

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号
特開2017-3301
(P2017-3301A)

(43) 公開日 平成29年1月5日(2017.1.5)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
GO 1 J 1/02 (2006.01)	GO 1 J 1/02 B	2 G O 5 9
GO 1 N 21/41 (2006.01)	GO 1 N 21/41 I O 1	2 G O 6 5
B 8 2 Y 20/00 (2011.01)	B 8 2 Y 20/00	5 F 8 4 9
H O 1 L 31/10 (2006.01)	H O 1 L 31/10 A	

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 28 頁)

(21) 出願番号	特願2015-114656 (P2015-114656)	(71) 出願人	000236436
(22) 出願日	平成27年6月5日 (2015.6.5)		浜松ホトニクス株式会社
			静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1
		(74) 代理人	100088155
			弁理士 長谷川 芳樹
		(74) 代理人	100113435
			弁理士 黒木 義樹
		(74) 代理人	100140442
			弁理士 柴山 健一
		(74) 代理人	100124291
			弁理士 石田 悟
		(72) 発明者	道垣内 龍男
			静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1
			浜松ホトニクス株式会社内
		最終頁に続く	

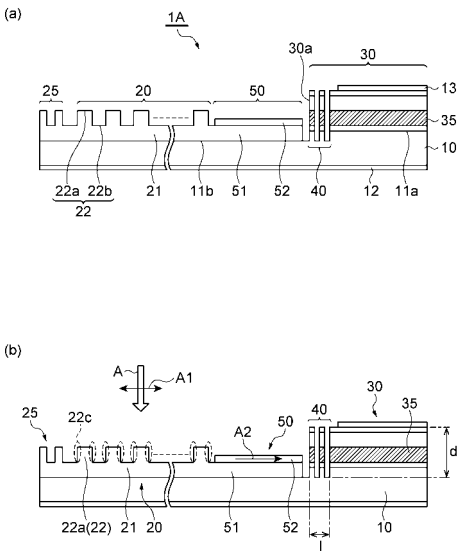
(54) 【発明の名称】 光検出装置

(57) 【要約】

【課題】 赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能な光検出装置を提供する。

【解決手段】 基板 1 0 上に設けられた量子カスケード検出器 3 0 と、基板 1 0 上に設けられ周期構造 2 2 が形成された金属層 2 1 を有し、波長 λ の被検出光の入射に応じてプラズモンを生成するように構成された受光部 2 0 とを備えて、光検出装置 1 A を構成する。検出器 3 0 は、その第 1 面 3 0 a が受光部 2 0 からのプラズモンに対する入射面となっており、第 1 面側において溝構造が形成されており、この溝構造は、検出器 3 0 を構成する半導体材料からなる第 1 媒質層と、溝構造での溝内にある媒質からなる第 2 媒質層とが光入射方向に積層されることで、第 1 面 3 0 a での波長 λ の光の反射率を低減する反射低減構造 4 0 を構成している。

【選択図】 図 2



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板と、

前記基板上に設けられ、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の活性層を有してメサ型に形成された半導体光検出素子と、

前記基板上に前記半導体光検出素子とともに設けられ、負の誘電率を有する材料からなり周期構造が形成された負誘電率材料層を有し、所定の波長 λ の被検出光の入射に応じてプラズモンを生成するように構成された受光部とを備え、

前記半導体光検出素子は、前記受光部における前記プラズモンの伝搬方向の一方側に配置され、その第 1 面が前記プラズモンに対する入射面となっているとともに、前記第 1 面側において溝構造が形成されており、

前記溝構造は、前記半導体光検出素子を構成する半導体材料からなる屈折率 n_1 の第 1 媒質層と、前記溝構造での溝内にある媒質からなる屈折率 n_2 の第 2 媒質層とが光入射方向に積層されることで、前記第 1 面での波長 λ の光の反射率を低減する反射低減構造を構成していることを特徴とする光検出装置。

【請求項 2】

前記反射低減構造は、それぞれ前記第 1 媒質層及び前記第 2 媒質層を含む M 層（M は 1 以上の整数）の構造層を有し、前記 M 層の構造層での前記第 1 媒質層の充填率が q となっているとともに、

前記第 1 媒質層と前記第 2 媒質層との平均屈折率

$$n_{eff} = \{q n_1^2 + (1 - q) n_2^2\}^{1/2}$$

が、前記第 1 媒質層及び前記第 2 媒質層の屈折率の積の平方根で表される最適屈折率

$$n_{opt} = (n_1 n_2)^{1/2}$$

に対して $\pm 20\%$ の範囲内となり、層厚 l が、最適層厚

$$l_{opt} = \lambda / 4 n_{opt}$$

に対して $\pm 20\%$ の範囲内となるように構成されていることを特徴とする請求項 1 記載の光検出装置。

【請求項 3】

前記反射低減構造は、それぞれ前記第 1 媒質層及び前記第 2 媒質層を含み、前記第 1 媒質層の充填率が $q_1 \sim q_M$ の M 層（M は 2 以上の整数）の構造層を有し、前記 M 層の構造層が、前記第 1 面側から第 1 構造層～第 M 構造層の順で積層されているとともに、

前記 M 層の構造層に含まれる第 m 構造層（m は 1 以上 M 以下の整数）での前記第 1 媒質層と前記第 2 媒質層との平均屈折率

$$n_{eff, m} = \{q_m n_1^2 + (1 - q_m) n_2^2\}^{1/2}$$

が、前記第 1 構造層から前記第 M 構造層に向けて段階的に前記第 2 媒質層の屈折率 n_2 から前記第 1 媒質層の屈折率 n_1 へと近づくように構成されていることを特徴とする請求項 1 記載の光検出装置。

【請求項 4】

前記反射低減構造は、前記第 m 構造層での前記第 1 媒質層の充填率 q_m が、0 と 1 との間において間隔 $\Delta q = 1 / (M + 1)$ で等間隔に設定された目標充填率

$$q_{t, m} = m / (M + 1)$$

に対して $\pm \Delta q / 2$ の範囲内となり、前記第 m 構造層の層厚 l_m が、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t, m}$ と一致させた場合の目標層厚

$$l_{t, m} = \lambda / 4 n_{eff, t, m}$$

に対して $\pm 30\%$ の範囲内となるように構成されていることを特徴とする請求項 3 記載の光検出装置。

【請求項 5】

前記半導体光検出素子は、吸収井戸層として機能する第 1 井戸層を含む N 個（N は 3 以上の整数）の量子井戸層、及び N 個の量子障壁層からなる単位積層体が多段に積層されることで、前記第 1 井戸層を含みサブバンド間吸収によって光を検出する吸収領域と、前記

10

20

30

40

50

サブバンド間吸収によって励起された電子を輸送する輸送領域とが交互に積層されたカスケード構造が形成された前記活性層を有する量子カスケード検出器であることを特徴とする請求項 1～4 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 6】

前記基板上で前記半導体光検出素子と前記受光部との間に設けられ、負の誘電率を有する材料からなる導波路層を有し、前記受光部で生成された前記プラズモンを前記半導体光検出素子へと伝搬させるように構成された導波路部を備えることを特徴とする請求項 1～5 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 7】

前記導波路部は、前記導波路層と、前記導波路層上に形成された誘電体材料からなる誘電体層とによって構成されていることを特徴とする請求項 6 記載の光検出装置。

10

【請求項 8】

前記導波路部は、前記受光部から前記半導体光検出素子へと導波路幅が減少するテーパ形状に形成されていることを特徴とする請求項 6 または 7 記載の光検出装置。

【請求項 9】

前記受光部の前記負誘電率材料層は、金属材料からなる金属層であることを特徴とする請求項 1～8 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 10】

前記受光部の前記負誘電率材料層は、前記周期構造として、前記半導体光検出素子への前記プラズモンの伝搬方向を配列方向として周期的に形成された複数の溝を含む凹凸構造を有することを特徴とする請求項 1～9 のいずれか一項記載の光検出装置。

20

【請求項 11】

前記半導体光検出素子は、前記第 1 面とは反対側の第 2 面側において第 2 溝構造が形成されており、

前記第 2 溝構造は、前記第 1 媒質層と、前記第 2 媒質層とが積層されることで、前記第 2 面での波長 λ の光の反射率を増大する反射構造を構成していることを特徴とする請求項 1～10 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 12】

前記基板上に 1 次元アレイ状または 2 次元アレイ状に配列され、それぞれ前記受光部、及び前記反射低減構造を含む前記半導体光検出素子を有する複数の光検出ユニットを備えることを特徴とする請求項 1～11 のいずれか一項記載の光検出装置。

30

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子を備える光検出装置に関するものである。

【背景技術】

【0002】

中～遠赤外領域（例えば、波長 $3\ \mu\text{m}$ 以上の領域）には、多くの分子に強い吸収が見られ、このような領域は分子の指紋領域として知られている。さらに、波長 $2\ \mu\text{m} \sim 5\ \mu\text{m}$ には、大気に対して透過率が高い領域が存在し、このような領域は大気の窓と呼ばれている。これらの特徴を活かし、中～遠赤外領域の光は、物質の検出、同定等に幅広く応用されている。

40

【0003】

赤外光の利用に必須となる赤外用（主に中赤外用）の光検出器としては、例えば、HgCdTe（MCT）検出器が知られており、実用化されている。しかしながら、MCT 検出器は、駆動速度が通常数 $100\ \text{kHz}$ 程度であり、GHz 以上の高速性を求められる用途には使用することができない。

【0004】

このような問題を解決する赤外光検出器として、近年、量子カスケード検出器（QCD

50

：Quantum Cascade Detector）の研究開発が進められている。量子カスケード検出器は、半導体における伝導帯サブバンド間の電子の高速（サブピコ秒）な遷移を用いていることから、数GHz～数10GHzに及ぶ高速な応答が可能であり、また、駆動電圧を必要としないため、大きなノイズは発生しない。このような量子カスケード検出器は、超高速、かつ低ノイズ、高感度な赤外光検出器として有望である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】国際公開WO2008/075542号

【特許文献2】特開2011-133472号公報

【特許文献3】特開2011-128162号公報

【特許文献4】特開2007-248141号公報

【非特許文献】

【0006】

【非特許文献1】A. Harrer et al., "Plasmonic lens enhanced mid-infrared quantum cascade detector", Appl. Phys. Lett. Vol.105 (2014) pp.171112-1-171112-4

【非特許文献2】Z. Yu et al., "Design of midinfrared photodetectors enhanced by surface plasmons on grating structures", Appl. Phys. Lett. Vol.89 (2006) pp.151116-1-151116-3

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

上記した量子カスケード検出器は、サブバンド間における光学遷移の選択則によって光の入射条件に大きな制約を有している。具体的には、量子カスケード検出器は、量子井戸構造を構成する半導体層の積層方向（成長方向）に沿って振動する偏光（TM偏光）にしか光感度を持たず、受光面積を広くとることができないため、検出器への効率的な被検出光の導入が困難となっている。

【0008】

このため、量子カスケード検出器では、被検出光の入射構成として、へき開端面に光を集光して直接、活性層に入射させる構成、あるいは、活性層を絶縁基板上に成長するとともに、基板を45°に研磨して研磨面から光を入射させ、基板内部での多重反射による光の基板から活性層への染み出しを用いる構成等が用いられている。しかしながら、上記の場合、前者の構成では、受光面の幅が活性層厚とほぼ同程度となってしまう、効率的な光の入射が困難となる。また、後者の構成では、基板に入射させた光のうちで感度に寄与しない成分が多く存在するため、同様に効率的な光の入射構成であるとは言い難い。

【0009】

したがって、量子カスケード検出器では、上記した受光効率の限界が検出器としての感度向上における課題となっている。また、このような受光効率の問題は、検出器のアレイ化、及びそれによる撮像素子への応答展開に向けても高いハードルとなっている。また、このような問題は、量子カスケード検出器以外にも、例えば量子井戸赤外光検出器（QWIP：Quantum Well Infrared Photodetector）など、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子において、同様に生じる。

【0010】

本発明は、以上の問題点を解決するためになされたものであり、赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能な光検出装置を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0011】

このような目的を達成するために、本発明による光検出装置は、（1）基板と、（2）基板上に設けられ、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の活性層を有してメサ型に形成された半導体光検出素子と、（3）基板上に半導体光検出素子とともに設けられ、

10

20

30

40

50

負の誘電率を有する材料からなり周期構造が形成された負誘電率材料層を有し、所定の波長 λ の被検出光の入射に応じてプラズモンを生成するように構成された受光部とを備え、
 (4) 半導体光検出素子は、受光部におけるプラズモンの伝搬方向の一方側に配置され、その第1面がプラズモンに対する入射面となっているとともに、第1面側において溝構造が形成されており、
 (5) 溝構造は、半導体光検出素子を構成する半導体材料からなる屈折率 n_1 の第1媒質層と、溝構造での溝内にある媒質からなる屈折率 n_2 の第2媒質層とが光入射方向に積層されることで、第1面での波長 λ の光の反射率を低減する反射低減構造を構成していることを特徴とする。

【0012】

上記した光検出装置では、基板上に設けられたメサ型のQCD、QWIPなどの半導体光検出素子に対し、被検出光の波長 λ を考慮して設計された負誘電率材料層による周期構造を有する受光部を同一基板上に設けている。そして、受光部の周期構造において、被検出光の入射に応じて表面プラズモンを生成させ、このプラズモンを半導体光検出素子へと伝搬させて、プラズモンに起因する光を光検出素子で検出する構成としている。

【0013】

さらに、このような構成において、上記の光検出装置では、半導体光検出素子で受光部側にあつてプラズモンに対する入射面となる第1面側に、反射低減構造として機能する溝構造を形成している。このように、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子に対して、プラズモン機構を利用した受光部を同一基板上に設けるとともに、光検出素子の入射面側に溝構造を用いた反射低減構造を形成する構成によれば、被検出光に対する受光面積を受光部によって拡大するとともに、受光部から半導体光検出素子への光の伝搬、入射効率を反射低減構造によって向上して、赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能な光検出装置を実現することができる。

【0014】

ここで、上記の光検出装置における反射低減構造の具体的な構成については、反射低減構造は、それぞれ第1媒質層及び第2媒質層を含むM層(Mは1以上の整数)の構造層を有し、M層の構造層での第1媒質層の充填率が q となっているとともに、第1媒質層と第2媒質層との平均屈折率

$$n_{eff} = \{q n_1^2 + (1 - q) n_2^2\}^{1/2}$$

が、第1媒質層及び第2媒質層の屈折率の積の平方根で表される最適屈折率

$$n_{opt} = (n_1 n_2)^{1/2}$$

に対して $\pm 20\%$ の範囲内となり、層厚 l が、最適層厚

$$l_{opt} = \lambda / 4 n_{opt}$$

に対して $\pm 20\%$ の範囲内となる構成を用いることができる。

【0015】

あるいは、反射低減構造は、それぞれ第1媒質層及び第2媒質層を含み、第1媒質層の充填率が $q_1 \sim q_M$ のM層(Mは2以上の整数)の構造層を有し、M層の構造層が、第1面側から光入射方向に第1構造層～第M構造層の順で積層されているとともに、M層の構造層に含まれる第m構造層(mは1以上M以下の整数)での第1媒質層と第2媒質層との平均屈折率

$$n_{eff, m} = \{q_m n_1^2 + (1 - q_m) n_2^2\}^{1/2}$$

が、第1構造層から第M構造層に向けて段階的に第2媒質層の屈折率 n_2 から第1媒質層の屈折率 n_1 へと近づく構成を用いることができる。

【0016】

また、この場合、反射低減構造は、第m構造層での第1媒質層の充填率 q_m が、0と1との間において間隔 $\Delta q = 1 / (M + 1)$ で等間隔に設定された目標充填率

$$q_{t, m} = m / (M + 1)$$

に対して $\pm \Delta q / 2$ の範囲内となり、第m構造層の層厚 l_m が、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t, m}$ と一致させた場合の目標層厚

$$l_{t, m} = \lambda / 4 n_{eff, t, m}$$

10

20

30

40

50

に対して±30%の範囲内となる構成としても良い。

【0017】

これらの構成を有する反射低減構造によれば、半導体光検出素子の入射面での光の反射率を好適に低減して、受光部から光検出素子へのプラズモンに起因する光の入射効率を充分に向上することができる。また、反射低減構造の具体的な構成については、上記以外にも様々な構成を用いることが可能である。

【0018】

また、上記の光検出装置における半導体光検出素子については、吸収井戸層として機能する第1井戸層を含むN個（Nは3以上の整数）の量子井戸層、及びN個の量子障壁層からなる単位積層体が多段に積層されることで、第1井戸層を含みサブバンド間吸収によって光を検出する吸収領域と、サブバンド間吸収によって励起された電子を輸送する輸送領域とが交互に積層されたカスケード構造が形成された活性層を有する量子カスケード検出器（QCD）を用いることができる。あるいは、半導体光検出素子として、量子井戸赤外光検出器（QWIP）などのQCD以外の光検出素子を用いても良い。

【0019】

また、上記の光検出装置は、基板上で半導体光検出素子と受光部との間に設けられ、負の誘電率を有する材料からなる導波路層を有し、受光部で生成されたプラズモンを半導体光検出素子へと伝搬させるように構成された導波路部をさらに備える構成としても良い。このように、基板上の受光部及び半導体光検出素子に対して、それらの間に導波路部を設ける構成によれば、受光部で生成されたプラズモンを光検出素子へと高効率で伝搬、入射させることが可能となる。

【0020】

この場合、導波路部は、導波路層と、導波路層上に形成された誘電体材料からなる誘電体層とによって構成されていることとしても良い。また、導波路部は、受光部から半導体光検出素子へと導波路幅が減少するテーパ形状に形成されている構成としても良い。これらの構成によれば、導波路部によるプラズモンの伝搬効率を向上することができる。

【0021】

受光部において周期構造が形成される負誘電率材料層については、具体的には例えば、受光部の負誘電率材料層は、金属材料からなる金属層である構成とすることができる。また、受光部の負誘電率材料層は、周期構造として、半導体光検出素子へのプラズモンの伝搬方向を配列方向として周期的に形成された複数の溝（溝構造）を含む凹凸構造（格子構造）を有する構成とすることができる。

【0022】

また、上記の光検出装置は、半導体光検出素子が、第1面とは反対側の第2面側において第2溝構造が形成されており、第2溝構造は、第1媒質層と、第2媒質層とが積層されることで、第2面での波長λの光の反射率を増大する反射構造を構成していることとしても良い。このように、半導体光検出素子において、第1面側の反射低減構造に加えて、第2面側にブラッグ反射構造などの反射構造を形成する構成によれば、光検出素子における光の検出効率をさらに向上することができる。

【0023】

また、上記の光検出装置は、基板上に1次元アレイ状、または2次元アレイ状に配列され、それぞれ受光部、及び反射低減構造を含む半導体光検出素子を有する複数の光検出ユニットを備える構成としても良い。このような光検出装置は、例えば1次元または2次元の撮像素子として利用することが可能である。

【発明の効果】

【0024】

本発明の光検出装置によれば、メサ型の半導体光検出素子とともに基板上に設けられた負誘電率材料層による周期構造を有する受光部において、被検出光の入射に応じて表面プラズモンを生成させ、このプラズモンを光検出素子へと伝搬させて、プラズモンに起因する光を光検出素子で検出する構成とするとともに、光検出素子においてプラズモンに起因

10

20

30

40

50

する光の入射面となる第 1 面側に、反射低減構造として機能する溝構造を形成することにより、赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【0025】

【図 1】光検出装置の第 1 実施形態の構成を示す平面図である。

【図 2】図 1 に示した光検出装置の (a) 断面構成を示す II-II 線に沿った側面断面図、及び (b) 側面断面図における被検出光の入射、及びプラズモンの伝搬について模式的に示す図である。

【図 3】第 1 実施形態の光検出装置における量子カスケード検出器及び反射低減構造の構成を一部拡大して示す (a) 平面図、及び (b) 側面断面図である。

10

【図 4】光検出装置の変形例の構成を示す側面断面図である。

【図 5】量子カスケード検出器における半導体積層構造の一例を示す図表である。

【図 6】量子カスケード検出器における活性層を構成する単位積層体の構成の一例を示す図である。

【図 7】反射低減構造における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 8】反射低減構造における光の反射率の半導体材料の充填率 q に対する依存性を示すグラフである。

【図 9】第 2 実施形態の光検出装置における量子カスケード検出器及び反射低減構造の構成を一部拡大して示す (a) 平面図、及び (b) 側面断面図である。

【図 10】図 9 に示した反射低減構造における第 1 ～ 第 4 構造層の構成の一例を示す図表である。

20

【図 11】反射低減構造における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 12】反射低減構造における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。

【図 13】光検出装置の第 3 実施形態の構成を示す平面図である。

【図 14】光検出装置の第 4 実施形態の構成を示す平面図である。

【図 15】光検出装置の第 5 実施形態の構成を示す平面図である。

【図 16】光検出装置の第 6 実施形態の構成を示す側面断面図である。

【図 17】反射構造における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。

【発明を実施するための形態】

【0026】

30

以下、図面とともに、本発明による光検出装置の実施形態について、詳細に説明する。なお、図面の説明においては同一要素には同一符号を付し、重複する説明を省略する。また、図面の寸法比率は、説明のものと必ずしも一致していない。

【0027】

[第 1 実施形態]

【0028】

図 1 は、本発明による光検出装置の第 1 実施形態の構成を示す平面図である。また、図 2 (a) は、図 1 に示した光検出装置の断面構成を示す II-II 線に沿った側面断面図であり、図 2 (b) は、光検出装置の側面断面図における被検出光の入射、及びプラズモンの伝搬等について模式的に示す図である。また、図 3 は、図 1 に示した第 1 実施形態の光検出装置における量子カスケード検出器及び反射低減構造の構成を一部拡大して示す (a) 平面図、及び (b) 側面断面図である。

40

【0029】

本実施形態の光検出装置 1 A は、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子 30 を備える半導体光検出装置である。このような半導体光検出素子は、上述したように、サブバンド間における光学遷移の選択則によって光の入射条件に大きな制約を有している。以下、光検出装置 1 A の構成について、その具体的な構成例とともに説明する。また、以下においては、上記したサブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子 30 について、量子カスケード検出器 (QCD) を例として説明する。

【0030】

50

図1～図3に示す半導体光検出装置1Aは、基板10と、半導体光検出素子である量子カスケード検出器30と、受光部20と、導波路部50とを備えて構成されている。基板10は、例えば矩形状の半導体基板からなり、その一方の面(図2中の上面)の検出器形成領域11a上に量子カスケード検出器30が設けられ、また、受光部形成領域11b上に受光部20及び導波路部50が設けられている。本実施形態では、図2(a)に示すように、受光部形成領域11bは、検出器形成領域11aよりも低い面部分となっている。また、基板10の他方の面(図2中の下面)上には、検出器30の駆動に用いられる下部電極12が形成されている。

【0031】

量子カスケード検出器30は、上記したように伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の活性層35を有しており、基板10上においてメサ型に形成されている。図3に示す構成例では、量子カスケード検出器30は、基板10上に下部コンタクト層31、活性層35、クラッド層32、及び上部コンタクト層33を順に形成することで構成されている。また、上部コンタクト層33上には、下部電極12とともに検出器30の駆動に用いられる上部電極13が形成されている。なお、図3(a)においては、上部電極13の図示を省略している。

【0032】

量子カスケード検出器30の活性層35においては、吸収井戸層として機能する第1井戸層を含むN個(Nは3以上の整数)の量子井戸層、及びN個の量子障壁層からなる単位積層体36(図3(b)参照)が多段に積層されることで、第1井戸層を含みサブバンド間吸収によって光を検出する吸収領域と、サブバンド間吸収によって励起された電子を輸送する輸送領域とが交互に積層されたカスケード構造が形成されている。なお、活性層35に含まれる単位積層体36の構成については、具体的には後述する。

【0033】

受光部20は、基板10上に検出器30とともに設けられ、負の誘電率を有する材料からなる負誘電率材料層21を有して構成されている。以下においては、負誘電率材料層21について、例えばAu(金)などの金属材料からなる金属層とする。金属層21には、光検出装置1Aでの検出対象となる被検出光の波長 λ を考慮して設計された周期構造22が形成されている。このように設計された構成の周期構造22により、受光部20は、波長 λ の被検出光Aの入射(図2(b)参照)に応じて、表面プラズモンを生成するように構成されている。

【0034】

図1、図2に示す構成例では、金属層21には、量子カスケード検出器30へと向かうプラズモンの伝搬方向を配列方向として、複数の溝が周期的に形成されている。これにより、本構成例での周期構造22は、プラズモンの伝搬方向と直交する方向を長手方向とする直線状の凸部22a及び凹部(溝部)22bが複数、交互に形成された凹凸構造(格子構造)となっている。また、受光部20の検出器30とは反対側には、検出器30側へとプラズモンを反射させるブラッグ反射構造25が設けられている。なお、図1では、見易さのため、受光部20と反射構造25とを、破線で区切って示している。

【0035】

量子カスケード検出器30は、受光部20におけるプラズモンの伝搬方向(周期構造22での凸部22a、凹部22bの配列方向)の一方側に配置されており、その第1面(図2中の左側の面)30aが、プラズモン(プラズモンに起因する光)に対する入射面となっている。また、この検出器30の入射面30a側には、検出器30の上面(基板10とは反対側の面)から形成された1または複数の溝からなる溝構造が形成されている。この溝構造は、検出器30を構成する半導体材料からなる屈折率 n_1 の第1媒質層と、溝構造での溝内にある媒質(例えば空気)からなる屈折率 n_2 の第2媒質層とが光入射方向に積層されることで、第1面30aでの波長 λ の光の反射率を低減する反射低減構造40を構成している。なお、量子カスケード検出器30の第1面30aでの光入射方向は、受光部20でのプラズモンの伝搬方向に対応している。

【0036】

量子カスケード検出器30と、受光部20との間の基板10上には、プラズモン導波路部50が設けられている。導波路部50は、負の誘電率を有する材料からなる導波路層51を有し、図2(b)に矢印A2によって伝搬方向を示すように、受光部20において生成されたプラズモンを検出器30へと伝搬させるように構成されている。

【0037】

本実施形態においては、導波路層51は、受光部20の負誘電率材料層21と同様に、例えばAuなどの金属材料からなる金属層によって構成されており、また、金属導波路層51上には、誘電体材料からなる誘電体層52が形成されている。また、導波路層51及び誘電体層52を含む導波路部50は、図1に示すように、受光部20から量子カスケード検出器30へ向けて次第に導波路幅が減少するテーパ形状に形成されている。また、導波路部50の検出器30側の端面と、検出器30の入射面である第1面30aとは、充分に近接するように配置されている。

【0038】

本実施形態による光検出装置1Aの効果について説明する。

【0039】

図1～図3に示した光検出装置1Aでは、基板10上に設けられたメサ型の半導体光検出素子である量子カスケード検出器30に対し、被検出光Aの波長 λ を考慮して設計された金属層21による周期構造22を有する受光部20を同一基板10上に設けている。そして、受光部20の周期構造22において、被検出光の入射に応じて表面プラズモンを生成させ、このプラズモンを量子カスケード検出器30へと伝搬させて、プラズモンに起因する光を検出器30で検出する構成としている。

【0040】

さらに、このような構成において、光検出装置1Aでは、検出器30で受光部20側にある半導体積層方向と平行な側面であって、プラズモンに起因する光に対する入射面となる第1面30a側に、第1面30aと略平行に形成された1または複数の溝からなり反射低減構造40として機能する溝構造を設けている。

【0041】

このように、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子である量子カスケード検出器30に対して、プラズモン機構を利用した受光部20を同一基板10上に設けるとともに、検出器30の入射面30a側に溝構造を用いた反射低減構造40を形成する構成によれば、光検出装置1Aへと入射する被検出光Aに対する受光面積を受光部20によって拡大するとともに、受光部20から量子カスケード検出器30への光の伝搬、入射効率を反射低減構造40によって向上して、赤外光などの被検出光Aを高速、高感度で検出することが可能な光検出装置1Aを実現することができる。

【0042】

ここで、プラズモン機構を利用した受光部による量子カスケード検出器への光の入射構成については、例えば非特許文献1(A. Harrer et al., Appl. Phys. Lett. Vol.105 (2014) pp.171112-1-171112-4)に記載されている。しかしながら、非特許文献1に記載の構成では、プラズモン導波路の終端面と、検出器の入射面との間で光学インピーダンスの整合がとれておらず、したがって、光の反射による損失が発生する。

【0043】

通常、量子カスケード検出器等の半導体光検出素子を構成する半導体材料の屈折率は、例えば3.2～3.3程度であり、空気から光が垂直入射した場合の反射率は、約30%である。このような光の反射を低減するための構成としては、一般に、光入射面に対して誘電体多層膜による低反射コートを施す構成が考えられる。しかしながら、上記のように同一基板上に半導体光検出素子と受光部とを形成する構成では、その構造上の特徴から、プラズモン受光部または導波路部の終端面に近接している検出器の入射面に蒸着等によって誘電体多層膜を形成することは、極めて困難である。

【0044】

これに対して、上記実施形態による光検出装置 1 A では、量子カスケード検出器 3 0 の受光部 2 0 側の第 1 面 3 0 a に誘電体多層膜等を形成するのではなく、膜の蒸着等を用いずにエッチングによって形成することが可能な溝構造による光学インピーダンス調整機構を設け、この溝構造を、受光部 2 0 及び導波路部 5 0 から入射する光に対する反射低減構造 4 0 としている。これにより、受光部 2 0 からのプラズモンに起因する光を検出器 3 0 の内部へと効率的に入射させて、赤外光などの被検出光 A に対して高い検出感度を有する光検出装置 1 A を好適に実現することが可能となる。

【0045】

光検出装置 1 A において用いられる伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子 3 0 については、上記実施形態で例示したように、吸収井戸層として機能する第 1 井戸層を含む N 個の量子井戸層、及び N 個の量子障壁層からなる単位積層体が多段に積層されることで、第 1 井戸層を含みサブバンド間吸収によって光を検出する吸収領域と、サブバンド間吸収によって励起された電子を輸送する輸送領域とが交互に積層されたカスケード構造が形成された活性層 3 5 を有する量子カスケード検出器 (QCD) を好適に用いることができる。

【0046】

あるいは、上記の半導体光検出素子としては、量子カスケード検出器以外の素子、例えば量子井戸赤外光検出器 (QWIP) を用いても良い。QWIP においても、サブバンド間における光学遷移の選択則による光の入射条件の制約については QCD と同様であり、したがって、光検出装置 1 A に関して上述したように、QWIP の検出器 3 0 に対して、プラズモン機構を利用した受光部 2 0 を同一基板 1 0 上に設けるとともに、検出器の入射面 3 0 a 側に反射低減構造 4 0 を形成することにより、被検出光を高速、高感度で検出することが可能な光検出装置を実現することができる。

【0047】

ただし、QWIP の場合、素子を駆動するために高い駆動電圧が必要となることから、比較的大きなノイズが発生して、光検出における SN 比が悪化する場合がある。これに対して、上記実施形態のように、半導体光検出素子として QCD を用いた場合、駆動電圧を必要としないため、大きなノイズは発生せず、したがって、低ノイズの光検出装置とすることができるという利点がある。

【0048】

また、上記構成の光検出装置 1 A では、図 1、図 2 に示したように、基板 1 0 上で量子カスケード検出器 3 0 と受光部 2 0 との間に設けられた導波路層 5 1 を有し、受光部 2 0 で生成されたプラズモンを検出器 3 0 へと伝搬させるように構成された導波路部 5 0 をさらに備えることが好ましい。このようにプラズモン導波路部 5 0 を設ける構成によれば、受光部 2 0 で生成されたプラズモンを検出器 3 0 へと高効率で伝搬、入射させて、光検出装置 1 A での被検出光 A の検出効率を向上することが可能となる。ただし、このような導波路部 5 0 については、不要であれば設けない構成としても良い。

【0049】

また、このように導波路部 5 0 が形成されている場合、導波路部 5 0 は、金属層などからなる導波路層 5 1 と、導波路層 5 1 上に形成された誘電体材料からなる誘電体層 5 2 とによって構成されていることが好ましい。これにより、導波路部 5 0 におけるプラズモンの伝搬を好適に実現することができる。ただし、導波路部 5 0 については、誘電体層 5 2 を設けずに、金属層などの導波路層 5 1 と、導波路層 5 1 の上面に接する空気の層とによって、プラズモン導波路を構成しても良い。

【0050】

また、導波路部 5 0 は、図 1 に示したように、受光部 2 0 から量子カスケード検出器 3 0 へと導波路幅が減少するテーパ形状に形成されている構成としても良い。このような構成によっても、プラズモン導波路部 5 0 による検出器 3 0 へのプラズモンの伝搬効率を向上することができる。

【0051】

受光部 20 において周期構造 22 が形成される負誘電率材料層 21 としては、具体的には例えば、上記したように、金属材料からなる金属層を用いることができる。また、受光部 20 の負誘電率材料層 21 は、周期構造 22 として、量子カスケード検出器 30 へのプラズモンの伝搬方向を配列方向として周期的に形成された複数の溝による凹凸構造（格子構造）を有する構成とすることができる。この場合、周期構造 22 として形成された複数の溝（溝による凸部 22 a、凹部 22 b）の形状は、図 1 に示したように、直線状であることが好ましく、あるいは同心円状である構成としても良い。

【0052】

また、光検出装置 1A における反射低減構造 40 の具体的な構成については、反射低減構造 40 は、M を 1 以上の整数として、それぞれ第 1 媒質層（半導体層）及び第 2 媒質層（例えば溝内の空気層）を含む M 層の構造層を有し、M 層の構造層での第 1 媒質層の充填率が q となっているとともに、第 1 媒質層と第 2 媒質層との平均屈折率

$$n_{eff} = \{q n_1^2 + (1-q) n_2^2\}^{1/2}$$

が、第 1 媒質層及び第 2 媒質層の屈折率の積の平方根で表される最適屈折率

$$n_{opt} = (n_1 n_2)^{1/2}$$

に対して ±20% の範囲内となり、層厚 l が、最適層厚

$$l_{opt} = \lambda / 4 n_{opt}$$

に対して ±20% の範囲内となる構成を用いることができる。

【0053】

また、このような構成では、反射低減構造 40 は、それぞれ第 1 媒質層及び第 2 媒質層を含む M 層の構造層を有し、M 層の構造層での第 1 媒質層の充填率が q となっているとともに、第 1 媒質層と第 2 媒質層との平均屈折率

$$n_{eff} = \{q n_1^2 + (1-q) n_2^2\}^{1/2}$$

が、第 1 媒質層及び第 2 媒質層の屈折率の積の平方根で表される最適屈折率

$$n_{opt} = (n_1 n_2)^{1/2}$$

と略一致し、層厚 l が、最適層厚

$$l_{opt} = \lambda / 4 n_{opt}$$

と略一致する構成とすることが、特に好ましい。

【0054】

あるいは、反射低減構造 40 は、M を 2 以上の整数として、それぞれ第 1 媒質層及び第 2 媒質層を含み、第 1 媒質層の充填率が $q_1 \sim q_M$ の M 層の構造層を有し、それら M 層の構造層が、第 1 面 30 a 側から光入射方向に第 1 構造層～第 M 構造層の順で積層されているとともに、M 層の構造層に含まれる第 m 構造層（m は 1 以上 M 以下の整数）での第 1 媒質層と第 2 媒質層との平均屈折率

$$n_{eff, m} = \{q_m n_1^2 + (1-q_m) n_2^2\}^{1/2}$$

が、第 1 構造層から第 M 構造層に向けて段階的に第 2 媒質層の屈折率 n_2 から第 1 媒質層の屈折率 n_1 へと近づく構成を用いることができる。

【0055】

また、この場合、反射低減構造 40 は、第 m 構造層での第 1 媒質層の充填率 q_m が、0 と 1 との間において間隔 $\Delta q = 1 / (M + 1)$ で等間隔に設定された目標充填率

$$q_{t, m} = m / (M + 1)$$

に対して $\pm \Delta q / 2$ の範囲内となり、第 m 構造層の層厚 l_m が、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t, m}$ と一致させた場合の目標層厚

$$l_{t, m} = \lambda / 4 n_{eff, t, m}$$

に対して ±30% の範囲内となる構成としても良い。

【0056】

また、このような構成では、反射低減構造 40 は、第 m 構造層での第 1 媒質層の充填率 q_m が、0 と 1 との間において間隔 $\Delta q = 1 / (M + 1)$ で等間隔に設定された目標充填率

$$q_{t, m} = m / (M + 1)$$

と略一致し、第 m 構造層の層厚 l_m が、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t,m}$ と一致させた場合の目標層厚

$$l_{t,m} = \lambda / 4 n_{eff,t,m}$$

と略一致する構成とすることが、特に好ましい。

【0057】

これらの構成を有する反射低減構造40によれば、量子カスケード検出器30の入射面30aでの光の反射率を好適に低減して、受光部20から検出器30へのプラズモンに起因する光の入射効率を十分に向上することができる。また、反射低減構造40の具体的な構成については、上記以外にも様々な構成を用いることができる。なお、反射低減構造40の構成の具体例、及びその構成条件については、さらに後述する。

10

【0058】

図1～図3に示した光検出装置1Aにおける各部の具体的な構成について、さらに説明する。最初に、被検出光Aの入射に応じて表面プラズモンを生成する受光部20の構成について、具体的に説明する。以下においては、受光部20を構成する負誘電率材料層21について、金属であるAu（金）を材料とするAu層を用いた場合を例として説明する。ただし、負誘電率材料層21については、Au以外の金属等の材料を用いても良い。

【0059】

受光部20のAu層21においては、図1、図2に直線状の溝構造による凹凸構造を例示したように、光検出装置1Aに入射する被検出光Aの波長 λ に応じた周期を有する周期構造22が形成される。このような周期構造22における周期は、下記の式(1)によって求めることができる。

20

【数1】

$$\frac{2\pi}{\Lambda} + \frac{2\pi}{\lambda} \sin \theta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{\epsilon_1 \epsilon_2}{\epsilon_1 + \epsilon_2}} \quad \dots(1)$$

ここで、 Λ は周期構造22の周期、 λ は入射する被検出光Aの波長、また、 ϵ は媒質の誘電率である。

【0060】

30

ϵ_1 と ϵ_2 とは、周期構造22を構成する異なる2つの媒質の誘電率の実部を示している。例えば、図2に示した構成において、周期構造22を構成する媒質として、凸部22aにおける第1媒質であるAu（金）、及び凹部22bにおける第2媒質である溝内の空気を用いた場合、Auの誘電率は $\epsilon_1 = -843.2$ 、空気の誘電率は $\epsilon_2 = 1$ となる。また、 θ は、受光部20で周期構造22が形成されている面（周期構造面）の垂線からみた被検出光Aの入射角度である。

【0061】

ここで、受光部20の周期構造22に対して、被検出光Aを垂直に入射させる場合を考える。この場合、入射角度が $\theta = 0^\circ$ となるため、この条件で上記の式(1)を Λ について解くと、下記の式(2)

40

【数2】

$$\Lambda = \lambda \sqrt{\frac{\epsilon_1 + \epsilon_2}{\epsilon_1 \epsilon_2}} \quad \dots(2)$$

が得られる。以上から、例えば被検出光Aの波長を $\lambda = 4.5 \mu m$ とした場合、周期構造22の最適な周期 Λ は、 $4.49 \mu m$ と求められる。また、周期構造22となる格子構造（凹凸構造）での凹凸のデューティ比は、例えば50%に設定することができる。また、格子構造での溝深さは、例えば $0.5 \mu m$ に設定することができる。

【0062】

50

また、被検出光 A の入射によって受光部 20 で生成されるプラズモンの周期構造面上での伝搬長（伝搬損失により電界強度が $1/e$ になる距離） L_x は、下記の式（3）によって求めることができる。

【数 3】

$$L_x = \frac{\lambda}{4\pi} \left[\text{Im} \left(\sqrt{\frac{\varepsilon_1' \varepsilon_2'}{\varepsilon_1' + \varepsilon_2'}} \right) \right]^{-1} \quad \dots(3)$$

ここで、 ε_1' 、 ε_2' は、それぞれ第 1 媒質である Au、及び第 2 媒質である空気の複素誘電率であり、Au については、上記の実部と合わせて $\varepsilon_1 = -843.2 + 229.1i$ 、空気については、 $\varepsilon_2 = 1$ となる。ただし、 i は虚数単位である。

【0063】

各パラメータを式（3）に代入して伝搬長 L_x を計算すると、約 2.4 mm と求められる。このことから、本構成例において、周期 $4.49 \text{ }\mu\text{m}$ の周期構造 22 における周期数の最大値は、伝搬損失を考慮して例えば 500 に設定すれば良い。一方、周期数の最小値については、周期構造 22 における周期数を 5 周期以上とすることにより、受光部 20 のプラズモンの生成、増強の効果が十分に得られると考えられることから（非特許文献 2（Z. Yu et al., Appl. Phys. Lett. Vol.89 (2006) pp.151116-1-151116-3）参照）、周期数の最小値を 5 に設定することが好ましい。また、受光部 20 における周期構造 22 の幅 L_3 （図 1 参照）については、特に制限はなく、例えば $L_3 = 1 \text{ mm}$ に設定することができる。

【0064】

このような構成の受光部 20 において、図 2（b）に被検出光 A、及びその電場の振動方向 A1 を模式的に示すように、周期構造 22 に入射する被検出光 A のうち、周期構造 22 の溝構造のストライプと垂直な方向の偏光成分によって、点線で囲んで示した凸部 22a のエッジ部分 22c に増強された電場が生じる。この電場は、光（電磁波）の入射によって Au 層 21 の内部の自由電子が振動し、電子の疎密波が形成されることに起因するものである。このような電子の疎密波と、金属の表面に染み出した入射光とが結合した連成波をプラズモンとよぶ。上記したように、式（2）で示した周期 Λ と、被検出光 A の入射波長 λ とをほぼ対応、一致させることで、受光部 20 の周期構造面上に増強された電場を生成させることができる。

【0065】

受光部 20 において被検出光 A の入射に応じて生成されたプラズモンは、Au 層 21 の周期構造 22 の表面（周期構造面）をストライプと垂直な方向に伝搬する。また、これに付随して、周期構造面上を増強された電場が、周期構造面と垂直な方向に振動しながら伝搬する。このようなメカニズムで生成された TM モードに相当する電場を、Au / 誘電体導波路部 50 を介して検出器 30 へと導くことで、光検出装置 1A に入射した被検出光 A を検出するための光感度を得ることができる。

【0066】

受光部 20 から量子カスケード検出器 30 への電場の導入は、上記のように検出器 30 に向かってテーパ形状に形成された導波路部 50 によって行われる。導波路部 50 の終端面と、検出器 30 の入射面 30a とは、図 2 に示すように、例えば $1 \text{ }\mu\text{m} \sim 10 \text{ }\mu\text{m}$ の間隔をあけて空気の層を介して近接配置され、これにより、プラズモンに起因する光の検出器 30 への伝搬、入射が可能となっている。ただし、導波路部 50 と量子カスケード検出器 30 との配置関係については、図 4 に光検出装置の変形例の構成を側面断面図によって示すように、空気の層を介さずに導波路部 50 の終端面と、検出器 30 の入射面 30a とを直接接続する構成としても良い。

【0067】

導波路部 50 は、図 1 に示すように、例えば、入口側（受光部 20 側）は周期構造 22

の幅 L_3 と略同じ幅とし、出口側（検出器 30 側）は検出器 30 の入射面 30a と略同じ幅として形成される。このような構成では、受光部 20 からのプラズモンが検出器 30 の入射面に向かって狭窄され、周期構造面上の電場をしばられた状態で検出器 30 へと入射させることができる。これにより、光検出装置 1A における受光面積（受光部 20 での周期構造 22 の面積）を大きく保ちつつ、量子カスケード検出器 30 を小型化することができる。また、導波路部 50 のプラズモン導波路長 D は、例えば $300\ \mu\text{m}$ に設定することができる。

【0068】

ここで、プラズモンに付随して伝搬する周期構造面上の電場は、周期構造面から離れるにしたがって指数関数的に減衰する。導波路部 50 では、このような電場の空間的な広がり

10

【0069】

を抑制し、量子カスケード検出器 30 での活性層 35 の層厚と同程度に電場を閉じ込めた状態で検出器 30 と結合させることで、光の入射効率を向上することができる。

【0070】

このような条件を実現するためには、上記したような Au 導波路層 51 及び誘電体層 52 によるプラズモン導波路構造において、誘電体層 52 の誘電体材料として屈折率が高い材料を用いれば良い。このような誘電体材料としては、例えば Ge（ゲルマニウム）が挙げられる。また、誘電体層 52 の層厚については、例えば検出器 30 の活性層 35 の層厚と同程度またはそれ以下、好ましくは活性層 35 の層厚の半分以下に設定すれば良い。

20

【0071】

また、受光部 20 において被検出光 A の入射に応じて生成されるプラズモンは、周期構造面上をストライプの長手方向と垂直な方向に等方的に伝搬するため、検出器 30 とは逆の方向にもプラズモンが進行する。これに対し、上記実施形態の光検出装置 1A では、受光部 20 に対して検出器 30 とは反対側にブラッグ反射構造 25 を設けることで、検出器 30 とは逆方向に進行する電場を光感度

30

【0072】

に寄与させる構成としている。この反射構造 25 は、例えば受光部 20 の周期構造 22 と同様に Au 層 21 の凹凸構造によって構成し、周期が波長 λ の $1/2$ となるようにデューティ比 50% で 2 周期以上の反射構造を形成することが好ましい。

40

【0073】

本構成例における活性層 35 の量子井戸構造では、吸収波長を $\lambda = 4.5\ \mu\text{m}$ （エネルギー 275 meV ）として設計された例を示している。図 6 においては、活性層 35 での吸収領域 37 及び輸送領域 38 を含む単位積層体 36 の多段の繰返し構造のうちの一部について、その量子井戸構造、及び伝導帯サブバンド準位によるサブバンド準位構造を示している。また、量子カスケード検出器 30 における半導体積層構造による素子構造は、例えば、分子線エピタキシー（MBE：Molecular Beam Epitaxy）法、または有機金属気相成長（MOCVD：MetalOrganic Chemical Vapor Deposition）法などによる結晶成長で形成することができる。

50

、及び厚さ25nmのInP上部コンタクト層33が順次積層されることで、量子カスケード検出器30の素子構造が形成されている。

【0074】

活性層35の上方には、光を効率的に閉じ込めるためのクラッド層32が設けられている。このクラッド層32は、検出器30の内部に進入した光がメサ構造の上部にある電極13に接触して、損失が生じることを防ぐ機能を有する。クラッド層32としては、具体的には例えば、濃度 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ でSiがドーブされたInP層を用いることができる。また、クラッド層32の層厚については、対象波長 λ の $1/2$ 以上から波長 λ と同程度の厚さとするのが好ましい。

【0075】

本構成例における活性層35は、吸収領域37及び輸送領域38を含む単位積層体36が複数周期で繰り返し積層されて構成されている。活性層35における単位積層体36の積層周期数は、例えば、10～50周期に設定することができる。また、1周期分の単位積層体36は、図5、図6に示すように、7個の量子井戸層361～367、及び7個の量子障壁層371～377が交互に積層された量子井戸構造として構成されている。

【0076】

これらの単位積層体36の各半導体層のうち、量子井戸層361～367は、それぞれInGaAs層によって構成されている。また、量子障壁層371～377は、それぞれInAlAs層によって構成されている。これにより、本構成例の活性層35は、InGaAs/InAlAs量子井戸構造によって構成されている。なお、活性層35を構成する各井戸層、障壁層の層厚については、図5に示す通りである。

【0077】

このような単位積層体36において、第1障壁層371、及び第1井戸層361は、サブバンド間吸収によって光を検出する吸収領域37を構成している。また、第2～第7障壁層372～377、及び第2～第7井戸層362～367は、サブバンド間吸収によって励起された電子を次周期の吸収領域37bへと輸送する輸送領域38を構成している。また、光吸収に用いられる吸収井戸層として機能する第1井戸層361には、キャリアである電子を供給するために、n型不純物であるSiが濃度 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ でドーブされている。

【0078】

このような構成において、単位積層体36は、その図6に示すサブバンド準位構造において、光検出に用いられる伝導帯サブバンド準位として、吸収領域37での光吸収に寄与する検出下準位(detection lower level) L_1 、検出上準位(detection upper level) L_2 、及び輸送領域38での電子輸送に寄与する複数の輸送準位(transport levels)を有している。

【0079】

このような単位積層体36を有する活性層35に波長 λ の光が入射すると、検出下準位 L_1 に存在する電子は、サブバンド間吸収によって検出上準位 L_2 へと励起される。上準位 L_2 に励起された電子は、輸送領域38での複数の輸送準位からなる輸送準位構造を介して、後段の吸収領域37bの検出下準位 L_1 へと輸送、抽出される。このような光吸収による電子励起、励起された電子の緩和、輸送、及び次周期の単位積層体への電子の抽出を、活性層35を構成する複数の単位積層体36で繰り返すことにより、活性層35においてカスケード的な光吸収が起こる。そして、これによって発生する電流を信号として取り出し、その電流量を計測することで、入射光が検出される。

【0080】

活性層35を含む量子カスケード検出器30の半導体積層構造は、例えば反応性イオンエッチング(ドライエッチング)によって基板10に対して垂直にエッチングされ、これによって、図1～図3に示したメサ構造を有する検出器30が作製される。このときのエッチング深さ d (図2(b)参照)は、好ましくは、活性層35の下端よりも200nm～300nm深い位置となるように設定する。

10

20

30

40

50

【0081】

また、これに対し、導波路部50として用いられるAu導波路層51及び誘電体層52の合計層厚を、300nm以上1μm以下となるように設定する。これにより、プラズモン導波路として機能する誘電体層52の位置を、検出器30の活性層35に対応する範囲内に設定することができる。ここで、導波路部50を伝搬する電場は、主に誘電体層52内部及びその上面付近に存在している。このため、検出器30における活性層35と、導波路部50における誘電体層52との高さをそろえることで、検出器30へと効率良く光を入射させることができる。

【0082】

メサ構造を有する量子カスケード検出器30のメササイズについては、例えば、入射面30aの幅となる検出器幅L2（図1参照）を50μm、検出器長L1を200μmに設定することができる。検出器長L1は、例えば入射光の強度が検出器30の内部で1/eとなる長さに設定することができる。このような検出器長は、例えば、活性層35へのドーピング量を $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ とした場合の波長 $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ の光に対する吸収係数（ 51 cm^{-1} ）から求めることができる。

【0083】

次に、受光部20における周期構造22、及び導波路部50の作製方法について説明する。上記のように量子カスケード検出器30のメサ構造を形成した後、エッチングによって露出した基板面に、Au層21となるAuを例えば0.6μm以上1μm以下の厚さで蒸着し、フォトリソグラフィ及びドライエッチングを施すことにより、上記の式（2）で求められる周期Λを有する周期構造22を作製する。また、周期構造22での溝深さは、例えば上記したように0.5μmとする。

【0084】

このような周期構造22の作製においては、例えば、SiNなどのAu以外の材料を基板面にあらかじめ蒸着しておき、所望の周期で深さ0.5μmの溝を作製し、その上からAuを蒸着するという方法を用いても良い。

【0085】

周期構造22を有する受光部20と、メサ型の検出器30との間には、例えば導波路長 $D = 300 \mu\text{m}$ のテーパ形状の導波路部50を作製する。プラズモン導波路に用いられるAu導波路層51は、基板面に直接蒸着する。このとき、SiNなどの材料で検出器30のメサ側面を含む全ての面を保護しておく。導波路の形成のためには、周期構造22と同様にフォトリソグラフィ及びドライエッチングを施す。また、必要に応じて、Au導波路層51上に誘電体層52を蒸着等によって形成する。

【0086】

最後に、検出器30を保護していたSiNを除去する。この際に、図2に示すように、導波路部50の終端面と検出器30の入射面30aとの間に、例えば数μmの隙間が形成される。あるいは、図4に示すように、導波路部50の終端面と検出器30の入射面30aとを直接接続させた構成としても良い。このような構成では、導波路部50と検出器30との間に空気による隙間が生じないため、プラズモンに起因する光をより効率良く検出器30へと入射させることができる。この場合の作製方法としては、反射低減構造40を含む検出器30のメサ構造の上部のみにレジストを塗布しておき、導波路部50を構成するAu及び誘電体を蒸着した後に、検出器30のメサ上部のレジストを除去する方法を用いることができる。

【0087】

次に、量子カスケード検出器30の入射面30a側に形成される反射低減構造40について説明する。受光部20で生成されたTM偏光の光は、導波路部50を伝搬して検出器30の入射面30aへと導かれる。このとき、誘電体層52と空気との界面付近において最も電場強度が高くなっている。したがって、検出器30への光の入射は、空気から検出器30への入射と考えて良い。

【0088】

10

20

30

40

50

このように屈折率が異なる媒質同士の界面において、波長 λ の光の反射率を低減させるには、その界面に厚さ $l = \lambda / 4n$ （図2（b）参照）となるように、屈折率 n の層を設ければ良い。ここで、検出器30を構成する半導体材料を屈折率 $n_1 = n_s$ の第1媒質とし、溝内の空気を屈折率 $n_2 = n_a$ の第2媒質とすると、反射率低減のための最適屈折率 n_{opt} は、半導体層（第1媒質層）及び空気層（第2媒質層）の屈折率の積の平方根

$$n_{opt} = (n_1 n_2)^{1/2} = (n_s n_a)^{1/2}$$

によって求められる。

【0089】

このような条件で光の反射を抑制するための反射低減構造40を、検出器30を構成する半導体材料と、空気とによって構成する。具体的には、検出器30の入射面30a側にエッチングによって溝構造を形成し、検出器30の半導体材料からなる第1媒質層（半導体層）と、溝構造での溝内にある空気からなる第2媒質層（空気層）とによって反射低減構造40を構成するとともに、半導体層と空気層との体積比を調整することで、反射率の低減条件が満たされるような平均屈折率 n_{eff} を実現する。なお、メサ型の量子カスケード検出器30に対する溝構造の形成は、垂直エッチングによって行うことが望ましく、例えば、検出器30のメサ構造と同時に作製することが好ましい。

【0090】

まず、半導体層の屈折率を $n_s = 3.3$ 、空気層の屈折率を $n_a = 1$ とすると、反射低減構造40の最適屈折率 n_{opt} は

$$n_{opt} = (3.3 \times 1)^{1/2} = 1.8$$

と求められる。また、反射低減構造40の最適層厚 $l = l_{opt}$ は、対象となる光の波長を $\lambda = 4.5 \mu m$ として

$$l_{opt} = \lambda / 4n_{opt} = 0.63 \mu m$$

と求められる。したがって、反射低減構造40での平均屈折率 n_{eff} が上記の最適屈折率 n_{opt} と一致するように、半導体層と空気層との体積比を設定すれば良い。

【0091】

反射低減構造40の溝構造における半導体層の充填率（半導体材料の体積比率）を q とすると、平均屈折率 n_{eff} は

$$n_{eff} = \{q n_s^2 + (1 - q) n_a^2\}^{1/2}$$

によって求められる。この式で、 $n_{opt} = n_{eff}$ となるように充填率 q の値を求めると、 $q = 0.24$ が得られる。このような充填率 q を最適充填率 q_{opt} とする。

【0092】

厚さ $l_{opt} = 0.63 \mu m$ の反射低減構造40において、上記の充填率 q_{opt} を実現するためには、反射低減構造40に含まれる半導体層の層厚の合計を $0.63 \times 0.24 = 0.15 \mu m$ とすれば良い。また、残りの層厚 $0.63 - 0.15 = 0.48 \mu m$ の部分は、溝内の空気層によって構成すれば良い。

【0093】

図7は、このように設定された層厚 l_{opt} 、及び屈折率 $n_{opt} = n_{eff}$ を用いて構成された反射低減構造40における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。このグラフにおいて、横軸は対象となる光の波長 λ （ μm ）を示し、縦軸は波長 λ の光に対する反射率 R （％）を示している。図7のグラフによれば、上記構成の反射低減構造40を用いることにより、所望の波長域において光の反射率 R が低減されていることがわかる。

【0094】

また、このような反射低減構造40は、具体的には、量子カスケード検出器30を構成する半導体材料からなる半導体層を溝構造における溝内の空気層によって分割する分割数 M を1以上の整数として、それぞれ半導体層（第1媒質層）及び空気層（第2媒質層）を含む M 層の構造層によって構成することができる。

【0095】

図3に示した構成例では、反射低減構造40は、検出器30の半導体層を溝内の空気層によって分割する分割数を $M = 2$ に設定し、入射面30a側から順に第1構造層41、第

10

20

30

40

50

2 構造層 4 2 の 2 層の構造層を有して構成されている。第 1 構造層 4 1 は、半導体層 4 1 a、及び溝構造による空気層 4 1 b によって構成されている。また、第 2 構造層 4 2 は、同様に、半導体層 4 2 a、及び空気層 4 2 b によって構成されている。このような構成では、半導体層 4 1 a、4 2 a の層厚は、それぞれ $0.15 / 2 = 0.075 \mu\text{m}$ となる。また、空気層 4 1 b、4 2 b の層厚は、それぞれ $0.48 / 2 = 0.24 \mu\text{m}$ となる。

【0096】

なお、上記構成において、分割数を $M = 1$ として、単一の構造層 4 1 によって反射低減構造 4 0 を構成した場合、半導体層 4 1 a の層厚は $0.15 \mu\text{m}$ 、空気層 4 1 b の層厚は $0.48 \mu\text{m}$ となる。このような反射低減構造 4 0 での分割数 M については、屈折率の平均化という点では分割数が多い方が望ましいが、溝構造の作製上の加工精度の限界を考慮して分割数 M を設定する必要がある。すなわち、分割数 M の上限は、対象とする光の波長 λ と、加工精度の限界とに依存する。本実施形態では、反射低減構造 4 0 での分割数 M は 1 または 2 とすることが好ましい。

【0097】

次に、上記構成において許容される屈折率、層厚等の各パラメータの範囲について説明する。反射低減構造 4 0 での光の反射特性は、全体での総層厚 l (図 2 (b) 参照) と、半導体層の充填率 q から求められる平均屈折率 n_{eff} とによって決定付けられる。両者は作製上ともに独立に変化するが、入射光が感じる反射低減構造 4 0 での光路長に関わるという点では、同様の影響を及ぼす。

【0098】

上記実施形態において達成すべき検出器 3 0 の入射面 3 0 a での光の反射率を、対象とする波長 λ において 15% 以下とすると、反射低減構造 4 0 で許容される層厚 l 、及び平均屈折率 n_{eff} の範囲は、それぞれ例えば

$$0.8 \times l_{\text{opt}} < l < 1.2 \times l_{\text{opt}}$$

$$0.8 \times n_{\text{opt}} < n_{\text{eff}} < 1.2 \times n_{\text{opt}}$$

と設定すれば良い。すなわち、平均屈折率 n_{eff} が、最適屈折率 n_{opt} に対して $\pm 20\%$ の範囲内となり、また、反射低減構造 4 0 の全体での層厚 l が、最適層厚 l_{opt} に対して $\pm 20\%$ の範囲内となるように、反射低減構造 4 0 を構成すれば良い。これは、

$$0.64 \times n_{\text{opt}} l_{\text{opt}} < n_{\text{eff}} l < 1.44 \times n_{\text{opt}} l_{\text{opt}}$$

となることを意味している。

【0099】

また、反射低減構造 4 0 の屈折率は、半導体材料の充填率 q によって決まるため、許容される充填率 q の範囲を設定しても良い。ここで、図 8 は、反射低減構造 4 0 における光の反射率の半導体材料の充填率 q に対する依存性を示すグラフである。このグラフにおいて、横軸は反射低減構造における半導体材料の充填率 q を示し、縦軸は波長 $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ の光に対する反射率 $R(\%)$ を示している。また、図 8 において、グラフ B 1 は、反射低減構造 4 0 の層厚を $l = l_{\text{opt}}$ とした場合の反射率を示し、グラフ B 2 は、層厚を $l = 0.8 \times l_{\text{opt}}$ とした場合の反射率を示し、グラフ B 3 は、層厚を $l = 1.2 \times l_{\text{opt}}$ とした場合の反射率を示している。

【0100】

図 8 のグラフより、上記実施形態において許容される充填率 q の範囲は

$$0.097 < q < 0.371$$

となる。したがって、最適屈折率 n_{opt} 及び平均屈折率 n_{eff} から求められる半導体層の最適充填率 q_{opt} に対し、充填率 q の許容範囲を例えば $\pm 50\%$ とし、

$$0.5 \times q_{\text{opt}} < q < 1.5 \times q_{\text{opt}}$$

と設定すれば良い。

【0101】

[第 2 実施形態]

【0102】

図 9 は、第 2 実施形態の光検出装置における量子カスケード検出器及び反射低減構造の

構成を一部拡大して示す（a）平面図、及び（b）側面断面図である。本実施形態による光検出装置1Bは、反射低減構造の構成が、第1実施形態の光検出装置1Aとは異なっている。

【0103】

本実施形態の光検出装置1Bにおける反射低減構造40は、最適な平均屈折率 n_{eff} を規定せず、Mを2以上の整数として、それぞれ半導体層（第1媒質層）及び空気層（第2媒質層）を含み、入射面30a側から第1構造層～第M構造層の順で積層された充填率が $q_1 \sim q_M$ のM層の構造層によって反射低減構造40を構成している。そして、このような構成において、反射低減構造40は、各構造層での平均屈折率 n_{eff} が、第1構造層から第M構造層に向けて段階的に空気層の屈折率 $n_2 = n_a$ から半導体層の屈折率 $n_1 = n_s$ へと近づくように構成されている。

10

【0104】

図9に示した構成例では、反射低減構造40は、構造層の層数を $M = 4$ とし、入射面30a側から順に、それぞれ1組の半導体層及び空気層を含む第1構造層46、第2構造層47、第3構造層48、及び第4構造層49の4層の構造層を有して構成されている。第1～第4構造層46～49での半導体層の充填率をそれぞれ q_1 、 q_2 、 q_3 、 q_4 とすると、mを1以上4以下の整数として、第m構造層での平均屈折率 $n_{eff, m}$ は

$$n_{eff, m} = \{q_m n_s^2 + (1 - q_m) n_a^2\}^{1/2}$$

によって求められる。

【0105】

図10は、図9に示した反射低減構造40における第1～第4構造層46～49の構成の一例を示す図表である。本構成例では、反射低減構造40を構成する第m構造層（第m層）での半導体材料の充填率 q_m を、0と1との間において間隔 $\Delta q = 1 / (M + 1) = 0.2$ で等間隔に設定された目標充填率 $q_{t, m}$

$$q_{t, m} = m / (M + 1) = 0.2 \times m$$

と一致するように設定している。このとき、第1～第4構造層46～49での半導体材料の充填率 $q_1 \sim q_4$ は、図10に示すように、それぞれ0.2、0.4、0.6、0.8となる。また、空気層の屈折率を $n_a = 1$ 、半導体層の屈折率を $n_s = 3.3$ とすると、第1～第4構造層46～49での平均屈折率 $n_{eff, 1} \sim n_{eff, 4}$ は、それぞれ1.7、2.2、2.6、3.0となる。

20

30

【0106】

また、本構成例では、半導体層及び空気層を含む第m構造層の全体での層厚 l_m を、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t, m}$ と一致させた場合の目標層厚

$$l_{t, m} = \lambda / 4 n_{eff, t, m} \\ = \lambda / 4 \{q_{t, m} n_s^2 + (1 - q_{t, m}) n_a^2\}^{1/2}$$

と一致するように設定している。このとき、第1～第4構造層46～49での層厚 $l_1 \sim l_4$ は、それぞれ662nm、511nm、433nm、375nmとなる。また、各構造層における半導体層、及び空気層のそれぞれの層厚は、図10に示すように、構造層の全体での層厚 l_m 、及び半導体層の充填率 q_m から求めることができる。図11は、このように設定された構成条件での反射低減構造40における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。

40

【0107】

図9、図10に示した構成例では、反射低減構造40を構成する溝構造のうち、最も精密な加工を要する溝が、第4構造層49における厚さ75nmの空気層となっている。このような溝構造は、例えば集束イオンビーム（FIB：Focused Ion Beam）装置を用いて作製することができる。具体的には、量子カスケード検出器30のメサ構造を作製する際には、溝構造の作製は行わず、別途、FIBを用いて加工を行えば良い。

【0108】

また、反射低減構造40を構成するM層の構造層のそれぞれでの半導体層の充填率 $q_1 \sim q_M$ は、上記の構成例のように、0と1との間において等間隔で段階的に増加させてい

50

くことが好ましい。このような構成では、構造層の層数 M を大きくすると必然的に要求される溝構造の加工精度が高くなっていくが、層数 M の上限は対象とする光の波長 λ に依存する。また、構造層の最小の層数 M は2である。

【0109】

次に、上記構成において許容される充填率、層厚等の各パラメータの範囲について説明する。反射低減構造40の第1～第 M 構造層において、第 m 構造層での半導体層の充填率 q_m は、上記のように間隔 Δq で等間隔に設定された目標充填率 $q_{t,m}$ に対して、 $\pm \Delta q/2$ の範囲内となるように設定することが好ましい。例えば、上記した構成例における第1構造層46では、等間隔での目標充填率の設計値 $q_{t,1} = 0.2$ に対して、充填率 q_1 は0.1～0.3の範囲内で設定されていれば良い。また、第 m 構造層の層厚 l_m は、充填率 q_m を目標充填率 $q_{t,m}$ と一致させた場合の目標層厚 $l_{t,m} = \lambda / 4 n_{eff,t,m}$ に対して、 $\pm 30\%$ の範囲内となるように設定することが好ましい。

10

【0110】

図12は、図10の構成例から構成条件を一定範囲で変更した反射低減構造40における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。図12において、グラフC1は、図10の構成条件から充填率 q を全て0.1増加させ、層厚 l を全て30%増加させた場合の反射率を示し、グラフC2は、図10の構成条件から充填率 q を全て0.1減少させ、層厚 l を全て30%減少させた場合の反射率を示している。

【0111】

〔第3実施形態〕

20

【0112】

図13は、光検出装置の第3実施形態の構成を示す平面図である。本実施形態による光検出装置1Cは、プラズモン受光部、及び導波路部の構成が、第1実施形態の光検出装置1Aとは異なっている。

【0113】

本実施形態では、基板10上において、受光部20と量子カスケード検出器30との間の導波路部50（図1参照）が設けられておらず、周期構造22が形成された金属層21を有する受光部20を検出器30の近傍まで拡大するとともに、そのうちの検出器30側の所定の部分を、プラズモン導波路としても機能するテーパ部23として構成している。このような構成の光検出装置1Cによっても、第1実施形態の光検出装置1Aと同様に、赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能となる。

30

【0114】

〔第4実施形態〕

【0115】

図14は、光検出装置の第4実施形態の構成を示す平面図である。本実施形態による光検出装置1Dでは、略正形状の基板10上において、その1つの角部（図中の右下の角部）側にメサ型の量子カスケード検出器30が設けられている。また、この検出器30の第1入射面（図中の上側の面）30cに対し、第1受光部201、第1導波路部501、及び第1ブラッグ反射構造251が設けられている。同様に、第2入射面（図中の左側の面）30dに対し、第2受光部202、第2導波路部502、及び第2ブラッグ反射構造252が設けられている。また、検出器30の入射面30c、30d側には、それぞれ上記実施形態と同様の溝構造からなる反射低減構造401、402が設けられている。

40

【0116】

このように、量子カスケード検出器30に対して2方向に受光部201、202を設ける構成は、光検出装置1Dにおける光感度の偏光依存性（図2（b）参照）を解消する上で有効である。特に、図14に示す構成では、第1受光部201での周期構造の配列方向と、第2受光部202での周期構造の配列方向とが、基板10上において互いに直交している。これにより、光感度の偏光依存性を好適に解消することができる。

【0117】

また、図14の構成では、検出器30の第1入射面30cに対し、受光部201及び導

50

波路部 501 の全体が、検出器 30 に向けて幅が減少するテーパ形状に形成されている。同様に、検出器 30 の第 2 入射面 30d に対し、受光部 202 及び導波路部 502 の全体が、検出器 30 に向けて幅が減少するテーパ形状に形成されている。図 14 の光検出装置 1D では、このような構成により、光検出装置の省スペース化、小型化が図られている。

【0118】

なお、第 1、第 2 受光部 201、202 の周期構造については、図 14 では互いに分離して形成された構成となっているが、これらの周期構造は、一体に接続されて形成されている構成としても良い。また、図 13 に示した構成と同様に、導波路部 501、502 を受光部 201、202 のテーパ部によって置き換える構成としても良い。

【0119】

[第 5 実施形態]

【0120】

図 14 に示した光検出装置 1D は、上記したように省スペース化等が図られていることから、量子カスケード検出器を含む光検出装置のアレイ化、及びそれによる撮像素子等への応答展開においても有効である。

【0121】

図 15 は、光検出装置の第 5 実施形態の構成を示す平面図である。本実施形態による光検出装置 1E では、受光部 201、202、及び反射低減構造を含む量子カスケード検出器 30 を有し、図 14 に示した光検出装置 1D と同様に構成された装置部分を光検出ユニット 15 とし、このような光検出ユニット 15 を複数、2 次元アレイ状に配列する構成としている。このような構成の光検出装置 1E は、例えば 2 次元の撮像素子として利用することが可能である。

【0122】

このように複数の光検出ユニット 15 を配列したアレイ状の構成では、画素に対応する光検出ユニットのサイズを可能な限り小さくすることが望まれる。この場合、量子カスケード検出器 30 の素子サイズを、例えば $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ とすることができ、また、光検出ユニット 15 全体での画素サイズを、例えば $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ とすることができ、なお、図 15 の光検出装置 1E では、光検出ユニット 15 を基板上に 2 次元アレイ状に配列した構成を示したが、光検出ユニット 15 を 1 次元アレイ状に配列して 1 次元の撮像素子として利用可能な構成としても良い。

【0123】

[第 6 実施形態]

【0124】

図 16 は、光検出装置の第 6 実施形態の構成を示す側面断面図である。本実施形態による光検出装置 1F では、基板 10 上の量子カスケード検出器 30 において、第 1 面 30a 側の反射低減構造 40 に加えて、第 1 面 30a とは反対側の第 2 面 30b 側において、反射構造 60 が設けられている。

【0125】

このような構成によれば、反射構造 60 での光の反射によって、検出器 30 の内部で光を往復させることが可能となり、検出器 30 における光の検出効率を向上することができる。また、この場合、検出器 30 の検出器長 L_1 (図 1 参照) を、波長 λ の入射光の強度が検出器 30 内で $1/e$ になる長さの $1/2$ (例えば $100\mu\text{m}$) 程度に設定することが可能となる。これにより、メサ型の量子カスケード検出器 30 の面積を小さくすることができ、素子抵抗の増大による熱雑音の低減が可能となる。また、このように検出器 30 を小型化した場合、高速応答に向けた静電容量の低減が可能となる。

【0126】

具体的には、検出器 30 の第 2 面 30b 側には、第 2 溝構造が形成されている。この溝構造は、検出器 30 を構成する半導体材料からなる屈折率 n_1 の第 1 媒質層 (半導体層) と、溝構造での溝内にある媒質からなる屈折率 n_2 の第 2 媒質層 (例えば空気層) とが積層されることで、第 2 面 30b での波長 λ の光の反射率を増大するブラッグ反射構造 60

10

20

30

40

50

を構成している。なお、反射構造 60 を構成する第 2 溝構造の形成方法については、上述した反射低減構造 40 における溝構造の形成方法と同様である。

【0127】

反射構造 60 を構成する第 1、第 2 媒質層のそれぞれの好適な層厚は、対象とする光の波長を λ 、媒質の屈折率を n として、 $\lambda / 4n$ によって求められる。例えば、被検出光の波長を $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ 、第 1 媒質層を屈折率 $n_1 = 3.3$ の半導体層とした場合、半導体層の好適な層厚は $0.33 \mu\text{m}$ となる。また、第 2 媒質層を屈折率 $n_2 = 1$ の空気層とした場合、空気層の好適な層厚は $1.13 \mu\text{m}$ となる。また、第 1、第 2 媒質層の実際の層厚については、上記した理想的な層厚に対して、例えば $\pm 45\%$ の範囲内で設定すれば良い。これにより、反射構造 60 での光の反射率を 50% 以上とすることができる。

10

【0128】

図 17 は、反射構造 60 における光の反射率の波長依存性を示すグラフである。図 17 において、グラフ D1 は、反射構造 60 に含まれる第 1 媒質層及び第 2 媒質層からなる構造層の層数を 1 とした場合の反射率を示し、グラフ D2 は、反射構造 60 に含まれる構造層の層数を 2 とした場合の反射率を示している。このグラフでは、波長 $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ の光に対し、反射構造 60 の構造層の層数 = 1 とした構成では反射率は $R = 90\%$ 、層数 = 2 とした構成では反射率は $R = 99\%$ となっている。したがって、反射構造 60 を構成する構造層の層数（第 1、第 2 媒質層の周期数）については、2 層あれば十分な反射率が得られることがわかる。

【0129】

20

本発明による光検出装置は、上記した実施形態及び構成例に限られるものではなく、様々な変形が可能である。例えば、上記した実施形態では、半導体光検出素子として、量子カスケード検出器 (QCD) を例示しているが、上述したように、伝導帯サブバンド準位を利用した量子井戸型の半導体光検出素子であれば、例えば量子井戸赤外光検出器 (QWIP) などの、QCD 以外の光検出素子を用いても良い。また、半導体光検出素子、受光部、導波路部等の装置各部の具体的な構成については、上記した実施形態で例示したもの以外にも、様々な構成を用いることが可能である。

【0130】

また、半導体光検出素子の第 1 面側に形成される反射低減構造、及び第 2 面側に形成される反射構造については、上記した実施形態では、第 1 媒質層が半導体材料からなる半導体層、第 2 媒質層が溝内にある空気からなる空気層である構成を例示しているが、第 2 媒質層については、例えば空気層以外の気体媒質層としても良い。また、溝内に誘電体材料などの所定材料を充填した層を第 2 媒質層として用いても良い。

30

【産業上の利用可能性】

【0131】

本発明は、赤外光などの被検出光を高速、高感度で検出することが可能な光検出装置として利用可能である。

【符号の説明】

【0132】

1A ~ 1F … 光検出装置、10 … 基板、11a … 検出器形成領域、11b … 受光部形成領域、12 … 下部電極、13 … 上部電極、15 … 光検出ユニット、

40

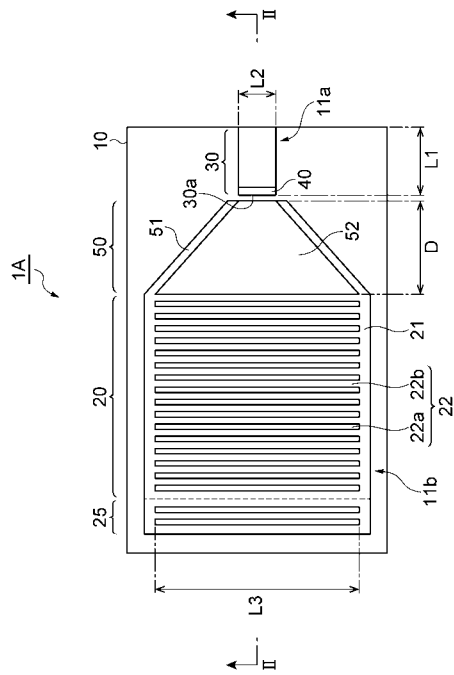
20 … 受光部、21 … 金属層（負誘電率材料層）、22 … 周期構造、22a … 凸部、22b … 凹部、23 … テーパ部、25 … ブラッグ反射構造、

30 … 量子カスケード検出器（半導体光検出素子）、30a … 第 1 面（入射面）、30b … 第 2 面、31 … 下部コンタクト層、32 … クラッド層、33 … 上部コンタクト層、35 … 活性層、36 … 単位積層体、37 … 吸収領域、38 … 輸送領域、

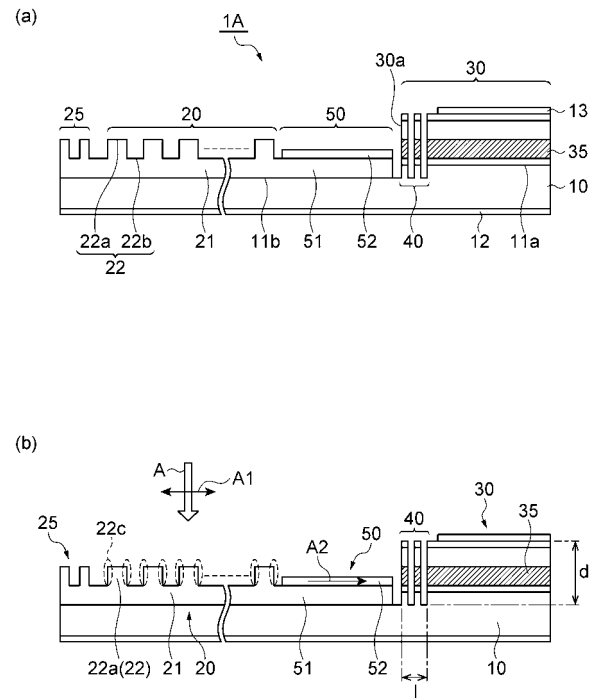
40 … 反射低減構造、41 … 第 1 構造層、42 … 第 2 構造層、46 … 第 1 構造層、47 … 第 2 構造層、48 … 第 3 構造層、49 … 第 4 構造層、60 … 反射構造、

50 … 導波路部、51 … 導波路層、52 … 誘電体層。

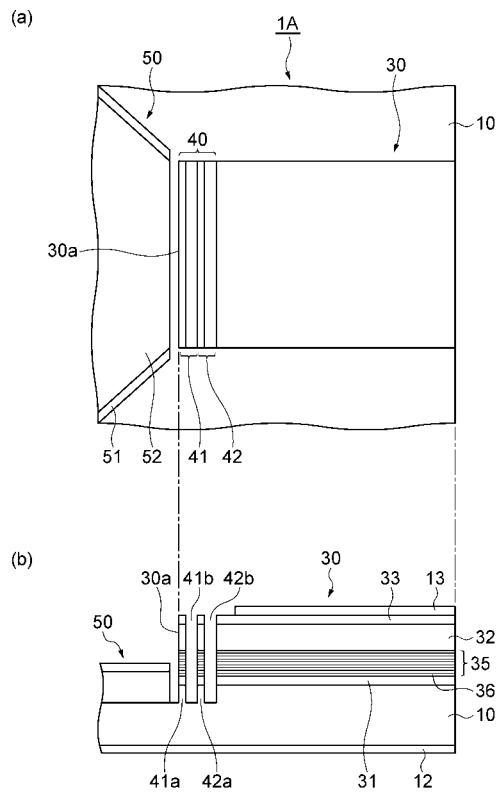
【図 1】



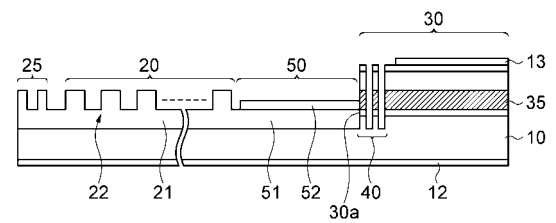
【図 2】



【図 3】



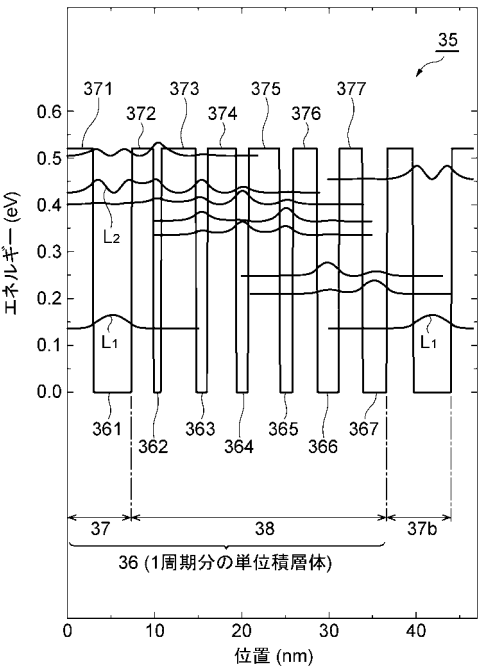
【図 4】



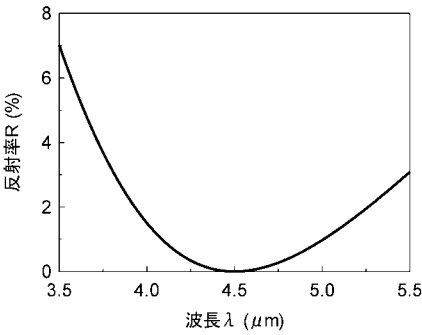
【図 5】

半導体層		組成	層厚 (nm)	ドーピング
コンタクト層33		InP	25	Si doped : $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$
クラッド層32		InP	3000	Si doped : $1 \times 10^{17}/\text{cm}^3$
吸収領域37	障壁層371	InAlAs	3.0	undoped
	井戸層361	InGaAs	4.4	Si doped : $1 \times 10^{18}/\text{cm}^3$
輸送領域38	障壁層372	InAlAs	2.5	undoped
	井戸層362	InGaAs	0.9	undoped
	373	InAlAs	4.0	undoped
	363	InGaAs	1.3	undoped
	374	InAlAs	3.3	undoped
	364	InGaAs	1.4	undoped
	375	InAlAs	3.6	undoped
	365	InGaAs	1.5	undoped
	376	InAlAs	2.8	undoped
	366	InGaAs	2.5	undoped
	377	InAlAs	2.7	undoped
	367	InGaAs	2.8	undoped
コンタクト層31		InAlAs	0.2	undoped
		InGaAs	25	Si doped : $3 \times 10^{18}/\text{cm}^3$

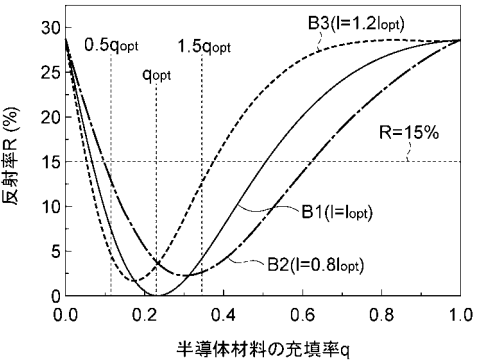
【図 6】



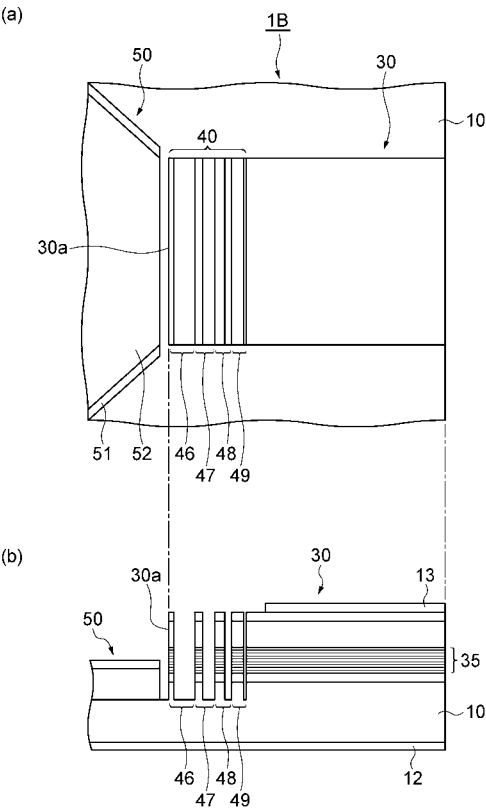
【図 7】



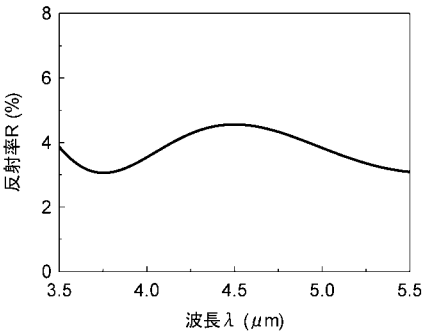
【図 8】



【図 9】



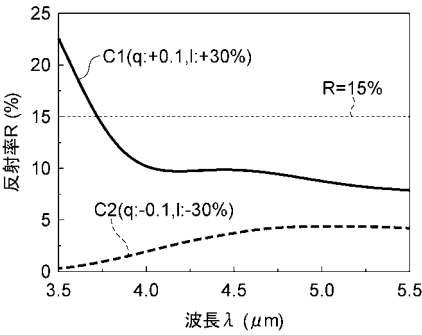
【図 1 1】



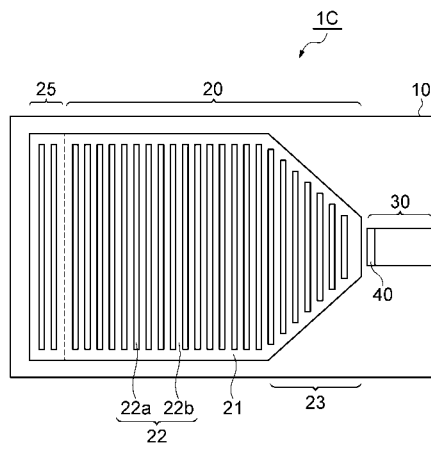
【図 1 0】

	空気層の 層厚 (nm)	半導体層の 層厚 (nm)	構造層の 層厚 (nm)	屈折率 $n_{eff,m}$	充填率 q_m	
空気	-	-	-	1.0	-	
第1層	530	132	662	1.7	0.2	
第2層	307	204	511	2.2	0.4	
第3層	173	260	433	2.6	0.6	
第4層	75	300	375	3.0	0.8	
半導体材料	-	-	-	3.3	-	

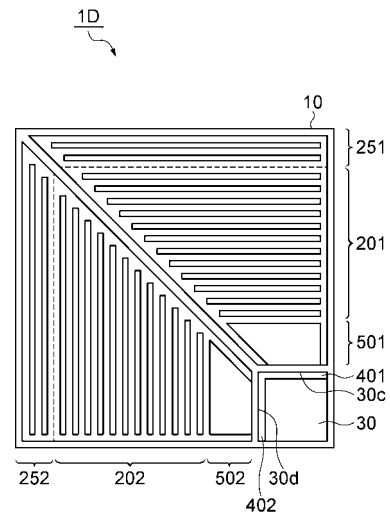
【図 1 2】



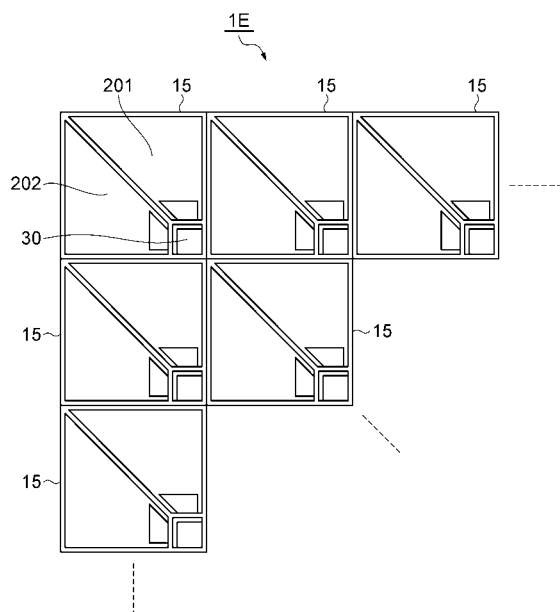
【図 1 3】



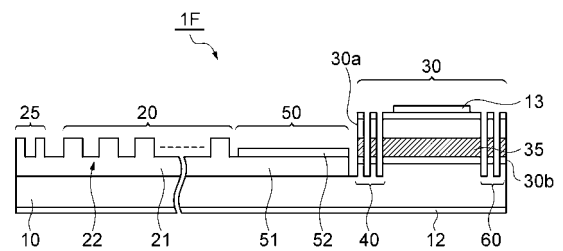
【図 1 4】



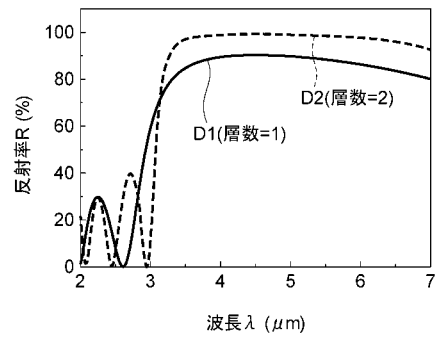
【図 1 5】



【図 1 6】



【図 17】



フロントページの続き

(72)発明者 廣畑 徹
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

(72)発明者 中嶋 和利
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

(72)発明者 田中 和典
静岡県浜松市東区市野町 1 1 2 6 番地の 1 浜松ホトニクス株式会社内

Fターム(参考) 2G059 HH01 JJ17 KK01 KK04 LL04 NN10
2G065 AA04 AB02 AB03 BA02 BB04 BB50 CA23
5F849 AA04 DA02 DA06 DA35 HA04 HA15 XB24