

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第4956119号  
(P4956119)

(45) 発行日 平成24年6月20日(2012.6.20)

(24) 登録日 平成24年3月23日(2012.3.23)

(51) Int.Cl.

F I

H O 1 S 5/343 (2006.01)

H O 1 S 5/343 6 1 0

H O 1 L 33/32 (2010.01)

H O 1 L 33/00 1 8 6

H O 1 S 5/12 (2006.01)

H O 1 S 5/12

請求項の数 3 (全 21 頁)

(21) 出願番号 特願2006-262378 (P2006-262378)  
 (22) 出願日 平成18年9月27日(2006.9.27)  
 (65) 公開番号 特開2008-85033 (P2008-85033A)  
 (43) 公開日 平成20年4月10日(2008.4.10)  
 審査請求日 平成21年9月28日(2009.9.28)

(73) 特許権者 000001007  
 キヤノン株式会社  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号  
 (74) 代理人 100086818  
 弁理士 高梨 幸雄  
 (72) 発明者 高木 章成  
 東京都大田区下丸子3丁目30番2号 キ  
 ヤノン株式会社内  
 審査官 松崎 義邦

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 発光素子およびそれを用いた表示素子

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

屈折率周期構造を有するフォトニック結晶と、該フォトニック結晶中に該屈折率周期構造を乱す孤立した欠陥部により形成された共振器と、共振器にInを含む窒化物半導体で形成された活性部を有する発光素子において、

該活性部が有するバンドギャップエネルギーで規定される波長は、該フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ帯域に含まれており、共振器がフォトニックバンドギャップ帯域内で有する共振モードの最も短波長側のピーク波長より短波長に設定されていることを特徴とする発光素子。

【請求項 2】

前記バンドギャップエネルギーで規定される波長と、共振モードのピーク波長の差は5nm以上であることを特徴とする請求項1に記載の発光素子。

【請求項 3】

前記活性部はInGa<sub>1-x</sub>Nを含み、InGa<sub>1-x</sub>Nの組成がIn<sub>x</sub>Ga<sub>1-x</sub>Nと表されるとき、

$$0.25 < x < 1$$

なる条件を満足することを特徴とする請求項1又は2に記載の発光素子。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

10

20

本発明は、フォトリック結晶を用いた発光ダイオード（LED）、半導体レーザ（LD）等の発光素子、およびそれを用いた表示素子に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、波長以下の大きさの構造物によって電磁波の透過・反射特性などを制御するという概念は、Yablonovitchによって提唱されている（非特許文献1）。

【0003】

この非特許文献1によると、波長以下の構造を周期的に配列することによって電磁波の透過・反射特性などを制御可能で、電磁波の波長を光の波長オーダーにまで小さくすることによって、光の透過・反射特性を制御することができる。

10

【0004】

このような構造物はフォトリック結晶として知られている。又、構造を3次元的な微細周期構造にすることによって、ある波長域において、入射角依存性がなく、かつ光損失が無損失の100%の反射率を有する反射ミラーを実現できることが示唆されている。

【0005】

このように、ある波長域で反射率をほぼ100%にすることができる概念は、従来の半導体を持つエネルギーギャップとの比較から、フォトリックバンドギャップと言われている。

【0006】

このようなフォトリックバンドギャップを呈する構造体が種々と提案されている（特許文献1、2）。

20

【0007】

また、構造を3次元的な微細周期構造にすることによって、あらゆる方向から入射した光に対してフォトリックバンドギャップを実現することができる。

【0008】

以下、これを完全フォトリックバンドギャップと呼ぶことにする。完全フォトリックバンドギャップを有する構造中に、孤立した点欠陥部を設けることにより高い閉じ込め効果を有する微小共振器を構成することができる。このように構成した微小共振器により、発光素子における自然放出を抑制し、高効率な発光素子を実現するものが提案されている。

【0009】

30

一方、従来より表示素子を構成する高効率で高輝度の光源として、LEDやLDが利用されている。フルカラーの画像表示のためには、赤、緑、青の3原色の光を放射する光源が必要となる。

【0010】

このうち、赤色光源としては活性層にAlGaAs、GaPなど、青色光源としてはAlGaN、InAlGaNなどの化合物半導体を用いた小型高出力のLED、LDが利用されている。緑色光源としては、活性層にInGaNを用いたLEDやLD励起固定レーザのSHG（第2高調波）を用いた発光素子が利用されている。

【0011】

これらの発光素子として、InGaNを用いた発光素子は、活性層のバンドギャップエネルギーの値を、緑色の波長域（500～550nm）に一致させるために、Inの組成比を大きくしなければならない。

40

【0012】

しかしながら、Inの組成比を大きくすると結晶性が悪化し、発光効率の低下や安定した発光が得られないなどの問題が生じてくる。この課題に対し、例えばZnなどの不純物をドーピングして、不純物の準位を介した発光により緑色発光を得る方法が提案されている。

【0013】

さらに、上記方法が有する課題である低出力、色純度の低下を改善する方法が提案されている。例えば歪量子井戸により、活性層の組成比から想定されるバンドギャップエネルギーよりも長波長で発振させる窒化物半導体発光素子の製作方法が提案されている（特許

50

文献 3)。

【0014】

この特許文献 3 では、InGaN 量子井戸活性層の厚さを非常に薄くして、それと接する AlGaIn クラッド層との格子不整合により、InGaN 活性層に格子歪を与え、発振波長を長波長化させた発光素子を開示している。

【非特許文献 1】Physical Review Letters、Vol.58、pp.2059、1987 年

【特許文献 1】特開 2002 - 148463 号公報

【特許文献 2】特表 2002 - 522810 号公報

【特許文献 3】特開平 08 - 316528 号公報

【発明の開示】

10

【発明が解決しようとする課題】

【0015】

特許文献 3 で提案されている窒化物半導体発光素子では、InGaIn を用いた発光素子を開示している。特許文献 3 における不純物をドーピングする方法は、低効率、短寿命であることが課題となっている。また、格子歪みを与える方法は、結晶成長時に格子不整合部でクラックが生じ、作製が非常に困難であることが課題となっている。

【0016】

また、固体レーザを用いた発光素子は、構成要素が多いことから発光素子サイズが大きくなり、また発光効率が低く消費電力が大きくなるという問題があった。

【0017】

20

一方、フォトリック結晶を用いた従来の半導体レーザは、活性層のバンドギャップエネルギーで規定される波長と共振器の共振モードピーク波長を一致させた系において、低閾値発振や高効率化を実現するためのアプローチである。よって、従来の LD では実現できていない波長で発振させる方法は何ら開示されていない。

【0018】

本発明は、小型で高効率で緑色光の発光が容易な発光素子及びそれを有する発光素子の提供を目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0019】

本発明の発光素子は、屈折率周期構造を有するフォトリック結晶と、該フォトリック結晶中に該屈折率周期構造を乱す孤立した欠陥部により形成された共振器と、共振器に In を含む窒化物半導体で形成された活性部を有する発光素子において、

30

該活性部が有するバンドギャップエネルギーで規定される波長は、該フォトリック結晶のフォトリックバンドギャップ帯域に含まれており、共振器がフォトリックバンドギャップ帯域内で有する共振モードの最も短波長側のピーク波長より短波長に設定されていることを特徴としている。

【発明の効果】

【0020】

本発明によれば、小型で高効率で緑色光の発光が容易な発光素子及びそれを有する発光素子が得られる。

40

【発明を実施するための最良の形態】

【0021】

【実施例 1】

【0022】

図 1 は、本発明の発光素子の実施例 1 の概念断面図である。

【0023】

図 1 の発光素子 10 は、p 型電極(電極部) 11、p 型コンタクト層 12、p 型クラッド部 13、活性部 14、単一モード共振器 15、絶縁部 16、n 型クラッド部 17、n 型コンタクト層 18、n 型電極(電極部) 19 を有している。

【0024】

50

電極部 11, 19 以外は 3 次元フォトニック結晶で形成されている。共振器 15 はフォトニック結晶の屈折率周期構造を乱す孤立した点欠陥を有している。

【0025】

p 型電極 11 から正孔が, n 型電極 19 から電子が注入され, それぞれコンタクト層 12, 18, クラッド部 13, 17 を介して, 活性部 14 にキャリアが注入される。注入したキャリアの結合により, 光が発生し, 共振器 15 で閉じ込められ共振, 増幅が行われ, レーザ発振が起こる。絶縁部 16 により電流狭窄構造を形成し, 活性部 14 に効率良くキャリアの注入を行っている。活性部 14 は  $\text{In}_{0.28}\text{Ga}_{0.72}\text{N}$  で形成され, バンドギャップエネルギーは 500 nm である。フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ帯域は, 波長 460 nm から波長 540 nm である。共振器 15 の共振スペクトルのピーク波長は 520 nm に設定されている。これらの構成により, 従来困難であった高効率な緑色光発光の発光素子を実現している。

10

【0026】

次に, 本実施例の発光素子 10 の動作原理を従来の LD を参照して説明する。

【0027】

図 2 は、従来の LD における, 自然放出スペクトル, 共振スペクトル, 利得スペクトル, 発光スペクトルの説明図である。

【0028】

通常の LD では, 光の種である自然放出光 (図 2 (A)) のうち, 共振器の共振モードと一致する波長の光が, 共振器内に閉じ込められ, かつその波長において共振器内の活性部が高い利得を持つ場合に, 誘導放出が起こり, レーザ発振する。

20

【0029】

つまり, 利得スペクトル (図 2 (C)) と, 共振器が有する共振スペクトル (図 2 (B)) の関係で規定される波長でレーザ発振 (図 2 (D)) が生じる。利得スペクトルは, キャリア運動量行列要素とキャリアのエネルギー状態密度と擬フェルミ準位に依存する占有確率の積で表される。利得スペクトルピークは, バンドギャップエネルギーで規定される状態密度で波長がほぼ決定され, キャリア密度に関係する擬フェルミ準位で規定される占有確率に依存してシフトが起こる。

【0030】

また, ライン形状関数で表されたバンド内緩和は, 利得スペクトル形状の広がりに関与する。つまり, 利得スペクトルのピーク波長は, バンドギャップエネルギーに強く依存し, 結果的に, 発振波長は, 活性部のバンドギャップエネルギーで規定される本来の発光波長に概略一致する。なお, 活性部の本来の発光波長 (単位は nm) は, バンドギャップエネルギーを  $E_g$  (単位は eV) とした場合,  $\lambda = 1240 / E_g$  で規定される。また, ボーイングパラメータを 1 とすると,  $\text{In}_x\text{Ga}_{1-x}\text{N}$  活性部のバンドギャップエネルギー  $E_g$  の理論値は, 式 1 で表すことができる。

30

【0031】

$$E_g = E_{g1} \cdot x + E_{g2} \cdot (1 - x) - x \cdot (1 - x) \quad \dots \text{式 1}$$

ここで  $E_{g1}$  は  $\text{InN}$  のバンドギャップエネルギー (0.8 eV) を表し,  $E_{g2}$  は  $\text{GaN}$  のバンドギャップエネルギー (3.4 eV) を表す。

40

【0032】

例えば,  $\text{In}$  組成比  $x$  が 0.1 での発光波長は 407 nm,  $\text{In}$  組成比  $x$  が 0.3 で発光波長は 515 nm となる。なお, 利得スペクトルの広がり量は, キャリア密度や活性層の構造により異なり, 半値全幅が, ダブルヘテロ (DH) 構造の場合で 40 nm 程度, 量子井戸構造で 10 乃至 20 nm 程度である。

【0033】

このように, 通常の LD では, 発振閾値以下を除き, 自然放出スペクトルは, 発振スペクトルにあまり関与しない。これは, 自然放出過程を示すキャリアのバンド間緩和で発生する光の状態に, 制限がほとんどないためである。

【0034】

50

結果的に、自然放出スペクトルがキャリアの状態に強く依存し、また自然放出光のうち誘導放出に寄与する割合である自然放出係数が非常に低くなる。活性部では、共振モード以外の波長の自然放出光も発生するため、発振波長以外の光はエネルギーの損失となり、効率低下の原因となる。

【 0 0 3 5 】

よって、通常のLDでは、自然放出を含むエネルギー損失を上回る増幅が必要となるため、バンドギャップエネルギーで規定される利得スペクトルのピーク波長と共振スペクトルのピーク波長を一致させる必要がある。

【 0 0 3 6 】

従来のLD構造では、活性部が有するバンドギャップエネルギーで規定される波長を、共振器が有する共振スペクトルのピーク波長より短波長に設定しても、損失が大きく発光が得られない。

【 0 0 3 7 】

また、現状の製造方法では、レーザに利用可能な高品質な膜を作製する場合、In組成比xは最大で0.25程度が限界である。よって、発光波長は480nm程度が長波長側の限度となる。

【 0 0 3 8 】

図3は本実施例の発光素子10における、自然放出スペクトル、共振スペクトル、利得スペクトル、発光スペクトルの説明図である。図3(A)において、自然放出スペクトルの実線は実際のスペクトルを、点線はフォトリソニック結晶共振器を用いなかった場合のスペクトルを表す。

【 0 0 3 9 】

フォトリソニック結晶による微小共振器を用いた発光素子においては、キャリアのバンド間緩和で発生する光の状態が、強い束縛を受ける。フォトリソニック結晶共振器内では、光のとり得るエネルギー状態が制限を受けるため、バンド間緩和が生じるキャリア間のエネルギー差が制限され、結果的に自然放出スペクトル(図3(A))が制限される。

【 0 0 4 0 】

よって、自然放出スペクトルが共振スペクトル(図3(B))とほぼ同一のスペクトル形状となる。

【 0 0 4 1 】

つまり、自然放出係数がほぼ1となり、自然放出スペクトルと誘導放出スペクトル(共振スペクトル)が、ほぼ同一のスペクトル形状となる。

【 0 0 4 2 】

よって、バンドギャップエネルギー $E_g$ で規定される利得スペクトル(図3(C))のピーク波長 $=1240/E_g$ を、共振スペクトルのピーク波長より短波長側にずらした場合でも、共振モード以外の光が発生しない。このため、効率の良い発光(図3(D))が可能となる。

【 0 0 4 3 】

緑色(例えば波長520nm)発光を得るために、活性部14のバンドギャップエネルギー $E_g$ で規定される波長を短波長側、例えば500nm程度に設定しても、効率の良い発光が得られる。

【 0 0 4 4 】

つまり、InGaNより成る活性部14のInの組成比Xを低い値に保つことができ、結果として結晶欠陥が生じず、さらに寿命が長く高効率の発光が得られる。

【 0 0 4 5 】

このような抑制は、作製時の結晶欠陥によって生じる欠陥準位を介しての遷移の抑制にも作用するため、結晶欠陥を含んでいる場合においても、その影響は低減され、高効率の発光が得られる。

【 0 0 4 6 】

以上述べたように、本実施例では活性部が有するバンドギャップエネルギー $E_g$ で規定

10

20

30

40

50

される利得スペクトルのピーク波長 ( $\lambda = 1240 / E_g$ ) を、共振器が有する共振スペクトルのピーク波長より短波長に設定している。これにより、フォトニック結晶共振器で自然放出光が制御され、高効率の緑色光を発する発光素子を実現できる。

【0047】

図1における、クラッド部13, 17を形成する媒質としては、活性部14を形成する媒質よりもバンドギャップエネルギーの大きい媒質を用いている。これにより、ダブルヘテロ構造を形成し、キャリア閉じ込め効果および光閉じ込め効果を高め、エネルギー効率を高めている。

【0048】

具体的には、活性部14を形成する媒質よりも低いIn組成比のInGa<sub>x</sub>NやGa<sub>1-x</sub>N, AlGa<sub>x</sub>Nを用いている。

10

【0049】

図1に示す実施例1においては、発光波長として520nmを用いたが、これに限定されるものではなく、緑色と認識される領域である波長500乃至波長550nmの範囲で、決定すればよい。

【0050】

さらに、本原理は緑色光の波長に限定されるものではないため、発光波長は550nm以上の長波長でも良い。また、In組成比xの値として0.28を用いたが、これに限定されるものではなく、利得スペクトルの広がりや発光波長を考慮して決定すればよい。

【0051】

20

特に、In組成比xが0.25以上の値を用いると、比較的高い利得の位置で発光が起きるため、高効率の発光が得られる。即ち  $0.25 \leq x < 1$  なる条件を満足するのが良い。

【0052】

In組成比xの値は、0.01の分解能で制御が可能である。よって、波長にして2nm程度の分解能で、バンドギャップエネルギーが制御可能である。

【0053】

活性部14のIn組成比xを低く抑えることが可能なため、活性部14のバンドギャップエネルギーで規定される波長と、発光波長を規定する共振モードのピーク波長の差は、大きい方が望ましく、5nm以上の値とするのが良い。

30

【0054】

より望ましくは、ピーク波長の差を10nm以上とすることにより、発光素子の作製が容易になる。ただし、波長の差を大きくし過ぎると、共振モードのピーク波長での利得の値が小さくなり、発光効率が低下する。

【0055】

利得スペクトルの広がり量を考慮し、波長の差は50nm以下が望ましい。また、活性部14にInGa<sub>x</sub>Nと同程度のバンドギャップエネルギーを有するInAl<sub>1-x</sub>NやInAlGa<sub>x</sub>N等の窒化物半導体を用いても良い。

【0056】

また、図1に示す実施例1においては、3次元フォトニック結晶を用いたが、2次元フォトニック結晶を用いても良い。2次元フォトニック結晶を用いた場合は、屈折率周期構造が形成されていない方向に関しては、屈折率差を利用した全反射により、光を閉じ込める構成とする。ただし、2次元フォトニック結晶では、屈折率周期構造が形成されていない1方向に関しては、フォトニック結晶共振器による自然放出の抑制効果は得られない。よって、より高い抑制効果を得て、効率を高めるためには、3次元フォトニック結晶が望ましい。

40

【0057】

フォトニック結晶共振器の共振モードは、フォトニックバンドギャップ内で単一モードであることが、動作安定性から望ましい。ただし、マルチモードの場合でも、活性部の利得が発光波長での値より低い値である長波長側に共振モードが存在する場合は、利得の高

50

い方の波長でのみレーザ発振が起きるため、許容できる。

【0058】

また、図1に示す実施例1においては、電極部11、19以外の部分を全てフォトニック結晶で形成したが、光閉じ込め機能を有する部分のみフォトニック結晶で形成しても良い。例えば、電極部11、19およびコンタクト部12、18以外の部分(クラット部13、17、絶縁部16、活性部14)をフォトニック結晶で形成しても良い。

【0059】

さらに、前述したように、フォトニック結晶を用いた共振器による自然放出の抑制効果は、結晶欠陥による欠陥準位にも作用する。このため、歪量子井戸を導入しても、効率の低下は抑えられる。よって、歪量子井戸と組合せて長波長化を行い、より低いIn組成比xのInGa<sub>N</sub>活性部を用いても良い。

10

【0060】

以上のように本実施例の発光素子10は、屈折率周期構造を有しフォトニックバンドギャップを呈するフォトニック結晶と、該フォトニック結晶中に該屈折率周期構造を乱す孤立した欠陥部により形成された共振器15を有している。更に、共振器15の内部にInGa<sub>N</sub>を含む活性部14を有している。

【0061】

該活性部14が有するバンドギャップエネルギーで規定される波長 $\lambda_1 = 500 \text{ nm}$ が、該フォトニック結晶のフォトニックバンドギャップ帯域 $460 \text{ nm} \sim 540 \text{ nm}$ に含まれている。又、活性部14が有するバンドギャップエネルギーで規定される波長 $500 \text{ nm}$ は、共振器15がフォトニックバンドギャップ帯域内 $460 \sim 540 \text{ nm}$ で有する共振モードの最も短波長側のピーク波長 $\lambda_2 = 520 \text{ nm}$ より短波長に設定されている。

20

【0062】

これによって緑色光の発光を効率的に行うことができる発光素子を得ている。

【実施例2】

【0063】

次に、本発明の実施例2の発光素子に係るフォトニック結晶共振器構造の具体的な構成を説明する。

【0064】

図4は本発明の実施例2の発光素子に用いる共振器の要部概略図である。共振器20は、周期構造部100とその内部に形成された周期欠陥部(点状欠陥部)120を有している。周期構造部100は、xy平面を含む層101~112の12層を基本周期としてz方向に積層して構成されている。

30

【0065】

図5は各層101~112のxy断面の一部の概略図である。第1の層101および第7の層107は、第1の媒質(高屈折率)によるy軸に平行な複数の柱状構造101aおよび107aが等間隔Pでx方向に配置されている。柱状構造101aおよび107aはx軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。また、第4の層104および第10の層110は、第1の媒質によるx軸に平行な複数の柱状構造104aおよび110aが等間隔Pでy方向に配置されている。柱状構造104aおよび110aはy軸方向に $P/2$ ずれた位置に配置されている。

40

【0066】

第2、第3の層102、103は第1、第4の層101、104に挟まれた付加層である。

【0067】

第5、第6の層105、106は第4、第7の層104、107に挟まれた付加層である。

【0068】

第8、第9の層108、109は第7、第10の層107、110に挟まれた付加層である。

50

## 【0069】

第11、第12の層111、112は第10の層110と、第1（次の基本周期に相当する第1の層）の層に挟まれた付加層である。

## 【0070】

付加層を構成する第2の層102および第3の層103には、第1の層101中の柱状構造101aおよび第4の層104中の柱状構造104aの交点に相当する位置に、第1の媒質による離散構造102aおよび103aが配置されている。

## 【0071】

離散構造102aおよび103aは、 $xy$ 平面内において互いに接しないように離散的に配置されている。

10

## 【0072】

なお、離散構造102aと103aは $xy$ 面内における90度の回転により相互に重なる対称性を有している。

## 【0073】

同様に、柱状構造を含む層の間にあり付加層を構成する第5の層105、第6の層106、第8の層108、第9の層109、第11の層111、第12の層112には、離散構造105a、106a、108a、109a、111a、112aが配置されている。

## 【0074】

離散構造105a、106a、108a、109a、111a、112aは、隣接する層中の柱状構造の交点に相当する位置に、 $xy$ 平面内において離散的に配置された第1の媒質による構成されている。

20

## 【0075】

各層中の柱状構造および離散構造は互いに接しており、各層中の柱状構造および離散構造以外の部分は第2の媒質（低屈折率）で充填されている。第1、第2の媒質の屈折率、柱状構造および離散構造の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数域（波長域）に非常に広い周波数帯域（波長帯域）で完全フォトリックバンドギャップを得ている。

## 【0076】

本実施例では、第1の媒質の屈折率を3.0、第2の媒質の屈折率を1としている。柱状構造の間隔を $P$ として、柱状構造を含む全ての層101、104、107、110の $z$ 軸方向の厚さを $0.15 \times P$ としている。

30

## 【0077】

離散構造を含む全ての層102、103、105、106、108、109、111、112の $z$ 方向の厚さを $0.1 \times P$ としている。

## 【0078】

全ての柱状構造を断面の $z$ 方向の一辺の長さが $0.15 \times P$ 、 $x$ 方向あるいは $y$ 方向で $0.25 \times P$ の長方形の角柱としている。

## 【0079】

さらに、全ての離散構造を $xy$ 断面の一辺の長さが $0.35 \times P$ 、 $0.65 \times P$ の長方形であり、 $z$ 方向の厚さ $0.1 \times P$ の直方体として、平面波展開法によりフォトリックバンド構造を解析した結果を図6に示す。

40

## 【0080】

図6において、横軸は、波数ベクトルすなわちフォトリック結晶に入射する電磁波の入射方向を表している。

## 【0081】

例えば $K$ 点は $x$ 軸（もしくは $y$ 軸）に平行な波数ベクトル、 $X$ 点は $xy$ 平面内において、 $x$ 軸（あるいは $y$ 軸）に対して45°の傾きをもった波数ベクトルを表している。

## 【0082】

一方、縦軸は格子周期で規格化した周波数（規格化周波数）を示している。図6中のハッチングで示した規格化周波数 $0.395$ から $0.479$ の領域においては、光の入射方

50



向によらず光が存在できず、完全フォトリックバンドギャップが形成されている。柱状構造の間隔  $P$  が  $235\text{ nm}$  とすると、波長  $490\text{ nm}$  から波長  $595\text{ nm}$  の波長域で完全フォトリックバンドギャップが形成される。

#### 【0083】

図7は、図4の周期欠陥部（点状欠陥部）120付近の拡大図である。周期欠陥部120は、屈折率3.0の第1の媒質で、厚さ  $D_z$ 、幅  $D_x$ 、 $D_y$  の直方体形状をしている。このように、周期欠陥部120を形成することにより、周期構造部100が持つフォトリックバンドギャップ内の波長域中の一部の波長域の電磁波に対して、周期欠陥部120のみ電磁波が存在できる状態にすることができる。そして、非常に小さい領域に電磁波を閉じ込め、かつ閉じ込め効果の高い高性能な共振器を構成している。

10

#### 【0084】

図7において、周期欠陥部120の  $x$  方向および  $y$  方向の中心座標が、それぞれ離散構造131aの  $x$  方向および  $y$  方向の中心座標と同一となるように形成する。

#### 【0085】

$z$  方向は周期欠陥部120の  $z$  方向の最小座標が柱状構造132aの  $z$  方向の最小座標と同一となるように形成する。周期欠陥部120の形状を  $D_x = 0.95 \times P$ 、 $D_y = 0.35 \times P$ 、 $D_z = 0.35 \times P$  とすることにより、フォトリックバンドギャップ内に欠陥モードを一つだけにすること、すなわち単一モード化が可能となる。

#### 【0086】

周期欠陥部120は、離散構造を含む層と柱状構造を含む層にまたがって形成される。製造工程を考慮すると、周期欠陥部120の厚さ  $D_z$  は離散構造あるいは柱状構造を含む層の厚さの和であることが望ましい。また、柱状構造を含む層よりも薄い離散構造を含む層を少なくとも一つ含んで欠陥構造を形成することにより、欠陥モード周波数の細かな制御が可能となる。

20

#### 【0087】

図8は周期構造部100を  $xy$  方向に13周期、 $z$  方向に6周期設け、その中心部に周期欠陥部120を配置したときの欠陥モードのスペクトルの説明図である。図8に示したように、単一モードの共振器を実現している。

#### 【0088】

図8に示した欠陥モードによる共振器の光閉じ込め性能を表す  $Q$  値（共振器に蓄積されるエネルギー / 単位時間に共振器から失われるエネルギー）は、約20000となる。この値は、周期構造部100の周期数を増やすことにより指数的に増やすことができる。よって、周期構造部100の周期数は所望の閉じ込め効果が得られる最低限の周期数以上の値とすればよい。

30

#### 【0089】

本実施例においては、それぞれの付加層を構成する離散構造を含む層を2層としたが、1層や3層以上であってもよく、1層以上含むことにより、広い周波数帯域で完全フォトリックバンドギャップを得ることができる。

#### 【実施例3】

#### 【0090】

次に、本発明の実施例3の発光素子に係るフォトリック共振器構造の具体的な構成を説明する。

40

#### 【0091】

図9は本発明の実施例3の発光素子に用いる共振器の要部概略図である。共振器30は、周期構造部200とその内部に形成された周期欠陥部（点状欠陥部）210を有している。周期構造部200は、 $xy$  平面を含む層201～204の4層を基本周期として順次積層することにより構成されている。

#### 【0092】

図10は図9の各層201～204の  $xy$  断面の一部の概略図である。第1の層201および第3の層203は、第1の媒質（高屈折率）による  $y$  軸に平行な複数の柱状構造2

50

0 1 a および 2 0 3 a が、予め定められた間隔  $P$  を空けて  $x$  方向（柱状構造 2 0 1 a および 2 0 3 a の延びる方向に垂直な方向）に配置されている。

【0 0 9 3】

柱状構造 2 0 1 a および 2 0 3 a は  $x$  軸方向に  $P/2$ （柱状構造 2 0 1 a および 2 0 3 a の配置される間隔  $P$  の半分）ずれた位置に配置されている。

【0 0 9 4】

また、第 2 の層 2 0 2 および第 4 の層 2 0 4 は、第 1 の媒質による  $x$  軸に平行な複数の柱状構造 2 0 2 a および 2 0 4 a が等間隔  $P$  で  $y$  方向に配置されている。柱状構造 2 0 2 a および 2 0 4 a は  $y$  軸方向に  $P/2$  ずれた位置に配置されている。各層 2 0 1 ~ 2 0 4 中の柱状構造 2 0 1 a ~ 2 0 4 a 以外の部分は第 2 の媒質（低屈折率）で充填されている。

10

【0 0 9 5】

第 1、第 2 の媒質の屈折率、柱状構造の形状や間隔、各層の厚さなどを最適化することにより、所望の周波数域（波長域）に非常に広い周波数帯域（波長帯域）で完全フォトリックバンドギャップを得ている。

【0 0 9 6】

本実施例では、第 1 の媒質の屈折率を 3.0、第 2 の媒質の屈折率を 1 とする。柱状構造 2 0 1 a ~ 2 0 4 a の間隔を等間隔  $P$  として、全ての柱状構造を断面の  $z$  軸方向の一边の長さが  $0.3 \times P$ 、 $x$  あるいは  $y$  方向で  $0.35 \times P$  の長方形の角柱としている。平面波展開法によりフォトリックバンド構造を解析した結果を図 1 1 に示す。

20

【0 0 9 7】

図 1 1 中のハッチングで示した規格化周波数 0.374 から 0.433 の領域においては、光の入射方向によらず光が存在できず、完全フォトリックバンドギャップが形成されている。例えば柱状構造 2 0 1 a の間隔  $P$  が 215 nm とすると、波長 496 nm から波長 575 nm の波長域で完全フォトリックバンドギャップが形成される。

【0 0 9 8】

図 1 2 は図 9 の周期欠陥部 2 1 0 付近の拡大図である。周期欠陥部 2 1 0 は、柱状構造 2 1 1 a、2 1 2 a と同一の媒質であって、一つの柱状構造を含んで形成される、厚さ  $D_z$ 、幅  $D_x$ 、 $D_y$  の直方体である。

【0 0 9 9】

30

このように、周期欠陥部 2 1 0 を形成することにより周期構造部 2 0 0 が持つフォトリックバンドギャップ内の一部の波長域の電磁波に対して、周期欠陥部 2 1 0 のみ電磁波が存在できる状態にすることができる。そして、非常に小さい領域に電磁波を閉じ込め、かつ閉じ込め効果の高い共振器を構成している。

【0 1 0 0】

図 1 2 において、周期欠陥部 2 1 0 の  $x$  方向の中心座標が柱状構造 2 1 2 a の  $x$  方向の中心座標と同一で、 $y$  方向の中心座標が柱状構造 2 1 1 a の  $y$  方向の中心座標と同一となるように形成する。

【0 1 0 1】

$z$  方向は周期欠陥部 2 1 0 の  $z$  方向の最大座標が柱状構造 2 1 2 a の  $z$  方向の最大座標と同一となるように形成する。周期欠陥部 2 1 0 の形状を  $D_x = 0.95 \times P$ 、 $D_y = 0.35 \times P$ 、 $D_z = 0.3 \times P$  とすることにより、フォトリックバンドギャップ内に欠陥モードを一つだけにすること、すなわち単一モード化が可能となる。

40

【0 1 0 2】

周期構造部 2 0 0 を  $x$  方向及び  $y$  方向に 8 周期、 $z$  方向に 4 周期設け、その中心部に周期欠陥部 2 1 0 を配置したときの欠陥モードのスペクトルを図 1 3 に示す。図 1 3 に示したように、本実施例では単一モードを実現している。

【実施例 4】

【0 1 0 3】

図 1 4 は本発明の実施例 4 の発光素子（レーザ素子）の要部断面図である。図 1 4 にお

50

いて300は発光素子である。

【0104】

320は、周期構造部310中に実施例2および実施例3に示したのと同様な構成より成る周期欠陥部より形成される共振器である。発光素子300は、共振器320、p型電極330、p型キャリア伝導路340、n型電極350、n型キャリア伝導路360、導波路370を有している。共振器320内部にはキャリア注入により発光作用を呈するInGaN活性部が形成されている。

【0105】

導波路370は、周期構造部310中に周期を乱す線状の欠陥部を設けることにより形成される線欠陥導波路である。その導波モードは、共振器320の共振モードを考慮し、共振器320との結合効率が高くなるように、線状欠陥部の形状や屈折率を最適化することにより決定される。線状の欠陥は、周期構造部310中の柱状構造の形状や屈折率などを変えたり、新たに柱状構造を加えるなどして形成される。

【0106】

p型電極330、p型キャリア伝導路340を介して、共振器320に正孔が供給される。そしてn型電極350、n型キャリア伝導路360を介して、共振器320に電子が供給され、共振器内部で結合して発光、レーザ発振し、導波路370を介して外部(Y方向)に取り出される。

【0107】

本実施形態による発光素子により、実施例1の原理に基づき、従来困難であった高効率の緑色光を発光する光源が実現できる。

【実施例5】

【0108】

図15は、本発明の実施例5の発光素子(レーザ素子)の要部概略図である。図15において400は発光素子である。

【0109】

420は周期構造部410中に実施例2又は実施例3に示したのと同様な構成より成る周期欠陥部より形成される共振器である。発光素子400は共振器320、p型電極430、p型コンタクト層440、p型クラッド部450、n型電極460、n型コンタクト層470、n型クラッド部480、導波路490を有している。

【0110】

共振器420内部にはキャリア注入により発光作用を呈するInGaN活性部が形成されている。導波路490は、周期構造部410中に周期を乱す線状の欠陥部を設けることにより形成される線欠陥導波路である。

【0111】

p型電極430、p型コンタクト層440、p型クラッド部450を介して、共振器420に正孔が供給される。n型電極460、n型コンタクト層470、n型クラッド部480を介して、共振器420に電子が供給される。共振器420内部で供給された正孔と電子が結合して発光、レーザ発振し、導波路490を介して外部に取り出される。

【0112】

本実施形態による発光素子400により、実施例1の原理に基づき、従来困難であった高効率の緑色光を発光する光源が実現できる。

【実施例6】

【0113】

図16は本発明の実施例6の表示素子の要部概略図である。図16において500は表示素子である。

【0114】

表示素子500は、本発明による緑色光を発光する発光素子510および赤色光を発光する発光素子520、青色光を発光する発光素子530を近接して配置した画素構造540を1画素としている。

## 【 0 1 1 5 】

そして画素構造 5 4 0 を複数個 2 次元的に配列した構造より成っている。これにより、高効率な高輝度で色再現範囲の広い表示素子を実現している。

## 【 実施例 7 】

## 【 0 1 1 6 】

図 1 7 は本発明の発光素子を用いた表示装置の要部概略図である。

## 【 0 1 1 7 】

図 1 7 において 6 0 0 は表示装置である。表示装置 6 0 0 は、本発明による緑色光を発光する発光素子 6 1 0 および赤色光を発光する発光素子 6 2 0、青色光を発光する発光素子 6 3 0 を近接して配置、またはダイクロイックミラーで結合した R G B 光源 6 4 0 を有している。

10

## 【 0 1 1 8 】

本実施例の表示装置では、画像情報に基づいて光変調された R G B 光源 6 4 0 から射出した表示光は、スキャンミラー 6 5 0 で走査され、投影レンズ 6 6 0 を介してスクリーン 6 7 0 に 2 次元画像を表示する。これらの構成により、高効率な高輝度で色再現範囲の広い表示装置を実現している。

## 【 0 1 1 9 】

本実施例の表示装置の他の形態として、画像をスクリーン 6 7 0 に投影するのではなく、直接網膜に投影し、画像を観察者に視認させる形態でも良い。

20

## 【 図面の簡単な説明 】

## 【 0 1 2 0 】

【 図 1 】 本発明の発光素子の実施例 1 の概略断面図

【 図 2 】 従来の L D の各スペクトルの説明図

【 図 3 】 本発明の発光素子の各スペクトルの説明図

【 図 4 】 本発明の実施例 2 に係る 3 次元フォトニック結晶の説明図

【 図 5 】 本発明の実施例 2 に係る 3 次元フォトニック結晶の各層の説明図

【 図 6 】 本発明の実施例 2 に係る 3 次元フォトニック結晶の規格化周波数の説明図

【 図 7 】 図 4 の一部分の説明図

【 図 8 】 本発明の実施例 2 に係る欠陥モードのスペクトルの説明図

【 図 9 】 本発明の実施例 3 に係る 3 次元フォトニック結晶の説明図

30

【 図 1 0 】 本発明の実施例 3 に係る 3 次元フォトニック結晶の各層の説明図

【 図 1 1 】 本発明の実施例 3 に係る 3 次元フォトニック結晶の規格化周波数の説明図

【 図 1 2 】 図 9 の一部分の説明図

【 図 1 3 】 本発明の実施例 3 に係る欠陥モードのスペクトルの説明図

【 図 1 4 】 本発明の発光素子の実施例 4 の要部断面図

【 図 1 5 】 本発明の発光素子の実施例 5 の要部断面図

【 図 1 6 】 本発明の表示素子の説明図

【 図 1 7 】 本発明の表示装置の説明図

## 【 符号の説明 】

## 【 0 1 2 1 】

40

1 0、3 0 0 発光素子

1 1 P 型電極

1 2 P 型コンタクト層

1 3 P 型クラッド層

1 4 活性部

1 5 共振器

1 6 絶縁部

1 7 n 型クラッド部

1 8 n 型コンタクト層

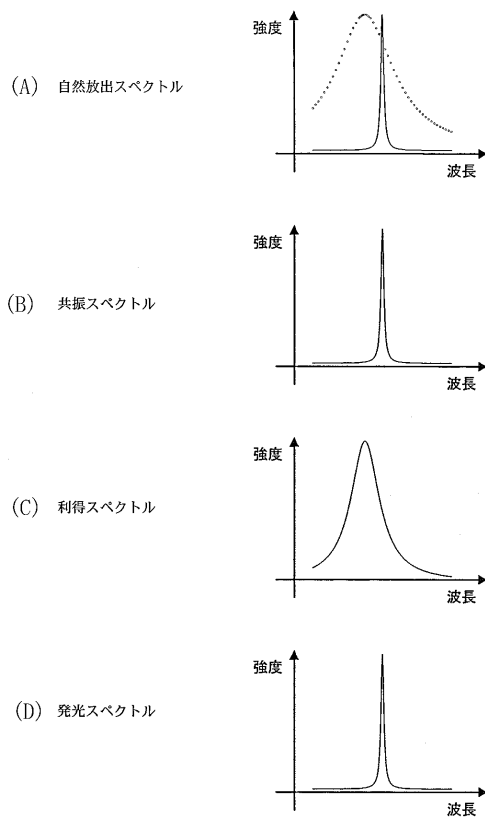
1 9 n 型電極

50

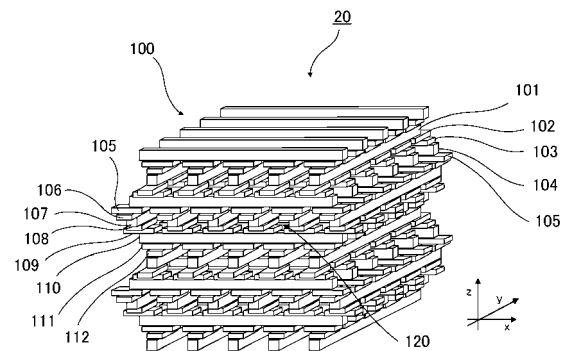
2 0、3 0、3 2 0      共振器  
 1 0 0、2 0 0、3 1 0      周期構造部  
 1 0 1 ~ 1 1 2、2 0 1 ~ 2 0 4      層  
 1 2 0、2 1 0      周期欠陥部  
 1 0 1 a、1 0 4 a、1 0 7 a、1 1 0 a、1 3 2 a      柱状構造  
 1 0 2 a、1 0 3 a、1 0 5 a、1 0 6 a、1 0 8 a、1 0 9 a、1 1 1 a、1 1 2 a、  
 1 3 1 a      離散構造  
 5 0 0      表示素子  
 5 4 0      画素構造  
 6 0 0      表示装置  
 6 4 0      R G B 光源  
 6 5 0      スキャンミラー  
 6 6 0      投影レンズ  
 6 7 0      スクリーン

10

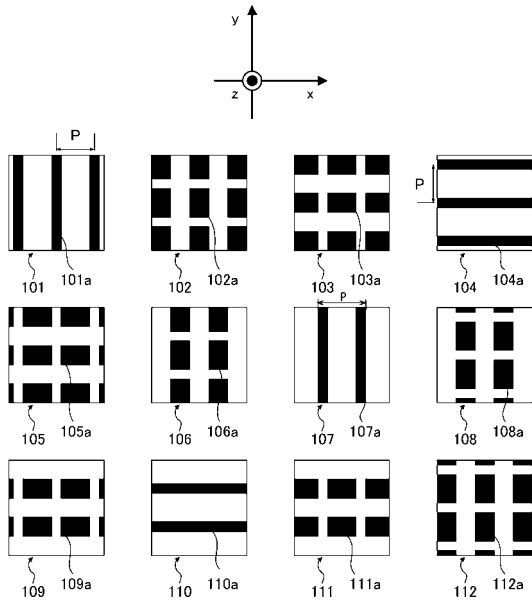
【図 3】



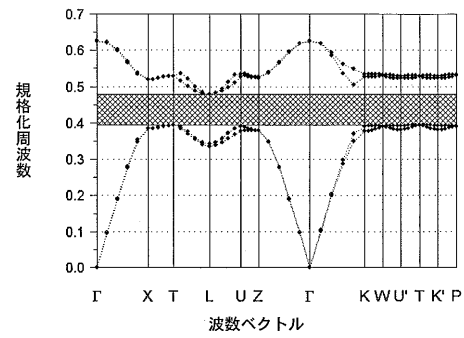
【図 4】



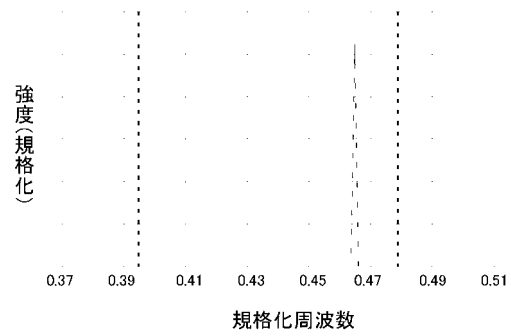
【図 5】



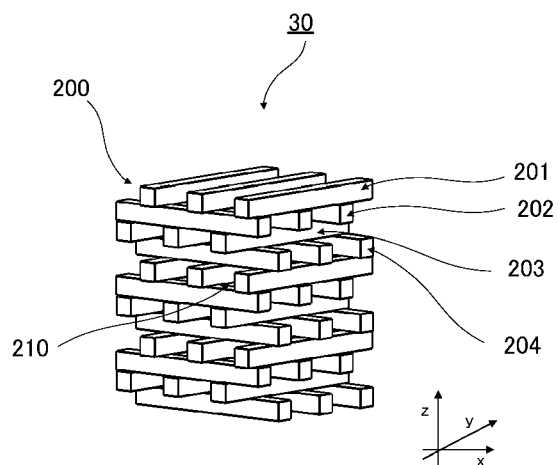
【図 6】



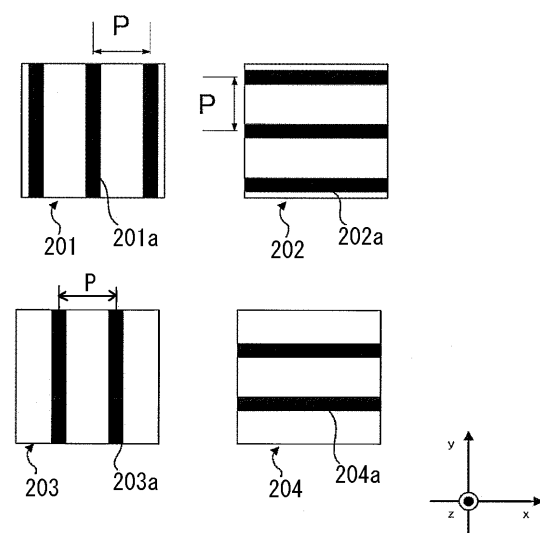
【図 8】



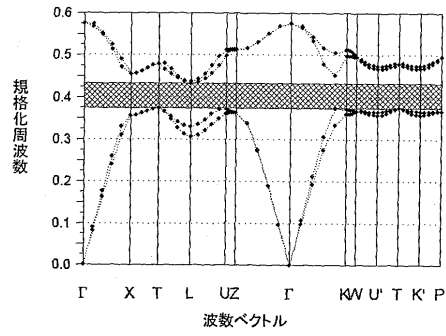
【図 9】



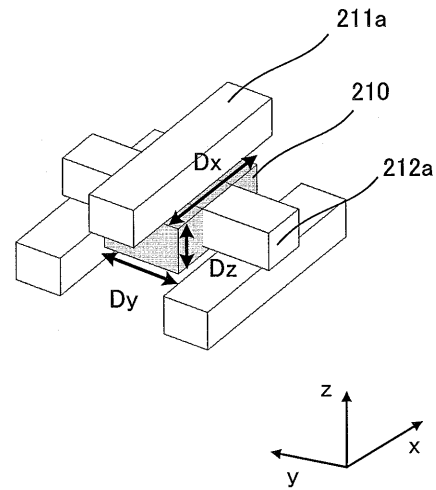
【図 10】



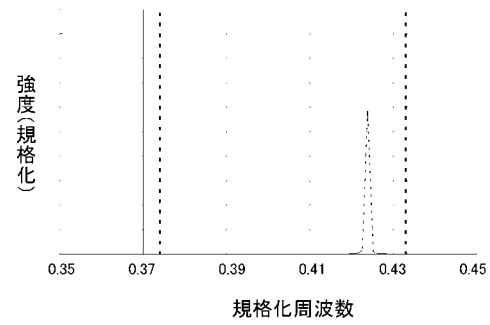
【図 1 1】



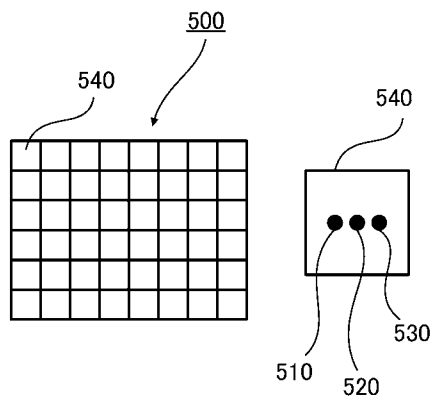
【図 1 2】



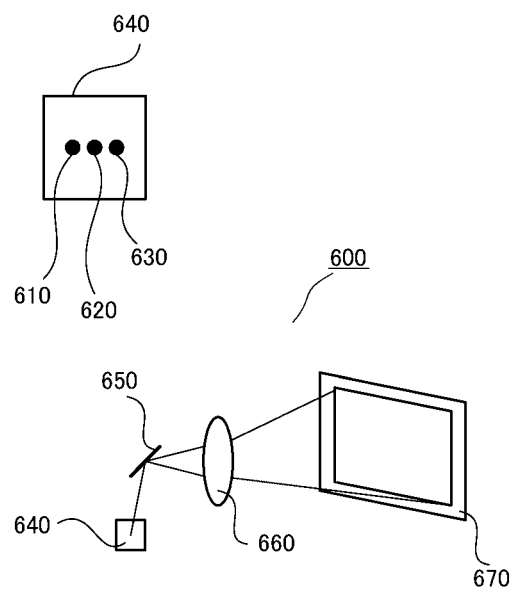
【図 1 3】



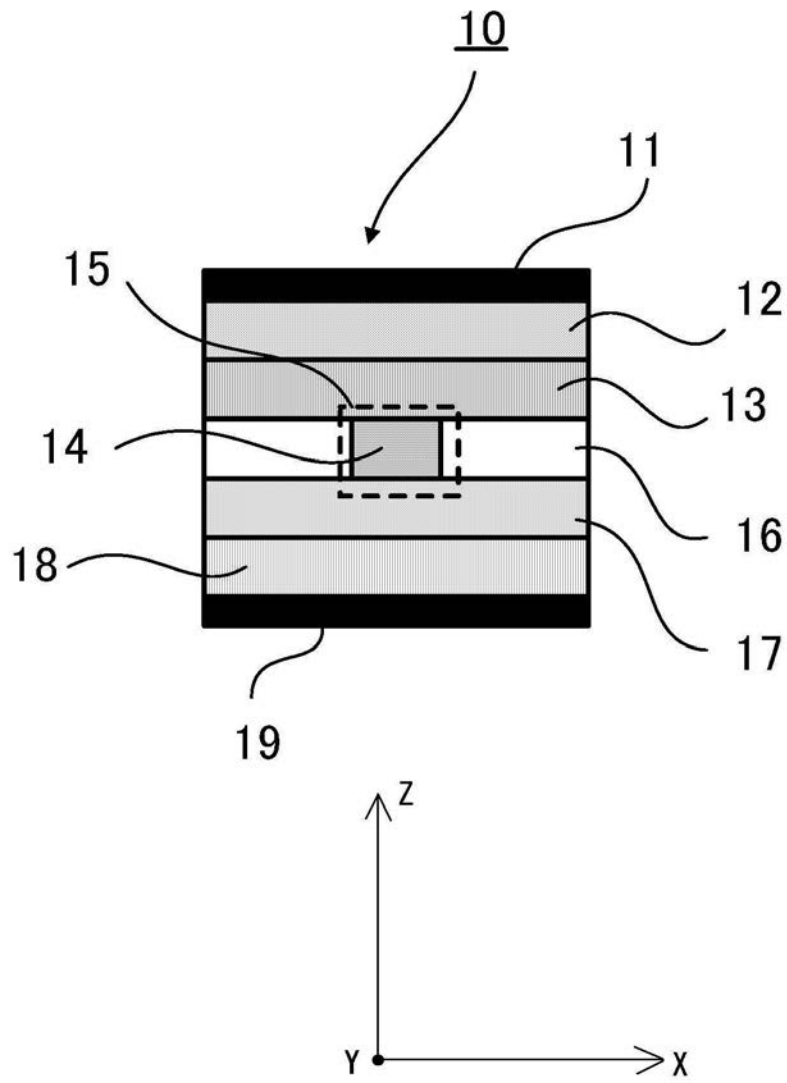
【図 1 6】



【図 1 7】



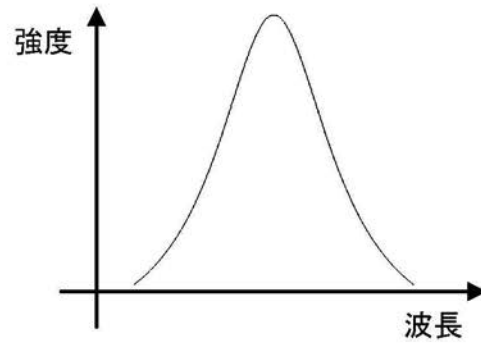
【図 1】



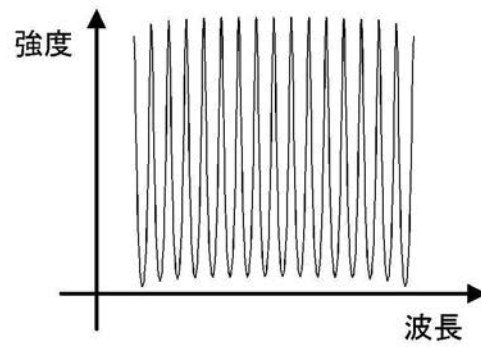


【図 2】

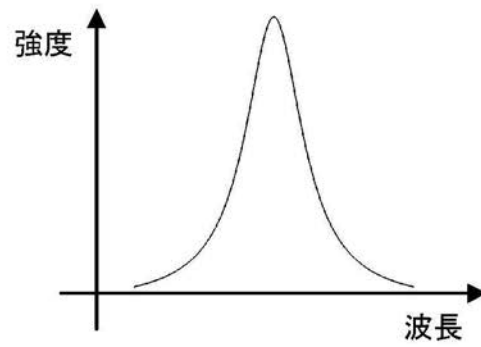
(A) 自然放出スペクトル



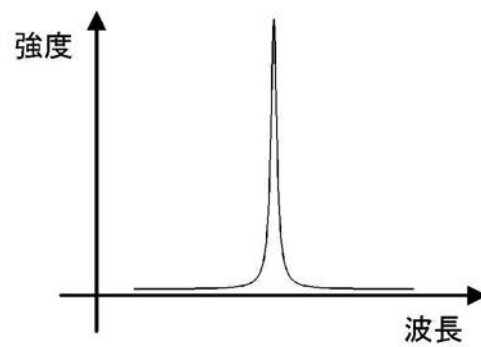
(B) 共振スペクトル



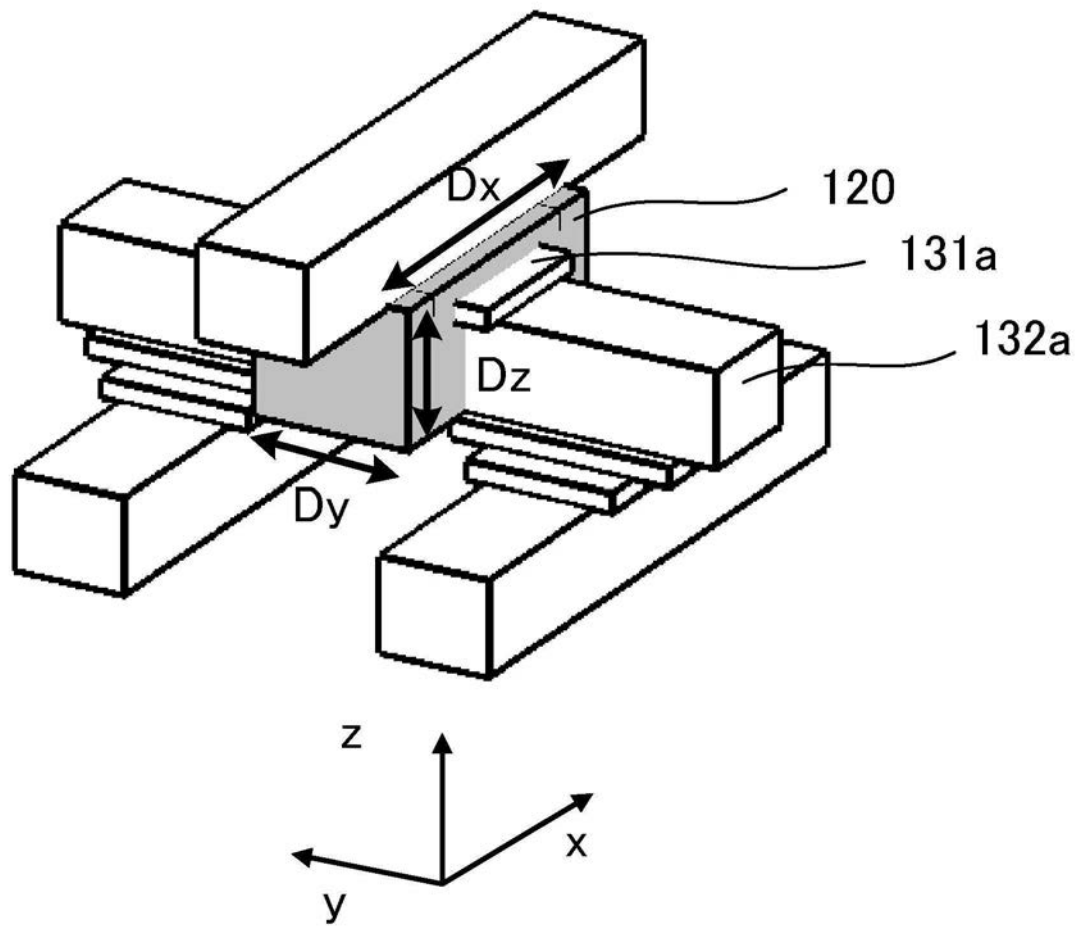
(C) 利得スペクトル



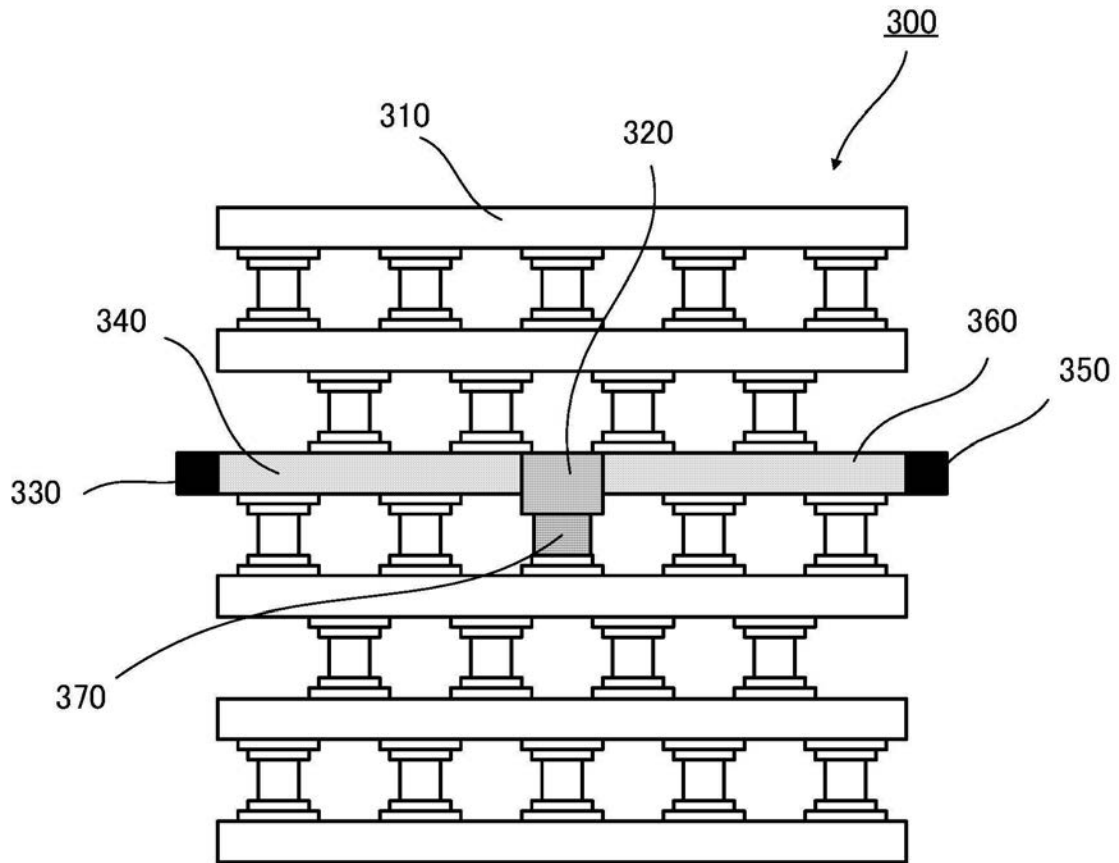
(D) 発光スペクトル



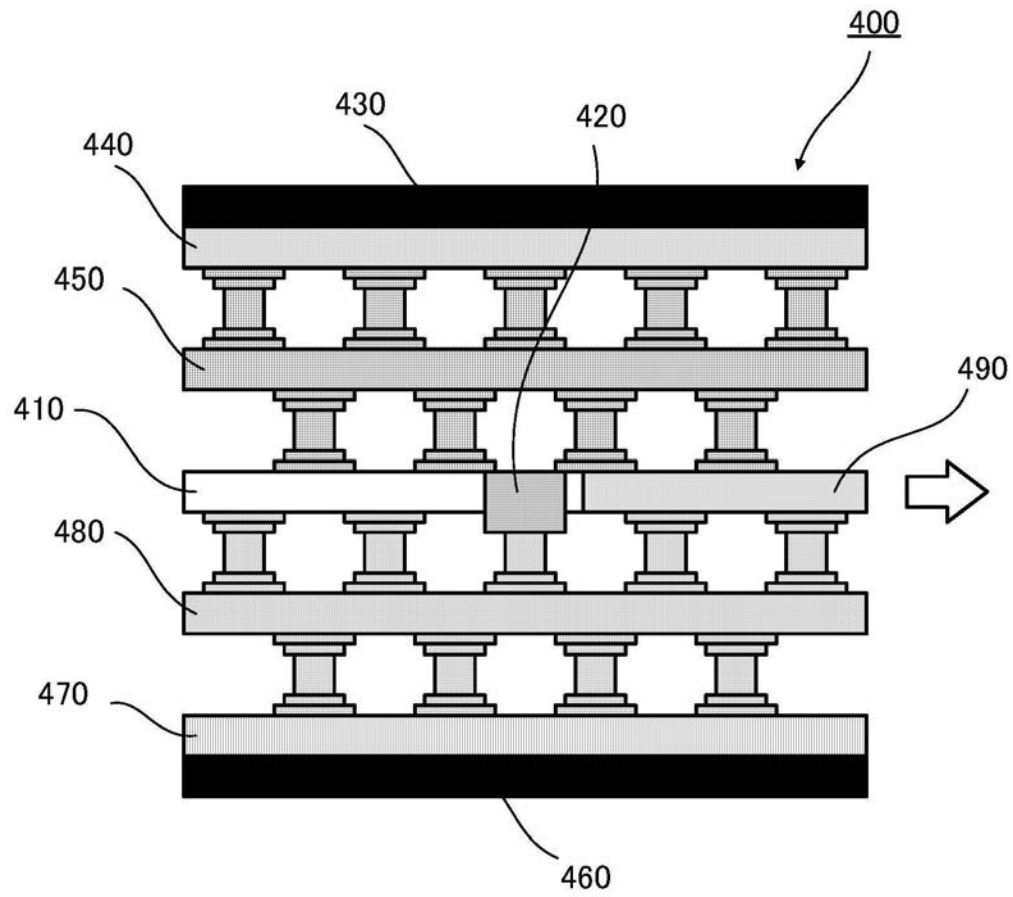
【図 7】



【図 14】



【図 15】



---

フロントページの続き

(56)参考文献 特開2006-065273(JP,A)  
特開2005-157336(JP,A)  
特開2004-006567(JP,A)  
特開2001-308452(JP,A)  
特開平06-188518(JP,A)  
特開2004-071645(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01L33/00-33/64

H01S5/00-5/50