

(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2017-5011
(P2017-5011A)

(43) 公開日 平成29年1月5日(2017.1.5)

(51) Int.Cl.
H O 1 L 31/10 (2006.01)
G O 1 J 1/02 (2006.01)

F I
H O 1 L 31/10
G O 1 J 1/02

テーマコード (参考)
2 G O 6 5
5 F 8 4 9

審査請求 未請求 請求項の数 12 O L (全 23 頁)

(21) 出願番号	特願2015-114657 (P2015-114657)	(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1126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1126番地の1
			浜松ホトニクス株式会社内

最終頁に続く

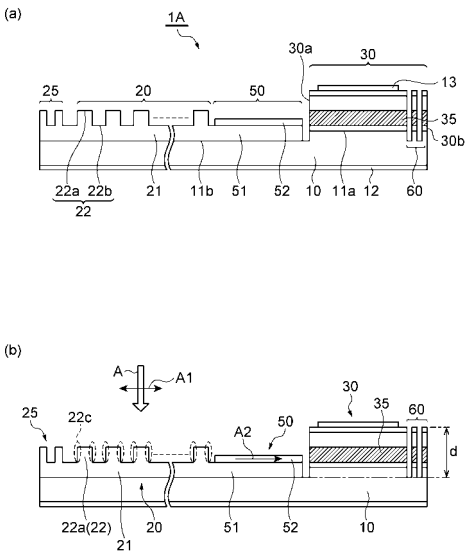
(54) 【発明の名称】 光検出装置

(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10上に設けられた量子カスケード検出器30と、基板10上に設けられ周期構造22が形成された金属層21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20とを備えて、光検出装置1Aを構成する。検出器30は、プラズモンに起因する光の入射面となる第1面30aとは反対側の第2面30b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30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2面30bでの波長λの光の反射率を増大する反射構造60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おり、前記第 1 面とは反対側の第 2 面側において溝構造が形成されており、

10

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 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光検出装置。

【請求項 2】

前記反射構造は、前記第 2 面での波長 λ の光の反射率が 50 % 以上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）の構造層を有するとともに、前記第 1 媒質層の層厚が、最適層厚 $\lambda / 4 n_1$ に対して $\pm 4.5 \%$ の範囲内となり、前記第 2 媒質層の層厚が、最適層厚 $\lambda / 4 n_2$ に対して $\pm 4.5 \%$ 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 または 2 記載の光検出装置。

20

【請求項 4】

前記反射構造において、前記構造層の層数 M は 1 または 2 に設定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。

30

【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】

40

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。

【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】

前記導波路部の終端面と、前記半導体光検出素子の前記第 1 面とは、 $1 \mu\text{m} \sim 10 \mu\text{m}$ の範囲内で設定された間隔をあけて配置されていることを特徴とする請求項 6 ～ 8 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 10】

50

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 1～9 のいずれか一項記載の光検出装置。

【請求項 11】

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 1～10 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。

10

【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 μm 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 μm ～5 μm 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。

20

【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 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：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 10 GHz 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。

30

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】国際公開 WO 2008/075542 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

40

【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】

50

【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、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面とは反対側の第２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。

【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の第１面とは反対側で光検出素子に入射した光に対する反射面となる第２面側に、反射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、光検出素子の反射面側に溝構造を用いた反射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

体光検出素子へと入射した光の検出効率を反射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。また、半導体光検出素子の反射面側に反射構造を設けることにより、光検出素子の小型化、及び低ノイズ化、動作の高速化が可能となる。

【0014】

ここで、上記の光検出装置における反射構造の構成、及び光の反射率については、反射構造は、第2面での波長 λ の光の反射率が50%以上となるように構成されていることが好ましい。

【0015】

また、反射構造の具体的な構成としては、反射構造は、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）の構造層を有するとともに、第1媒質層の層厚が、最適層厚 $\lambda/4n_1$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となり、また、第2媒質層の層厚が、最適層厚 $\lambda/4n_2$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となる構成を用いることができる。また、この場合、反射構造において、反射構造を構成する構造層の層数Mは、1または2に設定されている構成とすることができる。

【0016】

これらの構成を有する反射構造によれば、半導体光検出素子で入射面とは反対側にある反射面での光の反射率を好適に増大して、受光部から光検出素子へと入射したプラズモンに起因する光の検出効率を十分に向上することができる。また、このような検出効率の向上により、光検出素子の小型化等を好適に実現することができる。また、反射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。

【0017】

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。

【0018】

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。

【0019】

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。

【0020】

また、半導体光検出素子と導波路部との配置関係については、導波路部の終端面と、半導体光検出素子の第1面とは、 $1\mu\text{m}\sim 10\mu\text{m}$ の範囲内で設定された間隔をあけて配置されていることが好ましい。このような構成によれば、光検出素子の活性層と導波路部とが電氣的に接触することが防止され、電流のリーク等の発生を抑制することができる。

【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

10

20

30

40

50

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、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】

【0023】

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光の入射面となる第1面とは反対側の第2面側に、反射構造として機能する溝構造を形成することにより、光の検出効率の向上、及び光検出素子の小型化等を実現して、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となる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【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4】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5】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6】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。

【図7】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。

【図8】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。

【図9】光検出装置の第2実施形態の構成を示す平面図である。

【図10】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11】光検出装置の第4実施形態の構成を示す平面図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

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。

【0026】

〔第1実施形態〕

【0027】

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。

【0028】

本実施形態の光検出装置1A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

10

20

30

40

50

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 3 0 について、量子カスケード検出器 (QCD) を例として説明する。

【0029】

図 1～図 3 に示す半導体光検出装置 1 A は、基板 1 0 と、半導体光検出素子である量子カスケード検出器 3 0 と、受光部 2 0 と、導波路部 5 0 とを備えて構成されている。基板 1 0 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 1 1 a 上に量子カスケード検出器 3 0 が設けられ、また、受光部形成領域 1 1 b 上に受光部 2 0 及び導波路部 5 0 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 1 1 b は、検出器形成領域 1 1 a よりも低い面部分となっている。また、基板 1 0 の他方の面 (図 2 中の下面) 上には、検出器 3 0 の駆動に用いられる下部電極 1 2 が形成されている。

10

【0030】

量子カスケード検出器 3 0 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 3 5 を有しており、基板 1 0 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 3 0 は、基板 1 0 上に下部コンタクト層 3 1、活性層 3 5、クラッド層 3 2、及び上部コンタクト層 3 3 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 3 3 上には、下部電極 1 2 とともに検出器 3 0 の駆動に用いられる上部電極 1 3 が形成されている。なお、図 3 (a) においては、上部電極 1 3 の図示を省略している。

20

【0031】

量子カスケード検出器 3 0 の活性層 3 5 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 3 6 (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 3 5 に含まれる単位積層体 3 6 の構成については、具体的には後述する。

【0032】

受光部 2 0 は、基板 1 0 上に検出器 3 0 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 2 1 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 2 1 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 2 1 には、光検出装置 1 A 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 2 2 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 2 2 により、受光部 2 0 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。

30

【0033】

図 1、図 2 に示す構成例では、金属層 2 1 には、量子カスケード検出器 3 0 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 2 2 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 2 2 a 及び凹部 (溝部) 2 2 b 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 2 0 の検出器 3 0 とは反対側には、検出器 3 0 側へとプラズモンを反射させるブラッグ反射構造 2 5 が設けられている。なお、図 1 では、見易さのため、受光部 2 0 と反射構造 2 5 とを、破線で区切って示している。

40

【0034】

量子カスケード検出器 3 0 は、受光部 2 0 におけるプラズモンの伝搬方向 (周期構造 2 2 での凸部 2 2 a、凹部 2 2 b 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) 3 0 a 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 3 0 の入射面 3 0 a とは反対側で、検出器 3 0 に入射した光の反射面となる第 2 面 3 0 b 側には、検出器 3 0 の上面 (基板 1 0 とは反対側の面) から

50

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。

【0035】

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（光進行方向）に積層されることで、第 2 面 30b での波長 λ の光の反射率を増大する反射構造 60 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、及び検出器 30 の活性層 35 内での光進行方向は、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 側の終端面と、検出器 30 での入射面である第 1 面 30a とは、

【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 側にあつて半導体積層方向と平行な側面である第 1 面 30a が、プラズモンに起因する光に対する入射面となっているとともに、この第 1 面 30a とは反対側で検出器 30 に入射した光に対する反射面となる第 2 面 30b 側に、第 2 面 30b と略平行に形成された 1 または複数の溝からなり反射構造 60 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 の反射面 30b 側に溝構造を用いた反射構造 60 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 へと入射した光の検出効率を反射構造 60 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。また、このように検出器 30 の反射面 30b 側に反射構造 60 を設けることにより、検出器 30 の小型化、及びそれによる低ノイズ化、動作の高速化が可能となる。

【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 に記載の光

10

20

30

40

50

検出器では、実用上、いくつかの課題が残されている。

【0043】

まず、量子カスケード検出器では、検出器で発生するノイズにおいて、特に室温近傍で熱雑音が支配的となる。熱雑音によるノイズ電流 i_N は、下記の式(1)

【数1】

$$i_N = \sqrt{\frac{4k_B T \Delta f}{R}} \quad \dots(1)$$

によって求められる。ここで、 k_B はボルツマン定数、 T は素子温度、 Δf は帯域幅（ここでは $\Delta f = 1$ として良い）、 R は素子抵抗である。

10

【0044】

上記の式(1)から理解されるように、検出器におけるノイズ電流は、その素子抵抗 R に大きく依存している。したがって、検出器の素子サイズ（メサ型の量子カスケード検出器でのメササイズ）を小さくし、その素子抵抗を高くすることによって、熱雑音によるノイズを低減することができる。光検出器の能力を示す比検出能 (D^*) が S/N 比に基づいて求められるように、ノイズは検出器の性能を大きく左右する要素である。

【0045】

また、光検出器の素子サイズの縮小は、ノイズの低減に加えて、素子が持つ静電容量の低減にもつながり、したがって、 RC 時定数によって決まる応答速度の高速化においても重要となる。上記した非特許文献1では、このような素子サイズの影響、あるいはその最適化について記載されていない。

20

【0046】

これに対して、上記実施形態による光検出装置1Aでは、検出器30の反射面30b側に反射構造60を設けて、検出器30における光の検出効率を向上することにより、検出器30の素子サイズの縮小を可能としている。このような構成によれば、検出器30での素子抵抗を高くすることでノイズを低減するとともに、素子が持つ静電容量を低減して、検出器の低ノイズ化、動作の高速化を実現することが可能となる。

【0047】

また、検出器端面に形成する反射構造としては、一般に、反射面に対して誘電体多層膜による反射コートを施す構成が考えられる。しかしながら、例えば、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の光検出装置をアレイ化して撮像素子とする場合、光検出装置の構造上の特徴から、検出器のメサ端面である反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。

30

【0048】

これに対して、上記実施形態による光検出装置1Aでは、量子カスケード検出器30の受光部20とは反対側の第2面30b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を設け、この溝構造を、受光部20及び導波路部50から入射して検出器30で検出される光に対する反射構造60としている。これにより、検出器30での光の検出効率を好適に向上するとともに、素子サイズを縮小して、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高速、低ノイズの光検出装置1Aを好適に実現することが可能となる。

40

【0049】

光検出装置1A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30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35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。

50

【0050】

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1Aに関して上述したように、QWIPの検出器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、検出器の反射面30b側に反射構造60を形成することにより、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を実現することができる。

【0051】

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。

【0052】

また、上記構成の光検出装置1Aでは、図1、図2に示したように、基板10上で量子カスケード検出器30と受光部20との間に設けられた導波路層51を有し、受光部20で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た導波路部50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50を設ける構成によれば、受光部20で生成されたプラズモンを検出器30へと高効率で伝搬、入射させて、光検出装置1Aでの被検出光Aの検出効率をさらに向上することが可能となる。ただし、このような導波路部50については、不要であれば設けない構成としても良い。

【0053】

また、このように導波路部50が形成されている場合、導波路部50は、金属層などからなる導波路層51と、導波路層51上に形成された誘電体材料からなる誘電体層52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50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50については、誘電体層52を設けずに、金属層などの導波路層51と、導波路層51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。

【0054】

また、導波路部50は、図1に示したように、受光部20から量子カスケード検出器30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50による検出器30へのプラズモンの伝搬効率を向上することができる。

【0055】

また、量子カスケード検出器30と導波路部50との配置関係については、導波路部50の検出器30側の終端面と、検出器30の導波路部50側の第1面30aとは、 $1\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ の範囲内で設定された間隔をあけて配置されていることが好ましく、さらに、 $2\mu\text{m}$ ～ $10\mu\text{m}$ の範囲内で設定された間隔をあけて配置されていることが好ましい。このような構成によれば、検出器30の活性層35と、導波路部50の導波路層51とが電氣的に接触することが防止され、電流のリーク等の発生を抑制することができる。

【0056】

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22a、凹部22b）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。

【0057】

また、光検出装置 1 A における反射構造 6 0 の構成、及び光の反射率については、反射構造 6 0 は、光の反射面となる第 2 面 3 0 b での波長 λ の光の反射率が 5 0 % 以上となるように構成されていることが好ましい。

【0058】

また、反射構造 6 0 の具体的な構成としては、反射構造 6 0 は、M を 1 以上の整数として、それぞれ第 1 媒質層及び第 2 媒質層を含む M 層の構造層を有するとともに、第 1 媒質層の層厚が、最適層厚 $l_{opt, 1} = \lambda / 4 n_1$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となり、第 2 媒質層の層厚が、最適層厚 $l_{opt, 2} = \lambda / 4 n_2$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となる構成を用いることができる。また、この場合、反射構造 6 0 において、反射構造 6 0 を構成する構造層の層数 M は、1 または 2 に設定されている構成とすることができる。

10

【0059】

これらの構成を有する反射構造 6 0 によれば、量子カスケード検出器 3 0 において入射面 3 0 a とは反対側の反射面 3 0 b での光の反射率を好適に増大させて、受光部 2 0 から検出器 3 0 へと入射したプラズモンに起因する光の検出効率を十分に向上することができる。また、このような検出効率の向上により、検出器 3 0 の小型化等を好適に実現することができる。また、反射構造 6 0 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。なお、反射構造 6 0 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。

【0060】

図 1 ～ 図 3 に示した光検出装置 1 A 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 2 0 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 2 0 を構成する負誘電率材料層 2 1 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 2 1 については、Au 以外の金属等の材料を用いても良い。

20

【0061】

受光部 2 0 の Au 層 2 1 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 1 A 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 2 2 が形成される。このような周期構造 2 2 における周期は、下記の式 (2) によって求めることができる。

【数 2】

30

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

ここで、 Λ は周期構造 2 2 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。

【0062】

ϵ_1 と ϵ_2 とは、周期構造 2 2 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 2 2 を構成する媒質として、凸部 2 2 a における第 1 媒質である Au (金)、及び凹部 2 2 b 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 2 0 で周期構造 2 2 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。

40

【0063】

ここで、受光部 2 0 の周期構造 2 2 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 (2) を Λ について解くと、下記の式 (3)

【数 3】

$$\Lambda = \lambda \sqrt{\frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{\varepsilon_1 \varepsilon_2}} \quad \dots (3)$$

が得られる。以上から、例えば被検出光 A の波長を $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ とした場合、周期構造 22 の最適な周期 Λ は、 $4.49 \mu\text{m}$ 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 $0.5 \mu\text{m}$ に設定することができる。

【0064】

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（4）によって求めることができる。

【数 4】

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

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。

【0065】

各パラメータを式（4）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 $4.49 \mu\text{m}$ 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 で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。

【0066】

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（3）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。

【0067】

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。

【0068】

10

20

30

40

50

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 $1\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ の間隔、あるいはさらに $2\ \mu\text{m} \sim 10\ \mu\text{m}$ の間隔をあけて、空気の層を介して近接配置されている。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。また、これにより、検出器 30 と導波路部 50 との接触が防止される。

【0069】

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。

10

【0070】

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。

20

【0071】

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 の層厚の半分以上に設定すれば良い。

【0072】

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。

30

【0073】

次に、受光部 20 から導波路部 50 を介して入射するプラズモンに起因する光を検出する量子カスケード検出器 30 の構成の具体例について説明する。図 4 は、量子カスケード検出器 30 における半導体積層構造の一例を示す図表である。また、図 5 は、量子カスケード検出器 30 における活性層 35 を構成する単位積層体 36（図 3（b）参照）の構成の一例を示す図である。

40

【0074】

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 $275\ \text{meV}$ ）として設計された例を示している。図 5 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: Metal Organic 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

【0075】

本構成例による量子カスケード検出器30の半導体積層構造では、図1～図3に示した構成において、半導体基板10として、n型InP基板を用いている。InP基板10としては、具体的には例えば、濃度 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3} \sim 1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ でSがドーピングされたInP基板を用いることができる。そして、このInP基板10上に、図3(b)及び図4に示すように、厚さ25nmのInGaAs層及び厚さ0.2nmのInAlAs層から構成される下部コンタクト層31、吸収領域37及び輸送領域38を含む単位積層体36が多段に積層された活性層35、厚さ3000nmのInPクラッド層32、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。

10

【0076】

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がドーピングされた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ことが好ましい。

【0077】

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4、図5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。

20

【0078】

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4に示す通りである。

【0079】

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 $1 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ でドーピングされている。

30

【0080】

このような構成において、単位積層体36は、その図5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。

40

【0081】

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

50

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。

【0082】

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。

【0083】

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。

【0084】

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。

【0085】

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（3）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。

【0086】

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。

【0087】

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。

【0088】

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。この導波路部50と検出器30との間の隙間については、上記したように、1μm～10μmの範囲内で設定された間隔、あるいはさらに、2μm～10μmの範囲内で設定された間隔を有することが好ましい。これにより、検出器30と、導波路部50とが接触することが防止され、電流のリーク等の発生を抑制することができる。

【0089】

次に、量子カスケード検出器30において入射面30aとは反対側の反射面30b側に

10

20

30

40

50

形成される反射構造 60 について説明する。検出器 30 の反射面 30 b 側では、上述したようにエッチング等によって溝構造を作製し、この溝構造をブラッグ反射器として機能する反射構造 60 として用いている。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】

このようなブラッグ反射構造 60 は、高屈折率層と低屈折率層との組合せによって実現することができる。具体的には、反射構造 60 の高屈折率層としては、検出器 30 を構成する半導体材料からなる屈折率 $n_1 = n_s$ の第 1 媒質層が用いられる。また、低屈折率層としては、溝構造での溝内にある媒質、例えば空気からなる屈折率 $n_2 = n_a$ の第 2 媒質層が用いられる。

10

【0091】

また、反射構造 60 の理想的な構成としては、構造層の層数を M として、それぞれ第 1 媒質層及び第 2 媒質層を含む M 層の構造層によって反射構造 60 を構成するとともに、各構造層における第 1 媒質層（半導体層）の層厚を、最適層厚

$$l_{opt, 1} = \lambda / 4 n_1$$

と略一致させ、また、第 2 媒質層（例えば溝内の空気層）の層厚を、最適層厚

$$l_{opt, 2} = \lambda / 4 n_2$$

と略一致させる構成とすれば良い。

【0092】

図 3 に示した構成例では、反射構造 60 は、構造層の層数（ブラッグ反射器の周期数）を $M = 2$ に設定して、反射面 30 b 側から順に第 1 構造層 61、第 2 構造層 62 の 2 層の構造層を有して構成されている。第 1 構造層 61 は、半導体層 61 a、及び溝構造による空気層 61 b によって構成されている。また、第 2 構造層 62 は、同様に、半導体層 62 a、及び空気層 62 b によって構成されている。

20

【0093】

また、このような構成において、対象となる光の波長を $\lambda = 4.5 \mu\text{m}$ 、半導体層の屈折率を $n_1 = n_s = 3.3$ 、空気層の屈折率を $n_2 = n_a = 1$ とすると、反射構造 60 での半導体層 61 a、62 a のそれぞれの最適層厚は

$$l_{opt, 1} = l_{opt, s} = \lambda / 4 n_s = 0.33 \mu\text{m}$$

となる。また、空気層 61 b、62 b のそれぞれの最適層厚は

$$l_{opt, 2} = l_{opt, a} = \lambda / 4 n_a = 1.13 \mu\text{m}$$

となる。

30

【0094】

図 6 は、このように設定された層厚 $l_{opt, s}$ 、 $l_{opt, a}$ を有する半導体層、空気層によって構成された反射構造 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。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。また、図 6 において、グラフ B1 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 $M = 1$ とした場合の反射率を示し、グラフ B2 は、反射構造 60 に含まれる構造層の層数を $M = 2$ とした場合の反射率を示している。

40

【0095】

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 $M = 1$ とした構成では反射率は $R = 90\%$ 、層数 $M = 2$ 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、第 1、第 2 媒質層が 2 周期あれば、十分な反射率が得られることがわかる。したがって、反射構造 60 を構成する構造層の層数 M については、上述したように、 $M = 1$ 、または $M = 2$ に設定することが好ましい。

【0096】

このように、検出器 30 の反射面 30 b 側に反射構造 60 を形成して、反射面 30 b で

50

の光の反射率を高くすることにより、検出器 30 の内部で検出対象の光を往復させることが可能となる。この場合、例えば、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、メサ型の検出器 30 の面積を小さくすることができ、上述したように、素子抵抗の増大によるノイズ (熱雑音) の抑制、高速応答に向けた静電容量の低減等が可能となる。

【0097】

次に、上記構成において許容される第 1 媒質層、第 2 媒質層の層厚の範囲について説明する。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 $3 \sim 3.3$ 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。これに対して、検出器 30 の反射面 30b 側における反射構造 60 は、波長 λ の光の反射率が 50% 以上となるように構成することが好ましい。このような反射率の好適範囲を考慮すると、反射構造 60 を構成する第 1、第 2 媒質層の層厚については、それぞれ上記した最適層厚 $l_{opt} = \lambda / 4n$ に対して、 $\pm 45\%$ の範囲内となるように設定することが好ましい。

【0098】

図 7 は、反射構造 60 を構成する半導体層、空気層の層厚 l_s 、 l_a を、それぞれ最適層厚 $l_{opt,s}$ 、 $l_{opt,a}$ に対して $\pm 45\%$ に設定した場合の、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 7 において、グラフ C1 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 $M=1$ とした場合の反射率を示し、グラフ C2 は、反射構造 60 に含まれる構造層の層数を $M=2$ とした場合の反射率を示している。

【0099】

図 8 は、反射構造 60 を構成する半導体層、空気層の層厚 l_s 、 l_a を、それぞれ最適層厚 $l_{opt,s}$ 、 $l_{opt,a}$ に対して $\pm 45\%$ に設定した場合の、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 8 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 $M=1$ 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 $M=2$ とした場合の反射率を示している。これらの図 7、図 8 における構成条件は、上記した層厚の許容範囲において、ともに最適条件から最も離れた条件となっている。

【0100】

これらの図 7、図 8 に示すグラフから、反射構造 60 を構成する第 1 媒質層、第 2 媒質層の層厚は、最適層厚に対して $\pm 45\%$ の範囲内であれば、それぞれ独立に変化していても良いことがわかる。したがって、反射構造 60 の構成としては、上述したように、第 1 媒質層の層厚が、最適層厚 $l_{opt,1} = \lambda / 4n_1$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となり、第 2 媒質層の層厚が、最適層厚 $l_{opt,2} = \lambda / 4n_2$ に対して $\pm 45\%$ の範囲内となるように構成されていれば良い。

【0101】

[第 2 実施形態]

【0102】

図 9 は、光検出装置の第 2 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 1B 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。

【0103】

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 1B 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。

【0104】

[第3実施形態]

【0105】

図10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）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）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において、第1、第2入射面に対向する第1、第2反射面30e、30f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構造601、602が設けられている。

10

【0106】

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1C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10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。

【0107】

また、図10に示す構成では、検出器30の第1入射面に対し、受光部201及び導波路部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。光検出装置1C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。

20

【0108】

なお、第1、第2受光部201、202の周期構造については、図10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9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。

【0109】

[第4実施形態]

【0110】

図10に示した光検出装置1C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。

30

【0111】

図11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、受光部201、202、及び反射構造を含む量子カスケード検出器30を有し、図10に示した光検出装置1C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1D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。

40

【0112】

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 $50\mu\text{m} \times 50\mu\text{m}$ とすることができる。また、光検出ユニット15全体での画素サイズを、例えば $100\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$ とすることができる。なお、図11の光検出装置1D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。

50

【0113】

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。

【0114】

また、半導体光検出素子の第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。

【産業上の利用可能性】

【0115】

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】

【0116】

1A～1D…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、

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、

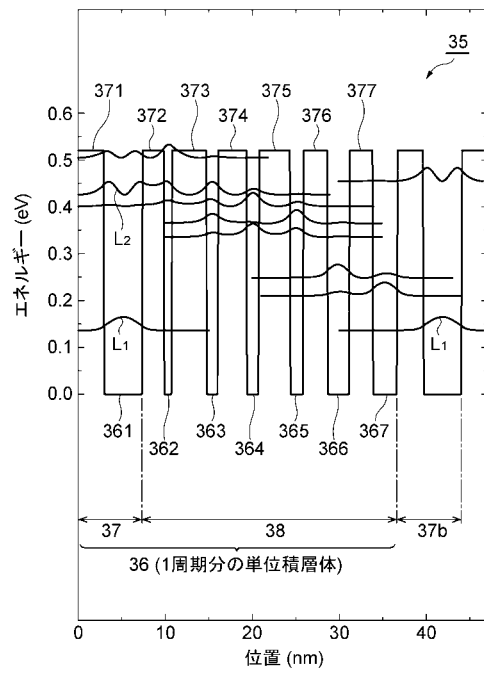
30…量子カスケード検出器（半導体光検出素子）、30a…第1面（入射面）、30b…第2面（反射面）、31…下部コンタクト層、32…クラッド層、33…上部コンタクト層、35…活性層、36…単位積層体、37…吸収領域、38…輸送領域、60…反射構造、61…第1構造層、62…第2構造層、

50…導波路部、51…導波路層、52…誘電体層。

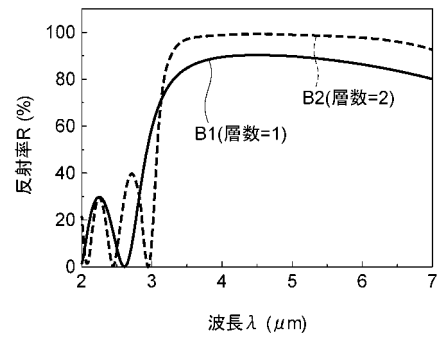
10

20

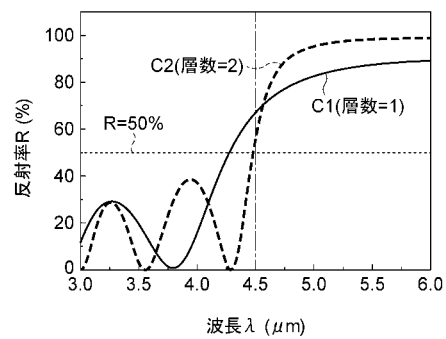
【図 5】



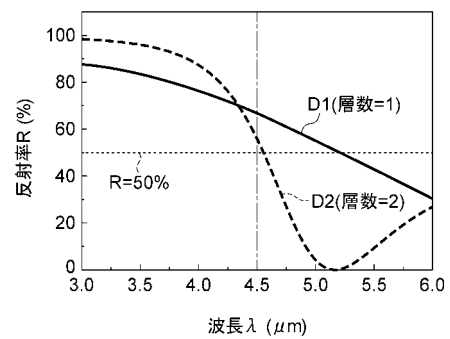
【図 6】



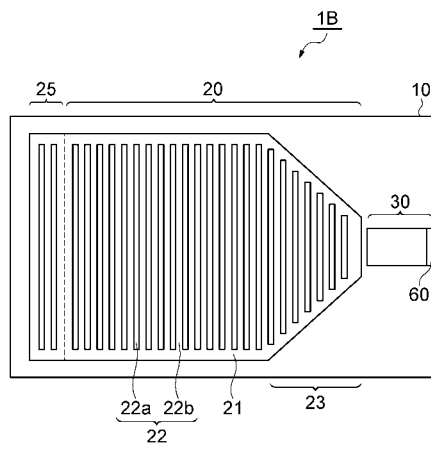
【図 7】



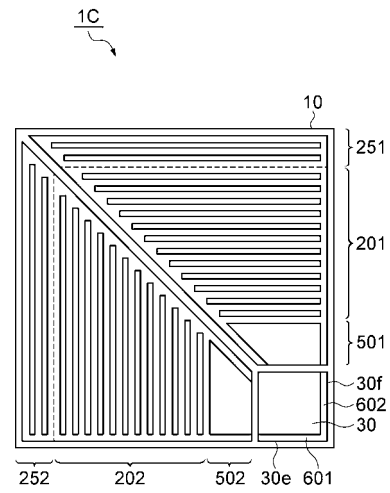
【図 8】



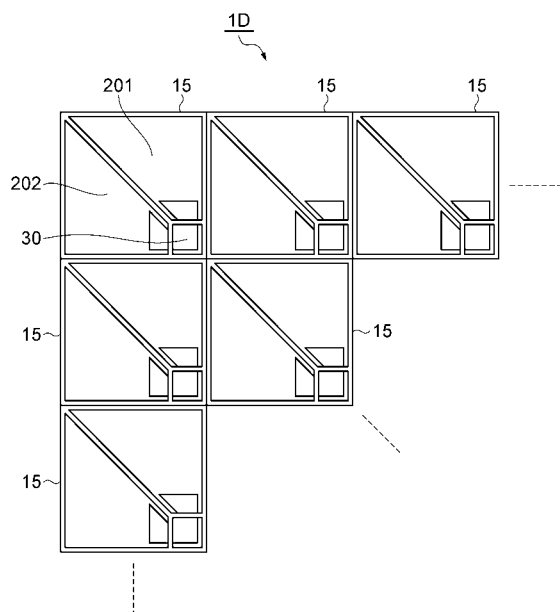
【図 9】



【図 10】



【図 11】



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) 2G065 AA04 AB02 BA02 BA14 BA40
5F849 AB07 BB02 DA35 DA50 XB18 XB34