テラヘルツ波制御フォトニック結晶の自由造形

Freeform Fabrication of Photonic Crystals for Tera-hertz Wave Control

02125

研究代表者 大阪大学接合科学研究所・教授 宮 本 欽 生 Yoshinari Miyamoto

共同研究者 大阪大学接合科学研究所・助手 桐 原 聡 秀 Soshu Kirihara

Photonic crystal is known as a new functional material with the periodic structure of dielectric media which can form the photonic band gap due to Bragg diffraction and thereby totally reflect electromagnetic waves. Various applications are expected for photonic crystals in communication, information and optical devices. We have tried to fabricate photonic crystals for control electromagnetic waves in THz region. The THz waves can be applied to the next generation communication with high speed and large contents, sensors of surface defects of materials, skin cancer, bacteria in foods, and others. The photonic crystal consisting of epoxy resin including TiO_2 - SiO_2 nano-composite particles with the diamond structure was successfully fabricated by using a CAD/CAM freeforming process of stereolithography. The crystal consists of 1000 unit cells with the lattice constant of 1mm. The diamond photonic crystal showed the band gap in THz range.

研究目的

物質と構造を3次元的に設計することによって、新たな機能材料やより高機能材料を生み出すことができる¹⁾。特にナノメータスケールで物質と構造の融合を図れば応用の可能性も大きく広がる。その例としてフォトニック結晶が上げられる。

フォトニック結晶は、誘電体を周期的に配列した人工格子であり、格子間隔と同程度の波長を持つ光や電

磁波を回折作用（ブラッグ反射）により完全反射する。格子と格子間の誘電率差が約倍（屈折率差にすると数十%）以上になると、反射されて結晶内を伝播できない波長域（周波数域）が拡大しフォトニックバンドギャップを形成する。この現象は半導体のバンドギャップの形成に似ており、半導体では電子波とイオン殻格子との回折によって生ずるが、フォトニック結晶では電磁波と誘電体格子との回折による。図1にフォトニック結晶によるバンドギャップ形成の概念図を示す^{2,3)}。

図1 フォトニック結晶による電磁波の反射とバンドギャップの形成

表1 フォトニック結晶に期待される応用

電磁波の波長／フォトニック結晶の構造周期

光や電磁波が3次元的にどの方向にも伝播できない状態は、ダイヤモンド型格子やある種の面心立方格子などで実現でき、表1に示すように格子間隔がナノメートルスケールであれば光を、またマイクロメートルやミリメートルスケールであれば、テラヘルツ波やミリ波・マイクロ波を制御するデバイスに応用できる。本研究では、テラヘルツ波を制御するフォトニック結晶の自由造形技術を確認することを目的とした。

波長が数10μmから数100μmで、周波数が100GHz以上のテラヘルツ領域では、将来の高速大容量通信デバイスへの応用以外に、波長と同程度の表面欠陥や人体の皮膚ガン、食品中のバクテリア等を検知するセンサーへの応用が期待されている。

研究成果の概要

本研究ではどの方向に対しても電磁波を反射するダイヤモンド構造を自在に形成できる光造形法によりフォトニック結晶を作製した^{4,5)}。光造形法は、CADで描いた3次元の構造体をスライスソフトで層状の集合体に変換した後、各層の位置データに従って紫外線レーザーを光硬化性樹脂液面に照射スキャンして2次元形状を形成し、逐次積層していくことによって高分子樹脂を3次元造形する手法である。光造形法は製品形

状のモデル作製によく使われるが、フォトニック結晶のように構造と誘電体材料を3次元的に融合する装置としても利用できる。光造形装置の概略図を図2に示す。

レーザービームのスポット径が100μmの場合、直径120μm程度の半球状領域が重合固化される。造形精度は0.15%である。用いている樹脂はエポキシであるが、結晶格子の誘電率を制御するため、酸化チタン系微粉末を樹脂液に分散した。

フォトニック結晶により光や電磁波を制御するに

図2 光造形装置の概略図

は、格子の誘電率を制御することが重要である。一般に誘電率が ϵ である媒質中において、電磁波の波長は $1/\sqrt{\epsilon}$ に圧縮されるため、誘電率の高い格子でフォトニック結晶を作れば、より長い波長の電磁波を制御できる。特定の波長域での電磁波制御を狙うのであれば、誘電率の高い格子のフォトニック結晶は、より小さい構造ですむことになる。

光硬化性樹脂を紫外線硬化させる際には、プロトンがモノマーの架橋に寄与して硬化反応が進行するカチオン重合が現在のところ最も広く用いられている。硬化による樹脂の収縮が極めて小さく、精度の高い3次元造形が実現できる。ところが、セラミック粒子を光硬化性樹脂液に分散すると、光重合が阻害されてしまう例が結構多い。分散したセラミック粒子が重合に必要なプロトンを捕獲してしまうことが考えられる。そ

のため、誘電率が高いが光重合を阻害するチタニアと、誘電率は低いが重合に影響を及ぼさないシリカを複合化し、光造形用の誘電体分散粒子として用いた。これらの粒子を樹脂液に投入して、真空脱泡し気泡を除去した後に造形へと進む。光造形法では2次元薄層を順次積み重ねて3次元構造を得るため、それぞれの薄層の平坦度が造形精度に大きな影響を及ぼす。粒子分散による樹脂液の粘度増加をできるだけ抑えるために、球状の粒子を用いるなどの工夫を行い、また造形中は粒子が沈降しないよう樹脂液をポンプで循環させた。図3に、作製したダイヤモンド格子とその反転構造、および電磁波の透過特性を示す。格子と同じ組成を持つバルク材が測定周波数域でほぼ完全透過しているのに比べ、ダイヤモンド格子では12.6GHz付近で60dB以上の鋭い減衰ピークが現れ、完全反射されていること

(100) 結晶面

(a) (100)面の写真と、面に垂直方向の透過特性。格子と同じ組成のバルク材の透過特性を比較のために示している。

(100) 結晶面

(b) 反転ダイヤモンド構造の(100)面と、面に垂直方向の透過特性。

図3 ダイヤモンド型フォトニック結晶と電磁波の透過特性

図4 酸化チタン系ナノ粒子を分散したダイヤモンド型フォトニック結晶と微細組織

を示している。減衰ピーク幅は各方位のバンドギャップ幅に対応する。一方、反転構造では高誘電率の酸化チタン系粒子分散樹脂の体積分率が多くなるためバンドギャップが広がり、17GHz付近ではどの方向に対しても完全反射する完全バンドギャップを形成する。図4は、単位格子が1000個からなるダイヤモンド格子で、酸化チタン系ナノ粒子が分散されている。図5にこのサンプルのテラヘルツ波透過特性を示す。測定はテラヘルツ分光器を用いて行ったところ、150GHz域にバンドギャップを有することが判明した。なお、テラヘルツ波分光測定は信州大学理学部の武田三男教授に依頼し行われた。

図5 酸化チタン系ナノ粒子分散ダイヤモンド型フォトニック結晶のテラヘルツ波透過特性

光造形法では、格子間隔を傾斜させたり、点欠陥、面欠陥、線欠陥などを自在に導入でき、バンドギャップの制御とともに局在モードや導波路が形成できる上、外形やコネクタも同時に設計できる。また、フルセラミックスのフォトニック結晶を作製する鋳型作製にも利用可能である。さらにCAD上の構造データがバンド計算に使える、フォトニック結晶の設計・製造から部品作製まで一貫して行えるなど、他の方法にない大きな利点を有している。

市販の光造形装置で作製するフォトニック結晶の格子径は200 μm が限度であるが、今後、波長が数十～数百 μm のテラヘルツ領域の制御を行うには、10 μm 径オーダーの格子を作製できる光造形装置と、ナノスケールの高誘電率セラミックス粒子をより多く含有し造形できる光硬化性樹脂の開発が課題となる。

今後の研究の見通し

光造形法によってミリ波・マイクロ波制御用3次元フォトニック結晶を設計し自由造形する基礎技術は確立しつつある。これらのノウハウを活かし、今後は、格子間隔がマイクロメートルからナノメートルスケールの3次元格子構造の自由造形技術へと発展させることにより、テラヘルツから光領域に至る広範な波長領域での情報・通信、センサー、波長変換、エネルギー変換などに関する3次元集積デバイスへの応用を目指す。

参考文献

- 1) Y.Miyamoto, J.Oh, S.Kirihara, and K.Matsuura, "Cybermaterials engineering: concept, processes and applications", Proc. of 7th Annual International Conference on Composites Engineering, Denver, Colorado, (2000), B11-14.
- 2) Photoic Crystals, J.D.Joannopoulos, Princeton University Press, (1995)
- 3) 川上彰二郎編, "フォトニック結晶技術とその応用", 東京, シーエムシー出版 (2002)
- 4) S.Kirihara, M.W.Takeda, K.Sakoda, and Y.Miyamoto, "Control of microwave emission from electromagnetic crystals by lattice modifications", Solid State Comm., 124, (2002), 135-139
- 5) 桐原聡秀, 宮本欽生, 笹部修司, 河原正佳, 須原一樹, 中川卓二, 田中克彦, "フォトニック結晶を応用した電磁波制御用デバイス", EMC, 15-8, (2002), 100-113.

本助成金による主な発表論文

- 1) 三次元ダイヤモンド構造を有するセラミック／高分子系フォトニック結晶の電磁波回折挙動・桐原聡秀, 武田三男, 迫田和彰, 宮本欽生, 日本セラミックス協会学術論文誌, 111, 7, 471-478 (2003).
- 2) Electromagnetic properties of photonic crystals with diamond structure containing defects, Shingo Kanehira, Soshu Kirihara, and Yoshinari Miyamoto, Kazuaki Sakoda, Mitsuo Wada Takeda. J. Mater. Res., Vol.18, No.9 pp.2214-2220, Sep 2003.
- 3) Band Gap Modification of Diamond Photonic Crystals by Changing the Volume Fraction of the Dielectric Lattice, Shingo Kanehira, Soshu Kirihara, J. Am. Ceram. Soc., 86 [10] 1691-94 (2003).