】

B. 磁化反転メカニズム

以下では、磁場による磁化反転のアシスト期間を制御することで、磁気抵抗効果素子 M T J を傾ける方向によらず、常に最大のアシスト効果を得るための磁化反転メカニズムについて説明する。

【0227】

図 4 3 及び図 4 4 は、ボトムピン/トップピン型磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

【0228】

図 4 3 のシーケンスは、磁気抵抗効果素子 M T J を反平行状態から平行状態にするときのものであり、図 4 4 のシーケンスは、磁気抵抗効果素子 M T J を平行状態から反平行状態にするときのものである。

【0229】

既に、第 5 実施の形態において、ボトムピン型(ピンド層右向き)及びトップピン型(ピンド層左向き)の場合には、左回転、トップピン型(ピンド層右向き)及びボトムピン型(ピンド層左向き)の場合には、右回転で、最大のアシスト効果を得ることができることを説明したので、本実施の形態では、磁気抵抗効果素子 M T J を傾ける方向として、以下の場合を検討する。

【0230】

ボトムピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子 M T J の上面からみて、磁気抵抗効果素子 M T J のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 $(0 < \theta < 45^\circ)$ だけ右回転させる。

【0231】

トップピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子 M T J の上面からみて、磁気抵抗効果素子 M T J のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸を、導電線(下部電極)の長軸と一致した状態から角度 $(0 < \theta < 45^\circ)$ だけ左回転させる。

【0232】

まず、スピン注入電流とアシスト電流を発生させる。

【0233】

両者の発生時期は、同じであってもよいし、互いにずらしてもよい。両者の発生時期をずらす場合には、スピン注入電流が先であっても、また、アシスト電流が先であっても、いずれでもよい。

【0234】

第 5 実施の形態で説明したように、磁気抵抗効果素子 M T J を上記条件で傾けた場合、磁化反転期間の初期、即ち、スピン注入電流(磁場アシスト)の発生初期(A)においてのみ磁場 H による磁化反転のアシストがある。

【0235】

そこで、アシスト電流は、S A F - フリー層の大きな体積を持つ磁性層の磁化方向が磁場 H の方向と同じになるまで流し、その後は、アシスト電流を遮断し、スピン注入電流のみによる磁化反転を行う。

【0236】

S A F - フリー層の大きな体積を持つ磁性層の磁化方向が磁場 H の方向と同じになる時点は、スピン注入電流を流している期間の中間点よりも前になる。

【0237】

尚、ボトムピン型(ピンド層左向き)の場合に、磁気抵抗効果素子 M T J を角度 $(0 < \theta < 45^\circ)$ だけ左回転させた場合、及び、トップピン型(ピンド層左向き)の場合に、磁気抵抗効果素子 M T J を角度 $(0 < \theta < 45^\circ)$ だけ右回転させた場合のそれぞれについても、本実施の形態は有効である。

10

20

30

40

50

【0238】

C. まとめ

このように、スピン注入電流による磁化反転期間(A~B)のうち、初期(A)のみにおいて磁場によるアシストを行えば、磁気抵抗効果素子を傾ける方向(左回転又は右回転)によらず、最大のアシスト効果を得ることができる。

【0239】

第6実施の形態では、導電線13, 18、BLu, BLdの間のクロストークを防止するため、アシスト磁場Hの強さは、~数10^{0e}の範囲内に設定することが好ましい。

【0240】

(7) 第7実施の形態

第7実施の形態は、単層からなるフリー層(単層フリー)を持つ磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムに関する。

【0241】

単層フリーを使用した場合にも、磁化反転メカニズムは、SAF-フリー層を使用した場合(第4及び第5実施の形態)と同じである。

【0242】

ピンド層右向き及びピンド層左向きの場合のいずれにおいても、基本的な考え方は、SAF-フリー層を使用した場合と同じであるので、ここでは、ピンド層右向きの場合のみについて説明する。

【0243】

図45及び図46は、ボトムピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0244】

磁気抵抗効果素子MTJがボトムピン型(ピンド層右向き)の場合、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層の磁化容易軸は、その上面からみて、導電線(下部電極)13の長軸と一致した状態から左回転で角度(0° < 45°)だけ傾ける。

【0245】

図47及び図48は、トップピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0246】

磁気抵抗効果素子MTJがトップピン型(ピンド層右向き)の場合、磁気抵抗効果素子MTJのフリー層の磁化容易軸は、その上面からみて、導電線(下部電極)13の長軸と一致した状態から右回転で角度(0° < 45°)だけ傾ける。

【0247】

図49及び図50は、ボトムピン/トップピン型(ピンド層右向き)磁気抵抗効果素子に対する磁化反転シーケンスを示している。

【0248】

図49のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを反平行状態から平行状態にするときのものであり、図50のシーケンスは、磁気抵抗効果素子MTJを平行状態から反平行状態にするときのものである。

【0249】

上述のように、ボトムピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子MTJを角度だけ左回転させ、トップピン型(ピンド層右向き)の場合には、磁気抵抗効果素子MTJを角度だけ右回転させる。

【0250】

ここで、アシスト磁場Hの向きと、磁化反転のスタート時におけるフリー層内の電子スピンの向き(磁化方向)との相対角 α は、90° < 相対角 α < 135°に設定される。この場合、SAF-フリー層構造の場合と同様に、スピン注入電流を流し続けている磁化反転期間のほぼ全てにおいて、アシスト磁場Hによる磁化反転のアシストを行うことができる。

【0251】

10

20

30

40

50

単層フリーを使用した場合においても、アシスト電流を流すための導電線を独立に設け、アシスト電流の経路とスピン注入電流の経路とを別々にすれば、第6実施の形態と同様に、アシスト期間を制御することにより、磁気抵抗効果素子を傾ける方向によらず、最大のアシスト効果を得ることができる。

【0252】

(8) 第8実施の形態

第8実施の形態は、メモリセル構造に関し、1つのスイッチ素子に複数の磁気抵抗効果素子を並列に接続した点に特徴を有する。

【0253】

A. 構造

図51及び図52は、第8実施の形態のメモリセル構造を示している。

【0254】

半導体基板11内には、STI構造の素子分離絶縁層12が配置される。素子分離絶縁層12により囲まれた素子領域内には、スイッチ素子SWとして、例えば、MISFETが配置される。スイッチ素子SWの一端は、コンタクトパーツAを介して、導電線としての下部ビット線BLdに接続される。下部ビット線BLdは、例えば、カラム方向に延びる。

【0255】

磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2は、それぞれ導電線13の一端に配置される。磁気抵抗効果素子MTJ1は、導電線13の一端の上部に配置され、磁気抵抗効果素子MTJ2は、導電線13の一端の下部に配置される。

【0256】

導電線13は、ヨーク構造を有し、導電体13aと、導電体13aの内部と側面とに形成される軟磁性体13bとから構成される。導電線13の他端は、コンタクトパーツBを介して、スイッチ素子SWの他端に接続される。

【0257】

磁気抵抗効果素子MTJ1の上部には、ビアプラグ、金属ハードマスクなどのコンタクトパーツ14を介して、導電線としての上部ビット線BLu1が配置される。上部ビット線BLu1は、例えば、カラム方向に延びる。

【0258】

同様に、磁気抵抗効果素子MTJ2の下部には、ビアプラグ、金属ハードマスクなどのコンタクトパーツ14を介して、導電線としての上部ビット線BLu2が配置される。図51の例では、上部ビット線BLu2は、カラム方向に延び、図52の例では、上部ビット線BLu2は、ロウ方向に延びる。

【0259】

磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2の構造は、同じタイプ(ボトムピン型/トップピン型)である。磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2には、それぞれ独立にデータを書き込むこともできるし、また、同時に、相補データを書き込むこともできる。

【0260】

ここで、磁気抵抗効果素子MTJは、その磁化容易軸と導電線13の長軸とのなす角度が $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲内の値になるようにレイアウトされる。また、磁気抵抗効果素子MTJを傾ける方向(左回転又は右回転)については、第5実施の形態に従うものとする。

【0261】

このような構造によれば、高速読み出し/書き込みのアーキテクチャを実現できる。例えば、2つの磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2に相補データを記憶させることで、読み出しに関しては、磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2のデータを同時に読み出す差動読み出しを実現できる。

【0262】

また、書き込みに関しても、磁気抵抗効果素子MTJ1, MTJ2に相補データを同時

10

20

30

40

50

に書き込むことができる。

【0263】

B. 磁化反転メカニズム

a. ボトムピン型(ピンド層右向き)

図53乃至図56は、ボトムピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0264】

磁気抵抗効果素子MTJ1は、導電線13の上部に配置される。つまり、磁気抵抗効果素子MTJ1のピンド層は、磁気抵抗効果素子MTJ1のフリー層よりも導電線13側にある。

10

【0265】

この場合、図53及び図55に示すように、磁気抵抗効果素子MTJ1のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(図51及び図52の上部ビット線BLU1側から導電線13側をみて)、導電線13の長軸と一致した状態から左回転で角度($0 < \theta < 45^\circ$)だけ傾ける。

【0266】

また、磁気抵抗効果素子MTJ2は、導電線13の下部に配置される。つまり、磁気抵抗効果素子MTJ2のフリー層は、磁気抵抗効果素子MTJ2のピン層よりも導電線13側にある。

【0267】

この場合、図54及び図56に示すように、磁気抵抗効果素子MTJ2のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その下面からみて(図51及び図52の上部ビット線BLU2側から導電線13側をみて)、導電線13の長軸と一致した状態から右回転で角度($0 < \theta < 45^\circ$)だけ傾ける。

20

【0268】

尚、図54及び図56では、磁気抵抗効果素子MTJ2をその上面からみている(図51及び図52の導電線13側から上部ビット線BLU2側をみている)ため、左回転となっているが、これは、図53及び図55と対応をとるためであり、当然に、その下面からみれば、右回転となる。

【0269】

そして、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図53に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の一端から他端に向かって流す。ここで、導電線13の一端とは、磁気抵抗効果素子MTJ1が配置される側の端部であり、他端とは、スイッチ素子SWが接続される側の端部である。

30

【0270】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJ1のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0271】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJ1に対して右向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \theta < 135^\circ$ となる方向である。

40

【0272】

従って、SAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【0273】

同様に、磁気抵抗効果素子MTJ2の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは

50

、図54に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の一端から他端に向かって流す。

【0274】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJ2のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0275】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJ2に対して左向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0276】

従って、SAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJ2の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【0277】

また、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図55に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。

【0278】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJ1のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0279】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJ1に対して右向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0280】

従って、SAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【0281】

同様に、磁気抵抗効果素子MTJ2の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図56に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。

【0282】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJ2のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0283】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場Hは、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJ2に対して左向きに作用する。この磁場Hの方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【0284】

従って、SAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJ2の磁化状態が反

10

20

30

40

50

平行状態から平行状態になる。

【0285】

尚、ボトムピン型(ピンド層左向き)の磁化反転メカニズムについては、ボトムピン型(ピンド層右向き)と同様に考えることができるため、ここでは、その説明を省略する。

【0286】

b. トップピン型(ピンド層右向き)

図57乃至図60は、トップピン型(ピンド層右向き)の磁気抵抗効果素子に対する磁化反転メカニズムを示している。

【0287】

磁気抵抗効果素子MTJ1は、導電線13の上部に配置される。つまり、磁気抵抗効果素子MTJ1のフリー層は、磁気抵抗効果素子MTJ1のピンド層よりも導電線13側にある。

【0288】

この場合、図57及び図59に示すように、磁気抵抗効果素子MTJ1のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その上面からみて(図51及び図52の上部ビット線BLU1側から導電線13側をみて)、導電線13の長軸と一致した状態から右回転で角度($0 < \theta < 45^\circ$)だけ傾ける。

【0289】

また、磁気抵抗効果素子MTJ2は、導電線13の下部に配置される。つまり、磁気抵抗効果素子MTJ2のピンド層は、磁気抵抗効果素子MTJ2のフリー層よりも導電線13側にある。

【0290】

この場合、図58及び図60に示すように、磁気抵抗効果素子MTJ2のフリー層のピンド層側の磁性体の磁化容易軸は、その下面からみて(図51及び図52の上部ビット線BLU2側から導電線13側をみて)、導電線13の長軸と一致した状態から左回転で角度($0 < \theta < 45^\circ$)だけ傾ける。

【0291】

尚、図58及び図60では、磁気抵抗効果素子MTJ2をその上面からみている(図51及び図52の導電線13側から上部ビット線BLU2側をみている)ため、右回転となっているが、これは、図57及び図59と対応をとるためであり、当然に、その下面からみれば、左回転となる。

【0292】

そして、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図57に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線13の他端から一端に向かって流す。

【0293】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子MTJ1のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、SAF-フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【0294】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線13の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子MTJ1に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、SAF-フリー層の2つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \theta < 135^\circ$ となる方向である。

【0295】

従って、SAF-フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子MTJ1の磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【0296】

10

20

30

40

50

同様に、磁気抵抗効果素子 M T J 2 の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図 5 8 に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線 1 3 の他端から一端に向かって流す。

【 0 2 9 7 】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 M T J 2 のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【 0 2 9 8 】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 1 3 の他端から一端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 M T J 2 に対して左向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【 0 2 9 9 】

従って、S A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 M T J 2 の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【 0 3 0 0 】

また、磁気抵抗効果素子 M T J 1 の磁化状態を平行状態から反平行状態にするときは、図 5 9 に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線 1 3 の一端から他端に向かって流す。

【 0 3 0 1 】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 M T J 1 のフリー層からピンド層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと逆向きに偏極された電子スピンは、ピンド層で反射され、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【 0 3 0 2 】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 1 3 の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 M T J 1 に対して右向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる

【 0 3 0 3 】

従って、S A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 M T J 1 の磁化状態が平行状態から反平行状態になる。

【 0 3 0 4 】

同様に、磁気抵抗効果素子 M T J 2 の磁化状態を反平行状態から平行状態にするときは、図 6 0 に示すように、スピン注入電流 I_s を導電線 1 3 の一端から他端に向かって流す。

【 0 3 0 5 】

この場合、スピン注入電流 I_s により発生するスピン偏極された電子の流れ(スピン流)は、磁気抵抗効果素子 M T J 2 のピンド層からフリー層に向かう。この時、ピンド層内の電子スピンと同じ向きに偏極された電子スピンは、S A F - フリー層のトンネルバリア層側の磁性体内の電子スピンのトルクを与える。

【 0 3 0 6 】

これと同時に、スピン注入電流 I_s により発生する磁場 H は、導電線 1 3 の一端から他端をみた場合に、磁気抵抗効果素子 M T J 1 に対して左向きに作用する。この磁場 H の方向は、磁化反転のスタート時において、S A F - フリー層の 2 つの磁性体のうち大きな体積を持つ磁性体内の電子スピンの向き(磁化方向)に対して $90^\circ < \text{相対角} < 135^\circ$ となる方向である。

【 0 3 0 7 】

10

20

30

40

50

従って、S A F - フリー層の磁化が反転し、磁気抵抗効果素子 M T J 2 の磁化状態が反平行状態から平行状態になる。

【0308】

尚、トップピン型(ピンド層左向き)の磁化反転メカニズムについては、トップピン型(ピンド層右向き)と同様に考えることができるため、ここでは、その説明を省略する。

【0309】

C. まとめ

このように、第8実施の形態によれば、導電線13の上下に配置された2つの磁気抵抗効果素子 M T J 1 , M T J 2 に対して、独立にデータを書き込むことができるし、また、相補データを同時に書き込むこともできる。

10

【0310】

(9) 第9実施の形態

第9実施の形態は、材料及びサイズに関する。

【0311】

まず、磁化固着層としてのピンド層は、一方向異方性を有し、磁気記録層としてのフリー層は、一軸異方性を有することが好ましい。また、ピンド層及びフリー層の厚さは、それぞれ0.1nm ~ 100nmの範囲内の値とするのが好ましい。

【0312】

ピンド層又はフリー層を構成する強磁性体は、超常磁性にならないことが必要であり、そのためには、両者ともに、その厚さを0.4nm以上にすることが好ましい。

20

【0313】

ピンド層の磁化方向を反強磁性層により固着する場合、反強磁性層は、Fe(鉄)-Mn(マンガン), Pt(白金)-Mn(マンガン), Pt(白金)-Cr(クロム)-Mn(マンガン), Ni(ニッケル)-Mn(マンガン), Ir(イリジウム)-Mn(マンガン), NiO(酸化ニッケル), Fe₂O₃ のグループから選択される1つにより構成する。

【0314】

反強磁性層を構成する磁性体内には、Ag(銀), Cu(銅), Au(金), Al(アルミニウム), Mg(マグネシウム), Si(シリコン), Bi(ビスマス), Ta(タンタル), B(ボロン), C(炭素), O(酸素), N(窒素), Pd(パラジウム), Pt(白金), Zr(ジルコニウム), Ir(イリジウム), W(タングステン), Mo(モリブデン), Nb(ニオブ), B(ボロン)などの非磁性元素を添加し、その磁気特性、結晶性、機械特性、化学特性などを含む物性を制御してもよい。

30

【0315】

ピンド層の磁化方向を反強磁性層により固着すると、ピンド層の磁化がビット線やワード線からの磁界に影響され難くなり、しっかりと磁化が固着される。また、ピンド層からの漏洩磁界(stray field)を減少でき、さらに、ピンド層を構成する強磁性体の厚さを変えて、フリー層の磁化のシフトを調整できる。

【0316】

ピンド層は、3層構造、例えば、Co(Co-Fe)/ Ru/ Co(Co-Fe), Co(Co-Fe)/ Ir/ Co(Co-Fe), Co(Co-Fe)/ Os(オスニウム)/ Co-(Co-Fe), Co(Co-Fe)/ Re(レニウム)/ Co-(Co-Fe), Co-Fe-B などのアモルファス材料/ Ru/ Co-Fe-B などのアモルファス材料, Co-Fe-B などのアモルファス材料/ Ir/ Co-Fe-B などのアモルファス材料, Co-Fe-B などのアモルファス材料/ Os/ Co-Fe-B などのアモルファス材料, Co-Fe-B などのアモルファス材料/ Re/ Co-Fe-B などのアモルファス材料などから構成する。

40

【0317】

フリー層は、軟磁性体/強磁性体からなる2層構造、又は、強磁性体/軟磁性体/強磁性体からなる3層構造としてもよい。フリー層は、強磁性体/非磁性体/強磁性体という3層構造、さらには、強磁性体/非磁性体/強磁性体/非磁性体/強磁性体からなる5層構造とし、強磁性体同士の磁気相互作用の強さを制御すれば、フリー層のサイズがサブミクロン以下になっても、消費電力の増大は抑えることができる。

【0318】

50

このようなフリー層を構成する強磁性体の種類や厚さなどについては、磁気抵抗効果素子の特性を考慮して決定する。

【0319】

特に、トンネルバリア層に接触する強磁性体は、MR比に与える影響が大きいいため、磁気抵抗効果素子のMR比を大きくするような材料、例えば、Co-Fe, Co-Fe-Ni, FeリッチNi-Feなどから構成する。また、トンネルバリア層に接触しない強磁性体は、NiリッチNi-Fe, NiリッチNi-Fe-Coなどから構成し、大きなMR比を確保しつつ、スイッチング磁場の低減を図る。

【0320】

また、フリー層の構造を、2つの強磁性体とこれらの間の非磁性体とからなる多層構造とし、2つの強磁性体との間の磁気相互作用を反強磁性結合又は強磁性結合させれば、さらなるスイッチング磁場の低減に貢献できる。 10

【0321】

フリー層を構成する磁性体内には、Ag(銀), Cu(銅), Au(金), Al(アルミニウム), Mg(マグネシウム), Si(シリコン), Bi(ビスマス), Ta(タンタル), B(ボロン), C(炭素), O(酸素), N(窒素), Pd(パラジウム), Pt(白金), Zr(ジルコニウム), Ir(イリジウム), W(タングステン), Mo(モリブデン), Nb(ニオブ), B(ボロン)などの非磁性元素を添加し、その磁気特性、結晶性、機械特性、化学特性などを含む物性を制御してもよい。

【0322】

非磁性材料は、Ag(銀), Cu(銅), Au(金), Al(アルミニウム), Ru(ルテニウム), Os(オスミウム), Re(レニウム), Si(シリコン), Bi(ビスマス), Ta(タンタル), B(ボロン), C(炭素), Pd(パラジウム), Pt(白金), Zr(ジルコニウム), Ir(イリジウム), W(タングステン), Mo(モリブデン), Nb(ニオブ)、又は、これらの少なくとも1つを含む合金から構成する。 20

【0323】

トンネルバリア層は、 Al_2O_3 (酸化アルミニウム), SiO_2 (酸化シリコン), MgO (酸化マグネシウム), AlN (窒化アルミニウム), Bi_2O_3 (酸化ビスマス), MgF_2 (フッ化マグネシウム), CaF_2 (フッ化カルシウム), $SrTiO_2$ (酸化チタン・ストロンチウム), $AlLaO_3$ (酸化ランタン・アルミニウム), $Al-N-O$ (酸化窒化アルニウム)などの絶縁体(誘電体)から構成する。

【0324】

トンネルバリア層の厚さは、トンネル電流が流れる程度に薄い方が好ましいため、例えば、10nm以下の値に設定する。 30

【0325】

尚、これらの化合物は、化学量論的にみて、完全に正確な組成である必要はなく、酸素、窒素、フッ素などの欠損、あるいは過不足が存在していてもよい。

【0326】

磁気抵抗効果素子を構成する各層は、例えば、スパッタ法、CVD法、分子線エピタキシャル法などの一般的な薄膜の形成方法を用いて基板の上部に形成する。ここで、基板としては、例えば、Si(シリコン)などの半導体基板の他、 SiO_2 (酸化シリコン), Al_2O_3 (酸化アルミニウム), スピネル, AlN (窒化アルニウム)などからなる基板を使用できる。 40

【0327】

また、基板と磁気抵抗効果素子との間に、下地層、保護層、又は、ハードマスクを配置してもよい。

【0328】

これらの層は、Ta(タンタル), Ti(チタン), Pt(白金), Pd(パラジウム), Au(金), Ti(チタン)/Pt(白金), Ta(タンタル)/Pt(白金), Ti(チタン)/Pd(パラジウム), Ta(タンタル)/Pd(パラジウム), Cu(銅), Al(アルミニウム)-Cu(銅), Ru(ルテニウム), Ir(イリジウム), Os(オスミウム)などから構成する。

【0329】

尚、磁気抵抗効果素子を構成する磁性体は、一般には、Ni-Fe, Co-Fe, Co-Fe-Niのグ 50

ループから選択される合金、(Co, Fe, Ni)-B, (Co, Fe, Ni)-B-(P, Al, Mo, Nb, Mn), Co-(Zr, Hf, Nb, Ta, Ti)のグループから選択されるアモルファス材料、及び、Co-Cr-Fe-Al, Co-Cr-Fe-Si, Co-Mn-Si, Co-Mn-Al のグループから選択されるホイスラー材料のうちの少なくとも1つから選択される。

【0330】

但し、括弧内に含まれる複数の元素は、それらのうちの少なくとも1つが選択されることを意味する。

【0331】

(10) 第10実施の形態

第10実施の形態は、ヨーク構造により、アシスト磁場を効率よく磁気抵抗効果素子に与える技術に関する。 10

【0332】

図61及び図62は、メモリセル構造の例を示している。

【0333】

半導体基板11内には、STI構造の素子分離絶縁層12が配置される。素子分離絶縁層12により囲まれた素子領域内には、スイッチ素子SWとして、例えば、MISFET(MOSFETを含む)が配置される。スイッチ素子SWの一端は、コンタクトパーツAを介して、導電線としての下部ビット線BLdに接続される。下部ビット線BLdは、例えば、カラム方向に延びる。

【0334】

図61の例では、導電線13は、ヨーク構造を有し、導電体13aと、導電体13aの下面と側面とを覆う軟磁性体13bとから構成される。磁気抵抗効果素子MTJは、導電線13の一端に配置される。導電線13の他端は、コンタクトパーツBを介して、スイッチ素子SWの他端に接続される。 20

【0335】

磁気抵抗効果素子MTJ上には、ビアプラグ、金属ハードマスクなどのコンタクトパーツ14を介して、導電線としての上部ビット線BLuが配置される。上部ビット線BLuは、例えば、カラム方向に延びる。上部ビット線BLuは、ヨーク構造を有し、導電体13cと、導電体13cの上面と側面とを覆う軟磁性体13dとから構成される。

【0336】

図61の例では、磁気抵抗効果素子MTJの上部及び下部に配置される導電線の各々がヨーク構造を有し、図62の例では、磁気抵抗効果素子MTJの上部に配置される導電線がヨーク構造を有する。 30

【0337】

磁気抵抗効果素子MTJのレイアウトについては、第4及び第5実施の形態に従うものとする。

【0338】

このような構造によれば、導電線13のみをヨーク構造にする場合と同様に、アシスト磁場の磁力線を収束して、アシスト磁場を効率よく磁気抵抗効果素子に与えることができる。 40

【0339】

4. 実施例

以下、本発明の実施例を説明する。

【0340】

(1) 第1実施例

第1実施例では、ボトムピン型の2つのサンプルに基づき、スピン注入電流の低減に関する効果を検証する。

【0341】

一つは、図17(a)のボトムピン型磁気抵抗効果素子と図24のメモリセル構造を有するサンプル(Sample 1)で、他の一つは、図18のボトムピン型磁気抵抗効果素子と図2 50

4のメモリセル構造を有するサンプル(Sample 2)である。

【0342】

図17(a)の場合、導電線(下部電極)は、Ta/Cu/Taの積層構造とし、下地層は、Ruとする。反強磁性層は、Ir-Mn(10nm)とし、ピンド層としての強磁性層は、ここでは、CoFe(2nm)/Ru(1.5nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。トンネルバリア層は、MgO(1nm)とし、SAF-フリー層は、CoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。キャップ層は、Ruから構成する。

【0343】

図18の場合、導電線(下部電極)は、Ta/Cu/Taの積層構造とし、下地層は、Ruとする。反強磁性層は、Ir-Mn(10nm)とし、ピンド層としての強磁性層は、ここでは、CoFe(2nm)/Ru(1.5nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。トンネルバリア層は、MgO(1nm)とし、SAF-フリー層は、CoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。非磁性層は、AlOx(0.6nm)/Ru(3nm)の2層構造とし、非磁性層上にCoFe(3nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(3nm)の3層からなるピンド層及びIr-Mn(10nm)からなる反強磁性層を配置する。キャップ層は、Ruから構成する。

【0344】

磁気抵抗効果素子は、このような構造を形成した後、一定強度の磁場を与えた状態で温度約360°のアニールを行い、さらに、微細加工技術により、サイズを、例えば、 $0.1 \times 0.2 \mu\text{m}^2$ とし、この後、再び、一定強度の磁場を与えた状態で温度約300°のアニールを行うことで完成する。

【0345】

ここで、Sample 1及びSample 2に関し、温度約300°のアニール後のSAF-フリー層としてのCoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の2つの強磁性層の間の磁気相互作用の強さ J_{EX} は、 1.24 erg/cm^2 である。また、Sample 1及びSample 2に関し、ピンド層の2つの強磁性層の磁気相互作用は、強磁性結合である。

【0346】

磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線(下部電極)の長軸とのなす角度 については、 0° 、 5° 、 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 45° の7種類を用意したが、Sample 1及びSample 2共に、角度 が 40° の場合に、最も小さなスピ注入電流密度で磁化反転が可能となる。

【0347】

但し、磁化反転メカニズムとしては、図25及び図26に示す磁化反転メカニズムを採用する。

【0348】

図63及び図64は、角度 が 40° の場合におけるスピ注入電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示している。

【0349】

図63は、図17(a)の構造に対応し、図64は、図18の構造に対応する。それぞれの図においては、スピ注入電流によるアシスト磁場 H_{hard} の強さをパラメータとして3つの場合を示している。

【0350】

$H_{\text{hard}}=200\text{e}$ 及び $H_{\text{hard}}=200\text{e}$ の場合には、 $H_{\text{hard}}=00\text{e}$ の場合に比べて、磁化反転に必要なスピ注入電流密度が大幅に低減されていることが分かる。

【0351】

第1実施例により得られるスピ注入電流密度の低減効果が顕著であることは、図12と比較すれば、明白である。

【0352】

図65は、角度 とスピ注入電流密度との関係を示している。

【0353】

磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線(下部電極)の長軸とのなす角度 が $0^\circ <$

10

20

30

40

50

45°の範囲内において、角度が0°の場合よりもスピン注入電流密度が低減されていることが分かる。

【0354】

(2) 第2実施例

第2実施例では、トップピン型の2つのサンプルに基づき、スピン注入電流の低減に関する効果を検証する。

【0355】

一つは、図17(b)のトップピン型磁気抵抗効果素子と図24のメモリセル構造を有するサンプル(Sample 3)で、他の一つは、図19のトップピン型磁気抵抗効果素子と図24のメモリセル構造を有するサンプル(Sample 4)である。

10

【0356】

図17(b)の場合、導電線(下部電極)は、Ta/Cu/Taの積層構造とし、下地層は、Ruとする。SAF-フリー層は、CoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とし、トンネルバリア層は、MgO(1nm)とする。ピンド層としての強磁性層は、ここでは、CoFe(2nm)/Ru(1.5nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とし、反強磁性層は、Pt-Mn(14nm)とする。キャップ層は、Ruから構成する。

【0357】

図19の場合、導電線(下部電極)は、Ta/Cu/Taの積層構造とし、下地層は、Ruとする。反強磁性層は、Pt-Mn(14nm)とし、ピンド層としての強磁性層は、ここでは、CoFe(4nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(3nm)の3層構造とする。非磁性層は、Cu(2nm)/AlOx(0.6nm)の2層構造とし、SAF-フリー層は、CoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。トンネルバリア層は、MgO(1nm)とし、トンネルバリア層上にCoFe(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFe(3nm)の3層からなるピンド層及びPt-Mn(14nm)からなる反強磁性層を配置する。キャップ層は、Ruから構成する。

20

【0358】

磁気抵抗効果素子は、このような構造を形成した後、一定強度の磁場を与えた状態で温度約360°のアニールを行い、さらに、微細加工技術により、サイズを、例えば、 $0.1 \times 0.2 \mu\text{m}^2$ とし、この後、再び、一定強度の磁場を与えた状態で温度約300°のアニールを行うことで完成する。

【0359】

ここで、Sample 3及びSample 4に関し、温度約300°のアニール後のSAF-フリー層としてのCoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の2つの強磁性層の間の磁気相互作用の強さ J_{EX} は、 1.24 erg/cm^2 である。また、Sample 3及びSample 4に関し、ピンド層の2つの強磁性層の磁気相互作用は、強磁性結合である。

30

【0360】

磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線(下部電極)の長軸とのなす角度については、0°、5°、10°、20°、30°、40°、45°の7種類を用意したが、Sample 3及びSample 4共に、角度が40°の場合に、最も小さなスピン注入電流密度で磁化反転が可能となる。

【0361】

但し、磁化反転メカニズムとしては、図29及び図30に示す磁化反転メカニズムを採用する。

40

【0362】

図66及び図67は、角度が40°の場合におけるスピン注入電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示している。

【0363】

図66は、図17(b)の構造に対応し、図67は、図19の構造に対応する。それぞれの図においては、スピン注入電流によるアシスト磁場 H_{hard} の強さをパラメータとして3つの場合を示している。

【0364】

50

Hhard=20 0e 及びHhard=20 0eの場合には、Hhard=0 0eの場合に比べて、磁化反転に必要なスピン注入電流密度が大幅に低減されていることが分かる。

【0365】

第2実施例により得られるスピン注入電流密度の低減効果が顕著であることは、第1実施例と同様に、図12と比較すれば、明白である。

【0366】

図68は、角度 θ とスピン注入電流密度との関係を示している。

【0367】

磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線(下部電極)の長軸とのなす角度 θ が $0^\circ < \theta < 45^\circ$ の範囲内において、角度 θ が 0° の場合よりもスピン注入電流密度が低減されていることが分かる。

10

【0368】

尚、第2実施例では、非磁性層のCu(2nm)をAu又はAgに置き換えても、同様の効果を得ることができる。

【0369】

非磁性層にCuを用いると、Au又はAgを用いる場合に比べてMR比を向上できるが、絶縁層としてのMgOとAlO_xとの抵抗値が異なれば、非磁性層としてCuを用いなくても、本発明の効果を得ることができる。

【0370】

(3) 第3実施例

20

第3実施例では、図22乃至図24に示す磁気ランダムアクセスメモリ(Sample 5)について、スピン注入電流の低減に関する効果を検証する。

【0371】

メモリセルアレイとしては、図24に示すように、導電線(下部電極)13として、ヨーク構造を採用する。

【0372】

導電線13上には、下地層としてのRuを介して磁気抵抗効果素子MTJを配置する。磁気抵抗効果素子MTJは、例えば、図17(a)に示すボトムピン型とする。

【0373】

反強磁性層は、Pt-Mn(14nm)とし、ピンド層は、CoFe(2nm)/Ru(1.5nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。トンネルバリア層は、MgO(1nm)とし、SAF-フリー層は、CoFeB(2nm)/Ru(0.9nm)/CoFeB(2nm)の3層構造とする。キャップ層は、Ruから構成する。

30

【0374】

磁気抵抗効果素子MTJに関しては、一定強度の磁場を与えた状態で温度約360°のアニールを行い、さらに、微細加工技術により、サイズを、例えば、 $0.1 \times 0.18 \mu\text{m}^2$ とし、この後、再び、一定強度の磁場を与えた状態で温度約300°のアニールを行う。後半のアニール後のSAF-フリー層の2つの強磁性層の間の磁気相互作用の強さ J_{EX} は、 1.24 erg/cm^2 である。また、ピンド層の2つの強磁性層は、強磁性結合する。

【0375】

磁気抵抗効果素子の磁化容易軸と導電線(下部電極)の長軸とのなす角度 θ については、 30° とする。

40

【0376】

そして、図25及び図26に示す磁化反転メカニズムに基づき、電流密度約 $4 \times 10^6 \text{ A/cm}^2$ の電流パルス(スピン注入電流)を発生させたところ、 $100 \mu\text{sec}$ 幅パルスで8000回以上の書き込み(磁化反転)を行っても、図69に示すように、安定動作が確保され、さらに、トンネルバリア層の破壊も発生しなかった。

【0377】

5. その他

本発明の例によれば、熱揺らぎ耐性を有する低消費電力、低電流書き込み及び高信頼性のスピンメモリを実現できる。

50

【0378】

本発明の例は、上述の実施の形態に限定されるものではなく、その要旨を逸脱しない範囲で、各構成要素を変形して具体化できる。また、上述の実施の形態に開示されている複数の構成要素の適宜な組み合わせにより種々の発明を構成できる。例えば、上述の実施の形態に開示される全構成要素から幾つかの構成要素を削除してもよいし、異なる実施の形態の構成要素を適宜組み合わせてもよい。

【0379】

例えば、磁気抵抗効果素子を構成する強磁性体、絶縁体、反強磁性体、及び、非磁性体、また、導電線、並びに、電極に関して、これらを構成する材料、厚さ、形状、サイズなどは、当業者が適宜選択し得るものは、当然に、本発明の範囲に包含される。

10

【図面の簡単な説明】

【0380】

【図1】磁気抵抗効果素子の構造例を示す断面図。

【図2】SAF-フリー層の反強磁性結合の強さと熱擾乱耐性との関係を示す図。

【図3】メモリセルの構造例を示す断面図。

【図4】メモリセルの構造例を示す断面図。

【図5】アシスト磁場とスピン反転エネルギーバリアとの関係を示す図。

【図6】単層-フリー層のアストロイド曲線を示す図。

【図7】スピン注入電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示す図。

【図8】スピン注入電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示す図。

20

【図9】メモリセルの構造例を示す断面図。

【図10】メモリセルの構造例を示す断面図。

【図11】SAF-フリー層のアストロイド曲線を示す図。

【図12】スピン注入電流密度と磁気抵抗効果素子の抵抗値との関係を示す図。

【図13】第1実施の形態に関わるレイアウトを示す平面図。

【図14】第1実施の形態に関わるレイアウトを示す平面図。

【図15】 $\theta = 45^\circ$ のときのアストロイド曲線を示す図。

【図16】スピン相対角度 θ とスピントルクの強さとの関係を示す図。

【図17】第2実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す断面図。

【図18】第2実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す断面図。

30

【図19】第2実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す断面図。

【図20】第2実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す断面図。

【図21】第2実施の形態の磁気抵抗効果素子を示す断面図。

【図22】第3実施の形態のメモリセルアレイ構造を示す図。

【図23】第3実施の形態のメモリセルアレイ構造を示す図。

【図24】第4実施の形態のメモリセル構造を示す断面図。

【図25】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図26】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図27】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図28】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

40

【図29】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図30】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図31】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図32】第4実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。

【図33】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

【図34】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

【図35】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

【図36】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

【図37】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

【図38】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。

50

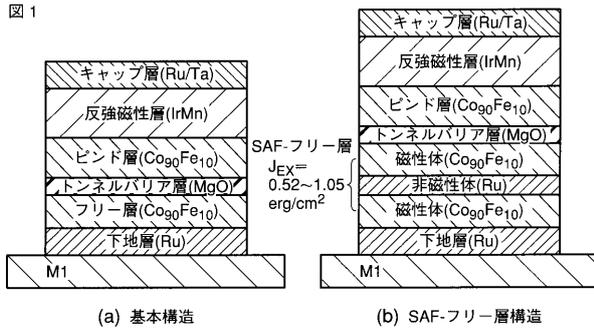
- 【図39】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図40】第5実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図41】第6実施の形態のメモリセル構造を示す断面図。
 【図42】第6実施の形態のメモリセル構造を示す断面図。
 【図43】第6実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図44】第6実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図45】第7実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図46】第7実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図47】第7実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図48】第7実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。 10
 【図49】第7実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図50】第7実施の形態の磁化反転シーケンスを示す図。
 【図51】第8実施の形態のメモリセル構造を示す断面図。
 【図52】第8実施の形態のメモリセル構造を示す断面図。
 【図53】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図54】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図55】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図56】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図57】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図58】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。 20
 【図59】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図60】第8実施の形態の磁化反転メカニズムを示す図。
 【図61】第10実施の形態のメモリセル構造を示す図。
 【図62】第10実施の形態のメモリセル構造を示す図。
 【図63】第1実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。
 【図64】第1実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。
 【図65】第1実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。
 【図66】第2実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。
 【図67】第2実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。
 【図68】第2実施例によるスピン注入電流密度の低減効果を示す図。 30
 【図69】第3実施例による安定動作に関する効果を示す図。

【符号の説明】

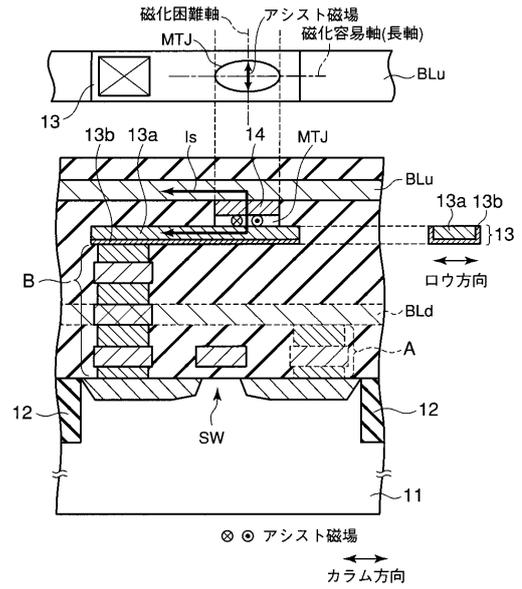
【0381】

11： 半導体基板、 12： 素子分離絶縁層、 13, 18： 導電線、 13a
 , 18a： 導電体、 13b, 18b： 軟磁性体、 14： コンタクトパーツ、
 15： ワード線ドライバ・デコーダ、 16, 17： ビット線ドライバ/シンカー・
 デコーダ、 SW： スイッチ素子、 WL： ワード線、 BLu, BLu1, BLu
 2： 上部ビット線、 BLd： 下部ビット線、 S/A： センスアンプ。

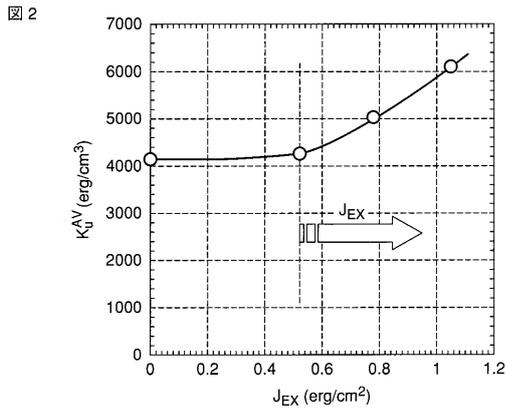
【 図 1 】



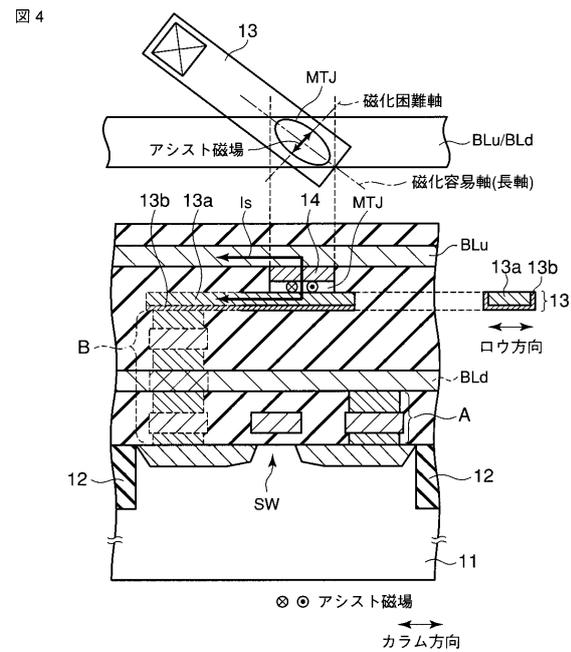
【 図 3 】



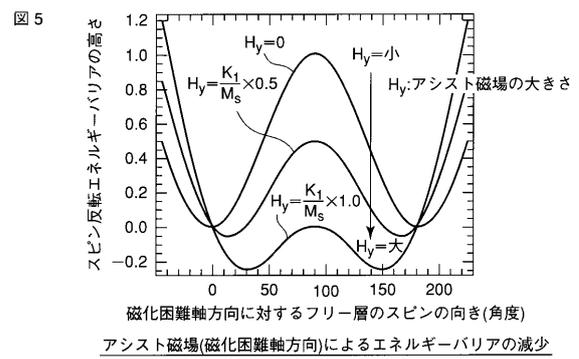
【 図 2 】



【 図 4 】

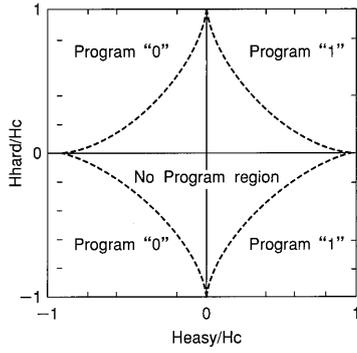


【 図 5 】



【 図 6 】

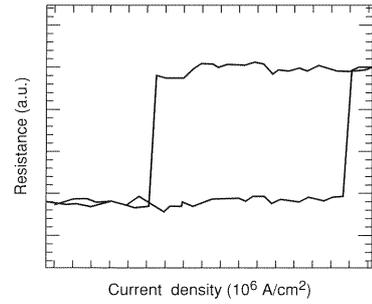
図 6



アストロイド曲線

【 図 7 】

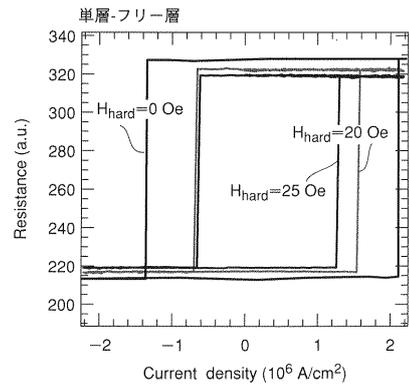
図 7



スピン注入による磁化反転(アシスト磁場無し)

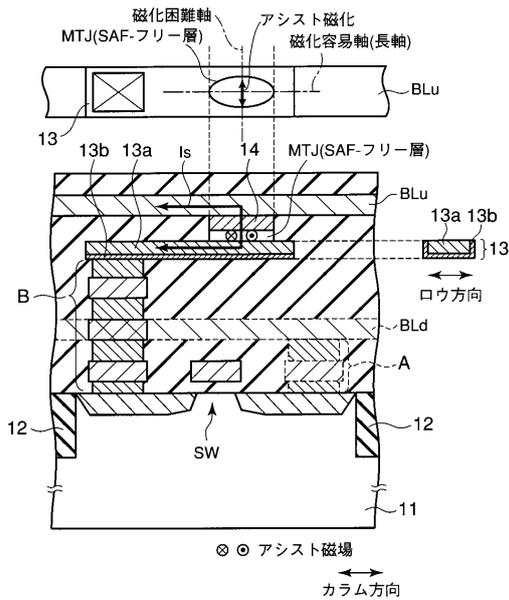
【 図 8 】

図 8



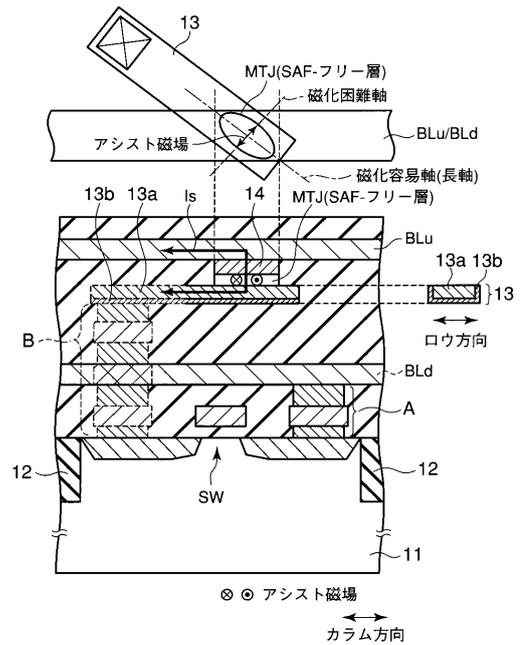
【 図 9 】

図 9



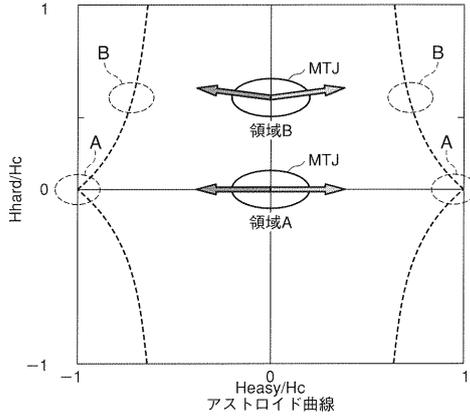
【 図 10 】

図 10



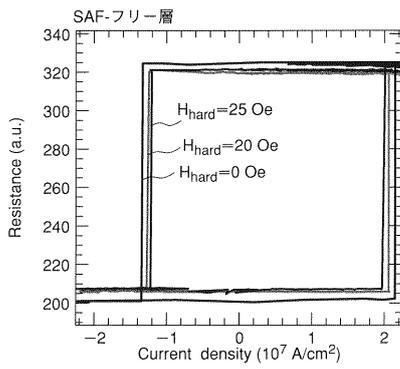
【 図 1 1 】

図 11



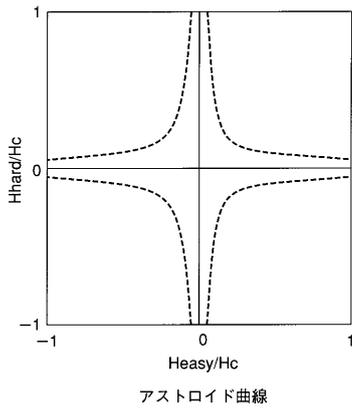
【 図 1 2 】

図 12



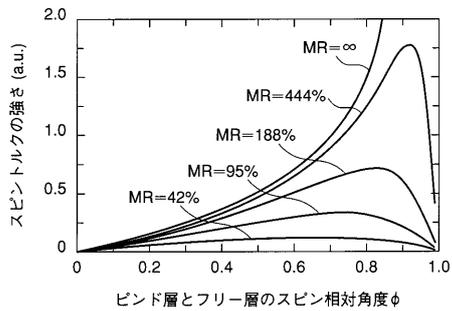
【 図 1 5 】

図 15



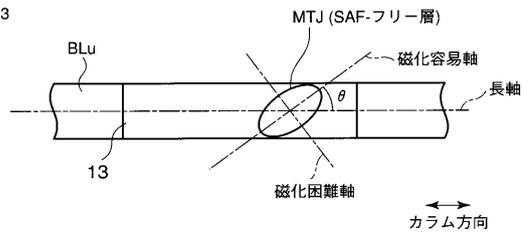
【 図 1 6 】

図 16



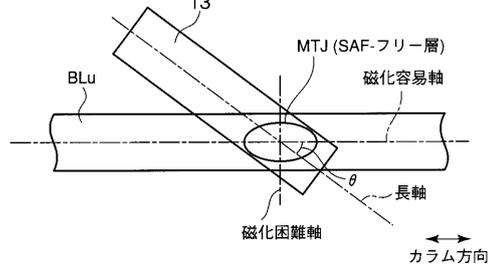
【 図 1 3 】

図 13



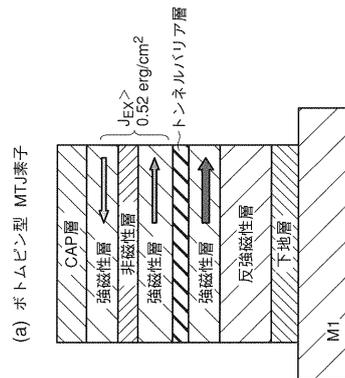
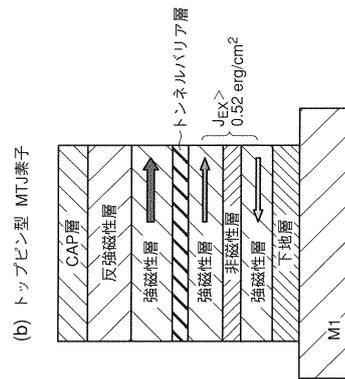
【 図 1 4 】

図 14



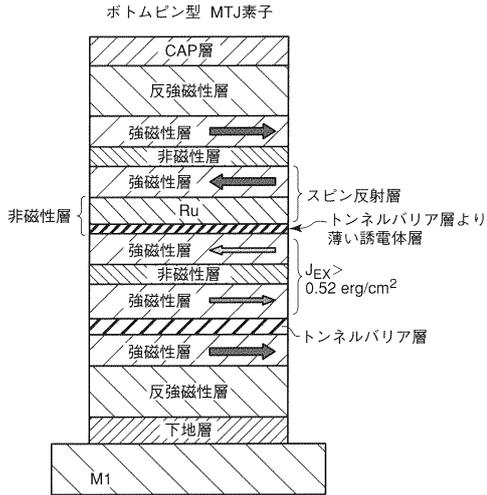
【 図 1 7 】

図 17



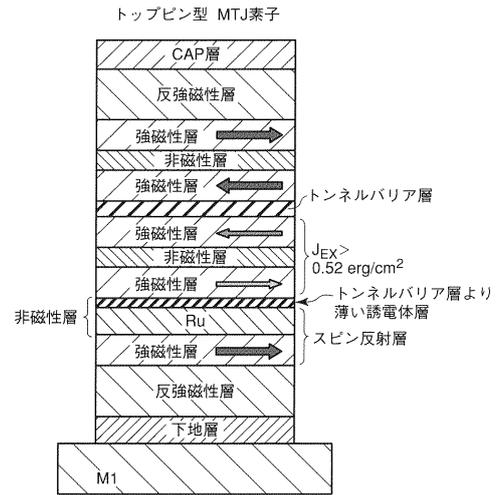
【 図 1 8 】

図 18



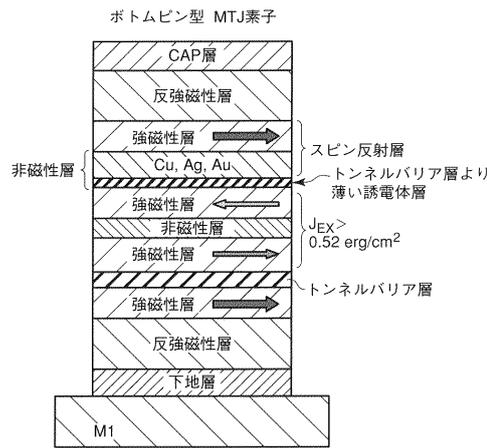
【 図 1 9 】

図 19



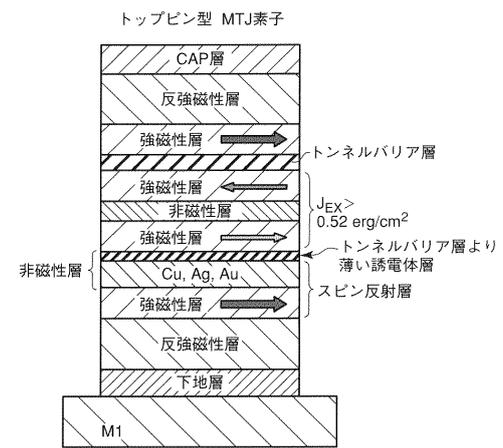
【 図 2 0 】

図 20



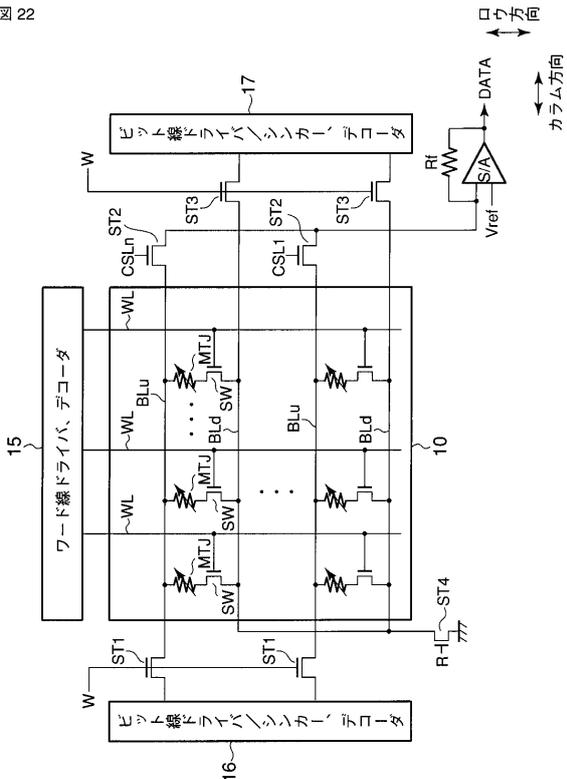
【 図 2 1 】

図 21



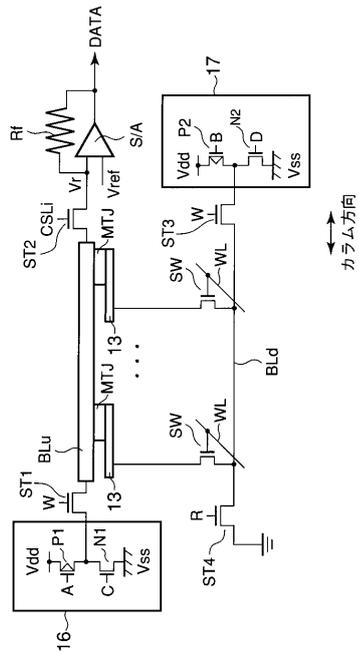
【 図 2 2 】

図 22



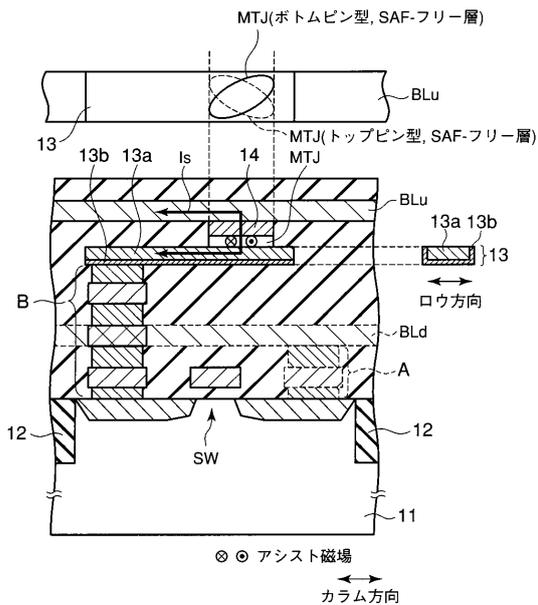
【 図 2 3 】

図 23



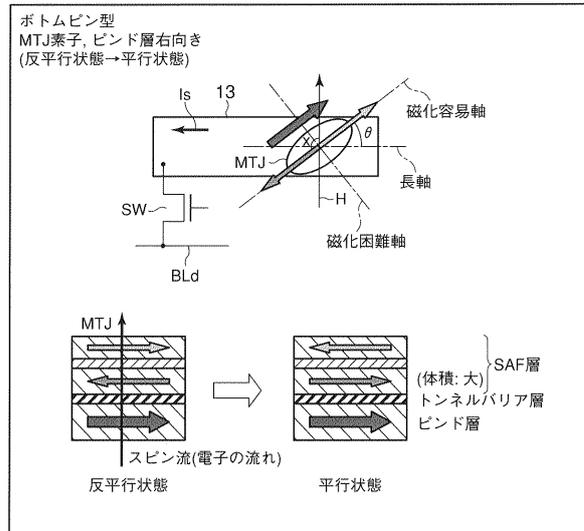
【 図 2 4 】

図 24



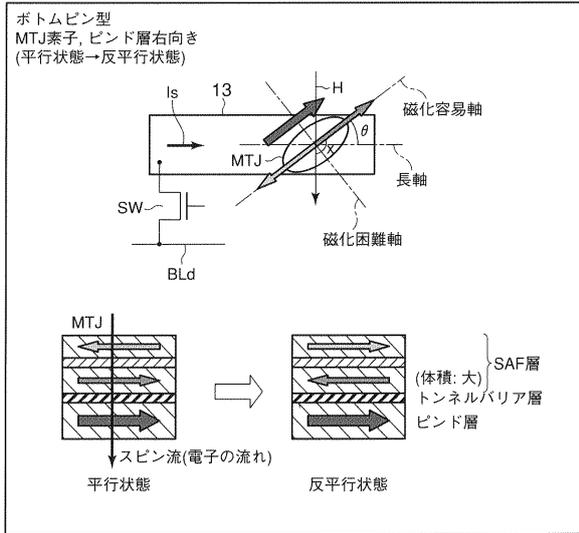
【 図 2 5 】

図 25



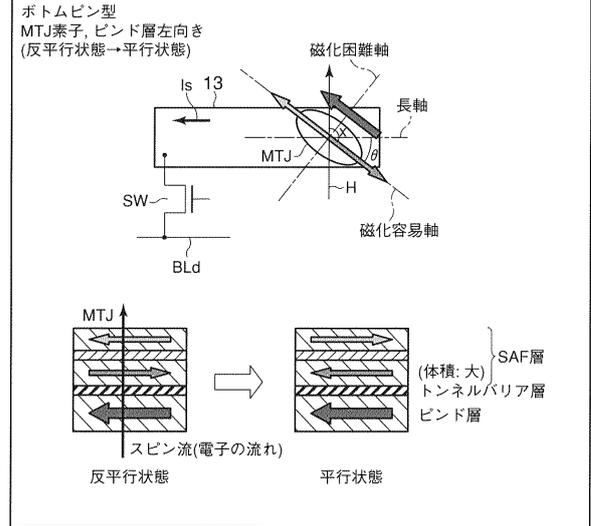
【図 26】

図 26



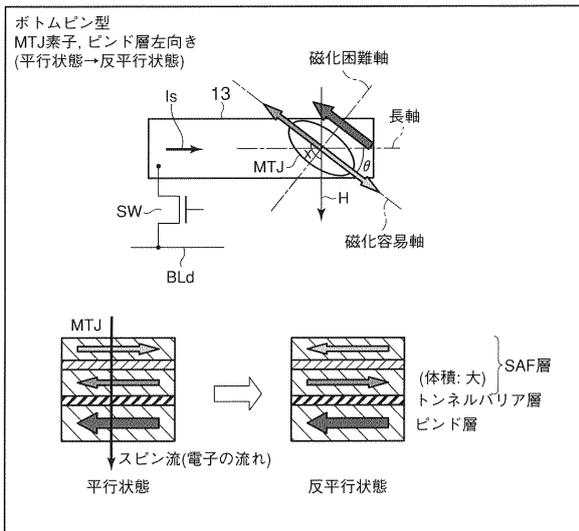
【図 27】

図 27



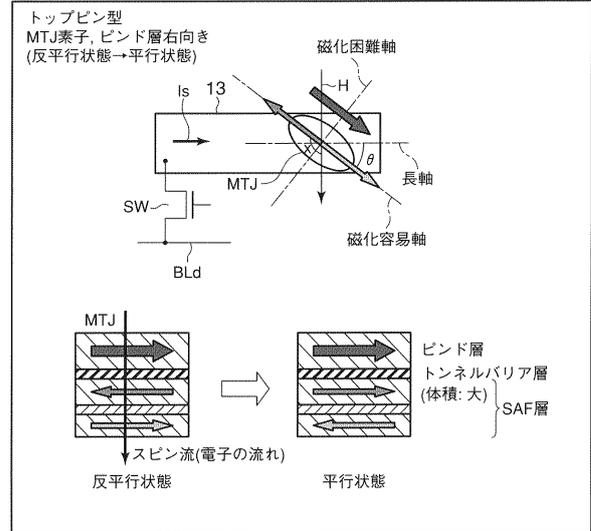
【図 28】

図 28



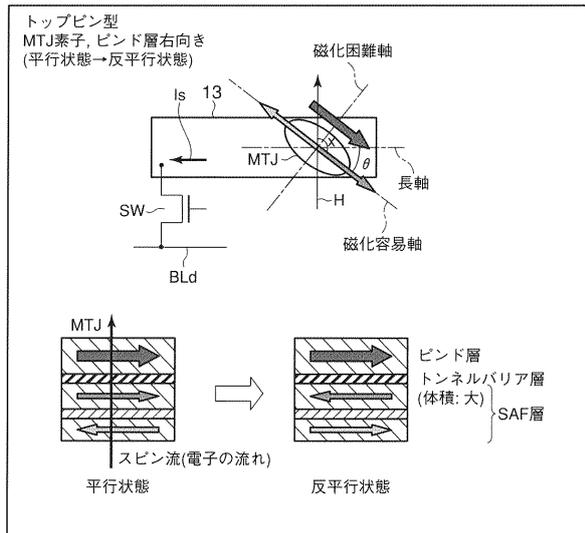
【図 29】

図 29



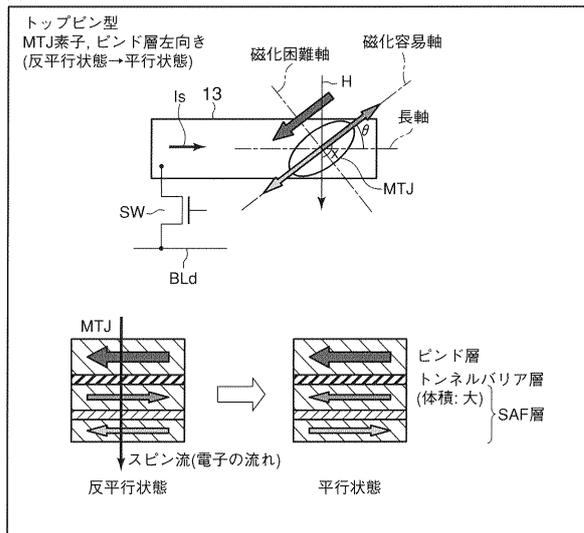
【 図 3 0 】

図 30



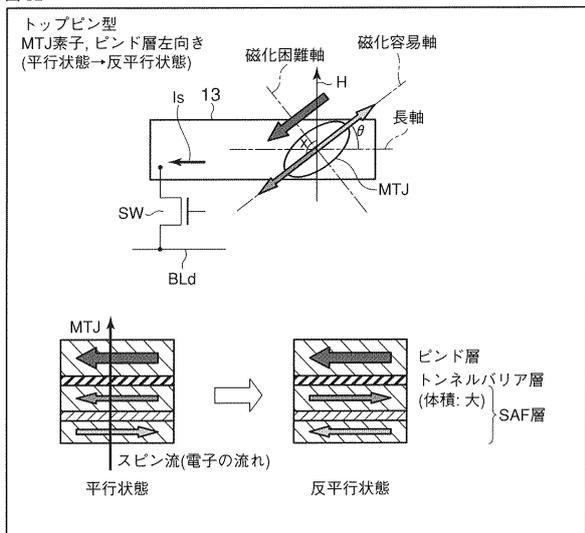
【 図 3 1 】

図 31



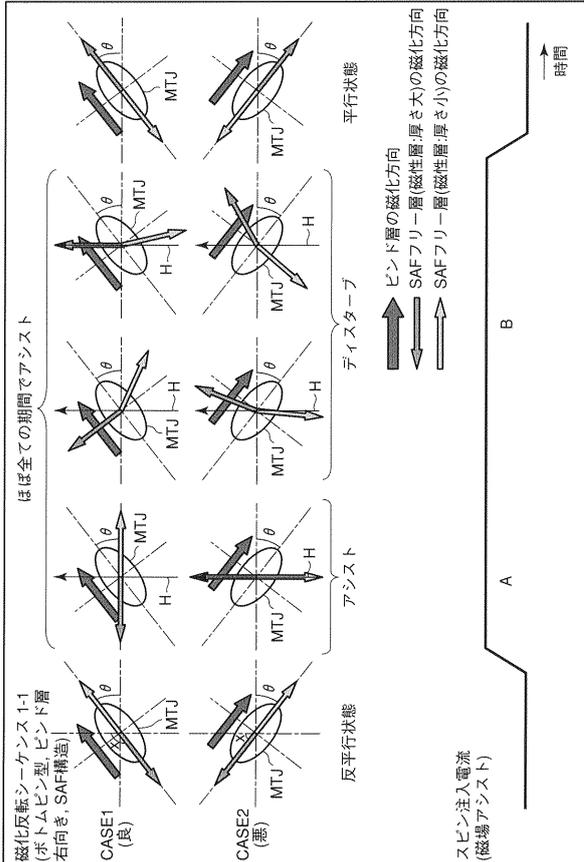
【 図 3 2 】

図 32

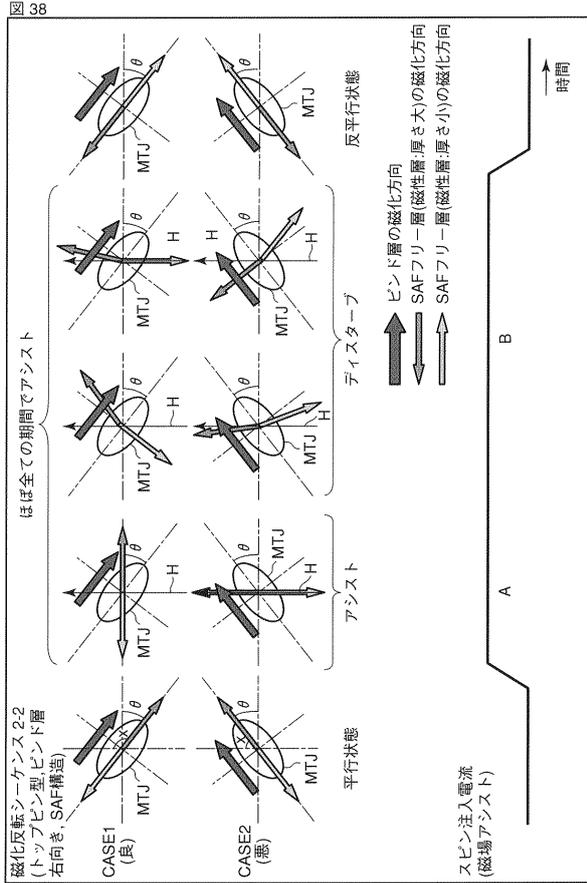


【 図 3 3 】

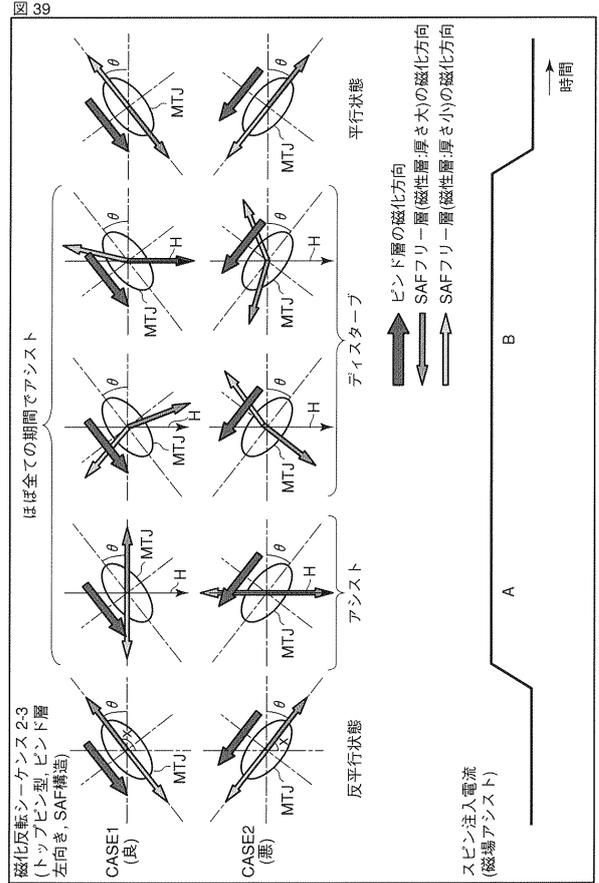
図 33



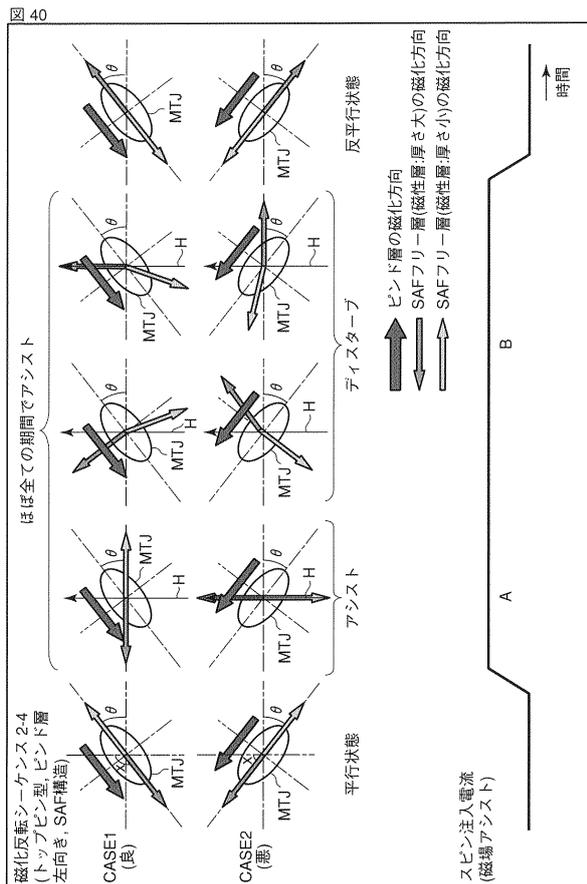
【図 38】



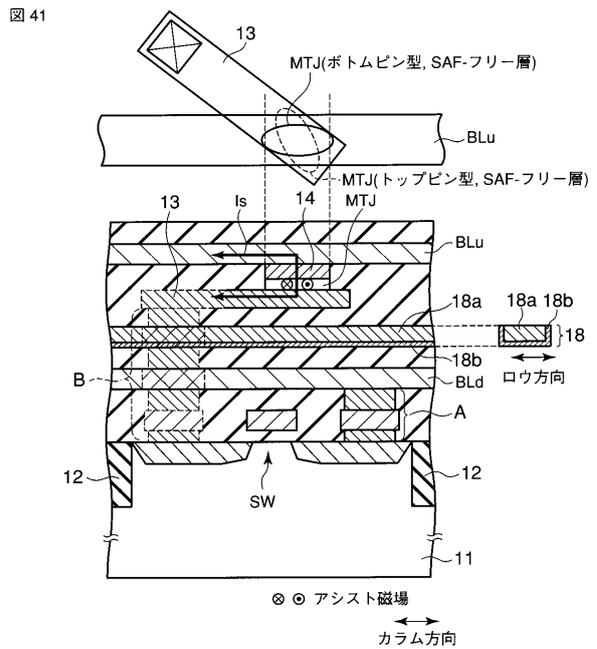
【図 39】



【図 40】

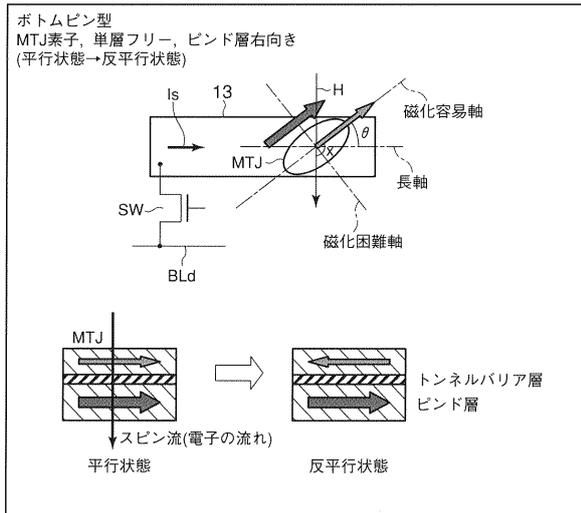


【図 41】



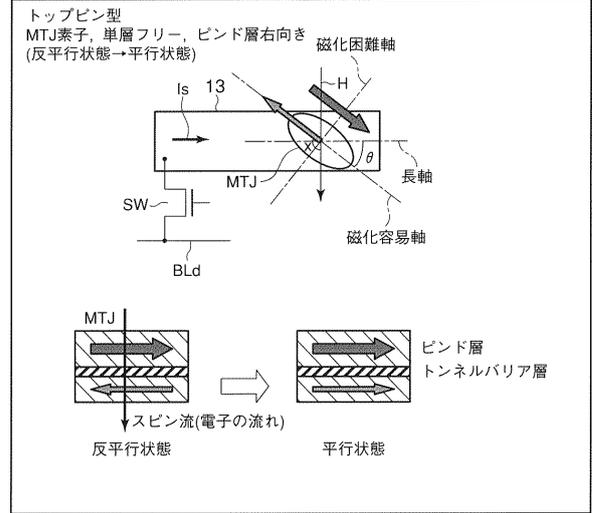
【図 4 6】

図 46



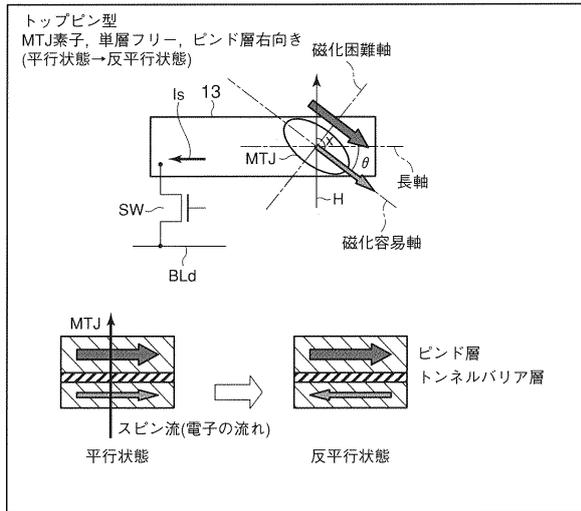
【図 4 7】

図 47



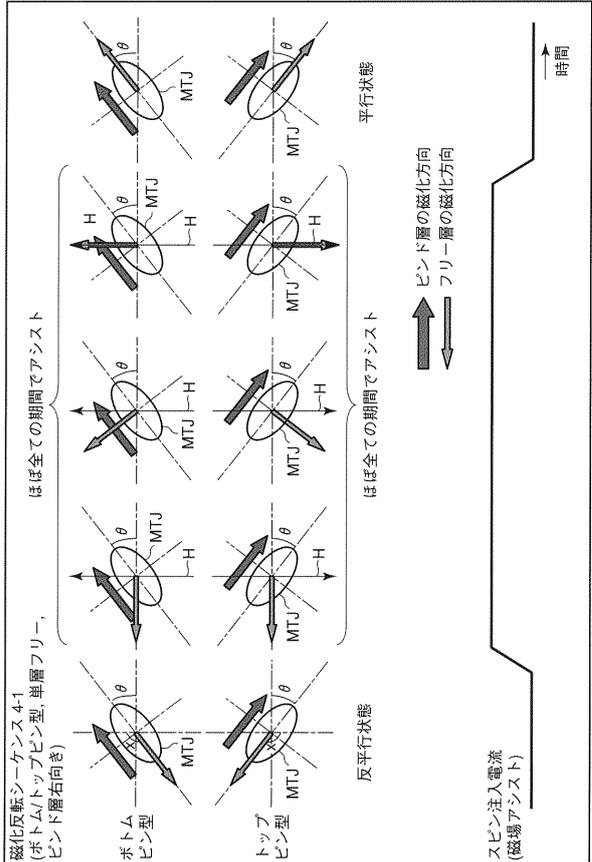
【図 4 8】

図 48

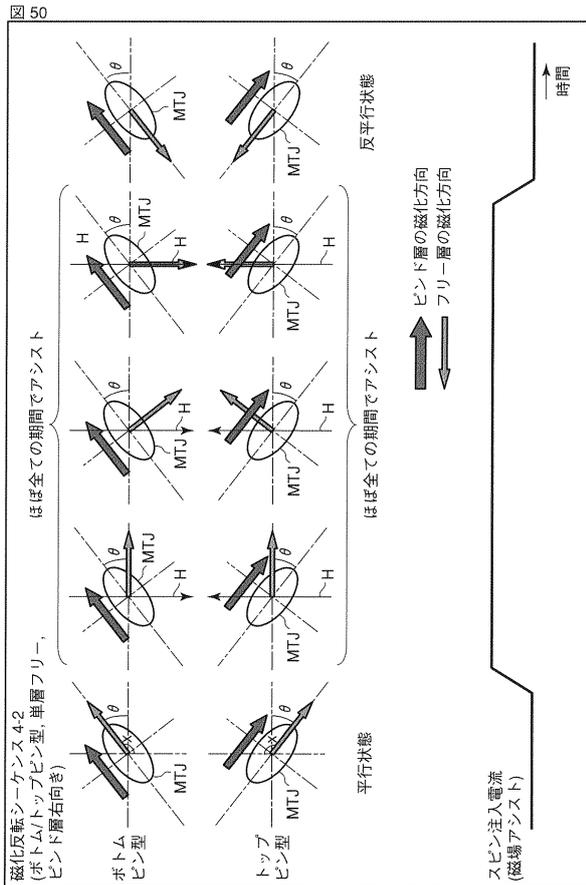


【図 4 9】

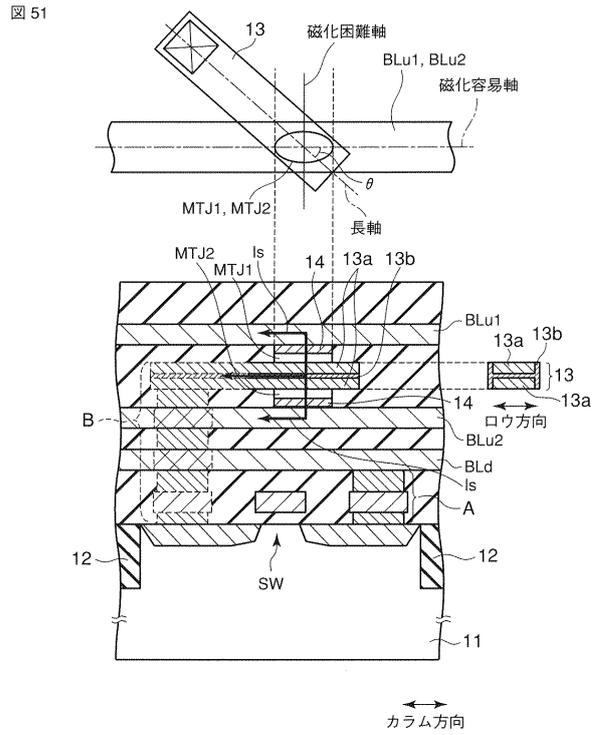
図 49



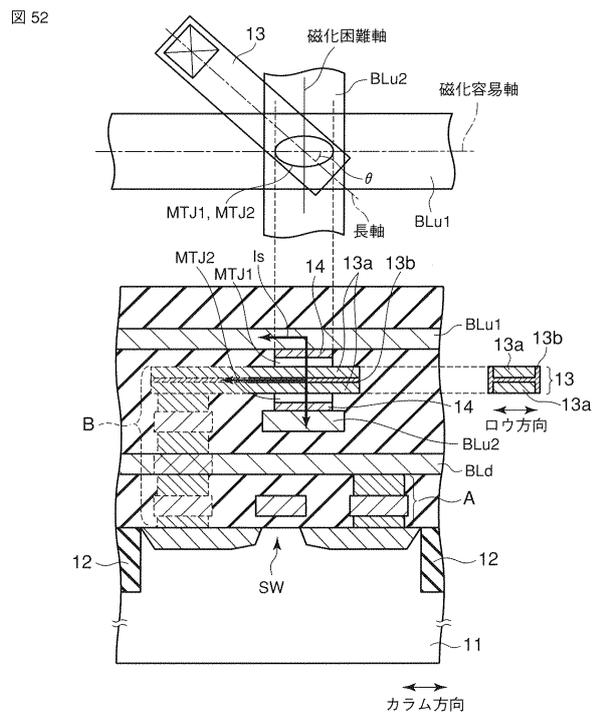
【図 50】



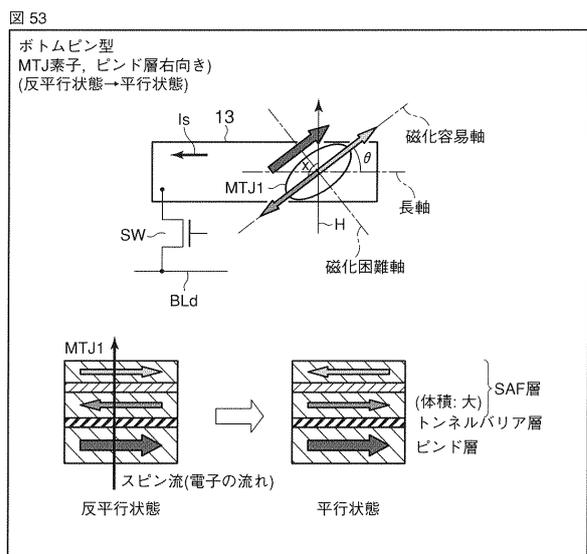
【図 51】



【図 52】

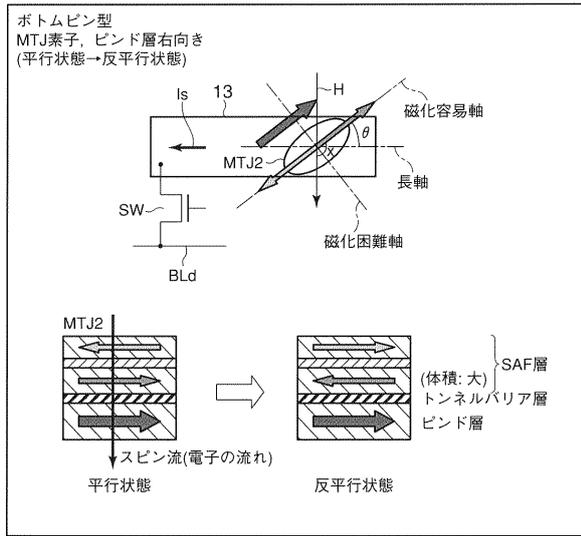


【図 53】



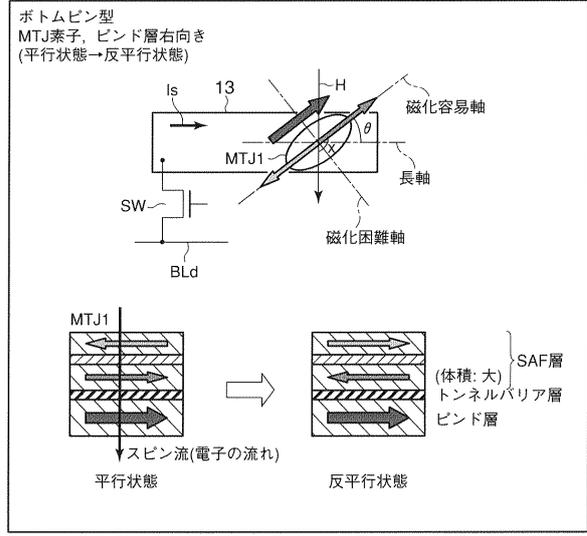
【 図 5 4 】

図 54



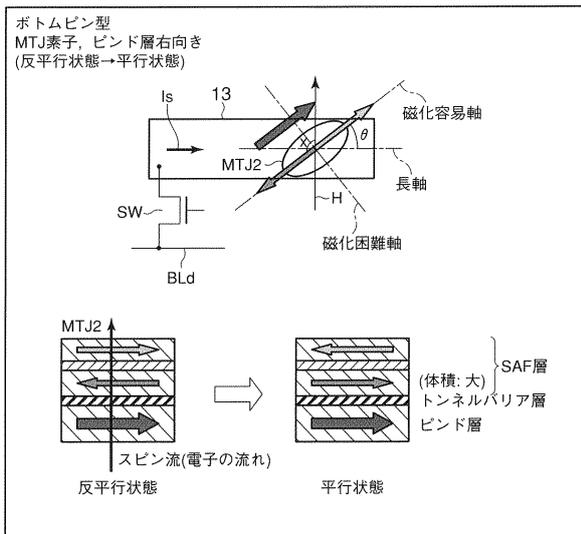
【 図 5 5 】

図 55



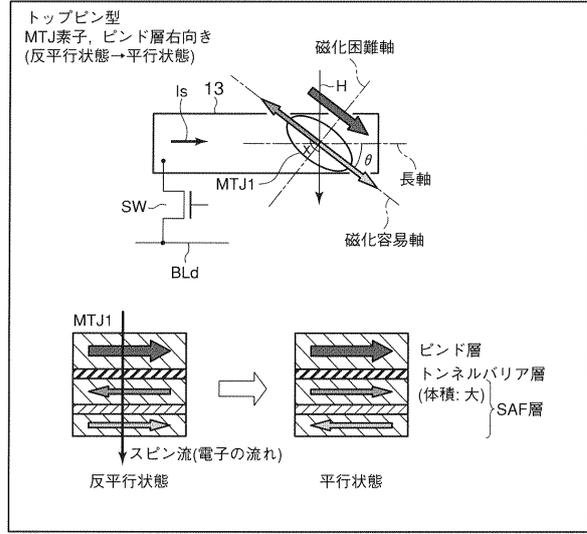
【 図 5 6 】

図 56



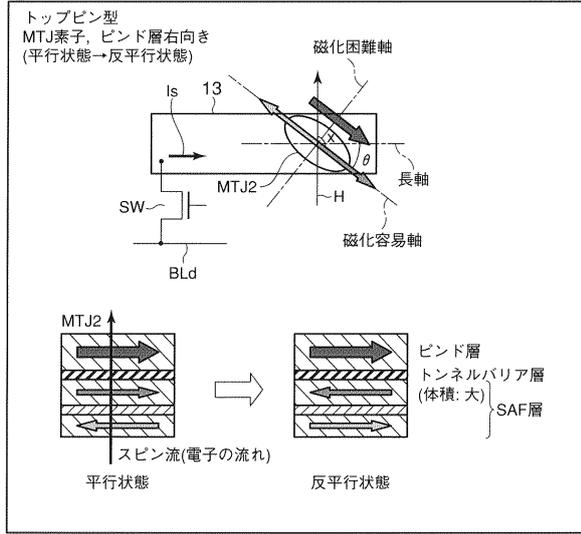
【 図 5 7 】

図 57



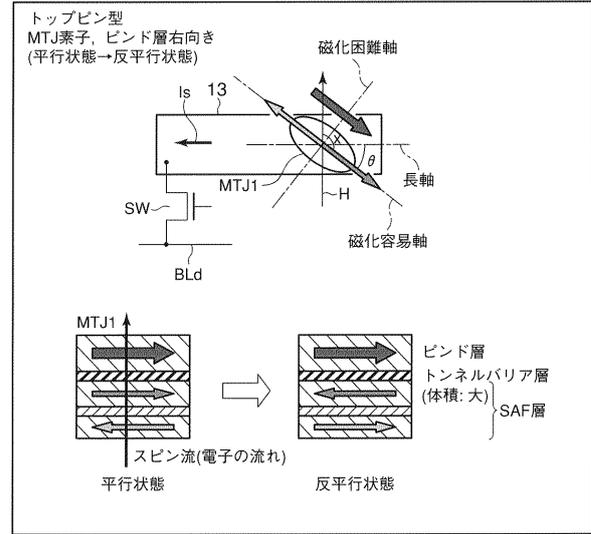
【 図 5 8 】

図 58



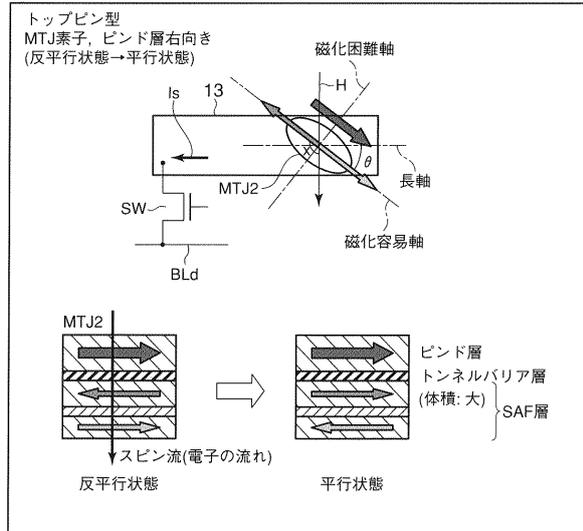
【 図 5 9 】

図 59



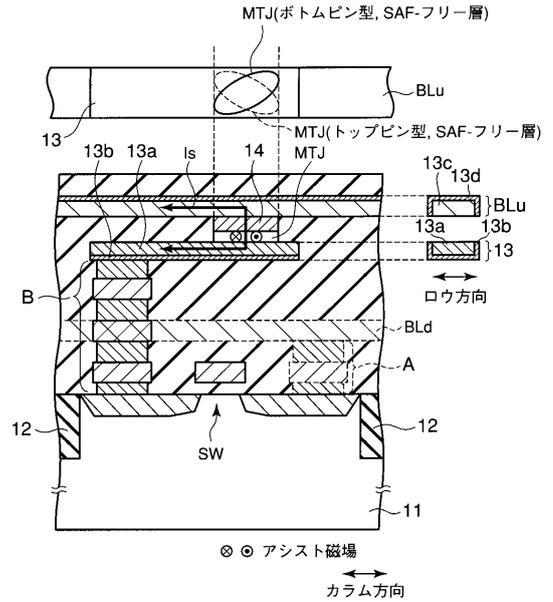
【 図 6 0 】

図 60



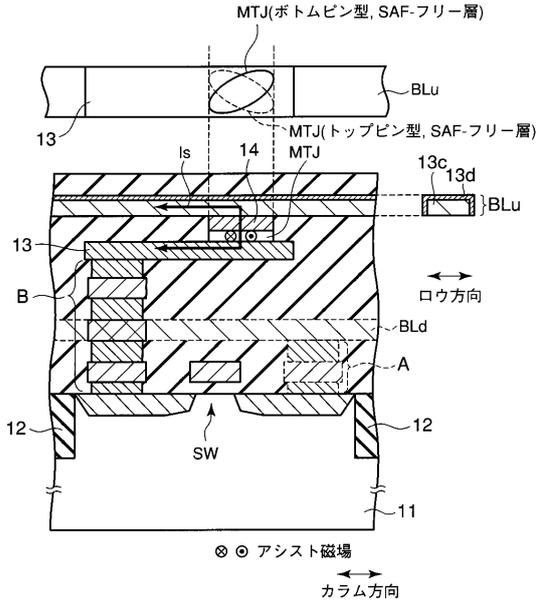
【 図 6 1 】

図 61



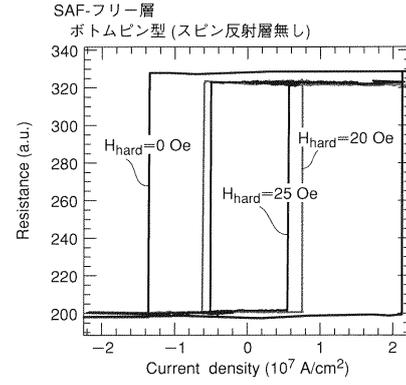
【 図 6 2 】

図 62



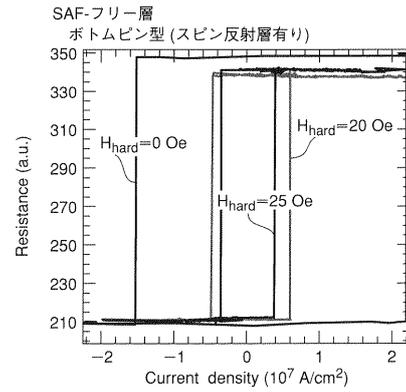
【 図 6 3 】

図 63



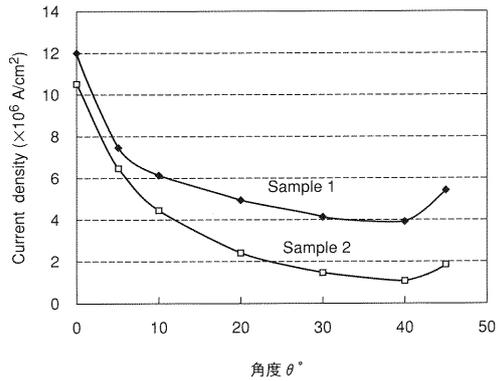
【 図 6 4 】

図 64



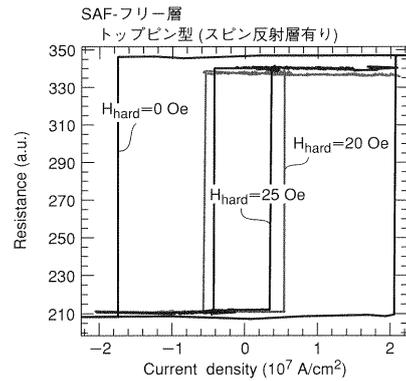
【 図 6 5 】

図 65



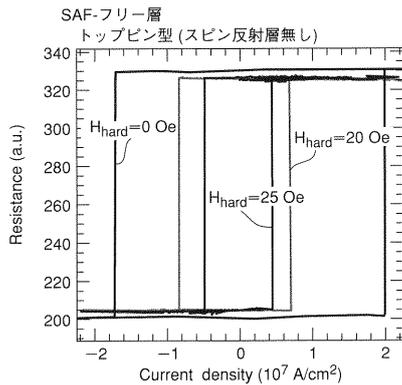
【 図 6 7 】

図 67



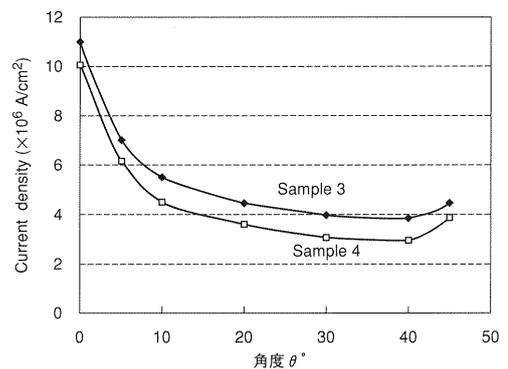
【 図 6 6 】

図 66



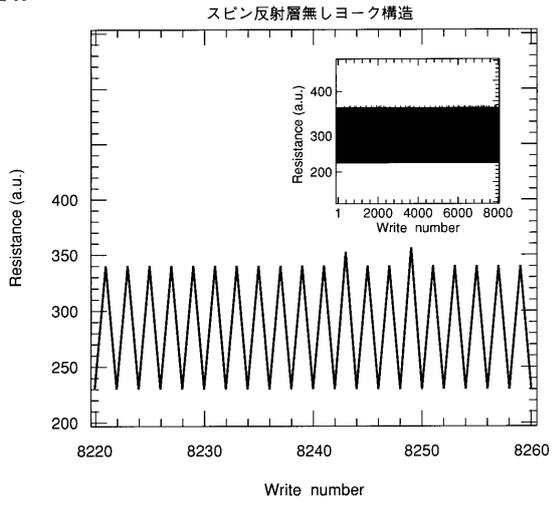
【 図 6 8 】

図 68



【 図 6 9 】

図 69



フロントページの続き

(74)代理人 100084618

弁理士 村松 貞男

(74)代理人 100092196

弁理士 橋本 良郎

(72)発明者 斉藤 好昭

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

(72)発明者 杉山 英行

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

(72)発明者 井口 智明

神奈川県川崎市幸区小向東芝町1番地 株式会社東芝研究開発センター内

Fターム(参考) 4M119 AA03 BB01 CC02 CC05 DD09 DD33 DD45 DD46 DD52 EE03
EE06 EE13 EE22 EE27 FF06 FF13 FF15 FF17 HH02 HH05
HH07
5F092 AA08 AB08 AC12 AD03 AD25 BB10 BB17 BB18 BB22 BB23
BB24 BB33 BB34 BB35 BB36 BB37 BB42 BB43 BB44 BB49
BB53 BC03 BC04 BC07 BC08 BC13 BC20 BC22 BC46 BE06
EA06