

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2015-119143

(P2015-119143A)

(43) 公開日 平成27年6月25日(2015.6.25)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO1S 5/183 (2006.01)	HO1S 5/183	5F173
HO3L 7/26 (2006.01)	HO3L 7/26	5J106

審査請求 未請求 請求項の数 3 O L (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2013-263464 (P2013-263464)	(71) 出願人	000002369 セイコーエプソン株式会社 東京都新宿区西新宿2丁目4番1号
(22) 出願日	平成25年12月20日(2013.12.20)	(74) 代理人	100090387 弁理士 布施 行夫
		(74) 代理人	100090398 弁理士 大淵 美千栄
		(72) 発明者	西田 哲朗 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内
		(72) 発明者	望月 理光 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内

最終頁に続く

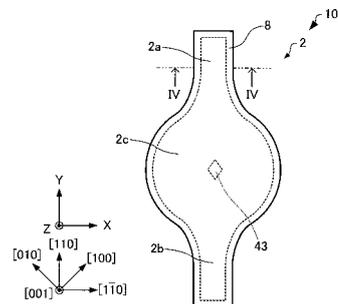
(54) 【発明の名称】 面発光レーザーおよび原子発振器

(57) 【要約】

【課題】 偏光方向の安定させることができる面発光レーザーを提供する。

【解決手段】 面発光レーザー100は、基板と、前記基板の上方に設けられた積層体2と、を含み、積層体2は、前記基板上方に設けられた第1ミラー層、前記第1ミラー層上方に設けられた活性層、前記活性層上方に設けられた第2ミラー層、および前記第1ミラー層と前記第2ミラー層との間に設けられた電流狭窄層を少なくとも含み、平面視において、積層体2は、第1歪付与部2aと、第2歪付与部2bと、第1歪付与部2aと第2歪付与部2bとの間に設けられ、活性層30で発生した光を共振させる共振部2cと、を有し、前記平面視において、電流狭窄層の開口部43は、長手方向を持つ形状を有し、前記電流狭窄層の開口部43の長手方向と第1歪付与部2aと第2歪付与部2bが共振部2cから延在する方向とは、平行である。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

基板と、
前記基板上方に設けられた積層体と、
を含み、

前記積層体は、前記基板上方に設けられた第 1 ミラー層、前記第 1 ミラー層上方に設けられた活性層、前記活性層上方に設けられた第 2 ミラー層、および前記第 1 ミラー層と前記第 2 ミラー層との間に設けられた電流狭窄層を含み、

平面視において、前記積層体は、第 1 歪付与部と、第 2 歪付与部と、前記第 1 歪付与部と前記第 2 歪付与部との間に設けられ、前記活性層で発生した光を共振させる共振部と、
を有し、

前記平面視において、前記電流狭窄層の開口部は、長手方向を持つ形状を有し、

前記電流狭窄層の前記開口部の長手方向と、前記第 1 歪付与部および前記第 2 歪付与部が前記共振部から延在する方向とは、平行であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記平面視において、前記電流狭窄層の前記開口部の形状は、菱形であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 3】

請求項 1 または 2 に記載の面発光レーザーを含む原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、面発光レーザーおよび原子発振器に関する。

【背景技術】

【0002】

面発光レーザー (VCSEL: Vertical Cavity Surface Emitting Laser) は、例えば、量子干渉効果のひとつである CPT (Coherent Population Trapping) を利用した原子発振器の光源として用いられる。

【0003】

面発光レーザーは、一般的に、共振器が等方的な構造を有するため、共振器から射出されるレーザー光の偏光方向の制御が困難であった。例えば特許文献 1 には、歪み付加部によって共振器に歪みを生じさせて複屈折を発生させ、レーザー発振によって得られるレーザー光の偏光方向を、安定化させる面発光レーザーが記載されている。

【0004】

特許文献 1 に記載の面発光レーザーでは、電流狭窄のために形成した酸化アルミニウムを歪み付加部の歪み発生源として利用している。具体的には、電流狭窄層が共振器に及ぼす応力は等方的であるため偏光を安定化させないが、歪み付加部を共振器に隣接させることによって、共振器に異方的な歪みを付与して偏光方向を安定化させている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献 1】特開平 11 - 54838 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、特許文献 1 に記載の面発光レーザーでは、歪み付加部によって共振器に生じる歪みの大きさが十分ではなく、レーザー光の偏光方向を安定化させることができない場合がある。

10

20

30

40

50

【0007】

本発明のいくつかの態様に係る目的の1つは、偏光方向の安定させることができる面発光レーザーを提供することにある。また、本発明のいくつかの態様に係る目的の1つは、上記面発光レーザーを含む原子発振器を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る面発光レーザーは、
 基板と、
 前記基板の上方に設けられた積層体と、を含み、
 前記積層体は、前記基板上方に設けられた第1ミラー層、前記第1ミラー層上方に設けられた活性層、および前記活性層上方に設けられた第2ミラー層、前記第1ミラー層と前記第2ミラー層との間に設けられた電流狭窄層を少なくとも含み、
 平面視において、前記積層体は、第1歪付与部と、第2歪付与部と、前記第1歪付与部と前記第2歪付与部との間に設けられ、前記活性層で発生した光を共振させる共振部と、を有し、
 前記平面視において、前記電流狭窄層の開口部は、長手方向を持つ形状を有し、
 前記電流狭窄層の前記開口部の長手方向と、前記第1歪付与部および前記第2歪付与部が前記共振部から延在する方向とは、平行である。

10

【0009】

このような面発光レーザーでは、電流狭窄層の開口部は、長手方向を持つ形状を有するため、活性層に異方的な歪みを付与することができる。そのため、このような面発光レーザーでは、第1歪付与部、第2歪付与部、および電流狭窄層によって、活性層に応力（歪み）を付与して、レーザー光の偏光方向を安定させることができる。したがって、例えば、第1及び第2歪付与部のみで活性層に応力を付与する場合と比べて、レーザー光の偏光方向をより安定させることができる。

20

【0010】

なお、本発明に係る記載では、「上方」という文言を、例えば、「特定のもの（以下、「A」という）の「上方」に他の特定のもの（以下、「B」という）を形成する」などと用いる場合に、A上に直接Bを形成するような場合と、A上に他のものを介してBを形成するような場合とが含まれるものとして、「上方」という文言を用いている。

30

【0011】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
 前記平面視において、前記電流狭窄層の前記開口部の形状は、菱形であってもよい。

【0012】

このような面発光レーザーでは、例えば、対称性の良好なレーザー光を射出することができる。

【0013】

本発明に係る原子発振器は、
 本発明に係る面発光レーザーを含む。

【0014】

このような原子発振器では、本発明に係る面発光レーザーを含むため、例えば、 $\lambda/4$ 板を介して、ガスセルに円偏光の光を安定して照射することができ、原子発振器の周波数安定性を高めることができる。

40

【図面の簡単な説明】

【0015】

- 【図1】本実施形態に係る面発光レーザーを模式的に示す平面図。
- 【図2】本実施形態に係る面発光レーザーを模式的に示す断面図。
- 【図3】本実施形態に係る面発光レーザーを模式的に示す平面図。
- 【図4】本実施形態に係る面発光レーザーを模式的に示す断面図。
- 【図5】電流狭窄層の開口部の平面形状の変形例を説明するための図。

50

- 【図6】電流狭窄層の開口部の平面形状の変形例を説明するための図。
 【図7】電流狭窄層の開口部の平面形状の変形例を説明するための図。
 【図8】本実施形態に係る面発光レーザーの製造工程を模式的に示す断面図。
 【図9】本実施形態に係る面発光レーザーの製造工程を模式的に示す断面図。
 【図10】本実施形態に係る面発光レーザーの製造工程を模式的に示す断面図。
 【図11】本実施形態に係る面発光レーザーの製造工程を模式的に示す断面図。
 【図12】本実施形態に係る原子発振器の機能ブロック図。
 【図13】共鳴光の周波数スペクトラムを示す図。
 【図14】アルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波および第2側帯波の関係を
 示す図。

10

【発明を実施するための形態】

【0016】

以下、本発明の好適な実施形態について、図面を用いて詳細に説明する。なお、以下に説明する実施形態は、特許請求の範囲に記載された本発明の内容を不当に限定するものではない。また、以下で説明される構成の全てが本発明の必須構成要件であるとは限らない。

【0017】

1. 面発光レーザー

まず、本実施形態に係る面発光レーザーについて、図面を参照しながら説明する。図1は、本実施形態に係る面発光レーザー100を模式的に示す平面図である。図2は、本実施形態に係る面発光レーザー100を模式的に示す図1のII-II線断面図である。図3は、本実施形態に係る面発光レーザー100を模式的に示す平面図である。図4は、本実施形態に係る面発光レーザー100を模式的に示す図3のIV-IV線断面図である。

20

【0018】

なお、便宜上、図2では、積層体2を簡略化して図示している。また、図3では、面発光レーザー100の積層体2以外の部材の図示を省略している。また、図1～図4では、互いに直交する3つの軸として、X軸、Y軸、およびZ軸を図示している。

【0019】

面発光レーザー100は、図1～図4に示すように、基板10と、第1ミラー層20と、活性層30と、第2ミラー層40と、電流狭窄層42と、コンタクト層50と、第1領域60と、第2領域62と、樹脂層（絶縁層）70と、第1電極80と、第2電極82と、を含む。

30

【0020】

基板10は、例えば、第1導電型（例えばn型）のGaAs基板である。

【0021】

第1ミラー層20は、基板10上に形成されている。第1ミラー層20は、第1導電型の半導体層である。第1ミラー層20は、図4に示すように、高屈折率層24と低屈折率層26とを交互に積層した分布ブラッグ反射型（DBR）ミラーである。高屈折率層24は、例えば、シリコンがドープされたn型の $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 層である。低屈折率層26は、例えば、シリコンがドープされたn型の $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層である。高屈折率層24と低屈折率層26との積層数（ペア数）は、例えば10ペア以上50ペア以下であり、具体的には40.5ペアである。

40

【0022】

活性層30は、第1ミラー層20上に設けられている。活性層30は、例えば、i型の $In_{0.06}Ga_{0.94}As$ 層とi型の $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$ 層とから構成される量子井戸構造を3層重ねた多重量子井戸（MQW）構造を有している。

【0023】

第2ミラー層40は、活性層30上に形成されている。第2ミラー層40は、第2導電型（例えばp型）の半導体層である。第2ミラー層40は、高屈折率層44と低屈折率層46とを交互に積層した分布ブラッグ反射型（DBR）ミラーである。高屈折率層44は

50

、例えば、炭素がドーブされたp型の $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 層である。低屈折率層46は、例えば、炭素がドーブされたp型の $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層である。高屈折率層44と低屈折率層46との積層数(ペア数)は、例えば3ペア以上40ペア以下であり、具体的には20ペアである。

【0024】

第2ミラー層40、活性層30、および第1ミラー層20は、垂直共振器型のpinダイオードを構成している。電極80, 82間にpinダイオードの順方向の電圧を印加すると、活性層30において電子と正孔との再結合が起こり、発光が生じる。活性層30で発生した光は、第1ミラー層20と第2ミラー層40との間を往復し(多重反射し)、その際に誘導放出が起こって、強度が増幅される。そして、光利得が光損失を上回ると、レーザー発振が起こり、コンタクト層50の上面から、垂直方向に(第1ミラー層20と活性層30との積層方向に)レーザー光が射出する。

10

【0025】

電流狭窄層42は、第1ミラー層20と第2ミラー層40との間に設けられている。図示の例では、電流狭窄層42は、活性層30上に設けられている。電流狭窄層42は、第1ミラー層20または第2ミラー層40の内部に設けることもできる。この場合においても、酸化狭窄層42は、第1ミラー層20と第2ミラー層40との間に設けられるとみなす。電流狭窄層42は、開口部43が形成された絶縁層である。電流狭窄層42は、電極80, 82によって垂直共振器に注入される電流が平面方向(第1ミラー層20と活性層30との積層方向と直交する方向)に広がることを防ぐことができる。

20

【0026】

コンタクト層50は、第2ミラー層40上に設けられている。コンタクト層50は、第2導電型の半導体層である。具体的には、コンタクト層50は、炭素がドーブされたp型のGaAs層である。

【0027】

第1領域60は、図4に示すように、積層体2を構成する第1ミラー層20の側方に設けられている。第1領域60は、第1ミラー層20と(図示の例では第1ミラー層20の一部と)連続して設けられた、複数の酸化層6を含む。具体的には、第1領域60は、第1ミラー層20を構成している低屈折率層(例えば $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層)26と連続する層が酸化された酸化層6と、第1ミラー層20を構成している高屈折率層(例えば $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 層)24と連続する層4と、が交互に積層されて構成されている。

30

【0028】

第2領域62は、積層体2を構成する第2ミラー層40の側方に設けられている。第2領域62は、第2ミラー層40と連続して設けられた、複数の酸化層16を含む。具体的には、第2領域62は、第2ミラー層40を構成している低屈折率層(例えば $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層)46と連続する層が酸化された酸化層16と、第2ミラー層40を構成している高屈折率層(例えば $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 層)44と連続する層14と、が交互に積層されて構成されている。平面視において(第1ミラー層20と活性層30との積層方向から見て)、第1領域60と第2領域62とにより、酸化領域8が構成されている。

40

【0029】

第1ミラー層20、活性層30、第2ミラー層40、電流狭窄層42、コンタクト層50、第1領域60、および第2領域62は、積層体2を構成している。図1および図2に示す例では、積層体2は、樹脂層70によって囲まれている。

【0030】

図3に示す例では、平面視において、Y軸方向における積層体2の長さは、X軸方向における積層体2の長さよりも長い。すなわち、積層体2の長手方向は、Y軸方向である。平面視において、積層体2は、例えば、積層体2の中心を通りX軸に平行な仮想直線に関して、対称である。また、平面視において、積層体2は、例えば、積層体2の中心を通り

50

Y 軸に平行な仮想直線に関して、対称である。

【0031】

積層体 2 は、図 3 に示すように平面視において、第 1 歪付与部（第 1 部分）2 a と、第 2 歪付与部（第 2 部分）2 b と、共振部（第 3 部分）2 c と、を含む。

【0032】

第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b は、平面視において、共振部 2 c を挟んで Y 軸方向に対向している。第 1 歪付与部 2 a は、平面視において、共振部 2 c から + Y 軸方向に突出している。第 2 歪付与部 2 b は、平面視において、共振部 2 c から - Y 軸方向に突出している。第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b は、共振部 2 c と一体に設けられている。

10

【0033】

第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b は、活性層 3 0 に歪みを付与して、活性層 3 0 にて発生する光を偏光させる。ここで、光を偏光させるとは、光の電場の振動方向を一定にすることをいう。第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b を構成する半導体層（第 1 ミラー層 2 0、活性層 3 0、第 2 ミラー層 4 0、電流狭窄層 4 2、コンタクト層 5 0、第 1 領域 6 0、および第 2 領域 6 2）は、活性層 3 0 に付与する歪みを発生させる発生源となる。第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b は、複数の酸化層 6 を有する第 1 領域 6 0 と、複数の酸化層 1 6 を有する第 2 領域 6 2 と、を有しているため、活性層 3 0 に大きな歪みを付与することができる。

【0034】

共振部 2 c は、第 1 歪付与部 2 a と第 2 歪付与部 2 b との間に設けられている。X 軸方向における共振部 2 c の長さは、X 軸方向における第 1 歪付与部 2 a の長さまたは X 軸方向における第 2 歪付与部 2 b の長さよりも大きい。共振部 2 c の平面形状（第 1 ミラー層 2 0 と活性層 3 0 との積層方向から見た形状）は、例えば、円である。

20

【0035】

共振部 2 c は、活性層 3 0 で発生した光を共振させる。すなわち、共振部 2 c では、垂直共振器が形成される。

【0036】

樹脂層 7 0 は、積層体 2 の少なくとも側面に設けられている。図 1 に示す例では、樹脂層 7 0 は、第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b を覆っている。すなわち、樹脂層 7 0 は、第 1 歪付与部 2 a の側面、第 1 歪付与部 2 a の上面、第 2 歪付与部 2 b の側面、および第 2 歪付与部 2 b の上面に設けられている。樹脂層 7 0 は、第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b を完全に覆っていてもよいし、第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b の一部を覆っていてもよい。樹脂層 7 0 の材質は、例えば、ポリイミドである。なお、本実施形態では、各歪付与部 2 a、2 b に歪みを付与するために樹脂層 7 0 としているが、樹脂層 7 0 に対応する構成は少なくとも絶縁の機能を有すればよいため、絶縁材料であれば樹脂でなくてもよい。

30

【0037】

図 3 に示す例では、平面視において、Y 軸方向における樹脂層 7 0 の長さは、X 軸方向における樹脂層 7 0 の長さよりも大きい。すなわち、樹脂層 7 0 の長手方向は、Y 軸方向である。樹脂層 7 0 の長手方向と積層体 2 の長手方向とは、一致している。

40

【0038】

第 1 電極 8 0 は、第 1 ミラー層 2 0 上に設けられている。第 1 電極 8 0 は、第 1 ミラー層 2 0 とオーミックコンタクトしている。第 1 電極 8 0 は、第 1 ミラー層 2 0 と電氣的に接続されている。第 1 電極 8 0 としては、例えば、第 1 ミラー層 2 0 側から、Cr 層、AuGe 層、Ni 層、Au 層の順序で積層したものをを用いる。第 1 電極 8 0 は、活性層 3 0 に電流を注入するための一方の電極である。なお、図示はしないが、第 1 電極 8 0 は、基板 1 0 の下面に設けられていてもよい。

【0039】

第 2 電極 8 2 は、コンタクト層 5 0 上（積層体 2 上）に設けられている。第 2 電極 8 2

50

は、コンタクト層 50 とオーミックコンタクトしている。図示の例では、第 2 電極 82 は、さらに樹脂層 70 上に形成されている。第 2 電極 82 は、コンタクト層 50 を介して、第 2 ミラー層 40 と電氣的に接続されている。第 2 電極 82 としては、例えば、コンタクト層 50 側から、Cr 層、Pt 層、Ti 層、Pt 層、Au 層の順序で積層したものをを用いる。第 2 電極 82 は、活性層 30 に電流を注入するための他方の電極である。

【0040】

第 2 電極 82 は、パッド 84 と電氣的に接続されている。図示の例では、第 2 電極 82 は、引き出し配線 86 を介して、パッド 84 と電氣的に接続されている。パッド 84 は、樹脂層 70 上に設けられている。パッド 84 および引き出し配線 86 の材質は、例えば、第 2 電極 82 の材質と同じである。

10

【0041】

ここで、電流狭窄層 42 についてより詳細に説明する。

【0042】

電流狭窄層 42 は、積層体 2 の側面から半導体層（後述する被酸化層 42a、図 8 および図 9 参照）を酸化させることにより形成される。電流狭窄層 42 に形成される開口部 43 は、例えば、被酸化層 42a の一部が酸化されずに残った部分である。

【0043】

電流狭窄層 42 の開口部 43 は、図 3 に示すように平面視において、長手方向を持つ形状を有している。図 3 に示す例では、電流狭窄層 42 の開口部 43 は、平面視において、Y 軸方向の長さが X 軸方向の長さよりも大きい。すなわち、電流狭窄層 42 の開口部 43 は、Y 軸方向に長手方向を持つ形状を有している。

20

【0044】

電流狭窄層 42 の開口部 43 の平面形状は、例えば、菱形である。ここで、菱形とは、4 辺の長さが互いに相等しい四辺形である数学上定義される菱形（図 3 参照）である場合と、当該数学上定義される菱形の角を丸くした形状や、当該数学上定義される菱形の角を丸くしかつ辺に曲率を持たせた形状（図 5 参照）である場合と、を含む。開口部 43 の平面形状が菱形の場合、開口部 43 の長手方向は、菱形の直交する 2 つの対角線のうち、長い方の対角線と平行（同じ方向）である。

【0045】

電流狭窄層 42 の開口部 43 が、平面視において、長手方向を持つ形状を有することにより、電流狭窄層 42 は、活性層 30 に異方的な歪み（応力）を付与する。例えば、電流狭窄層 42 が活性層 30 に付与する歪み（応力）は、開口部 43 の長手方向（Y 軸方向）における歪みの大きさと、開口部 43 の長手方向と直交する方向（X 軸方向）における歪みの大きさと、が異なる。

30

【0046】

図 3 に示す例では、基板 10 として、例えば、主面が (001) 面である (001) GaAs 基板を用いた場合、X 軸方向は、[1 - 1 0] 方向であり、Y 軸方向は、[1 1 0] 方向である。第 1 歪付与部 2a が延在する方向は、[1 1 0] 方向であり、第 2 歪付与部 2b が延在する方向は、[- 1 - 1 0] 方向である。なお、(001) GaAs 基板とは、例えば、主面が厳密に (001) 面を有する GaAs 基板だけでなく、主面が (001) 面に対して微小角度（例えば 5 度以内）傾いた GaAs 基板を含む。

40

【0047】

面発光レーザー 100 では、第 1 歪付与部 2a が延在する方向を、[1 1 0] 方向とし、第 2 歪付与部 2b が延在する方向を [- 1 - 1 0] 方向とすることにより、電流狭窄層 42 の開口部 43 の平面形状を、長手方向を持つ形状にすることができる。以下、その理由について説明する。

【0048】

電流狭窄層 42 は、積層体 2 の側面から半導体層（後述する被酸化層 42a）を酸化させることにより形成される。ここで、(001) GaAs 基板では、結晶方位により酸化速度に異方性を持ち、他の方向と比べて < 1 0 0 > 方向の酸化速度が速い。そのため、平

50

面視において、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の形状は、開口部 4 3 の中心から見て、[1 0 0] 方向、[0 1 0] 方向、[- 1 0 0] 方向、[0 - 1 0] 方向における積層体 2 の外縁の形状をトレースする。

【 0 0 4 9 】

面発光レーザー 1 0 0 では、第 1 歪付与部 2 a の延在する方向が [1 1 0] 方向であり、第 2 歪付与部 2 b が延在する方向が [- 1 - 1 0] 方向であるため、開口部 4 3 の中心から見て、[1 0 0] 方向、[0 1 0] 方向、[- 1 0 0] 方向、[0 - 1 0] 方向における積層体 2 の外縁には、共振部 2 c と接続する歪付与部 2 a , 2 b の接続部が含まれる。なお、平面視において、当該接続部の外形（積層体 2 の側面をなす接続部の側面）は、曲率を持っている。これは、積層体 2 をパターンニングする際に、マスクとして用いるレジストを形成した後に、リフロー（熱処理）しているためである。

10

【 0 0 5 0 】

したがって、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状は、曲率を持った外形の前記接続部を含む積層体 2 の外縁の形状をトレースした形状となり、[1 1 0] 方向に長手方向を持つ形状となる。

【 0 0 5 1 】

なお、ここでは、第 1 歪付与部 2 a が延在する方向を [1 1 0] 方向とし、第 2 歪付与部 2 b が延在する方向を [- 1 - 1 0] 方向とした場合について説明したが、歪付与部 2 a , 2 b が延在する方向は < 1 1 0 > 方向であれば、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状を長手方向を持つ形状にすることができる。

20

【 0 0 5 2 】

図 5 ~ 図 7 は、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状の変形例を説明するための図である。図 5 ~ 図 7 は、図 3 に対応している。

【 0 0 5 3 】

電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状は、図 5 に示すように、数学上定義される菱形の角を丸くしかつ辺に曲率を持たせた形状であってもよい。このとき、開口部 4 3 の長手方向は、開口部 4 3 の互いに対向する角（丸くした角）を結ぶ仮想直線 a , b のうち、長い方の仮想直線 a に平行である。

【 0 0 5 4 】

また、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状は、図 6 に示すように、楕円であってもよい。このとき、開口部 4 3 の長手方向は、楕円の長軸に平行である。

30

【 0 0 5 5 】

また、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の平面形状は、図 7 に示すように、長方形（正方形を除く）であってもよい。このとき、開口部 4 3 の長手方向は、長方形の長辺に平行である。

【 0 0 5 6 】

電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の長手方向と、第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b が共振部 2 c から延在する方向とは、平行（同じ方向）である。図示の例では、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の長手方向、および歪付与部 2 a , 2 b が延在する方向は、Y 軸方向である。

40

【 0 0 5 7 】

なお、上記では、AlGaAs 系の面発光レーザーについて説明したが、本発明に係る面発光レーザーは、発振波長に応じて、例えば、GaInP 系、ZnSSe 系、InGaN 系、AlGaN 系、InGaAs 系、GaInNAs 系、GaAsSb 系の半導体材料を用いてもよい。

【 0 0 5 8 】

面発光レーザー 1 0 0 は、例えば、以下の特徴を有する。

【 0 0 5 9 】

面発光レーザー 1 0 0 では、平面視において、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 は、長手方向を持つ形状を有し、電流狭窄層 4 2 の開口部 4 3 の長手方向と、第 1 歪付与部 2 a およ

50

び第2歪付与部2bが共振部2cから延在する方向とは、平行である。電流狭窄層42の開口部43は、長手方向を持つ形状を有するため、活性層30に異方的な歪みを付与することができる。そのため、面発光レーザー100では、歪付与部2a, 2bおよび電流狭窄層42の双方によって、活性層30に応力を付与して、レーザー光の偏光方向を安定させることができる。したがって、例えば、歪付与部2a, 2bのみで活性層30に応力を付与した場合と比べて、レーザー光の偏光方向を、より安定させることができる。

【0060】

面発光レーザー100では、このように、レーザー光の偏光方向を安定させることができるため、例えば、面発光レーザー100を原子発振器の光源として用いた場合に、 $\lambda/4$ 板を介して、ガスセルに円偏光の光を安定して照射することができる。その結果、原子発振器の周波数安定度を高めることができる。例えば、面発光レーザーから射出されるレーザー光の偏光方向が不安定な場合、 $\lambda/4$ 板を介して得られる光が楕円偏光となる場合や、円偏光の回転方向が変動してしまう場合がある。

10

【0061】

このように、面発光レーザー100では、レーザー光の偏光方向を安定させることができるため、 $\lambda/4$ 板を介して、ガスセルに円偏光の光を安定して照射することができ、原子発振器の周波数安定性を高めることができる。

【0062】

面発光レーザー100では、電流狭窄層42の開口部43の形状は、菱形である。そのため、面発光レーザー100では、対称性の良好なレーザー光を射出することができる。

20

【0063】

2. 面発光レーザーの製造方法

次に、本実施形態に係る面発光レーザーの製造方法について、図面を参照しながら説明する。図8～図11は、本実施形態に係る面発光レーザー100の製造工程を模式的に示す断面図であって、図2に対応している。

【0064】

図8に示すように、基板10上に、第1ミラー層20、活性層30、酸化されて電流狭窄層42となる被酸化層42a、第2ミラー層40、およびコンタクト層50を、この順でエピタキシャル成長させる。エピタキシャル成長させる方法としては、例えば、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) 法、MBE (Molecular Beam Epitaxy) 法が挙げられる。

30

【0065】

図9に示すように、コンタクト層50、第2ミラー層40、被酸化層42a、活性層30、および第1ミラー層20をパターンニングして、積層体2を形成する。パターンニングは、例えば、フォトリソグラフィーおよびエッチングによって行われる。なお、積層体2をパターンニングする際にマスクとして用いられるレジストは、コンタクト層50上に形成された後に、所定の温度で熱処理(リフロー)される。このようにリフローされたマスクを用いてパターンニングを行うことで、歪付与部2a, 2bの接続部(共振部2cと接続する部分)の外形が曲率を持った形状となる(図3参照)。

40

【0066】

図10に示すように、被酸化層42aを酸化して、電流狭窄層42を形成する。被酸化層42aは、例えば、 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.95$) 層である。例えば、400程度の水蒸気雰囲気中に、積層体2が形成された基板10を投入することにより、 $Al_xGa_{1-x}As$ ($x=0.95$) 層を側面から酸化して、電流狭窄層42を形成する。上述のようにGaAsの結晶方位によって酸化速度が異なることから、電流狭窄層42の開口部43は、平面視において、長手方向を持つ形状(例えば長手方向を持つ菱形)となる(図3参照)。

【0067】

面発光レーザー100の製造方法では、上記の酸化工程において、第1ミラー層20を構成する層を、側面から酸化して第1領域60を形成する。さらに、第2ミラー層40を

50

構成する層を、側面から酸化して第2領域62を形成する。具体的には、400程度の水蒸気雰囲気によって、ミラー層20, 40を構成する $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 層のヒ素が酸素に置き換わり、領域60, 62が形成される。領域60, 62は、例えば400程度の高温から室温に戻すときに収縮し、第2領域62の上面63は、基板10側に傾斜する(図4参照)。第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2bは、領域60, 62の収縮に起因する歪みを(応力を)活性層30に付与することができる。

【0068】

図11に示すように、積層体2を取り囲むように樹脂層70を形成する。樹脂層70は、例えば、スピンコート法等を用いて第1ミラー層20の上面および積層体2の全面にポリイミド樹脂等からなる層を形成し、該層をパターンングすることにより形成される。パターンングは、例えば、フォトリソグラフィおよびエッチングによって行われる。次に、樹脂層70を加熱処理(キュア)することにより硬化させる。本加熱処理によって、樹脂層70は、収縮する。さらに、樹脂層70は、加熱処理から常温に戻す際において収縮する。

10

【0069】

図2に示すように、コンタクト層50上および樹脂層70上に第2電極82を形成し、第1ミラー層20上に第1電極80を形成する。電極80, 82は、例えば、真空蒸着法およびリフトオフ法の組合せ等により形成される。なお、電極80, 82を形成する順序は、特に限定されない。また、第2電極82を形成する工程で、パッド84および引き出し配線86(図1参照)を形成してもよい。

20

【0070】

以上の工程により、面発光レーザー100を製造することができる。

【0071】

3. 原子発振器

次に、本実施形態に係る原子発振器について、図面を参照しながら説明する。図12は、本実施形態に係る原子発振器1000を示す機能ブロック図である。

【0072】

原子発振器1000は、図12に示すように、光学モジュール1100と、中心波長制御部1200と、高周波制御部1300と、を含んで構成されている。

【0073】

光学モジュール1100は、本発明に係る面発光レーザー(図示の例では、面発光レーザー100)と、ガスセル1110と、光検出部1120と、を有する。

30

【0074】

図13は、面発光レーザー100が射出する光の周波数スペクトラムを示す図である。図14は、アルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波W1および第2側帯波W2の関係を示す図である。面発光レーザー100から射出される光は、図13に示す、中心周波数 f_0 ($=c/\lambda_0$: c は光の速さ、 λ_0 はレーザー光の中心波長)を有する基本波Fと、中心周波数 f_0 に対して上側サイドバンドに周波数 f_1 を有する第1側帯波W1と、中心周波数 f_0 に対して下側サイドバンドに周波数 f_2 を有する第2側帯波W2と、を含む。第1側帯波W1の周波数 f_1 は、 $f_1 = f_0 + f_m$ であり、第2側帯波W2の周波数 f_2 は、 $f_2 = f_0 - f_m$ である。

40

【0075】

図14に示すように、第1側帯波W1の周波数 f_1 と第2側帯波W2の周波数 f_2 との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位GL1と基底準位GL2とのエネルギー差 E_{12} に相当する周波数と一致している。したがって、アルカリ金属原子は、周波数 f_1 を有する第1側帯波W1と、周波数 f_2 を有する第2側帯波W2と、によってEIT現象を起こす。

【0076】

ガスセル1110は、容器中に気体状のアルカリ金属原子(ナトリウム原子、ルビジウム原子、セシウム原子等)が封入されたものである。このガスセル1110に対して、ア

50

ルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数(波長)を有する2つの光波が照射されると、アルカリ金属原子がEIT現象を起こす。例えば、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、D1線における基底準位GL1と基底準位GL2のエネルギー差に相当する周波数が $9.19263 \cdots \text{GHz}$ なので、周波数差が $9.19263 \cdots \text{GHz}$ の2つの光波が照射されるとEIT現象を起こす。

【0077】

光検出部1120は、ガスセル1110に封入されたアルカリ金属原子を透過した光の強度を検出する。光検出部1120は、アルカリ金属原子を透過した光の量に応じた検出信号を出力する。光検出部1120としては、例えば、フォトダイオードを用いる。

【0078】

中心波長制御部1200は、光検出部1120が出力する検出信号に応じた大きさの駆動電流を発生させて面発光レーザー100に供給し、面発光レーザー100が射出する光の中心波長 λ_0 を制御する。面発光レーザー100、ガスセル1110、光検出部1120、中心波長制御部1200を通るフィードバックループにより、面発光レーザー100が射出するレーザー光の中心波長 λ_0 が微調整されて安定する。

【0079】

高周波制御部1300は、光検出部1120が出力する検出結果に基づいて、第1側帯波W1および第2側帯波W2の波長(周波数)差が、ガスセル1110に封入されたアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数に等しくなるように制御する。高周波制御部1300は、光検出部1120が出力する検出結果に応じた変調周波数 f_m (図13参照)を有する変調信号を発生させる。

【0080】

面発光レーザー100、ガスセル1110、光検出部1120、高周波制御部1300を通るフィードバックループにより、第1側帯波W1と第2側帯波W2との周波数差がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と極めて正確に一致するようにフィードバック制御がかかる。その結果、変調周波数 f_m は極めて安定した周波数になるので、変調信号を原子発振器1000の出力信号(クロック出力)とすることができる。

【0081】

次に、原子発振器1000の動作について、図12~図14を参照しながら説明する。

【0082】

面発光レーザー100から射出されたレーザー光は、ガスセル1110に入射する。面発光レーザー100から射出される光は、アルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数(波長)を有する2つの光波(第1側帯波W1、第2側帯波W2)を含んでおり、アルカリ金属原子がEIT現象を起こす。ガスセル1110を透過した光の強度は光検出部1120で検出される。

【0083】

中心波長制御部1200および高周波制御部1300は、第1側帯波W1と第2側帯波W2との周波数差がアルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数と極めて正確に一致するように、フィードバック制御を行う。原子発振器1000では、EIT現象を利用し、第1側帯波W1と第2側帯波W2との周波数差 $f_1 - f_2$ が基底準位GL1と基底準位GL2とのエネルギー差 E_{12} に相当する周波数からずれた時の光吸収挙動の急峻な変化を検出し制御することで、高精度な発振器をつくることができる。

【0084】

本発明は、実施の形態で説明した構成と実質的に同一の構成(例えば、機能、方法及び結果が同一の構成、あるいは目的及び効果が同一の構成)を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成の本質的でない部分を置き換えた構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成と同一の作用効果を奏する構成又は同一の目的を達成することができる構成を含む。また、本発明は、実施の形態で説明した構成に公知技術を付加した構成を含む。

10

20

30

40

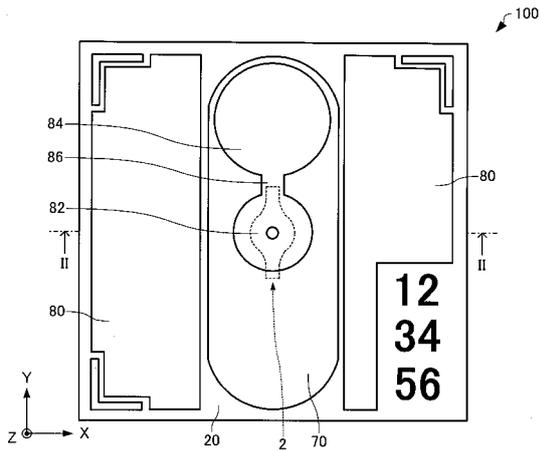
50

【符号の説明】

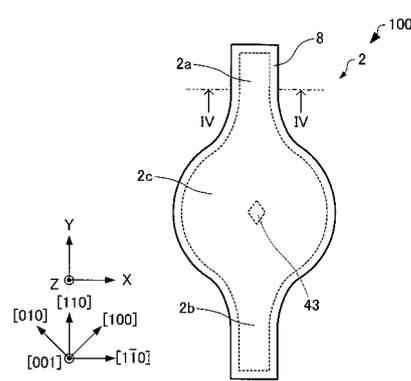
【0085】

2 ... 積層体、2 a ... 第1歪付与部、2 b ... 第2歪付与部、2 c ... 共振部、4 ... 層、6 ... 酸化層、8 ... 酸化領域、10 ... 基板、14 ... 層、16 ... 酸化層、20 ... 第1ミラー層、24 ... 高屈折率層、26 ... 低屈折率層、30 ... 活性層、40 ... 第2ミラー層、42 ... 電流狭窄層、42 a ... 被酸化層、43 ... 開口部、44 ... 高屈折率層、46 ... 低屈折率層、50 ... コンタクト層、60 ... 第1領域、62 ... 第2領域、63 ... 上面、70 ... 樹脂層、80 ... 第1電極、82 ... 第2電極、84 ... パッド、86 ... 引き出し配線、100 ... 面発光レーザー、1000 ... 原子発振器、1100 ... 光学モジュール、1110 ... ガスセル、1120 ... 光検出部、1200 ... 中心波長制御部、1300 ... 高周波制御部

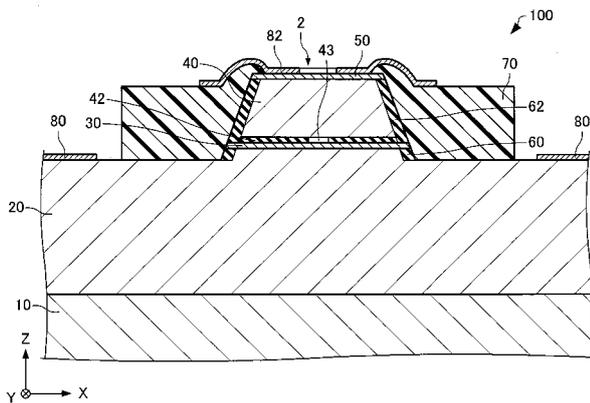
【図1】



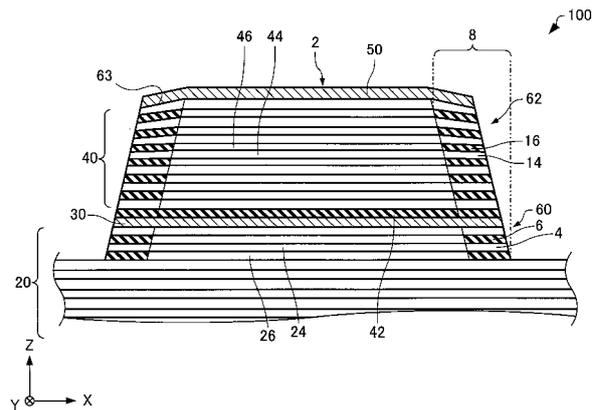
【図3】



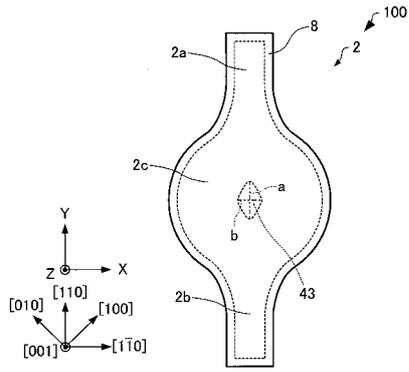
【図2】



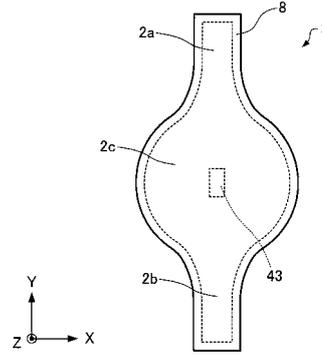
【図4】



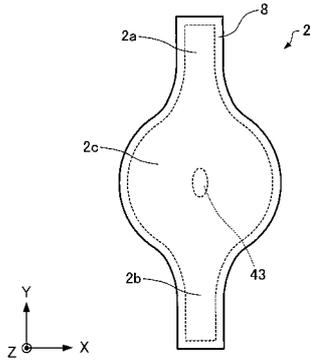
【図5】



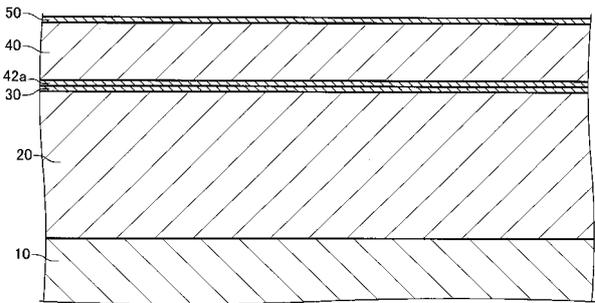
【図7】



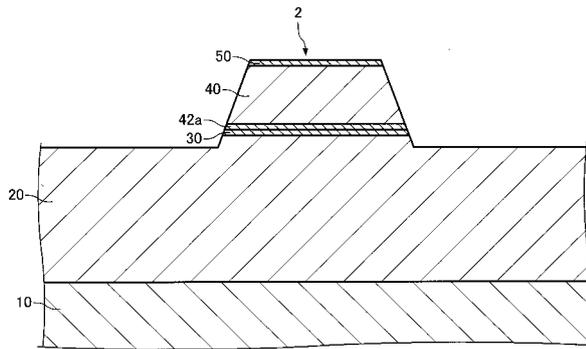
【図6】



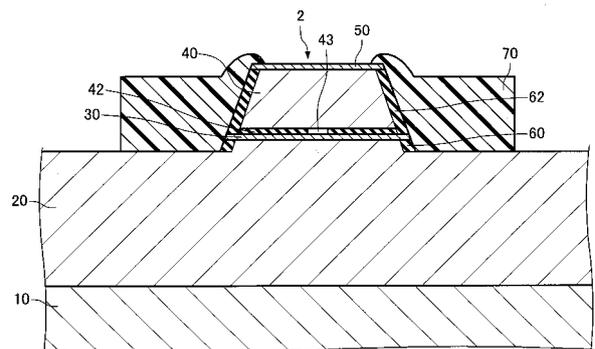
【図8】



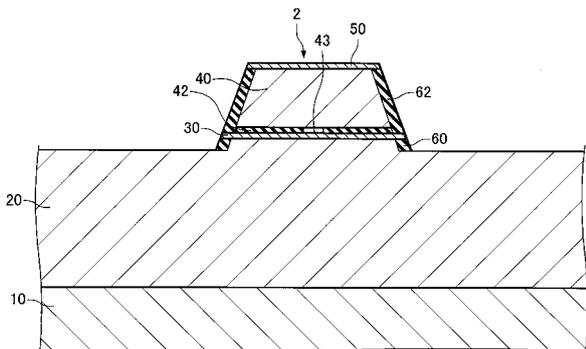
【図9】



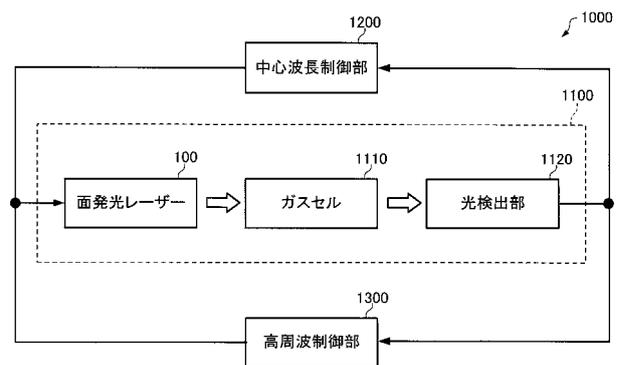
【図11】



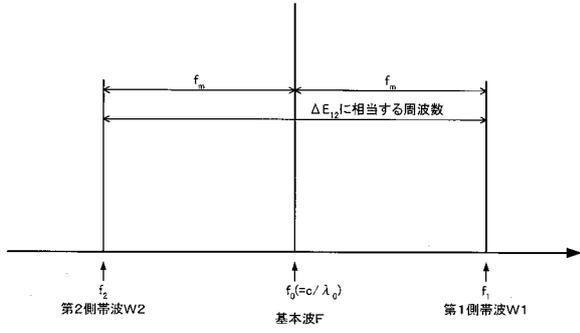
【図10】



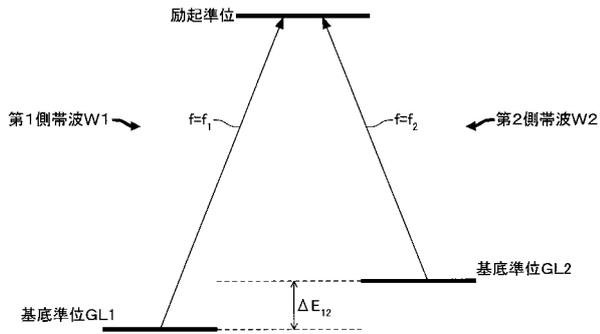
【図12】



【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



フロントページの続き

Fターム(参考) 5F173 AC03 AC13 AC35 AC42 AC48 AC52 AF92 AF96 AF99 AH03
AK21 AP05 AP67 AR43 SA18 SC10 SE01 SF08 SF10 SF19
SF33 SF34 SF43 SF72
5J106 CC07 CC08 CC09 CC10 KK12