

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2020年1月9日(09.01.2020)



(10) 国際公開番号

WO 2020/008853 A1

(51) 国際特許分類:

H01L 21/8239 (2006.01) *H01L 43/08* (2006.01)
H01L 27/105 (2006.01) *H01L 43/10* (2006.01)
H01L 43/02 (2006.01)

(21) 国際出願番号: PCT/JP2019/023979

(22) 国際出願日: 2019年6月17日(17.06.2019)

(25) 国際出願の言語: 日本語

(26) 国際公開の言語: 日本語

(30) 優先権データ:

特願 2018-127722 2018年7月4日(04.07.2018) JP

(71) 出願人: ソニーセミコンダクタソリューションズ株式会社(SONY SEMICONDUCTOR SOLUTIONS CORPORATION) [JP/JP]; 〒2430014 神奈川県厚木市旭町四丁目14番1号 Kanagawa (JP).

(72) 発明者: 苅屋田 英嗣 (KARIYADA, Eiji); 〒8691102 熊本県菊池郡菊陽町大字原水400番地1 ソニーセミコンダクタマニュフ

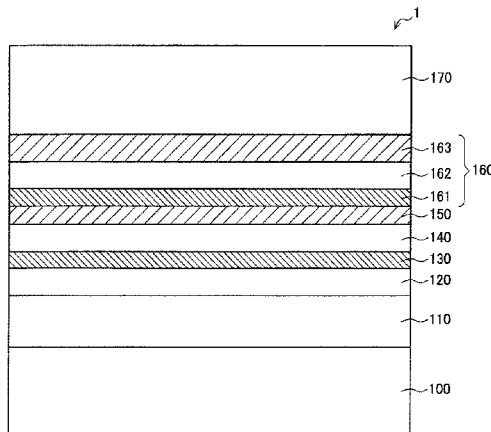
ァクチャリング株式会社内 Kumamoto (JP). 谷川 博信(TANIGAWA, Hironobu); 〒8691102 熊本県菊池郡菊陽町大字原水4000番地1 ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社内 Kumamoto (JP). 鈴木 哲広(SUZUKI, Tetsuhiro); 〒8691102 熊本県菊池郡菊陽町大字原水4000番地1 ソニーセミコンダクタマニュファクチャリング株式会社内 Kumamoto (JP).

(74) 代理人: 特許業務法人 酒井国際特許事務所 (SAKAI INTERNATIONAL PATENT OFFICE); 〒1000013 東京都千代田区霞が関3丁目8番1号 虎の門三井ビルディング Tokyo (JP).

(81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DJ, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, JO, JP, KE, KG, KH,

(54) Title: MAGNETIC TUNNEL JUNCTION ELEMENT AND SEMICONDUCTOR DEVICE

(54) 発明の名称: 磁気トンネル接合素子及び半導体装置



(57) Abstract: A magnetic tunnel junction element (1), comprising: a fixed-magnetization layer (120) in which the direction of magnetization is fixed; a first insulation layer (130) provided on the fixed-magnetization layer and formed from an insulating material; a magnetization free layer (140) provided on the first insulation layer; an adjacent layer (150) provided adjacently on the magnetization free layer and formed from a non-magnetic transition metal; and a cap layer (160) provided on the adjacent layer and formed from a multilayer structure including at least one barrier layer (163) formed from the non-magnetic transition metal.

(57) 要約: 磁化の向きが固定された磁化固定層(120)と、前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層(130)と、前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層(140)と、前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層(150)と、前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層(163)を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層(160)と、を備える、磁気トンネル接合素子(1)。

KN, KP, KR, KW, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LU, LY,
MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ,
NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT,
QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL,
SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA,
UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類：

- 一 国際調査報告（条約第21条(3)）

明 細 書

発明の名称：磁気トンネル接合素子及び半導体装置

技術分野

[0001] 本開示は、磁気トンネル接合素子及び半導体装置に関する。

背景技術

[0002] 近年、半導体装置では、CMOS (Complementary MOS) を用いたロジック回路に大容量の不揮発メモリを混載させることが一般的になっている。

[0003] 例えば、ロジック回路にSRAM (Static Random Access Memory) 等を混載させることが行われている。一方で、半導体装置のコスト及び消費電力を低減するために、SRAMを磁気抵抗メモリ (Magnetoresistive Random Access Memory: MRAM) で置換することが検討されている。

[0004] 磁気抵抗メモリ (MRAM) は、絶縁性薄膜を一对の強磁性層で挟持した磁気トンネル接合 (Magnetic Tunnel Junction: MTJ) 素子を利用したメモリ素子である。MTJ素子では、一对の強磁性層の相対的な磁化の向きによってトンネル抵抗の大きさが変化する。これにより、MTJ素子は、一对の強磁性層の磁化の向きを平行又は反平行のいずれかに制御することで、情報を記憶することができる。

[0005] 例えば、下記の特許文献1には、MTJ素子を用いた界面垂直磁化型のSTT-MRAM (Spin Transfer Torque-MRAM) が開示されている。特許文献1には、配線形成プロセスにおける熱負荷に耐え得る程度にMTJ素子の熱耐性を向上させることで、STT-MRAMと、選択トランジスタ等を含む周辺回路とを同時に作り込むことが開示されている。

先行技術文献

特許文献

[0006] 特許文献1：特開2013-187305号公報

発明の概要

発明が解決しようとする課題

[0007] しかし、半導体装置の構造及び製造工程の複雑化に伴い、ロジック回路等と混載され得るMTJ素子には、さらなる熱耐性が求められるようになってきている。そのため、特許文献1に開示された技術では、十分な熱耐性を有するMTJ素子を実現することが困難となっていた。

[0008] そこで、本開示では、より高い熱耐性を有する磁気トンネル接合素子、及び該磁気トンネル接合素子を搭載した半導体装置を提案する。

課題を解決するための手段

[0009] 本開示によれば、磁化の向きが固定された磁化固定層と、前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層と、前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、を備える、磁気トンネル接合素子が提供される。

[0010] また、本開示によれば、磁気トンネル接合素子を備え、前記磁気トンネル接合素子は、磁化の向きが固定された磁化固定層と、前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層と、前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、を備える、半導体装置が提供される。

[0011] 本開示によれば、高温及び長時間の熱処理にて生じる上部電極からの金属原子の拡散、及び磁化自由層からの原子の拡散を抑制することで、磁化自由層の垂直磁気異方性の低下を抑制することができる。

発明の効果

[0012] 以上説明したように本開示によれば、より高い熱耐性を有する磁気トンネル接合素子、及び該磁気トンネル接合素子を搭載した半導体装置を提供することができる。

[0013] なお、上記の効果は必ずしも限定的なものではなく、上記の効果とともに、または上記の効果に代えて、本明細書に示されたいずれかの効果、または本明細書から把握され得る他の効果が奏されてもよい。

図面の簡単な説明

[0014] [図1]本開示の一実施形態に係る磁気トンネル接合素子の主たる積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図2A]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子に熱処理を行った際の原子の拡散の様子を模式的に示す縦断面図である。

[図2B]比較例に係る磁気トンネル接合素子に熱処理を行った際の原子の拡散の様子を模式的に示す縦断面図である。

[図3]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図4]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図5]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図6]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図7]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図8]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図9]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図10]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示

す縦断面図である。

[図11]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図12]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図13]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図14]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図15]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図16]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図17]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図18]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[図19]同実施形態に係る磁気トンネル接合素子の變形例を模式的に示す縦断面図である。

[図20]実施例1に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図21]実施例2に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図22]比較例1に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図23]比較例2に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図24A]実施例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を

示すグラフ図である。

[図24B]実施例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図24C]実施例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図25A]実施例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図25B]実施例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図25C]実施例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図26A]比較例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図26B]比較例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図26C]比較例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図27A]比較例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図27B]比較例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図27C]比較例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[図28]実施例3に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図29]実施例4に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。
。

[図30]隣接層の膜厚に対する磁気トンネル接合素子のTMR比の変化を相対

値で示すグラフ図である。

[図31]バリア層の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力ばらつきの変化を相対値で示すグラフ図である。

[図32]中間層の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力ばらつきの変化を相対値で示すグラフ図である。

[図33]磁性層の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力の変化を相対値で示すグラフ図である。

[図34]調整層における磁性層の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の書き込み電圧の変化を相対値で示すグラフ図である。

発明を実施するための形態

[0015] 以下に添付図面を参照しながら、本開示の好適な実施の形態について詳細に説明する。なお、本明細書及び図面において、実質的に同一の機能構成を有する構成要素については、同一の符号を付することにより重複説明を省略する。

[0016] なお、以下の説明にて参照する各図面では、説明の便宜上、一部の構成部材の大きさを誇張して表現している場合がある。したがって、各図面において図示される構成部材同士の相対的な大きさは、必ずしも実際の構成部材同士の大小関係を正確に表現するものではない。また、以下の説明では、基板及び層の積層方向を上下方向と表現し、基板が存在する方向を下方向と表現し、該下方向と対向する方向を上方向と表現する。

[0017] なお、説明は以下の順序で行うものとする。

1. 主構成例
2. 他の構成例
3. 変形例

[0018] <1. 主構成例>

まず、図1を参照して、本開示の一実施形態に係る磁気トンネル接合素子の主構成例について説明する。図1は、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子1の主たる積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[0019] 図1に示すように、磁気トンネル接合素子1は、基板100と、下部電極110と、磁化固定層120と、第1絶縁層130と、磁化自由層140と、隣接層150と、多層構造にて構成されるキャップ層160と、上部電極170と、を備える。

[0020] 本実施形態に係る磁気トンネル接合素子1は、電子のスピンによるトルクを用いて、磁化自由層140の磁化の向きを制御するSTT-MRAMである。STT-MRAMでは、磁化自由層140及び磁化固定層120の磁化容易軸の方向を膜面に対して垂直方向とすることで、スピン注入による磁化反転の効率を向上させることができる。そのため、磁気トンネル接合素子1では、磁化固定層120及び磁化自由層140と、第1絶縁層130との界面に誘起される界面垂直磁気異方性によって、磁化自由層140及び磁化固定層120に垂直磁気異方性を付与している。磁気トンネル接合素子1のようなSTT-MRAMは、界面垂直磁化型STT-MRAMとも称される。

[0021] 基板100は、磁気トンネル接合素子1の各層を支持する部材である。基板100は、半導体、石英、ガラス又は有機樹脂のいずれで形成されてもよい。例えば、基板100は、シリコン(Si)若しくはゲルマニウム(Ge)等の半導体、又はガリウムヒ素(GaAs)、窒化ガリウム(GaN)若しくはシリコンカーバイド(SiC)等の化合物半導体で形成されてもよい。または、基板100は、シリコン基板の中にSiO₂等の絶縁膜を挟み込んだSOI(Silicon On Insulator)基板であってもよい。

[0022] 下部電極110は、基板100の上に設けられる。下部電極110は、各種金属材料又は合金材料にて形成されることで、磁気トンネル接合素子1と各種配線との接続点として機能する。下部電極110は、公知の材料及び積層構造で形成されてもよく、例えば、単層膜で形成されてもよく、複数の膜の積層膜で形成されてもよい。また、下部電極110は、下部電極110の上に設けられる磁化固定層120の結晶配向を制御する下地膜として機能してもよい。このような場合、下部電極110は、磁化固定層120と結晶構

造又は磁気異方性が略同じ金属材料で形成されてもよい。

[0023] 磁化固定層 120 は、下部電極 110 の上に設けられる。磁化固定層 120 は、膜面に対して垂直方向に磁化容易軸を有し、磁化の向きが固定された磁性層である。磁化固定層 120 は、公知の材料及び積層構造で形成され得る。磁化固定層 120 は、例えば、強磁性層と、非磁性層と、強磁性層とを交互に積層した積層フェリ構造にて形成されてもよい。また、磁化固定層 120 は、磁化の向きを固定するため、垂直磁気異方性を持たせるため、又は結晶構造を制御するために、種々の金属層の積層膜として形成されてもよい。

[0024] 第 1 絶縁層 130 は、磁化固定層 120 の上に設けられる。第 1 絶縁層 130 は、絶縁材料で形成されることで、MTJ 素子のトンネル絶縁膜として機能する。第 1 絶縁層 130 は、例えば、酸化マグネシウム (MgO) 又は酸化アルミニウム (Al_2O_3) などの無機酸化物にて、膜厚 1 nm 程度の薄膜層として形成されてもよい。より詳細には、第 1 絶縁層 130 は、酸化マグネシウム (MgO) にて膜厚 1 nm 程度で形成されてもよい。第 1 絶縁層 130 が酸化マグネシウム (MgO) で形成される場合、第 1 絶縁層 130 は、より低温で結晶性が良好な層となるため、磁化固定層 120 及び磁化自由層 140 の間のトンネル磁気抵抗効果 (Tunnel Magnetoresistance Effect: TMR 効果) をより高めることができる。

[0025] 磁化自由層 140 は、第 1 絶縁層 130 の上に設けられる。磁化自由層 140 は、第 1 絶縁層 130 との界面に生じる界面垂直磁気異方性によって膜面に対して垂直方向に磁化容易軸を有し、磁化の向きが制御可能な磁性層である。具体的には、磁化自由層 140 は、3d 遷移金属及びホウ素 (B) を含む磁性材料にて形成されてもよく、 $CoFeB$ にて膜厚 1 nm ~ 2 nm 程度で形成されてもよい。このような場合、磁化自由層 140 は、ホウ素 (B) の含有量を 15 原子%以上とすることで、垂直磁気異方性をより強めることができる。

[0026] 本実施形態では、強磁性体である磁化固定層 120 及び磁化自由層 140 によって第 1 絶縁層 130 が挟持されることで、磁気トンネル接合素子 (MTJ 素子) が構成される。磁気トンネル接合素子 1 では、磁化固定層 120 及び磁化自由層 140 と、第 1 絶縁層 130 との接合面に対して垂直に電圧が印加されることで、トンネル効果によって電流が流れる。このときのトンネル効果の大きさは、磁化固定層 120 及び磁化自由層 140 の磁化の向きが平行又は反平行のいずれであるのかによって変化する。したがって、磁気トンネル接合素子 1 は、磁化自由層 140 の磁化の向きを制御することで、下部電極 110 及び上部電極 170 の間に流れる電流の大きさを制御することができる。

[0027] 隣接層 150 は、非磁性遷移金属にて形成され、磁化自由層 140 の上に隣接して設けられる。隣接層 150 は、熱処理等によって、磁化自由層 140 に含まれるホウ素 (B) が磁化自由層 140 からキャップ層 160 側に拡散することを抑制する。

[0028] 具体的には、磁気トンネル接合素子 1 では、高温及び長時間の熱処理によって、磁化自由層 140 に含まれるホウ素 (B) が周囲の層に拡散することが生じ得る。このような場合、磁化自由層 140 のホウ素 (B) の含有量が低下するため、磁化自由層 140 は、垂直磁気異方性を保持することが困難となってしまう。特に、磁気トンネル接合素子 1 が柱体形状又は錐体形状に素子加工されている場合、磁化自由層 140 の体積が限定されているため、磁化自由層 140 のホウ素 (B) の含有量は、拡散によって減少しやすくなる。隣接層 150 は、磁化自由層 140 から拡散するホウ素 (B) をトラップすることで、ホウ素 (B) を磁化自由層 140 の周囲に滞留させることができる。これによれば、隣接層 150 は、熱処理によるホウ素 (B) の拡散を抑制することで、ホウ素 (B) の含有量の低下に起因する磁化自由層 140 の垂直磁気異方性の低下を抑制することができる。

[0029] 隣接層 150 は、密度及び熱伝導率が高い非磁性遷移金属にて形成することができる。例えば、隣接層 150 は、モリブデン (Mo)、タングステン

(W)、ニオブ(Nb)、Ir(イリジウム)又はTi(チタン)のいずれかで形成されてもよい。隣接層150は、密度及び熱伝導率がより高いモリブデン(Mo)、タングステン(W)又はニオブ(Nb)のいずれかで形成されることで、ホウ素(B)の拡散をより効果的に抑制することができる。より詳細には、隣接層150は、モリブデン(Mo)にて形成されてもよい。

[0030] 隣接層150は、0.25nm以上1.0nm以下の膜厚で形成されてもよい。隣接層150は、磁化自由層140が垂直磁気異方性を保持することができる程度にホウ素(B)の拡散を抑制すればよい。他の特性に対して影響を与えない程度の薄膜で形成されてもよい。後述する実施例で示すように、隣接層150が膜厚0.25nm以上1.0nm以下で形成される場合、磁気トンネル接合素子1は、TMR効果(すなわち、TMR比)をより大きくすることができる。

[0031] キャップ層160は、隣接層150の上に形成される。キャップ層160は、磁化自由層140及び隣接層150の保護、又は磁化自由層140の特性向上等を目的として、複数の層を積層させた多層構造にて設けられる。具体的には、キャップ層160は、隣接層150側から第2絶縁層161、中間層162及びバリア層163を順に積層させた多層構造にて設けられてもよい。なお、キャップ層160は、図1で図示する構造以外の多層構造を備えていてもよい。キャップ層160の多層構造のバリエーションについては、図3～図18を参照して後述する。

[0032] 第2絶縁層161は、絶縁材料で形成される。第2絶縁層161は、例えば、酸化マグネシウム(MgO)又は酸化アルミニウム(Al_2O_3)などの無機酸化物にて膜厚1nm程度の薄膜層として形成されてもよい。より詳細には、第2絶縁層161は、酸化マグネシウム(MgO)にて膜厚1nm程度で形成されてもよい。第2絶縁層161は、界面垂直磁気異方性によって、磁化自由層140の磁化容易軸を膜面に垂直な方向に制御することができるため、磁化自由層140の垂直磁気異方性をより高めることができる。

[0033] 中間層 162 は、非磁性材料で形成される。中間層 162 は、中間層 162 に隣接する層間の結晶配向等の差を緩和する。例えば、中間層 162 は、Ru、Pt、Pd、TiN 又は TaN などの非磁性材料にて膜厚 1 nm 以上 10 nm 以下で形成されてもよい。より詳細には、中間層 162 は、ルテニウム (Ru) にて膜厚 1 nm で形成されてもよい。

[0034] バリア層 163 は、非磁性遷移金属にて形成される。バリア層 163 は、熱処理等によって、上部電極 170 に含まれる金属がキャップ層 160 の下層の磁化自由層 140 又は第 1 絶縁層 130 に拡散することを防止する。具体的には、磁気トンネル接合素子 1 では、高温及び長時間の熱処理によって、上部電極 170 に含まれるタンタル (Ta) 等の金属原子が磁化自由層 140 又は第 1 絶縁層 130 に拡散することが生じ得る。このような場合、拡散したタンタル (Ta) 等によって磁化自由層 140 及び第 1 絶縁層 130 の界面が乱されるため、磁化自由層 140 の界面垂直磁気異方性が低下してしまう。バリア層 163 は、上部電極 170 から拡散するタンタル (Ta) 等をトラップすることで、タンタル (Ta) 等によって磁化自由層 140 及び第 1 絶縁層 130 の界面が乱されることを防止する。これによれば、バリア層 163 は、熱処理による原子の拡散によって磁化自由層 140 の垂直磁気異方性が低下することを防止することができる。

[0035] バリア層 163 は、隣接層 150 と同様に、密度及び熱伝導率が高い非磁性遷移金属にて形成することができる。例えば、バリア層 163 は、モリブデン (Mo)、タングステン (W)、ニオブ (Nb)、Ir (イリジウム) 又は Ti (チタン) のいずれかで形成されてもよい。なお、バリア層 163 は、隣接層 150 と同じ非磁性遷移金属で形成されてもよく、異なる非磁性遷移金属で形成されてもよい。より詳細には、バリア層 163 は、モリブデン (Mo) にて形成されてもよい。

[0036] 例えば、バリア層 163 は、上部電極 170 に含まれる金属の密度及び熱伝導率の積よりも、密度及び熱伝導率の積が大きい金属で形成されてもよい。ここで、タンタル (Ta)、モリブデン (Mo)、タングステン (W)、

ニオブ（Nb）、Ir（イリジウム）及びTi（チタン）の融点、密度及び熱伝導率は、以下の表1に示すとおりである。したがって、上部電極170に含まれる金属がタンタル（Ta）である場合、バリア層163は、タンタル（Ta）の密度及び熱伝導率の積よりも密度及び熱伝導率の積が大きいモリブデン（Mo）、イリジウム（Ir）、又はタングステン（W）で形成されてもよい。このような場合、バリア層163は、上部電極170からの金属原子の拡散をより効果的に抑制することができる。

[0037] [表1]

(表1)

材料	融点 (°C)	密度 (g/cm ³)	熱伝導率 (W/m·K)
Mo	2623	10.22	127
Ir	2433	22.42	139
W	3407	19.3	139
Nb	2477	8.57	53.7
Ti	1665	4.54	19
Ta	2985	16.65	58.5

[0038] バリア層163は、膜厚1.0nm以上10nm以下で形成されてもよい。すなわち、バリア層163は、同様の材料で形成される隣接層150よりも厚い膜厚で形成され得る。これによれば、バリア層163は、上部電極170から磁化自由層140又は第1絶縁層130へのタンタル（Ta）の拡散をより確実に防止することができる。後述する実施例で示すように、バリア層163が膜厚1.0nm以上で形成される場合、上部電極170からの金属の拡散を十分に防止することができるため、磁気トンネル接合素子1のHcばらつきを小さくすることができる。一方、バリア層163が膜厚10nm以下で形成される場合、磁気トンネル接合素子1の加工性が良好となるため、加工精度等に起因する二次的な特性ばらつきを小さくすることができる。

[0039] 上部電極170は、キャップ層160の上に設けられる。上部電極170は、各種金属材料又は合金材料にて形成されることで、磁気トンネル接合素

子 1 と各種配線との接続点として機能する。上部電極 170 は、公知の材料及び積層構造で形成されてもよく、例えば、単層膜で形成されてもよく、複数の膜の積層膜で形成されてもよい。また、上部電極 170 は、磁気トンネル接合素子 1 をエッチング等によって素子加工する際のハードマスクとして機能してもよい。このような場合、上部電極 170 は、タンタル (Ta) 又は窒化タンタル (Ta_N) を含んで形成されてもよい。より詳細には、上部電極 170 は、キャップ層 160 側から膜厚 1 nm の Ru 膜、膜厚 1 nm の Ta 膜、膜厚 5 nm の Ru 膜、及び膜厚 77 nm の Ta 膜を順に積層した多層構造にて形成されてもよい。または、上部電極 170 は、キャップ層 160 側から膜厚 1 nm の Ru 膜、膜厚 1 nm の Ta 膜、膜厚 5 nm の Ru 膜、及び膜厚 77 nm の Ta_N 膜を順に積層した多層構造、膜厚 1 nm の Ru 膜、膜厚 1 nm の Ta_N 膜、膜厚 5 nm の Ru 膜、及び膜厚 77 nm の Ta 膜を順に積層した多層構造、又は膜厚 1 nm の Ru 膜、膜厚 1 nm の Ta_N 膜、膜厚 5 nm の Ru 膜、及び膜厚 77 nm の Ta_N 膜を順に積層した多層構造にて形成されてもよい。

[0040] 上述したように、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 では、非磁性遷移金属で形成された隣接層 150 が磁化自由層 140 に隣接して設けられ、かつ同様に非磁性遷移金属で形成されたバリア層 163 がキャップ層 160 内に設けられる。これにより、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 は、熱耐性を向上させることができる。

[0041] かかる効果について、図 2 A 及び図 2 B を参照して、より具体的に説明する。図 2 A は、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 に熱処理を行った際の原子の拡散の様子を模式的に示す縦断面図である。図 2 B は、比較例に係る磁気トンネル接合素子 90 に熱処理を行った際の原子の拡散の様子を模式的に示す縦断面図である。

[0042] 図 2 B に示すように、比較例に係る磁気トンネル接合素子 90 では、磁気トンネル接合素子 1 と比較して、隣接層 150 及びバリア層 163 が設けられていない。したがって、比較例に係る磁気トンネル接合素子 90 では、高

温及び長時間での熱処理が行われた場合、上部電極 170 に含まれるタンタル (Ta) 等の金属原子は、キャップ層 160 側に拡散してしまう。熱処理によって拡散したタンタル (Ta) は、磁化自由層 140 及び第 1 絶縁層 130 の界面を乱し、界面垂直磁気異方性を低下させることで、磁化自由層 140 の垂直磁気異方性が低下させてしまう。また、磁化自由層 140 では、磁化自由層 140 に含まれるホウ素 (B) がキャップ層 160 側へ拡散するため、ホウ素 (B) の含有量が低下し、垂直磁気異方性を維持することが困難になってしまう。

[0043] したがって、比較例に係る磁気トンネル接合素子 90 では、高温及び長時間の熱処理によって、磁化自由層 140 の垂直磁気異方性が低下してしまう。このような場合、磁気トンネル接合素子 90 は、磁化自由層 140 の磁化容易軸を膜面に垂直方向に制御することが困難になるため、所望の磁気特性を実現することが困難になってしまう。よって、比較例に係る磁気トンネル接合素子 90 は、熱耐性が低いため、高温及び長時間の熱処理を行うことが困難であった。

[0044] 一方、図 2A に示すように、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 では、高温及び長時間での熱処理が行われた場合、上部電極 170 に含まれるタンタル (Ta) 等の金属原子は、バリア層 163 によってキャップ層 160 側への拡散が防止される。これにより、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 では、磁化自由層 140 及び第 1 絶縁層 130 との界面がタンタル (Ta) 等によって乱されないため、磁化自由層 140 は、垂直磁気異方性を維持することができる。また、磁化自由層 140 に含まれるホウ素 (B) は、隣接層 150 によってキャップ層 160 側への拡散が抑制される。よって、磁化自由層 140 は、垂直磁気異方性を維持するために十分な量のホウ素 (B) を保持することができる。

[0045] したがって、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 では、高温及び長時間の熱処理にて生じる原子の拡散を抑制することで、磁化自由層 140 の垂直磁気異方性の低下を抑制することができる。これによれば、本実施形態

に係る磁気トンネル接合素子 1 は、高負荷の熱処理が行われた場合でも、所望の磁気特性を維持することが可能である。よって、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 は、ロジック回路、メモリ回路又は画素回路等の様々な回路が混載され、様々な熱処理プロセスが行われる半導体装置に対して、製造プロセスを制約することなく混載されることができる。

[0046] < 2. 他の構成例 >

続いて、図 3～図 18 を参照して、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 の他の構成例について説明する。図 3～図 18 は、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 2～17 の他の積層構造を模式的に示す縦断面図である。

[0047] 図 3～図 18 に示す磁気トンネル接合素子 2～17 の他の積層構造は、図 1 で示した磁気トンネル接合素子 1 の積層構造に対して、キャップ層 160 の内部の積層構造のみが異なる。したがって、以下では、図 1、図 3～図 18 に示す磁気トンネル接合素子 1～17 の各々のキャップ層 160 の差異についてのみ説明し、共通する基板 100～隣接層 150 及び上部電極 170 の各層についての説明は省略する。

[0048] 図 3 に示すように、磁気トンネル接合素子 2 は、図 1 に示す磁気トンネル接合素子 1 に対して、中間層 162 及びバリア層 163 の積層順が入れ替わっている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 2 のキャップ層 160 は、隣接層 150 側から第 2 絶縁層 161、バリア層 163、及び中間層 162 を積層した構造を備える。すなわち、バリア層 163 は、上部電極 170 に隣接して設けられていなくともよく、キャップ層 160 のいずれかの位置に設けられていればよい。バリア層 163 は、上部電極 170 から磁化自由層 140 及び第 1 絶縁層 130 の間の界面への金属の拡散を防止する層であるため、上部電極 170 と隣接層 150 との間のいずれかの位置に設けられていればよい。

[0049] ただし、キャップ層 160 が第 2 絶縁層 161 を含む場合、界面垂直磁気異方性によって磁化自由層 140 の垂直磁気異方性を高めるために、第 2 絶

縁層 161 は、隣接層 150 に隣接して設けられる。このような場合、バリア層 163 は、上部電極 170 と第 2 絶縁層 161 との間のいずれかの位置に設けられることになる。

[0050] 図 4 に示すように、磁気トンネル接合素子 3 は、図 1 に示す磁気トンネル接合素子 1 に対して、複数のバリア層 163 A、163 B が設けられている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 3 のキャップ層 160 は、隣接層 150 側から第 2 絶縁層 161、第 1 のバリア層 163 A、中間層 162、及び第 2 のバリア層 163 B を積層した構造を備える。

[0051] 第 1 のバリア層 163 A 及び第 2 のバリア層 163 B は、図 1 に示す磁気トンネル接合素子 1 のバリア層 163 と同様の材料及び膜厚で形成され、上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散を防止する。図 4 に示す磁気トンネル接合素子 3 では、バリア層 163 A、163 B が複数設けられているため、熱処理の際の上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散をより確実に防止することで、磁化自由層 140 の垂直磁気異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0052] 図 5 に示すように、磁気トンネル接合素子 4 は、図 1 に示す磁気トンネル接合素子 1 に対して、第 2 絶縁層 161 及び中間層 162 の間に磁性層 164 が挿入されている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 4 のキャップ層 160 は、隣接層 150 側から第 2 絶縁層 161、磁性層 164、中間層 162、及びバリア層 163 を積層した構造を備える。

[0053] 磁性層 164 は、磁化自由層 140 と同様に、3d 遷移金属及びホウ素 (B) を含む磁性材料にて形成され、磁気トンネル接合素子 4 の磁気特性を向上させる。具体的には、磁性層 164 は、第 2 絶縁層 161 に隣接して積層されることで、熱処理後の第 2 絶縁層 161 の結晶性を向上させる。これにより、磁性層 164 は、隣接層 150 を介して磁化自由層 140 の垂直磁気異方性を向上させることができる。

[0054] 例えば、磁性層 164 は、CoFeB にて膜厚 0.9 nm 以下で形成されてもよい。磁性層 164 は、ホウ素 (B) の含有量を 15 原子%以上とする

ことで、垂直磁気異方性をより強めることができる。後述する実施例にて示すように、第2絶縁層161の上に設けられた磁性層164が膜厚0.9nm以下で形成されることにより、磁気トンネル接合素子4は、高い垂直磁気異方性及び保磁力を有することができる。なお、磁性層164の膜厚の下限は、特に限定されないが、0.1nmとしてもよい。図5に示す磁気トンネル接合素子4では、磁化自由層140に加えて、磁性層164が設けられるため、磁気トンネル接合素子4の全体での磁気特性を向上させることができる。

[0055] 図6に示すように、磁気トンネル接合素子5は、図5に示す磁気トンネル接合素子4に対して、中間層162及びバリア層163の積層順が入れ替わっている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子5のキャップ層160は、隣接層150側から第2絶縁層161、磁性層164、バリア層163、及び中間層162を積層した構造を備える。すなわち、バリア層163は、上部電極170に隣接して設けられていなくともよく、キャップ層160のいずれかの位置に設けられていればよい。バリア層163は、上部電極170からの金属の拡散を防止する層であるため、上部電極170と磁性層164との間のいずれかの位置に設けられていればよい。

[0056] 図7に示すように、磁気トンネル接合素子6は、図4に示す磁気トンネル接合素子3に対して、複数のバリア層163A、163Bが設けられている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子6のキャップ層160は、隣接層150側から第2絶縁層161、磁性層164、第1のバリア層163A、中間層162、及び第2のバリア層163Bを積層した構造を備える。

[0057] 第1のバリア層163A及び第2のバリア層163Bは、図1に示す磁気トンネル接合素子1のバリア層163と同様の材料及び膜厚で形成され、上部電極170からのタンタル（Ta）等の拡散を防止する。また、第1のバリア層163Aは、磁性層164からのホウ素（B）の拡散を抑制することができる。図7に示す磁気トンネル接合素子6では、バリア層163A、1

63Bが複数設けられているため、熱処理の際の上部電極170からのタンタル（Ta）等の拡散をより確実に防止し、磁化自由層140及び磁性層164の垂直磁気異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0058] 図8に示すように、磁気トンネル接合素子7は、図1に示す磁気トンネル接合素子1に対して、第2絶縁層161が設けられず、キャップ層160の各層が導電材料で形成される点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子7のキャップ層160は、隣接層150側から中間層162、及びバリア層163を積層した構造を備える。第2絶縁層161は、界面垂直磁気異方性によって、磁化自由層140の垂直磁気異方性を高める層であるため、磁化自由層140の垂直磁気異方性の程度によっては設けられなくともよい。図8に示す磁気トンネル接合素子7では、キャップ層160の積層構造を簡略化することによって、製造コストを削減することができる。

[0059] 図9に示すように、磁気トンネル接合素子8は、図1に示す磁気トンネル接合素子1に対して、第2絶縁層161及び中間層162の間に、3d遷移金属及びホウ素（B）を含む磁性材料にて形成される磁性層と、非磁性遷移金属で形成される非磁性層とを積層した調整層165が挿入されている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子8のキャップ層160は、隣接層150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層165、第2絶縁層161、中間層162、及びバリア層163を積層した構造を備える。

[0060] 調整層165の磁性層は、磁化自由層140と同様に、3d遷移金属及びホウ素（B）を含む磁性材料にて形成され、例えば、CoFeBにて膜厚0.7nm以下で形成されてもよい。調整層165の磁性層は、ホウ素（B）の含有量を15原子%以上とすることで、垂直磁気異方性をより強めることができる。後述する実施例にて示すように、調整層165の磁性層は、膜厚0.7nm以下で形成されることにより、書き込み電圧が過度に高くなることを防止することができる。なお、調整層165の磁性層の膜厚の下限は、特に限定されないが、0.1nmとしてもよい。

[0061] 調整層165の非磁性層は、隣接層150と同様に、モリブデン（Mo）

、タングステン（W）、ニオブ（Nb）、Ir（イリジウム）又はTi（チタン）などの非磁性遷移金属で形成され、例えば、モリブデン（Mo）にて膜厚0.25nm以上1.0nm以下で形成されてもよい。調整層165の非磁性層は、下層の磁性層に含まれるホウ素（B）が熱処理によって拡散することを抑制することができる。

[0062] 図9に示す磁気トンネル接合素子8では、キャップ層160に磁化自由層140及び隣接層150と同様の積層構造の調整層165を含むことによって、熱処理後の磁化自由層140の近傍のホウ素（B）の濃度をより高い精度で制御することが可能となる。これによれば、磁気トンネル接合素子8は、熱処理による磁化自由層140の垂直異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0063] 図10に示す磁気トンネル接合素子9は、図9に示す磁気トンネル接合素子8に対して、中間層162及びバリア層163の積層順が入れ替わっている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子9のキャップ層160は、隣接層150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層165、第2絶縁層161、バリア層163、及び中間層162を積層した構造を備える。すなわち、バリア層163は、上部電極170に隣接して設けられていなくともよく、キャップ層160のいずれかの位置に設けられていればよい。バリア層163は、上部電極170から磁化自由層140及び第1絶縁層130の間の界面への金属の拡散を防止する層であるため、上部電極170と第2絶縁層161との間のいずれかの位置に設けられていればよい。

[0064] 図11に示すように、磁気トンネル接合素子10は、図9に示す磁気トンネル接合素子8に対して、複数のバリア層163A、163Bが設けられている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子10のキャップ層160は、磁性層及び非磁性層からなる調整層165、第2絶縁層161、第1のバリア層163A、中間層162、及び第2のバリア層163Bを積層した構造を備える。

[0065] 第1のバリア層163A及び第2のバリア層163Bは、図1に示す磁気

トンネル接合素子 1 のバリア層 163 と同様の材料及び膜厚で形成され、上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散を防止する。図 11 に示す磁気トンネル接合素子 10 では、バリア層 163A、163B が複数設けられているため、熱処理の際の上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散をより確実に防止し、磁化自由層 140 の垂直磁気異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0066] 図 12 に示すように、磁気トンネル接合素子 11 は、図 9 に示す磁気トンネル接合素子 8 に対して、第 2 絶縁層 161 及び中間層 162 の間に磁性層 164 が挿入されている点が異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 11 のキャップ層 160 は、隣接層 150 側から磁性層及び非磁性層からなる調整層 165、第 2 絶縁層 161、磁性層 164、中間層 162、及びバリア層 163 を積層した構造を備える。

[0067] 磁性層 164 は、磁化自由層 140 と同様に、3d 遷移金属及びホウ素 (B) を含む磁性材料にて形成され、磁気トンネル接合素子 11 の磁気特性を向上させる。具体的には、磁性層 164 は、第 2 絶縁層 161 に隣接して積層されることで、熱処理後の第 2 絶縁層 161 の結晶性を向上させる。これにより、磁性層 164 は、隣接層 150 を介して磁化自由層 140 の垂直磁気異方性を向上させることができる。

[0068] 例えば、磁性層 164 は、CoFeB にて膜厚 0.9 nm 以下で形成されてもよい。磁性層 164 は、ホウ素 (B) の含有量を 15 原子%以上とすることで、垂直磁気異方性をより強めることができる。後述する実施例にて示すように、第 2 絶縁層 161 の上に設けられた磁性層 164 が膜厚 0.9 nm 以下で形成されることにより、磁気トンネル接合素子 11 は、高い垂直磁気異方性及び保磁力を有することができる。なお、磁性層 164 の膜厚の下限は、特に限定されないが、0.1 nm としてもよい。図 12 に示す磁気トンネル接合素子 11 では、磁化自由層 140 に加えて、磁性層 164 が設けられるため、磁気トンネル接合素子 11 の全体での磁気特性を向上させることができる。

[0069] 図13に示すように、磁気トンネル接合素子12は、図12に示す磁気トンネル接合素子11に対して、中間層162及びバリア層163の積層順が入れ替わっている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子12のキャップ層160は、隣接層150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層165、第2絶縁層161、磁性層164、バリア層163、及び中間層162を積層した構造を備える。すなわち、バリア層163は、上部電極170に隣接して設けられていなくともよく、キャップ層160のいずれかの位置に設けられていればよい。バリア層163は、上部電極170からの金属の拡散を防止する層であるため、上部電極170と磁性層164との間のいずれかの位置に設けられていればよい。

[0070] 図14に示すように、磁気トンネル接合素子13は、図12に示す磁気トンネル接合素子11に対して、複数のバリア層163A、163Bが設けられている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子13のキャップ層160は、隣接層150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層165、第2絶縁層161、磁性層164、第1のバリア層163A、中間層162、及び第2のバリア層163Bを積層した構造を備える。

[0071] 第1のバリア層163A及び第2のバリア層163Bは、図1に示す磁気トンネル接合素子1のバリア層163と同様の材料及び膜厚で形成され、上部電極170からのタンタル（Ta）等の拡散を防止する。また、第1のバリア層163Aは、磁性層164からのホウ素（B）の拡散を抑制することができる。図14に示す磁気トンネル接合素子13では、バリア層163A、163Bが複数設けられているため、熱処理の際の上部電極170からのタンタル（Ta）等の拡散をより確実に防止し、磁化自由層140及び磁性層164の垂直磁気異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0072] 図15に示すように、磁気トンネル接合素子14は、図9に示す磁気トンネル接合素子8に対して、第2絶縁層161が設けられず、キャップ層160の各層が導電材料で形成される点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子14のキャップ層160は、隣接層150側から磁性層及び非磁性層

からなる調整層 165、中間層 162、及びバリア層 163を積層した構造を備える。第2絶縁層 161は、界面垂直磁気異方性によって、磁化自由層 140の垂直磁気異方性を高める層であるため、磁化自由層 140の垂直磁気異方性の程度によっては、設けられなくともよい。図 15に示す磁気トンネル接合素子 14では、キャップ層 160の積層構造を簡略化することによって、製造コストを削減することができる。

[0073] 図 16に示すように、磁気トンネル接合素子 15は、図 15に示す磁気トンネル接合素子 14に対して、調整層 165及び中間層 162の間に磁性層 164が挿入されている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 15のキャップ層 160は、隣接層 150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層 165、磁性層 164、中間層 162、及びバリア層 163を積層した構造を備える。

[0074] 例えば、磁性層 164は、3d遷移金属及びホウ素(B)を含む磁性材料にて形成されてもよく、CoFeBにて膜厚0.9nm以下で形成されてもよい。磁性層 164は、ホウ素(B)の含有量を15原子%以上とすることで、垂直磁気異方性をより強めることができる。後述する実施例にて示すように、磁性層 164が膜厚0.9nm以下で形成されることにより、磁気トンネル接合素子 15は、高い垂直磁気異方性及び保磁力を有することができる。なお、磁性層 164の膜厚の下限は、特に限定されないが、0.1nmとしてもよい。図 16に示す磁気トンネル接合素子 15では、磁化自由層 140に加えて、磁性層 164が設けられるため、磁気トンネル接合素子 15の全体での磁気特性を向上させることができる。

[0075] 図 17に示すように、磁気トンネル接合素子 16は、図 16に示す磁気トンネル接合素子 15に対して、中間層 162及びバリア層 163の積層順が入れ替わっている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 16のキャップ層 160は、隣接層 150側から磁性層及び非磁性層からなる調整層 165、磁性層 164、バリア層 163、及び中間層 162を積層した構造を備える。すなわち、バリア層 163は、上部電極 170に隣接して設けら

れていなくともよく、キャップ層 160 のいずれかの位置に設けられていればよい。バリア層 163 は、上部電極 170 からの金属の拡散を防止する層であるため、上部電極 170 と磁性層 164 との間のいずれかの位置に設けられていればよい。

[0076] 図 18 に示すように、磁気トンネル接合素子 17 は、図 16 に示す磁気トンネル接合素子 15 に対して、複数のバリア層 163 A、163 B が設けられている点異なる。具体的には、磁気トンネル接合素子 17 のキャップ層 160 は、隣接層 150 側から磁性層及び非磁性層からなる調整層 165、磁性層 164、第 1 のバリア層 163 A、中間層 162、及び第 2 のバリア層 163 B を積層した構造を備える。

[0077] 第 1 のバリア層 163 A 及び第 2 のバリア層 163 B は、図 1 に示す磁気トンネル接合素子 1 のバリア層 163 と同様の材料及び膜厚で形成され、上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散を防止する。また、第 1 のバリア層 163 A は、磁性層 164 からのホウ素 (B) の拡散を抑制することができる。図 18 に示す磁気トンネル接合素子 17 では、バリア層 163 A、163 B が複数設けられているため、熱処理の際の上部電極 170 からのタンタル (Ta) 等の拡散をより確実に防止し、磁化自由層 140 及び磁性層 164 の垂直磁気異方性の低下をより確実に防止することができる。

[0078] 以上にて、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1～17 の構成例について説明した。本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1～17 を構成する各層は、いずれもスパッタリング法によって成膜することができる。スパッタリング法の成膜条件等は、特に限定されず、適宜最適な条件を選択することができる。

[0079] <3. 変形例>

次に、図 19 を参照して、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子 1 の変形例について説明する。図 19 は、本変形例に係る磁気トンネル接合素子 1 を模式的に示す縦断面図である。

[0080] 図 19 に示すように、本変形例に係る磁気トンネル接合素子 1 は、エッチ

ング等によって素子加工されており、素子加工後に露出した面が保護膜 180 によって覆われている。なお、保護膜 180 は、磁気トンネル接合素子 1 の少なくとも側面を覆っていればよく、磁気トンネル接合素子 1 の上面は必ずしも覆っていなくともよい。

[0081] 保護膜 180 は、 SiN_x 又は SiO_x 等の絶縁膜であり、PVD (Physical Vapor Deposition) 等の物理的な成膜方法によって成膜されることができる。例えば、保護膜 180 は、プラズマ PVD によって成膜された SiN 膜であってもよい。

[0082] エッチング等による素子加工後の磁気トンネル接合素子 1 は、磁化自由層 140 及び磁化固定層 120 等の端面が露出している。そのため、これらの端面が CVD (Chemical Vapor Deposition) 等の化学的な成膜方法で用いられる原料ガス (例えば、 SiH_4 又は NH_3 等) に曝露された場合、化学反応によって磁化自由層 140 及び磁化固定層 120 の磁気特性が低下する可能性がある。したがって、保護膜 180 は、物理的な成膜方法によって成膜されることによって、素子加工後の磁気トンネル接合素子 1 の磁気特性の低下を防止することができる。

[0083] 保護膜 180 の膜厚は、特に限定されないが、例えば、5 nm 以上 30 nm 以下としてもよい。保護膜 180 は、例えば、純度 5 N 超のシリコン (Si) ターゲットを用いて、Ar 及び N_2 ガス雰囲気下で反応性スパッタを行うことで形成することができる。Ar ガス及び N_2 ガスの流量は、例えば、それぞれ 20 sccm としてもよい。

[0084] このような物理的な成膜方法で形成された保護膜 180 で側面を保護された磁気トンネル接合素子 1 は、書き込み電圧をより低電圧化することができる。高温及び長時間の熱処理が行われた磁気トンネル接合素子 1 は、熱負荷によって書き込み電圧が上昇しやすいため、上述した保護膜 180 を用いて書き込み電圧の低電圧化を図っておくことがより好ましい。

実施例

[0085] 以下では、実施例及び比較例を参照しながら、本実施形態に係る磁気トン

ネル接合素子について具体的に説明する。なお、以下に示す実施例は、あくまでも一例であって、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子が下記の例に限定されるものではない。

[0086] <本実施形態に係る磁気トンネル接合素子の効果の検証>

まず、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子の効果を検証するために、図20～図23にて積層構造を示す磁気トンネル接合素子を製造した。図20は、実施例1に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。図21は、実施例2に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。図22は、比較例1に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。図23は、比較例2に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。なお、図20～図23において、括弧書き内の数値は、ナノメートル単位の各層の膜厚を表す。

[0087] 図20に示すように、Si基板上に、Ta (5 nm)、Pt (5 nm) 及びRu (3 nm) からなる下部電極と、Pt (0.3 nm)、Co (0.5 nm) 及びPt (0.3 nm) の6回積層構造、Co (0.5 nm)、Ir (0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、Mo (0.8 nm) の隣接層と、MgO (1.0 nm)、Ru (7 nm) 及びMo (7 nm) からなるキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) からなる上部電極と、を積層することで、実施例1に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0088] また、図21に示すように、Si基板上に、Ta (5 nm)、Pt (5 nm) 及びRu (3 nm) からなる下部電極と、Pt (0.3 nm)、Co (0.5 nm) 及びPt (0.3 nm) の6回積層構造、Co (0.5 nm)、Ir (0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、Mo (0.8 nm) の

隣接層と、CoFeB (0.5 nm)、Mo (0.8 nm)、MgO (1.0 nm) 及びMo (7 nm) からなるキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) からなる上部電極と、を積層することで、実施例2に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0089] また、図22に示すように、Si基板上に、Ta (5 nm)、Pt (5 nm) 及びRu (3 nm) からなる下部電極と、Pt (0.3 nm)、Co (0.5 nm) 及びPt (0.3 nm) の6回積層構造、Co (0.5 nm)、Ir (0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、MgO (1.0 nm)、及びCoFeB (0.5 nm) からなるキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) からなる上部電極と、を積層することで、比較例1に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0090] さらに、図23に示すように、Si基板上に、Ta (5 nm)、Pt (5 nm) 及びRu (3 nm) からなる下部電極と、Pt (0.3 nm)、Co (0.5 nm) 及びPt (0.3 nm) の6回積層構造、Co (0.5 nm)、Ir (0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、MgO (1.0 nm)、CoFeB (0.5 nm)、Ru (7 nm) 及びMo (7 nm) からなるキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) からなる上部電極と、を積層することで、比較例2に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0091] 続いて、Si基板上に成膜した状態、成膜した状態から直径60 nm程度の円柱形状に素子加工した状態、及び素子加工後にさらに高温及び長時間の熱処理を行った状態の各々において、実施例1、2又は比較例1、2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性を評価した。具体的には、M-Hループの測定は、振動試料型磁力計 (Vibrating Sample M

agnetometer : VSM) にて行い、R-Hループの測定は、オートプローバにて行った。その結果を図24A～図27Cに示す。

[0092] 図24A～図24Cは、実施例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。また、図25A～図25Cは、実施例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。さらに、図26A～図26Cは、比較例1に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。図27A～図27Cは、比較例2に係る磁気トンネル接合素子の磁気抵抗特性の評価結果を示すグラフ図である。

[0093] 図24A～図24Cを参照すると、実施例1に係る磁気トンネル接合素子では、Si基板上に成膜した状態(図24A)、素子加工した状態(図24B)、及び熱処理を行った状態(図24C)のいずれでも角形のヒステリシス曲線が形成されていることがわかる。したがって、実施例1では、素子加工及び熱処理後も磁気トンネル接合素子は、MTJ素子として機能しており、磁化自由層は、垂直磁気異方性を保持していることがわかる。

[0094] 図25A～図25Cを参照すると、実施例2に係る磁気トンネル接合素子では、Si基板上に成膜した状態(図25A)、素子加工した状態(図25B)、及び熱処理を行った状態(図25C)のいずれでも角形のヒステリシス曲線が形成されていることがわかる。したがって、実施例2では、素子加工及び熱処理後も磁気トンネル接合素子は、MTJ素子として機能しており、磁化自由層は、垂直磁気異方性を保持していることがわかる。

[0095] 一方、図26A～図26Cを参照すると、比較例1に係る磁気トンネル接合素子では、Si基板上に成膜した状態(図26A)では、角形のヒステリシス曲線が形成されているものの、素子加工した状態(図26B)及び熱処理を行った状態(図26C)では、ヒステリシス曲線が形成されていないことがわかる。したがって、比較例1では、磁化自由層は、Si基板上に成膜した状態では垂直磁気異方性を備えているものの、素子加工によって垂直磁気異方性を失うため、素子加工後の磁気トンネル接合素子は、MTJ素子と

して機能しなくなることがわかる。

[0096] また、図27A～図27Cを参照すると、比較例2に係る磁気トンネル接合素子では、Si基板上に成膜した状態（図27A）及び素子加工した状態（図27B）では、角形のヒステリシス曲線が形成されているものの、熱処理を行った状態（図27C）では、ヒステリシス曲線が形成されていないことがわかる。したがって、比較例2では、磁化自由層は、Si基板上に成膜した状態及び素子加工した状態では垂直磁気異方性を備えているものの、熱処理によって垂直磁気異方性を失うため、熱処理後の磁気トンネル接合素子は、MTJ素子として機能しなくなることがわかる。

[0097] したがって、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子は、非磁性遷移金属で形成された隣接層が磁化自由層に隣接して設けられ、かつ同様に非磁性遷移金属で形成されたバリア層がキャップ層の内部に設けられることで、素子加工及び熱処理後もMTJ素子として機能することがわかる。すなわち、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子は、熱処理に対する耐性が向上していることがわかる。

[0098] <磁気トンネル接合素子の各層の膜厚の検討>

次に、本実施形態に係る磁気トンネル接合素子の各層の膜厚を変化させて、磁気特性を測定した。具体的には、M-Hループの測定は、振動試料型磁力計（Vibrating Sample Magnetometer: VSM）にて行い、R-Hループの測定は、オートプロバにて行った。MR特性の測定は、C IPT（Current-In-Plane Tunneling）測定器にて行った。その結果を図30～図34に示す。

[0099] （隣接層）

まず、実施例1に係る磁気トンネル接合素子の隣接層の膜厚を0.15nmから1.15nmまで変化させた際の磁気トンネル接合素子のTMR比の変化を図30に示す。図30は、隣接層（Mo）の膜厚に対する磁気トンネル接合素子のTMR比の変化を相対値で示すグラフ図である。図30を参照すると、隣接層（Mo）の膜厚が0.1nm以上1nm以下の場合、磁気ト

ンネル接合素子のTMR比がより向上することがわかる。

[0100] (バリア層)

次に、実施例1に係る磁気トンネル接合素子のバリア層の膜厚を0.5 nmから11 nmまで変化させた際の磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきの変化を図31に示す。図31は、バリア層(Mo)の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきの変化を相対値で示すグラフ図である。図31を参照すると、バリア層(Mo)の膜厚が1 nm以上の場合、磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきがより小さくなることがわかる。一方、バリア層の膜厚が10 nm以下の場合、磁気トンネル接合素子の加工が容易になるため、磁気トンネル接合素子の加工精度を向上させることができる。

[0101] (中間層)

続いて、実施例1に係る磁気トンネル接合素子の中間層の膜厚を0.5 nmから11 nmまで変化させた際の磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきの変化を図32に示す。図32は、中間層(Ru)の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきの変化を相対値で示すグラフ図である。図32を参照すると、中間層の膜厚が1 nm以上の場合、磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)ばらつきが小さくなることがわかる。一方、中間層の膜厚が10 nm以下の場合、磁気トンネル接合素子の加工が容易になるため、磁気トンネル接合素子の加工精度を向上させることができる。

[0102] (磁性層)

次に、磁性層の膜厚を検討するために、図28にて積層構造を示す磁気トンネル接合素子を製造した。図28は、実施例3に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。

[0103] 図28に示すように、Si基板上に、Ta(5 nm)、Pt(5 nm)及びRu(3 nm)からなる下部電極と、Pt(0.3 nm)、Co(0.5 nm)及びPt(0.3 nm)の6回積層構造、Co(0.5 nm)、Ir

(0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、Mo (0.8 nm) の隣接層と、MgO (1.0 nm) の第2絶縁層、CoFeB (0 nm~3.5 nm) の磁性層、Ru (7 nm) の中間層、及びMo (7 nm) のバリア層を含むキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) からなる上部電極と、を積層することで、実施例3に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0104] ここで、実施例3に係る磁気トンネル接合素子の磁性層の膜厚を0 nmから3.5 nmまで変化させた際の磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)の変化を図33に示す。図33は、磁性層(CoFeB)の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)の変化を相対値で示すグラフ図である。図33を参照すると、磁性層(CoFeB)の膜厚が0.9 nm以下の場合、磁気トンネル接合素子の保磁力(Hc)がより大きくなることがわかる。

[0105] (調整層)

続いて、調整層の磁性層の膜厚を検討するために、図29にて積層構造を示す磁気トンネル接合素子を製造した。図29は、実施例4に係る磁気トンネル接合素子の積層構造を示す説明図である。

[0106] 図29に示すように、Si基板上に、Ta (5 nm)、Pt (5 nm) 及びRu (3 nm) からなる下部電極と、Pt (0.3 nm)、Co (0.5 nm) 及びPt (0.3 nm) の6回積層構造、Co (0.5 nm)、Ir (0.5 nm)、Co (0.6 nm)、Mo (0.4 nm)、CoFeB (0.9 nm) からなる磁化固定層と、MgO (1.0 nm) の第1絶縁層と、CoFeB (1.5 nm) の磁化自由層と、Mo (0.8 nm) の隣接層と、CoFeB (0 nm~1 nm) 及びMo (0.8 nm) の調整層、MgO (1.0 nm) の第2絶縁層、CoFeB (0.5 nm) の磁性層、Ru (7 nm) の中間層、及びMo (7 nm) のバリア層を含むキャップ層と、Ru (1 nm)、Ta (1 nm)、Ru (5 nm) 及びTa (77 nm) か

らなる上部電極と、を積層することで、実施例4に係る磁気トンネル接合素子を製造した。

[0107] ここで、実施例4に係る磁気トンネル接合素子の調整層における磁性層の膜厚を0 nmから1 nmまで変化させた際の磁気トンネル接合素子の書き込み電圧 (V_c) の変化を図34に示す。図34は、調整層における磁性層 (CoFeB) の膜厚に対する磁気トンネル接合素子の書き込み電圧 (V_c) の変化を相対値で示すグラフ図である。図34を参照すると、調整層における磁性層 (CoFeB) の膜厚が0.7 nm以下の場合、磁気トンネル接合素子の書き込み電圧をより低くすることができることがわかる。

[0108] 以上、添付図面を参照しながら本開示の好適な実施形態について詳細に説明したが、本開示の技術的範囲はかかる例に限定されない。本開示の技術分野における通常の知識を有する者であれば、特許請求の範囲に記載された技術的思想の範疇内において、各種の変更例または修正例に想到し得ることは明らかであり、これらについても、当然に本開示の技術的範囲に属するものと了解される。

[0109] 例えば、上記実施形態に係る磁気トンネル接合素子1～17は、多様な半導体装置にトランジスタ等と共に混載され得る。例えば、磁気トンネル接合素子1～17は、固体撮像装置、演算処理装置、通信装置又は記憶装置等の半導体装置に混載されてもよい。

[0110] また、本明細書に記載された効果は、あくまで説明的または例示的なものであって限定的ではない。つまり、本開示に係る技術は、上記の効果とともに、または上記の効果に代えて、本明細書の記載から当業者には明らかな他の効果を奏しうる。

[0111] なお、以下のような構成も本開示の技術的範囲に属する。

(1)

磁化の向きが固定された磁化固定層と、

前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層と、

前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、

前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、

前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、
を備える、磁気トンネル接合素子。

(2)

前記キャップ層の上に設けられた上部電極をさらに備え、

前記非磁性遷移金属の密度及び熱伝導率の積は、前記上部電極に含まれる金属材料の密度及び熱伝導率の積よりも高い、前記(1)に記載の磁気トンネル接合素子。

(3)

前記上部電極は、Ta又はTa_Nを含み、

前記上部電極に含まれる金属材料は、Taである、前記(2)に記載の磁気トンネル接合素子。

(4)

前記非磁性遷移金属は、Mo、W、Nb、Ir、Hf又はTiのいずれかである、前記(1)に記載の磁気トンネル接合素子。

(5)

前記キャップ層は、3d遷移金属及びBを含む磁性材料で形成された磁性層の上に前記非磁性遷移金属で形成された層を積層させた積層構造をさらに含み、

前記積層構造は、前記磁性層が前記隣接層に隣接するように設けられる、前記(1)～(4)のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

(6)

前記積層構造の前記磁性層の膜厚は、0.7nm以下である、前記(5)に記載の磁気トンネル接合素子。

(7)

前記3d遷移金属及びBを含む磁性材料は、Bを15原子%以上含む、前

記（５）又は（６）に記載の磁気トンネル接合素子。

（８）

前記キャップ層は、絶縁材料で形成された第２絶縁層をさらに含む、前記（１）～（７）のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

（９）

前記第２絶縁層は、前記隣接層の上に設けられる、前記（８）に記載の磁気トンネル接合素子。

（１０）

前記第１絶縁層及び前記第２絶縁層を形成する絶縁材料は、無機酸化物である、前記（９）に記載の磁気トンネル接合素子。

（１１）

前記キャップ層は、３ｄ遷移金属及びＢを含む磁性材料で形成され、前記第２絶縁層の上に設けられる磁性層をさらに含む、前記（８）～（１０）のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

（１２）

前記第２絶縁層の上に設けられる前記磁性層の膜厚は、０．９ｎｍ以下である、前記（１１）に記載の磁気トンネル接合素子。

（１３）

前記３ｄ遷移金属及びＢを含む磁性材料は、Ｂを１５原子％以上含む、前記（１１）又は（１２）に記載の磁気トンネル接合素子。

（１４）

前記キャップ層の各層は、導電材料で形成される、前記（１）～（７）のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

（１５）

前記隣接層の膜厚は、０．２５ｎｍ以上１ｎｍ以下である、前記（１）～（１４）のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

（１６）

前記バリア層の膜厚は、１ｎｍ以上１０ｎｍ以下である、前記（１）～（

15) のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

(17)

前記キャップ層は、非磁性材料で形成される中間層をさらに含み、

前記中間層の膜厚は、1 nm以上10 nm以下である、前記(1)～(16) のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

(18)

前記磁気トンネル接合素子は、柱体形状又は錐体形状である、前記(1)～(17) のいずれか一項に記載の磁気トンネル接合素子。

(19)

磁気トンネル接合素子を備え、

前記磁気トンネル接合素子は、

磁化の向きが固定された磁化固定層と、

前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層と、

前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、

前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、

前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、
を備える、半導体装置。

符号の説明

- [0112] 1、2、3、4、5、6、7、8、9、10、11、12、13、14、
15、16、17 磁気トンネル接合素子
100 基板
110 下部電極
120 磁化固定層
130 第1絶縁層
140 磁化自由層
150 隣接層

1 6 0	キャップ層
1 6 1	第2絶縁層
1 6 2	中間層
1 6 3	バリア層
1 6 4	磁性層
1 6 5	調整層
1 7 0	上部電極
1 8 0	保護膜

請求の範囲

- [請求項1] 磁化の向きが固定された磁化固定層と、
前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層と、
前記第1絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、
前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、
前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも1つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、
を備える、磁気トンネル接合素子。
- [請求項2] 前記キャップ層の上に設けられた上部電極をさらに備え、
前記非磁性遷移金属の密度及び熱伝導率の積は、前記上部電極に含まれる金属材料の密度及び熱伝導率の積よりも高い、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項3] 前記上部電極は、Ta又はTa_Nを含み、
前記上部電極に含まれる金属材料は、Taである、請求項2に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項4] 前記非磁性遷移金属は、Mo、W、Nb、Ir、Hf又はTiのいずれかである、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項5] 前記キャップ層は、3d遷移金属及びBを含む磁性材料で形成された磁性層の上に前記非磁性遷移金属で形成された層を積層させた積層構造をさらに含み、
前記積層構造は、前記磁性層が前記隣接層に隣接するように設けられる、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項6] 前記積層構造の前記磁性層の膜厚は、0.7nm以下である、請求項5に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項7] 前記3d遷移金属及びBを含む磁性材料は、Bを15原子%以上含む、請求項5に記載の磁気トンネル接合素子。

- [請求項8] 前記キャップ層は、絶縁材料で形成された第2絶縁層をさらに含む、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項9] 前記第2絶縁層は、前記隣接層の上に設けられる、請求項8に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項10] 前記第1絶縁層及び前記第2絶縁層を形成する絶縁材料は、無機酸化物である、請求項9に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項11] 前記キャップ層は、3d遷移金属及びBを含む磁性材料で形成され、前記第2絶縁層の上に設けられる磁性層をさらに含む、請求項8に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項12] 前記第2絶縁層の上に設けられる前記磁性層の膜厚は、0.9nm以下である、請求項11に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項13] 前記3d遷移金属及びBを含む磁性材料は、Bを15原子%以上含む、請求項11に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項14] 前記キャップ層の各層は、導電材料で形成される、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項15] 前記隣接層の膜厚は、0.25nm以上1nm以下である、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項16] 前記バリア層の膜厚は、1nm以上10nm以下である、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項17] 前記キャップ層は、非磁性材料で形成される中間層をさらに含み、前記中間層の膜厚は、1nm以上10nm以下である、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項18] 前記磁気トンネル接合素子は、柱体形状又は錐体形状である、請求項1に記載の磁気トンネル接合素子。
- [請求項19] 磁気トンネル接合素子を備え、
前記磁気トンネル接合素子は、
磁化の向きが固定された磁化固定層と、
前記磁化固定層の上に設けられ、絶縁材料で形成された第1絶縁層

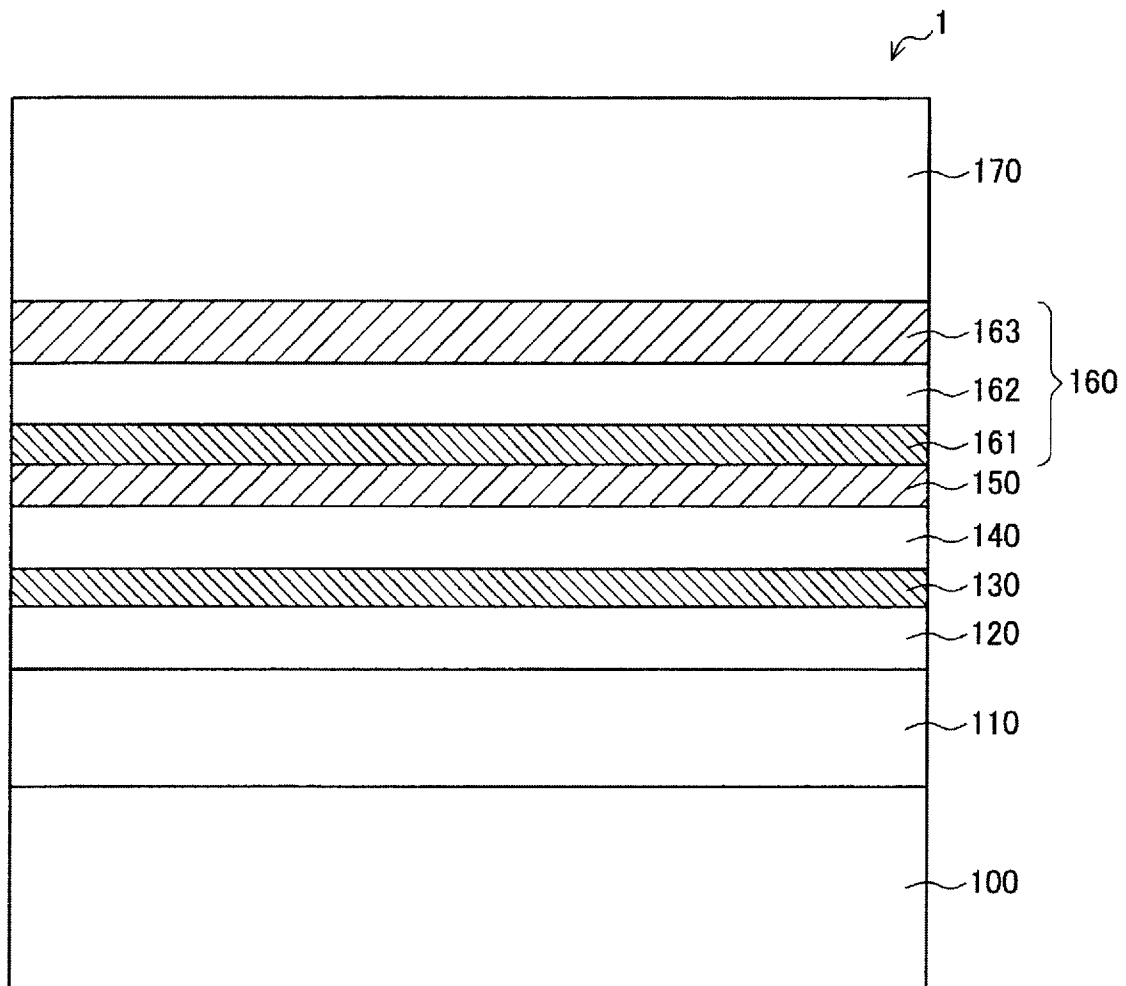
と、

前記第 1 絶縁層の上に設けられた磁化自由層と、

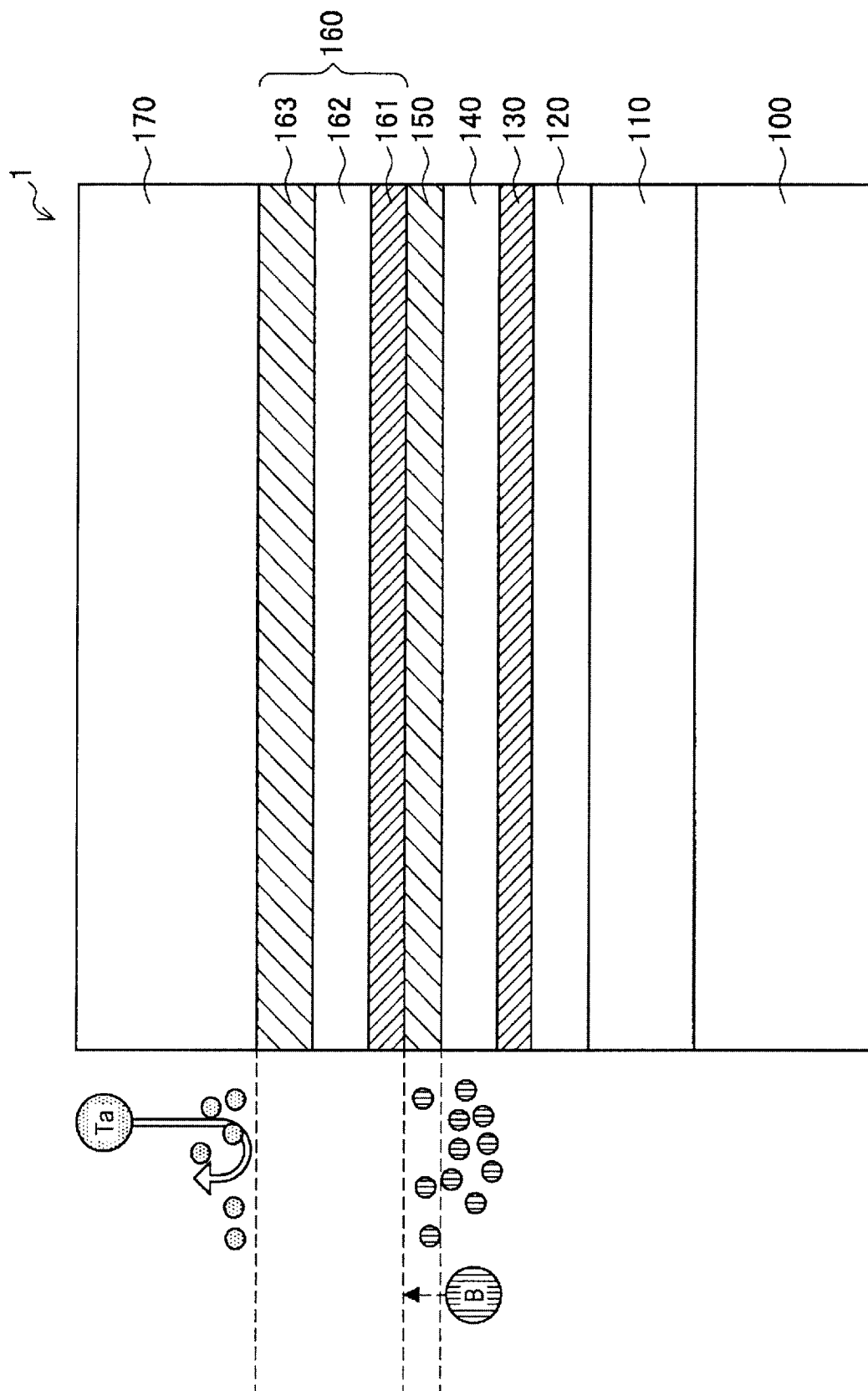
前記磁化自由層の上に隣接して設けられ、非磁性遷移金属で形成された隣接層と、

前記非磁性遷移金属で形成されたバリア層を少なくとも 1 つ以上含む多層構造で形成され、前記隣接層の上に設けられたキャップ層と、
を備える、半導体装置。

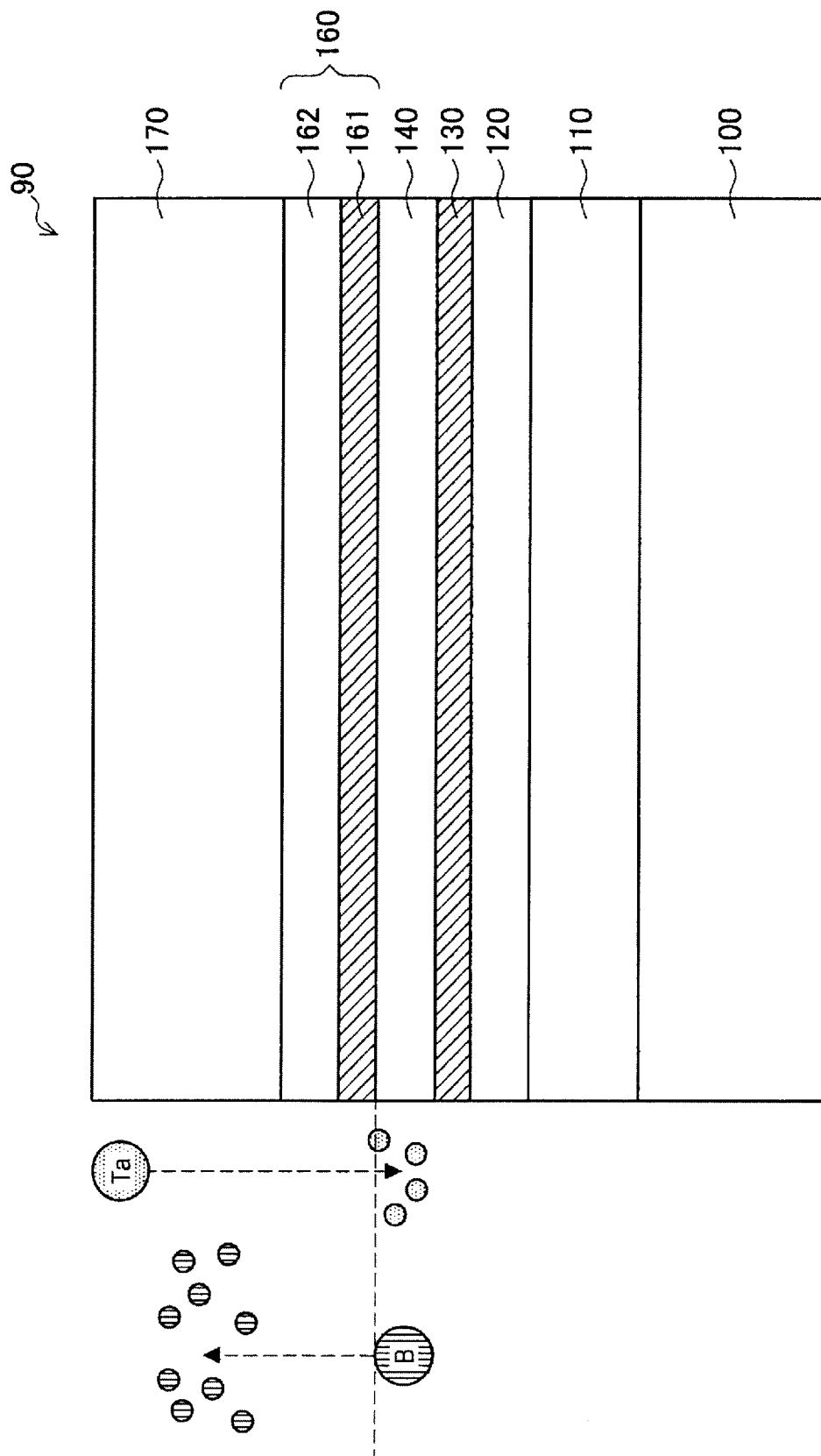
[図1]



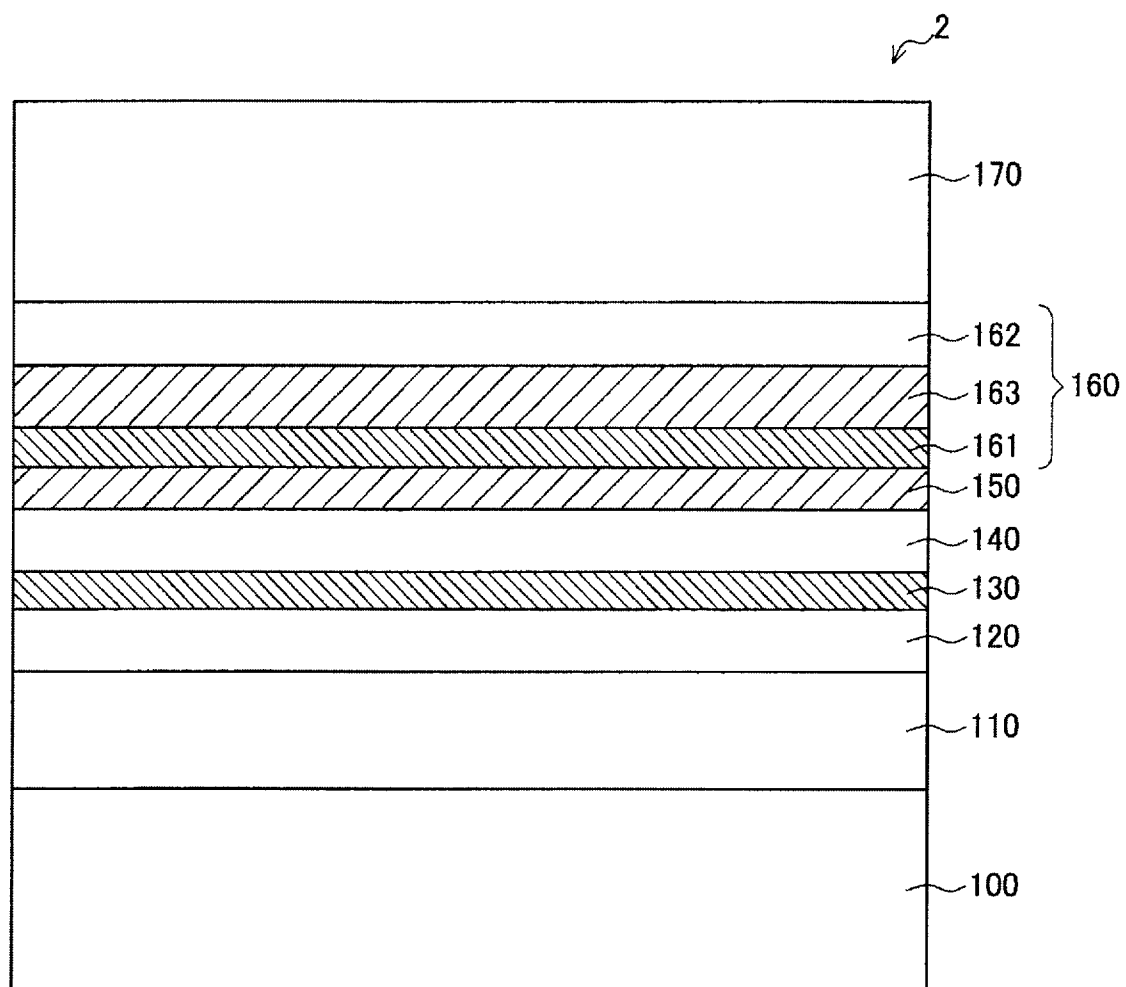
[図2A]



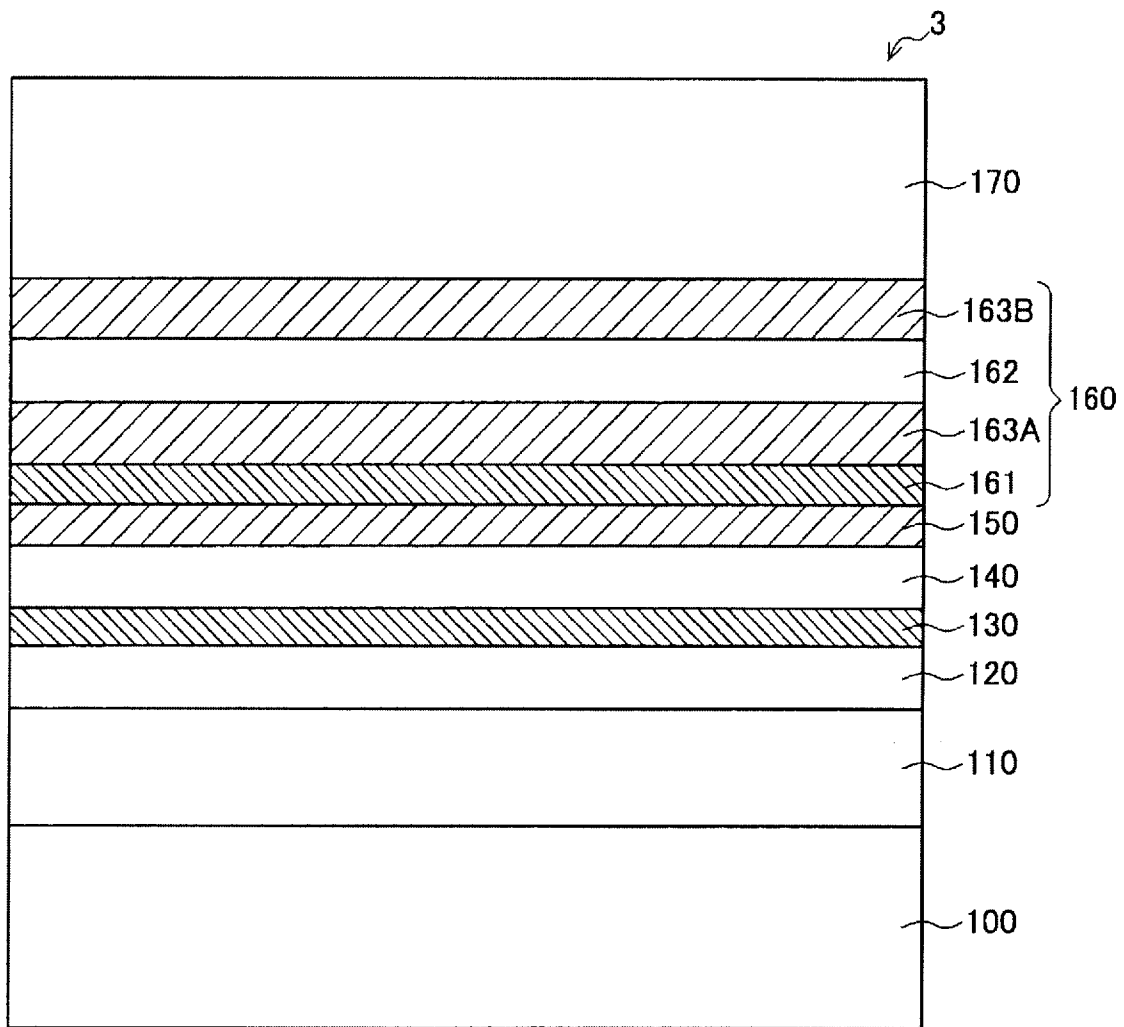
[図2B]



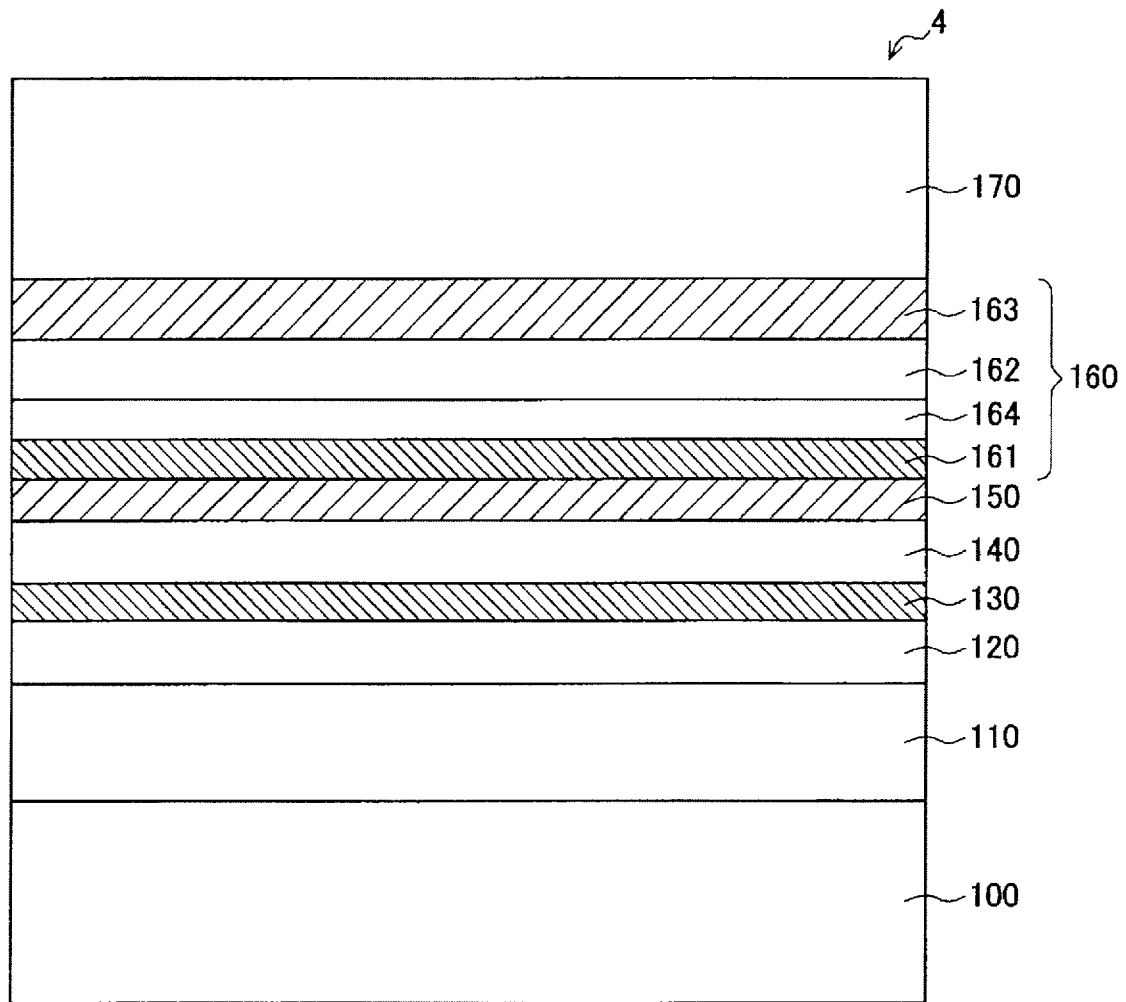
[図3]



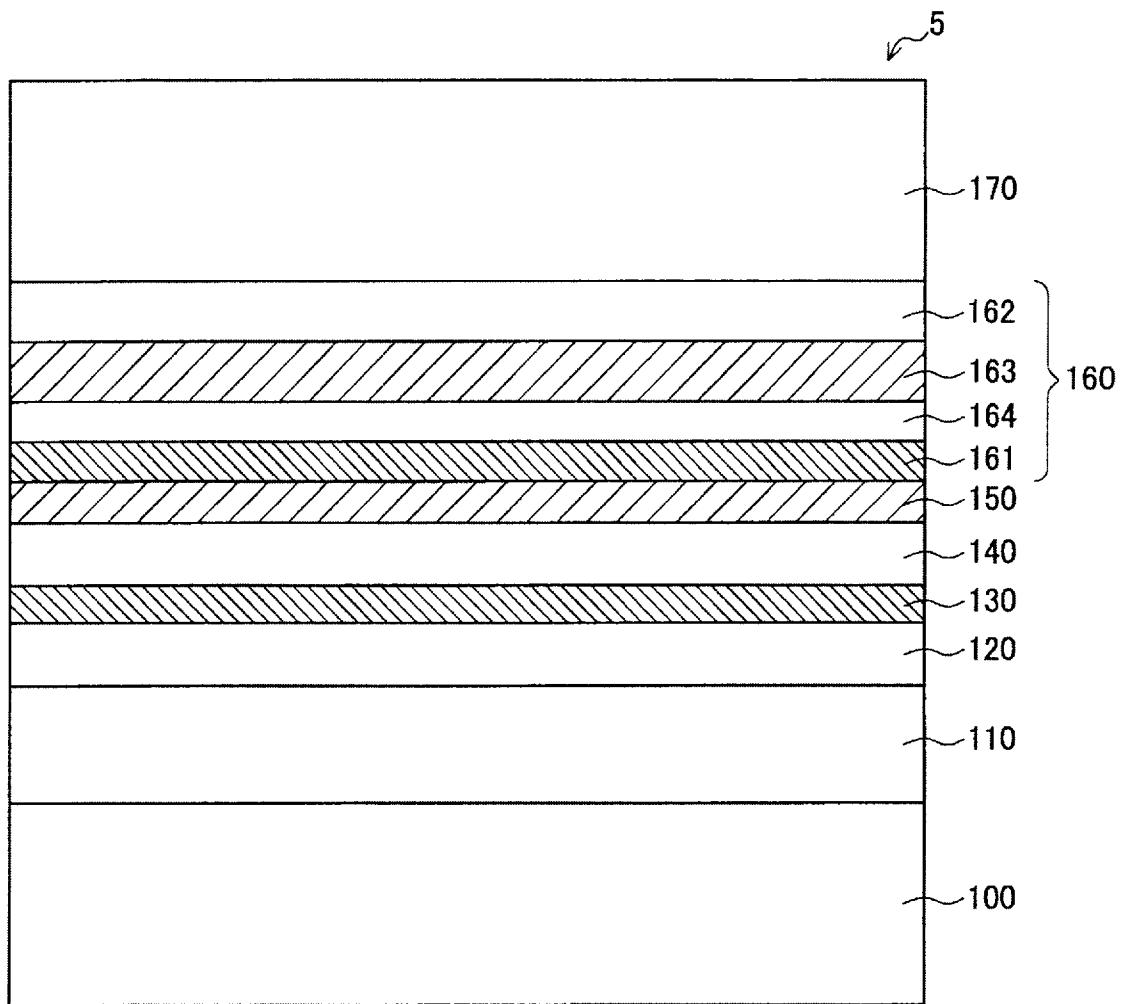
[図4]



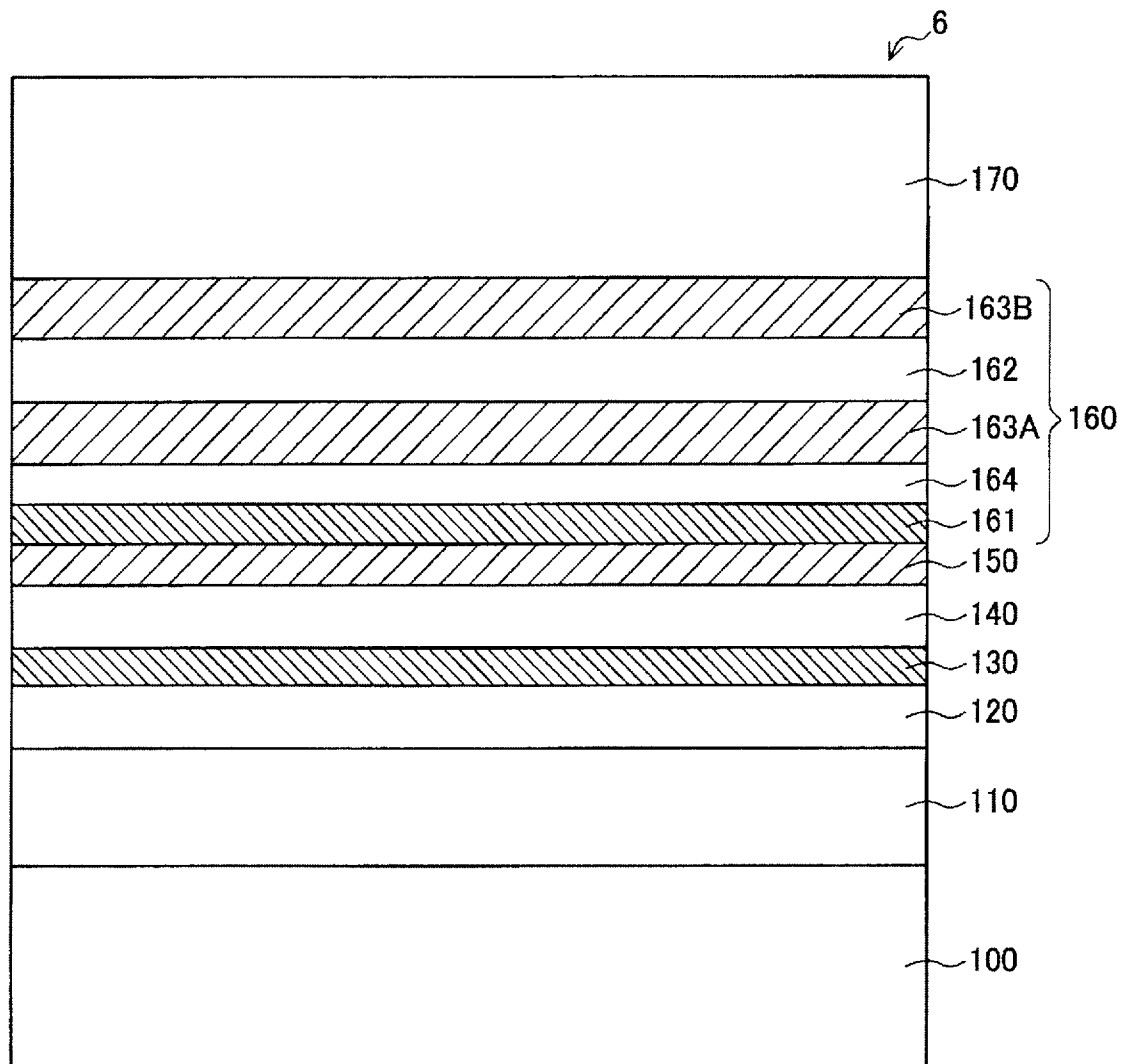
[図5]



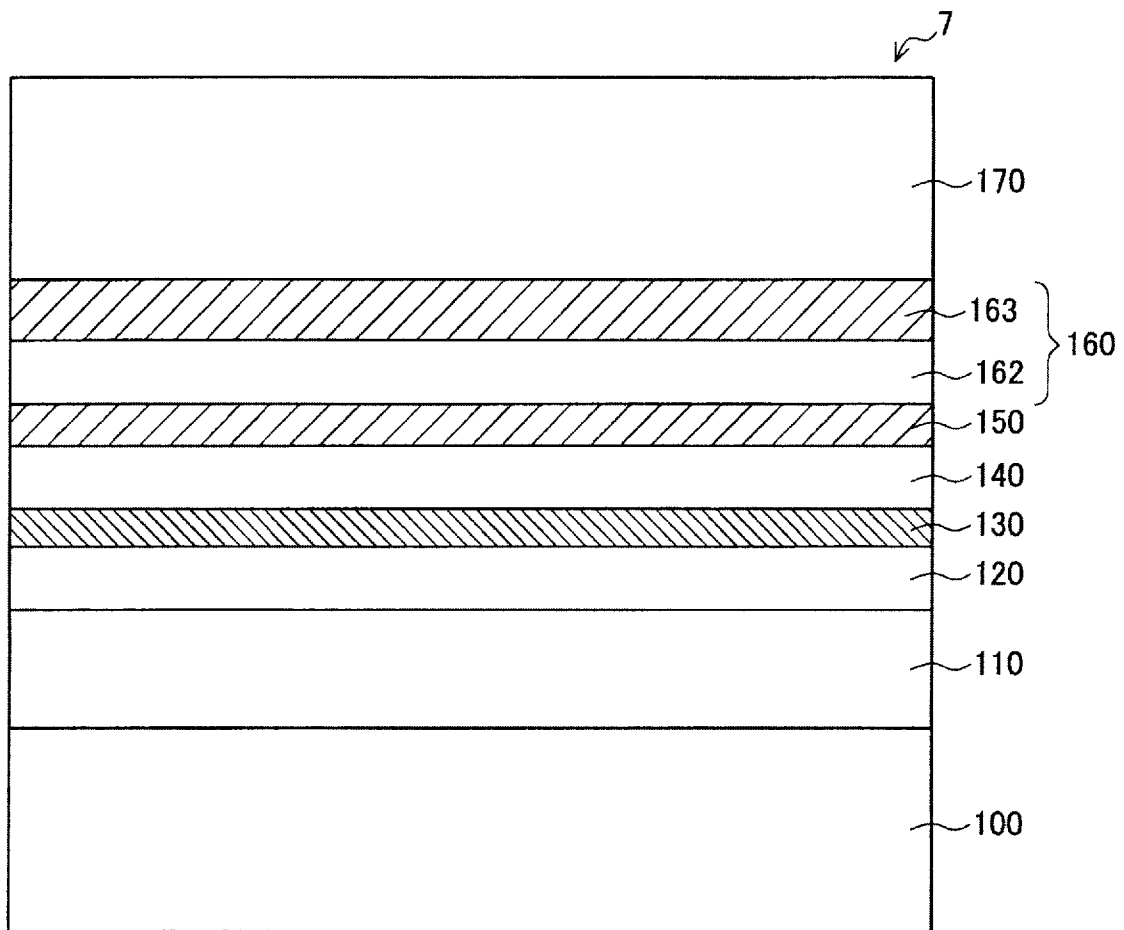
[図6]



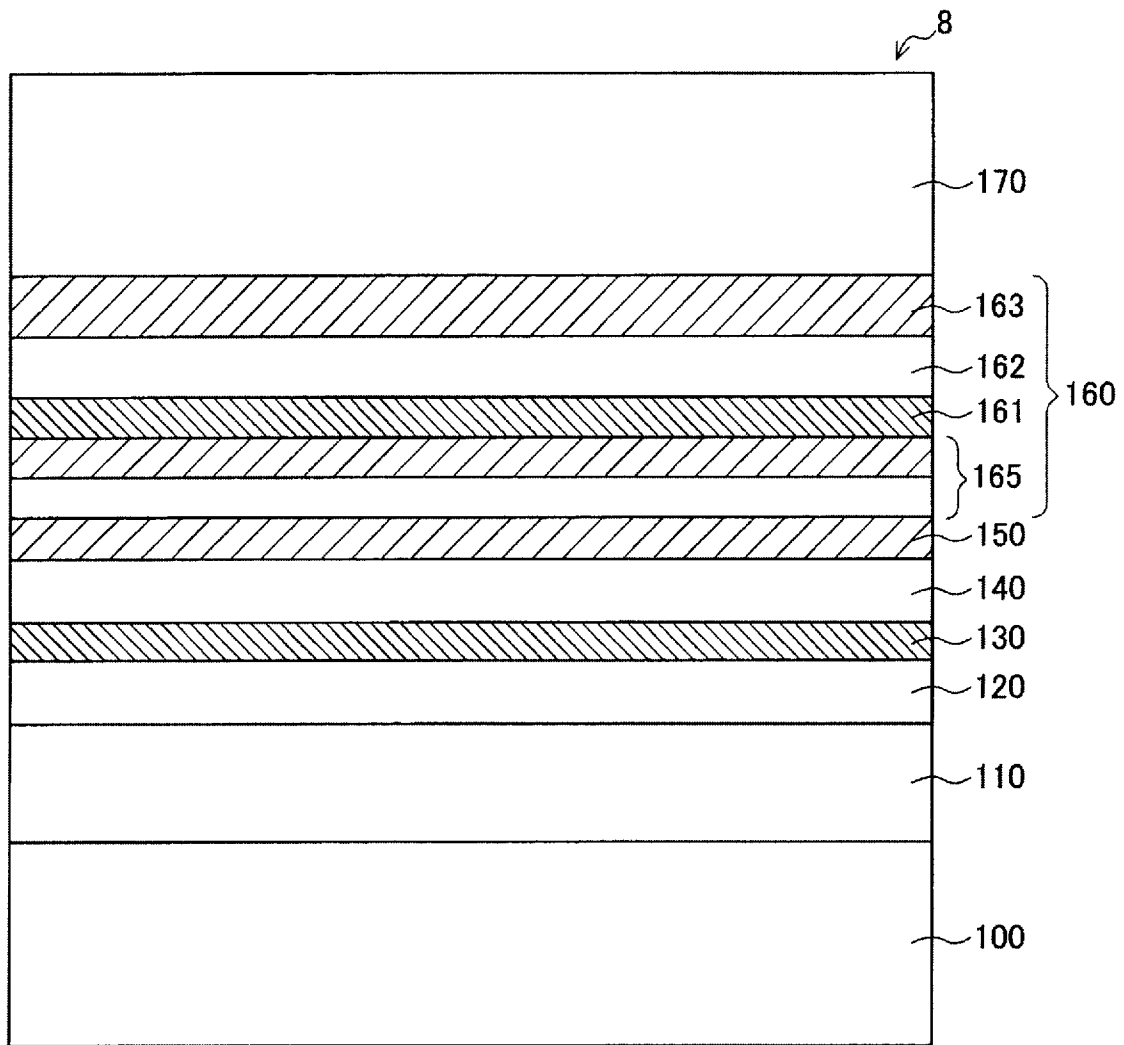
[図7]



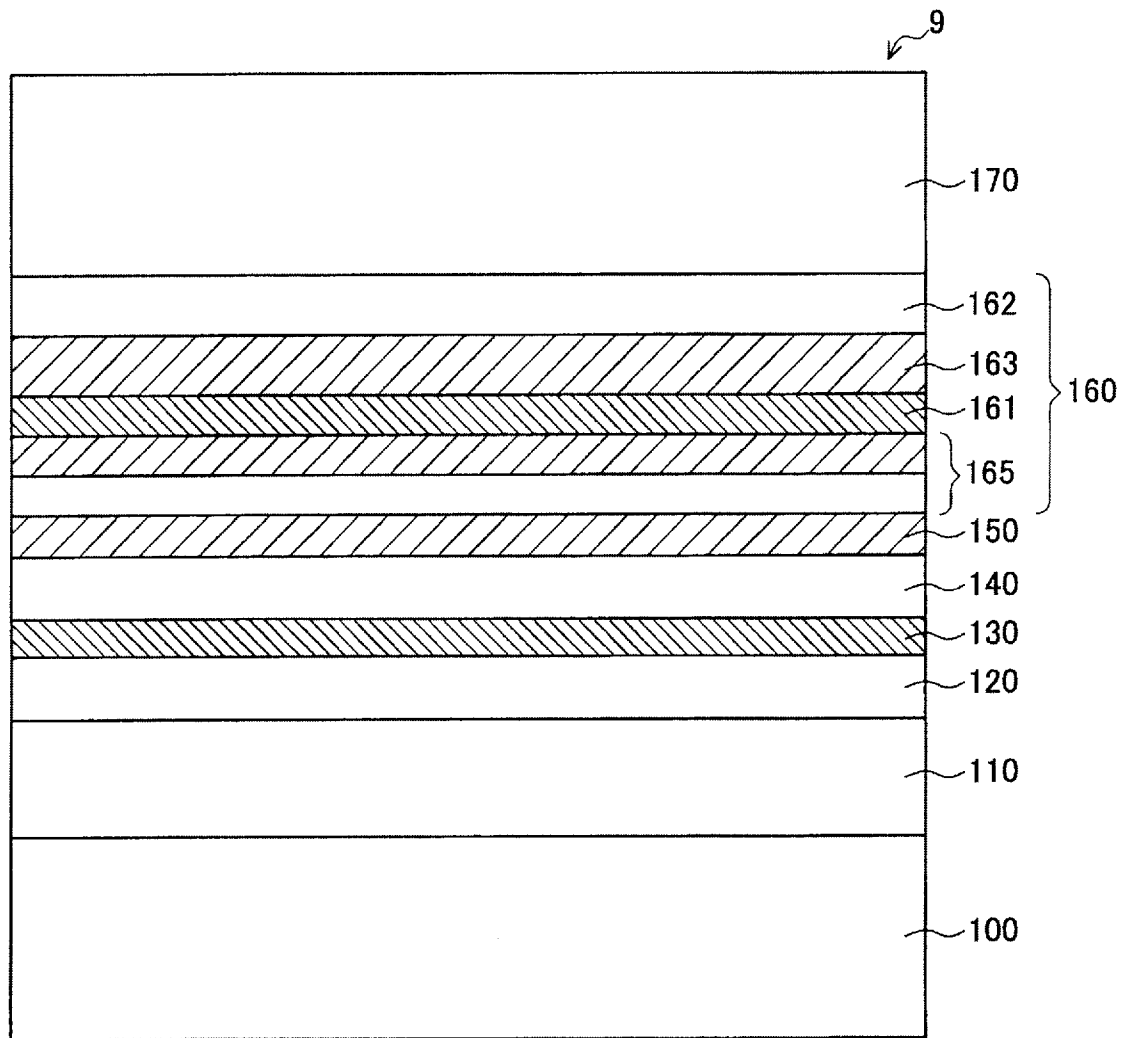
[図8]



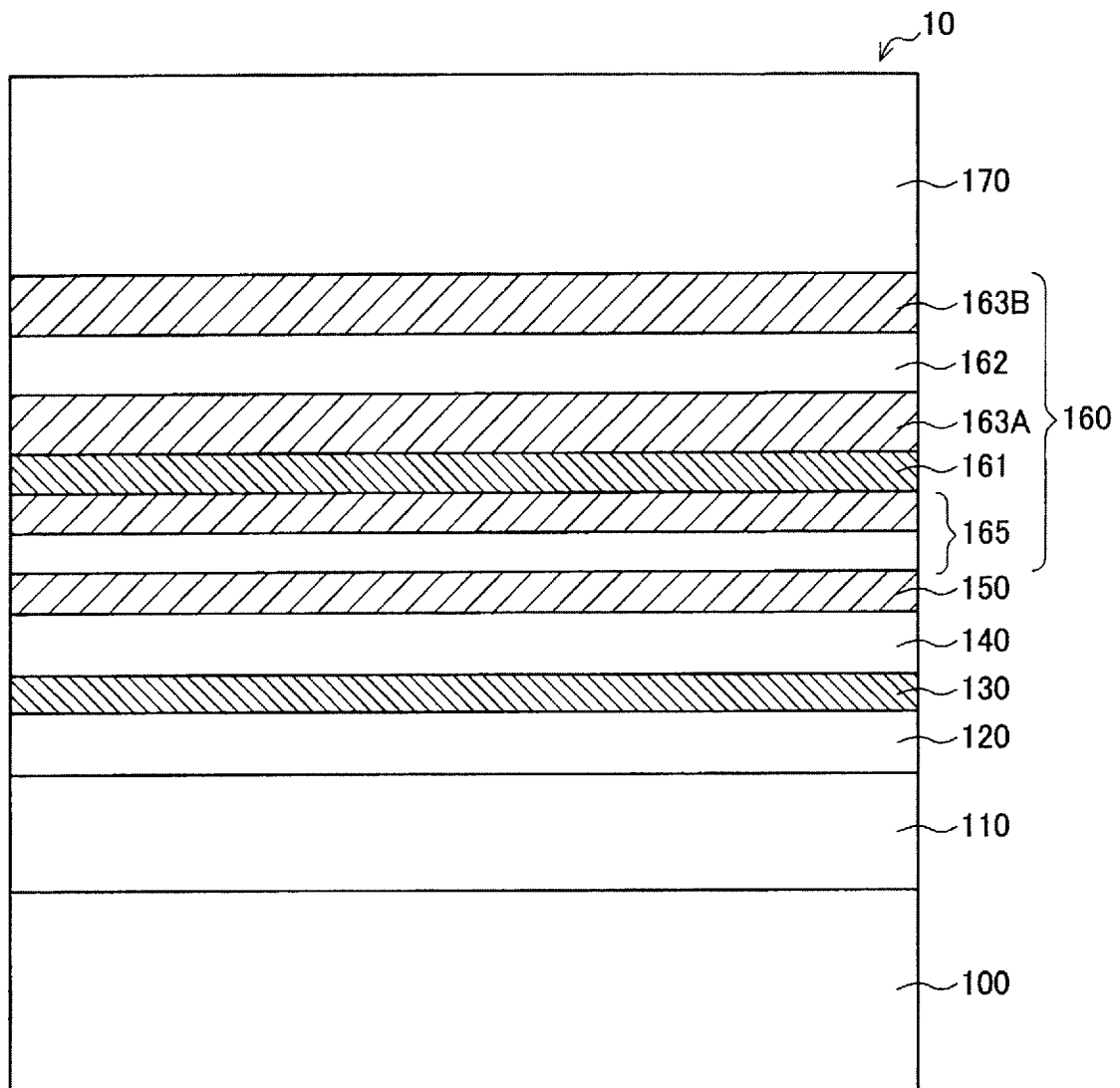
[図9]



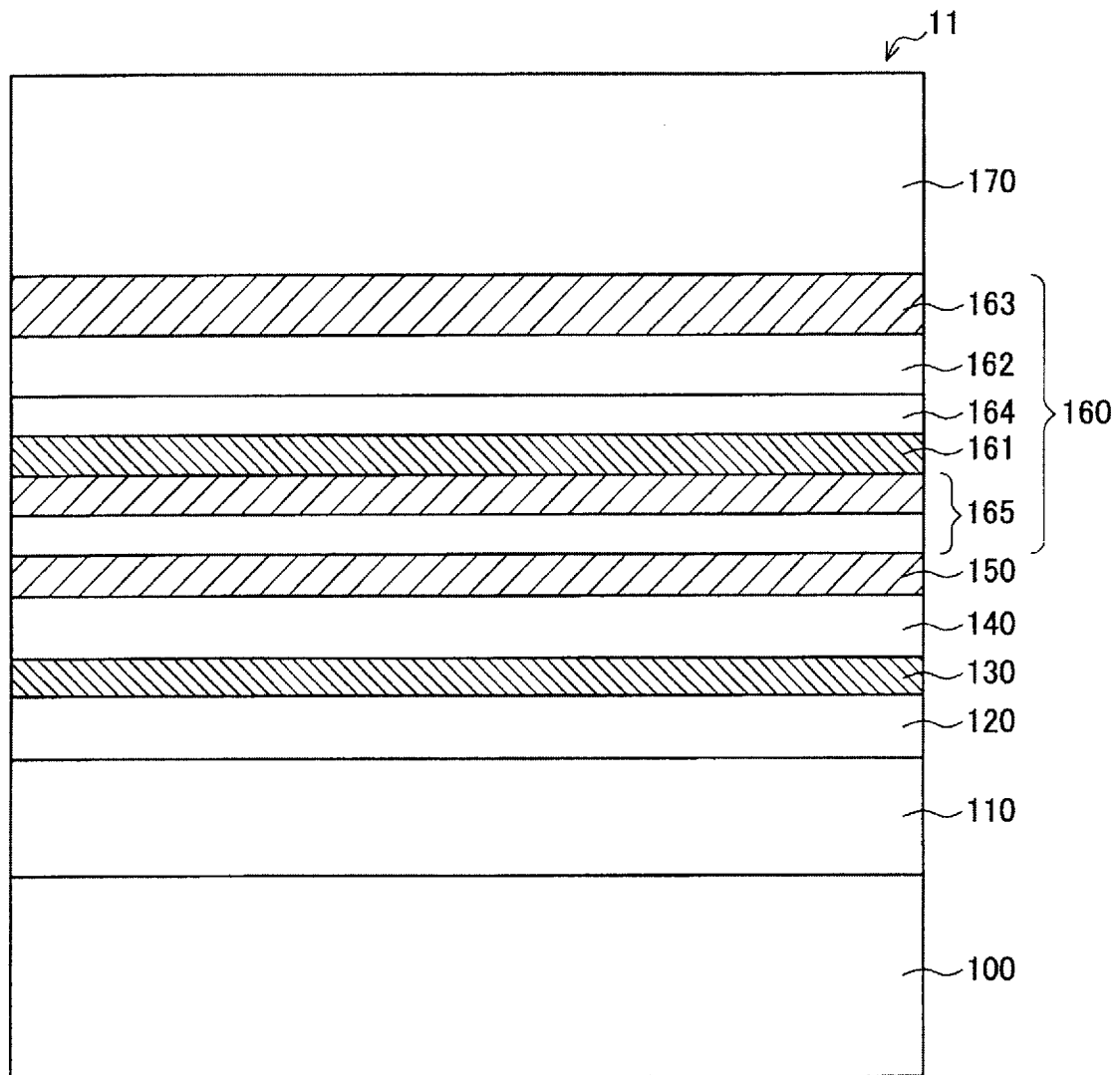
[図10]



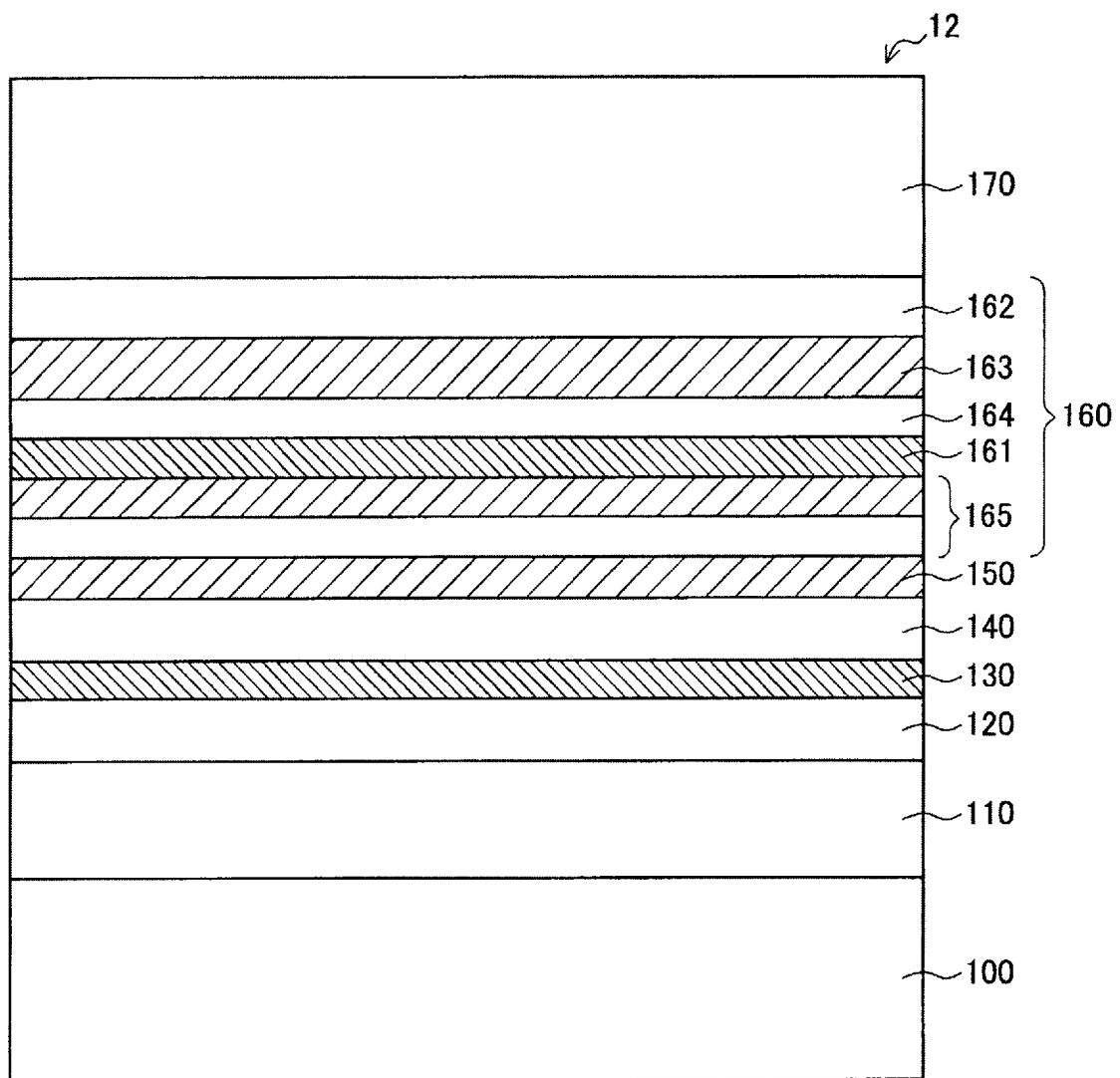
[図11]



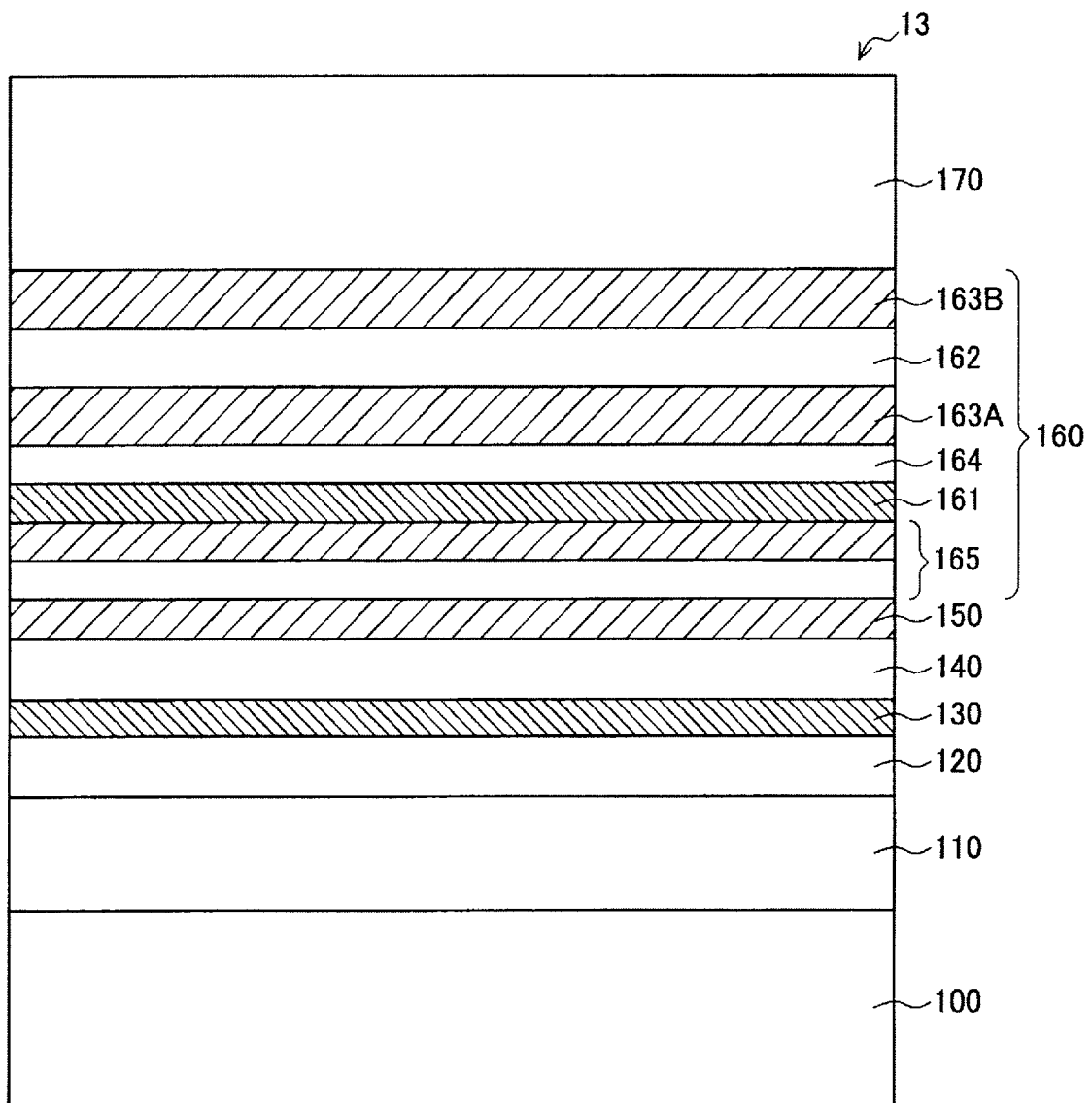
[図12]



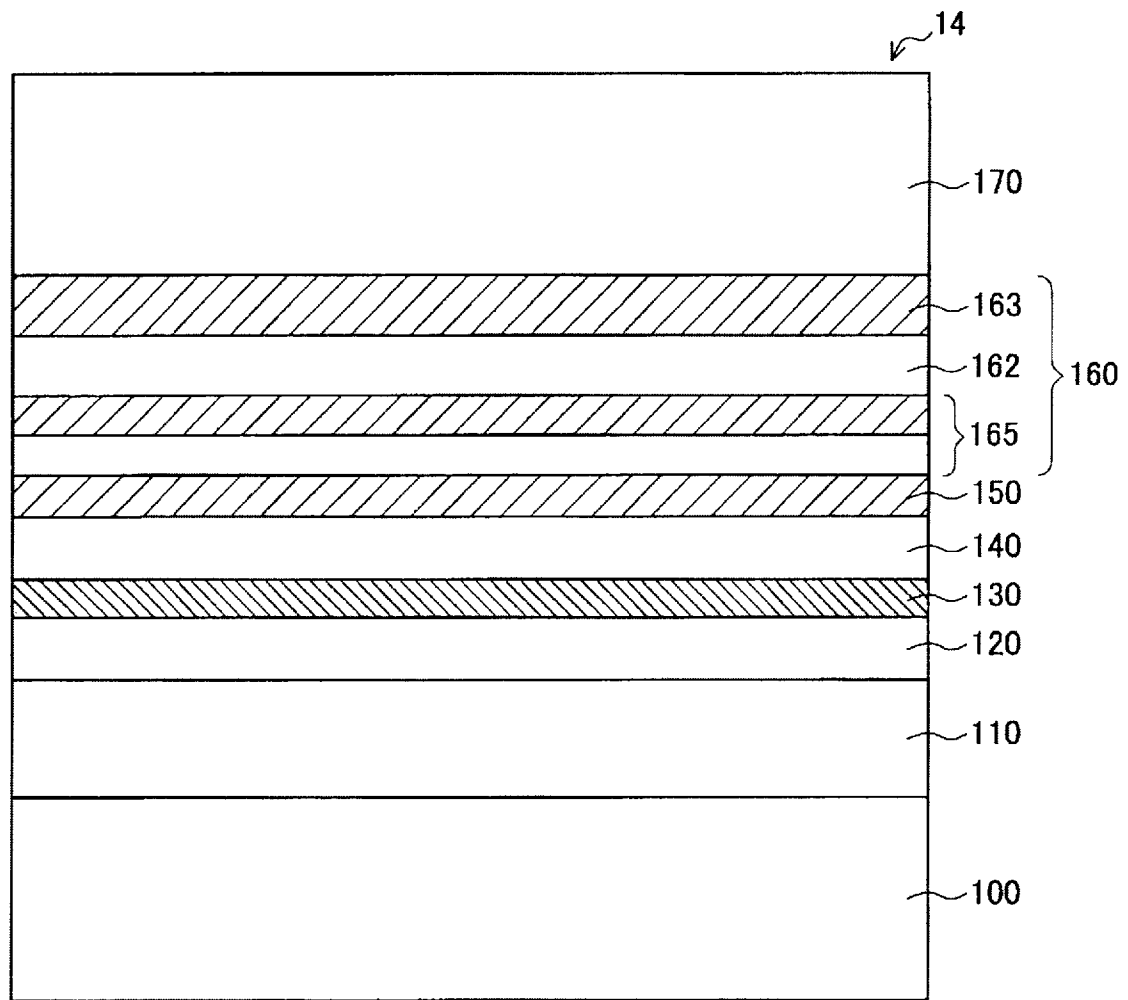
[図13]



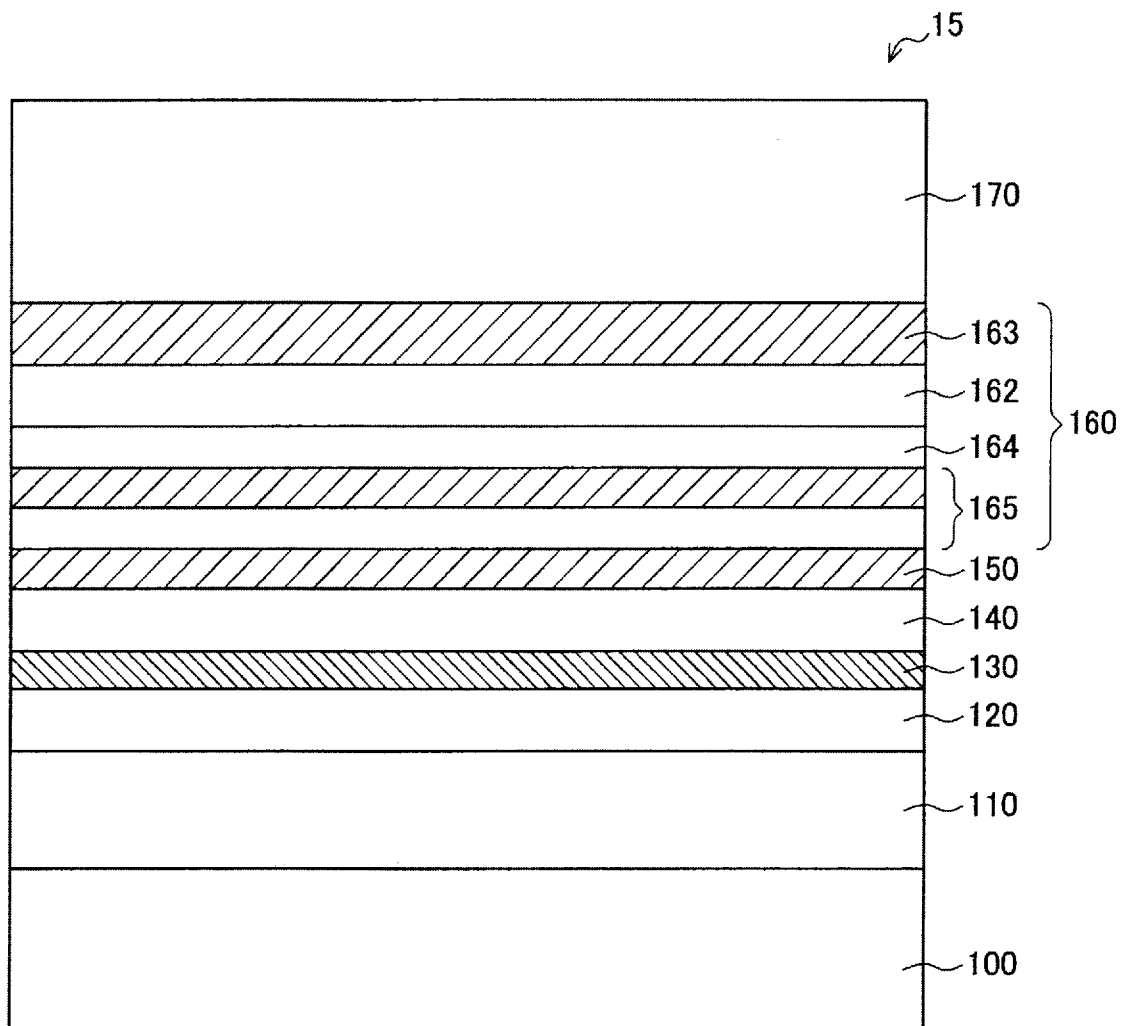
[図14]



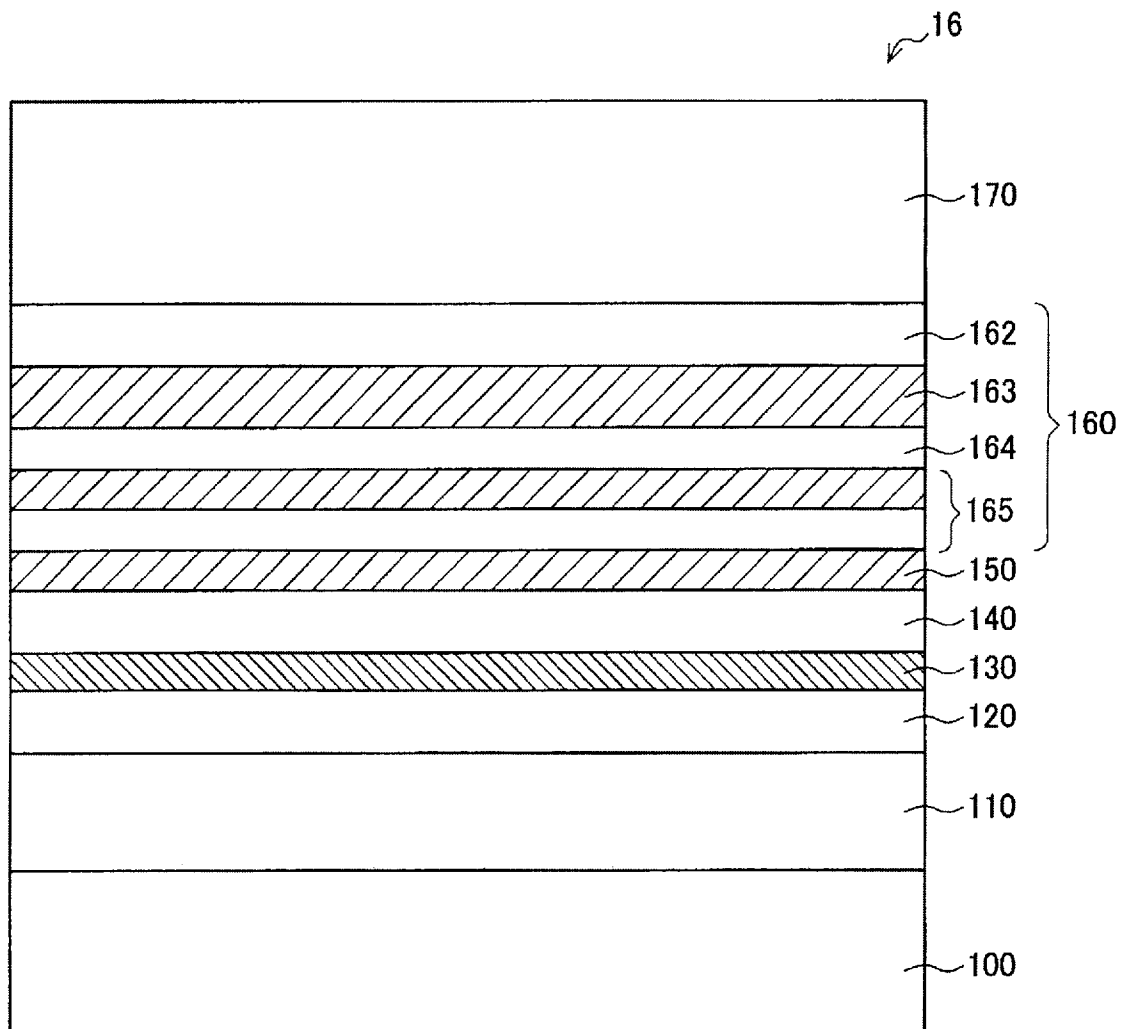
[図15]



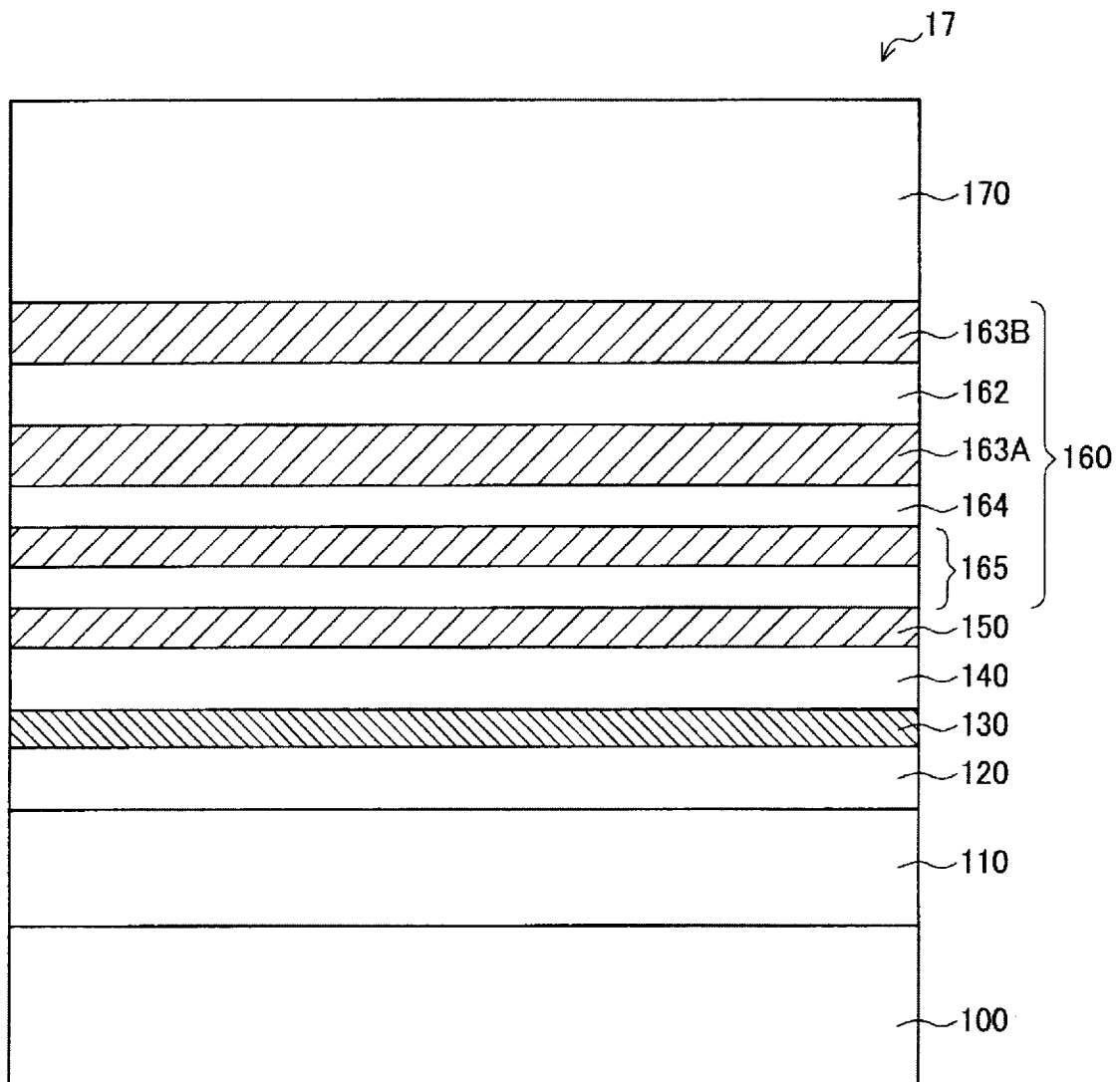
[図16]



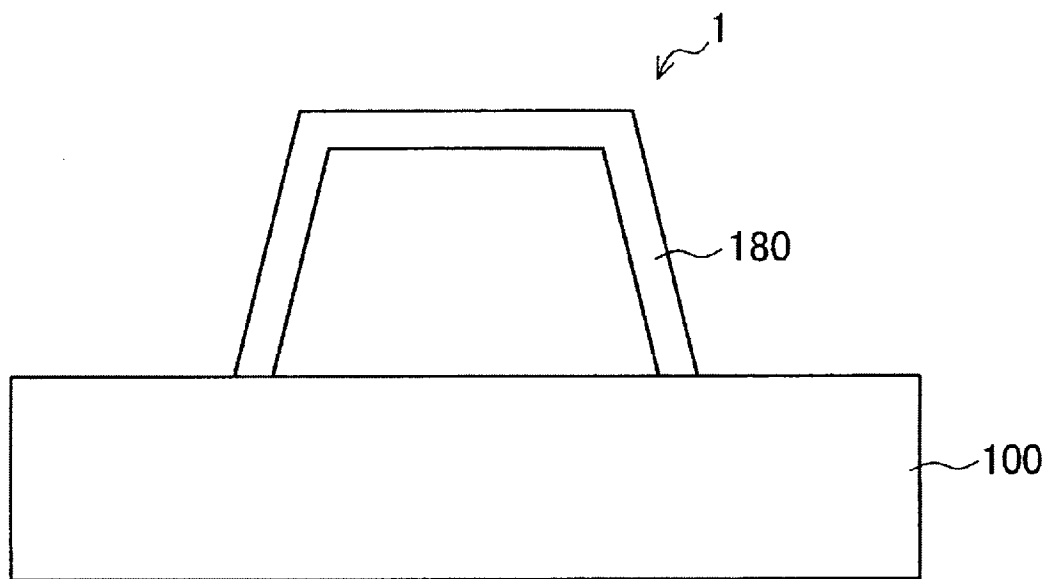
[図17]



[図18]



[図19]



[図20]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	Mo (7)
		Ru (7)
		MgO (1.0)
		Mo (0.8)
磁化固定層	{	CoFeB (1.5)
		MgO (1.0)
		CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
		Ru (3)
下部電極	{	Pt (5)
		Ta (5)
		Si

[図21]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	Mo (7)
		MgO (1.0)
		Mo (0.8)
		CoFeB (0.5)
		Mo (0.8)
		CoFeB (1.5)
磁化固定層	{	MgO (1.0)
		CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
		Ru (3)
下部電極	{	Pt (5)
		Ta (5)
		Si

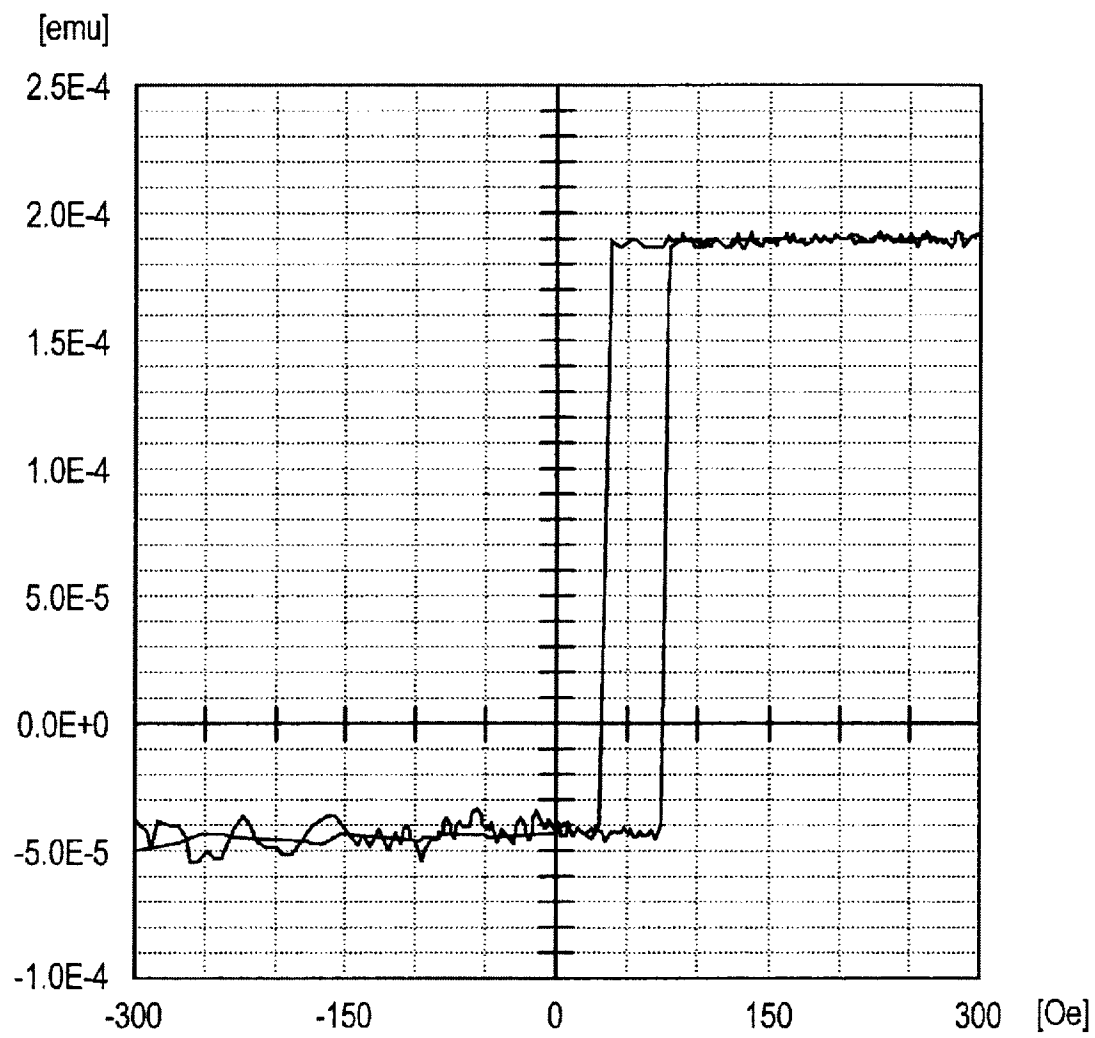
[図22]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	CoFeB (0.5)
		MgO (1.0)
		CoFeB (1.5)
		MgO (1.0)
磁化固定層	{	CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
		Ru (3)
下部電極	{	Pt (5)
		Ta (5)
		Si

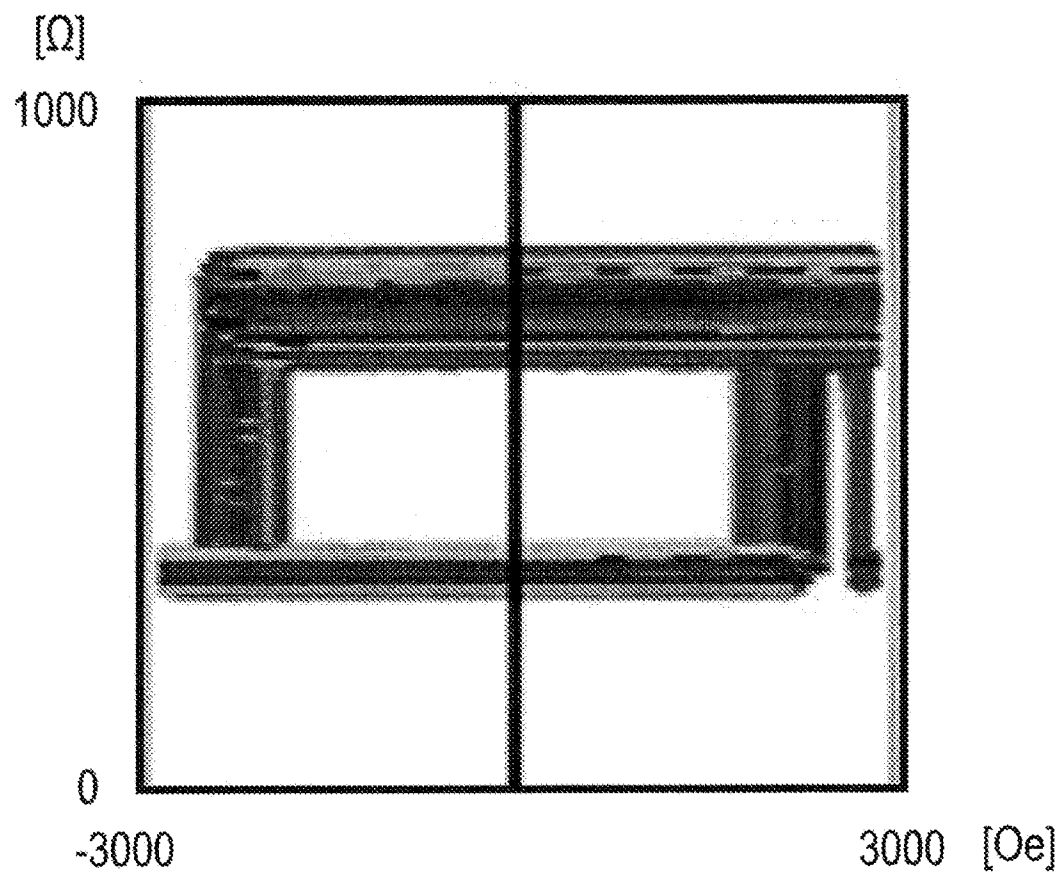
[図23]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	Mo (7)
		Ru (7)
		CoFeB (0.5)
		MgO (1.0)
磁化固定層	{	CoFeB (1.5)
		MgO (1.0)
		CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
		Ru (3)
下部電極	{	Pt (5)
		Ta (5)
		Si

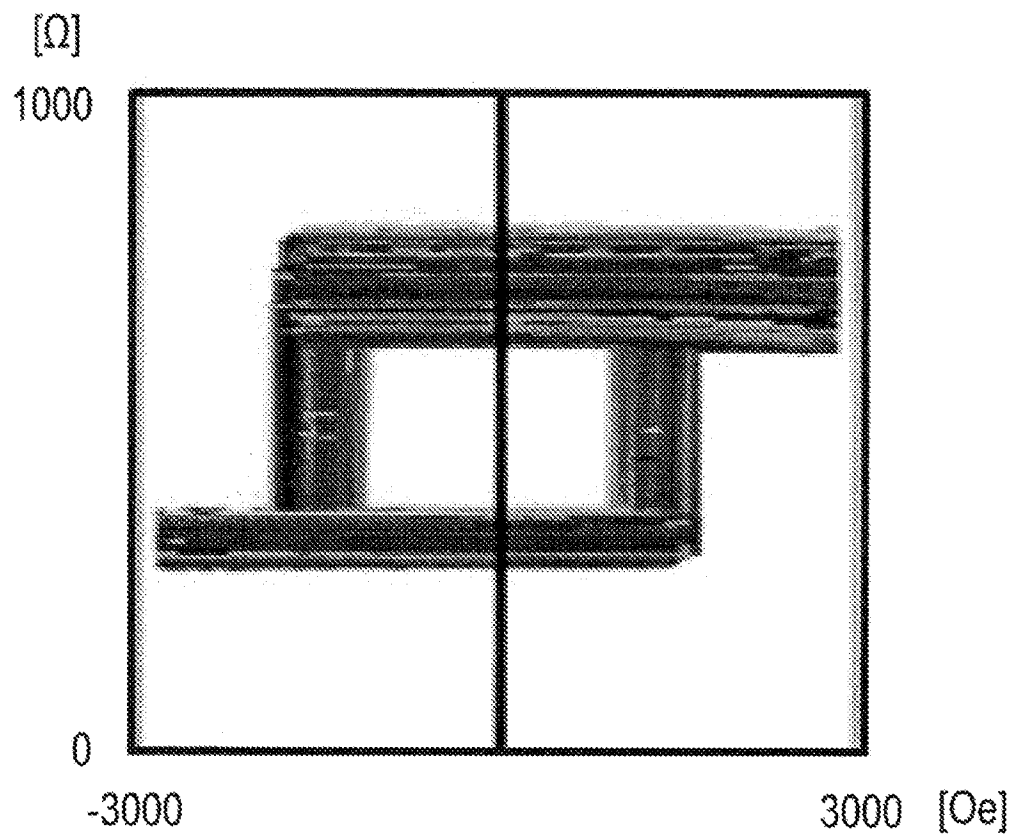
[図24A]



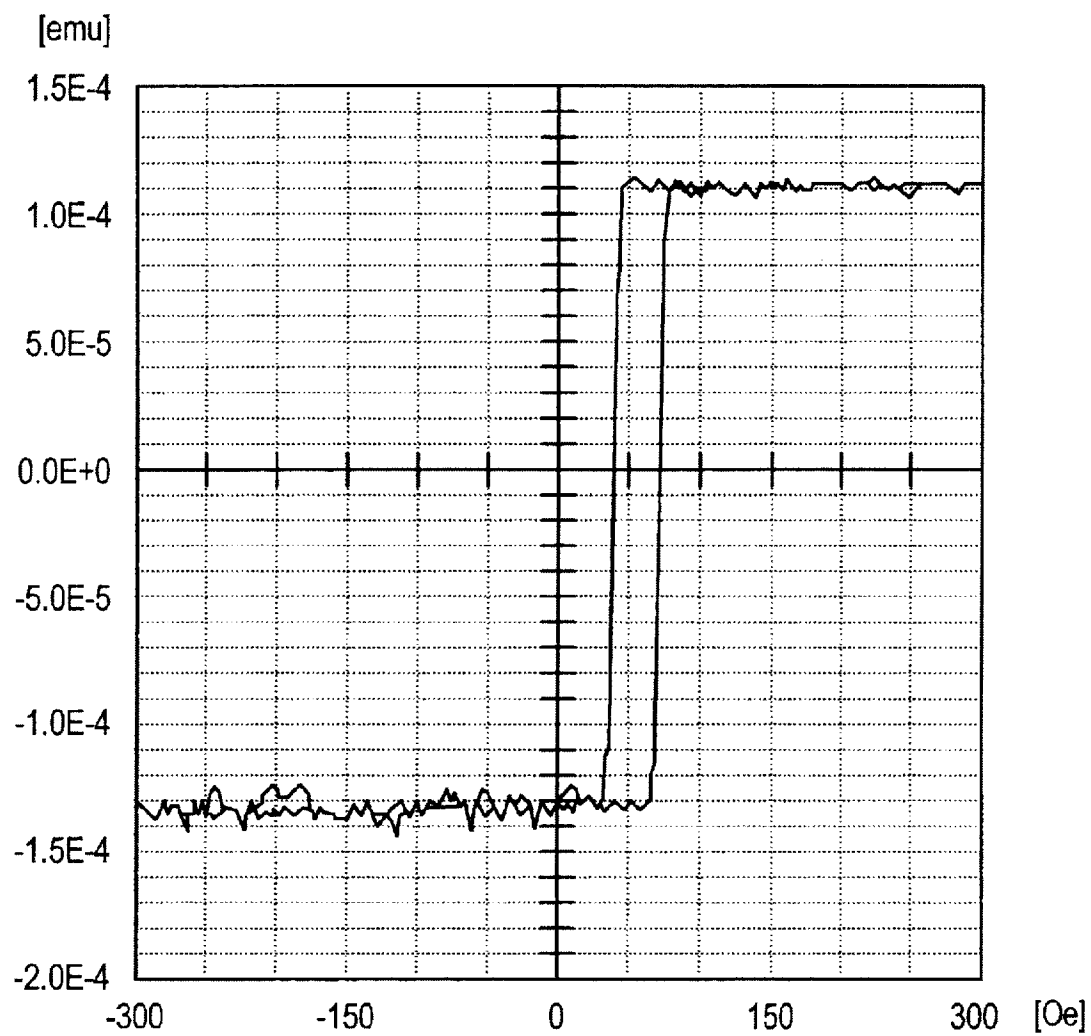
[図24B]



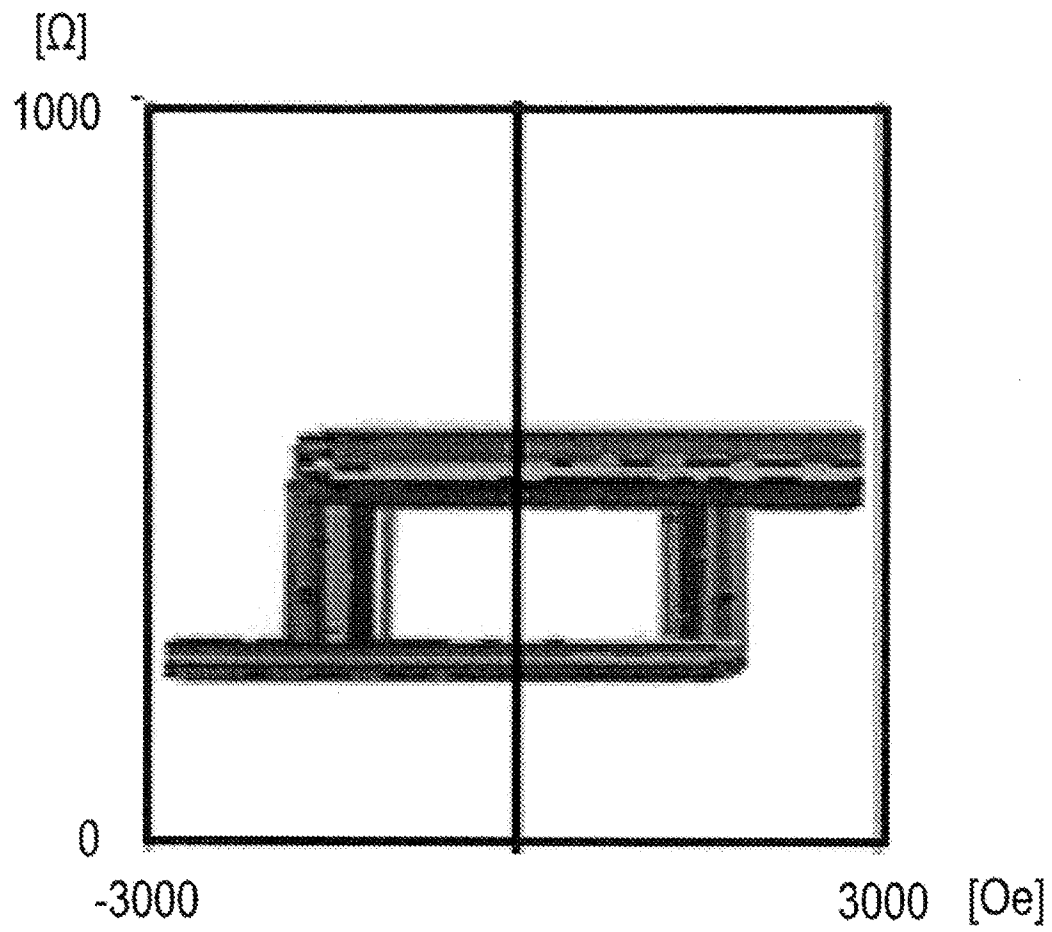
[図24C]



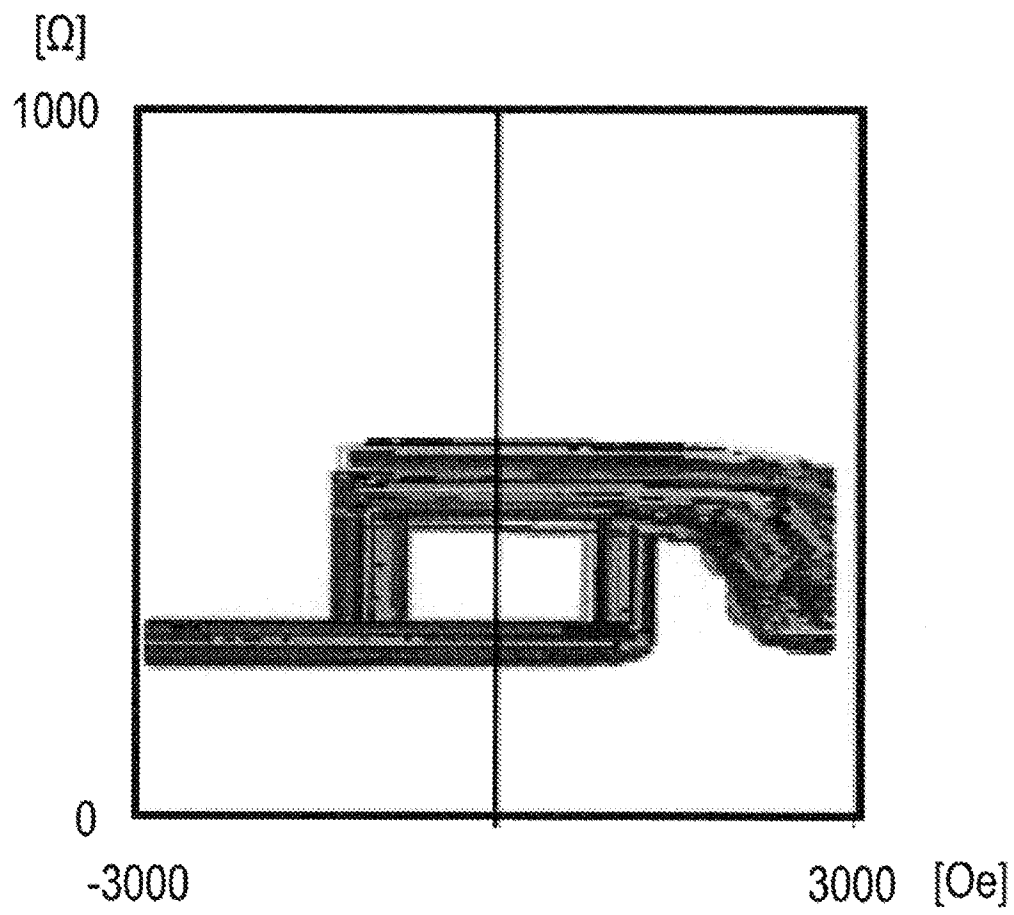
[図25A]



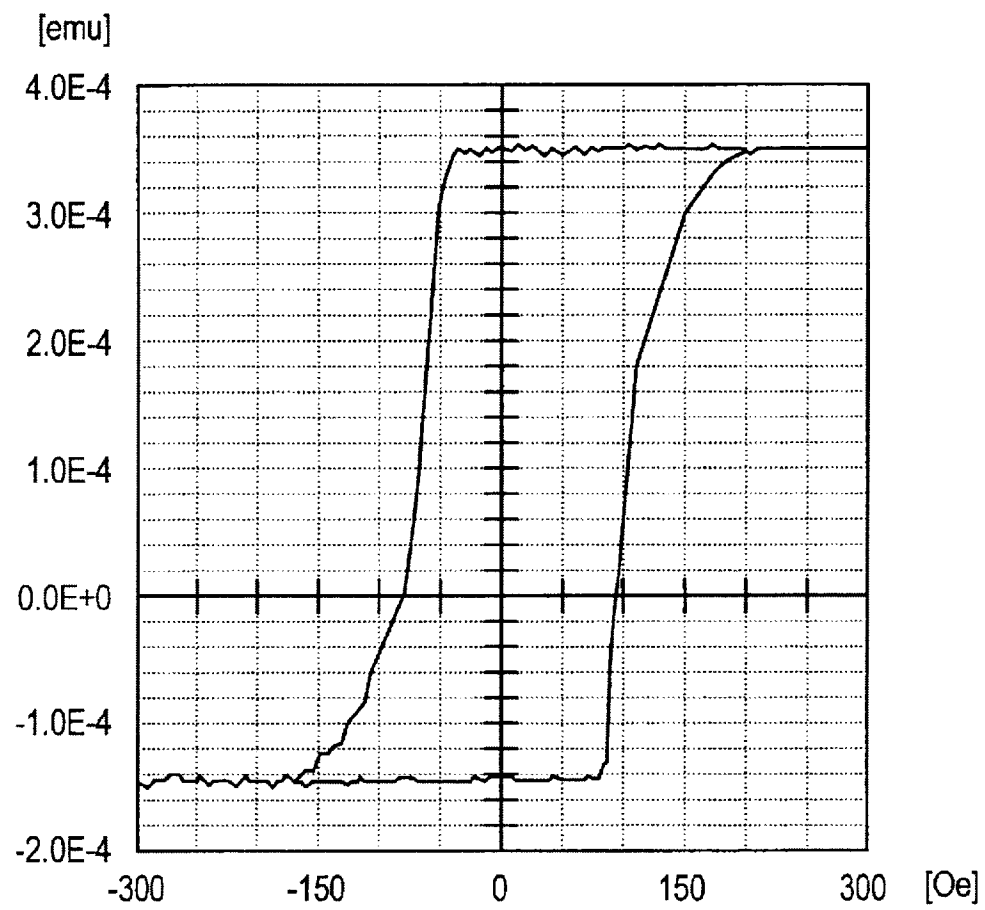
[図25B]



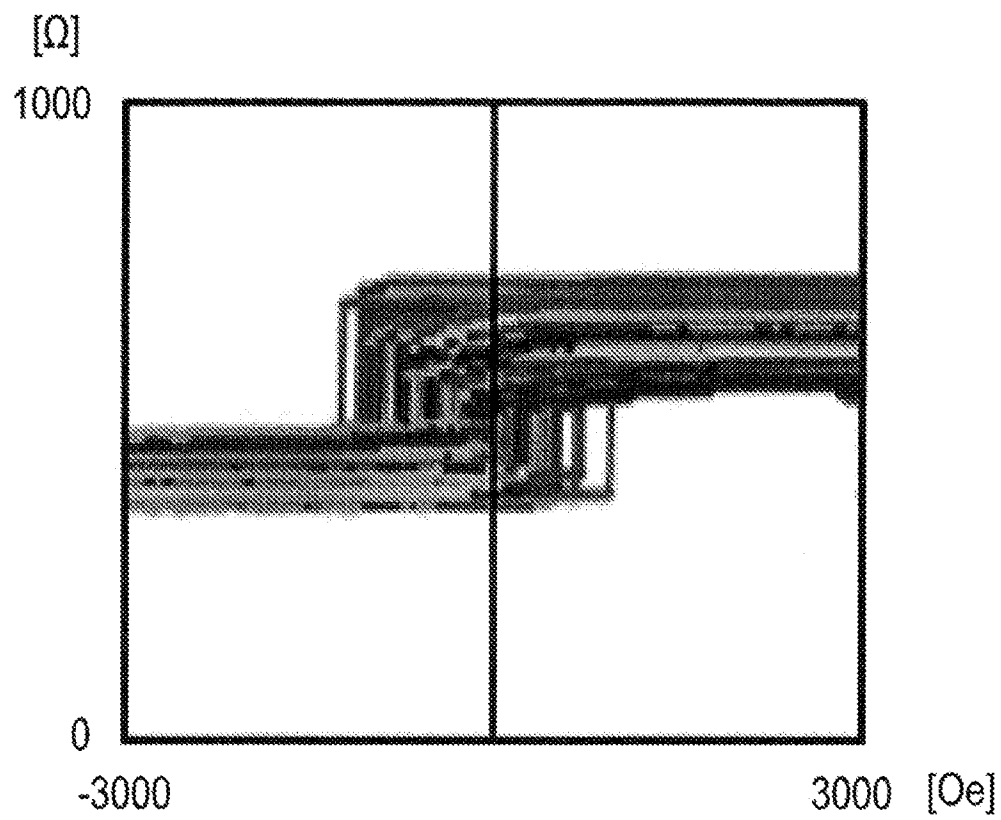
[図25C]



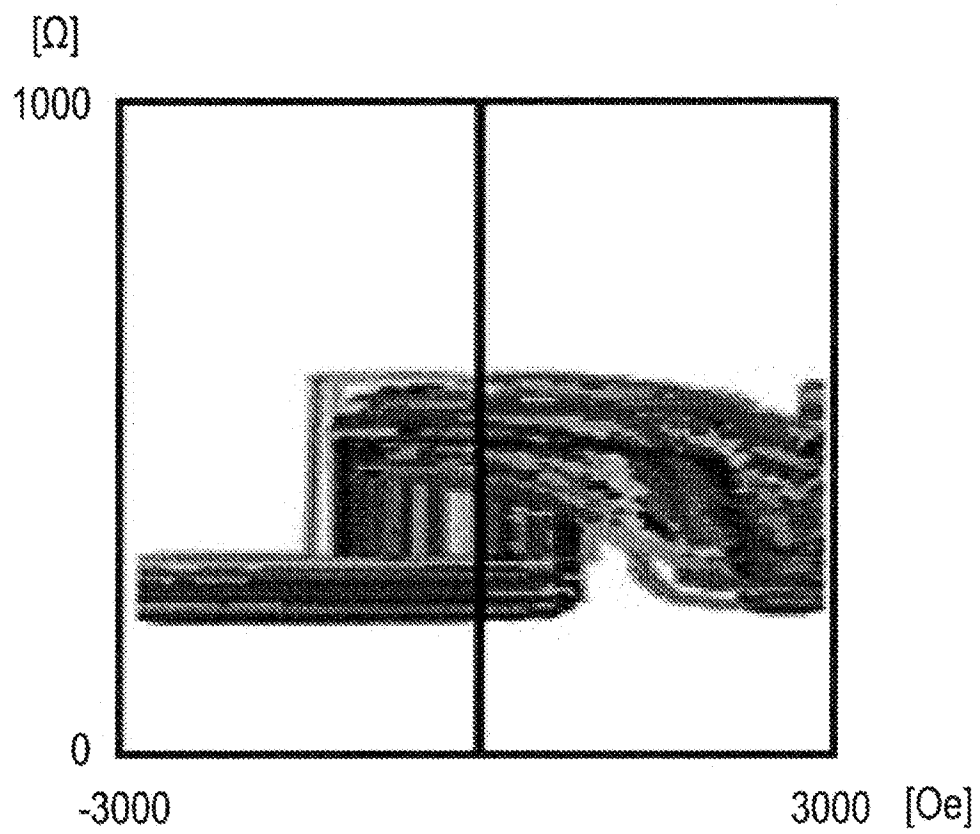
[図26A]



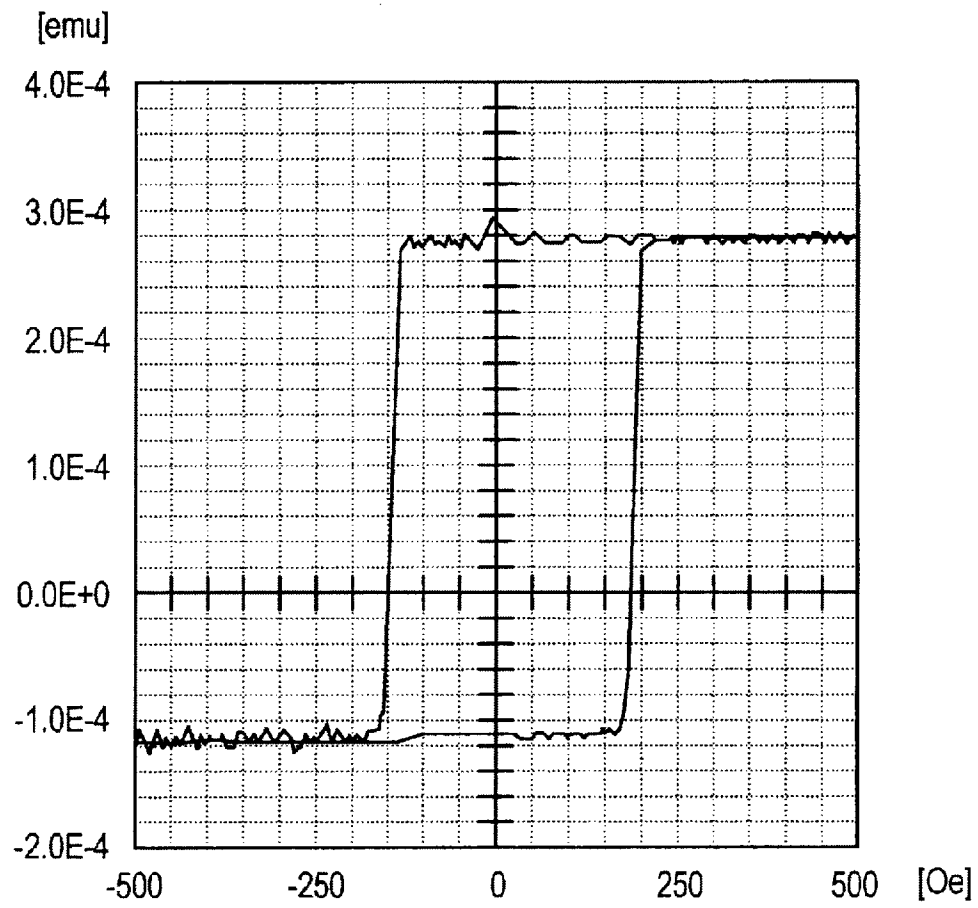
[図26B]



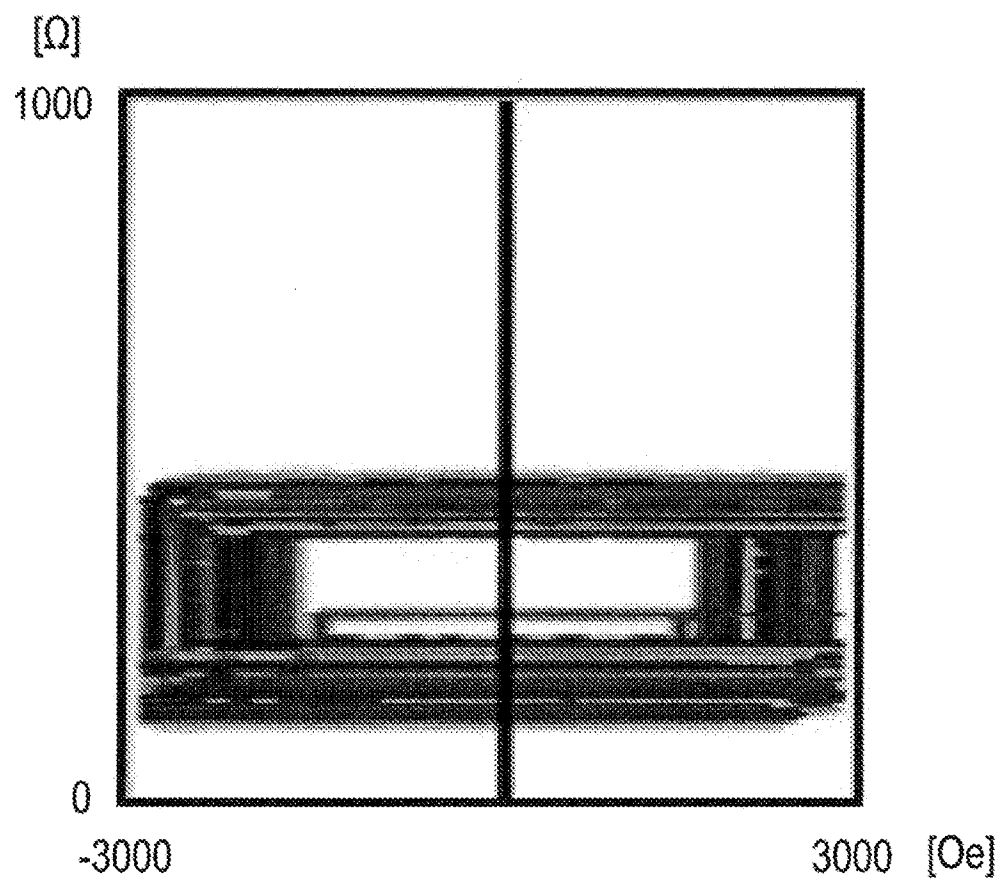
[図26C]



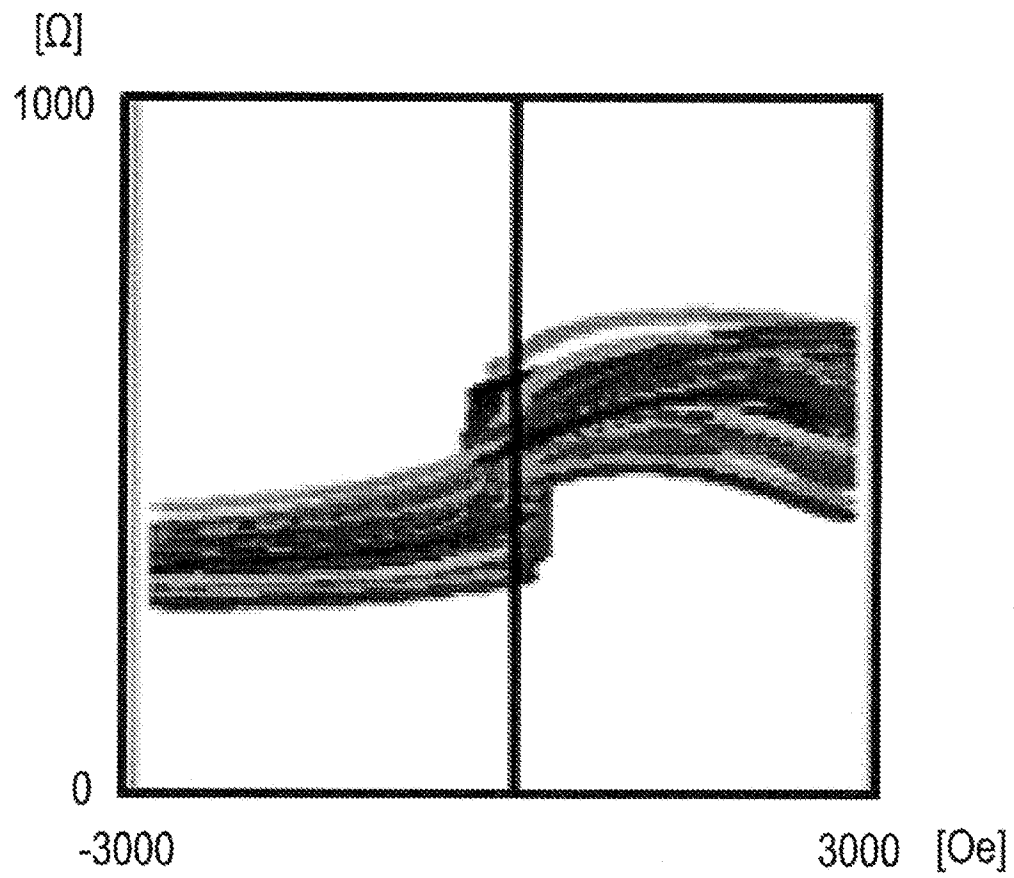
[図27A]



[図27B]



[図27C]



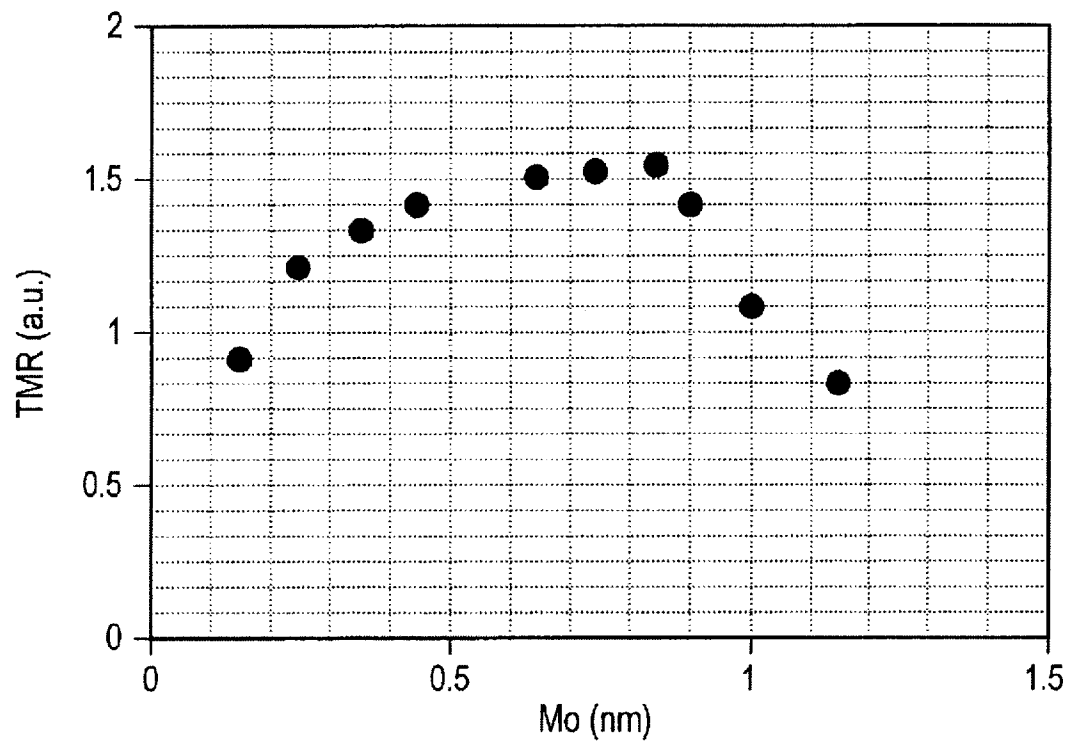
[図28]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	Mo (7)
		Ru (7)
		CoFeB (0~3.5)
		Mo (0.8)
磁化固定層	{	CoFeB (1.5)
		MgO (1.0)
		CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
		Ru (3)
下部電極	{	Pt (5)
		Ta (5)
		Si

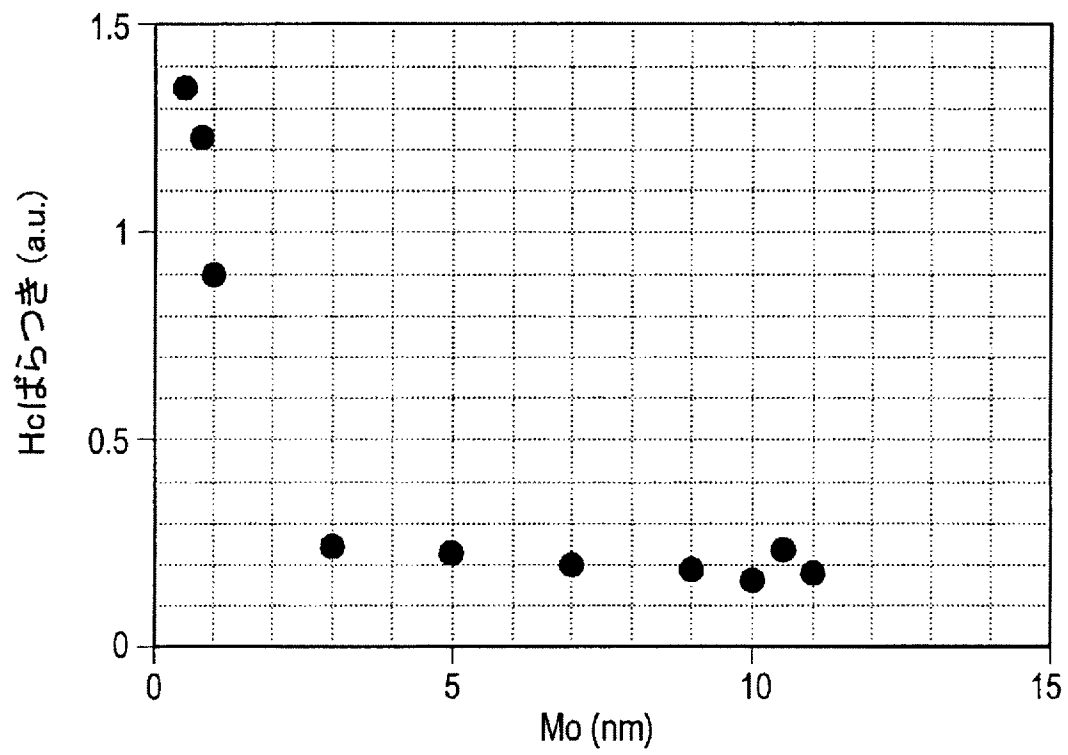
[図29]

上部電極	{	Ta (77)
		Ru (5)
		Ta (1)
		Ru (1)
キャップ層	{	Mo (7)
		Ru (7)
		CoFeB (0.5)
		MgO (1.0)
		Mo (0.8)
		CoFeB (0~1)
		Mo (0.8)
		CoFeB (1.5)
磁化固定層	{	MgO (1.0)
		CoFeB (0.9)
		Mo (0.4)
		Co (0.6)
		Ir (0.5)
		Co (0.5)
		[Co (0.5) / Pt (0.3)]×6
		Pt (0.3)
下部電極	{	Ru (3)
		Pt (5)
		Ta (5)
		Si

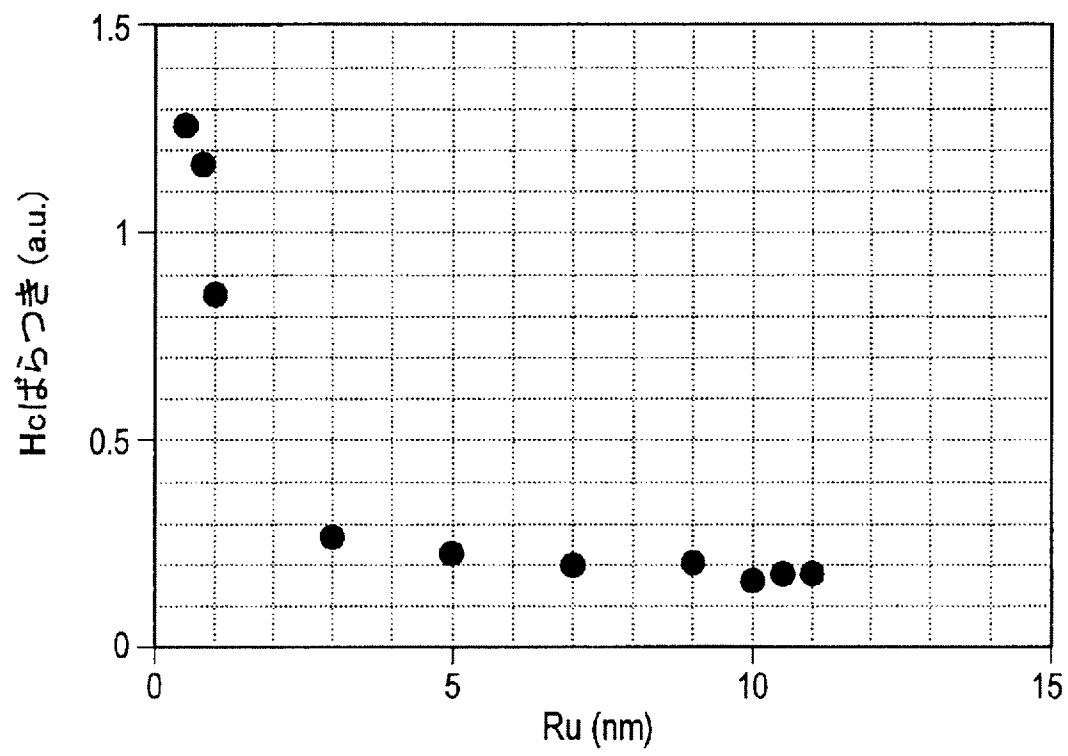
[図30]



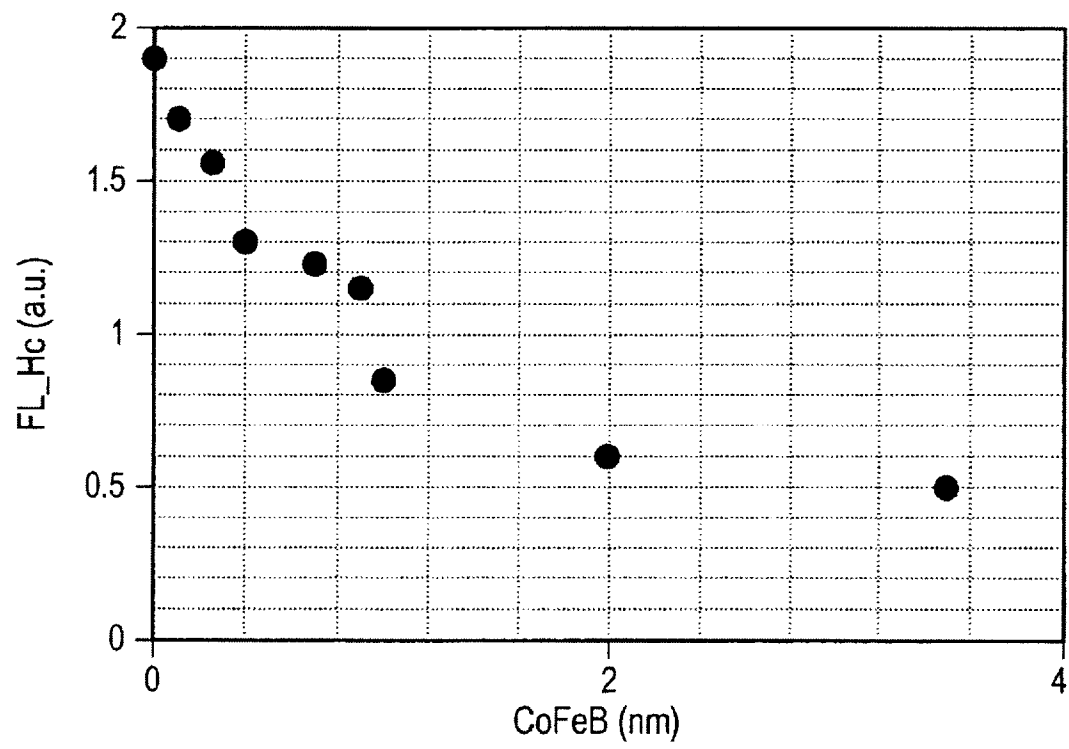
[図31]



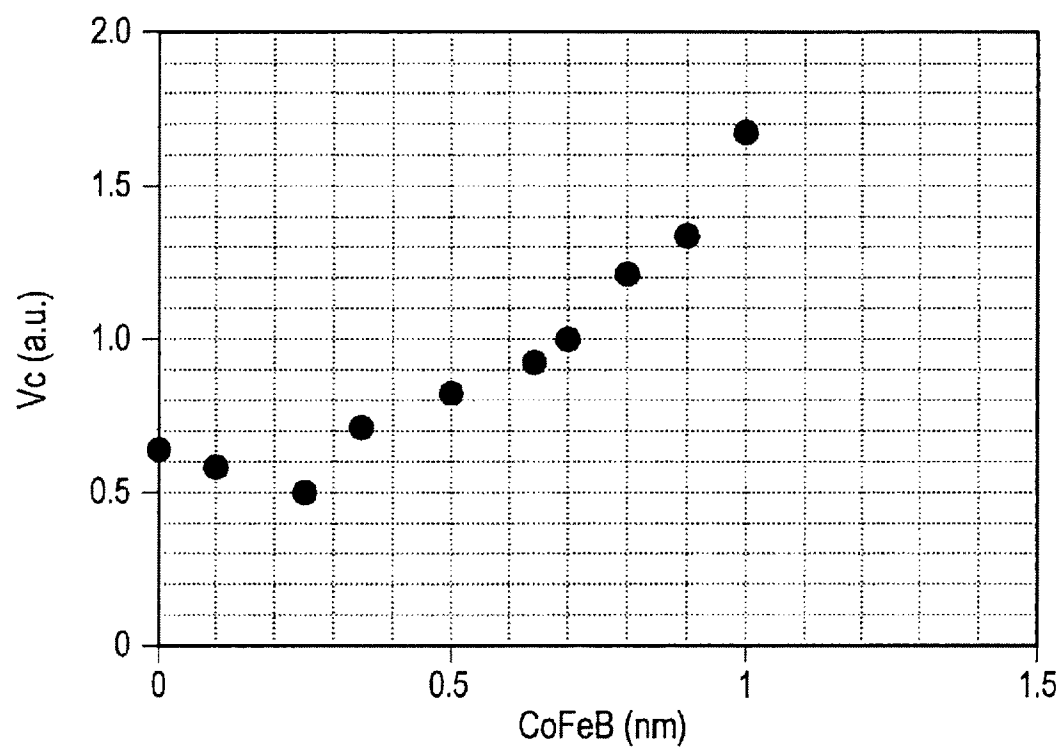
[図32]



[図33]



[図34]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/023979

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

Int.Cl. H01L21/8239 (2006.01) i, H01L27/105 (2006.01) i, H01L43/02 (2006.01) i, H01L43/08 (2006.01) i, H01L43/10 (2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

Int.Cl. H01L21/8239, H01L27/105, H01L43/02, H01L43/08, H01L43/10

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Published examined utility model applications of Japan	1922-1996
Published unexamined utility model applications of Japan	1971-2019
Registered utility model specifications of Japan	1996-2019
Published registered utility model applications of Japan	1994-2019

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	JP 2012-238631 A (SONY CORPORATION) 06 December 2012, paragraphs [0038], [0049]-[0054], [0058], [0059], [0061], [0072], fig. 3A & US 2012/0287696 A1, paragraphs [0076], [0100]-[0118], [0124]-[0131], [0134], [0162], fig. 3A & US 2015/0325782 A1 & CN 102779939 A	1, 4, 8-10, 15-19 1-3, 8-14, 19 5-7



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search
19.08.2019

Date of mailing of the international search report
27.08.2019

Name and mailing address of the ISA/
Japan Patent Office
3-4-3, Kasumigaseki, Chiyoda-ku,
Tokyo 100-8915, Japan

Authorized officer

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2019/023979

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y A	JP 2016-178301 A (HGST NETHERLANDS BV) 06 October 2016, paragraphs [0001], [0009]-[0015], fig. 2 & US 9337415 B1, column 1, lines 10-13, column 2, line 41 to column 3, line 64, fig. 2 & GB 2537039 A & DE 102016003130 A1 & FR 3033936 A1 & CN 105990517 A & KR 10-2016-0113048 A	1, 8-13, 19 2-7, 14-18
Y	WO 2006/129725 A1 (NEC CORPORATION) 07 December 2006, paragraphs [0041], [0050], fig. 7A (Family: none)	2, 3
Y	JP 2013-115413 A (SONY CORPORATION) 10 June 2013, paragraphs [0013], [0085], fig. 4 & US 2013/0163314 A1, paragraphs [0022], [0198], fig. 4 & US 2014/0346626 A1 & US 2015/0235688 A1 & US 2018/0226113 A1 & CN 103151455 A	14
A	US 2015/0028440 A1 (AGENCY FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND RESEARCH) 29 January 2015, entire text, all drawings (Family: none)	1-19

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01L21/8239(2006.01)i, H01L27/105(2006.01)i, H01L43/02(2006.01)i, H01L43/08(2006.01)i, H01L43/10(2006.01)i

B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料（国際特許分類（IPC））

Int.Cl. H01L21/8239, H01L27/105, H01L43/02, H01L43/08, H01L43/10

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

日本国実用新案公報	1922-1996年
日本国公開実用新案公報	1971-2019年
日本国実用新案登録公報	1996-2019年
日本国登録実用新案公報	1994-2019年

国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）

C. 関連すると認められる文献

引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
X	JP 2012-238631 A（ソニー株式会社）2012.12.06, 段落[0038], [0049] - [0054], [0058], [0059], [0061], [0072], 図 3A & US 2012/0287696 A1, 段落[0076], [0100] - [0118], [0124] - [0131],	1, 4, 8-10, 15-19
Y	[0134], [0162], 図 3A & US 2015/0325782 A1 & CN 102779939 A	1-3, 8-14, 19
A		5-7

☒ C欄の続きにも文献が列挙されている。

☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの

「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの

「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す）

「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献

「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の1以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

19.08.2019

国際調査報告の発送日

27.08.2019

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁（ISA/J P）

郵便番号100-8915

東京都千代田区霞が関三丁目4番3号

特許庁審査官（権限のある職員）

宮本 博司

5 F

6313

電話番号 03-3581-1101 内線 3516

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y A	JP 2016-178301 A (エイチジーエスティーネザーランドビービー) 2016.10.06, 段落[0001], [0009] - [0015], 図 2 & US 9337415 B1, 第 1 欄第 10 - 13 行, 第 2 欄第 41 行 - 第 3 欄第 64 行, 図 2 & GB 2537039 A & DE 102016003130 A1 & FR 3033936 A1 & CN 105990517 A & KR 10-2016-0113048 A	1, 8-13, 19 2-7, 14-18
Y	WO 2006/129725 A1 (日本電気株式会社) 2006.12.07, 段落[0041], [0050], 図 7A (ファミリーなし)	2, 3
Y	JP 2013-115413 A (ソニー株式会社) 2013.06.10, 段落[0013], [0085], 図 4 & US 2013/0163314 A1, 段落[0022], [0198], 図 4 & US 2014/0346626 A1 & US 2015/0235688 A1 & US 2018/0226113 A1 & CN 103151455 A	14
A	US 2015/0028440 A1 (AGENCY FOR SCIENCE, TECHNOLOGY AND RESEARCH) 2015.01.29, 全文, 全図 (ファミリーなし)	1-19