

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関  
国際事務局



(43) 国際公開日  
2010年8月5日(05.08.2010)

(10) 国際公開番号  
**WO 2010/087231 A1**

- (51) 国際特許分類:  
H01S 5/18 (2006.01) H01S 5/12 (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2010/050346
- (22) 国際出願日: 2010年1月14日(14.01.2010)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:  
特願 2009-017148 2009年1月28日(28.01.2009) JP  
特願 2009-017179 2009年1月28日(28.01.2009) JP
- (71) 出願人(米国を除く全ての指定国について): コニカミノルタホールディングス株式会社(KONICA MINOLTA HOLDINGS, INC.) [JP/JP]; 〒1000005 東京都千代田区丸の内一丁目6番1号 Tokyo (JP).
- (72) 発明者; および
- (75) 発明者/出願人(米国についてのみ): 今田 昌宏 (IMADA, Masahiro) [JP/JP]; 〒1918511 東京都日野

市さくら町1番地 コニカミノルタテクノロジーセンター株式会社内 Tokyo (JP).

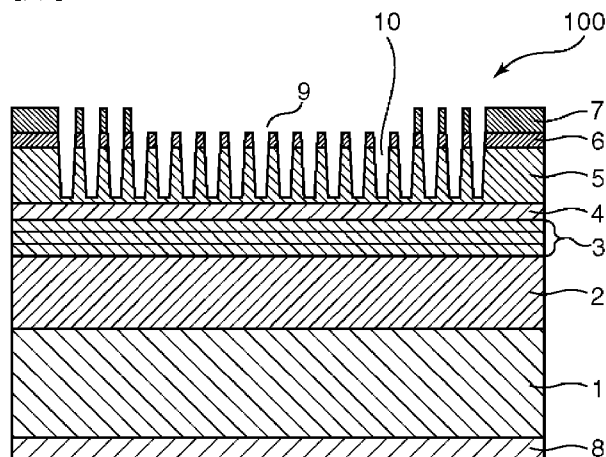
- (74) 代理人: 小谷 悦司, 外(KOTANI, Etsuji et al.); 〒5300005 大阪府大阪市北区中之島2丁目2番2号 大阪中之島ビル2階 Osaka (JP).
- (81) 指定国(表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PE, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.
- (84) 指定国(表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーラシア (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB,

[続葉有]

(54) Title: TWO-DIMENSIONAL PHOTONIC CRYSTAL SURFACE EMISSION LASER AND MANUFACTURING METHOD THEREFOR

(54) 発明の名称: 2次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法

[図1]



(57) Abstract: Disclosed is a two-dimensional photonic crystal surface emission laser (100) equipped with a first semiconductor layer (5) in which multiple concave parts (10) are formed as a two-dimensional photonic crystal structure, with the radius of the concave parts (10) gradually changing in the depth direction. The two-dimensional photonic crystal surface emission laser (100) having said structure is manufactured by including a step wherein the concave parts (10) are formed in the first semiconductor layer (5), which is stacked above an active layer (3), to become narrower from the surface opposite the active layer (3) toward the active layer (3).

(57) 要約: 本発明の2次元フォトリック結晶面発光レーザ100は、2次元フォトリック結晶構造として複数の凹部10を形成した第1半導体層5を備え、凹部10の径が深さ方向に沿って徐々に変化しているものであり、このような構成の2次元フォトリック結晶面発光レーザ100は、活性層3上に積層された第1半導体層5に、活性層3とは反対側の表面から、活性層3に近づくほど細くなっていく凹部10を形成する工程を含むことによって製造される。



WO 2010/087231 A1



GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, 添付公開書類:

NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ,

CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN,

TD, TG).

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

## 明 細 書

発明の名称：

### 2次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法

#### 技術分野

[0001] 本発明は、2次元フォトリック結晶で共振させることによって面発光する2次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法に関する。

#### 背景技術

[0002] 面発光レーザは、基板面から略垂直（その法線方向）にレーザ光を射出することができる、複数のレーザ素子を2次元に集積すること（2次元アレイ化）ができる、および、各レーザ素子からコヒーレントな光を並列的に射出することができるなどの様々な特徴を有している。このことから、例えば、ストレージ分野、通信分野および情報処理分野などの各分野へ様々な応用が期待され、その研究、開発が進んでいる。

[0003] 面発光レーザでは、キャリア注入によって光を発生する活性層を多層膜反射鏡（DBR）で上下に挟み込む構造が一般的な基本構造として採用されるが、この他、例えば、2次元フォトリック結晶を用いるものがある。ここで、フォトリック結晶は、一般的に光の波長と同程度もしくはより小さい周期的な屈折率分布を内部に備える光学素子である。フォトリック結晶には、3次元的な屈折率分布を持つ3次元フォトリック結晶や、2次元的な屈折率分布を持つ2次元フォトリック結晶などがある。フォトリック結晶は、半導体において原子核の周期ポテンシャルによって電子（電子波）がブラッグ反射を受けてバンド構造が形成される現象と同様に、周期的な屈折率分布によって光波がブラッグ反射を受けて光に対するバンド構造（フォトリックバンド構造）が形成されるという特徴を有している。この特徴を利用して、フォトリック結晶によって、様々な光の制御が可能になると期待されている。

[0004] 例えば、2次元フォトリック結晶面発光レーザは、キャリアの注入により発光する活性層の近傍に、2次元的に屈折率周期を配置したフォトリック結

晶周期構造体を備え、フォトニック結晶により共振して面発光するものである。例えば、特許文献1等は、従来の2次元フォトニック結晶面発光レーザについて記載されている。図22は、従来の2次元フォトニック結晶面発光レーザの構成を示す斜視図である。より具体的には、図22に示すように、この2次元フォトニック結晶面発光レーザ200では、概略、基板101上に下部クラッド層102、活性層103、上部クラッド層104が積層され、下部クラッド層102には活性層103の近傍に2次元フォトニック結晶120が内蔵されている。

[0005] 基板101は、例えば、 $n$ 型InPの半導体材料からなる。下部クラッド層102および上部クラッド層104は、例えば、それぞれ $n$ 型および $p$ 型InPの半導体層であり、これらは、活性層103よりも屈折率が低い。2次元フォトニック結晶120は、下部クラッド層102に空孔（フォトニック結晶周期構造体121）を形成することで構成される。また、空孔内にはSiN等を充填してもよい。これにより、下部クラッド層102の2次元フォトニック結晶120は、屈折率の異なる媒質が2次元の周期で配列された正方格子や三角格子からなっている。活性層103は、例えば、InGaAs／InGaAsP系の半導体材料を用いた多重量子井戸構造からなっており、キャリアの注入により発光する。2次元フォトニック結晶面発光レーザ200は、下部クラッド層102および上部クラッド層104により活性層103を挟んだダブルヘテロ接合を形成し、キャリアを閉じ込めて発光に寄与するキャリアを活性層103に集中させるようになっている。

[0006] 基板101の底面および上部クラッド層104の上面には、金等からなる下部電極106および上部電極107が形成されている。これら下部電極106および上部電極107に電圧を印加することにより活性層103が発光し、活性層103から漏れた光が2次元フォトニック結晶120に入射する。2次元フォトニック結晶120の格子間隔に波長が一致する光は、2次元フォトニック結晶120により共振して増幅される。これにより、上部クラッド層104の上面（電極107の周囲に位置する発光領域108）からコ

ヒーレントな光が面発光される。

[0007] ここで、図 23 に示すような正方格子からなる 2 次元フォトリック結晶 120 の共振作用について説明する。図 23 は、2 次元フォトリック結晶面発光レーザの共振作用を示す説明図である。2 次元フォトリック結晶 120 は、下部クラッド層 102 内に空孔 121 が形成されることで構成されている。空孔 121 が直交する 2 方向に同じ周期で形成されることによって正方格子が構成されている。正方格子は、 $\Gamma-X$  方向と  $\Gamma-M$  方向の代表的な方向を有している。 $\Gamma-X$  方向に隣接する空孔 121 の間隔を  $a$  とすると、空孔 121 を格子点とした一辺が  $a$  の正方形からなる基本格子  $E$  が、形成されている。ここで、波長  $\lambda$  が基本格子  $E$  の格子間隔  $a$  に一致する光  $L$  が  $\Gamma-X$  方向に進行すると、光  $L$  は、格子点で 2 次回折される。このうち、光  $L$  の進行方向に対して  $0^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $180^\circ$  の方向に回折された光のみがブラッグ条件を満たす。さらに、 $0^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $180^\circ$  の方向に回折された光の進行方向にも格子点が存在するため、回折光は、再度進行方向に対して  $0^\circ$ 、 $\pm 90^\circ$ 、 $180^\circ$  方向に回折する。光  $L$  が 1 回または複数回の 2 次回折を繰り返すと、回折光が元の格子点に戻るため共振作用が生じる。また、紙面に垂直な方向に 1 次回折された光もブラッグ条件を満たす。このため、共振によって増幅された光が上部クラッド層 104 を介して出射され、面発光機能を有することになる。また、全ての格子点でこの現象が生じるため、面内全域でコヒーレントなレーザ発振が可能である。なお、特許文献 1 には、活性層を形成したウェハと、表面に 2 次元フォトリック結晶 120 を形成したウェハとを接合（融着）することで 2 次元フォトリック結晶面発光レーザを製造する方法が記載されている。

[0008] また、特許文献 2 には、融着を用いずに 2 次元フォトリック結晶面発光レーザを製造する方法が記載されている。特許文献 2 に記載の製造方法は、具体的には、エピタキシャル層と誘電体膜とを有するフォトリック結晶構造工程と、フォトリック結晶構造工程後に、誘電体膜上およびエピタキシャル層上に  $GaN$  層を形成する工程とを備えている。この製造方法によると、融着

を用いる必要がないことから、製造時にデバイスにダメージを与えることがほとんどない。

[0009] また、特許文献3には、上部クラッド層をエピタキシャル成長により形成後、円柱状の凹部を形成することで、フォトリック結晶を構成する2次元フォトリック結晶面発光レーザが記載されている。この2次元フォトリック結晶面発光レーザは、閾値電流が低く、しかも光の偏波面が制御されているという効果を有する。

[0010] また、特許文献4には、フォトリック結晶構造体の結晶面に対する断面形状の幅が主たる発光方向に沿って漸減している、2次元フォトリック結晶面発光レーザが記載されている。これにより、高い光利用効率を得ることができる。

[0011] 前記特許文献1に記載の2次元フォトリック結晶面発光レーザは、製造の際にフォトリック結晶を形成したウェハとフォトリック結晶の真上に配置される活性層を形成したウェハとを融着することで製造する。しかし、ウェハ全面を均一に融着することは、難しく、歩留まりが悪い。また、融着させる材料ごとに最適な融着の条件が異なることから、材料が異なるごとに最適な融着条件を求める必要があり、このように融着条件を変更しなければならず、この製造方法は、煩雑である。融着は、通常還元もしくは不活性雰囲気で行われることから、融着の際にフォトリック結晶の空孔の変形等のダメージが生じる可能性がある。また、フォトリック結晶構造に反りやうねりが発生している場合は、融着が困難になってしまう。したがって、歩留まりが低い。

[0012] また、前記特許文献2に記載の2次元フォトリック結晶面発光レーザの製造方法は、Ga<sub>2</sub>N系を用いる場合にのみ可能であり、他の半導体レーザ材料であるGaAs系やInP系では実現することができない。また、同じGa<sub>2</sub>N系であっても、現状使われているc面と異なる面方位を用いた場合、例えばGa<sub>2</sub>N系緑色レーザやLEDなどで研究が行われている無極性面や半極性面といった面方位の基板を使う場合には、c面上とは成長条件が異なる。ま

た、このように、特殊な製造方法であることから、２次元フォトリック結晶レーザの構成にも制限が生じる可能性がある。

[0013] また、前記特許文献３に記載の２次元フォトリック結晶面発光レーザの構成において、低閾値化を行うためには、形成する円柱状の凹部の径を小さくする必要があるため、アスペクト比が高くなる。低閾値を実現するような構成とするためには、アスペクト比が高くなりすぎるため、エッチングによる凹部の形成は、実際には困難である。

[0014] また、前記特許文献４に記載の２次元フォトリック結晶面発光レーザは、前記特許文献１と同様に融着を用いて製造するため、この特許文献１の２次元フォトリック結晶面発光レーザと同様の問題がある。

## 先行技術文献

### 特許文献

[0015] 特許文献１：特許第３９８３９３３号公報

特許文献２：特開２００８－１３０７３１号公報

特許文献３：特許第３６１３３４８号公報

特許文献４：特許第３８３３９５３号公報

### 発明の概要

[0016] 本発明は、上述の事情に鑑みて為された発明であり、その目的は、容易に作製でき、低コストで歩留まりの高い２次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法を提供することである。

[0017] 本発明の２次元フォトリック結晶面発光レーザは、２次元フォトリック結晶構造として複数の凹部を形成した第１半導体層を備え、前記凹部の径が深さ方向に沿って徐々に変化しているものであり、このような構成の２次元フォトリック結晶面発光レーザは、活性層上に積層された第１半導体層に、前記活性層とは反対側の表面から、前記活性層に近づくほど細くなっていく凹部を形成する工程を含むことによって製造される。このような構成の２次元フォトリック結晶面発光レーザおよびその製造方法は、従来に較べて、容易に作製でき、低コストで歩留まりも高い。

[0018] 上記並びにその他の本発明の目的、特徴および利点は、以下の詳細な記載と添付図面から明らかになるであろう。

### 図面の簡単な説明

[0019] [図1]本発明の第1実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの構成を示す断面図である。

[図2]結合係数 $\kappa$ とFilling Factorを計算により求めるために用いた2次元フォトリック結晶面発光レーザのモデル構成を示す断面図である。

[図3]1次元結合波理論を用いて求めた結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。

[図4]第1クラッド層のA1組成を変化させた場合の結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。

[図5]第1クラッド層の厚さと光閉じ込めの強さの関係を求めるために用いたレーザのモデル構成を示す断面図である。

[図6]転送行列法を用いて求めた第1クラッド層厚さとコンタクト層にしみだす光の割合との関係を表すグラフである。

[図7]1次元結合波理論および2次元結合波理論を用いて求めた結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。

[図8]2次元結合波理論を用いて求めた、第1クラッド層のA1組成を変化させた場合の結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。

[図9]本発明の第1実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの要部拡大図である。

[図10]凹部深さが0.52 $\mu\text{m}$ の場合の表面側FF (Filling Factor) および活性層側FF (Filling Factor) に対する計算結果を示すグラフであって、図10(A)は結合係数 $\kappa$ の値を示すグラフであり、図10(B)はコンタクト層へしみだした光の割合を示すグラフである。

[図11]凹部深さが0.92 $\mu\text{m}$ の場合の表面側FF (Filling Factor) および活性層側FF (Filling Factor) に対する計算結果を示すグラフであって、図11(A)は結合係数 $\kappa$ の値を示すグラフであり、図11(B)はコン

タクト層へしみだした光の割合を示すグラフである。

[図12]本発明の第1実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの製造工程を示す断面工程図であって、図12(A)～図12(E)は、各工程図である。

[図13]パターンが形成された状態のレジスト層の平面図である。

[図14]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの構成を示す断面図である。

[図15]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの要部拡大図である。

[図16]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの製造工程を示す第1の断面工程図であって、図16(A)～図16(D)は、各工程図である。

[図17]本発明の第2実施形態に係る2次元フォトリック結晶面発光レーザの製造工程を示す第2の断面工程図であって、図17(A)～図17(D)は、各工程図である。

[図18]本発明の第2実施形態における2次元フォトリック結晶面発光レーザの電極の構成を示す平面図であって、図18(A)～図18(D)は、それぞれ異なる形状の電極の構成を示す平面図である。

[図19]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの他の製造工程としての第1製造工程を説明するための断面工程図であって、図19(A)および図19(B)は、各工程図である。

[図20]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの他の製造工程としての第2製造工程を説明するための断面工程図である。

[図21]本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの他の構成を示す断面図である。

[図22]従来の2次元フォトリック結晶面発光レーザの構成を示す斜視図である。

[図23]2次元フォトリック結晶面発光レーザの共振作用を示す説明図である

。

### 発明を実施するための形態

[0020] 以下、本発明にかかる実施の形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において同一の符号を付した構成は、同一の構成であることを示し、その説明を省略する。

[0021] (第1実施形態)

図1は、本発明の第1実施形態にかかる2次元フォトリソニック結晶面発光レーザの構成を示す断面図である。図1において、第1実施形態にかかる2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ100は、基板1と、基板1の一方の主面上に形成された第2半導体層である第2クラッド層2と、第2クラッド層2上に形成された活性層3と、活性層3上に形成されるキャリアストップ層4と、キャリアストップ層4上に形成された第1クラッド層5と、第1クラッド層5上に形成されたコンタクト層6と、コンタクト層6上に形成された円環状(リング状、ドーナツ状)の第1電極7と、基板1における前記一方の主面に対向する他方の主面上の全面に形成された第2電極8とを備えて構成される。なお、コンタクト層6上において第1電極7が形成されていない箇所は、光が発光される発光面9である。そして、半導体からなる第1クラッド層5およびコンタクト層6において、それらの発光面9側(活性層3と反対側)の主面すなわち第1電極7との境界面から加工がなされることで、第1クラッド層5およびコンタクト層6には、複数の凹部10が周期的に配置されるように形成されている。これにより、コンタクト層6、第1クラッド層5およびキャリアストップ層4からなる第1半導体層は、2次元フォトリソニック結晶構造を有する。なお、第1電極7側から加工がなされるので、凹部10は、コンタクト層6において第1電極7と接する側の表面には少なくとも形成されている。このフォトリソニック結晶構造は、活性層3でレーザ発振する光の波長を選択する。なお、凹部10の径は、深さ方向に沿って徐々に変化している。より具体的には、積層方向に沿った面による断面形状において、凹部10および凹部10以外の半導体部分は、いわゆるテーパ形状を有す

る。

[0022] 基板 1 は、例えば n 型の GaAs 基板である。第 2 クラッド層 2 は、例えば、電子をキャリアとする n 型の半導体層であり、例えば、n 型  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  で形成されている。キャリアストップ層 4 は、例えば、ホール（正孔）をキャリアとする p 型の半導体層であり、例えば、p 型  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  で形成されている。第 1 クラッド層 5 も、例えば、ホール（正孔）をキャリアとする p 型の半導体層であり、例えば、p 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$  で形成されている。コンタクト層 6 も、例えば、ホール（正孔）をキャリアとする p 型の半導体層であり、例えば、p+ 型 GaAs で形成されている。なお、第 1 半導体層および第 2 半導体層における各層の導電型は、上述のものに限られるわけではない。2 次元フォトリック結晶面発光レーザ 100 は、例えば、埋め込みトンネル接合（BTJ: Buried Tunnel Junction）型のように、活性層の上層に、異なる導電型である p 型および n 型の半導体層を有する構造でもよい。

[0023] 活性層 3 は、上述のように、第 2 クラッド層 2 からなる第 2 半導体層と、コンタクト層 6、第 1 クラッド層 5 およびキャリアストップ層 4 からなる第 1 半導体層とに挟まれており、キャリア注入によって光を発生（発光）する。なお、活性層 3 と第 1 クラッド層 5 との間にはキャリアストップ層 4 が配置されている。活性層 3 は、公知の一般的な材料および構造を採用することができ、使用用途に応じた波長を発光するように材料や構造などが選択される。活性層 3 は、例えば、3 周期の InGaAs 井戸層、GaAs 障壁層および分離閉じ込め層（SCH (Separate Confinement Heterostructure) 層）により構成されている歪み量子井戸構造であってよい。

[0024] 第 1 および第 2 クラッド層 5、2 は、活性層 3 の屈折率よりも低い屈折率の材料で形成され、下部および上部クラッド層の機能を兼ね備えている。また、第 1 クラッド層 5 の屈折率は、第 2 クラッド層 2 の屈折率よりも高いことが好ましい。このように、第 1 クラッド層 5 の屈折率を第 2 クラッド層 2 の屈折率よりも高くすることで、2 次元フォトリック結晶構造が形成された

場合に、第1クラッド層5の平均屈折率が低下し過ぎることがない。これにより、フォトニック結晶構造が形成された層に分布する光の割合の減少を防ぐことから、結合係数 $\kappa$ の低下を防ぐことができる。

[0025] そして、この2次元フォトニック結晶面発光レーザ100は、活性層3を挟んでダブルヘテロ接合を形成し、キャリアを閉じ込めて、発光に寄与するキャリアを活性層3に集中させている。コンタクト層6は、第1電極7と第1クラッド層5との間に配置され、これらを電氣的に接続させている。キャリアストップ層4は、キャリアオーバーフローによって活性層3から第1クラッド層5へ向かう電子に対する電位障壁として機能する。なお、第1クラッド層5と活性層3との間にはキャリアストップ層4が配置されていなくてもよい。また、第1クラッド層5と活性層3との間に他の層が介在していてもよい。

[0026] 第1および第2電極7、8は、例えばITO（Indium Tin Oxide：酸化インジウムスズ）電極や金系電極などから構成され、第1電極7と第2電極8との間に電圧を印加することによって活性層3にキャリアが注入され、所定値以上の電圧値で活性層3が発光するようになっている。なお、第1および第2電極7、8は、導電性を有するだけでなく、発光面側においては、この2次元フォトニック結晶面発光レーザ100が発光するレーザ光の波長に対して透明であり、導電性を有する材料を用いた透明電極であることが好ましい。したがって、ITO電極とすることが好ましい。なお、発光面9側に設置された第1電極7は、開口を形成し、第2電極8は、基板1全面に形成されている。このような構成とすることで、第1電極7が形成された側の面から選択的にレーザ光が射出される。なお、2次元フォトニック結晶面発光レーザ100は、第1電極7の一部または全部を透明電極とし、開口を形成せずに、発光面9の全面に第1電極7が形成された構成であってもよい。このような構成では、透明電極を介して、レーザ光が射出される。

[0027] また、本実施の形態では、第1クラッド層5の上面がレーザ光を射出する射出面（発光面9）となっているが、例えば、基板1の底面を発光面とする

ことも可能である。具体的には、基板 1 は、取り出す光の波長帯に対して透明な材料とし、第 1 電極 7 をコンタクト層 6 の全面に形成し、第 2 電極 8 に開口を形成すればよい。これにより、2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザ 100 は、第 2 電極 8 に形成された開口からレーザ光を射出することができる。なお、この場合も、2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザ 100 は、第 2 電極 8 の一部または全部を透明電極とし、開口を形成せずに、基板 1 の全面に第 2 電極 8 が形成された構成であってもよい。これにより、透明電極を介して、レーザ光が射出される。

[0028] 第 1 クラッド層 5 およびコンタクト層 6 に形成された 2 次元フォトリソニック結晶構造において、2 次元の周期的な屈折率分布は、第 1 クラッド層 5 を形成する材料の屈折率と異なる屈折率の材料が格子点として互いに異なる 2 方向（線形独立な 2 方向）に所定の周期（格子間隔、格子定数）で配列されることによって形成されている。格子点は、本実施の形態では、例えば、第 1 クラッド層 5 およびコンタクト層 6 に形成された錐状の凹部 10 から構成される。なお、凹部 10 は、コンタクト層 6 および第 1 クラッド層 5 だけでなく、キャリアストップ層 4 まで到達していてもよいが、活性層 3 には到達しないことが好ましい。凹部 10 が活性層 3 に到達、すなわちフォトリソニック結晶と活性層 3 とが近接すると、エッチング時に活性層 3 へのダメージが生じる可能性がある。

[0029] ここで、コンタクト層 6 の上面における半導体および凹部 10 において、半導体の占める面積の割合を表面側 FF とし、また、第 1 クラッド層 5 内において凹部 10 の底面を含む平面による断面を仮想した場合に、この断面における半導体および凹部 10 において、半導体の占める面積の割合を活性層側 FF とする。上述のように、凹部 10 の断面は、テーパ形状であるため、表面側 FF と活性層側 FF は異なる値となる。このように、凹部 10 の断面形状がテーパ状であることから、2 次元フォトリソニック結晶の結合係数  $\kappa$  の値が高く、かつ、光閉じ込め効果が高い。そして、凹部 10 の形成が容易となる。例えば、凹部 10 は、エッチングにより形成されるが、その形成難度の

低下を実現できる。また、活性層側 F F は、表面側 F F よりも大きいことが好ましい。すなわち、凹部 10 は、活性層 3 に近づくほど細くなるテーパ形状を有する。そのため、活性層 3 に近づくほど太くなるテーパ形状である凹部 10 に比べて、容易に作製することができる。また、表面側 F F は 0.8 以下であって、前記活性層側 F F は 0.8 以上であることが好ましい。これにより、2次元フォトリック結晶における高い結合係数  $\kappa$  および第 1 クラッド層 5 による高い光閉じ込め効果を得ることができる。そして、2次元フォトリック結晶の製造が容易である。

[0030] また、第 1 クラッド層 5 の厚さは、第 1 クラッド層 5 の屈折率にもよるが 0.3  $\mu\text{m}$  ~ 1.0  $\mu\text{m}$  程度が好ましい。さらに好ましくは、0.5  $\mu\text{m}$  前後である。これにより、アスペクト比が小さくなり凹部 10 の形成が容易であり、光閉じ込め効果も十分得ることができる。なお、第 1 クラッド層 5 が薄すぎると光閉じ込めが不十分になり、第 1 電極 7 による光の吸収が問題になる。一方、第 1 クラッド層 5 が厚すぎると、アスペクト比が高くなり凹部 10 の形成が困難となる。

[0031] 上述の本実施形態にかかる 2次元フォトリック結晶面発光レーザ 100 は、第 1 電極 7 および第 2 電極 8 間に電圧が印加されることで活性層 3 が発光する。活性層 3 から漏れた光がコンタクト層 6 および第 1 クラッド層 5 に形成された 2次元フォトリック結晶構造に入射し、その格子間隔に波長が一致する光は、2次元フォトリック結晶により共振して増幅され、発光面 9 からコヒーレントな光が発光される。

[0032] ここで、このような 2次元フォトリック結晶を備えたレーザの結合係数  $\kappa$  について説明する。このような回折格子結合型のレーザにおける重要なパラメータとして、回折格子の結合係数  $\kappa$  が挙げられる。ここで、フォトリック結晶構造は、回折格子であり、2次元フォトリック結晶構造は、2次元回折格子なので、2次元フォトリック結晶レーザは、通常の 1次元回折格子を使った DFB (distributed feedback laser : 分布帰還型) レーザと同様に考えることができる。結合係数  $\kappa$  は、回折格子に光が結合する割合を示す値で

ある。結合係数  $\kappa$  は、1次元回折格子を用いたDFBレーザにおいて、公知の1次元結合波理論を用いて下記の式(1)により表される(例えば、W. Streifer他、"Coupled Wave Analysis of DFB and DBR Lasers", IEEE Journal of Quantum Electronics, vol. QE-13, No. 4, pp. 134, 1977参照)。

[0033]

$$\kappa = \frac{k_0^2}{2\beta_0 P} \int_{grating} A_q(x) \varepsilon_0(x) \varepsilon_0^*(x) dx \quad \dots (1)$$

[0034]

ここで、回折格子に対して垂直な方向が  $x$  とされ、光伝搬方向が  $z$  とされている。また、 $k_0$  は、自由空間での波数であり、 $\beta_0$  は  $z$  方向の伝搬定数であり、 $A_q$  は、屈折率の二乗を  $z$  方向についてフーリエ展開したときの  $q$  次成分であり、 $\varepsilon_0$  は、電界振幅であり、 $\varepsilon_0^*(x)$  は、その共役複素数であり、 $P$  は、 $\{\varepsilon_0(x) \varepsilon_0^*(x)\}$  を  $x$  方向全体に積分したものである。1次元回折格子の断面が矩形である場合は、より簡便に下記の式(2)で表される。

[0035]

$$\kappa = \frac{k_0^2 (n_1^2 - n_2^2) \Gamma_{grating}}{2\beta_0} \frac{1}{m\pi} \sin\left(m\pi \frac{w}{\Lambda}\right) \quad \dots (2)$$

[0036]

ここで  $n_1$ 、 $n_2$  は、1次元回折格子を構成する材料の屈折率であり、 $m$  は、ブラッグ回折の次数であり、 $\Gamma_{grating}$  は、1次元回折格子層に分布する光の割合(光閉じ込め係数)であり、 $w$  は、1次元回折格子における溝の幅であり、 $\Lambda$  は、1次元回折格子の周期である。式(2)から分かるように、結合係数  $\kappa$  は、「1次元回折格子を構成する材料の屈折率差」、「1次元回折格子層に分布する光の割合」、「1次元回折格子における溝の幅」により決まる。

[0037]

式(2)を用いて、2次元フォトリック結晶面発光レーザ100における結合係数  $\kappa$  と Filling Factor (以下、FF という) すなわち2次元フォトリック結晶構造全体における高屈折率部分の割合との関係を計算により求める。なお、FF は、具体的には  $(1 - w/\Lambda)$  で表される。このように、1次

元回折格子（１次元フォトリック結晶構造）の場合は、１から、１次元フォトリック結晶構造における周期に対する溝の割合を減じた値であるが、２次元フォトリック結晶構造の場合は、２次元フォトリック結晶の単位格子を考えたときに、単位格子における凹部（低屈折率材料）の面積の割合を１から減じた値である。なお、計算においては、２次元フォトリック結晶面発光レーザとしては、図２に示した構成の２次元フォトリック結晶面発光レーザを用いる。図２は、結合係数 $\kappa$ とFilling Factorを計算により求めるために用いた２次元フォトリック結晶面発光レーザのモデル構成を示す断面図である。なお、図２においては、計算には用いないため、電極については省略している。図２において、基板２１は、屈折率が３．５２４であるGaAsとし、厚さは、無限大とした。第２クラッド層２２は、屈折率が３．３０６である $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ とし、厚さは、 $2.0\mu\text{m}$ とした。活性層２３は、SCH-MQW（Multiple Quantum Well：多重量子井戸）構造であり、屈折率が３．５３９であり、厚さは、 $0.144\mu\text{m}$ とした。また、キャリアストップ層２４は、屈折率が３．１９５である $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ とし、厚さは、 $0.04\mu\text{m}$ とした。また、第１クラッド層２５のうちフォトリック結晶構造を有していない箇所２５ｂは、屈折率が３．３０６である $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ とし、厚さは $0.04\mu\text{m}$ とした。また、第１クラッド層２５のうちフォトリック結晶構造を有している箇所２５ａは、屈折率が３．３０６である $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ と、屈折率が１．５である材料３０（例えば $\text{SiO}_2$ ）とが、図２に示すように交互に周期的に形成されていて、厚さは、 $1.96\mu\text{m}$ とした。また、コンタクト層２６は、屈折率が３．５２４であるGaAsと、屈折率が１．５である材料３０（例えば $\text{SiO}_2$ ）とが、図２に示すように交互に周期的に形成されていて、厚さは、 $0.02\mu\text{m}$ とした。また、コンタクト層２６の上層には、屈折率が１．０の空気が無限大の厚さで配置されていることとした。このような２次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、回折次数 $m$ を２と仮定して、式（２）を用いることによって結合係数 $\kappa$ とFFとの関係が求められた。なお、上述のように、式（２）は、１

次元回折格子（１次元フォトリック結晶構造）における計算式であるが、２次元フォトリック結晶の場合の計算においても、簡便な近似として用いることができる。なお、 $\Gamma_{\text{grating}}$ は、スラブ導波路を仮定し、転送行列法で計算した。また、光の波長は、 $980\text{ nm}$ を仮定した。

[0038] 式（２）により計算した結果が図３に表されている。図３は、１次元結合波理論を用いて求めた結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。なお、フォトリック結晶構造における材料３０（例えば $\text{SiO}_2$ ）の断面形状は、テーパ状ではなく直方体状の場合、すなわちフォトリック結晶に形成される凹部は、柱状の場合について、まず計算する。図３に示すように、 $FF$ は、結合係数 $\kappa$ に大きく依存し、 $FF=0.9$ 付近で極大値を持つ。２次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、結合係数 $\kappa$ が大きいほど、フォトリック結晶構造による特性がより強く生じるため、好ましい。しかし、 $FF=0.9$ とすると、１次元フォトリック結晶構造とした場合は、その周期に対して溝の幅が $0.1$ であることから、例えば周期を $300\text{ nm}$ とすると、溝の幅が $30\text{ nm}$ となり、パターン形状が微細化するため製造が困難である。また、２次元フォトリック結晶としても、直径 $100\text{ nm}$ 程度の円柱状の凹部を形成する必要がある、パターン形状が微細化するため製造が困難である。より具体的には、１次元フォトリック結晶構造であれば、一般的なレーザとして上部クラッド層である第１クラッド層２５の厚さを $2\text{ }\mu\text{ m}$ とすればエッチング深さは $1.9\text{ }\mu\text{ m}$ 程度必要であることから、アスペクト比は、 $60$ となり、２次元フォトリック結晶構造であればアスペクト比は、 $20$ となり、非常に高いアスペクト比の周期構造が必要である。したがって、加工難度が高い。

[0039] また、一般的に、１次元フォトリック結晶構造を有するレーザにおいては、結合係数 $\kappa$ は $1000\text{ cm}^{-1}$ 以上が必要であるとされている（例えば、D. Ohnishi他、Optics Express, vol.12, No.8, pp.1562, 2004参照）。しかし、図３に示された極大値は、 $500\text{ cm}^{-1}$ であることから、図２に示した２次元フォトリック結晶面発光レーザの構成では好ましい特性を得ることがで

きない。これは、本実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザは、第1クラッド層25の表面から加工することでフォトリック結晶構造を形成することから、上部クラッド層である第1クラッド層25に低屈折率材料である材料30が充填された部分が形成されているため、第1クラッド層25全体の平均屈折率が低下し、 $\Gamma_{\text{grating}}$ が小さくなっているためであると考えられる。

[0040] 結合係数 $\kappa$ を増加させるためには、例えば、 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ である第1クラッド層25のうち、Alの組成を変化させて、第1クラッド層25の屈折率を増加させる方法が考えられる。より具体的には、Alの組成を40%から0%へと減少させた場合について、式(2)を用いて計算が実行され、その計算結果が図4に示されている。図4は、第1クラッド層のAl組成を変化させた場合の結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。図4に示されているように、Alの組成を30%以下とした場合は、結合係数 $\kappa$ の極大値が、上述した必要とされる値である $1000\text{ cm}^{-1}$ を超えている。また、さらにAlの組成を下げることで、結合係数 $\kappa$ は、 $5000\text{ cm}^{-1}$ 以上となり、大幅に向上していることが分かる。このように、第1クラッド層25の屈折率を高く設計することで、十分な結合係数 $\kappa$ が得られる。

[0041] また、2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、高アスペクト比の周期構造を有することから、加工が困難である点を改善するために、第1クラッド層25の厚さを薄くすればよい。しかし、薄すぎると第1クラッド層25の光閉じ込め効果が弱くなり、第1電極7による光吸収が増大し、発振閾値が上昇するという問題が生じる。それにより、発振しないという問題も生じ得る。そこで、十分な光閉じ込め効果を有する第1クラッド層25の厚さが計算により求められた。この計算には、図5に示す構成のレーザが用いられた。図5は、第1クラッド層の厚さと光閉じ込めの強さの関係を求めるために用いたレーザのモデル構成を示す断面図である。図5に示すように、第2クラッド層に光閉じ込め効果を算出するため用いたモデルは、n型のG

a As 基板である基板 31 と、n 型  $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$  で形成された第 2 クラッド層 32 と、活性層 33 と、p 型  $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$  で形成されたキャリアストップ層 34 と、p 型  $\text{Al}_x\text{Ga}_{(1-x)}\text{As}$  で形成された第 1 クラッド層 35 と、p+ 型 GaAs で形成されたコンタクト層 36 とが順次積層された構成である。また、光の波長は、先ほどの計算と同様に、980 nm を仮定している。

[0042] 図 5 に示したモデルにおいて、第 1 クラッド層 35 の Al 組成を、通常のレーザで用いられる 40% とした場合の第 1 クラッド層 35 の厚さとコンタクト層 36 の表面にしみだす光の割合が計算され、図 6 に示されている。さらに、Al の組成が 0% の場合に、第 1 クラッド層 35 とコンタクト層 36 とに回折格子（1 次元もしくは 2 次元）を形成した場合に、その FF を変化させて第 1 クラッド層 35 の厚さとコンタクト層 36 にしみ出す光の割合とが計算され、図 6 に示されている。なお、FF は、0.9 から 0.6 まで変化させている。図 6 は、転送行列法を用いて求めた第 1 クラッド層厚さとコンタクト層にしみだす光の割合との関係を表すグラフである。図 6 に示すように、結合係数  $\kappa$  が最適の値となる、 $\text{FF} = 0.9$  の場合は、コンタクト層 36 にしみだす光の割合が、回折格子がない場合に比べると 1 桁以上増加しており、第 1 クラッド層 35 の光閉じ込め効果が弱いことが分かる。一方、FF を 0.8 以下にすれば、通常の Al 組成 40% よりも強い光閉じ込め効果が得られる。この場合、第 1 クラッド層 35 の厚さは、0.5 ~ 1  $\mu\text{m}$  またはそれ以下の厚さという、通常のレーザにおける上部クラッド層の厚さよりも薄い状態であっても、十分に強い光閉じ込め効果が得られる。したがって、第 1 クラッド層 35 の厚さは、0.3  $\mu\text{m}$  ~ 1.0  $\mu\text{m}$  程度が好ましい。さらに好ましくは、0.5  $\mu\text{m}$  前後とすればよい。これにより、十分な光閉じ込め効果を得ながら、アスペクト比が小さくなる。これにより、凹部の形成が容易になる。具体的には、エッチング加工の難度が下がる。

[0043] 上述のように、2 次元フォトニック結晶面発光レーザにおける結合係数  $\kappa$  の増加およびアスペクト比を減少させる方法が、計算により求められた。し

かしながら、上述の計算において用いた式（２）は、１次元回折格子（１次元フォトリック結晶構造）におけるものである。１次元フォトリック結晶構造に関する式であっても、２次元フォトリック結晶構造の解析において、近似的に用いることができるが、以下では、より厳密な解を求めるために、２次元フォトリック結晶における結合係数 $\kappa$ の厳密な解法を用いて、同様の計算が行われる。なお、２次元フォトリック結晶構造における厳密な解法は、例えば、公知の２次元回折格子に対する２次元の結合波理論が用いられた。この理論は、例えば、「K. Sakai他、” Coupled-wave model for square-lattice two-dimensional photonic crystal with transverse-electric-like mode” , Applied Physics Letters, vol.89, 021101 (2006)」に示されている。まず、図２に示したモデルを用いて、結合係数 $\kappa$ と $F$ との関係が求められた。各層の屈折率および厚さも上述した値と同一とする。また、格子点形状は、真円を仮定し、１次元（１Ｄ）の場合および２次元（２Ｄ）の場合のどちらも１８０°方向への回折に対する結合係数 $\kappa$ が計算された。

[0044] 図７は、１次元結合波理論および２次元結合波理論を用いて求めた結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。図７に示されているように、１次元フォトリック結晶構造の場合（１Ｄ計算）の極大値に対して、２次元フォトリック結晶構造の場合（２Ｄ計算）の極大値は、０．５倍程度になっている。このことから、上述したように、一般的に、２次元フォトリック結晶レーザの結合係数 $\kappa$ を１次元結合波理論で近似的に見積もった場合は、低閾値発振には１０００ $\text{cm}^{-1}$ 以上の結合係数 $\kappa$ が必要である。ここで、図７に示された結果より、２次元フォトリック結晶レーザの結合係数を２次元結合波理論で見積もった場合には、５００ $\text{cm}^{-1}$ 以上が必要であると考えられる。また、２次元結合波理論を用いて、第１クラッド層２５のＡ１組成を変化させた場合の結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係が計算により求められた。なお、計算において、図４に示したグラフを求めた条件と同様の条件について、結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係が計算され、その計算結果が図８に示されている。図８は、２次元結合波理論を用いて求めた、第

1クラッド層のA I 組成を変化させた場合の結合係数 $\kappa$ とFilling Factorとの関係を表すグラフである。図4と図8とを比較すればわかるように、両者は若干の違いはあるが、どちらも $FF = 0.9 \sim 0.95$ で極大値を取るという同じ傾向を示している。したがって、1次元結合波理論を用いて、2次元フォトリック結晶の解析を行うことは、有効な近似であることが分かる。

[0045] 上述した計算結果より、2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいては、フォトリック結晶構造の $FF$ は、 $0.9$ 近傍が好ましい。しかしながら、クラッド層の光閉じ込めおよび加工難易度の点から、 $FF$ は、 $0.8$ 以下が好ましく、さらに好ましくは $0.7$ 以下である。このように、好ましい $FF$ の値が異なるが、これら好ましい条件を共に含むこととするために、2次元フォトリック結晶面発光レーザにおける2次元フォトリック結晶構造の断面形状をテーパ状とすることが好ましい。つまり、凹部10（図1を参照）において、断面形状において表面側 $FF$ と活性層側 $FF$ とが異なっていることが好ましい。図9は、本発明の実施の形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザの要部拡大図である。より具体的には、図1に示した2次元フォトリック結晶面発光レーザ100におけるフォトリック結晶構造部分の拡大図である。なお、表面側 $FF$ とは、コンタクト層6の主面の内、発光面側の主面における $FF$ をいう。また、活性層側 $FF$ とは、第1クラッド層5に形成された凹部10の底面に沿った面10aにおける $FF$ をいう。

[0046] 以下、好ましい表面側 $FF$ および活性層側 $FF$ の値について、計算により求める。計算には、図2に示した構成のモデルが用いられ、第1クラッド層25以外は、条件も上述したものと略同じとする。第1クラッド層25については、 $A I_x Ga_{1-x} As$ であってA I 組成は、 $0\%$ とする。具体的には、第1クラッド層25のうちフォトリック結晶構造を有していない箇所25bは、屈折率が $3.5242$ である $Al_{0.0}Ga_{1.0}As$ とし、厚さは、 $0.04 \mu m$ とした。また、第1クラッド層25のうちフォトリック結晶構造を有している箇所25aは、屈折率が $3.5242$ である $Al_{0.0}Ga_{1.0}As$ と、屈折率が $1.5$ である材料30とが、図2に示すように交互に周期

的に形成されていて、厚さは、 $0.5\mu\text{m}$ または $0.9\mu\text{m}$ とした。また、第1クラッド層25およびコンタクト層26における凹部深さも変更する。なお、凹部深さは、材料30の深さ方向の長さに当たる。具体的には、第1クラッド層25全体の厚さが $0.54\mu\text{m}$ または $0.94\mu\text{m}$ として計算された。なお、第1クラッド層25全体の厚さを $0.54\mu\text{m}$ とする場合は、フォトリソニック結晶構造を有している箇所25aの厚さは、 $0.5\mu\text{m}$ とし、第1クラッド層25全体の厚さを $0.94\mu\text{m}$ とする場合は、フォトリソニック結晶構造を有している箇所25aの厚さは、 $0.9\mu\text{m}$ とする。また、コンタクト層26の厚さは、 $0.02\mu\text{m}$ であることから、なお、第1クラッド層25全体の厚さを $0.54\mu\text{m}$ とする場合の凹部深さは、 $0.52\mu\text{m}$ であり、第1クラッド層25全体の厚さを $0.94\mu\text{m}$ とする場合の凹部深さは、 $0.92\mu\text{m}$ である。

[0047] なお、計算には、2次元結合波理論が用いられた。そして、表面側FFおよび活性層側FFの値をそれぞれ $0.0\sim 1.0$ まで変化させたときの $180^\circ$ 方向への回折の結合係数 $\kappa$ およびコンタクト層26へしみだした光の割合が計算された。図10は、凹部深さが $0.52\mu\text{m}$ の場合の表面側FF (Filling Factor) および活性層側FF (Filling Factor) に対する計算結果を示すグラフであって、図10(A)は、結合係数 $\kappa$ の値を示すグラフであり、図10(B)は、コンタクト層へしみだした光の割合を示すグラフである。

[0048] 図10(A)および図10(B)より、凹部深さが $0.52\mu\text{m}$ である場合は、活性層側FFが $0.8$ 以上であれば表面側FFの広い範囲において、結合係数 $\kappa$ は、 $500\text{ cm}^{-1}$ 以上である。特に、表面側FFが $0.9$ 付近では結合係数 $\kappa$ は、 $1500\text{ cm}^{-1}$ を超えている。また、表面側FFが $0.8$ 以下であれば第1クラッド層25およびコンタクト層26を合わせた厚さが約 $0.5\mu\text{m}$  (正確には、 $0.56\mu\text{m}$ ) と薄いにもかかわらず、コンタクト層26へのしみだしは、 $0.01\%$ 以下であることから、十分な光閉じ込め効果が得られていると言える。したがって、活性層側FFは、 $0.8$ 以上

が好ましく、さらに好ましくは0.9以上である。また、表面側FFは、0.8以下とすることが好ましい。これにより、高い結合係数 $\kappa$ と強い光閉じ込めが両立できるという効果を奏する。なお、表面側FFが小さすぎると、2次元フォトリック結晶構造における凹部の間に存在する半導体の部分が薄くなり構造的に弱くなるという問題が生じる。さらに、2次元フォトリック結晶面発光レーザ100の平面視においてコンタクト層6の面積が小さいほど、それらの上に形成される第1電極7の面積が小さくなるため電気抵抗が高くなるという問題も生じる（図1参照）。したがって、表面側FFが小さすぎるのは好ましくなく、表面側FFは0.4以上とすることが好ましい。

[0049] また、本実施の形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザ100では、その製造において、半導体を積層後、半導体表面からエッチング等を行うことでフォトリック結晶構造が形成される。このような加工方法を用いることを考えると、加工難度の点から、活性層側FFが表面側FFと同一または大きいことが好ましい。つまり、フォトリック結晶構造積層方向に沿った面による断面形状において、凹部10は、活性層側に近づくほど細くなるテーパ形状あるいはテーパ形状でなく直方体であることが好ましい。

[0050] 次に、凹部深さが0.92  $\mu\text{m}$ である場合の表面側FFおよび活性層側FFに対する計算結果について説明する。図11は、凹部深さが0.92  $\mu\text{m}$ である場合の表面側FF（Filling Factor）および活性層側FF（Filling Factor）に対する計算結果を示すグラフであって、図11（A）は、結合係数 $\kappa$ の値を示すグラフであり、図11（B）は、コンタクト層へしみだした光の割合を示すグラフである。

[0051] 図11（A）および図11（B）より、凹部深さが0.92  $\mu\text{m}$ である場合は、活性層側FFが0.8以上であれば表面側FFの全範囲において、結合係数 $\kappa$ は、500  $\text{cm}^{-1}$ 以上である。特に、表面側FFが0.9付近では結合係数 $\kappa$ は、2000  $\text{cm}^{-1}$ を超えている。また、表面側FFが0.9以下であれば第1クラッド層25およびコンタクト層26を合わせた厚さが約1.0  $\mu\text{m}$ （正確には、0.96  $\mu\text{m}$ ）と薄いにもかかわらず、コンタクト

層 26 へのしみだしは 0.01% 以下であることから、十分な光閉じ込め効果が得られていると言える。したがって、活性層側 FF は、0.8 以上が好ましく、さらに好ましくは 0.9 以上である。また、表面側 FF は、0.9 以下とすることが好ましい。これにより、高い結合係数  $\kappa$  と強い光閉じ込めとが両立できるという効果を奏する。なお、表面側 FF が小さすぎると、2 次元フォトリック結晶構造における凹部の間に存在する半導体の部分が薄くなり構造的に弱くなるという問題が生じる。さらに、2 次元フォトリック結晶面発光レーザ 100 の平面視においてコンタクト層 6 の面積が小さいほど、それらの上に形成される第 1 電極 7 の面積が小さくなるため電気抵抗が高くなるという問題も生じる（図 1 参照）。したがって、表面側 FF が小さすぎるのは好ましくなく、表面側 FF は、0.4 以上とすることが好ましい。

[0052] また、本実施の形態にかかる 2 次元フォトリック結晶面発光レーザ 100 では、その製造において、半導体を積層後、半導体表面からエッチング等を行うことでフォトリック結晶構造が形成される。このような加工方法を用いることを考えると、加工難度の点から、活性層側 FF が表面側 FF と同一または大きいことが好ましい。

[0053] なお、上述の計算においては、 $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  である第 1 クラッド層 25 の Al 組成を 0% とし、その厚さを  $0.54\ \mu\text{m}$ 、 $0.94\ \mu\text{m}$  としている。ここで、Al 組成を高くして、第 1 クラッド層 25 の平均屈折率を高くすれば、第 1 クラッド層 25 の厚さを  $0.3\ \mu\text{m}$  以下程度にしても、十分な光閉じ込め効果を得ることができる。したがって、さらに加工難度を低下させることができる。なお、加工難度が高くなっても、加工が可能であれば、第 1 クラッド層 25 の厚さを  $0.54\ \mu\text{m}$  より厚い、例えば  $0.75\ \mu\text{m} \sim 1.0\ \mu\text{m}$  にすることで、図 10 と図 11 との比較から分かるように、結合係数  $\kappa$  の値を全体的に大きくするとともに、コンタクト層 26 にしみだす光の割合を小さくすることができる。これにより、結合係数  $\kappa$  が  $500\ \text{cm}^{-1}$  よりも大きい値を得ることができる FF の範囲が広がる、およびコンタクト層 26 への光のしみだしをさらに低減でき、上部電極での光の吸

収をさらに抑制できることが分かる。

[0054] 上述したように、本実施の形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザ１００（図１参照）では、第１クラッド層５を含む第１半導体層に２次元フォトリック結晶構造が形成される。これにより、第１クラッド層５の平均屈折率を活性層３に比べて大幅に低くすることができる。そのため、第１クラッド層５は、通常の半導体レーザに比べて屈折率が高い組成の材料を用いることができる。さらに第１クラッド層５の厚さが、通常の半導体レーザに比べて薄くても十分な光閉じ込め効果を得ることができる。例えば、９８０ｎｍ帯のレーザにおいて、 $Al_xGa(1-x)As$ を第１クラッド層５とした場合に、 $Al$ 組成は、４０％～６０％とするのが一般的である。また、第１クラッド層５の厚さは、１．５～２．０μｍ程度が一般的だが、本実施の形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザ１００においては、第１クラッド層５の $Al$ 組成は、０％～２０％、厚さは０．５～１．０μｍとすれば、十分な光閉じ込め効果を得ることができる。

[0055] したがって、２次元フォトリック結晶構造のアスペクト比、深さを低くすることができるため、加工難度が低下する。具体的には、凹部１０をエッチングにより容易に形成することができる。また、 $Al$ 組成が低いため、特に $Al$ を含む材料で問題になる、 $Al$ の酸化による素子劣化の問題が低減される。また、 $Al$ 組成が低いため、第１クラッド層５の電気抵抗、熱抵抗が低くなり、素子特性が向上する。また、第１クラッド層５に $GaN$ 系を用いた場合に、 $Al$ 組成が下がることによって、上記に加えて結晶性の悪化が避けられる。また、第１クラッド層５に $AlGaN$ を用いた場合に、 $Al$ 組成を下げて $Al$ 組成がゼロの $GaN$ を第１クラッド層として用いることができる。それにより、 $AlGaN$ 系材料で一般的な課題であるｐ型化が困難であるという問題も避けることができる。

[0056] 次に、本実施の形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザの製造方法について図面を用いて説明する。図１２は、本発明の実施の形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザの製造工程を示す断面工程図であつ

て、図12(A)～図12(E)は、各工程図である。ここでは、具体的には、GaAs基板上で活性層としてInGaAsを用いた980nm帯の2次元フォトリソニック結晶面発光レーザの製造方法について説明する。なお、他の波長帯の材料系、例えばInP基板上的InGaAsP系材料、GaN基板上的InGaNや、AlGaN系でも同様に製造することができる。

[0057] 図12(A)に示すように、まずn型GaAsで形成される基板1上に有機金属気相成長(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)法や分子線エピタキシー(Molecular Beam Epitaxy: MBE)法などにより、半導体レーザ構造が順次に成長される。より具体的には、基板1上にn型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ により形成される第2クラッド層2(厚さ $2.0\mu\text{m}$ )、無添加のInGaAs/GaAs量子井戸活性層3、p型 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ により形成されるキャリアストップ層4(厚さ $40\text{nm}$ )、p型GaAsにより形成される第1クラッド層5(厚さ $0.5\mu\text{m}$ )、p+型GaAsにより形成されるコンタクト層6(厚さ $20\text{nm}$ )が順次に積層形成される。ここで、活性層3は、3周期のInGaAs井戸層(厚さ $8\text{nm}$ )、GaAs障壁層(厚さ $20\text{nm}$ )および分離閉じ込め層(SCH層)(厚さ $20\text{nm}$ )で構成されている歪み量子井戸構造であり、量子井戸発光波長が980nmになるように設計されている。なお、本実施の形態においては、上述の結晶成長工程は、一回でよいので、容易に2次元フォトリソニック結晶面発光レーザを製造することができる。

[0058] 次に、図12(B)に示すように、エッチングマスク層11として $\text{SiO}_2$ (SiNや金属(Ni、Cr、Ti等)でもよい)がプラズマCVDやスパッタや蒸着等でコンタクト層6上に成膜され、続いて、その上にレジスト層12(電子線レジストやインプリント材料等)がスピコート等の方法で成膜される。

[0059] その後、図12(C)に示すように、電子線描画法やナノインプリント法を用いることによって、2次元フォトリソニック結晶構造パターンがレジスト層12に形成され、レジスト層12に形成されたパターンがRIE(reactive

ion etching：反応性イオンエッチング）や I C P（Inductively Coupled Plasma：誘導結合プラズマ）などのドライエッチングによってエッチングマスク層 11 に転写される。パターンは、より具体的には例えば円柱状の凹部 13 である。なお、波長 980 nm の光を面発光させる場合は、2 次元フォトリソニック結晶構造パターンの周期は、290 nm 程度であり、パターンである凹部 13 の直径は、50～200 nm 程度である。なお、図 13 は、パターンが形成された状態のレジスト層の平面図である。図 13 に示すように、円柱状の凹部 13 が 20  $\mu$ m 角以上の範囲に規則性を有して配列されている。なお、凹部 13 の配列領域は、正形状、長形状、円形状などであってよい。

[0060] また、本実施の形態において、2 次元フォトリソニック結晶構造は、真円形状の格子点を正方格子配列させた構造としているが、格子点形状は、これに限定されるものではなく、例えば、三角形や楕円形や V 字型などの公知の形状が用いられてよい。さらに、配列は、これに限定されるものではなく、例えば、三角格子配列や大きさの異なる格子点の複合型やフォトリソニック準結晶などの公知の構造が用いられてよい。このような格子点形状や配列は、例えば、特開 2003-23193 号公報、特開 2007-273730 号公報、特開 2006-59864 号公報、特開 2004-296538 号公報等に記載されている。

[0061] 次に、図 12（D）に示すように、エッチングマスク層 11 をマスクとしてコンタクト層 6 と第 1 クラッド層 5 を I C P、R I E などのドライエッチングでエッチングすることによって凹部 10 が形成される。エッチングガスは、III-V 族半導体のドライエッチングに一般的に用いられているメタン／水素系ガス、塩素系ガス、ヨウ素系ガス、臭素系ガスなどが用いられる。エッチングの際に、2 次元フォトリソニック結晶構造の断面がテーパ形状に形成されてもよい。より具体的には、活性層側 F F が表面側 F F よりも大きくされてよい。この場合のエッチング方法について説明する。まず、第 1 の方法は、エッチングの最初に、パターン（凹部 13）として直径の小さい穴を形成

し、エッチングを進めていくことによるマスクの後退を利用することによって、マスクのパターンの直径を徐々に広げることで、凹部10の上下の径を相違させる方法である。また、第2の方法は、エッチングにより形成している凹部10の側壁保護を強くするようなエッチング条件を設定する方法である。つまり、エッチングとともに側壁に保護膜が堆積し穴径が小さくなるようなエッチング条件が用いられる。また、エッチングガスによるエッチングレートがA1組成で大きく変わる性質を利用すると、キャリアストップ層4をエッチングストップ層として利用することもできる。

[0062] エッチングにより形成された凹部10において、活性層側FFは、0.8以上が好ましく、さらに好ましくは0.9以上である。また、表面側FFは、0.8以下とすることが好ましい。これにより、高い結合係数 $\kappa$ と強い光閉じ込めが両立できるという効果を奏する。なお、表面側FFが小さすぎると、2次元フォトリック結晶構造における凹部の間に存在する半導体の部分が薄くなり構造的に弱くなるという問題が生じる。さらに、第1電極7の面積が小さくなるため電気抵抗が高くなるという問題を防ぐために、表面側FFは、0.4以上とすることが好ましい。

[0063] なお、上記エッチングは、活性層3に到達する前に停止させる必要がある。より具体的には、第1クラッド層5のすべてをエッチングせずに途中でエッチングが停止される。これにより、上記エッチングによる活性層3へのダメージを抑制することができ、発光効率の減少を避けることができる。より具体的には、エッチングは、活性層3の手前50nmから活性層3の直前までのいずれかの位置で停止されることが好ましい。エッチングにより形成される凹部10の底面が活性層3に近いほどフォトリック結晶構造の結合係数 $\kappa$ は、大きくなるが、近すぎるとプラズマによる活性層3へのダメージが生じる可能性がある。

[0064] ここで、上述したフォトリック結晶の断面形状をテーパ形状とするための具体的な条件についてその一例を説明する。上述のように、エッチングマスク層11は、 $\text{SiO}_2$ として、p+型GaAsにより形成されるコンタクト層

6 および p 型 GaAs により形成される第 1 クラッド層 5 が RIE 装置を使用することによってドライエッチングされる。エッチングガスは、 $\text{BCl}_3$  とし、ガス流量は、2 sccm とし、圧力は、5 mTorr とし、RF 電力は、100 W とし、エッチング時間は、3 分間とした。その結果、周期は、290 nm であり、深さは、400 nm の凹部 10 を形成することができた。そして、その表面側 FF は、0.65 であり、活性層側 FF は、0.84 であり、断面においてテーパ形状をもつ 2 次元フォトニック結晶構造を形成することができた。

[0065] 次に、図 12 (E) に示すように、エッチングマスク層 11 をバッファードフッ酸などで除去した後に斜め方向から金属を蒸着することで、コンタクト層 6 の上面のみに第 1 電極 7 が形成される。このようにして第 1 電極 7 を形成することで、凹部 10 の底面に金属が蒸着されることを防ぐことができる。凹部 10 の底面に金属が蒸着されると、活性層 3 で発生した光が金属により吸収されることになり、閾値上昇や発光効率の低下につながるので好ましくない。なお、第 1 電極 7 は、コンタクト層 6 の上面すべてに形成されるのではなく、発光面 9 を形成するために選択的に形成される。さらに、基板 1 の底面に第 2 電極 8 を形成することで、本実施の形態にかかる 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 100 が製造される。

[0066] 本実施の形態にかかる 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 100 の製造方法において、上述のように、融着を用いずに製造するため、融着を行うことで生じる可能性の高い、デバイスへのダメージが生じることが無く、製造時に不良品が生じる可能性がほとんどない。さらに、融着においては、デバイスに反りやうねりが存在すると行うことはできないという問題もあるが、本実施の形態にかかる 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 100 の製造方法においては、融着を用いないことから、不良品が生じる可能性が低く、歩留まりが高く、容易に製造を行うことができる。また、使用材料は、特に、限定されることがなく、一般的に用いられる材料を使って、容易に、2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 100 を作製することができる。

[0067] 次に、別の実施形態について説明する。

[0068] (第2実施形態)

[0069] 図14は、本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリソニック結晶面発光レーザの構成を示す断面図である。図15は、本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトリソニック結晶面発光レーザの要部拡大図である。図14において、第2実施形態にかかる2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ200は、基板1と、基板1の一方の主面上に形成された第2半導体層である第2クラッド層2と、第2クラッド層2上に形成された活性層3と、活性層3上に形成されるキャリアストップ層4と、キャリアストップ層4上に形成された第1クラッド層5と、第1クラッド層5上に形成されたコンタクト層6と、コンタクト層6上に形成された絶縁層14と、絶縁層14を貫通し、コンタクト層6とオーミック接触する円環状（リング状、ドーナツ状）の第1電極7と、基板1における前記一方の主面に対向する他方の主面上の全面に形成された第2電極8とを備えて構成される。なお、絶縁層14上において第1電極7が形成されていない箇所は、光が発光される発光面9である。また、第1クラッド層5およびコンタクト層6には第1電極7側（活性層3と反対側）から加工がなされることで形成された凹部10に埋め込み材料10bが埋め込まれて、第1クラッド層5およびコンタクト層6には、複数の埋め込み材料10bが周期的に配置されるように形成されている。これにより、コンタクト層6、第1クラッド層5およびキャリアストップ層4からなる第1半導体層は、2次元フォトリソニック結晶構造を有する。なお、第1電極7側から加工がなされるので、埋め込み材料10bは、コンタクト層6において第1電極7と接する側の表面には少なくとも形成されている。このフォトリソニック結晶構造は、活性層3でレーザ発振する光の波長を選択する。なお、凹部10の径は、深さ方向に沿って徐々に変化している。したがって、埋め込み材料10bの径は、深さ方向に沿って徐々に変化している。より具体的には、積層方向に沿った面による断面形状において、埋め込み材料10bおよび埋め込み材料10b以外の半導体部分はいわゆるテーパ形状を有する。

- [0070] このように第2実施形態の2次元フォトリック結晶面発光レーザ200は、第1実施形態の2次元フォトリック結晶面発光レーザ100に対し、凹部10には埋め込み材料10bが埋め込まれている点で主に異なり、この相違点から絶縁層14をさらに備えている。
- [0071] 第1クラッド層5およびコンタクト層6に形成された2次元フォトリック結晶構造において、2次元の周期的な屈折率分布は、第1クラッド層5を形成する材料の屈折率と異なる屈折率の埋め込み材料10bが格子点として互いに異なる2方向（線形独立な2方向）に所定の周期（格子間隔、格子定数）で配列されることによって形成されている。格子点は、本実施の形態では、例えば、第1クラッド層5およびコンタクト層6に形成された錐状の埋め込み材料10bから構成される。なお、埋め込み材料10bは、コンタクト層6および第1クラッド層5だけでなく、キャリアストップ層4まで到達していてもよいが、活性層3には到達しないことが好ましい。埋め込み材料10bが活性層3に到達、すなわちフォトリック結晶と活性層3とが近接すると、エッチング時に活性層3へのダメージが生じる可能性がある。
- [0072] なお、埋め込み材料10bとしては、活性層3からの光を透過する必要があることから、透明絶縁材料を用いる。例えば、埋め込み材料10bは、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}$ 、 $\text{SOG}$ （spinon glass）、ポリイミド、BCB（ベンゾシクロブテン）などのような、レーザの発振波長で透明でかつ電氣的絶縁性のある材料で、電極形成の際の電極合金化工程の加熱に耐えうる耐熱性のある材料である。また、コンタクト層6上に形成される絶縁層14は、発光面9を形成し、埋め込み材料10bと同様に活性層3からの光を透過する必要があることから、埋め込み材料10bに用いた材料で形成される。なお、埋め込み材料10bと絶縁層14とは、同一の材料でもよいし、異なる材料でもよい。本実施形態にかかる2次元フォトリック結晶面発光レーザ200において、コンタクト層6に形成された凹部10に埋め込み材料10bが埋め込まれていることから、コンタクト層6の第1電極7側表面は、平坦化されている。このため、第1電極7の形成が容易である。また、コンタクト層6およ

び第1クラッド層5には埋め込み材料10bが埋め込まれていることから、これらが露呈されることはない。つまり、コンタクト層6および第1クラッド層5は、空気にさらされることがないので、酸化による素子劣化を防ぐことができる。

[0073] ここで、第2実施形態では、図15に示すように、上述の表面側FFは、コンタクト層6の上面における半導体および埋め込み材料10bにおいて、半導体の占める面積の割合とされ、活性層側FFは、第1クラッド層5内において、埋め込み材料10の底面を含む平面による断面を仮想した場合に、この断面における半導体および埋め込み材料10bにおいて、半導体の占める面積の割合とされる。第2実施形態の2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ200は、第1実施形態で説明した結合係数 $\kappa$ の解析と同様の解析が成り立ち、第1実施形態の2次元フォトリソニック結晶面発光レーザ100と同様な作用効果を奏する。なお、凹部10の深さは、埋め込み材料10bの深さでもある。すなわち、上述のように、埋め込み材料10bの断面は、テーパ形状であるため、表面側FFと活性層側FFは異なる値となる。そして、このように、埋め込み材料10bの断面形状がテーパ形状であることから、2次元フォトリソニック結晶の結合係数 $\kappa$ の値が高く、かつ、光閉じ込め効果が高くなることが容易である。そして、埋め込み材料10bを埋め込む凹部10の形成が容易となる。例えば、凹部10は、エッチングにより形成されるが、その形成難度を低下させることができる。また、活性層側FFは、表面側FFよりも大きいことが好ましい。すなわち、凹部10および埋め込み材料10bは、活性層3に近づくほど細くなるテーパ形状を有することが好ましい。活性層3に近づくほど細くなるテーパ形状を有する凹部10は、活性層3に近づくほど太くなるテーパ形状である凹部10に比べて、容易に作製することができるため、容易に凹部10を作製できる。また、表面側FFは、0.8以下であって、活性層側FFは、0.8以上であることが好ましい。これにより、2次元フォトリソニック結晶における高い結合係数 $\kappa$ および第1クラッド層5による高い光閉じ込め効果を得ることができる。そして、2次元フォ

トニック結晶の製造が容易である。

[0074] また、第1クラッド層5の厚さは、第1クラッド層5の屈折率にもよるが  $0.3\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$  程度が好ましい。さらに好ましくは、 $0.5\mu\text{m}$  前後とすればよい。これにより、アスペクト比が小さくなり凹部10の形成が容易であり、光閉じ込め効果も十分得ることができる。なお、第1クラッド層5が薄すぎると光閉じ込めが不十分になり、第1電極7による光の吸収が問題になる、一方、第1クラッド層5が厚すぎると、アスペクト比が高くなり凹部10の形成が困難となる。

[0075] 上述の第2実施形態にかかる2次元フォトニック結晶面発光レーザ200は、第1電極7および第2電極8間に電圧が印加されることで活性層3が発光する。活性層3から漏れた光がコンタクト層6および第1クラッド層5に形成された2次元フォトニック結晶構造に入射し、その格子間隔に波長が一致する光は、2次元フォトニック結晶により共振して増幅され、発光面9からコヒーレントな光が発光される。

[0076] 次に、本第2実施形態にかかる2次元フォトニック結晶面発光レーザの製造方法について図面を用いて説明する。図16は、本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトニック結晶面発光レーザの製造工程を示す第1の断面工程図であって、図16(A)～図16(D)は、各工程図である。図17は、本発明の第2実施形態にかかる2次元フォトニック結晶面発光レーザの製造工程を示す第2の断面工程図であって、図17(A)～図17(D)は、各工程図である。なお、図17は、図16に示した工程後の工程図である。ここでは、具体的には、GaAs基板上で活性層としてInGaAsを用いた980nm帯の2次元フォトニック結晶面発光レーザの製造方法について説明する。なお、他の波長帯の材料系、例えば、InP基板上的InGaAsP系材料や、GaN基板上的InGaNや、AlGaN系でも以下の説明と同様に製造することができる。

[0077] 図16(A)に示すように、まずn型GaAsで形成される基板1上に有機金属気相成長(Metal Organic Vapor Phase Epitaxy: MOVPE)法や分

子線エピタキシー(Molecular Beam Epitaxy : MBE)法などにより、半導体レーザ構造が順次に成長される。より具体的には、基板1上にn型 $\text{Al}_{0.4}\text{Ga}_{0.6}\text{As}$ により形成される第2クラッド層2(厚さ $2.0\mu\text{m}$ )、無添加の $\text{InGaAs}/\text{GaAs}$ 量子井戸活性層3、p型 $\text{Al}_{0.6}\text{Ga}_{0.4}\text{As}$ により形成されるキャリアストップ層4(厚さ $40\text{nm}$ )、p型 $\text{GaAs}$ により形成される第1クラッド層5(厚さ $0.5\mu\text{m}$ )、p+型 $\text{GaAs}$ により形成されるコンタクト層6(厚さ $20\text{nm}$ )が順次に積層形成される。ここで、活性層3は、3周期の $\text{InGaAs}$ 井戸層(厚さ $8\text{nm}$ )、 $\text{GaAs}$ 障壁層(厚さ $20\text{nm}$ )および分離閉じ込め層(SCH層)(厚さ $20\text{nm}$ )で構成されている歪み量子井戸構造であり、量子井戸発光波長が $980\text{nm}$ になるように設計されている。なお、本実施の形態においては、上述の結晶成長工程は、一回でよいので、容易に2次元フォトニック結晶面発光レーザを製造できる。

[0078] 次に、図16(B)に示すように、エッチングマスク層11として $\text{SiO}_2$ ( $\text{SiN}$ や金属( $\text{Ni}$ 、 $\text{Cr}$ 、 $\text{Ti}$ 等)でもよい)がプラズマCVDやスパッタや蒸着等によってコンタクト層6上に成膜され、続いて、その上にレジスト層12(電子線レジストやインプリント材料等)がスピンコート等の方法で成膜される。

[0079] その後、図16(C)に示すように、電子線描画法やナノインプリント法を用いて、2次元フォトニック結晶構造パターンをレジスト層12に形成し、レジスト層12に形成したパターンがRIE(reactive ion etching: 反応性イオンエッチング)やICP(Inductively Coupled Plasma: 誘導結合プラズマ)などのドライエッチングによってエッチングマスク層11に転写される。パターンは、具体的には、円柱状の凹部13である。なお、波長 $980\text{nm}$ の光を面発光させる場合は2次元フォトニック結晶構造パターンの周期としては、 $290\text{nm}$ 程度とし、パターンである凹部13の直径は、 $50\sim 200\text{nm}$ 程度とすればよい。上述の図13と同様に、円柱状の凹部13が例えば $20\mu\text{m}$ 角以上の範囲に規則性を有して配列されている。なお、

凹部 13 の配列領域は、正形状、長形状、円形状などであってよい。

[0080] また、本実施の形態においては、2次元フォトリソ結晶構造は、真円形状の格子点を正方格子配列させた構造としているが、格子点形状は、これに限定されるものではなく、三角形や楕円形やV字型などの公知の形状が用いられてよい。さらに、配列は、これに限定されるものではなく、三角格子配列や大きさの異なる格子点の複合型やフォトリソ結晶などの公知の構造が用いられてよい。

[0081] 次に、図 16 (D) に示すように、エッチングマスク層 11 をマスクとしてコンタクト層 6 と第 1 クラッド層 5 を ICP、RIE などのドライエッチングでエッチングすることによって凹部 10 が形成される。エッチングガスとしては、III-V 族半導体のドライエッチングに一般的に用いられているメタン/水素系ガス、塩素系ガス、ヨウ素系ガス、臭素系ガスなどが用いられる。エッチングの際に、2次元フォトリソ結晶構造の断面をテーパ形状にしてもよい。より具体的には、活性層側 FF を表面側 FF よりも大きくされてよい。この場合のエッチング方法について説明する。まず、第 1 の方法は、エッチングの最初に、パターン（凹部 13）として直径の小さい穴を形成し、エッチングを進めていくことによるマスクの後退を利用することによって、マスクパターンの直径を徐々に広げることで、凹部 10 の上下の径を相違させる方法がある。また、第 2 の方法は、エッチングにより形成している凹部 10 の側壁保護を強くするようなエッチング条件を設定する方法がある。つまり、エッチングとともに側壁に保護膜が堆積し穴径が小さくなるようなエッチング条件が用いられる。また、エッチングガスによるエッチングレートが A1 組成で大きく変わる性質を利用すると、キャリアストップ層 4 をエッチングストップ層として利用することもできる。

[0082] エッチングにより形成された凹部 10 において、活性層側 FF は、0.8 以上が好ましく、さらに好ましくは 0.9 以上である。また、表面側 FF は、0.8 以下とすることが好ましい。これにより、高い結合係数  $\kappa$  と強い光閉じ込めが両立できるという効果を奏する。なお、表面側 FF が小さすぎる

と、２次元フォトリック結晶構造における凹部１０の間に存在する半導体の部分が薄くなり構造的に弱くなるという問題が生じる。さらに、第１電極７の面積が小さくなるため電気抵抗が高くなるという問題を防ぐために、表面側ＦＦは、０．４以上とすることが好ましい。

[0083] なお、上記エッチングは、活性層３に到達する前に停止させる必要がある。より具体的には、第１クラッド層５のすべてをエッチングせずに途中でエッチングが停止される。これにより、上記エッチングによる活性層３へのダメージを抑制することができ、発光効率の減少を避けることができる。より具体的には、エッチングは、活性層３の手前５０ｎｍから活性層３の直前までのいずれかの位置で停止されることが好ましい。エッチングにより形成される凹部１０の底面が活性層３に近いほどフォトリック結晶構造の結合係数 $\kappa$ は、大きくなるが、近すぎるとプラズマによる活性層３へのダメージが生じる可能性がある。

[0084] ここで、上述したフォトリック結晶の断面形状をテーパ形状とするための具体的な条件についてその一例を説明する。上述のように、エッチングマスク層１１は、 $\text{SiO}_2$ として、 $p+$ 型 $\text{GaAs}$ により形成されるコンタクト層６および $p$ 型 $\text{GaAs}$ により形成される第１クラッド層５がＲＩＥ装置を使用することによってドライエッチングされる。エッチングガスは、 $\text{BCl}_3$ とし、ガス流量は、２ｓｃｃｍとし、圧力は、５ｍＴorrとし、ＲＦ電力は、１００Ｗとし、エッチング時間は、３分間とした。その結果、周期は、２９０ｎｍであり、深さは、４００ｎｍの凹部１０ａを形成することができた。そして、その表面側ＦＦは、０．６５であり、活性層側ＦＦは、０．８４であり、断面においてテーパ形状をもつ２次元フォトリック結晶構造を形成することができた。

[0085] 次に、図１７（Ａ）に示すように、エッチングマスク層１１をバッファードフッ酸などで除去した後に、凹部１０に埋め込み材料１０ｂが埋め込まれる。例えば、上述のように、埋め込み材料１０ｂは、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{SiN}$ 、 $\text{SOG}$ （spin on glass）、ポリイミド、ＢＣＢ（ベンゾシクロブテン）などのよ

うな、レーザの発振波長で透明でかつ電氣的絶縁性のある材料で、電極形成の際の電極合金化工程の加熱に耐えうる耐熱性のある材料が用いられる。また埋込方法は、プラズマCVD (Chemical Vapor Deposition)、LP CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) などの化学気相体積 (CVD) 法、スパッタ法、スピコート法などが用いられる。このように、凹部10に埋め込み材料10bを埋め込むことにより、コンタクト層6の上面が平坦になり、コンタクト層6の上面への電極形成が容易になる。また、コンタクト層6および第1クラッド層5の凹部10が露呈されないため、2次元フォトニック結晶面発光レーザ200は、酸化による素子劣化を受けにくい。

[0086] 次に、図17 (B) に示すように、エッチング (ウェットエッチングまたはドライエッチング) を用いることによって、コンタクト層6上に成膜された埋め込み材料10bが除去され、コンタクト層6が露出される。なお、埋め込み材料10bは、エッチングするが、コンタクト層6は、エッチングしないように方法および条件を選択することで、コンタクト層6がエッチングされてしまうことを防ぐことができる。

[0087] 次に、図17 (C) に示すように、デバイス全面に絶縁層14が形成される。なお、絶縁層14の材料および成膜方法は、図17 (A) で示した埋め込み材料10bを成膜する場合と同様である。すなわち、SiO<sub>2</sub>、SiN、SOG (spin on glass)、ポリイミド、BCB (ベンゾシクロブテン) などが、プラズマCVD (Chemical Vapor Deposition)、LP CVD (Low Pressure Chemical Vapor Deposition) などの化学気相体積 (CVD) 法、スパッタ法、スピコート法などにより成膜される。絶縁層14の厚さによっては、面発光でレーザ光を取り出すときの反射防止層として絶縁層14が機能するため、この際に、絶縁層14の厚さが調整される。次に、図17 (D) に示すように、絶縁層14において第1電極7を形成する部分を開口14aとするために、フォトリソグラフィとドライエッチングが行われる。この際、埋め込み材料10bと絶縁層14の材質を意図的に異なる材料とし、エッチング条件を適切に選択することによって、絶縁層14を選択的にエ

エッチング除去することも可能である。これによって、絶縁層 14 をエッチングするとき、エッチングを余分に行ったとしても、埋め込み材料 10b がエッチングされてしまうことを防ぐことができる。

[0088] 次に、図 17 (E) に示すように、フォトリソグラフィーとリフトオフによって第 1 電極 7 が形成される。第 1 電極 7 は、 $p+$  型 GaAs であるコンタクト層 6 にオーミック接触する材料であればよい。なお、2次元フォトリソグラフィック結晶構造形成領域の一部（発光面 9）は、第 1 電極 7 により覆われないこととする。これにより、2次元フォトリソグラフィック結晶構造により回折され垂直方向に放射される光を発光面 9 から外部に取り出すことができる。図 18 は、本発明の第 2 実施形態における 2次元フォトリソグラフィック結晶面発光レーザの電極の構成を示す平面図であって、図 18 (A) ~ 図 18 (D) は、それぞれ異なる形状の電極の構成を示す平面図である。図 18 (A) ~ 図 18 (D) に示すように、2次元フォトリソグラフィック結晶面発光レーザにおけるフォトリソグラフィック結晶構造形成領域 27 に、電極 28 が配置される。電極 28 の形状は、例えば、円形または矩形等である。そして、電極 28 は、その電極 28 の中央部分には、電極が形成されない形状（図 18 (A) および図 18 (B) 参照）、例えばドーナツ形状等であってもよいし、電極 28 は、フォトリソグラフィック結晶構造形成領域 27 に比べて小さい形状（図 18 (C) および図 18 (D) 参照）としてもよい。これにより、フォトリソグラフィック結晶構造形成領域 27 において、電極 28 が形成されない箇所が存在し、その箇所から光を取り出すことができる。

[0089] さらに、基板 1 の底面に第 2 電極 8 を形成することによって、第 2 実施形態にかかる 2次元フォトリソグラフィック結晶面発光レーザ 200 が製造される。

[0090] また、本発明の第 2 実施形態にかかる 2次元フォトリソグラフィック結晶面発光レーザの他の製造方法について説明する。図 19 は、本発明の第 2 実施形態にかかる 2次元フォトリソグラフィック結晶面発光レーザの他の製造工程としての第 1 製造工程を説明するための断面工程図であって、図 19 (A) および図 19 (B) は、各工程図である。この製造方法は、図 17 (A) に示された工程の後

に、図 19 (A) に示すように、フォトリソグラフィーとエッチングによって埋め込み材料 10b の一部に開口 10c を形成することでコンタクト層 6 が露出される。そして、図 19 (B) に示すように、開口 10c に第 1 電極 7 が形成される。そして、基板 1 の底面に第 2 電極を形成することで 2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザ 200 が製造される。これにより、図 17 (C) に示すような、絶縁層 14 を形成する必要がないことから、製造工程が短縮化されるという効果を奏する。

[0091] また、本発明の第 2 実施形態にかかる 2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザのさらに他の製造方法について説明する。図 20 は、本発明の第 2 実施形態にかかる 2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザの他の製造工程としての第 2 製造工程を説明するための断面工程図である。この製造方法は、図 17 (A) の工程において、図 20 に示すように凹部 10 に埋め込み材料 10b を埋め込む際に、凹部 10 すべてに埋め込むのではなく、凹部 10 に空気の部分（空所（空孔） 10d）を残留させるように埋め込み材料 10b が埋め込まれる。より具体的には、埋め込み方法が CVD 法やスパッタを用いる場合は、成膜条件を調整することでこのような埋め込み方が可能である。また、埋め込み方法が、スピコートの場合は、例えば、埋め込み材料 10 として粘度が高い材料を使うことでこのような埋め込み方が可能である。また、まず、別基板にスピコートにより埋め込み材料 10 を形成しておき、凹部 10 が形成されたデバイスにその埋め込み材料 10b を押し付けることによって、凹部 10 の途中まで埋め込み材料 10b が埋め込まれてもよい。なお、凹部 10 における空孔 10d の深さは、例えば、 $0.1\mu\text{m}$  以上であって、凹部 10 のすべての深さから  $0.1\mu\text{m}$  減じた深さとすればよい。つまり、埋め込み材料 10b が埋め込まれる量は、凹部 10 に  $0.1\mu\text{m}$  だけ埋め込まれた状態と、凹部 10 の底部まで  $0.1\mu\text{m}$  しかない状態まで埋め込まれた状態との間とされる。埋め込み材料 10b を埋め込み後は、図 17 (B) 以降に示された工程が行われる。これにより、埋め込み材料 10b の一部に空気を含み、2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザを製造することができる。

。空気の屈折率は、一般的に低いことから、この２次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、第１クラッド層５およびコンタクト層６に形成された２次元フォトリック結晶構造の屈折率差を大きくすることができる。これにより、２次元フォトリック結晶構造の回折効率が向上する。したがって、２次元フォトリック結晶面発光レーザの低閾値化および高効率化につながる。なお、凹部１０に不活性ガス等を注入した状態で埋め込み材料１０ｂを埋め込むことによって、凹部１０には空気の代わりに不活性ガス等の気体を残留させてもよい。また、空孔１０ｄが真空状態とされてもよい。これにより、凹部１０が酸化により劣化することを防ぐことができる。

[0092] 第２実施形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザ２００の製造方法において、上述のように、融着を用いずに製造するため、融着を行うことで生じる可能性の高い、デバイスへのダメージが生じることが無く、製造時に不良品が生じる可能性がほとんどない。さらに、融着においては、デバイスに反りやうねりが存在すると行うことはできないという問題もあるが、本実施の形態に係る２次元フォトリック結晶面発光レーザ２００の製造方法においては、融着を用いないことから、不良品が生じる可能性が低く、歩留まりが高く、容易に製造を行うことができる。また、使用材料は、特に、限定されることがなく、一般的に用いられる材料を使って、容易に、２次元フォトリック結晶面発光レーザ２００を作製することができる。また、凹部１０に埋め込み材料１０ｂを埋め込んで、第１半導体層（コンタクト層）の上面を平坦化するので、第１半導体層（コンタクト層）上への電極形成を容易に行うことができる。

[0093] なお、本発明の第２実施形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザ２００は、図２１に示すように、光を基板１側から取り出す構成とされてもよい。図２１は、本発明の第２実施形態にかかる２次元フォトリック結晶面発光レーザの他の構成を示す断面図である。より具体的には、基板１が取り出す光の波長帯に対して透明な材料とされる。そして、例えば、図１７（Ｂ）に示した工程の後に、第２電極８がコンタクト層６上の全面に形成され

、基板 1 の底面に、取り出す光の波長帯に対して透明な材料である絶縁層 14 が形成され、その絶縁層 14 を貫通して基板 1 と接触する第 1 電極 7 が形成される。これにより、基板 1 側に発光面 9 が形成された 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 200A が実現される。なお、図 21 では、2 次元フォトニック結晶面発光レーザ 200A は、第 1 電極 7 を発光面 9 の全面に形成せず、開口を有する構成とされ、この開口からレーザ光が射出される構成とされた。しかしながら、このような構成に限定されるものではなく、これ以外の構成であってもよく、例えば、第 1 電極 7 の一部または全部が透明電極とされ、開口を形成せずに、発光面 9 の全面に第 1 電極 7 が形成された構成とされてもよい。これにより、透明電極を介して、レーザ光が射出される。

[0094] 本明細書は、上記のように様々な態様の技術を開示しているが、そのうち主な技術を以下に纏める。

[0095] 一態様にかかる 2 次元フォトニック結晶面発光レーザは、第 1 および第 2 半導体層と、前記第 1 半導体層と、前記第 2 半導体層とに挟まれ、キャリア注入によって、光を発生する活性層とを備え、前記第 1 半導体層は、前記第 1 半導体層の前記活性層側とは反対側の主面から複数の凹部が形成されることで少なくとも前記第 1 半導体層の一部が 2 次元フォトニック結晶構造を有し、前記凹部の径は、深さ方向に沿って変化しているものである。好ましくは、前記凹部の径は、深さ方向に沿って徐々に変化しているものであり、また、好ましくは、第 1 半導体層におけるフォトニック結晶構造積層方向に沿った面による断面形状において、凹部および凹部以外の半導体は、いわゆるテーパ形状を有する。

[0096] この構成によれば、2 次元フォトニック結晶面発光レーザが融着を用いずに製造することができることから、容易に製造でき、製造時に不良品が生じる可能性も低い。したがって、この構成によれば、低コストで作製でき、分留まりが高い 2 次元フォトニック結晶面発光レーザを実現することができる。また、凹部の径を深さ方向に沿って徐々に変化させた構成であることから

、2次元フォトリック結晶の結合係数 $\kappa$ の値を高くし、かつ、光閉じ込め効果の向上および凹部形成を容易に行うことができる。これにより、低閾値化、高効率化、短波長化等を容易に行うことができる。

[0097] また、他の一態様では、上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第1半導体層は、第1クラッド層を有し、前記第2半導体層は、第2クラッド層を有し、前記第1クラッド層の屈折率は、前記第2クラッド層の屈折率よりも高いことである。

[0098] この構成によれば、第1クラッド層の屈折率を第2クラッド層のそれよりも高くすることで、2次元フォトリック結晶構造が形成されたとしても、第1クラッド層の平均屈折率が低下しすぎることがない。これにより、フォトリック結晶層に分布する光の割合の減少を防ぐことから結合係数の低下を防ぐことができる。

[0099] また、他の一態様では、これら上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第1クラッド層の厚さは、 $0.3\mu\text{m} \sim 1.0\mu\text{m}$ であることである。

[0100] この構成によれば、第1クラッド層の厚さが厚すぎないので、アスペクト比が小さいフォトリック結晶構造を有することとなる。そのため、第1クラッド層に形成する凹部の加工が容易である。より具体的には、エッチング加工の難度が低い。

[0101] また、他の一態様では、これら上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記凹部は、前記活性層には到達しないことである。

[0102] 凹部が活性層に到達、すなわちフォトリック結晶と活性層とが近接すると、プラズマによる活性層へのダメージが生じる可能性があるが、この構成によれば、凹部が活性層に到達しないことから、そのような問題が生じることはない。

[0103] また、他の一態様では、これら上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第1半導体層の発光面側主面における半導体

が占める面積の割合を表面側 F F とし、前記第 1 半導体層において、前記複数の凹部の底面を含む平面を仮想した場合に、この仮想した平面における半導体が占める面積の割合を活性層側 F F とし、前記表面側 F F と前記活性層側 F F とは異なる値であることである。

[0104] この構成によれば、第 1 半導体層におけるフォトリック結晶構造積層方向に沿った面による断面形状において、凹部および凹部以外の半導体は、いわゆるテーパ形状を有することとなる。したがって、このような構成の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、2 次元フォトリック結晶の結合係数  $\kappa$  の値を高くし、かつ、第 1 クラッド層による光閉じ込め効果を向上させることが可能である。また、凹部の加工が容易である。より具体的には、凹部のエッチング加工の難度が低い。

[0105] また、他の一態様では、これら上述の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記活性層側 F F は、前記表面側 F F よりも大きいことである。

[0106] この構成によれば、第 1 半導体層におけるフォトリック結晶構造積層方向に沿った面による断面形状において、活性層側に近づくほど凹部が細くなるテーパ形状を有することとなる。このため、このような構成の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、活性層側に近づくほど凹部が太くなるテーパ形状に比べて、容易に作製することができる。

[0107] また、他の一態様では、これら上述の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記表面側 F F は、0.8 以下であって、前記活性層側 F F は、0.8 以上であることである。

[0108] このような構成の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザは、2 次元フォトリック結晶における高い結合係数  $\kappa$ 、かつ、第 1 クラッド層による光閉じ込め効果を向上させることが可能である。また、凹部の加工が容易である。より具体的には、凹部のエッチング加工の難度が低い。

[0109] また、他の一態様にかかる 2 次元フォトリック結晶面発光レーザの製造方法は、第 2 半導体層上に活性層を積層し、前記活性層上に、第 1 半導体層を

積層した後に、前記第 1 半導体層において、前記活性層とは反対側の表面から、前記活性層に近づくほど細くなっていく凹部を形成することで、前記第 1 半導体層の少なくとも一部に 2 次元フォトリック結晶構造を形成することである。

[0110] この構成によれば、融着や特殊な埋め込み再成長法などを用いずに、2 次元フォトリック結晶面発光レーザを製造することができるので、このような構成の製造方法は、材料の選択性が広く、歩留まりがよく、低コスト化が可能である。

[0111] また、他の一態様では、これら上述の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第 1 半導体層の前記複数の凹部には、埋め込み材料が埋め込まれていることである。

[0112] このような構成によっても、2 次元フォトリック結晶面発光レーザが融着を用いずに製造することができることから、容易に製造でき、製造時に不良品が生じる可能性も低い。したがって、この構成によれば、低コストで作製でき、歩留まりが高い 2 次元フォトリック結晶面発光レーザを実現することができる。また、凹部（埋め込み材料）の径を深さ方向に沿って徐々に変化させた構成であることから、2 次元フォトリック結晶の結合係数  $\kappa$  の値を高くし、かつ、光閉じ込め効果の向上および凹部形成を容易に行うことができる。これにより、低閾値化、高効率化、短波長化等を容易に行うことができる。また、凹部に埋め込み材料が埋め込まれていることから、第 1 半導体層の上面が平坦化されているため、第 1 半導体層上に容易に電極を形成することができる。また、凹部に埋め込み材料が埋め込まれていることから、第 1 半導体層における凹部が大気に露呈されることはない。これにより、第 1 半導体層は、酸化されにくく、2 次元フォトリック結晶面発光レーザの劣化を防ぐことができる。

[0113] また、他の一態様では、これら上述の 2 次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第 1 半導体層の前記複数の凹部には、空所（空孔）が形成されるようにその深さ方向の途中まで埋め込み材料が埋め込ま

れていることである。なお、空所内には、空気や、空気以外の気体が封入されてよい。また、空孔内は、真空状態であってもよい。

[0114] この構成によれば、埋め込み材料の一部に空気等の気体を含むこととなる。空気等の気体は、屈折率が一般的に低いことから、埋め込み材料の屈折率よりも空気の屈折率の方が低い。したがって、第1半導体層に形成された2次元フォトリック結晶構造の屈折率差を大きくすることができる。それにより、2次元フォトリック結晶構造の回折効率が向上し、2次元フォトリック結晶面発光レーザは、低閾値化および高効率化が可能である。なお、空孔内は、真空としてもよいが、その場合も屈折率は、略空気と同程度である。

[0115] また、他の一態様では、これら上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザにおいて、好ましくは、前記第1半導体層の前記活性層側とは反対側の主面における半導体が占める面積の割合を表面側FFとし、前記第1半導体層において、前記複数の凹部の底面を含む平面を仮想した場合に、この仮想した平面における半導体が占める面積の割合を活性層側FFとし、前記表面側FFと前記活性層側FFとは異なる値であることである。

[0116] この構成によれば、第1半導体層におけるフォトリック結晶構造積層方向に沿った面による断面形状において、凹部、埋め込み材料および凹部以外の半導体は、いわゆるテーパ形状を有することとなる。したがって、このような構成の2次元フォトリック結晶面発光レーザは、2次元フォトリック結晶の結合係数 $\kappa$ の値を高くし、かつ、第1クラッド層による光閉じ込め効果を向上させることが可能である。また、凹部の加工が容易である。より具体的には、凹部のエッチング加工の難度が低い。

[0117] また、他の一態様では、上述の2次元フォトリック結晶面発光レーザの製造方法において、好ましくは、前記複数の凹部に、埋め込み材料を埋め込む工程をさらに含むことである。

[0118] この構成によれば、融着や特殊な埋め込み再成長法などを用いずに、2次元フォトリック結晶面発光レーザを製造することができるので、このような構成の製造方法は、材料の選択性が広く、歩留まりがよく、低コスト化が可

能である。また、この構成によれば、凹部に埋め込み材料を埋め込んで、第1半導体層の上面を平坦化するので、第1半導体層上への電極形成を容易に行うことができる。

[0119] この出願は、2009年01月28日に出願された日本国特許出願特願2009-017148および2009年01月28日に出願された日本国特許出願特願2009-017179を基礎とするものであり、その内容は、本願に含まれるものである。

[0120] 本発明を表現するために、上述において図面を参照しながら実施形態を通して本発明を適切且つ十分に説明したが、当業者であれば上述の実施形態を変更および／または改良することは容易に為し得ることであると認識すべきである。したがって、当業者が実施する変更形態または改良形態が、請求の範囲に記載された請求項の権利範囲を離脱するレベルのものでない限り、当該変更形態または当該改良形態は、当該請求項の権利範囲に包括されると解釈される。

### **産業上の利用可能性**

[0121] 本発明によれば、2次元フォトリソニック結晶面発光レーザおよびその製造方法を提供することができる。

## 請求の範囲

- [請求項1] 第1および第2半導体層と、  
前記第1半導体層と、前記第2半導体層とに挟まれ、キャリア注入によって、光を発生する活性層とを備え、  
前記第1半導体層は、前記第1半導体層の前記活性層側とは反対側の主面から複数の凹部が形成されることで少なくとも前記第1半導体層の一部が2次元フォトリック結晶構造を有し、  
前記凹部の径は、深さ方向に沿って変化していること  
を特徴とする2次元フォトリック結晶面発光レーザ。
- [請求項2] 前記第1半導体層は、第1クラッド層を有し、  
前記第2半導体層は、第2クラッド層を有し、  
前記第1クラッド層の屈折率は、前記第2クラッド層の屈折率よりも高いこと  
を特徴とする請求項1に記載の2次元フォトリック結晶面発光レーザ。
- [請求項3] 前記第1クラッド層の厚さは、 $0.3\mu\text{m}$ ～ $1.0\mu\text{m}$ であること  
を特徴とする請求項1または請求項2に記載の2次元フォトリック結晶面発光レーザ。
- [請求項4] 前記凹部は、前記活性層には到達しないこと  
を特徴とする請求項1ないし請求項3のいずれかに記載の2次元フォトリック結晶面発光レーザ。
- [請求項5] 前記第1半導体層の発光面側主面における半導体が占める面積の割合を表面側FFとし、  
前記第1半導体層において、前記複数の凹部の底面を含む平面を仮想した場合に、この仮想した平面における半導体が占める面積の割合を活性層側FFとし、  
前記表面側FFと前記活性層側FFとは異なる値であること  
を特徴とする請求項1ないし請求項4のいずれか1項に記載の2次

元フォトニック結晶面発光レーザ。

[請求項6] 前記活性層側 F F は、前記表面側 F F よりも大きいことを特徴とする請求項 5 に記載の 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ。

[請求項7] 前記表面側 F F は、0.8 以下であって、前記活性層側 F F は、0.8 以上であること  
を特徴とする請求項 6 に記載の 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ。

[請求項8] 第 2 半導体層上に活性層を積層し、  
前記活性層上に、第 1 半導体層を積層した後に、  
前記第 1 半導体層において、前記活性層とは反対側の表面から、前記活性層に近づくほど細くなっていく凹部を形成することで、前記第 1 半導体層の少なくとも一部に 2 次元フォトニック結晶構造を形成すること  
を特徴とする 2 次元フォトニック結晶面発光レーザの製造方法。

[請求項9] 前記第 1 半導体層の前記複数の凹部には、埋め込み材料が埋め込まれていること  
を特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ。

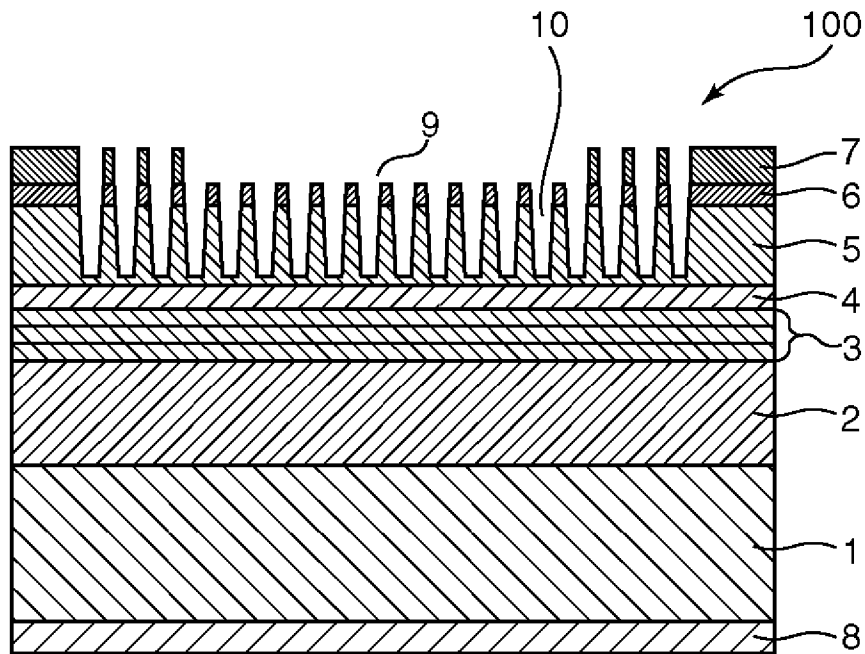
[請求項10] 前記第 1 半導体層の前記複数の凹部には、空所が形成されるようにその深さ方向の途中まで埋め込み材料が埋め込まれていること  
を特徴とする請求項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶面発光レーザ。

[請求項11] 前記第 1 半導体層の前記活性層側とは反対側の主面における半導体が占める面積の割合を表面側 F F とし、  
前記第 1 半導体層において、前記複数の凹部の底面を含む平面を仮想した場合に、この仮想した平面における半導体が占める面積の割合を活性層側 F F とし、

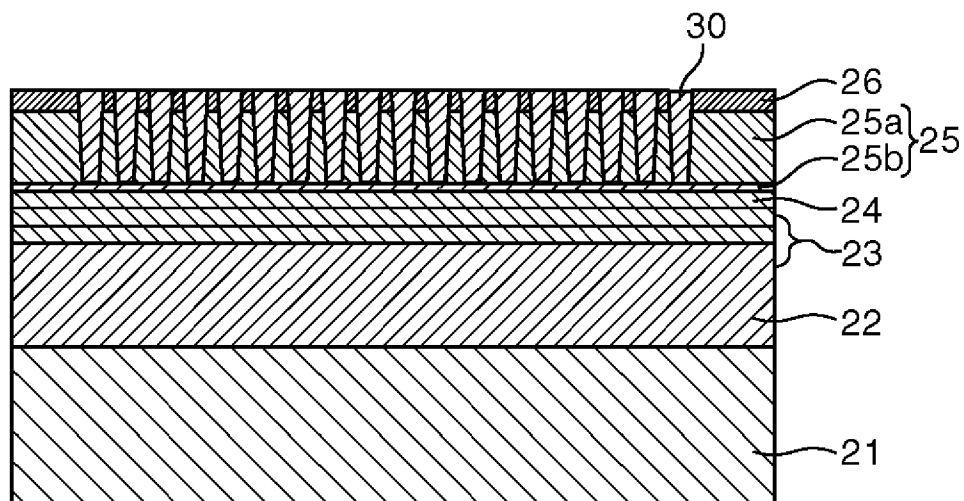
前記表面側 F F と前記活性層側 F F とは異なる値であることを特徴とする請求項 9 または請求項 10 に記載の 2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザ。

[請求項 12] 前記複数の凹部に、埋め込み材料を埋め込む工程をさらに含むことを特徴とする請求項 8 に記載の 2 次元フォトリソニック結晶面発光レーザの製造方法。

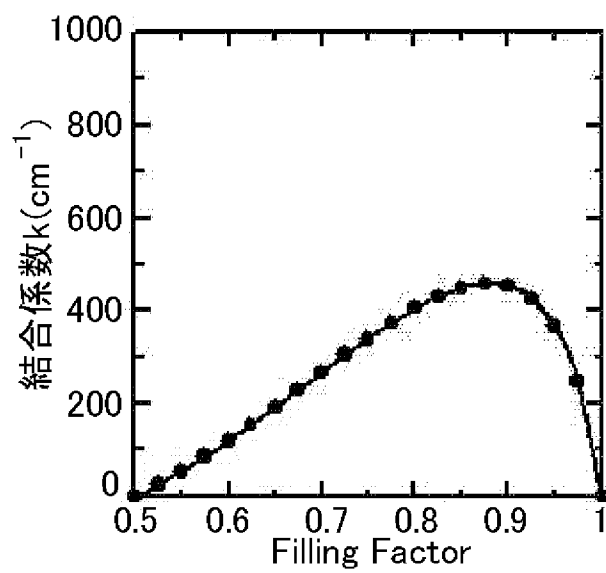
[図1]



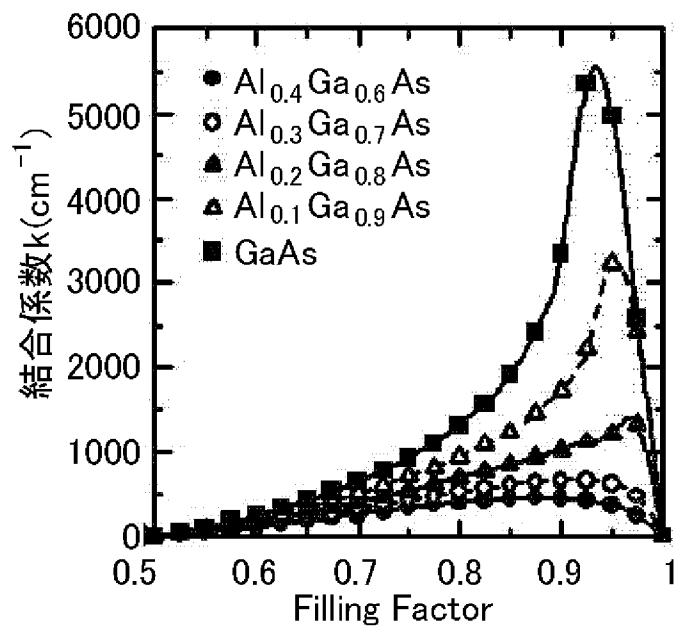
[図2]



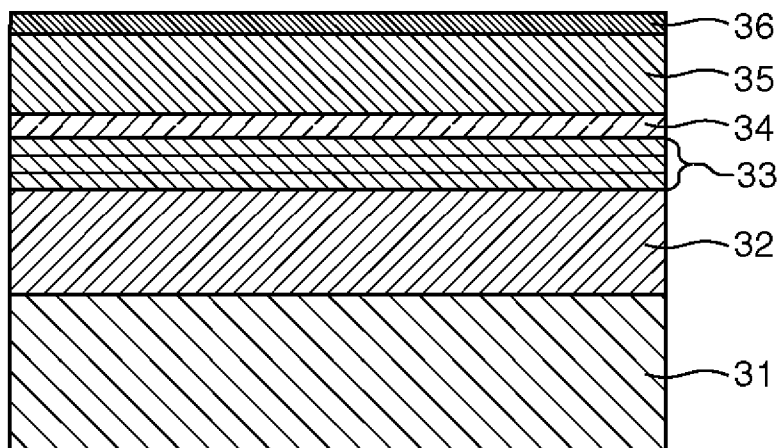
[図3]



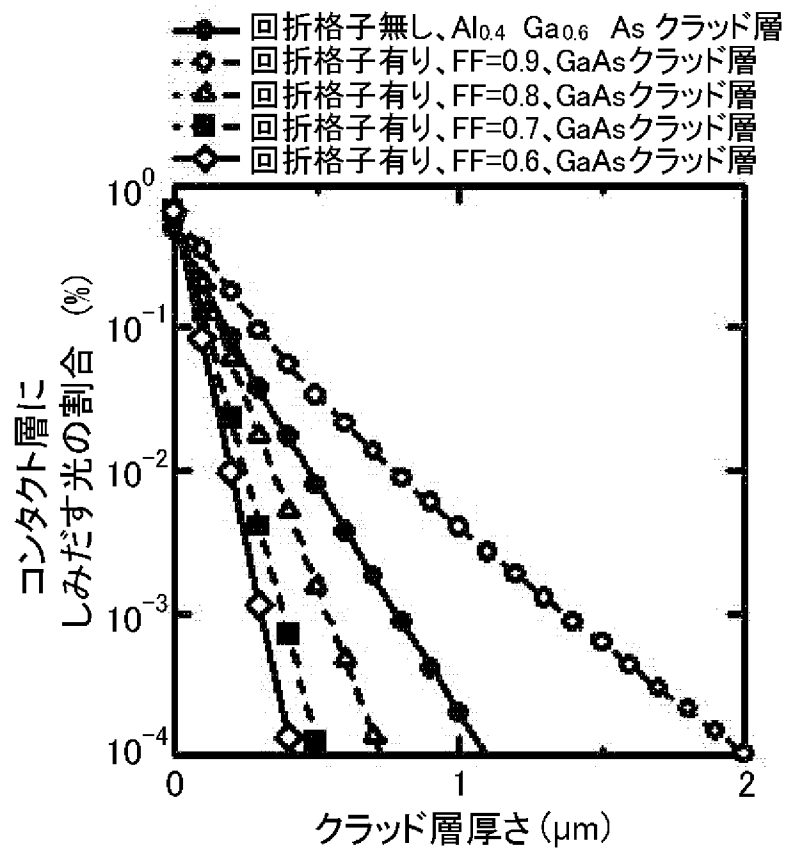
[図4]



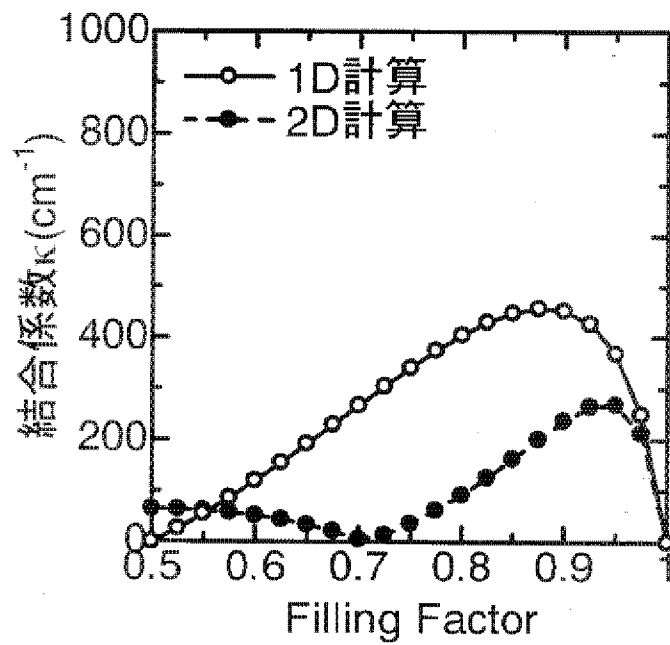
[図5]



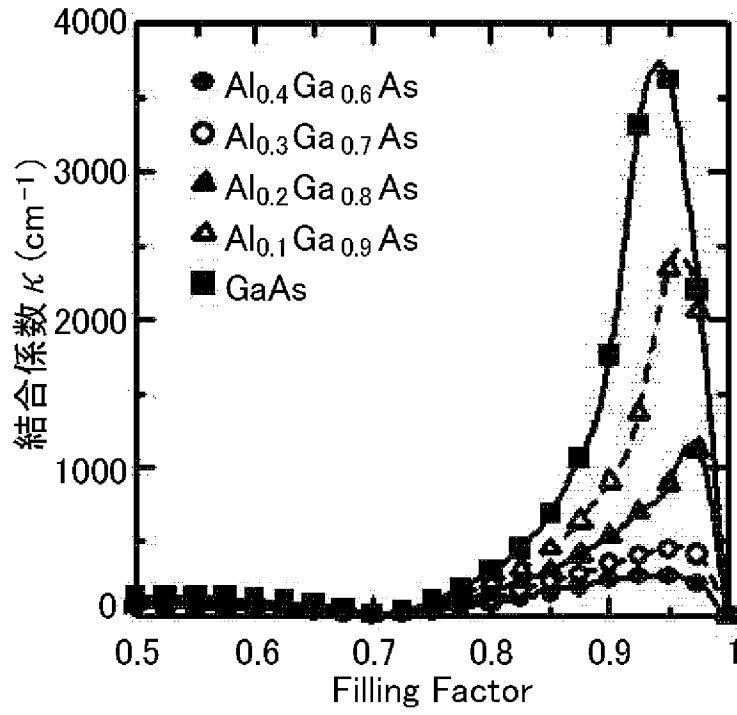
[図6]



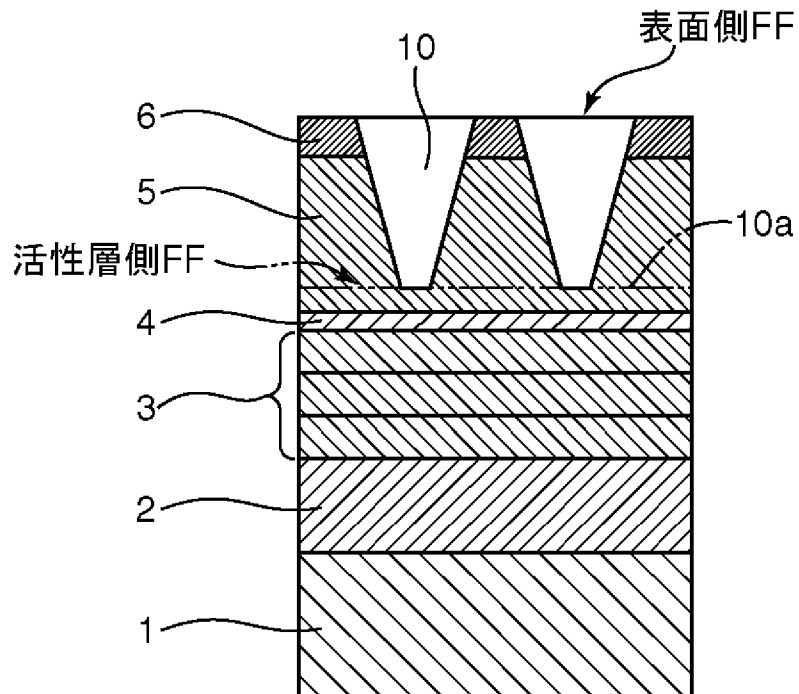
[図7]



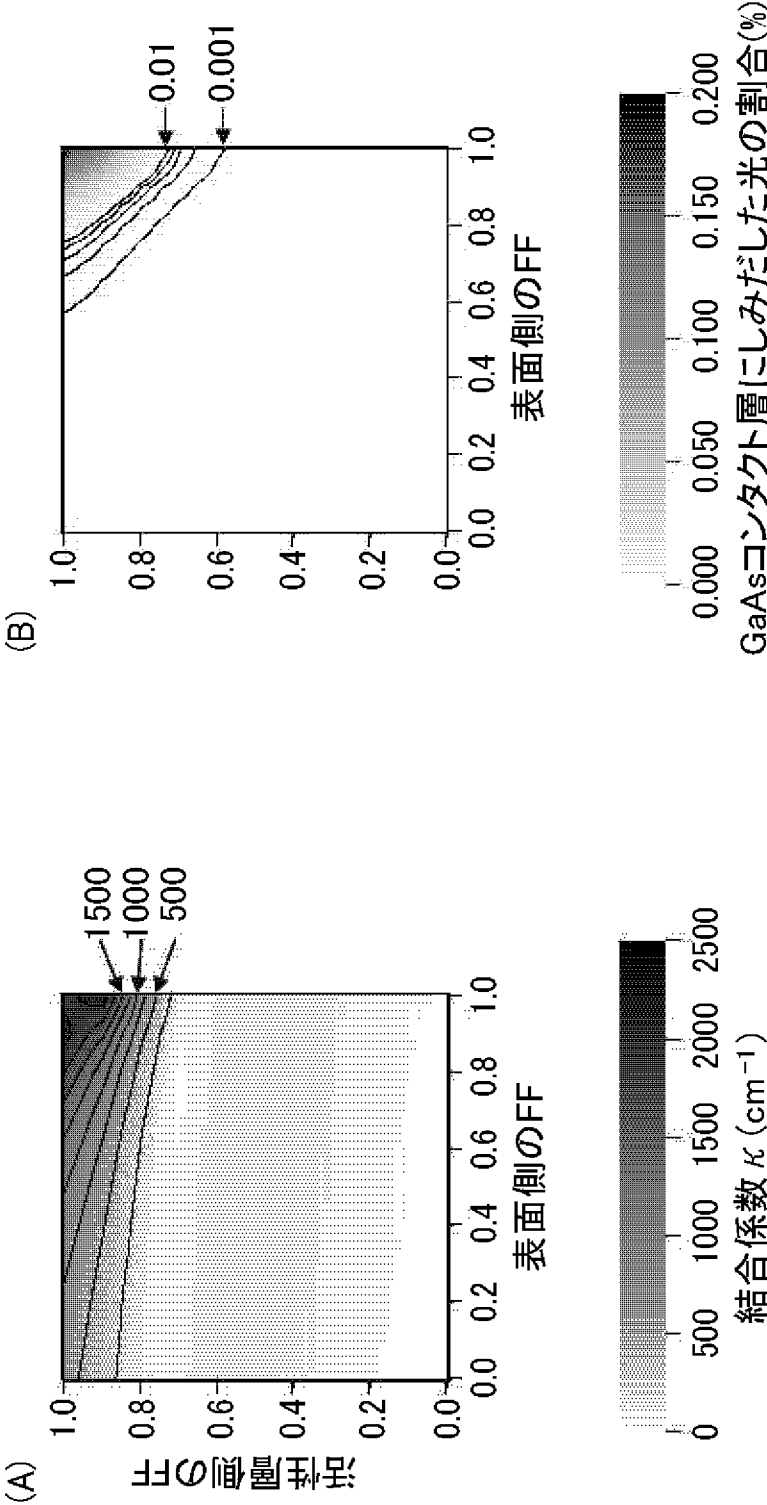
[図8]



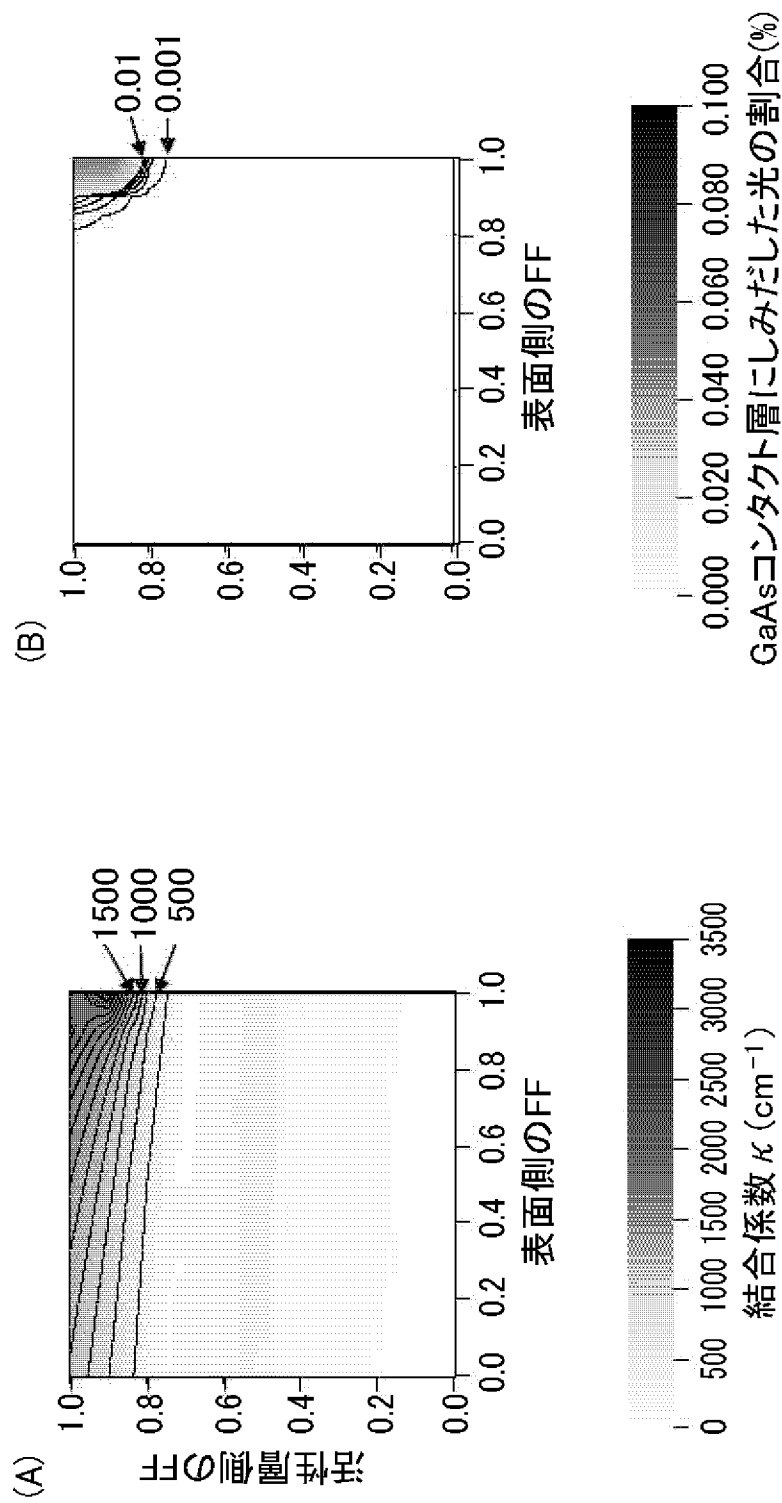
[図9]



[図10]

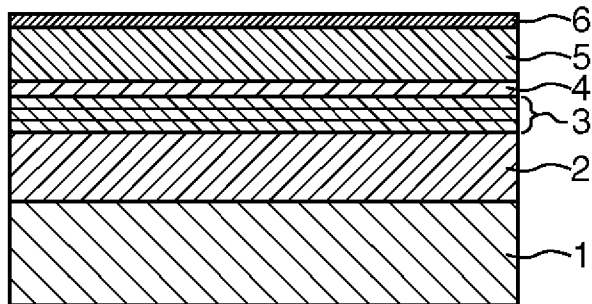


[図11]

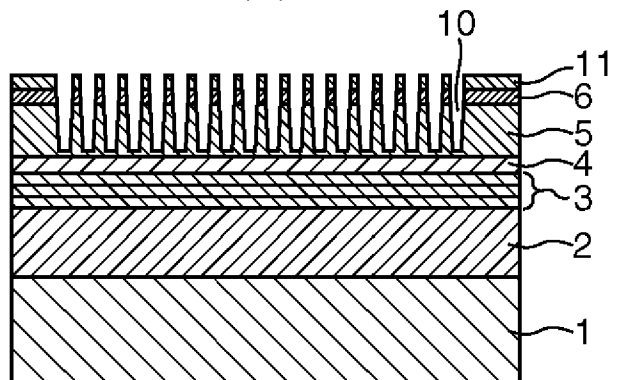


[図12]

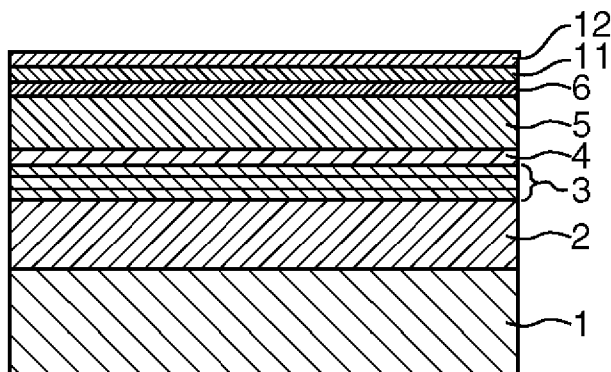
(A)



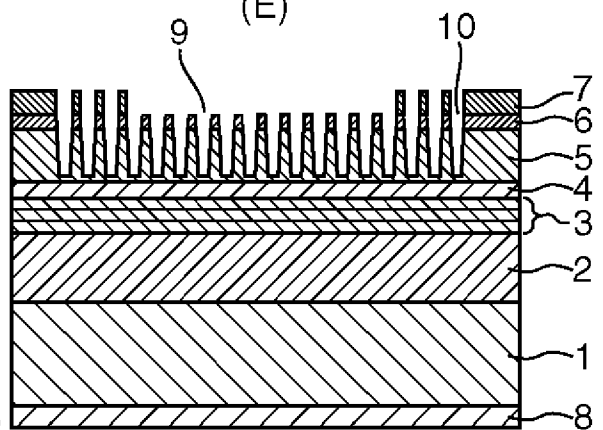
(D)



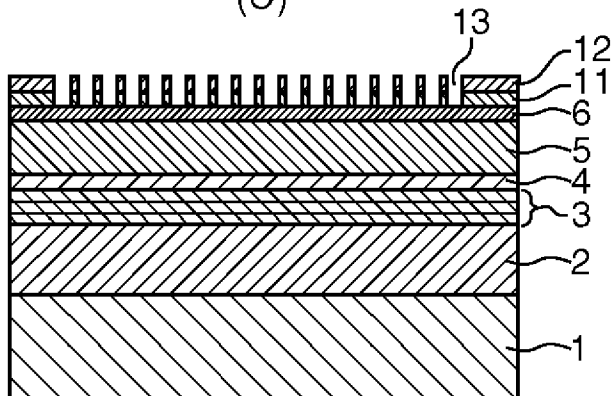
(B)



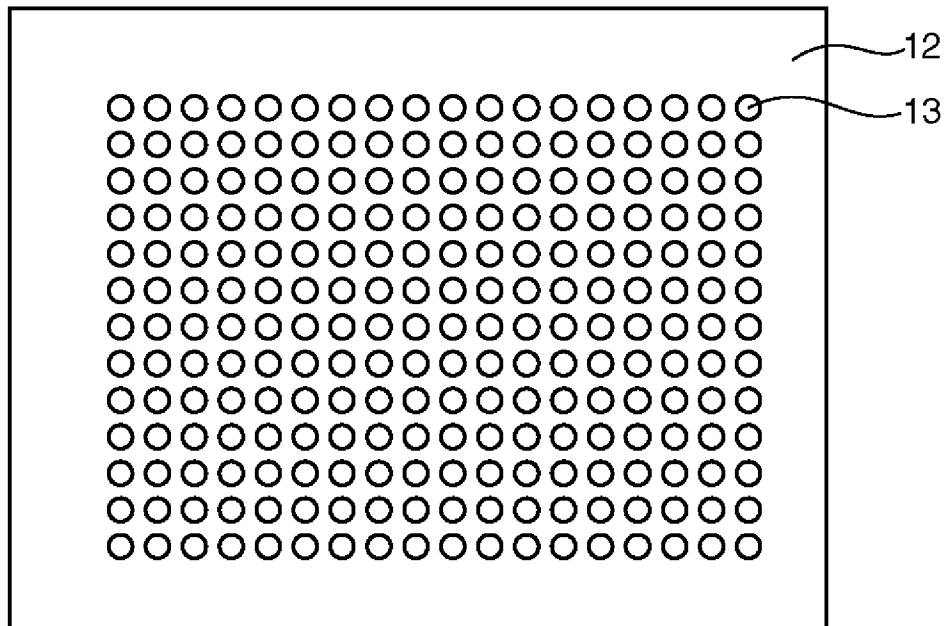
(E)



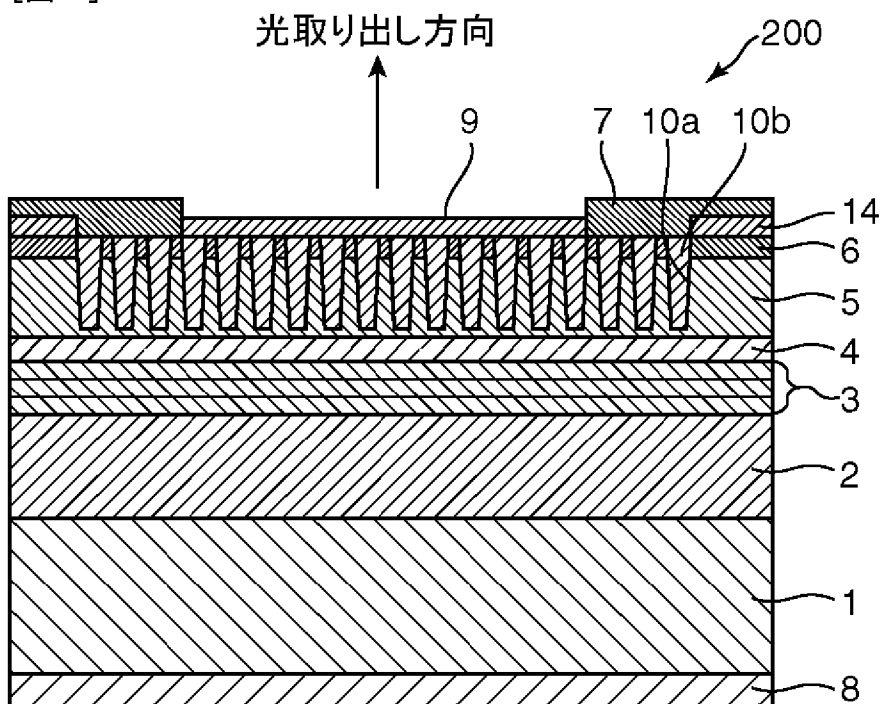
(C)



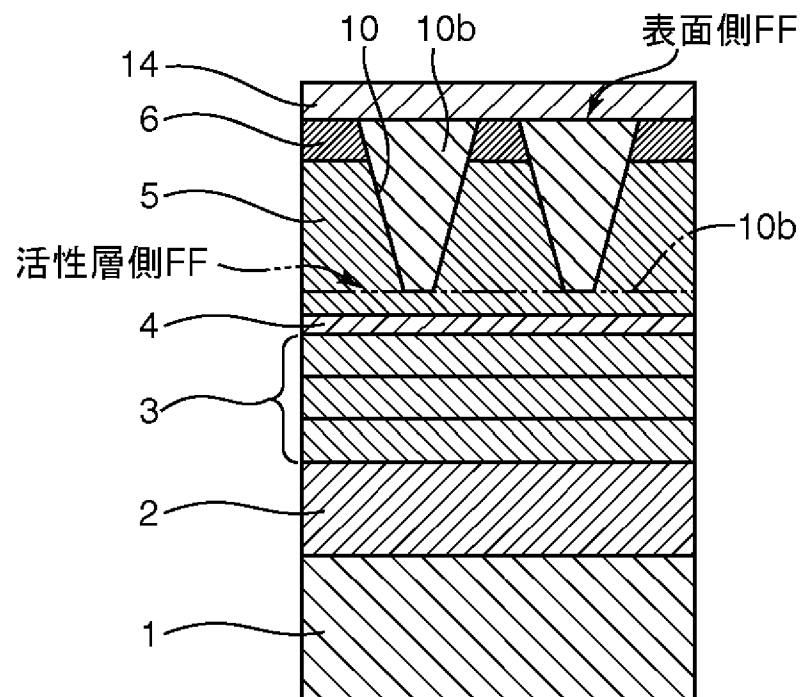
[図13]



[図14]

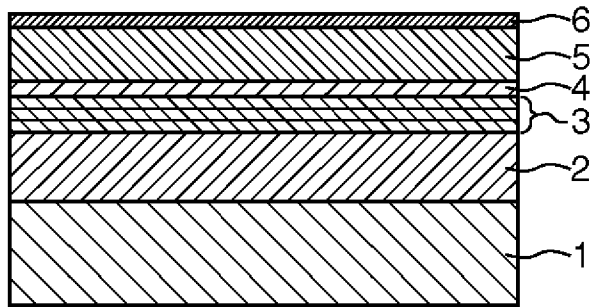


[図15]

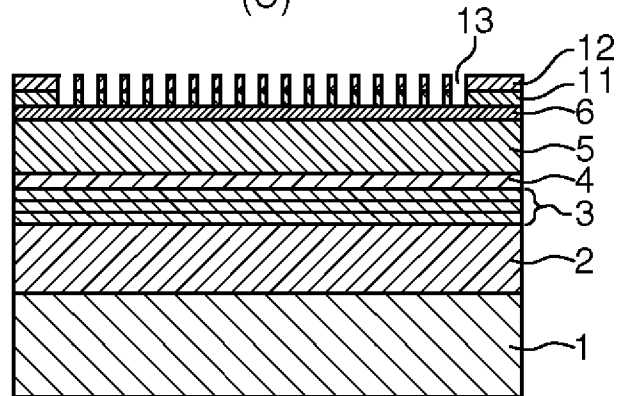


[図16]

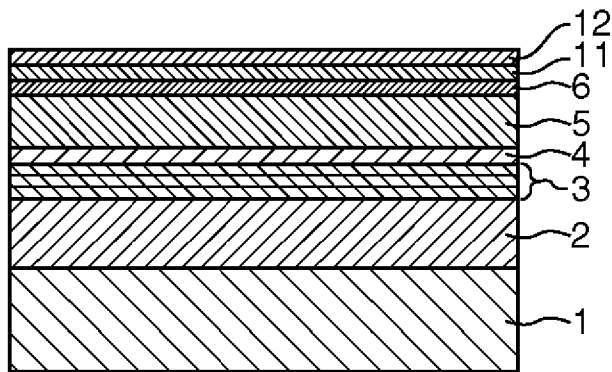
(A)



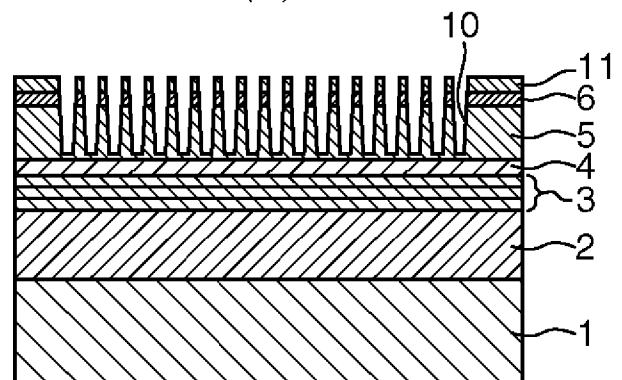
(C)



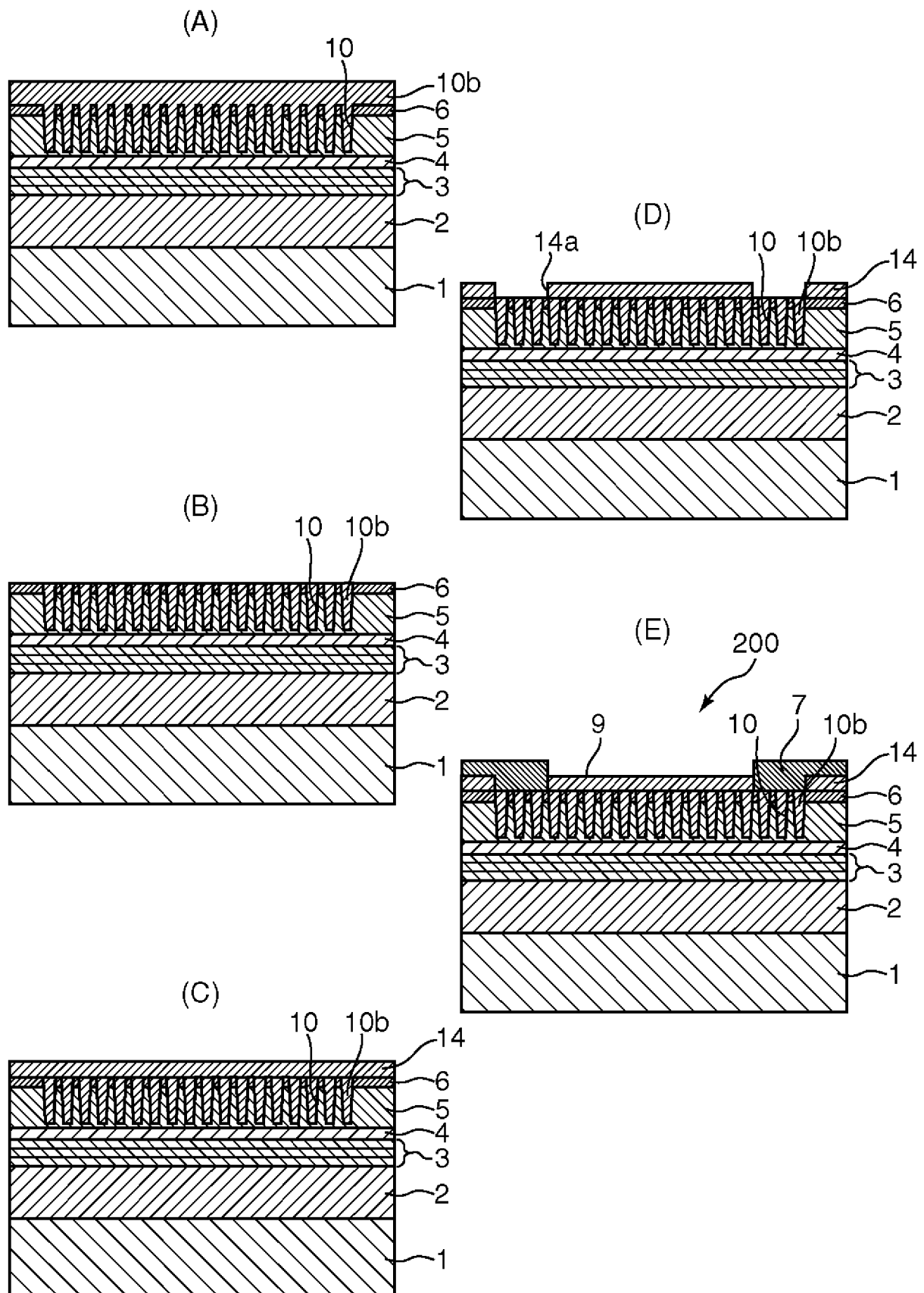
(B)



(D)

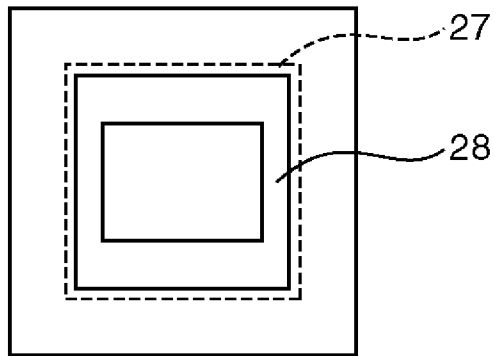


[図17]

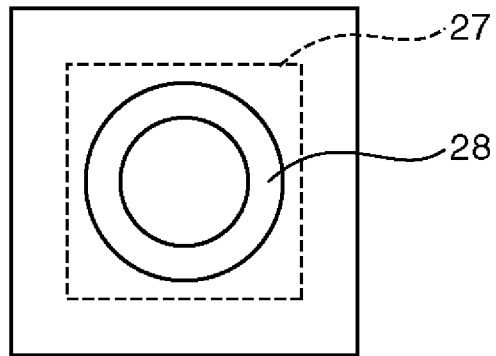


[図18]

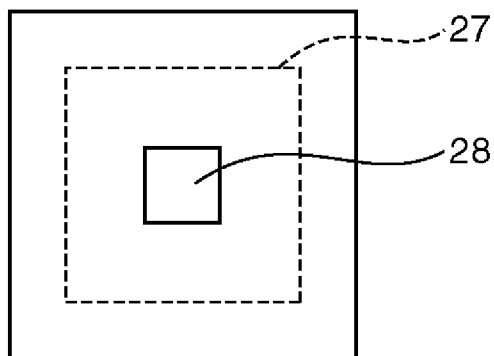
(A)



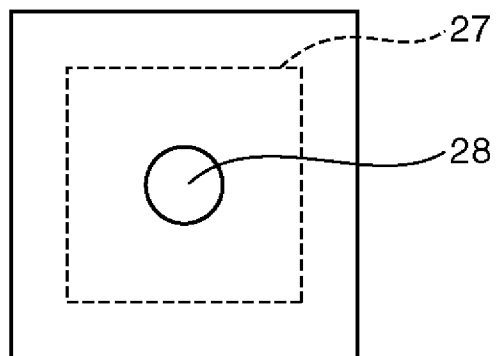
(B)



(C)

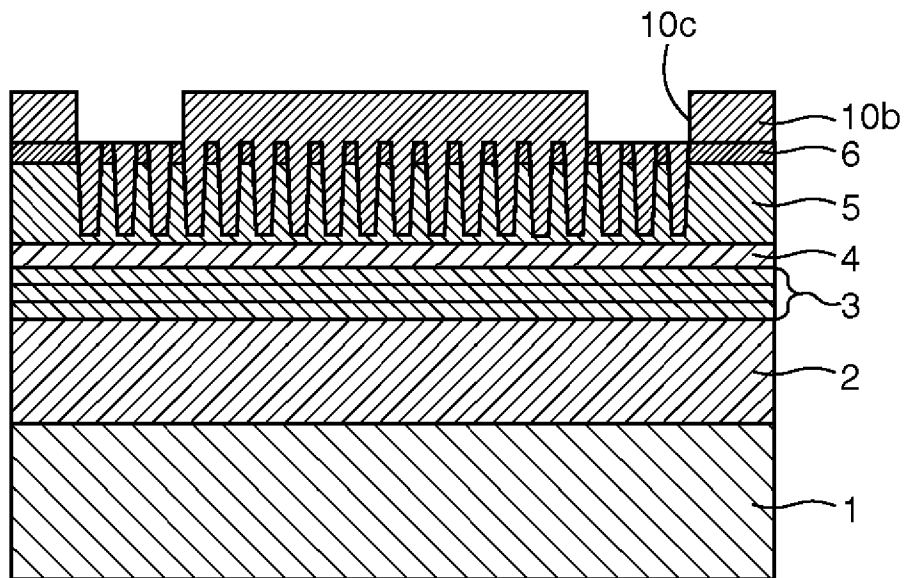


(D)

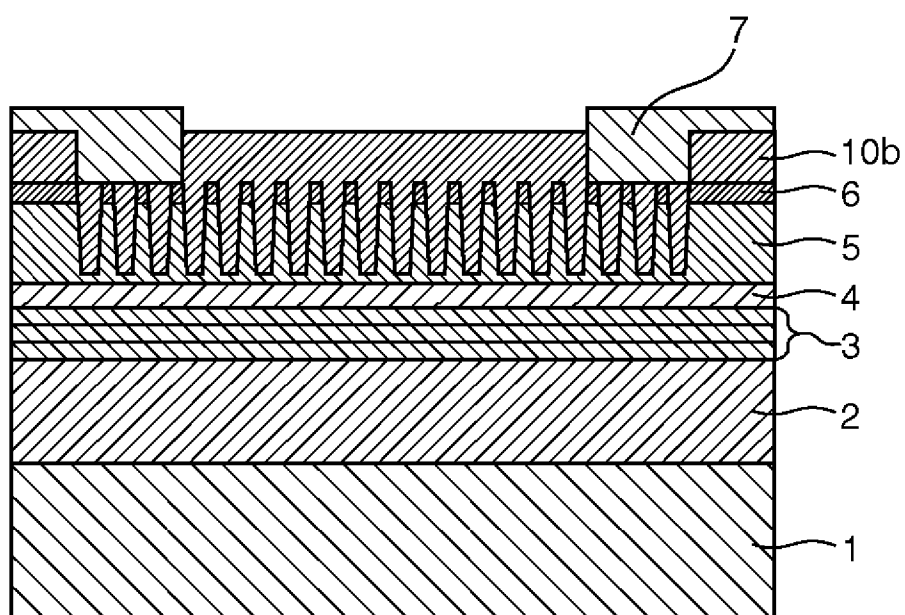


[図19]

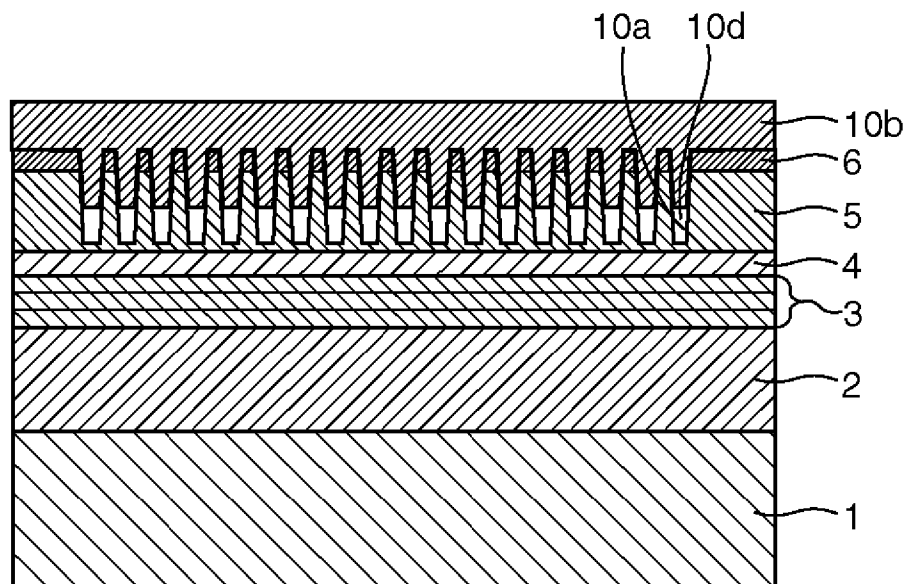
(A)



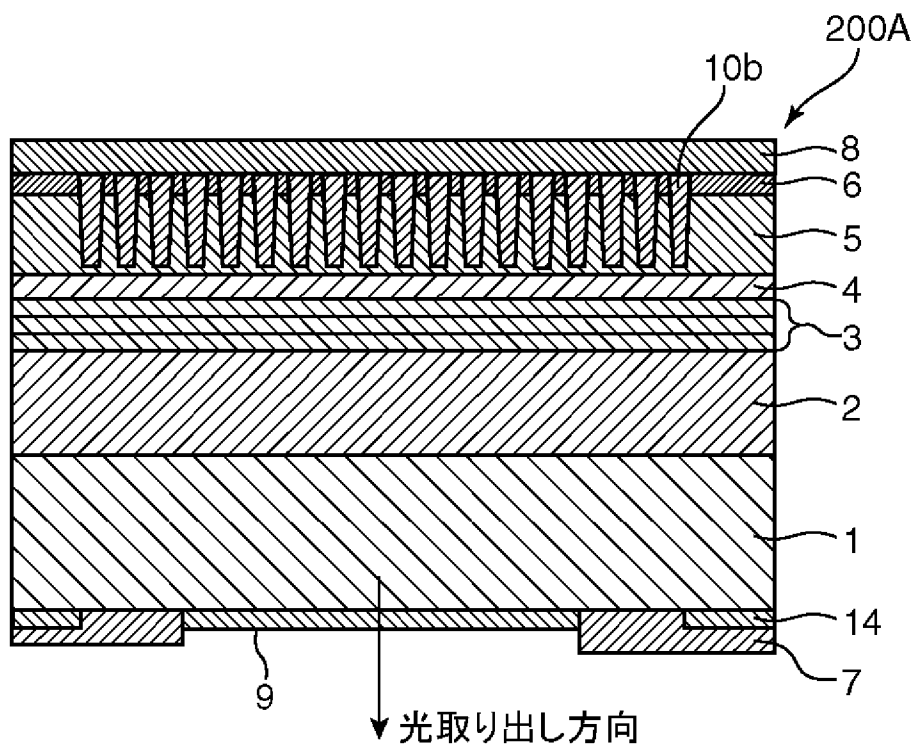
(B)



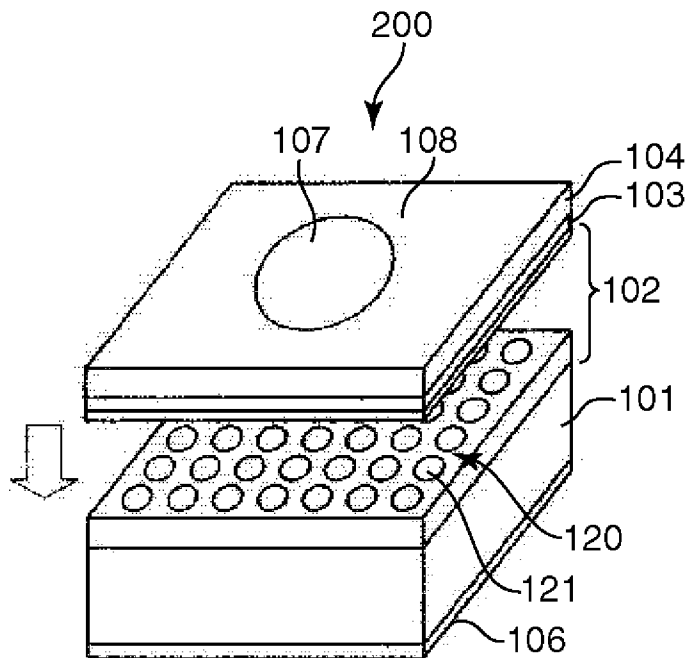
[図20]



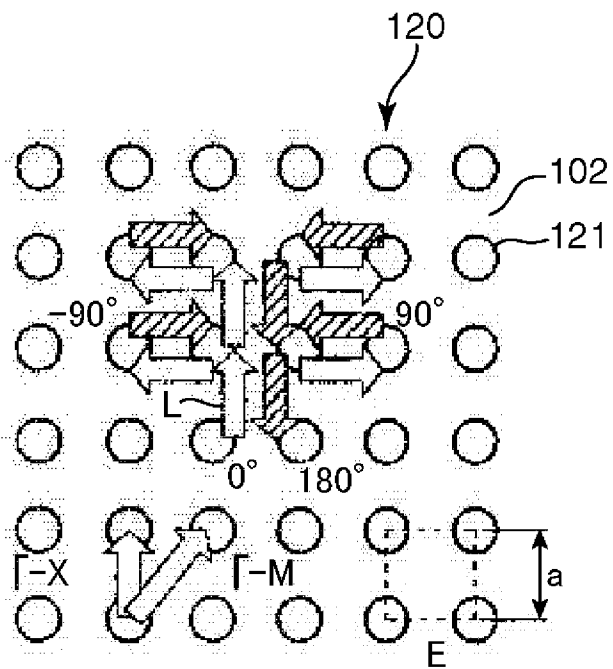
[図21]



[図22]



[図23]



# INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2010/050346

## A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

H01S5/18(2006.01) i, H01S5/12(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

## B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

H01S5/00-5/50

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

|                           |           |                            |           |
|---------------------------|-----------|----------------------------|-----------|
| Jitsuyo Shinan Koho       | 1922-1996 | Jitsuyo Shinan Toroku Koho | 1996-2010 |
| Kokai Jitsuyo Shinan Koho | 1971-2010 | Toroku Jitsuyo Shinan Koho | 1994-2010 |

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

## C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                                                                                 | Relevant to claim No. |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| X<br>Y    | JP 2007-234835 A (Canon Inc.),<br>13 September 2007 (13.09.2007),<br>paragraphs [0020], [0029] to [0035], [0040];<br>fig. 8<br>& US 2007/0201526 A1                                                | 1, 3-8<br>2, 9-12     |
| Y         | JP 2008-084974 A (Stanley Electric Co., Ltd.),<br>10 April 2008 (10.04.2008),<br>paragraphs [0034], [0040]; fig. 1, 15 (lowest<br>two paragraph); fig. 17 (lowest two paragraph)<br>(Family: none) | 2                     |
| Y         | JP 2008-130731 A (Sumitomo Electric Industries,<br>Ltd.),<br>05 June 2008 (05.06.2008),<br>paragraphs [0059], [0060]; fig. 2, 11, 13<br>(Family: none)                                             | 9-12                  |

☒ Further documents are listed in the continuation of Box C.

☐ See patent family annex.

\* Special categories of cited documents:

“A” document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

“E” earlier application or patent but published on or after the international filing date

“L” document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

“O” document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

“P” document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

“T” later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

“X” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

“Y” document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

“&” document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search  
29 January, 2010 (29.01.10)

Date of mailing of the international search report  
09 February, 2010 (09.02.10)

Name and mailing address of the ISA/  
Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

**INTERNATIONAL SEARCH REPORT**

International application No.

PCT/JP2010/050346

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

| Category* | Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages                                                   | Relevant to claim No. |
|-----------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------|
| A         | JP 2007-067182 A (Sumitomo Electric Industries, Ltd.),<br>15 March 2007 (15.03.2007),<br>entire text; all drawings<br>(Family: none) | 1-12                  |

## A. 発明の属する分野の分類 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01S5/18(2006.01)i, H01S5/12(2006.01)i

## B. 調査を行った分野

調査を行った最小限資料 (国際特許分類 (I P C))

Int.Cl. H01S5/00-5/50

最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの

|             |                     |
|-------------|---------------------|
| 日本国実用新案公報   | 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 |
| 日本国公開実用新案公報 | 1 9 7 1 - 2 0 1 0 年 |
| 日本国実用新案登録公報 | 1 9 9 6 - 2 0 1 0 年 |
| 日本国登録実用新案公報 | 1 9 9 4 - 2 0 1 0 年 |

国際調査で使用した電子データベース (データベースの名称、調査に使用した用語)

## C. 関連すると認められる文献

| 引用文献の<br>カテゴリー* | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                                                                  | 関連する<br>請求項の番号    |
|-----------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------|
| X<br>Y          | JP 2007-234835 A (キヤノン株式会社) 2007. 09. 13,<br>段落 0020, 0029-0035, 0040, 図 8 & US 2007/0201526 A1    | 1, 3-8<br>2, 9-12 |
| Y               | JP 2008-084974 A (スタンレー電気株式会社) 2008. 04. 10,<br>段落 0034, 0040, 図 1, 15(下 2 段), 17(下 2 段) (ファミリーなし) | 2                 |
| Y               | JP 2008-130731 A (住友電気工業株式会社) 2008. 06. 05,<br>段落 0059, 0060, 図 2, 11, 13 (ファミリーなし)                | 9-12              |

☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。

## \* 引用文献のカテゴリー

「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの  
「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの  
「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献 (理由を付す)  
「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献  
「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願

の日の後に公表された文献

「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの

「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの

「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの

「&amp;」同一パテントファミリー文献

国際調査を完了した日

2 9 . 0 1 . 2 0 1 0

国際調査報告の発送日

0 9 . 0 2 . 2 0 1 0

国際調査機関の名称及びあて先

日本国特許庁 (I S A / J P)

郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5

東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号

特許庁審査官 (権限のある職員)

高 椋 健 司

2 K

3 7 1 5

電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 2 5 5

| C (続き) . 関連すると認められる文献 |                                                                 |                |
|-----------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------|
| 引用文献の<br>カテゴリー*       | 引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示                               | 関連する<br>請求項の番号 |
| A                     | JP 2007-067182 A (住友電気工業株式会社) 2007. 03. 15,<br>全文, 全図 (ファミリーなし) | 1-12           |