

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6284179号
(P6284179)

(45) 発行日 平成30年2月28日(2018.2.28)

(24) 登録日 平成30年2月9日(2018.2.9)

(51) Int. Cl. F 1
GO2B 27/28 (2006.01) GO2B 27/28 A
GO2F 1/095 (2006.01) GO2F 1/095

請求項の数 11 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2013-267840 (P2013-267840)	(73) 特許権者	504132881
(22) 出願日	平成25年12月25日(2013.12.25)		国立大学法人東京農工大学
(65) 公開番号	特開2015-125186 (P2015-125186A)		東京都府中市晴見町3-8-1
(43) 公開日	平成27年7月6日(2015.7.6)	(74) 代理人	110000877
審査請求日	平成28年11月11日(2016.11.11)		龍華国際特許業務法人
		(72) 発明者	清水 大雅
			東京都府中市晴見町3-8-1 国立大学 法人東京農工大学内
		審査官	鈴木 俊光

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 光アイソレータ

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

下部クラッド層と、
 前記下部クラッド層上に配置された光導波路層と、
 前記光導波路層上に配置されたバッファ層と、
 前記バッファ層上の一部に配置され、前記バッファ層との界面においてプラズモン導波路を形成する強磁性金属層と
 を備え、
 前記バッファ層は、進み光の伝搬損失および戻り光の伝搬損失により定まる性能指数が極大値となる膜厚を有し、
前記光導波路層は、シリコンで形成され、
前記強磁性金属層は、コバルトで形成され、
前記バッファ層は、酸化シリコンで形成され、1.5 μmから2 μmの膜厚を有する光
 アイソレータ。

【請求項2】

前記性能指数は、前記戻り光の伝搬損失が前記進み光の伝搬損失より大きいほど高くなり、且つ、前記進み光および前記戻り光の伝搬損失の和が小さいほど高くなる
 請求項1に記載の光アイソレータ。

【請求項3】

前記光導波路層は、前記進み光において、前記プラズモン導波路に結合されずに前記光

導波路層を伝搬する光の強度に対する、前記プラズモン導波路に結合される光の強度の比が1より小さく、前記戻り光において、前記プラズモン導波路に結合されずに前記光導波路層を伝搬する光の強度に対する、前記プラズモン導波路に結合される光の強度の比が1より大きくなる膜厚を有する請求項1または2に記載の光アイソレータ。

【請求項4】

前記光導波路層は、前記進み光を出力するレーザーの活性層と一体に形成される請求項1から3のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【請求項5】

前記下部クラッド層は、半導体基板である請求項1から4のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

10

【請求項6】

前記光導波路層の厚みが、 $0.01\ \mu\text{m}$ から $20\ \mu\text{m}$ である

請求項1から5のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【請求項7】

前記強磁性金属層の厚みが、 $0.001\ \mu\text{m}$ から $0.2\ \mu\text{m}$ である

請求項1から6のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【請求項8】

前記バッファ層は、前記戻り光がATRカップリングを生じるような厚みを有する請求項1から7のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【請求項9】

前記光導波路層を伝搬する前記戻り光の全てが、プラズモン導波路に結合される請求項1から8のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

20

【請求項10】

前記光導波路層から、前記バッファ層に入射する光の強度反射率が0となる請求項1から9のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【請求項11】

前記光導波路層は、 $57\ \text{nm}$ の膜厚を有し、

前記強磁性金属層は、 $100\ \text{nm}$ の膜厚を有する請求項1から10のいずれか一項に記載の光アイソレータ。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

本発明は、半導体レーザーの戻り光を遮断する光アイソレータに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、半導体レーザーと一体に形成して、半導体レーザーを安定動作させることを目的として、プラズモン導波路を備えた光アイソレータが用いられてきた。(例えば、特許文献1参照)。

特許文献1 米国特許出願公開第2010/0316327号明細書

【発明の概要】

40

【発明が解決しようとする課題】

【0003】

しかしながら、従来の光アイソレータは、光の伝搬損失を考慮して設計されておらず、光アイソレータのバッファ層等の膜厚を最適に設計できない。

【課題を解決するための手段】

【0004】

本発明の第1の態様においては、下部クラッド層と、下部クラッド層上に配置された光導波路層と、光導波路層上に配置されたバッファ層と、バッファ層上の一部に配置され、バッファ層との界面においてプラズモン導波路を形成する強磁性金属層とを備え、バッファ層、光導波路層、強磁性金属層は、プラズモン導波路における進み光の伝搬損失および

50

戻り光の伝搬損失により定まる性能指数が極大値となる膜厚を有する光アイソレータを提供する。

【0005】

なお、上記の発明の概要は、本発明の必要な特徴の全てを列挙したものではない。また、これらの特徴群のサブコンビネーションもまた、発明となりうる。

【図面の簡単な説明】

【0006】

【図1】本発明の光アイソレータ100の一例を示す。

【図2A】プラズモンアイソレータ部70を伝搬する進み光の光強度分布を示す。

【図2B】プラズモンアイソレータ部70を伝搬する戻り光の光強度分布を示す。

10

【図3】バッファ層30の膜厚に対する光アイソレーションの依存性を示す。

【図4】バッファ層30の膜厚に対する性能指数FOMの依存性を示す。

【図5】光導波路層20を伝搬する光の伝搬角度を入射角として、バッファ層30、強磁性金属層50へ光が入射するときの伝搬角度と強度反射率Rとの関係を示す。

【図6】光アイソレータ100の設計の一例を示すフローチャートである。

【図7A】強度反射率Rの入射角に対する依存性を示す。

【図7B】進み光と戻り光の強度反射率Rの入射角依存性を示す。

【図8】進み光と戻り光の減衰入射角 θ_f 、 θ_b のバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 依存性を示す。

【発明を実施するための形態】

20

【0007】

以下、発明の実施の形態を通じて本発明を説明するが、以下の実施形態は特許請求の範囲にかかる発明を限定するものではない。また、実施形態の中で説明されている特徴の組み合わせの全てが発明の解決手段に必須であるとは限らない。

【0008】

図1は、本発明の光アイソレータ100の一例を示す。光アイソレータ100は、入力導波路部60、プラズモンアイソレータ部70、および出力導波路部80を備える。入力導波路部60、プラズモンアイソレータ部70、および出力導波路部80は、それぞれ下部クラッド層10、光導波路層20、バッファ層30を備える。プラズモンアイソレータ部70は、さらに、プラズモン導波路40、x軸に平行に磁化された強磁性金属層50を備える。本明細書では、光の伝搬方向をz軸、基板に垂直な方向をy軸、基板に平行で光の伝搬方向と垂直な方向をx軸とする。

30

【0009】

図1では、光導波路層20を伝搬する前進波（進み光）を矢印で示している。進み光は、レーザー光源等から光導波路層20に入力される。光導波路層20には、後段の導波路や光部品による反射等により、前進波とは逆方向に光導波路層20を伝搬する後退波（戻り光）が入力される場合がある。本例の光アイソレータ100は、プラズモン導波路層40を用いて、レーザー光源等に伝搬する戻り光を低減する。

【0010】

より具体的には、プラズモンアイソレータ部70における進み光については、プラズモン導波路40に結合されずに光導波路層20を伝搬する光の強度が、プラズモン導波路40に結合される光の強度より大きい。また、戻り光については、プラズモン導波路40に結合されずに光導波路層20を伝搬する光の強度が、プラズモン導波路40に結合される光の強度より小さい。強磁性金属層50の界面に形成されるプラズモン導波路40を伝搬する光は徐々に減衰するので、このような伝搬光強度の分布特性を有することで、レーザー光源等に伝搬する戻り光が低減される。

40

【0011】

また、プラズモン導波路40における進み光の伝搬損失は、プラズモン導波路40における戻り光の伝搬損失よりも小さい。伝搬損失とは、プラズモン導波路40を単位長さ伝搬した場合の、伝搬前後の光強度の比によって与えられる。このような構成により

50

、レーザー光源等に伝搬する戻り光が更に低減される。本例の光アイソレータ100においては、光導波路層20およびバッファ層30の膜厚を調整することで、上記の特性を実現する。

【0012】

下部クラッド層10は、光導波路層20のクラッド層として機能する。本例では、下部クラッド層10は、酸化シリコン SiO_2 で形成され、半導体基板上に形成される。下部クラッド層10の材料は、伝搬する光の波長によって、適宜選択されてよい。また、下部クラッド層10は、半導体基板であってよい。

【0013】

光導波路層20は、下部クラッド層10上に配置される。光導波路層20は、半導体レーザー光源等から光アイソレータ100に入射された光を導波する。光導波路層20は、下部クラッド層10およびバッファ層30よりも屈折率の高い材料で形成され、光導波路層20よりも屈折率の低い材料で形成された下部クラッド層10およびバッファ層30で挟まれることによって光を伝搬する。一例では、光導波路層20の材料はシリコン Si である。光導波路層20の材料は、伝搬する光の波長によって、適宜選択されてよい。例えば、光導波路層20の膜厚は、 $0.01\mu m$ から $20\mu m$ である。

10

【0014】

バッファ層30は、光導波路層20上に配置される。バッファ層30は、下部クラッド層10と同一の材料で形成されてよい。例えば、バッファ層30の材料は、酸化シリコン SiO_2 である。下部クラッド層10およびバッファ層30は、光導波路層20の上部と下部にそれぞれ配置されるので、伝搬する光を光導波路層20の内部に閉じ込められる。一例では、バッファ層30の厚みは、 $0.1\mu m$ から $50\mu m$ である。

20

【0015】

強磁性金属層50は、バッファ層30上の一部（すなわち、プラズモンアイソレータ部70に対応する領域）に配置される。一例では、強磁性金属層50の材料は、コバルト、鉄、ニッケル等の強磁性材料、または、これらから選択される2種類以上の材料の合金を含む。強磁性金属層50は、予め定められた方向に磁化される。本例の強磁性金属層50はx軸方向に磁化される。これにより、プラズモン導波路40をz軸プラス方向に進む光（進み光）に対するプラズモンアイソレータ部70の実効屈折率 $n_{eff,co,f}$ と、z軸マイナス方向に進む光（戻り光）に対するプラズモンアイソレータ部70の実効屈折率 $n_{eff,co,b}$ を異ならせる。例えば、強磁性金属層50の膜厚は、 $0.001\mu m$ から $0.2\mu m$ である。なお、磁化の向きは、強磁性金属層50の材料等によって、x軸プラス方向とx軸マイナス方向のうち、戻り光の伝搬損失が進み光の伝搬損失を上回るように選択されてよい。

30

【0016】

プラズモン導波路40は、バッファ層30および強磁性金属層50の界面に形成される。なお、プラズモンとは、自由電子の集団振動のことであり、強磁性金属層50中の自由電子が集団で振動することにより、光の電界と強く結合して金属と誘電体の界面を光が伝搬する状態を指す。

【0017】

光導波路層20を伝搬する光のうち、特定の条件を満たす伝搬光がプラズモン導波路40に結合される。具体的には、光導波路層20を伝搬する光に対するプラズモンアイソレータ部70の実効屈折率 $n_{eff,si}$ と、プラズモン導波路40を伝搬する光に対する実効屈折率 $n_{eff,co}$ の実部とが等しい場合に、光導波路層20を伝搬する光がプラズモン導波路40に結合する。なお、光導波路層20においては、進み光および戻り光で屈折率に差異がなく、且つ、伝搬損失も無視できるほど小さいので、光導波路層20を伝搬する光に対する実効屈折率 $n_{eff,si}$ は、進み光および戻り光で共通であり、且つ、伝搬損失に対応する虚部を有さない。

40

【0018】

光導波路層20を伝搬する光に対する実効屈折率 $n_{eff,si}$ は、光導波路層20、

50

バッファ層 30 の膜厚により変化する。このため、光導波路層 20 を伝搬する光に対する実効屈折率 $n_{eff, si}$ が、プラズモン導波路 40 を伝搬する戻り光の実効屈折率 $n_{eff, co, b}$ の実部とほぼ等しくなるように、光導波路層 20 とバッファ層 30 の膜厚を設定することで、光導波路層 20 を伝搬する戻り光を、プラズモン導波路 40 に結合することができる。

【0019】

本例の光導波路層 20 は、光導波路層 20 を伝搬する戻り光を、プラズモン導波路 40 に結合させるように最適化された膜厚を有する。上述したように、プラズモン導波路 40 を伝搬する進み光および戻り光の実効屈折率 $n_{eff, c}$ は異なる。このため、光導波路層 20 を伝搬する戻り光がプラズモン導波路 40 に結合されても、光導波路層 20 を伝搬する進み光がプラズモン導波路 40 に結合される度合は、戻り光よりも小さくなる。

10

【0020】

また、プラズモン導波路 40 における進み光の伝搬損失は、プラズモン導波路 40 における戻り光の伝搬損失よりも小さい。プラズモン導波路 40 における伝搬損失は、プラズモン導波路 40 における伝搬光に対する実効屈折率 $n_{eff, c}$ の虚部により定まる。上述したように、プラズモン導波路 40 における伝搬光に対する実効屈折率 $n_{eff, c}$ は、進み光と戻り光とで異なる。本例の強磁性金属層 50 は、戻り光の実効屈折率 $n_{eff, co, b}$ の虚部が大きくなり、進み光に対する実効屈折率 $n_{eff, c, f}$ の虚部が小さくなる方向に磁化される。例えば、+x 方向の磁化および -x 方向の磁化のうち、上記の条件を満たす方向に強磁性金属層 50 を磁化する。

20

【0021】

バッファ層 30 は、進み光の伝搬損失、および、戻り光の伝搬損失により定まる性能指数 FOM (Figure of merit) が極大値となる膜厚を有する。本例の性能指数 FOM は、プラズモンアイソレータ部 70 全体において、戻り光の伝搬損失が、進み光の伝搬損失より大きいほど高くなり、且つ、進み光および戻り光の伝搬損失の和が小さいほど高くなる。

一例として、性能指数 FOM は下式で定義される。

$$FOM = \frac{\text{戻り光の伝搬損失 } \alpha [dB/\mu m] - \text{進み光の伝搬損失 } \alpha [dB/\mu m]}{(\text{戻り光の伝搬損失 } \alpha [dB/\mu m] + \text{進み光の伝搬損失 } \alpha [dB/\mu m]) / 2}$$

30

【0022】

進み光および戻り光の伝搬損失は、プラズモンアイソレータ部 70 における下部クラッド層 10、光導波路層 20、バッファ層 30、強磁性金属層 50 および強磁性金属層 50 の上部層を一つの光導波路とした場合の、進み光および戻り光のそれぞれに対する実効屈折率 n_{eff} から算出できる。それぞれの実効屈折率 n_{eff} は、光の波長、各層の膜厚、各層の複素屈折率、および、強磁性金属層 50 における磁化の方向から算出することができる。

【0023】

本例の光アイソレータ 100 によれば、プラズモン導波路 40 における損失を考慮してバッファ層 30 の膜厚を最適化することで、性能指数 FOM を極大化することができる。また、進み光については、光導波路層 20 を伝搬する光の強度に対するプラズモン導波路 40 に結合される光の強度の比が 1 より小さく、かつ、戻り光については光導波路層 20 を伝搬する光の強度に対するプラズモン導波路 40 に結合される光の強度の比が 1 より大きくなる。また、プラズモン導波路 40 における進み光の伝搬損失を、プラズモン導波路 40 における戻り光の伝搬損失よりも小さくできる。

40

【0024】

なお、強磁性金属層 50 の上部層は、例えば空気等の空間層であってよく、酸化シリコン SiO_2 等の層であってよい。入力導波路部 60 および出力導波路部 80 におけるバッファ層 30 上にも、空気等の空間層が設けられてよく、酸化シリコン SiO_2 等の層が

50

設けられてもよい。また、図1に示すように、下部クラッド層10のx軸方向における幅は、光導波路層20の幅よりも大きくてよい。下部クラッド層10において、光導波路層20に覆われていない領域上には、空気等の空間層が形成されてよい。

【0025】

光導波路層20は、進み光を出力するレーザーの活性層と一体に形成されてよい。この場合、レーザーが出力した光と光導波路層20を伝搬する光の光軸を、人手で合わせる必要がなくなる。また、光導波路層20は、進み光を出力するレーザーの活性層と一体に形成されずに、光アイソレータ100の外部に進み光を出力する光源を備えてよい。この場合、光アイソレータ100がレーザーと一体に形成されないため、要求される消光比が得られる範囲で、レーザーの波長を自由に選択できる。

10

【0026】

図2Aは、プラズモンアイソレータ部70を伝搬する進み光の光強度分布の一例を示す。本例のプラズモンアイソレータ部70は、酸化シリコン SiO_2 で形成された下部クラッド層10およびバッファ層30と、シリコン Si で形成された光導波路層20と、コバルト Co で形成された強磁性金属層50を備える。また、光導波路層20およびバッファ層30は、図1において説明した最適化された厚みを有する。図2Aの例では、伝搬光の波長を $1.55\mu m$ 、下部クラッド層10の厚みを無限大、光導波路層20の膜厚を $57nm$ 、バッファ層30の厚みを $2\mu m$ 、強磁性金属層50の厚みを $100nm$ として光強度分布を計算した。本例では、プラズモンアイソレータ部70を一つの導波路として、上記の各層の複素屈折率および厚みから定まる導波路の実効屈折率 n_{eff} から光強度分布を算出した。

20

【0027】

図2Aの横軸は、下部クラッド層10および光導波路層20の境界位置を原点としたy軸方向の位置(μm)を示している。図2Aでは、破線により各層の境界位置を示している。また、図2Aの縦軸は、下部クラッド層10および光導波路層20の境界位置における光強度を1とした場合の、光強度の相対値を示している。

【0028】

図2Aに示すように、本例のプラズモンアイソレータ部70においては、光導波路層20における進み光の強度は、プラズモン導波路40における進み光の強度の2倍程度大きい。また、プラズモンアイソレータ部70における進み光の実効屈折率 n_{eff} の実部の大きさは 1.54233 であり、虚部の大きさは -0.00436813 であった。当該虚部に対応する伝搬損失は、 $0.153801dB/\mu m$ であった。

30

【0029】

図2Bは、プラズモンアイソレータ部70を伝搬する戻り光の光強度分布の一例を示す。本例のプラズモンアイソレータ部70の構成は、図2Aの例と同一である。図2Bに示すように、本例のプラズモンアイソレータ部70においては、プラズモン導波路40における戻り光の強度は、光導波路層20における戻り光の強度の10倍以上大きい。つまり、膜厚が最適化されたプラズモンアイソレータ部70は、進み光については、光導波路層20を伝搬する光の強度が、プラズモン導波路40に結合される光の強度より大きくなり、戻り光については、光導波路層20を伝搬する光の強度が、プラズモン導波路40に結合される光の強度より小さくなる。

40

【0030】

また、プラズモンアイソレータ部70における戻り光の実効屈折率 n_{eff} の実部の大きさは 1.54049 であり、虚部の大きさは -0.0226692 であった。当該虚部に対応する伝搬損失は、 $0.798175dB/\mu m$ であった。つまり、膜厚が最適化されたプラズモンアイソレータ部70は、進み光の伝搬損失を、戻り光の伝搬損失よりも小さくできる。

【0031】

本例のプラズモンアイソレータ部70における光アイソレーションは、 $0.644374dB/\mu m$ であった。光アイソレーションは下式で与えられる。

50

$$\Delta\alpha[dB/mm] = 2 \times 0.01 \log_e \frac{2\pi}{\lambda} (\text{Im}[n_{\text{eff},b}] - \text{Im}[n_{\text{eff},f}])$$

なお、 λ は伝搬光の波長、 $n_{\text{eff},b}$ は戻り光の実効屈折率、 $n_{\text{eff},f}$ は進み光の実効屈折率を示す。本例のプラズモンアイソレータ部 70 における性能指数 FOM は、1.35 であった。

【0032】

図 3 は、バッファ層 30 の膜厚に対する光アイソレーションの依存性を示す。横軸は、バッファ層 30 の膜厚 [μm] を示し、縦軸は、光アイソレータ 100 の光アイソレーション [$\text{dB}/\mu\text{m}$] を示す。バッファ層 30 の膜厚は 1.0 から 2.3 μm まで変化する。光アイソレーションは、プラズモン導波路 40 の導波路長における単位長さ当たりの消光比を示す。本例の光アイソレータ 100 は、光導波路層 20 が 57 nm、強磁性金属層 50 が 100 nm の膜厚を有する。

10

【0033】

光アイソレータ 100 は、バッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} に応じて、光アイソレーションの極大値を有する。領域 I、III は光アイソレーションの極小値を示しているが、光の伝搬方向または強磁性金属層 50 の磁化の方向を反転させれば、極大値として扱うことができる。領域 II は、光アイソレーションの極大値を示す。例えば、光アイソレーションの極大値は、光アイソレーションの波形の傾きが 0 となるときの光アイソレーションを示す。また、極大値は、必ずしも光アイソレーションの波形の傾きが 0 となるときに限られず、光アイソレーションの絶対値が予め定められた値以上となった場合でよい。例えば、光アイソレーションの絶対値が 0.2 $\text{dB}/\mu\text{m}$ 以上となった場合を極大値としてよい。

20

【0034】

バッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} は、光アイソレーションが極大値を取るように最適化される。つまり、図 3 で示された光アイソレーションとバッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} との関係が得られた場合、バッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} は、領域 I、II、III となるように選択される。これにより、光アイソレータ 100 は、進み光と戻り光の光強度分布の差を利用して、予め定められた光アイソレーションを達成する。

30

【0035】

図 4 は、バッファ層 30 の膜厚に対する性能指数 FOM の依存性を示す。横軸は、バッファ層 30 の膜厚 [μm] を示しており、バッファ層 30 の膜厚は 1.0 から 2.3 μm まで変化する。縦軸は、光アイソレータ 100 の性能指数 FOM [$\text{dB}/\mu\text{m}$] を示す。

【0036】

光アイソレータ 100 は、バッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} に応じて、光アイソレーションと同様に性能指数 FOM が極大値をとる。例えば、性能指数 FOM の極大値は、性能指数 FOM の波形の傾きが 0 となるときの性能指数 FOM を示す。また、性能指数 FOM の極大値は、必ずしも性能指数 FOM の波形の傾きが 0 となるときに限られず、性能指数 FOM の絶対値が予め定められた値以上となった場合でもよい。例えば、性能指数 FOM の絶対値が 0.5 以上となった場合を極大値としてよい。

40

【0037】

バッファ層 30 は、光アイソレータ 100 の要求される光アイソレーションおよび性能指数 FOM を満たすような膜厚 d_{SiO_2} を有する。例えば、バッファ層 30 の膜厚 d_{SiO_2} は、光アイソレーションおよび性能指数 FOM が同時に極大値をとる領域 I、II、III に設定される。本例において、領域 I、II、III は、性能指数 FOM または光アイソレーションの波形の傾き（微分値）がほぼ無限となる 2 つの膜厚に挟まれた領域である。

【0038】

図 5 は、光導波路層 20 を伝搬する光の伝搬角度 θ を入射角として、バッファ層 30、

50

強磁性金属層 50 へ光が入射するときの伝搬角度 θ と強度反射率 R との関係を示す。強度反射率 R は、光導波路層 20 からバッファ層 30 に入射する入射光の強度に対する、光導波路層 20 とバッファ層 30 との界面で反射する反射光の強度の比を示す。つまり、強度反射率 R が大きい程、入射光がバッファ層 30 に入射してプラズモン導波路 40 に結合されにくくなる。また、入射角度 θ とは、光導波路層 20 を伝搬する光がバッファ層 30 に入射する場合に、光導波路層 20 とバッファ層 30 との界面に垂直な面と、入射光とがなす角度を指す。例えば入射角度 θ は、光導波路層 20 を伝搬される光の波長および光導波路層 20 の膜厚等により決定される。

【0039】

強度反射率 R が 1 の場合、入射光は光導波路層 20 とバッファ層 30 との界面で全反射する。また、強度反射率 R が 1 より小さい場合、入射光の一部がバッファ層 30 に入射する。例えば、領域 IV は、強度反射率 R が極小値を取る領域であり、光導波路層 20 を伝搬する光がプラズモン導波路 40 で減衰される領域である。領域 IV では、減衰全反射 (ATR: Attenuated Total Reflection) カップリングが起こる。ここで、領域 IV において、強度反射率 R が極小値を取る場合の入射角度 θ を減衰入射角度 θ_f と定義する。一方、領域 V は、強度反射率 R が 1 に近い領域であり、光導波路層 20 を伝搬する光がプラズモン導波路 40 で減衰されない領域である。

【0040】

入射角度 θ に対する強度反射率 R の関係は、選択する光導波路層 20、バッファ層 30、プラズモン導波路 40、強磁性金属層 50 等の材料および膜厚によって変化する。また、入射角度 θ に対する強度反射率 R の関係は、強磁性体である強磁性金属層 50 の磁化の向きに応じて、進み光と戻り光とで異なる。例えば、コバルトの強磁性金属層 50 が x 軸方向に磁化されると、光導波路層 20 を伝搬する進み光と戻り光とで入射角度 θ に対する強度反射率 R の関係に違いが生じる。つまり、進み光の減衰入射角度 θ_f と戻り光の減衰入射角度 θ_b とが異なる値となる。

【0041】

光アイソレータ 100 の構造は、戻り光の入射角度 θ が減衰入射角度 θ_b となるように設定される。具体的には、進み光の入射角度 θ が減衰入射角度 θ_f となり、戻り光の入射角度 θ が減衰入射角度 θ_b となるように光導波路層 20 の膜厚が設定される。なお、入射角度 θ は、減衰入射角度 θ_b と厳密に一致しなくともよい。但し、減衰入射角度 θ_b の近傍において、少なくとも戻り光の強度反射率 R が進み光の強度反射率 R より小さい入射角度 θ となるように設定される。つまり、入射角度 θ が減衰入射角度 θ_b の場合、進み光は領域 V に対応して、戻り光は領域 IV に対応するように設定される。領域 V における進み光は、プラズモン導波路 40 と結合しないか、もしくは弱く結合するので、伝搬損失 α が小さい。一方、領域 IV における戻り光は、プラズモン導波路 40 と結合するので伝搬損失 α が大きい。よって、戻り光では、光導波路層 20 における光強度がプラズモン導波路 40 における光強度より小さく、進み光では、光導波路層 20 における光強度がプラズモン導波路 40 における光強度より大きくなる。これにより予め定められた消光比が得られる。

【0042】

以下に、光アイソレータ 100 の構造を決定するためのパラメータの導出方法を示す。本例では、下部クラッド層 10 の膜厚を無限長、光導波路層 20 の膜厚を d_{Si} 、バッファ層 30 (SiO_2) の膜厚を d_{SiO_2} 、強磁性金属層 50 (コバルト) の膜厚を d_C 。および強磁性金属層 50 上の空気の膜厚を無限長として説明する。

【0043】

伝搬損失 α は、単位 [dB/mm] で表され、式 (1) により導出される。

式 (1)

$$\alpha [dB/mm] = -10 \log_{10} \{ \exp(2k_0 \text{Im}[n_{eff}]L) \} \quad (L = 1mm)$$

10

20

30

40

50

ただし、 $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ は真空中の波数、 λ_0 は波長を示す。

【0044】

強磁性金属層50は、異方性をもつコバルトCoで形成されており、磁化された強磁性金属層50の比誘電率はテンソルで表され、光の誘電率テンソル $\tilde{\epsilon}_{\text{進み光}}$ と戻り光の誘電率

テンソル $\tilde{\epsilon}_{\text{戻り光}}$ は式(2)のようにあらわされる。

式(2)

$$\tilde{\epsilon}_{\text{進み光}} = \begin{pmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & -\epsilon_{yz} \\ 0 & \epsilon_{yz} & \epsilon \end{pmatrix}, \quad \tilde{\epsilon}_{\text{戻り光}} = \begin{pmatrix} \epsilon & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon & \epsilon_{yz} \\ 0 & -\epsilon_{yz} & \epsilon \end{pmatrix} \quad 10$$

進み光の誘電率テンソル $\tilde{\epsilon}_{\text{進み光}}$ と戻り光の誘電率テンソル $\tilde{\epsilon}_{\text{戻り光}}$ との違いにより、進み光と戻り光の実効屈折率 $n_{\text{eff},f}$ 、 $n_{\text{eff},b}$ はそれぞれ異なる。なお、 z は光の伝搬方向、 y はSiO₂基板に垂直な方向、 x は磁化の向き(異方性の方向)と定義される。

【0045】

対角項は、強磁性金属層50層の複素屈折率 N と $\epsilon = N^2$ の関係にあり、非対角項 ϵ_{yz} は、異方性を表す強磁性体特有のパラメータである。強磁性体以外の場合、非対角項 ϵ_{yz} はゼロで、進み光と戻り光の実効屈折率 $n_{\text{eff},f}$ 、 $n_{\text{eff},b}$ がそれぞれ同じ値となる。 20

【0046】

式(3)に示す通り、進み光の実効屈折率 $n_{\text{eff},f}$ は、光の波長 λ_0 、下部クラッド層10、バッファ層30の屈折率 n_{SiO_2} 、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 、光導路層20の屈折率 n_{Si} と膜厚 d_{Si} 、強磁性金属層50の複素屈折率 N 、非対角項 ϵ_{yz} および膜厚 d_{Co} から一意に導出される。

式(3)

$$n_{\text{eff},f} = f_1(\lambda_0, n_{\text{SiO}_2}, d_{\text{SiO}_2}, n_{\text{Si}}, d_{\text{Si}}, N, \epsilon_{yz}, d_{\text{Co}}) \quad 30$$

関数 f_1 は、実効屈折率 n_{eff} を算出する関数である。

また、式(4)に示す通り、戻り光の実効屈折率 $n_{\text{eff},b}$ は、 ϵ_{yz} の符号を反転することにより求まる。

式(4)

$$n_{\text{eff},b} = f_1(\lambda_0, n_{\text{SiO}_2}, d_{\text{SiO}_2}, n_{\text{Si}}, d_{\text{Si}}, N, -\epsilon_{yz}, d_{\text{Co}})$$

【0047】

次に、プラズモンアイソレータ部70を伝搬する光の光強度分布の導出方法を示す。進み光と戻り光に対する光強度分布 I_f 、 I_b は、式(5)、(6)により導出される。

式(5)

$$I_f = f_2(\lambda_0, n_{\text{SiO}_2}, d_{\text{SiO}_2}, n_{\text{Si}}, d_{\text{Si}}, N, \epsilon_{yz}, d_{\text{Co}}, y) \quad 40$$

式(6)

$$I_b = f_2(\lambda_0, n_{\text{SiO}_2}, d_{\text{SiO}_2}, n_{\text{Si}}, d_{\text{Si}}, N, -\epsilon_{yz}, d_{\text{Co}}, y)$$

ここで、関数 f_2 は、進み光と戻り光に対する光強度分布 I_f 、 I_b を算出する関数である。

【0048】

以下に、進み光と戻り光の伝搬損失 α_f 、 α_b の導出方法を示す。進み光および戻り光の伝搬損失 α_f 、 α_b は式(7)、(8)により導出される。式(7)、(8)を用いることによ 50

り、進み光および戻り光の実効屈折率 $n_{eff,f}$ 、 $n_{eff,b}$ が求めれば、進み光と戻り光の伝搬損失 が導出される。

式(7)

$$\alpha_f [dB/mm] = -10 \log_{10} \{ \exp(2k_0 \text{Im}[n_{eff,f}]L) \} \quad (L=1mm)$$

式(8)

$$\alpha_b [dB/mm] = -10 \log_{10} \{ \exp(2k_0 \text{Im}[n_{eff,b}]L) \} \quad (L=1mm)$$

10

【0049】

以下に、光アイソレーション の導出方法を示す。光アイソレーション [dB/mm] は進み光および戻り光の実効屈折率 $n_{eff,f}$ 、 $n_{eff,b}$ を用いて、式(9)により導出される。

式(9)

$$\Delta\alpha [dB/mm] = \alpha_b - \alpha_f$$

光アイソレーション は、バッファ層30 (SiO₂) の膜厚によってはマイナスの値をとる。光アイソレーション がマイナスの値をとった場合、強磁性金属層50の磁化の向きを反転し、進み光と戻り光の伝搬損失 の大小関係を逆転させ、戻り光の伝搬損失が進み光の伝搬損失を上回るように設定する。

20

【0050】

以下に、光アイソレータ100の性能指数FOMの導出方法を示す。光アイソレータ100の性能は、光アイソレーション の大きさだけでなく、進み光の伝搬損失 が小さいことが重要である。そこで、性能指数FOMは、光アイソレーション の大きさと進み光の伝搬損失 の小ささを評価するために、式(10)のように定義される。

式(10)

$$FOM = \frac{\alpha_b - \alpha_f}{(\alpha_b + \alpha_f)/2}$$

30

性能指数FOMは、戻り光の伝搬損失 α_b が進み光の伝搬損失 α_f より大きいほど高くなり、且つ、進み光および戻り光の伝搬損失の和 ($\alpha_f + \alpha_b$) が小さいほど高くなる。性能指数FOMは、進み光の伝搬損失 がゼロの時に最大値2をとる。また、性能指数FOMは、バッファ層30 (SiO₂) の膜厚 d_{SiO_2} によってはマイナスの値をとる。性能指数FOMがマイナスの値をとった場合、強磁性金属層50の磁化の向きを反転させ、進み光と戻り光の伝搬損失 の大小関係を逆転させ、戻り光の伝搬損失が進み光の伝搬損失を上回るように設定する。

【0051】

式(1)-(10)から性能指数FOMは光の波長、下部クラッド層10およびバッファ層30の屈折率 n_{SiO_2} 、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 、光導波路層20の屈折率 n_{Si} 、と膜厚 d_{Si} 、強磁性金属層50の複素屈折率 N と非対角項 ϵ_{yz} および膜厚 d_c から一意に導出でき、式(11)のように定義される。

40

式(11)

$FOM = f_3(\lambda, n_{SiO_2}, d_{SiO_2}, n_{Si}, d_{Si}, N, \epsilon_{yz}, d_c)$
ここで、 f_3 は、性能指数FOMを算出する関数である。

【0052】

図6は、光アイソレータ100の設計の一例を示すフローチャートである。光アイソレータ100の構造は、ステップS100~ステップS400により決定される。

【0053】

ステップS100において、光源であるレーザー光の波長 を決定する。レーザー光の

50

波長は、単一波長でも、一定の幅を有する波長であってもよい。レーザー光の波長が単一波長の場合、光導波路層20は、レーザーの活性層と一体に形成されてよい。ステップS100で設定されたレーザー光の波長が一定の幅を有する場合、光アイソレータ100には、設定された波長幅に対応する波長の光が入射される。

【0054】

ステップS200では、戻り光がプラズモン導波路40に結合する減衰入射角度 θ_b となるように入射角度 θ を決定する。強磁性金属層50の膜厚が決定されると、光導波路層20の膜厚を無限大に設定することにより、戻り光の強度反射率Rがゼロとなるバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} および減衰入射角度 θ_b が決定される。なお、入射角度 θ は、以下の通り伝搬定数 β と一対一の関係にあるので、ステップS200で決定された減衰入射角度 θ_b に対応する減衰伝搬定数 β_b が導出される。

$$\sin \theta = \frac{\operatorname{Re}[\beta]}{\left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)n_{core}}$$

n_{core} は、光導波路層20の屈折率を示す。

【0055】

ステップS300では、光導波路層20の膜厚 d_{Si} を決定する。ステップS100、200において、光導波路層20を伝搬する光の波長および減衰入射角度 θ_b （減衰伝搬定数 β_b ）が決定されているので、光導波路層20の膜厚 d_{Si} は一意に決まる。

【0056】

ステップS400では、ステップS300で決定された光導波路層20の膜厚 d_{Si} に対してバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} を変数として、光アイソレーション α と性能指数FOMを計算する。性能指数FOMの計算には、式(9)、(10)が用いられる。バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} は、図3、4に対応する光アイソレーション α および性能指数FOMのバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 依存性を考慮して決定される。例えば、光アイソレーション α が0.2 dB/ μ m以上、かつ、性能指数FOMの絶対値が0.5から2の間を満たすように、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} が決定される。

【0057】

なお、式(1)-(11)で示した通り、光アイソレーション α と性能指数FOMは、波長 λ 、下部クラッド層10とバッファ層30の屈折率 n_{SiO_2} および膜厚 d_{SiO_2} 、光導波路層20の屈折率 n_{Si} および膜厚 d_{Si} 、強磁性金属層50層の複素屈折率Nと非対角項 γ_z および膜厚 d_c から一意に決定できる。光アイソレーション α が0.2 dB/ μ m以上、かつ、性能指数FOMの絶対値が0.5から2の間を満たすように、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 、光導波路層20の膜厚 d_{Si} 、強磁性金属層50の膜厚 d_c を任意に決定してよい。これにより、ステップS100~ステップS400を単純化して、光アイソレータ100の構造を決定できる。

【0058】

光アイソレータ100は、光アイソレーション α が大きくても、伝搬損失 β が大きい場合は有効ではない。また、光アイソレータ100は、進み光の伝搬損失 β がゼロで性能指数FOMが最大値の2であっても、光アイソレーション α が小さければ、素子長を短くできないので有効でない。つまり、光アイソレータ100は、光アイソレーション α と性能指数FOMとがいずれも好適に設定される。例えば、光アイソレータ100は、光アイソレーション α が0.2 dB/ μ m以上、かつ、性能指数FOMの絶対値が0.5から2の間となるように設計される。

【0059】

本例の光アイソレータ100は、任意の強磁性金属層50の膜厚 d_c に対して、各層の膜厚が最適に決定される。一方、強磁性金属層50の膜厚 d_c を最適化することもできる。即ち、光アイソレータ100は、強磁性金属層50の膜厚 d_c を振ることにより、性能指数FOMを最適化される。例えば、強磁性金属層50の膜厚を複数設定して、そ

10

20

30

40

50

それぞれの強磁性金属層50の膜厚について、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} を最適化して、性能指数FOMを算出する。また、性能指数FOMが最大となるように、強磁性金属層50の膜厚 d_c 。およびバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} の組み合わせが決定されてもよい。

【0060】

図7Aは、強度反射率Rの入射角度に対する依存性を示す。横軸は入射角度 [deg]を示して、縦軸は強度反射率Rを示す。入射角度と強度反射率Rの関係は、光導波路層20の膜厚が無限長である場合のシミュレーション結果である。なお、本例のシミュレーションでは、強磁性金属層50上の空気の膜厚を無限長、強磁性金属層50を磁化された100nmのコバルトとして、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} は、100nmから1000nmまで100nm間隔で変更される。

10

【0061】

バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} が752nmの場合、入射角度が26.1度になると、強度反射率RがゼロになるATRカップリングが生じる。ATRカップリングが生じると、強磁性金属層50およびバッファ層30の界面にプラズモンが励起する。例えば、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} が100nmである場合、入射角度が0度~80度付近において、強度反射率Rは、0.5前後となる。また、入射角度が80度以上になると強度反射率Rは増加する。つまり、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} が100nmである場合強度反射率Rは0とならずATRカップリングが生じない。

【0062】

一方、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} が752nmである場合、入射角度が26.1度で、強度反射率Rが0となるATRカップリングが生じる。ATRカップリングが生じると、光導波路層20を伝搬する光の全てがプラズモン導波路40に結合されて、強度反射率Rが0となる。このように、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} に応じて、ATRカップリングが生じる場合と生じない場合とがある。

20

【0063】

図7Bは、進み光と戻り光の強度反射率Rの入射角度依存性を示す。図7Bは、図7Aにおいて破線で示された領域の拡大図である。図7Aに示した通り、強度反射率Rが0となるバッファ層30の膜厚は、 $d_{SiO_2} = 752$ nmである。強度反射率Rの入射角度依存性は、進み光と戻り光とで異なる。本例では、進み光の減衰入射角度 θ_f が約26.075度であるのに対して、戻り光の減衰入射角度 θ_b は、約26.1度となる。なお、本例のように、進み光と戻り光の強度反射率Rの差がわずかである場合であっても、光導波路層20内を伝搬する距離を調整することにより、光アイソレーションの大きさを調整できる。

30

【0064】

図8は、減衰入射角度のバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} 依存性を示す。横軸はバッファ層30の膜厚 [μm]を、縦軸は入射角度 [度]を示す。本例では、シリコンSiで形成された光導波路層20の膜厚が57nmであり、コバルトCoで形成された強磁性金属層50の膜厚が100nmである。なお、プラズモンアイソレータ部70の導波路長は、光アイソレータ100が要求される消光比に応じて設計される。例えば消光比を大きく設計したい場合、プラズモンアイソレータ部70の導波路長を長くする。光導波路層20の膜厚 d_{Si} は、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} を決定するために任意に設定された値であり、図6のステップS100~ステップS400により決定される。

40

【0065】

領域VI、VII、VIIIは、プラズモン導波路40と結合する入射角度が進み光と戻り光とで異なる領域の一例である。強度反射率Rの入射角度依存性が進み光と戻り光とで異なるか否かは、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} の大きさに応じて決まる。領域VI、VII、VIIIに対応する入射角度は、進み光に関して減衰入射角度 θ_f である場合には、戻り光に対して減衰入射角度 θ_b ではなく、戻り光に対して減衰入射角度 θ_b である場合には、進み光に対して減衰入射角度 θ_f ではない。なお、領域VI、VII

50

、VIIは、説明の便宜において指定された領域であり、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} の設定される領域がこれに限定されるものではない。例えば、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} は、進み光および戻り光の減衰入射角度の差が極大となる値に設定される。この場合、バッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} は、領域VI、VII、VIIIに限られず、 $1.5\mu m$ から $2\mu m$ の間に設定されてよい。

【0066】

本実施形態に係るバッファ層30の膜厚 d_{SiO_2} は、進み光と戻り光の減衰入射角度の差が極大となる値に設定されるので、進み光では、光導波路層20における伝搬光強度がプラズモン導波路40における伝搬光強度より大きく、かつ、戻り光では光導波路層20における伝搬光強度がプラズモン導波路40における伝搬光強度より小さく、プラズモン導波路40から受ける伝搬光の減衰の度合いが、進み光の方が戻り光より小さい光アイソレータ100を実現できる。

10

【0067】

以上、本発明を実施の形態を用いて説明したが、本発明の技術的範囲は上記実施の形態に記載の範囲には限定されない。上記実施の形態に、多様な変更または改良を加えることが可能であることが当業者に明らかである。その様な変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、特許請求の範囲の記載から明らかである。

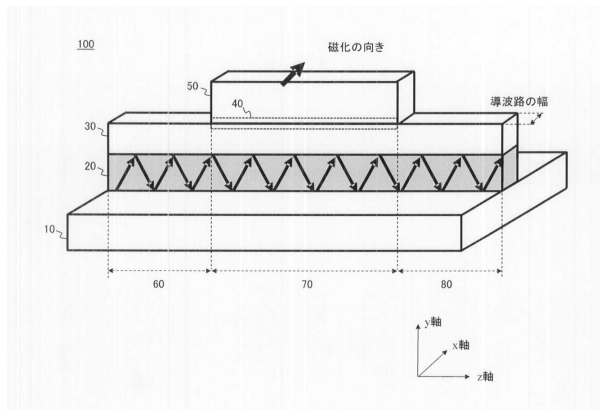
【符号の説明】

【0068】

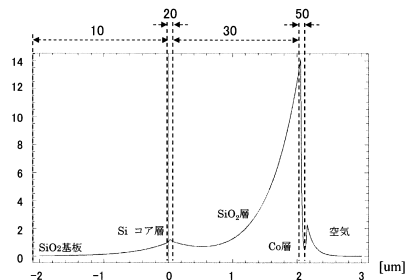
10 下部クラッド層、20 光導波路層、30 バッファ層、40 プラズモン導波路、50 強磁性金属層、60 入力導波路部、70 プラズモンアイソレータ部、80 出力導波路部、100 光アイソレータ

20

【図1】

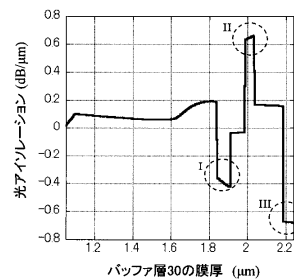
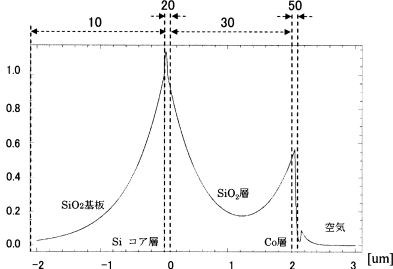


【図2B】

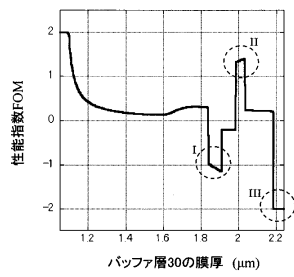


【図3】

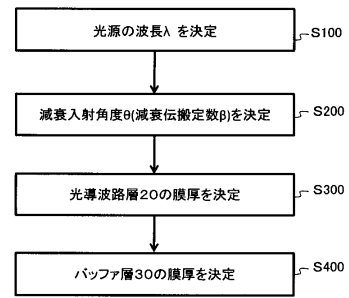
【図2A】



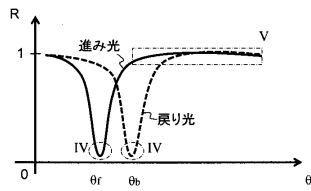
【 図 4 】



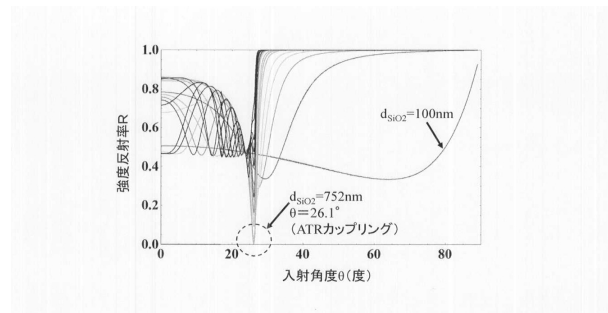
【 図 6 】



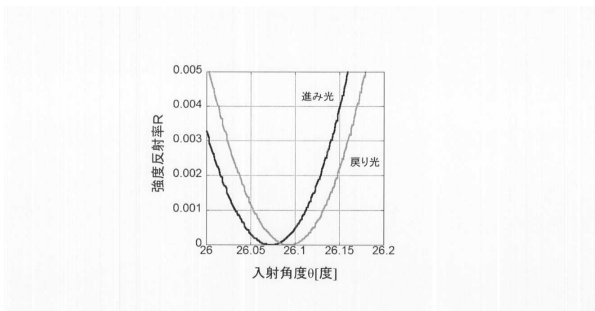
【 図 5 】



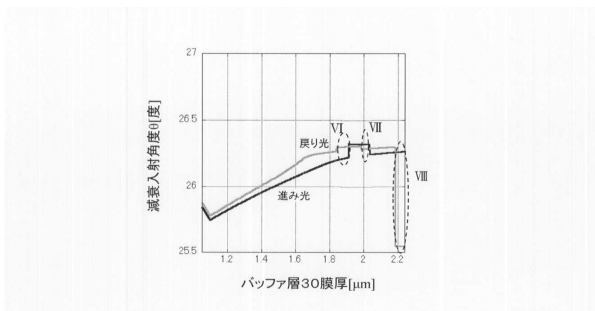
【 図 7 A 】



【 図 7 B 】



【 図 8 】



フロントページの続き

(56)参考文献 米国特許出願公開第2010/0316327 (US, A1)

国際公開第2007/088991 (WO, A1)

貝原輝則他4名, Co/Al₂O₃/AlGaAs界面における表面プラズモンを用いた導波路型光アイソレータの設計, 第74回応用物理学会秋季学術講演会講演予稿集, 日本, 応用物理学会, 2013年8月31日, 19p - A8 - 17

Juan Montoya et al., Surface plasmon isolator based on nonreciprocal coupling, JOURNAL OF APPLIED PHYSICS, 米国, American Institute of Physics, 2009年7月15日, Vol. 106, No. 2, 023108

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02B 27/28

G02F 1/09 - 1/095

G02B 6/27