(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2016-156971
(P2016-156971A)
(43)公開日　平成28年9月1日(2016.9.1)

(51)Int.Cl.		F I			テーマコード（参考）
G02B 1/02	(2006.01)	G02B	1/02		4F100
B32B 15/01	(2006.01)	B32B	15/01	E	
B32B 15/08	(2006.01)	B32B	15/08	Q	

審査請求 未請求　請求項の数 5　ＯＬ　（全 13 頁）

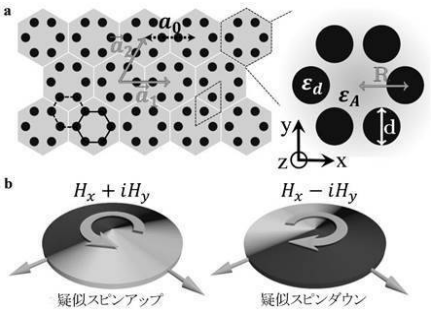
(21)出願番号　特願2015-34902(P2015-34902)
(22)出願日　平成27年2月25日(2015.2.25)

(71)出願人　301023238
国立研究開発法人物質・材料研究機構
茨城県つくば市千現一丁目２番地１
(72)発明者　古月　暁
茨城県つくば市千現一丁目２番地１　独立行政法人物質・材料研究機構内
(72)発明者　呉　龍華
茨城県つくば市千現一丁目２番地１　独立行政法人物質・材料研究機構内

Ｆターム(参考)　4F100 AB01A AB01C AB11B BA03 BA10A BA10C EJ24B JG05A JG05B JG05C JG06A JG06B JG06C

(54)【発明の名称】トポロジカルフォトニック結晶

(57)【要約】　（修正有）
【課題】シリコン等のありふれた材料を使用し、また特殊で制御が困難なプロセスを要することなく作成できるトポロジカルフォトニック結晶を提供する。
【解決手段】正六角形に配置された誘電体円柱がハニカム状に配列した状態（ａ）において、正六角形の対角線の長さを２Ｒとし、正六角形とそれに隣接する正六角形との中心間の距離をａ０とするとき、ａ$_0$／Ｒ＜３とすることによりトポロジカルフォトニック絶縁状態を得る。
【選択図】図１



【特許請求の範囲】
【請求項１】
平面上に互いに平行に立設された複数の誘電体円柱を有すると共に前記誘電体円柱の周囲が前記誘電体円柱を構成する誘電体とは異なる誘電率を有する誘電体で埋められた領域を設け、
前記領域において、前記複数の誘電体円柱は同じ大きさの正六角形に配置された誘電体円柱の複数の組に分けられ、
前記誘電体円柱の複数の組に対応する複数の前記正六角形の中心は三角格子の格子点に配置されるとともに、前記正六角形の頂点は隣接する二つの前記格子点間を結ぶ格子線上に配置され、
前記正六角形の対角線の長さを２Ｒとし、前記正六角形とそれに隣接する前記正六角形との中心間の距離をa_0とするとき、a_0／Ｒ＜３が成立する
トポロジカルフォトニック結晶。
【請求項２】
前記領域は２枚の互いに平行な金属板で挟まれる、請求項１に記載のトポロジカルフォトニック結晶。
【請求項３】
前記金属板は金からなる、請求項２に記載のトポロジカルフォトニック結晶。
【請求項４】
前記誘電体円柱はシリコンからなる、請求項１または２に記載のトポロジカルフォトニック結晶。
【請求項５】
前記誘電体円柱の周囲を埋める誘電体は空気または真空である、請求項１から４の何れかに記載のトポロジカルフォトニック結晶。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明はトポロジカルフォトニック結晶に関し、特にシリコン等の通常の材料を使用して作製できるトポロジカルフォトニック結晶に関する。
【背景技術】
【０００２】
量子ホール効果（quantum Hall effect、ＱＨＥ）の発見により、トポロジーを中心概念とした物性研究の新たな進展が見られた（非特許文献１～１１）。トポロジカル状態は学術的な観点で興味深いものであるというだけではなく、応用面にも重大な影響を及ぼすものと期待されている。それは、バルクトポロジーによって保護される強靭な表面（あるいエッジ）状態により、スピントロニクス及び量子計算に新たな可能性がもたらされるからである（非特許文献１２～１７）。
【０００３】
しかしながら、現在までにトポロジカル状態が確認されている物質はごく少数であり、またそのほとんどのものは非常に低い温度のみでトポロジカルな性質を示す。この問題により、実際の応用に必須である材料の詳細な研究や操作が妨げられていた。
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【０００４】
本発明の課題は、特殊な材料やプロセスを使用することなく作成できるトポロジカルフォトニック結晶を設計することにある。
【課題を解決するための手段】
【０００５】
本発明の一側面によれば、平面上に互いに平行に立設された複数の誘電体円柱を有すると共に前記誘電体円柱の周囲が前記誘電体円柱を構成する誘電体とは異なる誘電率を有す

る誘電体で埋められた領域において、前記複数の誘電体円柱は同じ大きさの正六角形に配置された誘電体円柱の複数の組に分けられ、前記誘電体円柱の複数の組に対応する複数の前記正六角形の中心は三角格子の格子点に配置されるとともに、前記正六角形の頂点は隣接する二つの前記格子点間を結ぶ格子線上に配置され、前記正六角形の対角線の長さを２Ｒとし、前記正六角形とそれに隣接する前記正六角形との中心間の距離をa_0とするとき、$a_0/R<3$が成立するトポロジカルフォトニック結晶が与えられる。

ここで、前記領域は２枚の互いに平行な金属板で挟まれてよい。

また、前記金属板は金からなってよい。

また、前記誘電体円柱はシリコンからなってよい。

また、前記誘電体円柱の周囲を埋める誘電体は空気または真空であってよい。

【発明の効果】

【０００６】

本発明によれば、シリコン等のありふれた材料を使用し、また特殊で制御が困難なプロセスを要することなく作成できるトポロジカルフォトニック結晶が与えられる。

【図面の簡単な説明】

【０００７】

【図１】フォトニック結晶の設計を説明する図。（ａ）はそれぞれ６本のｚ方向に伸びる誘電体円柱によって構成される「人工原子」の三角フォトニック結晶の構成の概略を示す図。細い破線で描かれたひし形及び正六角形はそれぞれハニカム格子及び三角格子の単位セルを示す。やや太い黒色の実線で描かれた正六角形は人工原子を示し、またやや太い黒色の破線で描かれた六角形は人工原子の格子間領域を示す。（ｂ）ＴＭ（transverse magnetic）モードの磁界$H_x \pm iH_y$の左手及び右手円偏光に関連付けられた本願フォトニック系の擬スピン状態を概念的に示す図。

【図２】（ａ）人工原子におけるp_x/p_y及び

【数１】

$$d_{xy}/d_{x^2-y^2}$$

フォトニック軌道の電界E_zの分布を示す図。（ｂ）正及び負の角運動量を持つ電界E_zの分布

【数２】

$$p_\pm = (p_x \pm ip_y)/\sqrt{2}$$

及び

【数３】

$$d_\pm = (d_{x^2-y^2} \pm id_{xy})/\sqrt{2}$$

を示す図。

【図３】フォトニックバンドを示す図であって、ε_d＝１１．７（シリコン）、ε_A＝１（空気、もちろん真空でもよい）及びＲ＝１．５ｄである２Ｄフォトニック結晶についてのＴＭモードの分散関係を示す。（ａ）a_0/R＝３．１６の場合（差し込み図は三角格子のBrillouinゾーンを表す）、（ｂ）a_0/R＝３の場合及び（ｃ）a_0/R＝２．７８の場合をそれぞれ示す。図中で中間調濃度の曲線は図右端の縦棒に示すように濃度により$d_\pm$バンド及び$p_\pm$バンドを区別して表し、特に（ｃ）のa_0/R＝２．７８についての図中の中間調濃度のカーブは両者の混成を表すように、$d_\pm$バンド及び$p_\pm$バンドをそれぞれ表す濃度の間で連続的に遷移している。

【図４】フォトニックギャップ以下のΓ点におけるPoyntingベクトルの実空間分布を示す図。（ａ）自明な（trivial）状態であるa_0/R＝３．１６の場合。（ｂ）トポロジカル状態であるa_0/R＝２．７８の場合。

【図５】ヘリカルトポロジカルエッジ状態を示す図。（ａ）一つの方向に無限の長さを持

ち、もう一つの方向にはトポロジカル領域及び自明な領域についてそれぞれ４５個及び６個の人工原子を有する、リボン形状フォトニック結晶の分散関係を示す。右側はトポロジカルエッジ状態を含むフォトニック結晶ギャップ近傍の拡大図で、太い曲線はトポロジカルエッジ状態である。Ａ及びＢは電界$Ｅ_{z}$が示されている二つの点である。ここで使用されているパラメータは、トポロジカル領域について$ａ_{0}$／Ｒ＝２．９であり、自明な領域については$ａ_{0}$／Ｒ＝３．１２５であること以外は図３と同じである。（ｂ）点Ａ及びＢにおける電界Ｅｚの分布を示す。右側は界面に隣接したトポロジカル領域側の単位セルでの時間平均Poyntingベクトル

【数４】

$\vec{S}$

（黒い矢印）である。

【図６】本発明の実施例のトポロジカルフォトニック結晶の構造を概念的に示す図。（ａ）高さが有限のフォトニック結晶であって、２枚の水平の金の板が多数の誘電体（シリコン）円柱の両端に対称に配置されている。（ｂ）２枚の平行な金の板に挟まれたトポロジカルフォトニック結晶の正方形の試料中の電界Ｅｚによるエネルギー密度分布

【数５】

$$u_{E_z}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r})|E_z(\mathbf{r})|^2/2$$

【図７Ａ】本発明の実施例において、$ａ_{0}$／Ｒ＝３の場合のシリコン円柱の配置を概念的に示す図。

【図７Ｂ】本発明の実施例において、$ａ_{0}$／Ｒ＞３の場合のシリコン円柱の配置を概念的に示す図。

【図７Ｃ】本発明の実施例において、$ａ_{0}$／Ｒ＜３の場合のシリコン円柱の配置を概念的に示す図。

【発明を実施するための形態】

【０００８】

フォトニック結晶は固体の中で並んでいる原子が周期的な誘電率及び／または透磁率を有する媒体で置き換えられている光学的材料である（非特許文献１８）。負の屈折率、磁気レンズ等の自然界では得られない電磁的性質を実現する等、メタマテリアル（meta-material）と呼ばれている（非特許文献１９）。最近、電磁波のユニークなエッジ伝播モードで特徴付けられるトポロジカルフォトニック状態が、外部磁界下にある磁気回転材料（gyromagnetic material）、電界と磁界とが結合する双異方性（bi-anisotropic）メタマテリアル、また結合共振器光学導波管（coupled resonator optical waveguide、ＣＲＯＷ）で実現できるということがわかってきた（非特許文献２０～３２）。

【０００９】

本発明の一態様によれば、シリコン等の通常の誘電体だけでできた二次元（２Ｄ）フォトニック結晶が与えられる。なお、以下では代表例としてこのような誘電体としてもっぱらシリコンを使用した構成を説明するが、当然一般性を失うものではないことを注意しておく。

【００１０】

ハニカム格子は６つの近隣サイトで構成される正六角形のクラスタの三角格子と同等であり、また、二つのサイトで構成されるひし型の単位セルの代わりに当該大きな正六角形の単位セルで考えることにより、ハニカム格子の第１のブリルアンゾーン（Brillouin zone）中のＫ及びＫ’点におけるDiracコーン（Dirac cone）が折りたたまれてΓ点でDiracコーンに二重に縮退する。ここで、$Ｃ_{6}$対称群のΓ点における空間的な反転操作における奇及び偶パリティに対応する二つの２Ｄ既約表現が存在することを検討するのは興味深いことである。これらの性質に基づいて、本発明者は図１（ａ）に示すように、正六角形クラスタの形状及びサイズ、さらにこれらが満たす$Ｃ_{6}$対称性を保つようにハニカム格子を変形することにより、トポロジカル非自明状態（topological nontrivial state）を実現

した。厳密に言えば、Maxwell方程式を解くことにより、本発明者は、本発明の構成において「人工原子（artificial atom）」として動作する六角形クラスタでの電磁モードは、固体中の電子軌道と同様にｓ－波形、ｄ－波形及びｐ－波形を呈してフォトニックバンドを形成することを見出した。また、Maxwell方程式が一般的に持つ時間反転対称性（time reversal（ＴＲ）symmetry）及び設計によるC_6結晶対称性を組み合わせることによって生まれる擬ＴＲ対称性を明らかにした。この擬ＴＲ対称性は電子系でのＴＲ対称性と同じ挙動を示し、本発明のフォトニック系でKramers二重化（Kramers doubling）を引き起こす。このことは、三次元系について提案されたトポロジカル結晶絶縁体の場合と類似している（非特許文献３３）。このことはＴＭモードにおける右手／左手回転偏光と電子の上向き／下向きスピンとの間の一対一対応に密接に関連する。フォトニックバンドのBerry曲率（Berry curvature）及び有限系のエッジ状態を評価することを通じて、「人工原子」の三角形格子の格子定数がシリコン円柱の元のハニカム格子に対応する値から縮小したときにトポロジカル状態が出現することを示すことに成功した。いかなる外部強磁場もまた回転磁界あるいは双異方性の材料も必要としない、シリコンだけで作製できる本発明のトポロジカル状態は、将来の応用に非常に有望である。

【００１１】

＜人工原子及び擬スピン＞

誘電材料中の電磁波のＴＭモード（つまり、有限の平面内H_x、H_y及び面外E_x成分；他はゼロ）について検討する。簡単化のため、考慮している周波数領域における誘電率は周波数に依存しない実数とみなす。この場合、周波数ωの電磁波モードについてのマスター方程式は、Maxwell方程式より以下のように与えられる（非特許文献３４）：

【００１２】

【数６】

$$\left[\frac{1}{\varepsilon(\mathbf{r})}\nabla\times\nabla\times\right]E_z(\mathbf{r})=\frac{\omega^2}{c^2}E_z(\mathbf{r}) \qquad (1)$$

【００１３】

ここで、ε（ｒ）は位置依存の誘電率であり、ｃは光の速度である。磁界の横方向成分はFaraday関係

【００１４】

【数７】

$$\mathbf{H}=-i/(\mu_0\omega)\nabla\times\mathbf{E}$$

【００１５】

により与えられる。ここで透磁率μ_0は真空の透磁率を仮定している。上記マスター方程式(1)は一般化されたSchroedinger方程式と考えることができ、従って電子系上におけるBloch理論は、ε（ｒ）が図１（ａ）に図式的に示すように空間中で周期的である場合には、本発明の系に適用される。しかしながら、マスター方程式(1)は、スピン自由度を持つ電子ではなく、電磁波を記述していることに注意する必要がある。その最も際立った相違点は、時間反転操作に対する応答にある。

【００１６】

本発明に係る２Ｄフォトニック結晶では、図１（ａ）に示すように、ｚ軸に平行な方向の比誘電率ε_dを有する誘電体（例えばシリコン）がそれとは異なる誘電率ε_Aを有する誘電材料（例えば空気）中に埋め込まれている。以下の議論はｚ軸に沿って一様である状態についてのものであって、この想定により問題は２Ｄに還元される。

【００１７】

ハニカム格子状に配列された複数の誘電体円柱から出発し、６本の隣接する円柱からなる正六角形クラスタ及びC_6対称性が維持されるようにこの配列を変形する。このような変形が行なわれると、誘電体円柱の整列の態様は、正六角形の「人工原子」の三角形状格子と考える方がより好都合である。当該三角形状格子に付随するC_6対称群について、２つの２Ｄ既約表現Ｅ’及びＥ”が存在する。Ｅ’及びＥ”は単純関数ｘ／ｙ及びｘｙ／（x^2-y^2）のような奇及び偶空間パリティに対応する（非特許文献３５）。マスター方

程式(1)を解くことによって得られる図２（ａ）の電界Ｅ$_z$からわかるように、人工原子は固体中の通常の原子の電子軌道の対称性と同じ対称性をもつｐ$_x$／ｐ$_y$及び
【００１８】
【数８】
$d_{xy}/d_{x^2-y^2}$
【００１９】
軌道を有している。
【００２０】
ここで２組の固有波動関数を以下のように定義する。
【００２１】
【数９】
$$p_\pm = (p_x \pm ip_y)/\sqrt{2}; \quad d_\pm = (d_{x^2-y^2} \pm id_{xy})/\sqrt{2} \qquad (2)$$
【００２２】
これらの波動関数の「角運動量」ｊ$_z$は±１及び±２である。以下の反ユニタリ演算子によって定義される擬ＴＲ操作を構成する。
【００２３】
【数１０】
$$\mathcal{T} \equiv U\mathcal{K} = -i\sigma_z\mathcal{K} \qquad (3)$$
【００２４】
ここで、Ｋは複素共役演算子であって、マスター方程式(1)によって支配されるＴＭモード上のＴＲ操作に対応する。また、σ$_z$は２×２ Pauli行列である。
【００２５】
【数１１】
$$\mathcal{T}p_\pm = \pm ip_\mp$$
【００２６】
及び
【００２７】
【数１２】
$$\mathcal{T}d_\pm = \pm id_\mp$$
【００２８】
であることを示すことができ、これにより式(2)に示される２セットの固有波動関数の下で
【００２９】
【数１３】
$$\mathcal{T}^2 = -1 \qquad (4)$$
【００３０】
がもたらされる。ここで強調しておくことは、一般的にはMaxwell方程式が持つＴＲ対称性は、典型的にはボソン（boson）的なもので、Ｋ^2＝１によって特徴付けられるが、本系には、典型的にはフェルミオン（fermion）的で、式(3)によって定義され式(4)を満たすＴＲ演算子Ｔに特徴づけられる、隠された創成ＴＲ対称性が存在する。擬ＴＲ演算子Ｔにより、本Maxwell系におけるKramers二重化が電子系のKramers二重化（非特許文献３５）に良く似ていることが保証される。式(2)中の固有波動関数から、２つの擬スピン状態は電界Ｅ$_z$フィールドの正及び負の角運動量によって、あるいは等価なこととして、図１（ｂ）及び図２（ｂ）に示されるようにＨ$_x$±ｉＨ$_y$によって定義される面内磁界の左手及び右手回転偏光によって与えられることが明らかである。
【００３１】
フォトニック系では、今まで議論された擬スピンは電界及び磁界の結合／反結合状態（bonding/antibonding states）（非特許文献２４、２５）、電磁波の左手／右手回転偏光（非特許文献２８）及びＣＲＯＷ中での光の時計回り／反時計回り循環（非特許文献２９、３０）を含む。有効スピン軌道結合（spin-orbit coupling、ＳＯＣ）は、分割リング

共振器（split-ring resonator）及びΩ粒子に基づくメタマテリアルにより、圧電・圧磁材料超格子により、またＣＲＯＷ中の結合ループの非対称位置により、それぞれ拠出される。これらのうちの最初の二つの実装は込み入ったメタマテリアル構造を伴うので、微妙な製造工程が必要とされる。最後の一つはシリコン等の誘電体ファイバーだけを使用するので作成しやすいが、結合ループのうちの一つでも壊れれば、それが磁気的不純物（magnetic impurity）として働き、量子スピンホール効果（ＱＳＨＥ）のヘリカルエッジ状態を破壊する。

【００３２】

＜トポロジカルフォトニック結晶＞

本発明者は、図１（ａ）により与えられる単位ベクトル

【００３３】

【数１４】

$\vec{a}_1$

【００３４】

及び

【００３５】

【数１５】

$\vec{a}_2$

【００３６】

に沿った周期境界条件の下でマスター方程式(1)によって記述されるフォトニックバンド分散を計算した。図３に示すように、バンド分散における二重縮退（double degeneracy）がΓ点に現れ、これらは$p_{\pm}$及び$d_{\pm}$状態であることが確認され、対称性からの考察と一致している。格子定数が大きい場合は、ギャップより下（または上）のフォトニックバンドは$p_{\pm}$（または$d_{\pm}$）状態によって占有される（例えば、$a_0/R=3.16$の場合を示す図３（ａ）を参照）。定量的に言えば、$a_0=1\mu m$とした場合、Ω＝１３８．６ＴＨｚにおけるギャップ$\Delta\omega=7.7$ＴＨｚとなる。ここでこれらの周波数は格子定数a_0に逆比例する。

【００３７】

格子定数a_0/Rを３まで小さくすると、ｐ及びｄ状態はΓ点において縮退し、図３（ｂ）に示すように、二つのDiracコーンが現れる。これは、格子定数がこのようになったとき、系は個別の円柱がハニカム格子に配列されたものと等価になり、二重に縮退したDiracコーンは、二つのサイトのひし形単位セルに基づくハニカム格子のBrillouinゾーン中のＫ及びＫ’点におけるDiracコーンに他ならない。フォトニック系におけるDirac分散はこれまでに正方格子及び三角格子の両者について議論された（非特許文献３６、３７）。これらの過去の系とは異なり、ここで人工原子の構造に組み込まれた構造によって保障されている擬ＴＲ対称性に付随する二つのDiracコーンが存在し、これによって、本系において非自明なトポロジーが可能となる。

【００３８】

格子定数a_0/Rを更に小さくすると、$a_0/R=2.78$の場合について図３（ｃ）に示すように、Brillouinゾーン全体に渡ってバンドギャップ（global band gap）が再び開かれる。Γ点の周りで、バンドギャップの低（高）周波数側における電界E_zが$d_{\pm}$（$p_{\pm}$）特性を示し、Γ点から遠ざかると順序が逆になる。すなわち、本願のフォトニック格子では、格子定数a_0を小さくするとバンド逆転が起こる。

【００３９】

バンド逆転前後の系を特徴づけるために、本願の電磁系におけるエネルギーフローを周期$\tau=2\pi/\omega$上で平均したPoyntingベクトル

【００４０】

【数１６】

$$\vec{S}=\mathrm{Re}[\vec{E}\times\vec{H}^*]/2 \qquad (5)$$

【００４１】

の実空間分布を確認した。a_0／Ｒ＝３．１６についての図４（ａ）（擬スピンアップをもつPoyntingベクトルは明記しない）に示すように、Poyntingベクトルは個別の原子の周りを循環する。この場合、電磁エネルギーは個々の原子の周りに流れるので、これは通常の「絶縁」状態の特徴を示すものである。a_0／Ｒ＝２．７８の場合、つまりバンド逆転の後では、図４（ｂ）に示すように、Poyntingベクトルは人工原子の間の領域で大いに増強される。これは図４（ａ）の場合との際立った違いであり、従来のものではない絶縁状態であることを意味している。

【００４２】

この状況を更に明らかにするため、上述のトポロジカルフォトニック結晶をリボン状にしたものを考える。ここで、リボンの外側は同じ周波数領域で自明なバンドギャップを有するフォトニック結晶を置く。これにより、トポロジカルエッジ状態が自由空間へ漏出することが防止される。ここで注意すべきこととして、６本の円柱のクラスタが本願設計の基本ブロックとされるので、意味のある議論においてはこれを壊してはならない。図５（ａ）に示すように、バルク分散のギャップ内に太い曲線で示され、二重縮退を有するエッジ状態が現れる。Γ点近傍の典型的な波数における電界E_zの実空間分布を調べると（図５（ａ）中の拡大表示（右側）中の、k_x＝±０．０４×（２π）／a_0であるＡ及びＢ）、図５（ｂ）に示すように、ギャップ内状態はエッジに位置し、バルクに向かって指数関数的に減衰することがわかる（他の二つの状態はリボンの反対側のエッジに位置するが、ここでは明示的には示されていない）。図５（ｂ）の右側にある差し込み図から分かるように、Poyntingベクトルは、人工原子について平均化した場合でも擬スピンダウン／スピンアップ状態について有限の下向き／上向き電磁エネルギーフローを示す。このことはエッジにおいて二つの擬スピン状態に付随した逆方向での電磁エネルギーフローを曖昧さなく示し、これはＱＳＨＥ状態の特徴である。リボン系について図５（ａ）に示すバルクバンド中のPoyntingベクトルの分布は図４に示す無限の系についての分布とそれほど大きくは異なっていない。準古典描像では、ＱＨＥは強い外部磁界の下における電子のバルクでの円運動及びエッジでのスキップ運動によって記述されたことがある（非特許文献３８）。ここで、Poyntingベクトルは電磁系における物理量であり、従ってフォトニックＱＳＨＥ状態について図４、５及び６に示される分布は実験で観測できることを強調しておく。本願の系におけるＱＳＨＥはまたΓ点近傍で成り立つｋ・ｐモデルに基づくZ_2トポロジー指数の計算によっても確認できる。

【実施例】

【００４３】

本願のトポロジー状態の実験的な実装については、ｚ軸方向に沿ったシリコン円柱の有限の高さを考慮に入れた。距離Ｈ＝１０ｍｍだけ離間した２枚の平行な金の板に挟まれた、正方形状である試料を検討した（図６（ａ））。トポロジカルな試料のサイズを

【００４４】

【数１７】

$$40\vec{a}_1 \times 20(\vec{a}_1 + \vec{a}_2)$$

【００４５】

とし、四辺の縁は皆自明なフォトニック結晶で囲む。トポロジカルな領域及び自明な領域についてＲをそれぞれ３．６５ｍｍ及び３ｍｍとした。なお、ここで両領域のＲの値が異なっているのは、設計の際の計算の都合上、格子定数a_0の値を両領域で一致させたことによって両領域のＲが異なることになったためである。また、両領域についてｄ＝２．４ｍｍ及びa_0＝１０ｍｍとした。この構造により、トポロジカル周波数は１３．４７±１．２ＧＨｚとなった。周波数ω＝１３．４７ＧＨｚの直線偏光を持つ線状電磁波源をシリコン円柱と平行においた。直線偏光を持つ電磁波源は二つの円偏光（二つの擬スピン）に分解することができるので、図６（ｂ）に示すように、系はヘリカルトポロジカルエッジ状態を示す。

【００４６】

以下では、図７Ａ～図７Ｃを参照して、本実施例におけるトポロジカルフォトニック結

晶の自明な領域及びトポロジカル領域を実現するシリコン円柱の配置をより具体的に説明する。これらの図は何れも平面上に立設された多数のシリコン円柱を上から（図１の表記に従えばｚ方向から）見たものであり、黒色の円がそれぞれのシリコン円柱を現している。また、シリコン円柱の周囲の誘電体は空気である。

【００４７】

図７Ａはシリコン円柱がハニカム格子状に配置されており、これらの円柱は互いに等間隔になっている。つまり、６本のシリコン円柱の組の各シリコン円柱を頂点とする淡色の正六角形の対角線を対角線の長さ（この長さが２Ｒであることに注意されたい）の半分、つまり正六角形の中心からその頂点までの距離Ｒだけ延長すると、隣接する６本のシリコン円柱の組に属する最も近いシリコン円柱の中心位置に到達する。この対角線を更にＲだけ延長すると当該隣接する６本のシリコン円柱の組の中心に到達する。このような隣接するシリコン円柱の組の中心間の距離はa_0であるから、この配置が上で説明した$a_0/R=3$に相当する。

【００４８】

図７Ｂは図７Ａの配置を変形し、６本のシリコン円柱が構成する組のそれぞれにおいて、上述の正六角形の形状及びサイズを維持したままで（つまりＲを一定にして）、各組の間の距離a_0を大きくすることによって拡大したものである。この場合には明らかに$a_0/R>3$となる。従って、この配置では自明な状態となる。

【００４９】

この距離の拡大を、上記正六角形の中心を格子点とすることで構成される三角格子（正三角格子）を使って説明すれば、以下のようになる。図７Ａの配置において、これらの正六角形の中心はそれぞれ上記三角格子の格子点上に位置するとともに、正六角形の各頂点は隣接する格子点を結ぶ格子線上に位置する。この三角格子をこの三角格子の面内で比例拡大（等方向的に拡大）すると、格子点は相互の距離が一様に拡大するように移動する（この移動に当たって正六角形の形状・サイズ・向きは不変）ので、隣接する格子点相互の間隔a_0は当初の３Ｒから大きくなる。また上記正六角形は当初載っていた格子点の移動に伴ってそれと一緒に移動する。これにより、$a_0/R>3$となる。なお、この移動の際に正六角形の向きが変化しない、つまり平行移動が行なわれる。これにより、正六角形の頂点は隣接した格子点を結ぶ格子線上に位置した状態を維持する。

【００５０】

図７Ｃは図７Ａの配置を図７Ｂとは逆方向に変形したものである。つまり、６本のシリコン円柱が構成する正六角形の形状及びサイズを維持したままで各組の間の距離a_0を小さくすることによって縮小したものである。この場合には明らかに$a_0/R<3$となる。従って、この配置ではトポロジカル状態が現れる。

【００５１】

図７Ｂの場合と同じようにこれらの六角形の中心を格子点とする三角格子に基づいて当該縮小を表現すれば、図７Ｂとは逆にこの三角格子をこの三角格子の面内で比例縮小（等方向的に縮小）すると、格子点は相互の距離が一様に縮小するように移動する（この移動に当たって正六角形の形状・サイズ・向きは不変）ので、隣接する格子点相互の間隔a_0は当初の３Ｒから小さくなる。また上記正六角形は当初載っていた格子点の移動に伴ってそれと一緒に平行移動する。これにより、$a_0/R<3$となる。

【００５２】

ここで、シリコン円柱（一般には誘電体円柱）のハニカム格子状配置から６本組み円柱で構成される正六角形間距離の縮小を行う場合、$a_0/R=2$に到達すると隣接する正六角形が互いに接触するので、実際には$2<a_0/R<3$とする必要がある。なお、Ｒは誘電体円柱の中心位置からの距離であるため、円柱の太さが無視できない大きさである場合には、当然のことであるがこの比の値が実際に取り得る範囲が更に狭くなることに注意されたい。

【産業上の利用可能性】

【００５３】

以上詳細に説明したように、本発明によれば通常の半導体デバイスに使用される材料など、ありふれた材料を使用し、また特殊で適切な制御が困難な処理を必要とせずにトポロジカルフォトニック結晶を実現できる。また、このようにして実現されたトポロジカルフォトニック結晶は室温でも動作可能であるため、実用に供するにあたって制限が少ない。

【先行技術文献】

【非特許文献】

【００５４】

【非特許文献１】Klitzing, K. v., Dorda, G. & Pepper, M. New method for high-accuracy determination of the fine-structure constant based on quantized Hall resistance. Phys. Rev. Lett. 45, 494-497 (1980).

【非特許文献２】Hasan, M. Z. & Kane, C. L. Colloquium: Topological insulators. Rev. Mod. Phys. 82, 3045-3067 (2010).

【非特許文献３】Qi, X.-L. & Zhang S.-C. Topological insulators and superconductors. Rev. Mod. Phys. 83, 1057-1110 (2011).

【非特許文献４】Thouless, D. J., Kohmoto, M., Nightingale, M. P. & Nijs, M. d. Quantized Hall Conductance in a Two-Dimensional Periodic Potential. Phys. Rev. Lett. 49, 405-408 (1982).

【非特許文献５】Xiao, D., Chang, M.-C. & Niu, Q. Berry phase effects on electronic properties. Rev. Mod. Phys. 82, 1959-2007 (2010).

【非特許文献６】Haldane, F. D. M. Model for a Quantum Hall Effect without Landau Levels: Condensed-Matter Realization of the “Parity Anomaly”. Phys. Rev. Lett. 61, 2015 (1988).

【非特許文献７】Kane, C. L. & Mele E. J. Quantum Spin Hall Effect in Graphene. Phys. Rev. Lett. 95, 226801 (2005).

【非特許文献８】Bernevig, B. A., Hughes, T. L. & Zhang S.-C. Quantum Spin Hall Effect and Topological Phase Transition in HgTe Quantum Wells. Science 314, 1757-1761 (2006).

【非特許文献９】Hsieh, D., Qian, D., Wray, L., Xia, Y., Hor, Y. S., Cava, R. J. & Hasan M. Z. A topological Dirac insulator in a quantum spin Hall phase. Nature 452, 970-974 (2008).

【非特許文献１０】Yu, R., Zhang, W., Zhang, H.-J., Zhang, S.-C., Dai, X. & Fang, Z. Quantized Anomalous Hall Effect in Magnetic Topological Insulators. Science 329, 61-64 (2010).

【非特許文献１１】Chang, C.-Z. et al. Experimental Observation of the Quantum Anomalous Hall Effect in a Magnetic Topological Insulator. Science 340, 167-170 (2013).

【非特許文献１２】Liang, Q.-F., Wu, L-.H. & Hu, X. Electrically tunable topological state in [111] perovskite materials with an antiferromagnetic exchange field. New J. Phys. 15, 063031 (2013).

【非特許文献１３】Pesin, D. & MacDonald, A. H. Spintronics and pseudospintronics in graphene and topological insulators. Nature Mater. 11, 409-416 (2012).

【非特許文献１４】Nayak, C., Simon, S. H., Stern, A., Freedman, M. & Das Sarma, S. Non-Abelian anyons and topological quantum computation. Rev. Mod. Phys. 80, 1083-1159 (2008).

【非特許文献１５】Stanescu, T. D., & Tewari, S. Majorana fermions in semiconductor nanowires: fundamentals, modeling, and experiment. J. Phys.: Condens. Matter 25, 233201 (2013).

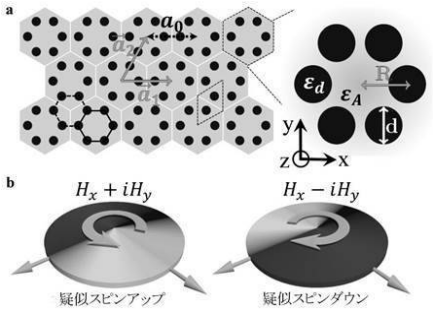
【非特許文献１６】Beenakker, C. W. J. Search for Majorana Fermions in Superconductors. Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 4, 113-136 (2013).

【非特許文献１７】Wu, L.-H., Liang, Q.-F. & Hu, X. New scheme for braiding Major

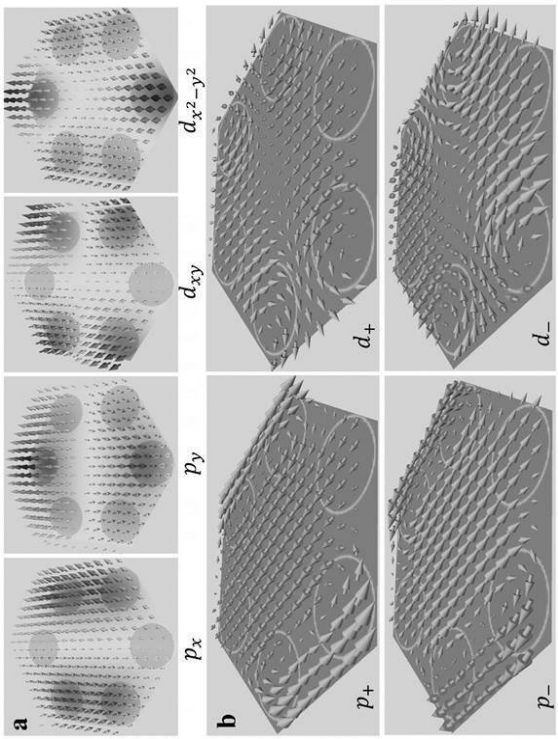
ana fermions. Sci. Technol. Adv. Mater. 15, 064402 (2014).
【非特許文献１８】Yablonovitch, E. Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics and Electronics. Phys. Rev. Lett. 58, 2059-2062 (1987).
【非特許文献１９】Pendry, J. B., Holden, A. J., Robbins, D. J. & Stewart W. J. Magnetism from Conductors and Enhanced Nonlinear Phenomena. IEEE Trans. Microw. Theory Tech. 47, 2075-2084 (1999).
【非特許文献２０】Haldane, F. D. M. & Raghu, S. Possible Realization of Directional Optical Waveguides in Photonic Crystals with Broken Time-Reversal Symmetry. Phys. Rev. Lett. 100, 013904 (2008).
【非特許文献２１】Wang, Z., Chong, Y. D., Joannopoulos, J. D. & Soljacic, M. Reflection-Free One-Way Edge Modes in a Gyromagnetic Photonic Crystal. Phys. Rev. Lett. 100, 013905 (2008).
【非特許文献２２】Wang, Z., Chong, Y., Joannopoulos, J. D. & Soljacic, M. Observation of unidirectional backscattering-immune topological electromagnetic states. Nature 461, 772-775 (2009).
【非特許文献２３】Fang, K., Yu, Z. & Fan, S. Realizing effective magnetic field for photons by controlling the phase of dynamic modulation. Nature Photon. 6, 782-787 (2012).
【非特許文献２４】Khanikaev, A. B. et al. Photonic topological insulators. Nature Mater. 12, 233-239 (2013).
【非特許文献２５】Ma, T., Khanikaev, A. B., Mousavi, S. H. & Shvets, G. Topologically protected photonic transport in bianisotropic meta-waveguides. arXiv: 1401.1276 (2014).
【非特許文献２６】Liang, G. Q. & Chong, Y. D. Optical Resonator Analog of a Two-Dimensional Topological Insulator. Phys. Rev. Lett. 110, 203904 (2013).
【非特許文献２７】Rechtsman, M. C. et al. Photonic Floquet topological insulators. Nature 496, 196-200 (2013). 6
【非特許文献２８】He, C., Sun, X.-C., Liu, X.-P., Lu, M.-H., Chen, Y., Feng, L. & Chen, Y.-F. Photonic analogue of quantum spin Hall effect. arXiv: 1405.2869 (2014).
【非特許文献２９】Hafezi, M., Demler, E. A., Lukin, M. D. & Taylor, J. M. Robust optical delay lines with topological protection. Nature Phys. 7, 907-912 (2011).
【非特許文献３０】Hafezi, M., Mittal, S., Fan, J., Migdall, A. & Taylor, J. M. Imaging topological edge states in silicon photonics. Nature Photon. 7, 1001-1005 (2013).
【非特許文献３１】Ochiai, T. Photonic realization of the (2+1)-dimensional parity anomaly. Phys. Rev. B 86, 075152 (2012); ibid Broken Symmetry and Topology in Photonic Analog of Graphene. Int. J. Mod. Phys. B. 28, 1441004 (2013).
【非特許文献３２】Lu, L., Joannopoulos, J. D. & Soljacic, Topological photonics. Nature Photon. 8, 821-829 (2014).
【非特許文献３３】Fu, L. Topological Crystalline Insulators. Phys. Rev. Lett. 106, 106802 (2011).
【非特許文献３４】Joannopoulos, J. D., Johnson, S. G., Winn, J. N. & Meade, R. D. Photonic Crystals: Molding the Flow of Light (Princeton UniversityPress, New Jersey, 2008).
【非特許文献３５】Dresselhaus, M. S., Dresselhaus, G. & Jorio, A. Group theory: Application to the physics of condensed matter. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 2008).
【非特許文献３６】Sakoda, K. Double Dirac cones in triangular-lattice metamateri

als. Opt. Express 20, 9925-9939 (2012).
【非特許文献３７】Sakoda, K. Dirac cone in two- and three-dimensional metamaterials. Opt. Express 20, 3898-3917 (2012).
【非特許文献３８】Girvin, S. M. The Quantum Hall Effect: Novel Excitations and Broken Symmetries. (Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 1999).

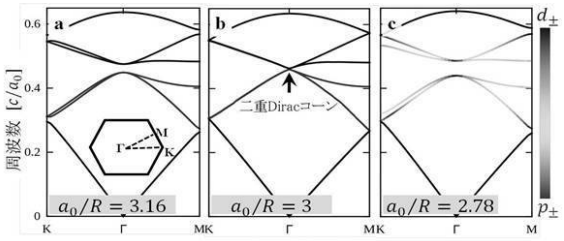
【図１】



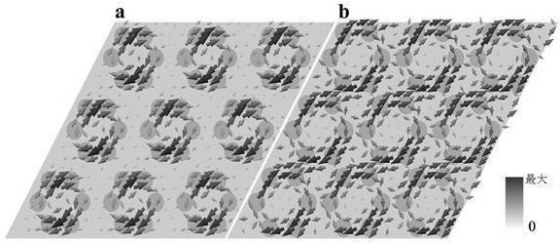
【図２】



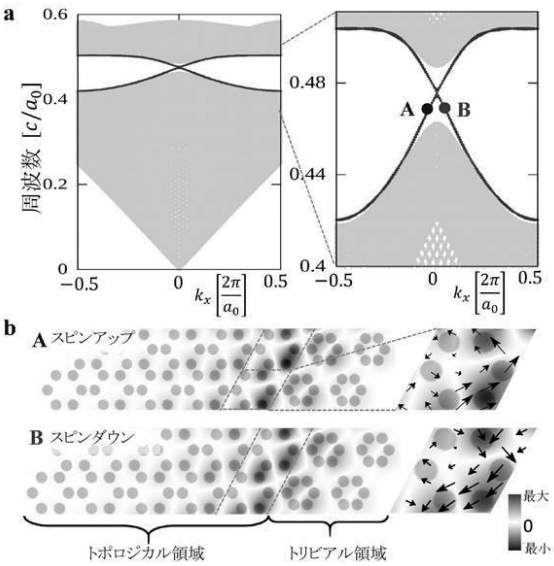
【図３】



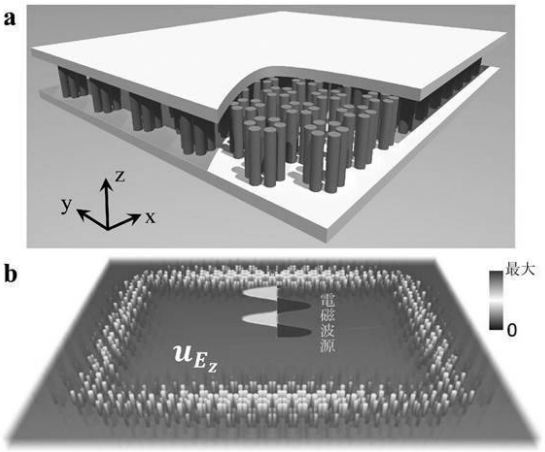
【図４】



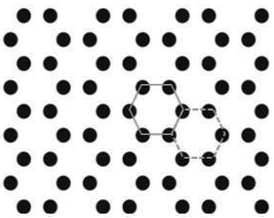
【図５】



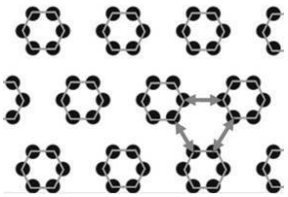
【図６】



【図７Ａ】



【図７Ｂ】



【図７Ｃ】

