

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6303255号
(P6303255)

(45) 発行日 平成30年4月4日(2018.4.4)

(24) 登録日 平成30年3月16日(2018.3.16)

(51) Int.Cl.

F 1

HO 1 S 5/183 (2006.01)
GO 4 F 5/14 (2006.01)HO 1 S 5/183
GO 4 F 5/14

請求項の数 12 (全 30 頁)

(21) 出願番号 特願2012-234113 (P2012-234113)
 (22) 出願日 平成24年10月23日 (2012.10.23)
 (65) 公開番号 特開2013-138176 (P2013-138176A)
 (43) 公開日 平成25年7月11日 (2013.7.11)
 審査請求日 平成27年9月30日 (2015.9.30)
 (31) 優先権主張番号 特願2011-264908 (P2011-264908)
 (32) 優先日 平成23年12月2日 (2011.12.2)
 (33) 優先権主張国 日本国 (JP)

(73) 特許権者 000006747
 株式会社リコー
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号
 (74) 代理人 100107766
 弁理士 伊東 忠重
 (74) 代理人 100070150
 弁理士 伊東 忠彦
 (72) 発明者 鈴木 亮一郎
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
 会社リコー内
 (72) 発明者 佐藤 俊一
 東京都大田区中馬込1丁目3番6号 株式
 会社リコー内
 審査官 村井 友和

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】面発光レーザ素子及び原子発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

異なる波長のレーザビームを各々出射する複数の面発光レーザを有する面発光レーザ素子であって、

各々の面発光レーザは、

活性層を含む共振器と、

前記共振器を挟んで配置される上部プラグ反射鏡および下部プラグ反射鏡と、
を有し、

前記複数の面発光レーザは、前記上部プラグ反射鏡または前記下部プラグ反射鏡内に形成されていてそれぞれ厚さの異なる波長調整層を有する面発光レーザを含み、

10

前記波長調整層は、M層の調整層 (Mは正の整数) からなる波長調整領域と位相調整領域とコンタクト層のうち少なくともいすれかを含むものであって、

前記複数の面発光レーザの前記波長調整層のうち最厚の波長調整層の光学的な厚さPは
、を前記最厚の波長調整層を有する前記面発光レーザの波長とした場合に、

$\frac{1}{4} < P < \frac{1}{2}$

であることを特徴とする面発光レーザ素子。

【請求項 2】

M 2 である前記M層の調整層は、複数の異なる材料が積層されたものであることを特徴とする請求項1に記載の面発光レーザ素子。

【請求項 3】

20

前記波長調整層は、前記M層の調整層により構成される波長調整領域と、位相調整領域とを含むことを特徴とする請求項1または2に記載の面発光レーザ素子。

【請求項4】

前記波長調整層は、前記波長調整領域よりも前記共振器に近い側に形成されたコンタクト層を含むものであって、

前記コンタクト層は、一方の電極と接続されていることを特徴とする請求項3に記載の面発光レーザ素子。

【請求項5】

前記波長調整層が、1組形成されていることを特徴とする請求項1から4のいずれかに記載の面発光レーザ素子。

10

【請求項6】

前記波長調整層は、前記上部プラグ反射鏡中に1組形成されていることを特徴とする請求項1から5のいずれかに記載の面発光レーザ素子。

【請求項7】

各々の前記面発光レーザは、前記波長調整層において、前記調整層の層数が異なることにより前記波長調整層の膜厚が異なるものであって、

前記複数の異なる材料は、

第1のエッチング液により除去される材料と、前記第1のエッチング液とは異なる第2のエッチング液により除去される材料と、を含むことを特徴とする請求項2に記載の面発光レーザ素子。

20

【請求項8】

前記複数の異なる材料の一方はGaInPであり、他方はGaAsPまたはGaAsであることを特徴とする2または7に記載の面発光レーザ素子。

【請求項9】

前記上部プラグ反射鏡には、前記活性層が形成されている側より順に、第1の上部プラグ反射鏡、前記波長調整層、第2の上部プラグ反射鏡が形成されているものを含むものであって、

前記第2の上部プラグ反射鏡は、屈折率の異なる誘電体を交互に積層形成することにより形成されたものであることを特徴とする請求項1から8のいずれかに記載の面発光レーザ素子。

30

【請求項10】

前記複数の波長のうちいずれか1つは、893.6nm～895.6nm、851.3nm～853.3nm、794.0nm～796.0nm、779.2nm～781.2nmの範囲に含まれるものであることを特徴とする請求項1から9のいずれかに記載の面発光レーザ素子。

【請求項11】

請求項1から10のいずれかに記載の面発光レーザ素子と、

アルカリ金属を封入したアルカリ金属セルと、

前記面発光レーザ素子における面発光レーザより前記アルカリ金属セルに照射した光のうち、前記アルカリ金属セルを透過した光を検出する光検出器と、

40

を有し、前記面発光レーザより出射したサイドバンドを含む光のうち、2つの異なる波長の光を前記アルカリ金属セルに入射させることにより、2種類の共鳴光による量子干渉効果による光吸収特性により発振周波数を制御することを特徴とする原子発振器。

【請求項12】

前記アルカリ金属は、ルビジウム、または、セシウムであることを特徴とする請求項1に記載の原子発振器。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、面発光レーザ素子、面発光レーザ素子の製造方法及び原子発振器に関する。

50

【背景技術】

【0002】

面発光レーザ (VCSEL : Vertical Cavity Surface Emitting LASER) は、基板面に對し垂直方向に光を出射する半導体レーザであり、端面発光型の半導体レーザと比較して、低価格、低消費電力、小型であって高性能であること、また2次元的に集積化しやすいといった特徴を有している。

【0003】

面発光レーザは、活性層を含む共振器領域と、共振器領域の上下に設けられた上部反射鏡及び下部反射鏡とからなる共振器構造を有している（例えば、特許文献1）。よって、共振器領域は、発振波長の光を得るために、共振器領域において波長の光が共振するように所定の光学的な厚さで形成されている。上部反射鏡及び下部反射鏡は、屈折率の異なる材料、即ち、低屈折率材料と高屈折率材料とを交互に積層形成することにより形成されており、波長において高い反射率が得られるように、低屈折率材料と高屈折率材料の光学的な膜厚が $1/4$ となるように形成されている。

10

【0004】

また、チップ内に波長の異なる素子を形成することも開示されている（例えば、特許文献2～5）。このような多波長面発光レーザ素子は、エッチング液の異なる2つの材料を交互に積層形成した構造の波長調整層を面発光レーザ素子の共振器領域に形成し、この波長調整層を各々の面発光レーザごとに一層ずつウエットエッチングにより除去し、波長調整層の厚みを変えることにより形成することができる。

20

【0005】

一方、極めて正確な時間を計る時計として原子時計（原子発振器）があり、この原子時計を小型化する技術等の検討がなされている。原子時計とは、アルカリ金属等の原子を構成している電子の遷移エネルギー量を基準とする発振器であり、特に、アルカリ金属の原子における電子の遷移エネルギーは外乱がない状態では、非常に精密な値が得られるため、水晶発振器に比べて、数桁高い周波数安定性を得ることができる。

【0006】

このような原子時計には、幾つかの方式があるが、中でも、CPT (Coherent Population Trapping) 方式の原子時計は、従来の水晶発振器に比べて周波数安定性が3桁程度高く、また、超小型、超低消費電力を望むことができる（例えば、非特許文献1、2、特許文献6）。

30

【0007】

CPT方式の原子時計では、レーザ素子と、アルカリ金属を封入したセルと、セルを透過したレーザ光を受光する受光素子とを有しており、レーザ光は変調され、特定波長である搬送波の両側に出現するサイドバンド波長により、アルカリ金属原子における電子の2つの遷移を同時に行ない、励起する。この遷移における遷移エネルギーは不变であり、レーザ光のサイドバンド波長と遷移エネルギーに対応する波長とが一致したときに、アルカリ金属における光の吸収率が低下する透明化現象が生じる。このように、アルカリ金属による光の吸収率が低下するように、搬送波の波長を調整するとともに、受光素子において検出された信号を変調器にフィードバックし、変調器によりレーザ素子からのレーザ光の変調周波数を調整することを特徴とした原子時計である。尚、この原子時計では、レーザ素子から出射されたレーザ光は、コリメートレンズ、 $1/4$ 波長板を介し、アルカリ金属を封入したセルに照射される。

40

【0008】

このような超小型の原子時計の光源としては、小型で超低消費電力であり、波長品質の高い面発光レーザが適しており、搬送波の波長精度としては、特定波長に対し $\pm 1\text{ nm}$ が求められる（例えば、非特許文献3）。

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0009】

50

ところで、原子時計に面発光レーザ素子を用いる場合には、各々の面発光レーザごとに狭い波長間隔 (5 nm) とする必要がある。よって、面発光レーザの共振器領域に波長調整層を形成することにより、このような狭い波長間隔で面発光レーザを形成する場合には、波長調整層における各々の膜の膜厚は極めて薄く形成する必要がある。しかしながら、波長調整層を形成している各々の膜の膜厚を極めて薄く均一に形成することは、半導体層を形成する際の成長速度のバラツキ、膜厚の分布ムラ等により困難である。

【0010】

具体的には、特許文献2に示されるように、共振器領域に波長調整層を形成した場合では、発振させる波長間隔を5 nm以内にしようとする、波長調整層の膜厚は1.2 nm以下にする必要があり、現在の化合物半導体の結晶成長の技術では、このような薄い膜厚の制御は極めて困難である。このように、膜厚が僅かに変化しただけでも、発振波長に影響を与えててしまう。

【0011】

本発明は、上記に鑑みなされたものであり、所望の波長間隔で正確に発振させることのできる複数の面発光レーザを有する面発光レーザ素子を提供することを目的とするものである。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明は、異なる波長のレーザビームを各々出射する複数の面発光レーザを有する面発光レーザ素子であって、各々の面発光レーザは、活性層を含む共振器と、前記共振器を挟んで配置される上部プラック反射鏡および下部プラック反射鏡と、を有し、前記複数の面発光レーザは、前記上部プラック反射鏡または前記下部プラック反射鏡内に形成されていてそれぞれ厚さの異なる波長調整層を有する面発光レーザを含み、前記波長調整層は、M層の調整層 (Mは正の整数) からなる波長調整領域と位相調整領域とコンタクト層のうち少なくともいずれかを含むものであって、前記複数の面発光レーザの前記波長調整層のうち最厚の波長調整層の光学的な厚さPは、を前記最厚の波長調整層を有する前記面発光レーザの波長とした場合に、 $\frac{1}{4} < P < \frac{1}{2}$ であることを特徴とする。

【0013】

また、本発明は、半導体基板の上に形成された下部プラック反射鏡と、前記下部プラック反射鏡の上に形成された活性層を含む共振器と、前記共振器の上に形成された上部プラック反射鏡と、を有する面発光レーザ素子の製造方法において、前記上部プラック反射鏡または前記下部プラック反射鏡内には、波長調整層が形成されており、前記波長調整層の厚さを変えることにより、異なる波長を各々出射する複数の面発光レーザを有するものであって、前記波長調整層は、2の種類の異なる材料により形成される各々の調整層を積層することにより形成されており、前記波長調整層の厚さは、前記波長調整層における前記調整層を前記調整層ごとに除去し層数を変えることにより、変えたものであって、前記波長調整層における2の種類の異なる材料により形成される各々の調整層のうち、一方の調整層を第1のエッティング液により除去する工程と、前記波長調整層における2の種類の異なる材料により形成される各々の調整層のうち、他方の調整層を第2のエッティング液により除去する工程と、を有し、前記第1のエッティング液と前記第2のエッティング液とが異なるものであることを特徴とする。

【発明の効果】

【0014】

本発明によれば、波長調整層を形成している膜の膜厚を薄くすることができるため、所望の波長間隔で正確に発振させることのできる複数の面発光レーザを有する面発光レーザ素子を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0015】

【図1】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図

【図2】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図

- 【図3】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の構造図
- 【図4】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(1)
- 【図5】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(2)
- 【図6】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(3)
- 【図7】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(4)
- 【図8】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(5)
- 【図9】第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(6)
- 【図10】第2の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図
- 【図11】第2の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図
- 【図12】第2の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(1) 10
- 【図13】第2の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(2)
- 【図14】第3の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図
- 【図15】第3の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図
- 【図16】第1の波長調整層及び第2の波長調整層と発振波長との相関図
- 【図17】第3の実施の形態における面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(1)
)
- 【図18】第3の実施の形態における面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(2)
)
- 【図19】第3の実施の形態における面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(3)
) 20
- 【図20】第4の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図
- 【図21】第5の実施の形態における原子発振器の構造図
- 【図22】CPT方式を説明する原子エネルギー準位の説明図
- 【図23】面発光レーザ変調時における出力波長の説明図
- 【図24】変調周波数と透過光量との相関図
- 【発明を実施するための形態】
- 【0016】
- 本発明を実施するための形態について、以下に説明する。尚、同じ部材等については、同一の符号を付して説明を省略する。 30
- 【0017】
- 〔第1の実施の形態〕
- (面発光レーザ素子の構造)
- 第1の実施の形態における面発光レーザ素子について説明する。本実施の形態における面発光レーザ素子10は、図1及び図2に示すように、複数の面発光レーザを有しており、具体的には、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14を有している。尚、図1は本実施の形態の説明のため簡略化されており、便宜上コンタクト層等の記載は省略されている。また、図2は、図1における一点鎖線1A-1Bにおいて切断した断面図である。
- 【0018】
- 本実施の形態における面発光レーザ素子10は、300μm角の半導体チップ上に形成されており、この半導体チップ上に形成された第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14は、各々に対応して設けられた電極パッドに接続されている。具体的には、第1の面発光レーザ11には電極パッド21が接続されており、第2の面発光レーザ12には電極パッド22が接続されており、第3の面発光レーザ13には電極パッド23が接続されており、第4の面発光レーザ14には電極パッド24が接続されている。 40
- 【0019】
- また、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14は、出射される光の波長が相互に異なるものである。即ち、第1の面発光レーザ11より出射される波長λ1、第2の面発光レーザ12より出射される波

10

20

30

40

50

長 2、第3の面発光レーザ13より出射される波長 3、第4の面発光レーザ14より出射される波長 4は、相互に異なる波長である。

【0020】

尚、本実施の形態における面発光レーザ素子は、発振波長が894.6 nmとなる面発光レーザを得るためのものであり、300 μm角の半導体チップ（基板）に4つの面発光レーザが形成されている。面発光レーザ素子では、狭い領域に複数の面発光レーザを形成することができるため、発光させる面発光レーザを切換えた場合であっても、発光位置は殆ど変わらない。従って、基板の大きさとしては、500 μm × 500 μm以下の大きさとすることにより、光軸調整等が不要または極めて容易となる。

【0021】

本実施の形態における面発光レーザ素子は、半導体等からなる基板101上に、屈折率の異なる半導体材料を交互に積層形成することにより、下部プラグ反射鏡102を形成し、下部プラグ反射鏡102上には、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105を形成する。上部スペーサ層105上には、第1の上部プラグ反射鏡106、コンタクト層110、波長調整領域120、第2の上部プラグ反射鏡107が形成されている。また、コンタクト層110の上には上部電極111が形成され接続されており、基板101の裏面には下部電極112が形成されている。本実施の形態では、コンタクト層110と波長調整領域120により波長調整層130が形成されているが、波長調整領域120に隣接してコンタクト層110が形成されていない場合には、波長調整層130は、波長調整領域120のみにより形成される場合がある。尚、基板101上に形成される半導体層となる下部プラグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部プラグ反射鏡106、コンタクト層110、波長調整領域120は、半導体材料をエピタキシャル成長させることにより形成されている。具体的には、これらの半導体層は、MOCVD (Metal Organic Chemical Vapor Deposition) またはMBE (Molecular Beam Epitaxy) によるエピタキシャル成長により形成されている。尚、本願明細書において記載されているプラグ反射鏡は、DBRと記載される場合がある。

【0022】

また、波長調整層130の上には、第2の上部プラグ反射鏡107が各々の面発光レーザごとに形成されている。第2の上部プラグ反射鏡107は、酸化物、窒化物、フッ化物等からなる誘電体膜であって高屈折率材料膜と低屈折率材料膜とを交互に積層形成することにより形成されている。尚、本実施の形態では、第1の上部プラグ反射鏡106、波長調整層130、第2の上部プラグ反射鏡107により、上部プラグ反射鏡が形成されている。また、波長調整層130は、下部プラグ反射鏡102の内部に形成したものであってもよい。

【0023】

本実施の形態における面発光レーザ素子では、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14において、各々波長調整層130における波長調整領域120の厚さが異なっている。具体的には、図3に示すように、波長調整領域120は、コンタクト層110の上に形成されており、波長調整領域120は、第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123により形成されている。本実施の形態では、第1の調整層121及び第3の調整層123はGaInPにより形成されており、第2の調整層122はGaAsPにより形成されている。尚、第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123を形成している材料は、この逆であってもよい。

【0024】

このように本実施の形態における面発光レーザ素子は、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における波長調整領域120の厚さが異なるものである。

【0025】

10

20

30

40

50

具体的には、第1の面発光レーザ11には、波長調整領域120において、第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123が形成されており、この波長調整領域120とコンタクト層110との和である波長調整層130の厚さに対応した波長1の光が出射される。

【0026】

また、第2の面発光レーザ12には、波長調整領域120のうち、第1の調整層121、第2の調整層122が形成されており、この波長調整領域120とコンタクト層110との和である波長調整層130の厚さに対応した波長2の光が出射される。

【0027】

また、第3の面発光レーザ13には、波長調整領域120において、第1の調整層121が形成されており、この波長調整領域120とコンタクト層110との和である波長調整層130の厚さに対応した波長3の光が出射される。 10

【0028】

また、第4の面発光レーザ14には、波長調整領域120は形成されないため、コンタクト層110の厚さと等しい波長調整層130の厚さに対応した波長4の光が出射される。

【0029】

このようにして、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における波長調整層130の厚さを少しずつ変えることができ、波長調整層130における各々の厚さに対応した波長の光を各々出射させることができ。 20

【0030】

(面発光レーザ素子の製造方法)

本実施の形態においては、基板101は、n-GaAs基板を用いている。また、下部プラグ反射鏡102は、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が1/4となるように35.5ペア積層することにより形成されている。 20

【0031】

下部プラグ反射鏡102の上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる下部スペーサ層103を介し、GaInAs量子井戸層/GaInPAs障壁層からなる活性層104が形成されている。活性層104上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる上部スペーサ層105、第1の上部プラグ反射鏡106が形成されている。尚、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105により1波長光学厚さとなる共振器領域が形成されている。 30

【0032】

第1の上部プラグ反射鏡106は、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が1/4となるように6ペア積層することにより形成されている。第1の上部プラグ反射鏡106の低屈折率層の一つは、AlAsからなる電流狭窄層108により形成されており、電流狭窄層108の周辺部分は選択酸化されて選択酸化領域108aが形成されており、中心部分は酸化されていない電流狭窄領域108bが形成されている。 40

【0033】

第1の上部プラグ反射鏡106の上には、p-GaAsからなるコンタクト層110、第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123からなる波長調整領域120が形成されている。尚、上述したように、各々の面発光レーザより出射される波長に対応して波長調整領域120における層の一部は除去されている。

【0034】

本実施の形態における面発光レーザ素子では、各々の面発光レーザはメサ構造となっており、このメサ構造は、形成される面発光レーザ間の半導体層をエッチングにより除去することにより形成される。メサ構造を形成した後、水蒸気中で熱処理を行なうことにより 50

、電流狭窄層 108 をメサ構造の周囲より酸化し、周辺部分の選択酸化領域 108a (酸化されている領域) と中心部分の酸化されていない電流狭窄領域 108b とが形成される。つまり、電流狭窄層 108 は、酸化された選択酸化領域 108a と、酸化されていない電流狭窄領域 108b とから構成されており、電流狭窄構造となっている。尚、メサ構造の上部より見た形状は、円形となるように形成してもよく、橢円形、正方形、長方形等の形状となるように形成してもよい。

【0035】

また、各々の面発光レーザに対応してエッティングにより除去された波長調整層 130 の上には、第 2 の上部プラグ反射鏡 107 が形成されている。第 2 の上部プラグ反射鏡 107 は TiO_2 高屈折率層と SiO_2 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が 1/4 となるように 8.5 ペア積層することにより形成されている。尚、第 2 の上部プラグ反射鏡 107 は、誘電体材料であって、高屈折率材料と低屈折率材料とを積層して形成したものであればよく、具体的には、酸化物、窒化物、フッ化物等の材料が挙げられる。高屈折率材料としては、 TiO_2 の他、 Ta_2O_5 、 HfO_2 等が挙げられる。また、低屈折率材料としては、 SiO_2 の他、 MgF_2 等が挙げられる。第 2 の上部プラグ反射鏡 107 における TiO_2 高屈折率層と SiO_2 低屈折率層の形成方法は、スパッタリングまたは真空蒸着等により形成される。更に、全体には SiN からなる保護膜 140 が形成されており、各々の面発光レーザのメサの間にはポリイミド等の樹脂材料からなる樹脂層 141 が形成されている。

【0036】

この後、p 側電極となる上部電極 111 を形成する。この上部電極 111 は、各々の面発光レーザに対応して各々形成されており、各々の上部電極 111 は、各々電極パッド 21 ~ 24 と接続されている。また、基板 101 の裏面には n 側電極となる下部電極 112 が形成されている。

【0037】

次に、本実施の形態における面発光レーザ素子における波長調整層 130 の形成方法について詳しく説明する。

【0038】

最初に、基板 101 上に、半導体材料からなる下部プラグ反射鏡 102、下部スペーサ層 103、活性層 104、上部スペーサ層 105、第 1 の上部プラグ反射鏡 106、コンタクト層 110、波長調整領域 120 を MOCVD または MBE によるエピタキシャル成長により形成する。尚、波長調整層 130 は、コンタクト層 110 と波長調整領域 120 により形成されており、波長調整領域 120 は、第 1 の調整層 121、第 2 の調整層 122、第 3 の調整層 123 を積層することにより形成されている。ここで、前述したように、第 1 の調整層 121 及び第 3 の調整層 123 は、 $GaInP$ により形成されており、第 2 の調整層 122 は、 $GaAsP$ により形成されている。

【0039】

次に、第 1 の面発光レーザ 11 が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域 120 における第 3 の調整層 123 上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0040】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第 3 の調整層 123 をウエットエッティングにより除去する。具体的には、第 3 の調整層 123 は、 $GaInP$ により形成されているため、塩酸と水の混合液によりウエットエッティングを行なう。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第 3 の調整層 123 のみを除去し、第 2 の調整層 122 の表面を露出させる。尚、この混合液は、第 3 の調整層 123 を形成している $GaInP$ をエッティングすることはできるが、第 2 の調整層 122 を形成している $GaAsP$ は殆どエッティングすることができないものである。この混合液は第 1 のエッティング液とも記載する場合がある。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0041】

10

20

30

40

50

次に、第1の面発光レーザ11及び第2の面発光レーザ12が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域120の第3の調整層123及び第2の調整層122上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0042】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第2の調整層122をウェットエッチングにより除去する。具体的には、第2の調整層122は、GaAsPにより形成されているため、硫酸と過酸化水素と水の混合液によりウェットエッチングを行なう。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第2の調整層122のみを除去し、第1の調整層121の表面を露出させる。尚、この混合液は、第2の調整層122を形成しているGaInPは殆どエッチングすることができないものである。この混合液を第2のエッチング液と記載する場合がある。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0043】

次に、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12及び第3の面発光レーザ13が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域120における第1の調整層121、第2の調整層122及び第3の調整層123上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0044】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第1の調整層121をウェットエッチングにより除去する。具体的には、第1のエッチング液によりレジストパターンの形成されていない領域の第1の調整層121を除去する。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第1の調整層121のみを除去し、コンタクト層110の表面を露出させる。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0045】

次に、第2の上部プラグ反射鏡107を形成する。具体的には、スパッタリング等により、酸化物、窒化物、フッ化物等からなる高屈折率材料からなる誘電体膜と低屈折率材料からなる誘電体膜を所定の膜厚ごとに交互に積層することにより形成する。尚、第2の上部プラグ反射鏡107は、屈折率の異なる半導体材料を積層形成したものにより形成することも可能である。

【0046】

これにより、本実施の形態における面発光レーザ素子における波長調整層130及び第2の上部プラグ反射鏡107を形成することができる。

【0047】

本実施の形態においては、波長調整層130における波長調整領域120を形成している第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123には、A1を含んでいないため、エッチング後に酸化等がされにくく、エッチング後もきれいな表面状態を維持することができる。即ち、A1は極めて腐食されやすいため、A1を含んだ材料により第1の調整層121、第2の調整層122、第3の調整層123のいずれかを形成した場合、ウェットエッチング等を行なった後の表面状態は劣悪なものとなり、この上に第2の上部プラグ反射鏡107を形成しても、剥がれてしまう場合や、厚さが不均一となる場合等がある。しかしながら、本実施の形態における面発光レーザ素子では、波長調整領域120はA1を含まない材料により形成されているため、A1の腐食等が生じることはなく、このような問題が生じることはない。

【0048】

また、本実施の形態においては、波長調整層130における波長調整領域120は、GaAsPとGaInPとを交互に形成したものであり、ウェットエッチングを行う際には、相互に一方はエッチングをすることができるが他方はエッチングすることができない2種類のエッチング液を用いてエッチングを行なっている。このような2種類のエッチング

10

20

30

40

50

液を用いてエッティングを行なうことにより、エッティング後の表面は平坦になり、オーバー エッティングされることなく所定の厚さで形成することができる。これにより、特性の安定した面発光レーザ素子を得ることができる。

【0049】

尚、本実施の形態における説明では、GaAsPとGaInPとの組み合わせの場合について説明したが、Alを含まない材料であって、更にエッティング液が異なり、発振波長よりもバンドギャップエネルギーの大きい他の半導体材料の組み合わせでもよい。本実施の形態における発振波長である894.6nmの場合、このような半導体材料の組み合わせとしては、例えばGaInAsP/GaInP、GaAs/GaInP、GaAs/GaInAsP、GaAsP/GaInAsP等が挙げられる。また、GaAsN/GaInP、GaInNAs/GaInP、GaAsSb/GaInP等のようにN、Sbが添加されていてもよい。10

【0050】

以上により、本実施の形態における面発光レーザ素子では、1つの基板101において、波長の異なる光を出射する複数の面発光レーザを形成することができる。これにより、面発光レーザ素子を製造する際に半導体層等において膜厚変動が生じた場合であっても、所望の波長に最も近い波長の光を出射するものを第1の面発光レーザ11から第4の面発光レーザ14のうちから選ぶことにより、所望の波長の半導体レーザを容易に得ることができる。これにより、所定の波長で発光する面発光レーザを有する面発光レーザ素子を低成本で製造することができる。20

【0051】

尚、波長調整領域120の上にコンタクト層110を形成した場合では、波長調整領域120の厚さに依存して各々の面発光レーザに流すことのできる電流量等も変化し、各々の面発光レーザにおける電気的な特性及び発光特性も大きく異なるものとなる。また、波長調整領域120に電流を通す場合、各層の界面におけるバンド不連続により電気抵抗が増加してしまう。しかしながら、本実施の形態における面発光レーザ素子では、コンタクト層110は波長調整領域120の下に形成されているため、面発光レーザに注入される電流は波長調整領域120を通過することなく、波長調整領域120の厚さに依存して抵抗等が変化することはない。

【0052】

次に、波長調整層130と共振器領域の間に形成される第1の上部プラグ反射鏡106の利点について説明する。例えば、波長調整層が1波長分の光学長を持つ共振器領域の中に形成されている場合、波長895nmを中心として波長1nm間隔で4波長とすると、波長調整層を構成する1層あたり1.3nmとなり、現状の結晶成長技術ではウエハ面内において均一に形成することは極めて困難である。そこで、本実施の形態においては、共振器領域と波長調整層130との間に上部プラグ反射鏡の一部となる第1の上部プラグ反射鏡106を形成する。具体的には、第1の上部プラグ反射鏡106として、n_{-Al_{0.1}Ga_{0.9}As}高屈折率層とn_{-Al_{0.9}Ga_{0.1}As}低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が1/4となるように6ペア積層することにより形成する。更に、第1の上部プラグ反射鏡106の上に、コンタクト層110を形成し、コンタクト層110の上に、波長調整領域120を形成する。波長調整領域120を形成している第1の調整層121、第2の調整層122及び第3の調整層123は、GaInP/GaAsP/GaInPの膜厚がそれぞれ16nm/16nm/16nmとなるように形成されており、現状の結晶成長技術で十分に均一に製造できるものである。よって、面発光レーザ間ににおける波長間隔のバラつきを減らすことができる。40

【0053】

また、このような構造で形成することにより、同時に電気抵抗を低減させることもできる。即ち、波長調整層130の上部には誘電体による第2の上部プラグ反射鏡107が形成され、その周囲に上部電極111が形成されるが、共振器領域の中に波長調整層を設けた場合、層構造上、コンタクト層に近い位置にAlAs被選択酸化層を設ける必要があ50

り電流経路が非常に狭くなり電気抵抗が増加する。そこで、本実施の形態では、波長調整層130（波長調整領域120の下にコンタクト層110が形成されている）と共振器領域との間に第1の上部プラグ反射鏡106を形成することにより、電流経路を拡大させることができ、電気抵抗を低減させることができる。

【0054】

尚、第2の上部プラグ反射鏡107を7ペア以上とすることにより、波長調整層130における波長調整領域120の各層の膜厚を更に増やすことができ、均一な製造が容易となり、電気抵抗も低減する。しかしながら、第2の上部プラグ反射鏡107におけるペア数が増えると、波長調整層130における光学厚さが $\frac{1}{4}$ より大きくなり、上部プラグ反射鏡全体の反射率が低下してしまう。このように第2の上部プラグ反射鏡107には、波長調整層130の光学的厚さを $\frac{1}{4}$ に近くすることができるような最適ペア数が存在する。

【0055】

次に、波長調整層130の厚さについて説明する。図4(a)に示されるように、波長調整層130の光学的な厚さPが、 $\frac{1}{4} < P < \frac{1}{2}$ である場合には、図4(b)に示されるように、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における上部プラグ反射鏡の反射率を略一定にすることができる。尚、L1は第1の面発光レーザ11における波長調整層130の表面であり、L2は第2の面発光レーザ12における波長調整層130の表面であり、L3は第3の面発光レーザ13における波長調整層130の表面であり、L4は第4の面発光レーザ14における波長調整層130の表面を示す。

【0056】

一方、図5(a)に示されるように、波長調整層130の光学的な厚さPが、 $\frac{1}{2} < P$ である場合には、図5(b)に示されるように、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における上部プラグ反射鏡の反射率が大きく異なってしまう。

【0057】

また、図6(a)に示されるように、波長調整層130の光学的な厚さPが、 $P < \frac{1}{4}$ である場合には、図6(b)に示されるように、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における上部プラグ反射鏡の反射率が大きく異なってしまう。

【0058】

以上より、波長調整層130の光学的な厚さPは、

$$\frac{1}{4} < P < \frac{1}{2}$$

であることが好ましく、このことを一般化するならば、

$$(2N-1) \frac{1}{4} < P < N \frac{1}{2}$$

であることが好ましい。尚、Nは正の整数であるが、光吸収の影響を受け、閾値電流の増加などの弊害を考慮した場合には、Nは小さい方が好ましい。

【0059】

また、波長調整領域120の厚さが薄く、波長調整領域120とコンタクト層110の光学的な厚さの和が $\frac{1}{4}$ 未満の場合には、図7(a)に示すように波長調整層130に位相調整領域131を設けてもよい。これにより、波長調整層130における光学的な厚さPを $\frac{1}{4} < P < \frac{1}{2}$ 、一般的には、 $(2N-1) \frac{1}{4} < P < 2N \frac{1}{4}$ とすることができ、図7(b)に示されるように、第1の面発光レーザ11、第2の面発光レーザ12、第3の面発光レーザ13、第4の面発光レーザ14における上部プラグ反射鏡の反射率を略一定にすることができる。尚、この場合、波長調整層130は、コンタクト層110、波長調整領域120、位相調整領域131により形成される。また、位相調整領域131は、AlGaAsにより形成されており、図7(a)に示すように、位相調整領域131は、コンタクト層110の下に形成してもよく、図8に示すように、位相調整領域131は、コンタクト層110と波長調整領域120との間に形成してもよい。更には

10

20

30

40

50

、図9に示すように、位相調整領域131aをGaAsPとGaInPとを交互に積層した積層膜により形成してもよい。

【0060】

また、本実施の形態における面発光レーザ素子は、波長調整領域120において複数の膜を形成した構造のものであるが、波長調整層130において、光学的な膜厚が $1/4$ となる位置は、形成されている膜（調整層）の層数をMとした場合（Mは正の整数）、Mが奇数の場合には、上から $(M+1)/2$ 番目の膜（調整層）であり、Mが偶数の場合には、上から $M/2$ 番目または、 $(M/2)+1$ 番目の膜（調整層）となるように形成されていることが好ましい。

【0061】

10

〔第2の実施の形態〕

次に、第2の実施の形態における面発光レーザ素子について説明する。尚、本実施の形態における面発光レーザ素子は、波長が894.6nmの面発光レーザであって、波長調整領域が下部プラグ反射鏡に設けられている構造のものである。本実施の形態における面発光レーザ素子150は、図10及び図11に示すように、複数の面発光レーザを有しており、具体的には、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154を有している。尚、図10は本実施の形態の説明のため簡略化されており、便宜上コンタクト層等の記載は省略されている。また、図11は、図10における一点鎖線10A-10Bにおいて切断した断面図である。

【0062】

20

本実施の形態における面発光レーザ素子150は、300μm角の半導体チップ上に形成されており、この半導体チップ上に形成された第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154は、各々に対応して設けられた電極パッドに接続されている。具体的には、第1の面発光レーザ151には電極パッド161が接続されており、第2の面発光レーザ152には電極パッド162が接続されており、第3の面発光レーザ153には電極パッド163が接続されており、第4の面発光レーザ154には電極パッド164が接続されている。

【0063】

また、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154は、出射される光の波長が相互に異なるものである。即ち、第1の面発光レーザ151より出射される波長1、第2の面発光レーザ152より出射される波長2、第3の面発光レーザ153より出射される波長3、第4の面発光レーザ154より出射される波長4は、相互に異なる波長である。

30

【0064】

尚、本実施の形態における面発光レーザ素子は、発振波長が894.6nmとなる面発光レーザを得るためのものであり、300μm角の半導体チップ（基板）に4つの面発光レーザが形成されている。面発光レーザ素子では、狭い領域に複数の面発光レーザを形成することができるため、発光させる面発光レーザを切換えた場合であっても、発光位置は殆ど変わらない。

【0065】

40

本実施の形態における面発光レーザ素子は、半導体等からなる基板101上に、屈折率の異なる半導体材料を交互に積層形成することにより、第1の下部プラグ反射鏡172を形成し、第1の下部プラグ反射鏡172上には、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部プラグ反射鏡174、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105が形成されている。上部スペーサ層105上には、上部プラグ反射鏡176、コンタクト層177が形成されている。また、コンタクト層177の上には上部電極178が形成され接続されており、基板101の裏面には下部電極112が形成されている。尚、本実施の形態では、波長調整領域180と位相調整領域173とにより波長調整層190が形成されており、第1の下部プラグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部プラグ反射鏡174により、下部プラグ反射鏡1

50

70が形成されている。

【0066】

また、基板101上に形成される半導体層となる第1の下部プラグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部プラグ反射鏡174、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、上部プラグ反射鏡176、コンタクト層177は、半導体材料をエピタキシャル成長させることにより形成されている。具体的には、これらの半導体層は、MOCVDまたはMBEによるエピタキシャル成長により形成されている。

【0067】

本実施の形態における面発光レーザ素子では、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154において、各々の波長調整領域180の厚さが異なっている。具体的には、波長調整領域180は、第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183により形成されている。本実施の形態では、第1の調整層181及び第3の調整層183はGaInPにより形成されており、第2の調整層182はGaaSPにより形成されている。尚、第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183を形成している材料は、この逆であってもよい。

【0068】

このように本実施の形態における面発光レーザ素子は、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154における波長調整領域180の厚さ、即ち、波長調整層190の厚さが異なるものである。

【0069】

具体的には、第1の面発光レーザ151には、波長調整領域180において、第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183が形成されており、この波長調整領域180を含む波長調整層190の厚さに対応した波長1の光が出射される。

【0070】

また、第2の面発光レーザ152には、波長調整領域180のうち、第1の調整層181、第2の調整層182が形成されており、この波長調整領域180を含む波長調整層190の厚さに対応した波長2の光が出射される。

【0071】

また、第3の面発光レーザ153には、波長調整領域180において、第1の調整層181が形成されており、この波長調整領域180を含む波長調整層190の厚さに対応した波長3の光が出射される。

【0072】

また、第4の面発光レーザ154には、波長調整領域180は形成されないため、波長調整領域180が形成されていない場合の波長調整層190の厚さに対応した波長4の光が出射される。

【0073】

このようにして、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154における波長調整領域180の厚さを少しずつ変えることができ、波長調整領域180における各々の厚さに対応した波長の光を各々出射させることができる。

【0074】

本実施の形態においては、基板101は、n-GaAs基板を用いている。また、下部プラグ反射鏡170は、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が1/4となるように35.5ペア積層することにより形成されている。

【0075】

下部プラグ反射鏡170は前述したように、基板101の上に、第1の下部プラグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部プラグ反射鏡1

10

20

30

40

50

74により形成されている。従って、位相調整領域173及び波長調整領域180は、下部プラグ反射鏡170の内部に形成されている。尚、本実施の形態においては、図12に示されるように、位相調整領域173の光学的な膜厚と波長調整領域180の光学的な膜厚の半分との和、即ち、位相調整領域173の下部から波長調整領域180の中心部分までの光学的な膜厚が $\sqrt{4}$ となるように形成されている。

【0076】

下部プラグ反射鏡170の上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる下部スペーサ層103を介し、GaInAs量子井戸層/GaInPAs障壁層からなる活性層104が形成されている。活性層104上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる上部スペーサ層105が形成されている。尚、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105により1波長光学厚さとなる共振器領域が形成されている。

【0077】

上部プラグ反射鏡176は、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\sqrt{4}$ となるように24ペア積層することにより形成されている。上部プラグ反射鏡176の低屈折率層の一つは、AlAsからなる電流狭窄層108により形成されており、電流狭窄層108の周辺部分は選択酸化されて選択酸化領域108aが形成されており、中心部分は酸化されていない電流狭窄領域108bが形成されている。また、上部プラグ反射鏡176の上には、p-GaAsからなるコンタクト層177が形成されている。

【0078】

図12(a)に示されるように、位相調整領域173の光学的な膜厚の値と波長調整領域180の光学的な膜厚の半分の値との和が約 $\sqrt{4}$ である場合には、図12(b)に示されるように、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154における下部プラグ反射鏡の反射率を略一定にすることができる。尚、L1は第1の面発光レーザ151における波長調整層190の表面であり、L2は第2の面発光レーザ152における波長調整層190の表面であり、L3は第3の面発光レーザ153における波長調整層190の表面であり、L4は第4の面発光レーザ154における波長調整層190の表面を示す。

【0079】

本実施の形態における面発光レーザ素子では、各々の面発光レーザはメサ構造となっており、このメサ構造は、形成される面発光レーザ間の半導体層をドライエッチング等により除去することにより形成される。メサ構造を形成した後、水蒸気中で熱処理を行なうことにより、電流狭窄層108をメサ構造の周囲より酸化し、周辺部分の選択酸化領域108a(酸化されている領域)と中心部分の酸化されていない電流狭窄領域108bとが形成される。つまり、電流狭窄層108は、酸化された選択酸化領域108aと、酸化されていない電流狭窄領域108bとから構成されており、電流狭窄構造となっている。具体的には、電流狭窄層108を形成しているAlAsを水蒸気中で熱処理することにより酸化させてAl_xO_yを形成し、このように形成されたAl_xO_yにより選択酸化領域108aが形成される。この際、電流狭窄層108において酸化されていないAlAsにより電流狭窄領域108bが形成される。尚、メサ構造の上部より見た形状は、円形となるように形成してもよく、橢円形、正方形、長方形等の形状となるように形成してもよい。

【0080】

更に、全体にはSiNからなる保護膜140が形成されており、各々の面発光レーザのメサの間にはポリイミド等の樹脂材料を埋め込むことにより樹脂層141が形成されている。この後、p側電極となる上部電極178を形成する。この上部電極178は、各々の面発光レーザに対応して各々形成されており、各々の上部電極178は、各々電極パッド161～164と接続されている。

【0081】

具体的には、SiNからなる保護膜140を形成し、各々の面発光レーザのメサの間にポリイミド等の樹脂材料を埋め込み平坦化することにより樹脂層141を形成する。この

10

20

30

40

50

後、コンタクト層177の上の保護膜140及び樹脂層141を除去し、コンタクト層177を露出させ、コンタクト層177の上に、上部電極178を形成する。尚、基板101の裏面にはn側電極となる下部電極112が形成されている。

【0082】

本実施の形態における面発光レーザ素子は、基板101側とは反対側にレーザ光が出射されるものである。尚、本実施の形態においては、SiNにより形成されている保護膜140により、メサエッティングで現れた腐食しやすいAlを含む層の側面や底面を誘電体により保護することができるため、信頼性を向上させることができる。

【0083】

次に、波長調整領域180と共振器の間に形成される第2の下部プラグ反射鏡174の利点について説明する。波長調整領域が1波長分の光学長を持つ共振器の中に形成されている場合、波長895nmを中心として波長1nm間隔で4波長とすると、波長調整領域を構成する調整層の1層あたりが1nm程度となり、現状の結晶成長技術ではウエハ面内における均一化は極めて困難である。

【0084】

そこで、本実施の形態においては、共振器と波長調整領域180の間に下部プラグ反射鏡170の一部となる第2の下部プラグ反射鏡174を形成する。具体的には、第2の下部プラグ反射鏡174として、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が/4となるように10ペア積層することにより形成する。これにより、波長調整領域180を形成している第1の調整層181、第2の調整層182及び第3の調整層183におけるGaInP/GaAsP/GaInPの膜厚が、それぞれ16nm/16nm/16nmとすることができ、現状の結晶成長技術により十分に均一に製造することができるため、第1の実施の形態と同様に、波長間隔のバラつきを改善することができる。

【0085】

尚、第2の下部プラグ反射鏡174を11ペア以上形成した場合、波長調整領域180における各々の層の膜厚をより一層厚くすることが可能であるため、均一性をさらに高めることができる。しかしながら、図13に示されるように、第2の下部プラグ反射鏡174におけるペア数が増加すると、波長調整領域180における光学膜厚が/4(プラグ反射鏡の光学膜厚)より大幅に厚くなるため、下部プラグ反射鏡170全体の反射率が低下してしまい好ましくない。このように第2の下部プラグ反射鏡には、波長調整領域180の光学的膜厚が/4に近くなるべき最適ペア数が存在する。

【0086】

一方、図13(a)に示されるように、位相調整領域173の光学的な膜厚の値と波長調整領域180の光学的な膜厚の半分の値との和が/4以上である場合には、図13(b)に示されるように、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152、第3の面発光レーザ153、第4の面発光レーザ154における各々の下部プラグ反射鏡の反射率が大きく異なってしまう。これに対し、本実施の形態においては、図12(b)に示されるように、各々の下部プラグ反射鏡における反射率の均一性を高めることができる。

【0087】

次に、本実施の形態における面発光レーザ素子における波長調整領域180の形成方法について詳しく説明する。

【0088】

最初に、基板101上に、半導体材料からなる第1の下部プラグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180をMOCVDまたはMBEによるエピタキシャル成長により形成する。前述したように、波長調整層190は、位相調整領域173と波長調整領域180により形成されており、波長調整領域180は、第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183を積層することにより形成されている。尚、第1の調整層181及び第3の調整層183は、GaInPにより形成されており、第2の調整層

10

20

30

40

50

182は、GaAsPにより形成されている。

【0089】

次に、第1の面発光レーザ151が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域180における第3の調整層183上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0090】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第3の調整層183をウエットエッチングにより除去する。具体的には、第3の調整層183は、GaInPにより形成されているため、塩酸と水の混合液によりウエットエッチングを行なう。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第3の調整層183のみを除去し、第2の調整層182の表面を露出させる。尚、この混合液は、第3の調整層183を形成しているGaInPをエッチングすることはできるが、第2の調整層182を形成しているGaAsPは殆どエッチングすることができない。この混合液は第1のエッチング液とも記載する場合がある。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0091】

次に、第1の面発光レーザ151及び第2の面発光レーザ152が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域180の第3の調整層183及び第2の調整層182上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0092】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第2の調整層182をウエットエッチングにより除去する。具体的には、第2の調整層182は、GaAsPにより形成されているため、硫酸と過酸化水素と水の混合液によりウエットエッチングを行なう。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第2の調整層182のみを除去し、第1の調整層181の表面を露出させる。尚、この混合液は、第2の調整層182を形成しているGaAsPをエッチングすることはできるが、第1の調整層181を形成しているGaInPは殆どエッチングすることができない。この混合液を第2のエッチング液と記載する場合がある。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0093】

次に、第1の面発光レーザ151、第2の面発光レーザ152及び第3の面発光レーザ153が形成される領域にレジストパターンを形成する。具体的には、波長調整領域180における第1の調整層181、第2の調整層182及び第3の調整層183上にフォトレジストを塗布し、露光装置による露光、現像を行なうことにより、レジストパターンを形成する。

【0094】

次に、レジストパターンの形成されていない領域の第1の調整層181をウエットエッチングにより除去する。具体的には、第1のエッチング液によりレジストパターンの形成されていない領域の第1の調整層181を除去する。これによりレジストパターンが形成されていない領域の第1の調整層181のみを除去し、位相調整領域173の表面を露出させる。この後、有機溶剤等によりレジストパターンを除去する。

【0095】

次に、第2の下部プラック反射鏡174を形成する。これにより、本実施の形態における面発光レーザ素子における波長調整領域180を含む下部プラック反射鏡170を形成することができる。

【0096】

本実施の形態では、波長調整層190において波長調整領域180を形成している第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183には、A1が含まれていないため、エッチング後に酸化等がされにくく、エッチング後もきれいな表面状態を維持することができる。即ち、A1は極めて腐食されやすいため、A1を含んだ材料により第1の調整層181、第2の調整層182、第3の調整層183のいずれかを形成した場合、ウ

10

20

30

40

50

エットエッティング等を行なった後の表面状態は劣悪なものとなり、この上に第2の下部ブラング反射鏡174を形成しても、剥がれてしまう場合や、厚さが不均一となる場合等がある。しかしながら、本実施の形態における面発光レーザ素子では、波長調整領域180はA1を含まない材料により形成されているため、A1の腐食等が生じることはなく、このような問題が生じることはない。

【0097】

また、本実施の形態では、波長調整層190における波長調整領域180は、GaAsPとGaInPとを交互に形成したものであり、エットエッティングを行う際には、相互に一方はエッティングをすることができるが他方はエッティングすることができない2種類のエッティング液を用いてエッティングを行なっている。このような2種類のエッティング液を用いてエッティングを行なうことにより、エッティング後の表面は平坦になり、オーバーエッティングされることなく所定の厚さで形成することができる。これにより、特性の安定した面発光レーザ素子を得ることができる。

10

【0098】

尚、本実施の形態における説明では、GaAsPとGaInPとの組み合わせの場合について説明したが、A1を含まない材料であって、更にエッティング液が異なり、発振波長よりもバンドギャップエネルギーの大きい他の半導体材料の組み合わせでもよい。本実施の形態における発振波長である894.6nmの場合、このような半導体材料の組み合わせとしては、例えばGaInAsP/GaInP、GaAs/GaInP、GaAs/GaInAsP、GaAsP/GaInAsP等が挙げられる。また、GaAsN/GaInP、GaInNAs/GaInP、GaAsSb/GaInP等のようにN、Sbが添加されていてもよい。

20

【0099】

以上により、本実施の形態における面発光レーザ素子では、1つの基板101において、波長の異なる光を出射する複数の面発光レーザを形成することができる。これにより、面発光レーザ素子を製造する際に半導体層等において膜厚変動が生じた場合であっても、所望の波長に最も近い波長の光を出射するものを第1の面発光レーザ151から第4の面発光レーザ154のうちから選ぶことにより、所望の波長の半導体レーザを容易に得ることができる。これにより、所定の波長で発光する面発光レーザを有する面発光レーザ素子を低コストで製造することができる。

30

【0100】

尚、上記以外の内容については、第1の実施の形態と同様である。

【0101】

〔第3の実施の形態〕

次に、第3の実施の形態について説明する。本実施の形態における面発光レーザは、波長780nmの12chの面発光レーザ素子であり、図14及び図15に基づき説明する。尚、図14は、本実施の形態における面発光レーザ素子の上面図であり、図15(a)は、図14における一点鎖線14A-14Bにおいて切断した断面図、図15(b)は、図14における一点鎖線14C-14Dにおいて切断した断面図である。

【0102】

40

本実施の形態における面発光レーザ素子200は、300μm角の半導体チップ上に形成されており、この半導体チップ上に形成された第1の面発光レーザ201、第2の面発光レーザ202、第3の面発光レーザ203、第4の面発光レーザ204、第5の面発光レーザ205、第6の面発光レーザ206、第7の面発光レーザ207、第8の面発光レーザ208、第9の面発光レーザ209、第10の面発光レーザ210、第11の面発光レーザ211、第12の面発光レーザ212は、各々に対応して設けられた電極パッドに接続されている。

【0103】

具体的には、第1の面発光レーザ201には電極パッド221が接続されており、第2の面発光レーザ202には電極パッド222が接続されており、第3の面発光レーザ20

50

3には電極パッド223が接続されており、第4の面発光レーザ204には電極パッド224が接続されており、第5の面発光レーザ205には電極パッド225が接続されており、第6の面発光レーザ206には電極パッド226が接続されており、第7の面発光レーザ207には電極パッド227が接続されており、第8の面発光レーザ208には電極パッド228が接続されており、第9の面発光レーザ209には電極パッド229が接続されており、第10の面発光レーザ210には電極パッド230が接続されており、第11の面発光レーザ211には電極パッド231が接続されており、第12の面発光レーザ212には電極パッド232が接続されている。

【0104】

また、第1の面発光レーザ201、第2の面発光レーザ202、第3の面発光レーザ203、第4の面発光レーザ204、第5の面発光レーザ205、第6の面発光レーザ206、第7の面発光レーザ207、第8の面発光レーザ208、第9の面発光レーザ209、第10の面発光レーザ210、第11の面発光レーザ211、第12の面発光レーザ212は、出射される光の波長が相互に異なるものである。即ち、第1の面発光レーザ201より出射される波長1、第2の面発光レーザ202より出射される波長2、第3の面発光レーザ203より出射される波長3、第4の面発光レーザ204より出射される波長4、第5の面発光レーザ205より出射される波長5、第6の面発光レーザ206より出射される波長6、第7の面発光レーザ207より出射される波長7、第8の面発光レーザ208より出射される波長8、第9の面発光レーザ209より出射される波長9、第10の面発光レーザ210より出射される波長10、第11の面発光レーザ211より出射される波長11、第12の面発光レーザ212より出射される波長12は、相互に異なる波長である。 10 20

【0105】

本実施の形態における面発光レーザ素子は、半導体等からなる基板101上に、下部プラグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部プラグ反射鏡106が形成されており、第1の上部プラグ反射鏡106の上には、第1の波長調整層250、第2の上部プラグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部プラグ反射鏡272、コンタクト層240、上部電極111が形成されている。また、コンタクト層240は上部電極111と接続されており、基板101の裏面には下部電極112が形成されている。尚、本実施の形態では、基板101上に形成される半導体層となる下部プラグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部プラグ反射鏡106、第1の波長調整層250、第2の上部プラグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部プラグ反射鏡272、コンタクト層240は、半導体材料をエピタキシャル成長させることにより形成されている。具体的には、これら半導体層は、MOCVDまたはMBEによるエピタキシャル成長により形成されている。尚、本実施の形態では、第1の上部プラグ反射鏡106、第1の波長調整層250、第2の上部プラグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部プラグ反射鏡272により上部プラグ反射鏡が形成されている。また、第1の波長調整層250、第2の波長調整層260は下部プラグ反射鏡102の内部に形成したものであってもよい。 30 40

【0106】

本実施の形態においては、基板101は、n-GaAs基板を用いている。また、下部プラグ反射鏡102は、n-Al_{0.1}Ga_{0.9}As高屈折率層とn-Al_{0.9}Ga_{0.1}As低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が1/4となるように35.5ペア積層することにより形成されている。

【0107】

下部プラグ反射鏡102の上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる下部スペーサ層103を介し、GaInAs量子井戸層/GaInPAs障壁層からなる活性層104が形成されている。活性層104上には、Al_{0.2}Ga_{0.8}Asからなる上部スペーサ層105、第1の上部プラグ反射鏡106が形成されている。尚、下部スペーサ層1 50

03、活性層104、上部スペーサ層105は1波長光学厚さとなる共振器領域が形成されている。

【0108】

第1の上部プラグ反射鏡106は、 $n - Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 高屈折率層と $n - Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $/4$ となるように3.5ペア積層することにより形成されている。尚、第1の上部プラグ反射鏡106の低屈折率層の一つは、図15には不図示のAlAsからなる電流狭窄層により形成されている。

【0109】

第1の上部プラグ反射鏡106の上には、第1の波長調整層250が形成されている。第1の波長調整層250は、 $p - Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ からなる位相調整領域254、 $GaInP$ からなる第1の調整層251、 $GaAsP$ からなる第2の調整層252、 $GaInP$ からなる第3の調整層253を積層することにより形成されている。

【0110】

第1の波長調整層250の上には、第2の上部プラグ反射鏡271が形成されている。第2の上部プラグ反射鏡271は、 $n - Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 高屈折率層と $n - Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $/4$ となるように4.5ペア積層することにより形成されている。

【0111】

第2の上部プラグ反射鏡271の上には、第2の波長調整層260が形成されている。第2の波長調整層260は、 $p - Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ からなる位相調整領域263、 $GaInP$ からなる第4の調整層261、 $GaAsP$ からなる第5の調整層262を積層することにより形成されている。

【0112】

第2の波長調整層260の上には、第3の上部プラグ反射鏡272が形成されている。第3の上部プラグ反射鏡272は、 $n - Al_{0.1}Ga_{0.9}As$ 高屈折率層と $n - Al_{0.9}Ga_{0.1}As$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $/4$ となるように17ペア積層することにより形成されている。

【0113】

第3の上部プラグ反射鏡272の上には、 $p - GaAs$ からなるコンタクト層240が形成されており、コンタクト層240の上には上部電極111が形成され、基板101の裏面には下部電極112が形成されている。

【0114】

本実施の形態では、各々の面発光レーザに対応して各々のchごとに、第1の波長調整層250及び第2の波長調整層260が異なる厚さとなるように形成されている。尚、厚さの異なる第1の波長調整層250及び第2の波長調整層260は、第1の実施の形態と同様の方法により形成することができる。具体的には、フォトリソグラフィと選択的エッティングを行なうことにより、波長調整層の層数を異なるように形成することができる。例えば、 $GaAsP$ ($GaAs$ の場合も同様)をエッティングする際には、硫酸、過酸化水素、水の混合液を用いることができ、 $GaInP$ をエッティングする際には、塩酸、水の混合液を用いることができる。第1の波長調整層250の選択エッティングを行なった後に、第2の上部プラグ反射鏡271及び第2の波長調整層260を結晶成長により形成し、第2の波長調整層260の選択エッティングを行い、第3の上部BDR272及びコンタクト層240を結晶成長により形成する。尚、各々の面発光レーザの形成に必要となるメサのエッティングは、ドライエッティング法により行なわれている。また、図15に示されるように、コンタクト層240上に各々面発光レーザのp側電極となる上部電極111を形成し、基板101の裏面にn側共通電極となる下部電極112を形成する。本実施の形態における面発光レーザ素子では、基板101と反対側にレーザ光が放射される。

【0115】

特許文献2では、波長調整層は1波長分の光学長を持つ共振器領域の中に形成されてい

10

20

30

40

50

る。例えば、この場合、波長 780 nmを中心として波長 3 nm 間隔とすると、波長調整層を構成する 1 層あたり 0.9 nm となる。これは約 3 原子層に相当する厚さであり、現状の結晶成長技術ではウエハ面内において均一に形成することは困難である。また、X 波長分 (X = 2, 3, . . .) の光学長を持つ共振器領域とすると、波長調整層を構成する 1 層あたり $0.9 \times X$ nm となり膜厚が増加するが、この場合、緩和振動周波数が $X^{-1/2}$ 倍だけ悪化し、高速変調動作が困難となるなどの弊害が生じる。

【0116】

そこで、図 15 に示されるように、本実施の形態における面発光レーザ素子においては、共振器領域と第 1 の波長調整層 250 との間に第 1 の上部プラグ反射鏡 106 を形成する。具体的には、第 1 の波長調整層 250 と共振器領域との間に、4.5 ペアの p-A_{1.0.1}Ga_{0.9}As 高屈折率層と n-A_{1.0.1}Ga_{0.9}As 低屈折率層とを交互に積層することにより第 1 の上部プラグ反射鏡 106 を形成する。この場合、異なる発光素子間での発振波長間隔を 3 nm としても、第 1 の波長調整層 250 を形成している GaInP/GaAsP/GaInP の膜厚は、それぞれ 11.6 nm / 11.6 nm / 11.6 nm となり、現状の結晶成長技術で十分に均一に製造することができる。よって、面発光レーザ間における波長間隔のバラつきを減らすことができる。

【0117】

また、更に、第 1 の波長調整層 250 の上に、第 2 の上部プラグ反射鏡 271 及び第 2 の波長調整層 260 を形成する。これにより、第 1 の波長調整層 250 をより均一に発振波長間隔を狭くして形成することができる。図 16 は、図 14 及び図 15 に示される本実施の形態における面発光レーザ素子において、第 1 の波長調整層 250 及び第 2 の波長調整層 260 の膜厚（光学的な膜厚で示す。 / 4 を 0.25 とする。）と発振波長の関係を示す。尚、第 1 の波長調整層 250 の膜厚は、第 1 の波長調整層 250 を形成している GaInP/GaAsP/GaInP について選択エッチングをすることにより変化させることができる。同様に、第 2 の波長調整層 260 の膜厚は、第 2 の波長調整層 260 を形成している GaInP/GaAsP について選択エッチングをすることにより変化させることができる。

【0118】

図 16 に示されるように、第 2 の波長調整層 260 が同じ膜厚においては、第 1 の波長調整層 250 の膜厚を変化させること、即ち、第 1 の波長調整層 250 を形成している 11.6 nm / 11.6 nm / 11.6 nm の GaInP/GaAsP/GaInP を 1 層ずつエッチングすることで、約 3 nm の発振波長変化を得ることができる。また、第 1 の波長調整層 250 が同じ膜厚とし、第 2 の波長調整層 260 の膜厚を変化させること、即ち、第 2 の波長調整層 260 を形成している 14 nm / 11 nm の GaInP/GaAsP を 1 層ずつエッチングすることにより、約 1 nm の発振波長変化を得ることができる。このように、図 15 に示されるように、第 1 の波長調整層 250 及び第 2 の波長調整層 260 の膜厚をそれぞれ 4 水準及び 3 水準で変化させることで、 $4 \times 3 = 12$ 水準で発振波長を異なる面発光レーザを形成することができる。また、第 1 の波長調整層 250 及び第 2 の波長調整層 260 の膜厚を調整することにより、図 16 に示されるように、12 個の面発光レーザを全て約 1 nm 間隔の異なる波長で発振させることができる。

【0119】

次に、第 1 の波長調整層 250 に形成される位相調整領域 254 について説明する。図 17 (a) に示されるように、位相調整領域 254 を形成することなく第 1 の調整層 251、第 2 の調整層 252 及び第 3 の調整層 253 を形成した場合において、GaInP/GaAsP/GaInP の各々の層をウエットエッチングにより除去した場合の反射率を図 17 (b) に示す。図 17 (b) に示されるように、位相調整領域 254 を形成しない場合には、第 1 の波長調整層 250 の厚さが変化することにより反射率が大きく変化してしまう。これは、各々の波長において閾値電流等のレーザ特性におけるバラツキが大きくなることを意味する。

【0120】

10

20

30

40

50

一方、図18(a)に示すように、第1の波長調整層250に位相調整領域254を形成することにより、第1の波長調整層250における光学的な厚さが $1/4$ となる位置をGaAsPからなる第2の調整層252が形成されている位置にすることができる。これにより、図18(b)に示されるように、反射率の変化を少なくすることができる。

【0121】

即ち、第1の波長調整層250の光学的な厚さP1は、

$$1/4 \leq P1 < 1/2$$

であることが好ましく、このことを一般化するならば、

$$(2N-1)/4 \leq P1 < 2N/4$$

であることが好ましい。尚、Nは正の整数である。

10

【0122】

また、第1の波長調整層250において光学的な膜厚が $1/4$ となる位置は、形成されている膜(調整層)の層数をMとした場合(Mは正の整数)、Mが奇数の場合には、上から(M+1)/2番目の膜(調整層)であり、Mが偶数の場合には、上からM/2番目または、(M/2)+1の膜(調整層)となるように形成されていることが好ましい。

【0123】

図19(a)に示されるように、位相調整領域254は、p-Al_{0.1}Ga_{0.9}Asにより形成してもよく、図19(b)に示されるように、GaInP及びGaAsPを交互に積層することに位相調整領域254aを形成してもよい。尚、上記においては、第1の波長調整層250について説明したが、第2の波長調整層260についても同様である。

20

【0124】

ところで、波長調整層としては、特許文献4ではAlGaAsとInGaPの組み合わせが開示されており、特許文献2ではGaAsとAlGaAsの組み合わせが開示されている。いずれもAlを含むAlGaAsを用いているが、Alを含んでいるので酸化など腐食しやすく信頼性に問題があった。特に、本実施の形態のように波長調整層のエッチング後に半導体層の結晶成長を行う場合においては、波長調整層表面は製造工程において大気に触れるため、Alの表面が酸化され、その上に上部ブレーリング反射鏡を結晶成長させることは極めて困難である。そこで、本実施の形態における面発光レーザ素子では、特許文献2、4とは異なり、Alを含まないGaInPとGaAsPとにより波長調整層を形成することにより、製造工程における腐食の進行を極めて遅くすることができ、高い信頼性を得ることができる。

30

【0125】

尚、本実施の形態における説明では、GaAsPとGaInPとの組み合わせの場合について説明したが、Alを含まない材料であって、更にエッチング液が異なり、発振波長よりもバンドギャップエネルギーの大きい他の半導体材料の組み合わせでもよい。本実施の形態における発振波長である780nmの場合、このような半導体材料の組み合わせとしては、例えばGaInAsP/GaInP、GaAsP/GaInAsP等が挙げられる。また、波長が1μm以上の長波長においてはGaAsPの代わりにGaAsを用いこともできる。この場合には、GaAs基板に対してGaAsPのように歪を有していないので扱いやすい。

40

【0126】

尚、上記以外の内容については、第1の実施の形態と同様である。

【0127】

〔第4の実施の形態〕

次に、第4の実施の形態について説明する。図20に基づき、本実施の形態における面発光レーザ素子について説明する。本実施の形態における面発光レーザ素子300は、基板301上に8個の面発光レーザを有するものであり、第1から第3の実施の形態により異なる波長を出射する面発光レーザが形成されているものであって、更に、同じ波長を発光する面発光レーザが2個ずつ形成されているものである。

50

【0128】

具体的には、本実施の形態における面発光レーザ素子300は、基板301上に第1の面発光レーザ311、第2の面発光レーザ312、第3の面発光レーザ313、第4の面発光レーザ314、第5の面発光レーザ315、第6の面発光レーザ316、第7の面発光レーザ317、第8の面発光レーザ318を有している。第1の面発光レーザ311から第8の面発光レーザ318は、各々電極パッドに接続されている。具体的には、第1の面発光レーザ311には電極パッド321が接続されており、第2の面発光レーザ312には電極パッド322が接続されており、第3の面発光レーザ313には電極パッド323が接続されており、第4の面発光レーザ314には電極パッド324が接続されており、第5の面発光レーザ315には電極パッド325が接続されており、第6の面発光レーザ316には電極パッド326が接続されており、第7の面発光レーザ317には電極パッド327が接続されており、第8の面発光レーザ318には電極パッド328が接続されている。10

【0129】

また、第1の面発光レーザ311から第8の面発光レーザ318は、同じ波長のものが2個ずつとなるように形成されている。具体的には、第1の面発光レーザ311及び第2の面発光レーザ312より出射される光は同じ波長1、第3の面発光レーザ313及び第4の面発光レーザ314より出射される光は同じ波長2、第5の面発光レーザ315及び第6の面発光レーザ316より出射される光は同じ波長3、第7の面発光レーザ317及び第8の面発光レーザ318より出射される光は同じ波長4であり、波長1から4は、相互に異なる波長である。このように各々の面発光レーザにおいて異なる波長の光を出射するために、第1の実施の形態と同様に波長調整層を設け、各々の面発光レーザごとに、波長調整層の厚さを変えて形成している。尚、電極パッド321から328の大きさは、各々約50μm角であり、基板301は300μm角の大きさの半導体チップである。20

【0130】

本実施の形態における面発光レーザ素子では、同じ波長の光を発光する面発光レーザが2個ずつ存在しているため、不良や故障等により、同じ波長の光を出射する面発光レーザのうち、一方が発光しなくなったとしても他方を用いることができる。よって、面発光レーザ素子の寿命を長寿命にするとともに、歩留りをより向上させることができる。また、本実施の形態における面発光レーザ素子では、必要な波長に最も近い波長の素子のみならず、2番目に近い波長の素子を用いてもよく、それを予備の面発光レーザとして用いることで長寿命化させることができる。30

【0131】

尚、上記以外の内容については、第1から第3の実施の形態と同様である。

【0132】**〔第5の実施の形態〕**

次に、第5の実施の形態について説明する。本実施の形態は、第1から第4の実施の形態における面発光レーザ素子を用いた原子発振器である。図21に基づき本実施の形態における原子発振器について説明する。本実施の形態における原子発振器は、CPT方式の小型原子発振器であり、光源410、コリメートレンズ420、/4波長板430、アルカリ金属セル440、光検出器450、変調器460を有している。40

【0133】

光源410は、第1から第4の実施の形態における面発光レーザ素子が用いられている。アルカリ金属セル440には、アルカリ金属としてCs(セシウム)原子ガスが封入されており、D1ラインの遷移を用いるものである。光検出器450は、フォトダイオードが用いられている。

【0134】

本実施の形態における原子発振器では、光源410より出射された光をセシウム原子ガスが封入されたアルカリ金属セル440に照射し、セシウム原子における電子を励起する50

。アルカリ金属セル440を透過した光は光検出器450において検出され、光検出器450において検出された信号は変調器460にフィードバックされ、変調器460により光源410における面発光レーザ素子を変調する。

【0135】

図22に、CPTに関連する原子エネルギー準位の構造を示す。二つの基底準位から励起準位に電子が同時に励起されると光の吸収率が低下することを利用する。面発光レーザは搬送波波長が894.6nmに近い素子を用いている。搬送波の波長は面発光レーザの温度、もしくは出力を変化させてチューニングすることができる。温度や出力を上げると長波長にシフトするため、アルカリ金属セルの光密度の変動は好ましくないので温度変化を利用するのが好ましい。具体的に、波長の温度依存性は0.05nm/程度で調整できる。図23に示すように、変調をかけることで搬送波の両側にサイドバンドが発生し、その周波数差がCs原子の固有振動数である9.2GHzに一致するように4.6GHzで変調させている。図24に示すように、励起されたCsガスを通過するレーザ光はサイドバンド周波数差がCs原子の固有周波数差に一致した時に最大となるので、光検出器450の出力が最大値を保持するように変調器460においてフィードバックして光源410における面発光レーザ素子の変調周波数を調整する。原子の固有振動数が極めて安定なので変調周波数は安定した値となり、この情報がアウトプットとして取り出される。尚、波長が894.6nmの場合では、±1nmの範囲の波長の光源が必要となる。即ち、893.6nm~895.6nmの範囲の波長の光源が必要となる。

【0136】

本実施の形態における原子発振器は第1から第4の実施の形態における面発光レーザ素子を用いているため、原子発振器を低コストで作製し提供することができる。また、更に、第3の実施の形態及び第4の実施の形態における面発光レーザ素子を用いることにより、より長寿命の原子発振器を提供することができる。

【0137】

また、本実施例ではアルカリ金属としてCsを用い、そのD1ラインの遷移を用いるために波長が894.6nmの面発光レーザを用いたが、CsのD2ラインを利用する場合は852.3nmを用いることもできる。また、アルカリ金属としてRb(ルビジウム)を用いることもでき、D1ラインを利用する場合は795.0nm、D2ラインを利用する場合は780.2nmを用いることができる。活性層の材料組成などは波長に応じて設計することができる。また、Rbを用いる場合の変調周波数は、⁸⁷Rbでは3.4GHz、⁸⁵Rbでは1.5GHzで変調させる。尚、これらの波長においても、±1nmの範囲の波長の光源が必要となる。即ち、CsのD2ラインを利用する場合は851.3nm~853.3nmの範囲の波長の光源が必要となる。また、RbのD1ラインを利用する場合は794.0nm~796.0nmの範囲の波長の光源が必要となる。また、RbのD2ラインを利用する場合は779.2nm~781.2nmの範囲の波長の光源が必要となる。

【0138】

以上、本発明の実施に係る形態について説明したが、上記内容は、発明の内容を限定するものではない。また、本発明の実施に係る形態では、面発光レーザ素子を原子発振器に用いた場合について説明したが、第1から第4の実施の形態における面発光レーザ素子は、ガスセンサー等の所定の波長の光が必要な他の装置等に用いることができる。この場合、これらの装置等においても、用途に応じた所定の波長の面発光レーザ光を用いることにより、同様の効果を得ることができる。

【符号の説明】

【0139】

- | | |
|----|-----------|
| 10 | 面発光レーザ素子 |
| 11 | 第1の面発光レーザ |
| 12 | 第2の面発光レーザ |
| 13 | 第3の面発光レーザ |

10

20

30

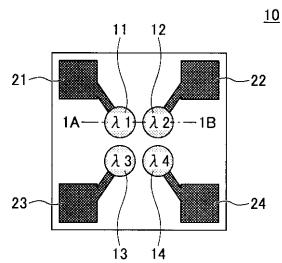
40

50

1 4	第4の面発光レーザ	
2 1	電極パッド	
2 2	電極パッド	
2 3	電極パッド	
2 4	電極パッド	
1 0 1	基板	
1 0 2	下部プラグ反射鏡	
1 0 3	下部スペーサ層	
1 0 4	活性層	
1 0 5	上部スペーサ層	10
1 0 6	第1の上部プラグ反射鏡	
1 0 7	第2の上部プラグ反射鏡	
1 0 8	電流狭窄層	
1 0 8 a	選択酸化領域	
1 0 8 b	電流狭窄領域	
1 1 0	コンタクト層	
1 1 1	上部電極	
1 1 2	下部電極	
1 2 0	波長調整領域	
1 2 1	第1の調整層	20
1 2 2	第2の調整層	
1 2 3	第3の調整層	
1 2 4	第4の調整層	
1 3 0	波長調整層	
1 3 1	位相調整領域	
1 4 0	保護膜	
1 4 1	樹脂層	
【先行技術文献】		
【特許文献】		
【0140】		
【特許文献1】特開2008-53353号公報		
【特許文献2】特許第2751814号公報		
【特許文献3】特開2000-58958号公報		
【特許文献4】特開平11-330631号公報		
【特許文献5】特開2008-283129号公報		
【特許文献6】特開2009-188598号公報		
【非特許文献】		
【0141】		
【非特許文献1】Applied Physics Letters, Vol. 85, p p. 1460-1462 (2004).		
【非特許文献2】Comprehensive Microsystems, vol. 3, pp. 571-612		
【非特許文献3】Proc. of SPIE Vol. 6132 613208-1 (2006)		

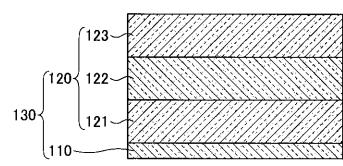
【図1】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図



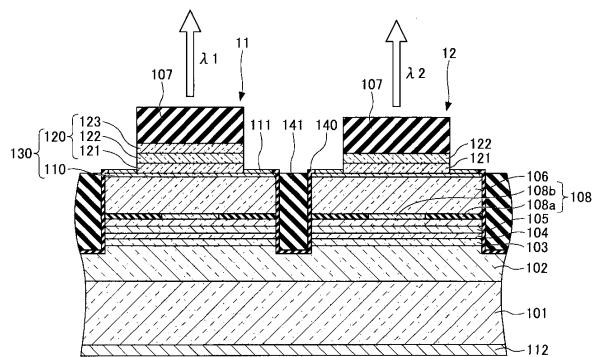
【図3】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の構造図



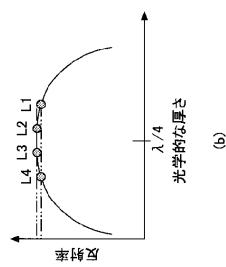
【図2】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図

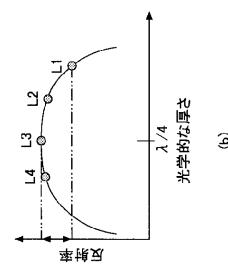


【図4】

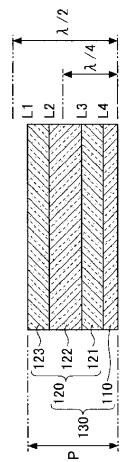
第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(1)



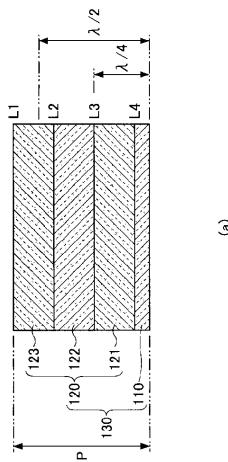
(a)



(b)



(a)



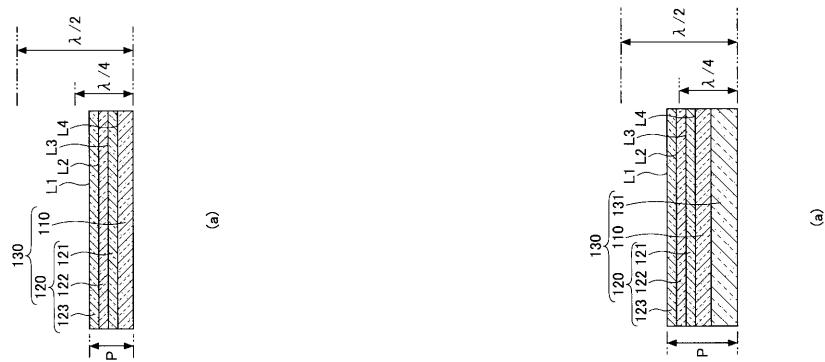
(b)

【図5】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(2)

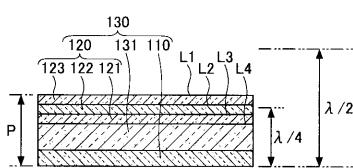
【図6】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(3) 第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(4)



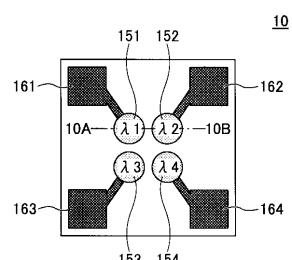
【図8】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(5)



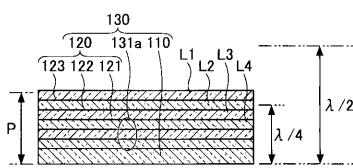
【図10】

第2の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図



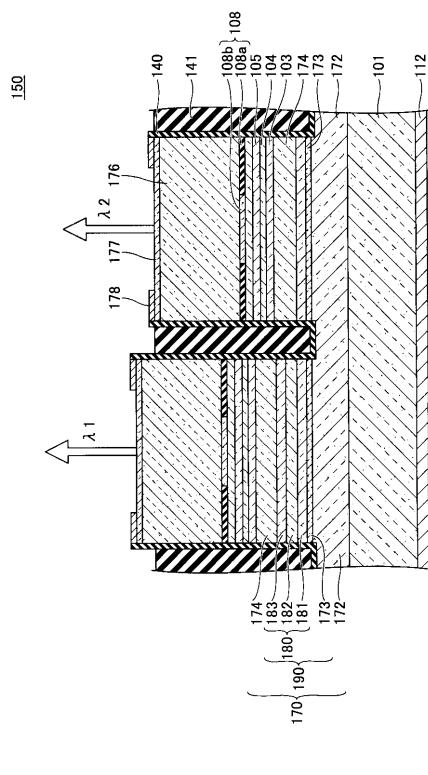
【図9】

第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(6)



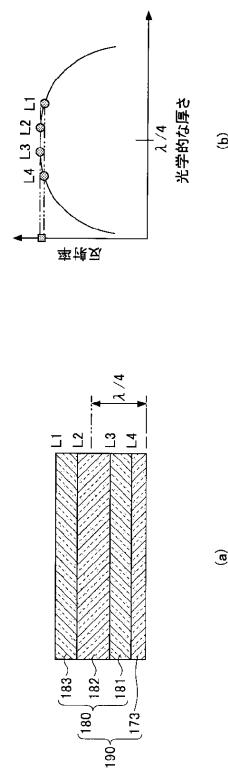
【図11】

第2の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図



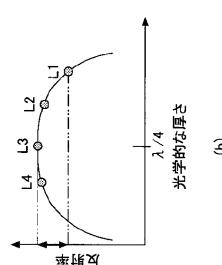
【図12】

第2の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(1)



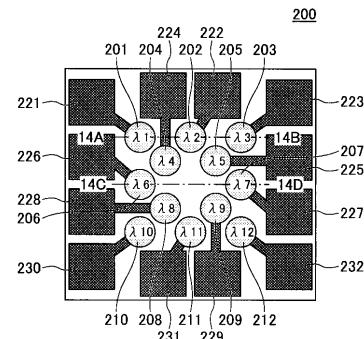
【図13】

第2の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(2)



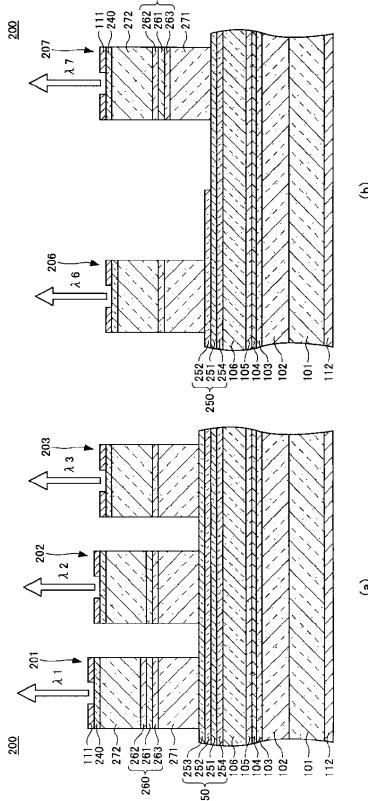
【図14】

第3の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図



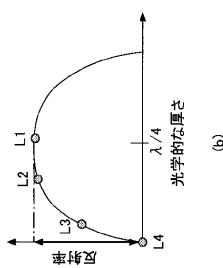
【図15】

第3の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図

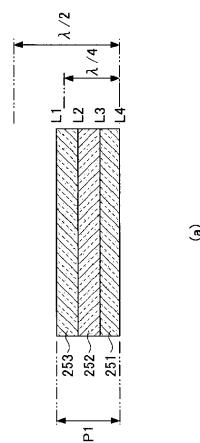


【図17】

第3の実施の形態における面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(1)



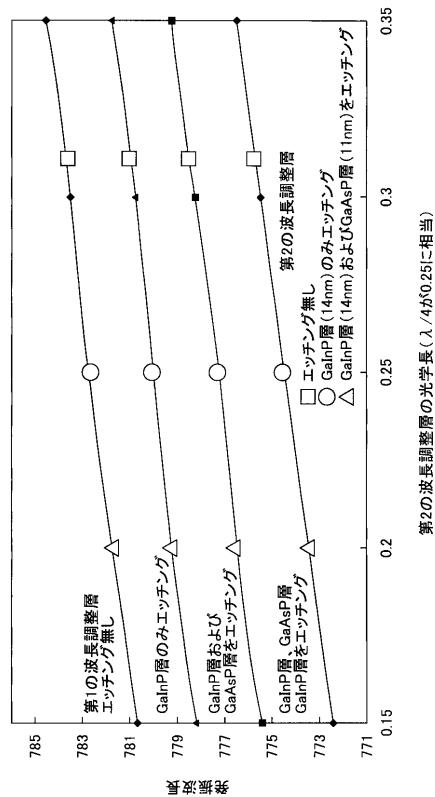
(a)



(b)

【図16】

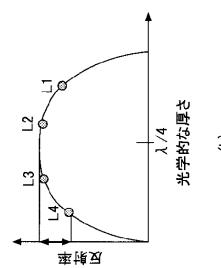
第1の波長調整層及び第2の波長調整層と発振波長との相関図



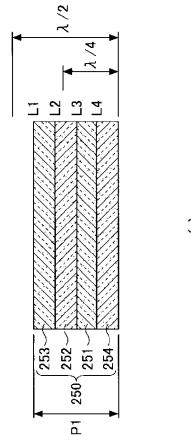
第2の波長調整層の光学長(λ/4が0.25に相当)

【図18】

第3の実施の形態における面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(2)



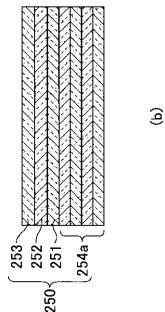
(a)



(b)

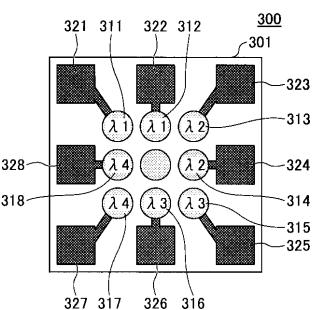
【図19】

第3の実施の形態における
面発光レーザ素子の第1の波長調整層の説明図(3)



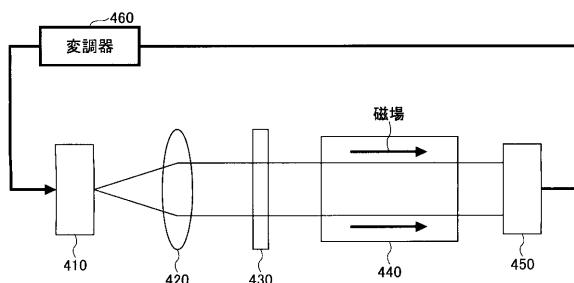
【図20】

第4の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図



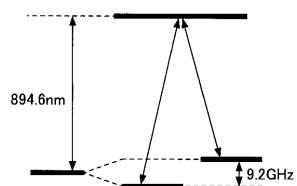
【図21】

第5の実施の形態における原子発振器の構造図



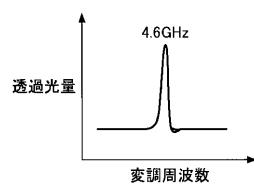
【図22】

CPT方式を説明する原子エネルギー準位の説明図



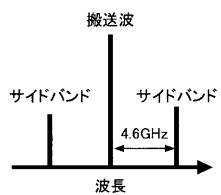
【図24】

変調周波数と透過光量との相関図



【図23】

面発光レーザ変調時における出力波長の説明図



フロントページの続き

(56)参考文献 特開平07-211986(JP, A)
特開2000-058958(JP, A)
米国特許出願公開第2002/0131464(US, A1)
特開平09-135051(JP, A)
特開2006-351692(JP, A)
特開2000-244067(JP, A)
特開2011-108678(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01S 5/00 - 5/50