

(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 I

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)	(73) 特許権者	000006747
(22) 出願日	平成24年10月23日 (2012.10.23)		株式会社リコー
(65) 公開番号	特開2013-138176 (P2013-138176A)		東京都大田区中馬込 1 丁目 3 番 6 号
(43) 公開日	平成25年7月11日 (2013.7.11)	(74) 代理人	100107766
審査請求日	平成27年9月30日 (2015.9.30)		弁理士 伊東 忠重
(31) 優先権主張番号	特願2011-264908 (P2011-264908)	(74) 代理人	100070150
(32) 優先日	平成23年12月2日 (2011.12.2)		弁理士 伊東 忠彦
(33) 優先権主張国	日本国 (JP)	(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ブラッグ反射鏡および下部ブラッグ反射鏡と、  
を有し、

前記複数の面発光レーザは、前記上部ブラッグ反射鏡または前記下部ブラッ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、

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、

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

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】

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。

【請求項6】

前記波長調整層は、前記上部ブラッグ反射鏡中に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。

【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】

前記上部ブラッグ反射鏡には、前記活性層が形成されている側より順に、第1の上部ブラッグ反射鏡、前記波長調整層、第2の上部ブラッ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の上部ブラッグ反射鏡は、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。

【請求項10】

前記複数の波長のうちいずれか1つは、 $893.6\text{ nm} \sim 895.6\text{ nm}$ 、 $851.3\text{ nm} \sim 853.3\text{ nm}$ 、 $794.0\text{ nm} \sim 796.0\text{ nm}$ 、 $779.2\text{ nm} \sim 781.2\text{ nm}$ 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、

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11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。

10

20

30

40

50

## 【背景技術】

## 【0002】

面発光レーザ（V C S E L : Vertical Cavity Surface Emitting LASER）は、基板面に対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  $\lambda/4$  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、C P T（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】

C P T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変であり、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、 $\lambda/4$ 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は、発振させる波長間隔を5 nm以内にしようすると、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ブラッグ反射鏡および下部ブラッグ反射鏡と、を有し、前記複数の面発光レーザは、前記上部ブラッグ反射鏡または前記下部ブラッ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、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、 $\frac{P}{4} \leq \frac{P}{2}$ 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ブラッグ反射鏡と、前記下部ブラッグ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ブラッグ反射鏡と、を有する面発光レーザ素子の製造方法において、前記上部ブラッグ反射鏡または前記下部ブラッグ反射鏡内には、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のエッチ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のエッチング液により除去する工程と、を有し、前記第1のエッチング液と前記第2のエッチ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厚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

10

20

30

40

50

- 【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】C P T 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。
- 【0017】 30
- 〔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 1 A - 1 B において切断した断面図である。
- 【0018】 40
- 本実施の形態における面発光レーザ素子 10 は、300  $\mu$ m 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。
- 【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 1、第 2 の面発光レーザ 12 より出射される波 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894.6nm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替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、500μm×500μm以下の大きさとするにより、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、下部ブラッグ反射鏡102を形成し、下部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡106、コンタクト層110、波長調整領域120、第2の上部ブラッグ反射鏡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ブラッグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部ブラッグ反射鏡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ブラッグ反射鏡は、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の上部ブラッグ反射鏡107が各々の面発光レーザごとに形成されている。第2の上部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡106、波長調整層130、第2の上部ブラッグ反射鏡107により、上部ブラッグ反射鏡が形成されている。また、波長調整層130は、下部ブラッグ反射鏡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】

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る。

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、 $n\text{-GaAs}$ 基板を用いている。また、下部ブラッグ反射鏡102は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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。

【0031】

下部ブラッグ反射鏡102の上には、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ からなる下部スペーサ層103を介し、 $\text{GaInAs}$ 量子井戸層/ $\text{GaInPAs}$ 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、 $\text{Al}_{0.2}\text{Ga}_{0.8}\text{As}$ からなる上部スペーサ層105、第1の上部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡106は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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の上部ブラッグ反射鏡106の低屈折率層の一つは、 $\text{AlAs}$ 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の上部ブラッグ反射鏡106の上には、 $p\text{-GaAs}$ 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、楕円形、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チングにより除去された波長調整層 130 の上には、第 2 の上部ブラッグ反射鏡 107 が形成されている。第 2 の上部ブラッグ反射鏡 107 は  $\text{TiO}_2$  高屈折率層と  $\text{SiO}_2$  低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が  $\lambda/4$  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 の上部ブラッグ反射鏡 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、 $\text{TiO}_2$  の他、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$ 、 $\text{HfO}_2$  等が挙げられる。また、低屈折率材料としては、 $\text{SiO}_2$  の他、 $\text{MgF}_2$  等が挙げられる。第 2 の上部ブラッグ反射鏡 107 における  $\text{TiO}_2$  高屈折率層と  $\text{SiO}_2$  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  $\text{SiN}$  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ブラッグ反射鏡 102、下部スペーサ層 103、活性層 104、上部スペーサ層 105、第 1 の上部ブラッグ反射鏡 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、 $\text{GaInP}$  により形成されており、第 2 の調整層 122 は、 $\text{GaAsP}$  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 上にフォトリソを塗布し、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 をウェ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 123 は、 $\text{GaInP}$  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 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  $\text{GaInP}$  をエッチ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  $\text{GaAsP}$  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。

#### 【0041】



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上にフォトリソを塗布し、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GaAsPをエッチングすることはできるが、第1の調整層121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。

10

【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上にフォトリソを塗布し、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】

20

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の上部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡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。

30

【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の上部ブラッグ反射鏡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、Al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、Alは極めて腐食されやすいため、Al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、ウエ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の上部ブラッグ反射鏡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Alを含まない材料により形成されているため、Al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。

40

【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、ウエ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

50

液を用いてエッチングを行なうことにより、エッチング後の表面は平坦になり、オーバーエッチ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コスト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氣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を通過することではなく、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】

30

次に、波長調整層130と共振器領域の間に形成される第1の上部ブラッグ反射鏡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との間に上部ブラッグ反射鏡の一部となる第1の上部ブラッグ反射鏡106を形成する。具体的には、第1の上部ブラッグ反射鏡106として、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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の上部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡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 の上部ブラッグ反射鏡 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 の上部ブラッグ反射鏡 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 の上部ブラッグ反射鏡 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  $\lambda/4$  より大きくなり、上部ブラッ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 の上部ブラッグ反射鏡 107 には、波長調整層 130 の光学的厚さを  $\lambda/4$  に近くすることができるような最適ペア数が存在する。

10

#### 【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、 $\lambda/4 < P < \lambda/2$  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 における上部ブラッ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。

20

#### 【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、 $\lambda/2 < P$  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 における上部ブラッ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、 $P < \lambda/4$  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 における上部ブラッグ反射鏡の反射率が大きく異なってしまう。

30

#### 【0058】

以上より、波長調整層 130 の光学的な厚さ  $P$  は、

$$\lambda/4 < P < \lambda/2$$

であることが好ましく、このことを一般化するならば、

$$(2N - 1) \lambda/4 < P < N \lambda/2$$

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  $\lambda/4$  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  $\lambda/4 < P < \lambda/2$ 、一般的には、 $(2N - 1) \lambda/4 < P < N \lambda/2$  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 における上部ブラッ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

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 $\lambda/4$ 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】

##### 〔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ブラッ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】

本実施の形態における面発光レーザ素子150は、300 $\mu$ m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 $\lambda_1$ 、第2の面発光レーザ152より出射される波長 $\lambda_2$ 、第3の面発光レーザ153より出射される波長 $\lambda_3$ 、第4の面発光レーザ154より出射される波長 $\lambda_4$ は、相互に異なる波長である。

#### 【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、300 $\mu$ m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】

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の下部ブラッグ反射鏡172を形成し、第1の下部ブラッグ反射鏡172上には、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部ブラッグ反射鏡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、上部ブラッグ反射鏡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の下部ブラッグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部ブラッグ反射鏡174により、下部ブラッグ反射鏡1

10

20

30

40

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の下部ブラッグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部ブラッグ反射鏡174、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、上部ブラッグ反射鏡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、下部ブラッグ反射鏡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 $\lambda/4$ 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】

下部ブラッグ反射鏡170は前述したように、基板101の上に、第1の下部ブラッグ反射鏡172、位相調整領域173、波長調整領域180、第2の下部ブラッグ反射鏡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、下部ブラッグ反射鏡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  $\lambda/4$  となるように形成されている。

#### 【0076】

下部ブラッグ反射鏡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。

10

#### 【0077】

上部ブラッグ反射鏡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  $\lambda/4$  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。上部ブラッグ反射鏡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、上部ブラッグ反射鏡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】

20

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  $\lambda/4$  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における下部ブラッ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、楕円形、正方形、長方形等の形状となるように形成してもよい。

30

40

#### 【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

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射出されるものである。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、メサエッチ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 の下部ブラッグ反射鏡 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 895 nm を中心として波長 1 nm 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 1 nm 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 の間に下部ブラッグ反射鏡 170 の一部となる第 2 の下部ブラッグ反射鏡 174 を形成する。具体的には、第 2 の下部ブラッグ反射鏡 174 として、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$  高屈折率層と  $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$  低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が  $\lambda/4$  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 16 nm / 16 nm / 16 nm 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 の下部ブラッグ反射鏡 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 の下部ブラッグ反射鏡 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  $\lambda/4$  (ブラッグ反射鏡の光学膜厚) より大幅に厚くなるため、下部ブラッグ反射鏡 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 の下部ブラッグ反射鏡には、波長調整領域 180 の光学的膜厚が  $\lambda/4$  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  $\lambda/4$  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ブラッ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、各々の下部ブラッ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 の下部ブラッグ反射鏡 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上にフォトリソを塗布し、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上にフォトリソを塗布し、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上にフォトリソを塗布し、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の下部ブラッグ反射鏡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を含む下部ブラッグ反射鏡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、Al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、Alは極めて腐食されやすいため、Al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の下部ブラッグ反射鏡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Alを含まない材料により形成されているため、Al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、ウエ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種類のエッチング液を用いてエッチングを行なうことにより、エッチング後の表面は平坦になり、オーバーエッチ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。

#### 【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、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。

#### 【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。

#### 【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】

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

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

#### 【0104】

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

#### 【0105】

本実施の形態における面発光レーザー素子は、半導体等からなる基板101上に、下部ブラッグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部ブラッグ反射鏡106が形成されており、第1の上部ブラッグ反射鏡106の上には、第1の波長調整層250、第2の上部ブラッグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部ブラッグ反射鏡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ブラッグ反射鏡102、下部スペーサ層103、活性層104、上部スペーサ層105、第1の上部ブラッグ反射鏡106、第1の波長調整層250、第2の上部ブラッグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡106、第1の波長調整層250、第2の上部ブラッグ反射鏡271、第2の波長調整層260、第3の上部ブラッグ反射鏡272により上部ブラッ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は下部ブラッグ反射鏡102の内部に形成したものであってもよい。

#### 【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、下部ブラッグ反射鏡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 $\lambda/4$ 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】

下部ブラッグ反射鏡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の上部ブラッグ反射鏡106が形成されている。尚、下部スペーサ層1

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の上部ブラッグ反射鏡106は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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の上部ブラッグ反射鏡106の低屈折率層の一つは、図15には不図示の $\text{AlAs}$ からなる電流狭窄層により形成されている。

【0109】

第1の上部ブラッグ反射鏡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、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ からなる位相調整領域254、 $\text{GaInP}$ からなる第1の調整層251、 $\text{GaAsP}$ からなる第2の調整層252、 $\text{GaInP}$ 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。

10

【0110】

第1の波長調整層250の上には、第2の上部ブラッグ反射鏡271が形成されている。第2の上部ブラッグ反射鏡271は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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の上部ブラッグ反射鏡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、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ からなる位相調整領域263、 $\text{GaInP}$ からなる第4の調整層261、 $\text{GaAsP}$ 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。

20

【0112】

第2の波長調整層260の上には、第3の上部ブラッグ反射鏡272が形成されている。第3の上部ブラッグ反射鏡272は、 $n\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 高屈折率層と $n\text{-Al}_{0.9}\text{Ga}_{0.1}\text{As}$ 低屈折率層とを各々の層の光学的な膜厚が $\lambda/4$ 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の上部ブラッグ反射鏡272の上には、 $p\text{-GaAs}$ 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。

30

【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 $\lambda$ 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チ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、 $\text{GaAsP}$  ( $\text{GaAs}$ の場合も同様)をエッチングする際には、硫酸、過酸化水素、水の混合液を用いることができ、 $\text{GaInP}$ をエッチングする際には、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の選択エッチングを行なった後に、第2の上部ブラッグ反射鏡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の選択エッチングを行い、第3の上部 $\text{BDR}$ 272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なメサのエッチングは、ドライエッチ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。

40

【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

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 ( $X = 2, 3, \dots$ ) 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 の上部ブラッグ反射鏡 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 10.1 Ga 0.9 As 高屈折率層と n-A 10.9 Ga 0.1 As 低屈折率層とを交互に積層することにより第 1 の上部ブラッグ反射鏡 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 の上部ブラッグ反射鏡 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 の各々の層をウェ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つきが大きくなることを意味する。

#### 【0120】

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  $\lambda/4$  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、

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

であることが好ましく、このことを一般化するならば、

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

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  $\lambda/4$  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、 $p\text{-Al}_{0.1}\text{Ga}_{0.9}\text{As}$ 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、その上に上部ブラッ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

## 【 0 1 2 8 】

具体的には、本実施の形態における面発光レーザ素子 3 0 0 は、基板 3 0 1 上に第 1 の面発光レーザ 3 1 1、第 2 の面発光レーザ 3 1 2、第 3 の面発光レーザ 3 1 3、第 4 の面発光レーザ 3 1 4、第 5 の面発光レーザ 3 1 5、第 6 の面発光レーザ 3 1 6、第 7 の面発光レーザ 3 1 7、第 8 の面発光レーザ 3 1 8 を有している。第 1 の面発光レーザ 3 1 1 から第 8 の面発光レーザ 3 1 8 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 3 1 1 には電極パッド 3 2 1 が接続されており、第 2 の面発光レーザ 3 1 2 には電極パッド 3 2 2 が接続されており、第 3 の面発光レーザ 3 1 3 には電極パッド 3 2 3 が接続されており、第 4 の面発光レーザ 3 1 4 には電極パッド 3 2 4 が接続されており、第 5 の面発光レーザ 3 1 5 には電極パッド 3 2 5 が接続されており、第 6 の面発光レーザ 3 1 6 には電極パッド 3 2 6 が接続されており、第 7 の面発光レーザ 3 1 7 には電極パッド 3 2 7 が接続されており、第 8 の面発光レーザ 3 1 8 には電極パッド 3 2 8 が接続されている。

10

## 【 0 1 2 9 】

また、第 1 の面発光レーザ 3 1 1 から第 8 の面発光レーザ 3 1 8 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 3 1 1 及び第 2 の面発光レーザ 3 1 2 より出射される光は同じ波長 1、第 3 の面発光レーザ 3 1 3 及び第 4 の面発光レーザ 3 1 4 より出射される光は同じ波長 2、第 5 の面発光レーザ 3 1 5 及び第 6 の面発光レーザ 3 1 6 より出射される光は同じ波長 3、第 7 の面発光レーザ 3 1 7 及び第 8 の面発光レーザ 3 1 8 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させるために、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 3 2 1 から 3 2 8 の大きさは、各々約 5 0  $\mu$ m 角であり、基板 3 0 1 は 3 0 0  $\mu$ m 角の大きさの半導体チップである。

20

## 【 0 1 3 0 】

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ことができるとともに、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

## 【 0 1 3 1 】

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。

## 【 0 1 3 2 】

## 〔 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 2 1 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、C P T 方式の小型原子発振器であり、光源 4 1 0、コリメートレンズ 4 2 0、 $\lambda$ /4 波長板 4 3 0、アルカリ金属セル 4 4 0、光検出器 4 5 0、変調器 4 6 0 を有している。

40

## 【 0 1 3 3 】

光源 4 1 0 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 4 4 0 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、D 1 ラインの遷移を用いるものである。光検出器 4 5 0 は、フォトダイオードが用いられている。

## 【 0 1 3 4 】

本実施の形態における原子発振器では、光源 4 1 0 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 4 4 0 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 894.6 nm 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ため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 0.05 nm/ 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 9.2 GHz に一致するように 4.6 GHz 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 894.6 nm の場合では、±1 nm の範囲の波長の光源が必要となる。即ち、893.6 nm ~ 895.6 nm 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 を使い、その D1 ラインの遷移を用いるために波長が 894.6 nm 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 852.3 nm 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 795.0 nm、D2 ラインを利用する場合は 780.2 nm 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、<sup>87</sup>Rb では 3.4 GHz、<sup>85</sup>Rb では 1.5 GHz で変調させる。尚、これらの波長においても、±1 nm 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 851.3 nm ~ 853.3 nm 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 794.0 nm ~ 796.0 nm 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 779.2 nm ~ 781.2 nm 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】

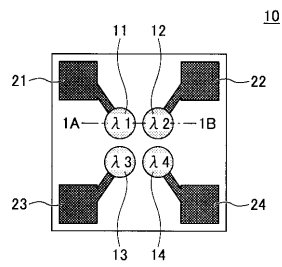
- 10           面発光レーザ素子
- 11           第 1 の面発光レーザ
- 12           第 2 の面発光レーザ
- 13           第 3 の面発光レーザ

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	下部ブラッグ反射鏡	
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 の上部ブラッグ反射鏡	
1 0 7	第 2 の上部ブラッグ反射鏡	
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】		
【0 1 4 0】		30
【特許文献 1】特開 2 0 0 8 - 5 3 3 5 3 号公報		
【特許文献 2】特許第 2 7 5 1 8 1 4 号公報		
【特許文献 3】特開 2 0 0 0 - 5 8 9 5 8 号公報		
【特許文献 4】特開平 1 1 - 3 3 0 6 3 1 号公報		
【特許文献 5】特開 2 0 0 8 - 2 8 3 1 2 9 号公報		
【特許文献 6】特開 2 0 0 9 - 1 8 8 5 9 8 号公報		
【非特許文献】		
【0 1 4 1】		
【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 (20		
06)		
40		



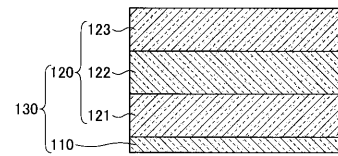
【図 1】

第1の実施の形態における面発光レーザー素子の上面図



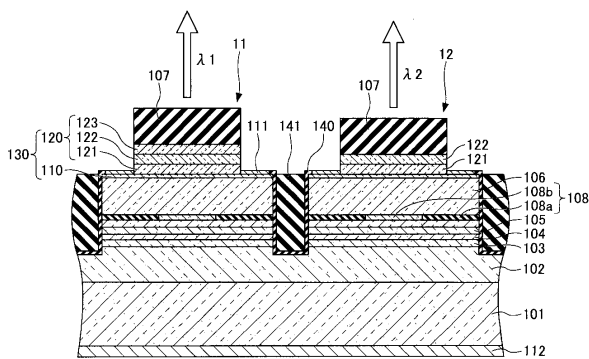
【図 3】

第1の実施の形態における面発光レーザー素子の波長調整層の構造図



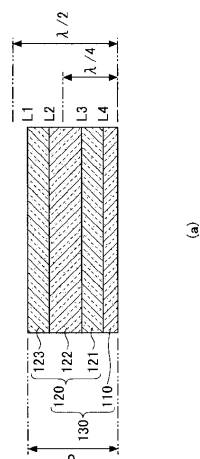
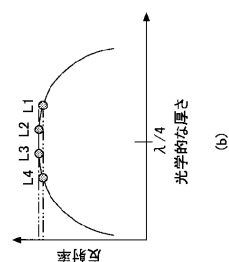
【図 2】

第1の実施の形態における面発光レーザー素子の説明図



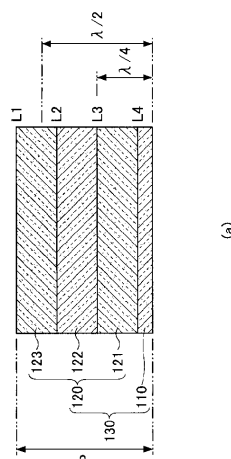
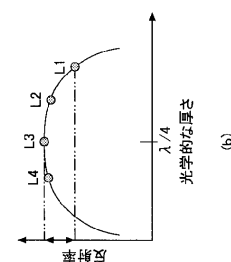
【図 4】

第1の実施の形態における面発光レーザー素子の波長調整層の説明図(1)



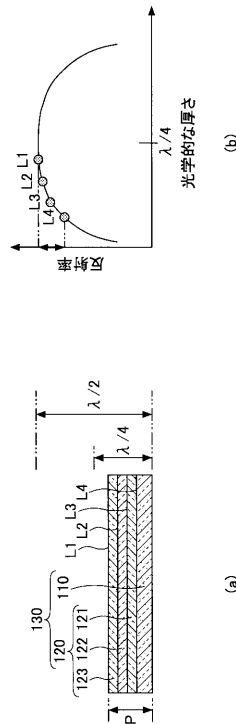
【図 5】

第1の実施の形態における面発光レーザー素子の波長調整層の説明図(2)



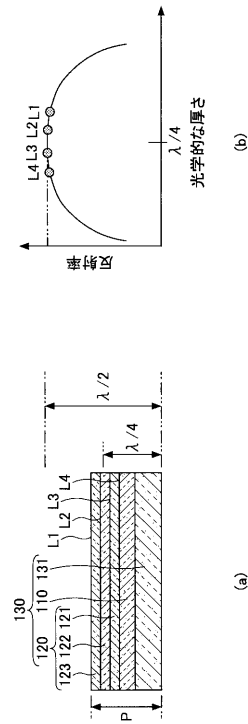
【図 6】

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)



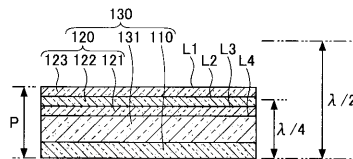
【図 7】

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)



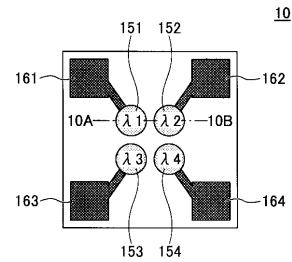
【図 8】

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)



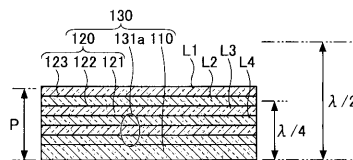
【図 10】

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】

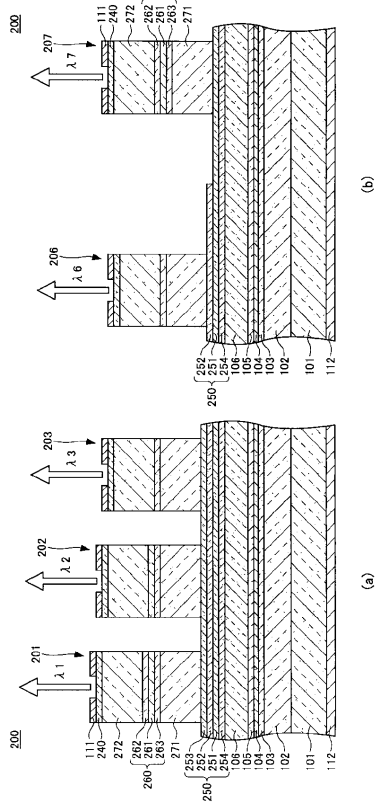
第1の実施の形態における面発光レーザ素子の波長調整層の説明図(6)





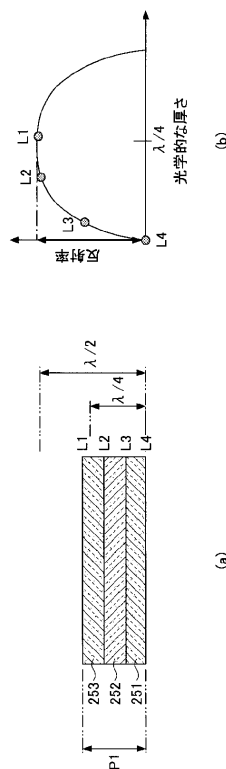
【図 15】

第3の実施の形態における面発光レーザ素子の説明図



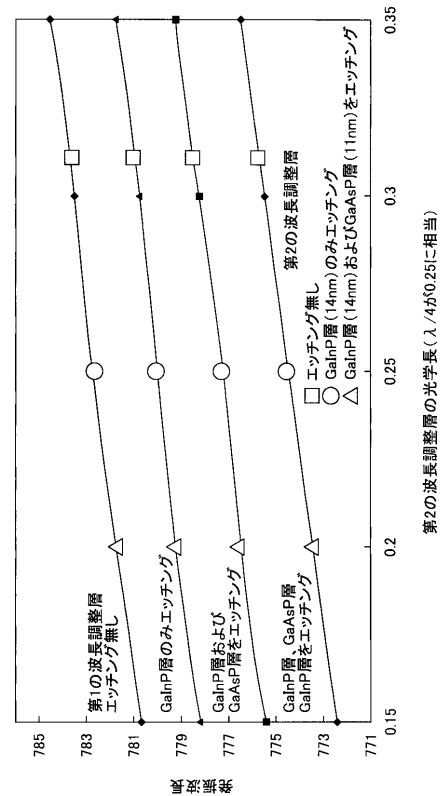
【図 17】

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)



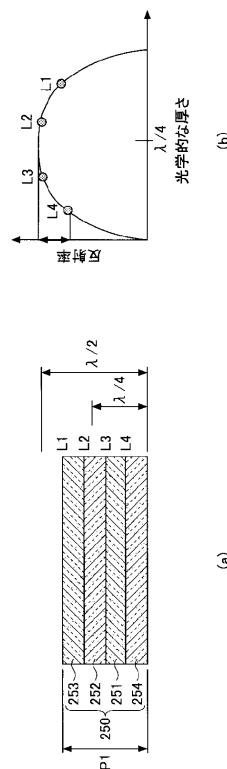
【図 16】

第1の波長調整層及び第2の波長調整層と共振波長との相關図



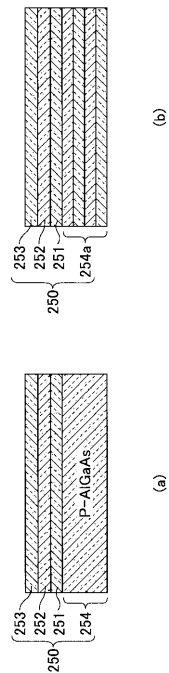
【図 18】

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)



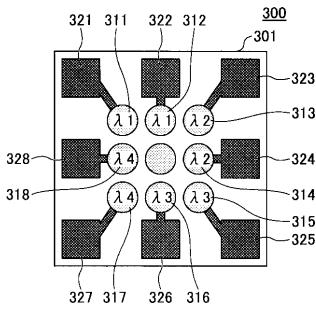
【図 19】

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)



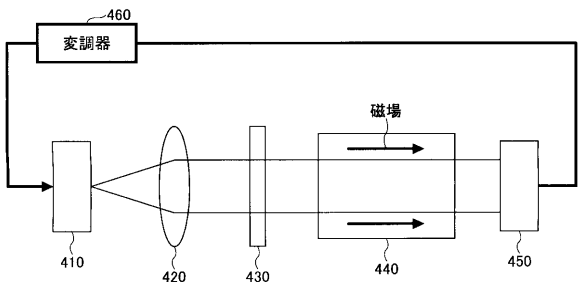
【図 20】

第4の実施の形態における面発光レーザ素子の上面図



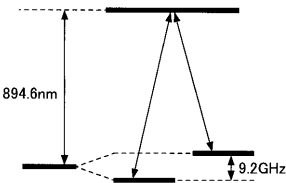
【図 21】

第5の実施の形態における原子発振器の構造図



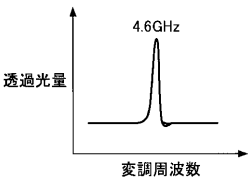
【図 22】

CPT方式を説明する原子エネルギー準位の説明図



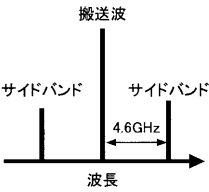
【図 24】

変調周波数と透過光量との関係図



【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