

論文の内容の要旨

フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドの光伝播特性

氏名 今川 成樹

【1. 緒言】

フォトニック結晶とは、誘電体が光の波長程度の周期性をもって配列した人工的な構造体である。その大きな特徴は、結晶構造をうまく設計することにより、特定の周波数領域の光の伝播をあらゆる方向で禁止する3次元フォトニックバンドギャップ(3D-PBG)を形成することである。これを利用することで光の制御性を飛躍的に高めることができることから、近年幅広い方面から注目されている。その3D-PBGの形成は従来周期的結晶格子によるフォトンのブラッグ散乱によると考えられてきた。ところが、最近、周期的結晶格子を持たないアモルファス構造であるにもかかわらず、明確に3D-PBGを形成するフォトニック・アモルファス・ダイヤモンド(PAD)が計算機シミュレーションにより発見された^[1]。

本研究では、このPADの光伝播特性を明らかにすることを大目的とし、以下の5つの小目的について研究を行った。1.PADにおける3D-PBG形成の実験的な証明、2.PADにおけるパスバンド周波数の光伝播特性を解明、3.PADにおける3D-PBG形成機構の解明、4.誘電体球で構成したPADにおける3D-PBG形成の発見とその形成機構の解明、5.PADを用いた点欠陥共振器の光閉じ込め性能の評価

【2. 方法】

2.1 実験方法

マイクロ波帯サイズのPADと比較のために結晶ダイヤモンド構造を誘電体ロッドで構成したフォトニック結晶ダイヤモンド(PCD)を粉末焼結積層造形法^[2]により作製した(Fig. 1)。材料粉末にはナイロンと二酸化チタンを用い、ロッド部の屈折率を高めるため作製した試料のロッド部内の空孔を適量の氷とした。最終的に、PADが十分大きな3D-PBGを形成する屈折率、また十分小さく吸収による影響は無視できる損失係数とした。

電磁波透過スペクトル測定は、ベクトルネットワークアナライザ(HP Model 8722D, agilent Technologies)を用いた自由空間法で行った。直線偏光の電磁波を一つのアンテナ(発信器)から発射し、もう一つのアンテナ(受信器)によって透過波を測定し

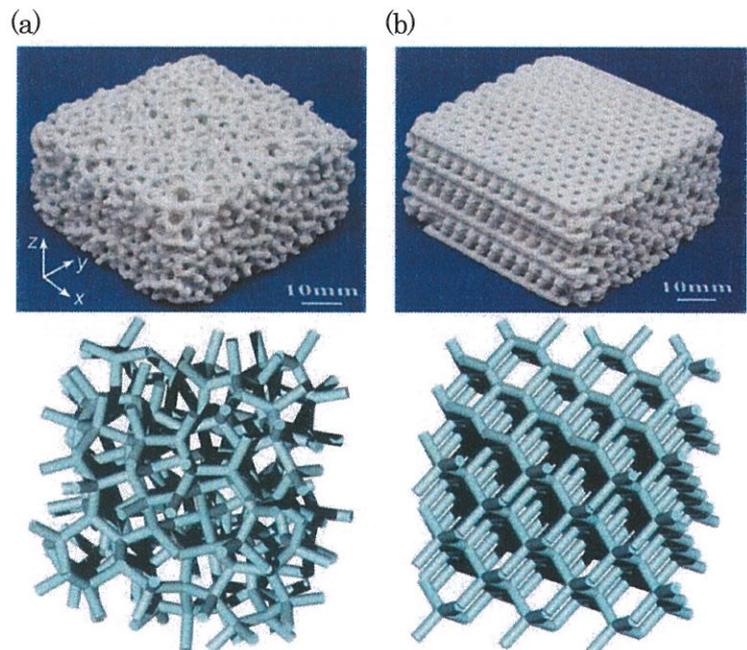


Fig. 1
(a)作製したPAD(上段)、Computer graphics 像(下段)
(b)作製したPCD(上段)、Computer graphics 像(下段)

た。このとき二つのアンテナの偏光方向を相対的に変えて入射偏光と平行な透過波の直線偏光成分(平行成分 T_p)と垂直な直線偏光成分(垂直成分 T_c)の強度と位相、すなわち複素透過スペクトルを測定した。

2.2 計算方法

計算機上でのロッドと球で構成したPADとPCDを作成した。これらについてFinite Difference Time Domain (FDTD)スペクトラル法^[3]を用いて光固有状態の周波数分布を計算した。

PADとPCDに点欠陥を導入し、その欠陥部を中心とする大きさの異なる立方体スーパーセルを作成した。これらについてFDTD法を用いて、欠陥部から欠陥準位に対応したガウシアンパルスを励振させたときの、欠陥部内のエネルギーの減衰を計算し、光共振器の光閉じ込め性能を示すパラメータであるQ値を見積もった。

【3. 結果と考察】

3.1 3D-PBG 形成の実証

PADの T_c の測定結果(Fig. 2(b))にはスペクトルの明確な落ち込みがみられ、その落ち込みの周波数域は6つの異なる入射・偏光方向の結果でよく一致している。このことは入射方位によってスペクトルの落ち込み周波数域が異なる従来のフォトニック結晶の結果とは大きく異なる。また、6つのスペクトルの落ち込み周波数は光固有状態の周波数分布の計算結果にみられる3D-PBGの位置と一致している。このことはPADにおいて等方的にPBGが形成されていることを示唆している。一方、PADの T_p には特異な特徴がみられる。というのも、 T_p の減少は計算で示された3D-PBGの下端周波数よりもずっと低周波数から始まっており、上端より高周波数域においても T_p は 10^{-1} 程度の小さな値にとどまっている。

3.2 光伝播特性の特徴

本実験では、受信器の指向性は比較的大きいため、 T_p 成分は主にバリスティック伝播成分、 T_c 成分は拡散伝播成分とみなすことができる。そのため、Fig. 2(a)に見られたPADのバリスティック伝播成分における特異な減衰は電磁波の進行方向と偏光方向を変える散乱が生じたためであると考えられる。ここで、これらの電磁波がPAD中を伝播する際の散乱平均自由行程を見積もると、低周波数端では、 l は試料厚さよりも大きく、伝播は完全にバリスティックであり、周波数が高くなるにしたがって l は小さくなり、拡散伝播が支配的になってきていることが分かる(Fig. 3)。また、3D-PBGより高周波数域においても拡散的な伝播が支

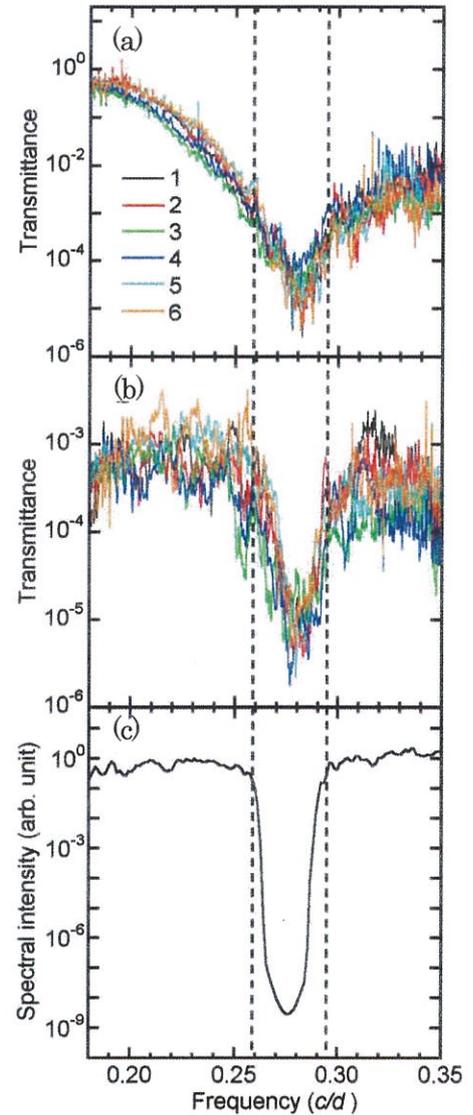


Fig. 2 PADの透過スペクトル T_p (a)と T_c (b)の測定結果と光固有状態の周波数分布(c)

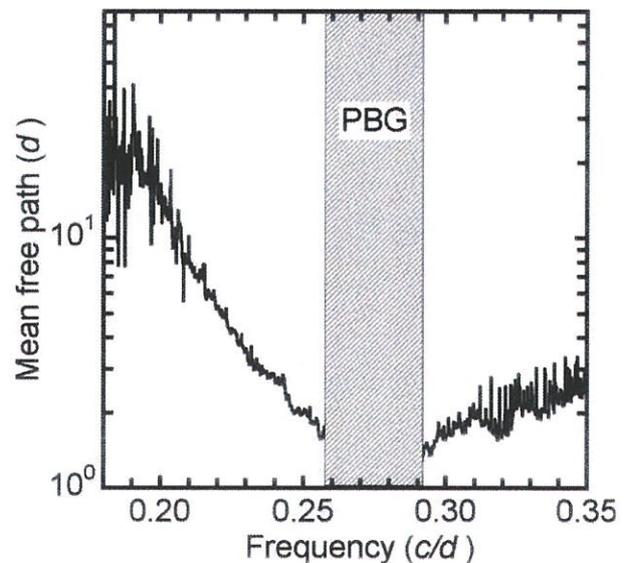


Fig. 3 バリスティック透過成分から算出した、PADの散乱平均自由行程の周波数依存性

配的となっている。

上述の通り PAD は強い拡散伝播特性を示すので、光のアンダーソン局在が実現している可能性がある。そこで、PAD についてアンダーソン局在が生じる指標である Loffe-Regel 条件^[4]を当てはめると 3D-PBG 上下端の平均自由行程はその条件をほぼ満たすことが明らかとなった。また、FDTD 法を用いて 3D-PBG 上下端について固有状態の電場強度分布を計算し、実際に光が局在していることを確認できた。

3.3 3D-PBG 形成機構の解明

PCD と PAD についての 3D-PBG 上下端近傍の電場集中度の計算結果から、PCD、PAD 共に 3D-PBG 上端近傍の周波数では空気領域に電場が集中し、下端近傍の周波数では誘電体領域に電場が集中していることが分かった (Fig. 4)。これは従来のフォトニック結晶における誘電体バンドと空気バンドの描像にそのものであり、このことが 3D-PBG 形成に寄与していると考えられる。また $\nabla \cdot (\epsilon(r)E(r)) = 0$ より、3D-PBG 上下端近傍の周波数において電場が誘電体(空気)領域のネットワークに湧き出し・吸い込みない流れを形成している必要がある。実際に流れを形成するために必要不可欠な構造体が持つネットワークを少しだけ分断した構造体において 3D-PBG が急激に消失していることを確認した。しかし、ただネットワークをもつ構造であれば良いのではなく、PCD や PAD のように誘電体、空気領域が双対性のある構造であることが 3D-PBG 形成に有利であると考えられる。

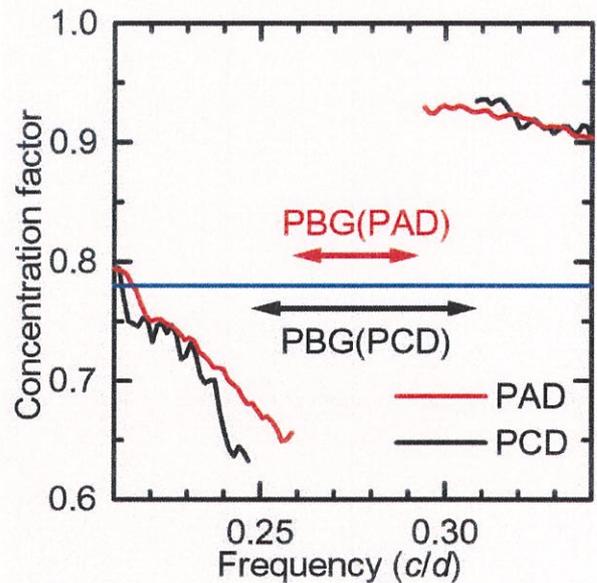


Fig. 4 PCD と PAD についての電場集中度

3.4 光閉じ込め性能の調査

PCD と PAD の全ての構造体サイズについて Q 値を見積もった (Fig. 5)。PAD の 3 種類の結果は全ての構造体サイズにおいてほぼ一致して構造体サイズが増すに従って Q 値が指数関数的に増加していることが分かる。また、これらの欠陥中に閉じ込められているモード体積は PCD、PAD 共にほぼ同程度の $0.1(\lambda/n)^3$ であった。以上のことから、PAD の光閉じ込め性質は従来のフォトニック結晶と同程度であると言える。

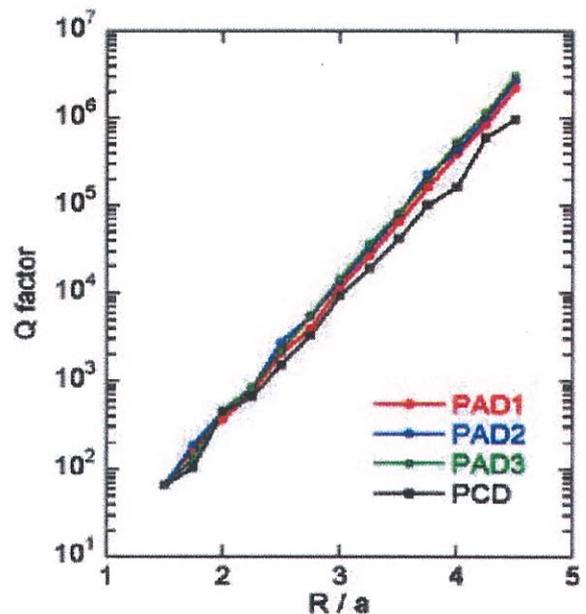


Fig. 5 PCD(黒)と 3 種類の PAD(赤、青、緑) についての値の構造体サイズ依存性

3.5 誘電体球で構成した PAD についての 3D-PBG 形成の発見とその形成機構の解明

3 種類の誘電体球で構成した PAD と PCD についての光固有状態の周波数分布の計算結果から、ネットワークの連続性に起因する 3D-PBG とは別に球が小さくなりネットワークがなくなった $r = 0.45d$ において高周波数側に上記の 3D-PBG とは別の 3D-PBG が形成されていることを発見した (Fig. 6)。

この高周波数側の 3D-PBG の形成機構を明らかにするため、孤立した 1 つの誘電体球とその誘電体球の周りに PCD 構造の第一近接まで、第二近接まで、第三近接までの誘電体球を配置した構造体中の誘電体球において、共鳴状態を形成する周波数を調べた。孤立した誘電体球の結果においては飛び飛びの周波数が共鳴状態を形成しており、第一近接、第二近接と誘電体球を配置するに従ってこれらの周波数が幅を持つようになり、最終的に第三近接まで配置した構造体中においては、幅広い周波数において共鳴状態が形成されていることを明らかにした。また、共鳴状態が形成されていない周波数帯は光固有状態の周波数分布で示された 3D-PBG 位置と一致していた。このことは、高周波数側の 3D-PBG 形成は電子論における強束縛近似とよく一致している。

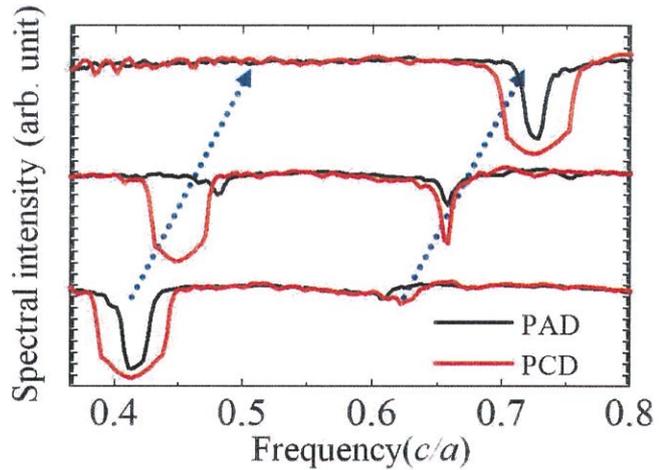


Fig. 6 誘電体球で構成した PAD と PCD についての光固有状態の周波数分布

【4. 総括】

本研究では、マイクロ波帯サイズの PAD を作製し、電磁波透過スペクトル測定を行い、PAD における等方的な PBG 形成を実験的に証明した。また、その 3D-PBG には局在状態などは存在せず、光閉じ込め性能は従来のフォトニック結晶と同程度であることを明らかにした。3D-PBG 形成機構の説明として、従来のフォトニック結晶における誘電体バンドと空気バンドの描像が PAD の 3D-PBG 形成にも同様に適用できることを示した。一方、パスバンドにおいては光拡散や光局在に関連して特徴的な振る舞いを示すことを明らかにした。また、誘電体球で構成した PAD が高周波数側に 3D-PBG を形成することを確認し、その形成機構が電子論における強束縛近似のモデルと良く一致することを示した。

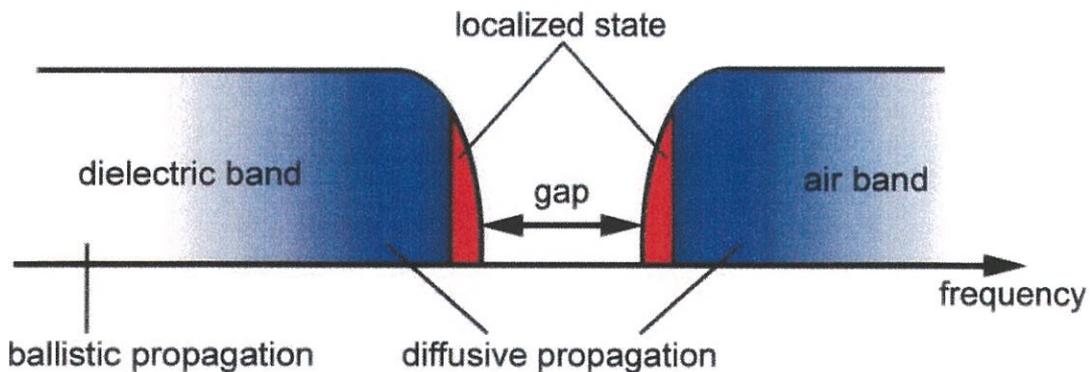


Fig. 7 PAD の光伝播特性のまとめ

参考文献

- [1] K. Edagawa, et al., Phys. Rev. Lett. **100** 013901 (2008).
- [2] S. Kumar, et al., J. Minerals Metals & Materials **55**, 43 (2003).
- [3] C.T. Chan, et al., Phys. Rev. B **61**, 13458-13464 (2000).
- [4] A. F. Ioffe, et al., (Heywood & Company, London), 237 (1960).