

(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2015-119137
(P2015-119137A)

(43) 公開日 平成27年6月25日(2015.6.25)

(51) Int.Cl.
H01S 5/187 (2006.01)

F I
H01S 5/187

テーマコード(参考)
5F173

審査請求 未請求 請求項の数 21 O L (全 20 頁)

(21) 出願番号 特願2013-263458 (P2013-263458)
(22) 出願日 平成25年12月20日(2013.12.20)

(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
(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 金子 剛
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 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

最終頁に続く

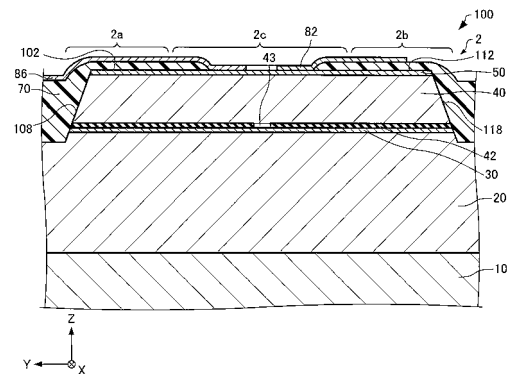
(54) 【発明の名称】 面発光レーザーおよび原子発振器

(57) 【要約】

【課題】 偏光方向の安定化を図ることができる面発光レーザーを提供する。

【解決手段】 本発明に係る面発光レーザー100は、基板10と、基板10上方に設けられた積層体2と、を含み、積層体2は、基板10上方に設けられた第1ミラー層20と、第1ミラー層20上方に設けられた活性層30と、活性層30上方に設けられた第2ミラー層40と、を含み、平面視において、積層体2は、第1幅を有する第1部分2aと、第2幅を有する第2部分2bと、第1部分2aと第2部分2bとの間に設けられ、第1幅または第2幅よりも広い第3幅を有する第3部分2cと、を有し、第1部分2aの少なくとも一部を覆う樹脂層70が設けられている。

【選択図】 図6



【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 ミラー層と、前記第 1 ミラー層上方に設けられた活性層と、前記活性層上方に設けられた第 2 ミラー層と、を含み、

平面視において、前記積層体は、第 1 幅を有する第 1 部分と、第 2 幅を有する第 2 部分と、前記第 1 部分と前記第 2 部分との間に設けられ、前記第 1 幅または前記第 2 幅よりも広い第 3 幅を有する第 3 部分と、を有し、

前記第 1 部分の少なくとも一部を覆う樹脂層が設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

10

【請求項 2】

請求項 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の少なくとも前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第 1 部分の少なくとも前記一部の第 1 側面と、前記上面と連続し、前記第 1 部分の少なくとも前記一部の第 2 側面と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 3】

請求項 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の前記一部を覆うことを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 4】

20

請求項 3 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第 1 部分の前記一部の第 1 側面と、前記上面と連続し、前記第 1 部分の前記一部の第 2 側面と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 5】

請求項 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の全体を覆うことを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 6】

請求項 5 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の上面全体と、前記第 1 部分の側面全体と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

30

【請求項 7】

請求項 1 において

前記樹脂層は、前記積層体の側面全体と、前記第 1 部分の上面の少なくとも一部と、前記第 2 部分の上面の少なくとも一部と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 8】

請求項 7 において、

前記第 1 部分の前記上面の前記一部は、前記第 1 部分の端に位置し、

前記第 2 部分の前記上面の前記一部は、前記第 2 部分の端に位置することを特徴とする面発光レーザー。

40

【請求項 9】

請求項 7 において、

前記樹脂層は、前記第 1 部分の上面全体と、前記第 2 部分の上面全体と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 10】

請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 項において、

前記樹脂層は、前記第 3 部分の上面全体に設けられておらず、

前記第 3 部分の上面全体に、開口部を有する電極が設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

50

【請求項 1 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 ミラー層と、前記第 1 ミラー層上方に設けられた活性層と、前記活性層上方に設けられた第 2 ミラー層と、を含み、

平面視において、前記積層体は、第 1 幅を有する第 1 歪付与部と、第 2 幅を有する第 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、前記第 1 幅または前記第 2 幅よりも広い第 3 幅を有し前記活性層で発生した光を共振させる共振部と、を有し、

前記第 1 歪付与部の少なくとも一部を覆う樹脂層が設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

10

【請求項 1 2】

請求項 1 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の少なくとも前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第 1 歪付与部の少なくとも前記一部の第 1 側面と、前記上面と連続し、前記第 1 歪付与部の少なくとも前記一部の第 2 側面と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 1 3】

請求項 1 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の前記一部を覆うことを特徴とする面発光レーザー。

20

【請求項 1 4】

請求項 1 3 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第 1 歪付与部の前記一部の第 1 側面と、前記上面と連続し、前記第 1 歪付与部の前記一部の第 2 側面と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 1 5】

請求項 1 1 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の全体を覆うことを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 1 6】

請求項 1 5 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の上面全体と、前記第 1 歪付与部の側面全体と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

30

【請求項 1 7】

請求項 1 1 において

前記樹脂層は、前記積層体の側面全体と、前記第 1 歪付与部の上面の少なくとも一部と、前記第 2 歪付与部の上面の少なくとも一部と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 1 8】

請求項 1 7 において、

前記第 1 歪付与部の前記上面の前記一部は、前記第 1 歪付与部の端に位置し、前記第 2 歪付与部の前記上面の前記一部は、前記第 2 歪付与部の端に位置することを特徴とする面発光レーザー。

40

【請求項 1 9】

請求項 1 7 において、

前記樹脂層は、前記第 1 歪付与部の上面全体と、前記第 2 歪付与部の上面全体と、に設けられていることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 2 0】

請求項 1 1 ないし 1 9 のいずれか 1 項において、

前記樹脂層は、前記共振部の上面全体に設けられておらず、

前記共振部の上面全体に、開口部を有する電極が設けられていることを特徴とする面発

50

光レーザー。

【請求項 21】

請求項 1 ないし 20 のいずれか 1 項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、垂直共振器の外側面に接触して形成され、異方的な応力を有する絶縁層を含み、この異方的な応力によりレーザー光の偏光方向の制御を行う面発光レーザーが記載されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

20

【0004】

【特許文献 1】特開 2001-189525 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0005】

しかしながら、特許文献 1 に記載の面発光レーザーでは、絶縁層は、垂直共振器の側面のみ設けられている。そのため、特許文献 1 に記載の面発光レーザーでは、垂直共振器に加えらるべき応力が十分でなく、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。

【0006】

30

本発明のいくつかの態様に係る目的の 1 つは、偏光方向の安定化を図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】

【0007】

本発明に係る面発光レーザーは、
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 ミラー層と、前記第 1 ミラー層上方に設けられた活性層と、前記活性層上方に設けられた第 2 ミラー層と、を含み、
平面視において、前記積層体は、第 1 幅を有する第 1 部分と、第 2 幅を有する第 2 部分と、前記第 1 部分と前記第 2 部分との間に設けられ、前記第 1 幅または前記第 2 幅よりも広い第 3 幅を有する第 3 部分と、を有し、
前記第 1 部分の少なくとも一部を覆う樹脂層が設けられている。

40

【0008】

このような面発光レーザーでは、樹脂層の収縮によって、第 1 部分により第 3 部分に付与する応力を大きくすることができ、第 3 部分の活性層に大きな歪みを生じさせることができる。そのため、このような面発光レーザーでは、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる。

【0009】

50

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。

【0010】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の少なくとも前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第1部分の少なくとも前記一部の第1側面と、前記上面と連続し、前記第1部分の少なくとも前記一部の第2側面と、に設けられていてもよい。

【0011】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0012】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の前記一部を覆ってもよい。

【0013】

このような面発光レーザーでは、活性層に電流を注入するための電極に接続された引き出し配線は、第1部分と接触することができる。したがって、このような面発光レーザーでは、電極と引き出し配線とによって構成される導電部と、積層体と、の接触面積を大きくすることができる。これにより、導電部と積層体との接触抵抗を小さくすることができる。

【0014】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第1部分の前記一部の第1側面と、前記上面と連続し、前記第1部分の前記一部の第2側面と、に設けられていてもよい。

【0015】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0016】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の全体を覆ってもよい。

【0017】

このような面発光レーザーでは、第1部分により第3部分に付与する応力を、より大きくすることができる。

【0018】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の上面全体と、前記第1部分の側面全体と、に設けられていてもよい。

【0019】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0020】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記積層体の側面全体と、前記第1部分の上面の少なくとも一部と、前記第2部分の上面の少なくとも一部と、に設けられていてもよい。

【0021】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0022】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記第1部分の前記上面の前記一部は、前記第1部分の端に位置し、

前記第2部分の前記上面の前記一部は、前記第2部分の端に位置してもよい。

【0023】

10

20

30

40

50

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0024】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1部分の上面全体と、前記第2部分の上面全体と、に設けられていてもよい。

【0025】

このような面発光レーザーでは、第1部分および第2部分により第3部分に付与する応力を、より大きくすることができる。

【0026】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第3部分の上面全体に設けられておらず、

前記第3部分の上面全体に、開口部を有する電極が設けられていてもよい。

【0027】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0028】

本発明に係る面発光レーザーは、

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ミラー層と、前記第1ミラー層上方に設けられた活性層と、前記活性層上方に設けられた第2ミラー層と、を含み、

平面視において、前記積層体は、第1幅を有する第1歪付与部と、第2幅を有する第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、前記第1幅または前記第2幅よりも広い第3幅を有し前記活性層で発生した光を共振させる共振部と、を有し、

前記第1歪付与部の少なくとも一部を覆う樹脂層が設けられていてもよい。

【0029】

このような面発光レーザーでは、樹脂層の収縮によって、第1歪付与部により共振部に付与する応力を大きくすることができ、共振部の活性層に大きな歪みを生じさせることができる。そのため、このような面発光レーザーでは、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる。

【0030】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1歪付与部の少なくとも前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第1歪付与部の少なくとも前記一部の第1側面と、前記上面と連続し、前記第1歪付与部の少なくとも前記一部の第2側面と、に設けられていてもよい。

【0031】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0032】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1歪付与部の前記一部を覆ってもよい。

【0033】

このような面発光レーザーでは、活性層に電流を注入するための電極に接続された引き出し配線は、第1歪付与部と接触することができる。したがって、このような面発光レーザーでは、電極と引き出し配線とによって構成される導電部と、積層体と、の接触面積を大きくすることができる。これにより、導電部と積層体との接触抵抗を小さくすることができる。

【0034】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記樹脂層は、前記第1歪付与部の前記一部の上面と、前記上面と連続し、前記第1歪付与部の前記一部の第1側面と、前記上面と連続し、前記第1歪付与部の前記一部の第2

10

20

30

40

50

側面と、に設けられていてもよい。

【0035】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0036】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記樹脂層は、前記第1歪付与部の全体を覆ってもよい。

【0037】

このような面発光レーザーでは、第1歪付与部により共振部に付与する応力を、より大きくすることができる。

【0038】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記樹脂層は、前記第1歪付与部の上面全体と、前記第1歪付与部の側面全体と、に設けられていてもよい。

10

【0039】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0040】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記樹脂層は、前記積層体の側面全体と、前記第1歪付与部の上面の少なくとも一部と、前記第2歪付与部の上面の少なくとも一部と、に設けられていてもよい。

【0041】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

20

【0042】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記第1歪付与部の前記上面の前記一部は、前記第1歪付与部の端に位置し、
前記第2歪付与部の前記上面の前記一部は、前記第2歪付与部の端に位置してもよい。

【0043】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0044】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記樹脂層は、前記第1歪付与部の上面全体と、前記第2歪付与部の上面全体と、に設けられていてもよい。

30

【0045】

このような面発光レーザーでは、第1歪付与部および第2歪付与部により共振部に付与する応力を、より大きくすることができる。

【0046】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記樹脂層は、前記共振部の上面全体に設けられておらず、
前記共振部の上面全体に、開口部を有する電極が設けられていてもよい。

【0047】

このような面発光レーザーでは、偏光方向の安定化を図ることができる。

40

【0048】

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。

【0049】

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。

【図面の簡単な説明】

【0050】

【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。

50

- 【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】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 6】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 7】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 8】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 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】本実施形態に係る面発光レーザーの製造工程を模式的に示す断面図。
 【図 13】本実施形態の変形例に係る面発光レーザーを模式的に示す平面図。
 【図 14】本実施形態の変形例に係る面発光レーザーを模式的に示す断面図。
 【図 15】本実施形態の変形例に係る面発光レーザーを模式的に示す平面図。
 【図 16】本実施形態に係る原子発振器の機能ブロック図。
 【図 17】共鳴光の周波数スペクトラムを示す図。
 【図 18】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

20

30

40

50

【発明を実施するための形態】

【0051】

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。

【0052】

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 I I - I I 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 I V - I V 線断面図である。

【0053】

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。

【0054】

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 70 と、第 1 電極 80 と、第 2 電極 82 と、を含む。

【0055】

基板 10 は、例えば、第 1 導電型（例えば n 型）の GaAs 基板である。

【0056】

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。

【0057】

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。

【0058】

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、例えば、炭素がドーブされた p 型の $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 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。

10

【0059】

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。

【0060】

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 間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

【0061】

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。

30

【0062】

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 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 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。

【0063】

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 $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 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 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

【0064】

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

50

示す例では、積層体 2 は、樹脂層 70 によって囲まれている。

【0065】

図 3 に示す例では、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）、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 Y 軸に平行な仮想直線に関して、対称である。

【0066】

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。

10

【0067】

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。

【0068】

第 1 歪付与部 2 a および第 2 歪付与部 2 b は、活性層 30 に歪みを付与して、活性層 30 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 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、活性層 30 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 60 と、複数の酸化層 16 を有する第 2 領域 62 と、を有しているため、活性層 30 に大きな歪みを付与することができる。

20

【0069】

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 20 と活性層 30 との積層方向から見た形状）は、例えば、円である。

30

【0070】

共振部 2 c は、活性層 30 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。

【0071】

樹脂層 70 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 70 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 70 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 70 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 70 の材質は、例えば、ポリイミドである。

40

【0072】

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 70 の長さは、X 軸方向における樹脂層 70 の長さよりも大きい。すなわち、樹脂層 70 の長手方向は、Y 軸方向である。樹脂層 70 の長手方向と積層体 2 の長手方向とは、一致している。

【0073】

第 1 電極 80 は、第 1 ミラー層 20 上に設けられている。第 1 電極 80 は、第 1 ミラー層 20 とオーミックコンタクトしている。第 1 電極 80 は、第 1 ミラー層 20 と電氣的に接続されている。第 1 電極 80 としては、例えば、第 1 ミラー層 20 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 80 は、活性層 30

50

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80は、基板10の下面に設けられていてもよい。

【0074】

第2電極82は、コンタクト層50上(積層体2上)に設けられている。第2電極82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。

【0075】

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。

【0076】

ここで、積層体2および樹脂層70について、より詳細に説明する。図5は、面発光レーザー100を模式的に示す平面図であって、図2に示す積層体2近傍の拡大図である。図6は、面発光レーザー100を模式的に示す図5のVI-VI線断面図である。図7は、面発光レーザー100を模式的に示す図5のVII-VII線断面図である。図8は、面発光レーザー100を模式的に示す図5のVIII-VIII線断面図である。

【0077】

なお、便宜上、図5~図8では、積層体2を簡略化して図示している。また、図5~図8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。

【0078】

積層体2は、基板10の上方に設けられている。積層体2は、第1幅(X軸方向の長さ)を有する第1歪付与部2aと、第2幅を有する第2歪付与部2bと、第1幅および第2幅よりも広い第3幅を有する共振部2cと、を有している。図示の例では、第1幅と第2幅は、同じ幅である。

【0079】

なお、第1幅とは、例えば、第1歪付与部2aと第2歪付与部2bとが対向する方向(Y軸方向)に直交する方向(X軸方向)において、第1歪付与部2aの幅のうちの最大をとる幅のことである。第2幅とは、例えば、第1歪付与部2aと第2歪付与部2bとが対向する方向に直交する方向において、第2歪付与部2bの幅のうちの最大をとる幅のことである。第3幅とは、例えば、第1歪付与部2aと第2歪付与部2bとが対向する方向に直交する方向において、共振部2cの幅のうちの最大をとる幅のことである。

【0080】

第1歪付与部2aは、図5~図8に示すように、上面102と、第1側面104と、第2側面106と、第3側面108と、を有している。側面104, 106, 108は、上面102と連続(接続)している。第1側面104は、第1歪付与部2aの-X軸方向側の側面である。第2側面106は、第1歪付与部2aの+X軸方向側の側面である。第3側面108は、第1歪付与部2aの+Y軸方向側の側面である。第3側面108は、第1側面104および第2側面106に接続されている。

【0081】

第2歪付与部2bは、上面112と、第1側面114と、第2側面116と、第3側面118と、を有している。側面114, 116, 118は、上面112と連続(接続)している。第1側面114は、第2歪付与部2bの-X軸方向側の側面である。第2側面116は、第2歪付与部2bの+X軸方向側の側面である。第3側面118は、第2歪付与部2bの-Y軸方向側の側面である。第3側面118は、第1側面114および第2側面116に接続されている。

【0082】

10

20

30

40

50

樹脂層 70 は、第 1 歪付与部 2 a の少なくとも一部を覆っている。すなわち、樹脂層 70 は、第 1 歪付与部 2 a の少なくとも一部の上面 102 と、第 1 歪付与部 2 a の少なくとも一部の第 1 側面 104 と、第 1 歪付与部 2 a の少なくとも一部の第 2 側面 106 と、に設けられている。図示の例では、樹脂層 70 は、第 1 歪付与部 2 a の全体を覆っている。具体的には、樹脂層 70 は、上面 102 全体と、第 1 側面 104 全体と、第 2 側面 106 全体と、第 3 側面 108 全体と、に設けられている。

【0083】

樹脂層 70 は、さらに、第 2 歪付与部 2 b の少なくとも一部を覆っている。すなわち、樹脂層 70 は、第 2 歪付与部 2 b の少なくとも一部の上面 112 と、第 2 歪付与部 2 b の少なくとも一部の第 1 側面 114 と、第 2 歪付与部 2 b の少なくとも一部の第 2 側面 116 と、に設けられている。図示の例では、樹脂層 70 は、第 2 歪付与部 2 b の全体を覆っている。具体的には、樹脂層 70 は、上面 112 全体と、第 1 側面 114 全体と、第 2 側面 116 全体と、第 3 側面 118 全体と、に設けられている。

10

【0084】

図示の例では、樹脂層 70 は、積層体 2 の側面全体と、第 1 歪付与部 2 a の上面 102 の少なくとも一部（具体的には全部）と、第 2 歪付与部 2 b の上面 112 の少なくとも一部（具体的には全部）と、に設けられている。

【0085】

樹脂層 70 は、熱を与えることで硬化する樹脂であり、樹脂層 70 を硬化するための加熱処理（キュア）において収縮する。さらに、樹脂層 70 は、上記加熱処理から常温に戻す際において収縮する。樹脂層 70 の熱膨張係数は、基板 10 の熱膨張係数（基板 10 が GaAs 基板の場合は 6.5 程度）よりも大きい。そのため、樹脂層 70 は、基板 10 よりも収縮しやすい。

20

【0086】

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。

【0087】

面発光レーザー 100 は、例えば、以下の特徴を有する。

30

【0088】

面発光レーザー 100 では、積層体 2 は、第 1 歪付与部 2 a と、第 2 歪付与部 2 b と、共振部 2 c と、を有し、第 1 歪付与部 2 a の少なくとも一部を覆う樹脂層 70 が設けられている。ここで、樹脂層 70 は、熱を与えることで硬化する樹脂であり、樹脂層 70 を硬化するための加熱処理（キュア）において収縮する。さらに、樹脂層 70 は、上記加熱処理から常温に戻す際において収縮する。この樹脂層 70 の収縮によって、面発光レーザー 100 では、第 1 歪付与部 2 a により共振部 2 c に付与する応力を大きくすることができ、共振部 2 c の活性層 30 に大きな歪みを生じさせることができる。そのため、面発光レーザー 100 では、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる。

40

【0089】

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。これにより、EIT 現象の発現確率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。

【0090】

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

50

子発振器の周波数安定性を高めることができる。

【0091】

面発光レーザー100では、樹脂層70は、第1歪付与部2aの全体を覆っている。そのため、面発光レーザー100では、樹脂層70が第1歪付与部2aの一部しか覆っていない場合に比べて、第1歪付与部2aにより共振部2cに付与する応力を大きくすることができる。

【0092】

面発光レーザー100では、樹脂層70は、第1歪付与部2aの上面102全体と、第2歪付与部2bの上面112全体と、に設けられている。そのため、面発光レーザー100では、例えば樹脂層70が上面102, 112の一部しか覆っていない場合に比べて、歪付与部2a, 2bにより共振部2cに付与する応力を大きくすることができる。

10

【0093】

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9～図12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。

【0094】

図9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。

20

【0095】

図10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。

【0096】

図11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。

30

【0097】

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1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。

40

【0098】

図12に示すように、積層体2を取り囲んで、歪付与部2a, 2bを覆うように樹脂層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、該層をパターンニングすることにより形成される。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。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。

【0099】

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、

50

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。

【0100】

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。

【0101】

3. 面発光レーザーの変形例

次に、本実施形態の変形例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13は、本実施形態の変形例に係る面発光レーザー200を模式的に示す平面図であって、図5に対応している。図14は、本実施形態の変形例に係る面発光レーザー200を模式的に示す図13のXIV-XIV線断面図である。以下、面発光レーザー200において、上述した面発光レーザー100の例と異なる点について説明し、同様の点については説明を省略する。

10

【0102】

なお、便宜上、図13および図14では、積層体2を簡略化して図示している。また、図13および図14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。

【0103】

面発光レーザー100では、樹脂層70は、図5および図6に示すように、積層体2の側面全体と、第1歪付与部2aの上面102全体と、第2歪付与部2bの上面112全体と、に設けられていた。

20

【0104】

これに対し、面発光レーザー200では、樹脂層70は、図13および図14に示すように、第1歪付与部2aの一部202を覆っている。すなわち、樹脂層70は、第1歪付与部2aの一部202の上面102と、第1歪付与部2aの一部202の第1側面104と、第1歪付与部2aの一部202の第2側面106と、に設けられている。図示の例では、樹脂層70は、さらに、第1歪付与部2aの一部202の第3側面108に設けられている。第1歪付与部2aの上面102の一部202は、第1歪付与部2aの端(+Y軸方向側の端)E1に位置している。

30

【0105】

面発光レーザー200では、樹脂層70は、第2歪付与部2bの一部204を覆っている。すなわち、樹脂層70は、第2歪付与部2bの一部204の上面112と、第2歪付与部2bの一部204の第1側面114と、第2歪付与部2bの一部204の第2側面116と、に設けられている。図示の例では、樹脂層70は、さらに、第2歪付与部2bの一部204の第3側面118に設けられている。第2歪付与部2bの上面112の一部204は、第2歪付与部2bの端(-Y軸方向側の端)E2に位置している。

【0106】

面発光レーザー200では、樹脂層70は、共振部2cの上面全体に設けられていない。すなわち、共振部2cの上面には、樹脂層70は設けられていない。共振部2cの上面全体には、開口部82aを有する第2電極82が設けられている。第2電極82は、平面視において、積層体2の外縁の内側に設けられている。第2電極82に接続されている引き出し配線86は、第1歪付与部2aのコンタクト層50と接触している。なお、引き出し配線86の下部には樹脂層70が延出して設けられている。引き出し配線86の下部は他の部分との絶縁がなされていればよいため、樹脂層70ではなく他の絶縁層が設けられていてもよい。

40

【0107】

面発光レーザー200では、上記のように、樹脂層70は、第1歪付与部2aの一部202を覆っている。そのため、面発光レーザー200では、引き出し配線86は、第1歪付与部2aのコンタクト層50(一部202以外の第1歪付与部2aのコンタクト層50

50

）と接触することができる。したがって、面発光レーザー 200 では、第 2 電極 82 と引き出し配線 86 とによって構成される導電部が共振部 2c のコンタクト層 50 のみと接触している場合に比べて、該導電部とコンタクト層 50 との接触面積を大きくすることができる。これにより、該導電部とコンタクト層 50 との接触抵抗を小さくすることができる。

【0108】

なお、図 15 に示すように、樹脂層 70 は、第 1 歪付与部 2a の第 3 側面 108、および第 2 歪付与部 2b の第 3 側面 118 に設けられていなくてもよい。すなわち、第 1 歪付与部 2a の一部 202 は、第 1 歪付与部 2a の端 E1 に設けられていなくてもよく、第 2 歪付与部 2b の一部 204 は、第 2 歪付与部 2b の端 E2 に設けられていなくてもよい。このような形態の場合、引き出し配線 86 と第 1 ミラー層 20 との間には、例えば、絶縁層（図示せず）が設けられている。

10

【0109】

4. 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 16 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。

【0110】

原子発振器 1000 は、図 16 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。

【0111】

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。

20

【0112】

図 17 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 18 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 17 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。

30

【0113】

図 18 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。

【0114】

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 $9.19263 \dots \text{GHz}$ なので、周波数差が $9.19263 \dots \text{GHz}$ の 2 つの光波が照射されると EIT 現象を起こす。

40

【0115】

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。

【0116】

50

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。

【0117】

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 17 参照）を有する変調信号を発生させる。

10

【0118】

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。

【0119】

次に、原子発振器 1000 の動作について、図 16 ~ 図 18 を参照しながら説明する。

20

【0120】

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。

【0121】

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。

30

【0122】

上述した実施形態および変形例は一例であって、これらに限定されるわけではない。例えば、各実施形態および各変形例を適宜組み合わせることも可能である。

【0123】

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。

40

【符号の説明】

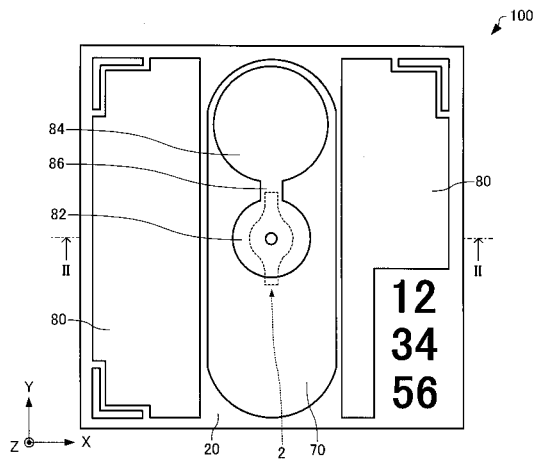
【0124】

2 ... 積層体、2 a ... 第 1 歪付加部、2 b ... 第 2 歪付加部、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

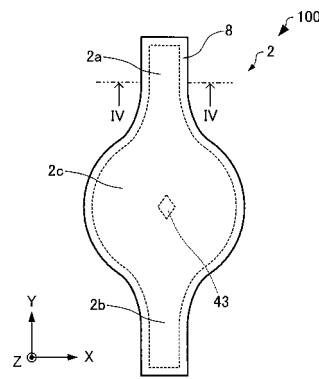
50

電極、82...第2電極、82a...開口部、84...パッド、86...引き出し配線、100...面発光レーザー、102...上面、104...第1側面、106...第2側面、108...第3側面、112...上面、114...第1側面、116...第2側面、118...第3側面、200...面発光レーザー、202, 204...一部、1000...原子発振器、1110...ガスセル、1120...光検出部、1100...光モジュール、1200...中心波長制御部、1300...高周波制御部

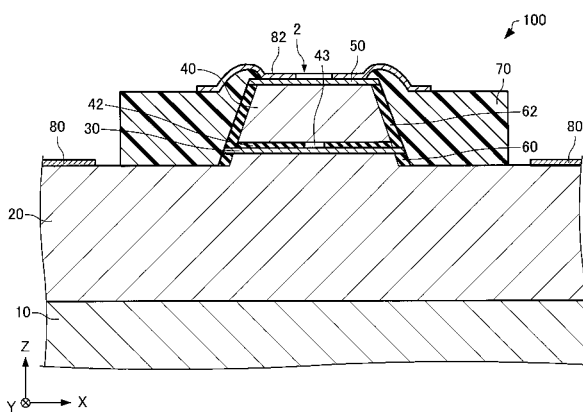
【図1】



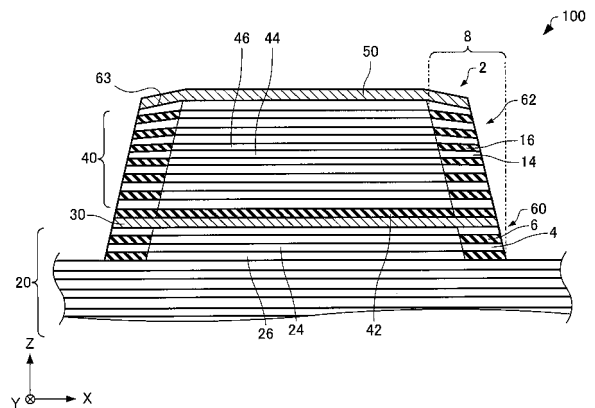
【図3】



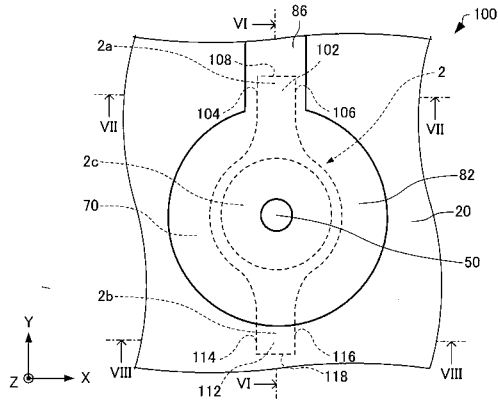
【図2】



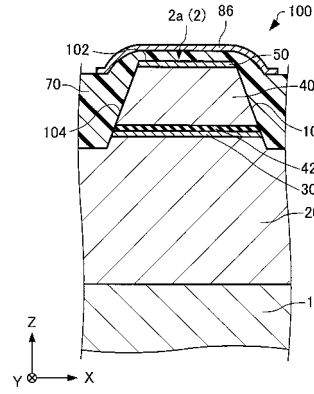
【図4】



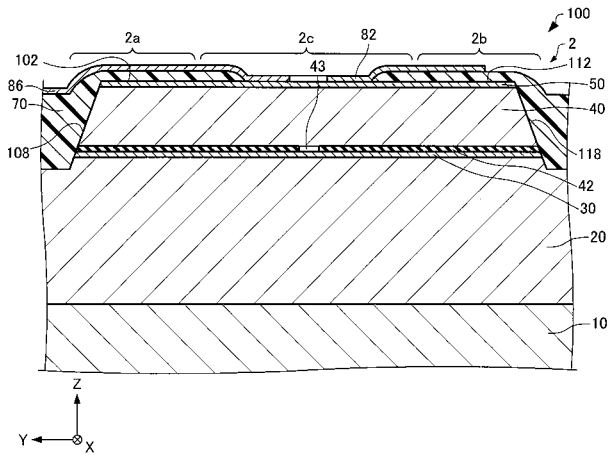
【 図 5 】



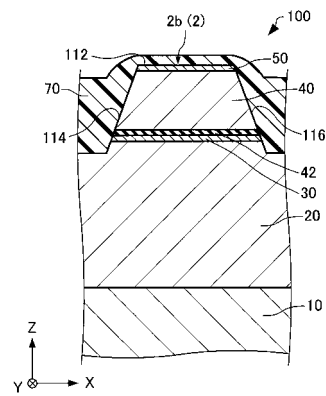
【 図 7 】



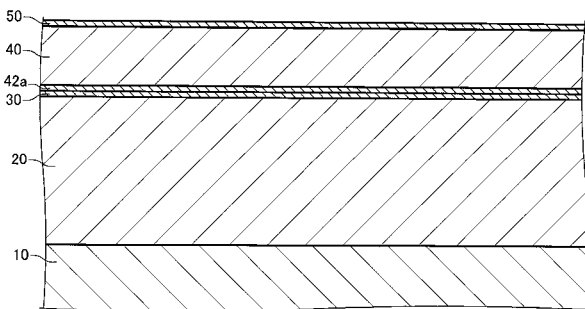
【 図 6 】



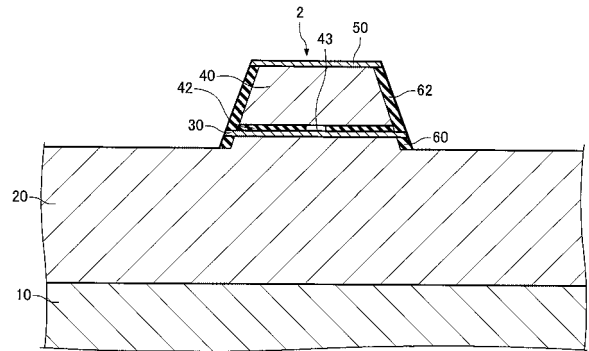
【 図 8 】



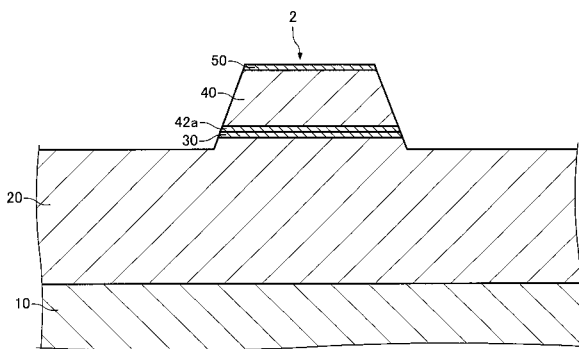
【 図 9 】



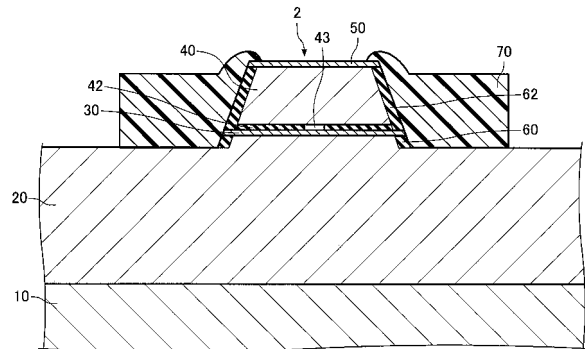
【 図 11 】



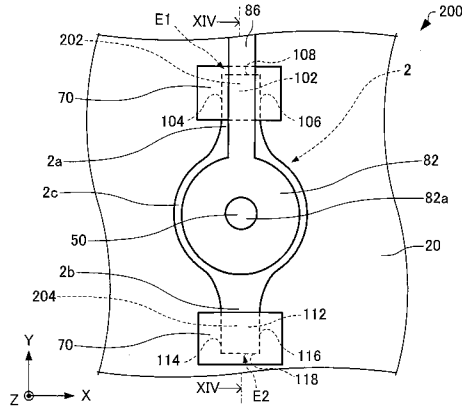
【 図 10 】



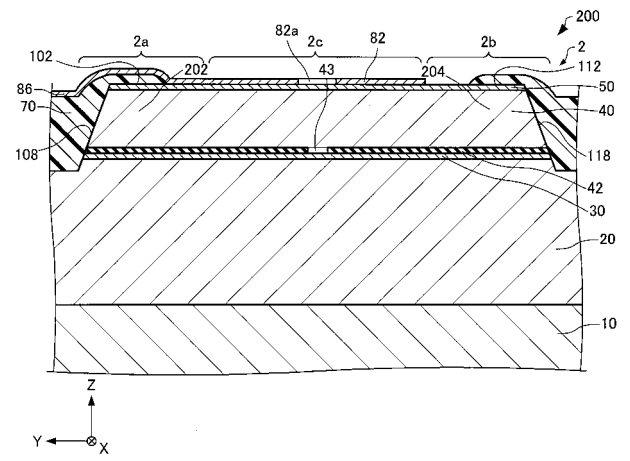
【 図 12 】



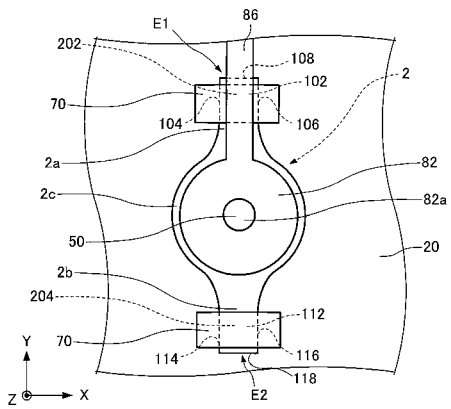
【図13】



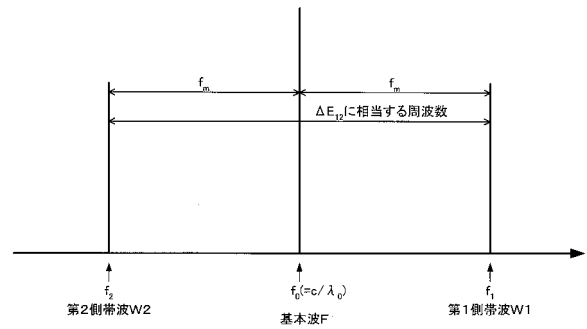
【図14】



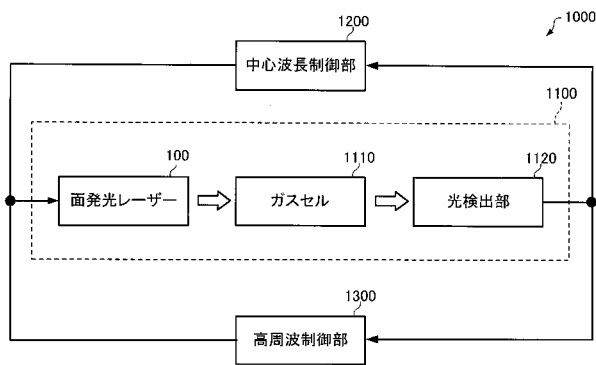
【図15】



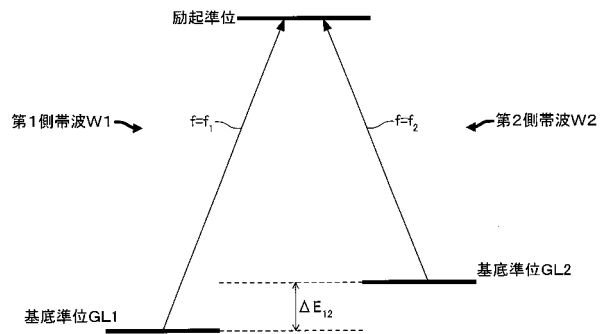
【図17】



【図16】



【図18】



フロントページの続き

(72)発明者 倉知 祐司

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

Fターム(参考) 5F173 AC03 AC13 AC35 AC42 AC48 AC52 AH04 AP05 AP33 AP61
AP67 AR42