

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7379056号
(P7379056)

(45)発行日 令和5年11月14日(2023.11.14)

(24)登録日 令和5年11月6日(2023.11.6)

(51)国際特許分類

F I

H O 1 L 31/10 (2006.01)

H O 1 L 31/10 A

H O 1 L 31/0232(2014.01)

H O 1 L 31/02 D

請求項の数 11 (全15頁)

(21)出願番号	特願2019-181577(P2019-181577)	(73)特許権者	000001007
(22)出願日	令和1年10月1日(2019.10.1)		キャノン株式会社
(65)公開番号	特開2021-57527(P2021-57527A)		東京都大田区下丸子3丁目30番2号
(43)公開日	令和3年4月8日(2021.4.8)	(74)代理人	110002860
審査請求日	令和4年9月29日(2022.9.29)		弁理士法人秀和特許事務所
		(72)発明者	内田 武志
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号
			キャノン株式会社内
		(72)発明者	須賀 貴子
			東京都大田区下丸子3丁目30番2号
			キャノン株式会社内
		審査官	吉岡 一也

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 受光素子、検知システム

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

半導体基板に対して、下部反射鏡、光電変換層を含んだ共振器部、上部反射鏡がこの順に積層されることによって形成された複数のフォトダイオードを有し、

前記複数のフォトダイオードにおける、前記半導体基板および前記下部反射鏡は共通化されており、

前記複数のフォトダイオードは、共振波長λ1を有する第1のフォトダイオードと、前記共振波長λ1よりも大きい共振波長λ2を有する第2のフォトダイオードとを含み、

前記下部反射鏡の反射率は、前記共振波長λ1に対応した第1のピークと、前記共振波長λ2に対応した第2のピークを有しており、

前記第2のピークの反射率は、前記第1のピークの反射率よりも大きい、

ことを特徴とする受光素子。

【請求項2】

前記共振波長λ1における前記下部反射鏡の反射率および前記共振波長λ2における前記下部反射鏡の反射率は、0.155以上である、

ことを特徴とする請求項1に記載の受光素子。

【請求項3】

前記共振波長λ1における前記下部反射鏡の反射率は、前記第1のピークの反射率の85%以上であり、

前記共振波長λ2における前記下部反射鏡の反射率は、前記第2のピークの反射率の8

5 % 以上である、

ことを特徴とする請求項 1 または 2 に記載の受光素子。

【請求項 4】

前記第 1 のフォトダイオードと前記第 2 のフォトダイオードとでは、前記下部反射鏡と前記上部反射鏡との間に存在する層の光学厚さの合計値が異なっている、

ことを特徴とする請求項 1 から 3 のいずれか 1 項に記載の受光素子。

【請求項 5】

前記下部反射鏡では、第 1 の材料によって構成された第 1 の層と、前記第 1 の材料よりも屈折率が低い第 2 の材料によって構成された第 2 の層とが交互に積層されており、

前記下部反射鏡の少なくとも一部では、それぞれの光学厚さが特定の波長 λ_3 の $1/4$ 倍である前記第 1 の層と前記第 2 の層が交互に積層されており、

前記下部反射鏡は、光学厚さが前記特定の波長 λ_3 の $1/4$ 倍ではない前記第 2 の層を含んでいる、

ことを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の受光素子。

【請求項 6】

前記特定の波長 λ_3 は、前記共振波長 λ_1 と前記共振波長 λ_2 との間の値である、

ことを特徴とする請求項 5 に記載の受光素子。

【請求項 7】

前記光学厚さが前記特定の波長 λ_3 の $1/4$ 倍ではない前記第 2 の層の光学厚さは、前記特定の波長 λ_3 の $1/4$ 倍よりも大きく、前記特定の波長 λ_3 の $1/2$ 倍以下である、

ことを特徴とする請求項 5 または 6 に記載の受光素子。

【請求項 8】

前記下部反射鏡は、2 つの反射鏡が積層されることによって構成されており、

前記 2 つの反射鏡のそれぞれでは、第 1 の材料によって構成された第 1 の層と、前記第 1 の材料よりも屈折率が低い第 2 の材料によって構成された第 2 の層とが交互に積層されており、

前記 2 つの反射鏡のうちの一方では、それぞれの光学厚さが特定の波長 λ_3 の $1/4$ 倍である前記第 1 の層と前記第 2 の層が交互に積層されており、

前記 2 つの反射鏡のうちの他方では、それぞれの光学厚さが前記特定の波長 λ_3 とは異なる特定の波長 λ_4 の $1/4$ 倍である前記第 1 の層と前記第 2 の層が交互に積層されている、

ことを特徴とする請求項 1 から 4 のいずれか 1 項に記載の受光素子。

【請求項 9】

前記特定の波長 λ_3 は、前記共振波長 λ_1 と略同じ値であり、

前記特定の波長 λ_4 は、前記共振波長 λ_2 と略同じ値である、

ことを特徴とする請求項 8 に記載の受光素子。

【請求項 10】

前記半導体基板は I n P 基板であって、

前記共振波長 λ_1 と前記共振波長 λ_2 との差は 150 nm よりも大きい、

ことを特徴とする請求項 1 から 9 のいずれか 1 項に記載の受光素子。

【請求項 11】

請求項 1 から 10 のいずれか 1 項に記載の受光素子を含み、入射された光を信号に変換する受光部と、

前記受光部から前記信号を読み出す読み出し部と、

前記信号に基づいた情報を出力する信号処理部と、
を有する、

ことを特徴する検知システム。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

20

30

40

50

本発明は、受光素子、検知システムに関する。

【背景技術】

【0002】

光電変換層を2つの反射鏡によって挟んだ共振器型のフォトダイオード(PD)を有し、光(電磁波)を受光する受光素子が知られている。特許文献1には、下部反射鏡であるInP/InGaAsPのDBR(Distributed Bragg Reflector)と、InGaAsの光電変換層と、SiO₂/SiNの上部反射鏡とがInP基板上に形成された共振器型PDが記載されている。

【0003】

共振器型PDでは、光電変換層を含む共振器の共振波長においてPDとしての分光感度が最大であり、分光感度の半値全幅は40nm程度である。当該半値全幅は、一般的なPDと比較して狭い。このため、共振器型PDは、特定の波長付近のみの光を受光する目的には好適である。

【0004】

ここで、特定の波長の光を受光する目的の一つとして、特定の波長の光から情報を得ることや、2次元像として可視化することがあげられる。一例としては、物質の固有の吸収波長に対応した波長の光を受光することによって、その物質の有無や物質の分布の2次元像を得るといったことができる。なお、一般的に、物質における固有の吸収は、1μmより長い波長域で顕著である。また、特定の波長の光を受光して情報を得る場合には、特定の1波長の光ではなく、特定の2波長以上の複数波長の光を受光することによって情報を得ることが装置として、さらに好ましい場合がある。

【0005】

特許文献1に開示されている共振器型PDでは、共振波長に対応する波長付近のみ感度が高いという特徴があるため、特定の1波長を受光する受光素子としては好適である。特に、物質の吸収スペクトルが顕著に現れる1μmより長い波長域に共振波長を持つ共振器型PDは好適な受光素子である。さらに、共振器型PDでは、共振波長を変えることで、PDの感度ピークの波長を変えることができる。そのため、半導体基板上に下部反射鏡と光電変換層を含めた共振器部を結晶成長させた後に、一部の共振器部の厚さを減らすことによって、異なる2波長に感度ピークを持つ複数のPDをモノリシック(同一基板上)に作製することができる。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【文献】特開2002-151731号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

このように、共振波長(共振器長)の調整により、特定の2波長に感度ピークを有する受光素子を容易に形成できるように思われる。しかし、特定の2波長が互いに大きく異なる場合には、受光素子を構成する共振器部以外の部材が影響することによって、特定の2波長に感度ピークを有する受光素子を形成することができなかった。つまり、同一基板上に形成された複数のフォトダイオードを有し、波長が大きく異なる特定の2波長の光に感度ピークを有する受光素子を形成することができなかった。

【0008】

そこで、本発明は、同一基板上に形成された複数のフォトダイオードを有し、波長が大きく異なる2波長の光に感度ピークを有する受光素子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】

【0009】

本発明の1つの態様は、

半導体基板に対して、下部反射鏡、光電変換層を含んだ共振器部、上部反射鏡がこの順

10

20

30

40

50

に積層されることによって形成された複数のフォトダイオードを有し、

前記複数のフォトダイオードにおける、前記半導体基板および前記下部反射鏡は共通化されており、

前記複数のフォトダイオードは、共振波長 λ_1 を有する第1のフォトダイオードと、前記共振波長 λ_1 よりも大きい共振波長 λ_2 を有する第2のフォトダイオードとを含み、

前記下部反射鏡の反射率は、前記共振波長 λ_1 に対応した第1のピークと、前記共振波長 λ_2 に対応した第2のピークを有しており、

前記第2のピークの反射率は、前記第1のピークの反射率よりも大きい、

ことを特徴とする受光素子である。

【発明の効果】

【0010】

本発明によれば、同一基板上に形成された複数のフォトダイオードを有し、波長が大きく異なる2波長の光に感度ピークを有する受光素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0011】

【図1】実施形態に係る受光素子を示す図である。

【図2】実施例1に係る受光素子を示す図である。

【図3】実施例1に係る反射率スペクトルを説明する図である。

【図4】実施例1に係る分光感度を説明する図である。

【図5】実施例2に係る受光素子を示す図である。

【図6】実施例2に係る反射率スペクトルおよび分光感度を説明する図である。

【図7】実施例3に係る検知システムを示す図である。

【図8】水と氷との光の吸収について説明する図である。

【発明を実施するための形態】

【0012】

以下では、異なる2波長の光（電磁波）を受光する受光素子（PDアレイ；共振器型PD）について説明する。まず、本発明に係る発明者が見出した受光素子において生じる課題について説明する。

【0013】

受光素子は、2つの物質の情報を取得したり、2次元像を取得したりするために用いられる。ここで、例えば、氷と水は、どちらも $1.4\mu\text{m}$ から $1.6\mu\text{m}$ の波長範囲の光を吸収する性質がある。そのため、この波長範囲において受光素子が1波長の光のみを受光する場合には、氷と水のどちらか一方が存在することが判別可能であるが、氷の水のどちらであるかの判別はできない。

【0014】

これに対して、受光素子が2波長の光を受光できる場合には、 $1.4\mu\text{m}$ と $1.6\mu\text{m}$ の2波長の光を受光し、光の強度を比較すれば、氷と水のどちらであるかを判別することができる。これは、図8が示すように、水は $1.4\mu\text{m}$ の波長の光の方が $1.6\mu\text{m}$ の波長の光よりも吸収が強く、逆に、氷は $1.6\mu\text{m}$ の波長の光の方が $1.4\mu\text{m}$ の波長の光よりも吸収が強いためである。このように、氷と水の判別を必要とする場合には、2波長の光を受光することによって、当該判別ができる。対象の物理現象に基づき決定する特定の2波長を受光することによって、1波長では得られない検知対象物質などのより詳細な情報を得ることができる場合がある。

【0015】

しかしながら、受光素子では、DBR（下部反射鏡）の上に光電変換層を結晶成長するため、光電変換層を結晶成長可能な半導体によってDBRを実現しなければならない。この場合、DBRを形成するために選択できる材料が限られるので、下部反射鏡として用いるDBRでの反射帯域が限られる。ここで、例えば、 $1.4\mu\text{m}$ と $1.6\mu\text{m}$ の波長の光に対応するInP基板上にDBR（下部反射鏡）を作製する場合、バンド間吸収を避け、かつInP基板上に結晶成長可能な構成を有するInP／InGaAsPなどが知られて

10

20

30

40

50

いる。しかし、このDBRの反射率スペクトルの1つの帯域としては100～150 nm程度が実用的な範囲であり、1.4 μm と1.6 μm という互いの差分が150 nmより大きく異なる2つの波長に対応することはできない。さらに、DBRの反射率が最大の波長（中心波長）から離れると反射率の波長依存性が大きいため、設計と実際の結晶成長の膜厚のずれが反射率およびPDの分光感度に大きく影響するという課題も存在する。

【0016】

また、特定の1波長の光のみ受光する場合はDBRの反射率が最大の波長（中心波長）と共振波長を一致させ、反射率が少なければDBRにおける積層の繰り返し数を増やすことによって反射率を上げることができる。一方、2波長以上の場合、必要な波長が離れている一方、DBRによって光反射率が得られる帯域は積層の繰り返し数を増やしても増加せず、層間の屈折率差のみで決まってしまう。このため、DBRを構成する材料が限定されてしまうと、反射率の向上が容易ではないという課題もある。

【0017】

<実施形態>

このような課題を解決すべく、以下では、実施形態に係る受光素子1（PDアレイ；共振器型PD）を説明する。本実施形態に係る受光素子1を図1に示す。受光素子1は、2つのフォトダイオード部（PD部）であるPD101とPD102を有する。また、受光素子1において、半導体基板1000、第1の反射鏡1001、共振器部1010（共振器部1020）、第2の反射鏡1002が順に積層されている。以下では、積層方向において半導体基板1000に対して第1の反射鏡1001が配置されている方向を「上」と称する。

【0018】

PD101とPD102は、共通化された半導体基板1000と共通化された第1の反射鏡1001を含んでいる。半導体基板1000は、InP基板である。PD101は共振器部1010を有し、PD102は共振器部1020を有している。共振器部1010および共振器部1020の上部に、第2の反射鏡1002が配置されている。第2の反射鏡1002は、上部反射鏡であり、PD101とPD102において同一の部材によって構成されている。ここで、PD101の共振波長は λ_1 であり、PD102の共振波長は λ_2 である。

【0019】

共振器部1010および共振器部1020は、光を電気信号に変換するための光電変換層1003を内部に含んでいる。ここで、第1の反射鏡1001と各PDの共振器部との界面から光電変換層1003の上部まではPD101とPD102で同一の構成である。

【0020】

下部反射鏡である第1の反射鏡1001における反射率スペクトルは2つのピークを有しており、ピーク波長はPD101とPD102の共振波長 λ_1 と共振波長 λ_2 と略一致している。このようにすることで、第1の反射鏡1001の反射率スペクトルにおいて十分な反射率を有する1つの波長帯の幅を λ_1 、 λ_2 の波長差よりも広くできない場合でも、 λ_1 および λ_2 に対して共振の効果を発揮するのに十分な反射率を実現することができる。この複数のピークを実現する具体的な構成やそれぞれの構成の効果については、下記の各実施例で述べる。

【0021】

<実施例1>

以下、実施形態に係る具体的な例である実施例1について説明する。本実施例に係る受光素子1は、氷と水の判別を目的として設計されており、波長=1.4 μm と波長=1.6 μm においてPDの分光感度が最大であるように設計がされている。つまり、受光素子1が検出する光の波長は、1.4 μm と1.6 μm である。なお、上述において説明した実施形態に係る受光素子1の構成と同じ部分については、説明を省略する。

【0022】

[受光素子の構成について]

以下にて、本実施例に係る受光素子1について説明する。図2は、受光素子1の断面図を示す。ここで、PD101の共振波長は $1.4\mu\text{m}$ であり、PD102の共振波長は $1.6\mu\text{m}$ である。

【0023】

第1の反射鏡1001は、物理的な厚さ（物理厚さ）約 110nm のInGaAsP層2041と物理厚さ約 120nm のInP層2042が交互に積層されて構成されており、それぞれの1層の光学厚さは波長 $\lambda = 1520\text{nm}$ の $1/4$ 倍である。層の光学厚さ（光学的厚さ）とは、物理的な層厚に該層の屈折率を掛けた値である。ここで、InP層2042は、InGaAsP層2041よりも屈折率が低い。

【0024】

第1の反射鏡1001は、通常のDBR（Distributed Bragg Reflector）と同様に形成されている。なお、本明細書では、通常のDBRとは、光学厚さが同じであり、材料が異なる2つの層が交互に積層されることによって構成される反射鏡を示す。なお、通常のDBRにおいて、各層の光学厚さが、共振波長である $1.4\mu\text{m}$ と $1.6\mu\text{m}$ の間の波長 $\lambda = 1520\text{nm}$ であれば、第1の反射鏡1001によって波長 $\lambda = 1.5\mu\text{m}$ 付近を中心波長とする反射率スペクトルを形成することができる。ただし、本実施例に係る第1の反射鏡1001では、通常のDBRと完全に同じではなく、半導体基板1000側から数えて6ペア目のInP層2043のみ物理厚さが 210nm でありInP層2042よりも厚い。ここで、ペアとは、InP層とInGaAsP層の1つの組合せをいう。また、本実施例では、半導体基板1000側から数えて6ペア目のInP層の厚さを変更しているが、任意の場所のInP層の厚さを変更してもよい。図2では、第1の反射鏡1001および第2の反射鏡1002を構成する全ての層（DBRの繰返し周期分）は図示していない。

【0025】

共振器部1010は、InP層と光電変換層1003とから基本的に構成されており、共振器部1010の総光学厚さは $1.4\mu\text{m}$ である。PD101の共振波長はPD102とは異なっているが、これは、光電変換層1003よりも上部のInP層部分を形成した後、一部を除去することで実現している。

【0026】

共振器部1020は、InP層と光電変換層1003とから基本的に構成されており、共振器部1020の総光学厚さは $1.6\mu\text{m}$ である。このように、共振器部1010と共振器部1020との総光学厚さが異なる、つまり、PD101とPD102とで、第1の反射鏡1001と第2の反射鏡1002との間に存在する層の光学厚さの合計値が異なっている。

【0027】

光電変換層1003は、InGaAsによって構成されており、物理厚さは 70nm である。一般に、光電変換層の材料の吸収係数は、バンド端から短波長側に離れるにしたがって増加する。本実施例でも、光電変換層1003は、この特性を有する。つまり、光電変換層1003は、短波長の光の方が長波長の光よりも吸収する特性を有している。PD101の第2の反射鏡1002およびPD102の第2の反射鏡1002は、互いに同じ構成であり、TiO₂2051とSiO₂2052が交互に積層されることにより構成されるDBRである。

【0028】

PD101には、電気信号を取り出すための電極2061が形成されており、PD102には、電気信号を取り出すための電極2062が形成されている。また、第2の反射鏡1001上には、PD101およびPD102において共通のカソード電極2063が形成されている。電極2061は共振器部1010と電氣的に接続されており、電極2062は共振器部1020と電氣的に接続されている、また、共通のカソード電極2063は、第1の反射鏡1001と電氣的な接続をしている。

【0029】

〔反射率スペクトルおよび分光感度について〕

次に、第1の反射鏡1001の反射率スペクトルについて詳細に説明する。第1の反射鏡1001は、通常のDBRにおける1層のみの厚さが異なる構成である。図3(A)～図3(D)は、InP層2043の物理厚さと第1の反射鏡1001の反射率スペクトルの関係を示す。なお、図3(A)～図3(D)における物理厚さは、光学厚さが波長 $\lambda = 1520$ の $1/4$ 倍である物理厚さ 120 nm (InP層2042の物理厚さ)からの差分 Δd によって表現する。

〔0030〕

図3(A)は、 $\Delta d = 0$ 、つまりInP層2043の光学厚さが $\lambda/4$ である構成(第1の反射鏡1001が通常のDBR)である場合の反射率スペクトルを示す。この場合、反射率スペクトルは通常のDBRと同じであり、中心波長にピークを持つスペクトル形状である。

〔0031〕

図3(B)は、 $\Delta d = 40\text{ nm}$ の場合の反射率スペクトルを示す。この場合には、 $\Delta d = 0\text{ nm}$ の場合よりも、反射率が最大値をとる波長が長波長側にずれて、短波長側の極大値が増加している。

〔0032〕

図3(C)は、 $\Delta d = 80\text{ nm}$ の場合の反射率スペクトルを示す。この場合には、 $\Delta d = 40\text{ nm}$ の場合よりも、反射率が最大値をとる波長がさらに長波長側にずれ、かつ、短波長側の極大値が増加している。

〔0033〕

図3(D)は $\Delta d = 120\text{ nm}$ 、つまり Δd の光学厚さが $\lambda/4$ である場合の反射率スペクトルを示す。この場合には、略同じ大きさの極大値が2つ並んでおり、 $\Delta d = 0$ の場合における中心波長では、反射率が極小であることがわかる。

〔0034〕

本実施例では、InP層2043の Δd を増加させることによって、図3(D)などに現れている2つの極大値をとる波長を、PD101、PD102の共振波長に合わせている。これによって、少ないDBRにおける層数によって離れた特定の2波長での反射率を向上させ、共振器の効果を向上させることができる。

〔0035〕

さらに、反射率スペクトルの極大値付近の波長が共振波長に一致するように構成されている。ここで、極大値付近では反射スペクトルの傾きが小さいため、各PDの共振波長と反射率の極大値の波長とにずれが生じた際にも、反射率への影響が小さいという効果もある。図3(A)が示すような通常のDBRにおいては、本実施例において受光される $1.4\text{ }\mu\text{m}$ と $1.6\text{ }\mu\text{m}$ の波長での反射率は、反射率スペクトルにおいて傾きが大きい位置である。そのため、波長 $= 1.4\text{ }\mu\text{m}$ 、 $1.6\text{ }\mu\text{m}$ の付近でPDの共振波長がずれた場合、共振器を構成する下部反射鏡の反射率が大きくずれてしまい、結果としてPDの素子特性、具体的な分光感度のピーク値が大きく変動する。そのため、図3(D)で示されるように、反射率スペクトルの極大値付近の波長が共振波長に一致させることが好ましい。

〔0036〕

なお、本実施例では、図3(D)が示すような2つの極大値が近づく $\Delta d = 120\text{ nm}$ ではなく、2つの反射率の極大値が異なる $\Delta d = 90\text{ nm}$ にしている。 $\Delta d = 90\text{ nm}$ である理由は、光電変換層1003が、短波長の光の方が長波長の光よりも吸収する特性を有していることを考慮して、PD101とPD102の分光感度のピーク値を互いに近づけるためである。図4(A)は $\Delta d = 120\text{ nm}$ である場合の各PDの分光感度を示し、図4(B)は $\Delta d = 90\text{ nm}$ である場合の各PDの分光感度を示す。図4(C)は、 $\Delta d = 90\text{ nm}$ である場合の第1の反射鏡1001の反射率スペクトルを示す。

〔0037〕

$\Delta d = 120\text{ nm}$ である場合では、図4(A)が示すように、2つのPDの分光感度に 1.3 倍程度の差が生じている。 $\Delta d = 90\text{ nm}$ である場合では、図4(C)が示すよう

10

20

30

40

50

に、2つの反射率の極大値がそれぞれ0.15と0.25程度であり、2つの値は1.7倍程度異なる。つまり、長波長側の反射率の極大値（長波長側のピークの反射率）が、短波長側の反射率の極大値（短波長側のピークの反射率）よりも大きい。しかしながら、図4（B）が示すように、 $\Delta d = 90 \text{ nm}$ である場合では、2つのPDの分光感度のピーク値は10%程度の差である。このように、本実施例では、2つの波長における反射率の極大値に差を設けることにより、2つのPDの分光感度のピーク値が近づくように設計している。より具体的には、分光感度を高めたい側のPDの共振波長での反射率を上げることによって、当該共振波長における分光感度を上げている。

【0038】

光電変換層1003の材料の吸収係数は、バンド端から短波長側に離れるにしたがって増加する。この特性によれば、反射率スペクトルの2つの極大値は、長波長側の極大値の方をより大きくすることによって、各PDの共振波長において反射率が同じである場合と比較して、2つのPDの分光感度のピーク値が互いに近づくように補正することができる。そのため、このように補正する場合、 Δd は0より大きく120 nm以下、言い換えると Δd は0より大きく光学厚さの $\lambda/4$ 以下である。なお、 Δd は上述のように、光学厚さが $\lambda/4$ と異なる特定層の光学厚さから光学厚さ $\lambda/4$ を引いた値に対応する物理厚さで定義している。このため、光学厚さが $\lambda/4$ と異なる特定層の光学膜厚としての好ましい範囲は、光学厚さが $\lambda/4$ より大きく $\lambda/2$ 以下（ λ の $1/4$ 倍より大きく、 λ の $1/2$ 倍以下）ということができる。

【0039】

上述のように、各PDの共振波長と第1の反射鏡1001の反射率の極大値の波長とは一致していることが望ましい。しかし、実際に作製する場合には、多少の誤差が生じてしまう。このため、2つのPDの共振波長のそれぞれが、それぞれ異なる第1の反射鏡1001の反射率スペクトルにおけるピークと対応していればよい。その許容範囲としては、図4（A）と図4（B）における反射率と分光感度の変動量を読み取ると、分光感度の変動を10%以内に抑える場合には、反射率の許容範囲は15%である。これらを言い換えると、2つの共振波長を λ_1 、 λ_2 とした場合に、第1の反射鏡1001の反射率（反射率）は、共振波長 λ_1 に対応した第1のピークと、共振波長 λ_2 に対応した第2のピークを有していればよい。そして、共振波長 λ_1 における第1の反射鏡1001の反射率が、反射率の極大値を有する波長のうち λ_1 から最も近い波長における極大値（第1のピークの反射率）の85%以上であることが好ましい。同様に、共振波長 λ_2 における第1の反射鏡1001の反射率が、反射率の極大値を有する波長のうち λ_2 から最も近い波長における極大値（第2のピークの反射率）の85%以上であることが好ましい。

【0040】

本実施例では、通常のDBRに対して特定の1層の層厚のみ変更して、特定の2つの波長において第1の反射鏡1001の反射率が所定の反射率以上（所定値以上）であるように設計されている。この設計は、実際の製造上、DBRの膜厚の調整が容易であるため、第1の反射鏡1001の製造が容易であるというメリットがある。具体的には、通常のDBRを成膜し、DBRの中心波長を反射率スペクトル測定で把握し、成膜条件にフィードバックして特定の1層の厚さを調整するという製造方法が適用できる。これは、第1の反射鏡1001では、特定の1層を除き通常のDBRであり、かつ、特定の1層もDBRの特性の層と同じ材料であるため、成膜時間の制御によって厚さを容易に調整できるからである。

【0041】

なお、本実施例では、DBRにおいて交互に積層する層（通常のDBRに相当する層）の光学厚さを1520 nmとしている。これに対して、当該光学厚さを1.4 μm と1.6 μm との中心の値である1500 nmとすると、1.4 μm と1.6 μm に反射率の極大値を有する当該光学厚さが1520 nmである場合よりも、反射スペクトルが20 nm短波長にずれてしまう。しかし、上述した「反射率の変動率15%以内」を考えると、DBRにおいて交互に積層する層の光学厚さは、図4（C）より読み取ると、1520 nm

10

20

30

40

50

から誤差 2.0 % 以内であれば許容可能であるため、当該光学厚さは 1500 nm であってもよい。

【0042】

しかしながら、DBRにおいて交互に積層する層の膜厚が1%ずれると、DBRの中心波長は、1.5 μm の波長帯において15 nm程度ずれる。この15 nmのずれは、DBRの反射率やPD分光感度特性への影響が懸念されることもある。このため、理想的には、中心波長の調整は直接的に精度よく調整可能な本実施例の構成が好ましい。

【0043】

一方、DBRにおいて光学厚さが他の層と異なる特定の1層の膜厚については、膜厚ずれが1%あっても許容できる。例えば、図3(C)と図3(D)を比較すると、膜厚40 nmのずれ(約18%ずれ)があるが、分光感度は0.1 A/Wの差(約20%)である。そのため、特定の1層の膜厚については、通常のDBRで得られた成膜条件に対して膜厚比に応じた係数を掛けることによって特定の1層の成膜条件を推定して、成膜する方法などによって実現可能である。

【0044】

このように、本実施例では、通常のDBRに対して異なる光学厚さの層を形成して反射率の調整をすることによって、2つの反射率の極大値を持つ第1の反射鏡1001を精度よく実現することができる。

【0045】

また、DBRの反射率スペクトルの1つの帯域としては100~150 nm程度が実用的な範囲であるため、従来、互いの波長の差が150 nmより大きく異なる2つの光を十分に反射させることができなかった。これに対して、本実施例による第1の反射鏡は、1.4 μm と1.6 μm という互いの波長の差が150 nmより大きく異なる2つの光を十分に反射させることができる。従って、同一基板上に形成された複数のフォトダイオードを有し、波長が大きく異なる2波長の光に感度ピークを有する受光素子を実現できる。

【0046】

<実施例2>

以下では、2つの反射鏡が積層されることによって下部反射鏡を実現する実施例2に係る受光素子6について説明する。図5は、実施例2に係る受光素子6の断面図を示す。本実施例では、受光素子6において、下部反射鏡の反射率スペクトルの帯域を広げるために中心波長の異なるDBRが2つ重なっている。なお、実施例1に係る受光素子1と同様の構成については、同様の符号を付けて詳細な説明は省略する。もっとも、同じ符号であっても、材料の組成や膜厚等が異なる場合もありうる。

【0047】

[半導体素子の構成について]

半導体素子6は、2つのPD部であるPD601とPD602を有する。PD601とPD602は、半導体基板1000と第1の反射鏡6001および第3の反射鏡6101を共通(同一)に有している。本実施例では、2つの反射鏡が積層することによって下部反射鏡が形成されており、一方が第1の反射鏡6001であり、他方が第3の反射鏡6101である。PD601は共振器部1010を有し、PD602は共振器部1020を有している。共振器部1010および共振器部1020の上部に、上部反射鏡である第2の反射鏡1002が形成されている。第2の反射鏡1002は、PD601とPD602において同一の部材によって構成されている。PD601の共振波長は1.39 μm であり、PD602の共振波長は1.77 μm である。

【0048】

第1の反射鏡6001は、物理厚さ約131 nmのInGaAsP層6041と物理厚さ約144 nmのInP層6042が交互に8ペア積層されて構成されたDBRであり、それぞれの1層の光学厚さは波長 $\lambda = 1800 \text{ nm}$ (波長 λ_3)の $1/4$ である。当該光学厚さは、PD602の共振波長と同じ値(もしくは略同じ値)であってもよい。

【0049】

第3の反射鏡6101は、第1の反射鏡6001の上部に積層されており、共振器部1010および共振器部1020の下部に形成されているDBRである。第3の反射鏡6101は、物理厚さ約97nmのInGaAsP層6141と物理厚さ約111nmのInP層6142が交互に4ペア積層されて構成されており、それぞれの1層の光学厚さは波長 $\lambda' = 1400\text{ nm}$ （波長 λ_4 ）の $1/4$ である。当該光学厚さはPD601の共振波長と同じ値（もしくは略同じ値）であってもよい。なお、第1の反射鏡6001および第3の反射鏡6101において、積層させるInP層とInGaAsP層のペア数は、上述した数に限らず任意の数であってもよい。

【0050】

このように、第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101とにおいて層の光学厚さを異ならせることによって、第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101との反射スペクトルでの中心波長を異ならせる。より詳細には、第1の反射鏡6001の中心波長をPD602の共振波長と同様の値にし、第3の反射鏡6101の中心波長をPD601の共振波長と同様の値にしている。このことによって、2つの反射鏡を重ねた構成において1800nmと1400nmの付近の波長とに反射率の極大値が位置するようにすることができる。なお、図2では、各反射鏡における繰り返し数に対応した全ての層は図示しておらず、代表した一部の層を表している。

【0051】

共振器部1020は、基本的にInP層とInGaAsSbの光電変換層1003とによって構成されている。光電変換層1003の下部のInP層の物理厚さは140nmであり、光電変換層1003の上部のInP層の物理厚さは270nmである。光電変換層1003の物理厚さは100nmである。

【0052】

共振器部1010は、基本的にInP層とInGaAsの光電変換層1003とによって構成されており、第1の反射鏡6101とPD601の共振器部との界面から光電変換層1003まではPD602と同様の構成である。PD601の光電変換層の上部のInP層の物理厚さは100nmである。PD601およびPD602の第2の反射鏡1002の中心波長は、1600nmである。

【0053】

〔反射率スペクトルおよび分光感度について〕

図6（A）は、本実施例に係る第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101とが積層された（重なった）構成による反射率スペクトルを示す。図6（B）は、本実施例に係るPD601、PD602の分光感度を示す。

【0054】

図6（A）では、第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101が積層された構成による反射率スペクトル（本実施例に係る下部反射鏡の反射率スペクトル）を、実線によって示している。一方、比較例として第1の反射鏡6001のみで構成された場合の反射率スペクトルを、破線によって示している。図6（A）が示すように、第3の反射鏡6101が存在することによって、波長 $= 1.4\text{ }\mu\text{m}$ を中心に、波長 $= 1.3\text{ }\mu\text{m} \sim 1.6\text{ }\mu\text{m}$ 付近で反射率が第3の反射鏡6101が存在しない場合よりも増加していることがわかる。本実施例では、このように中心波長の異なる2つのDBRを重ねることによって、波長 $= 1.4\text{ }\mu\text{m}$ と波長 $= 1.8\text{ }\mu\text{m}$ 付近において共振器PDとして必要な反射率を得ることができる。

【0055】

図6（B）は、本実施例に係るPD601およびPD602の分光感度を示す。PD601は波長 $= 1.39\text{ }\mu\text{m}$ に分光感度のピークを有しており、PD602は波長 $= 1.77\text{ }\mu\text{m}$ に分光感度のピークを有している。なお、PD602は、波長 $= 1.39\text{ }\mu\text{m}$ 付近にも分光感度のピークがあるが、PD602に求められる感度とは異なるので、2つのPDからの信号を差分などの演算をすることによって、各波長での光強度に基づく情報を得ることができる。

【0056】

なお、本実施例では、実施例1とは異なり、2つの異なるDBRを重ねた構成を受光素子の1つの反射鏡として使用している。実施例1と比較しての本実施例の利点は、共振波長がより離れた2つの波長に対しても必要な反射率を得られる点である。例えば、本実施例では波長=1.4 μm と波長=1.8 μm の波長が400nm離れた位置に必要な反射率を持つことができる。一方で、実施例1の構成では、受光する2つの光の波長差は200nmであった。

【0057】

一方で、下部反射鏡における結晶成長による成膜時の膜厚調整という点では、実施例1では、下部反射鏡として第1の反射鏡1001の1つのDBRを作製して調整するのみで実現可能である。これに対して、実施例2の構成では、第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101との2つのDBRを作製して、それぞれについて調整することが望ましい。このため、実施例1の方が実施例2よりもDBRの作製回数が少ないという利点がある。

【0058】

また、反射率スペクトルの形状について、実施例2では2つのDBR間での光の干渉が生じるが、実施例1ではそのような干渉の影響はない。例えば、図6(A)に示されているように、波長=1.6 μm より短波側において、フリンジ(縞)があり、これは2つのDBR間での干渉が影響している。

【0059】

本実施例においても、通常のDBRでは十分に反射することができない離れた2波長に対して局所的に反射率を上げ、離れた2つの共振波長を反射することが可能な受光素子(共振器型PD)を実現している。また、実施例1と実施例2はともに、共振波長付近で局所的に反射率を上げ、モノリシックな構成によって離れた2つの共振波長を有する受光素子を実現している。

【0060】

なお、半導体基板と光電変換層との間に位置する反射鏡の構成としては、実施例1, 2の構成に限定されるものではなく、2つの共振波長付近で局所的に反射率を上げた他の構成であってもよい。例えば、実施例2における第1の反射鏡6001と第3の反射鏡6101の2つのDBRの繰り返し周期を平均化した構成を、半導体基板と光電変換層との間に有する受光素子であってもよい。

【0061】

また、実施例1および実施例2はともに、InP基板上に結晶成長可能な半導体材料を用いて下部反射鏡を構成しているが、GaAs基板上に結晶成長可能な材料系、GaSb基板上に結晶成長可能な材料系など、他の半導体材料系によって構成していてもよい。これは、受光したい光の波長帯などに応じて適宜選択することができる。また、受光素子が受光する波長の種類は、実施例1および実施例2は2種類であったが、3種類以上でも同様の思想によって実現することができる。

【0062】

また、実施例1および実施例2の共振器部において、光電変換層の上下の層はInP単膜で構成されているが、複数層で構成されていてもよい。例えば、実施例1においてPD101の共振波長の調整の際に一部の層を除去する際、その制御性を向上させるために、エッチングストップ層を導入してもよい。反射鏡についても、実施例1および実施例2の各DBRにおいては、単膜の高屈折率層および単膜の低屈折率層で構成されているが、それぞれ複数層で実現してもよい。

【0063】

また、実施例1および実施例2により、共振を実現している波長(共振波長)での反射率は、実施例1では0.155と0.261にしており、実施例2では、0.178と0.405にしている。そこで、共振効果を生じるために必要な反射率としては、少なくとも、0.155以上というのが一つの目安といえる。言い換えると、共振効果を得るためには、2つの共振波長において、それぞれの反射率は0.155以上であることが好まし

10

20

30

40

50

い。

【0064】

＜実施例3＞

以下では、実施例3として、実施例1に係る受光素子1を用いた、水と氷の検知システム810について説明する。図7（A）および図7（B）は、実施例1に係る受光素子1（PDアレイ）を同一基板上に2次元に配置した受光部801と、受光部801を用いた検知システム810を示す。

【0065】

検知システム810は、図7（A）が示すように、受光素子1（PDアレイ）を同一基板上に2次元に配置した受光部801、各PDからの電気信号を読み出す読み出し回路802、金属バンプ803から構成されている。金属バンプ803は、受光部801と読み出し回路802とを電氣的・機械的に接続している。なお、金属バンプ803は、受光部801および読み出し回路802の表面に形成されている電極（不図示）に接続している。

【0066】

図7（B）は、検知システム810における信号の処理の流れを模式的に示している。検知システム810では、観察対象からの光がレンズ系850を通して受光部801に入射される。受光部801におけるPD101およびPD202（不図示）は、入射された光を電気信号に変換する。読み出し回路802は、変換された電気信号を読み出し、信号処理部820に送る。信号処理部820は、目的に応じて電気信号を処理する。本実施例では、信号処理部820は、隣接するPD101とPD102とのそれぞれが検知した光強度との比を求めて2次元画像を生成する。そして、信号処理部820は、2次元画像の各画素数値に対して、あらかじめ設定された閾値による3条件によって分類し、氷を示す領域、水を示す領域、どちらでもない領域の3つに分けた画像情報を生成して出力する。例えば、検知システム810により出力された情報は、画像として表示することができ、また、氷と水の検知割合などの情報を他のシステムに伝送することもできる。

【0067】

なお、本実施例は、水と氷の検知システムであるが、PDの共振波長や信号処理方法を変えることによって各種の物質の検知・可視化システム、2色温度計などに応用可能である。

【0068】

また、本実施例では、検知システムは、受光素子を2次元に配列した受光部を有しているが、1次元、またはPDを1組（例えばPD101とPD202が各1個）だけ配列した受光部を有していてもよい。また、読み出し回路は金属バンプ以外の方法によって読み出し回路と電氣的に接続してもよい。

【符号の説明】

【0069】

1：受光素子、101，102：PD（フォトダイオード）、1000：半導体基板、1001：第1の反射鏡、1002：第2の反射鏡、1003：光電変換層、1010，1020：共振器部

10

20

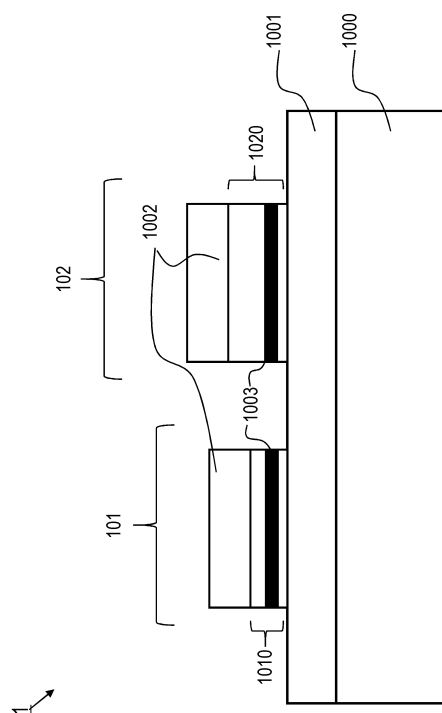
30

40

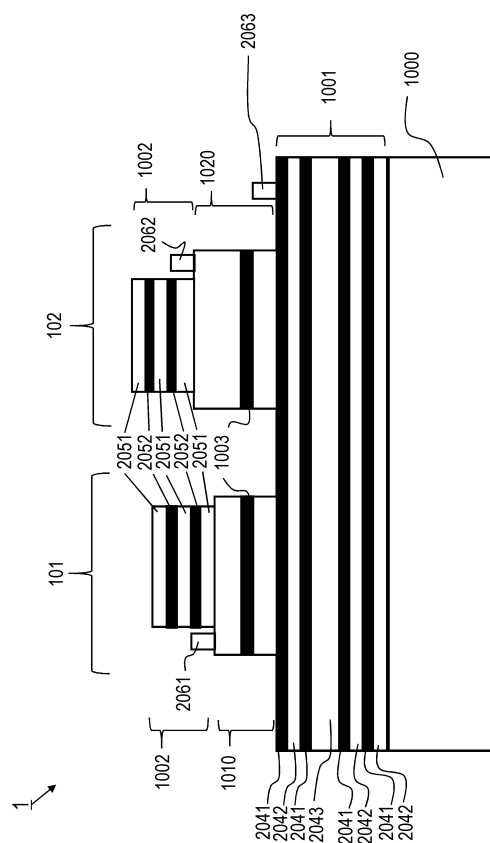
50

【図面】

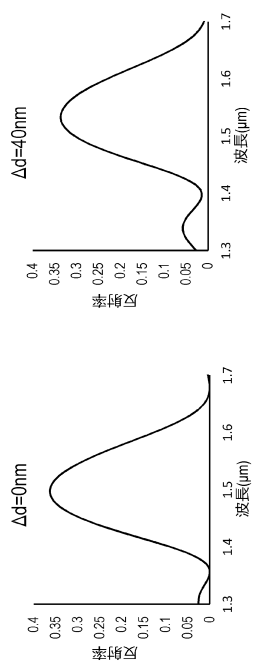
【図 1】



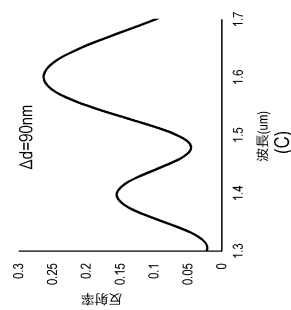
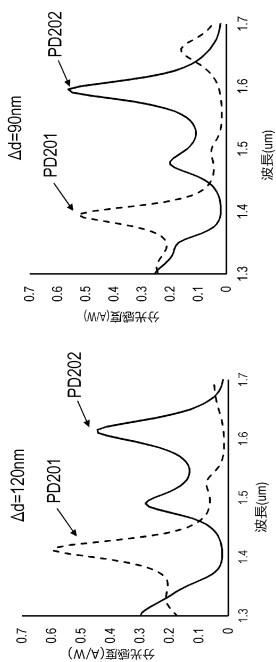
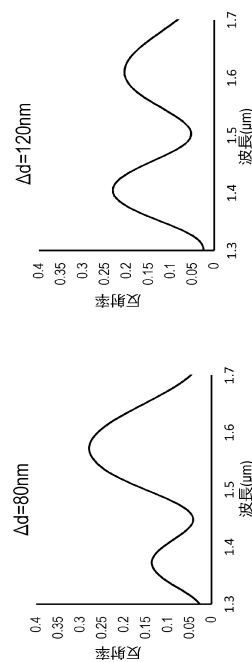
【図 2】



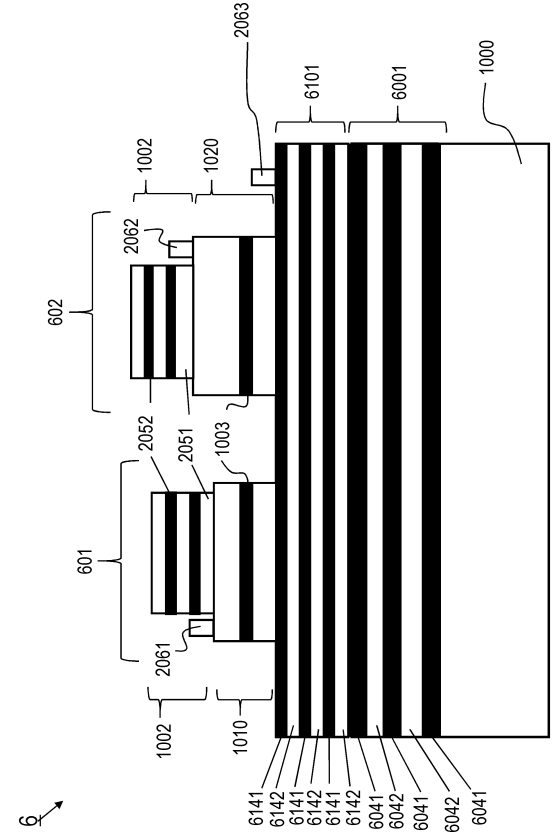
【図 3】



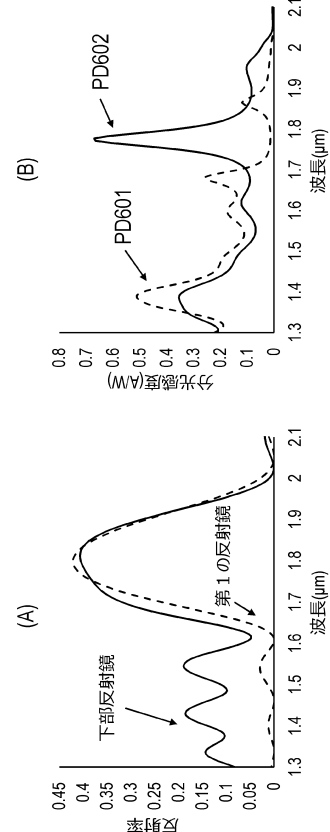
【図 4】



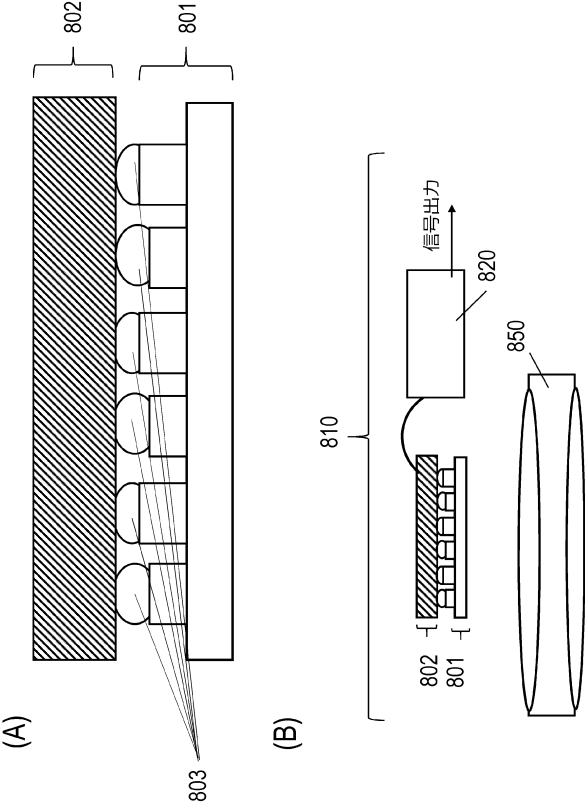
【図 5】



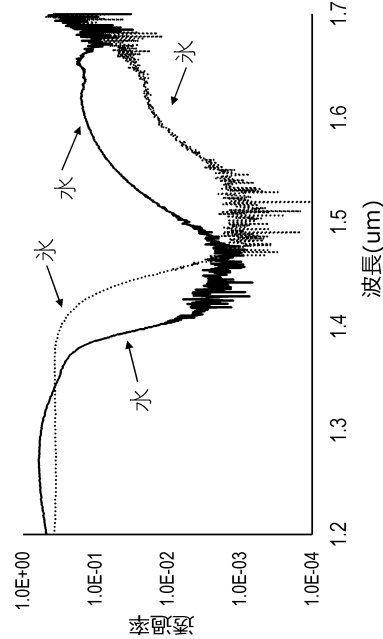
【図 6】



【図 7】



【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2017/0345958 (US, A1)
特表2003-508876 (JP, A)
特開2001-308368 (JP, A)
米国特許出願公開第2017/0309757 (US, A1)
中国特許出願公開第109659386 (CN, A)
- (58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)
H01L 31/02-31/0392, 31/08-31/119