

6 フォトニック結晶

フォトニック結晶とは

フォトニック結晶 (PhC: Photonic crystal)は 1987 年に Yablonovitch [Phys. Rev. Lett. 58, 2059 (1987).] によって、「光に対する結晶」というアイデアが提案されたことに端を発する。結晶（周期的に並んだ原子）が作る周期的なポテンシャル中を運動する電子と、PhC による周期的な屈折率分布中を運動する光（フォトン）を対応付けることが、PhC の基本的なアイデアである。これにより、光に対する「バンドギャップ」を実現できることが示され、その学理的な面白さや、応用の可能性から大きな注目を集めた。具体的には、PhC は光の波長程度のスケールで屈折率（ポテンシャル）が変調された構造を指す。特に、光学領域（1 μm 程度）の非常に小さいサイズで構造を加工する微細加工技術が 21 世紀になって急速に進歩してきたことに伴い、盛んに研究されるようになった。現在では、他分野の人でも知っているほど、「フォトニック結晶」は有名である。

2次元フォトニック結晶

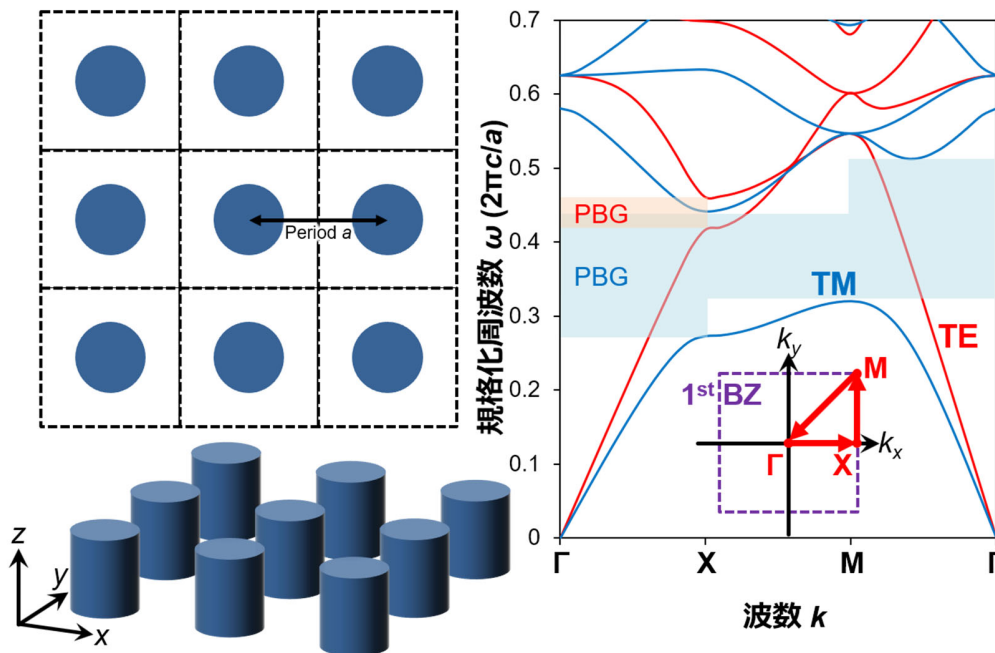
第 5 章では、誘電体多層膜を題材に PhC の基本について説明した。ここでは、本来の PhC とでも言うべき 2次元 PhC を扱う。2次元 PhC は、多層膜とは異なり、「ふたつの方向に」周期性をもつ PhC である。ブリルアンゾーンも 2次元に拡張され、周期性のある面内で任意の方向への伝搬を考えていくことになる。

詳しい内容に入る前に、「フォトニック結晶」という言葉の使われ方について述べておく。単に「フォトニック結晶」と言う場合には、2次元 PhC を指すことが多い。それは、光操作機能の自由度の高さと実装（作製）のしやすさとのバランスが優れていることが一番の理由と考えられる。（これはもちろん現在の作製・測定技術で、ということである）単純に考えれば、3次元 PhC のほうが設計の自由度が高いのでより興味もたれそうであるが、3次元構造は一般に作製が難しく、特に光領域で動作する 3DPhC を作るのは非常に難しい。また、実は 3次元 PhC を用いずとも、十分に高い誘電率の材料スラブを用いれば、全反射によって z 方向（厚さ方向）は十分に光を閉じ込めることができるため、2次元 PhC でたいのことができてしまうのだ。また、現在の作製技術を用いれば、半導体（シリコン）の 2次元 PhC の作製は現実的な労力で可能である。

更新日：2025/03/31

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

ピラー型正方格子 PhC



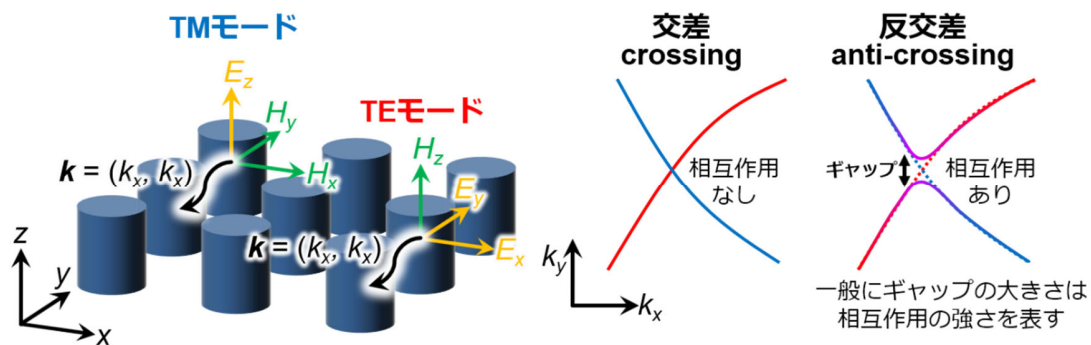
はじめに、ピラー型の正方格子 PhC を題材にして 2 次元 PhC について学んでいこう。ピラー型とは、ピラーと呼ばれる誘電体柱が周期的に並んだ図のような構造を指す。また、正方格子は、ユニットセルの並び方の種類であり、格子点が正方形に配置されていることを意味する。ここでは、議論を単純にするために、 z 方向に無限に長いピラーを考えよう。このような構造は、 z 方向に完全に一様であるため、2 次元モデルの計算（シミュレーション）によって解析することができる。図の右側は、屈折率 3、半径 $0.2a$ の誘電体円柱に対して計算したバンド図である。このバンド図について順を追って説明していこう。

まず、このバンド図には、それぞれ、TM モード、TE モードと呼ばれる 2 種類のモードのバンド図が描かれている。2 次元 PhC の x 、 y 面内を伝搬する光を考えると、 z 方向（厚さ方向）が完全に対称な構造であれば、鏡映対称性によりモードをふたつの異なる偏光に分離できる。図のように、横電場（TE）モードは面に対して垂直な磁場（ H_z ）と面内の電場（ E_x, E_y ）をもつ。一方、横磁場（TM）モードは面に対して垂直な電場（ E_z ）と面内の磁場（ H_x, H_y ）をもつ。自由空間の光と大きく異なるのは、自由空間の光が完全な横波であった（振動場が伝搬方向と完全に垂直）のに対し、PhC 中では、伝搬方向成分の場が存在する（縦波成分がある）

更新日：2025/03/31

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

ことである。従って、自由空間で定義した TM,TE (p, s 偏光) と、PhC 内の TM,TE は定義が異なる。一般に、TE と TM に対するバンドは全く異なるものになるため、PhC の研究では偏波に気を配ることが重要である。



次に、2次元周期系のブリルアンゾーン (BZ) について説明しよう。非常に単純だった1次元周期系 (多層膜) の時と比べて、2次元では BZ が2次元に拡張され複雑になる。とは言っても、正方格子の場合は、BZ も逆格子空間で同じ正方形になるため、比較的わかりやすい。ここで、BZ を表す図をみると、 Γ (ガンマ) とか M とか記号が振ってある。これは物性物理で伝統的に使われている、波数空間において対称性の高い点につけられている名称である (慣れるしかない)。 Γ 点は BZ の原点を表す記号であり、それ以外では、X、M、K 点あたりがよく出てくる。(K 点は、三角格子、八ニカム (六方) 格子などであらわれるため、今回のような正方格子では現れない) 先に述べたように、バンドの情報は BZ 内を見れば、全ての情報が入っているのだが、さらに二次元系では、対称性から、BZ 内の一部分を見るだけでよいことが知られている (この一部のことを、既約ブリルアンゾーンと呼んだりする)。正方格子の場合は、 Γ -X-M からなる三角形の領域が既約 BZ なので、そこだけを見れば十分である。一般に、PhC のバンド構造を知るためには、既約 BZ をなぞるようにすると見やすい。そのため、バンド図の横軸が、 $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma$ となっているのだ。既約 BZ をなぞるバンド図は、特に PBG の様子を知るために優れているが、実際の研究では、この線上の情報だけでは不十分なこともある。そのような場合には、特定の周波数における波数の k_y, k_x 平面内でのバンドの様子を描く「等周波数面」が用いられる。

さて、バンド図の見方がわかったところで、2次元 PhC のフォトニックバンドの特徴を見ていこう。まず、 $\Gamma \rightarrow X$ のバンドを見てほしい。TM、TE とともに、第1第2バンドは、誘電体多層膜の時と似たバンド形状になっている。これは、ある意味当たり前で、 Γ -X 方向に進む波に

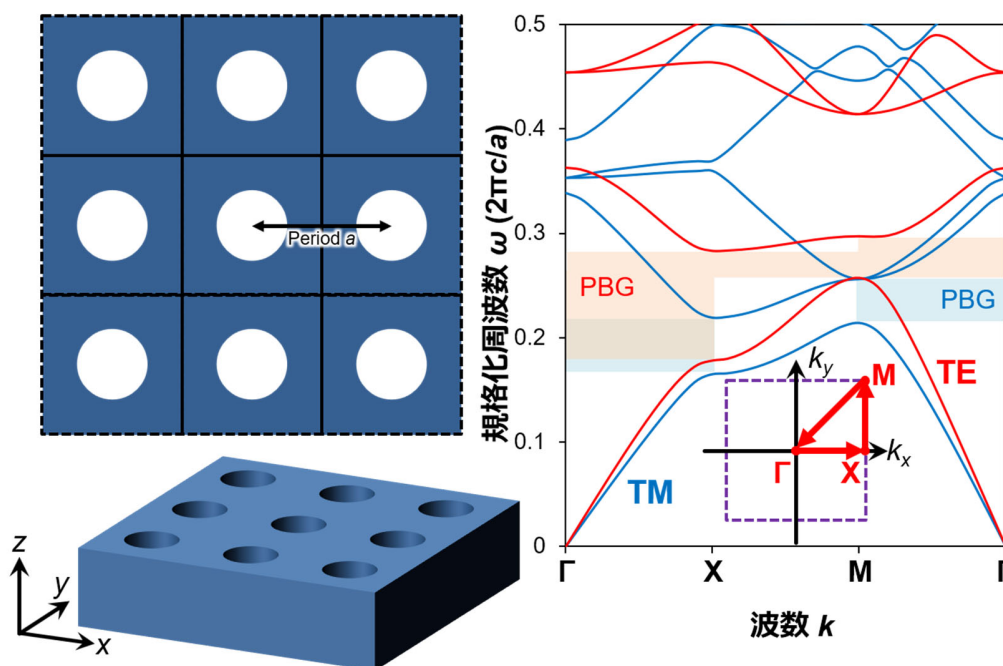
関しては、多層膜の時とほとんど同じ状況になるからである。次に、TM モードを見てみると、大きな PBG が開いていることに気づく。 Γ -X 方向だけでなく、あらゆる方向で BG が空いている。このような BG は、TM モードに関する完全 BG と呼ばれる。この周波数の (TM の) 光は、PhC 内に進入できないため、どんな角度で入射しても完全に反射される。誘電体多層膜のような 1 次元系の場合は、実は斜め入射に対しては BG が閉じて光の進入を許してしまうのだが、2 次元 PhC を使うことによってこのような完全 BG を実現できる。TE モードについては、 Γ -X と Γ -M 方向には BG があるものの、X-M 方向では BG が開いていない。一般に、ピラー型の場合は、TM モードの方が、大きな PBG を作りやすい。これは、TM 第 1 バンドのモードが誘電体ピラー部に強く閉じこもっているからである。一方、第 2 バンドでは、空気部にたまっているため、第 1・第 2 の間で大きな屈折率コントラストを感じることで大きな PBG が形成される。一方、TE では電場の面内成分があるため、界面における電束密度の連続条件のために、誘電体と空気部で電場のコントラストがつきにくく、PBG も形成しにくい。

この構造に限らず、一般的なフォトリックバンドの性質として、対称点 (Γ 点や M 点等) のモードは定在波になることが多い (例外もある)。定在波とは、逆向きの波数をもつ波が重なった結果、その場にとどまって振動するよう見えるモードであり、群速度がゼロになる。群速度とは、バンドの「傾き」で定義される光の速度を表す量であり、群速度ゼロの定在波ではバンドが平らになることを意味する。定在波は普通共振器を用いて生成されるが、PhC を用いると特定の周波数 (バンドエッジ) で定在波を生成でき、これはレーザー発振など利用される。

最後に、z 方向の対称性がない場合について触れておこう。バンドをよくみてもらうと、TM と TE のバンドは、互いに「交差 (crossing)」していることがわかる。これは、交点の周波数と波数をもつ TM と TE が同時に PhC 内に存在していても、互いに混ざることなく各々が独立に存在できるという物理的状況に対応する。一方、z 方向の対称性がなんらかの理由で壊れてしまった場合、TE、TM は独立ではなく相互作用して、バンドは反交差 (anti-crossing) する (↑図参照)。実際に作製される PhC では、z 方向の対称性が完全にはない場合が多い。例えば SOI と呼ばれるウエハを用いる場合には、スラブとして用いるシリコン層の下に SiO₂ (BOX) 層があるため、空気/シリコン/SiO₂ のような層構造になることがあるため、対称性が破れている。また、もっと細かいことを言えば、エッチング (削る加工のこと) でつくられた構造は、普通少し傾きをもっているため、わずかに z 方向の対称性を崩す。ただし、これらの影響が、十分に小さいと見做せるような場合は、PhC 内のモードを TE, TM に完

全に分けて議論することが多い。この場合、TE-like, TM-like モードと言った言葉が用いられることがある。また論文によっては、これらの like を省いてしまって、実際には混ざっているにも拘らず TE、TM と呼んでしまうことも少なくない。つまり、論文などで TE, TM という表記を見つけたら、それらをどういった意味で用いているのかを、しっかり理解することが重要である。

スラブ型正方格子 PhC



続いて、スラブ型について見ていこう。スラブ型は、薄膜のスラブに穴が周期的に空いている構造である。図の右側は、屈折率 3.5 のスラブに、半径 $0.4a$ の円形空孔を開けた構造に対して計算したバンド図である。ただし、ここでも、厚さ方向は無限として計算している。一般に、スラブ型はピラー型と相補的な役割を果たす。つまり、スラブ型では TE の PBG が形成しやすい。

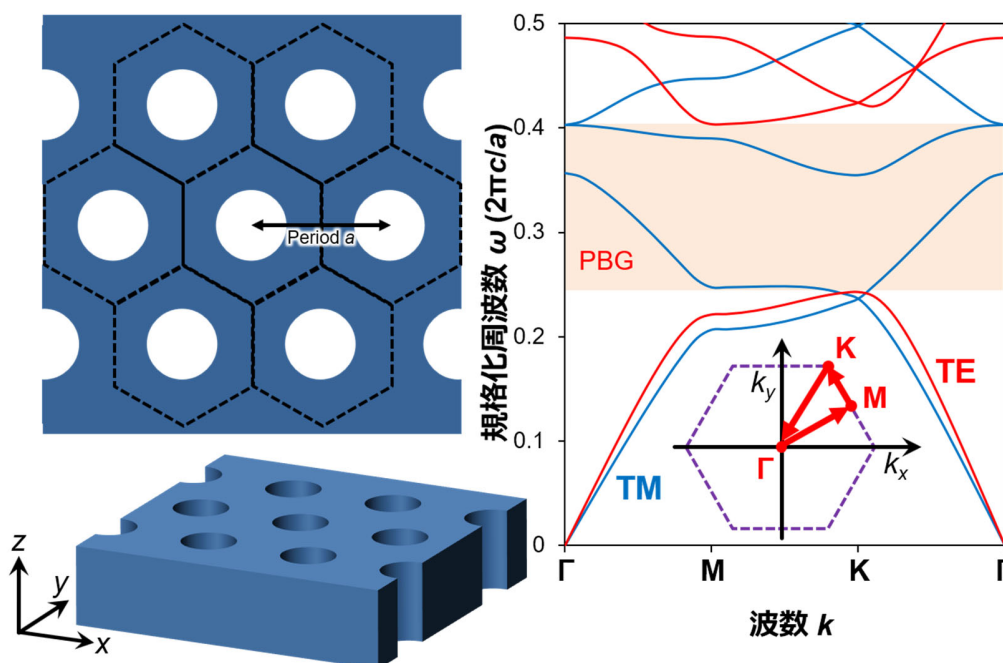
ピラー型とスラブ型

既に見たように、ピラー型では TM モードが、スラブ型では TE モードが、最も低い周波数帯で BG をもちやすい（もちろん誘電体部と空気部の比率に依存する）。一般に、狭い周波数

帯に多くのモードが存在している高次バンドは、解析や実験が難しいため、比較的各バンドが独立していて、解析や実験がしやすい低次のバンドが研究に用いられることが多い。実験的には、入射光（レーザ）の波長（周波数）と偏光を選ぶことで、PhC内のどのモードを励振するかをある程度決めることができる。特に、特定の周波数にモードがひとつしかない「シングルモード領域」では、選択的にモードを励振することが可能である。一方、特定の周波数に複数のモードがある「マルチモード領域」では、一般に選択的に励起ができないため、現象が複雑になることから実験的には避ける場合が多い。そういった事情で、低次のモードが使いやすい。このように実験的には特定の偏光（TEやTM）を選ぶことができるため、自分たちが興味のある偏光のモードのみしかバンド図に描かないことがよくあるが、どのような構造でも、一般にTEとTMモードの両方が系に存在することを忘れてはならない。

ここまで見てきたように、2次元PhCは大きく、ピラー型とスラブ型に分けることができる。光学領域（可視～近赤外）で動作するようなPhCは数百nmの周期をもつことが多いため、ピラー型のような（宙に浮いたような）構造を作るのは現実には難しい。一方で、スラブ型は、基板（スラブ）にリソグラフィとエッチング等の技術を用いて穴を空けるだけなので、比較的作りやすい。また、基板の厚さについても、ピラー低次TMモードを使う場合、400nm以上の比較的厚い基板を使う必要があるのに対して、スラブ低次TEを使う場合は、200nm程度の比較的薄い基板で実現できる（加工は基板が薄いほどやりやすい）。そういった理由から、世の中のPhCの実験的研究はスラブ型であることが多い。一方ピラー型の方は、それぞれの誘電体柱に電磁場が局在するために、各誘電体柱を原子のように見なすことができ、電子物性の世界でよく用いられるタイトバインディング（強束縛）モデルによって系をよく記述することができる。そのため、PhCの性質の理論的な解析では、ピラー型がよく用いられる。そういった事情から、多くの理論の論文はピラー型を用いるため、実験家としてはそれをスラブ型に焼き直すことがよく行われる。基本的に、ピラー型が持っている特徴は、スラブ型になっても引き継がれることが多いので、ピラー型理論の実験をスラブ型によって行うことができる。

スラブ型三角格子 PhC



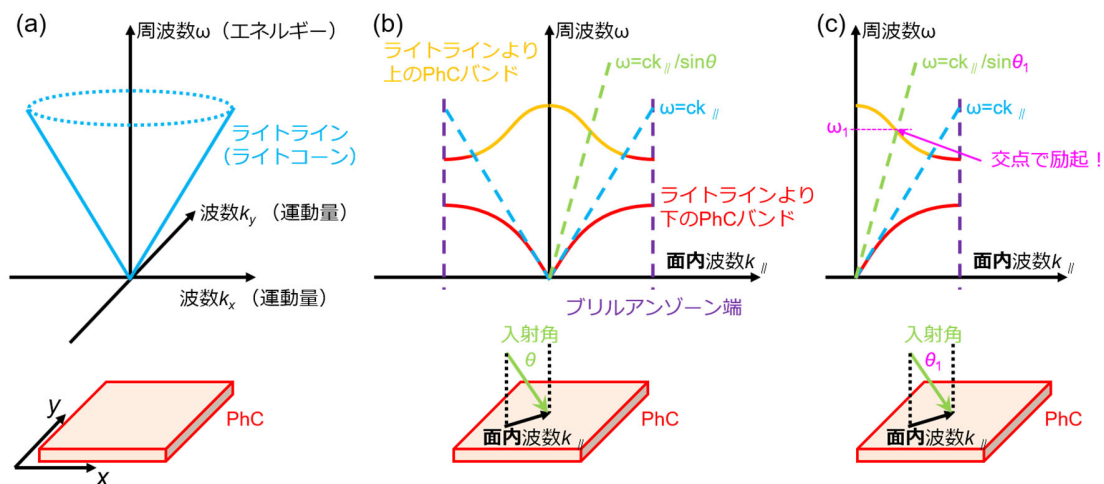
最後の例として、おそらく PhC の研究で最もよく用いられる、スラブ型三角格子 PhC を紹介しよう。三角格子は、図のようにユニットセルが六角形で、格子点が正三角形の頂点に位置している。図の右側は、屈折率 3.5 のスラブに、半径 $0.4a$ の円形空孔を開けた構造に対して計算したバンド図である。バンド図を見ると、TE 大きな PBG ができている。構造のパラメータや、バンドの軸は、ひとつ前のスラブ型正方格子とそろえてあるので、比べてみてほしい。このように巨大な BG が作れることが、スラブ型三角格子がよく用いられる理由である。また、空孔の半径を適切な値に設定すると、TE・TM の両方で重なる完全 BG を作ることもできる。そのような構造は、どんな偏光、どんな向きの光でもはねかえす、完全な光の絶縁体となる。応用上は、このスラブ型三角格子 PhC に、欠陥構造を導入することで、光導波路や光共振器などを実現することができる。三角格子の BZ はやや複雑である。一見、ユニットセルと同じ六角形なのだが、「向き」が異なることに注意しよう。また、正方格子では現れなかった、3 回回転対称性をもつ K 点があられる。K 点の TM 第 1、第 2 バンドを見ると、他の対称点とは異なり「X 字」に交わる「ディラック点」があることがわかる（グラフェンの物理を知っている人はなじみ深いだろう）。通常、対称点ではバンドが平らになることが多いため、これは非常に特殊で、三角格子やハニカム格子の K 点に特徴的なバンド分散である。

更新日：2025/03/31

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

フォトニック結晶のモードのスラブ面外からの励起

ここまで、2次元 PhC のバンド図を見てきた。ここでは、PhC 内のモードをスラブ面外からの入射光で励起する状況を考えよう。この励起を考える上でも、バンド図が役立つ。さて、励起光である入射光の分散関係を復習しよう。図(a)のように軸を取ると、PhC 面内には並進対称性があるので、その波数でライトラインを描くことにする。すると、図のように、円錐状の分散関係「ライトコーン (光円錐)」になる。自由空間から PhC 内に斜めに入射する光は、必ずこのライトコーンの内側 (円錐表面より高い周波数領域) に対応する、周波数 (エネルギー) と波数 (運動量) をもつ。図(b)において、赤 (と橙) PhC のバンドを描いている。このバンド (分散関係) の物理的意味を復習しておこう。周波数は時間と紐づいた量であり、光のエネルギーを表す。一方、波数は、空間と紐づいており運動量を表す。つまり、バンドとは、光が取り得るエネルギーと運動量のペアをあらわしている。逆言えば、それぞれは勝手な値を取ることはできず、密接に関係しあっている。



モードを励起するためには、エネルギーと (面内) 運動量がともに保存していなければならない。つまり、バンド図上で、入射光の分散と PhC バンドが「交点」をもたなければならない。図(c)のように、スラブ外から光を入射して PhC 内部のモードを励起することを考える。この時入射する周波数は自由に選べるような光源を用いることにする (ここでは ω_1)。面内波数は入射角 θ を選ぶことによって変えることができる。 θ を大きくするほど、面内方向の波数は大きくなるので、ライトラインは黄緑線のように \sin の逆関数の傾きをもつ。ここで、角度 θ の時、黄緑色の線と橙色の線が交点をもつ、つまり ω_1 の周波数をもつ光を角度 θ で入射すると、このモードを励振することができる。ここで重要なのは、 θ を大きくしていった最大の

更新日 : 2025/03/31

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗

90°になっても、水色のライトラインより下の傾きをもつことはできない。つまり、ライトライン（水色）よりも下のモード（赤色）とは（どんな周波数を選んでも）運動量保存を満たすことができない=励起できないことを意味する。逆にライトラインの上のモード（橙色）は、励起可能ということになる。ここで、面内運動量の保存が要請されるのは、もちろん PhC が二次元周期性をもち、 x, y 面内で並進対称性をもつためである。

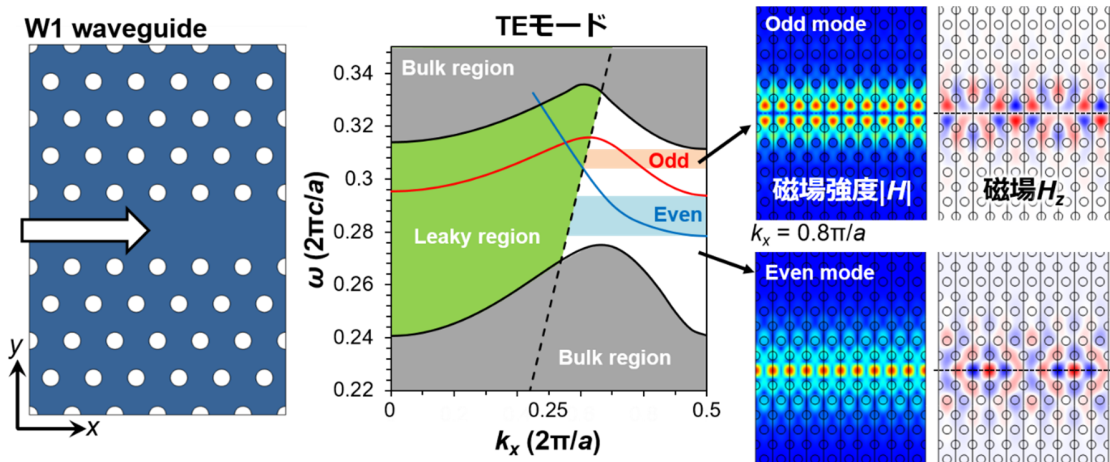
第5章で見たように、結合と放射損失は、常に表裏一体である。そのため、一般にライトライン（ライトコーン）より上にあるモードは、放射損失をもつ。つまり、励起によりその固有モードを形成しても、そのまま放っておくと、放射として光が自由空間に逃げていってしまう。ただし、励起の可否は、ライトラインとの位置関係だけでなく固有モードの対称性でも決まるため、「放射損失がある→ライトラインより上」は成り立つが、逆は成り立たない。（対称性については、ラマン分光等ででてくる光学許容・光学禁制と同じ話である）

ちなみに、COMSOL 等の数値計算で固有モードを計算した際に、放射損失は固有値の「虚部」として計算される。（虚部がなければ放射損失ゼロ）ただし、放射損失は、空気中におかれた有限の厚さをもつ PhC を 3次元モデルで計算した場合のみ計算される。2D 計算（厚さが無限）の場合は、PhC の「外」という概念が存在しないため、計算される固有値は、ライトラインの上のモードであっても、常にゼロである。

ここでの議論は、あくまで「スラブ面外」からの励振の話である。スラブの端面に向かって真横から光を入射するような場合には、面内方向の波数保存は要請されないため、もっと単純にモードを励振することが可能になる。

欠陥による導波路・共振器

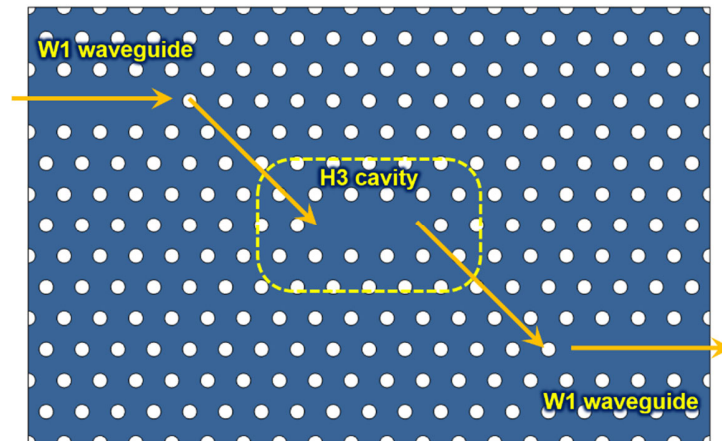
PhC は BG 中の周波数の光に対して鏡としてふるまう。その性質を利用すると、2D PhC に様々な光機能をもたせることができる。欠陥を用いた機能として、導波路と共振器がある。PhC の特定の「列」に欠陥を入れる（つまり、ピラー型の場合はピラーをなくす、スラブ型の場合は穴をなくす）と、その部分では光の伝搬が許される。すると、（シングルモード）光ファイバのように、光を導波する導波路になる。また、特定の穴のみをなくすと、その部分は光がとどまる共振器になる。共振器では、光の滞在時間が長いため、そこに別の材料を置けば、光と物質とが強く相互作用しあう。



図は、PhC の導波路でもっともよく用いられる「W1」導波路と呼ばれる構造である。Γ-K 方向に導入した線欠陥の幅「W」idth が格子「1」つ分の欠陥から形成される導波路という意味である。2 列欠陥を入れれば W2 導波路になる。この構造は x 方向に周期性があるため、 k_x を用いてバンド図を描くことができる。右図の赤線と青線は、TE 導波モードのバンドを示しており、周期系（バルク）のバンド時と同じように特定の分散関係をもつ。ここで、赤は Odd、青は Even のモードを表している。導波路の中心に対して「奇」の対称性（反対称）をもつ場合を Odd、「偶」の対称性（対象）をもつ場合を Even という。灰色の領域は PhC 内に広がるモードの領域であり、バルクモードと呼ばれる。この計算は二次元シミュレーションの結果であるが、現実の 3 次元構造の場合は z 方向（基板の厚さ方向）へ光が逃げていくモードは導波路として使うことができない。従って、ライトラインより下にあるモードのみが、実際に導波路として使用できるモードになる（ライトラインより上は、空気中に漏れていくので、leaky mode と呼ばれる）。また、導波路として使用可能な領域において、さらに単一のモードしかない周波数領域「シングルモード領域」をそれぞれの色でしめしている。この、周波数を導波路に入射すると、特定の導波路モードしか励振されないため、測定や解析が容易になりやすい。

更新日：2025/03/31

ナノフォトニクスゼミ 森竹勇斗



PhCの特定の「部分」だけに欠陥を入れた場合は、光共振器として働く。この場合、光は導波せず、共振器内を行ったり来たりする。PhC共振器では、光を小さな領域に強く閉じ込めることができるため、他の材料と組み合わせることで通常のデバイスではできない様々な機能を実現できる。ちなみに、共振器も様々な形状があり得るが、図のような共振器は「H」all（穴）を「3」つ欠陥させたものという意味で、H3共振器と呼ばれる。穴が1つだけ欠損していればH1共振器である。また、光が欠陥部に局在するとき、欠陥部の「外側」にも有限の「漏れ（近接場）」をもつ。この漏れ具合は、これまで学んだようにPhCのギャップの大きさに関係がある。図では、その近接場同士が重なるように設計することで、W1導波路とH3共振器を「結合」させている。つまり、導波路に光を投入すると、いくらかは中央の共振器に光が伝わり、さらにその一部は出力側の導波路に伝わる。このようなデバイスを用いると、出力光の強度等を見ることで共振器の特徴（共鳴波長やQ値等）を調べることができる。こういった素子たちを組み合わせることでPhCは様々なデバイスになる。