

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5527680号  
(P5527680)

(45) 発行日 平成26年6月18日 (2014. 6. 18)

(24) 登録日 平成26年4月25日 (2014. 4. 25)

(51) Int. Cl.		F I			
HO 1 J	1/34	(2006. 01)	HO 1 J	1/34	C
HO 1 J	37/073	(2006. 01)	HO 1 J	37/073	
G 2 1 K	1/00	(2006. 01)	G 2 1 K	1/00	E

請求項の数 13 (全 21 頁)

(21) 出願番号	特願2009-73929 (P2009-73929)	(73) 特許権者	504139662 国立大学法人名古屋大学
(22) 出願日	平成21年3月25日 (2009. 3. 25)		愛知県名古屋市千種区不老町 1 番
(65) 公開番号	特開2009-266809 (P2009-266809A)	(73) 特許権者	391002487 学校法人大同学園
(43) 公開日	平成21年11月12日 (2009. 11. 12)		愛知県名古屋市南区滝春町 1 〇番地 3
審査請求日	平成24年3月6日 (2012. 3. 6)	(73) 特許権者	000003713 大同特殊鋼株式会社
(31) 優先権主張番号	特願2008-79292 (P2008-79292)		愛知県名古屋市東区東桜一丁目 1 番 1 〇号
(32) 優先日	平成20年3月25日 (2008. 3. 25)	(74) 代理人	100087723 弁理士 藤谷 修
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(72) 発明者	宇治原 徹 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 国立大 学法人名古屋大学内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 スピン偏極電子発生素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、

前記基板と前記バッファ層との間に、前記バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成り、臨界膜厚以上の厚さを有する中間層を介在させたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子。

【請求項 2】

基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、

前記基板と前記バッファ層との間に、前記バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成る中間層を介在させ、

前記バッファ層には、引張歪みにより基板に垂直な方向へのクラックが発生していることを特徴とするスピン偏極電子発生素子。

【請求項 3】

基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、

前記基板と前記バッファ層との間に、前記バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成る中間層を介在させ、

前記中間層の厚さは、前記バッファ層に前記中間層から印加される引張歪みにより基板

に垂直な方向へのクラックが発生に至る直前において、前記中間層が前記バッファ層から受ける歪みが5%となる厚さより厚いことを特徴とするスピン偏極電子発生素子。

【請求項4】

前記バッファ層には、引張歪みにより基板に垂直な方向へのクラックが発生していることを特徴とする請求項1又は請求項3に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項5】

前記スピン偏極電子発生素子は前記基板の裏面から励起光を前記歪み超格子層に入射させるものであり、前記中間層の厚さは、前記励起光を50%～100%透過させる厚さであることを特徴とする請求項1乃至請求項4の何れか1項に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項6】

前記基板は、GaPから成り、前記バッファ層は、 $GaAs_xP_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ )、 $Ga_yIn_{1-y}P$  ( $0 < y < 1$ )又は $Ga_zIn_{1-z}As$  ( $0 < z < 1$ )から成り、前記中間層は、前記バッファ層の格子定数よりも、格子定数大きい、一般式、AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物から成ることを特徴とする請求項1乃至請求項5の何れか1項に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項7】

前記中間層は、GaAsから成ることを特徴とする請求項6に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項8】

前記基板は、GaAsから成り、前記バッファ層は、 $GaAs_xP_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ )、 $Ga_yIn_{1-y}P$  ( $0 < y < 1$ )又は $Ga_zIn_{1-z}As$  ( $0 < z < 1$ )、前記中間層は、前記バッファ層の格子定数よりも、格子定数大きい、一般式、AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物から成ることを特徴とする請求項1乃至請求項5の何れか1項に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項9】

前記中間層は、InAsから成ることを特徴とする請求項8に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項10】

前記基板は、GaNから成り、前記バッファ層は、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ )又は $Ga_yIn_{1-y}N$  ( $0 < y < 1$ )から成り、前記中間層は、前記バッファ層の格子定数よりも、格子定数大きい、一般式、AlGaInNで表される2元、3元、4元の化合物から成ることを特徴とする請求項1乃至請求項5の何れか1項に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項11】

前記中間層は、InNから成ることを特徴とする請求項10に記載のスピン偏極電子発生素子。

【請求項12】

請求項1乃至請求項11の何れか1項に記載のスピン偏極電子発生素子を用いたスピン偏極電子発生装置。

【請求項13】

前記スピン偏極電子発生装置は、前記スピン偏極電子発生素子をスピン偏極電子源とした電子顕微鏡であることを特徴とする請求項12に記載のスピン偏極電子発生装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、歪み超格子層を用いたスピン偏極電子発生素子に関する。特に、歪み超格子層の結晶性を改善し、スピン偏極度と外部量子効率の向上を実現するための構造に関する。

【背景技術】

【0002】

スピン偏極電子源は、磁区構造を観測するスピン低速電子顕微鏡や、陽子とスピン偏極

10

20

30

40

50

電子とを衝突させて素粒子を生成する場合の素粒子研究に用いられることが期待されている。これらの分野では、特に、高偏極度と高外部量子効率が必要である。現在、スピン偏極電子源には、主に、スピン偏極電子発生素子である半導体フォトカソードが用いられている。半導体フォトカソードは、光を照射することで電子を励起し、その電子を表面から取り出すことで、電子ビームを得る素子である。スピン偏極電子源として用いる場合は、励起光に円偏光を用いることで、励起される電子のスピンに偏りが生じ、スピン偏極電子源として機能する。

【0003】

GaAs系半導体フォトカソードにおけるスピン偏極の原理を説明する。半導体フォトカソードに照射された円偏光により、重い正孔バンドと軽い正孔バンドから、伝導帯へ電子が励起される。そのとき、それぞれのバンドからは、異なるスピンを持った電子が3対1の割合で励起される。その結果、カソードの外部に出力される電子ビームのスピンに偏りが生じ、スピン偏極電子ビームが得られる。

10

【0004】

歪みGaAs半導体の単層を用いたスピン偏極電子発生素子として、下記特許文献1、2、3の技術が知られている。その技術は、GaAs半導体層に歪みを与えることでスピン偏極度を向上させるものである。GaAs系半導体では、価電子帯の重い正孔バンドと軽い正孔バンドは、点で縮退しているため、両方のバンドから同時に電子が励起されてしまう。もし、この縮退を解いて2つのバンドを分離することができれば、片方のスピン電子しか励起されず、原理的には100%のスピン偏極度を達成することができる。バンドを分離する方法として、半導体に歪みを与える方法がある。これらの特許文献1～3では、GaAs基板上に、それと格子定数の異なるGaAsP結晶活性層をエピタキシャル成長させることで格子不整合によりGaAsP層に歪みを生じさせ、それによるGaAsPの価電子帯のバンド分離により偏極度50%以上を達成している。さらに、GaAs基板に直接ではなく、活性層の下に、活性層とは異なる組成をもつGaAsPを挿入することで、活性層の結晶性の劣化を抑制することが提案されている。

20

【0005】

また、下記特許文献4では、歪み超格子構造を用いて、スピン偏極度を向上させる技術が開示されている。超格子構造とは、一層が1ML～数nmの厚さの、2種類以上の異なるバンドギャップを持つ半導体を繰り返し積層したものである。電子の場合は、伝導帯の底のエネルギーが低い層、また正孔の場合は、価電子帯の頂上のエネルギーが高い層は、井戸層とよばれ、それを挟む層は障壁層と呼ばれている。電子や正孔はこの井戸層に閉じ込められることで、量子準位が形成される。また、その準位は、重い正孔と軽い正孔では異なるエネルギー領域に形成されるため、これによってもバンドの分離が生じる。

30

【0006】

さらに、超格子層に歪みを付与したものは、歪み超格子構造といい、歪みと量子閉じ込めによる効果を相加的に利用することで、更なるバンド分離が実現される。特許文献4ではGaAs基板上に形成したGaAs-GaAsP歪み超格子構造によるスピン偏極電子源に関するもので、90%以上の偏極度が実現されている。

40

【0007】

また、下記特許文献5に開示された技術は、高輝度偏極電子線を実現する電子源に関する。輝度向上のためには、励起光を絞り、電子線発生領域を小さくすることが有効である。本発明では、励起光をフォトカソードの裏面から照射することで、表面から放出されるスピン偏極電子線と干渉せずに、レンズで励起光を集光する構造を提案している。ここで、半導体フォトカソードに関しては、励起光を透過するGaP基板上のGaAs-GaAsP歪み超格子構造を新たに発明している。しかし、このままの構造では高い偏極度は得られない。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0008】

【特許文献1】特許第3189444

50

【特許文献2】特開平6 - 28970

【特許文献3】特開平6 - 231676

【特許文献4】特開2000 - 90817

【特許文献5】特開2007 - 258119

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

上記特許文献4の技術は、歪み超格子層を用いることで、価電子帯の縮退を解き、重い正孔バンドと軽い正孔バンドとにスプリットさせて、吸収波長が長波長側となる重い正孔バンドと伝導帯との間の電子の遷移を、片方向円偏光を用いて実現するものである。この技術は、原理的には、理想状態で100%のスピンの偏極度を得ることができる。

10

【0010】

図1に歪み超格子半導体フォトカソードの構成を示す。歪み超格子半導体フォトカソードの偏極度は、主に、軽い正孔バンドと重い正孔バンドとの分離の程度によって決まる。これらのバンド構造は、超格子構造4の井戸層401と障壁層402の組成と厚さと、それぞれの層に生じる歪みに依存し、クローニツヒペニモデルと、モデルソリッド理論を用いることで理論的に計算可能である。このとき、それぞれの層401、402に生じる歪みは、それらの下に存在するバッファ層3の組成によって決まる。図2に、一例として、GaAsP バッファ層上に形成したGaAsP/GaAs超格子構造のミニバンド構造を示す。この構造の場合、重い正孔バンドと軽い正孔バンドの分離幅が107 meV であることがわかる。この値が大きいほど、理論的には偏極度は大きくなり、このように設計した構造において、重い正孔バンドと伝導帯との間で電子の遷移が行われる波長の円偏光を入射させれば、理論的には、100 %のスピンの偏極度が得られる。

20

【0011】

しかしながら、実際には偏極度は100%に達しない。本発明者らは、この原因を追求すべく、鋭意研究を重ねてきた。その結果、次のことが、原因であることを見出した。本構造においては結晶中に多くの転位が導入され、それらによるスピン反転散乱が生じ、それにより偏極度は低下してしまう。また、歪み超格子構造における転位の導入は生成された電子を捕獲するため、量子効率も低下させている。

【0012】

そして、転位が導入される原因には、主に二つあることを発見した。一つの原因は、歪み超格子構造内に蓄積される歪み自体によるものである。これに関しては、本発明者らは、未公開の出願特願2006-60673で提案している。井戸層と障壁層で逆向きの歪みをかけることで、超格子構造全体としての歪みの蓄積を抑制する歪み補償構造の採用により、ある程度、転位の発生を改善することが可能である。

30

【0013】

もう一つの原因は、バッファ層と基板との間の格子不整合によるものである。基板結晶としては、現在、入手可能なものとして、GaAs、GaP、InP、InAs、GaN、AlN、Si、Ge、SiC、サファイアなどが想定される。バッファ層の格子定数は、歪み超格子層に印加させる歪み量に応じて、前述の理論計算による設計により決定される。また、基板は結晶成長の容易性から、歪み超格子層と比較的組成が共通し、格子定数の近いものを選ぶ必要がある。また、スピンの偏極電子発生素子を基板の裏面から励起光を入射させる励起光透過型にする場合は、基板において光吸収が起こらないように、バンドギャップを考慮して、基板の材料を決定する必要がある。このように決定したバッファ層と基板の格子定数は、ほとんどの場合、一致しない。そのため、バッファ層には必ず格子不整合に起因する転位が発生することになる。また、バッファ層の転位は、その上にエピタキシャル成長する超格子構造へも伝播し、超格子構造の結晶性も劣化させる。また、これらの転位は電子を捕獲するため、量子効率も低下させる。

40

【0014】

本発明は、上記の課題を解決するために成されたものであり、その目的は、基板、バッ

50

ファ層、歪み超格子層の材料選択の自由度を持たせた状態で、スピン偏極度と外部量子効率の高いスピン偏極電子発生素子を実現することである。

【課題を解決するための手段】

【0015】

第1の発明は、基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、基板とバッファ層との間に、バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成り、臨界膜厚以上の厚さを有する中間層を介在させたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子である。

【0016】

すなわち、本発明の要旨は、歪み超格子層の価電子帯の縮退を解き、2つのバンドを効果的に分離させるために超格子層に歪みを付与するためのバッファ層の下に、そのバッファ層の結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成る中間層を設けたことである。この中間層により、基板の結晶材料に関係なく、バッファ層に対して、引張歪みを付与するようにしたことが特徴である。したがって、本発明では、バッファ層に対して引張歪みが付与できる、バッファ層の格子定数よりも格子定数の大きな材料を中間層に用いれば、十分であるので、その材料の種類には、限定されるものではない。また、バッファ層は、歪み超格子層に対して、圧縮歪みを印加する格子定数の組成であることが望ましい。この場合には、重い正孔バンドは、正孔のエネルギーが低い方に、軽い正孔バンドを正孔のエネルギーが高い方に分離でき、2つの価電子帯を、点の付近で交差させることなく、分離できる。したがって、歪み超格子に励起されたスピン偏極度を高くすることができる。

このためには、バッファ層は、歪み超格子層の少なくとも井戸層の格子定数よりも、小さい格子定数を有する結晶を用いる。もちろん、バッファ層は、歪み超格子層の障壁層の格子定数よりも小さい格子定数の結晶であっても良い。

【0017】

バッファ層が、歪み超格子層に対して、所定の歪みを印加し得るためには、中間層は、臨界膜厚以上の厚さに構成されており、十分に歪みが緩和されていることが望ましい。これにより、歪み超格子層は、その下の層であるバッファ層からのみ所定の歪みを受けることになるため、歪み超格子層の価電子帯を、設計通りに、効果的に分離することが可能となる。

【0018】

また、第2の発明は、基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、基板とバッファ層との間に、バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成る中間層を介在させ、バッファ層には、引張歪みにより基板に垂直な方向へのクラックが発生していることを特徴とするスピン偏極電子発生素子である。

このクラックによりバッファ層は、モザイク状となる。本発明者らは、引張歪みが、バッファ層に印加されると、バッファ層には、その歪みを緩和させるために垂直方向に、部分的に、低密度で、クラックが発生することを見出した。この結果、バッファ層には、斜め方向の滑り転位の発生がなく、バッファ層上の歪み超格子層には、この斜め方向の転位が継承されないために、歪み超格子層の結晶性が良くなることを見出した。すなわち、バッファ層に圧縮歪みが印加されると、バッファ層には、高密度の斜め方向の滑り転位が発生し、この転位面が、バッファ層上にエピタキシャル成長する歪み超格子層にも伝播する結果、歪み超格子層に大きな密度の転位が発生していることを見出した。そして、歪み超格子層における転位密度を低減させることにより、スピン偏極度、偏極した電子の外部量子効率を向上させることを見出した。

【0019】

また、第3の発明は、基板と、バッファ層と、バッファ層上に形成された歪み超格子層とを有するスピン偏極電子発生素子において、基板とバッファ層との間に、バッファ層を構成する結晶の格子定数よりも大きな格子定数を有する結晶から成る中間層を介在させ、

10

20

30

40

50

中間層の厚さは、バッファ層に中間層から印加される引張歪みにより基板に垂直な方向へのクラックが発生に至る直前において、中間層がバッファ層から受ける歪みが5%となる厚さより厚いことを特徴とするスピン偏極電子発生素子である。

バッファ層から中間層に歪みが印加されると、バッファ層から歪み超格子層へ、所定の歪みが印加され難くなるので、中間層は、この条件を満たすような厚さであることが望ましい。

【0020】

また、第4の発明は、第1又は第3の発明において、バッファ層には、引張歪みにより基板に垂直な方向へのクラックが発生していることを特徴とする。

また、第5の発明は、第1乃至第4の何れか1の発明において、スピン偏極電子発生素子は基板の裏面から励起光を歪み超格子層に入射させるものであり、中間層の厚さは、励起光を50%～100%透過させる厚さであることを特徴とする。歪み超格子層に、所定の設計通りの歪みが印加されるためには、中間層の厚さは厚い程、望ましいことになる。そこで、基板の裏面から励起光を入射させた場合には、その励起光が減衰せずに、歪み超格子層に入射することも必要であるので、中間層での励起光の透過率は、50%～100%とする厚さが望ましい。

【0021】

また、第6の発明は、第1乃至第5の発明の何れか1つの発明において、基板は、GaPから成り、バッファ層は、 $GaAs_xP_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ )、 $Ga_yIn_{1-y}P$  ( $0 < y < 1$ )又は $Ga_zIn_{1-z}As$  ( $0 < z < 1$ )から成り、中間層は、バッファ層の格子定数よりも、格子定数が大きい、一般式、AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物から成ることを特徴とする。この構成の場合に、歪み超格子層は、 $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )と $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )との超格子、 $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )と $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )との超格子、 $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )と $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )との超格子、組成比の異なる $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )による超格子、組成比の異なる $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )による超格子、または、 $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )が望ましい。これらの組成にAlが含まれていても良い。もちろん、一般式AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の組成のうち、バンドギャップの小さい組成と、大きい組成との組合せで歪み超格子層を形成しても良い。もちろん、GaP以外の基板を用いる場合であっても、中間層、バッファ層、歪み超格子層の材料は、上記した材料を用いることができる。バッファ層としては、中間層よりも格子定数が小さく、且つ、歪み超格子層に対して圧縮歪みを付与するように、歪み超格子層の井戸層よりも格子定数が小さいものが採用される。また、バッファ層は、歪み超格子層の障壁層よりも格子定数が小さくとも良い。

【0022】

また、第7の発明は、第6の発明において、中間層は、GaAsから成ることを特徴とする。

この構成の場合に、歪み超格子層は、第6の発明で記載した組合せの他、特に、GaAsと $GaAs_wP_{1-w}$  ( $0 < w < 1$ )との超格子を用いることが望ましい。なお、第6又は第7の発明において、バッファ層における組成は、歪み超格子層のバリア層の組成と同一でも異なっても良い。この構成の発明の場合には、基板の裏面から励起光を入射させるスピン偏極電子発生素子とすることができる。

【0023】

また、第8の発明は、第1乃至第5の発明の何れか1つの発明において、基板は、GaAsから成り、バッファ層は、 $GaAs_xP_{1-x}$  ( $0 < x < 1$ )、 $Ga_yIn_{1-y}P$  ( $0 < y < 1$ )又は $Ga_zIn_{1-z}As$  ( $0 < z < 1$ )から成り、中間層は、バッファ層の格子定数よりも、格子定数が大きい、一般式、AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物から成ることを特徴とする。この構成の場合に、歪み超格子層は、 $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )と $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )との超格子、 $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )と $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )との超格子、 $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )と $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )との超格子、組成比の異なる $Ga_sIn_{1-s}As$  ( $0 < s < 1$ )による超格子、組成比の異なる $GaAs_tP_{1-t}$  ( $0 < t < 1$ )による超格子、または、 $Ga_wIn_{1-w}P$  ( $0 < w < 1$ )が望ましい。これらの組成にAlが含まれていても良い。もちろん、一般式AlGaInAsPで表される

2元、3元、4元、5元の組成のうち、バンドギャップの小さい組成と、大きい組成との組合せで歪み超格子層を形成しても良い。もちろん、GaAs以外の基板を用いる場合であっても、中間層、バッファ層、歪み超格子層の材料は、上記した材料を用いることができる。バッファ層としては、中間層よりも格子定数が小さく、且つ、歪み超格子層に対して圧縮歪みを付与するように、歪み超格子層の井戸層よりも格子定数が小さいものが採用される。バッファ層は、障壁層よりも格子定数が小さくとも良い。

【0024】

また、第9の発明は、第8の発明において、中間層は、InAsから成ることを特徴とする。この構成の場合に、歪み超格子層は、第8の発明で記載した組合せの他、特に、 $Ga_zIn_{1-z}As$  ( $0 < z < 1$ )と $Ga_yIn_{1-y}P$  ( $0 < y < 1$ )との超格子とすることが望ましい。この構造の発明の場合には、大出力の半導体レーザが得られ易い長波長、たとえば、900nmの励起光を、基板の裏面から入射させる型のスピン偏極電子発生素子とすることができる。

10

【0025】

また、第10の発明は、第1乃至第5の発明の何れか1つの発明において、基板は、GaNから成り、バッファ層は、 $Al_xGa_{1-x}N$  ( $0 < x < 1$ )又は $Ga_yIn_{1-y}N$  ( $0 < y < 1$ )から成り、中間層は、バッファ層の格子定数よりも、格子定数が大きい、一般式、 $AlGaInN$ で表される2元、3元、4元の化合物から成ることを特徴とする。この構成の場合には、歪み超格子層は、 $Ga_sIn_{1-s}N$  ( $0 < s < 1$ )と $Al_tGa_{1-t}N$  ( $0 < t < 1$ )との超格子とすることが望ましい。また、組成比の異なる $Ga_sIn_{1-s}N$  ( $0 < s < 1$ )による超格子、又は、組成比の異なる $Al_tGa_{1-t}N$  ( $0 < t < 1$ )による超格子が望ましい。もちろん、一般式 $AlGaInN$ で表される2元、3元、4元、5元の組成のうち、バンドギャップの小さい組成と、大きい組成との組合せで歪み超格子層を形成しても良い。もちろん、GaN以外の基板を用いる場合であっても、中間層、バッファ層、歪み超格子層の材料は、上記した材料を用いることができる。バッファ層としては、中間層よりも格子定数が小さく、且つ、歪み超格子層に対して圧縮歪みを付与するように、歪み超格子層の井戸層よりも格子定数が小さいものが採用される。バッファ層は、障壁層よりも格子定数が小さくとも良い。

20

【0026】

また、第11の発明は、第10の発明において、中間層は、InNから成ることを特徴とする。この構成の場合に、歪み超格子層は、第10の発明で記載した組合せの他、特に、 $Ga_zIn_{1-z}N$  ( $0 < z < 1$ )とGaNとの超格子とすることが望ましい。この構成の場合には、基板の裏面から励起光を入射させることが可能である。また、バンドギャップが大きいことから、外部へのスピン偏極電子の取り出し効率が向上し、外部量子効率を大きくすることができる。

30

【発明の効果】

【0027】

本発明は、バッファ層の結晶の格子定数よりも、格子定数の大きい結晶の中間層を、バッファ層の下に設けたものである。バッファ層に引張歪みを印加でき、バッファ層上の歪み超格子層の転位密度を低減できる。この結果、励起された電子の転位によるスピン反転散乱と、転位による電子の捕獲が減少するので、歪み超格子層の伝導帯に励起される電子のスピン偏極度を大きくでき、また、外部量子効率を向上させることができる。すなわち、バッファ層と基板の材料の選択に係わらず、バッファ層には引張歪みを印加することができ、歪み超格子層の結晶性を改善して、高偏極度、高量子効率の実現が可能となる。

40

【図面の簡単な説明】

【0028】

【図1】 バッファ層と歪み超格子層を用いたスピン偏極電子発生素子の構造図。

【図2】 バッファ層と歪み超格子層におけるバンド図。

【図3】 (a)は、バッファ層に引張歪みが印加された場合の結晶の断面図、(b)は、バッファ層に圧縮歪みが印加された場合の結晶の断面図。

【図4】 本発明の具体的な実施例1に係るスピン偏極電子発生素子の構造図。

50

【図5】(a)は、実施例1の構成において、中間層を用いてバッファ層を成長させた後のバッファ層のAFM像、(b)は、実施例1の構成において、中間層を用いずに、バッファ層を成長させた後のバッファ層のAFM像。

【図6】実施例1のスピンの偏極電子発生素子のスピンの偏極度と波長との関係、及び、中間層を用いない場合のスピンの偏極電子発生素子のスピンの偏極度と波長との関係を測定して得た特性図。

【図7】本発明の具体的な実施例2に係るスピンの偏極電子発生素子の構造図。

【図8】本発明の具体的な実施例3に係るスピンの偏極電子発生素子の構造図。

【図9】本発明のスピンの偏極電子発生素子を用いたスピンの偏極電子発生装置の構成図。

【図10】スピンの偏極電子発生装置のスピンの偏極電子発生素子の設置部の構成図。

10

【発明を実施するための最良の形態】

【0029】

本発明は、超格子層において偏極度や量子効率の低下の原因となる転位の密度を低下させるための構造に関する。図3に示すように、バッファ層3の格子定数が基板1の格子定数よりも大きい場合、バッファ層3は、面内2軸圧縮歪みをうける。バッファ層3の厚さが増加し、臨界膜厚をこえると、その歪みを緩和するために転位が導入される。図3(b)に示すように、バッファ層3に圧縮歪みが印加される場合は、結晶中に細かく、高密度で転位が分布することになる。

【0030】

一方、バッファ層3の格子定数が基板1の格子定数よりも小さい場合には、バッファ層3は面内2軸引張歪みを受ける。バッファ層3の厚さが臨界膜厚を越えると、やはり転位が導入されるが、それと同時に基板面に対して垂直方向に伸びるクラック5が発生する。その結果、図3(a)に示すようなクラック5に区切られたモザイク構造が形成される。このクラック5の発生密度は、図3(b)に示す圧縮歪みの場合の転位密度に比べると遙かに小さい。引張歪みの場合、クラック5で囲まれたモザイク構造内部には、歪みがクラックで開放されるので、転位密度が低い状態が維持される。したがって、励起された電子が転位に散乱される確率が減少し、偏極度、量子効率が増加する。

20

【0031】

また、超格子層で励起された電子のうち、基板に垂直方向に進む電子が真空中に取り出されるが、滑り転位の場合は、基板垂直方向に進む電子の進行を妨げ、スピンの反転散乱の要因となるが、クラックは電子の進行方向と平行であるため、電子はクラックによっては散乱されず、スピンの反転散乱の要因にならない。

30

【0032】

上述したように、超格子層4に歪みを与えて価電子帯を有効にスプリットさせるために設計したバッファ層3の格子定数が、基板1の格子定数より、必ずしも小さくなるわけではない。たとえば、基板1に励起光を透過させるためには、バンドギャップの大きい基板を選ぶ必要がある。一般に、バンドギャップが大きい材料は格子定数が小さい。励起光を透過させる目的のために、GaP基板を用いた場合には、GaP基板上にバッファ層を形成して、そのバッファ層上に、GaAsP/GaAs超格子層を形成した場合、バッファ層の格子定数が基板の格子定数よりも大きくなる。この構造では、バッファ層は、圧縮歪みが緩和されて、高い密度の滑り転位が発生し、その転位が歪み超格子層に伝播して、歪み超格子層の転位密度が高くなり、スピンの偏極度や量子効率低下する。

40

【0033】

バッファ層の組成は理論計算による設計により決定され、また基板は入手可能なものであり、かつ、目的に応じて制限されてしまう。このため、基板とバッファ層との間で、格子定数の大小関係を任意に選ぶことは不可能である。本発明では、基板とバッファ層をどのように選択したとしても、バッファ層に引張歪みを印加するようにするために、基板とバッファ層の間に、バッファ層よりも格子定数の大きい中間層を導入する。本発明は、それにより、どのような歪み超格子層を形成する場合であっても、バッファ層に、基板に垂直な方向のクラックを発生させて、モザイク構造にして、歪み超格子層の結晶性を改善し

50



て、励起される電子の高スピン偏極度、高量子効率を実現するものである。

【0034】

最も望ましい場合には、中間層には、主に次の4つの要件が要求される。ただし、本発明においては、1.項の要件が必須であって、他の要件は、望ましくは付加すべき要件である。

1. バッファ層よりも格子定数が大きい。
2. 中間層の歪みが十分緩和されていること。(中間層は、臨界膜厚以上の厚さを有すること。)
3. バッファ層の引張歪みが緩和されるときに、中間層はほとんど歪まないこと。(バッファ層によって、中間層が歪まないほどに、中間層は十分な厚さを有すること。)
4. 透過型のスピン偏極電子発生素子の場合、歪み超格子層での電子励起効率を低下させないために、中間層は、入射する励起光の50~100%が透過する厚さ以下であること。

10

【0035】

中間層には、バッファ層よりも格子定数の大きい材料・組成を選択する。中間層は、格子定数が異なる基板上にエピタキシャルに成長しているため、中間層には歪みが生じる。中間層としての機能を有効に働かせるためには、膜厚を大きくし、その歪みが十分緩和する必要がある。歪みが緩和される中間層の膜厚 $h_i$ は次式で求められる。

【0036】

【数1】

$$h_i = \frac{b(1 - v_i \cos^2 \theta)[\ln(h_i/b) + 1]}{8\pi|f|(1 + v_i) \cos \lambda} \quad (1)$$

20

【0037】

また、中間層は、バッファ層に転位が導入され、垂直方向のクラックによりモザイク構造が形成されるまで、ほとんど歪まない厚さであることが望ましい。このような厚さ $h_i'$ は、次の式で求めることができる。ここでは、バッファ層の歪みに対する中間層の歪みの割合を $x\%$ とした。

【0038】

【数2】

$$h_i' > \frac{A_b h_b a_i^2 (a - a_b)}{A_i a_b^2 (a_i - a)} = \frac{A_b h_b a_i^2}{A_i a_b^2} \frac{100 - x}{x} \quad (2)$$

30

【0039】

ここで、

【0040】

【数3】

$$A_b = \frac{2G_b}{a_b^2} \left( \frac{1 + v_b}{1 - v_b} \right) \quad (3)$$

40

【0041】

【数4】

$$A_i = \frac{2G_i}{a_i^2} \left( \frac{1 + v_i}{1 - v_i} \right) \quad (4)$$

【0042】

ただし、

50

- $G_b$  : バッファ層のshear modulus  
 $G_i$  : 中間層のshear modulus  
 $\nu_b$  : バッファ層のポアソン比  
 $\nu_i$  : 中間層のポアソン比  
 $a_b$  : バッファ層の格子定数  
 $a_i$  : 中間層の格子定数  
 $a_s$  : 基板の格子定数  
 $h_b$  : バッファ層にモザイク構造が形成される膜厚  
 $b$  : 中間層に導入される転位のバーガーズベクトル  
: 転位線とバーガーズベクトルのなす角  
: 中間層と基板界面の法線方向とバーガーズベクトルのなす角  
 $f$  : 基板と中間層の格子不整合度

10

【 0 0 4 3 】

【数 5】

$$f = \frac{a_s - a_i}{a_i} \quad (5)$$

【 0 0 4 4 】

である。

20

【 0 0 4 5 】

$x$  は、5 程度よりも小さいほうが望ましい。

【 0 0 4 6 】

中間層の膜厚は、上述の $h_i$ と $h_i'$ のいずれの値よりも大きい必要がある。

【 0 0 4 7 】

さらに、半導体フォトカソードを透過型電子源として用いる場合は、励起光が基板と中間層を透過する必要がある。しかし、一般的には、中間層の格子定数は超格子層の格子定数よりも大きい場合、中間層のバンドギャップは、超格子層のバンドギャップよりも小さくなる。このため、中間層は、励起光を100%透過できない場合が多い。その際には、励起光が中間層を、入射強度の50%以上透過できるようにすることが望ましい。そのためには、中間層の透過率は次式を満たす必要がある。

30

【 0 0 4 8 】

【数 6】

$$1 > \exp(-\alpha h_i'') > 0.5 \quad (6)$$

【 0 0 4 9 】

: 励起光波長に対する中間層の透過率

透過率は、中間層の組成に依存するので、中間層の組成は、この透過率の条件を満たすものであることが望ましい。さらに(6)式において、1に近いほど(中間層での光吸収がないほど)最適な構造となる。

40

【 0 0 5 0 】

バッファ層にモザイク構造が形成されるバッファ層の臨界膜厚 $h_b$ は、理論的には次式で求められる。

【 0 0 5 1 】

【数 7】

$$h_b = \frac{b_b(1 - \nu_b \cos^2 \theta_b)[\ln(h_b/b_b) + 1]}{8\pi |f_b| (1 + \nu_b) \cos \lambda_b} \quad (7)$$

50

## 【 0 0 5 2 】

ただし、

- $b_b$  : バッファ層に導入される転位のバーガーズベクトル
- $b$  : バッファ層における転位線とバーガーズベクトルのなす角
- $b$  : バッファ層と中間層界面の法線方向とバーガーズベクトルのなす角
- $f_b$  : バッファ層と中間層の格子不整合度

## 【 0 0 5 3 】

## 【数 8】

$$f = \frac{a_i - a_b}{a_b} \quad (8)$$

10

## 【 0 0 5 4 】

また、中間層の厚さの下限値をより正確に定義するためには、実験によるバッファ層の臨界膜厚の測定値を用いても良い。任意の基板上に中間層を、予測される最適厚さよりも、十分厚くエピタキシャル成長させ、その上に、バッファ層をエピタキシャル成長する。様々な厚さのバッファ層を成長させ、顕微鏡、もしくは原子間力顕微鏡などで、バッファ層の表面を観察する。そのとき、亀裂状のクラックが確認できる厚さを、バッファ層の臨界膜厚 $h_b$ として求めても良い。

## 【 0 0 5 5 】

20

転位の導入により形成されるモザイク構造は、その幅が、超格子層の厚さ、及び、電子の拡散長以上であることが望ましい。歪み超格子層において、励起された電子が、このクラックで散乱される確率を低減させるためである。

## 【実施例 1】

## 【 0 0 5 6 】

実施例 1 は、図 4 に示すように、GaP 基板と、GaAsP/GaAs歪み超格子層を用いたスピン偏極電子発生素子である。すなわち、GaP から成る基板 1 0 上に、厚さ500nm のGaAsから成る中間層 2 0 が形成され、その上に、厚さ1  $\mu\text{m}$  のバッファ層 3 0 が形成され、そのバッファ層 3 0 の上に歪み超格子層 4 0 が形成され、その歪み超格子層 4 0 の上に、厚さ5nm のキャップ層 5 0 が形成されている。

30

## 【 0 0 5 7 】

この構造は、高偏極度、高輝度のスピン偏極電子源を目的として設計された透過型歪み超格子半導体フォトカソードである。歪み超格子層 4 0 は、理論計算に基づき、図 4 のように設計された。すなわち、バッファ層 3 0 は、Znが濃度 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ に添加された厚さ1  $\mu\text{m}$  のGaAs $_{0.65}$ P $_{0.35}$ で構成されている。また、歪み超格子層 4 0 は、厚さ4.3nm のGaAsから成る井戸層 4 0 1 と、厚さ4.3nm のGaAs $_{0.65}$ P $_{0.35}$ から成る障壁層 4 0 2 を 1 組として、1 2 組で構成されており、総合厚さは103.2nm である。また、井戸層 4 0 1 と障壁層 4 0 2 には、共に、Znが濃度 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で添加されている。これは、p 型半導体として、励起された電子を少数キャリアとするためである。そして、歪み超格子層 4 0 の上には、厚さ5nm のZnが濃度 $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$ で添加されたGaAsから成るキャップ層 5 0 が形成されている。

40

## 【 0 0 5 8 】

この構造から計算されるバンド構造を図 2 に示す。この構造では、重い正孔バンドと、軽い正孔バンドの分離幅が107 meV であり、理論的には100%のスピン偏極度が期待できる。また、バンド構造から偏極電子の励起には、780nm 程度の励起光波長が最適であることがわかる。ここで、透過型スピン偏極電子発生素子を想定する場合、基板が780nm の光を透過する必要があり、基板 1 0 としてはGaP を選択することとなる。この場合、バッファ層 3 0 の格子定数は0.558 nmであるのに対して、基板 1 0 の格子定数は0.539 nmとなるため、バッファ層 3 0 の結晶の方が、基板 1 0 の結晶よりも格子定数が大きくなる。このため、バッファ層 3 0 を基板 1 0 の上に直接、成長させた場合には、バッファ層 3 0 には、

50

圧縮歪みがかかる。この圧縮歪みを引張歪みに変化させて、高偏極度を得るためには、本発明の要部である中間層 20 が必要となる。本発明の設計指針にしたがって、本構造では中間層 20 として厚さ 500nm の GaAs 層を導入した。上記組成のバッファ層 30 と中間層 20 との組み合わせでは、バッファ層の臨界膜厚は、式(7)に基づき、7nm である。しかし、バッファ層 30 が歪み超格子の厚さに対して薄すぎると、歪み超格子に掛かるべき歪みがバッファ層に掛かって好ましくないという理由から、バッファ層の厚さは歪み超格子の厚さの 10 倍程度が望ましいので、バッファ層の厚さを 1 ミクロンとした。この厚さの違いにより、約 90% の歪みが歪み超格子に掛かり、バッファ層には約 10% の歪みが掛かることになる。バッファ層の厚さは、素子全体の大きさが大き過ぎない範囲であれば、いくらかでも厚くて構わない。

10

## 【0059】

図 5 に、バッファ層の表面の AFM 像を示す。図 5 ( b ) は、GaP 基板に直接 GaAsP バッファ層を積層した場合のバッファ層表面の AFM 像、図 5 ( a ) は、GaP 基板上に、GaAs 中間層を成長させて、その中間層上に GaAsP バッファ層を成長させた場合のバッファ層表面の AFM 像である。中間層が介在されている場合には、図 5 ( a ) から明らかなように、大きなクラック状の欠陥が見られ、さらにその間隔は 0.5 ~ 1  $\mu\text{m}$  程度あることが確認できている。クラック密度としては、圧縮歪みにより生じた転位密度よりも低い。

## 【0060】

このバッファ層 30 の上に設計した歪み超格子層 40 を形成し、さらに、その上に、高 Zn ドープ GaAs から成るキャップ層 50 を形成後、表面を Cs:O 蒸着により NEA 表面を形成した。これは、仕事関数を小さくして、電子を真空中に取り出し易くするためである。この構造のスピンの偏極電子発生素子の基板 10 の裏側からの励起光照射により、偏極度測定を行った。その結果を図 6 に示す。横軸は励起光波長、縦軸はスピン偏極度である。GaAs 中間層を導入しなかったものは、最大偏極度で 70% 以下と非常に低い値となっている。それに対して、GaAs 中間層を導入したものは 90% の偏極度を達成していることがわかる。本実施例において、中間層の望ましい厚さは、370nm 以上 500nm 以下である。中間層の厚さが、370nm よりも薄いと、バッファ層の歪みに対する中間層の歪みを 5% よりも小さくすることができないので、望ましくない。また、中間層の厚さは、基板の裏面から励起光を導入する場合に、光損失を低減するために、なるべく薄い方が望ましい。中間層が 500nm よりも厚いと、光損失が大きくなり、望ましくない。さらに、望ましくは、370nm 以上 400nm 以下である。

20

30

この実施例において、バッファ層は、中間層の格子定数よりも格子定数が小さく、歪み超格子層の少なくとも井戸層の格子定数よりも小さい格子定数を有する結晶であれば、任意組成比の GaAsP ( 2 元を含む ) を用いることができ、歪み超格子層も任意組成比の GaAsP / GaAsP 超格子を用いることができる。また、中間層も、格子定数の上述した関係を満たすのであれば、GaAsP、GaInP、GaInAs ( いずれも 2 元系を含む ) を用いることができる。基板には、GaP、その他の基板を用いても良い。

## 【実施例 2】

## 【0061】

実施例 2 は、図 7 に示すように、GaAs 基板と、GaInP / GaInAs 歪み超格子層を用いたスピンの偏極電子発生素子である。電子源の目的によっては、フォトカソードから取り出せる電流を大きくする必要がある。その一つの方法は、励起光のパワーを大きくすることである。また、電子顕微鏡への応用などを想定した場合、大型のレーザーではなく、小型で汎用性の高い半導体レーザーの利用が有効である。半導体レーザーにおいては、発光波長 900 ~ 1000nm で数 W の出力を持つ汎用品が多く存在する。したがって、この波長域の励起光により電子が励起される歪み超格子の利用が有効である。また、小型化のためには透過型が必須である。

40

## 【0062】

図 7 に示すように、本実施例のスピンの偏極電子発生素子は、GaAs から成る基板 11 上に、厚さ 500nm の InAs から成る中間層 21 が形成され、その上に、厚さ 1  $\mu\text{m}$  のバッファ層

50

3 1 が形成され、そのバッファ層 3 1 の上に歪み超格子層 4 1 が形成され、その歪み超格子層 4 1 の上にキャップ層 5 1 が形成されている。バッファ層 3 1 は、Zn が濃度  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  に添加された厚さ  $1 \mu\text{m}$  の  $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$  で構成されている。また、歪み超格子層 4 1 は、厚さ  $4\text{nm}$  の  $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{As}$  から成る井戸層 4 1 1 と、厚さ  $4\text{nm}$  の  $\text{Ga}_{0.4}\text{In}_{0.6}\text{P}$  から成る障壁層 4 1 2 を 1 組として、1 2 組で構成され、総合厚さは、 $96\text{nm}$  である。また、井戸層 4 1 1 と障壁層 4 1 2 には、共に、Zn が濃度  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  で添加されている。そして、歪み超格子層 4 1 の上には、厚さ  $5\text{nm}$  の Zn が濃度  $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  で添加された GaAs から成るキャップ層 5 1 が形成されている。

#### 【0063】

この構造のスピンの偏極電子発生素子は、 $900\text{-}1000\text{nm}$  の励起光で励起される。この波長範囲の光を透過する基板としては、GaAs 基板が適切である。しかし、この場合も、バッファ層の格子定数は基板の格子定数よりも大きくなる。そのため、本発明による中間層が有効となる。このような汎用な高強度半導体レーザーの利用は、これまでも望まれてきたが、本発明によって、高い偏極度を維持したまま、初めて実現できる構造である。上記組成のバッファ層 3 1 と中間層 2 1 との組み合わせでは、バッファ層の臨界膜厚は、式 (7) に基づき、 $1\text{nm}$  である。しかし、バッファ層 3 1 が歪み超格子の厚さに対して薄すぎると、歪み超格子に掛かるべき歪みがバッファ層に掛かって好ましくないという理由から、バッファ層の厚さは歪み超格子の厚さの  $10$  倍程度が望ましいので、バッファ層の厚さを  $1$  ミクロンとした。この厚さの違いにより、約  $90\%$  の歪みが歪み超格子に掛かり、バッファ層には約  $10\%$  の歪みが掛かることになる。バッファ層の厚さは、素子全体の大きさが大き過ぎない範囲であれば、いくらでも厚くて構わない。

#### 【0064】

本実施例において、中間層の望ましい厚さは、 $250\text{nm}$  以上、 $500\text{nm}$  以下である。

#### 【0065】

中間層の厚さが、 $250\text{nm}$  よりも薄いと、バッファ層の歪みに対する中間層の歪みを  $5\%$  よりも小さくすることができないので、望ましくない。また、中間層の厚さは、基板の裏面から励起光を導入する場合に、光損失を低減するために、なるべく薄い方が望ましい。中間層が  $500\text{nm}$  よりも厚いと、光損失が大きくなり、望ましくない。さらに、望ましくは、 $250\text{nm}$  以上  $400\text{nm}$  以下である。この実施例において、バッファ層は、中間層の格子定数よりも格子定数が小さく、歪み超格子層の少なくとも井戸層の格子定数よりも小さい格子定数を有する結晶であれば、任意組成比の GaInP (2 元を含む) を用いることができ、歪み超格子層も任意組成比の GaInP/GaInP 超格子を用いることができる。また、中間層も、格子定数の上述した関係を満たすのであれば、GaAsP、GaInP、GaInAs (いずれも 2 元系を含む) を用いることができる。基板には、GaAs、その他の基板を用いても良い。

#### 【実施例 3】

#### 【0066】

実施例 3 は、図 8 に示すように、GaN 基板と、GaN/GaN 歪み超格子層を用いたスピンの偏極電子発生素子である。図 8 に示すように、本実施例のスピンの偏極電子発生素子は、GaN から成る基板 1 2 上に、厚さ  $500\text{nm}$  の InN から成る中間層 2 2 が形成され、その上に、厚さ  $1 \mu\text{m}$  のバッファ層 3 2 が形成され、そのバッファ層 3 2 の上に歪み超格子層 4 2 が形成され、その歪み超格子層 4 2 の上にキャップ層 5 2 が形成されている。バッファ層 3 2 は、Mg が濃度  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  に添加された厚さ  $1 \mu\text{m}$  の GaN で構成されている。また、歪み超格子層 4 2 は、厚さ  $4\text{nm}$  の  $\text{Ga}_{0.8}\text{In}_{0.2}\text{N}$  から成る井戸層 4 2 1 と、厚さ  $4\text{nm}$  の GaN から成る障壁層 4 2 2 を 1 組として、1 2 組で構成され、総合厚さは、 $96\text{nm}$  である。また、井戸層 4 2 1 と障壁層 4 2 2 には、共に、Mg が濃度  $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$  で添加されている。そして、歪み超格子層 4 2 の上には、厚さ  $5\text{nm}$  の Mg が濃度  $6 \times 10^{19} \text{cm}^{-3}$  で添加された  $\text{Ga}_{0.7}\text{In}_{0.3}\text{N}$  から成るキャップ層 5 2 が形成されている。

#### 【0067】

一般に、バンドギャップが大きいほど、フォトカソード表面からの電子の取出しが容易になり、量子効率が良くなることが知られている。また、寿命も長くなることが知られて

10

20

30

40

50

いる。そのため、ワイドバンドギャップ材料は期待されている。この材料系で、結晶性などを考慮したときに最も実現可能な超格子層は、GaN/GaInN である。また、基板にはGaNかAlNを用いることになり、やはりこの場合も、バッファ層の格子定数は基板の格子定数よりも大きくなる。そのため、本発明による中間層が有効となる。上記組成のバッファ層31と中間層21との組み合わせでは、バッファ層の臨界膜厚は、式(7)に基づき、1nmである。しかし、バッファ層31が歪み超格子の厚さに対して薄すぎると、歪み超格子に掛かるべき歪みがバッファ層に掛かって好ましくないという理由から、バッファ層の厚さは歪み超格子の厚さの10倍程度が望ましいので、バッファ層の厚さを1ミクロンとした。この厚さの違いにより、約90%の歪みが歪み超格子に掛かり、バッファ層には約10%の歪みが掛かることになる。バッファ層の厚さは、素子全体の大きさが大き過ぎない範囲であれば、いくらでも厚くて構わない。

10

## 【0068】

本実施例において、中間層の望ましい厚さは、85nm以上、500nm以下である。中間層の厚さが、85nmよりも薄いと、バッファ層の歪みに対する中間層の歪みを5%よりも小さくすることができないので、望ましくない。また、中間層の厚さは、中間層で吸収する波長の励起光を基板の裏面から導入する場合に、光損失を低減するために、なるべく薄い方が望ましい。たとえば、波長430nmを用いる場合には、中間層が500nmよりも厚いと、光損失が大きくなり、望ましくない。さらに、望ましくは、85nm以上400nm以下である。この実施例において、バッファ層は、中間層の格子定数よりも格子定数が小さく、歪み超格子層の少なくとも井戸層の格子定数よりも小さい格子定数を有する結晶であれば、任意組成比のAlGaIn, GaInN(いずれも2元系を含む)を用いることができ、歪み超格子層も任意組成比のAlGaIn/AlGaIn超格子、GaInN/AlGaInの超格子を用いることができる。また、中間層も、格子定数の上述した関係を満たすのであれば、GaInN, AlGaIn, AlGaInN(いずれも2元系を含む)を用いることができる。基板には、GaNの他、サファイア、SiCなど、その他の基板を用いても良い。

20

## 【実施例4】

## 【0069】

井戸層組成を $Ga_{0.9}In_{0.1}As$ とした以外は、実施例2と同様とした。実施例2より本実施例のほうが、励起波長900nmにより適切な素子が作成できた。

## 【0070】

以上述べた全ての実施例において、歪み超格子層の組成や組成比は一例であって、他の組成比であっても良いし、組成が上記実施例と異なっても良い。また、全実施例で、中間層は、2元系材料を選択しているが、バッファ層の格子定数よりも、中間層の格子定数の方が大きいものであれば、この中間層も3元、4元系の材料を選択することも可能である。また、中間層の格子定数は、バッファ層の格子定数に対して、0.1%以上(中間層の格子定数 - バッファ層の格子定数) / バッファ層の格子定数)であることが望ましい。さらに、望ましくは、0.5%以上である。

30

## 【0071】

また、基板、中間層、バッファ層の組成及び組成比は、励起光を吸収することのない、組成又は組成比であって、中間層の格子定数が、バッファ層の格子定数よりも大きい材料を使用することが、望ましい。この場合に、スピン偏極電子の外部量子効率を大きく向上させることができる。

40

## 【0072】

製造方法については、MOCVD法など、公知の方法を用いることができ、良く知られているので記載を省略した。

## 【実施例5】

## 【0073】

次に、本発明のスピン偏極電子発生素子を用いたスピン偏極電子発生装置について説明する。図9は、スピン偏極電子線発生装置100の構成を説明する概念図である。このスピン偏極電子線発生装置100は、図示しない排気系に接続されて超高真空に維持される

50

気密な真空容器 112 を備えている。この真空容器 112 は、励起光 L が入射される開口 114 を形成する筒状のポート 116 と、Mott 散乱偏極度測定装置或いは投影型表面電子顕微鏡 (LEEM) などのスピン偏極電子線利用機器に接続されて真空容器 112 内で発生させられたスピン偏極電子線 B をそれらの機器へ導くための筒状の接続用のポート 118 とが設けられている。上記ポート 116 の開口 114 は、石英などの透光板 119 によって気密に閉じられている。

【0074】

上記排気系は、高真空とするために真空容器 112 内を排気するターボポンプとロータリポンプとが直列に接続された粗排気系と、真空容器 112 全体を 200 程度でベーキングした後に排気して真空容器 112 内を  $10^{-10}$  Pa 台の超高真空とするためにイオンポンプと NEG ポンプとを用いる本排気系とから構成される。

10

【0075】

上記真空容器 112 には、図 10 に示す素子保持装置 120 によって上記開口 114 の中心位置となるように保持される偏極電子線発生素子 122 と、図示しない支持装置によって支持されて上記偏極電子線発生素子 122 からスピン偏極電子線 B を引き出すための電界を印加する円筒状のアノード電極 124 と、アノード電極 124 により引き出されたスピン偏極電子線 B を収束させるための円筒状のソレノイドレンズ 126 と、ポート 118 へ向かうように上記スピン偏極電子線 B の進行方向を直角に曲げて偏極電子のスピン軸を進行方向に対してたとえば直角とするための偏向電磁石 (スピンマニピュレータ) 128 とが、一直線上に所定の間隔で配置されている。また、真空容器 112 において、上記

20

【0076】

図 10 に詳しく示すように、偏極電子源素子保持装置 120 は、円筒状の一端部が外向きに突き出してポート 116 に固定されているカソードホルダ 132 と、そのカソードホルダ 132 を介して真空容器 112 のポート 116 に固定されて上記偏極電子線発生素子 122 をその両端面が露出するように周縁部で保持し位置決めする保持ブロック 134 と、前記円筒状のアノード電極 124 と同心となるように上記カソードホルダ 132 に嵌め

30

【0077】

上記保持ブロック 134 には、それにより保持されている偏極電子線発生素子 122 の基板側表面すなわち裏面の中央部を露出させるために貫通して形成された貫通穴 138 と、その貫通穴 138 の外周側に位置して保持ブロック 134 内に嵌めつけられた円筒状のヒータ 140 とが設けられている。上記保持ブロック 134 はたとえば偏極電子線発生素子 122 の構成元素に対して非反応性の金属材料たとえばモリブデン、タンタル等により構成されている。

40

【0078】

また、真空容器 112 のポート 116 内には、偏極電子線発生素子 122 の非基板側表面すなわち電子放出側表面を負の電子親和性 (NEA : Negative Electron Affinity) 表面とするために、アノード電極 124 およびカソード電極 136 付近でセシウム Cs および酸素 O を放出するセシウム放出装置 144 および図示はしていないが酸素 O を導入する装

50

置がそれぞれ設けられている。セシウム放出装置 144 は、たとえば、 $\text{CsCrO}_4$  および還元剤がゲッター剤とともにニクロム製スリーブ内に收容されることにより構成され、そのヒータの通电加熱により $\text{CsCrO}_4$  を還元させることでセシウムCsを放出する。偏極電子線発生素子 122 の清浄にされた表面層の表面にセシウムCsおよび酸素Oが付加されることによりおよそ数原子層の厚さを持つ電気2重層ポテンシャルが形成されて真空順位が下げられる。すなわち、真空中へ伝導帯にある偏極電子が放出されるための電子親和性が負とされて、スピン偏極電子線Bを得るための量子効率が高められる。なお、酸素Oを導入する代わりに、三フッ化窒素 $\text{NF}_3$  などのフッ化窒素を導入する装置を設けて、前記電子放出側表面にセシウムCsおよびフッ化窒素を付加しても、同様の効果が得られる。

#### 【0079】

前記励起光Lは、励起光入射装置146により発生させられて偏極電子線発生素子122の基板側表面すなわち裏面に入射させられるようになっている。励起光入射装置146は、たとえばレーザ光源148と、そのレーザ光源148から出力されたレーザ光を直線偏光から円偏光に変換して励起光Lとするための直線偏光子150および $\lambda/4$ 波長板152と、その励起光Lを収束させるためにカソードホルダ132から透光板119側へ突設されたレンズ支持部156により前記アノード電極124と同心に支持されることにより真空容器112内に配置されたレンズ154とを備え、収束レンズ154は、ポート116の開口114を塞ぐように設けられた透光板119および保持ブロック134に形成された貫通穴138を通して、励起光Lを小さなスポット径で偏極電子線発生素子122の基板側から入射させ、超格子半導体光電層166に収束させる。収束レンズ154と偏極電子線発生素子122との間の距離すなわち焦点距離fは、上記透光板119の厚み寸法と保持ブロック134の厚み寸法とを加えた値よりも大きい。アノード電極124、ソレノイドレンズ126、および偏向電磁石(スピンマニピュレータ)128を通して偏極電子線発生素子122の非基板側表面に収束する場合に比較して、大幅に短縮されている。この装置例よりさらに収束レンズ154と偏極電子線発生素子122の距離を短くすることは可能であり、たとえば負の電子親和性表面処理(NEA活性化)は別の真空容器で行った偏極電子線発生素子122をロードロック機構によりカソード電極136にセットする方式を採用すると円筒状のヒータ140は不要となり、収束レンズ154と偏極電子線発生素子122との間の距離を数mm以内にする事ができる。

#### 【0080】

なお、励起光入射装置146の収束レンズ154は、真空容器112の外部に設けても良い。また、ポート118に、Mott散乱偏極度測定装置或いは投影型表面電子顕微鏡(LEEM)などを接続することにより、本スピン偏極電子発生装置をMott散乱偏極度測定装置や、投影型表面電子顕微鏡などのスピン偏極電子線応用装置とすることができる。

#### 【0081】

本実施例のスピン偏極電子発生装置は、スピン偏極電子発生素子と、該スピン偏極電子発生素子の半導体光電層に励起光を入射させる励起光入射装置とを含み、該半導体光電層に励起光が収束されることによって該半導体光電層からスピン方向が偏在しているスピン偏極電子を発生させ、励起光入射装置は、スピン偏極電子発生素子の基板側から半導体光電層に励起光を収束させる構成である。

#### 【産業上の利用可能性】

#### 【0082】

本発明は、スピントロニクスや磁気記録媒体材料における磁区構造を観察する電子顕微鏡の偏極電子源に用いることができる。

#### 【符号の説明】

#### 【0083】

- 1, 10, 11, 12 ... 基板
- 20, 21, 22 ... 中間層
- 3, 30, 31, 32 ... バッファ層
- 4, 40, 41, 42 ... 歪み超格子層

10

20

30

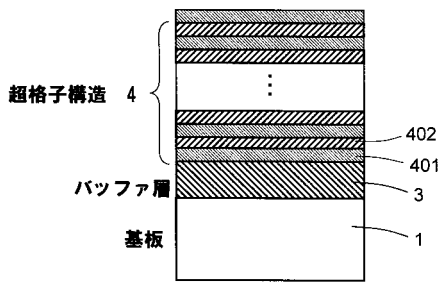
40

50

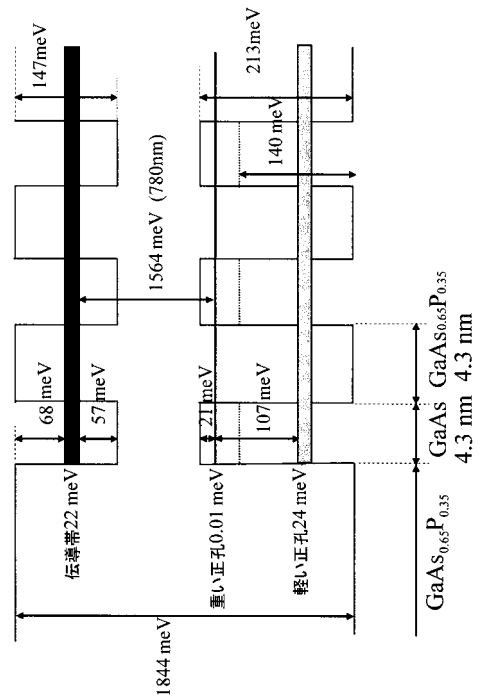


50, 51, 52...キャップ層

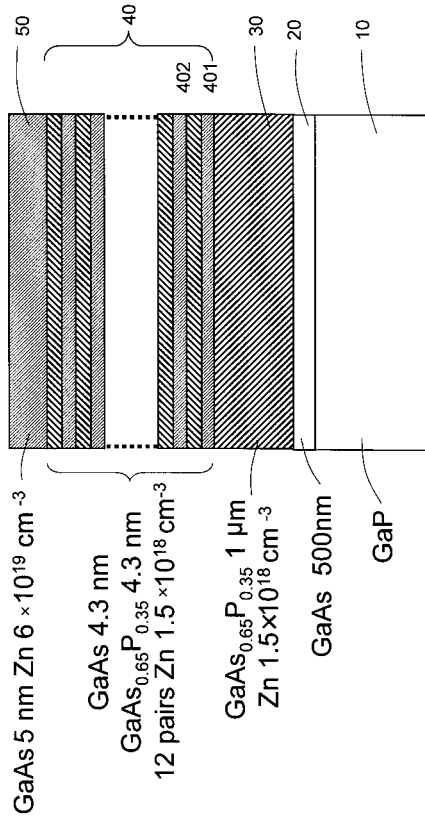
【図1】



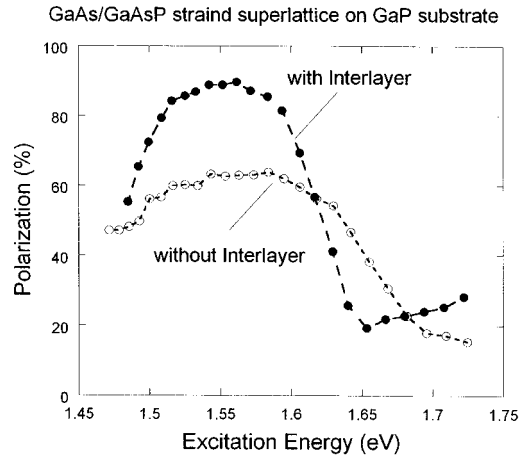
【図2】



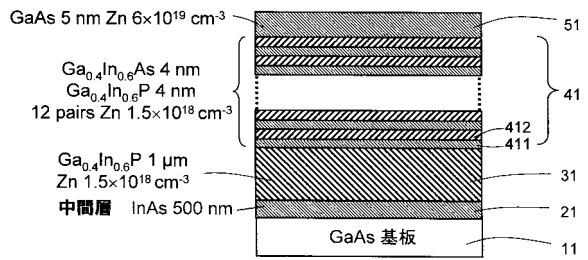
【 図 4 】



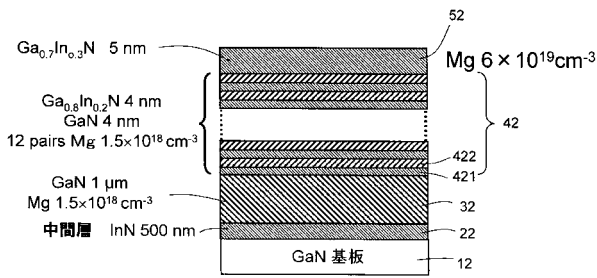
【 図 6 】



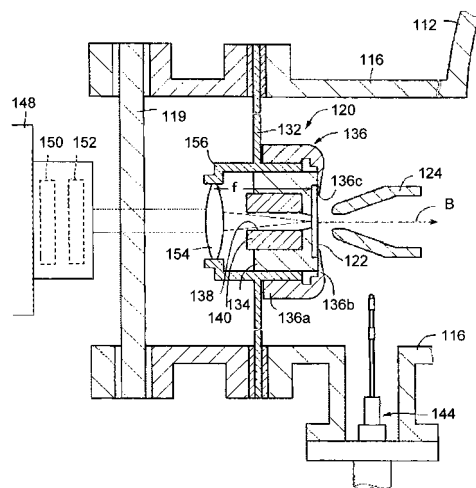
【 図 7 】



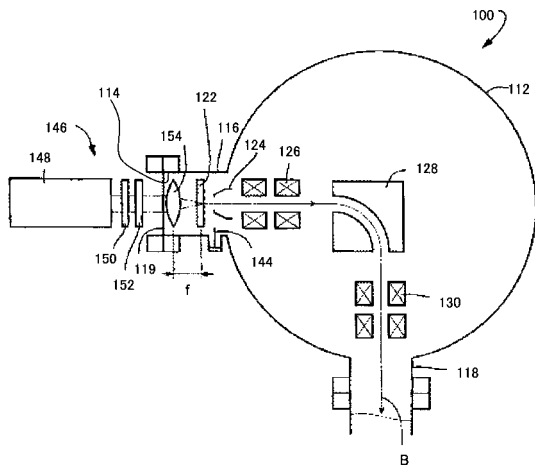
【 図 8 】



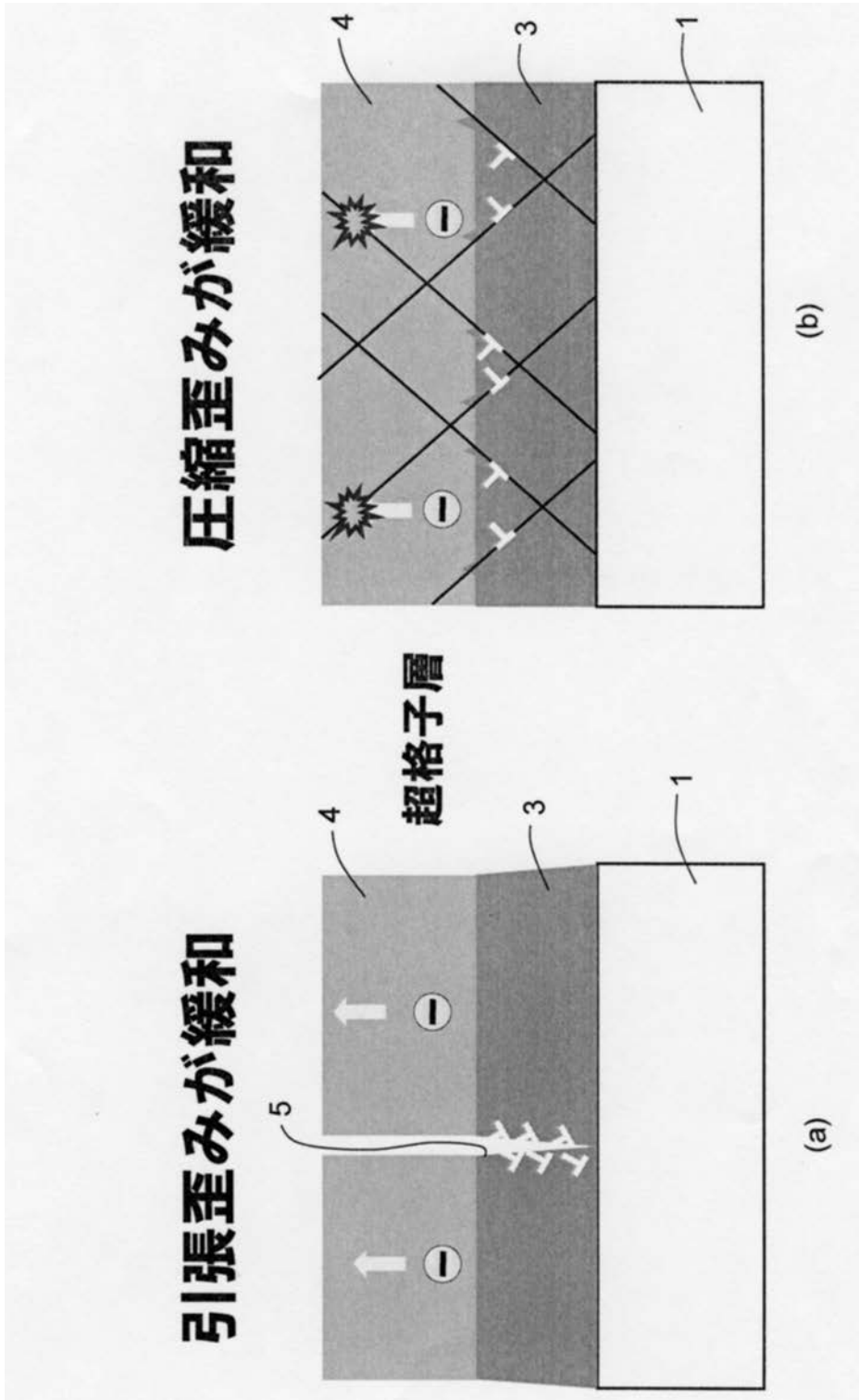
【 図 10 】



【 図 9 】



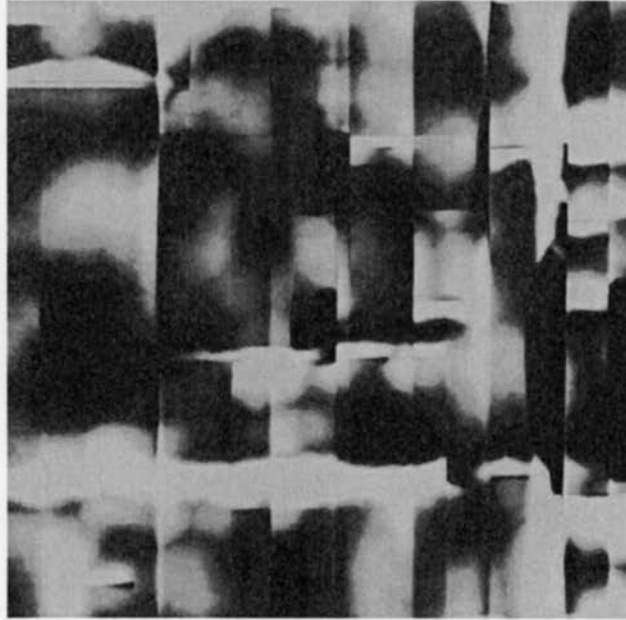
【図3】



【図5】

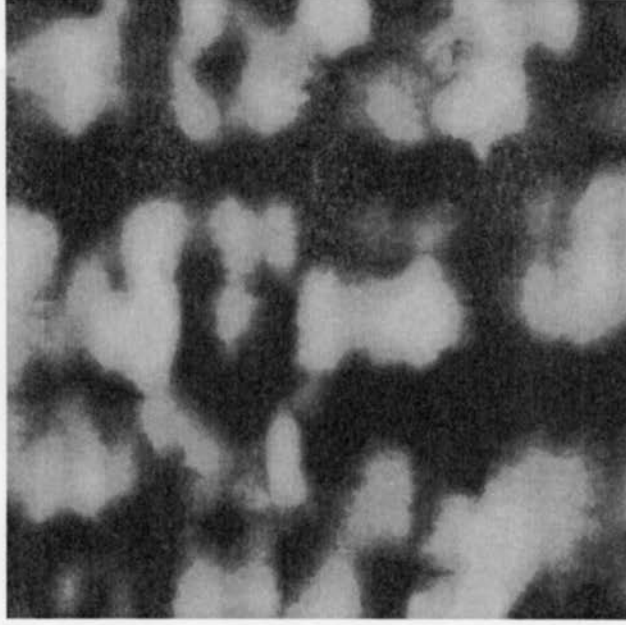
AFM像 (5  $\mu\text{m}$  x 5  $\mu\text{m}$ )

中間層あり



(a)

中間層なし



(b)

## フロントページの続き

- (72)発明者 金 秀光  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内
- (72)発明者 竹田 美和  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内
- (72)発明者 中西 彊  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内
- (72)発明者 山本 尚人  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内
- (72)発明者 坂 貴  
愛知県名古屋市南区滝春町10番地3 大同工業大学内
- (72)発明者 加藤 俊宏  
愛知県名古屋市南区大同町二丁目30番地 大同特殊鋼株式会社内

審査官 桐畑 幸 廣

- (56)参考文献 特開2000-090817(JP,A)  
特開2007-258119(JP,A)

- (58)調査した分野(Int.Cl., DB名)  
H01J 1/34, 37/073  
JSTPlus(JDreamIII)