

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第6705151号  
(P6705151)

(45) 発行日 令和2年6月3日(2020.6.3)

(24) 登録日 令和2年5月18日(2020.5.18)

(51) Int.Cl.		F I
HO 1 S	1/06 (2006.01)	HO 1 S 1/06
HO 3 L	7/26 (2006.01)	HO 3 L 7/26
HO 1 S	5/183 (2006.01)	HO 1 S 5/183
HO 1 S	5/343 (2006.01)	HO 1 S 5/343
HO 1 S	5/0687 (2006.01)	HO 1 S 5/0687

請求項の数 4 (全 19 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2015-210824 (P2015-210824)  
 (22) 出願日 平成27年10月27日(2015.10.27)  
 (65) 公開番号 特開2017-84937 (P2017-84937A)  
 (43) 公開日 平成29年5月18日(2017.5.18)  
 審査請求日 平成30年9月13日(2018.9.13)

(73) 特許権者 000002369  
 セイコーエプソン株式会社  
 東京都新宿区新宿四丁目1番6号  
 (74) 代理人 100090387  
 弁理士 布施 行夫  
 (74) 代理人 100090398  
 弁理士 大淵 美千栄  
 (72) 発明者 西田 哲朗  
 長野県諏訪市大和3丁目3番5号 セイコーエプソン株式会社内  
 審査官 高椋 健司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 原子発振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

アルカリ金属原子を封入したガスセルと、  
 前記ガスセルに光を照射する光源と、  
 前記ガスセルを透過した光の光量を検出する光検出手段と、  
 を含み、  
 前記光源は、  
 第1反射層と活性層と第2反射層との順に積層された光発振層と、  
 第1半導体層と量子井戸層と第2半導体層との順に積層された電界吸収層と、  
 前記光発振層と前記電界吸収層との間に配置され、前記第2反射層よりも熱伝導率が高い熱拡散層と、  
 を有し、  
前記活性層で発生した光は、前記光発振層と前記熱拡散層と前記電界吸収層との積層方向に射出され、  
前記電界吸収層は前記活性層で発生した光を吸収することによって前記光源の光出力を変化させる、ことを特徴とする原子発振器。

【請求項2】

前記熱拡散層は、i型のAlAs層である、ことを特徴とする請求項1に記載の原子発振器。

【請求項3】

前記熱拡散層は、i型のGaAs層である、ことを特徴とする請求項1に記載の原子発振器。

【請求項4】

前記熱拡散層と前記第1半導体層との間に設けられたコンタクト層を含み、  
前記コンタクト層の前記第1半導体層が配置される面に、前記電界吸収層に電圧を印加するための電極が設けられている、ことを特徴とする請求項1ないし3いずれか1項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、原子発振器に関する。

【背景技術】

【0002】

原子の遷移エネルギーを基準周波数として用いる原子発振器は、最も高精度な発振器の1つとして、通信基地局などで広く用いられている。原子発振器にはいくつかの方式があるが、ルビジウム(Rb)ランプを用いたマイクロ波二重共鳴方式が最も一般的に用いられている。

【0003】

近年、量子干渉効果の1つであるCPT(Coherent Population Trapping)と呼ばれる現象を用いた原子発振器が提案され(例えば特許文献1参照)、従来に比べ原子発振器の小型化、低消費電力化が期待されている。CPT方式の場合、光源にはレーザーなどのコヒーレントな光源を用い、高周波信号を重畳することで、その側波帯をCPT現象の発現に用いる。CPT方式の原子発振器は、アルカリ金属原子に異なる2種類の波長(周波数)を有するコヒーレント光を照射すると、コヒーレント光の吸収が停止する電磁誘起透過現象(EIT現象: Electromagnetically Induced Transparency)を利用した発振器である。

【0004】

原子発振器の光源としてCPT現象を発現させるためには、レーザー素子等の出力波長の高精度な調整が必要となる。レーザー素子等への注入電流を変化させると出力波長を調整することが可能である。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特開2015-62167号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかしながら、レーザー素子への注入電流を変化させると、同時にレーザー素子等の光出力が変化してしまうため、これを考慮して原子発振器の制御ループを形成する必要があり、複雑な制御が必要となる。そのため、出力波長と光出力とを個別に制御することができる光源が求められている。

【0007】

本発明のいくつかの態様に係る目的の1つは、光源の出力波長と光出力とを個別に制御することができる原子発振器を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【0008】

本発明に係る原子発振器は、  
アルカリ金属原子を封入したガスセルと、  
前記ガスセルに光を照射する光源と、  
前記ガスセルを透過した光の光量を検出する光検出手段と、

10

20

30

40

50

を含み、

前記光源は、

第1反射層と活性層と第2反射層との順に積層された光発振層と、

第1半導体層と量子井戸層と第2半導体層との順に積層された電界吸収層と、

前記光発振層と前記電界吸収層との間に配置され、前記第2反射層よりも熱伝導率が高い熱拡散層と、

を有する。

【0009】

このような原子発振器では、活性層に注入する電流量を変化させて、光源から射出される光の中心波長を変化させる場合に、光源から射出される光の光出力（光量）が所定の値からずれたとしても、電界吸収層に印加する電圧を変化させることにより、光源から射出される光の光出力を所定の値に戻すことができる。さらに、このような原子発振器では、電界吸収層が（量子井戸層が）光を吸収して発熱したとしても、該熱を、熱拡散層を介して外部に拡散させることができ、該熱が、第2反射層や活性層に到達することを抑制することができる。これにより、電界吸収層において発生した熱による光源の温度変化を抑制することができる。したがって、光源の中心波長が温度によって変動することを抑制することができる。したがって、活性層への注入電流量と、電界吸収層への印加電圧と、によって、光源の出力波長（中心波長）と光出力とを個別に（独立して）制御することができる。

10

【0010】

本発明に係る原子発振器において、

前記熱拡散層は、i型のAlAs層であってもよい。

20

【0011】

このような原子発振器では、熱拡散層を、光発振層および電界吸収層と一連の工程で（光発振層および電界吸収層を形成するための装置と同じ装置で）形成することができる。

【0012】

本発明に係る原子発振器において、

前記熱拡散層は、i型のGaAs層であってもよい。

【0013】

このような原子発振器では、熱拡散層を、光発振層および電界吸収層と一連の工程で形成することができる。

30

【0014】

本発明に係る原子発振器において、

前記熱拡散層と前記第1半導体層との間に設けられたコンタクト層を含み、

前記コンタクト層の前記第1半導体層が配置される面に、前記電界吸収層に電圧を印加するための電極が設けられていてもよい。

【0015】

このような原子発振器では、電極が第1半導体層と直接接触している場合に比べて、電極の接触抵抗を低減することができる。

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本実施形態に係る原子発振器の機能ブロック図。

【図2】共鳴光の周波数スペクトラムを示す図。

【図3】アルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波および第2側帯波の関係を示す図。

【図4】本実施形態に係る原子発振器の光源を模式的に示す平面図。

【図5】本実施形態に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【図6】本実施形態に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【図7】本実施形態に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【図8】本実施形態に係る原子発振器の光源を説明するための回路図。

【図9】本実施形態に係る原子発振器の光源の製造工程を模式的に示す断面図。

40

50

【図10】本実施形態に係る原子発振器の光源の製造工程を模式的に示す断面図。

【図11】本実施形態に係る原子発振器の光源の製造工程を模式的に示す断面図。

【図12】本実施形態の第1変形例に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【図13】本実施形態の第2変形例に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【図14】本実施形態の第2変形例に係る原子発振器の光源を模式的に示す平面図。

【図15】本実施形態の第2変形例に係る原子発振器の光源を模式的に示す断面図。

【発明を実施するための形態】

【0017】

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

10

【0018】

1. 原子発振器

1.1. 構成

まず、本実施形態に係る原子発振器について、図面を参照しながら説明する。図1は、本実施形態に係る原子発振器1000の機能ブロック図である。

【0019】

原子発振器1000は、図1に示すように、光源100と、ガスセル102と、光検出手段（光検出部）104と、光出力可変部106と、中心波長可変部108と、高周波発生部110と、吸収検出部112と、EIT検出部114と、制御部120と、を含む。制御部120は、光出力制御部122と、中心波長制御部124と、高周波制御部126と、を有している。原子発振器1000は、2つの異なる周波数成分を有する共鳴光対（第1光および第2光）によってアルカリ金属原子にEIT現象を発生させる。

20

【0020】

光源100は、互いに周波数が異なる第1光および第2光を発生させて、ガスセル102に封入されたアルカリ金属原子を照射する。光源100の詳細な構成については後述する。

【0021】

ここで、図2は、共鳴光の周波数スペクトラムを示す図である。図3は、アルカリ金属原子の型3準位モデルと第1側帯波（第1光） $W_1$ および第2側帯波（第2光） $W_2$ の関係を示す図である。光源100から射出される光 $L$ は、図2に示す、中心周波数 $f_0$ （ $= c / \lambda_0$ ： $c$ は光の速さ、 $\lambda_0$ はレーザー光の中心波長）を有する基本波 $F$ と、中心周波数 $f_0$ に対して上側サイドバンドに周波数 $f_1$ を有する第1側帯波 $W_1$ と、中心周波数 $f_0$ に対して下側サイドバンドに周波数 $f_2$ を有する第2側帯波 $W_2$ と、を含む。第1側帯波 $W_1$ の周波数 $f_1$ は、 $f_1 = f_0 + f_m$ であり、第2側帯波 $W_2$ の周波数 $f_2$ は、 $f_2 = f_0 - f_m$ である。

30

【0022】

図3に示すように、第1側帯波 $W_1$ の周波数 $f_1$ と第2側帯波 $W_2$ の周波数 $f_2$ との周波数差が、アルカリ金属原子の基底準位 $GL_1$ と基底準位 $GL_2$ とのエネルギー差 $E_1$ 、 $E_2$ に相当する周波数と一致している。したがって、アルカリ金属原子は、周波数 $f_1$ を有する第1側帯波 $W_1$ と、周波数 $f_2$ を有する第2側帯波 $W_2$ と、によってEIT現象を起こす。

40

【0023】

ここで、EIT現象について説明する。アルカリ金属原子と光との相互作用は、型3準位系モデルで説明できることが知られている。図3に示すように、アルカリ金属原子は、2つの基底準位を有し、基底準位 $GL_1$ と励起準位とのエネルギー差に相当する波長（周波数 $f_1$ ）を有する第1側帯波 $W_1$ 、あるいは基底準位 $GL_2$ と励起準位とのエネルギー差に相当する波長（周波数 $f_2$ ）を有する第2側帯波 $W_2$ を、それぞれ単独でアルカリ金属原子に照射すると、光吸収が起きる。ところが、図2に示すように、このアルカリ金

50

属原子に、周波数差  $f_1 - f_2$  が基底準位  $GL1$  と基底準位  $GL2$  のエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数と正確に一致する第1側帯波  $W1$  と第2側帯波  $W2$  とを同時に照射すると、2つの基底準位の重ね合わせ状態、すなわち量子干渉状態になり、励起準位への励起が停止して第1側帯波  $W1$  と第2側帯波  $W2$  とがアルカリ金属原子を透過する透明化現象（EIT現象）が起きる。このEIT現象を利用し、第1側帯波  $W1$  と第2側帯波  $W2$  との周波数差  $f_1 - f_2$  が基底準位  $GL1$  と基底準位  $GL2$  とのエネルギー差  $E_{12}$  に相当する周波数からずれた時の光吸収挙動の急峻な変化を検出し制御することで、高精度な発振器をつくることができる。

#### 【0024】

ガスセル102は、容器中に気体状のアルカリ金属原子（ナトリウム原子、ルビジウム原子、セシウム原子等）を封入したものである。セシウム原子は、例えば、80程度に加熱されて気体状となる。このガスセル102に対して、アルカリ金属原子の2つの基底準位のエネルギー差に相当する周波数（波長）を有する2つの光波（第1光および第2光）が照射されると、アルカリ金属原子がEIT現象を起こす。例えば、アルカリ金属原子がセシウム原子であれば、D1線における基底準位  $GL1$  と基底準位  $GL2$  とのエネルギー差に相当する周波数が  $9.19263 \cdots \text{GHz}$  なので、周波数差が  $9.19263 \cdots \text{GHz}$  の2つの光波が照射されるとEIT現象を起こす。

#### 【0025】

光検出部104は、ガスセル102を透過した（ガスセル102に封入されたアルカリ金属原子を透過した）光の光量を（強度を）検出する。光検出部104は、アルカリ金属原子を透過した光の量に応じた検出信号を出力する。光検出部104としては、例えば、フォトダイオードを用いる。

#### 【0026】

光出力可変部106は、光出力制御部122からの信号に基づいて、光源100の電極60, 62（後述する図5参照）間に電圧を印加し、光源100の光出力（光量）を変化させる。光出力可変部106は、電極60, 62間に電圧を印加する電源4（後述する図8参照）を含んで構成されていてもよい。

#### 【0027】

中心波長可変部108は、中心波長制御部124からの信号に基づいて、光源100の電極30, 32（図5参照）間に電圧を印加して活性層22に電流を注入し、光源100から射出される光Lの中心波長を変化させる。これにより、光Lに含まれる共鳴光対（第1光および第2光）の中心波長を変化させることができる。中心波長可変部108は、電極30, 32間に電圧を印加する電源2（図8参照）を含んで構成されていてもよい。

#### 【0028】

高周波発生部110は、高周波制御部126からの信号に基づいて、光源100の電極30, 32間に高周波信号を供給して共鳴光対を生成する。高周波発生部110は、専用回路によって実現されていてもよい。

#### 【0029】

吸収検出部112は、例えば、光Lの中心波長を変えたときの光検出部104が出力した検出信号の信号強度の最小値（吸収の底）を検出する。吸収検出部112は、専用回路によって実現されていてもよい。

#### 【0030】

EIT検出部114は、光検出部104が出力した検出信号を同期検波して、EIT現象を検出する。EIT検出部114は、専用回路によって実現されていてもよい。

#### 【0031】

光出力制御部122は、光検出部104が出力した検出信号の光量の平均（DC成分）に基づいて、光出力可変部106を制御することにより、光源100の電界吸収層59（図5参照）に印加する（量子井戸層52に印加する）電圧を制御して、電界吸収層59における（量子井戸層52における）光吸収量を変化させる。これにより、光出力制御部122は、光源100の光出力（光量）を変化させることができる。光出力制御部122は

10

20

30

40

50

、検出信号の光量の移動平均に基づいて、光出力可変部 106 を制御してもよい。光出力制御部 122 は、光源 100 から射出される光出力が一定となるように（例えば光検出部 104 が出力した検出信号の DC 成分が一定となるように）、電界吸収層 59 に印加する電圧を制御する。光出力制御部 122 は、APC (Auto Power Control) 回路を含んで構成されていてもよい。

【0032】

中心波長制御部 124 は、吸収検出部 112 からの信号に基づいて、中心波長可変部 108 を制御することにより、光源 100 の活性層 22 (図 5 参照) に注入する電流を制御して、光源 100 から射出される光 L の光出力 (光量) および波長 (中心波長) を変化させる。

10

【0033】

高周波制御部 126 は、EIT 検出部 114 からの信号に基づいて、高周波発生部 110 に、高周波信号を発生する信号を入力する。

【0034】

なお、制御部 120 は、専用回路によって実現して上記の制御を行うように構成されていてもよい。また、制御部 120 は、例えば CPU (Central Processing Unit) が ROM (Read Only Memory) や RAM (Random Access Memory) 等の記憶装置に記憶された制御プログラムを実行することによってコンピューターとして機能し、上記の制御を行うように構成されていてもよい。

20

【0035】

次に、原子発振器 1000 の動作について説明する。まず、停止状態の原子発振器 1000 を起動する際の初期動作について説明する。

【0036】

高周波制御部 126 は、高周波発生部 110 に信号を入力し、高周波発生部 110 から光源 100 に高周波信号を入力する。このとき、高周波信号の周波数を、EIT 現象が発生しないように僅かにずらしておく。例えばガスセル 102 のアルカリ金属原子としてセシウムを用いた場合、4.596... GHz の値からずらす。

【0037】

次に、中心波長制御部 124 は、中心波長可変部 108 を制御して、光 L の中心波長をスイープさせる。このとき、高周波信号の周波数は、EIT 現象が発生しないように設定されているので、EIT 現象は発生しない。吸収検出部 112 は、光 L の中心波長をスイープしたときに、光検出部 104 において出力される検出信号の強度の最小値 (吸収の底) を検出する。吸収検出部 112 は、例えば、光 L の中心波長に対する、検出信号の強度変化が一定となったところを、吸収の底とする。

30

【0038】

吸収検出部 112 が吸収の底を検出すると、中心波長制御部 124 は、中心波長可変部 108 を制御して、中心波長を固定する (ロックする)。すなわち、中心波長制御部 124 は、光 L の中心波長を、吸収の底に相当する波長に固定する。

【0039】

次に、光出力制御部 122 は、光検出部 104 が出力した検出信号の DC 成分に基づいて、光出力可変部 106 を制御し、光源 100 の光出力を変化させる。具体的には、光出力制御部 122 は、検出信号の DC 成分が所定の値になるように、光源 100 の光出力を変化させる。

40

【0040】

次に、高周波制御部 126 は、高周波発生部 110 を制御して、高周波信号の周波数を EIT 現象が発生する周波数に合わせる。その後、ループ動作に移行して、EIT 検出部 114 により EIT 信号を検出する。

【0041】

次に、原子発振器 1000 のループ動作について説明する。

50

## 【0042】

EIT検出部114は、光検出部104が出力した検出信号を同期検波し、高周波制御部126は、EIT検出部114から入力される信号に基づいて、高周波発生部110が発生する高周波信号の周波数を、ガスセル102のアルカリ金属原子の  $E_{12}$  の半分に相当する周波数となるように制御する。

## 【0043】

吸収検出部112は、光検出部104が出力した検出信号を同期検波し、中心波長制御部124は、吸収検出部112から入力される信号に基づいて、光Lの中心波長が、光検出部104において出力される検出信号の強度の最小値（吸収の底）に相当する波長となるように、中心波長可変部108を制御する。

10

## 【0044】

光出力制御部122は、光検出部104が出力した検出信号のDC成分に基づいて、光出力可変部106を制御する。具体的には、検出信号のDC成分が所定の値より小さくなった場合に、光出力制御部122は、検出信号のDC成分が所定の値になるように、光出力可変部106を制御する。光出力制御部122の制御により、光Lの中心波長が、吸収の底に相当する波長からずれたとしても、上記の中心波長制御部124の制御により、光Lの中心波長を、吸収の底に相当する波長に合わせることができる。さらに、中心波長制御部124の制御により、検出信号のDC成分が所定の値からずれたとしても、上記の光出力制御部122の制御により、検出信号のDC成分を所定の値に戻すことができる。

20

## 【0045】

なお、原子発振器1000では、光源100の温度（駆動温度）が一定となるように制御されていてもよい。

## 【0046】

## 1.2. 光源

次に、本実施形態に係る原子発振器1000の光源100について、図面を参照しながら説明する。図4は、本実施形態に係る光源100を模式的に示す平面図である。図5は、本実施形態に係る光源100を模式的に示す図4のV-V線断面図である。図6は、本実施形態に係る光源100を模式的に示す図4のVI-VI線断面図である。図7は、本実施形態に係る光源100を模式的に示す図4のVII-VII線断面図である。図8は、本実施形態に係る光源100を説明するための回路図である。

30

## 【0047】

光源100は、図4～図7に示すように、基板10と、第1反射層20と、活性層22と、第2反射層24と、電流狭窄層26と、第1電極30と、第2電極32と、熱拡散層40と、第1コンタクト層50と、第1半導体層51と、量子井戸層52と、第2半導体層53と、第2コンタクト層54と、第3電極60と、第4電極62と、絶縁層70, 72, 74と、を含む。

## 【0048】

基板10は、例えば、第1導電型（例えばn型）のGaAs基板である。

## 【0049】

第1反射層20は、基板10上に設けられている。第1反射層20は、第1導電型の半導体層である。第1反射層20は、高屈折率層と、高屈折率層よりも屈折率が低い低屈折率層と、を交互に積層した分布ブラッグ反射型（DBR）ミラーである。高屈折率層は、例えば、n型の  $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$  層である。低屈折率層は、例えば、n型の  $Al_{0.9}Ga_{0.1}As$  層である。高屈折率層と低屈折率層との積層数（ペア数）は、例えば10ペア以上50ペア以下であり、具体的には40.5ペアである。

40

## 【0050】

活性層22は、第1反射層20上に設けられている。活性層22は、例えば、i型の  $In_{0.06}Ga_{0.94}As$  層とi型の  $Al_{0.3}Ga_{0.7}As$  層とから構成される量子井戸構造を3層重ねた多重量子井戸（MQW）構造を有している。

## 【0051】

50

第2反射層24は、活性層22上に設けられている。第2反射層は、第2導電型（例えばp型）の半導体層である。第2反射層24は、高屈折率層と、高屈折率層よりも屈折率が低い低屈折率層と、を交互に積層した分布ブラッグ反射型（DBR）ミラーである。高屈折率層は、例えば、p型の $Al_{0.12}Ga_{0.88}As$ 層である。低屈折率層は、例えば、p型の $AlGaAs$ 層である。高屈折率層と低屈折率層との積層数（ペア数）は、例えば3ペア以上40ペア以下であり、具体的には20ペアである。

#### 【0052】

第2反射層24、活性層22、および第1反射層20は、光発振層29を構成している。光発振層29は、第1反射層20と活性層22と第2反射層24との順に積層された積層体である。光発振層29は、垂直共振器型のpinダイオードを構成している。図8に示すように、電源2と電氣的に接続された電極30、32間に、pinダイオード3の順方向の電圧を印加すると、活性層22において電子と正孔との再結合が起こり、発光が生じる。活性層22で発生した光は、第1反射層20と第2反射層24との間を往復し（多重反射し）、その際に誘導放出が起こって、強度が増幅される。そして、光利得が光損失を上回ると、レーザー発振が起こり、第2コンタクト層54の上面から、垂直方向に（活性層22および第1反射層20の積層方向に）レーザー光が射出される。該レーザー光の波長は、例えば、800nm以上950nm以下であり、具体的には、852nmや895nmである。

#### 【0053】

電流狭窄層26は、第1反射層20と第2反射層24との間に設けられている。図5に示す例では、電流狭窄層26は、活性層22上に設けられている。電流狭窄層26は、開口部が形成された絶縁層であり、該開口部には第2反射層24が設けられている。電流狭窄層26の平面形状（活性層22および第1反射層20の積層方向からみた形状）は、リング状である。電流狭窄層26は、電極30、32によって垂直共振器に注入される電流が平面方向（活性層22および第1反射層20の積層方向と直交する方向）に広がることを抑制することができる。

#### 【0054】

電流狭窄層26、第2反射層24、活性層22、および第1反射層20は、柱状部28を構成している。柱状部28の平面形状は、例えば、円形である。

#### 【0055】

第1電極30は、基板10下に設けられている。第1電極30は、例えば、第1電極30とオーミックコンタクトする層（図5に示す例では基板10）の下面に設けられている。第1電極30は、第1反射層20と電氣的に接続されている。第1電極30としては、例えば、基板10側から、Cr層、AuGe層、Ni層、Au層の順序で積層したものをを用いる。第1電極30は、活性層22に電流を注入するための一方の電極である。

#### 【0056】

第2電極32は、第2反射層24上に配置されている。第2電極32は、第2反射層24と電氣的に接続されている。第2電極32としては、例えば、第2反射層24側から、Cr層、Pt層、Ti層、Pt層、Au層の順序で積層したものをを用いる。第2電極32は、活性層22に電流を注入するための他方の電極である。

#### 【0057】

第2電極32は、図4に示すように、接触部32aと、引出部32bと、パッド部32cと、を有している。接触部32aは、第2反射層24と接触している。図4に示す例では、接触部32aの平面形状は、リング形状の一部を切り取った形状である。引出部32bの平面形状は、例えば、直線状である。引出部32bは、接触部32aとパッド部32cとを接続している。引出部32bおよびパッド部32cは、絶縁層70上に設けられている。パッド部32cは、電極パッドとして外部の配線等と接続される。図示の例では、パッド部32cの平面形状は、円形である。なお、絶縁層70は、例えば、柱状部28の側面に接して、柱状部28を取り囲むように設けられている。絶縁層70は、例えば、ポリイミド層、酸化シリコン層である。

10

20

30

40

50

## 【0058】

第2電極32、第2反射層24、活性層22、第1反射層20、および第1電極30は、面発光レーザー（VCSEL：Vertical Cavity Surface Emitting Laser）を構成している。

## 【0059】

熱拡散層40は、第2反射層24上に配置されている。熱拡散層40は、第2反射層24と第1コンタクト層50との間に（光発振層29と電界吸収層59との間に）配置されている。熱拡散層40の平面形状は、例えば、円形である。平面視において（活性層22および第1反射層20の積層方向からみて）、熱拡散層40の面積は、第2反射層24の上面の面積よりも小さく、熱拡散層40は、第2反射層24の外縁の内側に設けられている。熱拡散層40の熱伝導率は、第2反射層24の熱伝導率よりも高い。具体的には、熱拡散層40の熱伝導率は、第2反射層24を構成する高屈折率層の熱伝導率よりも高く、かつ第2反射層24を構成する低屈折率層の熱伝導率よりも低い。熱拡散層40は、例えば、i型のAlAs層、i型のGaAs層である。例えば、i型のGaAsの熱伝導率は、 $0.55\text{ W / (cm} \cdot \text{K)}$ である。

10

## 【0060】

第1コンタクト層50は、熱拡散層40上に配置されている。第1コンタクト層50は、熱拡散層40と第1半導体層51との間に設けられている。図4に示す例では、第1コンタクト層50の平面形状は、円形である。平面視において、第1コンタクト層50の面積と熱拡散層40の面積とは、例えば、同じである。第1コンタクト層50は、例えば、p型のGaAs層である。

20

## 【0061】

第1半導体層51は、第1コンタクト層50上に設けられている。第1半導体層51の平面形状は、例えば、円形である。平面視において、第1半導体層51の面積は、第1コンタクト層50の上面の面積よりも小さく、第1半導体層51は、第1コンタクト層50の外縁の内側に設けられている。第1半導体層51は、例えば、p型の $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 層である。

## 【0062】

量子井戸層52は、第1半導体層51上に設けられている。i型のGaAsウェル層とi型の $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ バリア層とから構成される量子井戸構造を3つ重ねた多重量子井戸（MQW）構造を有している。

30

## 【0063】

第2半導体層53は、量子井戸層52上に設けられている。第2半導体層53は、例えば、n型の $\text{Al}_{0.3}\text{Ga}_{0.7}\text{As}$ 層である。半導体層51、53は、量子井戸層52よりもバンドギャップが大きく、屈折率が小さい層である。

## 【0064】

第2半導体層53、量子井戸層52、および第1半導体層51は、電界吸収層59を構成している。電界吸収層59は、第1半導体層51と量子井戸層52と第2半導体層53との順に積層された積層体である。電界吸収層59は、pinダイオード（pinフォトダイオード）を構成している。図8に示すように、電源4と電氣的に接続された電極60、62間に、pinダイオード5の逆方向の電圧を印加すると、量子井戸層52において光を吸収することができる。これにより、光発振層29において生じた光（面発光レーザーにおいて生じたレーザー光）を吸収することができる。電界吸収層59に印加する電圧の大きさによって、量子井戸層52における光の吸収量を調整することができる。

40

## 【0065】

なお、電界吸収層59を含んで構成されるpinフォトダイオードは、量子井戸層52で光を吸収して励起される電子と正孔とによる光電流を、外部回路に信号として取り出してもよいし、取り出さなくてもよい。

## 【0066】

ここで、電界吸収層59に電圧を印加すると、量子閉じ込めシュタルク効果により、電

50

界吸収層 5 9 の吸収波長（吸収ピーク波長）が、電圧を印加しない場合に比べて、長波長側にシフトする。そのため、電界吸収層 5 9 に電圧を印加しない状態では、電界吸収層 5 9 における吸収ピーク波長を、光発振層 2 9 における（面発光レーザーにおける）発振波長よりも短波長側に設定しておく。そして、電界吸収層 5 9 に電圧を印加することで、電界吸収層 5 9 の吸収ピーク波長をシフトさせて、光発振層 2 9 において生じる光を吸収する。

【 0 0 6 7 】

例えば、光発振層 2 9 における発振波長が 8 5 2 nm の場合、電圧を印加しない状態において電界吸収層 5 9 の（量子井戸層 5 2 の）の吸収ピーク波長が 8 0 0 nm となるようにする。この場合、量子井戸層 5 2 として、厚さ 4 nm の GaAs ウェル層と厚さ 1 0 nm の Al<sub>0.3</sub>Ga<sub>0.7</sub>As バリア層とから構成される量子井戸構造を 3 つ重ねた多重量子井戸（MQW）構造を有するものを用いる。

10

【 0 0 6 8 】

第 2 コンタクト層 5 4 は、第 2 半導体層 5 3 上に設けられている。図 4 に示す例では、第 2 コンタクト層 5 4 の平面形状は、円形である。第 2 コンタクト層 5 4 の材質は、例えば、n 型の GaAs 層である。

【 0 0 6 9 】

第 3 電極 6 0 は、第 1 コンタクト層 5 0 上に設けられている。第 3 電極 6 0 は、第 1 コンタクト層 5 0 の第 1 半導体層 5 1 が配置される面に設けられている。第 3 電極 6 0 は、第 1 半導体層 5 1 と電氣的に接続されている。第 3 電極 6 0 は、例えば、第 1 コンタクト層 5 0 とオーミックコンタクトしている。第 3 電極 6 0 の材質は、例えば、第 2 電極 3 2 の材質と同じである。第 3 電極 6 0 は、電界吸収層 5 9 に電圧を印加するための一方の電極である。

20

【 0 0 7 0 】

第 3 電極 6 0 は、図 4 に示すように、接触部 6 0 a と、パッド部 6 0 c と、を有している。接触部 6 0 a は、第 1 コンタクト層 5 0 と接触している。図 4 に示す例では、接触部 6 0 a は、平面視において、リング形状の一部を切り取った形状を有し、第 2 コンタクト層 5 4 を取り囲むように設けられている。

【 0 0 7 1 】

第 3 電極 6 0 のパッド部 6 0 c は、例えば、接触部 6 0 a と接続されている。パッド部 6 0 c は、第 1 部分 6 0 1 と第 2 部分 6 0 2 とを有している。平面視において、第 1 部分 6 0 1 の面積は、第 2 電極 3 2 のパッド部 3 2 c の面積、および第 4 電極 6 2 のパッド部 6 2 c の面積よりも大きい。平面視において、第 2 部分 6 0 2 の面積は、パッド部 3 2 c の面積、およびパッド部 6 2 c の面積よりも大きい。図示の例では、第 1 部分 6 0 1 および第 2 部分 6 0 2 の平面形状は、略四角形である。平面視において、第 1 部分 6 0 1 および第 2 部分 6 0 2 は、第 2 コンタクト層 5 4 の中心に関して点対称に設けられていてもよい。

30

【 0 0 7 2 】

第 3 電極 6 0 のパッド部 6 0 c は、絶縁層 7 2 上に設けられている。パッド部 6 0 c は、電極パッドとして外部の配線等と接続される。なお、絶縁層 7 2 は、図 7 に示すように、熱拡散層 4 0 および第 1 コンタクト層 5 0 の側面に接して、絶縁層 7 0 上に設けられている。絶縁層 7 2 の材質は、例えば、絶縁層 7 0 の材質と同じである。

40

【 0 0 7 3 】

第 4 電極 6 2 は、第 2 コンタクト層 5 4 上に設けられている。第 4 電極 6 2 は、第 2 半導体層 5 3 と電氣的に接続されている。第 4 電極 6 2 は、例えば、第 2 コンタクト層 5 4 とオーミックコンタクトしている。第 4 電極 6 2 の材質は、例えば、第 1 電極 3 0 の材質と同じである。第 4 電極 6 2 は、電界吸収層 5 9 に電圧を印加するための他方の電極である。

【 0 0 7 4 】

第 4 電極 6 2 は、図 4 に示すように、接触部 6 2 a と、引出部 6 2 b と、パッド部 6 2

50

cと、を有している。接触部62aは、第2コンタクト層54と接触している。図4に示す例では、接触部62aの平面形状は、リング形状である。引出部62bの平面形状は、例えば、直線状である。引出部62bは、接触部62aとパッド部62cとを接続している。引出部62bおよびパッド部62cは、絶縁層74上に設けられている。パッド部62cは、電極パッドとして外部の配線等と接続される。図示の例では、パッド部62cの平面形状は、円形である。なお、絶縁層74は、図6に示すように、電界吸収層59および第2コンタクト層54の側面に接して、絶縁層72上に設けられている。絶縁層74の材質は、例えば、絶縁層70の材質と同じである。

#### 【0075】

なお、図示はしないが、絶縁層72は、熱拡散層40および第1コンタクト層50を取り囲むように設けられていてもよく、絶縁層74は、電界吸収層59および第2コンタクト層54を取り囲むように設けられていてもよい。

#### 【0076】

また、上記では、AlGaAs系の光源について説明したが、光源は、発振波長に応じて、例えば、GaInP系、ZnSSe系、InGaN系、AlGaN系、InGaAs系、GaInNAs系、GaAsSb系の半導体材料を用いてもよい。

#### 【0077】

##### 1.3. 光源の製造方法

次に、本実施形態に係る光源100の製造方法について、図面を参照しながら説明する。図9～図11は、本実施形態に係る光源100の製造工程を模式的に示す断面図である。

#### 【0078】

図9に示すように、基板10上に、第1反射層20、活性層22、酸化されて一部が電流狭窄層26となる被酸化層26a、第2反射層24、熱拡散層40、第1コンタクト層50、第1半導体層51、量子井戸層52、第2半導体層53、および第2コンタクト層54を、この順でエピタキシャル成長させる。エピタキシャル成長させる方法としては、例えば、MOCVD(Metal Organic Chemical Vapor Deposition)法、MBE(Molecular Beam Epitaxy)法が挙げられる。

#### 【0079】

図10に示すように、第2コンタクト層54、第2半導体層53、量子井戸層52、第1半導体層51、第1コンタクト層50、熱拡散層40、第2反射層24、被酸化層26a、活性層22、第1反射層20を、所定形状にパターニングする。パターニングは、例えば、フォトリソグラフィおよびエッチングによって行われる。第2コンタクト層54、第2半導体層53、量子井戸層52、および第1半導体層51は、同一の工程で(例えば同時に)パターニングされてもよい。第1コンタクト層50および熱拡散層40は、同一の工程でパターニングされてもよい。第2反射層24、被酸化層26a、活性層22、第1反射層20は、同一の工程でパターニングされてもよい。各層をパターニングする順序は、特に限定されない。本工程により柱状部28を形成することができる。

#### 【0080】

図11に示すように、被酸化層26aの一部を酸化して電流狭窄層26を形成する。被酸化層26aは、例えば、 $Al_xGa_{1-x}As$ ( $x=0.95$ )層である。例えば、400程度の水蒸気雰囲気中に、各層が形成された基板10を投入することにより、被酸化層26aを側面から酸化して、電流狭窄層26を形成する。本工程では、熱拡散層40が酸化しないように、熱拡散層40の側面をレジスト(図示せず)等で覆う。

#### 【0081】

図5に示すように、柱状部28の周囲に絶縁層70を形成する。換言すると、柱状部28の平面視で、柱状部28は絶縁層70で囲われている。絶縁層70は、例えば、スピンコート法やCVD法による成膜、およびパターニングより形成される。パターニングは、例えば、フォトリソグラフィおよびエッチングによって行われる。

10

20

30

40

50

## 【 0 0 8 2 】

図 6 および図 7 に示すように、絶縁層 7 0 上に、絶縁層 7 2 , 7 4 を形成する。絶縁層 7 2 , 7 4 は、例えば、スピンコート法や C V D 法による成膜、およびパターニングより形成される。パターニングは、例えば、フォトリソグラフィーおよびエッチングによって行われる。

## 【 0 0 8 3 】

図 5 に示すように、基板 1 0 下に第 1 電極 3 0 を形成し、第 2 反射層 2 4 上に第 2 電極 3 2 を形成し、第 1 コンタクト層 5 0 上に第 3 電極 6 0 を形成し、第 2 コンタクト層 5 4 上に第 4 電極 6 2 を形成する。電極 3 0 , 3 2 , 6 0 , 6 2 は、例えば、真空蒸着法およびリフトオフ法の組合せ等により形成される。なお、電極 3 0 , 3 2 , 6 0 , 6 2 を形成する順序は、特に限定されない。

10

## 【 0 0 8 4 】

以上の工程により、光源 1 0 0 を製造することができる。

## 【 0 0 8 5 】

原子発振器 1 0 0 0 は、例えば、以下の特徴を有する。

## 【 0 0 8 6 】

原子発振器 1 0 0 0 では、光源 1 0 0 は、第 1 反射層 2 0 と活性層 2 2 と第 2 反射層 2 4 との順に積層された光発振層 2 9 と、第 1 半導体層 5 1 と量子井戸層 5 2 と第 2 半導体層 5 3 との順に積層された電界吸収層 5 9 と、を有する。そのため、原子発振器 1 0 0 0 では、活性層 2 2 に注入する電流量を変化させて、光源 1 0 0 から射出される光（第 2 コンタクト層 5 4 の上面から射出される光）の中心波長を変化させる場合に、光源 1 0 0 から射出される光の光出力（光量）が所定の値からずれたとしても、電界吸収層 5 9 に（量子井戸層 5 2 に）印加する電圧を変化させることにより、光源 1 0 0 から射出される光の光出力を所定の値に戻すことができる。

20

## 【 0 0 8 7 】

さらに、原子発振器 1 0 0 0 の光源 1 0 0 では、光発振層 2 9 と電界吸収層 5 9 との間に配置され、第 2 反射層 2 4 よりも熱伝導率が高い熱拡散層 4 0 を有する。そのため、電界吸収層 5 9 が（量子井戸層 5 2 が）光を吸収して発熱したとしても、該熱を、熱拡散層 4 0 を介して外部に拡散させることができ、該熱が、第 2 反射層 2 4 や活性層 2 2 に到達することを抑制することができる。具体的には、電界吸収層 5 9 において発生した熱は、第 1 コンタクト層 5 0、熱拡散層 4 0、接触部 6 0 a、およびパッド部 6 0 c を介して外部に放出される。これにより、原子発振器 1 0 0 0 では、電界吸収層 5 9 において発生した熱による光源 1 0 0 の温度変化を抑制することができる。したがって、原子発振器 1 0 0 0 では、光源 1 0 0 の中心波長が温度によって変動することを抑制することができ、活性層 2 2 への注入電流量と、電界吸収層 5 9 への印加電圧と、によって、光源 1 0 0 の出力波長と光出力とを個別に（独立して）制御することができる。原子発振器 1 0 0 0 では、例えば、光源 1 0 0 の中心波長を一定にするために、数十 m K という単位で光源 1 0 0 の駆動温度を制御する必要があり、熱拡散層 4 0 を設けることによって、温度の制御を容易にすることができる。

30

## 【 0 0 8 8 】

さらに、活性層に注入する電流量を一定とし光源の駆動温度を一定として光源を駆動させた場合においても、長期的には、光源の出力波長および光出力は、変化する場合がある。このような場合においても、原子発振器 1 0 0 0 では、光源 1 0 0 の出力波長と光出力とを個別に制御することができ、原子発振器 1 0 0 0 の長期安定度の向上を図ることができる。

40

## 【 0 0 8 9 】

原子発振器 1 0 0 0 の光源 1 0 0 では、熱拡散層 4 0 は、i 型の A l A s 層や i 型の G a A s 層である。そのため、熱拡散層 4 0 を、光発振層 2 9 および電界吸収層 5 9 と一連の工程で（例えば同じ M O C V D 装置で）形成することができる。

## 【 0 0 9 0 】

50

原子発振器 1000 の光源 100 では、第 1 コンタクト層 50 の第 1 半導体層 51 が配置される面に、電界吸収層 59 に電圧を印加するための第 3 電極 60 が設けられている。そのため、原子発振器 1000 では、第 3 電極 60 が第 1 半導体層 51 と直接接触している場合に比べて、第 3 電極 60 の接触抵抗を低減することができる。

#### 【0091】

### 2. 原子発振器の変形例

#### 2.1. 第 1 変形例

次に、本実施形態の第 1 変形例に係る原子発振器について、図面を参照しながら説明する。図 12 は、本実施形態の第 1 変形例に係る原子発振器 2000 の光源 100 を模式的に示す断面図ある。

10

#### 【0092】

以下、本実施形態の第 1 変形例に係る原子発振器 2000 において、本実施形態に係る原子発振器 1000 の構成部材と同様の機能を有する部材については同一の符号を付し、その詳細な説明を省略する。このことは、後述する本実施形態の第 2 変形例に係る原子発振器についても同様である。

#### 【0093】

原子発振器 2000 の光源 100 は、図 12 に示すように、断熱層 42 を有する点において、上述した原子発振器 1000 の光源 100 と異なる。

#### 【0094】

断熱層 42 は、第 2 反射層 24 上に設けられている。断熱層 42 は、第 2 反射層 24 と熱拡散層 40 との間に設けられている。断熱層 42 の平面形状は、例えば、円形である。平面視において、断熱層 42 の面積と熱拡散層 40 の面積とは、例えば、同じである。断熱層 42 の熱伝導率は、第 2 反射層 24 の熱伝導率よりも低い。具体的には、断熱層 42 の熱伝導率は、第 2 反射層 24 を構成する高屈折率層の熱伝導率よりも低く、かつ第 2 反射層 24 を構成する低屈折率層の熱伝導率よりも低い。断熱層 42 は、例えば、酸化アルミニウム層 ( $Al_xO_y$  層) である。例えば、 $Al_2O_3$  の熱伝導率は、 $0.3 W / (cm \cdot K)$  である。

20

#### 【0095】

断熱層 42 は、例えば、AlAs 層を酸化することによって形成される。AlAs 層を酸化して断熱層 42 を形成する工程は、電流狭窄層 26 を形成する工程と同時に行われてもよい。断熱層 42 となる AlAs 層は、例えば、MOCVD 法により形成される。

30

#### 【0096】

原子発振器 2000 の光源 100 は、第 2 反射層 24 と熱拡散層 40 との間に、第 2 反射層 24 よりも熱伝導率が低い断熱層 42 を有する。そのため、原子発振器 2000 では、電界吸収層 59 が光を吸収して発熱したとしても、該熱を断熱層 42 によって断熱し、該熱が、第 2 反射層 24 や活性層 22 に到達することを抑制することができる。

#### 【0097】

### 2.2. 第 2 変形例

次に、本実施形態の第 2 変形例に係る原子発振器について、図面を参照しながら説明する。図 13 は、本実施形態の第 2 変形例に係る原子発振器 3000 の光源 100 を模式的に示す断面図ある。図 14 は、本実施形態の第 2 変形例に係る原子発振器 3000 の光源 100 を模式的に示す平面図ある。なお、便宜上、図 14 では、第 4 電極 62 の接触部 62a、熱拡散層 40、および断熱層 42 以外の部材の図示を省略している。

40

#### 【0098】

原子発振器 3000 の光源 100 は、図 13 および図 14 に示すように、断熱層 42 を有する点において、上述した原子発振器 1000 の光源 100 と異なる。

#### 【0099】

原子発振器 3000 の光源 100 では、平面視において、断熱層 42 の面積は、熱拡散層 40 の面積よりも小さい。断熱層 42 は、平面視において、熱拡散層 40 の外縁の内側に設けられている。第 2 反射層 24 と熱拡散層 40 との間には、空間 6 が設けられている

50

。図示の例では、平面視において、断熱層 4 2 の直径 R 1 は、第 4 電極 6 2 の接触部 6 2 a の外径と同じ大きさであり、直径 R 1 は、接触部 6 2 a の内径 R 2 よりも大きい。平面視において、断熱層 4 2 の面積は、接触部 6 2 a によって規定される開口部 1 6 2 の面積よりも大きく、開口部 1 6 2 は、断熱層 4 2 の外縁の内側に設けられている。さらに、図示の例では、平面視において、断熱層 4 2 の直径 R 1 は、電流狭窄層 2 6 に設けられた開口部の内径よりも大きい。

【 0 1 0 0 】

断熱層 4 2 は、例えば、フッ化水素 ( H F ) で選択的にエッチングすることにより、直径 R 1 を調整することができる。なお、フッ化水素で断熱層 4 2 をエッチングするには、レジスト等で電流狭窄層 2 6 を保護しておく。

10

【 0 1 0 1 】

原子発振器 3 0 0 0 の光源 1 0 0 では、平面視において、断熱層 4 2 の面積は、熱拡散層 4 0 の面積よりも小さい。そのため、原子発振器 3 0 0 0 では、第 2 反射層 2 4 と熱拡散層 4 0 との間には、空間 6 が設けられている。これにより、原子発振器 3 0 0 0 では、電界吸収層 5 9 が光を吸収して発熱したとしても、該熱を断熱層 4 2 および空間 6 により断熱し、該熱が、第 2 反射層 2 4 や活性層 2 2 に到達することを抑制することができる。

【 0 1 0 2 】

原子発振器 3 0 0 0 の光源 1 0 0 では、平面視において、断熱層 4 2 の面積は、接触部 6 2 a によって規定される開口部 1 6 2 の面積よりも大きく、開口部 1 6 2 は、断熱層 4 2 の外縁の内側に設けられている。そのため、原子発振器 3 0 0 0 では、活性層 2 2 で生じ第 2 コンタクト層 5 4 の上面から射出される光が、断熱層 4 2 と空間 6 との境界を通過することを抑制することができる。これにより、原子発振器 3 0 0 0 では、断熱層 4 2 と空間 6 との境界における光の散乱や損失を抑制することができる。

20

【 0 1 0 3 】

なお、図 1 5 に示すように、断熱層 4 2 の周囲に、断熱層よりも熱伝導率が低い低熱伝導率層 4 3 が設けられていてもよい。換言すると、断熱層 4 2 の平面視で、断熱層 4 2 は低熱伝導率層 4 3 で囲われていてもよい。低熱伝導率層 4 3 は、第 2 反射層 2 4 と熱拡散層 4 0 との間に設けられている。低熱伝導率層 4 3 は、例えば、ポリイミド層である。例えば、ポリイミドの熱伝導率は、 $0.018 \text{ W} / (\text{cm} \cdot \text{K})$  である。低熱伝導率層 4 3 は、例えば、CVD法、スピンコート法により形成される。低熱伝導率層 4 3 を設けることにより、第 2 反射層 2 4 と熱拡散層 4 0 との間に空間 6 が設けられている場合 ( 図 1 3 に示す場合 ) に比べて、耐衝撃性を向上させることができる。さらに、電界吸収層 5 9 が光を吸収して発熱したとしても、該熱を断熱層 4 2 および低熱伝導率層 4 3 により断熱し、該熱が、第 2 反射層 2 4 や活性層 2 2 に到達することを抑制することができる。

30

【 0 1 0 4 】

本発明は、本願に記載の特徴や効果を有する範囲で一部の構成を省略したり、各実施形態や変形例を組み合わせたりしてもよい。

【 0 1 0 5 】

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

40

【 符号の説明 】

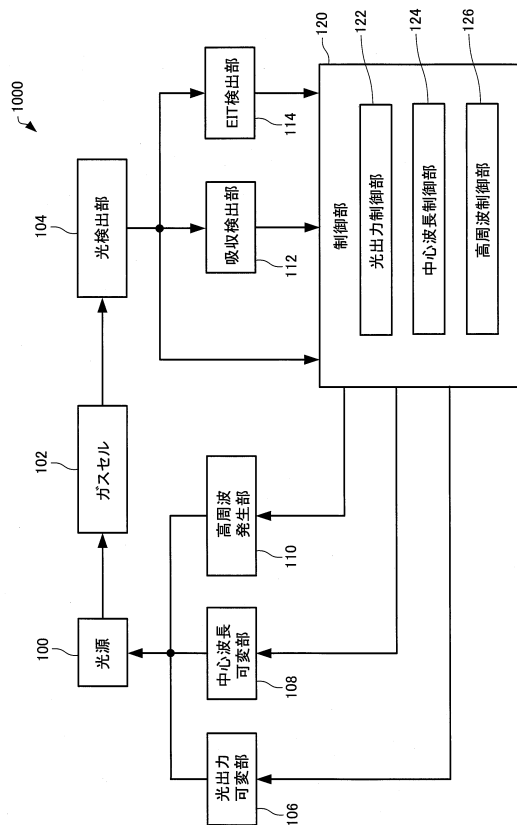
【 0 1 0 6 】

2 ... 電源、 3 ... p i n ダイオード、 4 ... 電源、 5 ... p i n ダイオード、 6 ... 空間、 1 0 ... 基板、 2 0 ... 第 1 反射層、 2 2 ... 活性層、 2 4 ... 第 2 反射層、 2 6 ... 電流狭窄層、 2 6 a ... 被酸化層、 2 8 ... 柱状部、 2 9 ... 光発振層、 3 0 ... 第 1 電極、 3 2 ... 第 2 電極、 3 2 a ... 接触部、 3 2 b ... 引出部、 3 2 c ... パッド部、 4 0 ... 熱拡散層、 4 2 ... 断熱層、 4 3 ...

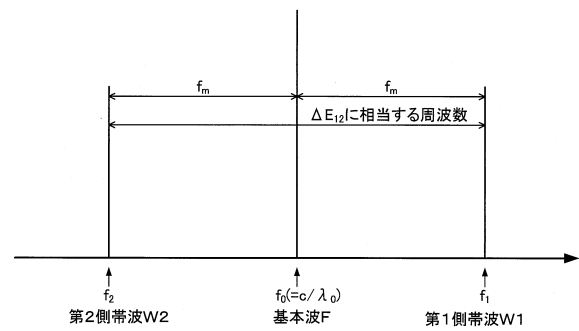
50

低熱伝導率層、50...第1コンタクト層、51...第1半導体層、52...量子井戸層、53...第2半導体層、54...第2コンタクト層、59...電界吸収層、60...第3電極、60a...接触部、60c...パッド部、62...第4電極、62a...接触部、62b...引出部、62c...パッド部、70, 72, 74...絶縁層、100...光源、102...ガスセル、104...光検出部、106...光出力可変部、108...中心波長可変部、110...高周波発生部、112...吸収検出部、114...EIT検出部、120...制御部、122...光出力制御部、124...中心波長制御部、126...高周波制御部、162...開口部、601...第1部分、602...第2部分、1000, 2000, 3000...原子発振器

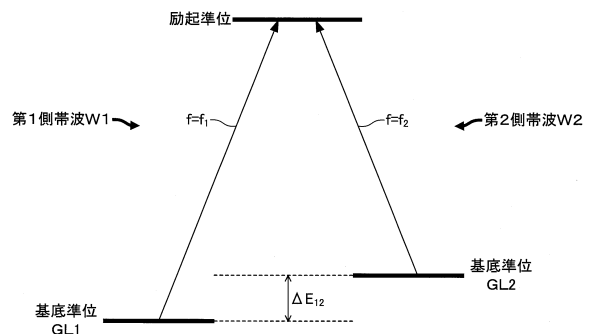
【図1】



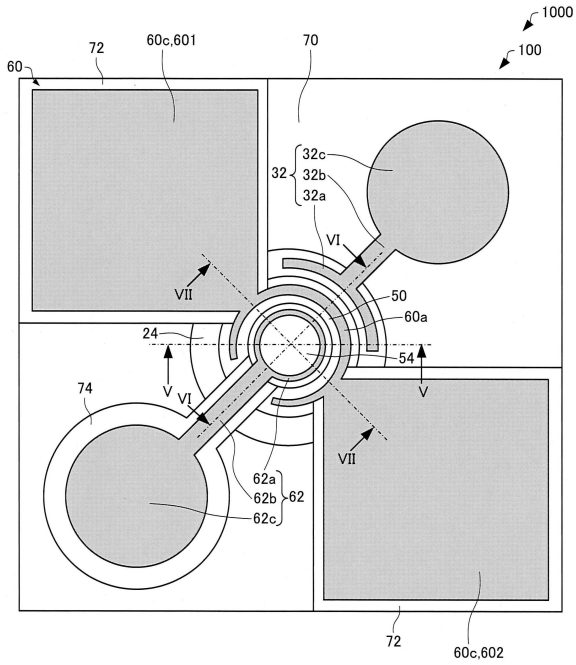
【図2】



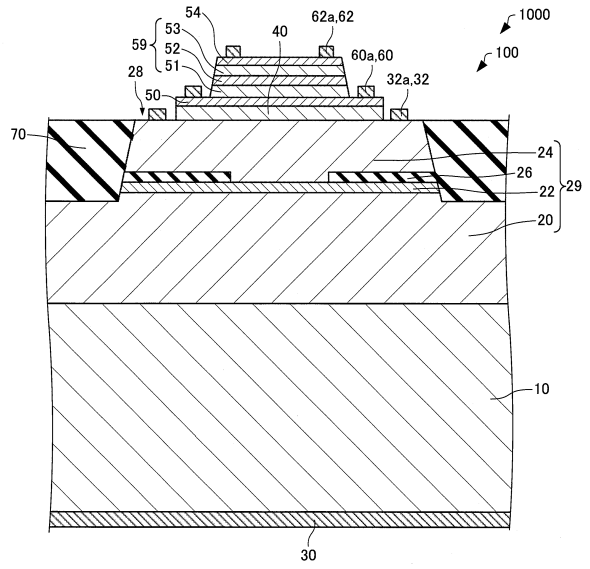
【図3】



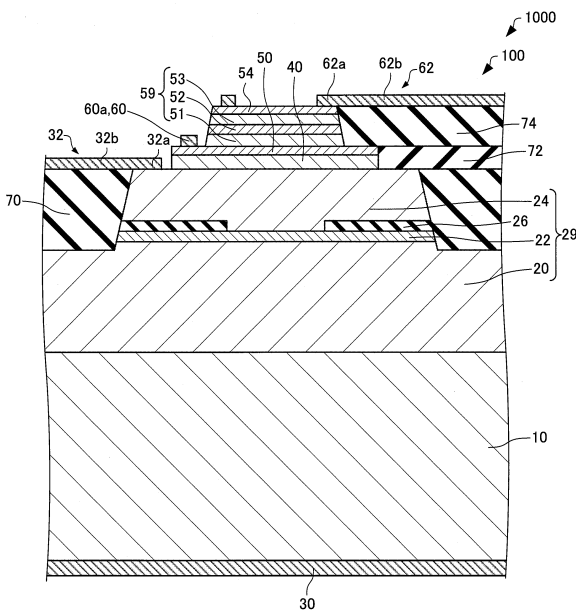
【図4】



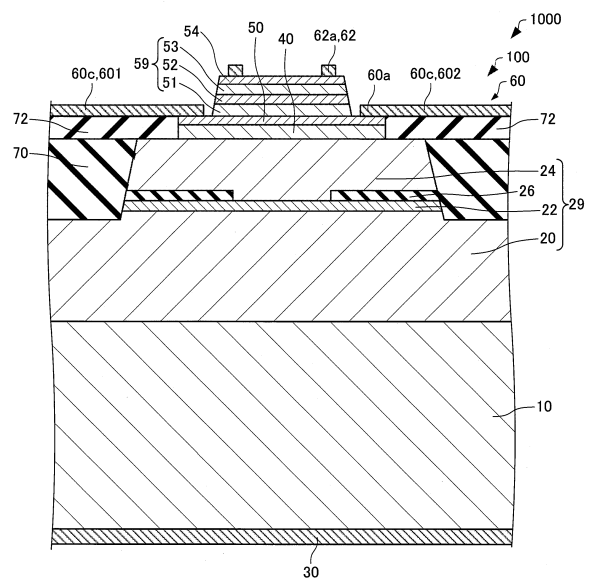
【図5】



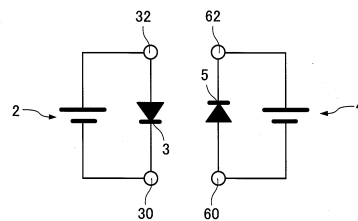
【図6】



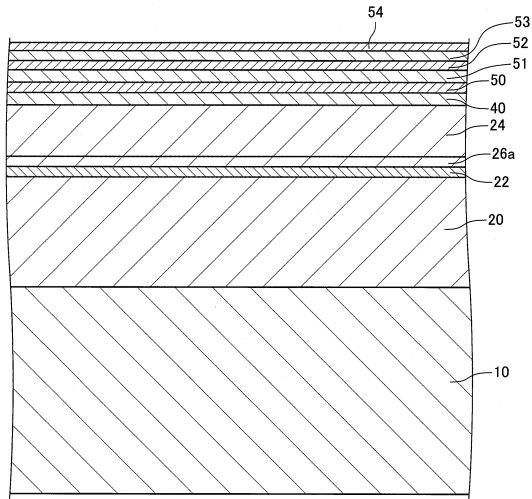
【図7】



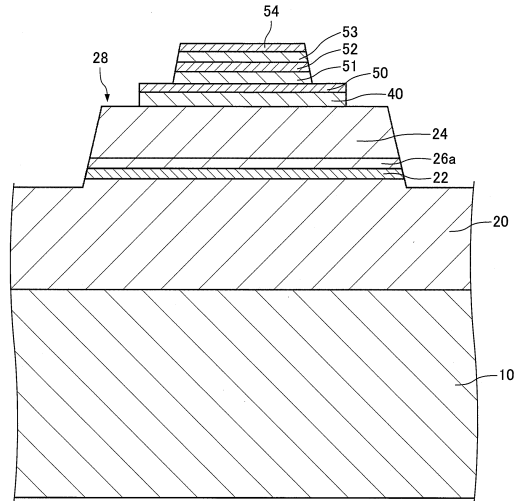
【図8】



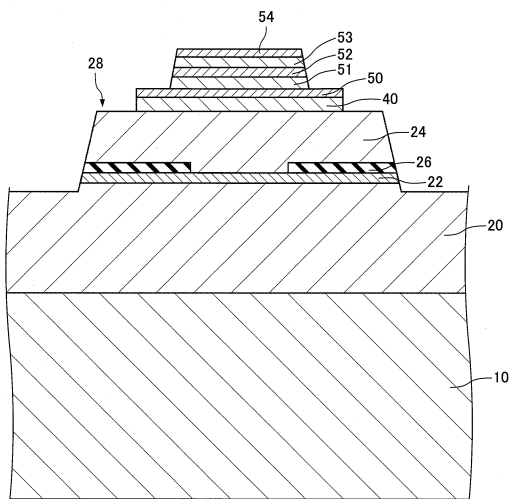
【図9】



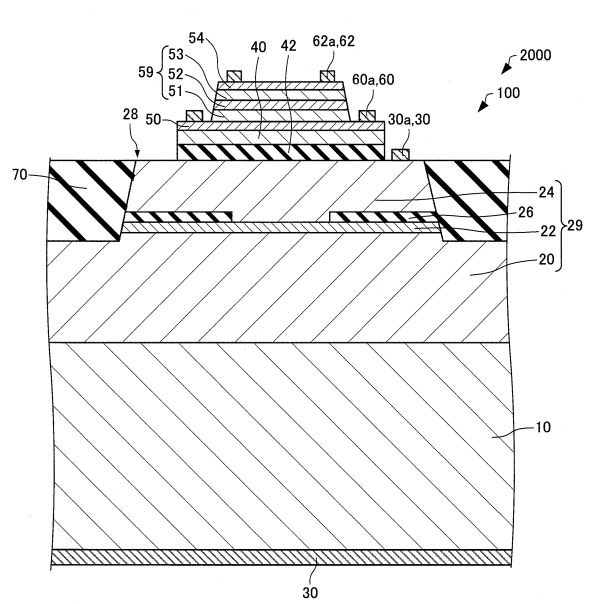
【図10】



【図11】



【図12】





## フロントページの続き

(51) Int.Cl.		F I			
H 0 1 S	5/0683	(2006.01)	H 0 1 S	5/0683	
H 0 1 S	5/026	(2006.01)	H 0 1 S	5/026	6 1 2

(56) 参考文献 特開 2 0 1 3 - 1 4 3 4 9 7 ( J P , A )  
 国際公開第 2 0 0 9 / 1 2 5 6 3 5 ( W O , A 1 )  
 特開 2 0 0 9 - 0 8 8 4 4 5 ( J P , A )  
 特開 2 0 0 6 - 2 1 6 8 6 2 ( J P , A )  
 特開 2 0 0 5 - 1 9 7 5 4 9 ( J P , A )  
 特開 2 0 0 3 - 2 0 2 5 2 9 ( J P , A )  
 特開 2 0 1 5 - 1 7 7 0 0 0 ( J P , A )  
 特開 2 0 1 5 - 0 6 2 1 6 7 ( J P , A )  
 米国特許出願公開第 2 0 0 9 / 0 2 5 6 6 3 8 ( U S , A 1 )  
 米国特許出願公開第 2 0 0 7 / 0 2 9 1 8 0 8 ( U S , A 1 )  
 中国特許出願公開第 1 0 1 6 6 7 7 1 5 ( C N , A )  
 原坂和宏, チップスケール原子発振器(CSAC)用894.6nm VCSEL, 電子情報通信学会2013年ソサイエティ大会講演論文集, 日本, 電子情報通信学会, 2013年, S-30-31  
 Wipiejewski T. et al., Improved performance of vertical-cavity surface-emitting laser diodes with Au-plated heat spreading layer, Electronics Letters, 米国, 1995年 2月16日, Vol.31, No.4, 279-281

(58) 調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 1 S 1 / 0 0 - 1 / 0 6 , 5 / 0 0 - 5 / 5 0  
 H 0 3 L 1 / 0 0 - 9 / 0 0  
 J D r e a m I I I