

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6323649号
(P6323649)

(45) 発行日 平成30年5月16日(2018.5.16)

(24) 登録日 平成30年4月20日(2018.4.20)

(51) Int.Cl.

HO1S 5/183 (2006.01)
HO3L 7/26 (2006.01)

F 1

HO1S 5/183
HO3L 7/26

請求項の数 23 (全 24 頁)

(21) 出願番号

特願2013-263457 (P2013-263457)

(22) 出願日

平成25年12月20日 (2013.12.20)

(65) 公開番号

特開2015-119136 (P2015-119136A)

(43) 公開日

平成27年6月25日 (2015.6.25)

審査請求日

平成28年12月19日 (2016.12.19)

(73) 特許権者 000002369

セイコーエプソン株式会社

東京都新宿区新宿四丁目1番6号

(74) 代理人 100090387

弁理士 布施 行夫

(74) 代理人 100090398

弁理士 大渕 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) 【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、

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と、

前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、
および前記第2領域は、積層体を構成し、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、前記平面視において、前記第1部分における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸
化領域が構成されており、前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1部分の前記第2ミラー層
の上面の幅をW2としたとき、W2 / W1 = 3 : 3 である、断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第1ミラー層を挟むように、前記第
1領域の第1部分と第2部分とがあり、

10

20

前記断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第2ミラー層を挟むように、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とが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、

W2/W1 2.2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において、

1.3 W2/W1であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項4】

請求項1ないし3のいずれか1項において、

前記平面視において、前記積層体の前記第1部分上に、前記積層体の前記第1部分と前記積層体の前記第2部分とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の前記上面の幅であるW2は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項5】

請求項4において、

前記平面視において、前記仮想直線と重なる位置に、前記第2ミラー層の前記上面を挟むように、前記酸化領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記酸化領域の前記第1部分の幅であり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項6】

基板と、

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、

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と、

前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、前記第1歪付与部における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸化領域が構成されており、

前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1歪付与部の前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2/W1 3.3であり、

断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第1ミラー層を挟むように、前記第1領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第2ミラー層を挟むように、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とがあることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項7】

請求項6において、

W2/W1 2.2であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項8】

請求項6または7において、

1.3 W2/W1であることを特徴とする面発光レーザー。

10

20

30

40

50

【請求項 9】

請求項 6 ないし 8 のいずれか 1 項において、

前記平面視において、前記第 1 歪付与部上に、前記第 1 歪付与部と前記第 2 歪付与部とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第 2 ミラー層の前記上面の幅である W 2 は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 10】

請求項 9 において、

前記平面視において、前記仮想直線と重なる位置に、前記第 2 ミラー層の前記上面を挟むように、前記酸化領域の第 1 部分と第 2 部分とがあり、

前記酸化領域の幅である W 1 は、前記酸化領域の前記第 1 部分の幅であり、

前記酸化領域の幅である W 1 は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 11】

基板と、

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、

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と、

前記第 1 ミラー層の一部と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第 1 領域と、

前記第 2 ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第 2 領域と、を含み、

前記第 1 ミラー層、前記活性層、前記第 2 ミラー層、前記電流狭窄層、前記第 1 領域、および前記第 2 領域は、積層体を構成し、

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、

断面視において、前記第 1 領域の複数の酸化層のうち、最下層の酸化層は、前記第 1 部分の前記第 1 ミラー層と接する端と対向する第 1 端を有し、

前記断面視において、前記第 2 領域の複数の酸化層のうち、最上層の酸化層は、前記第 1 部分の前記第 2 ミラー層と接する第 2 端を有し、

前記平面視において、前記第 1 端から前記第 2 端までの幅を W 1 とし、前記第 1 部分における前記第 2 ミラー層の上面の幅を W 2 としたとき、 $W_2 / W_1 = 3.3$ であり、

前記断面視において、前記積層体の前記第 1 部分の前記第 1 ミラー層を挟むように、前記第 1 領域の第 1 部分と第 2 部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第 1 部分の前記第 2 ミラー層を挟むように、前記第 1 領域の前記第 1 部分の上方に前記第 2 領域の第 1 部分と、前記第 1 領域の前記第 2 部分の上方に前記第 2 領域の第 2 部分とがあることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 12】

請求項 11 において、

$W_2 / W_1 = 2.2$ であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 13】

請求項 11 または 12 において、

$1.3 < W_2 / W_1 < 2.2$ であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 14】

請求項 11 ないし 13 のいずれか 1 項において、

前記平面視において、前記積層体の前記第 1 部分上に、前記積層体の前記第 1 部分と前記積層体の前記第 2 部分とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第 2 ミラー層の上面の幅である W 2 は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項 15】

請求項 14 において、

10

20

30

40

50

前記第1領域の前記第1部分は、前記最下層の酸化層を有し、
 前記第2領域の前記第1部分は、前記最上層の酸化層を有し、
 前記最下層の酸化層の前記第1端から前記最上層の酸化層の前記第2端までの幅である
 W1は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項16】

基板と、

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、

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と、

10

前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、
 および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

断面視において、前記第1領域の複数の酸化層のうち、最下層の酸化層は、前記第1歪
 付与部の前記第1ミラー層と接する端と対向する第1端を有し、

前記断面視において、前記第2領域の複数の酸化層のうち、最上層の酸化層は、前記第
 1歪付与部の前記第2ミラー層と接する第2端を有し、

20

前記平面視において、前記第1端から前記第2端までの幅をW1とし、前記第1歪付与
 部における前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2/W1=3.3であり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第1ミラー層を挟むように
 、前記第1領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第2ミラー層を挟むように
 、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記
 第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とがあることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項17】

請求項16において、

30

W2/W1=2.2であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項18】

請求項16または17において、

1.3 W2/W1であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項19】

請求項16ないし18のいずれか1項において、

前記平面視において、前記第1歪付与部上に、前記第1歪付与部と前記第2歪付与部が
 対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の上面の幅であるW2
 は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項20】

請求項19において、

40

前記第1領域の前記第1部分は、前記最下層の酸化層を有し、

前記第2領域の前記第1部分は、前記最上層の酸化層を有し、

前記最下層の酸化層の前記第1端から前記最上層の酸化層の前記第2端までの幅である
 W1は、前記仮想直線に沿った幅であることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項21】

基板と、

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、

50

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と、
 前記第1ミラー層に形成された樹脂層と、
 前記第1ミラー層と接続され、複数の酸化層を含む第1領域と、
 前記第2ミラー層と接続され、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、
 前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、
 および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

前記平面視において、前記第1部分における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸化領域が構成されており、

前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1部分の前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2/W1=3.3であり、

断面視において、前記第1領域は、前記第1ミラー層と前記樹脂層との間に設けられており、前記第2領域は、前記第2ミラー層と前記樹脂層との間に設けられ、

前記断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第1ミラー層を挟むように、前記第1領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第2ミラー層を挟むように、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とがあることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項22】

請求項1ないし21のいずれか1項において、

前記第2領域の上面が、前記基板側に傾斜していることを特徴とする面発光レーザー。

【請求項23】

請求項1ないし22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、歪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、レーザー光の偏光方向を安定化させることができる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】

【0004】

【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】

【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、歪付加部によって共振器に生じる歪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

【0006】

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、
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と、
前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、
前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、
前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、
および前記第2領域は、積層体を構成し、
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、
前記平面視において、前記第1部分における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸化領域が構成されており、
前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1部分の前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2/W1=3.3である。

【0008】

このような面発光レーザーでは、酸化領域によって活性層に大きな歪みを生じさせることができ、偏光方向の安定化を図ることができる（詳細は後述）。

【0009】

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、
W2/W1=2.2であってもよい。

【0011】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、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、
1.3 W2/W1であってもよい。

【0013】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、偏光方向の安定化を図ることができる。
。

【0014】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、
前記平面視において、前記第1部分上に、前記第1部分と前記第2部分とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の前記上面の幅であるW2は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【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。

10

20

30

40

50

【0016】

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、前記仮想直線と重なる位置に、前記第2ミラー層の前記上面を挟むように、前記酸化領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記酸化領域の前記第1部分の幅であり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【0017】

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。

【0018】

本発明に係る面発光レーザーは、

10

基板と、

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、

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と、

前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

20

前記平面視において、前記第1歪付与部における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸化領域が構成されており、

前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1部分の前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2/W1=3.3である。

【0019】

このような面発光レーザーでは、酸化領域によって活性層に大きな歪みを生じさせることができ、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0020】

30

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

W2/W1=2.2であってもよい。

【0021】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、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、

1.3 W2/W1であってもよい。

【0023】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、偏光方向の安定化を図ることができる。

40

【0024】

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、前記第1歪付与部上に、前記第1歪付与部と前記第2歪付与部とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の前記上面の幅であるW2は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【0025】

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。

【0026】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

50

前記平面視において、前記仮想直線と重なる位置に、前記第2ミラー層の前記上面を挟むように、前記酸化領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記酸化領域の前記第1部分の幅であり、

前記酸化領域の幅であるW1は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【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第1ミラー層と、

10

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、

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と、

前記第1ミラー層の一部と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

20

断面視において、前記第1領域の複数の酸化層のうち、最下層の酸化層は、前記第1部分の前記第1ミラー層と接する端と対向する第1端を有し、

前記断面視において、前記第2領域の複数の酸化層のうち、最上層の酸化層は、前記第1部分の前記第2ミラー層と接する第2端を有し、

前記平面視において、前記第1端から前記第2端までの幅をW1とし、前記第1部分における前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、 $W_2 / W_1 = 3/3$ である。

【0029】

このような面発光レーザーでは、酸化層によって活性層に大きな歪みを生じさせることができ、偏光方向の安定化を図ることができる。

【0030】

30

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

$W_2 / W_1 = 2/2$ であってもよい。

【0031】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、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、

$1/3 < W_2 / W_1 < 2/2$ であってもよい。

【0033】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、偏光方向の安定化を図ることができる

40

【0034】

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、前記第1部分上に、前記第1部分と前記第2部分とが対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の上面の幅であるW2は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【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、

50

前記断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第1ミラー層を挟むように、前記第1領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1部分の前記第2ミラー層を挟むように、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とがあり

前記第1領域の前記第1部分は、前記最下層の酸化層を有し、

前記第2領域の前記第1部分は、前記最上層の酸化層を有し、

前記最下層の酸化層の前記第1端から前記最上層の酸化層の前記第2端までの幅であるW1は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【0037】

10

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。

【0038】

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、

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と、

前記第1ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と連続して設けられた、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

断面視において、前記第1領域の複数の酸化層のうち、最下層の酸化層は、前記第1歪付与部の前記第1ミラー層と接する端と対向する第1端を有し、

前記断面視において、前記第2領域の複数の酸化層のうち、最上層の酸化層は、前記第1歪付与部の前記第2ミラー層と接する第2端を有し、

前記平面視において、前記第1端から前記第2端までの幅をW1とし、前記第1部分における前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、 $W_2 / W_1 = 3.3$ である。

【0039】

このような面発光レーザーでは、酸化層によって活性層に大きな歪みを生じさせることができ、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、

$W_2 / W_1 = 2.2$ であってもよい。

【0041】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、偏光方向の安定化を図ることができる。

。

【0042】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

$1.3 < W_2 / W_1 < 2.2$ であってもよい。

【0043】

このような面発光レーザーでは、よりいっそう、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、

前記平面視において、前記第1歪付与部上に、前記第1歪付与部と前記第2歪付与部が対向する方向に直交する仮想直線を引いた場合、前記第2ミラー層の上面の幅であるW2

40

50

は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【0045】

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。

【0046】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第1ミラー層を挟むように、前記第1領域の第1部分と第2部分とがあり、

前記断面視において、前記積層体の前記第1歪付与部の前記第2ミラー層を挟むように、前記第1領域の前記第1部分の上方に前記第2領域の第1部分と、前記第1領域の前記第2部分の上方に前記第2領域の第2部分とがあり、

10

前記第1領域の前記第1部分は、前記最下層の酸化層を有し、

前記第2領域の前記第1部分は、前記最上層の酸化層を有し、

前記最下層の酸化層の前記第1端から前記最上層の酸化層の前記第2端までの幅であるW1は、前記仮想直線上に位置してもよい。

【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。

【0048】

本発明に係る面発光レーザーにおいて、

前記第2領域の上面が、前記基板側に傾斜していてもよい。

【0049】

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

【0050】

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。

【0051】

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、 / 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。

本発明に係る面発光レーザーは、

基板と、

30

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

前記活性層上方に設けられた第2ミラー層と、

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と、

前記第1ミラー層に形成された樹脂層と、

前記第1ミラー層と接続され、複数の酸化層を含む第1領域と、

前記第2ミラー層と接続され、複数の酸化層を含む第2領域と、を含み、

前記第1ミラー層、前記活性層、前記第2ミラー層、前記電流狭窄層、前記第1領域、および前記第2領域は、積層体を構成し、

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、

40

前記平面視において、前記第1部分における前記第1領域と前記第2領域とにより、酸化領域が構成されており、

前記平面視において、前記酸化領域の幅をW1とし、前記第1部分の前記第2ミラー層の上面の幅をW2としたとき、W2 / W1 = 3 / 3であり、

断面視において、前記第1領域は、前記第1ミラー層と前記樹脂層との間に設けられており、前記第2領域は、前記第2ミラー層と前記樹脂層との間に設けられている。

【図面の簡単な説明】

【0052】

50

- 【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】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 6】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 7】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 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】実験例に用いた面発光レーザーの写真。
- 【図 10】実験例に用いた面発光レーザーの写真。 10
- 【図 11】実験例に用いた面発光レーザーの写真。
- 【図 12】実験例に用いた面発光レーザーの写真。
- 【図 13】良品の面発光レーザーの電流と出力との関係を示すグラフ。
- 【図 14】NG品の面発光レーザーの電流と出力との関係を示すグラフ。
- 【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断面図。
- 【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I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。 20
- 【発明を実施するための形態】**
- 【0053】**
- 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。
- 【0054】**
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。 30
- 【0055】**
- 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。
- 【0056】**
- 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。 40
- 【0057】**
- 基板10は、例えば、第1導電型(例えばn型)のGaAs基板である。
- 【0058】**
- 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プラッギ反射型(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

0ペア以下であり、具体的には40.5ペアである。

【0059】

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。

【0060】

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プラグ反射型(DBR)ミラーである。高屈折率層44は、例えば、炭素がドープされたp型の $Al_{0.15}Ga_{0.85}As$ 層である。低屈折率層46は、例えば、炭素がドープされた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

【0061】

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。

20

【0062】

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。

30

【0063】

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、炭素がドープされたp型の $GaAs$ 層である。

【0064】

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。

40

【0065】

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。

【0066】

50

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。

【0067】

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。10

【0068】

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)2aと、第2歪付与部(第2部分)2bと、共振部(第3部分)2cと、を含む。

【0069】

第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2bは、平面視において、共振部2cを挟んでY軸方向に対向している。第1歪付与部2aは、平面視において、共振部2cから+Y軸方向に突出している。第2歪付与部2bは、平面視において、共振部2cから-Y軸方向に突出している。第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2bは、共振部2cと一緒に設けられている。20

【0070】

第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2b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、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2aおよび第2歪付与部2b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2aおよび第2歪付与部2b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。

【0071】

共振部2cは、第1歪付与部2aと第2歪付与部2bとの間に設けられている。X軸方向における共振部2cの長さは、X軸方向における第1歪付与部2aの長さまたはX軸方向における第2歪付与部2bの長さよりも大きい。共振部2c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

【0072】

共振部2cは、活性層30で発生した光を共振させる。すなわち、共振部2cでは、垂直共振器が形成される。

【0073】

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2aおよび第2歪付与部2bを覆っている。すなわち、樹脂層70は、第1歪付与部2aの側面、第1歪付与部2aの上面、第2歪付与部2bの側面、および第2歪付与部2bの上面に設けられている。樹脂層70は、第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2bを完全に覆っていてもよいし、第1歪付与部2aおよび第2歪付与部2b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。なお、本実施形態では、各歪付与部2a、2bに歪みを付与するために樹脂層70としているが、樹脂層70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。40

【0074】

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。50

【0075】

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と電気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用いる。第1電極80は、活性層30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。

【0076】

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と電気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。

10

【0077】

第2電極82は、パッド84と電気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と電気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。

20

【0078】

ここで、積層体2について、より詳細に説明する。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。

30

【0080】

平面視において、第1歪付与部2aにおける第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。平面視において、酸化領域8の幅(X軸方向の大きさ)をW1とし、第1歪付与部2aの第2ミラー層40の上面48の幅をW2としたとき、W2/W1=3.3であり、より好ましくは、1.3 W2/W1=2.2である。例えば、第2歪付与部2bにおける酸化領域8の幅をW3(図示せず)とすると、1.3 W2/W3=2.2の関係を満たしている。

【0081】

平面視において、第1歪付与部2a上に、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)に直交する仮想直線Lを引いた場合、第2ミラー層40の上面48の幅であるW2は、仮想直線上Lに位置する。すなわち、仮想直線Lは、X軸に平行であり、W2は、第2ミラー層40の上面48のX軸方向の長さである。

40

【0082】

図3に示す例では、平面視において、仮想直線Lと重なる位置に、第2ミラー層40の上面48を挟むように、酸化領域8の第1部分8aと第2部分8bとがある。すなわち、第1部分8aと第2部分8bとは、X軸方向において上面48を挟んでいる。図示の例では、第1部分8aは、第2ミラー層40の上面48の+X軸方向側に設けられ、第2部分8bは、上面48の-X軸方向側に設けられている。酸化領域8の幅であるW1は、第1部分8aの幅であり、仮想直線L上に位置する。すなわち、W1は、酸化領域8の第1部

50

分 8 a の X 軸方向の長さである。

【 0 0 8 3 】

図 4 に示す例では、断面視において、第 1 領域 6 0 の複数の酸化層 6 のうち、最下層の酸化層 6 a は、第 1 歪付与部 2 a の第 1 ミラー層 2 0 と接する端 6 b と対向する第 1 端 6 c を有している。また、断面視において、第 2 領域 6 2 の複数の酸化層 1 6 のうち、最上層の酸化層 1 6 a は、第 1 歪付与部 2 a の第 2 ミラー層 4 0 と接する第 2 端 1 6 b を有している。平面視において、W 1 は、第 1 端 6 c から第 2 端 1 6 b までの幅である。

【 0 0 8 4 】

第 1 領域 6 0 は、図 4 に示すように、第 1 部分 6 0 a および第 2 部分 6 0 b を有している。第 1 領域 6 0 の第 1 部分 6 0 a および第 2 部分 6 0 b は、断面視において、第 1 歪付与部 2 a の第 1 ミラー層 2 0 を挟むように設けられている。図示の例では、第 1 部分 6 0 a は、第 1 ミラー層 2 0 の + X 軸方向側に設けられ、第 2 部分 6 0 b は、第 1 ミラー層 2 0 の - X 軸方向側に設けられている。第 1 領域 6 0 の第 1 部分 6 0 a は、最下層の酸化層 6 a を有している。

10

【 0 0 8 5 】

第 2 領域 6 2 は、第 1 部分 6 2 a および第 2 部分 6 2 b を有している。第 2 領域 6 2 の第 1 部分 6 2 a および第 2 部分 6 2 b は、断面視において、第 1 歪付与部 2 a の第 2 ミラー層 4 0 を挟むように設けられている。第 2 領域 6 2 の第 1 部分 6 2 a は、第 1 領域 6 0 の第 1 部分 6 0 a の上方に設けられている。第 2 領域 6 2 の第 2 部分 6 2 b は、第 1 領域 6 0 の第 2 部分 6 0 b の上方に設けられている。第 2 領域 6 2 の第 1 部分 6 2 a は、最上層の酸化層 1 6 a を有している。

20

【 0 0 8 6 】

第 2 領域 6 2 の上面 6 3 は、基板 1 0 側に傾斜している。図示の例では、第 2 領域 6 2 の上面 6 3 は、第 2 ミラー層 4 0 の上面 4 8 に対して基板 1 0 側に傾斜している。

【 0 0 8 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。

30

【 0 0 8 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 8 9 】

面発光レーザー 1 0 0 では、平面視において、第 1 歪付与部 2 a における第 1 領域 6 0 と第 2 領域 6 2 とにより、酸化領域 8 が構成されており、酸化領域 8 の幅を W 1 とし、第 1 歪付与部 2 a の第 2 ミラー層 4 0 の上面 4 8 の幅を W 2 としたとき、W 2 / W 1 = 3 / 3 である。これにより、面発光レーザー 1 0 0 では、酸化領域 8 によって活性層 3 0 に大きな歪みを生じさせることができ、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる（詳細は後述の実験例参照）。

【 0 0 9 0 】

面発光レーザー 1 0 0 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に、例えば、面発光レーザー 1 0 0 を原子発振器の光源として用いた場合に、1 / 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、1 / 4 板を介して得られる光が橢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。

40

【 0 0 9 1 】

このように、面発光レーザー 1 0 0 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に、1 / 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。

50

【0092】

面発光レーザー100では、W2/W1 2.2である。これにより、面発光レーザー100では、いっそう、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる（詳細は後述の実験例参照）。

【0093】

面発光レーザー100では、1.3 W2/W1 2.2である。これにより、面発光レーザー100では、よりいっそう、レーザー光の偏光方向の安定化を図ることができる（詳細は後述の実験例参照）。

【0094】**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5～図8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。

【0095】

図5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。

【0096】

図6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をパターニングして、積層体2を形成する。パターニングは、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。

【0097】

図7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、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.95$) 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、 $\text{Al}_{1-x}\text{Ga}_{1-x}\text{As}$ ($x = 0.95$) 層を側面から酸化して、電流狭窄層42を形成する。

【0098】

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 $\text{Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 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。

【0099】

図8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、スピンドル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、該層をパターニングすることにより形成される。パターニングは、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収縮する。

【0100】

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

10

20

30

40

50

し配線 8 6 (図 1 参照) を形成してもよい。

【 0 1 0 1 】

以上の工程により、面発光レーザー 1 0 0 を製造することができる。

【 0 1 0 2 】

3 . 実験例

以下に、実験例を示し、本発明を具体的に説明する。なお、本発明は、以下の実験例によって何ら限定されるものではない。

【 0 1 0 3 】

本実験例では、図 3 に示す W_1 と W_2 との比 W_2 / W_1 が異なる面発光レーザー (タイプ A ~ D) を用いた。図 9 ~ 図 12 は、タイプ A ~ D の積層体を示す写真であり、共焦点レーザー顕微鏡を用いて撮影したものである。なお、図 9 ~ 図 11 において、(a) は積層体の全体図を示しており、(b) は積層体の歪付与部の拡大図を示している。

【 0 1 0 4 】

タイプ A は、図 9 に示すように、歪付与部の幅は $6 \mu m$ であり、 W_2 / W_1 は 1 . 3 である。タイプ B は、図 10 に示すように、歪付与部の幅は $8 \mu m$ であり、 W_2 / W_1 は 2 . 2 である。タイプ C は、図 11 に示すように、歪付与部の幅は $10 \mu m$ であり、 W_2 / W_1 は 3 . 3 である。タイプ D は、図 12 に示すように、歪付与部の幅は $12 \mu m$ であり、 W_2 / W_1 は 4 . 3 である。なお、本実験例に用いた面発光レーザーの構成は、上述した面発光レーザー 1 0 0 の構成と同様である。

【 0 1 0 5 】

本実験例では、タイプ A ~ D の光出力を、偏光フィルターを介して測定した。具体的には、タイプ A ~ D の面発光レーザーに、 $0 \sim 2 . 5 m A$ 程度の電流を供給し、タイプ A ~ D から射出された光を、X 軸方向に偏光透過軸を持つ偏光フィルターを通過させて、光出力を測定した。タイプ A ~ D の各々を複数個用意し、上記の測定を行った。

【 0 1 0 6 】

本測定において、図 13 に示すように、電流値が大きくなるについて出力が大きくなる面発光レーザーを、良品とした。一方、図 14 に示すように、電流値が大きくなってしまっても出力が大きくならない部分 (図 14 の例では、電流値が $0 \sim 0 . 6 m A$ 程度の領域) を有する面発光レーザーを、NG 品とした。図 14 の例では、電流値が $0 \sim 0 . 6 m A$ 程度の領域において、射出された光が X 軸方向に偏光しておらず、電流値が約 $0 . 6 m A$ 以上の領域において、射出された光が X 軸方向に偏光している。すなわち、図 14 のような例では、偏光方向は不安定であるといえる。

【 0 1 0 7 】

表 1 に、タイプ A ~ D の NG 品の個数を示す。

【 0 1 0 8 】

【 表 1 】

タイプ	歪付与部の幅 [μm]	W_2/W_1	測定数	NG品の個数
A	6	1.3	60	0
B	8	2.2	56	0
C	10	3.3	78	11
D	12	4.3	78	53

【 0 1 0 9 】

表 1 より、 $W_2 / W_1 = 3 . 3$ の場合では、NG 品の個数は、全数 (測定数) の半分以下であり、面発光レーザーの偏光方向が安定していることがわかった。さらに、 $1 . 3$ $W_2 / W_1 = 2 . 2$ の場合では、NG 品の個数は、ゼロであり、よりいっそう、面発光レーザーの偏光方向が安定していることがわかった。

【 0 1 1 0 】

4 . 面発光レーザーの変形例

10

20

30

40

50

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15は、本実施形態の変形例に係る面発光レーザー200を模式的に示す断面図であって、図2に対応している。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。

【0111】

面発光レーザー100では、図2に示すように、積層体2の側面は、基板10の上面に対して傾斜していた。これに対し、面発光レーザー200では、図15に示すように、積層体2の側面は、基板10の上面に対して垂直である。

【0112】

面発光レーザー200では、面発光レーザー100と同様に、偏光方向の安定化を図ることができる。10

【0113】

5. 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。

【0114】

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。

【0115】

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

【0116】

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I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 / λ_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

【0117】

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 $E_{1,2}$ 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。

【0118】

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...GHzなので、周波数差が9.19263...GHzの2つの光波が照射されるとEIT現象を起こす。40

【0119】

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。

【0120】

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

50

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 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 が微調整されて安定する。

【0121】

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

【0122】

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。

【0123】

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。

【0124】

20

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。

【0125】

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 のエネルギー差 $E_{1,2}$ 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

【0126】

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。

【0127】

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】

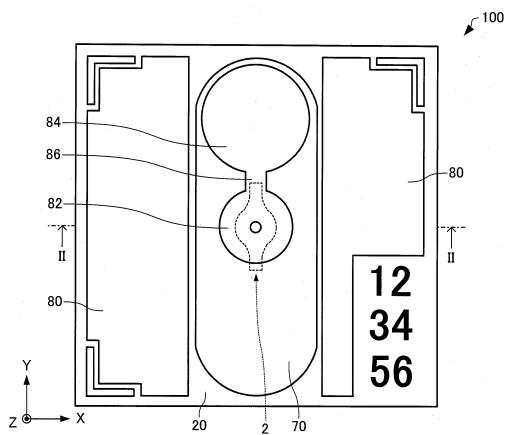
【0128】

2 … 積層体、2a … 第 1 歪付加部、2b … 第 2 歪付加部、2c … 共振部、4 … 層、6, 6a … 酸化層、6b … 端、6c … 第 1 端、8 … 酸化領域、8a … 第 1 部分、8b … 第 2 部分、10 … 基板、14 … 層、16, 16a … 酸化層、16b … 第 2 端、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、42a … 被酸化層、43 … 開口部、44 … 高屈折率層、46 … 低屈折率層、48 … 上面、50 … コンタクト層、60 … 第 1 領域、60a … 第 1 部分、60b … 第 2 部分

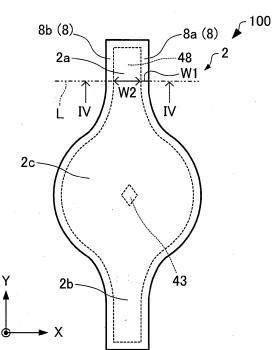
50

、62…第2領域、62a…第1部分、62b…第2部分、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, 200
 …面発光レーザー、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

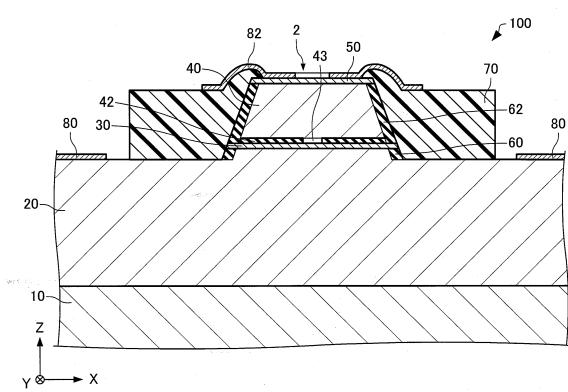
【図1】



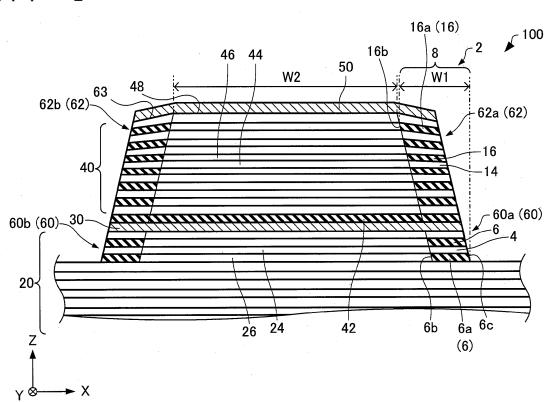
【図3】



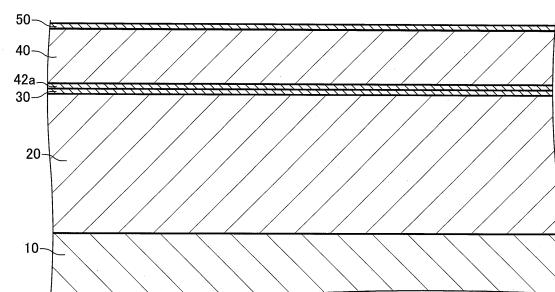
【図2】



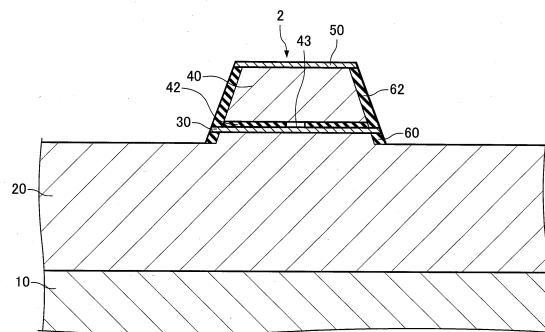
【図4】



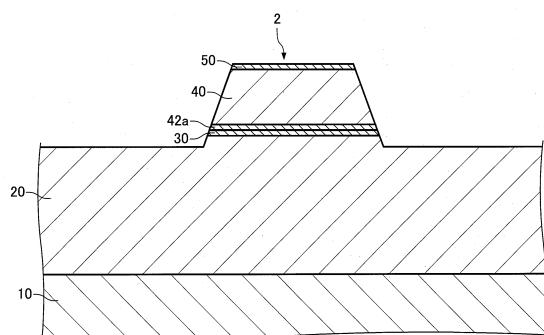
【図5】



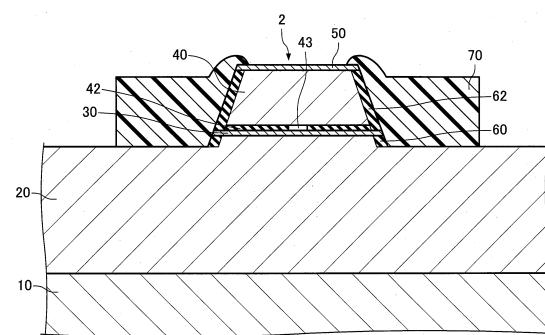
【図7】



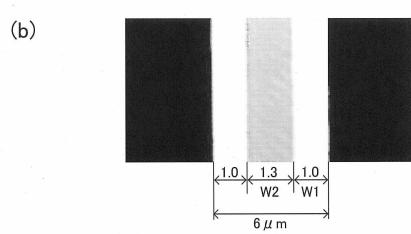
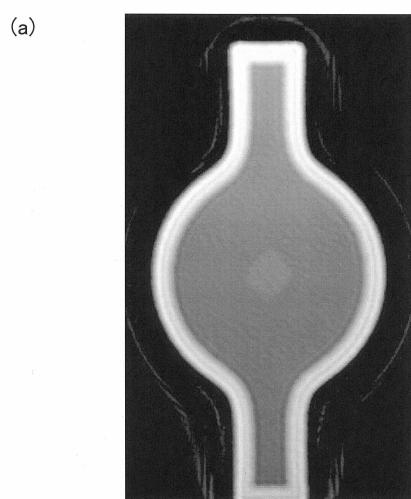
【図6】



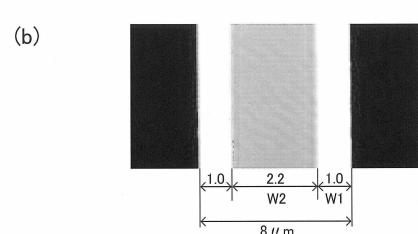
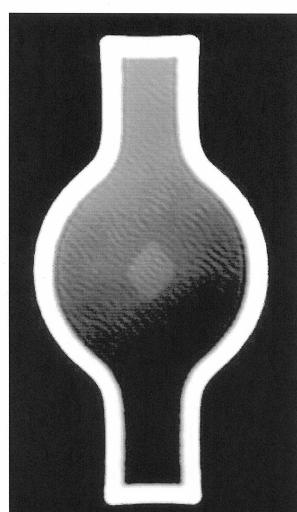
【図8】



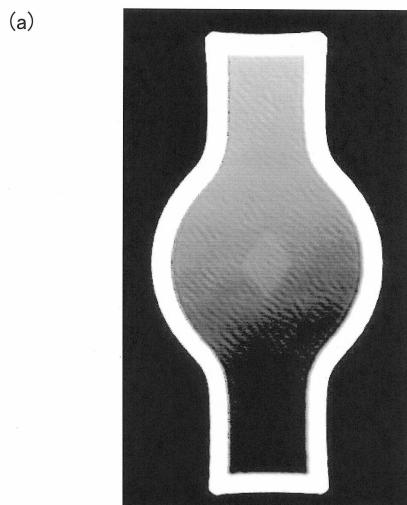
【図9】



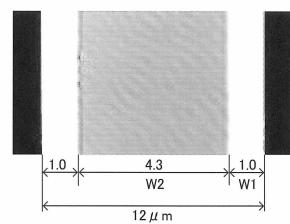
【図10】



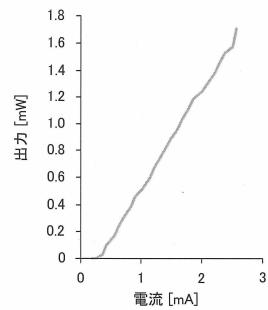
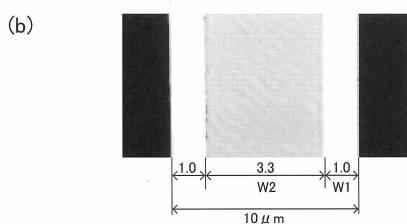
【図 1 1】



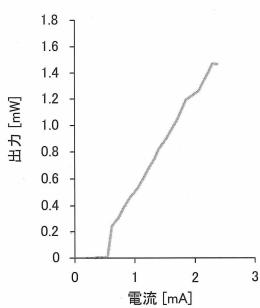
【図 1 2】



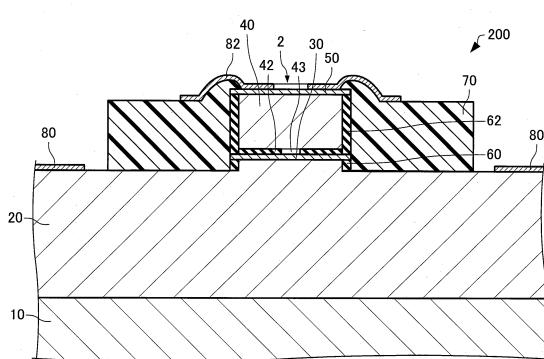
【図 1 3】



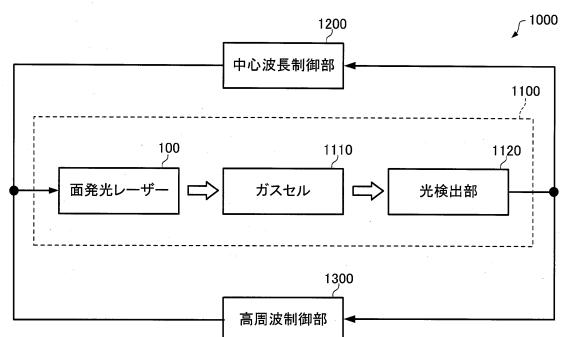
【図 1 4】



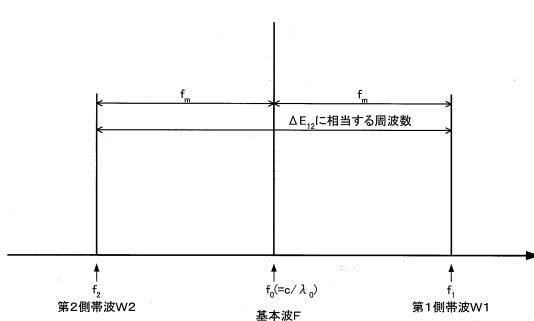
【図 1 5】



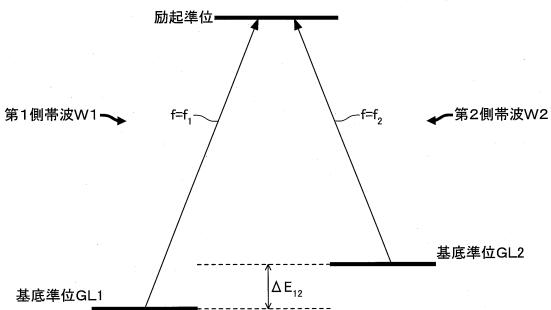
【図 1 6】



【図 1 7】



【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

審査官 佐藤 俊彦

(56)参考文献 特開2005-252240(JP,A)
特開2013-098606(JP,A)
特開2006-019498(JP,A)
特開2003-008142(JP,A)
米国特許第06570905(US,B1)
Monti et al, "Polarization Control in Strained T-bar VCSELs", IEEE PHOTONICS TECHNOLOGY LETTERS, IEEE, 2002年8月, VOL.14, NO.8, p.1034-1036

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 5/00 - 5/50
H01S 1/00 - 1/06
H03L 7/26