

平成21年 5 月 8 日現在

研究種目：基盤研究 (C)
 研究期間：2006～2008
 課題番号：18560029
 研究課題名 (和文) 完全 Gap を持つ 2 次元ネットワーク型 UDPS (等方分布誘電体) の創製とその応用
 研究課題名 (英文) Creation and application of 2-dimensional network UDPS having complete gaps
 研究代表者
 宮崎 博司 (MIYAZAKI HIROSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号：00134007

研究成果の概要：完全ギャップを持つ 2 次元ネットワーク型誘電体構造の探索を行った。周期系ネットワークのフォトニックギャップ構造を調べた結果、誘電壁が薄く、接点円柱半径の大きい蜂の巣型構造が、広いパラメータの範囲に渡って完全ギャップを持ち、ランダムな歪みに対し高い耐性を持つ事が判った。非周期系ネットワークでギャップを有するものは見出せなかったが、高誘電率の誘電体円柱を用いれば従来の UDPS 構造でも完全ギャップが実現できる事が判った。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2006年度	1,000,000	0	1,000,000
2007年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2008年度	800,000	240,000	1,040,000
年度			
年度			
総計	2,900,000	570,000	3,470,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：応用物理学・工学基礎
 キーワード：微小光学、マイクロ光デバイス

応用光学・量子光工学

1. 研究開始当初の背景

フォトニック結晶は、メタマテリアルや負の屈折率等の興味深い研究領域を提供し続けているが、工学的応用としての魅力は依然としてフォトニックギャップにある。我々は「フォトニックギャップには周期性が本当に不可欠か？」という素朴な疑問から出発し、2次元誘電体円柱系の円柱間隔に下限 D_{min} を設定し、それ以外の周期配列などの規則を全て取り除いた等方分布円柱系 (UDPS) を提唱した。UDPS 構造では、円柱の誘電率が閾値を越えると TM モードに全方位ギャップが現れる。しかしながら、円柱系 UDPS のギャップ

は TM モードに限られ、面発光素子やファイバーとの接続で重要な TE モード (磁場が円柱軸に平行なモード) のギャップは見出されなかった。一方、円筒系をベースにした UDPS を作成したところ、狭いけれど TE モードにギャップが現れた。その代わり、TM モードにはギャップが現れなかった。工学的な応用を考えると TM と TE の両モードにギャップを共有する完全ギャップの光学材料が望まれる。以上の研究過程から次の事がわかる。円柱的構造は TM 局在モードをサポートし、円筒的構造は TE 局在モードをサポートする。そして局在モードがあれば、強結合的なボンドの

形成によって、それぞれのモードのギャップが形成される。したがって両者が共存する構造ならば、揺らぎに強い完全ギャップを持つ可能性がある。この両者を兼ね備えた構造が Network 型 UDPS である。

2. 研究の目的

ネットワーク型 UDPS の構成要素としての円柱や多角形リングの固有モードが、各パラメータにどのように依存するかのデータベースを作る。周期系ネットワークでの TE と TM ギャップが、構成要素の固有モードからどのように構成されるかを広いパラメータ範囲に渡って調査し、ギャップを有するネットワーク型 UDPS 構造の設計指針を得る。また、周期系 Network の円柱位置に大幅な揺らぎを入れてギャップの耐性を調べる。ついで、周期系を母体としないネットワーク型 UDPS の作成方法を確立し、パルス FDTD 法を用いて、フォトニックギャップ構造を調査し、どのような特徴を持てば TM 及び TE の両モードにおいて全方位フォトニックギャップを持つかを明らかにする。

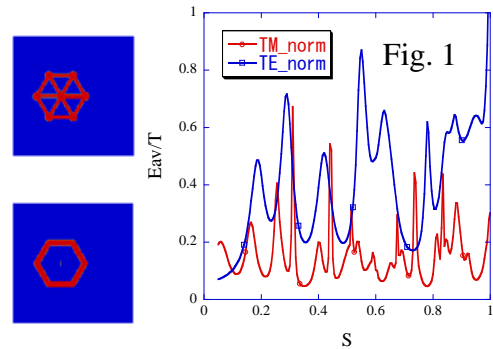
3. 研究の方法

計算は、多中心ベクトル円柱関数展開法とグリーン関数法を組み合わせた解析的方法と、2次元 FDTD 法で行った。FDTD 法は、RC 法やサブセル法などを実装し、入射パルスによって広範な周波数にわたりスペクトルを得る事ができる利点があるが、PML のコーディングが難しいので、解析解との比較のほかに、市販の標準的な FDTD ソフトウェアを購入して、計算結果を直接に比較検討し、プログラム作成の効率化を図った。作製されたコードはマルチコアのワークステーションによって並列化コンパイルされて実行する。開発されたコードは物材機構の研究者と共有し、計算を分担することで広範なパラメータ範囲で野スペクトルを得る事ができる。また、実験面で多大な経験を有する東大生産研のグループと総合的な議論を重ねることで応用に関する様々な問題点を指摘してもらう。

4. 研究成果

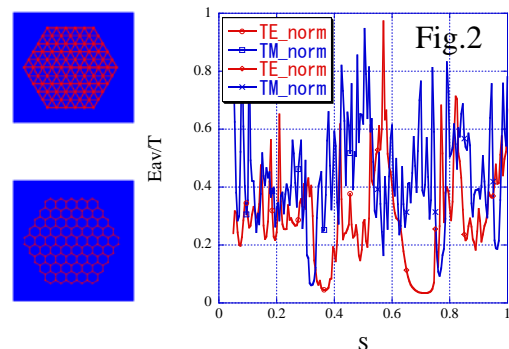
(1) ネットワークを構成する多角形リング状の誘電体構造の電磁場固有局在状態を明らかにした。構成要素としては三角形や四角形のほかに、蜂の巣構造の構成要素となる正六角形や正三角形が 6 つ集まった構造を考え、各辺の厚さ(壁厚)と、各辺の接点に置いた円柱の半径を様々に変化させて固有状態を求めた。固有状態を求めるのに解析的な取り

扱いができないので、FDTD 法を開発し、パルス FDTD 法を用いてスペクトルを求めた。構成誘電体の誘電率を 12、辺長は 40 ミ



クロンに固定し、壁の厚さは 3-5 ミクロン、円柱の半径は 3-7 ミクロンとした。円柱の半径を a 、入射波数を k として $S=ka$ をパラメータとし、 $S<1.5$ の範囲で構造内に蓄積される電磁場エネルギースペクトルを求めた。図 1 に、典型的な六角形リング構造とその TM および TE 共鳴周波数を示す。非常に多くのピークが存在するが、それらは必ず、三角リング、六角形リングおよび接点での円柱の共鳴状態として分類されることがわかった。

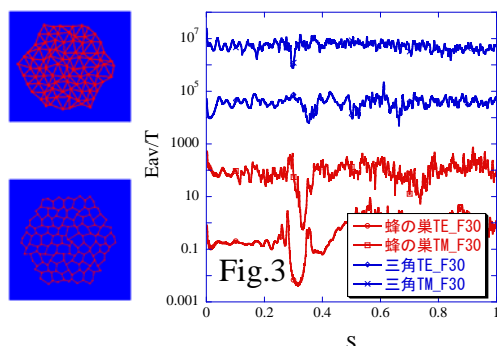
(2) (1) で調査した多角形リングの中で三角形と六角形をそれぞれ基本構成要素とする周期系ネットワーク構造のフォトニックバンド構造を調べた。三角形は三角格子を、六角形は蜂の巣構造を切り出したものである。構成要素を周期的に配列した系のバンド構造を参考にしながら、切り出しのサイズによ



ってフォトニックギャップ構造がどのように成長していくのかを詳細に調べた結果、系の辺長が構成要素の辺長の 5 倍程度になればフォトニックギャップ構造が十分成長することがわかった。ついで、構成要素の辺長を $b=50$ ミクロン、入射波数を k として、 $S=kb < 6$ の範囲でギャップを探索した。図 2 に壁厚 2 ミクロン、円柱半径 7 ミクロンの場合の試料形状および有限三角格子の場合の透過率を示す。このパラメータでは、TE モードに 2 つのギャップが見えるが TM モードでは一つの狭いギャップしか現れない。しかも、それらのギャップは重なりあいが殆どない。そこ

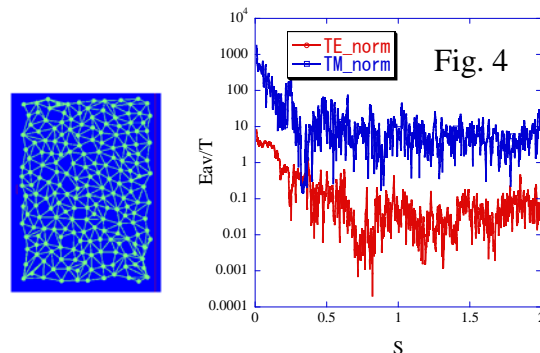
で、壁厚を2, 4, 6 ミクロンとし、接点の円柱の半径を壁厚から 20 ミクロンまで変化させて、TM モードと TE モードでのフォトニックギャップのパラメータ依存性を調べた。ただし、構成要素の誘電率は 12 に固定してある。その結果、有限三角格子においては、円柱半径が 8 ミクロンから 13 ミクロンまでと、18 ミクロンから 20 ミクロンの間で、TM と TE に共通なフォトニックギャップが存在することがわかった。ただし、壁厚は 2 ミクロンが尤も適切で、厚さが増加すると TM モードのギャップが急速に縮まる事がわかった。この原因は、TM モードのギャップの起源が接点の円柱に局在する電磁場状態であることによる。壁が厚くなることで円柱間の相互作用が増大し、TM モードのギャップ幅が侵食される。一方、有限の蜂の巣構造では円柱半径が 8 ミクロンから 17 ミクロンの範囲で TM と TE に共通のギャップが存在する事がわかった。この場合も、壁厚は 2 ミクロンが最適で、厚くすると TM モードのギャップが急速に縮小する。

(3) (2)で調査した有限三角格子系と有限蜂の巣格子系に対してランダムな変形を加えてギャップの耐性を調べた。ランダムな変形としては、乱数を多数発生させ、これを用いて格子の各接点座標に辺長の±30%の範囲までの位置揺らぎを与えた。図3左にその1例を示す。実際の計算では相異なる乱数の



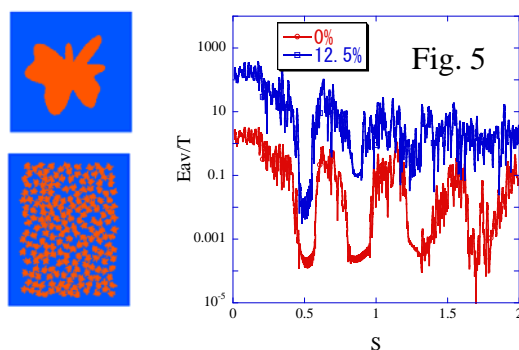
セットを 5 例用意して位置揺らぎを与え、TM と TE の両モードで透過率を求めた。図 3 右に、蜂の巣格子と三角格子に±30% (F30)の揺らぎを加えた系での透過率を示す。ただし、壁厚は 2 ミクロン、円柱半径は 12 ミクロンである。透過率はそれぞれ 5 例で平均化してある。図からわかるように、有限三角格子の TE ギャップは急速に減少し、ほとんど消滅状態になる。TM ギャップはもともと狭いので三角格子での完全ギャップは格子変形に非常に弱い事がわかる。一方、蜂の巣格子は図 3 からわかるように格子変形に対して高い耐性を持ち、完全ギャップが消えない事がわかった。これは円柱半径が 10~17 ミクロンで成り立つ。又、壁厚が 4 ミクロンでも完全ギャップが現れることが分かった。

(4) 以上は周期系をベースにしたランダムネットワーク系であるが、UDPS のように周期系を母体構造としない系をベースにしたネットワークの作製を試みた。作製の仕方は次のようである。UDPS の円柱配置を出発点にして、任意の 2 つの円柱をとり、その距離がある値以下であるとき、それらの円柱間を誘電体壁で結合する。このようにするとネットワ



ークは作製できるのであるが、壁と壁が互いに交差する事が多々あり、そのような場合は片方の壁を取り除く必要がある。このような不要な壁を取り除くアルゴリズムの作製が大変難航し、コードの完成に時間を要した。こうして作製されたネットワークの一例を図 4 左に示す。このような系での TM と TE の透過率をパルス FDTD 法に基づいて求めた。ただし、接点の円柱半径は 15 ミクロンとし、壁厚を 1-10 ミクロンに変化させた。相当広範なパラメータの範囲で調べたが、ギャップは TM モードで壁厚が 1-2 ミクロンの場合のみで現れた。従って、この方法では完全ギャップの発現は難しい事がわかった。

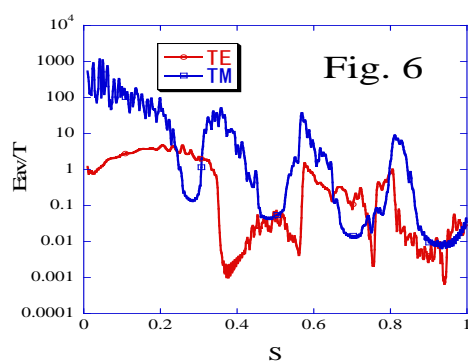
(5) (1)の研究の副産物として、円柱がランダムな変形を受けた場合の UDPS のギャップ構造を調べた。通常の UDPS では構成要素を誘電体円柱とするが、今の場合には各円柱が



半径方向にランダムな変形を受ける。図 5 左上にランダムな変形を受けた円柱の 1 例を示す。この場合、動径方向に半径の±12.5%以内の伸縮を受けている。ただし、円柱の面積は不変とする。このような円柱を UDPS 配列で並べた系の TM モードでの透過率を図 5

右に示す。0%は無変形の場合である。図からわかるように、最低次のギャップは円柱の変形に対して非常に高い耐性を示す。その原因はギャップの起源にある。最低次のギャップは円柱の最低次のMie共鳴による。この共鳴は局在性が弱く、固有電磁場は円柱領域を超えてかなりの広がりを持つ。そのため、共鳴は円柱自身の総面積によって決まり、その形状に鈍感である。これが変形に対する高い耐性の起源である。

(6)我々はTHz領域でのメタマテリアルの研究も同時進行で進めているが、この領域ではTiO₂等のように大変高い誘電率(120程度)を持つ誘電体が存在する。本来UDPSは1.55ミクロンでのSiを想定して誘電率を12に固



定しているが、THz領域での研究がヒントとなって、波長領域を変えることで誘電率に選択の幅があることに気づいた。そこで、従来のUDPS構造ではあるが、構成する誘電体要素が非常に高い誘電率を持つ場合のTMTE両モードでの透過率をパルスFDTD法を用いて計算した。結果の一例を図6に示す。ただし誘電率は45にとっている。明らかにいくつかの周波数領域で完全ギャップが発現している事がわかる。従ってこの研究から、高誘電率の誘電体を用いれば従来のUDPSでも容易に完全ギャップを持つものが作り出せる事がわかった。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計 4 件)

- ①T. Fujishima, and F. Minami (8名, 3番目), Light Propagation from a fluorescent particle embedded in a photonic clusters of micrometer-sized dielectric spheres, Optical Express, Vol. 16, 20706-20723, 2008, 査読あり
- ②N. Horiuchi, and K. Ohtaka (12名, 9番目), Exotic radiation from a photonic crystal excited by an ultrarelativistic electron beam, Physical Review E, Vol. 74,

056601-1-4, 2006, 査読あり

- ③Y. Shibata, and K. Ohtaka (10名, 7番目), Properties of Coherent Radiation Emitted from Photonic Crystal in the Millimeter Wave Region. I, Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Vol. 39, 55-66, 2006, 査読なし
- ④Y. Shibata, and K. Ohtaka (10名, 7番目), Properties of Coherent Radiation Emitted from Photonic Crystal in the Millimeter Wave Region. II, Research Report of Laboratory of Nuclear Science, Tohoku University, Vol. 39, 55-66, 2006, 査読なし

[学会発表] (計 7 件)

- ① 宮崎博司, Resonant Terahertz Transmission through Incommensurate Metal Hole Arrays, Metamaterials 2008, 2008年9月25日, Pamplona, Spain
- ②宮崎博司, Penrose配置金属開口からのテラヘルツ波の共鳴透過, 日本物理学会, 2008年3月24日, 近畿大学
- ③ 萩行正憲, Resonant terahertz transmission through Penrose metal hole arrays, Metamaterials 2007, 2007年9月23日, Rome, Italy
- ④藤嶋敏之, 微小マニピュレーションによるフォトニッククラスタの作製と光伝播特性, 日本物理学会, 2007年9月22日, 北海道大
- ⑤神馬洋司, 同心円状に配置した誘電体球の共鳴モードと電場強度分布Ⅲ, 日本物理学会, 2007年9月22日, 北海道大
- ⑥宮崎博司, 誘電体がランダムに変形したフォトニック結晶のフォトニックギャップ, 日本物理学会, 2007年3月21日, 鹿児島大
- ⑦宮崎博司, ランダムな変形による誘電体円柱系UDPSのフォトニックギャップの変化, 日本物理学会, 2006年9月24日, 千葉大

6. 研究組織

(1) 研究代表者

宮崎博司 (MIYAZAKI HIROSHI)
 東北大学・大学院工学研究科・准教授
 研究者番号: 00134007

(2) 研究分担者

(3) 連携研究者