

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 特 許 公 報 (B 2)

(11) 特許番号

特許第3459827号

(P 3 4 5 9 8 2 7)

(45) 発行日 平成15年10月27日(2003.10.27)

(24) 登録日 平成15年 8 月 8 日(2003.8.8)

(51) Int.Cl.⁷

識別記号

F I

G02B 6/12

G02B 6/12

F

Z

請求項の数17 (全12頁)

(21) 出願番号 特願2002 - 86221 (P 2002 - 86221)

(22) 出願日 平成14年 3 月26日(2002.3.26)

(65) 公開番号 特開2003 - 279764 (P 2003 - 279764 A)

(43) 公開日 平成15年10月 2 日(2003.10.2)

審査請求日 平成14年 7 月18日(2002.7.18)

(73) 特許権者 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

(72) 発明者 野田 進

京都府宇治市五ヶ庄 京大職員宿舍231号

(72) 発明者 望月 理光

長野県茅野市金沢2050番地 金沢精和荘320号室

(72) 発明者 浅野 卓

京都市山科区安朱東海道町16の1 緑山荘 A - 207

(74) 代理人 100095670

弁理士 小林 良平 (外 1 名)

審査官 福島 浩司

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 2次元フォトニック結晶光分合波器

1

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 a) スラブ状の本体と、
b) 上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
c) 上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、
d) 上記導波路の近傍に設けられる、隣接する 2 個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、
を備えることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 2】 上記クラスタ欠陥が、隣接する 2 個の欠陥によって形成され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光分合波器。

【請求項 3】 上記クラスタ欠陥が、三角形状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されることを特徴とする請求

2

項 1 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 4】 上記クラスタ欠陥が、導波路に平行な直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成され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光分合波器。

【請求項 5】 直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の 4 列目に設けられることを特徴とする請求項 4 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

10 【請求項 6】 a) スラブ状の本体と、

b) 上記本体内に設けられた 2 以上の禁制帯領域と、
c) 各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
d) 各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線

状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、

e)各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、

を備えることを特徴とする 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 7】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、隣接する 2 個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥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光分合波器。

【請求項 8】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、隣接する 2 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 9】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、三角形に隣接する 3 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 10】 上記複数の禁制帯領域の各々に設けられた点状欠陥のうちの少なくとも 1 つが、導波路に平行な直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥であることを特徴とする請求項 7 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 11】 直線状に隣接する 3 個の欠陥によって形成される上記クラスタ欠陥が、上記導波路から上記異屈折率領域の列の 4 列目に設けられることを特徴とする請求項 10 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 12】 上記異屈折率領域の欠陥は、本体の一方の面から本体の厚みの 5% ~ 40% の範囲の部分にのみ異屈折率領域を設けたものであることを特徴とする請求項 1 ~ 11 のいずれかに記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 13】 上記異屈折率領域の厚みが本体の厚みの 20% ~ 30% であることを特徴とする請求項 12 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 14】 上記異屈折率領域が、本体よりも屈折率の低い領域であることを特徴とする請求項 1 ~ 13 のいずれかに記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 15】 上記低屈折率領域が空孔であることを特徴とする請求項 14 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 16】 上記異屈折率領域の欠陥が、本体に空孔を設けないことにより形成されるドナー型欠陥であることを特徴とする請求項 15 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【請求項 17】 上記異屈折率領域の欠陥が、上記空孔

よりも径の大きい空孔を設けることにより形成されるアクセプタ型欠陥であることを特徴とする請求項 15 に記載の 2 次元フォトニック結晶光分合波器。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、波長分割光多重通信などに用いられる光分合波デバイスに関する。

【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】この波長分割多重方式においては、伝送路の入口側で各波長の光を混合し、混合された光を出口側で各波長ごとに取り出す。そのために、光の合波器及び分波器、あるいは波長フィルタが必要となる。このうち分波器として、現状ではアレイ導波路回折格子(Arrayed Waveguide Grating : AWG)が用いられている。しかし、AWGでは通常の導波路を用いるので、光の損失を小さくするために、現状では数cm角程度の比較的大きな素子が用いられている。

【0005】そこで、フォトニック結晶から成るデバイスを上記分波器及び合波器として用いることにより、上記分波器の小型化を図ることが検討されている(例えば、特開2001-272555号公報に記載。以下、従来技術 1 とする。)。以下に、フォトニック結晶から成る分波器について簡単に述べる。フォトニック結晶中に適切な欠陥を導入することにより、上記フォトニックバンドギャップ中にこの欠陥によるエネルギー準位(欠陥準位)が形成される。これによって、上記フォトニックバンドギャップ中のエネルギーに対応する波長範囲のうち、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になる。結晶中の上記欠陥を線状にすれば光導波路となり、結晶中の欠陥を点状にすれば光共振器となる。

【0006】フォトニック結晶中に上記導波路を設け、その近傍に上記点状欠陥を適切に設ければ、様々な波長の光が導波路内を伝播し、その内の、点状欠陥の共振周波数に一致する波長の光のみが点状欠陥に捕獲される。その光を取り出せば、所望の波長の分波器となる。逆に、共振

周波数に一致する波長の光を点欠陥からフォトニック結晶内に導入し、他の様々な波長の光と一緒に導波路内を伝播させれば、所望の波長の合波器となる。

【 0 0 0 7 】分波器及び合波器としてのフォトニック結晶には、2次元結晶あるいは3次元結晶を用いることができる。その両者にそれぞれ特長があるが、以下では、作成が比較的容易な2次元結晶について述べる。2次元フォトニック結晶では、面に直交する方向(面直方向)には結晶本体と空気との大きな屈折率の差があるので、光を面直方向に対して閉じこめることができる。

【 0 0 0 8 】上記従来技術 1 において、InGaAsPから成るスラブに周期的に同じ直径の円柱孔を開け、その円柱孔の1列を塞ぐことで光導波路とし、さらに少なくとも1箇所の円柱孔の直径を他の円柱孔の直径と異なるものとすることで欠陥を導入して、それを光共振器とした場合について検討されている。

【 0 0 0 9 】それによれば、伝播させたい光の波長(上記実施例では、波長分割光多重通信に一般的に用いられる波長帯のひとつである $1.55\ \mu\text{m}$)に合わせて格子定数 a を設定する。そして、各格子点に設けた円柱孔の半径を $0.29a$ とする。そのうち1個の円柱孔の半径を $0.56a$ とすることにより、そこに点欠陥を形成する。すると、その点欠陥からスラブの面直上下方向に規格化周波数 $f=0.273$ の光が放射される。この時の Q 値はおよそ500となる。ここで、規格化周波数とは、光の周波数に a/c (c は光速)を乗じて無次元としたものである。 Q 値は共振器の効率を示す値であり、 Q 値が大きいくほど波長分解能も高くなる。また、1個の円柱孔の半径を $0.56a$ 、別の1個の円柱孔の半径を $0.58a$ と、大きさの異なる複数の点欠陥を形成した場合、それぞれ規格化周波数が 0.2729 及び 0.2769 と、波長の異なる2種の光が放射される。その時の Q 値はいずれもおよそ500となる。

【 0 0 1 0 】

【発明が解決しようとする課題】上で述べたように、上記従来技術 1 において2次元フォトニック結晶を光分波器として使用できることが示されているが、そこで得られている性能について、以下の点でさらに向上させる必要がある。まず、 Q 値について述べる。上記従来技術 1 において Q 値はおよそ500である。この値から、波長の光における光共振器の波長分解能が $1/Q$ で求められる。例えば、 $1.55\ \mu\text{m}$ 帯の波長における上記光共振器の波長分解能は約3nmとなる。しかし、高密度波長分割多重方式の光通信に用いるためには、波長分解能をおよそ0.8nm以下、 Q 値をおよそ2000以上にしなければならない。従来技術 1 において Q 値を向上させることに対する障害要因として、点欠陥を導入することによって面直方向への光のエネルギーの損失が増大することが考えられる。

【 0 0 1 1 】2次元面の片側の面からのみ光を取り出すために点欠陥に上下非対称性を導入することがある(従来技術 1)。また、円形の点欠陥から取り出される光は

無偏光であるが、外部の光学系と結合させることなどの目的により、直線偏光した光が求められることがある。そこで、偏光波を取り出すために点欠陥に面内方向の非対称性が導入されることがある。しかし、点欠陥の非対称性も Q 値が低下する原因となる。

【 0 0 1 2 】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小型化が可能であり、かつ Q 値の高い、すなわち効率の高い光分合波器を得ることにある。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることも目的とする。

【 0 0 1 3 】

【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2次元フォトニック結晶光分合波器の第1の態様のものは、

- a)スラブ状の本体と、
- b)上記本体に周期的に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
- c)上記本体において、上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成される導波路と、
- d)上記導波路の近傍に設けられる、隣接する2個以上の欠陥によって形成されるクラスタ欠陥と、

を備えることを特徴とする。

【 0 0 1 4 】また、本発明に係る2次元フォトニック結晶光分合波器の第2の態様のものは、

- a)スラブ状の本体と、
- b)上記本体内に設けられた2以上の禁制帯領域と、
- c)各禁制帯領域内において、各禁制帯領域毎に異なる周期で周期的に本体に配列された複数の、本体とは屈折率の異なる領域と、
- d)各禁制帯領域内において上記異屈折率領域の欠陥を線状に設けることにより形成され、全禁制帯領域を通過するように設けられる導波路と、
- e)各禁制帯領域内において上記導波路の近傍に設けられる点状欠陥と、

を備えることを特徴とする。

【 0 0 1 5 】

【発明の実施の形態】まず、第1の態様について説明する。面内方向の大きさに比べて厚さが十分薄い板状体であるスラブが、本発明の2次元フォトニック結晶光分合波器の本体となる。この本体に、本体とは屈折率の異なる領域を周期的に配置する。この周期的な異屈折率領域の存在によりフォトニックバンドギャップが形成され、その範囲内のエネルギーを持つ光を存在させなくする。すなわち、それに対応する波長帯の光は本体を通過することができない。

【 0 0 1 6 】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低いもの及び高いもののいずれであってもよい。一般に、本体としては屈折率の高い材質が用いられることが多いので、異屈折率領域としては屈折率の低い材質のものを

いるのが材料選択の点からも容易である。

【0017】更に、低屈折率領域としては、本体よりも屈折率の低い物質を本体内に埋め込んだものでもよいし、単に本体に孔を開けただけのものでもよい。後者の場合は、空気が上記異屈折率領域となる。實際上、空気が最も屈折率の低い材質であるため、本体との屈折率差を大きくすることができるという点で有利である。また、製造上も、他の物質を埋め込むよりも単に空孔を設ける方が容易である。

【0018】以下、異屈折率領域が配置される周期的な点を格子点と呼ぶ。格子点の配列としては種々の形態が考えられるが、例えば正方格子状や三角格子状などが典型的なものである。

【0019】このような周期性を有するフォトニック結晶において、1個の格子点の異屈折率領域に欠陥を設けることにより、そこで周期性が乱される。欠陥のパラメータを適切に設定することにより、この周期性の乱れからフォトニックバンドギャップ中に欠陥準位が形成され、光の存在が許されない本体中に光の存在が許される点が生ずる。これを点欠陥と呼ぶ。このような欠陥を線状に設けることにより、本体中に光が通過し得る導波路を形成することができる。これを線欠陥と呼ぶ。線欠陥の形状は直線状に限らず、屈曲状や曲線状であってもよい。また、線欠陥の幅は格子点の列の1列分であってもよいし、複数列分であってもよい。

【0020】上記のように、異屈折率領域を空孔とした場合、その欠陥としては、空孔を本体の物質で埋めたもの、すなわち、その格子点に空孔を設けないもの、が最も便利である。もちろん、その空孔の径を大きくしたのも欠陥となる。格子点に空孔を設けないものはドナー型欠陥であり、空孔の径を大きくしたものはアクセプタ型欠陥である。

【0021】ここで、ドナー型欠陥とアクセプタ型欠陥について説明する。本発明では赤外線及び紫外線を含む光を対象としているため、屈折率で説明しているが、一般的にはフォトニック結晶は周期的な誘電率の差により形成される。従って、欠陥は、本体中に周期的に配置された異誘電率領域(格子点)の1個の誘電率を異なるものとする事により形成される。誘電率を通常の格子点の誘電率よりも高い値にしたものをドナー型欠陥、低い値にしたものをアクセプタ型欠陥と呼ぶ。上記のように、何らかの物質で作製された本体中に周期的に空孔を配置し、その内の1点に空孔を設けない(本体物質で埋める)という欠陥は、その格子点の誘電率を空気よりも高くすることであるため、ドナー型欠陥である。逆に、1点の孔の径を大きくすることは、その格子点の誘電率を低くすることであるため、アクセプタ型欠陥である。

【0022】異屈折率領域のうち、導波路の近傍にある、隣接する2個以上の格子点を欠陥とすることによって、1個の格子点のみから成る欠陥とは別異の特性を持

つ欠陥を形成する。以後、1個の格子点のみから成る欠陥を「点欠陥」と呼ぶ。従来技術1に記載されている欠陥は、この点欠陥である。それに対して、本願発明の第1の態様で使用される欠陥は、隣接する2個以上の格子点により形成される欠陥である。これを「クラスタ欠陥」と呼ぶ。また、「点欠陥」と「クラスタ欠陥」とを総称して「点状欠陥」と呼ぶ。これは、後述の第2の態様で使用する。

【0023】このような構成において、1個のクラスタ欠陥に含まれる格子点の個数や配列及びクラスタ欠陥の位置(導波路からの距離)、あるいは本体の格子定数 a などのパラメータを適切に設定することにより、クラスタ欠陥によりフォトニックバンドギャップ中に所望の欠陥準位が形成される。そして、導波路を通過する種々の波長の光のうち、欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光のみが欠陥位置において共振する。共振した光はフォトニック結晶の面直方向に放出される。所望の波長の光を得るためには、上記種々のパラメータを調節することによって、欠陥準位のエネルギーを適切に選ばばよい。

【0024】2個以上の欠陥を直線状に配置して形成したクラスタ欠陥の場合、欠陥位置においてクラスタ欠陥の幅方向の偏光が得られる。

【0025】クラスタ欠陥の形状に面直方向の非対称性を与えれば、2次元フォトニック結晶の上下に出力される光の出力を非対称にすることができる。非対称性を与えるための方法としては、本体の一方の面から本体の厚みの一部分にのみ異屈折率領域を設けることにより、異屈折率領域の欠陥とする方法が考えられる。その厚みの範囲としては、後述のように、5%~40%、特に20~30%が望ましい。

【0026】クラスタ欠陥の場合、その形状に面直方向の非対称性を与えるには、上記のように各格子点における非対称性に依る必要はない。例えば、隣接する2つの格子点から成るクラスタ欠陥に対して、その2つの格子点の中間の一点に上記操作(一方の面にのみ低屈折率領域を設ける)を行ってもよい。

【0027】ここまでは分波器としての作用を述べたが、上記構成を合波器として用いることもできる。欠陥準位のエネルギーに対応する波長の光をクラスタ欠陥の位置に導入すれば、導波路を流れる光に上記波長の光が合波される。

【0028】格子点の個数や配列が異なる2個以上のクラスタ欠陥を配置することによって、異なる2種以上の波長の光を分合波することもできる。

【0029】次に、第2の態様について説明する。第1の態様において、欠陥を設ける格子点の個数や配置を変えることによって分合波する光の波長を変えることができることを示した。そして、異屈折率領域としては空孔が有利であり、欠陥としてはその空孔を設けないというドナー型欠陥が有利であることを述べた。しかし、この

ようなドナー型欠陥は、空孔の径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型欠陥よりも波長変化の自由度が少ない。これは、アクセプタ型欠陥では空孔の大きさを任意に変化させることができるのに対して、ドナー型欠陥は単に格子点を本体物質で埋めるだけであり、そのような変化の自由度がないためである。上記本発明の第 1 の態様に従ってドナー型欠陥をクラスタ型とすることにより、それに含まれる格子点の数又は配置の形態を変えるという自由度は生じるが、それでも自由度の幅は限られている。ドナー型クラスタ欠陥におけるこのような問題は、本発明の第 2 の態様によって解決される。それを以下に詳しく述べる。

【0030】本発明の第 2 の態様は、本体に異屈折率領域を配する際に、本体を、分合波する波長の種類の数と同じ数の領域に分ける。以後、この領域を禁制帯領域と呼ぶ。そして、各禁制帯領域毎に異なる配列周期で上記異屈折率領域を配置する。

【0031】異屈折率領域は、本体よりも屈折率の低い材質によって形成されることが好ましく、空気によって形成される（すなわち、空孔である）ことがより好ましいという点は、第 1 の態様と同様である。

【0032】各禁制帯領域を通して光を通過させ、合波するために、上記禁制帯領域の全てを通る導波路を第 1 の態様と同様に形成する。さらに、上記禁制帯領域の各々に分合波用の点状欠陥を形成する。「点状欠陥」とは上記の通り、1 個の格子点のみから成る点欠陥と、複数個の隣接する点欠陥で構成されるクラスタ欠陥とを含むものである。各禁制帯領域に設ける点状欠陥は、互いに共振波長が異なるようにしておく。従って、 n 個の禁制帯領域で構成される 2 次元フォトニック結晶分合波器は、 n 種類の波長の光を分合波する。このように、1 つの 2 次元フォトニック結晶に複数の禁制帯領域を設けた構造を、面内ヘテロ構造と呼ぶ。

【0033】各禁制帯領域における異屈折率領域の配列周期と点状欠陥は、分合波する光の波長に対応して設定する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率も、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期と同じ比率とする。各禁制帯領域に同じ形状のクラスタ欠陥を配置すれば、禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の違いによって、各クラスタ欠陥は異なる波長を分合波する。もちろん、禁制帯領域毎に異なる格子点数又は形状のクラスタ欠陥を配置してもよい。クラスタ欠陥には第 1 の態様の種々の欠陥が使用可能である。

【0034】本発明の第 2 の態様は、特に、本体の周期構造である空孔を設けないというドナー型欠陥の場合に自由度を大きくするという目的で開発されたものであるが、この構成自体はアクセプタ型にも適用することができ、それに特有の利点を持つ。すなわち、1 個の格子点の空孔径を大きくすることにより形成されるアクセプタ型点欠陥を用いて異なる 2 種以上の波長の光を分合波し

ようとする場合、従来は 1 枚の本体内に径の異なる複数の空孔を導入していたが、これによって Q 値が低下するという問題があった。この Q 値の低下を回避するために、本発明の第 2 の態様を好適に適用することができる。すなわち、異なる禁制帯領域に、分合波する光の波長に対応して異なる配列周期で異屈折率領域を配置する。各禁制帯領域毎の異屈折率領域の大きさの比率、及び各禁制帯領域毎に配置するアクセプタ型点欠陥の大きさも、設定した各禁制帯領域毎の異屈折率領域の配列周期の比率と同じ比率とする。これにより、Q 値の低下を招くことなく、複数の波長の光を分合波することが可能となる。

【0035】

【発明の効果】上記第 1 の態様のクラスタ欠陥を導入することによって、1 個の格子点のみから成る点欠陥を用いる場合よりも高い Q 値を持つ分波器及び合波器を得ることができる。これは、クラスタ欠陥が形成されることにより、欠陥の周囲における有効屈折率が高くなり、光の閉じこめ効果が向上することによる。また、上下非対称性を導入した場合や偏光波を得る場合にも効率の高い光分合波器を得ることができる。

【0036】上記第 2 の態様の面内ヘテロ構造を導入することによって、ドナー型クラスタ欠陥を使用した場合においても、複数の波長の光を分合波する際の各波長を高い自由度で設定することができる。また、そのときの Q 値は、1 種類の波長の光を分合波するフォトニック結晶の Q 値とほとんど変わらない。高い Q 値を持つ第 1 の態様のドナー型クラスタ欠陥を用いて第 2 の態様を構成すれば、高い Q 値を持ち、かつ光の波長を分合波する装置を比較的容易に作製することができる。また、第 2 の態様はアクセプタ型欠陥に対しても有効に応用することができる。

【0037】

【実施例】(1) 第 1 の態様の実施例

(1-1) 構成

まず、第 1 の態様の実施例として、図 1 に模式的に示すような 2 次元フォトニック結晶を取り上げる。図 1 に板状に表したものがスラブ(本体) 1 1 である。光通信に用いる波長 $\lambda = 1.55 \mu\text{m}$ の赤外線考えた場合、スラブ 1 1 にはそれに対して透明な InGaAsP を用いることができる。そこに、白丸で示すように、異屈折率領域(低屈折率領域)である空孔 1 2 を周期的に配置する。図 1 では三角格子状に空孔 1 2 を配した例を示しているが、その他にも正方形格子状などの様々な配置が考えられる。

【0038】導波路 1 3 は、図 1 の実線の矢印で示した部分において空孔を線状に連続的に設けないことにより形成される。さらに白矢印で示した部分において複数の格子点に空孔を設けないことによって、ドナー型クラスタ欠陥 1 4 が形成される。図のうえでは、空孔で構成される格子点を本体物質で埋めたように表されるので、以

下では、ドナー型クラスタ欠陥を構成することを「格子点を埋める」と表現することがある。

【 0 0 3 9 】 図 1 においては 3 格子点を埋めたドナー型クラスタ欠陥の例を示したが、その他にも、図 2 に示すような様々なドナー型クラスタ欠陥の構成が考えられる。図 2 には、格子点を 2 ~ 3 個埋めた場合の構成を示した。図には示さないが、4 格子点以上を埋めたドナー型クラスタ欠陥も可能である。格子点を 3 個埋めた場合については 3 通りの構成を示している。このうち、欠陥を構成する 3 つの格子点が三角形に並ぶものを「三角形状欠陥」、直線上に並ぶものを「直線状欠陥」と呼ぶことにする。なお、図 2 には比較のために格子点 1 個だけで構成されるドナー型欠陥 (ドナー型点欠陥) も示した。

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial x} \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} \frac{\partial H_z}{\partial y} \right] + \frac{\omega^2}{c^2} H_z = 0 \quad (1)$$

と表される。ここで k は光の角振動数、 $H_z = H_z(x, y, z)$ は面内における z 方向の磁界 (H_x, H_y は 0)、 c は光速である。また、 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ はここでは周期的な誘電率を表す。 $\epsilon_r(\mathbf{r})$ をフーリエ級数展開し、 $H_z(x, y, z)$ をプロック

$$\frac{1}{\epsilon_r(\mathbf{r})} = \sum_{\mathbf{G}} \kappa(\mathbf{G}) \exp\{j\mathbf{G} \cdot \mathbf{r}\}$$

$$H_z(\mathbf{x}, \omega) = \sum_{\mathbf{G}} h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \exp\{j(\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot \mathbf{r}\} \quad (2)$$

となる。ただし、 \mathbf{k} は波数ベクトルであり、 \mathbf{G} は逆格子ベクトルである。また、 $\kappa(\mathbf{G})$ 及び $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ はそれぞれ展開係数である。式(2)を式(1)に代入し、任意の \mathbf{G} に対する $h(\mathbf{k}, \mathbf{G})$ について解くと、

$$\sum_{\mathbf{G}'} (\mathbf{k} + \mathbf{G}) \cdot (\mathbf{k} + \mathbf{G}') \kappa(\mathbf{G} - \mathbf{G}') h(\mathbf{k}, \mathbf{G}') = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 h(\mathbf{k}, \mathbf{G}) \quad (3)$$

となる。したがって、特定の波数ベクトル \mathbf{k} を与えると固有値として $(\omega/c)^2$ が求められ、対応する周波数、すなわち対応するエネルギーが定まる。様々な波数ベクトル \mathbf{k} に対応する周波数 ω を求めることで、フォトニックバンド構造が計算される。

【 0 0 4 5 】 式(3)を用いて、まず導波路を有し点欠陥を持たない 2 次元フォトニック結晶に対して、TEモードについて導波路を伝播する周波数領域を計算した結果を図 3 に示す。なお、図 3 の右図は左図の一部を拡大したものである。図 3 より、0 次モード (図中の黒丸) と 1 次モード (同白丸) の 2 つの導波モードが伝播可能であるが、単一モードであること及び外部の系との兼ね合いから、0 次モードの方が効率が良く考えられる。また、図中に「ライトライン」と記された実線よりも高周波側の光は、自由空間に存在する同じ周波数で同じ面内波数をもつモードに結合して上下方向に漏れ出してしまい、伝播効率が低下する。以上より、図 3 の右図に黒丸と細実線で示した、規格化周波数 0.267 ~ 0.280 の範囲の光が

【 0 0 4 0 】 (1-2) 光分合波できることの確認

上記構成によって実際に光を分合波できるかどうかを確認する。そのためにまず、導波路が通すフォトニックバンドギャップ中の光の波長帯を調べ、次にその光の波長帯の中にドナー型欠陥によって欠陥準位が形成されるかどうかを調べる。その手段として、2次元平面波展開法と呼ばれる解析手法を用いた。

【 0 0 4 1 】 平面波展開法とは、誘電率分布が周期構造をもつ空間を伝播する光を、平面波の合成として表す方法である。電界が面内方向に振動し磁界が面直方向に振動する TE モードを考えると、電磁気のマクスウェル方程式は磁界について、

【 0 0 4 2 】

【 数 1 】

の定理により展開すると、それぞれ、

【 0 0 4 3 】

【 数 2 】

(\mathbf{k}, \mathbf{G}) について解くと、

【 0 0 4 4 】

【 数 3 】

最も効率よく当該導波路を伝播すると考えられる。言い換えれば、所望の光の周波数が規格化周波数 0.267 ~ 0.280 の範囲に入るように格子定数 a を決定すればよい。例えば、本体の材質として InGaAsP を使用し、波長 1.55 μm の光を用いるものとして計算した場合、上記規格化周波数の範囲から格子定数 a を 0.42 ~ 0.43 μm とすればよいことがわかる。

【 0 0 4 6 】 図 2 に示した欠陥のうち、格子点を 2 個埋めたものと、三角形状及び直線状に 3 個埋めたクラスタ欠陥について、それぞれ欠陥準位を計算した。また、比較のために格子点を 1 個だけ埋めたドナー型点欠陥についても計算を行った。それらの結果を図 4 ~ 図 7 に示す。まず、比較例であるドナー型点欠陥の場合は、図 4 のように、上記の導波路を伝播する周波数領域 0.267 c/a ~ 0.280 c/a (以後、利用可能周波数域と称する) の間に欠陥準位が形成されないため、分合波器としては用いることができない。

【 0 0 4 7 】 それに対して、隣接する 2 個の格子点を埋

10

20

40

50

めたクラスタ欠陥の場合は、図 5 のように利用可能周波数域に欠陥準位が 1 つだけ形成されるので、分合波器として用いることができる。3 個の格子点を三角形に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図 6 のように利用可能周波数域に欠陥準位が複数形成されるが、そのうち規格化周波数 0.268 付近にある欠陥準位は単一であり、かつそれより高周波側の欠陥準位との間隔が十分離れているので、分合波器として用いることができる。3 個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めたクラスタ欠陥の場合は、図 7 のように利用可能な周波数域に欠陥準位が 1 つだけ形成されるので、分合波器として用いることができる。

【 0 0 4 8 】上記において分合波器として用いることができることが明らかになった、隣接する 2 個の格子点を埋めた場合、3 個の格子点を三角形に埋めた場合および 3 個の格子点を導波路に平行な直線状に埋めた場合について、電磁界分布を計算した結果を図 8 及び図 9 に示す。この図において、矢印は図面に平行な方向の電界ベクトルを示し、色の濃淡は図面に垂直な方向の磁界の振幅を示している。2 個の格子点を埋めた場合及び 3 個の格子点を直線状に埋めた場合には、当該欠陥において共振する光は、埋めた格子点列に伝播するようなモードである。また、埋めた格子点列に垂直な方向の電界が強くなり、直線偏光に近い特性を持つと考えられる。一方、3 個の格子点を三角形に埋めた場合には、三角形の重心から各頂点に向かって伝播するような共振モードを示しており、電磁界分布の対称性が高く、偏光性が上記 2 つの場合ほどは大きくないと考えられる。

【 0 0 4 9 】(1-3)Q 値の算出

次に、前段落で取り上げた 3 つの場合について、Q 値の計算を行った。その際、Yee のアルゴリズムによる時間領域差分法 (K.S.Yee, "IEEE Trans. Antennas Propagat.", AP-14 巻 302-307 ページ) を用い、放射される電磁波の強度について欠陥準位付近における周波数依存性を計算し、そのピーク強度と半値全幅から Q 値を求めた。

【 0 0 5 0 】2 次元フォトニック結晶における Q 値は、点欠陥と導波路との結合を表す Q_p と、点欠陥と外部 (面外) との結合を表す Q_s で決まる。このうち Q_p は点欠陥と導波路との距離によって決まる。そこで、点欠陥の種類による Q 値の違いを調べるために、まず点欠陥と導波路との距離を無限大と仮定し、 Q_s について計算した。その結果、2 個の格子点を埋めた場合は $Q_s=1354$ 、3 個の格子点を三角形に埋めた場合は $Q_s=2529$ 、3 個の格子点を直線状に埋めた場合は $Q_s=5215$ となった。一方、従来技術 1 のアクセプタ型点欠陥について同様に Q_s を求めると 924 であった。

【 0 0 5 1 】この結果、ドナー型クラスタ欠陥の Q 値がアクセプタ型点欠陥のそれよりも向上することが期待され、その中でも特に 3 個の格子点を直線状に埋めた場合がもっとも Q 値が高くなると期待される。そこで、3 個

の格子点を直線状に埋めた場合について、 Q_s 及び Q_p の、点欠陥 - 導波路間の距離依存性を求めた結果を図 1 0 に示す。ここで図 1 0 の横軸は、空孔の列の数を単位として、格子点を直線状に埋めた列と導波路との距離を表している。Q 値は Q_s と Q_p を用いて $1/Q=1/Q_s+1/Q_p$ で求められるので、図 1 0 から Q 値は図 1 1 のように求められる。Q 値は 2012 ~ 4666 となり、いずれも従来技術 1 の Q 値 ~ 500 よりも大幅に向上している。

【 0 0 5 2 】図 1 1 によれば、点欠陥と導波路との距離が増大するにつれて Q 値は大きくなる。しかし、その距離が大きくなりすぎると、分波器の場合は点欠陥に到達する光が減少し、合波器の場合は導波路に到達する光が減少するので、分合波器としては不都合である。そこで上記距離は、Q 値と点欠陥 - 導波路間の光のやりとりとの兼ね合いを考慮して、適切に選ぶ必要がある。最も効率がよいと考えられるのが、 $Q_p=Q_s$ のときである。図 1 2 より、この条件に最も近いのは、点欠陥が、導波路から空孔列の数で 4 列目にある場合である。

【 0 0 5 3 】前段落においては分合波器としての効率を考えたが、意図的に Q_p を大きく、 Q_s を小さくすれば、導波路を流れる特定の波長の光をわずかに取り出してモニタする、波長検出デバイスとして用いることもできる。

【 0 0 5 4 】(1-4) 偏光特性

(1-2) で述べたように、2 個の格子点を埋めた場合及び 3 個の格子点を直線状に埋めた場合には、放出光の直線偏光性が高いことが期待される。そこで、3 個の格子点を直線状に埋めた場合について放出光の偏光特性を計算した。その結果を図 1 3 に示す。図 1 3 の横軸は埋められた格子点の列に対する面内方向の角度であり、縦軸はその角度における光の振幅に対応する。上記角度が 0° の方向では振幅がほとんど 0 になり、上記角度が 90° の方向で振幅が最大になる。すなわち、埋められた格子点の列に垂直な方向に強く偏光していることがわかる。

【 0 0 5 5 】(1-5) ドナー型クラスタ欠陥における上下出力割合の制御

以上においては、点欠陥は面直方向に上下対称とした。すなわち、一格点における低屈折率の物質を全て埋めた場合を考えた。この場合、面の上下方向共に、点欠陥から光が放出される。

【 0 0 5 6 】ここでは、ドナー型クラスタ欠陥の形状に図 1 4 のような上下非対称性を入れた場合について計算した。図 1 4 の例は、本体の厚さを $0.6a$ とし、3 個の格子点を直線状に埋め、埋められた各格子点の中間 (2 箇所) に半径 $r=0.29a$ 、深さ $h (< 0.6a)$ の孔を開けたものである。深さを格子定数で規格化した h/a と上下出力比の関係についての計算結果を図 1 5 に示す。この図に示した h/a の範囲 (0.05 ~ 0.4) において、欠陥の上下の出力に非対称性が見られる。特に、 h/a が 0.2 ~ 0.4 の範囲で約 2 倍強の上下出力比が得られていることが分かる。また、 h/a と Q 値の関係を図 1 6 に示す。上下出力比が大きい領

域でQ値の低下が見られるが、それでも従来技術 1 よりも高いQ値が得られた。

【 0 0 5 7 】 (2) 第 2 の態様の実施例

第 2 の態様の実施例として、面内ヘテロ構造の構成例を図 1 7 に示す。この図は 2 つの禁制帯領域から成る面内ヘテロ構造を表している。図中央の一点鎖線を境に、空孔（低屈折率物質）の配列周期が a_1 である結晶と同周期が a_2 である結晶が接合されて構成されている。以下、配列周期が a_1 の禁制帯領域を第 1 禁制帯領域、配列周期が a_2 の禁制帯領域を第 2 禁制帯領域と呼ぶ。第 1 禁制帯領域における空孔の直径を b_1 、第 2 禁制帯領域における空孔の直径を b_2 とする。一点鎖線の両側の導波路が同じ直線上に揃えられる。第 1 禁制帯領域及び第 2 禁制帯領域に同じ形状のドナー型クラスタ欠陥を形成する。以上の構成において、 a_1/a_2 と b_1/b_2 を等しくする。ドナー型クラスタ欠陥の大きさは空孔の配列周期によって決まるので、第 1 禁制帯領域のドナー型クラスタ欠陥の大きさと第 2 禁制帯領域ドナー型クラスタ欠陥のドナー型クラスタ欠陥の大きさの比も a_1/a_2 と等しい。

【 0 0 5 8 】 なお、ここではドナー型クラスタ欠陥の例を示したが、点欠陥は図 1 8 に示すようなアクセプタ型点欠陥でもよい。この場合、第 1 禁制帯領域に直径 c_1 の 1 個のアクセプタ型点欠陥、第 2 禁制帯領域に直径 c_2 の 1 個のアクセプタ型点欠陥を設ける。 a_1/a_2 、 b_1/b_2 、 c_1/c_2 は全て等しくする。

【 0 0 5 9 】 図 1 7 および図 1 8 の構造について、 a_1 と a_2 が等しい場合、 a_1 が a_2 よりも 1% 大きい場合及び a_1 が a_2 よりも 1% 小さい場合についてQ値を計算した。ここで $\pm 1\%$ 、計 2% の構造の違いは、 $1.55 \mu\text{m}$ 帯において 30nm の共鳴波長の違いに相当する。本計算においては、 $b_1=0.29a_1$ 、 $b_2=0.29a_2$ 、 $c_1=0.54a_1$ 、 $c_2=0.54a_2$ とした。Q値の計算結果を図 1 9 に示す。図 1 7 および図 1 8 では、 $(1-a_2/a_1)$ を構造変化率と定義して用いた。ドナー型クラスタ欠陥を用いた場合は、Q値が 2885 ~ 2891 となり、十分な大きな値が得られている。アクセプタ型点欠陥を用いた場合は、従来技術 1 のアクセプタ型の 2 次元フォトニック結晶のQ値と同程度の値が得られた。構造の違いによる大きなQ値の低下は見られない。

【 0 0 6 0 】 (3) 本発明第 1 及び第 2 の態様の 2 次元フォトニック結晶の製造方法の例

2 次元フォトニック結晶の製造方法については、上記従来技術 1 に関して、低屈折率物質として空気を用いる場合の製造方法が特開 2001-272555 号公報の [0037] ~ [0044] に開示されている。まず、その方法を簡単に説明する（詳細は上記公報を参照）。基板上に本体となるスラブの材質の結晶を成長させ、スラブを形成する。目的とする光の波長帯が $1.55 \mu\text{m}$ 帯の場合は、例えば InGaAsP をスラブの材質に用いることができる。スラブの面上にフォトレジストを塗布し電子線を照射することにより、低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥に対応するパターンを描

画する。その面をガスエッチングすることによって低屈折率物質及びアクセプタ型点欠陥が形成される。

【 0 0 6 1 】 本発明の第 1 の態様の 2 次元フォトニック結晶を製造する場合には、上記製造方法において、パターンを描画する際にドナー型クラスタ欠陥を配置する個所に電子線を照射しないことによって、ドナー型クラスタ欠陥を導入する。また、本発明の第 2 の態様の面内ヘテロ構造を導入する場合にも、それに対応したパターンを描画すればよい。

10 【図面の簡単な説明】

【図 1】 本発明の第 1 の態様である、ドナー型クラスタ欠陥を持つ 2 次元フォトニック結晶の模式図。

【図 2】 ドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図 3】 導波路を導波する光の周波数帯を示す図。

【図 4】 格子点を 1 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図 5】 格子点を 2 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

20 【図 6】 格子点を三角形に 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図 7】 格子点を直線状に 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥による欠陥準位を示すグラフ。

【図 8】 格子点を 2 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図 9】 格子点を 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の周囲における電磁界分布を示すグラフ。

【図 10】 欠陥位置と Q_p 及び Q_s の関係を示すグラフ。

【図 11】 欠陥位置とQ値との関係を示す表。

30 【図 12】 欠陥位置と Q_p/Q_s の関係を示すグラフ。

【図 13】 格子点を直線状に 3 個埋めたドナー型クラスタ欠陥の偏光特性を示すグラフ。

【図 14】 上下非対称なドナー型クラスタ欠陥の構成例を示す模式図。

【図 15】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と光の上下出力比の関係を示すグラフ。

【図 16】 点欠陥に開けられた孔の深さ h と共振器のQ値の関係を示すグラフ。

40 【図 17】 ドナー型クラスタ欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図 18】 アクセプタ型点欠陥を有する面内ヘテロ構造の一例を示す模式図。

【図 19】 面内ヘテロ構造とQ値との関係を示す表。

【符号の説明】

1 1 ... 本体

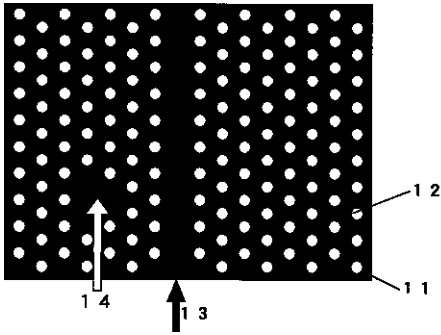
1 2 ... 空孔

1 3 ... 導波路

1 4 ... ドナー型クラスタ欠陥

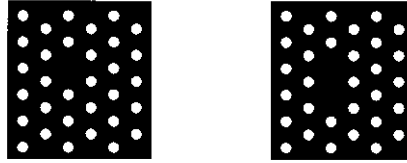
1 5 ... アクセプタ型点欠陥

【図 1】

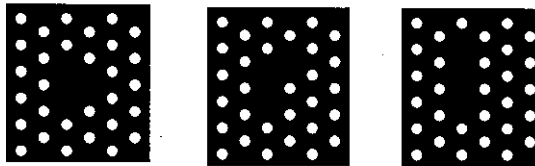


【図 2】

1 格子点を埋めた場合 (比較例) 2 格子点を埋めた場合



3 格子点を埋めた場合

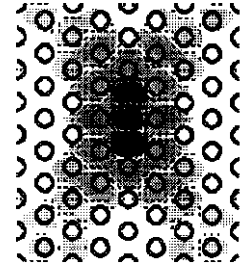


パターン 1
三角形欠陥

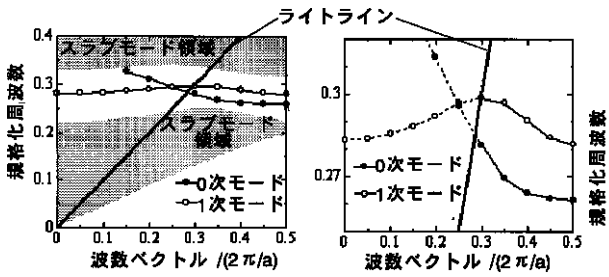
パターン 2

パターン 3
直線状欠陥

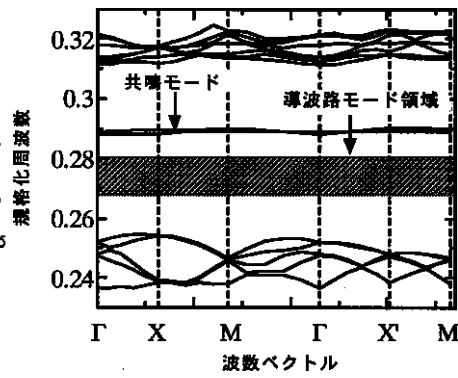
【図 8】



【図 3】



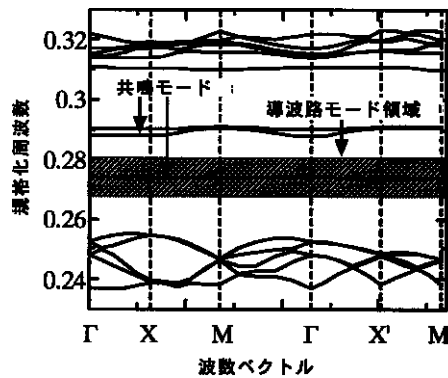
【図 4】



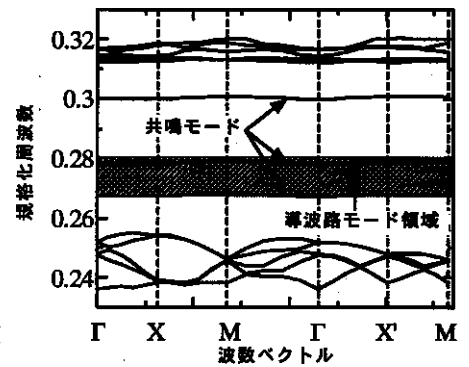
【図 11】

欠陥の位置	共振周波数	Q
3 列目	0.26790	2012
4 列目	0.26745	2651
5 列目	0.26735	3885
6 列目	0.26733	4666

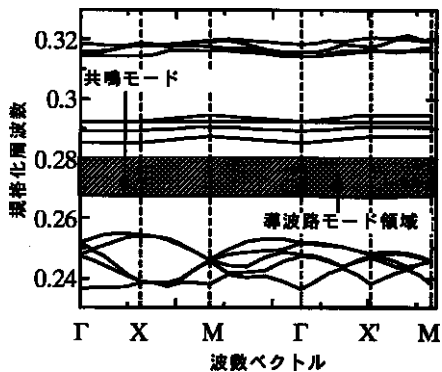
【図 5】



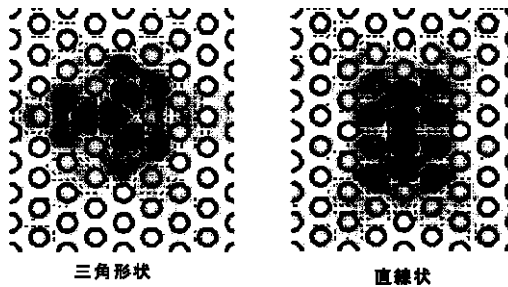
【図 6】



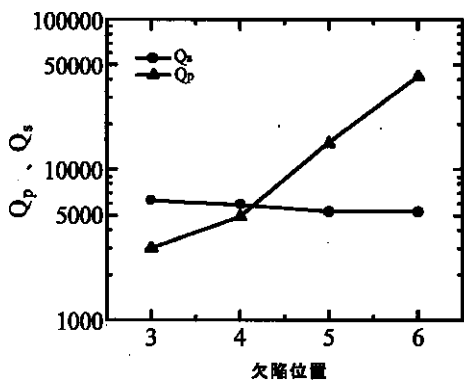
【 図 7 】



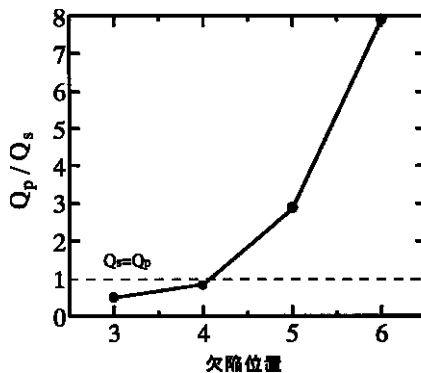
【 図 9 】



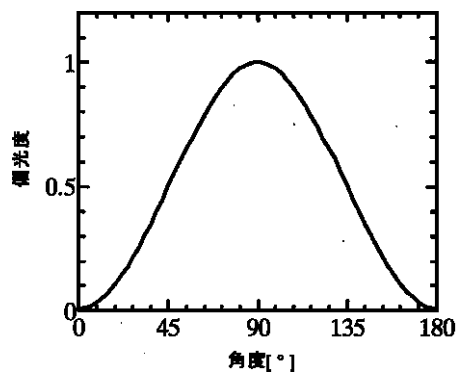
【 図 1 0 】



【 図 1 2 】



【 図 1 3 】



【 図 1 9 】

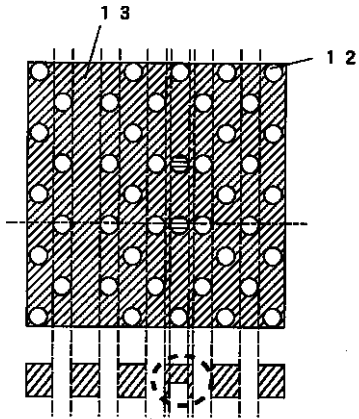
ドナー型クラスタ欠陥

構造変化率	共振周波数	Q	Q _v	Q _p	Q _p / Q _v
-1%	0.266649c/a ₂ (+0.69%)	2891	5039	6784	1.34
0%(参考)	0.2675c/a ₁	2651	5769	4904	0.85
1%	0.26849c/a ₂ (-0.62%)	2885	5206	6474	1.24

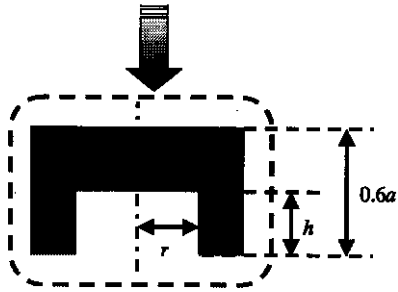
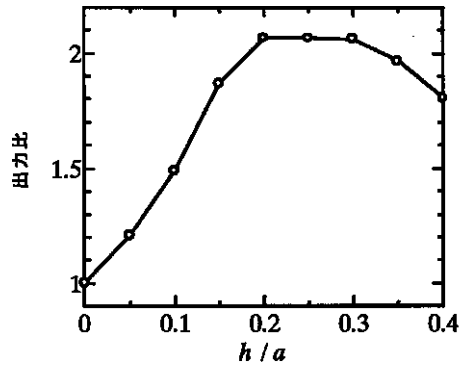
アクセプタ型点欠陥

構造変化率	共振周波数	Q	Q _v	Q _p	Q _p / Q _v
-1%	0.2719c/a ₂ =0.27462 c/a ₁	470	975	906	0.93
0%(参考)	0.2728c/a ₁	482	1040	899	0.86
1%	0.2738c/a ₂ =0.27101 c/a ₁	484	958	978	1.02

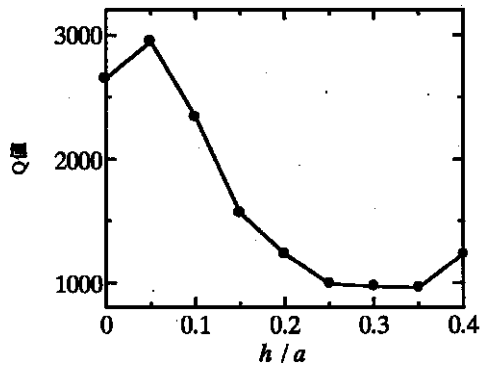
【 図 1 4 】



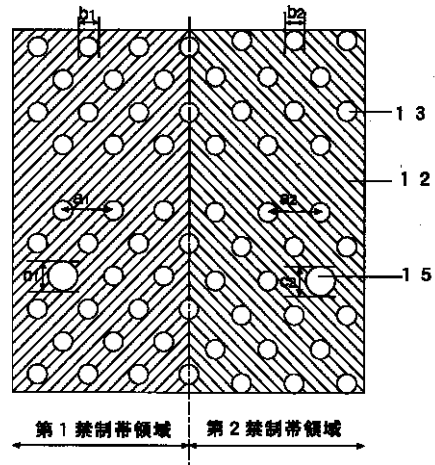
【 図 1 5 】



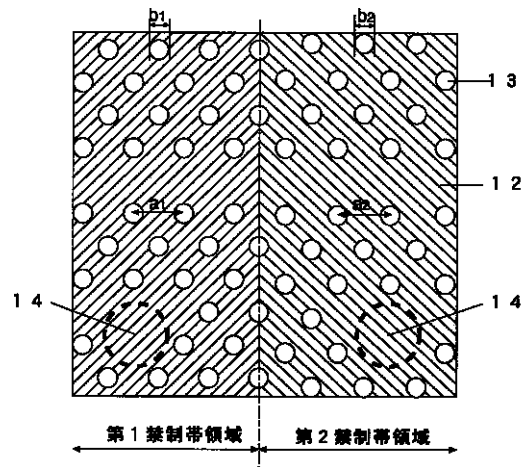
【 図 1 6 】



【 図 1 8 】



【 図 1 7 】



フロントページの続き

(56)参考文献 特表2001 - 508887 (J P , A)

(58)調査した分野(Int.Cl.⁷, D B 名)
G02B 6/12