

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7038667号
(P7038667)

(45)発行日 令和4年3月18日(2022.3.18)

(24)登録日 令和4年3月10日(2022.3.10)

(51)国際特許分類		F I	
H 0 1 S	5/18 (2021.01)	H 0 1 S	5/18
H 0 1 S	5/125(2006.01)	H 0 1 S	5/125

請求項の数 12 (全22頁)

(21)出願番号	特願2018-558173(P2018-558173)	(73)特許権者	503392976
(86)(22)出願日	平成29年5月5日(2017.5.5)		ザ・ユニヴァーシティ・コート・オブ・
(65)公表番号	特表2019-515508(P2019-515508 A)		ザ・ユニヴァーシティ・オブ・グラスゴー
(43)公表日	令和1年6月6日(2019.6.6)		イギリス・グラスゴー・G 1 2・8 Q Q
(86)国際出願番号	PCT/EP2017/060834		・ユニヴァーシティ・アヴェニュー・(番
(87)国際公開番号	WO2017/191320		地なし)・ギルバート・スコット・ビル
(87)国際公開日	平成29年11月9日(2017.11.9)		ディング
審査請求日	令和2年5月1日(2020.5.1)	(74)代理人	100108453
(31)優先権主張番号	1607996.4		弁理士 村山 靖彦
(32)優先日	平成28年5月6日(2016.5.6)	(74)代理人	100110364
(33)優先権主張国・地域又は機関	英国(GB)		弁理士 実広 信哉
		(74)代理人	100133400
			弁理士 阿部 達彦
		(72)発明者	リチャード・ホッグ

最終頁に続く

(54)【発明の名称】 レーザ装置およびその動作方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項1】

フォトリック結晶面発光レーザ（P C S E L）素子であって、前記P C S E L素子の少なくとも第1の側面に、前記P C S E L素子の前記第1の側面を通して前記P C S E L素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射して前記P C S E L素子内に戻すように配置された反射器が設けられており、前記P C S E L素子の前記第1の側面と前記反射器との間に、電気入力に基づいて、前記P C S E L素子から前記反射器への光の透過を制御するように構成された、電氣的に制御可能な光透過領域が介在されている、P C S E L素子を有する、レーザ装置。

【請求項2】

前記反射器は、波長選択性反射器である、請求項1に記載のレーザ装置。

【請求項3】

前記電氣的に制御可能な光透過領域は、電気入力により、実質的にすべての光が前記光透過領域を通して透過されて対応する反射器によって反射される透過状態と、実質的に光が前記光透過領域を透過されない吸光状態との間で切り替え可能であり、それにより、前記P C S E L素子から前記反射器への光の透過を制御している、請求項1または2に記載のレーザ装置。

【請求項4】

前記P C S E L素子の第2の側面に、前記P C S E L素子の前記第2の側面を通して前記P C S E L素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射して前記P C S E L素子内に戻

すように配置された第2の反射器がさらに設けられている、請求項1から3のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項5】

前記PCSEL素子の前記第2の側面と前記第2の反射器との間に、電気入力に基づいて、前記PCSEL素子から前記第2の反射器への光の透過を制御するように構成された第2の電氣的に制御可能な光透過領域が介在されている、請求項4に記載のレーザ装置。

【請求項6】

前記第1および第2の側面は、互いに隣接している、請求項4または5に記載のレーザ装置。

【請求項7】

前記PCSEL素子の第1、第2、第3および第4の側面にそれぞれの反射器が設けられており、各々は、前記PCSEL素子のそれぞれの前記側面を通して前記PCSEL素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射して前記PCSEL素子に戻すようにそれぞれ配置されている、請求項1から3のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項8】

それぞれ電氣的に制御可能な光透過領域が、それぞれの反射器と前記レーザ装置の側面との間に介在されている、請求項7に記載のレーザ装置。

【請求項9】

各電氣的に制御可能な光透過領域は、それぞれの電気入力により独立して制御されている、請求項5または8に記載のレーザ装置。

【請求項10】

少なくとも1つの電氣的に制御可能な光透過領域は、少なくとも2つのセグメントに分割されており、各セグメントは、前記PCSEL素子から前記反射器への光のそれぞれの部分の透過を制御するように構成されている、請求項1から9のいずれか一項に記載のレーザ装置。

【請求項11】

各セグメントは、それぞれの電気入力によって個別に制御される、請求項10に記載のレーザ装置。

【請求項12】

レーザ装置を動作させる方法であって、前記レーザ装置はフォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)素子を有しており、前記方法は、前記PCSEL素子の第1の側面を通して前記PCSEL素子の外に出ていく光を前記PCSEL素子に戻す反射を制御するステップであって、電気入力に前記PCSEL素子の前記第1の側面と反射器との間に介在された光透過領域を通る光の透過を制御させることによる、反射を制御するステップを含む、方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、レーザ装置およびその動作方法に関する。これは、フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)に基づいたレーザ装置に特に適用可能である。

【背景技術】

【0002】

フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)は、新しい分類の半導体発光素子である。PCSELは、コヒーレント振動、および放射光の低い発散を含む有益な特性を有することが見出されている。

【0003】

PCSELは、活性発光層およびフォトリック結晶層を用いて機能する。これらの2つの層は、層状構造の一部として互いに近接または隣接して配置される。フォトリック結晶は第1の屈折率を有する材料で作られ、周期格子構造に配置された第1の屈折率とは異なる第2の屈折率を有する離散領域でパターン化されて、フォトリック結晶を形成する。第2

10

20

30

40

50

の屈折率を有する領域は、孔とすることができ、または別の材料で充填することができる。この格子は、フォトリック結晶においてブラッグ回折を引き起こし、次に、フォトリック結晶の周期性／格子定数によって決定される特定の波長で光をフォトリック結晶内で共振させる。

【0004】

電圧がPCSELにわたって印加されると、活性層が発光する。光は、活性層の外へ、およびフォトリック結晶の中に漏れる。フォトリック結晶の格子定数と一致する波長を有するフォトリック結晶内の光は、フォトリック結晶内で共振し、増幅される。この増幅された光は、出射面を通してPCSELを出る。

【0005】

ガレッタら(2015) [15] は、PCSELのTEモードでの外部反射の影響に関するモデリング調査の結果を開示している。ガレッタら(2015)により報告された成果は、適度な(約100 μm²)領域の空洞におけるモード安定性を改善するために、外部反射の使用が興味深いことを示唆している。しかしながら、そのような効果を支持するための実験的成果は示されていない。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

発明者の研究グループによる先行研究は、国際公開第2016/027105号[20]として公表されており、レーザ構造は、結合領域を介して結合された第1のPCSEL素子および第2のPCSEL素子を有することが開示されている。結合領域は、第1のPCSELと第2のPCSELとの間のコヒーレント結合を提供するために電氣的に制御可能である。

【0007】

本発明者らは、PCSELに基づく既存のレーザ装置が、強度、ビーム発散、ビーム形状などの観点から、例えばレーザ出力の制御可能性を改良するために、さらなる修正および／または改善が可能であることを見出した。本発明はそれに応じて考案された。好ましくは、本発明は、上記の問題の少なくとも1つを軽減、改善、回避または克服する。本発明の好ましい実施形態の更なる利点を以下に説明する。

【課題を解決するための手段】

【0008】

一般的な態様では、本発明は、横方向に伝播する光のPCSEL内に戻す制御可能なおよび／または選択的な反射を提供することによって、既知のPCSELデバイスを変更している。

【0009】

第1の好ましい態様では、本発明は、フォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)素子を有するレーザ装置を提供し、PCSEL素子の少なくとも第1の側面に、PCSEL素子の第1の側面を通してPCSEL素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してPCSEL素子に戻すように配置された反射器が提供され、PCSEL素子の第1の側面と反射器との間に、電気入力に基づいて、PCSEL素子から反射器への光の透過を制御するように構成された電氣的に制御可能な光透過領域が介在されている。

【0010】

第2の好ましい態様において、本発明はレーザ装置を動作させる方法を提供し、レーザ装置はフォトリック結晶面発光レーザ(PCSEL)素子を有しており、この方法は、電気入力がPCSEL素子の第1の側面と反射器との間に介在された光透過領域を通して光の透過を制御することにより、PCSEL素子の第1の側面を通してPCSEL素子の外に出ていく光のPCSEL素子内へ戻す反射を制御するステップを含む。

【0011】

従って、反射してPCSEL素子内へ戻る光からのPCSEL素子内部のフィードバックは、電気入力に基づいて制御することができる。本発明者らは、このようにフィードバッ

10

20

30

40

50

クを制御することにより、レーザ装置のレージング出力およびビーム形状を電子的に制御することができることを見出した。有利的には、レージング出力およびビーム形状は、必要に応じて、P C S E L 素子自体を直接変調することなく制御することができる。

【0012】

第3の好ましい態様では、本発明は、P C S E L 素子を有するレーザ装置であって、それぞれの反射器は、少なくともP C S E L 素子の第1の側面およびP C S E L 素子の第2の側面に設けられ、各々はP C S E L 素子のそれぞれの側面を通してP C S E L 素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してP C S E L 素子に戻すように配置されており、それぞれの反射器は波長選択性である、レーザ装置を提供する。

【0013】

第4の好ましい態様では、本発明はレーザ装置を動作させる方法を提供し、レーザ装置はフォトニック結晶面発光レーザ（P C S E L）素子であって、それぞれの波長選択性反射器が、少なくともP C S E L 素子の第1の側面およびP C S E L 素子の第2の側面に配置されている、P C S E L 素子を有しており、この方法は、P C S E L 素子からP C S E L 素子のそれぞれの側面を通る光を放射させるステップを含み、各反射器はそれぞれ、P C S E L 素子のそれぞれの側面を通してP C S E L 素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してP C S E L 素子に戻すように配置されている。

【0014】

理解されているように、波長選択性反射器は、その波長に応じて、典型的には選択された波長のあらかじめ定義された波長範囲内で光を反射する。そのような反射器は、デバイスアーキテクチャ内で都合よく形成することができ、例えばエピタキシャルおよび／またはリソグラフィ技術によって形成することができる。従ってそれらは、面内光のフィードバックをP C S E L 素子に戻すことを可能にする反射器に対して便利なフォーマットを提供している。有利的には、波長選択性反射器は、P C S E L 素子のフォトニック結晶内部の光の共振周波数に対応する波長の光を反射するだけであってもよい。言い換えれば、反射器は、P C S E L 素子のレージング周波数で光を反射するようにのみ形成することができる。

【0015】

好ましくは、波長選択性反射器は、そこに入射する所定の波長範囲内の実質的に全ての光を反射することができる。さらに、好ましくはそこに入射するP C S E L 素子のレージング周波数に対応する実質的にすべての光を反射してもよい。

【0016】

従って、反射器を通るレージング周波数の光の損失を最小にすることができ、P C S E L 素子におけるフィードバック効果を最大にすることができる。

【0017】

本発明の第1、第2、第3および／または第4の態様は、互換性がある限り、以下の任意の特徴のいずれか1つまたは任意の組み合わせを有することができる。

【0018】

第1および第2の態様の反射器は、波長選択性反射器であってもよい。

【0019】

反射器（および波長選択性反射器）は、P C S E L 素子の面内に配置することができる。

【0020】

電氣的に制御可能な光透過領域は、P C S E L 素子の面内に配置することができる。

【0021】

電氣的に制御可能な光透過領域は、実質的に全ての光が光透過領域を通して透過されて、対応する反射器によって反射される透過状態と、実質的に光が光透過領域を通して透過されない吸光状態との間を電氣的入力によって切り替え可能であってもよく、それによりP C S E L 素子から反射器への光の透過を制御する。

【0022】

実際には、透過は、吸光状態と透過状態との間で光学状態の連続的な範囲を通して調整可

10

20

30

40

50

能であってもよい。この点で、チューニングはバイナリではなくアナログと考えることができる。

【0023】

従って、電氣的に制御可能な光透過領域が吸光状態にあり、光が対応する反射器に透過されることを妨げる場合、光は、対応する側面で反射器により反射されてPCSEL素子に戻されることはなく、デバイスのそのエッジからのフィードバックはない。一方、電氣的に制御可能な光透過領域が透過状態にあり、光が対応する反射器に到達することを可能にしている場合、光は反射されてPCSEL素子に戻され、デバイスのそのエッジからのフィードバックをもたらす。電氣的に制御可能な光透過領域が、吸光状態と透過状態との間の光学状態にあるとき、光の中間の割合が、反射器によって対応する側面に反射され装置

10

【0024】

第1および第2の実施形態では、PCSEL素子の第2の側面に、PCSEL素子の第2の側面を通してPCSEL素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してPCSEL素子に戻すように配置された第2の反射器が設けられてもよい。さらに、第2の反射器は、PCSEL要素の第1の側面における（第1の）反射器に加えて設けられてもよい。

【0025】

PCSEL素子の第2の側面と第2の反射器との間に、電気入力に基づいて、PCSEL素子から第2の反射器への光の透過を制御するように構成された第2の電氣的に制御可能な光透過領域が介在されてもよい。さらに、第2の電氣的に制御可能な光透過領域は、第1の反射器と第1の側面との間に介在された（第1の）電氣的に制御可能な光透過領域に加えて設けてられてもよい。

20

【0026】

第1及び第2の側面は、互いに隣接し得る。

【0027】

本発明者らは、PCSEL素子の2つの隣接する側面からのフィードバックが、PCSELからのビーム形状を制御するための特定の使用とすることができ、およびPCSELの特定のレージングモードを選択するために使用できることを見出した（これは、以下でより詳細に考察する）。（以下の）詳細な説明において明らかとなるように、2つの隣接する側面から個別にフィードバックを制御できることは有利である。

30

【0028】

それぞれの反射器は、PCSEL素子の第1、第2および第3の側面に設けられてもよく、各々は、PCSEL素子のそれぞれの側面を通してPCSEL素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してPCSEL素子に戻すようにそれぞれ配置されている。

【0029】

あるいは、それぞれの反射器は、PCSEL素子の第1、第2、第3および第4の（すなわち、好ましくは全ての）側面に設けられてもよく、各々は、PCSEL素子のそれぞれの側面を通してPCSEL素子の外に出ていく光の少なくとも一部を反射してPCSEL素子に戻すようにそれぞれ配置されている。

【0030】

第1および第2の態様の場合では、それぞれの反射器とレーザ装置の側面との間に介在された電氣的に制御可能な光透過領域があってもよい。

40

【0031】

各電氣的に制御可能な光透過領域は、それぞれの電気入力によって独立して制御されてもよい。

【0032】

従って、PCSEL素子のそれぞれの側面における反射を独立して制御することができる。これは、PCSEL素子のフィードバック、従って出力およびビーム形状に対して高度な電氣的制御を提供している。

【0033】

50

反射器は、分布ブラッグ反射器（DBR）であってもよい。

【0034】

少なくとも1つの電氣的に制御可能な光透過領域はセグメント化されてもよく、各セグメントは、PCSEL素子から反射器への光のそれぞれの部分の透過を制御するように構成されている。好ましくは、各電氣的に制御可能な光透過領域がセグメント化されてもよい。特に、各電氣的に制御可能な光透過領域は、少なくとも2つのセグメントに分割されてもよい。実際には、任意の数のセグメントが使用されてもよい。例えば、2、3、4、5または6個のセグメントを使用することができる。

【0035】

各電氣的に制御可能な光透過領域の各セグメントは、それぞれの電気入力によって独立して制御することができる。特に、各セグメントは、透過状態または吸光状態のいずれかになるように個別に制御することができる。

【0036】

発明者らは、このようなセグメント化された制御可能な光透過領域は、PCSEL素子からのレージング出力およびビーム形状に対するさらなる制御を提供できると考えている。彼らはまた、そのようなセグメント化された制御可能な光透過領域は、レージング出力が集中されるPCSEL素子の平面内の位置を変えることにより、ビームステアリングのために使用できると考えている。

【0037】

本発明のさらなる任意の特徴を以下に示す。

【図面の簡単な説明】

【0038】

本発明の実施形態を添付の図面を参照して例として以下に説明する。

【0039】

【図1】PCSEL素子の斜視図を示している。

【図2】図1のPCSEL素子の断面図を示している。

【図3】図1および図2のPCSEL素子において使用するためのフォトニック結晶の平面図を示している。

【図4】図3のフォトニック結晶のフォトニックバンド構造を示している、波動ベクトル（x軸）に応じた正規化された周波数（y軸）のグラフである。

【図5A】図4で示した周波数A、B、C、Dに対する、図3のPCSEL素子における磁場分布の係数を示している。

【図5B】図4で示した周波数A、B、C、Dに対する、図3のPCSEL素子における磁場分布の係数を示している。

【図5C】図4で示した周波数A、B、C、Dに対する、図3のPCSEL素子における磁場分布の係数を示している。

【図5D】図4で示した周波数A、B、C、Dに対する、図3のPCSEL素子における磁場分布の係数を示している。

【図6】異なる数の反射面を有するPCSELに対する、電流（x軸）に応じたレージング出力（y軸）のグラフを示している。

【図7】図8の0°及び90°方向の配向を示している。

【図8A】1.1x閾値電流で動作し、異なる数の反射面を有するPCSELに対する、角度（x軸）に応じた正規化されたビーム強度（y軸）のグラフである。

【図8B】1.1x閾値電流で動作し、異なる数の反射面を有するPCSELに対する、角度（x軸）に応じた正規化されたビーム強度（y軸）のグラフである。

【図8C】1.1x閾値電流で動作し、異なる数の反射面を有するPCSELに対する、角度（x軸）に応じた正規化されたビーム強度（y軸）のグラフである。

【図9A】ある電流の範囲で動作し、異なる数の反射面を有するPCSELに対する、発光波長に応じたビーム強度（y軸）のグラフを示している。

【図9B】ある電流の範囲で動作し、異なる数の反射面を有するPCSELsに対する、

10

20

30

40

50

発光波長に応じたビーム強度（y 軸）のグラフを示している。

【図 9 C】ある電流の範囲で動作し、異なる数の反射面を有する P C S E L s に対する、発光波長に応じたビーム強度（y 軸）のグラフを示している。

【図 1 0】本発明の一実施形態によるレーザ装置の平面図を示している。

【図 1 1】図 1 0 の A A - A A 線に沿って見たレーザ装置の断面図を示している。

【図 1 2】本発明の別の実施形態に係るレーザ装置の平面図を示している。

【図 1 3】図 1 2 のレーザ装置に対する、集中されたレージング発光点（A、B、C）の例を示している。

【図 1 4】図 1 3 の B B - B B 線に沿った断面図であり、レーザ装置の出力がレンズを通して向けられるときのビームステアリング効果を示している。

【発明を実施するための形態】

【0 0 4 0】

好ましい実施形態の詳細な説明、および本発明のさらなる任意の特徴

P C S E L は、室温での連続波動作を与えることが示されている [1]、[2]。P C S E L におけるフォトリック結晶層の設計、すなわち周期構造を制御することにより、ビーム形状 [3] および偏光 [4] のようなレージング特性を制御することが可能である。このようにビームステアリングを実現することも可能である [5]。P C S E L は、ウェーハ融着を通して [2]、またはエピタキシャル成長 [6]、[7]、[8]、[9]、[10] により製造することができる。

【0 0 4 1】

個々の P C S E L 素子のアレイを作製することにより、高いレージング出力を達成することができる [6]、[11]、[12]、[13]。特に、フォトリック結晶層への変化は、レージング出力を増加させるために使用されている [14]。単一の P C S E L 素子から達成される最高出力は、エピタキシャル成長および制御されたフォトリック結晶設計を用いて達成された [6]。

【0 0 4 2】

ガレッタら (2015) [15] は、P C S E L 素子の単一の側面からの外部反射の P C S E L のレージング特性に対する影響を調べた。外部反射器の位相を変化させることにより、彼らは閾値利得（レージング閾値）およびバンド周波数に対する変化を示すことができた。レージング閾値への変化は反射面の位相に依存しており、変化の性質は P C S E L におけるフォトリック結晶の異なる共振周波数モードに対して異なっていた。フォトリック結晶領域にわたって反射面の位相を変更させることがなされた効果についての研究はなかった。ガレッタら (2015) [15] により報告された成果は、実験的測定に基づくのではなく、その代わりにモデリングおよび分析に基づいていた。

【0 0 4 3】

シャサニューら (2009) [16] は、六方晶系フォトリック結晶格子を有する T H z P C S E L の側面にファセット（反射面）を含めることにより、ウィスパリングギャラリー周波数モード、またはフォトリック結晶の周波数モードを交互に選択することが可能であることを示した。

【0 0 4 4】

以下でより詳細に説明するように、本発明者らは、P C S E L 素子のエッジに反射面を含めることにより、P C S E L 素子のレージング閾値および遠距離場のビーム形状が変化され得ることを見出した。反射面は、フォトリック結晶層に対してランダムな位相を有すると考えることができる。反射位相は、P C S E L 素子にわたって変化する。

【0 0 4 5】

図 1 および図 2 は、P C S E L 素子の斜視図および断面図をそれぞれ示す。図 1 および図 2 の P C S E L 素子は、例えば、有機金属気相エピタキシー (MOVPE) によって G a A s 基板上に成長することができる。

【0 0 4 6】

図 1 および図 2 の P C S E L 素子は、n - A l G a A s 下部クラッド層 102、I n G a

10

20

30

40

50

A s 活性層 104、p-InGa エッチストップ層 106、InGaP フォトニック結晶層 108、p-AlGaAs 上部クラッド層 110、p⁺GaAs キャップ層 112、およびリング電極 114 を有している。一般的に、コンタクト電極が下部クラッド層 102 に隣接して提供されてもよい。図 1 に示すように、コンタクト電極は環状であり、PCSEL がレージングするとき光を取り出すことができる開口部を有している。

【0047】

活性層は、量子井戸および／または量子ドットを含むことができる。例えば、InGaAs/GaAs 量子井戸、InAs/GaAs 量子ドット、GaAs/AlGaAs 量子井戸、AlInGaAsP 量子井戸のうちの 1 つ以上を含み得る。活性層は、20 nm の GaAs 障壁を有する 38 nm の InGaAs 量子井戸を含む非ドープの GaAs/InGaAs 3 重量子井戸コアであってもよい。

【0048】

フォトニック結晶は、InGaP 層を、InGaP の第 1 の屈折率とは異なる第 2 の屈折率を有する周期的な領域でパターンニングし、フォトニック結晶の周期的な格子構造を形成することによって形成される。パターンニングは電子ビームリソグラフィ (EBL) を用いて行われる。特に、SiO₂ のハードマスク内に孔がパターン化され、そのパターンは CH₄/H₂/O₂ 反応性イオンエッチング (RIE) によって InGaP に転写される。第 2 の屈折率の InGaP を有する領域は、エアギャップ/ボイドとして残されてもよく、あるいは GaAs のような第 2 の屈折率を有する適切な充填材で過成長により充填することもできる。

【0049】

フォトニック結晶は、150 μm × 150 μm の PCSEL 素子の平面内にフットプリントサイズを有している。理解されるように、異なる実施形態は異なる寸法を使用することができる。

【0050】

フォトニック結晶は、代替的に、または追加的に、AlGaAs、GaInAs、GaInAsP、AlInGaAs、および AlInGaN のうちの 1 つ以上を含むことができる。

【0051】

PCSEL 素子のフォトニック結晶の周期格子 300 の SEM 像が図 3 に示されている。明領域 302 は、上述した第 1 の屈折率を有する InGaP であり、暗領域 304 は、上述した第 2 の屈折率を有する GaAs で充填されている。図 3 から明らかなように、第 2 の屈折率を有する暗の GaAs 領域はそれぞれ、三角形状を有しており、正方格子内にまとめて配置されている。

【0052】

この種類のフォトニック結晶は、高いレージング出力を生成するために特に有用であることが分かっている。当業者が理解するように、当技術分野で知られている他のフォトニック結晶構造も同様に使用することができる。例えば、第 2 の屈折率を有する領域は、正方形、円形、または他の形状を有してもよく、正方形、六角形、または他の格子配列にまとめて配置されてもよい。

【0053】

上記構造を有する PCSEL 素子は、連続波条件の下、室温で動作することが示されている。

【0054】

図 4 は、図 3 の InGaP/GaAs フォトニック構造のガンマ点 (Γ) 付近の理論フォトニックバンド構造を示している。図 4 は、コンピュータモデリングにより、マクスウェル方程式の限定的周波数固有状態 (definite frequency eigenstates) を解くことにより得られたものである。シミュレーションは、MIT フォトニックバンド (MPB) [18] を使用して実行された。図 4 における周波数 (x 軸) は、周波数を a/c で掛けて正規化してあり、ここで a = 格子定数、c = 光速である。Γ は

10

20

30

40

50

、フォトニック結晶における光の群速度がゼロである点であり、共振がフォトニック結晶に生じる点を表す。従って、図4は、光が図3のフォトニック結晶内で共振できる4つの周波数（A、B、CおよびD）を示している。

【0055】

図5A、5B、5C、5Dは、図4で（それぞれ）示された4つの共振周波数A、B、CおよびDに対して、図3のフォトニック結晶における横電界（TE）偏波の磁場分布の理論係数を示している。

【0056】

上述のPCSELにおいて、AおよびBのレージングモードが実際に観測された。

【0057】

周期格子は、フォトニック結晶内を進行する光のブラッグ回折を生じさせる。このブラッグ回折は、次に、フォトニック結晶において、特定の周波数の光を共振させ、従って増幅させる。共振は、フォトニック結晶内を伝播する光の群速度がゼロに近づくときに生じる。光が結晶内で共振する周波数は、フォトニック結晶の周期性／格子定数に依存している。この共振周波数は、PCSEL素子のレージング周波数となる。

【0058】

電圧がPCSEL素子にわたって印加されると、活性層が光を放射する。この光はフォトニック結晶に入り、上述したように所定の周波数で共振してレーザ光を生成する。このレーザ光は次いで、PCSEL素子の放射面（上部クラッド層110）を通して取り出される。

【0059】

レーザによって生成された光の全てがレーザ放射面から抽出されるわけではない。PCSEL素子の平面内を移動する光の一部は、PCSEL要素の側面を通して透過する。

【0060】

発明者らは、PCSEL素子の側面から光を反射してPCSEL素子に戻すことにより、それ故PCSEL素子内部のフィードバックを変化させることにより、PCSEL素子のレージング出力およびビーム形状を変化させることができることを見出した。

【0061】

この効果を実証するために、本発明者らは、1.5 μm のAl_{0.4}Ga_{0.6}As下部クラッド層、3 μm の量子井戸活性領域（20 nmのGaAs層によって分離された8 nmのIn_{0.2}Ga_{0.8}As量子井戸）、40 nmのp-In_{0.48}Ga_{0.52}エッチストップ層、150 nmのIn_{0.48}Ga_{0.52}Pフォトニック結晶層（EBLを用いてパターン化され、フォトニック結晶の孔を充填するためにGaAsが使用された）、1.5 μm のp-Al_{0.4}Ga_{0.6}As上部クラッド層、400 nmのp⁺GaAsキャップ層を有するPCSEL素子を使用した。フォトニック結晶は、図3に示されているのと同じ格子構造を有しており、150 μm ×150 μm のデバイスの平面内に正方形のフットプリントを有している。52 μm の開口サイズを有する環状のコンタクト電極が上部キャップ層上に形成された。

【0062】

レージング出力、ビーム形状および発光スペクトルが、初期のPCSEL素子（すなわち、いかなる反射面を有しない）に対して最初に測定された。次いで、PCSEL素子が上に成長された基板は、PCSEL素子の第1の側面に第1の反射面を導入するために、PCSEL素子の第1の側面に沿って切断された。レージング出力および遠距離場のビーム形状が測定された。次いで、基板は、PCSEL素子の第1の反射面に隣接する第2の反射面を導入するために、第1の側面に隣接する、PCSEL素子の第2の側面に沿って切断された。レージング出力および遠距離場のビーム形状が再び測定された。その結果を図6、8Aから8Cおよび9A～9Cに示す。

【0063】

本発明者らは、少なくとも1つの反射面を追加することにより、単一のレージングモード（AまたはB）が選択されることをもたらすことを見出した。

10

20

30

40

50

【0064】

図6は、印加電流（x軸）に応じたレージング出力（y軸）のグラフである。0～200 mAのレージング出力が測定された。図6のグラフからわかるように、初期のPCSEL素子のレージング閾値は112 mAであり、200 mAにおけるレージング出力は約 1×10^{-5} a.u（任意単位）であった。

【0065】

単一の反射面を有するPCSEL素子のレージング出力が0から200 mAで測定された。図6のグラフからわかるように、単一の反射面はレージング閾値を88 mAまで低減させた。200 mAでのレージング出力は約 2×10^{-5} a.u.まで増加した。

【0066】

次いで2つの反射面を有するPCSEL素子のレージング出力が0から200 mAで測定された。図6のグラフからわかるように、1つの反射面のみを有することと比較して、第2の反射面を追加することによって、レージング出力およびレージング閾値は特に変更されなかった。

【0067】

図6の実験結果は、PCSEL素子の側面に反射面を追加することが、レージング出力を増加させ、レージング閾値を低減させることを示している。

【0068】

図7は、PCSEL素子に対する、第1の切断／反射面702および第2の切断／反射面703の位置を示す。

【0069】

図8Aから8Cは、 $1.1 \times$ 閾値電流の動作電流で、異なる数の反射面を用いて、図1および2のPCSEL素子の放射面を通して放射される光の遠距離場測定に対する角度について正規化された強度の分布グラフを示す。

【0070】

また、図8Aから8Cにおいて、0°の線は、反射面に平行な角度に応じたビーム強度である。すなわち、0°の線は、図7の線704（線702は反射面である）に沿った角度に応じたビーム強度がどのように変化するかを示している。90°の線は、ビーム強度が反射面に垂直な角度に応じてどのように変化するかを示している。すなわち、90°の線は、図7における線706に沿った角度に応じてビーム強度がどのように変化するかを示している。図8Aから8Cにおけるx軸上の0°点は、図7の線704および706が交差する点を通過する軸に沿った観察位置に対応しており、軸はPCSEL要素の平面に垂直である。

【0071】

図8Aは、反射面を有さないPCSEL素子に対する遠距離場のビーム分布である。図からわかるように、ビーム形状はほぼ円形であり、約 $\pm 2.5^\circ$ の角拡散を有している。

【0072】

図8Bは、単一の反射面を有するPCSEL素子に対する遠距離場のビーム分布である。図8Bからわかるように、単一の反射面は、反射面に平行な方向におけるビームを広げ、反射面に垂直な方向におけるビームを集束させる効果を有する。反射面に垂直な方向における角拡散は、約 $\pm 2^\circ$ までわずかに減少し、一方、反射面に平行な方向における角拡散は約 $\pm 10^\circ$ まで増加した。

【0073】

図8Cは、単一の反射面を有するPCSEL素子に対する遠距離場のビーム分布である。この図からわかるように、第1の反射面に隣接する第2の反射面を追加することは、第1の反射面に平行な方向におけるビームを集束させる効果を有しており、それによりビームは、いかなる反射面を有さないPCSEL素子と比較する場合、約 $\pm 1^\circ$ の角拡散で両方向に集束される。

【0074】

従って、PCSEL素子の側面への単一の反射面の追加は、楕円形を有するビームを生成

10

20

30

40

50

する。P C S E L 素子の隣接する側面への２つの反射面の追加は、反射面を有さない P C S E L 素子と比べた場合、ビームの角拡散を低減する効果を有している。

【 0 0 7 5 】

本発明者らは、以上の知見に基づいて、レージング出力およびビーム形状を電子的に変化させることができるレーザ素子を開発した。そのようなレーザ装置を図 1 0 に示す。

【 0 0 7 6 】

図 9 A から 9 C は、ある電流の範囲内で、および異なる数の反射面で動作する場合の、図 1 および図 2 の P C S E L 素子に対する発光波長に応じたビーム強度のグラフを示している。

【 0 0 7 7 】

図 9 A は、反射面を有さない初期の P C S E L 素子に対する発光波長に応じたビーム強度を示している。図 9 A から分かるように、初期の P C S E L 素子は、より低い電流値で 2 つのスペクトル最大値を有する傾向がある。

【 0 0 7 8 】

図 9 B は、第 1 の反射面を有する P C S E L 素子に対する発光波長に応じたビーム強度を示している。図 9 B から分かるように、単一の反射面の追加は、約 6 3 . 5 n m に中心がある単一のスペクトル発光ピークをもたらす。

【 0 0 7 9 】

図 9 C は、第 1 の反射面に隣接する第 2 の反射面を有する P C S E L 素子の発光波長に応じたビーム強度を示している。図 9 C から分かるように、P C S E L 素子は依然として単一のスペクトル発光ピークを有している。発光最大値は、電流に応じて増加することがわかる。本発明者らは、この増加した最大値は、2 つの切断を有する P C S E L 素子における電流閉じ込めによって生じる結果としての加熱効果であると考えている。

【 0 0 8 0 】

図 1 0 のレーザ装置 5 0 0 は、P C S E L 素子 5 0 2 を含む。この実施形態におけるこの P C S E L 素子 5 0 2 は、図 1 および図 2 の P C S E L 素子 1 0 0 と同じ構造を有している。制御可能な光透過領域 5 0 4 および D B R 反射器 5 0 6 が、P C S E L 素子 5 0 2 の各側面に形成されている。各側面での制御可能な光透過領域は、P C S E L 素子とそれぞれの D B R 反射器との間に介在される。これによりレーザ装置が形成される。

【 0 0 8 1 】

各 D B R 反射器 5 0 6 は、そこに入射し、および P C S E L 素子 5 0 2 の平面に実質的に平行な方向に進む光を反射するように構成されている。D B R 反射器は、P C S E L 素子の平面内に存在する。このようにして、P C S E L 素子 5 0 2 の外に出ていく光は、D B R 反射器 5 0 6 によって反射されて P C S E L 素子 5 0 2 に戻され、それにより P C S E L 素子内のフィードバックを変更することができる。

【 0 0 8 2 】

各制御可能な光透過領域 5 0 4 の光学特性は、電気入力によって制御可能である。特に、所与の制御可能な光透過領域 5 0 4 に供給される電流を制御することによって、制御可能な光透過領域 5 0 4 の光学特性を制御することができる。特に、制御可能な光透過領域の光学特性は、実質的に全ての光が透過する透過状態と、実質的に全く光が透過しない吸光状態との間のどこかに制御することができる。好ましくは、透過状態と吸光状態との間で切り換えられる。さらに、制御可能な光透過領域は、それに電流を流すことによって制御される。この電流が閾値を超えると、コンタクトは本質的に透明となり、光が通過することを可能にする。これが透過状態である。電流が閾値を下回ると、コンタクトはもはや光を通過させない。これが吸光状態である。

【 0 0 8 3 】

透過状態になるように制御されるとき、制御可能な光透過領域 5 0 4 は、P C S E L 素子 5 0 2 の平面内の P C S E L 素子 5 0 2 の外に出ていく光を透過させる。この光は次いで対応する D B R 反射器 5 0 6 によって反射され、P C S E L 素子 5 0 2 に戻る。反対に、制御可能な光透過領域が吸光状態に制御されるとき、光は反射して P C S E L 素子 5 0 2

10

20

30

40

50

に戻されない。従って、P C S E L 素子の各側面からのフィードバックは、電子的に制御することができる。

【0084】

上記図6、8Aから8Cおよび9Aから9Cに関連して示すように、光がP C S E L 素子の特定の側面から反射されて戻されるかどうかを選択的に制御することによって、レーザ装置の出力およびビーム形状を変更することができる。従って、レーザ装置500は、レージング出力およびビーム形状を電子的に変更することを可能にする。

【0085】

例えば、制御可能な光透過領域504を制御することにより、第1の制御可能な光透過領域が透過状態になり、他の3つが吸光状態になり、レージング閾値を低減することができ、レージング閾値より上の所与の動作電流でのレージング出力を増加させることができる。さらに、ビームは楕円形を有するように作ることができる。隣接する2つの制御可能な光透過領域504が透過状態となるように制御すること、および他の2つを吸光状態に制御することにより、レーザ装置500からのレーザ光を集束させることができる。

【0086】

図11は、AA-AA線に沿って見たレーザ装置500を示している。図11から分かるように、P C S E L 素子502は、図1および2のP C S E L 素子と同じ構造を有する。

【0087】

制御可能な光透過領域504は、P C S E L 素子と同じ層状構造を有している。従って、制御可能な光透過領域504は、P C S E L 素子502と実質的に同じ屈折率を有しており、それにより、P C S E L 素子502と制御可能な光透過領域504との間の界面で反射が生じることを防止する。しかしながら、制御可能な光透過領域504の(P C S E L 素子のフォトリソニック結晶層108に対応している)InGaP層は、InGaPと異なる屈折率を有する周期的な領域でパターン化されていない。それ故、この層は、制御可能な光透過領域504においてフォトリソニック結晶ではない。制御可能な光透過領域504は、P C S E L 素子電極114から電氣的に分離されている、それ自身の電極600を有している。

【0088】

このように、制御可能な光透過領域504は、P C S E L 素子114とは独立に、互いに独立して電子的に制御することができる。

【0089】

P C S E L 素子502、制御可能な光透過領域504およびDBR反射器506は、1つまたは複数の光学的に調節可能な領域504に供給される電流に基づいて、レーザ装置の平面内でP C S E L 素子の外に出ていく光を選択的に反射するために、全て同じ平面内に存在している。

【0090】

いくつかの実施形態では、いくつかのレーザ装置を単一の基板上に成長させてもよい。この基板は次いで、製造プロセスの後に切断され、それにより、各レーザ装置が単一のP C S E L 要素を含む複数の個別のレーザ装置を提供する。

【0091】

図12は、図10および図11のレーザ装置の変形例を示す。このレーザ装置800において、各制御可能な光透過領域802は、複数の光学的に調節可能なセグメント804にセグメント化される。各セグメント804は、他のセグメントとは独立して制御され得る。従って、各個別のセグメントは、透過状態または吸光状態のいずれかとなるように独立して制御することができる。このようにして所与の側面からのフィードバックを調整することができる。例えば、一つの側面で単一のセグメントを透過状態に、および、他のセグメントを吸光状態にすることによって、P C S E L 素子に弱いフィードバックを提供するように側面を作ることができる。

【0092】

各側面でのフィードバックを微調整するこの能力は、図10および11の実施形態におけ

10

20

30

40

50

るように、側面全体からのフィードバックを均一に制御することよりも、より高いレベルの制御とともに、レーザ装置の発光強度を微調整することを可能にする。

【0093】

さらに、各側面からのフィードバックを空間的に変調することによって、ビーム形状をより正確に制御することができる。従って、セグメント化された電極は、レーザビームを操作し、およびその形状および角発散を調整するために使用することができる。

【0094】

ビームステアリング効果が、図13および14に示されている。

【0095】

セグメント804を個別に制御することにより、PCSEL装置800のレーザ出力を、フォトニック結晶の平面内の異なる位置に集中させることができる。図13は、セグメント804を個別に制御することにより、レーザ装置800のレーザ出力を集中させることができる3つの異なる例示的な位置（A、BおよびC）を示す。これらの位置は例示的であり、限定的ではない。

【0096】

図14は、図13のBB-BB線に沿った断面、および点A、BおよびCから放射されたレーザ光が、Bを焦点に合わせられたレンズ900を通過することができる経路を示している。これらの3つの点からの光は、レンズ900により透過され、および屈折させられる。図14は、点Aから点A'、点Bから点B'、点Cから点C'の光の経路を示しており、点A'、点B'および点C'は面902内にある。従って、点A、点B、点Cのいずれかにレーザ出力を集中させるように制御することにより、ビームステアリングを達成することができる。

【0097】

本発明者らはまた、レージング出力のこの微調整が、各個別のPCSEL素子に対する製造上の問題によってもたらされる装置性能のばらつきを補償するために使用できることを見出した。例えば、フォトニック結晶構造、ヒートシンク、および他の製造上の問題の不正確によって引き起こされるレージング出力上の有害な影響は、例えば、より高い単一モードのレージング出力を達成するために、セグメント化されたコンタクトを使用してフィードバックを微調整することによって補償することができる。

【0098】

本発明は、上述の例示的な実施形態と関連して説明されてきたが、本開示が与えられる場合、当業者には多くの均等な変更および変形が明らかとなるであろう。従って、上に示された本発明の例示的な実施形態は、例示的なものであり、限定的なものではないと考えられる。説明した実施形態に対する様々な変更が、本発明の精神および範囲から逸脱することなくなされ得る。

【0099】

上で参照した、および／または以下に列挙されたすべての参考文献は、その全体が参照により本明細書に組み込まれる。

【0100】

参考文献

[1] M. Imada, S. Noda, A. Chutinan, T. Tokuda, M. Murata and G. Sasaki, "Coherent two-dimensional lasing action in surface-emitting laser with triangular-lattice photonic crystal structure" Applied Physics Letters, vol. 75, no. 3, p. 316, 1999.

[2] D. Ohnishi, T. Okano, M. Imada and S. Noda, "Room temperature continuous wave operation of a surface emitting two dimensional photonic crystal laser" optics express, vol. 12, no. 8, p. 1562, 2004.

[3] E. Miyai, K. Sakai, T. Okano, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda, "Lasers producing tailored beams" Nature, vol. 441, no. 946, 2006.

[4] S. Noda, M. Yokoyama, A. Chutinan, M. Imada and M. Mochizuki, "Polari

10

20

30

40

50

zation Mode Control of Two-Dimensional Photonic Crystal Laser by Unit Cell Structure Design” Science, vol. 293, p. 1123, 2001.

[5] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, Y. Liang, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda, “On-chip beam-steering photonic-crystal lasers” Nature Photonics, vol. 4, pp. 447-450, 2010.

[6] K. Hirose, Y. Liang, Y. Kurosaka, A. Watanabe, T. Sugiyama and S. Noda, “Watt-class high-power, high-beam-quality photonic-crystal lasers” Nature Photonics, vol. 8, pp. 406-411, 2014.

[7] D. Williams, K. Groom, D. Childs, R. Taylor, S. Khamas, R. Hogg, B. Stevens, N. Ikeda and Y. Sugimoto, “Epitaxially regrown GaAs-based photonic crystal surface emitting laser” Photonics Technology Letters, vol. 24, no. 11, pp. 966-968, 2012.

[8] D. Williams, K. Groom, D. Childs, R. Taylor, S. Khamas, R. Hogg, B. Stevens, N. Ikeda and Y. Sugimoto, “Optimisation of coupling between photonic crystal and active elements in an epitaxially regrown GaAs based photonic crystal surface emitting laser” Japanese Journal of Applied Physics, vol. 52, no. 02BG05-1-3, 2012.

[9] R. Taylor, D. Williams, D. Childs, B. Stevens, L. Shepherd, S. Khamas, K. Groom and R. Hogg, “All-semiconductor photonic crystal surface emitting lasers based on epitaxial regrowth” IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, vol. 19, no. 4, p. 4900407, 2013.

[10] M. Nishimoto, K. Ishizaki, K. Maekawa, K. Kitamura and S. Noda, “Air-Hole Retained Growth by Molecular Beam Epitaxy for Fabricating GaAs-Based Photonic-Crystal Lasers” Applied physics express, vol. 6, no. 4, 2013.

[11] R. Taylor, D. Child, P. Ivanov, B. Stevens, N. Babazadeh, A. Crombie, S. T. G. Ternent, H. Zhou and R. Hogg, “Electronic control of coherence in a two-dimensional array of photonic crystal surface emitting lasers” Nature Scientific Reports, vol. 5, p. 13203, 2015.

[12] R. Taylor, D. Childs, P. Ivanov, B. Stevens, N. Babazadeh, J. Sarma, S. Khamas, Crombie, G. Li, G. Ternent, S. Thoms, H. Zhou and R. Hogg, “Coherently Coupled Photonic Crystal Surface Emitting Laser Array” Journal of selected topics in quantum electronics, vol. 21, no. 6, p. 4900307, 2015.

[13] S. Noda, T. Sakaguchi, W. Kunishi, S. Arimura, K. Nagase, E. Miyai, D. Ohnishi and K. Sakai, “Surface-Emitting Photonic-Crystal Laser with 35W Peak Power, in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO) and the International Quantum Electronics Conference (IQEC), 2009.

[14] R. J. E. Taylor, D. M. Williams, J. R. Orchard, D. T. Childs, S. Khamas and R. Hogg, “Band structure and waveguide modelling of epitaxially regrown photonic crystal surface emitting lasers” Journal of Physics D, vol. 46, no. 26, p. 264005, 2013.

[15] J. GELLETA., Y. LIANG., H. KITAGAWA. and S. NODA., “Influence of external reflection on the TE mode of photonic crystal surface-emitting lasers” Journal of the Optical Society of America B, vol. 32, no. 7, p. 1435, 2015.

[16] Y. Chassagneux, R. Colombell, W. Mainault, S. Barbieri, H. E. Beere, D. A. Ritchie, S. Khanna, E. H. Linfield and A. Davies, “Electrically pumped photonic-crystal terahertz lasers controlled by boundary conditions” Nature, vol. 457, pp. 174-178, 2009.

[17] S. G. Johnson and J. D. Joannopoulos, “Block-iterative frequency-domain methods for Maxwell’s equations in a planewave basis” optics express, vol. 8, no. 3, pp. 173-190, 2001.

[18] M. Yokoyama and S. Noda, "Polarisation mode control of two-dimensional photonic crystal laser having a square lattice structure" IEEE journal of quantum electronics, vol. 39, no. 9, p. 1074, 2003.

[19] Y. Kurosaka, S. Iwahashi, K. Sakai, E. Miyai, W. Kunishi, D. Ohnishi and S. Noda, "Band structure observation of 2D photonic crystal with various v-shaped air hole arrangements" IEICE Electronics express, vol. 6, no. 13, p. 966, 2009.

[20] R. Taylor, E. James, D. Childs, "Improved Laser Structure", WO2016/027105 A1

【符号の説明】

10

【0101】

100 P C S E L 素子

102 下部クラッド層

104 活性層

106 エッチストップ層

108 フォトニック結晶層

110 上部クラッド層

112 キャップ層

114 リング電極

500 レーザ装置

20

502 P C S E L 素子

504 制御可能な光透過領域

506 反射器

600 電極

702 反射面

703 反射面

800 レーザ装置

802 制御可能な光透過領域

804 セグメント

900 レンズ

30

902 面

40

50

【図面】
【図 1】

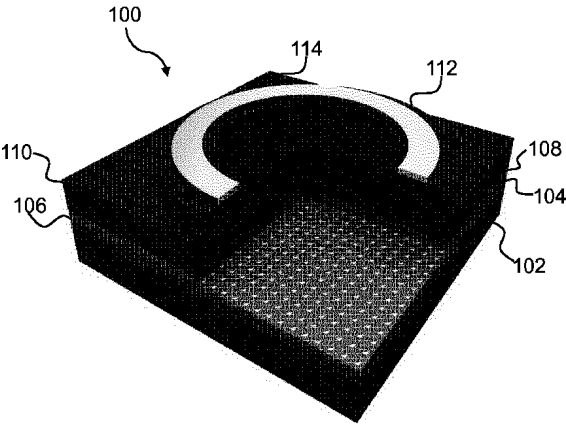


Fig. 1

【図 2】

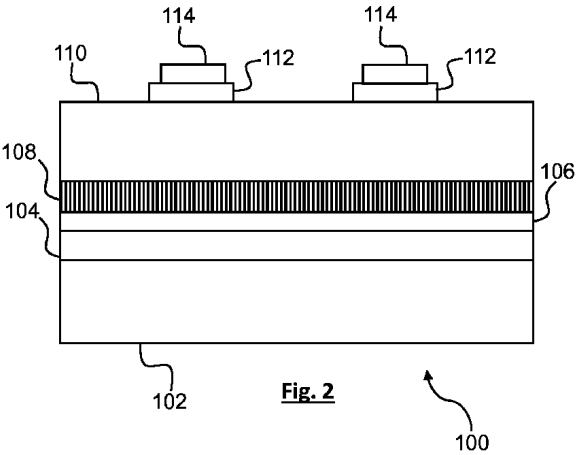


Fig. 2

【図 3】

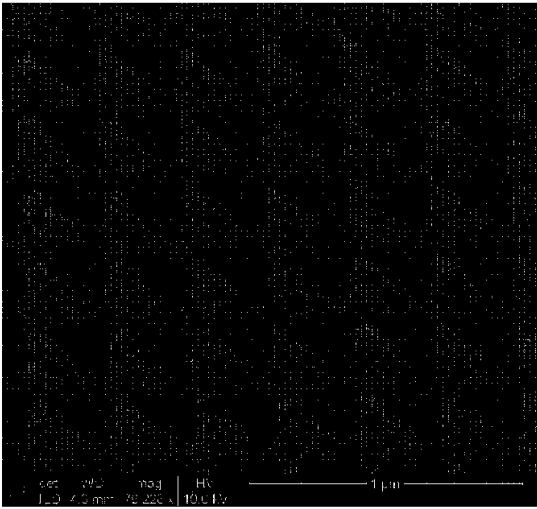


Fig. 3

【図 4】

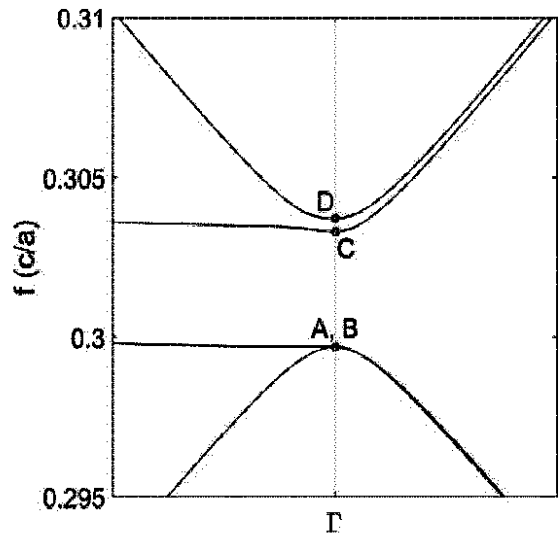


Fig. 4

10

20

30

40

50

【図 5 A】

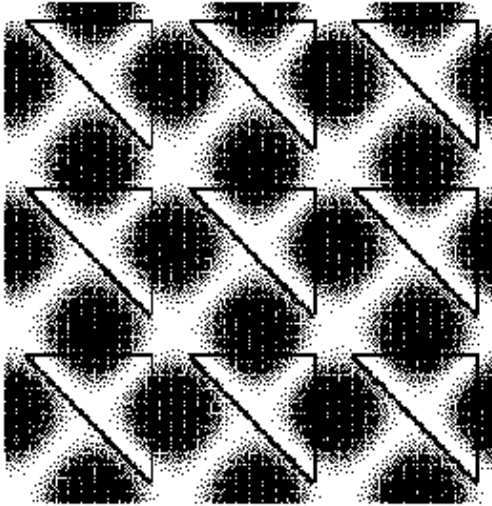


Fig. 5A

【図 5 B】

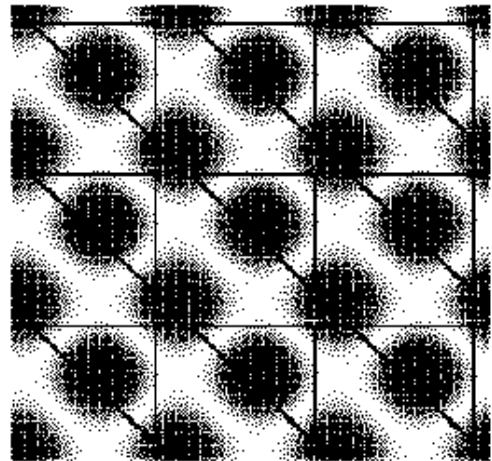


Fig. 5B

【図 5 C】

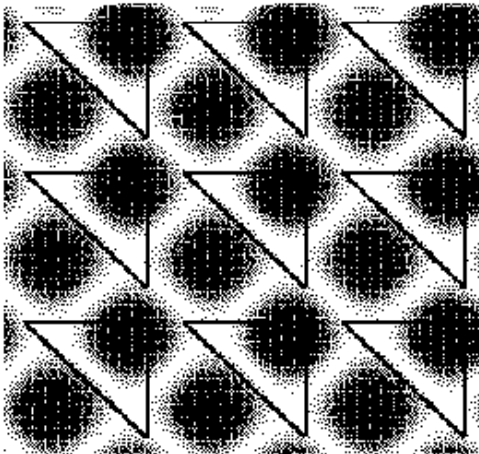


Fig. 5C

【図 5 D】

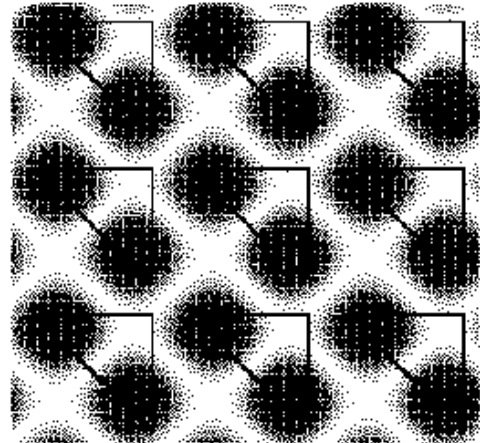


Fig. 5D

10

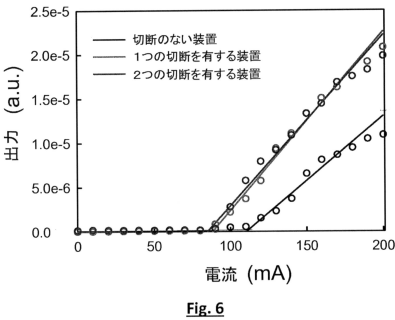
20

30

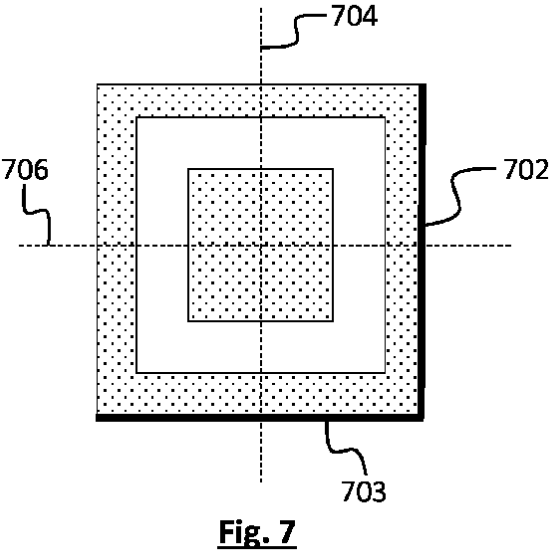
40

50

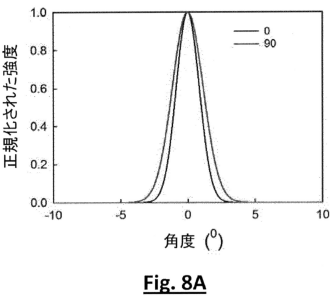
【図 6】



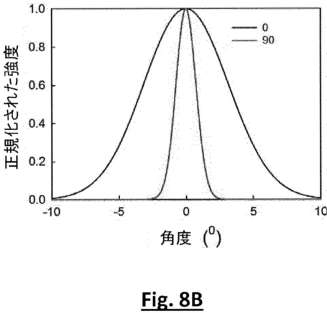
【図 7】



【図 8 A】



【図 8 B】



10

20

30

40

50

【図 8 C】

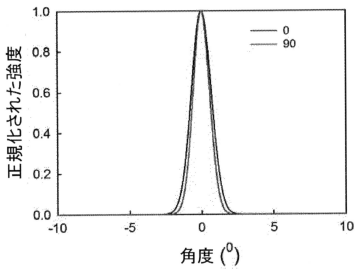


Fig. 8C

【図 9 A】

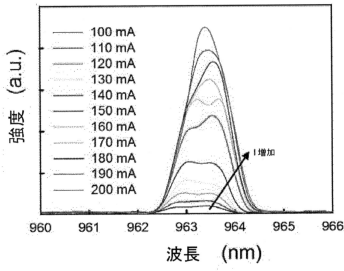


Fig. 9A

10

【図 9 B】

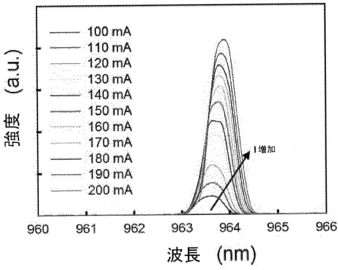


Fig. 9B

【図 9 C】

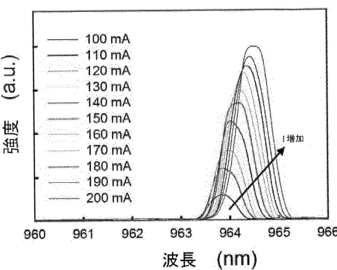


Fig. 9C

20

30

40

50

【図 10】

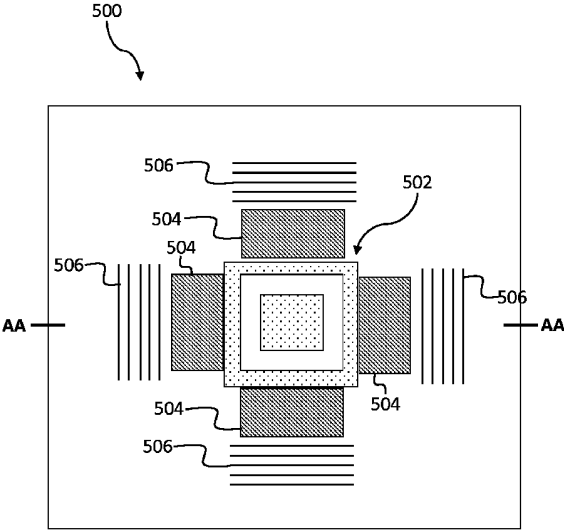


Fig. 10

【図 11】

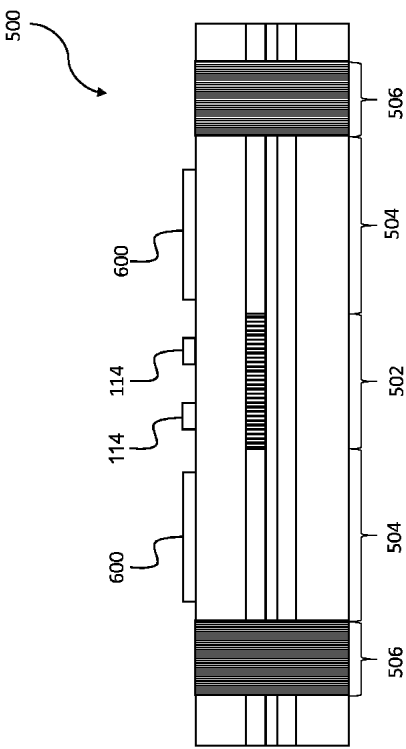


Fig. 11

【図 12】

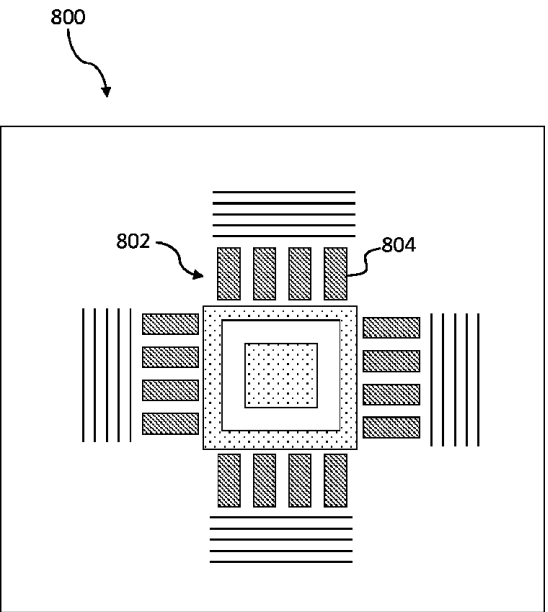


Fig. 12

【図 13】

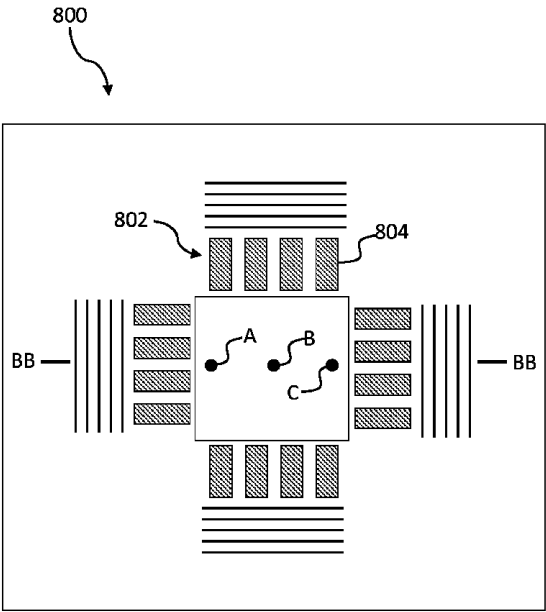


Fig. 13

10

20

30

40

50

【図 14】

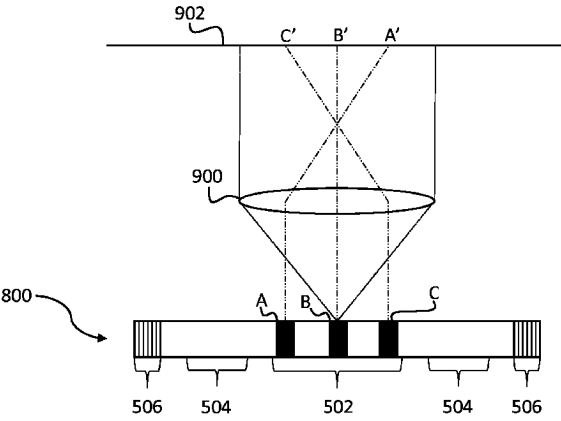


Fig. 14

10

20

30

40

50

フロントページの続き

イギリス・G12・8LT・グラスゴー・ユニヴァーシティ・オブ・グラスゴー・（番地なし）・
ランキン・ビルディング

(72)発明者 デイヴィッド・チャイルズ

イギリス・G12・8LT・グラスゴー・ユニヴァーシティ・オブ・グラスゴー・（番地なし）・
ランキン・ビルディング

(72)発明者 リチャード・テイラー

イギリス・DN21・4GD・ゲインズバラ・カートン・イン・リンジー・ブルックス・クローズ
・5

審査官 浅見 一喜

(56)参考文献 特開2007-258262 (JP, A)

特開2004-253811 (JP, A)

特開2010-232504 (JP, A)

特開2009-043918 (JP, A)

特開2003-304033 (JP, A)

特表2017-524266 (JP, A)

特開2008-243963 (JP, A)

特開2003-273456 (JP, A)

Hamed Dalir, Akihiro Matsutani, Moustafa Ahmed, Ahmed Bakry, and Fumio Koyama, High
Frequency Modulation of Transverse-Coupled-Cavity VCSELs for Radio Over Fiber Applicati
ons, IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, 米国, IEEE, 2013年12月05日, Vol. 26,
No. 3, pp. 281-284

(58)調査した分野 (Int.Cl., DB名)

H01S 5/00-5/50

IEEE Xplore

Google Scholar

Scopus