

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 1 日現在

機関番号：12601
研究種目：基盤研究(B)
研究期間：2012～2014
課題番号：24360024
研究課題名(和文) ランダムネットワーク光デバイスの開発

研究課題名(英文) Development of Random Network Photonic Device

研究代表者
枝川 圭一 (Edagawa, Keiichi)
東京大学・生産技術研究所・教授

研究者番号：20223654
交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,200,000円

研究成果の概要(和文)：最近我々が発見したフォトリックバンドギャップ(PBG)を形成する4配位ランダムネットワーク構造(PAD構造)をテラヘルツ帯サイズで作製した。まず、アルミナ粉末を混ぜ込んだアクリル系光硬化樹脂を原料として光造形法により構造体を作製し、600 で脱脂、1500 で焼結することによりアルミナロッドからなるPAD構造体を作製した。

PADにおけるPBG形成機構を調べる目的で5配位、6配位ランダムネットワーク構造を計算機上に作製し、PBG形成について調べた。いずれもPADほど明確なPBG形成はみられなかった。このことはPADのPBG形成に4配位であることが重要な役割を果たしていることを示している。

研究成果の概要(英文)：The four-coordinated random network structure (PAD structure) with a photonic band gap (PBG), which we recently discovered, was fabricated with the size of a terahertz frequency region. First, the structure was fabricated by a laser beam lithography using acrylic resin containing alumina particles. Then, it was dewaxed at 600 and sintered at 1500. By these procedures, we finally obtained the PAD structure of alumina rods. For the purpose of clarifying the formation mechanism of PBG in PAD, we constructed five- and six-coordinated random network structures on computer, and investigated numerically the PBG formations in them. No clear PBG formations were observed in these structures, indicating that the four-coordination in PAD plays an essential role in the PBG formation in PAD.

研究分野：材料科学

キーワード：フォトリック結晶 アモルファス構造 フォトリックバンドギャップ テラヘルツ帯

1. 研究開始当初の背景

現在、3次元フォトニックバンドギャップ(3D-PBG)を有する「フォトニック結晶」による光閉じ込め効果を利用した光制御素子を開発する研究が盛んに行われている。従来、フォトニック結晶による3D-PBG形成はフォトニック結晶の周期構造に由来して現われるものと信じられており、周期構造は大前提で不可欠のものと思われていた。ところが2008年に我々は周期性を全くもたないランダムネットワーク構造(PAD構造(図1))でも大きな3D-PBGが形成し、強い3次元光閉じ込め効果が発現することを数値シミュレーションによって見出した[1]。さらに、この構造をミリ波帯(～10mm)で作製し、3D-PBG形成を実証した[2]。また、この3D-PBGがアモルファス構造の等方性を反映して完全に等方的であることを示した。フォトニック結晶の3D-PBGは、原理的に非等方性をもつため、完全に等方的な3D-PBGの形成は、我々のPADで初めて実現されたものである。その後PADによって従来のフォトニック結晶と同程度の強い光閉じ込めができることを数値シミュレーションによって示した[3]。

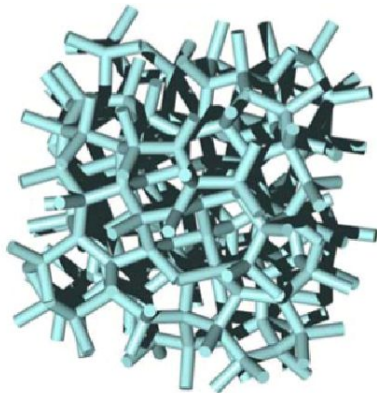


図1 PAD構造のComputer Graphics像

2. 研究の目的

前項のような背景で、本研究では、i)実際の応用に直結するテラヘルツ帯、光波帯に3D-PBGをもつランダムネットワーク構造を作製すること、ii)ランダムネットワーク構造における点欠陥共振器、線欠陥導波路等の光制御素子の基本性能を明らかにし、設計指針を確立すること、iii)3D-PBG形成機構の理論解明を行うこと、の3つを目的とした。このうちi)のテラヘルツ帯でのランダムネットワーク構造の作製と、iii)の3D-PBG形成機構の理論解明のために行った5配位、6配位ランダムネットワーク構造における3D-PBG形成に関する研究の成果を報告する。

3. 研究の方法

(1)テラヘルツ帯ランダムネットワーク構造の作製

ロッド半径 r はロッド長を d として

$r = 0.26d$ とした。このときロッド部の屈折率が $n \geq 2.5$ で3D-PBGが形成することが数値計算により示されている。本研究では、このような高い屈折率を得るために桐原らの方法[4]を用いた。これは光造形の際に用いるアクリル系光硬化樹脂にセラミックスの粉を混ぜ込んで、造形後に焼結するものである。本研究ではテラヘルツ領域での比誘電率が9.5であるアルミナ粒子を用いた。粒径は100nm、体積率10%とした。造形にはユニラピッド社製のマイクロ光造形装置(URM-HP301)を用いた。図2(a)(b)に装置の外観と造形部の模式図を示す。レーザー波長は325nmである。光造形法で作製したサイズはロッド長285 μm 、外形サイズ5.3 \times 5.3 \times 2.0 mm^3 である。積層ピッチは20 μm とした。レーザーパワーは0.005mW、スキャン速度は3mm/sとした。造形後に大気中で600 \sim 2時間の焼鈍により樹脂を除き、さらに1500 \sim 2時間でアルミナ粒子を焼結した。最後に、作製したテラヘルツ帯PADについて、電磁波透過スペクトルを測定した。装置は、東大生産研平川研のものを借用した。

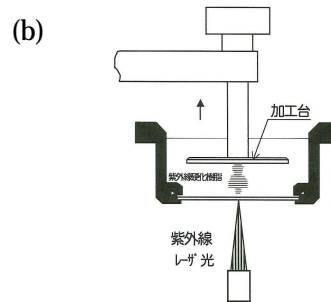
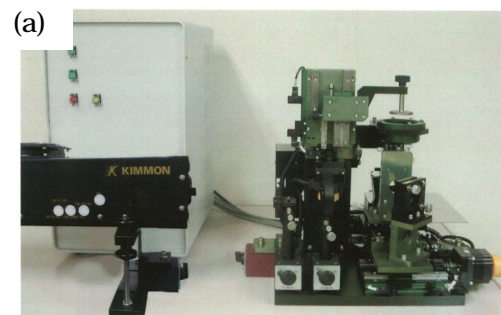


図2 用いた光造形装置の外観(a)と造形部の模式図(b)

(2)5配位、6配位ランダムネットワーク構造における3D-PBG形成

4配位ランダムネットワーク構造であるPADにおける3D-PBG形成について4配位構造が果たす役割を明確にして3D-PBG機構を明らかにする目的で、5配位、6配位ランダムネットワーク構造を計算機上に作製して光状態密度計算を行った。

構造作製には Wooten, Winer, Weaire らが Continuous Random Network(CRN)モデルを作製した手法を用いた。[5]。具体的な手順は以下の通りである。

1000 点の格子点からなる initial model を作製する。ここで 6 配位については単純立方格子、5 配位については単純立方格子からランダムに結合手を抜いて各格子点の配位数が 5 となるようにした構造を initial model とした。

で作成した構造のランダムな位置の格子点について結合の組み換えを行う。

全ての格子点について、短距離秩序が揃うように Keating potential で構造緩和する。

～ の作業を十分な回数繰り返す。

このようにして作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造について光状態密度の計算を Chan らによる方法[6]を用いて行った。ここではランダムな電磁場を初期場とし、電磁場の時間発展を計算し、フーリエ解析により光状態密度を求めた。

4. 研究成果

(1) テラヘルツ帯ランダムネットワーク構造の作製

図 3(a)(b)に作製した PAD 構造（焼結前）の実体顕微鏡像を示す。(a)において積層方向は下から上の方向である。(b)は(a)の上面の一部を上から観察したものである。十分な造形分解能で設計通りの造形ができていることが確認された。(b)において積層にともなう段差ができていることがわかる。3次元計測が可能なレーザー顕微鏡で段差の大きさを計測したところ積層ピッチの $20\mu\text{m}$ とよく一致した。

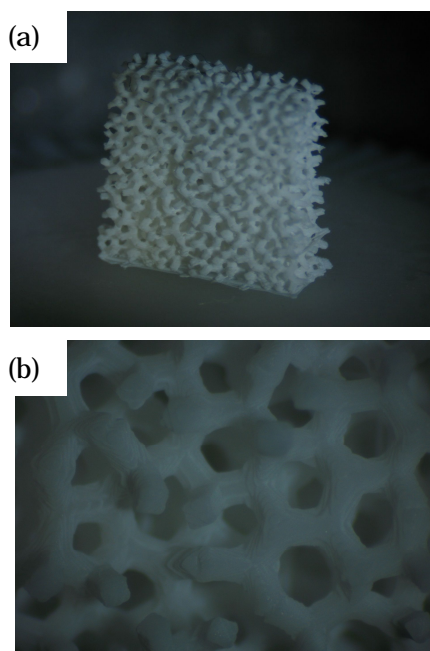


図 3 作製した PAD 構造（焼結前）の実体顕微鏡像。(b)は(a)の上面の一部。スケールは本文参照。

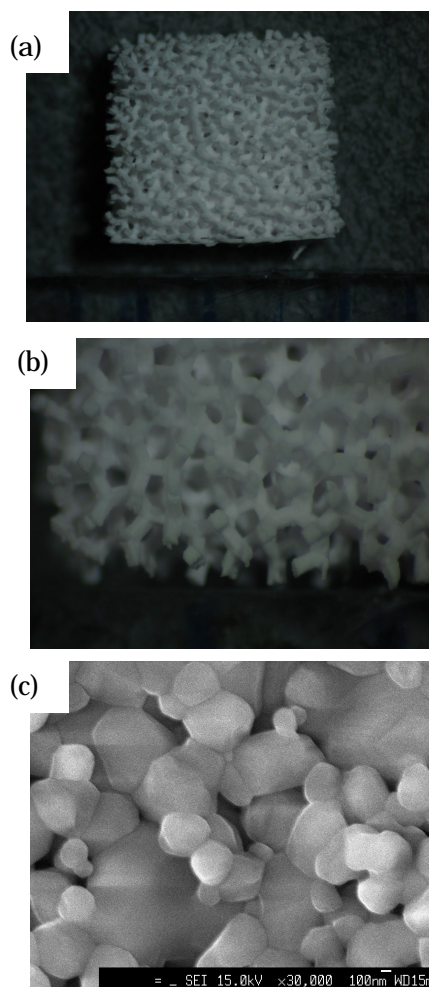


図 4 焼結後の PAD 構造の実体顕微鏡像(a,b)と走査電子顕微鏡像(c)。(a)(b)のスケールは本文参照。(c)のスケールは右下の白いバーが 100nm 。

図 4(a)(b)に焼結後の PAD 構造の実体顕微鏡像を示す。(b)は(a)の一部を拡大したものである。焼結後も PAD 構造がよく保たれていることがわかる。外形サイズは $3.1 \times 3.1 \times 1.2\text{mm}^3$ であり、体積が焼結前の 20.5%に縮小していることがわかった。ロッド長は約 170nm で、3D-PBG は約 0.5THz に形成するはずである。但し、原料のアルミナの体積率は 10%なので、ロッド部が 50%程度の空隙をもっていることになる。図 4(c)にロッド部の走査電子顕微鏡像を示す。確かに空隙を含むことがわかる。また各粒子が焼結によって十分に接合していることがわかる。

図 5 (a)に作製したテラヘルツ帯 PAD の電磁波透過スペクトル測定結果を示し、(b)に測定結果との比較用に FDTD 法により求めた PAD の光状態密度を示す。計算ではロッドの屈折率を $n=2.5$ とした。なお測定結果は、同一試料に対して 4 回測定を行い、積算したものである。青い点線で挟んだ大きな落ち込みが計算によって得られた PBG に対応する。計算結果の PBG 中心である 0.55THz 付近にわずかな落ち込みが見られたが、はっきりとした

PBG の形成は確認できなかった。また、全体的に(より高周波側で)透過率の値が小さくなっている。これは散乱による影響であると考えられる。

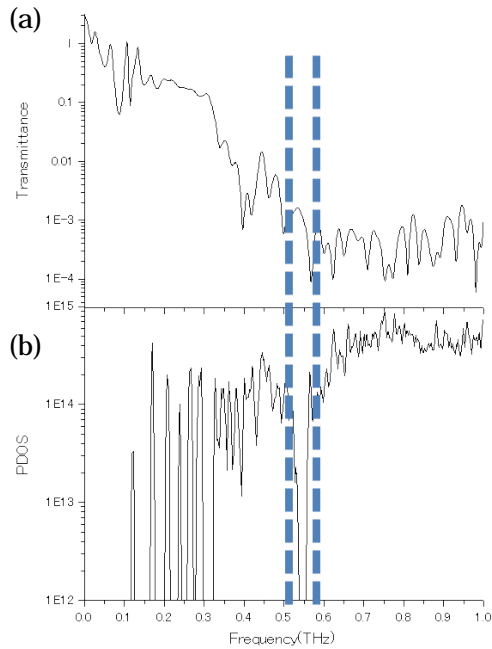


図5 (a)作製したテラヘルツ帯 PAD の電磁波透過スペクトル測定結果、(b) FDTD 法により求めた PAD の光状態密度

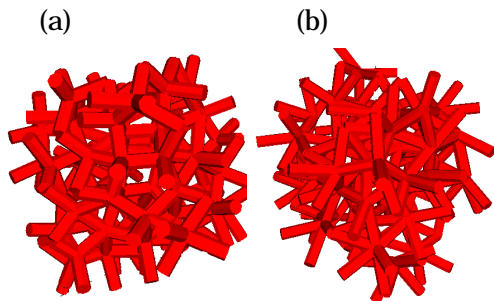


図6 (a)(b)作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造

明確なギャップが確認できなかった原因はロッド部の空隙率が 50%程度であり、これから計算されるロッド部の有効屈折率が $n=2.0$ 程度で、ギャップ形成に必要な屈折率に達していなかったためと考えられる。現在、原料粉末に焼結助剤として酸化マグネシウムを加えて実験を進めている。空隙率を 20%にまで下げること成功しており、今後ギャップ形成の有無を調べるテラヘルツ波透過スペクトルの測定を行う予定である。

(2)5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造における 3D-PBG 形成

図6 (a)(b)に作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造を示し、図7 (a)(b)にそれらの動径分布関数(RDF)を示す。いずれの構造も RDF は明確な第 1 ピークをもち、ロ

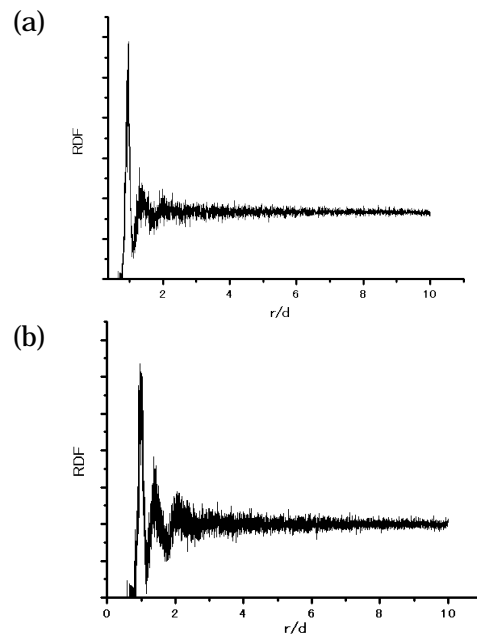


図7 (a)(b) 作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造の動径分布関数(RDF)

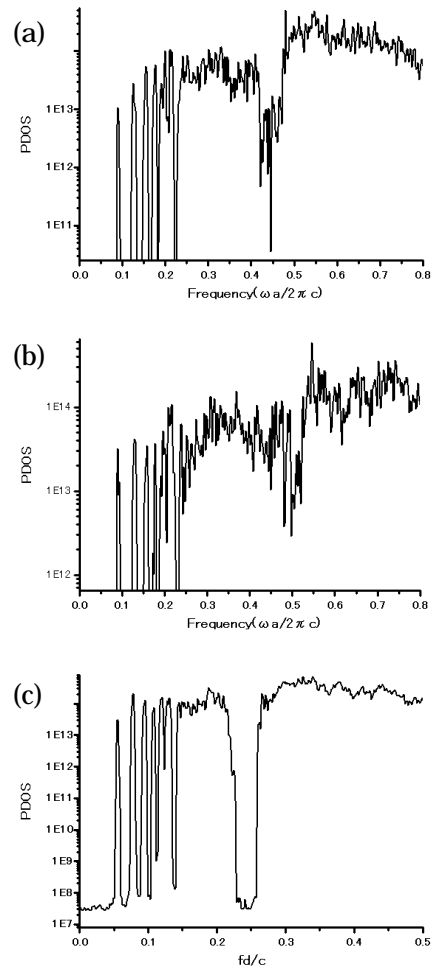


図8 (a)(b)作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造について計算した光状態密度。(c)PAD について計算した光状態密度

ッド長がよくそろっていることがわかる。第 2 ピークはわずかにみられるが、第 3 ピーク

以降はほとんど消失している。このことは短距離秩序はよく保たれているが長距離秩序は完全に消失していることを示し、理想的なアモルファス構造が得られていることがわかる。

図 8 (a)(b)に作製した 5 配位、6 配位ランダムネットワーク構造について計算した光状態密度を示す。比較のため、図 8 (c)に PAD について計算した光状態密度を示す。5 配位、6 配位ともに光状態密度の落ち込みがみられるが、PAD と比べるとその落ち込みは小さく、完全な (状態数が 0 の) ギャップが形成していないことがわかる。このことは PAD のギャップ形成に 4 配位であることが重要な役割を果たしていることを示している。

現在、(1)と(2)についてそれぞれ投稿論文を作成中である。

参考文献

- [1] K. Edagawa, et al.: Phys. Rev. Lett., **100**, 013901 (2008).
- [2] S. Imagawa et al.: Phys. Rev. B, 82, 115116 (2010).
- [3] S.Imagawa et al., Appl. Phys. Lett. **100**, 151103 (2012)
- [4] S. Kirihara et al.: Ferroelec. 387, 102 (2009).
- [5] F. Wooten, K. Winer and D. Weaire, Phys. Rev. Lett. **54**, 1392 (1985).
- [6] C.T Chan et al., Phys. Rev. B 61, 16635 (1995)

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 2 件)

Photonic crystals, amorphous materials, and quasicrystals, K. Edagawa, Sci. Tech. Adv. Mater., vol. 15, 2014, 034805, DOI: 10.1088/1468-6996/15/3/034805, 査読有

フォトニック結晶・アモルファス・準結晶, 枝川圭一, 固体物理, vol. 48, pp. 341-354, 2013, 査読有

[学会発表](計 10 件)

二次元フォトニック準結晶における光禁帯形成機構, 川俣勇太, 枝川圭一, 日本物理学会第 70 回年次大会, 早稲田大学, 2015 年 3 月 22 日

光造形法によるテラヘルツ帯フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドの作製, 小見山雄一郎, 上村祥史, 枝川圭一, 日本セラミックス協会 2015 年年会, 岡山大学, 2015 年 3 月 20 日

光造形法によるテラヘルツ帯フォトニッ

ク・アモルファス・ダイヤモンドの作製, 阿部紘之, 小見山雄一郎, 枝川圭一, 第 74 回応用物理学会秋季学術講演会, 同志社大学, 2013 年 9 月 18 日

五配位及び六配位アモルファス構造体における光禁帯形成, 小見山雄一郎, 阿部紘之, 上村祥史, 枝川圭一, 日本物理学会 2014 年秋季大会, 中部大学, 2014 年 9 月 7 日

五配位及び六配位アモルファス構造体における光禁帯形成, 阿部紘之, 小見山雄一郎, 枝川圭一, 第 61 回応用物理学会春季学術講演会, 青山学院大学相模原キャンパス, 2014 年 3 月 18 日

フォトニック結晶・準結晶・アモルファス, 枝川圭一, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 2013 年 3 月 28 日

光造形法によるテラヘルツ帯フォトニック・アモルファス・ダイヤモンドの作製, 枝川圭一, 精密工学会 2013 年度春季大会, 東京工業大学, 2013 年 3 月 14 日, 招待講演

Photonic Band-Gap and Defect States in a Photonic Amorphous Material, K. Edagawa, Extended Defects on Semiconductors 2012, June 24-29, 2012, Thessaloniki, Greece, 招待講演

High-Q Resonant Cavities in a Photonic Amorphous Diamond, S. Imagawa, K. Edagawa, M. Notomi, The 3rd International Symposium on Advanced Microscopy and Theoretical Calculations, May 15, 2012, 岐阜市

[その他]

ホームページ等

<http://www.edalabo.iis.u-tokyo.ac.jp/>

6 . 研究組織

(1)研究代表者

枝川 圭一 (Keiichi Edagawa)

東京大学 生産技術研究所 教授

研究者番号 : 2 0 2 2 3 6 5 4