

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6777565号
(P6777565)

(45) 発行日 令和2年10月28日 (2020. 10. 28)

(24) 登録日 令和2年10月12日 (2020. 10. 12)

(51) Int.Cl. F I
G O 2 B 6/122 (2006.01) G O 2 B 6/122 3 O 1

請求項の数 6 (全 15 頁)

(21) 出願番号	特願2017-27961 (P2017-27961)	(73) 特許権者	000004226
(22) 出願日	平成29年2月17日 (2017. 2. 17)		日本電信電話株式会社
(65) 公開番号	特開2018-132726 (P2018-132726A)		東京都千代田区大手町一丁目5番1号
(43) 公開日	平成30年8月23日 (2018. 8. 23)	(74) 代理人	100098394
審査請求日	平成30年12月21日 (2018. 12. 21)		弁理士 山川 茂樹
(出願人による申告) 平成28年度、国立研究開発法人 科学技術振興機構、新たな光機能や光物性の発現・利活 用を基軸とする次世代フォトニックスの基盤技術、産業技 術力強化法第19条の適用を受ける特許出願		(74) 代理人	100153006
			弁理士 小池 勇三
		(74) 代理人	100064621
			弁理士 山川 政樹
		(72) 発明者	倉持 栄一
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日 本電信電話株式会社内
		(72) 発明者	納富 雅也
			東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日 本電信電話株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 フォトニック結晶光共振器

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

板状の基部および前記基部に対象とする光の波長以下の間隔で周期的に三角格子状に設けられて前記基部とは異なる屈折率とされて前記基部を貫通する円柱状の同一形状の複数の格子要素を備えるフォトニック結晶本体と、

前記フォトニック結晶本体に設けられて、前記格子要素によるフォトニック結晶の前記格子要素がない部分から構成された点欠陥による光閉じ込め部と、

前記格子要素によるフォトニック結晶のΓ-K結晶方位方向に長手方向が延在して前記光閉じ込め部における前記基部に埋め込まれて設けられ、前記基部より屈折率の低い埋め込み構造体とを備え、

前記埋め込み構造体は、直方体、矩形断面、面取りされた矩形断面のいずれかの形状を有し、

前記光閉じ込め部による共振器の共振モードの1つは前記埋め込み構造体の内部に1つのみの電界のアンチノードを有する状態とされていることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

【請求項2】

請求項1記載のフォトニック結晶光共振器において、

前記光閉じ込め部は、フォトニック結晶の前記格子要素が1つ取り除かれた点欠陥により構成されることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

【請求項3】

請求項 1 または 2 記載のフォトニック結晶光共振器において、
前記光閉じ込め部を中心としてこの左側に隣り合う前記埋め込み構造体の長手方向の直線上に 1 つの前記格子要素をおいて連続する第 1 格子要素、第 2 格子要素と、
前記光閉じ込め部を中心としてこの右側に隣り合う前記埋め込み構造体の長手方向の直線上に 1 つの前記格子要素をおいて連続する第 3 格子要素、第 4 格子要素と
を備え、
前記第 1 格子要素、前記第 2 格子要素、および前記第 3 格子要素、前記第 4 格子要素のうち少なくとも 1 つは、前記直線上で前記光閉じ込め部を中心として対称となる外側ヘシフトしている
ことを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

10

【請求項 4】

請求項 3 記載のフォトニック結晶光共振器において、
前記シフトの量は、結晶周期の $0.05 \sim 0.2$ 倍の範囲とされていることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

【請求項 5】

請求項 1 ～ 4 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶光共振器において、
前記埋め込み構造体の $\Gamma - K$ 結晶方位方向の長さは、結晶周期の $0.75 \sim 1.25$ 倍の範囲とされていることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

【請求項 6】

請求項 1 ～ 5 のいずれか 1 項に記載のフォトニック結晶光共振器において、
前記埋め込み構造体の $\Gamma - K$ 結晶方位方向に直交する方向の長さは、結晶周期の $1/20 \sim 1/8$ の範囲とされていることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

20

【発明の詳細な説明】**【技術分野】****【0001】**

本発明は、フォトニック結晶光共振器に関する。

【背景技術】**【0002】**

フォトニック結晶は、屈折率の異なる 2 種類以上の媒体からなる周期結晶構造を有する人工素材であり、光の伝播・屈折・反射の制御や光の捕獲などの機能を有している。フォトニック結晶の中には、光の波長のスケールの非常に小さいモード体積 V を有する光共振器を配置することが可能である。特に、フォトニック結晶光共振器は、光を閉じ込める性能の指標である Q 値（格子捕獲時間の逆数に比例）が高く、同時にモード体積 V が極めて小さい共振モードを実現できるため、光物質相互作用を著しく増強することが可能になる。実際、フォトニック結晶光共振器は、主に共振器電磁気学(cavity quantum electrodynamics: c Q E D)において多くの重要な学術成果を挙げた。

30

【0003】

原子や分子を対象とした c Q E D 用途においては、共振器により閉じ込められている共振モードの電界のアンチノード(antinode/腹)部分が空洞になっており、ここに原子や分子を配置あるいは捕獲できるようになっていることが望ましい。加えて、極めて狭い空気のない真空スロット構造を配置した屈折率の高い媒体（屈折率 n が 2 よりも大きい）からなる光導波路においては、空気スロット部分に電界が集中して強度が著しく増強される効果が知られている。

40

【0004】

このスロット構造を超高 Q 値が実現可能なモードギャップ共振器と組み合わせることで、スロット内における電界強度の大きな増強を伴いながら、 Q 値を 10^6 以上、 Q/V を 10^8 以上にすることが理論上可能であることが非特許文献 1 に報告されている。この、設計により、実際に Q 値 1 万程度のフォトニック結晶スロット共振器が実現されている。

【0005】

上述したスロットを用いるフォトニック結晶光共振器は、 Q 値が高くモード体積 V の絶

50

対値も小さい。しかしながら、スロットの長さが光の波長の数倍程度と比較的長く、スロットの光閉じ込め領域内には複数の電界アンチノードが含まれている。

【0006】

スロットを配置したフォトニック結晶光共振器は、c Q E D用途以外にも有用な用途がある。スロット部分の微小な屈折率変化に共振波長などが敏感に変化するため、屈折率センサとして有望である。更に、マイクロ～サブマイクロスケールにおいて、微小な物体、またDNAなどの生体関連高分子の検出に用いるセンサとしての応用が期待されている。

【0007】

また、スロットを配置したフォトニック結晶光共振器において、スロット内に空気/真空の代わりに、共振器を構成する高屈折率媒体に対し十分屈折率の低い(n が1.6以下)媒体を充填しても、空気/真空の場合と同様にスロット部分への電界の集中と増強、更に非常に小さいモード体積 V が実現可能である。一般に、低屈折率媒体のみで波長以下のサイズへの強い電界の集中を実現することは困難であり、高屈折率媒体中のスロット構造と組み合わせる手法は、それを実現する1つの有力な手段である。

【0008】

光非線形効果や光増幅などの機能性を有する低屈折率媒質をスロット部分に充填し、ここを活性層とする光共振器デバイスを作成すれば、高い Q/V による光物質相互作用の増強により、特に非常に低エネルギーで動作するデバイスや、極めてエネルギー効率の高いデバイスを実現することが原理的に可能となる。

【0009】

周期結晶構造を2次元の三角格子としたフォトニック結晶(2次元フォトニック結晶光共振器)において、周期的に配置されている穴からなる格子要素を1つ取り除いた光閉じ込め構造により、共振器が構成できる。格子要素を取り除いた箇所は、点欠陥と呼ばれている。上述した1つの点欠陥による共振器の構造は、結晶の六回対称性を有し、H1共振器と呼ばれている。なお、性能を高めるため、対称性を崩すような弱い変調を加えた構成もある。

【0010】

H1共振器における単極子(monopole)モードは、共振器中央の点欠陥部分が電界のアンチノードになる特徴を有するため、点欠陥部分の媒体との光物質相互作用を共振器により効率的に増強できる。双極子(dipole)および六重極子(hexapole)共振モードについては、共振器 Q 値を非常に高くできる設計が非特許文献2に示されている。スロットを配置しない従来の設計において、H1共振器のモード体積 V は、 $0.125(\lambda/n)^3$ を下回ることはない。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0011】

【非特許文献1】T. Yamamoto, M. Notomi, H. Taniyama, E. Kuramochi, Y. Yoshikawa, Y. Torii, and T. Kuga, "Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab", Optics Express, vol. 16, no. 18, pp. 13809-13817, 2008.

【非特許文献2】H. Takagi, Y. Ota, N. Kumagai, S. Ishida, S. Iwamoto, and Y. Arakawa, "High Q H1 photonic crystal nanocavities with efficient vertical emission", Optics Express, vol. 20, no. 27, pp. 28292-28300, 2012.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

上述したスロットを用いた2次元フォトニック結晶光共振器(2次元フォトニック結晶スロット共振器)では、理論上の Q 値が100万を超える設計であっても、実際に作成された共振器において共振器 Q 値を10万以上にすることは困難であった。

【0013】

従来のQ値の高い2次元フォトリック結晶スロット共振器においては、非特許文献1およびそれをベースとする設計を除き、スロット構造は少なくとも2つ以上の結晶穴と接触あるいは貫通する形で設けられていた。この2次元フォトリック結晶スロット共振器では、単一の電界アンチノードのみに強く光を集中させ、かつ高い共振器Q値を実現することは困難であった。

【0014】

一方、非特許文献1をベースとするスロット共振器においては、結晶穴との接触はないものの、複数の電界アンチノードを含む非常に長いスロットを必要とした。フォトリック結晶の穴から完全に分離された、1つの電界アンチノードのみを含む微小なスロットを有する共振器において、Q値が高くなる設計はこれまで示されていなかった。

10

【0015】

従来知られている2次元フォトリック結晶スロット共振器では、一般にスロットが光の波長に対してはるかに長く、スロット中に多くの電界アンチノードが含まれるため、どのアンチノードと原子が相互作用しているのかを知ることは実験上困難であり、原子の位置にスロット内のアンチノードの個数分のあいまいさがあった。2次元フォトリック結晶スロット共振器をセンサとして応用する場合、電界強度の強いアンチノードがスロット内に複数分布することが、位置分解能の制約となっていた。

【0016】

また、これまでに知られているH1共振器の設計において、Q値が1万を超える単極子共振モードを実現することは困難であった。一方、双極子および六重極子共振モードについては、Q値を高くすることは可能であるが、共振器の対称性により共振器の中心が電界のノードとなるため、H1共振器では光が閉じ込められる点欠陥部分が小さいこととあわせ、共振器による光物質相互作用増強効果が制約される問題があった。

20

【0017】

上述したように、従来では、2次元フォトリック結晶光共振器において、高いQ値と単一のアンチノードへの電界集中とを両立できないという問題があった。

【0018】

本発明は、以上のような問題点を解消するためになされたものであり、2次元フォトリック結晶光共振器において、高いQ値と単一のアンチノードへの電界集中とが両立できるようにすることを目的とする。

30

【課題を解決するための手段】

【0019】

本発明に係るフォトリック結晶光共振器は、板状の基部および基部に対象とする光の波長以下の間隔で周期的に三角格子状に設けられて基部とは異なる屈折率とされて基部を貫通する円柱状の同一形状の複数の格子要素を備えるフォトリック結晶本体と、フォトリック結晶本体に設けられて、格子要素によるフォトリック結晶の格子要素がない部分から構成された点欠陥による光閉じ込め部と、格子要素によるフォトリック結晶の Γ -K結晶方位方向に長手方向が延在して光閉じ込め部における基部に埋め込まれて設けられ、基部より屈折率の低い埋め込み構造体とを備え、埋め込み構造体は、直方体、矩形断面、面取りされた矩形断面のいずれかの形状を有し、光閉じ込め部による共振器の共振モードの1つは埋め込み構造体の内部に1つのみの電界のアンチノードを有する状態とされている。

40

【0020】

上記フォトリック結晶光共振器において、光閉じ込め部は、フォトリック結晶の格子要素が1つ取り除かれた点欠陥により構成されればよい。

【0021】

上記フォトリック結晶光共振器において、光閉じ込め部を中心としてこの左側に隣り合う埋め込み構造体の長手方向の直線上に1つの格子要素をおいて連続する第1格子要素、第2格子要素と、光閉じ込め部を中心としてこの右側に隣り合う埋め込み構造体の長手方向の直線上に1つの格子要素をおいて連続する第3格子要素、第4格子要素とを備え、第1格子要素、第2格子要素、および第3格子要素、第4格子要素のうち少なくとも1つは

50

、直線上で光閉じ込め部を中心として対称となる外側へシフトしている。

【0022】

上記フォトニック結晶光共振器において、シフトの量は、結晶周期の0.05～0.2倍の範囲とされていればよい。

【0023】

上記フォトニック結晶光共振器において、埋め込み構造体の Γ -K結晶方位方向の長さは、結晶周期の0.75～1.25倍の範囲とされていればよい。
ることを特徴とするフォトニック結晶光共振器。

【0024】

上記フォトニック結晶光共振器において、埋め込み構造体の Γ -K結晶方位方向に直交する方向の長さは、結晶周期の $1/20 \sim 1/8$ の範囲とされていればよい。

【発明の効果】

【0025】

以上説明したように、本発明によれば、格子要素によるフォトニック結晶の Γ -K結晶方位方向に長手方向が延在して光閉じ込め部における基部に埋め込まれて設けられ、基部より屈折率の低い埋め込み構造体を備えるようにしたので、2次元フォトニック結晶光共振器において、高いQ値と単一のアンチノードへの電界集中とが両立できるという優れた効果が得られる。

【図面の簡単な説明】

【0026】

【図1A】図1Aは、本発明の実施の形態1におけるフォトニック結晶の構成を示す平面図である。

【図1B】図1Bは、本発明の実施の形態1におけるフォトニック結晶の構成を示す平面図である。

【図2】図2は、電磁界シミュレーションにより得られた、実施の形態1におけるフォトニック結晶光共振器における基底共振モードの共振器中心付近の電界分布を示す分布図である。

【図3】図3は、実施の形態1におけるフォトニック結晶光共振器の基底共振モードのQ値およびモード体積Vの変化を示す特性図である。

【図4】図4は、図3に特性を示した事例における基底モードの共振波長の特性を示す特性図である。

【図5】図5は、本発明の実施の形態2におけるフォトニック結晶の構成を示す平面図である。

【図6】図6は、実施の形態2のフォトニック結晶光共振器における共振モードのQ値、モード体積Vの変化を示す特性図である。

【図7】図7は、図6は、実施の形態2のフォトニック結晶光共振器における共振波長の変化を示す特性図である。

【図8】図8は、実施の形態2における埋め込み構造体105の幅を36.3nmに固定し、埋め込み構造体105の長さを330nm-600nmの範囲で変化させた場合の、埋め込み構造体105における共振モードのQ値、モード体積V、および共振波長をFDTD法により数値解析で求めた結果を示す特性図である。

【図9】図9は、作製した実施の形態2におけるフォトニック結晶光共振器の電子顕微鏡像である。

【図10】図10は、実施の形態2におけるフォトニック結晶光共振器の埋め込み構造体105における共振波長の特性を示す特性図である。

【発明を実施するための形態】

【0027】

以下、本発明の実施の形態について図を参照して説明する。

【0028】

[実施の形態1]

10

20

30

40

50

はじめに、本発明の実施の形態 1 に係るフォトニック結晶光共振器について、図 1 A、図 1 B を用いて説明する。

【 0 0 2 9 】

このフォトニック結晶光共振器は、基部 1 0 2 および基部 1 0 2 に対象とする光の波長以下の間隔で三角格子状に周期的に設けられて基部 1 0 2 とは異なる屈折率の柱状の複数の格子要素 1 0 3 を備えるフォトニック結晶本体 1 0 1 から構成されている。フォトニック結晶本体 1 0 1 は、いわゆる 2 次元スラブ型のフォトニック結晶である。格子要素 1 0 3 は、例えば円柱状の中空構造である。共振器 Q 値を高く、かつフォトニックバンドギャップ (Photonic bandgap , P B G) を応用上最適に設定するために、格子要素 1 0 3 の直径 (穴径) は概ね、格子要素 1 0 3 の周期の 0 . 5 倍前後とされていけばよい。

10

【 0 0 3 0 】

また、このフォトニック結晶光共振器は、フォトニック結晶本体 1 0 1 に設けられて、フォトニック結晶の格子要素 1 0 3 が無い部分から構成された点欠陥による光閉じ込め部 1 0 4 を備える。

【 0 0 3 1 】

また、このフォトニック結晶光共振器は、光閉じ込め部 1 0 4 における基部 1 0 2 に埋め込み構造体 1 0 5 を備える。埋め込み構造体 1 0 5 は、格子要素 1 0 3 によるフォトニック結晶の Γ - K 結晶方位方向に、長手方向が延在している。また、埋め込み構造体 1 0 5 は、基部 1 0 2 に埋め込まれて設けられている。埋め込み構造体 1 0 5 は、平面視で光閉じ込め部 1 0 4 の中心に配置されている。

20

【 0 0 3 2 】

また、埋め込み構造体 1 0 5 の屈折率は、基部 1 0 2 の屈折率より低い状態とされている。埋め込み構造体 1 0 5 は、例えば、空気 (屈折率 $n = 1$) または真空状態の中空構造である。なお、光閉じ込め部 1 0 4 による共振器の基底共振モードは、埋め込み構造体 1 0 5 の内部に 1 つのみの電界のアンチノードを有する状態とされている。

【 0 0 3 3 】

図 1 A では、埋め込み構造体 1 0 5 は、長手方向を紙面左右方向としているが、フォトニック結晶の 6 回対称性より、長手方向を、図 1 A の状態より ± 60 度回転させても等価な構造となる。

【 0 0 3 4 】

ここで、図 1 B に矢印で示すように、第 1 格子要素 1 3 2 a , 第 2 格子要素 1 3 3 a , および第 3 格子要素 1 3 2 b , 第 4 格子要素 1 3 3 b は、 Γ - K 結晶方位方向の直線上で光閉じ込め部 1 0 4 を中心として対称となる外側ヘシフトさせるとよい。第 1 格子要素 1 3 2 a , 第 2 格子要素 1 3 3 a , および第 3 格子要素 1 3 2 b , 第 4 格子要素 1 3 3 b の少なくとも 1 つが、光閉じ込め部 1 0 4 を中心として対称となる外側ヘシフトしていればよい。

30

【 0 0 3 5 】

第 1 格子要素 1 3 2 a , 第 2 格子要素 1 3 3 a は、光閉じ込め部 1 0 4 を中心としてこの左側に隣り合う格子要素 1 3 1 の外側において、埋め込み構造体 1 0 5 の長手方向の直線上に連続して配置されている。第 1 格子要素 1 3 2 a , 第 2 格子要素 1 3 3 a は、光閉じ込め部 1 0 4 を中心としてこの左側に隣り合う埋め込み構造体 1 0 5 の長手方向の直線上に 1 つの格子要素 1 3 1 をおいて連続している。

40

【 0 0 3 6 】

また、第 3 格子要素 1 3 2 b , 第 4 格子要素 1 3 3 b は、光閉じ込め部 1 0 4 を中心としてこの右側に隣り合う格子要素 1 3 1 の外側において、埋め込み構造体 1 0 5 の長手方向の直線上に連続している。第 3 格子要素 1 3 2 b , 第 4 格子要素 1 3 3 b は、光閉じ込め部 1 0 4 を中心としてこの右側に隣り合う埋め込み構造体 1 0 5 の長手方向の直線上に 1 つの格子要素 1 3 1 をおいて連続している。

【 0 0 3 7 】

上記構成において、上記シフトの量は、共振器の Q 値を大幅に増強して必要な共振器性

50

能が得られるように最適化されていけばよい。

【0038】

後で説明するように、埋め込み構造体105の長手方向の長さを、格子要素103の周期 a （格子定数）の0.75倍から1.25倍の範囲に設定すれば、点欠陥に隣接する格子要素131，格子要素131に接触することなく、埋め込み構造体105は格子要素131，格子要素131とは分離した構造となる。

【0039】

従来知られているH1共振器の設計においては、格子要素131，格子要素131を含む点欠陥に隣り合う6個の格子要素103のうち少なくとも2つ以上に、Q値を高くするための位置や形状の変調が加えられる。

10

【0040】

一方、実施の形態1においては、点欠陥に隣り合う6個の格子要素131には、一切の変調が加えられない。本発明の特徴は、まず、埋め込み構造体105の配置にある。また、本発明の特徴は、埋め込み構造体105の延長線上にある第1格子要素132a，第2格子要素133a，および第3格子要素132b，第4格子要素133bを、共振器外側へのシフトするところにある。

【0041】

実施の形態1においては、第2格子要素133aおよび第4格子要素133bの外側へのシフト量を、第1格子要素132aおよび第3格子要素132bの外側へのシフト量の0.50倍とする。

20

【0042】

例えば、基部102を構成する高屈折率媒体は、シリコン($n=3.46$)から構成する。この場合、格子要素103の周期を420nm、格子要素103の穴の半径を格子要素103の周期の0.25倍、基部102の厚さ t を220nmに設定すればよい。格子要素103は、前述したように、空気または真空状態の中空構造である。また、埋め込み構造体105も、空気または真空状態の中空構造である。なお、共振器Q値を高く、かつフォトリソニックバンドギャップ(Photonic bandgap, PBG)を応用上最適に設定するために、格子要素103の直径(穴径)は概ね、格子要素103の周期の0.5倍前後に設定されればよい。また、埋め込み構造体105の長手方向の長さを420nmとし、埋め込み構造体105の長手方向に直交する長さ(幅)を31nmに設定する。

30

【0043】

上述した設定において、実施の形態1におけるフォトリソニック結晶光共振器について、有限差分時間領域法(FDTD)による電磁界シミュレーションを実施した。フォトリソニック結晶本体101の周囲は、空気または真空とした。図2は、電磁界シミュレーションにより得られた、実施の形態1におけるフォトリソニック結晶光共振器における基底共振モードの共振器中心付近の電界分布を示す。電界強度は、リニアスケールで表示しているが、埋め込み構造体105の内部を満たすように、1つの電界アンチノードが存在し、電界がアンチノードに強く集中していることを示している。

【0044】

H1共振器の中心にほぼ等方的に各格子要素を配置した場合の単極子共振モードにおいても、共振器中心のアンチノードへの電界集中が発生する。これに対し、本発明においては、非常に幅の狭い埋め込み構造体105の効果により、非特許文献1に述べられているのと同様に、より小さく狭い埋め込み構造体105の内部へ電界が閉じ込められ、電界の増強はより大きくなる。

40

【0045】

図3は、実施の形態1におけるフォトリソニック結晶光共振器の基底共振モードのQ値およびモード体積 V の変化を示す特性図である。図3では、第1格子要素132a，第3格子要素132bおよび第2格子要素133a，第4格子要素133bに、前述したシフトを適用した場合におけるフォトリソニック結晶光共振器の基底共振モードのQ値およびモード体積 V の変化を示している。図3の横軸は、第1格子要素132a，第3格子要素132b

50

のシフト量である。なお、シフトしていない場合のQ値は、1700程度になる。以下では、第1格子要素132a, 第3格子要素132bのシフト量を第1シフト量とする。また、第2格子要素133a, 第4格子要素133bのシフト量を第2シフト量とする。

【0046】

この基底共振モードは、埋め込み構造体105が無い場合の単極子共振モードが、埋め込み構造体105により変調され、埋め込み構造体105内に引き込まれたものである。第1シフト量を0から増加させるにつてQ値は大きく増強され、第1シフト量が格子要素103の周期(格子定数)の0.12倍において、最大値18万となる。

【0047】

更に第1シフト量を増加すると、Q値は急激に減少し、第1シフト量が0.20a以上では有用な値とはならない。一方、モード体積Vについては、第1格子要素132a, 第3格子要素132bをシフトさせることで、 $0.01(\lambda/n)^3$ 程度になり、埋め込み構造体105の無いH1共振器に対し、1桁程度低い極めて小さい値となる。本実施の形態においては、理論的に 10^7 程度の極めて高いQ/Vが達成可能となる。

【0048】

本発明を適用して様々な構成を検討した結果、Q値を実用上有用な値に増強させるためには、第1シフト量を、格子定数の0.05倍から0.20倍の範囲に設定すればよいことが分かった。第2シフト量は、必ずしも第1シフト量の0.50倍である必要はない。ただし、第1シフト量と同時に同様の範囲に第2シフト量を設定して第2格子要素133a, 第4格子要素133bを外側へシフトさせることで、第1格子要素132a, 第3格子要素132bを単独でシフトさせる効果に加え、更にQ値を増強させることが可能となる。

【0049】

図3に特性を示した事例における基底モード共振器波長を図4に示す。Q/Vが最大となる第1シフト量の設定における共振波長は、1,440nm程度となる。格子定数や格子要素103の穴径、および基部102の厚さtを調整することにより、共振波長を任意の波長に設定できる。媒質およびその屈折率が変われば共振波長が変動するが、この場合は、同様の構造調整により、再度、共振波長を設定すればよい。

【0050】

実施の形態1におけるフォトリック結晶光共振器の埋め込み構造体105においては、上述した基底共振モードのほかに、数nm以上の波長間隔において高次共振モードの発生を伴う。この高次共振モードにおけるQ値やVは、基底共振モードにおけるQ値やVに近い値になるほか、共振器中心がノードとなり、埋め込み構造体105の内部に2つの電界アンチノードが存在して双極子モード的な性質を示す。

【0051】

[実施の形態2]

次に、本発明の実施の形態2に係るフォトリック結晶光共振器について、図5を用いて説明する。

【0052】

このフォトリック結晶光共振器は、基部102および格子要素103を備えるフォトリック結晶本体101から構成されている。また、このフォトリック結晶光共振器は、点欠陥による光閉じ込め部104を備える。また、このフォトリック結晶光共振器は、光閉じ込め部104における基部102に埋め込み構造体105を備える。

【0053】

また、第1格子要素132a, 第2格子要素133a, および第3格子要素132b, 第4格子要素133bを、 Γ -K結晶方位方向の直線上で光閉じ込め部104を中心として対称となる外側へシフトさせている。

【0054】

上述した構成は、前述した実施の形態1と同様である。

【0055】

実施の形態 2 では、更に、第 5 格子要素 134a、第 6 格子要素 135a、および第 7 格子要素 134b、第 8 格子要素 135b を、 Γ -K 結晶方位方向の直線上で光閉じ込め部 104 を中心として対称となる外側へシフトさせている。

【0056】

第 5 格子要素 134a、第 6 格子要素 135a、は、光閉じ込め部 104 を中心として、第 2 格子要素 133a の外側のフォトニック結晶の Γ -K 結晶方位方向の直線上に連続して配置されている。また、第 7 格子要素 134b、第 8 格子要素 135b は、光閉じ込め部 104 を中心として、第 4 格子要素 133b の外側のフォトニック結晶の Γ -K 結晶方位方向の直線上に連続している。

【0057】

前述した実施の形態 1 と同様に、点欠陥に隣り合う 6 個の格子要素 131 には、一切の変調を加えない。第 2 格子要素 133a、第 4 格子要素 133b、第 1 格子要素 132a、第 3 格子要素 132b に加え、第 5 格子要素 134a、第 6 格子要素 135a、および第 7 格子要素 134b、第 8 格子要素 135b をシフトすることで、実施の形態 1 に比較して更に Q 値を高めることが可能となる。

【0058】

例えば、基部 102 を構成する高屈折率媒体は、シリコンから構成すればよい。また、格子要素 103 の周期を 468 nm、格子要素 103 の穴の半径を格子要素 103 の周期の 0.5 倍、基部 102 の厚さ t を 220 nm に設定すればよい。格子要素 103 は、空気または真空状態の中空構造である。また、埋め込み構造体 105 も、空気または真空状態の中空構造である。

【0059】

また、第 1 格子要素 132a および第 3 格子要素 132b のシフト量（第 1 シフト量）は、格子要素 103 の周期（格子定数）の 0.125 倍とすればよい。また、第 2 格子要素 133a および第 4 格子要素 133b のシフト量（第 2 シフト量）は、格子定数の 0.088 とすればよい。また、第 5 格子要素 134a および第 7 格子要素 134b のシフト量（第 3 シフト量）は、格子定数の 0.155 とすればよい。また、第 6 格子要素 135a および第 8 格子要素 135b のシフト量（第 4 シフト量）は、格子定数の 0.085 倍とすればよい。

【0060】

上述した条件とした実施の形態 2 のフォトニック結晶光共振器について、埋め込み構造体 105 における共振モードの Q 値、モード体積 V、および共振波長を、FDTD 法により数値解析した結果について、以下に図 6、図 7 を用いて説明する。図 6 は、共振モードの Q 値、モード体積 V の変化を示し、図 7 は、共振波長の変化を示している。いずれも、埋め込み構造体 105 の長さを 460 nm に固定し、埋め込み構造体 105 の幅を 30 - 60 nm の範囲で変化させている。

【0061】

埋め込み構造体 105 における基底共振モードは、図 2 の結果と同等の電界分布を示し、埋め込み構造体 105 の内部の 1 つのアンチノードに強く電界が集中している。

【0062】

このような極めて狭い埋め込み構造体 105 を含むフォトニック結晶光共振器の数値解析においては、電磁界の変化が有限要素のメッシュに対して急激になるため、Q 値の計算誤差が大きくなるほか、メッシュの設定により Q 値の計算結果が変動する課題がある。非特許文献 1 では、最大 3 割程度のエラーバーがあると報告されている。これに対し、実施の形態 2 では、更に埋め込み構造体 105 の幅が狭いため、5 割程度のエラーバーが見積もられる。

【0063】

モード体積 V および共振波長については、メッシュ設定による計算結果のエラーバーは小さい。図 6 の結果から図 8 の特性を求めるに当たり、メッシュサイズは埋め込み構造体 105 の幅の 1/2 に設定し、埋め込み構造体 105 の幅方向については埋め込み構造体

10

20

30

40

50

105の幅の1/4に設定した。

【0064】

実施の形態2において、計算上のQ値は、埋め込み構造体105の幅が34nmから40nmの狭い範囲でのみ非常に高くなり、最高で75万程度を示した。埋め込み構造体105幅が32nmおよび40-46nmの範囲でも、数万程度の高いQ値が得られたが、この外側の埋め込み構造体105幅においては有効にQ値を高くできないことが明らかになった。

【0065】

埋め込み構造体105の幅について、特定の狭い範囲においてQ値の増強が著しくなる効果は、ほぼ等方的な円孔をH1共振器の中心点欠陥に配置する従来の設計では得られないものであり、埋め込み構造体105を配置する本発明により初めて得られる効果である。

10

【0066】

前述した計算のエラーや、実験と数値解析の誤差等を考慮すれば、本発明においてQ値の増強効果が顕著となる埋め込み構造体105幅の範囲は、格子定数の1/20から1/8の範囲である。モード体積Vは、Q値が非常に高くなる埋め込み構造体105の幅の範囲において、 $0.01 - 0.02 (\lambda/n)^3$ の範囲で変化する。共振波長も、図7に示すように、埋め込み構造体105の幅に対して緩やかな変化を示す。

【0067】

次に、埋め込み構造体105の幅を36.3nmに固定し、埋め込み構造体105の長さを330nm-600nmの範囲で変化させた場合の、埋め込み構造体105における共振モードのQ値、モード体積V、および共振波長をFDTD法により数値解析で求めた結果を図8に示す。

20

【0068】

Q値およびモード体積Vは、埋め込み構造体105の長さが460nmのときを1として規格化してある。非常に高いQ値が得られる埋め込み構造体105の長さの範囲は、実施の形態1では、格子定数の0.95-1.15倍の範囲である。この範囲を外れるとQ値は急激に低下する。埋め込み構造体105の長さが短い場合は、光閉じ込め効果の減少によりQ値が低下する。また、埋め込み構造体105の長さが長い場合は、埋め込み構造体105の長手方向に隣接する格子要素131から埋め込み構造体105に向けて両者を隔てる基部102の領域内に電界が侵入することにより、Q値が低下する。

30

【0069】

前述したように、実施の形態2におけるQ値のエラーが大きいこと、高/低屈折率媒体や格子要素103の周期や厚さなどの寸法を変えることによる変動、更に実験と数値解析の間の誤差など、様々な実施の形態における変動を考慮すれば、埋め込み構造体105の長さが格子定数の0.75倍から1.25倍の範囲において、埋め込み構造体105配置と特定穴のシフトによる高Q値化が有効になると考えられる。

【0070】

埋め込み構造体105の長さや幅と、埋め込み構造体105の長手方向に隣接する格子要素131に接触しないことなどの条件を総合的に勘案すると、埋め込み構造体105の長さが幅に対して5倍以上であれば本発明の効果が有効に得られるといえる。

40

【0071】

図8に示すように、モード体積Vは、埋め込み構造体105の長さの変化に対しほぼ一定である。また、共振波長は、埋め込み構造体105の長さが短くQ値が大きく変動する領域では、緩やかに変化するが、埋め込み構造体105の長さが、格子定数と同じか格子定数よりも長くなれば、ほぼ一定になる。埋め込み構造体105の幅に加えて長さについても特定の範囲でのみにおいて、特に高いQ値およびQ/Vが実現されることが本発明の特徴であり、埋め込み構造体105の代わりにほぼ等方的な穴を配置した構造とは共振モードの特性が本質的に異なることを示している。

【0072】

50

非特許文献 1 に示されているとおり、スロット（埋め込み構造体 105）を用いるフォトニック結晶光共振器においては、理論的には本発明を上回る Q 値や Q/V が得られていても、実験において実際に高い Q 値や Q/V を実現することは困難であることが課題であった。

【0073】

本発明の実施の形態 2 に基づき、格子定数のみを 470 nm に変更して埋め込み構造体 105 を用いたフォトニック結晶光共振器を作製した。この電子顕微鏡像を図 9 に示す。図 9 に示す結果より、格子要素 103 の穴径は 235 nm であり、埋め込み構造体 105 の長さは 390 nm であり、埋め込み構造体 105 の幅は、 38 nm であった。

【0074】

上述したフォトニック結晶光共振器において、図 10 に示すように、埋め込み構造体 105 における共振波長が観察された。この共振波長のローレンツ（Lorentz）曲線フィッティングにおける半値全幅は 8.4 pm であり、対応する共振器 Q 値は 1.8 万であった。この共振モードの V は、 $0.017(\lambda/n)^3$ であり、 Q/V は 1×10^7 を上回る。

【0075】

上述した結果より、いわゆるスロットを備えるあらゆるフォトニック結晶光共振器の中で、実験上最高の Q 値と、2次元フォトニック結晶光共振器における実験上最高の Q/V が、実施の形態 2 により達成できることが示され、本発明が、実際に Q 値および Q/V が高く、 V が非常に小さいフォトニック結晶光共振器を実際に実現する上で、非常に有効であることが示された。

【0076】

以上に説明したように、本発明によれば、格子要素によるフォトニック結晶の $\Gamma-K$ 結晶方位方向に長手方向が延在して光閉じ込め部における基部に、埋め込み構造体を設けたので、2次元フォトニック結晶光共振器において、高い Q 値と単一のアンチノードへの電界集中とが両立できるようになる。また、特定の格子要素の外側へのシフトと組み合わせることにより、より高い効果が得られる。

【0077】

本発明は、埋め込み構造体内の単一の電界アンチノードにのみ強く光を集中させた共振モードを発生させるという2次元フォトニック結晶光共振器として前例の無い特性を有する。加えて、本発明は、 10 万をはるかに超える高い Q 値と $0.01(\lambda/n)^3$ 程度の極めて小さいモード体積 V 、また、最大 1×10^7 を上回る Q/V を実現可能にする。格子要素の穴などから完全に分離された、光の回折限界よりも小さい埋め込み構造体内に光を閉じ込め、同時に高い Q 値を実現することは、光共振器において本発明により初めて実現された。本発明を H1 共振器の1つの形態と考えれば、非特許文献 2 に記載された共振器における双極子および6重極子共振モードと比べ、少なくとも同等かそれ程劣らない Q 値において、モード体積 V は1桁程度低く、 Q/V および埋め込み構造体内における光物質相互作用増強効果は圧倒的に大きい。

【0078】

原子や分子と光共振器を用いた c Q E D 研究に本発明を適用すれば、従来同研究に用いられてきた光共振器に比べ埋め込み構造体内において圧倒的に大きい光物質相互作用を提供可能となる。また、電界が、埋め込み構造体内の単一アンチノードに集中しているため、共振器と結合している原子などの位置が特定できる。

【0079】

屈折率センサやバイオセンサ用途においては、高い Q/V により高感度が実現できるほか、埋め込み構造体が格子要素の周期程度の寸法であることから、サブミクロンの高い位置分解能を与えることが可能となる。また共振器の占有領域が小さいことから、集積化も容易である。

【0080】

埋め込み構造体の部分に低屈折率の機能性媒体を充填しても、上述した本発明の特徴を有する共振モードが実現可能である。共振モードに光を結合入射することで、また利得を

10

20

30

40

50

持つ場合に電流を注入することにより、同媒体の光物質相互作用を大きく増強し、発光増強や波長変換などの機能を小さい素子サイズと低い消費エネルギーにて実現することが可能になる。

【 0 0 8 1 】

なお、本発明は以上に説明した実施の形態に限定されるものではなく、本発明の技術的思想内で、当分野において通常の知識を有する者により、多くの変形および組み合わせが実施可能であることは明白である。

【 0 0 8 2 】

埋め込み構造体の形状は必ずしも直方体あるいは矩形断面である必要ではなく、面取りされた矩形断面、また楕円形であってもよい。また、埋め込み構造体部分が、2つ、3つなどのより細かい埋め込み構造体に分離分割されていても、性能上、1つの埋め込み構造体として機能する場合は、本発明に含まれる。

10

【 0 0 8 3 】

埋め込み構造体の中心は、必ずしも共振器の中心と一致せず、若干のオフセットをもって配置されても構わない。

【 0 0 8 4 】

また、フォトニック結晶本体の基部は、2以上の屈折率を有するGe, GaAs, InP, GaP, GaN, AlN, SiC, ダイヤモンド、SiNなどから構成してもよい。埋め込み構造体および格子要素は、空気であっても、真空であってもよく、また、屈折率1.6以下の低屈折率媒体から構成してもよい。

20

【 0 0 8 5 】

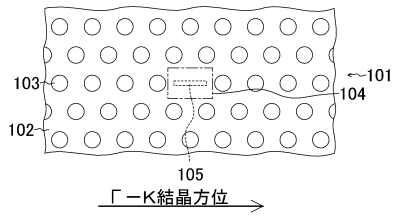
また、共振器を構成する点欠陥に隣り合う格子要素については、本発明の適用において、シフトや形状変調が施されても施されなくとも良い。

【 符号の説明 】

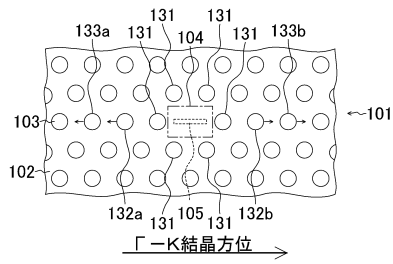
【 0 0 8 6 】

101...フォトニック結晶本体、102...基部、103...格子要素、104...光閉じ込め部、105...埋め込み構造体。

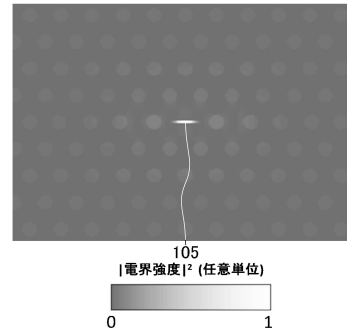
【図 1 A】



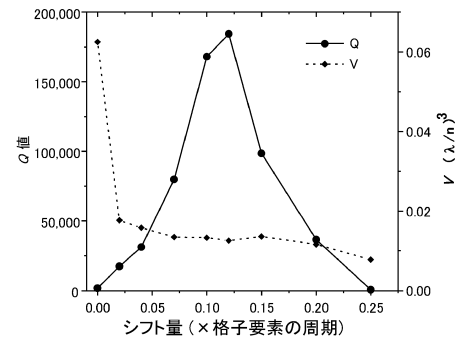
【図 1 B】



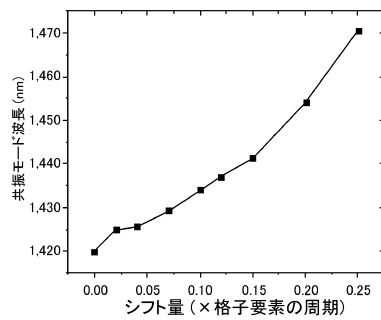
【図 2】



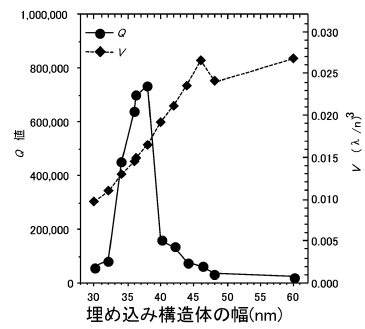
【図 3】



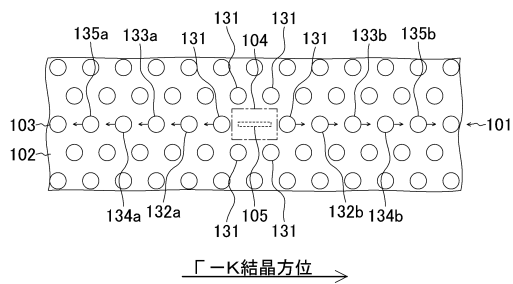
【図 4】



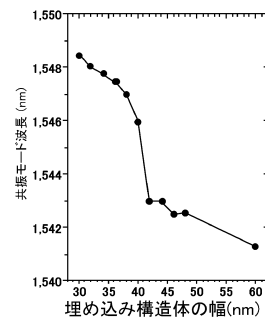
【図 6】



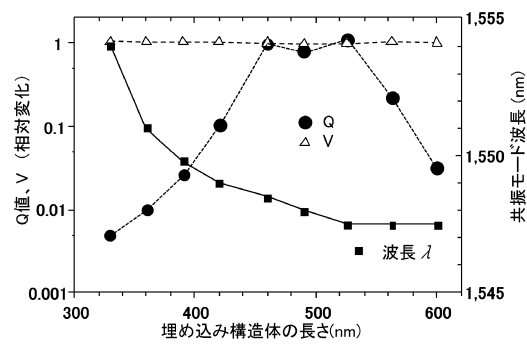
【図 5】



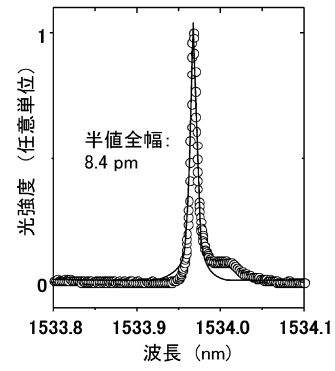
【図 7】



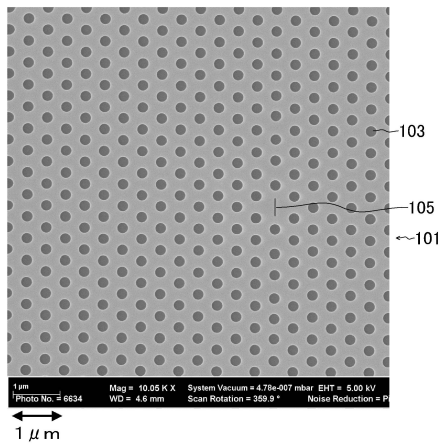
【図 8】



【図 10】



【図 9】



フロントページの続き

- (72)発明者 谷山 秀昭
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 新家 昭彦
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内
- (72)発明者 北 翔太
東京都千代田区大手町一丁目5番1号 日本電信電話株式会社内

審査官 林 祥恵

- (56)参考文献 米国特許出願公開第2006/0067605(US, A1)
特開2016-115783(JP, A)
特開2016-154164(JP, A)
特表2007-528516(JP, A)
中国特許出願公開第102759775(CN, A)
米国特許出願公開第2005/0200942(US, A1)
Jeong, C.Y., et al., Slot-embedded photonic-crystal resonator with enhanced modal confinement, OPTICS LETTERS, 2015年 2月15日, Vol.40, No.4, pp.554-557
Takagi, H., et al., High Q H1 photonic crystal nanocavities with efficient vertical emission, OPTICS EXPRESS, 2012年12月17日, Vol.20, No.27, pp.28292-28300
Yamamoto, T., et al., Design of a high-Q air-slot cavity based on a width-modulated line-defect in a photonic crystal slab, OPTICS EXPRESS, 2008年 9月 1日, Vol.16, No.18, pp.13809-13817
Kita, S., et al., Photonic crystal point-shift nanolasers with and without nanoslots-design, fabrication, lasing, and sensing characteristics, IEEE JOURNAL OF SELECTED TOPICS IN QUANTUM ELECTRONICS, 2011年 5月27日, Vol.17, No.6, pp.1632-1647

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G02F 1/00 - 1/125
G02F 1/21 - 1/39
G02B 6/12 - 6/14
H01S 5/00 - 5/50
JSTPlus/JST7580(JDreamIII)
IEEE Xplore