

光が表面を散乱せずに伝わる新しいフォトニック結晶を発見

シリコンのみで実現可能 半導体技術との融合で新機能開発に期待

配布日時：平成27年6月8日14時
国立研究開発法人 物質・材料研究機構

概要

1. 国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトゥクス研究拠点 (MANA) の古月 暁主任研究者と呉 龍華 (ウー ロンファ) NIMSジュニア研究員のグループは、光の透過や屈折を制御するフォトニック結晶¹⁾において、光を含む電磁波が、表面のみを散乱することなく伝わる新しい原理を解明しました。蜂の巣状に配列された絶縁体や半導体の円柱 (ナノロッド) の位置をわずかに調整するだけで、電磁波は結晶の角の部分や欠陥にも散乱されることなく伝わります。この性質は、シリコン等の半導体だけでも得られるため、現在広く普及している半導体技術による情報処理と優れた情報伝播機能との融合によって、新規機能の開発に繋がることが期待されます。
2. 近年、物質の表面だけに特別な性質が現れるトポロジカル特性²⁾を持つ物質の研究が、活発に行われています。フォトニック結晶においても、通常は光が結晶内を通過する際に欠陥などによって散乱してしましますが、トポロジカル特性を実現することで、散乱することなく光の透過を制御することができ、光による効率のよい情報伝播機能を実現することが期待されています。しかし、トポロジカル特性をもつフォトニック結晶を作るためには、特殊な材料が必要とされていました。
3. 本研究グループは、複雑な物質や構造を一切使わずに、蜂の巣格子に配列した絶縁体や半導体のナノロッドの位置を調整するだけで、トポロジカル特性をもつフォトニック結晶が実現できる新しい原理を発見しました。位置調整によってできたナノロッドの六角形クラスターには、スピン³⁾ という従来電子にしかない特徴をもつ電磁波が現れます。その結果、六角形クラスター同士の間隔を小さくすれば、フォトニック結晶でトポロジカル特性が発現することが理論的に明らかになりました。
4. ナノロッドの素材としてシリコンが使えるため、既存のエレクトロニクス技術との融合により、新規機能や新規デバイスの研究開発に新しい展開が期待されます。
5. 本研究は一部、文部科学省科学研究費補助金の新学術領域研究「対称性の破れた凝縮系におけるトポロジカル量子現象」からも援助を得ています。本研究成果は、米国物理学会の論文誌 Physical Review Letters 誌にて2015年6月3日 (現地時間) にオンラインで掲載されました。

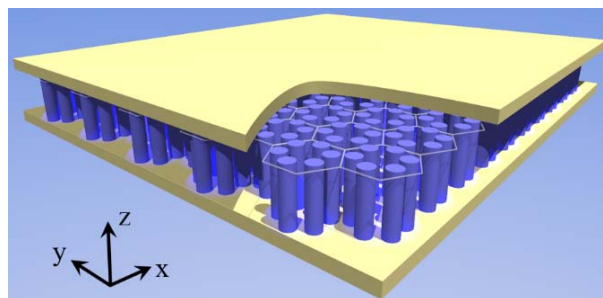


図1：フォトニック結晶の模式図。絶縁体や半導体の円柱 (ナノロッド) が蜂の巣格子に並んでいる。電磁波が漏れないように、金属で上下を挟んでいる。

研究の背景

通常の絶縁体などと違い、物質の表面や縁に特異な状態が現れるトポロジカル特性が注目を集めており、その特性を持つ物質についての研究が、物性物理及び物質科学の最先端になっています。トポロジカル特性を持つ物質は、表面のみで散乱なく電子やスピンの流れを制御できることから、スピントロニクスや強靱な量子計算などに利用できることが期待されています。電磁波の透過や屈折を制御するフォトニック結晶でも、トポロジカル特性の実現は可能であり、他の媒体との界面において、電磁波が欠陥などからの散乱を受けずに伝播されます。これまでトポロジカル特性を持つフォトニック結晶の研究では、電磁波の磁場ベクトルを回転させる物質や、電場と磁場成分を混合させるメタ物質⁴⁾ など、特殊な材料を中心に製作が検討されていました。このため、製作方法が複雑になり、シリコンなど単純な物質でできている既存の半導体エレクトロニクスとの融合において、問題を抱えていました。

研究内容と成果

本研究では、絶縁体や半導体の円柱（ナノロッド）が蜂の巣格子に配列されたフォトニック結晶に注目しました（図1、図2中列）。フォトニック結晶では、伝播できる電磁波の周波数は方向と波長に依存します。蜂の巣格子のユニークなところは、周波数が波長の逆数（＝波数）に比例する、いわゆるディラック型分散関係⁵⁾を持っていることです。これは、グラフェンで見られる特性と同じ原理です。

研究グループは、図2上段に示されているように、蜂の巣格子に配列された絶縁体や半導体のナノロッドを六角形クラスターに区分けしたうえで、形状やサイズを保ったまま、六角形クラスター同士の距離を伸ばしたり、縮めたりしました。すると、もともとディラック分散関係になっていたところ（図2中列）にギャップが開き、電磁波が伝播できない周波数帯（バンドギャップ）が現れます（図2左列、右列）。電磁波の成分を調べてみると、六角形クラスター同士の距離が大きくなっている場合、赤色と青色で示すようにその成分は単純になっています（図2左列）。一方、距離が小さくなっている場合、赤色と青色が混ざり、虹色になっていることから分かるように異なる電磁波成分が混ざっています（図2右列）。しかも、波数によって電磁波成分の混ざり具合が変化し、バンドギャップ直下の分散関係では、波数の原点になっている Γ 点では青色が強く、波数が大きくなるにつれて赤みが強くなり、ひねりが生じています。

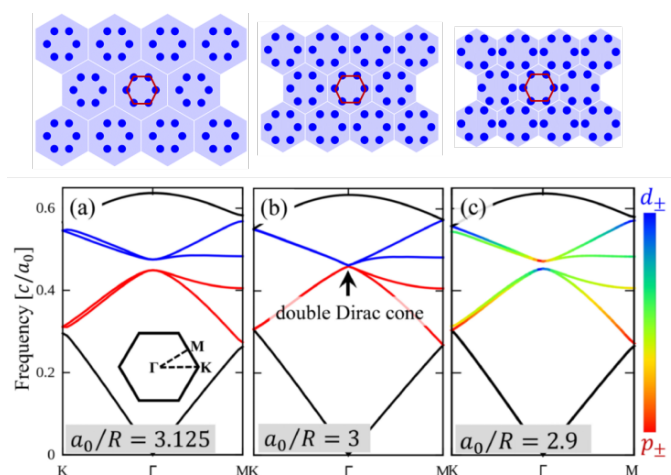


図2：上段：蜂の巣格子に並んだ円柱からなるフォトニック結晶を上からみた場合の模式図。最隣接した円柱を六角形クラスターに区分けしたうえで、形状とサイズを一定にしたまま、六角形クラスター同士の間隔を、蜂の巣格子（中列）から、伸ばした場合（左列）と縮めた場合（右列）に得られるフォトニック結晶。下段：それぞれの場合に対応するフォトニック結晶の波数と周波数の関係。但し、 a_0 は六角形の中心から計った六角形クラスター間の距離で、 R は六角形の一辺の長さである。

図2の左列と右列に示されているフォトニック結晶は、いずれも結晶内部では電磁波が伝播できませんが、分散関係が虹色になっている場合（右列）、電磁波成分のひねりによってフォトニック結晶の表面に特異な状況が現れ、図3に示しているように、空気や普通のフォトニック結晶との界面で電磁波が伝播できるようになります。結晶界面に鋭角や鈍角になっている部分があれば、普通電磁波は鋭角では後方に反射され、鈍角ではまっすぐ進みます。ところが今回の場合、電磁波がこれらをまったく感じずに界面に沿って進みます。欠陥があっても、電磁波がそれを避けて伝播できることも確認されています。これは、図2右列に示されたフォトニック結晶に量子スピンホール効果⁶⁾と呼ばれるトポロジカル特性が発生することを示しています。

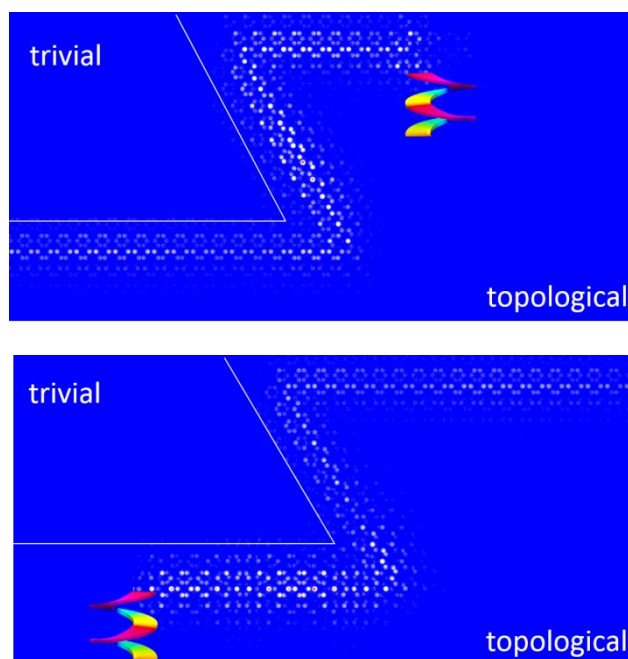


図3：トポロジカル特性を持つフォトニック結晶と普通のフォトニック結晶の界面で、鋭角と鈍角になっている場所でも、電磁波がそのまま界面に沿って伝播する様子。左手回りの電磁波が反時計方向に（上図）、右手周りの電磁波が時計方向に（下図）進む。

今後の展開

外部磁場、複雑な材料や構造に頼ることなく、単純な絶縁体や半導体の円柱の配列を調整するだけでトポロジカル特性をもつフォトニック結晶が製作できるため、今までに提案された手法より格段に製作が容易になります。円柱の材料としてシリコン等の単純な物質が使えるため、広く普及している半導体エレクトロニクスによる情報処理機能と、電磁波による情報伝播機能がコンパクトに集積でき、新規デバイスの研究開発に新しい道が開かれると考えています。電磁波が散乱されない性質を利用すれば、物体を見えなくするクローキング技術も現実になる可能性もあります。

掲載論文

題目： Scheme for Achieving a Topological Photonic Crystal by Using Dielectric Material

著者： Longhua Wu and Xiao Hu

雑誌： Physical Review Letters

掲載日時： 2015年6月3日（水）

用語解説

(1) フォトニック結晶

誘電率や透磁率の異なる物質が周期的に並ぶことによってできた電磁波の複合媒体のこと。干渉効果により伝播できる電磁波の周波数はその方向と波長に依存する。伝播できない周波数の領域もあり、電磁波のバンドギャップと呼ばれる。

(2) トポロジカル特性

電子の量子力学波動関数がかもつ特異な位相幾何学的 (=トポロジカル) 位相によって、結晶内部では普通の絶縁体や超伝導体と変わらないが、表面や縁に特異な状態が現れる現象。二次元トポロジカル絶縁体の縁に抵抗のない電流やスピン流、トポロジカル超伝導体の量子渦の芯やナノワイヤーの端に他では見られない特異な準粒子励起が現れ、斬新な量子機能が期待されている。

(3) スピン

量子力学に従う電子の内部自由度のことで、角運動量に似た性質を持っている。

(4) メタ物質

電磁波に対して負の屈折率をもつなど、自然界の物質にはない振る舞いをする人工物質のこと。それを実現するためには、電磁波の波長よりも小さなナノスケールのコイルを多数つくり、物質中に整列させることなどが必要である。

(5) ディラック型分散関係

結晶の中で電子エネルギーの運動量依存、あるいはフォトニック結晶の中で電磁波周波数の波数 (=波長の逆数) 依存が線型的になること。バンドギャップがある場合、バンドの底で分散関係が放物線的になるが、ゼロギャップになると、ディラック型分散関係が現れる。それに伴い、波動関数に非自明な幾何学的位相が現れることが多く、トポロジカル特性発現の原因になっている。

(6) 量子スピンホール効果

トポロジカル特性の1種で、時間反転対称性が保たれている。結晶表面ではスピン上向きの電子とスピン下向きの電子が逆方向に運動する。グラフェンでの提案が最初で、HgTe でその存在が理論的に予言され、その後実験で確認されたことを受けて、この分野の研究が急速に進展した。

本件に関するお問い合わせ先

(研究内容に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 国際ナノアーキテクトニクス研究拠点 (MANA)

主任研究者 古月 暁

TEL: 029-860-4897

E-mail: HU.Xiao@nims.go.jp

(報道・広報に関すること)

国立研究開発法人 物質・材料研究機構 企画部門 広報室

〒305-0047 茨城県つくば市千現 1-2-1

TEL: 029-859-2026, FAX: 029-859-2017

E-mail: pressrelease@ml.nims.go.jp