

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6274488号
(P6274488)

(45) 発行日 平成30年2月7日(2018.2.7)

(24) 登録日 平成30年1月19日(2018.1.19)

(51) Int. Cl. F I
 HO 1 S 5/20 (2006.01) HO 1 S 5/20
 HO 1 S 5/343 (2006.01) HO 1 S 5/343

請求項の数 11 (全 32 頁)

(21) 出願番号	特願2013-192156 (P2013-192156)	(73) 特許権者	504145283
(22) 出願日	平成25年9月17日 (2013. 9. 17)		国立大学法人 和歌山大学
(65) 公開番号	特開2015-60880 (P2015-60880A)		和歌山県和歌山市栄谷930番地
(43) 公開日	平成27年3月30日 (2015. 3. 30)	(74) 代理人	110000280
審査請求日	平成28年7月29日 (2016. 7. 29)		特許業務法人サンクレスト国際特許事務所
		(72) 発明者	尾崎 信彦
			和歌山県和歌山市栄谷930 国立大学法人 和歌山大学システム工学部内
		(72) 発明者	小田 久哉
			北海道千歳市美々758の65 千歳科学技術大学 総合光科学部内
		(72) 発明者	杉本 喜正
			茨城県つくば市千現1の2の1 独立行政法人 物質・材料研究機構内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 多波長光源装置および多波長光源システム

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

活性層と中間層を有する積層構造体を備え、前記積層構造体は、2次元フォトニック結晶を構成する第1フォトニック結晶領域と、幅方向における両側に前記第1フォトニック結晶領域が隣接し前記フォトニック結晶領域を伝播できない第1波長帯域の光の一部の第2波長帯域の光が伝播可能な複数の第1導波路領域と、前記複数の第1導波路領域において伝播する光を伝播可能な光伝送部と、を有し、

前記活性層における、光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、第2波長帯域の高状態密度波長帯域に含まれ、

前記複数の第1導波路領域は、並列に設けられており、一つの第1導波路領域と他の第1導波路領域とを含む、少なくとも2つの第1導波路領域を備え、

前記光伝送部は、

2次元フォトニック結晶を構成する第2フォトニック結晶領域と、

幅方向における両側に前記第2フォトニック結晶領域が隣接し前記第2フォトニック結晶領域を伝播できない第3波長帯域の光の一部の第4波長帯域の光が伝播可能な第2導波路領域と、

を有し、

前記第2導波路領域には、並列に設けられた前記複数の第1導波路領域が接続され、

前記複数の第1導波路領域それぞれにおける前記高状態密度波長帯域の中心波長が、前記第4波長帯域に含まれ、前記他の第1導波路領域における前記高状態密度波長帯域の中

心波長は、前記一つの第 1 導波路領域における前記高状態密度波長帯域の中心波長よりも、前記第 4 波長帯域内において長波長側にあり、

前記他の第 1 導波路領域における前記第 2 波長帯域の短波長側端は、前記一つの第 1 導波路領域における前記第 2 波長帯域の短波長側端よりも、前記第 4 波長帯域内において長波長側にある

多波長光源装置。

【請求項 2】

前記複数の第 1 導波路領域それぞれにおける前記第 2 波長帯域および前記高状態密度波長帯域が、互いに異なる

請求項 1 記載の多波長光源装置。

10

【請求項 3】

前記フォトニック結晶領域は、前記積層構造体における、前記積層構造体の厚み方向に貫通し且つ前記積層構造体の厚み方向に直交する方向に周期的に並列する複数の空孔が形成された領域であり、

前記第 1 波長帯域、前記第 2 波長帯域および前記高状態密度波長帯域が、前記複数の空孔の空孔間隔、前記複数の空孔それぞれの大きさおよび前記積層構造体の厚みの少なくとも 1 つに基づいて定まる

請求項 1 または請求項 2 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置。

【請求項 4】

前記複数の第 1 導波路領域のうちのいずれか 1 つの前記高状態密度波長帯域は、他の第 1 導波路領域の前記第 2 波長帯域よりも短波長側に存在する

請求項 1 ~ 3 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置。

20

【請求項 5】

前記第 2 フォトニック結晶領域は、前記積層構造体における、前記積層構造体の厚み方向に貫通し且つ前記積層構造体の厚み方向に直交する方向に周期的に並列する複数の空孔が形成された領域であり、

前記第 3 波長帯域および前記第 4 波長帯域が、前記複数の空孔の空孔間隔、前記複数の空孔それぞれの大きさおよび前記積層構造体の厚みの少なくとも 1 つに基づいて定まる

請求項 1 ~ 請求項 4 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置。

【請求項 6】

前記活性層は、複数の量子ドットから構成される

請求項 1 ~ 請求項 5 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置。

30

【請求項 7】

前記複数の量子ドットは、サイズ分布を有し、

当該サイズ分布が、前記複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が前記複数の第 1 導波路領域それぞれの前記高状態密度波長帯域の全てを含むように設定されている

請求項 1 ~ 請求項 6 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置。

【請求項 8】

請求項 1 ~ 請求項 7 のいずれか 1 項に記載の多波長光源装置と、

前記多波長光源装置の前記複数の第 1 導波路領域それぞれに励起光を照射する励起光源と、を備える

多波長光源システム。

40

【請求項 9】

前記励起光源は、前記複数の第 1 導波路領域毎に、複数個設けられている

請求項 8 記載の多波長光源システム。

【請求項 10】

前記励起光源は、前記複数の第 1 導波路領域それぞれに対して、時分割で順次励起光を照射していく

請求項 9 記載の多波長光源システム。

【請求項 11】

50

前記積層構造体の前記複数の第1導波路領域毎に設けられた複数の電極を更に備える請求項1～請求項7のいずれか1項に記載の多波長光源装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、多波長光源装置およびこれを用いた多波長光源システムに関し、特に、フォトニック結晶を利用した多波長光源装置およびこれを用いた多波長光源システムに関する。

【背景技術】

【0002】

従来、波長の異なる複数種類の光を出射する多波長光源装置が提案されている（例えば、特許文献1参照）。

この種の多波長光源装置としては、例えば、半導体レーザと波長変換素子とを組み合わせたものや互いに発振波長が異なる複数のレーザ光源を組み合わせたものがある。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特開2011-66028号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

しかしながら、前述の多波長光源装置では、半導体レーザと波長変換素子とを組み合わせたり複数の半導体レーザを用いたりする必要のあることから、多波長光源の小型化が困難となる虞があった。

【0005】

本発明は、上記事由に鑑みてなされたものであり、互いに波長の異なる複数種類の光を出射可能としながら、小型化を図ることができる多波長光源装置およびこれを用いた多波長光源システム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】

【0006】

(1)ある観点から見た本発明に係る多波長光源装置は、半導体基材および当該半導体基材中に分散された発光材料から構成される活性層を有する積層構造体を備える多波長光源装置であって、積層構造体が、2次元フォトニック結晶を構成する第1フォトニック結晶領域と、幅方向における両側に第1フォトニック結晶領域が隣接し第1フォトニック結晶領域を伝播できない第1波長帯域の光の一部の第2波長帯域の光が伝播可能な複数の第1導波路領域とから構成され、発光材料における、光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、第2波長帯域の高状態密度波長帯域に含まれ、複数の第1導波路領域のうちの少なくとも2つの高状態密度波長帯域が互いに異なる。

【0007】

本構成によれば、発光材料における、光学遷移可能な2つの電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、第2波長帯域の高状態密度波長帯域に含まれる。これにより、発光材料において、高状態密度波長帯域に含まれる波長の光の放出を伴う2つの電子準位間の光学遷移が促進されるいわゆるパーセル効果を生じさせることができるので、高状態密度波長帯域に含まれる波長の光を増強して当該波長を発振波長とするレーザ光を生成することができる。そして、複数の第1導波路領域のうちの少なくとも2つの高状態密度波長帯域が互いに異なることにより、発振波長の異なる少なくとも2種類のレーザ光を出射する多波長光源を実現することができる。従って、発振波長の異なる複数種類のレーザ光が、対応するレーザ光源素子から各別に出射される多波長光源に比べて、集積化が容易であり、小型化を図ることができる。

また、発光材料において、パーセル効果により高状態密度波長帯域に含まれる波長の光

10

20

30

40

50

が増強されることに伴い、当該高状態密度波長帯域に含まれる発振波長でのレーザ発振が起こりやすくなる。即ち、比較的低い励起密度でレーザ光を得ることができるので、消費電力の低減を図ることができる。

【0008】

(2) また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の第1導波路領域それぞれにおける上記第2波長帯域および上記高状態密度波長帯域が、互いに異なるものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域における高状態密度波長帯域が互いに異なることにより、複数の第1導波路領域それぞれにおいてパーセル効果により増強される光の波長が互いに異なる。従って、互いに波長が異なる複数種類のレーザ光を出射できる。

また、複数の第1導波路領域それぞれにおいて、他の第1導波路領域から出射された光の一部が第1導波路領域に進入しないようにすることができるので、第1導波路領域における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

【0009】

(3) また、本発明に係る多波長光源装置は、上記フォトニック結晶領域が、上記積層構造体における、積層構造体の厚み方向に貫通し且つ積層構造体の厚み方向に直交する方向に周期的に並列する複数の空孔が形成された領域であり、上記第1波長帯域、上記第2波長帯域および上記高状態密度波長帯域が、複数の空孔の空孔間隔、複数の空孔それぞれの大きさおよび積層構造体の厚みの少なくとも1つに基づいて定まるものであってもよい。

本構成によれば、複数の空孔の空孔間隔、複数の空孔それぞれの大きさおよび積層構造体の厚みの少なくとも一つを変化させることにより、第1波長帯域、第2波長帯域および高状態密度波長帯域を変化させることができるので、第1波長帯域、第2波長帯域および高状態密度波長帯域の設計の容易化を図ることができる。

【0010】

(4) また、本発明に係る多波長光源装置は、上記積層構造体が、上記複数の第1導波路領域において生成された光の全てを伝送する光伝送部を更に有し、上記光伝送部が、2次元フォトニック結晶を構成する第2フォトニック結晶領域と、幅方向における両側に第2フォトニック結晶領域が隣接し第2フォトニック結晶領域を伝播できない第3波長帯域の光の一部の第4波長帯域の光が伝播可能な第2導波路領域とから構成され、第2導波路領域には、前記複数の第1導波路領域が並列に接続され、第4波長帯域が、複数の第1導波路領域それぞれの上記高状態密度波長帯域全てを含むものであってもよい。

本構成によれば、第4波長帯域が、複数の第1導波路領域それぞれの上記高状態密度波長帯域全てを含むことにより、光伝送部は、複数の第1導波路領域それぞれにおいて生成されたレーザ光全てを伝送させることができるので、波長多重通信を実現することができる。

【0011】

(5) また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の第1導波路領域のうちのいずれか1つの上記高状態密度波長帯域が、他の第1導波路領域の上記第2波長帯域よりも短波長側に存在するものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域のうちのいずれか1つの高状態密度波長帯域が、他の第1導波路領域の第2波長帯域よりも短波長側に存在することにより、上記複数の第1導波路領域のいずれか1つから出射されたレーザ光が、他の第1導波路領域に進入できない。これにより、他の第1導波路領域における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

【0012】

(6) また、本発明に係る多波長光源装置は、上記第2フォトニック結晶領域が、上記積層構造体における、積層構造体の厚み方向に貫通し且つ積層構造体の厚み方向に直交する方向に周期的に並列する複数の空孔が形成された領域であり、上記第3波長帯域および上記第4波長帯域が、複数の空孔の空孔間隔、複数の空孔それぞれの大きさおよび積層構造体の厚みの少なくとも1つに基づいて定まるものであってもよい。

本構成によれば、複数の空孔の空孔間隔、複数の空孔それぞれの大きさおよび積層構造

10

20

30

40

50

体の厚みの少なくとも一つを変化させることにより、第3波長帯域および第4波長帯域を変化させることができるので、第3波長帯域および第4波長帯域の設計の容易化を図ることができる。

【0013】

(7)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の第1導波路領域が、直列に結合され、複数の第1導波路領域の少なくとも一つの上記高状態密度波長帯域が、他の第1導波路領域の上記第2波長帯域内に存在するものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域の少なくとも一つの上記高状態密度波長帯域が他の第1導波路領域の第2波長帯域内に存在するので、複数の第1導波路領域の少なくとも一つの上記第1導波路領域で生成された光が他の第1導波路領域中を伝播することができる。従って、多波長光源装置の構造の簡素化を図ることができる。

10

【0014】

(8)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の第1導波路領域が、その一つの並び方向において、上記高状態密度波長帯域が漸次長波長側に移動していくよう配置され、上記複数の第1導波路領域のうちのいずれか一つの上記第2波長帯域が、一つの並び方向側とは反対側に隣接する第1導波路領域の高状態密度波長帯域とを含むものであってもよい。

本構成によれば、上記複数の第1導波路領域のうちのいずれか一つの上記第2波長帯域が、上記一つの並び方向側とは反対側に隣接する第1導波路領域の高状態密度波長帯域を含むことにより、上記一つの並び方向側とは反対側に隣接する第1導波路領域で生成されたレーザ光を上記一つの並び方向側へ伝送させることができる。

20

【0015】

(9)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の第1導波路領域のうちのいずれか一つの上記高状態密度波長帯域が、上記一つの並び方向側とは反対側に隣接する第1導波路領域の上記第2波長帯域よりも長波長側に存在するものであってもよい。

本構成によれば、上記複数の第1導波路領域のいずれか一つから出射されたレーザ光が、一つの並び方向側とは反対側に隣接する第1導波路領域に進入できない。これにより、第1導波路領域における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

【0016】

(10)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記発光材料が、複数の量子ドットから構成されるものであってもよい。

30

本構成によれば、積層構造体の活性層において、比較的低い励起密度でレーザ発振を生じさせることができるので、消費電力の低減を図ることができる。

【0017】

(11)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記複数の量子ドットが、サイズ分布を有し、当該サイズ分布が、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が上記複数の第1導波路領域それぞれの上記高状態密度波長帯域の全てを含むように設定されているものであってもよい。

本構成によれば、複数の量子ドットが、サイズ分布を有することにより、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が、量子サイズ効果に起因して、単一の量子ドットから発せられる光の波長帯域よりも広い波長帯域に広がる。そして、サイズ分布が、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が複数の第1導波路領域それぞれの高状態密度波長帯域の全てを含むように設定されていることにより、複数の第1導波路領域それぞれの高状態密度波長帯域に含まれる発振波長を有するレーザ光を得ることができる。従って、例えば複数の発振波長毎に異なる活性層を有する多波長光源に比べて、製造容易化を図ることができる。

40

【0018】

(12)他の観点から見た本発明に係る多波長光源システムは、上記(1)~(11)のいずれかに記載の多波長光源装置と、多波長光源装置の上記複数の第1導波路領域それぞれに励起光を照射する励起光源と、を備える。

50

本構成によれば、多波長光源装置自体に第1導波路領域を励起する手段を設ける必要がないので、多波長光源装置の構造の簡素化を図ることができる。

【0019】

(13)また、本発明に係る多波長光源システムは、上記励起光源が、上記複数の第1導波路領域毎に、複数個設けられているものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域毎に異なる信号が重畳されたレーザ光を生成することができるので、波長多重通信を実現することができる。

【0020】

(14)また、本発明に係る多波長光源システムは、上記励起光源が、上記複数の第1導波路領域それぞれに対して、時分割で順次励起光を照射していくものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域の数よりも少ない数の励起光源を備える構成とすることができるので、多波長光源システムの部品点数の削減や小型化を図ることができる。

【0021】

(15)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記積層構造体の上記複数の第1導波路領域毎に設けられた複数の電極を更に備えるものであってもよい。

本構成によれば、複数の第1導波路領域それぞれを光励起する構成に比べて、励起光源が不要となるので、構成の簡素化および小型化を図ることができる。

【0022】

(16)また、本発明に係る多波長光源装置は、上記積層構造体が、上記複数の電極のうち隣り合う2つの電極の間の領域に、当該2つの電極のいずれか一方から注入された電流が他の電極に対応する上記第1導波路領域に流入するのを抑制する電流ブロック層を有するものであってもよい。

本構成によれば、隣り合う2つの電極のいずれか一方から注入された電流の、他方の電極に対応する第1導波路領域への流入が制限される。従って、隣り合う2つの電極それぞれに対応する第1導波路領域から出射されるレーザ光に重畳された信号同士が干渉するのを抑制できる。

【発明の効果】

【0023】

本発明によれば、互いに波長の異なる複数種類の光を出射可能としながら、小型化を図ることができる多波長光源装置およびこれを用いた多波長光源システムを提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】実施形態1に係る試料について、(a)は斜視図であり、(b)は平面図であり、(c)は(a)におけるA1-A1線で破断した断面の矢視図である。

【図2】(a)は、実施形態1に係る試料の導波路領域WGにおける光の群速度分散の計算を行った結果を示す図であり、(b)は、実施形態1に係る試料の導波路領域における光の透過率測定の結果を示す図である。

【図3】(a)は、実施形態1に係る試料の導波路領域における光の透過率測定の結果を示す図であり、(b)は、実施形態1に係る試料の、導波路領域における空孔間隔と透過帯域との関係を示す図である。

【図4】実施形態1に係る試料の導波路領域を光励起した場合における光の正規化発光強度を測定した結果を示す図である。

【図5】実施形態1に係る試料の導波路領域におけるキャリア緩和過程を説明するための模式図である。

【図6】実施形態1に係る試料の導波路領域WGにおける群速度分散の計算を行った結果を示す図である。

【図7】(a)は、実施形態1に係る試料の導波路領域を光励起した場合における光の発光強度を測定した結果を示す図であり、(b)は、(a)についてピーク位置での発光強

10

20

30

40

50

度で正規化して得られる正規化発光強度を示す図である。

【図 8】実施形態 1 に係る試料について、発光強度の測定により得られた発光強度スペクトルのピーク波長と、空孔間隔との関係を示す図である。

【図 9】実施形態 1 に係る試料について、高強度励起を行った場合に得られる発光スペクトルを示す図である。

【図 10】実施形態 1 に係る多波長光源装置を示し、(a) は平面図、(b) は(a) における B1 - B1 線で破断した断面の矢視図である。

【図 11】実施形態 1 に係る多波長光源装置の動作説明図である。

【図 12】実施形態 1 に係る多波長光源装置の各製造工程における概略断面図である。

【図 13】実施形態 1 に係る多波長光源装置の一部の SEM 写真である。

10

【図 14】実施形態 2 に係る多波長光源装置の平面図である。

【図 15】実施形態 2 に係る多波長光源装置の動作説明図である。

【図 16】実施形態 3 に係る多波長光源装置の概略構成図である。

【図 17】実施形態 4 に係る多波長光源装置の一部を示す斜視図である。

【図 18】実施形態 4 に係る多波長光源装置の一部を示す断面図である。

【図 19】実施形態 4 に係る多波長光源装置の各製造工程における概略断面図である。

【図 20】実施形態 4 に係る多波長光源装置の各製造工程における概略断面図である。

【図 21】変形例に係る多波長光源システムの概略構成図である。

【図 22】変形例に係る多波長光源装置の各製造工程における概略断面図である。

【図 23】実施形態 1 に係る試料について、試料の導波路領域を光励起した場合に導波路領域から発せられる光の偏光特性を調査した結果である。

20

【図 24】変形例に係る多波長光源システムの概略構成図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

<実施形態 1>

<1>本発明の動機となった研究結果について

まず、本発明の動機となった研究結果について説明する。発明者らは、フォトニック結晶を備える試料の光学的特性について研究を行っている。

【0026】

<1-1>試料の構成

30

図 1 は、本実施形態に係る試料を示し、(a) は斜視図、(b) は平面図、(c) は(a) における A1 - A1 線で破断した断面の矢視図である。

試料 1 は、半導体基板 15 と、ブリッジ層 16 と、積層構造体 10 と、を備える。

半導体基板 15 は、例えば GaAs 基板から構成されている。

ブリッジ層 16 は、例えば $Al_yGa_{1-y}As$ ($y = 0.53$) 混晶から形成されている。このブリッジ層 16 は、半導体基板 15 と積層構造体 10 との間に空隙 16a が介在するように形成されている。

積層構造体 10 は、3 層の活性層 13 と、4 層の中間層 14 とから構成される。また、積層構造体 10 には、厚み方向に貫通する複数の空孔 11 が形成されている。この積層構造体 10 の厚み (スラブ厚) は、例えば 240 nm 程度に設定されている。

40

活性層 13 は、例えば $In_xGa_{1-x}As$ ($x = 0.2$) から形成された基材中に InAs から形成された量子ドット (発光材料) が分散した構造を有する。この活性層 13 の厚みは、例えば 3 nm 程度に設定されている。中間層 14 は、例えば GaAs から形成され、厚みは例えば 50 nm 程度に設定されている。この複数の量子ドットは、サイズ分布を有しており、例えば、高さおよび粒径がそれぞれ 2 ~ 7 nm、30 ~ 70 nm の範囲内で分布している。

中間層 14 は、GaAs 層から構成されている。

【0027】

空孔 11 は、積層構造体 10 における、帯状の導波路領域 WG 以外の領域 PC において三角格子状に周期的に配列している。例えば、半径 r_1 の空孔が、間隔 (以下、「空孔間

50

隔」と称する。) a 1 で周期的に並んでいる。この領域 P C においては、試料 1 の厚み方向に直交する方向において、屈折率の異なる領域が周期的に並んでおり、いわゆる 2 次元フォトニック結晶を形成している。具体的には、空気から構成される部位と、空気の屈折率の 3 ~ 4 倍程度の屈折率を有する半導体から構成される部位とが、周期的に並ぶこととなる。

即ち、積層構造体 1 0 は、導波路領域 W G と、導波路領域 W G の幅方向における両側に隣接した 2 次元フォトニック結晶を構成する領域 (以下、「フォトニック結晶領域」と称する。) P C と、を有している。

【 0 0 2 8 】

< 1 - 2 > 分析結果について

積層構造体 1 0 のフォトニック結晶領域 P C では、フォトニックバンドギャップが形成されており、当該フォトニックバンドギャップに対応した第 1 波長帯域 (以下、「非透過帯域」と称する。) の光が伝播できない。一方、積層構造体 1 0 の導波路領域 W G では、上記非透過帯域中に含まれる第 2 波長帯域 (以下、「透過帯域」と称する。) の光が伝播 (透過) できる。

これは、導波路領域 W G における光の群速度分散において、フォトニック結晶領域 P C のフォトニックバンドギャップに相当する領域内に、フォトニックバンドが存在していることによるものである。

【 0 0 2 9 】

図 2 (a) は、本実施形態に係る試料 1 の導波路領域 W G における光の群速度分散の計算を行った結果を示す図であり、図 2 (b) は、本実施形態に係る試料 1 の導波路領域 W G における光の透過率測定の結果を示す図である。なお、図 2 (a) は、導波路領域 W G の長手方向に T E モードで伝播する光 (電場の振幅方向が試料 1 の厚み方向に直交し且つ導波路領域 W の幅方向に平行である光) について計算を行った結果を示している。

【 0 0 3 0 】

導波路領域 W G における光の群速度分散の計算では、例えば 3 次元 F D T D 法と呼ばれる計算方法を採用した。この計算で用いられる主なパラメータとして、フォトニック結晶領域 P C における空孔 1 1 の半径 r_1 や空孔間隔 a_1 、スラブ厚等が挙げられる。

図 2 (a) に示すように、導波路領域 W G では、フォトニック結晶領域 P C において光が存在し得ない非透過帯域に、光の存在し得る透過帯域が形成されている。

実際、図 2 (b) に示すように、発明者らは、計算結果から得られた透過帯域に対応する波長帯域において、導波路領域 W G における光の透過率が増加するという知見を得ている。

【 0 0 3 1 】

また、発明者らは、試料 1 について、フォトニック結晶領域 P C における空孔間隔 a_1 を変化させた場合における透過帯域の変化について知見を得ている。

図 3 (a) は、本実施形態に係る試料 1 の導波路領域 W G における光の透過率測定の結果を示す図であり、図 3 (b) は、本実施形態に係る試料 1 のフォトニック結晶領域 P C における空孔間隔 a_1 と、導波路領域 W G における透過帯域との関係を示す図である。

図 3 (a) に示すように、発明者らは、フォトニック結晶領域 P C における空孔間隔 a_1 を 3 2 1 n m から 3 5 7 n m まで増加させると、透過帯域が長波側に移動していくという知見を得ている。図 3 (a) において、例えば透過率が - 3 5 d B 以上となる波長帯域を透過帯域と定義したとする。この場合、図 3 (b) に示すように、透過帯域は、空孔間隔 a_1 の増加とともに長波長側に移動していく。

【 0 0 3 2 】

つまり、発明者らは、導波路領域 W G の幅方向における両側に隣接するフォトニック結晶領域 P C における空孔間隔 a_1 を変化させることにより、導波路領域 W G の透過帯域を制御することができるという知見を得ている。

【 0 0 3 3 】

ところで、導波路領域 W G における光の状態密度は、当該導波路領域 W G を伝播する光

10

20

30

40

50

のうち、群速度が低いほど高くなる。ここで、導波路領域WGにおける光の群速度は、下記式(1)で表される。

【数1】

$$v_g = \frac{d\omega}{dK_x} \quad \dots \text{式(1)}$$

ここで、 ω は光の周波数を示し、 K_x は光の波数を示し、 v_g は光の群速度を示す。式(1)に示すように、群速度が低くなるほど、波数の変化に対する光の周波数の変化が小さくなる。つまり、群速度が低い光ほど、単位周波数あたりに存在する互いに波数の異なる光の密度(状態密度)が大きくなる。

10

そこで、発明者らは、導波路領域WGにおけるフォトリックバンドの形状から、状態密度が高くなる光の波長帯域(以下、「高状態密度波長帯域」と称する。)を見積もった。

ところで、導波路領域WGから放出される光の自然放出レートは、下記式(2)で表される。

【数2】

$$A = \text{coeff} \times \rho(\omega) \quad \dots \text{式(2)}$$

ここで、Aは上記自然放出レート、 $\rho(\omega)$ は光の状態密度、coeffは導波路領域WGにおける光学遷移の確率を反映した係数である。

20

式(2)に示すように、自然放出レートAは、光の状態密度が増加するとともに増加する。そして、発明者らは、上記自然放出レートが所定の大きさ以上となる光の波長帯域を高状態密度波長帯域と定義した。

図2(a)に示すように、高状態密度波長帯域は、楕円で囲んだ領域(周波数が ω_1 , ω_2 , ω_3 近傍の領域、以下、「低群速度領域」と称する。)P1, P2, P3に対応する波長帯域に相当する。

ここにおいて、発明者らは、活性層13中に分散された量子ドットにおける、光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、上記高状態密度波長帯域に含まれる場合、量子ドットから発せられる光がパーセル効果により増強されると考えた。そして、発明者らは、この点を検証すべく、試料1の導波路領域WGを光励起した場合に導波路領域WGから発せられる光の強度スペクトルの測定を行った。

30

【0034】

図4(a)は、本実施形態に係る試料1の導波路領域WGを光励起した場合に導波路領域WGから発せられる光の強度スペクトルの測定方法を説明する模式図である。また、図4(b)は、本実施形態に係る試料1の導波路領域WGを光励起した場合に導波路領域WGにおける光の正規化発光強度を測定した結果を示す図である。更に、図4(c)は、フォトリック結晶領域PCを有しない試料を光励起した場合に試料から発せられる光の強度スペクトルを測定した結果である。

【0035】

40

図4(a)に示すように、強度スペクトルの測定では、導波路領域WGの長手方向に発せられる光の強度スペクトル(以下、「水平方向強度スペクトル」と称する。)と、試料1の厚み方向に発せられる光の強度スペクトル(以下、「垂直方向強度スペクトル」と称する。)と、を測定した。また、図4(b)では、水平方向強度スペクトルを「H」、垂直方向強度スペクトルを「V」で表す。

図4(c)に示すように、フォトリック結晶領域PCを有しない試料を光励起した場合に試料から発せられる光の強度スペクトルは、量子ドットのサイズ分布を反映して、1120nm~1330nmの波長帯域に亘るブロードな形状をしている。

これに対して、図4(b)に示すように、試料1の導波路領域WGを光励起した場合に導波路領域WGから発せられる光の水平方向強度スペクトルHは、波長 ω_1 , ω_3 近傍に

50

2つのピーク「Peak 1」, 「Peak 3」が生じている。また、垂直方向強度スペクトルVにも、波長 λ_2 近傍に1つのピーク「Peak 2」が生じている。

そして、波長 λ_1 , λ_2 , λ_3 近傍の波長帯域は、導波路領域WGにおける高状態密度波長帯域(図2中のP1, P2, P3(図2参照))と略一致している。

【0036】

図5は、本実施形態に係る試料1の導波路領域WGにおけるキャリア緩和過程を説明するための模式図である。

活性層13中に分散された量子ドットでは、いわゆる電子の3次元の量子サイズ効果により電子準位が離散化している。また、活性層13中に分散された複数の量子ドットは、サイズ分布を有している。例えば、複数の量子ドットには、粒径が $b_1 \sim b_4$ の間で互いに異なるものが存在する。そして、複数の量子ドットにおける電子準位は、この粒径 $b_1 \sim b_4$ の違いに応じて異なっている。各量子ドットでは、電子が2つの電子準位間のうち高い方の電子準位から低い方の電子準位へ光学遷移する際に、当該2つの電子準位間のエネルギー差に相当する光を放出する。

【0037】

例えば、粒径 b_3 の量子ドットでは、伝導帯側で最も低い電子準位から価電子帯側の電子準位への電子の光学遷移に伴う光と、伝導帯側で2番目に低い電子準位から価電子帯側の電子準位への電子の光学遷移に伴う光とが放出されるとする。また、粒径 b_4 の量子ドットでは、伝導帯側で最も低い電子準位から価電子帯側の電子準位への電子の光学遷移に伴う光が放出されるとする。

そして、発明者らは、例えば粒径 b_3 , b_4 の量子ドットにおける光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する波長が、導波路領域WGにおける高状態密度波長帯域に含まれているために、当該電子準位間における振動子強度が増大したと考察している。つまり、活性層13中に分散された複数の量子ドットのいずれかにおいて、パーセル効果による発光強度の増強が生じていると考察している。

例えば、粒径 b_3 の量子ドットにおける光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差 E_1 (E_3), E_2 (E_1), E_4 (E_3)に相当する光の波長が、導波路領域WGの高状態密度帯域に含まれる波長 λ_1 , λ_3 に等しい。また、粒径 b_3 の量子ドットにおける光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差 E_2 (E_2)に相当する光の波長が、波長 λ_2 に等しい。

【0038】

ところで、導波路領域WGにおけるフォトリックバンドの形状は、フォトリック結晶領域PCにおけるフォトリック結晶の構造、即ち、空孔間隔 a_1 や空孔半径 r_1 に依存している。従って、フォトリック結晶領域PCにおける空孔間隔 a_1 を変化させると、導波路領域WGにおけるフォトリックバンドの形状が変化し、それに伴い、高状態密度波長帯域の位置も変化する。

そこで、発明者らは、フォトリック結晶領域PCにおける空孔間隔 a_1 を変化させることにより、高状態密度波長帯域の位置を変化させ、増強される光の波長を変化させることを試みた。

【0039】

図6は、本実施形態に係る試料1の導波路領域WGにおける群速度分散の計算を行った結果を示す図である。ここでは、フォトリック結晶領域PCにおける空孔間隔 a_1 を変化させて計算を行った。図6において、(a)は空孔間隔330nmの場合、(b)は空孔間隔339nmの場合、(c)は空孔間隔348nmの場合、(d)は空孔間隔357nmの場合の計算結果を示す。

図6に示すように、空孔間隔 a_1 が長くなると、導波路領域WGの高状態密度波長帯域に対応する波長 $\lambda_2(1)$, $\lambda_2(2)$, $\lambda_2(3)$, $\lambda_2(4)$, $\lambda_1(1)$, $\lambda_1(2)$, $\lambda_1(3)$, $\lambda_1(4)$ が長くなることが判った。ここで、導波路領域WGの高状態密度波長帯域に対応する周波数 $\omega_2(1)$, $\omega_2(2)$, $\omega_2(3)$, $\omega_2(4)$, $\omega_1(1)$, $\omega_1(2)$, $\omega_1(3)$, $\omega_1(4)$ は短くなっていく。

10

20

30

40

50

【0040】

図7(a)は、本実施形態に係る試料の導波路領域WGを光励起した場合に導波路領域WGから発せられる光の強度スペクトルを測定した結果を示す図であり、図7(b)は、(a)についてピーク位置での強度で正規化して得られる強度スペクトルを示す図である。ここでは、図4(b)における「Peak 2」について測定を行った。

図7(a)および(b)に示すように、図6に示す計算結果から得られる高状態密度波長帯域(例えば $\lambda_2(1)$, $\lambda_2(2)$, $\lambda_2(3)$, $\lambda_2(4)$)において、強度スペクトルのピークが生じることが判った。そして、当該ピーク位置は、空孔間隔 a_1 が長くなるほど長波長側に移動していくことが判った。

【0041】

また、発明者らは、強度スペクトルのピーク「Peak 2」以外の他のピーク「Peak 1」, 「Peak 3」の波長についても、空孔間隔 a_1 との関係を調査した。

図8は、本実施形態に係る試料について、発光強度の測定により得られた発光強度スペクトルのピーク波長と、空孔間隔との関係を示す図である。ここで、計算値は、本実施形態に係る試料1の導波路領域WGにおける群速度分散の計算から得られるフォトリックバンドの低群速度領域に対応する波長に相当する。

他のピーク「Peak 1」, 「Peak 3」の波長も、空孔間隔 a_1 が長くなるほど長波長側に移動していくことが判った。

【0042】

以上のように、発明者らは、フォトリック結晶領域PCにおけるフォトリック結晶の構造、即ち、空孔間隔 a_1 や空孔半径 r_1 を変化させることにより、透過帯域や高状態密度波長帯域の位置を変化させることができるという知見を得た。

【0043】

更に、発明者らは、試料1の導波路領域WGを励起する際の励起強度をある程度高くすると、レーザ発振が生じることが実証している。

図9は、本実施形態に係る試料1について、導波路領域WGを高い励起強度で光励起した場合に導波路領域から発せられる光の強度スペクトルを示す図である。

図9に示すように、試料1において、導波路領域WGをある程度高い励起強度で光励起すれば、レーザ発振した場合に特有の幅の狭いスペクトルが得られることが判った。また、この発振波長は、活性層13中に分散された量子ドットから発せられる光の波長帯域内に存在し且つ試料1における高状態密度波長帯域内に存在することが判った。

つまり、発明者らは、フォトリック結晶領域PCと導波路領域WGとを有する積層構造体10について、導波路領域WGの励起強度をある程度高くすれば、高状態密度波長帯域に含まれる発振波長を有するレーザ光を得ることができるという知見を得た。

【0044】

< 2 > 多波長光源装置について

次に、発明者らが、< 1 >で説明した知見に基づいて考案した多波長光源装置について説明する。

図10は、本実施形態に係る多波長光源装置101を示し、(a)は平面図、(b)は(a)におけるB1-B1線で破断した断面の矢視図である。

多波長光源装置101は、積層構造体110と、ブリッジ層116と、半導体基板115と、を備える。

半導体基板115は、例えばGaAs基板から構成されている。

ブリッジ層116は、例えば $Al_yGa_{1-y}As$ ($y = 0.53$) 混晶から形成されている。このブリッジ層116は、半導体基板115と積層構造体110との間に空隙116aが介在するように形成されている。

【0045】

積層構造体110は、互いに異なる波長帯域の光を生成する複数の領域AR1~AR4を有している。そして、複数の領域AR1~AR4それぞれは、フォトリック結晶領域(第1フォトリック結晶領域)PC1~PC4と、導波路領域(第1導波路領域)WG1~

10

20

30

40

50

WG4 とから構成されている。

ここで、フォトニック結晶領域PC1～PC4は、2次元フォトニック結晶を構成している。また、導波路領域WG1～WG4は、幅方向における両側にフォトニック結晶領域PC1～PC4が隣接しフォトニック結晶領域PC1～PC4を伝播できない非透過帯域（第1波長帯域）の光の一部の透過帯域（第2波長帯域）の光が伝播可能となっている。

【0046】

また、積層構造体110は、3層の活性層113および4層の中間層114とから構成されている。この積層構造体110の厚み（スラブ厚） t は、例えば240nm程度に設定されている。

活性層113は、例えば $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x=0.2$) から形成された半導体基材中に InAs から形成された量子ドットが分散した構造を有する。この活性層113の厚みは、例えば3nm程度に設定されている。このように、活性層113が複数の量子ドットが分散した構造を有することにより、積層構造体110の活性層113において、比較的低い励起密度でレーザ発振を生じさせることができるので、消費電力の低減を図ることができる。

また、この複数の量子ドットは、サイズ分布を有している。そして、このサイズ分布は、活性層113中に分散された複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域は、4つの領域AR1～AR4それぞれの高状態密度波長帯域の全てを含むように設定されている。具体的には、複数の量子ドットの粒径は、例えば、高さ2～7nm、直径30～70nmの範囲で分布している。さらに、各量子ドットは離散的な準位を持つことで複数の発光ピークを有する。これにより、複数の量子ドットから発せられる光の強度スペクトルは、波長帯域1120nm～1330nmに亘るブロードな形状となる。

中間層114は、例えば GaAs から形成され、厚みは例えば50nm程度に設定されている。

【0047】

フォトニック結晶領域PC1～PC4は、積層構造体110における、積層構造体110の厚み方向に貫通し、積層構造体110の厚み方向に直交する方向に三角格子状に周期的に並列する複数の空孔11が形成された領域である。

そして、導波路領域WG1～WG4における非透過帯域、透過帯域および高状態密度波長帯域が、複数の空孔111の空孔間隔 a_2 、空孔111の大きさ（空孔半径 r_2 ）および積層構造体110の厚み（スラブ厚）に基づいて定まっている。具体的には、前述<1>で説明したように、空孔間隔 a_2 が長いほど、透過帯域全体および高状態密度波長帯域全体が、長波長側に位置する。

これにより、空孔間隔 a_2 、空孔半径 r_2 および積層構造体110の厚みの少なくとも1つを変化させることにより、導波路領域WG1～WG4それぞれにおける非透過帯域、透過帯域および高状態密度波長帯域を変化させることができる。従って、導波路領域WG1～WG4それぞれにおける、非透過帯域、透過帯域および高状態密度波長帯域の設計の容易化を図ることができる。

【0048】

また、積層構造体110は、4つの領域AR1～AR4において生成されたレーザ光の全てを伝送する領域（光伝送部）AR5を有している。この領域AR5は、フォトニック結晶領域（第2フォトニック結晶領域）PC5と、導波路領域（第2導波路領域）WG5と、から構成されている。ここで、フォトニック結晶領域PC5は、2次元フォトニック結晶を構成している。また、導波路領域WG5は、幅方向における両側にフォトニック結晶領域PC5が隣接し、フォトニック結晶領域PC5を伝播できない非透過帯域（第3波長帯域）の光の一部の透過帯域（第4波長帯域）の光が伝播可能となっている。

【0049】

また、フォトニック結晶領域PC5も、積層構造体110における、積層構造体110の厚み方向に貫通し、積層構造体110の厚み方向に直交する方向に三角格子状に周期的に並列する複数の空孔111が形成された領域である。

10

20

30

40

50

そして、導波路領域WG5における非透過帯域および透過帯域は、複数の空孔111の空孔間隔a2、空孔111の大きさ(空孔半径r2)および積層構造体110の厚みに基づいて定まっている。具体的には、前述<1>で説明したように、空孔間隔a2が長いほど、透過帯域全体が、長波長側に位置する。

これにより、空孔間隔a2、空孔半径r2および積層構造体110の少なくとも1つを変化させることにより、導波路領域WG5における非透過帯域および透過帯域を変化させることができる。従って、導波路領域WG5における非透過帯域および透過帯域の設計の容易化を図ることができる。

【0050】

ところで、多波長光源装置101では、各領域AR1~AR4において、活性層113中の複数の量子ドットのうちの少なくとも1つにおける、光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、高状態密度波長帯域に含まれるよう空孔間隔a2および空孔半径r2が設定されている。ここで、「高状態密度波長帯域」とは、導波路領域WG1~WG4において、上記自然放出レートが所定の大きさ以上となる光の波長帯域を意味する。

具体的には、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が、1120nm~1330nmであるとする。即ち、複数の量子ドットにおける光学遷移可能な電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長が、1120nm~1330nmの範囲内で分散している。これに対して、4つの領域AR1~AR4それぞれの高状態密度波長帯域が、例えば1215nm(1(1))近傍、1240nm(1(2))近傍、1255nm(1(3))近傍、1290nm(1(4))近傍に設定されている。

【0051】

また、空孔111の空孔間隔a2および空孔111の空孔半径r2が、4つの領域AR1~AR4において互いに異なっている。これにより、領域AR1~AR4の透過帯域および高状態密度波長帯域それぞれが、互いに異なっている。

このように、4つの領域AR1~AR4における高状態密度波長帯域が互いに異なることにより、4つの領域AR1~AR4それぞれにおいてパーセル効果により増強される光の波長が互いに異なる。従って、4つの領域AR1~AR4それぞれから、互いに波長が異なる複数種類のレーザー光を出射できる。また、4つの領域AR1~AR4それぞれにおいて、他の領域から出射された光の一部が導波路領域WG1~WG4に進入しないようにすることができるので、導波路領域WG1~WG4における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

ここにおいて、領域AR1~AR4では、導波路領域WG1~WG4における高状態密度波長帯域の中心波長を、1(1), 1(2), 1(3), 1(4)とすると、下記式(3)の関係式が成立するように、空孔間隔a2および空孔半径r2が設定されている。

【数3】

$$\lambda_1(1) < \lambda_1(2) < \lambda_1(3) < \lambda_1(4) \quad \dots \text{式(3)}$$

【0052】

また、領域AR5における空孔間隔a2および空孔半径r2は、下記式(4)で表される関係式が成立するように設定されている。

【数4】

$$\lambda_{15t} < \lambda_1(1), \lambda_1(2), \lambda_1(3), \lambda_1(4) < \lambda_{15c} \quad \dots \text{式(4)}$$

ここで、領域AR5の導波路領域WG5における透過帯域の下限を15t、上限を15cとしている。

式(4)に示すように、領域AR5の導波路領域WG5の透過帯域は、4つの領域AR1, AR2, AR3, AR4それぞれの高状態密度波長帯域全てを含むように設定されて

10

20

30

40

50

いる。これにより、4つの領域AR1, AR2, AR3, AR4それぞれで発生するレーザー光全てが、領域AR5の導波路領域WG5内を伝播できるので、波長多重通信を実現することができる。

【0053】

図11は、本実施形態に係る多波長光源装置101の動作説明図である。ここで、図10(a)~(d)では、各領域AR1~AR4の導波路領域WG1~WG4それぞれで発生するレーザー光の発振波長と、図10における4つの光伝播経路PA1, PA2, PA3, PA4それぞれに沿って伝播する光の透過帯域とを示している。

領域AR1, AR2, AR3, AR4のフォトニック結晶領域PC1, PC2, PC3, PC4における空孔間隔は、例えば330nm, 339nm, 348nm, 357nmに設定されている。そして、領域AR5のフォトニック結晶領域PC5における空孔間隔は、例えば330nmに設定されている。

10

【0054】

図11(a)に示すように、領域AR1の透過帯域(下限11t上限11c)と、領域AR5の透過帯域(下限15t上限15c)とは、一致している。

図11(b)に示すように、領域AR1の高状態密度波長帯域(波長1(1)近傍の波長帯域)は、他の領域AR2の透過帯域12t~12cよりも短波長側に存在する。これにより、光伝播経路PA1を通して領域AR5の導波路領域WG5に到達した光は、領域AR2の導波路領域WG2に進入できなくなっている。また、領域AR2の高状態密度波長帯域(波長1(2)近傍の波長帯域)は、領域AR5の透過帯域(下限15t上限15c)の中心よりもやや短波側に位置する。

20

【0055】

図11(c)に示すように、領域AR1, AR2の高状態密度波長帯域(波長1(1), 1(2)近傍の波長帯域)は、他の領域AR3の透過帯域13t~13cよりも短波長側に存在する。これにより、光伝播経路PA1, PA2を通して領域AR5の導波路領域WG5に到達した光は、領域AR3の導波路領域WG3に進入できなくなっている。また、領域AR3の高状態密度波長帯域(波長1(3)近傍の波長帯域)は、領域AR5の透過帯域(下限15t上限15c)の中心よりもやや長波側に位置する。

【0056】

図11(d)に示すように、領域AR1, AR2, AR3の高状態密度波長帯域(波長1(1), 1(2)近傍の波長帯域)は、領域AR4の透過帯域14t~14cよりも短波長側に存在する。これにより、光伝播経路PA1~PA3を伝播して領域AR5の導波路領域WG5に到達した光は、領域AR4の導波路領域WG4に進入できなくなっている。また、領域AR1の高状態密度波長帯域(波長1(1)近傍の波長帯域)は、領域AR5の透過帯域(下限15t上限15c)の長波側の帯域端近傍に位置する。

30

【0057】

以上のように、多波長光源装置101では、4つの領域AR1~AR4のうちのいずれか1つ(例えば領域AR1)の高状態密度波長帯域が、他の領域(例えば領域AR2)の透過帯域よりも短波長側に存在する。これにより、領域AR1から出射されたレーザー光が、他の領域AR2の導波路領域WG2に進入できないので、領域AR2の導波路領域WG2における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

40

【0058】

<3>多波長光源装置の製造方法について

次に、本実施形態に係る多波長光源装置101の製造工程について説明する。

図12は、本実施形態に係る多波長光源装置101の各製造工程における未完成品の断面図である。なお、図12は模式図であり、図12に表された各層の厚みは実測寸法を反映したものではない。

まず、図12(a)に示すように、半導体基板115上に、犠牲層156をエピタキシャル成長法により形成し、その後、犠牲層156上に、4つの中間層114と3つの活性

50

層 1 1 3 とからなる積層構造体 1 1 0 をエピタキシャル成長法により形成する。ここで、犠牲層 1 5 6 は、 $Al_y Ga_{1-y} As$ ($y = 0.53$) 混晶から形成されている。この犠牲層 1 5 6 の厚みは、例えば $2 \mu m$ に設定されている。

犠牲層 1 5 6 を形成する際のエピタキシャル成長法としては、例えば、MOCVD (有機金属気相成長法: Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法や MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法を採用すればよい。そして、MBE 法を採用する場合、成長条件は、例えば成長温度を 560 、砒素圧力を 1×10^{-5} Torr に設定すればよい。

また、積層構造体 1 1 0 を形成する際のエピタキシャル成長法としては、MBE 法が採用される。そして、成長条件は、例えば成長温度を 450 、砒素圧力を 3×10^{-6} Torr に設定すればよい。

10

【0059】

次に、図 1 2 (b) に示すように、積層構造体 1 1 0 上に、電子線リソグラフィ技術を利用して、複数の空孔 1 2 1 a を有するレジストマスク 1 2 1 を形成する。

具体的には、積層構造体 1 1 0 上にフォトレジスト (図示せず) を塗布した後、フォトレジストに対して電子線照射 (EB 露光) を行う。ここで、電子線は、レジストマスク 1 2 1 の形成予定領域 (空孔 1 2 1 a に対応する領域以外の領域) に照射される。そして、現像液に浸漬することにより、電子線が照射されていない部分のフォトレジストを除去する。次に、水洗により現像液を除去し、続いて、加熱処理 (ポストバーク処理および焼成処理) を行うことにより、レジストマスク 1 2 1 が形成される。

20

【0060】

続いて、図 1 2 (c) に示すように、リアクティブイオンエッチング (RIE) 法により、レジストマスク 1 2 1 をマスクとして、積層構造体 1 1 0 および犠牲層 1 5 6 の一部をエッチングする。ここで、エッチングガスとしては、例えば CCl_2F_2 等を用いればよい。その後、 O_2 (酸素) アッシャー等によりレジストマスク 1 2 1 を除去すれば、図 1 2 (d) に示すような構造が得られる。

【0061】

次に、図 1 2 (e) に示すように、ウェットエッチング法により、犠牲層 1 5 6 の一部をエッチングにより除去することにより、空隙 1 1 6 a を有するブリッジ層 1 1 6 を備えた多波長光源装置 1 0 1 が完成する。ここで、エッチング液としては、例えば、 BHF (バッファドフッ酸) 等を用いればよい。

30

【0062】

図 1 3 は、本実施形態に係る多波長光源装置 1 0 1 の一部の SEM 写真である。

図 1 3 に示すように、前述の製造方法により、3 層の活性層 1 1 3 および 4 層の中間層 1 1 4 から構成される積層構造体 1 1 0 に複数の空孔 1 1 1 が形成された多波長光源装置 1 0 1 が製造できることが判る。また、積層構造体 1 1 0 と半導体基板 1 1 5 との間に空隙 1 1 6 a が形成されていることも判る。

【0063】

< 4 > まとめ

結局、本実施形態に係る多波長光源装置 1 0 1 は、波長 $1(1) \sim 1(4)$ が、透過帯域 (第 2 波長帯域) の高状態密度波長帯域に含まれる。ここで、波長 $1(1) \sim 1(4)$ は、活性層 1 1 3 中に分散された複数の量子ドットの少なくとも 1 つにおける光学遷移可能な 2 つの電子準位間のエネルギー差に相当する光の波長である。

40

これにより、量子ドットにおいて、高状態密度波長帯域に含まれる波長の光の放出を伴う 2 つの電子準位間の光学遷移が促進されるいわゆるパーセル効果が発生させることができる。従って、高状態密度波長帯域に含まれる波長 $1(1) \sim 1(4)$ の光を増強させることができる。

そして、4 つの領域 $AR1 \sim AR4$ の高状態密度波長帯域が互いに異なることにより、発振波長の異なる 4 種類のレーザ光を出射する多波長光源 1 0 1 を実現することができる。従って、発振波長の異なる複数種類のレーザ光が、対応するレーザ光源素子から各別に

50

出射される多波長光源に比べて、領域AR1～AR4の集積化が容易であり、小型化を図ることができる。

【0064】

また、量子ドットにおいて、パーセル効果により高状態密度波長帯域に含まれる波長の光が増強されることに伴い、当該高状態密度波長帯域に含まれる発振波長でのレーザ発振が起こりやすくなる。即ち、比較的低い励起密度でレーザ光を得ることができるので、消費電力の低減を図ることができる。

【0065】

更に、本実施形態に係る多波長光源装置101では、複数の量子ドットが、サイズ分布を有することにより、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が、量子サイズ効果に起因して、単一の量子ドットから発せられる光の波長帯域よりも広い波長帯域に広がる。そして、サイズ分布が、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域が、4つの領域AR1～AR4それぞれの高状態密度波長帯域の全てを含むように設定されている。これにより、4つの領域AR1～AR4それぞれの高状態密度波長帯域に含まれる発振波長λ₁₍₁₎～λ₁₍₄₎を有するレーザ光を得ることができる。従って、例えば4つの発振波長λ₁₍₁₎～λ₁₍₄₎毎に異なる活性層を有する多波長光源に比べて、製造容易化を図ることができる。

10

また、本実施形態に係る多波長光源装置101では、サイズ分布を大きくして、複数の量子ドットから発せられる光の波長帯域を広げることができる。この場合、4つの領域AR1～AR4それぞれの高状態密度波長帯域の間隔を広げることができるので、多波長光源101から出射されるレーザ光の波長可変範囲を拡大することができる。

20

【0066】

<実施形態2>

図13は、本実施形態に係る多波長光源装置201の平面図である。

多波長光源装置201の基本的な構造は、実施形態1に係る多波長光源装置101と同様である。そして、多波長光源装置201は、平面視における空孔111の配置が実施形態1に係る多波長光源装置101とは相違する。なお、実施形態1と同様の構成については同一の符号を付して適宜説明を省略する。

【0067】

多波長光源装置201では、空孔111の空孔間隔a₂および空孔111の空孔半径r₂が、4つの領域(領域)AR21～AR24において互いに異なっている。そして、4つの領域AR21～AR24それぞれの導波路領域(第1導波路領域)WG21～WG24は、直列に結合されている。また、導波路領域WG21～WG24に隣接してフォトニック結晶領域PC21～PC24が配置されている。

30

領域AR21, AR22, AR23, AR24における空孔間隔a₂および空孔半径r₂は、下記式(5)および式(6)で表される関係式が成立するように設定されている。

【数5】

λ₂₁₍₁₎ < λ₂₁₍₂₎ < λ₂₁₍₃₎ < λ₂₁₍₄₎ . . . 式(5)

40

【数6】

λ_{21t} < λ₂₁₍₁₎ < λ_{21c}
λ_{22t} < λ₂₁₍₁₎, λ₂₁₍₂₎ < λ_{22c}
λ_{23t} < λ₂₁₍₁₎, λ₂₁₍₂₎, λ₂₁₍₃₎ < λ_{23c}
λ_{24t} < λ₂₁₍₁₎, λ₂₁₍₂₎, λ₂₁₍₃₎, λ₂₁₍₄₎ < λ_{24c}
. . . 式(6)

ここで、λ₂₁₍₁₎, λ₂₁₍₂₎, λ₂₁₍₃₎, λ₂₁₍₄₎は、領域AR21

50

、 AR_{22} 、 AR_{23} 、 AR_{24} の導波路領域 WG_{21} 、 WG_{22} 、 WG_{23} 、 WG_{24} それぞれで発生するレーザ光の発振波長を示す。また、領域 AR_{21} 、 AR_{22} 、 AR_{23} 、 AR_{24} の導波路領域 WG_{21} 、 WG_{22} 、 WG_{23} 、 WG_{24} における透過帯域それぞれの下限を $21t$ 、 $22t$ 、 $23t$ 、 $24t$ とし、上限を $21c$ 、 $22c$ 、 $23c$ 、 $24c$ としている。

【0068】

即ち、式(5)に示すように、4つの領域 AR_{21} ～ AR_{24} が、その1つの並び方向(図14における光伝播経路PAを伝播する光の伝播方向、以下、「光伝播経路PA方向」と称する。)において、高状態密度波長帯域が漸次長波長側に移動するよう配置されている。そして、4つの領域 AR_{21} ～ AR_{24} のうちの1つ(例えば領域 AR_{21})の高状態密度波長帯域は、光伝播経路PA方向側に隣接する領域(例えば領域 AR_{22})の高状態密度波長帯域よりも短波側に存在する。

10

また、式(6)に示すように、4つの領域 AR_{21} ～ AR_{24} の少なくとも1つの高状態密度波長帯域は、他の領域の透過帯域内に存在する。

【0069】

図15は、本実施形態に係る多波長光源装置201の動作説明図である。ここで、図14では、各領域 AR_{21} ～ AR_{24} の導波路領域 WG_{21} ～ WG_{24} それぞれで発生するレーザ光の発振波長と、図14における光伝播経路PAを伝播する光の透過帯域とを示している。

【0070】

20

領域 AR_{21} の導波路領域 WG_{21} で発生したレーザ光の波長は、領域 AR_{22} 、 AR_{23} 、 AR_{24} の透過帯域(下限 $22t$ 上限 $22c$ の帯域、下限 $23t$ 上限 $23c$ の帯域、下限 $24t$ 上限 $24c$ の帯域)内に位置する。従って、導波路領域 WG_{21} で発生したレーザ光は、3つの領域 AR_{22} 、 AR_{23} 、 AR_{24} の導波路領域 WG_{22} 、 WG_{23} 、 WG_{24} を伝播していく。

また、領域 AR_{22} の導波路領域 WG_{22} で発生したレーザ光の波長は、領域 AR_{23} 、 AR_{24} の透過帯域(下限 $23t$ 上限 $23c$ の帯域、下限 $24t$ 上限 $24c$ の帯域)内に位置する。但し、領域 AR_{22} の高状態密度波長帯域は、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域 AR_{21} の透過帯域 $21t$ ～ $21c$ よりも長波長側に存在する。従って、導波路領域 WG_{22} で発生したレーザ光は、2つの領域 AR_{23} 、 AR_{24} の導波路領域 WG_{23} 、 WG_{24} へは伝播するが、領域 AR_{21} の導波路領域 WG_{21} へは伝播できない。

30

【0071】

領域 AR_{23} の導波路領域 WG_{23} で発生したレーザ光の波長は、領域 AR_{24} の透過帯域(下限 $24t$ 上限 $24c$ の帯域)内に位置する。但し、領域 AR_{23} の高状態密度波長帯域は、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域 AR_{22} の透過帯域(下限 $22t$ 上限 $22c$ の帯域)よりも長波長側に存在する。従って、導波路領域 WG_{23} で発生したレーザ光は、領域 AR_{24} の導波路領域 WG_{24} へは伝播するが、領域 AR_{21} 、 AR_{22} の導波路領域 WG_{21} 、 WG_{22} へは伝播できない。

また、但し、領域 AR_{24} の高状態密度波長帯域は、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域 AR_{23} の透過帯域(下限 $23t$ 上限 $23c$ の帯域)よりも長波長側に存在する。従って、導波路領域 WG_{24} で発生したレーザ光は、3つの領域 AR_{21} 、 AR_{22} 、 AR_{23} の導波路領域 WG_{21} 、 WG_{22} 、 WG_{23} へは伝播できない。

40

【0072】

以上のように、多波長光源装置201では、4つの領域 AR_{21} ～ AR_{24} が、光伝播経路PA方向において、高状態密度波長帯域が漸次長波長側に移動するよう配置されている。そして、領域 AR_{22} (AR_{23} 、 AR_{24})の透過帯域(第2波長帯域)が、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域 AR_{21} (AR_{22} 、 AR_{23})の高状態密度波長帯域を含んでいる。

【0073】

50

これにより、領域AR22 (AR23, AR24)では、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接するAR21 (AR22, AR23)で生成されたレーザ光を、光伝播経路PA方向側へ伝送させることができる。

【0074】

結局、本実施形態に係る多波長光源装置201では、領域AR21における高状態密度波長帯域が、領域AR22～AR24の透過帯域内に存在するので、領域AR21で生成した光が領域AR22～AR24それぞれの導波路領域WG22～WG24中を伝播することができる。従って、多波長光源装置201の構造の簡素化を図ることができる。

【0075】

また、多波長光源装置201では、領域AR22 (AR23, AR24)の高状態密度波長帯域が、領域AR22 (AR23, AR24)の光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域AR21 (AR22, AR23)の透過帯域よりも長波長側に存在する。これにより、領域AR22 (AR23, AR24)から出射されたレーザ光は、光伝播経路PA方向側とは反対側に隣接する領域AR21 (AR22, AR23)の導波路領域WG21 (WG22, WG23)に進入できない。従って、領域AR21 (AR22, AR23)の導波路領域WG21 (WG22, WG23)における戻り光ノイズの発生を抑制できる。

10

【0076】

<実施形態3>

図16は、本実施形態に係る多波長光源システム301の概略構成図である。

20

本実施形態に係る多波長光源システム301は、実施形態1で説明した多波長光源装置101を用いたものである。

多波長光源システム301では、多波長光源装置101の各領域AR1～AR4の導波路領域WG1～WG4を各別に光励起する機能を有する。

多波長光源システム301は、多波長光源装置101と、4つの励起光源311A～311Dと、各励起光源311A～311Dに対応する走査レンズ313A～313Dと、を備える。

【0077】

励起光源311A～311Dは、例えば半導体レーザ等のレーザ光源から構成される。そして、励起光源311A～311Dそれぞれは、外部から入力される制御信号Data1～Data4に基づいて、レーザ光を出力する。

30

走査レンズ313A～313Dは、励起光源311A～311Dから出射される光を、多波長光源装置101の各領域AR1～AR4の導波路領域WG1～WG4の一部に集光する。

【0078】

結局、本実施形態に係る多波長光源システム301では、多波長光源装置101自体に導波路領域WG1～WG4を励起する手段を設ける必要がないので、多波長光源装置101の構造の簡素化を図ることができる。

【0079】

また、多波長光源システム301では、励起光源311A～311Dが、複数の領域AR1～AR4毎に、1つずつ設けられている。

40

これにより、4つの領域AR1～AR4毎に異なる信号が重畳されたレーザ光を生成することができるので、波長多重通信を実現することができる。

【0080】

<実施形態4>

図17は、本実施形態に係る多波長光源装置401の一部を示す斜視図であり、図18は、本実施形態に係る多波長光源装置401の一部を示す断面図である。

本実施形態に係る多波長光源装置401は、実施形態1に係る多波長光源装置101と略同様の構成である。そして、多波長光源装置401は、主として、4つの電極417と、電流ブロック層420とを備える点が実施形態1に係る多波長光源装置101と相違す

50

る。ここで、4つの電極417は、積層構造体410の4つの領域AR1～AR4それぞれが有する導波路領域WG1～WG4毎に設けられている。

【0081】

多波長光源装置401は、半導体基板415と、ブリッジ層416と、積層構造体410と、電極422を備える。

半導体基板415は、例えば導電型がN型のGaAs基板から構成される。

ブリッジ層416は、例えば導電型がN型の $Al_yGa_{1-y}As$ ($y=0.53$) 混晶から形成されている。このブリッジ層416は、半導体基板115と積層構造体110との間に空隙116aが介在するように形成されている。

電極422は、例えばTi/Au等から構成され、半導体基板415のブリッジ層416側とは反対側の全面を覆うように形成されている。

10

【0082】

図18に示すように、積層構造体410は、第1クラッド層418と、3層の活性層113と、2層の中間層114と、第2クラッド層419と、電流ブロック層420と、コンタクト層421と、4つの電極417と、を備える。そして、積層構造体410には、厚み方向に貫通する複数の空孔11が形成されている。

【0083】

第1クラッド層418は、例えば導電型がN型のGaAs層から構成されている。ここで、N型の不純物としては、例えばSiを用いればよい。

活性層113は、例えば $In_xGa_{1-x}As$ ($x=0.2$) 層中にInAsから形成された量子ドットが分散した構造を有する。

20

中間層114は、例えばGaAs層から構成されている。

第2クラッド層419は、例えば導電型がP型のGaAs層から構成されている。ここで、P型の不純物としては、例えばBeを用いればよい。

【0084】

電流ブロック層420は、例えば導電型がN型のGaAs層から構成されている。この電流ブロック層420は、積層構造体410における隣り合う2つの電極417の間の領域に設けられている。この電流ブロック層420内では、4つの電極417と、電極422との間にバイアスを印加した場合、電流ブロック層420と第2クラッド層419との境界近傍の一部に空乏層が形成される。これにより、隣り合う2つの電極417のいずれか一方から注入された電流の、他の電極417に対応する導波路領域への流入が制限される。従って、隣り合う2つの電極417それぞれに対応する導波路領域から出射されるレーザ光に重畳された信号同士が干渉するのを抑制できる。

30

コンタクト層421は、例えば導電型がP型のGaAs層から構成されている。このコンタクト層421の不純物濃度は、第2クラッド層419の不純物濃度よりも大きい。

電極417は、例えばTi/Au等の金属材料から形成され、コンタクト層421の上方に設けられている。電極417は、不純物濃度が高くなっているコンタクト層421との間でオーミック接触している。

【0085】

この多波長光源装置401では、電流ブロック層420を有することにより、電極417から注入された電流の大部分が、対応する導波路領域のみに流入し、他の導波路領域へ拡散が抑制されている。

40

【0086】

次に、本実施形態に係る多波長光源装置401の製造方法について説明する。

図19および図20は、本実施形態に係る多波長光源装置401の各製造工程における未完成品の断面図である。なお、実施形態1と同様の構成については同一の符号を付して適宜説明を省略する。また、図19および図20は模式図であり、図19および図20に表された各層の厚みは実測寸法を反映したものではない。

図19(a)に示すように、まず、半導体基板415上に、犠牲層456をエピタキシャル成長法により形成する。その後、犠牲層456上に、第1クラッド層418、3つの

50

活性層 1 1 3、中間層 1 1 4、第 2 クラッド層 4 1 9、コンタクト層 4 2 1 を順にエピタキシャル成長法により形成する。

【 0 0 8 7 】

そして、コンタクト層 4 2 1 上に、電子線リソグラフィ技術およびエッチング技術を利用して、電極 4 1 7 を形成する予定の領域を覆う酸化シリコンマスク 5 1 1 を形成する。

続いて、ウェットエッチング法によりコンタクト層 4 2 1 のうち、酸化シリコンマスク 5 1 1 以外の領域を除去する。

その後、エピタキシャル成長法により、電流ブロック層 4 2 0 を酸化シリコンマスク 5 1 1 以外の領域に埋め込むように形成する。このとき、エピタキシャル成長法として、MOCVD 法を採用する。

そして、電流ブロック層 4 2 0 を形成した後、酸化シリコンマスク 5 1 1 を除去する。

【 0 0 8 8 】

その後、図 1 9 (c) に示すように、コンタクト層 4 2 1 上に、電子線リソグラフィ技術を利用して、電極 4 1 7 を形成する予定の領域以外の領域を覆うレジストマスク 5 1 2 を形成する。このレジストマスク 5 1 2 の形成方法は、実施形態 1 で説明したレジストマスク 1 2 1 の形成方法と同様である。

【 0 0 8 9 】

次に、図 1 9 (d) に示すように、金属層 4 5 7 を形成する。ここで、金属層 4 5 7 の形成方法としては、例えば蒸着法やスパッタリング法を採用すればよい。

続いて、リフトオフ技術を利用して、金属層 4 5 7 のうち電極 4 1 7 以外の部分をレジストマスク 5 1 2 とともに除去する。レジストマスク 5 1 2 の除去は、例えば O₂ (酸素) アッシャー等により行う。

【 0 0 9 0 】

その後、図 2 0 (a) に示すように、電極 4 1 7 およびコンタクト層 4 2 1 上に、フォトリソグラフィ技術を利用して、複数の空孔 1 2 1 a を有するレジストマスク 1 2 1 を形成する。このレジストマスク 1 2 1 の形成方法は、実施形態 1 で説明したレジストマスク 1 2 1 の形成方法と同様である。

【 0 0 9 1 】

続いて、図 2 0 (b) に示すように、リアクティブイオンエッチング (R I E) 法により、レジストマスク 1 2 1 をマスクとして、積層構造体 4 1 0 および犠牲層 4 5 6 の一部をエッチングする。ここで、積層構造体 4 1 0 は、前述のように、第 1、第 2 クラッド層 4 1 8、4 1 9、活性層 1 1 3、中間層 1 1 4、電流ブロック層 4 2 0 およびコンタクト層 4 2 1 から構成される。その後、O₂ (酸素) アッシャー等によりレジストマスク 1 2 1 を除去される。

【 0 0 9 2 】

次に、図 2 0 (c) に示すように、ウェットエッチング法により、犠牲層 4 5 6 の一部をエッチングにより除去することにより、ブリッジ層 4 1 6 が形成される。

その後、半導体基板 4 1 5 を研磨した後、図 2 0 (d) に示すように、半導体基板 4 1 5 における電極 4 1 7 側とは反対側に電極 4 2 2 を形成することにより、多波長光源装置 4 0 1 が完成する。ここで、電極 4 2 2 の形成方法としては、例えば蒸着法やスパッタリング法を採用すればよい。

【 0 0 9 3 】

結局、本実施形態に係る多波長光源装置 4 0 1 は、電極 4 1 7 からの電流注入により、4 つの領域 A R 1 ~ A R 4 それぞれの導波路領域 W G 1 ~ W G 4 の励起を行うことができる。従って、領域 A R 1 ~ A R 4 の導波路領域 W G 1 ~ W G 4 を光励起する構成に比べて、励起光源が不要となる分、多波長光源装置 4 0 1 を用いた多波長光源システムの簡素化および小型化を図ることができる。

【 0 0 9 4 】

< 変形例 >

(1) 実施形態 1 および 2 では、多波長光源装置 1 0 1 の領域 A R 1 ~ A R 4 や多波長光

10

20

30

40

50

源装置 201 の領域 AR 2 1 ~ AR 2 4 において、互いに透過帯域および高状態密度波長帯域が異なる例について説明した。但し、透過帯域および高状態密度帯域は、必ずしも互いに異なる構成に限定されるものではない。例えば、4つの領域 AR 1 ~ AR 4 (AR 2 1 ~ AR 2 4) のうち、2つの透過帯域および高状態密度帯域は、同じであり、他の透過帯域および高状態密度帯域とは異なる構成であってもよい。

【0095】

(2) 実施形態 1 および 2 では、積層構造体 110 において、フォトニック結晶領域 PC 1 ~ PC 4 (PC 2 1 ~ PC 2 4) と、導波路領域 WG 1 ~ WG 4 (WG 2 1 ~ WG 2 4) とが、2次元に並列して設けられる例について説明した。但し、フォトニック結晶領域と、導波路領域とは、必ずしも2次元に並列して設けられている構成に限定されるものではない。例えば、導波路領域が、フォトニック結晶領域により3次的に囲繞された構成であってもよい。

10

【0096】

例えば、実施形態 1 に係る中間層 114 と同じ材料からなる複数の半導体ワイヤを格子状に積み上げられたフォトニック結晶領域中に、量子ドットが分散された活性層を有する導波路領域が形成されたものであってもよい。

ここで、フォトニック結晶領域は、例えば2次元に互いに平行となるように配列された複数の半導体ワイヤ上に、これらのワイヤの延伸方向に直交する方向に延伸し、互いに平行となるように配列された複数の半導体ワイヤが重なった構造を基本構造とする。そして、フォトニック結晶領域は、この基本構造における半導体ワイヤが配列された面に直交する方向に、当該基本構造が複数個積み上げられた構造を有している。

20

【0097】

(3) 実施形態 3 では、多波長光源装置 101 の領域 AR 1 ~ AR 4 毎に励起光源 311 A ~ 311 D を備える多波長光源システム 301 の例について説明した。但し、励起光源は、必ずしも領域 AR 1 ~ AR 4 毎に各別に備える必要はない。例えば、1つの励起光源が、各領域 AR 1 ~ AR 4 の導波路領域 WG 1 ~ WG 4 に対して、時分割で順次励起光を照射していく構成であってもよい。

【0098】

図 21 は、本変形例に係る多波長光源システム 601 の概略構成図である。なお、実施形態 3 と同様の構成については同一の符号を付して適宜説明を省略する。

30

多波長光源システム 601 は、多波長光源装置 101 と、1つの励起光源 611 と、ガルバノミラー 612 と、走査レンズ 613 と、を備える。

ここにおいて、励起光源 611 から出射される光は、ガルバノミラー 612 で反射されてから走査レンズ 613 を通って、多波長光源装置 101 の導波路領域 WG 1 ~ WG 4 のいずれかの一部に集光される。

そして、ガルバノミラー 612 の角度を変化させることにより、励起光源 611 から出射される光が集光される位置が変化する。

【0099】

本構成によれば、領域 AR 1 ~ AR 4 の数 (4個) よりも少ない数 (1個) の励起光源 611 を備える構成とすることができるので、多波長光源システム 601 の部品点数の削減や小型化を図ることができる。

40

【0100】

また、本変形例に係る多波長光源システム 601 では、多波長光源装置 101 における隣り合う2つの導波路領域同士の間隔を狭く (例えば 3 μm 程度) にすることができる。また、ガルバノミラー 612 と多波長光源装置 101 との間の距離は、隣り合う2つの導波路領域同士の間隔に比べて長くすることができる。すると、領域 AR 1 ~ AR 4 の導波路領域 WG 1 ~ WG 4 を順番に光励起していく場合、ガルバノミラー 612 の振り角度を比較的小さくすることができる。

例えばガルバノミラー 612 と多波長光源装置 101 との間隔を 5 mm に設定する。この場合、光励起する場所を隣り合う2つの導波路領域のいずれか一方から他方に変更

50

するとき、ガルバノミラー 6 1 2 の角度を 0.03° 程度変化させるだけでよい。

【0101】

このように、本構成によれば、例えば領域 AR 1 ~ AR 4 の導波路領域 WG 1 ~ WG 4 を順番に光励起（掃引）していく場合、ガルバノミラー 6 1 2 の振り角度のダイナミックレンジを比較的小さくすることができる。従って、導波路領域 WG 1 ~ WG 4 全てを順番に光励起するのに要する時間（掃引時間）の短縮を図ることができる。

【0102】

（4）実施形態 4 では、多波長光源装置 4 0 1 の電流ブロック層 4 2 0 およびコンタクト層 4 2 1 が、エピタキシャル成長法により形成される例について説明した。但し、電流ブロック層 4 2 0 およびコンタクト層 4 2 1 は、必ずしもエピタキシャル成長法により形成されるものに限定されるものではない。例えば、電流ブロック層 4 2 0 およびコンタクト層 4 2 1 が、イオン注入法により形成されるものであってもよい。

【0103】

図 2 2 は、本変形例に係る多波長光源装置 8 0 1 の各製造工程における未完成品の断面図である。なお、実施形態 4 と同様の構成については同一の符号を付して適宜説明を省略する。また、図 2 2 は模式図であり、図 2 2 に表された各層の厚みは実測寸法を反映したものである。

図 2 2 (a) に示すように、まず、実施形態 1 と同様に、半導体基板 4 1 5 上に、犠牲層 4 5 6、第 1 クラッド層 4 1 8、3 つの活性層 1 1 3、中間層 1 1 4 をエピタキシャル成長法により形成する。そして、半導体基板 4 1 5 から最も離間した位置にある活性層 1 1 3 上に、第 2 クラッド層 8 1 9 をエピタキシャル成長法により形成する。

次に、第 2 クラッド層 8 1 9 上に、電子線リソグラフィ技術およびエッチング技術を利用して、電極 4 1 7 を形成する予定の領域以外の領域を覆う酸化シリコンマスク 9 1 1 を形成する。

続いて、酸化シリコンマスク 9 1 1 上から電極 4 1 7 を形成する予定の領域にイオン注入により不純物イオンを注入する。ここでは、P 型の不純物イオンとして、例えば B e イオンを注入する。その後、熱処理を施すことにより、不純物を活性化させてコンタクト層 8 2 1 が形成される。そして、例えばパフアドフッ酸等を用いて、酸化シリコンマスク 9 1 1 を除去する。

【0104】

次に、図 2 2 (b) に示すように、コンタクト層 8 2 1 上に、電子線リソグラフィ技術およびエッチング技術を利用して、電極 4 1 7 を形成する予定の領域を覆う酸化シリコンマスク 9 1 2 を形成する。

続いて、酸化シリコンマスク 9 1 2 上から電極 4 1 7 を形成する予定の領域以外の領域にイオン注入により不純物イオンを注入する。ここでは、N 型の不純物イオンとして、例えば S i イオンを注入する。その後、熱処理を施すことにより、不純物を活性化させて電流ブロック層 8 2 0 が形成される。そして、酸化シリコンマスク 9 1 2 を除去する。

【0105】

次に、図 2 2 (c) に示すように、電極 4 1 7 およびコンタクト層 4 2 1 上に、フォトリソグラフィ技術を利用して、複数の空孔 1 2 1 a を有するレジストマスク 1 2 1 を形成する。

【0106】

その後、実施形態 4 で説明した製造方向と同様の工程を行うことにより、図 2 2 (d) に示すような、積層構造体 8 1 0 を有する多波長光源装置 8 0 1 が完成する。

ここで、積層構造体 8 1 0 は、第 1 クラッド層 4 1 8 と、3 つの活性層 1 1 3 と、2 つの中間層 1 1 4 と、第 2 クラッド層 8 1 9 と、コンタクト層 8 2 1 と、電流ブロック層 8 2 0 と、電極 4 1 7 と、から構成される。

【0107】

本構成によれば、電流ブロック層 8 2 0 がイオン注入法により形成されるので、電流ブロック層をエピタキシャル成長法により形成する構成に比べて、製造方法の簡素化を図る

10

20

30

40

50

ことができる。

【0108】

なお、本変形例では、電流ブロック層820が、N型の不純物イオンを注入することにより形成される例について説明したが、注入するイオンはN型の不純物イオンに限定されるものではなく、例えばプロトン注入により電流ブロック層820を形成してもよい。

具体的には、酸化シリコンマスク912上から電極417を形成する予定の領域以外の領域に水素イオンを注入し、その後、熱処理を施す。

【0109】

(5)また、発明者らは、実施形態1に係る試料1について、導波路領域WGを光励起した場合に試料1から出射される光の偏光特性について調査を行っている。

10

図23は、実施形態1に係る試料1について、導波路領域WGを光励起した場合に試料1から出射される光の偏光特性を調査した結果である。

図23において、(a-1)は、(a-2)に示すように、偏光子を試料1の厚み方向において試料1に対して対向配置し、偏光子の偏光角を変えながら、導波路領域WGから試料1の厚み方向に出射される光の強度スペクトルを測定した結果である。ここで、偏光子の偏光角は、導波路領域WGの長手方向に直交する方向を0°とし、導波路領域WGの長手方向に平行な方向を90°としている。

また、(b-1)は、(b-2)に示すように、偏光子を導波路領域WGの長手方向において試料1に対して対向配置し、偏光子の偏光角を変えながら、導波路領域WGから導波路領域WGの長手方向に出射される光の強度スペクトルを測定した結果である。ここで、偏光子の偏光角は、試料1の厚み方向に直交する方向を0°とし、試料1の厚み方向に平行な方向を90°としている。

20

【0110】

図23(a-1)に示す結果から、導波路領域WGから試料1の厚み方向に直交する方向に出射される光は、導波路領域WGの長手方向に直交する方向に直線偏光していることが判る。また、図21(b-1)に示す結果から、導波路領域WGから導波路領域WGの長手方向に出射される光は、試料の厚み方向に直交する方向に直線偏光していることが判る。

そこで、発明者らは、実施形態1で説明した多波長光源装置101と、光スイッチ素子とを組み合わせた多波長光源システムを考案した。

30

【0111】

図24は、本変形例に係る多波長光源システム701の概略構成図である。

多波長光源システム701は、多波長光源装置101と、光スイッチ素子711と、制御部712とを備える。ここで、光スイッチ素子711は、多波長光源101から入射する光を透過する状態と透過しない状態とに切り替わることが可能である。制御部712は、光スイッチ素子711を上記2つの状態のいずれか一方に切り替える切り替え制御を行う。

光スイッチ素子711は、第1、第2偏光板711a, 711bと、第1、第2偏光板711a, 711bの間に介在する偏光方向可変素子711cと、を有する。

第1偏光板711aは、光スイッチ素子711の多波長光源101側に配置され、多波長光源101の積層構造体110の厚み方向に直交する第1偏光方向PL1に偏光する光を透過させる。

40

第2偏光板711bは、光スイッチ素子711の多波長光源101側とは反対側に配置され、光スイッチ素子711の積層構造体110の厚み方向に平行な第2偏光方向PL2に偏光する光を透過させる。即ち、第2偏光板711bを透過可能な光の偏光方向は、第1偏光板711aを透過可能な光の偏光方向に対して90°ずれている。

【0112】

偏光方向可変素子711cは、例えばネマティック液晶を用いた素子やファラデー回転素子等から構成され、第1偏光板711aおよび第2偏光板711cの間に介在している。そして、偏光方向可変素子711cは、制御部712により、第1偏光方向PL1に偏

50

光した光の偏光方向を第2偏光方向PL2にする状態と、第1偏光方向PL1に偏光した光の偏光方向を第2偏光方向PL2以外の偏光方向にする状態とに切り替わる。

ここで、偏光方向可変素子711cは、制御部712から印加される電界の変化に応じて、上記2つの状態のいずれか一方に切り替わる。

【0113】

制御部712は、光スイッチ素子711の偏光方向可変素子711cに印加する電界を変化させる機能を有する。制御部712は、光スイッチ素子711の偏光方向可変素子711cに印加する電界を変化させることにより、光スイッチ素子711を、多波長光源101から入射する光を透過する状態と透過しない状態とに切り替える。

【0114】

本構成によれば、多波長光源装置101の各領域AR1, AR2, AR3, AR4の導波路領域WG1, WG2, WG3, WG4それぞれの励起強度と、偏光素子711の偏光角との両方を制御することにより、多波長光源システム701から出射される光量を制御できる。従って、多波長光源システム701の制御パラメータを増やすことができるので、多波長光源システム701から出射される光の光量を細かく制御することが可能となる。

【0115】

(6)上記各実施形態および各変形例では、積層構造体10, 110, 410, 810の活性層13, 113が、発光材料として量子ドットを有する例について説明した。但し、発光材料は、量子ドットに限定されるものではなく、例えば、量子井戸構造や量子ワイヤ構造から構成されるものであってもよい。

活性層13, 113が量子井戸構造を有する場合、ウェル層の厚みに分布を持たせるようにしてもよい。また、活性層13, 113が量子ワイヤであれば、その幅に分布を持たせるようにしてもよい。

本構成によれば、積層構造体の活性層において、比較的低い励起密度でレーザ発振を生じさせることができるので、消費電力の低減を図ることができる。

【0116】

<付記>

なお、本発明の技術的範囲は上記実施形態および上記変形例に記載された範囲に限定されない。上記実施形態および上記変形例に、多様な変更又は改良を加えることができる。そのような変更または改良を加えた形態も本発明の技術的範囲に含まれ得ることが、特許請求の範囲の記載から明らかである。例えば、InAsからなる量子ドットが分散された活性層を有する多波長光源装置について説明をしたが、その他の材料(例えば、窒化ガリウム(GaN)や酸化亜鉛(ZnO)系の材料)からなる量子ドットが分散された活性層を有する多波長光源装置であってもよい。

【産業上の利用可能性】

【0117】

本発明は、光通信に使用される多波長光源に好適である。また、医療イメージング技術の1つであるSS-OCTに利用される高速掃引性を持った多波長光源としても好適である。また、光集積回路用の光源としても有効である。

【符号の説明】

【0118】

- 1 試料
- 10, 110, 410, 810 積層構造体
- 11, 111, 121a 空孔
- 13, 113 活性層
- 14, 114 中間層
- 15, 115, 415 半導体基板
- 16, 116, 416 ブリッジ層
- 16a, 116a 空隙

10

20

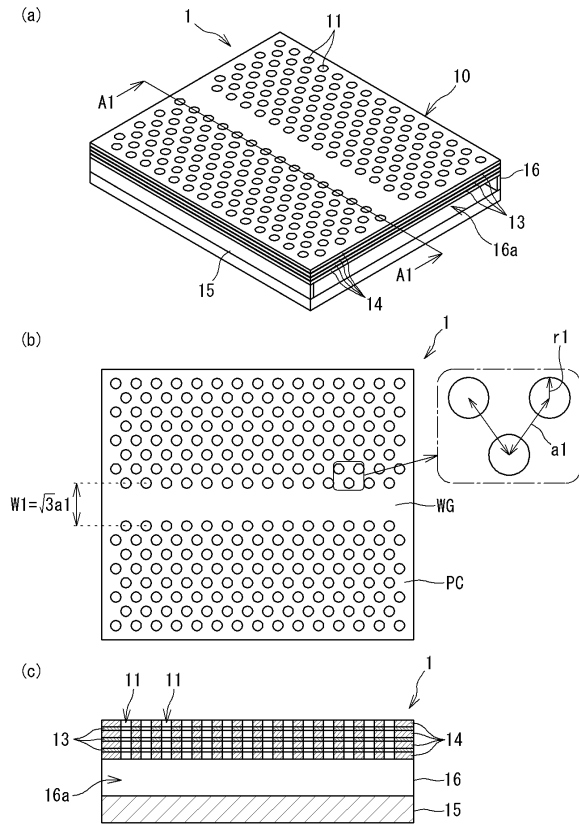
30

40

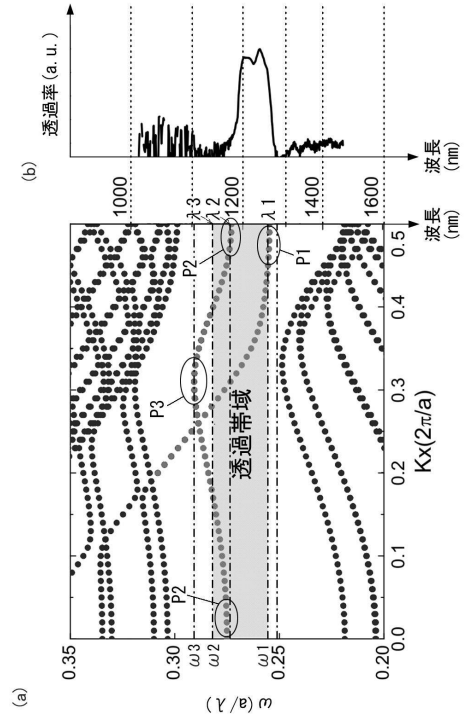
50

1 0 1 , 2 0 1 , 4 0 1 , 8 0 1	多波長光源装置	
1 2 1	レジストマスク	
1 5 6 , 4 5 6	犠牲層	
3 0 1 , 6 0 1 , 7 0 1	多波長光源システム	
3 1 1 A , 3 1 1 B , 3 1 1 C , 3 1 1 D , 6 1 1	励起光源	
3 1 3 A , 3 1 3 B , 3 1 3 C , 3 1 3 D , 6 1 3	走査レンズ	
4 1 7 , 4 2 2	電極	
4 1 8	第1クラッド層	
4 1 9 , 8 1 9	第2クラッド層	
4 2 0 , 8 2 0	電流ブロック層	10
4 2 1 , 8 2 1	コンタクト層	
4 5 7	金属層	
5 1 1 , 9 1 1 , 9 1 2	酸化シリコンマスク	
5 1 2	レジストマスク	
6 1 2	ガルバノミラー	
7 1 1	光スイッチ素子	
7 1 2	制御部	
r 1 , r 2	空孔半径	
a 1 , a 2	空孔間隔	
A R 1 , A R 2 , A R 3 , A R 4 , A R 5 , A R 2 1 , A R 2 2 , A R 2 3 , A R 2 4	領域	20
P C 1 , P C 2 , P C 3 , P C 4 , P C 5 , P C 2 1 , P C 2 2 , P C 2 3 , P C 2 4	フォトニック結晶領域	
W G 1 , W G 2 , W G 3 , W G 4 , W G 5 , W G 2 1 , W G 2 2 , W G 2 3 , W G 2 4	導波路領域	
P A 1 , P A 2 , P A 3 , P A 4	光伝播経路	

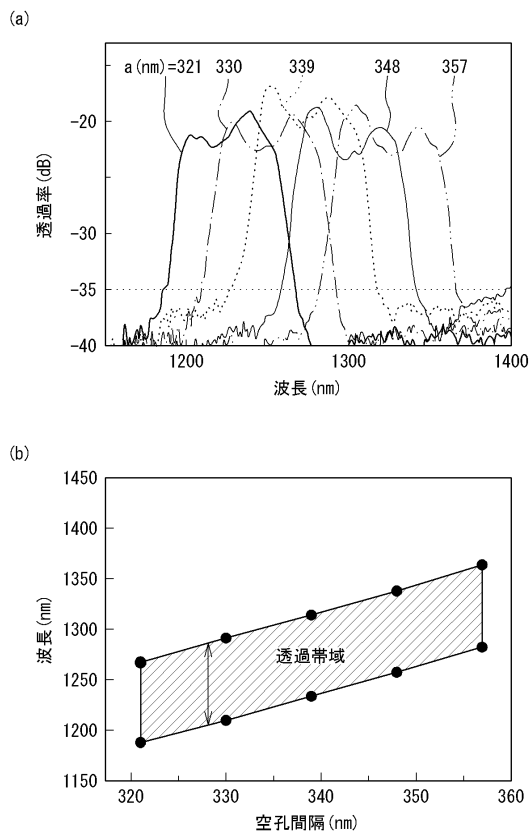
【図1】



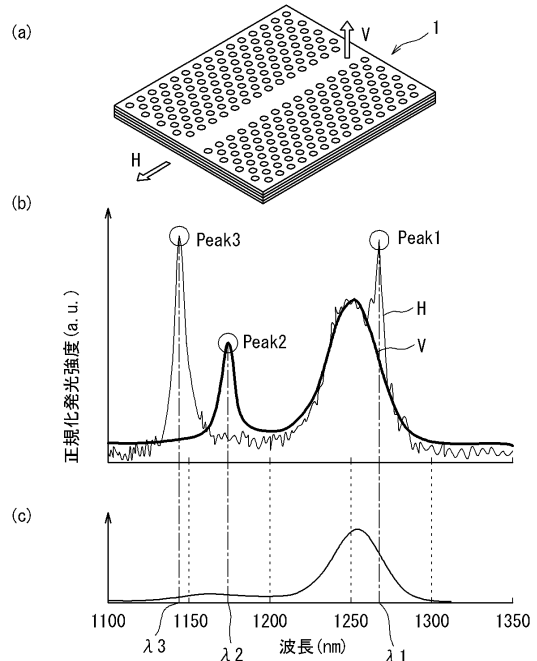
【図2】



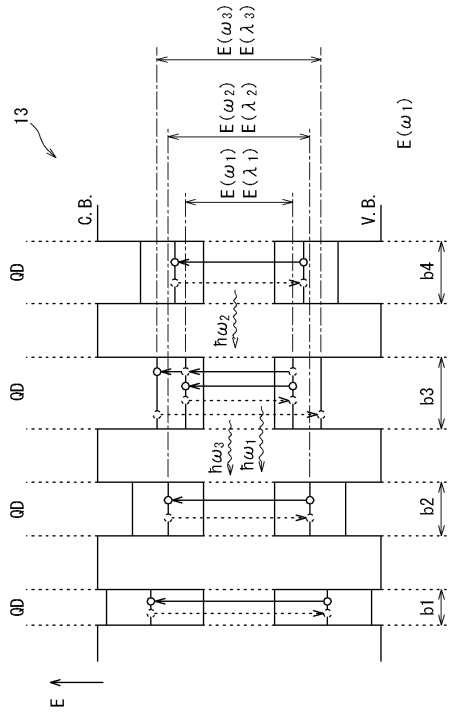
【図3】



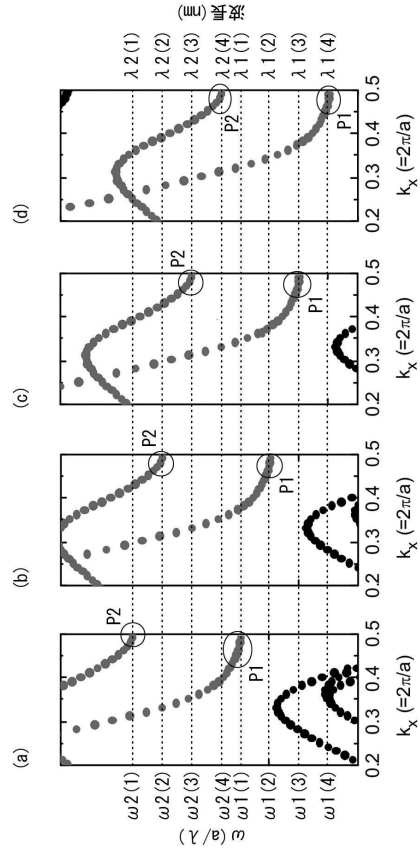
【図4】



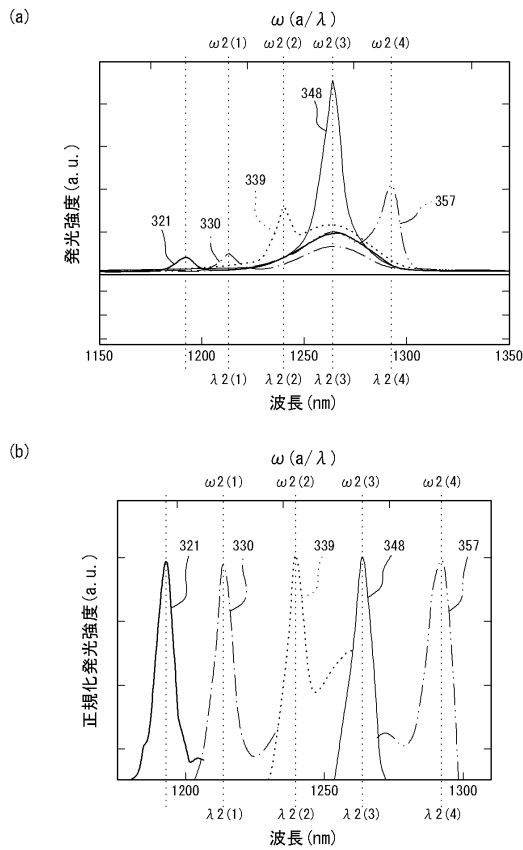
【 図 5 】



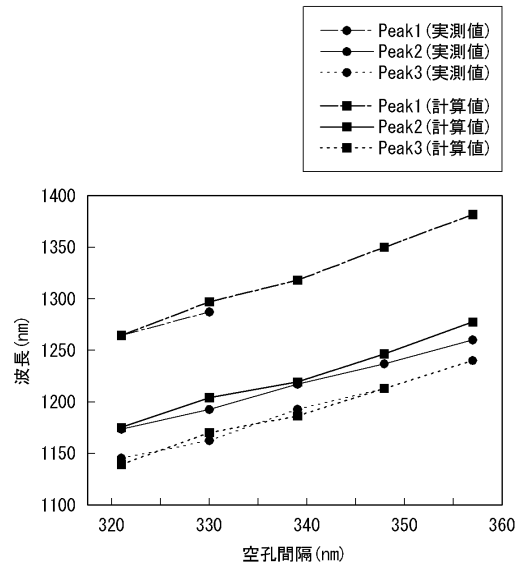
【 図 6 】



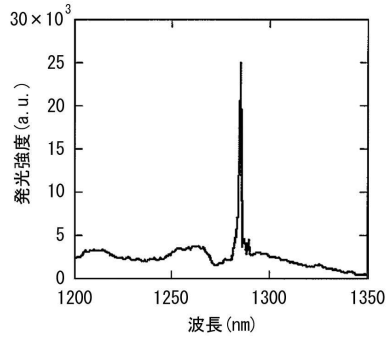
【 図 7 】



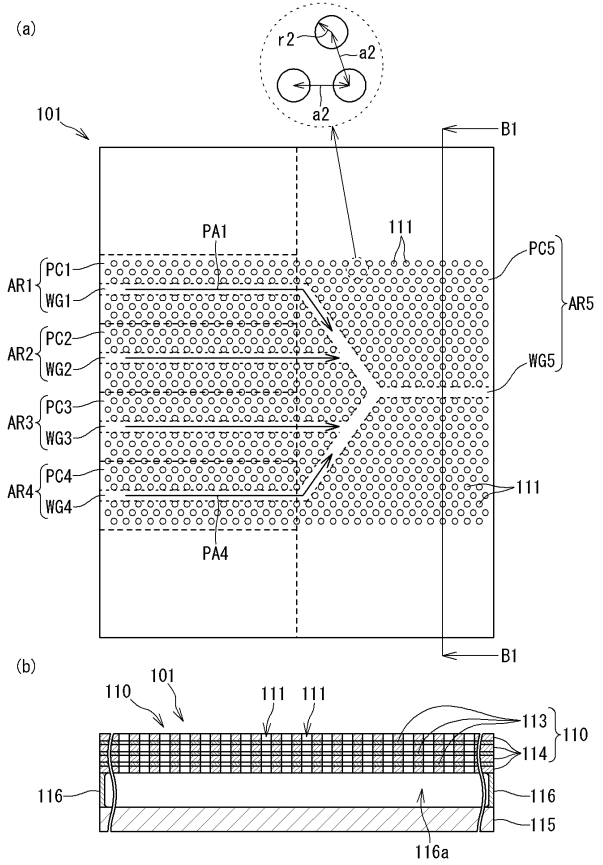
【 図 8 】



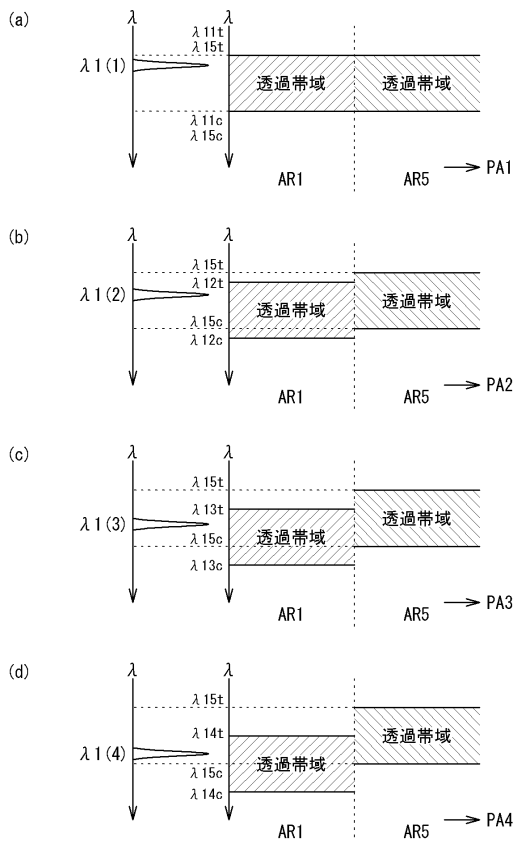
【 図 9 】



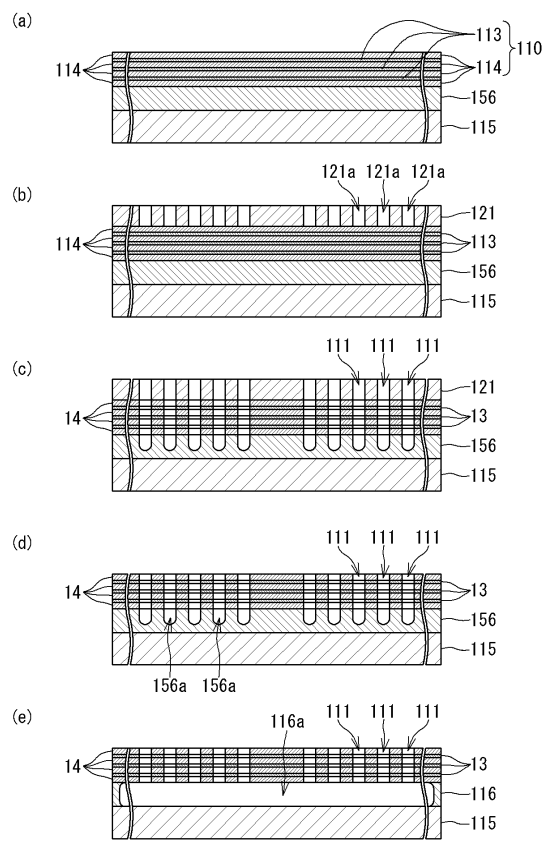
【 図 10 】



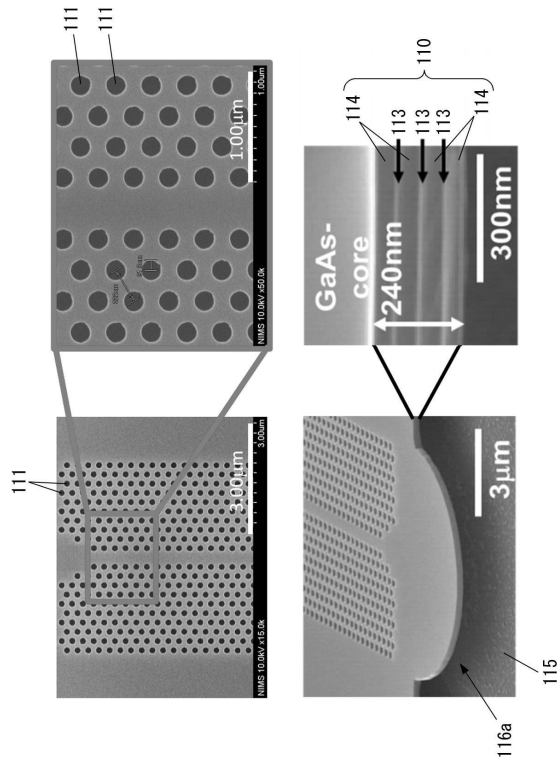
【 図 11 】



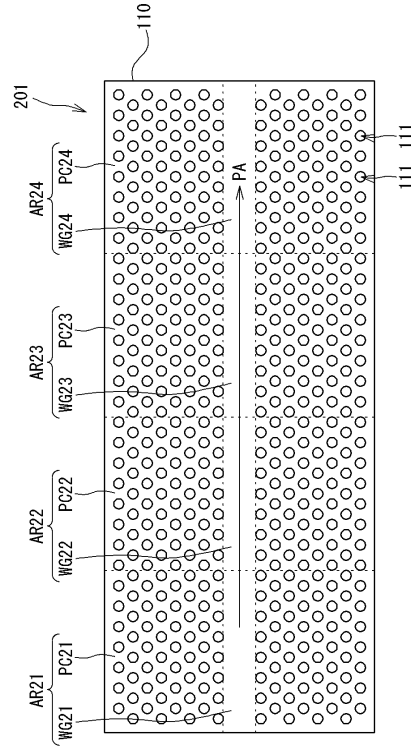
【 図 12 】



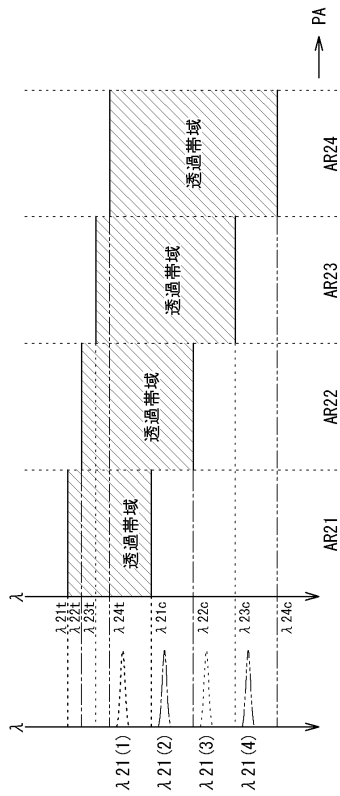
【図 13】



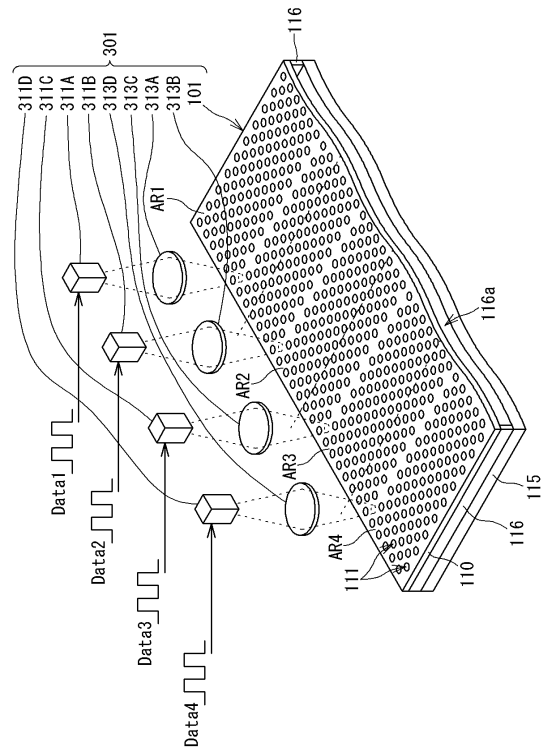
【図 14】



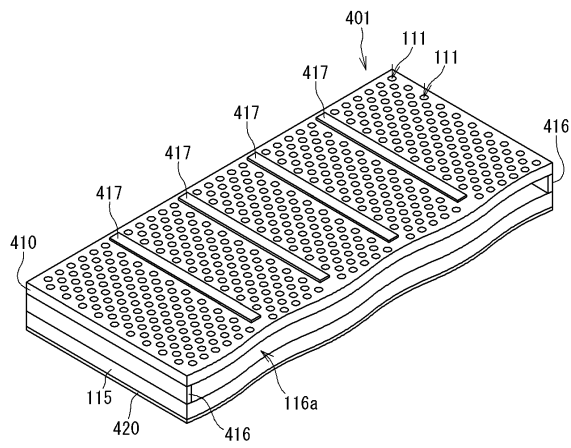
【図 15】



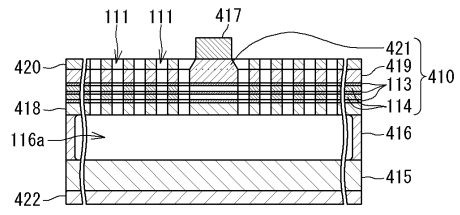
【図 16】



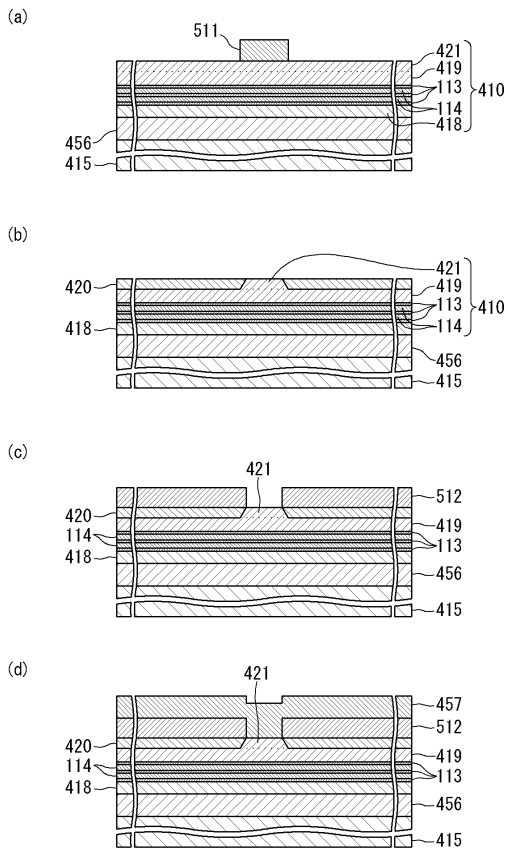
【 図 17 】



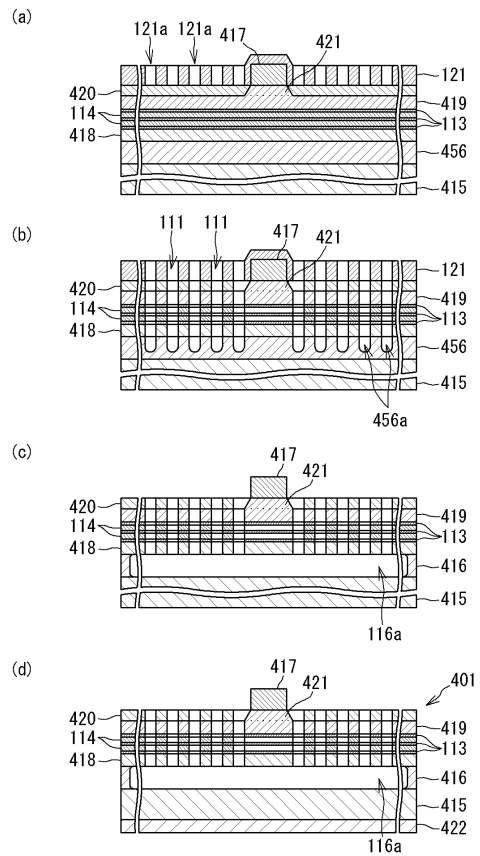
【 図 18 】



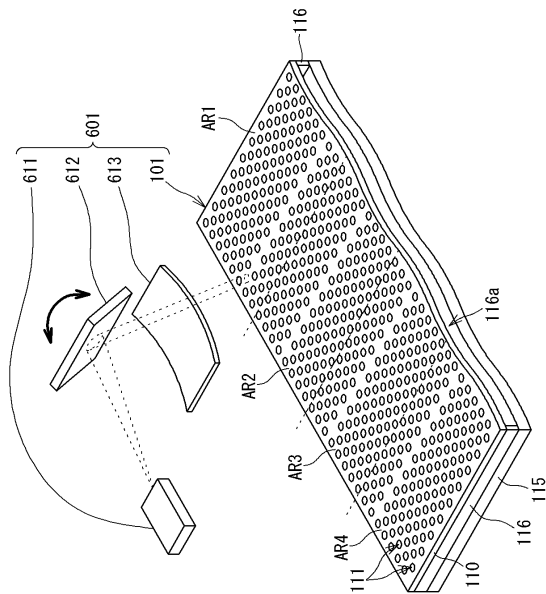
【 図 19 】



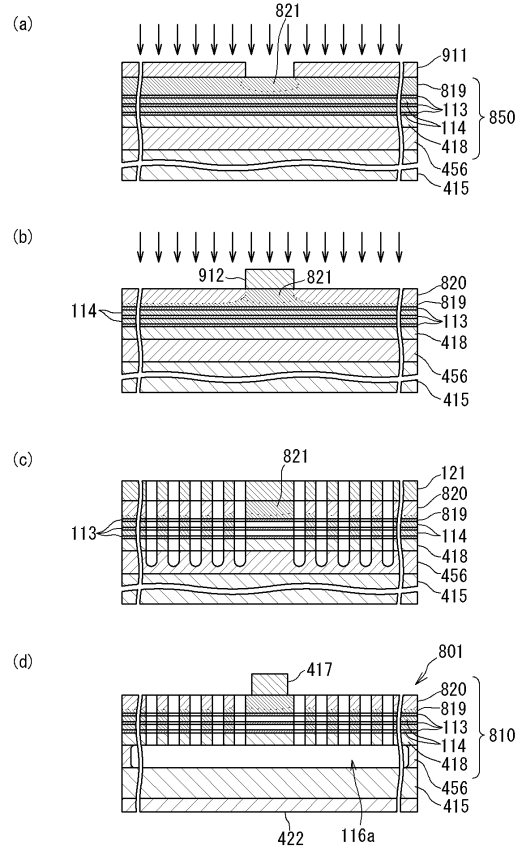
【 図 20 】



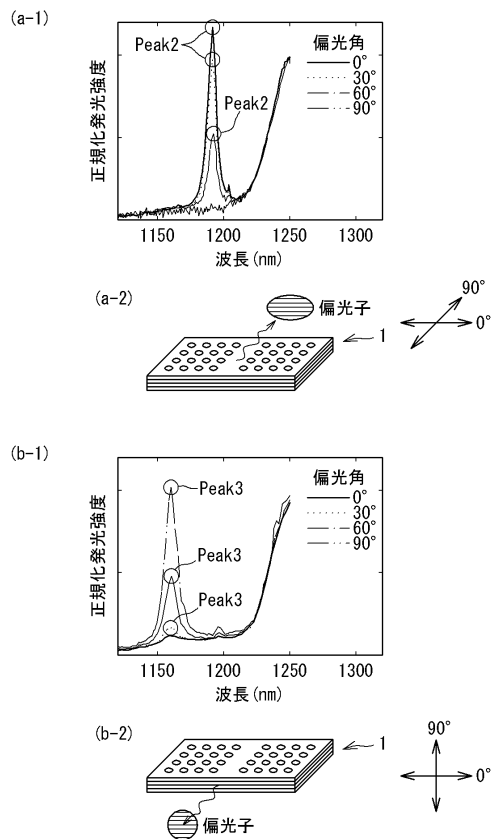
【図 2 1】



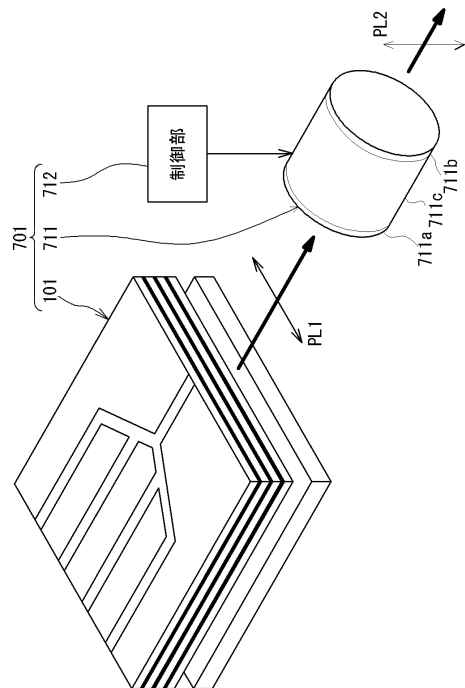
【図 2 2】



【図 2 3】



【図 2 4】



フロントページの続き

(72)発明者 池田 直樹

茨城県つくば市千現1の2の1 独立行政法人 物質・材料研究機構内

審査官 村井 友和

(56)参考文献 特開2005-064471(JP, A)

国際公開第2004/055900(WO, A1)

特開2004-163731(JP, A)

米国特許出願公開第2007/0177644(US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 5/00-5/50