【公報種別】特許法第１７条の２の規定による補正の掲載
【部門区分】第７部門第２区分
【発行日】平成27年12月17日(2015.12.17)

【公開番号】特開2013-211542(P2013-211542A)
【公開日】平成25年10月10日(2013.10.10)
【年通号数】公開・登録公報2013-056
【出願番号】特願2013-37152(P2013-37152)
【国際特許分類】
Ｈ０１Ｓ　5/12　(2006.01)
【ＦＩ】
Ｈ０１Ｓ　5/12

【手続補正書】
【提出日】平成27年10月9日(2015.10.9)
【手続補正１】
【補正対象書類名】特許請求の範囲
【補正対象項目名】請求項５
【補正方法】変更
【補正の内容】
【請求項５】
前記光出射用フォトニック結晶構造が、前記光共振状態形成用フォトニック結晶構造における2つの基本並進ベクトルの方向をそれぞれx方向及びy方向とする直交座標系を持つ実空間において基本並進ベクトルc_1↑=(r_1, 1)a及びc_2↑=(r_2, 1)aを有する斜交格子の格子点に異屈折率領域が配置されたものであって、
【数４】

$$r_1 = \frac{n_{\text{eff}} + \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\text{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (4)$$

$$r_2 = \frac{n_{\text{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\text{eff}} - \sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (5)$$

の関係を満たす、前記２次元フォトニック結晶層の法線に対する傾斜角θ及び前記x方向を基準とする方位角φの方向にレーザビームが出射されることを特徴とする請求項２に記載の２次元フォトニック結晶面発光レーザ。
【手続補正２】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２３
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２３】
上記２次元定在波は、図１(b)に示す逆格子空間では以下のように説明される。逆格子空間では、その光の波数を表す(±1/2, ±1/2)×(2π/a)（複号任意）の4つの点であるＭ点１３Ａ、あるいはこれらＭ点と逆格子空間の原点を結ぶ波数ベクトルk↑で示される。この波数ベクトルk↑は、正方格子の基本逆格子ベクトルb_1↑及びb_2↑を用いて、k↑=±(1/2)b_1↑±(1/2)b_2↑で表される。すなわち、実空間において式(1)の関係を満たすことと、逆格子空間において上記関係を満たすことは等価である。
【手続補正３】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２４

【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２４】
そして、光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ａの格子点１１Ａにおける光の散乱は、これらＭ点に関する波数ベクトルk↑と、格子点１１Ａを逆格子空間で表す逆格子ベクトルG↑（上述した逆格子ベクトルG'↑は、光出射用フォトニック結晶構造の格子点を逆格子空間で表す点で、この逆格子ベクトルG↑とは相違する）の和が、同じくＭ点に関する他の波数ベクトルと一致する場合に生じる。上記180°散乱は、逆格子ベクトルG_1↑=±b_1↑±b_2↑で表される。また、上記90°散乱は、逆格子ベクトルG_2↑=±b_1↑又はG_2↑=±b_2↑で表される。
【手続補正４】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２５
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２５】
また、逆格子空間では、２次元フォトニック結晶層に対して傾斜した方向に光が出射されるか否かという点も示される。波数ベクトルと逆格子ベクトルの和が0になるような逆格子ベクトルが存在すれば、光は２次元フォトニック結晶層に垂直に出射されるが、Ｍ点に関する波数ベクトルk↑ではそのような逆格子ベクトルG↑は存在しない。また、逆格子空間の原点を中心とし、波数ベクトルの大きさ|k↑|の$1/n_{eff}$の半径を有する円で表されるライトコーン１４Ａ内に、波数ベクトルk↑と逆格子ベクトルG↑の和k↑+G↑が存在する場合、２次元フォトニック結晶層内の光が２次元フォトニック結晶層と外部との界面において全反射を生じることなく外部に出射されるが、Ｍ点に関する波数ベクトルではそのような逆格子ベクトルは存在しない。従って、第１の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。
【手続補正５】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２６
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２６】
(I-2) 第２の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造
第２の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ｂは、長方格子の格子点１１Ｂに異屈折率領域が配置され、その長方格子の格子定数a_1及びa_2が上記式(2)を満たす周期構造を有する（図２(a)）。この周期構造においては、$\lambda_{PC}=2a_1a_2(a_1^2+a_2^2)^{-0.5}$の波長を有する２次元定在波が形成される。この２次元定在波は、逆格子空間では、(±(1/2)×(2π/a_1)，±1/2×(2π/a_2))（複号任意）の4つの点であるＭ点１３Ｂ、あるいはこれらの点と逆格子空間の原点を結ぶ波数ベクトルで示される（図２(b)）。この波数ベクトルk↑は、長方格子の基本逆格子ベクトルb_1↑及びb_2↑を用いて、k↑=±(1/2)b_1↑±(1/2)b_2↑（複号任意）で表され、第１の態様の光共振状態形成用フォトニック結晶構造と同様に、逆格子ベクトルG_1↑=±b_1↑±b_2↑（複号任意）で表される180°散乱と、逆格子ベクトルG_2↑=±b_1↑又はG_2↑=±b_2↑で表される90°散乱の双方が生じる。これは、２次元定在波が形成されることを意味する。また、波数ベクトルk↑と逆格子ベクトルG↑の和k↑+G↑がライトコーン１４Ｂ内に存在するような逆格子ベクトルG↑はない。従って、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。なお、第２の態様において、長方格子には面心長方格子が含まれるものとする。
【手続補正６】

【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２７
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２７】
(I-3) 第３の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造
第３の態様における光共振状態形成用フォトニック結晶構造１０Ｃは、三角格子の格子点１１Ｃに異屈折率領域が配置され、その三角格子の格子定数aが上記式(3)を満たす周期構造を有する（図３(a)）。この周期構造においては、$\lambda_{PC}=3a/2$の波長を有する２次元定在波が形成される。この２次元定在波は、逆格子空間では、互いに60°に交差する2つの基本逆格子ベクトル$b_1\uparrow$及び$b_2\uparrow$を用いて、波数ベクトルk↑が$(1/3)b_1\uparrow+(1/3)b_2\uparrow$，$(-2/3)b_1\uparrow+(1/3)b_2\uparrow$，及び$(1/3)b_1\uparrow-(2/3)b_2\uparrow$で表される（図３(b)）。これら波数ベクトルk↑が指す点を、三角格子ではＪ点と呼ぶ。そして、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造では、逆格子ベクトル$G_1\uparrow=\pm b_1\uparrow$で表される第１の120°散乱と、逆格子ベクトル$G_2\uparrow=\pm b_2\uparrow$で表される第２の120°散乱と、逆格子ベクトル$G_3\uparrow=\pm b_1\uparrow\pm b_2\uparrow$で表される第３の120°散乱が生じることにより、２次元定在波が形成される。また、波数ベクトルk↑と逆格子ベクトルG↑の和k↑+G↑がライトコーン１４Ｃ内に存在するような逆格子ベクトルG↑はない。従って、この光共振状態形成用フォトニック結晶構造は、それ自身では、２次元フォトニック結晶層内で共振状態が形成された光を外部に出射する機能を有していない。
【手続補正７】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００２９
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００２９】
例えば、図４(a)に示すように、第１の態様において光出射用フォトニック結晶構造１５Ａが異屈折率領域１６Ａを斜交格子状に配置した構成を有する場合には、斜交格子の格子定数c_1，c_2及びα（格子点を結ぶ直線が交差する角度）を適宜設定することにより、図４(b)に示すように、散乱光の波数ベクトルΔk↑がライトコーン１４内に存在するように逆格子ベクトルG'↑を形成することができ、それにより、傾斜ビームが得られる。また、傾斜ビームの傾斜角θ、及び傾斜ビームの２次元フォトニック結晶層に平行な面への射影の該面内での向きを表す方位角φも、計算により適宜定めることができる。例えば、光共振状態形成用フォトニック結晶構造における2つの基本並進ベクトルの方向をそれぞれx方向及びy方向とする直交座標系を持つ実空間において、光出射用フォトニック結晶構造が基本並進ベクトル$c_1\uparrow=(r_1, 1)a$及び$c_2\uparrow=(r_2, 1)a$を有する斜交格子である（従って、光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造のいずれも、y方向の格子点の間隔がaとなる）場合には、所望の傾斜角θ及び方位角φに応じて、r_1及びr_2を
【数４】

$$r_1=\frac{n_{\mathrm{eff}}+\sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}}-\sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (4)$$

$$r_2=\frac{n_{\mathrm{eff}}-\sqrt{2}\sin\theta\sin\phi}{n_{\mathrm{eff}}-\sqrt{2}\sin\theta\cos\phi} \qquad (5)$$

とすればよい。これら式(4)及び(5)の導出法は後述する。
【手続補正８】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００３３

【補正方法】変更
【補正の内容】
【００３３】
【図１】第１の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。
【図２】第２の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。
【図３】第３の態様の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおける光共振状態形成用フォトニック結晶構造を実空間(a)及び逆格子空間(b)で示す図。
【図４】光出射用フォトニック結晶構造の一例(a)、及び光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造を組み合わせることによる散乱の状態(b)を示す図。
【図５】本発明に係る２次元フォトニック結晶面発光レーザの一実施例を示す斜視図。
【図６】第１実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図７】第１実施例で作製した２次元フォトニック結晶層の一例の電子顕微鏡写真(a)及びその写真に光共振状態形成用格子である正方格子（実線）及び光出射用格子である斜交格子（破線）を記載したもの(b)を示す平面図。
【図８】第１実施例で作製した２次元フォトニック結晶面発光レーザにより得られたレーザビームのスポットを示す写真。
【図９】第２実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１０】第３実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１１】第４実施例の２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)～(c)及び空孔が配置された状態(d)を示す平面図。
【図１２】第５実施例の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)、(b)及び電極(c)を示す平面図。
【図１３】第６実施例の出射方向可変２次元フォトニック結晶面発光レーザにおいて、２次元フォトニック結晶層に空孔（異屈折率領域）が配置される格子点(a)、(b)及び電極(c)を示す平面図。
【図１４】第１～第６実施例の変形例を示す斜視図。
【手続補正９】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００４０
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００４０】
それに対して光出射用格子２１２Ｂでは、$c_1\uparrow=(r_1, 1)a$及び$c_2\uparrow=(r_2, 1)a$の基本並進ベクトルを有する斜交格子が構成される。この斜交格子の格子定数c_1、c_2はそれぞれ、基本並進ベクトル$c_1\uparrow$及び$c_2\uparrow$の大きさである$(r_1^{0.5}+1)a$及び$(r_2^{0.5}+1)a$であり、$c_1\uparrow$と$c_2\uparrow$の成す角度αは$\cos\alpha=(r_1r_2+1)\times(r_1^2+1)^{-0.5}\times(r_2^2+1)^{-0.5}$の関係を満たす。格子点２１３Ａ，２１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子２１２Ａ及び光出射用格子２１２Ｂ共に、間隔aで並ぶ。
【手続補正１０】

【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００４１
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００４１】
本実施例では、出射波長λは980nmとした。また、２次元フォトニック結晶層２１の有効屈折率n_{eff}は、スラブ２１４の材料であるp型GaAsの屈折率（3.55）及びスラブ２１４中で空孔２１１（屈折率1）の占める割合により定まる。本実施例では空孔２１１の面積を調整することにより、２次元フォトニック結晶層２１の有効屈折率n_{eff}は3.5とした。従って、本実施例における格子定数aは式(1)より$2^{-0.5}\times 980nm/3.5$　200nmとした。
【手続補正１１】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００４８
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００４８】
図７(a)に、本実施例で作製した２次元フォトニック結晶層２１の一例の電子顕微鏡写真を示す。この電子顕微鏡写真から、スラブ２１４内に正三角形の空孔２１１が多数配置されていることがわかる。そして、これら空孔２１１は、図７(b)に実線で示す正方格子（光共振状態形成用格子２１２Ａ）と、同図に破線で示す斜交格子（光出射用格子２１２Ｂ）を重ね合わせた格子点上に配置されていることがわかる。
【手続補正１２】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００５０
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００５０】
本実施例では、光共振状態形成用格子２１２Ａの正方格子と光出射用格子２１２Ｂの斜交格子は共に、y方向には格子点が間隔aで並ぶように配置したが、光共振状態形成用格子と光出射用格子が互いに無関係な方向を向くように両者を配置してもよい。また、光出射用格子は斜交格子には限られず、正方格子、長方格子、面心長方格子、あるいは三角格子であってもよい。その一例として、光出射用格子を正方格子としたものを第２実施例として説明する。
【手続補正１３】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００５６
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００５６】
光共振状態形成用格子４１２Ａは、x方向の格子定数がa_1、y方向の格子定数がa_2である長方格子から成る。このような光共振状態形成用格子４１２Ａに空孔４１１を配置した場合に共振を起こす光の波数ベクトルk↑は、

$$k\uparrow=(\pm(1/2)\times(2\pi/a_1),\ \pm(1/2)\times(2\pi/a_2)) \quad (20)$$

（複号任意）で表される。光出射用格子４１２Ｂは、$c_1\uparrow=(r_1,\ 1)a_2$及び$c_2\uparrow=(r_2,\ 1)a_2$の基本並進ベクトルを有する斜交格子である。格子点４１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子４１２Ａ及び光出射用格子４１２Ｂ共に、間隔a_2で並ぶ。この光出射用格子４１２Ｂの基本逆格子ベクトルは

$$d_1\uparrow=(1/(r_1+r_2),\ r_2/(r_1+r_2))\times(2\pi/a_2) \quad (21)$$

$$d_2\uparrow=(-1/(r_1+r_2),\ r_1/(r_1+r_2))\times(2\pi/a_2) \quad (22)$$

で表され、逆格子ベクトルG'↑はG'↑$=pd_1\uparrow+qd_2\uparrow$（p、qは整数）で表される。そして、

ベクトルΔk↑=k↑+G'↑の大きさ|Δk↑|=|k↑+G'↑|がライトコーンの半径|k↑|/neffよりも小さくなるようにr1及びr2を定めることにより、傾斜ビームを出射させることができる。

【手続補正１４】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００５９
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００５９】
光共振状態形成用格子５１２Ａは、格子定数がaである三角格子から成る。このような光共振状態形成用格子５１２Ａに空孔５１１を配置した場合に共振状態が形成される光の波数ベクトルk↑は、

$$k_1\uparrow=(1/3)\times(2\times3^{0.5}\pi/a,\ 2\pi/a) \quad (23)$$

$$k_2\uparrow=(1/3)\times(-2\times3^{0.5}\pi/a,\ 2\pi/a) \quad (24)$$

$$k_3\uparrow=(1/3)\times(0,\ -4\pi/a) \quad (25)$$

で表される。光出射用格子５１２Ｂは、$c_1\uparrow=(r_1,\ 1)\times(3^{0.5}a/2)$及び$c_2\uparrow=(r_2,\ 1)\times(3^{0.5}a/2)$の基本並進ベクトルを有する斜交格子である。格子点５１３Ｂは、y方向には、光共振状態形成用格子５１２Ａ及び光出射用格子５１２Ｂ共に、間隔$3^{0.5}a/2$で並ぶ。この光出射用格子５１２Ｂの基本逆格子ベクトルは

$$d_1\uparrow=(1/(r_1+r_2),\ r_2/(r_1+r_2))\times(4\times3^{-0.5}\pi/a) \quad (26)$$

$$d_2\uparrow=(-1/(r_1+r_2),\ r_1/(r_1+r_2))\times(4\times3^{-0.5}\pi/2a) \quad (27)$$

で表され、逆格子ベクトルG'↑はG'↑=$pd_1\uparrow+qd_2\uparrow$（p、qは整数）で表される。そして、ベクトルΔk↑=k↑+G'↑の大きさ|Δk↑|=|k↑+G'↑|がライトコーンの半径|k↑|/neffよりも小さくなるようにr1及びr2を定めることにより、傾斜ビームを出射させることができる。

【手続補正１５】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００６１
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００６１】
２次元フォトニック結晶層６１は、光共振状態形成用格子６１２Ａ（図１２(a)）と光出射用格子６１２Ｂ（図１２(b)）を重ね合わせた格子（図示せず）の格子点上に空孔（異屈折率領域）が配置されたものである。光共振状態形成用格子６１２Ａは第１実施例と同様に、格子定数aの正方格子である。光出射用格子６１２Ｂは、y方向には格子点が間隔aで並んでいる点では第１実施例と同様である。一方、x方向には、光出射用格子６１２Ｂが仮想的に分割された複数の領域６６（異周期領域と呼ぶ。これは、異屈折率領域とは異なるものである。）毎に異なる間隔で格子点が並んでいる。

【手続補正１６】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００６５
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００６５】
光出射用格子７１２Ｂは斜交格子であり、その格子点はx方向にa1, a2, a3...(a1<a2<a3<...)と徐々に大きくなる間隔で並ぶと共に、x軸からα°だけy方向に傾斜した方向に一定の間隔(a/sinα)で並んでいる（図１３(b)）。従って、格子点は、y方向には、光共振状態形成用格子６１２Ａの格子点と同じ間隔aで並んでいる。

【手続補正１７】
【補正対象書類名】明細書

【補正対象項目名】００６８
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００６８】
以上に述べた第１～第６実施例ではいずれも、光共振状態形成用フォトニック結晶構造と光出射用フォトニック結晶構造を１つの層に形成しているが、図１４(a)に示すように、２次元フォトニック結晶層８１は、光共振状態形成用フォトニック結晶構造を有する第１層８１Ａと、光出射用フォトニック結晶構造を有する第２層８１Ｂの２層構造を有する２次元フォトニック結晶層８１を用いてもよい。また、図１４(a)の例では第１層８１Ａと第２層８１Ｂを共に活性層２２よりも裏面電極２５１側に設けたが、これら２層を共に活性層２２よりも窓状電極２５２側に設けてもよい。また、図１４(b)に示すように、第１層８１Ａと第２層８１Ｂのうちの一方を活性層２２よりも裏面電極２５１側に設け、他方を活性層２２よりも窓状電極２５２側に設ける、すなわち第１層８１Ａと第２層８１Ｂで活性層２２を挟むようにしてもよい。
【手続補正１８】
【補正対象書類名】明細書
【補正対象項目名】００６９
【補正方法】変更
【補正の内容】
【００６９】
１０、２０…フォトニック結晶レーザ
１０Ａ、１０Ｂ、１０Ｃ…光共振状態形成用フォトニック結晶構造
１１１Ａ、１１２Ａ、４１３Ｂ、５１３Ｂ…格子点
１１Ａ、１１Ｂ、１１Ｃ、２１３Ａ、２１３Ｂ…格子点
１３Ａ、１３Ｂ…Ｍ点
１４、１４Ａ、１４Ｂ、１４Ｃ…ライトコーン
１５…光出射用フォトニック結晶構造
１６Ａ…異屈折率領域
２１、３１、４１、５１、６１…２次元フォトニック結晶層
２１１、４１１、５１１…空孔
２１２Ａ、４１２Ａ、５１２Ａ、６１２Ａ…光共振状態形成用格子
２１２Ｂ、３１２Ｂ、４１２Ｂ、５１２Ｂ、６１２Ｂ…光出射用格子
２１２Ｃ、３１２Ｃ、４１２Ｃ、５１２Ｃ…格子
２１４…母材（スラブ）
２２…活性層
２３１…第１クラッド層
２３２…第２クラッド層
２４１…下部基板
２４２…上部基板
２５１…裏面電極
２５２…窓状電極
６５１…下部電極
６５２…上部電極
６６…異周期領域