

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2004-6567

(P2004-6567A)

(43) 公開日 平成16年1月8日(2004.1.8)

(51) Int. Cl.⁷

H01S 5/12
G02B 6/12

F I

H01S 5/12
G02B 6/12
G02B 6/12

N
Z

テーマコード(参考)

2H047
5F073

審査請求有 請求項の数 18 O L (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2002-207726 (P2002-207726)
(22) 出願日 平成14年7月17日(2002.7.17)
(31) 優先権主張番号 特願2002-86219 (P2002-86219)
(32) 優先日 平成14年3月26日(2002.3.26)
(33) 優先権主張国 日本国(JP)

(71) 出願人 396020800
科学技術振興事業団
埼玉県川口市本町4丁目1番8号
(74) 代理人 100095670
弁理士 小林 良平
(74) 代理人 100077171
弁理士 竹内 尚恒
(72) 発明者 野田 進
京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舎231号
(72) 発明者 岡野 誠
京都市左京区一乗寺東杉ノ宮町42 東杉ノ宮ハイツ303
Fターム(参考) 2H047 KA03 LA18 PA05 PA06 QA02
QA04 TA01
5F073 AA63 AA89 BA02 CA02 EA04

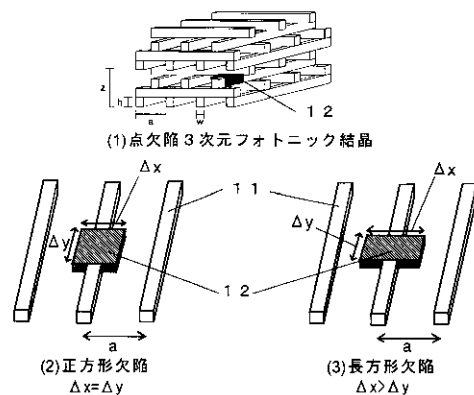
(54) 【発明の名称】 点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器

(57) 【要約】

【課題】 共振波長を制御することのできる点欠陥3次元フォトニック結晶を提供する。

【解決手段】 3次元フォトニック結晶に、欠陥部材を導入して点欠陥12を形成する。これにより、フォトニックバンドギャップ内に欠陥準位が形成され、点欠陥12内では欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが存在可能となり、当該波長における光共振器としての役割を果たす。3次元結晶であるので、点欠陥12からの光のエネルギーの損失が少なく、共振器としての効率が良い。欠陥部材のパラメータである大きさや形状及び位置を適切に設定することによって、共振波長を制御することが可能である。さらに、欠陥部材のパラメータが異なる複数の点欠陥を導入することにより、1個の3次元フォトニック結晶によって複数の波長の光を共振させることが可能である。これらは、波長多重光通信等の装置の小型化に寄与する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが 2 層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている 3 次元フォトニック結晶から成る本体と、

b) 上記ロッドのうちの 1 本に設けられた、ロッド幅方向の大きさ x とロッド長手方向の大きさ y の比 x/y が 1 より大きい点欠陥と、

を備えることを特徴とする点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

10

【請求項 2】

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが 2 層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の $1/2$ だけずれている 3 次元フォトニック結晶から成る本体と、

b) 上記ロッドのうちの 1 本に設けられた点欠陥であって、該点欠陥の中心が、該点欠陥に隣接するストライプ層に属する直近のロッドの中心軸から該点欠陥が属するロッドの長手方向に変位して配置されている点欠陥と、

を備えることを特徴とする点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

20

【請求項 3】

上記変位が上記面内周期の 0.1 倍以上であることを特徴とする請求項 2 に記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 4】

上記変位が上記面内周期の 0.25 倍であることを特徴とする請求項 3 に記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 5】

上記点欠陥のロッド幅方向の大きさ x とロッド長手方向の大きさ y の比 x/y が 1 より大きいことを特徴とする請求項 2 ~ 4 のいずれかに記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

30

【請求項 6】

上記の比 x/y が $1.5 \sim 2.5$ であることを特徴とする請求項 5 に記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 7】

上記の比 x/y が $2.0 \sim 2.5$ であることを特徴とする請求項 6 に記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 8】

上記点欠陥が、ロッドと同じ高さを有する直方体の欠陥部材で構成されることを特徴とする請求項 1 ~ 7 のいずれかに記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 9】

上記点欠陥が属するストライプ層の上下にそれぞれ 4 層以上のストライプ層を設けることを特徴とする請求項 1 ~ 8 のいずれかに記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

40

【請求項 10】

上記点欠陥が属するストライプ層の上下にそれぞれ 6 層以上のストライプ層を設けることを特徴とする請求項 9 に記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 11】

4 層のストライプ層から成る積層方向の 1 周期の長さである面外周期を上記面内周期の $1.1 \sim 1.7$ 倍とすることを特徴とする請求項 1 ~ 10 のいずれかに記載の点欠陥 3 次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項 12】

50

4層のストライプ層から成る積層方向の1周期の長さである面外周期を上記面内周期の $2^{0.5} \sim 1.7$ 倍とすることを特徴とする請求項11に記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項13】

上記面内周期に対する上記ロッドの幅の比を $0.2 \sim 0.4$ としたことを特徴とする請求項1～12のいずれかに記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項14】

本体内に複数の点欠陥を設けたことを特徴とする請求項1～13のいずれかに記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項15】

本体内に同じ形状で変位の異なる複数の点欠陥を設けたことを特徴とする請求項14に記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項16】

上記変位が $0.0a \sim 0.25a$ の範囲内で等間隔となるように、本体内に同じ形状で複数の点欠陥を設けたことを特徴とする請求項15に記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項17】

上記変位が $0.0a \sim 0.5a$ の範囲内で等間隔となるように、本体内に同じ形状で複数の点欠陥を設けたことを特徴とする請求項15に記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【請求項18】

上記点欠陥部に発光体を導入することを特徴とする、請求項1～17のいずれかに記載の点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】

本発明は、光波長分割多重通信の光源等に応用可能な光共振器に関する。

【0002】

【従来の技術】

近年、新しい光デバイスとして、フォトニック結晶が注目されている。フォトニック結晶とは周期屈折率分布をもった光学機能材料であり、光子のエネルギーに対してバンド構造を形成する。特に、光の伝播が不可能となるエネルギー領域（フォトニックバンドギャップ）が形成されることが特徴である。

【0003】

フォトニック結晶の適用が期待される分野の一例として、光通信の分野を取り上げる。光通信において、従来の光時分割多重方式（Optical Time Division Multiplexing : OTDM）に代わって、波長分割多重方式（Wavelength Division Multiplexing : WDM）が用いられている。このWDMは、一本の伝送路において複数の波長の光を伝播させ、それぞれに別個の信号を乗せる通信方式である。これによって、単位時間に送信できる情報量が飛躍的に向上する。

【0004】

この波長分割多重通信においては、複数の波長毎にそれぞれ光源が必要となる。現在のところ光源としては、発振波長の異なる半導体レーザを1波長毎に用いるものや、白色光源を光分波器と組み合わせるもの等が用いられている。しかし、これらの方法ではいずれも装置の大型化が避けられず、かつ非効率である。

【0005】

【発明が解決しようとする課題】

フォトニック結晶を光共振器として用いることができることは既に知られている。光共振器は光を閉じこめることができるため、適切な光の取り出し手段を設けることにより、光

10

20

30

40

50

共振器は光源として使用可能である。そこで、フォトニック結晶を光源として用いることにより、波長分割多重通信装置の大幅な小型化を図ることができる。

【0006】

光共振器としてのフォトニック結晶は、これまでも2次元フォトニック結晶において検討されている（例えば、特開2001-272555号公報に記載）。この文献においては、フォトニック結晶の周期を乱す点欠陥を導入することにより、光共振器のみならず波長分合波デバイスとして用いることも検討されている。

【0007】

2次元フォトニック結晶は製造が比較的容易であるという利点があるが、光共振器としての効率を考慮すれば、光を共振器内に閉じこめる効果の高い3次元系がより望ましい。

10

【0008】

3次元フォトニック結晶に関しては、これまで導波路を導入したもの（例えば、特開2001-74955号公報）や、点欠陥を導入したもの（岡野誠他、「3次元フォトニック結晶における微小光共振器の解析」、応用物理学会2000年秋季講演概要集、同、「3次元フォトニック結晶における単一欠陥微小光共振器の解析（ⅠⅠ）」、応用物理学会2001年春季講演概要集）が報告されている。しかし、欠陥の構造と共振器の特性との間の関係については、これまで具体的な報告はなされていない。

【0009】

工業的には、光共振器を例えば波長多重光通信の光源として用いる場合、その放出波長を任意の目的の値に設定することができなければ、実用とはならない。

20

【0010】

本発明はこのような課題を解決するために成されたものであり、その目的とするところは、点欠陥3次元フォトニック結晶を用いた光共振器の共振波長の具体的な制御方法を提供することにある。

【0011】

【課題を解決するための手段】

上記課題を解決するために成された本発明に係る点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器の第1の態様のものは、

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の1/2だけずれている3次元フォトニック結晶から成る本体と、

30

b) 上記ロッドのうちの1本に設けられた、ロッド幅方向の大きさ x とロッド長手方向の大きさ y の比 x/y が1より大きい点欠陥と、
を備えることを特徴とする。

【0012】

また、本発明に係る点欠陥3次元フォトニック結晶光共振器の第2の態様のものは、

a) 複数のロッドを平行且つ所定の面内周期で周期的に配置したストライプ層が複数、平行に積層されて成り、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交し、各ストライプ層に属する各ロッドが2層離れたストライプ層に属する各ロッドと平行且つ上記面内周期の1/2だけずれている3次元フォトニック結晶から成る本体と、

40

b) 上記ロッドのうちの1本に設けられた点欠陥であって、該点欠陥の中心が、該点欠陥に隣接するストライプ層に属する直近のロッドの中心軸から該点欠陥が属するロッドの長手方向に変位して配置されている点欠陥と、
を備えることを特徴とする。

【0013】

【発明の実施の形態】

まず、本発明の光共振器の母体となる3次元フォトニック結晶について説明する。3次元

50

フォトニック結晶は、ロッドの集合で構成される。このようなロッドを所定の周期（面内周期） a で平行に配列することによって1枚の層が構成される。これをストライプ層と呼ぶ。ストライプ層を積層することによって3次元結晶を構成するが、フォトニックバンドギャップを形成するためには、各ストライプ層に属する各ロッドと他のストライプ層に属するロッドとの間の位置関係が重要である。本発明で用いる3次元フォトニック結晶においては、各ストライプ層に属する各ロッドが最隣接のストライプ層に属する各ロッドと直交するように配置される。また、各ストライプ層に属する各ロッドが、上記最隣接のストライプ層の次に近いストライプ層（すなわち、2層離れたストライプ層）に属する各ロッドと平行、且つロッドの幅方向に長さ $a/2$ だけずれて配置されることによって周期的な屈折率分布を形成する。このような周期的な屈折率分布により、3次元フォトニック結晶内に、光が存在し得ないエネルギーの範囲（フォトニックバンドギャップ）が形成される。

10

【0014】

このような周期性を有する3次元フォトニック結晶内の1本のロッドに、点欠陥を導入する。こうして導入された点欠陥により3次元フォトニック結晶内における周期的な屈折率分布に乱れが生じ、フォトニックバンドギャップ内に、光が存在し得るエネルギー準位（欠陥準位）が形成される。すなわち、このような点欠陥を有する3次元フォトニック結晶は、光共振器となる。この点欠陥部に発光体を導入すれば、この光共振器は光源となる。

【0015】

点欠陥を導入する方法には、種々の方法がある。例えば、ロッドの一部を欠損させ、そこに形状や屈折率等の異なる物体を配置する方法や、ロッドを欠損させることなくロッドに部材を取り付ける方法、或いは、ロッド自体の形状を変化させる（太くする／細くする）等の方法が取り得る。これらを総称して欠陥部材と呼ぶ。なお、点欠陥を光源として使用することを考えた場合、欠陥部に発光体を導入する必要があるが、発光体自体を欠陥部材としてもよい。

20

【0016】

このように点欠陥を導入した3次元フォトニック結晶を光共振器として用いる際、欠陥準位のエネルギー値、欠陥準位間の間隔、光閉じこめ効果の3つの特性が重要である。これらについて必要な特性を得るためには、点欠陥の大きさ、形状及び変位などの、点欠陥に関するパラメータを適切に選択する必要がある。

30

【0017】

点欠陥に関する上記パラメータのうち、欠陥部材の大きさにより、欠陥準位のエネルギー値を高い自由度で設定することができる。ただし、欠陥部材の大きさを制御するだけでは、共振周波数の間隔が小さくなる場合がある。すなわち、共振器として使用する準位（以下、使用準位とする）が隣接する準位と近接し、使用準位が隣接準位の影響を受ける場合が生じる。そこで、本発明では、欠陥部材の形状や変位を以下に示す方法で調整することによって、隣接準位の影響を回避することができることを明らかにした。

【0018】

まず、欠陥部材の形状について述べる。ロッド及び欠陥部材を作製する際にリソグラフィ法を用いることを考慮すると、欠陥部材は（積層方向に）ロッドと同じ高さとし、点欠陥箇所において平面形状がロッド部分とは異なる形状（長方形、楕円形等）とすることが望ましい。

40

【0019】

次に、このような欠陥部材の平面形状における幅 x と長さ y の関係を考えると、(i) x と y が等しい場合（ $x/y = 1$ ）、(ii) x が y よりも大きい場合（ $x/y > 1$ ）、(iii) x が y よりも小さい場合（ $x/y < 1$ ）、の3つの場合がある。電磁界分布には方向依存性があるため、点欠陥による欠陥準位のエネルギー値は欠陥部材の x/y に依存する。そこで使用準位と隣接準位との間のエネルギー差 E を調べたところ、欠陥部材の形状が $x/y > 1$ である場合にエネルギー差 E が最も大きくなることがわかった。そこで、使用準位に対する隣接準位の影響を回避する

50

ために、欠陥部材はその幅 x が長さ y よりも大きい形状異方性を持つようにする。また、 x / y の値は 1.5 以上が好ましく、さらには 2 以上とすることが特に好ましい。

【0020】

次に、点欠陥の変位について述べる。点欠陥の変位は、その点欠陥と、それが属するストライプ層に隣接する上下のストライプ層（以下、隣接層と呼ぶ）のロッドとの位置関係を表す。

【0021】

電磁界分布の影響を考慮すると容易に理解できるように、欠陥準位のエネルギー値は変位にも依存する。変位が大きいほど、欠陥準位と隣接準位との間隔が大きい。変位を $0.1a$ 以上とすることにより、そのエネルギー差は実際上十分なものとなる。なお、上下2つの隣接層のロッドは相互に長さ $a/2$ だけずれているため、一方の隣接層に対する変位が $0.25a$ を越えた場合は、他方の隣接層に対する変位が $0.25a$ 以下になる。すなわち、上記変位の最大値は $0.25a$ となり、そのときに欠陥準位と隣接準位との間隔が最大となる。

10

【0022】

点欠陥のパラメータとしては、結晶全体の中の位置ではなく、上記「変位」が意味を持つ。なぜならば、結晶内の異なる位置においても、同じ変位を与えれば同じ欠陥準位が得られるからである。

【0023】

上記変位の利点は、点欠陥（欠陥部材）の形状とは独立に得られる。

20

【0024】

ここまで述べたように、点欠陥（欠陥部材）の大きさ・形状・変位を適切に設定することによって欠陥準位のエネルギー値を高い自由度で設定することができる。3次元フォトニック結晶内の異なる位置に異なる大きさ及び/又は形状及び/又は変位を持つ複数の点欠陥（欠陥部材）を導入すれば、それぞれ異なる欠陥準位のエネルギー値を持つ複数の点欠陥を有する光共振器を作製することができる。

【0025】

次に、光共振器におけるQ値について述べる。Q値は、光共振器に蓄積される光のエネルギーを、単位時間に共振器から失われる光のエネルギーで除し、共振角周波数を乗じたものである。この値がおおむね1000を越えると、室温においてレーザ発振を得ることができる。とされている。

30

【0026】

光共振器のQ値を向上させるためには、光共振器からの光のエネルギーの損失を抑制することが必要である。そのためには、3次元の全ての方向について結晶の大きさを十分大きく取ればよい。ただし、以下の点に留意する必要がある。

【0027】

本発明の3次元フォトニック結晶は、ストライプ層を1層ずつ作成し、それらを積み重ねることによって製造されるので、ストライプ層の面内方向に結晶を大きくすることは比較的容易であるのに対して、積層方向に結晶を大きくすることは、積み重ねる工程が増加することによって製造コストを上昇させる。この点からストライプ層の数を増やしすぎること好ましくない。

40

【0028】

本発明において、光共振器からの光のエネルギーの損失を抑制するためには、このストライプ層の数が、点欠陥の属するストライプ層の上下共に4層以上あることが望ましい。さらに、このストライプ層の数が、点欠陥の属するストライプ層の上下共に6層以上あれば、Q値は1000近くに達することが明らかになった。この結果と製造コストとを勘案して、適切な積層数を決定すればよい。

【0029】

使用可能な光の波長の範囲を広くするためには、フォトニックバンドギャップ幅が大きい

50

ことが望ましい。ここまでは主に点欠陥に関するパラメータについて検討してきたが、以下ではフォトリックバンドギャップの大きさを制御するために、母体となる3次元フォトリック結晶のパラメータについて検討する。検討すべきパラメータには、面内外周期比と面内のロッド充填率がある。面内外周期比とは、ストライプ層内の面内周期 a に対する積層方向の1周期（1周期はストライプ層の4層分）の大きさ（面外周期） z の比 z/a である。また、ロッドの充填率は、ロッドの幅 w を面内周期 a で除した値 w/a である。

【0030】

各種面内外周期比 z/a の値に対して充填率 w/a を種々変化させると、面内外周期比 z/a がいずれの値の場合も、充填率 w/a が $0.275 \sim 0.30$ の範囲においてフォトリックバンドギャップ幅が最大となる。また、充填率 w/a が $0.20 \sim 0.40$ の範囲を外れると、その範囲から離れるにつれてフォトリックバンドギャップ幅は急激に減少する。

10

【0031】

一方、各種充填率 w/a の値に対して面内外周期比 z/a の値を種々変化させると、充填率 w/a が $0.20 \sim 0.30$ の場合は面内外周期比 $z/a = 1.2$ の時、充填率 w/a が $0.30 \sim 0.40$ の場合は面内外周期比 $z/a = 1.3$ の時に、フォトリックバンドギャップ幅が最大となる。

【0032】

面内外周期比 z/a の値を大きくすると Q 値が向上する。特に、これまでの3次元フォトリック結晶ではあまり検討されていなかった、 z/a が $2^{0.5}$ よりも大きい場合に高い Q 値が得られる。

20

【0033】

【発明の効果】

3次元フォトリック結晶に点欠陥を導入し、そこに配置する点欠陥（欠陥部材）の大きさ・形状・変位、及び3次元フォトリック結晶の面内外周期比 z/a ・充填率 w/a などのパラメータを変化させることにより、共振周波数を任意に設定することが可能となり、また、その周波数の単一性を高めることができるようになる。特に、それらのパラメータの適切な設定により、レーザ発振も可能となる。このため、例えば本発明に係る光共振器を光源として用いた場合、所望の発光波長を有し、且つ、波長単一性の高いものとなり、波長多重光通信用光源として最適なものとなる。もちろん、その他にも各種光学装置の光源として用いることが可能である。

30

【0034】

【実施例】

まず、母体となる3次元フォトリック結晶の構成例を図1に示す。図に棒状に示したものがロッド11である。図の右端に記した矢印の1つがストライプ層1層分に対応する。図中の a が、ストライプ層内でのロッド配列の1周期分の長さ（面内周期）である。 z は、ストライプ層4層で構成される積層方向の1周期の長さ（面外周期）である。 w はロッドの幅、 h はロッドの高さをそれぞれ表す。ロッドの材質としては、例えば光通信でよく用いられる赤外線に対して透明な物質であり、発光体の導入が可能な誘電体であるIII-V族半導体（例えば、GaAs、InP等）を使用することができる。

40

【0035】

図1のような結晶がフォトリックバンドギャップを持つことを確認するために、平面波展開法を用いてエネルギーバンドを計算した結果を図2に示す。ここで、面内外周期比 $z/a = 1.2$ 、充填率 $w/a = 0.25$ 、ロッドの屈折率を 3.309 とした。図2の左側の縦軸は光の周波数に a/c （ c は光速）を乗じて無次元とした規格化周波数を表し、右側の縦軸はフォトリックバンドギャップの中心エネルギーを 0.8 eV （光多重通信において一般的に用いられる波長 $1.55 \mu\text{m}$ の光のエネルギー）とした場合の光子エネルギーを表す。図2の横軸は波数空間における方向を表す。この図から、規格化周波数が $0.38 \sim 0.45$ の範囲で、波数空間の全方向に対してエネルギーギャップが開いていることが分かる。これがフォトリックバンドギャップである。

50

【0036】

次に、図3(1)に示すように、上記母体の結晶に点欠陥12を導入する。点欠陥は、ロッドの一部に欠陥部材を配置することにより形成する。本実施例においては欠陥部材は、ロッドと同じ高さを有する直方体であり、その材質はロッドと同じである、とした。なお、材質(屈折率)をロッドとは異なるとした場合も、以下に示す結果は同様となる。以下に、この欠陥部材の各種パラメータが点欠陥のエネルギー準位等の各種特性に及ぼす影響を検討する。欠陥部材の平面形状は、図3(2)に示す幅 x と長さ y が等しいものと、図3(3)に示す $x > y$ のものを検討した。なお、 $x < y$ の場合は、検討の結果、 $x = y$ の場合よりも欠陥準位間の間隔を狭める傾向にあることが明らかとなったので、以下では説明を省略する。以後、 $x = y$ の点欠陥を「正方形欠陥」、 $x >$

10

【0037】

次に、欠陥部材の変位について検討する。図4に示すように、欠陥部材の中心と、直上のストライプ層にある最隣接のロッドの中心との y 方向のずれを検討した。図4(1)は y 方向のずれがない場合、図4(2)及び(3)は y 方向にずらした場合である。なお、 x 方向のずれも検討したが、こちらの方は、ずれを大きくすることにより欠陥準位間の間隔を狭める傾向にあることが分かった。従って、以下では y 方向のずれについてのみ検討する。

【0038】

以下に、上記欠陥部材の大きさ・形状・変位が点欠陥の欠陥準位に及ぼす影響について計算した結果を示す。まず、形状を正方形に固定し、変位を $0.0a$ 、 $0.125a$ 、 $0.25a$ の3通りに変化させた場合の計算結果を図5に示す。この計算では、上記平面波展開法よりも精度の良い時間領域差分法を用いた。図5の横軸は欠陥部材の大きさを表す。図の背景の白い領域が、フォトリックバンドギャップをもつ領域である。変位が $0.0a$ の場合は低エネルギー(低周波数)側の2つの欠陥準位が大きさ $x = 0.6$ 付近で交差している。この交差付近の欠陥準位を用いることは、波長の単一性が損なわれるため、好ましくない。変位が $0.125a$ 、 $0.25a$ の場合はそのような交差は見られない。

20

【0039】

図6に、最も周波数が低い欠陥準位とその他の準位との間隔の最小値 $m_{i n}$ を示す。「その他の準位」は、各変位にそれぞれ付した x 印及び $+$ 印を境に、 x 印よりも左側では高周波側のバンド端、 x 印と $+$ 印の間では隣接準位、 $+$ 印よりも右側では低周波側のバンド端である。破線は、欠陥準位とそれに近接する側のバンド端との間隔を表す。なお、計算した範囲内では、変位が $0.0a$ の時は「その他の準位」は全て隣接準位であり、変位が $0.125a$ の時は「その他の準位」が高周波側のバンド端にはならない。

30

【0040】

図6では、変位が $0.25a$ の時に $m_{i n}$ が最も大きいことが示されている。ここで、点欠陥に $InGaAsP$ 系の材料から成る発光体を導入することを考慮した場合、その多重量子井戸の常温における半値全幅として実験的に $60meV$ ($a = 0.653\mu m$ の場合、 $0.0315c/a$) という値が観測されており、この値から判断すると、 $m_{i n}$ はこの半分の $30meV$ 以上であることが望まれる。変位が $0.25a$ の時、この条件は満たされており、単一モードの強い発光が得られる。

40

【0041】

次に、 x/y が 1.5 、 2.0 、 2.5 である長方形欠陥について平面波展開法を用いて計算を行った結果を図7~図9に示す。いずれも、最も周波数が低い欠陥準位と隣接する欠陥準位の差が正方形欠陥の場合よりも大きくなることが分かる。 x/y が大きくなるにつれて、その差は大きくなる。正方形欠陥の時に欠陥準位の交差が見られた、変位が $0.0a$ の時も、 x/y の増加とともに隣接する欠陥準位との差が大きくなり、 $x/y = 2.5$ の時には交差は見られなくなった。

【0042】

図10に、 $x/y = 2.0$ における上記計算を、時間領域差分法を用いて計算した結

50

果を示す。長方形欠陥と正方形欠陥の違いを比較するために、この図と図5を比べると、図5から隣接準位を除去したものと非常によく似ていることが分かる。これは、 x/y の値を1よりも大きくすると、隣接準位は抑制されて高周波側へシフトするのに対して、使用準位及び次隣接準位にはそのようなシフトが生じないことによる。この隣接準位と使用準位との違いは、隣接準位においては電磁界分布が y 方向に広がるのに対して使用準位においては電磁界分布が点欠陥の中心部に強く局在することによる。

【0043】

図11に、図10から計算した $x/y = 2.0$ における $m_{i n}$ を示す。図中の x 印及び $+$ 印の記号及び破線の意味は図6と同様である。変位がいずれの場合においても、正方形欠陥の場合よりも $m_{i n}$ が増大していることが分かる。

10

【0044】

図12に、正方形欠陥と長方形欠陥 ($x/y = 2.0$) のそれぞれについて、変位が $0.25a$ である場合の Q 値の計算結果を示す。それぞれの x は、欠陥準位がフォトリックバンドギャップの中心付近にある場合の、 $x = 0.65a$ (正方形欠陥) 及び $x = 0.80a$ (長方形欠陥) とした。図12の横軸は、ストライプ層の積層総数を表す。点欠陥の属する層の上下にそれぞれストライプ層が n 層ずつ存在する場合、上記横軸の値は $2n + 1$ となる。この図より、正方形欠陥及び長方形欠陥のいずれの場合においても、 $n = 6$ の時、 Q 値は室温においてレーザ発振を得ることができる値である 1000 に達する。

【0045】

図13に、正方形欠陥と長方形欠陥 ($x/y = 2.0$) のそれぞれに対して、 $n = 4$ 及び $n = 8$ の場合について、 Q 値の x 依存性を計算した結果を示す。この図より、 $n = 8$ の場合、 x がいずれの値の時も高い Q 値が得られていることがわかる。従って、フォトリックバンドギャップ内の広い波長範囲に渡り、 Q 値の高い欠陥準位を形成することができ、設計に際して高い自由度が得られる。

20

【0046】

図14に、 $n = 8$ の場合に長方形欠陥 ($x/y = 2.0$) における Q 値の変位依存性を示す。いずれの変位においても高い Q 値が維持される。

【0047】

ここまでの計算結果から、点欠陥に配置する欠陥部材のパラメータを適切に設定することにより、欠陥準位の間隔を広く取ることができ、かつ広い周波数領域において高い Q 値が得られることが分かった。このことから、1つの3次元フォトリック結晶内に異なる形状、大きさ及び/又は変位を持つ欠陥部材を複数導入すれば、異なる複数の共振周波数を持つ複数の点欠陥共振器が、互いの周波数領域が重複せず、かついずれも高い Q 値で得られる。このように、1つの3次元フォトリック結晶のみで複数の光共振器を実現することができるので、本発明に係る共振器は波長多重光通信等の装置の小型化に寄与する。

30

【0048】

ここでは、図15に示すように、同じ形状及び大きさで変位の異なる複数の欠陥部材を設けた3次元フォトリック結晶について検討する。このような構成は、欠陥部材が1種類のみであるので、量産の際に好都合である。この図では各欠陥の変位が一定間隔 d ずつ異なる例を挙げたが、もちろん、目的の波長に応じた変位のみを導入するようにしてもよい。図16に、 $x = 0.8$ 、 $x/y = 2.0$ の場合について、それぞれ変位の異なる複数の点欠陥を導入したときの、各点欠陥の規格化周波数の例を示す。規格化周波数を光多重通信等で用いられる $1.55 \mu\text{m}$ 帯 (Cバンド) に当てはめると、波長を $1.525 \mu\text{m} \sim 1.565 \mu\text{m}$ 、帯域幅 $0.04 \mu\text{m}$ に渡って制御することができることが分かる。現在、実際に光多重通信で用いられる波長帯域は $1.530 \mu\text{m} \sim 1.565 \mu\text{m}$ であるため、本発明に係る光共振器は点欠陥の変位の調整のみでそれに対応することができる。

40

【0049】

図15のように同じ形状・同じ大きさで変位のみ異なる N 個の点欠陥を導入する場合、そ

50

れらの変位を $0.0a \sim 0.25a$ の範囲内で等間隔となるように設定すれば、全波長帯域の中で各波長が等間隔となる複数の波長の光を得ることができる。このような構成にすることにより、上記のように、光多重通信において与えられた波長帯域内の複数の波長の光を1個の光源で生成することができ、しかも各波長が等間隔となることで波長帯域を有効に用いることができる。

【0050】

実用上は、前記変位をさらに $0.0a \sim 0.5a$ の範囲内で等間隔となるように設定するのが便利である。こうすることにより、図17のA及びBの範囲で示すように、その範囲がどの位置にあるとも(すなわち、全体としてy方向にLだけシフトしたとしても)、常に全波長帯域をカバーすることができるようになる。作製上の位置ずれを考慮した場合、この構造は非常に有益である。

10

【0051】

点欠陥の変位以外に、その大きさも適切に設定することにより、さらに広い帯域幅で異なる複数の共振周波数を持つ点欠陥光共振器を導入することができる。ただし、フォトリックバンドギャップよりも広い帯域幅を作り出すことはできない。ここで、フォトリックバンドギャップの大きさを制御するには、母体結晶におけるパラメータの調節が必要である。

【0052】

そこで、フォトリックバンドギャップの大きさを制御するための、母体の3次元フォトリック結晶の構造パラメータについて検討する。対象としたパラメータは、ストライプ層の積層周期に関する面内外周期比 z/a と、ストライプ層内のロッド充填率 w/a である。

20

【0053】

図18に、フォトリックバンドギャップ幅の、面内外周期比 z/a 及び充填率 w/a 依存性を示す。ここで、縦軸はフォトリックバンドギャップ幅をその中心周波数で除したものを百分率で示した。充填率 w/a に着目すると、面内外周期比 z/a がいずれの値の場合も、充填率 w/a が $0.2 \sim 0.4$ の範囲から外れれば、その範囲から離れるにつれてフォトリックバンドギャップ幅は急激に減少する。この結果より、充填率 w/a は $0.2 \sim 0.4$ とすることが好ましいことがわかる。

【0054】

面内外周期比 z/a の各値においてフォトリックバンドギャップ幅が最大になるときの充填率 w/a を用いて、フォトリックバンドギャップ幅の面内外周期比 z/a 依存性を図19に示す。ここで用いた充填率 w/a は、 $1.05 < z/a < 1.225$ 及び $1.70 < z/a$ において 0.275 、 $1.25 < z/a < 1.65$ において 0.30 である。図19より、最もフォトリックバンドギャップ幅が大きいのは $z/a = 1.225$ のときであることがわかる。

30

【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の3次元フォトリック結晶光共振器の母体となる、3次元フォトリック結晶の構成例。

【図2】母体の3次元フォトリック結晶のフォトリックバンド構造を表すグラフ。

【図3】3次元フォトリック結晶中に導入した欠陥部材の形状例を表す図。

40

【図4】3次元フォトリック結晶中に導入した欠陥部材の変位例を表す図。

【図5】正方形欠陥の大きさと共振周波数との関係の、変位依存性を表したグラフ。

【図6】正方形欠陥における m_{in} を表すグラフ。

【図7】 x/y が 1.5 である長方形欠陥の場合の欠陥部材の大きさと共振周波数との関係の、変位依存性を表したグラフ。

【図8】 x/y が 2.0 である長方形欠陥の場合の欠陥部材の大きさと共振周波数との関係の、変位依存性を表したグラフ。

【図9】 x/y が 2.5 である長方形欠陥の場合の欠陥部材の大きさと共振周波数との関係の、変位依存性を表したグラフ。

【図10】 x/y が 2.0 である長方形欠陥の場合の欠陥部材の大きさと共振周波数

50

との関係の変位依存性を時間領域差分法で計算した結果を表すグラフ。

【図11】長方形欠陥における $m_{i n}$ を表すグラフ。

【図12】正方形欠陥と長方形欠陥 ($x / y = 2.0$) のそれぞれについて、変位が $0.25a$ である場合の Q 値の計算結果を表すグラフ。

【図13】正方形欠陥と長方形欠陥 ($x / y = 2.0$) のそれぞれについて、 Q 値の x 依存性を表すグラフ。

【図14】長方形欠陥 ($x / y = 2.0$) における Q 値の変位依存性を表すグラフ。

【図15】異なる変位で配置された複数の点欠陥を有する共振器の構成図。

【図16】変位の異なる複数の点欠陥を配置したときの、各点欠陥の規格化周波数を表す表。

【図17】変位の異なる複数の点欠陥を配置したときの、各点欠陥の共振波長を模式的に表す図。

【図18】フォトニックバンドギャップ幅の面内外周期比 z / a 及び充填率 w / a 依存性を表すグラフ。

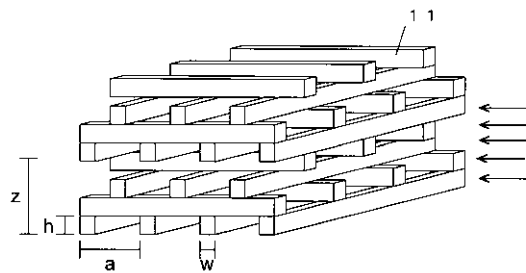
【図19】フォトニックバンドギャップ幅の面内外周期比 z / a 依存性を表すグラフ。

【符号の説明】

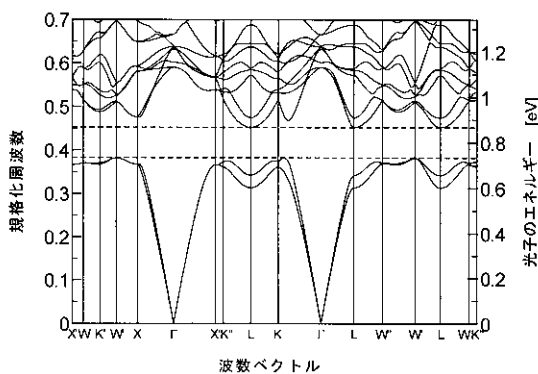
1 1 ... ロッド

1 2 ... 点欠陥

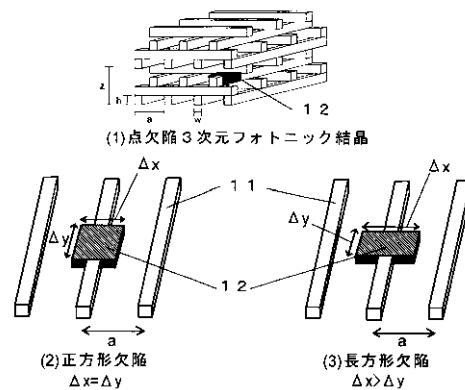
【図1】



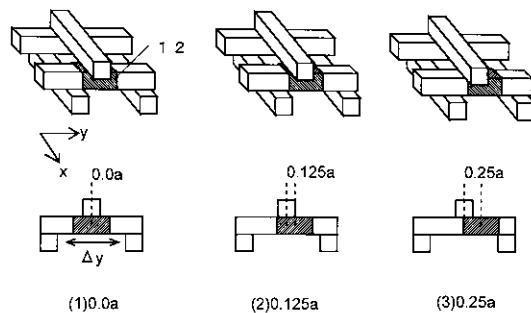
【図2】



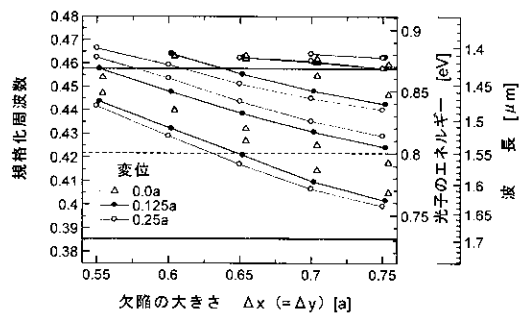
【図3】



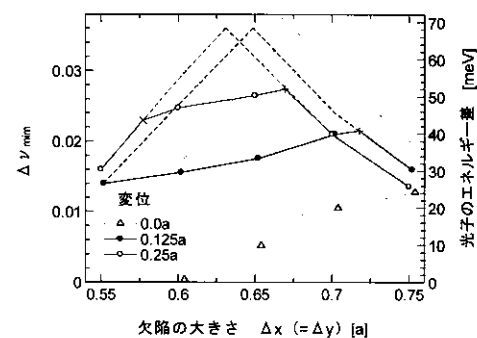
【図4】



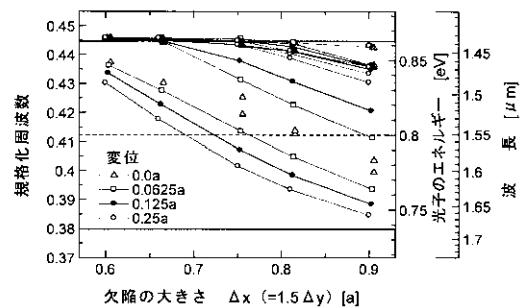
【 図 5 】



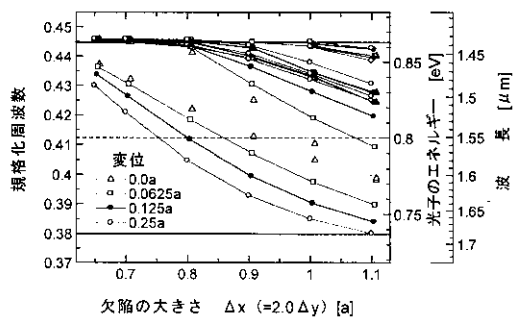
【 図 6 】



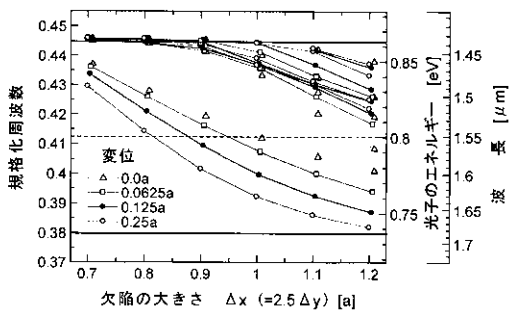
【 図 7 】



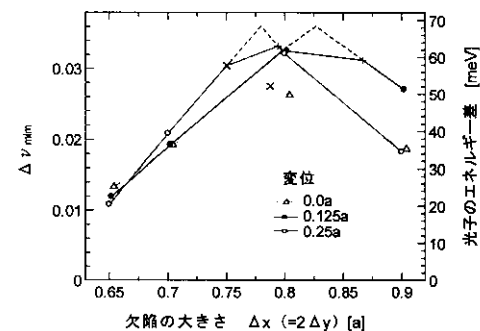
【 図 8 】



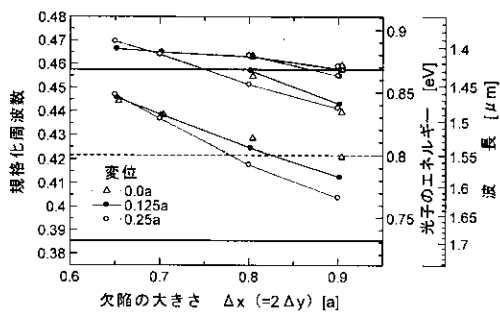
【 図 9 】



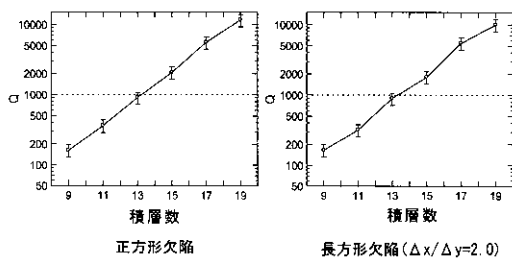
【 図 11 】



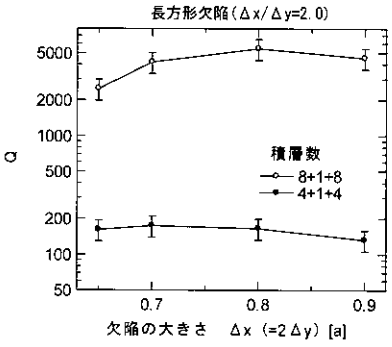
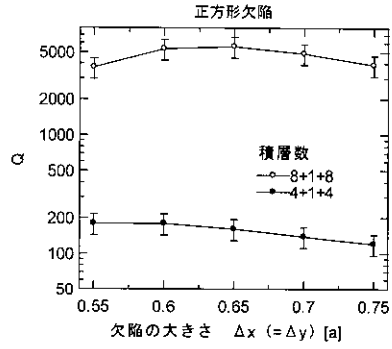
【 図 10 】



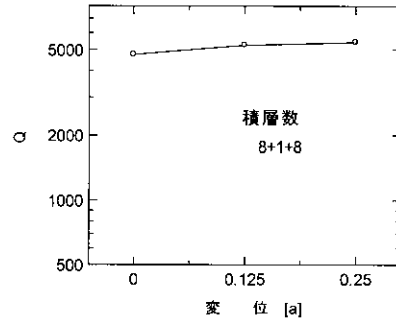
【 図 12 】



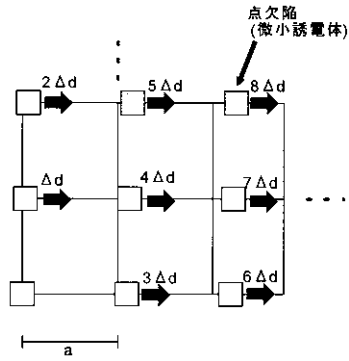
【 図 1 3 】



【 図 1 4 】



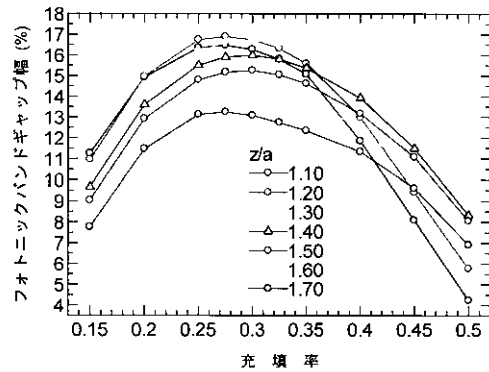
【 図 1 5 】



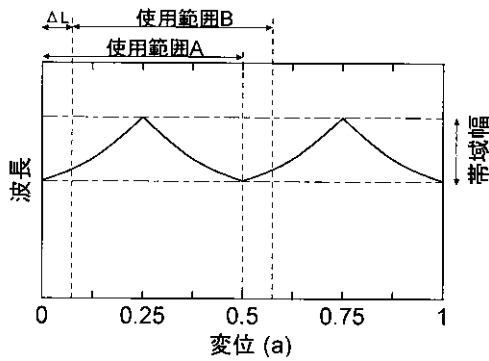
【 図 1 6 】

欠陥位置	規格化周波数	光子エネルギー [meV]	波長 [nm]
0.0a	0.4285	813	1525
0.125a	0.4245	806	1539
0.25a	0.4176	792	1565
帯域幅	0.0109	21	40

【 図 1 8 】



【 図 1 7 】



【 図 1 9 】

