

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6001319号  
(P6001319)

(45) 発行日 平成28年10月5日(2016.10.5)

(24) 登録日 平成28年9月9日(2016.9.9)

(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 11 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2012-108186 (P2012-108186)	(73) 特許権者	503360115
(22) 出願日	平成24年5月10日 (2012.5.10)		国立研究開発法人科学技術振興機構
(65) 公開番号	特開2013-235750 (P2013-235750A)		埼玉県川口市本町四丁目1番8号
(43) 公開日	平成25年11月21日 (2013.11.21)	(74) 代理人	100087723
審査請求日	平成27年4月22日 (2015.4.22)		弁理士 藤谷 修
		(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	淵 真悟
			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及びその製造方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

基板と、前記基板上に形成されたバッファ層と、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、

前記バッファ層は、格子定数が前記基板の格子定数よりも大きく、面方向に圧縮歪みが発生する格子定数を有し、

前記バッファ層は、前記バッファ層の組成比に対する面状成長における臨界膜厚の変化特性と、前記バッファ層の組成比に対する、バッファ層が2次元成長から3次元成長に転位する膜厚である転位膜厚の変化特性とにおいて、前記転位膜厚が前記臨界膜厚よりも小さくなる範囲の組成比であって、結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される組成比の化合物半導体としたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子。

10

【請求項2】

基板と、前記基板上に形成されたバッファ層と、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、

前記基板を GaP とし、

前記バッファ層を  $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$  とし、

前記バッファ層の組成比  $x$ 、 $y$  を、前記バッファ層の格子定数が、前記 GaP の格子定数よりも大きく、前記バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、前記バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値としたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子。

20

## 【請求項 3】

前記基板を GaP とし、

前記バッファ層を  $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$  とし、

前記バッファ層の組成比  $x$ 、 $y$  を、前記バッファ層の格子定数が、前記 GaP の格子定数よりも大きく、前記バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、前記バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値としたことを特徴とする請求項 1 に記載のスピニ偏極電子発生素子。

## 【請求項 4】

前記バッファ層は、 $GaAs_{1-x}P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$  から成ることを特徴とする請求項 2 又は請求項 3 に記載のスピニ偏極電子発生素子。

10

## 【請求項 5】

前記バッファ層は、 $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$ 、 $0 < 1 - y < 1$  から成ることを特徴とする請求項 2 又は請求項 3 に記載のスピニ偏極電子発生素子。

## 【請求項 6】

前記歪み超格子層は、GaAs と GaAsP とを交互に積層した層であることを特徴とする請求項 1 乃至請求項 5 の何れか 1 項に記載のスピニ偏極電子発生素子。

## 【請求項 7】

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ニ偏極電子発生素子の製造方法において、

20

前記基板上に、成長初期において、格子定数が前記基板の格子定数よりも大きく、前記基板から面方向に圧縮歪みを受ける化合物半導体から成る分散した多数の島状の結晶核を成長させ、

その後、前記化合物半導体を前記基板の面に平行な方向に成長させることにより、前記バッファ層を前記基板上に成長させ、

前記バッファ層上に、前記歪み超格子層を成長させることを特徴とするスピニ偏極電子発生素子の製造方法。

## 【請求項 8】

前記基板を GaP とし、

前記バッファ層を  $Al_{1-y} Ga_y As_{1-x} P_x$  とし、

前記バッファ層の組成比  $x$ 、 $y$  を、前記バッファ層の格子定数が、前記 GaP の格子定数よりも大きく、前記バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、前記バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値としたことを特徴とする請求項 7 に記載のスピニ偏極電子発生素子の製造方法。

30

## 【請求項 9】

前記バッファ層は、 $GaAs_{1-x}P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$  から成ることを特徴とする請求項 8 に記載のスピニ偏極電子発生素子の製造方法。

## 【請求項 10】

前記バッファ層は、 $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$ 、 $0 < 1 - y < 1$  から成ることを特徴とする請求項 8 に記載のスピニ偏極電子発生素子の製造方法。

40

## 【請求項 11】

前記歪み超格子層は、GaAs と GaAsP とを交互に積層した層であることを特徴とする請求項 7 乃至請求項 10 の何れか 1 項に記載のスピニ偏極電子発生素子。

## 【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ニ偏極電子発生素子及びその製造方法に関する。特に、歪み超格子層の結晶性を改善し、スピニ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】

50

## 【 0 0 0 2 】

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。

## 【 0 0 0 3 】

G a A s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。

## 【 0 0 0 4 】

下記特許文献1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。

## 【 0 0 0 5 】

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1ではG a A s基板上に形成したG a A s - G a A s P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。

## 【 0 0 0 6 】

上記特許文献1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%のスピン偏極度を得ることができる。

## 【 0 0 0 7 】

しかしながら、実際には偏極度は100%に達しない。結晶中に多くの転位が導入されるからである。転位によりスピン反転散乱が生じるため偏極度は低下し、転位は生成された電子を捕獲するため量子効率も低下する。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決定され、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が選択される。また、スピン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な、バンドギャップの広い材料を選択する必要がある。この結果、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。

## 【 0 0 0 8 】

特許文献2は、スピン偏極度と外部量子効率を高くするために、基板、バッファ層、歪み超格子層の材料選択の自由度を持たせるために、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ている。この中間層により、バッファ層には引張歪みが印加される。バッファ層は、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を発生し、平面において

10

20

30

40

50

、クラックによりモザイク状となる。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。このようにして、引例 2 は、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ている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0009】

【特許文献 1】特開 2000 - 90817

【特許文献 2】特開 2009 - 266809

10

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0010】

しかしながら、引例 2 の技術においては、中間層を 1 層形成する必要があり、製造が複雑になると共に、中間層での光吸収による損失があるため効率が低下するという問題がある。また、引例 2 ではクラックが発生するために、そのクラック密度に応じて、クラックでの偏極電子の散乱により、外部量子効率が低下するという問題もある。

【0011】

そこで、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、構造を簡単にして、さらに、スピン偏極度及び外部量子効率を向上させることである。

20

【課題を解決するための手段】

【0012】

第 1 の発明は、基板と、基板上に形成されたバッファ層と、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、バッファ層は、格子定数が基板の格子定数よりも大きく、面方向に圧縮歪みが発生する格子定数を有し、バッファ層は、バッファ層の組成比に対する面状成長における臨界膜厚の変化特性と、バッファ層の組成比に対する、バッファ層が 2 次元成長から 3 次元成長に転位する膜厚である転位膜厚の変化特性とにおいて、転位膜厚が臨界膜厚よりも小さくなる範囲の組成比であって、結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される組成比の化合物半導体としたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子である。

30

また、第 2 の発明は、基板と、基板上に形成されたバッファ層と、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、基板を GaP とし、バッファ層を  $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$  とし、バッファ層の組成比  $x$ 、 $y$  を、バッファ層の格子定数が、GaP の格子定数よりも大きく、バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値としたことを特徴とするスピン偏極電子発生素子である。

【0013】

本第 1、第 2 発明は、バッファ層と基板との格子定数の差により、基板からバッファ層に大きな圧縮応力が印加されて、バッファ層の結晶成長の初期において、分散された島状の結晶核が基板上に形成されるように、バッファ層の化合物半導体の組成比を決定した  
ことが特徴である。島状の結晶成長核が形成された後は、隣接する島状の結晶核が合体して均一な厚さの平面状のバッファ層となる。これにより、バッファ層上に形成される歪み超格子の厚さが均一様となり、スピン偏極度及び外部量子効率が向上する。

40

【0014】

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の製造方法において、基板上に、成長初期において、格子定数が基板の格子定数よりも大きく、基板から面方向に圧縮歪みを受ける化合物半導体から成る分散した多数の島状の結晶核を成長させ、その後、化合物半導体を基板の面に平行な方向に成長させることにより、バッファ層を基板上に成長させ、バッファ層上に、歪み超格子層を成長させることを特徴とするスピン偏極電子発生素子の製造方法である

50

## 【0015】

上記の全発明（以下、単に、上記発明という）において、基板をGaPとし、バッファ層を $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$ とし、バッファ層の組成比 $x$ 、 $y$ を、バッファ層の格子定数が、GaPの格子定数よりも大きく、バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値とすることが望ましい。基板をGaPとすることで、基板の裏面から励起光を入射させることができる。

## 【0016】

また、上記発明において、バッファ層は、 $GaAs_{1-x}P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$ とすることが望ましい。この組成及び組成比の化合物半導体をバッファ層とすることで、成長初期において、基板面上に多数の分散した島状の結晶核を形成することができる。また、 $0.05 < x < 0.3$ 、 $0.1 < x < 0.2$ も望ましい範囲である。バッファ層での励起光の吸収を抑制するには、バンドギャップを大きくするために、 $x$ は、上記の範囲において、大きい程望ましい。

10

## 【0017】

また、上記発明において、バッファ層は、 $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$ 、ただし、 $0 < x < 0.3$ 、 $0.1 < y < 1$ とすることが望ましい。この場合も上記と同様に、バッファ層の成長初期において、基板面上に多数の分散した島状の結晶核を形成することができる。また、上記と同様に、この場合も、 $0.05 < x < 0.3$ 、 $0.1 < x < 0.2$ も望ましい範囲である。 $0.1 < y < 1$ は、バンドギャップを大きくして、基板の裏面から励起光を入射させた場合に、バッファ層を通過してバッファ層では励起光の吸収が起こらないようにするのに最適な範囲である。この場合には、組成比 $x$ 、 $y$ とにより島状の結晶核の形成と、バッファ層のバンドギャップをを独立に制御できる。

20

## 【0018】

また、上記発明において、歪み超格子層は、GaAsとGaAsPとを交互に積層した層であることが望ましい。井戸層のGaAsに、バッファ層から圧縮応力を印加することができ、重い正孔バンドを正孔エネルギーが低い方向に、軽い正孔バンドを正孔エネルギーが高い方向に分離することができる。この結果、スピン偏極度を大きくすることができる。

30

## 【発明の効果】

## 【0019】

本発明は、バッファ層は、格子定数が前記基板の格子定数よりも大きく、面方向に圧縮歪みが発生し、結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される組成比の化合物半導体とした。この結果、バッファ層と、その上の歪み超格子層とを、共に、面方向において、均一様な厚さとすることができる。したがって、スピン偏極度と外部量子効率とを向上させることができる。また、中間層を用いていないので、スピン偏極電子発生素子の層数が少なくなり構造が簡単となると共に、製造が容易となる。また、クラックで、励起された偏極電子が消滅することが低減されるので、外部量子効率を向上させることができる。

40

## 【0020】

また、基板をGaPとし、バッファ層を $Al_y Ga_{1-y} As_{1-x} P_x$ とし、バッファ層の組成比 $x$ 、 $y$ を、バッファ層の格子定数が、GaPの格子定数よりも大きく、バッファ層に面方向に圧縮歪みが発生し、バッファ層の結晶成長の初期において、分離した島状の結晶核が形成される範囲の値とすることにより、基板の裏面から励起光を入射させることができ、バッファ層と、その上の歪み超格子層とを、共に、面方向において、均一様な厚さとすることができる。したがって、スピン偏極度と外部量子効率とを向上させることができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0021】

50

【図1】本発明の具体的な実施例1に係るGaP基板とGaAs<sub>0.7</sub>P<sub>0.3</sub>バッファ層とGaAs/GaAsP歪み超格子層とを用いたスピン偏極電子発生素子の構造図。

【図2】実施例1のスピン偏極電子発生素子のバッファ層のP組成比と臨界膜厚及び転移膜厚との関係を示した特性図。

【図3】比較例1に係るGaAs基板とGaAs<sub>0.65</sub>P<sub>0.35</sub>バッファ層とGaAs/GaAsP歪み超格子層とを用いたスピン偏極電子発生素子の励起光波長とスピン偏極度との関係を示した特性図。

【図4】比較例2に係るGaP基板とGaAs<sub>0.65</sub>P<sub>0.35</sub>バッファ層とGaAs/GaAsP歪み超格子層とを用いたスピン偏極電子発生素子の励起光波長とスピン偏極度との関係を示した特性図。

10

【図5】比較例2に係るスピン偏極電子発生素子の断面TEM像。

【図6】比較例2に係るスピン偏極電子発生素子のバッファ層の各厚さにおける表面AFMと断面模式図。

【図7】実施例1に係るスピン偏極電子発生素子のバッファ層の各厚さにおける表面AFMと断面模式図。

【図8】本発明の具体的な実施例2に係るGaP基板とAl<sub>0.1</sub>Ga<sub>0.9</sub>As<sub>0.8</sub>P<sub>0.2</sub>バッファ層とGaAs/GaAsP歪み超格子層とを用いたスピン偏極電子発生素子の構造図。

【図9】実施例2に係るスピン偏極電子発生素子のバッファ層の表面AFM像。

【図10】実施例2に係るスピン偏極電子発生素子の基板の裏面から励起光を入射させてスピン偏極電子を放出する様子を示した構成図。

20

【図11】実施例2に係るスピン偏極電子発生素子の励起光波長とスピン偏極度及び外部量子効率との関係を示した特性図。

【発明を実施するための形態】

【0022】

以下、本発明を具体的な実施例に基づいて説明する。本発明は、下記の実施例に限定されるものではない。

【実施例1】

【0023】

実施例1に係るスピン偏極電子発生素子1の構成を図1に示す。図1に示すように、スピン偏極電子発生素子1は、p型GaPから成る基板10と、その基板10に接合して、その基板10上に成長されたGaAs<sub>0.7</sub>P<sub>0.3</sub>から成るバッファ層20と、そのバッファ層20上に成長されたGaAsP/GaAsの12周期から成る歪み超格子層30と、歪み超格子層30上に成長されたGaAsから成るキャップ層40とを有している。バッファ層20は、厚さ2μmであり、Znが濃度 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ に添加されている。歪み超格子層30は、厚さ4nmのGaAs<sub>0.7</sub>P<sub>0.3</sub>から成る障壁層31と、厚さ4nmのGaAsから成る井戸層32を一組として、12組の積層である。歪み超格子層30の総合厚さは、96nmである。井戸層32と障壁層31には、共に、Znが濃度 $1.5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で添加されている。キャップ層40は、厚さ5nmであり、Znが濃度 $6 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ で添加されている。キャップ層40の表面は、Cs:Oの蒸着により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。基板を含めて各半導体をp型半導体としているのは、励起された電子を少数キャリアとするためである。

30

【0024】

比較例1として、基板10をGaAsとして、バッファ層20を厚さ2μmのGaAs<sub>0.65</sub>P<sub>0.35</sub>とし、歪み超格子層30、キャップ層40は、実施例1と同一としたスピン偏極電子発生素子を製造した。この素子は、図3に示すような励起光波長-スピン偏極度特性を有し、波長790nmの励起光に対して、スピン偏極度は92%であった。この比較例1の素子のバッファ層の格子定数は、基板の格子定数よりも小さく、バッファ層には引っ張り応力が基板から印加されている。

40

50

## 【 0 0 2 5 】

一方、比較例 2 として、比較例 1 のスピン偏極電子発生素子に対して、基板 1 0 だけを GaP として、他の層構成は、比較例 1 と同一の素子を製造した。この比較例 2 の素子は、図 4 に示すような励起光波長 - スピン偏極度特性を有し、波長 7 9 0 n m の励起光に対して、スピン偏極度は 6 4 % に過ぎなかった。この比較例 2 の素子のバッファ層の格子定数は、基板の格子定数よりも大きく、バッファ層には平面方向に圧縮応力が基板から印加されている。

## 【 0 0 2 6 】

そこで、基板を GaAs から GaP に変更しただけで、スピン偏極度が 9 2 % から 6 4 % に低下した理由について検討した。基板を GaP にした比較例 2 の素子の断面 TEM 像を図 5 に示す。GaAs / GaAsP の歪み超格子層の厚さは面方向に均一ではなく、断面において湾曲し、最上面は、凹凸が形成されている。このように、歪み超格子層は膜厚変調を受けていることが分かる。この構造により、歪み超格子層の井戸層の圧縮歪みが部分的に小さくなる結果、重い正孔バンドと軽い正孔バンドの分離不足が発生し、スピン偏極度が低下したものと思われる。

## 【 0 0 2 7 】

次に、歪み超格子が膜厚変調を受ける理由について検討した。図 6 は、基板が GaP、バッファ層が  $\text{GaAs}_{0.65}\text{P}_{0.35}$  の場合の比較例 2 に係る素子のバッファ層の各厚さにおける表面 AFM 像を測定した結果である。バッファ層は、臨界膜厚の 3 倍の厚さになると、5 n m 程度の表面粗さ（凹部と凸部との高低差）で、基板面上に一樣に成長しているが、バッファ層には多数の滑り転位が発生している。バッファ層の厚さが臨界膜厚の 1 2 倍となると、表面粗さは 1 0 n m 程度に大きくなり、バッファ層の滑り転位密度は大きく増加している。さらに、バッファ層が厚くなり臨界膜厚の 6 0 倍の厚さとなると、表面粗さは 2 0 n m に拡大し、転位間の結晶が盛り上がっていることが理解される。

## 【 0 0 2 8 】

この原因は、バッファ層には圧縮歪みが印加されているが、バッファ層の  $\text{GaAs}_{0.65}\text{P}_{0.35}$  と基板の GaP との格子定数の差がそれほど大きくないために、結晶成長の初期において、基板上に、一樣、面状に、 $\text{GaAs}_{0.65}\text{P}_{0.35}$  が成長するためであることが分かった。AFM 像からは、 $\text{GaAs}_{0.65}\text{P}_{0.35}$  が基板上に、膜厚が臨界膜厚の 1 2 倍以下において、ほぼ、一樣に、基板上に成長していることが理解される。基板の面上に一樣な厚さで  $\text{GaAs}_{0.65}\text{P}_{0.35}$  が成長する結果として、格子定数差に基づく圧縮応力が結晶内部に直接的に発生するために、図 6 に示すように、膜厚が増加するに連れて、滑り転位が発生し、滑り転位密度が増加し、結晶の盛り上がりが発生する。

## 【 0 0 2 9 】

次に、本実施例 1 の場合、すなわち、基板を GaP、バッファ層を  $\text{GaAs}_{0.7}\text{P}_{0.3}$  としたスピン偏極電子発生素子のバッファ層の厚さが増加する場合の各厚さにおける表面 AFM 像を測定した。その表面 AFM 像を図 7 に示す。図 7 から明らかなように、バッファ層は、臨界膜厚の 2 倍の厚さになると、高さが 5 0 n m 程度の多数の島状に分散した結晶核が形成されている。この時、滑り転位は見られない。バッファ層の厚さが臨界膜厚の 1 2 倍となると、表面粗さは 1 5 n m 程度に低下し、隣接する結晶核は合体し始めているが、滑り転位は見られない。さらに、バッファ層が厚くなり臨界膜厚の 1 8 倍の厚さとなると、表面粗さは 1 0 n m にさらに低下し、基板の面上にバッファ層が一樣な厚さで形成されていることが分かる。バッファ層が一樣な厚さになっても、滑り転位は見られない。このようにして、バッファ層の厚さが増加するに連れて、バッファ層は一樣な厚さの転位のない面状の層に形成されていることが分かる。したがって、この滑り転位密度が小さく、一樣な厚さ（凹凸のない）のバッファ層に成長させた歪み超格子層も、面方向において均一な厚さとなる。

## 【 0 0 3 0 】

この現象は、以下のように説明することができる。バッファ層の  $\text{GaAs}_{0.7}\text{P}_{0.3}$  と基板の GaP との格子定数の差が大きいため、バッファ層の成長初期においては、基板

10

20

30

40

50

の面上に、 $GaAs_{0.7}P_{0.3}$  が一様な厚さに形成されずに、多くの分散した島状に形成され、しばらくの間、この島状の結晶核が相互に独立した状態で3次元成長して大きくなる。格子定数差が大きく最も圧縮歪みを受け易い結晶成長の初期段階においては、結晶核が島状に形成される結果、圧縮歪みは、各結晶核の内部だけに独立して発生し、隣接する結晶核には、圧縮応力の干渉がない。結晶核間では、圧縮応力が緩和された状態で、各結晶核が3次元成長しつつ、結晶核が相当な厚さとなり基板からの圧縮歪みの影響が少なくなった状態で、横方向に各結晶核が合体して、結晶が成長して行く。この結果、成長する結晶には、圧縮応力の累積がなく、滑り転位が発生しない。

#### 【0031】

図2は、バッファ層  $GaAs_{1-x}P_x$  のP組成比  $x$  と、面状に一様な厚さで成長させたバッファ層の臨界膜厚との関係、及び、P組成比  $x$  と、バッファ層の転移膜厚との関係を示している。転移膜厚が臨界膜厚よりも薄い範囲において、結晶は、成長初期において、分散した島状に成長する。したがって、図2から、臨界膜厚の曲線と転移膜厚の曲線との交点は、Pの組成比が0.4であるので、 $GaAs_{1-x}P_x$  を成長初期において、分散した島状に成長させるためには、 $0 < x < 0.3$  とすることが望ましい。さらに、島状の結晶成長を確実にするには、 $0 < x < 0.2$  とするのが望ましい。なお、転移膜厚は、基板上に面状に一様に成長(2次元成長)する状態から分散した島状の成長(3次元成長)する状態に移る厚さを言う。バッファ層は、歪みが緩和されない臨界膜厚よりも薄い状態において、分散した島状に成長することが必要となる。したがって、図2において、転移膜厚が、臨界膜厚よりも薄くなる範囲のP組成比  $x$  が望ましい範囲となる。

#### 【実施例2】

#### 【0032】

図8は、実施例2に係るスピン偏極電子発生素子2の断面構造を示す断面図である。実施例1に係る素子1と同一機能を有する層には、同一符号が付されている。実施例1の素子1と異なるところは、バッファ層20を、 $Al_{0.1}Ga_{0.9}As_{0.8}P_{0.2}$  とし、超格子層30を厚さ4nmの  $GaAs_{0.6}P_{0.4}$  から成る障壁層31と、厚さ4nmの  $GaAs$  から成る井戸層32を一組とする超格子としたことである。その他の構成は、実施例1と同一である。この素子2のバッファ層20の厚さが  $0.5 \mu m$  の時のバッファ層20の表面のAFM像を図9に示す。図7と比較すれば明らかのように、結晶核が合体して、面状のバッファ層が得られていることが分かる。

#### 【0033】

この素子2に、図10に示すように、励起光を収束レンズ50により集光して、基板10の裏面から励起光を入射させて、キャップ層40の表面から出力される偏極電子の偏極度を測定した。その結果を図11に示す。波長780nmにおいて、92%の励起光が得られていることが分かる。これは、基板を  $GaP$ 、バッファ層を  $GaAs_{0.65}P_{0.35}$ 、歪み超格子を  $GaAs/GaAs_{0.7}P_{0.3}$  とした素子のスピン偏極度64%の1.4倍である。

#### 【0034】

バッファ層の  $Al_yGa_{1-y}As_{1-x}P_x$  において、 $0 < x < 0.3$ 、 $0 < y < 1$  である。P組成比  $x$  を  $0 < x < 0.3$  とすることで、バッファ層の成長初期において、基板面上に多数の分散した島状の結晶核を形成することができる。P組成比  $x$  が小さい程、島状の結晶が成長し易くなるが、バッファ層のバッドギャップが小さくなる。一方、Al組成比  $y$  を大きくすれば、島状の結晶成長に影響を与えることなく、バッファ層のバンドギャップを大きくすることができる。よって、バッファ層の結晶成長の初期において分散した島状の結晶核を形成できる状態を維持して、励起光がバッファ層で吸収されることを防止できる。励起光のバッファ層での吸収を防止するには、Al組成比  $y$  を  $0 < y < 1$  とする。このことにより、励起光がバッファ層で吸収されることを防止すること、すなわち、励起光に対してバッファ層を透明として、スピン偏極電子の生成効率を向上させることができる。また、バッファ層の結晶性を高くするという観点から、Al組成比  $y$  を  $0 < y < 0.5$  とすることが望ましい。また、 $0 < x < 0.2$  とすると、結晶成長の初



期において、より確実に分散した島状の結晶核とすることができる。また、 $0.05 \times 0.3$ 、 $0.1 \times 0.2$ とすることも望ましい範囲である。

【0035】

上記実施例1、2において、バッファ層20の厚さは $2 \mu\text{m}$ としたが、厚さの望ましい範囲は、 $0.5 \mu\text{m} \sim 3 \mu\text{m}$ である。バッファ層20の厚さは、歪み超格子40の少なくとも井戸層32に圧縮歪みを付与できる厚さであれば良い。バッファ層20の厚さは、歪み超格子40に圧縮歪みを印加できるには、歪み超格子40の厚さの10倍程度であれば良い。しかし、励起光のバッファ層での吸収を抑制するには、薄い方が望ましい。

【0036】

バッファ層は、基板から圧縮応力を受ける必要があることから、基板の格子定数よりも大きく、歪み超格子層の少なくとも井戸層に圧縮応力を付与する必要があることから、井戸層の格子定数よりも小さくする必要がある。そして、バッファ層の組成や組成比は、基板の組成及び組成比、井戸層の組成及び組成比に対して、上記の条件を満たし、且つ、基板上において、結晶成長の初期において、多数の分散した島状の結晶核が成長する組成及び組成比とする必要がある。この条件を満たす限りにおいて、バッファ層は、GaPの基板に対して、GaPよりも格子定数が大きく、結晶成長の初期において、分散した島状の結晶核が成長する程度に、基板の格子定数に対して格子定数差を有した組成比の、GaInP、GaInAs、AlGaInAsや、一般式AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物半導体を用いることができる。また、歪み超格子層の少なくとも井戸層がバッファ層から圧縮歪みを受けるように、井戸層の格子定数がバッファ層の格子定数よりも大きいように、井戸層、障壁層は、GaInP、GaInAs、AlGaInAsや、一般式AlGaInAsPで表される2元、3元、4元、5元の化合物半導体の組み合わせを用いることができる。

【0037】

また、スピン偏極電子発生素子に、III族窒化物半導体を用いた場合には、次の構成を採用することができる。基板にGaNを用いた場合には、バッファ層には、GaNよりも格子定数が大きい、GaInN、AlGaInNを用いることができる。歪み超格子層には、バッファ層より格子定数が大きいGaInNから成る井戸層と、GaN又はAlGaNから成る障壁層から成る超格子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。

【産業上の利用可能性】

【0038】

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】

【0039】

- 10...基板
- 20...バッファ層
- 30...歪み超格子層
- 31...障壁層
- 32...井戸層
- 40...キャップ層

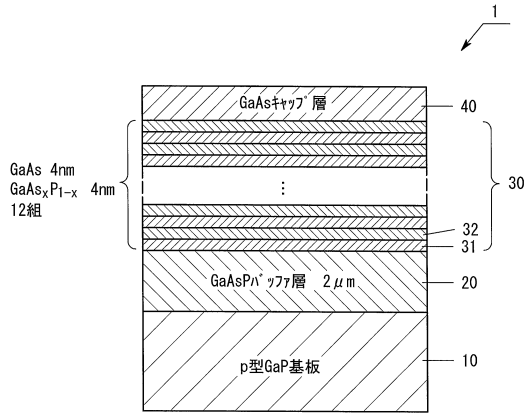
10

20

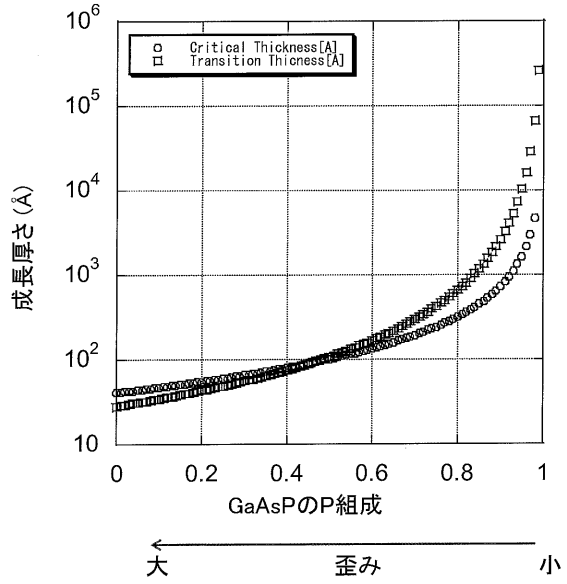
30

40

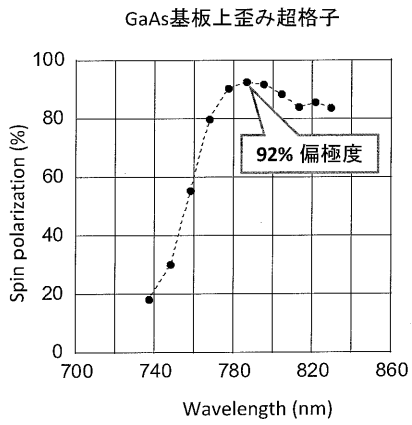
【図1】



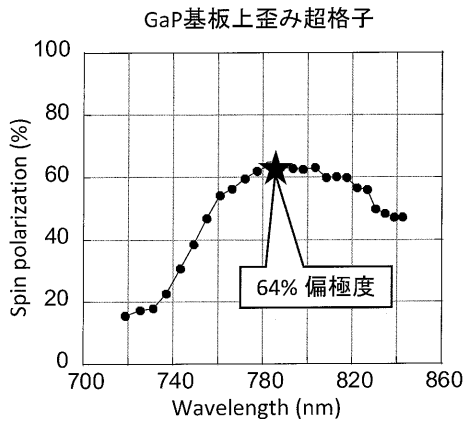
【図2】



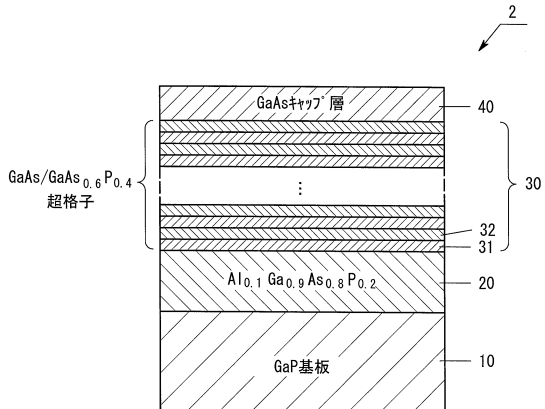
【図3】



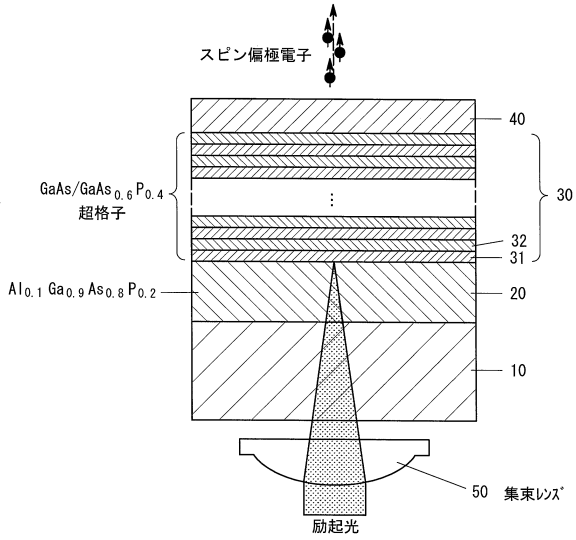
【図4】



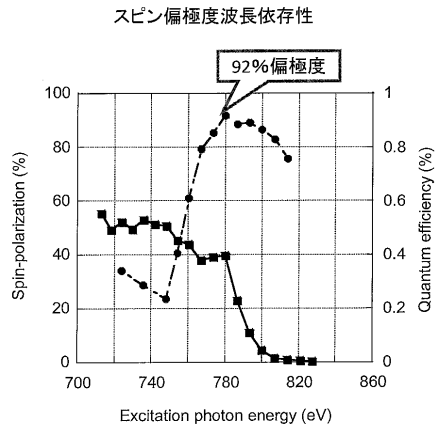
【図8】



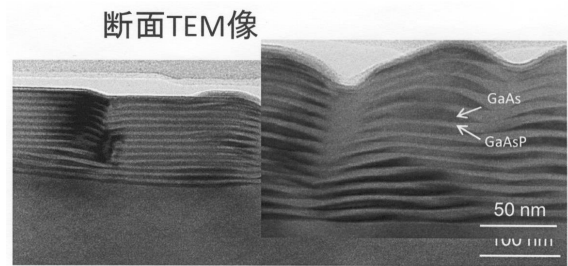
【図10】



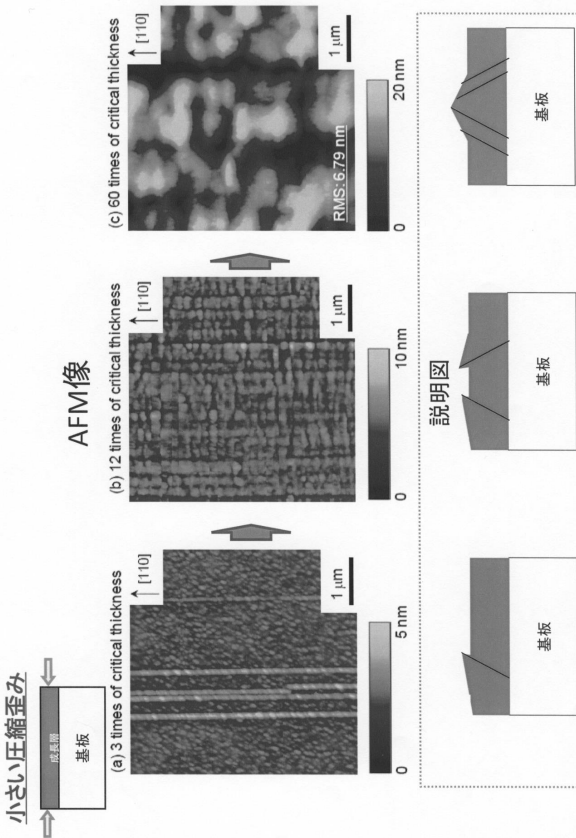
【図11】



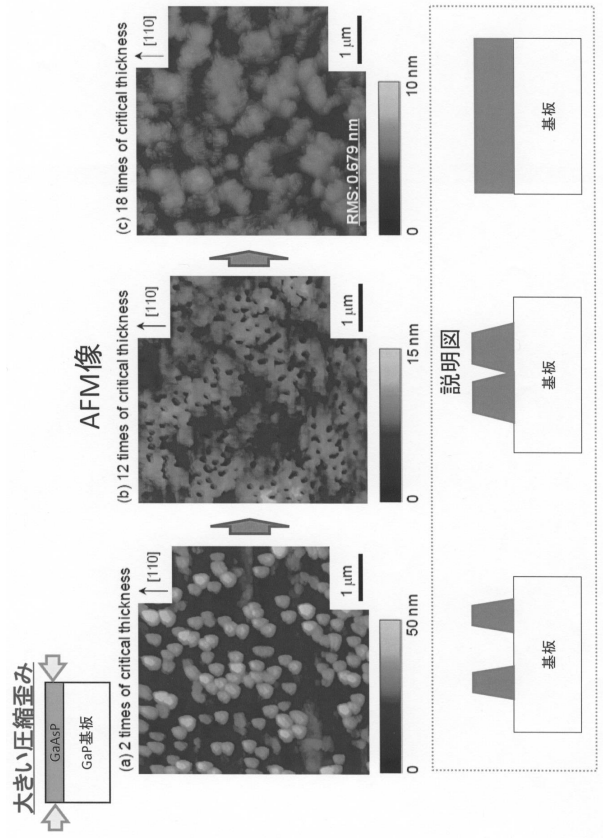
【図5】



【図6】

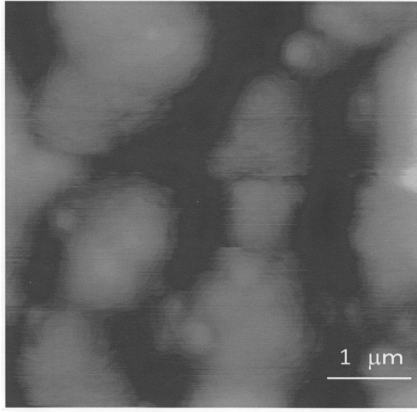


【図7】



【図9】

AFM像



---

フロントページの続き

審査官 遠藤 直恵

(56)参考文献 特開平07-320633(JP,A)  
特開2009-266809(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 1/34

H01J 37/06 - 37/077

G21K 1/00