

用折射率阶梯增加的二维正方晶格光子晶体获得宽带隙

陈义万¹, 杜海霞², 陈昭蓉³, 张群芝⁴

¹湖北工业大学理学院, 湖北 武汉

²火箭军工程大学, 陕西 西安

³深圳点猫科技有限公司武汉分公司, 湖北 武汉

⁴武汉市板桥中学, 湖北 武汉

Email: chenyiwan@yeah.net

收稿日期: 2020年8月17日; 录用日期: 2020年8月31日; 发布日期: 2020年9月7日

摘要

为了在二维光子晶体材料中获得宽的带隙, 并能够按照要求进行带隙位置和宽度调控, 文章提出了一种新的二维光子晶体结构: 均匀介质圆柱排列成正方形结构, 圆柱介质折射率在空间上阶梯性增加。构造二维圆柱介质的正方形光子晶体为: 每两层的圆柱介质折射率相同, 在y方向折射率阶梯增加。用有限时域差分(FDTD)方法, 计算平面光波通过该二维光子晶体后的透射率, 得到光子晶体的带隙。发现折射率阶梯增加的紧密型圆柱介质正方形光子晶体, 完全带隙不存在, 说明当圆形介质柱相切时, 不能获得完全带隙; 填充率在0.1962~0.3488之间, 随着晶格常数增加, 带隙的中心波长向长波长方向移动; 在相同的填充率下, 折射率阶梯增加, 并呈周期性变化时, 带隙位置没有变, 但是带隙宽度变小。

关键词

二维光子晶体, 有限时域差分, 折射率阶梯增加, 带隙

Obtaining Wide Band Gap by Using a Two-Dimensional Quadrangular Photonic Crystal with Refractive Index Step Increase

Yiwan Chen¹, Haixia Du², Zhaorong Chen³, Qunzhi Zhang⁴

¹School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei

²University of Rocket Force Engineering, Xi'an Shaanxi

³Shenzhen Point Cat Technology Co. Ltd. Wuhan Branch, Wuhan Hubei

⁴Wuhan Banqiao Middle School, Wuhan Hubei

Abstract

In order to obtain wide band gap in two-dimensional photonic crystal materials and adjust the band gap position and width according to the requirements, a new two-dimensional photonic crystal structure is proposed in this paper: the uniform dielectric cylinder is arranged into a square structure, and the refractive index of the cylinder increases in space by steps. The square photonic crystal of two-dimensional cylindrical medium is constructed as follows: the refractive index of cylindrical medium in each two layers was the same, and the refractive index stepwise increased in the y direction. By using the finite time domain difference (FDTD) method, the transmittance of planar light wave through the two-dimensional photonic crystal is calculated, and the band gap of the photonic crystal is obtained. It is found that the compact cylindrical dielectric square photonic crystal with increasing refractive index stepwise does not have a complete band gap, indicating that when the circular medium column is tangent, the complete band gap cannot be obtained. The filling rate is between 0.1962 and 0.3488. As the lattice constant increases, the central wavelength of the bandgap moves to the longer wavelength. At the same filling rate, when the refractive index stepwise increases and shows a periodic change, the bandgap position does not change, but the bandgap width decreases.

Keywords

Two-Dimensional Photonic Crystal, FDTD, Refractive Index Stepwise Increasing, Band Gap

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

光子晶体是折射率或介电常数周期性变化的人工微结构材料,其概念最早于 1987 年分别由 S.John 和 E.Yablonovitch 提出[1] [2],光子禁带和光子局域是光子晶体的基本特性。早些年的研究主要集中在常规光子晶体上,常规光子晶体的带隙位置和带隙宽度不容易按需求设计。随着光子晶体的应用范围日益广泛,对光子晶体的带隙中心位置和带隙宽度有更多的要求,需要能够按照要求调控光子晶体的带隙,近年陆陆续续提出了不同结构的非常规光子晶体[3]-[8],折射率与空间坐标有关的函数型光子晶体[9] [10]就是其中的一类非常规光子晶体。函数型光子晶体利用材料的非光学性质,即折射率与电场的非线性关系: $n = n_0 + \beta E^2$,通过电场强度改变介质的折射率,进而调控光子晶体的带隙。一维函数型光子晶体得到了比较深入的研究,主要原因是使用转移矩阵方法,对带隙的计算比较方便。二维函数型光子晶体的研究,目前文献都集中在折射率随半径变化的函数关系上[11] [12],也就是电场强度在介质柱的半径方向上发生变化,进而改变介质柱的折射率在半径方向的分布。但是,在实验中控制每个介质柱中的电场在半径方向发生改变,难度很大。笔者发现,在实际制造光子晶体过程中,更容易实现的是,在二维平面内,让折射率均匀分布的介质柱周期排列,介质柱在指定方向折射率阶梯增加。通过介质柱半径和晶格

常数的调节, 来人为控制二维光子晶体的带隙位置和带隙宽度。本文通过模拟二维折射率阶梯增加的光子晶体的带隙, 结果表明, 通过调节二维光子晶体的圆柱半径和晶格常数, 可以人为调节光子晶体的带隙位置和带隙宽度。这为光子晶体的设计提供新的思路 and 理论依据。

2. 折射率阶梯增加的二维光子晶体结构

在光子晶体的模拟计算中, 使用较多的方法为: 平面波展开方法, 有限时域差分方法(FDTD), 转移矩阵方法。平面波展开法应用比较广范, 可以计算在第一布里渊区间, 能带与波矢的关系, 但是, 该方法对晶体的完整性要求比较高, 难以适用于非周期性结构和不规则的边界; 转移矩阵方法适用于一维, 且具有周期性结构的光子晶体。有限时域差分方法(FDTD)以 Maxwell 方程为基础, 通过离散方法, 计算电磁波在光子晶体内的传播, 可以适用于非周期性的结构, 和不规则的边界, 适应面很广。

FDTD 方法, 是由 K.S.Yee 在 1966 年提出的[13], 其基本思想是把数学中的微分用差分代替, 用中心差分法表达导数为[13]:

$$\frac{df(x)}{dx} = \frac{f(x+\Delta x) - f(x-\Delta x)}{2\Delta x}$$

由于计算机的储存容量的限制, 计算的物理区间是有限的, 用 FDTD 方法计算时, 被广泛使用的是完全匹配吸收层[14] (PML), 通过选择边界内的电导率和磁导率的比值: $\frac{\sigma}{\sigma^*} = \frac{\epsilon_0}{\mu_0}$, 使电磁波从介质入射到边界后, 被完全吸收, 不被反射。

用 FDTD 方法推导的 2 维 TE 模式和 TM 模式的电磁波递推表达式[15], 经过计算机的逐步计算, 模拟光波在光子晶体中的传播情况, 从而得出结果。计算过程中, 为了适当控制内存的需求和计算时间, 需要恰当的划分计算网格。

介质为圆柱形, 半径为 r , 折射率为 n , 排列成正方形结构, 晶格常数为 a , 背景材料为空气, 折射率为 1。相同折射率的圆柱介质排列成 2×15 的基本单元, 介质圆柱的折射率在 y 方向阶梯增加。光波源是波长范围为 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ 的平面波, 计算时的频率抽样点为 200, 为了不影响光波的传播, 包围计算区域的边界是完全匹配层(PML), 在平面光波沿 y 方向通过光子晶体后, 测量监测点的透过部分, 得出光波的透射系数和透射强度。整个模拟实验使用专门的 FDTD 软件计算。二维光子晶体的结构图见图 1。

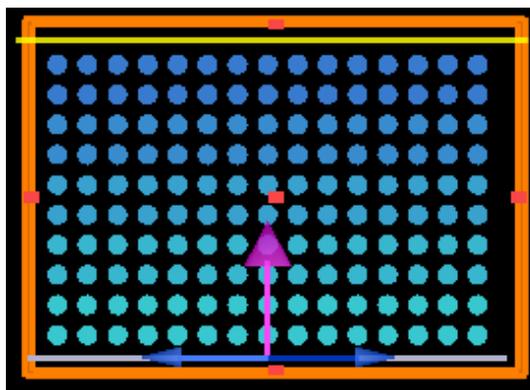


Figure 1. Structure diagram of square photonic crystal of cylindrical medium with increased refractive index stepwise. Every two rows of dielectric cylinders have the same refractive index, which increases in turn along the y direction

图 1. 折射率阶梯增加的圆柱介质正方形光子晶体结构图, 每两行介质圆柱的折射率相同, 折射率沿 y 方向依次增加

3. 折射率阶梯增加的二维光子晶体对光波的透射率

下面是各个结构的光波透射系数与波长关系图。

图 2 中所用的光子晶体是 10×15 的结构，圆柱半径 $r = 0.2 \mu\text{m}$ ，晶格常数 $a = 0.6 \mu\text{m}$ ，每 2 行圆柱介质柱折射率相同，沿 y 方向折射率阶梯性增加，分别为 $n = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 。平面波的频率范围是 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ ，在监测点的频率抽样点为 200。由于使用的是平面光波源，光在晶体中传播时，带隙波长范围内的光波不能传播，而且我们计算的是 TE 波和 TM 波的总能量，纵轴的总透射能量接近零，说明该波长范围是完全带隙。可以观察到带隙的中心波长为 $1.1 \mu\text{m}$ ，带隙宽度是 $0.60 \sim 1.50 \mu\text{m}$ 。

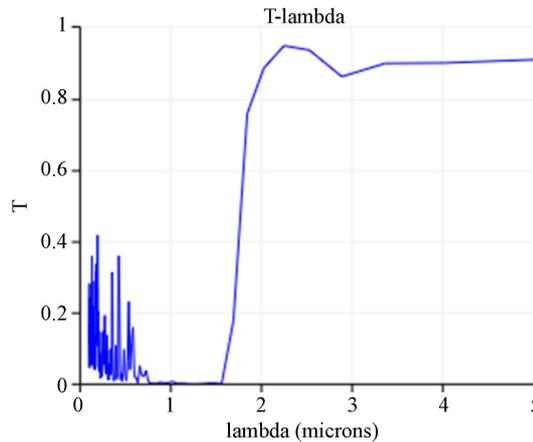


Figure 2. $r = 0.2 \mu\text{m}$, $a = 0.6 \mu\text{m}$, transmission coefficient and wavelength relationship

图 2. $r = 0.2 \mu\text{m}$, $a = 0.6 \mu\text{m}$ ，透射系数与波长关系图

图 3 中所用的光子晶体是 10×15 的结构，圆柱半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$ ，晶格常数 $a = 1.2 \mu\text{m}$ ，每 2 行圆柱介质柱折射率相同，沿 y 方向折射率阶梯性增加，分别为 $n = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 。平面波的频率范围是 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$ ，在监测点的频率抽样点为 200。可以观察到带隙的中心波长为 $2.0 \mu\text{m}$ ，带隙宽度是 $1.25 \sim 2.80 \mu\text{m}$ 。

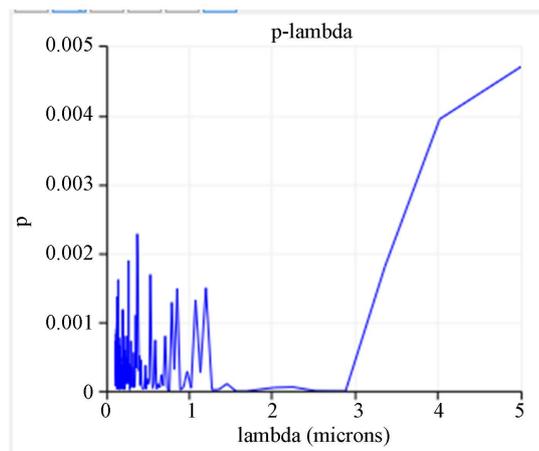


Figure 3. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.2 \mu\text{m}$, transmitted light energy and wavelength diagram

图 3. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.2 \mu\text{m}$ ，透射光能量与波长关系图

图 4 中所用的光子晶体是 10×15 的结构, 圆柱半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$, 晶格常数 $a = 1.6 \mu\text{m}$, 每 2 行圆柱介质柱折射率相同, 沿 y 方向折射率阶梯性增加, 分别为 $n = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 。平面波的频率范围是 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$, 在监测点的频率抽样点为 200。可以观察到带隙的中心波长为 $3.0 \mu\text{m}$, 带隙宽度是 $2.50 \sim 3.40 \mu\text{m}$ 。

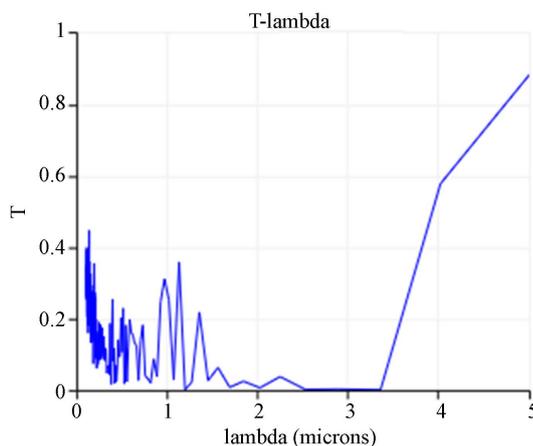


Figure 4. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.6 \mu\text{m}$, transmission coefficient and wavelength relationship

图 4. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.6 \mu\text{m}$, 透射光透射系数与波长关系图

图 5 中所用的光子晶体是 9×9 的结构, 圆柱半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$, 晶格常数 $a = 1.2 \mu\text{m}$, 每 1 行圆柱介质柱折射率相同, 沿 y 方向折射率阶梯性增加, 分别为 $n = 1.5, 2.0, 2.5$, 构成 3 行的基本单元, 然后重复 3 次, 形成 y 方向 3 个周期的结构。入射平面波的频率范围是 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$, 在监测点的频率抽样点为 200。可以观察到带隙的中心波长为 $1.4 \mu\text{m}$, 带隙宽度是 $1.25 \sim 1.60 \mu\text{m}$ 。

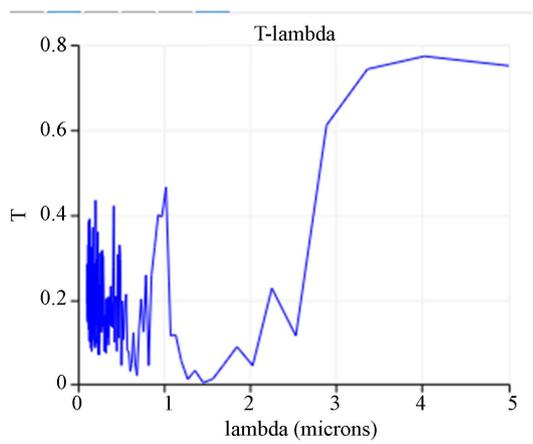


Figure 5. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.2 \mu\text{m}$, transmission coefficient and wavelength relationship

图 5. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 1.2 \mu\text{m}$, 透射光透射系数与波长关系图

图 6 中所用的光子晶体是 10×15 的结构, 圆柱半径 $r = 0.4 \mu\text{m}$, 晶格常数 $a = 0.8 \mu\text{m}$, 每 2 行圆柱介质柱折射率相同, 沿 y 方向折射率阶梯性增加, 分别为 $n = 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5$ 。平面波的频率范围是 $0.1 \sim 5 \mu\text{m}$, 在监测点的频率抽样点为 200。可以观察到带隙不明显。

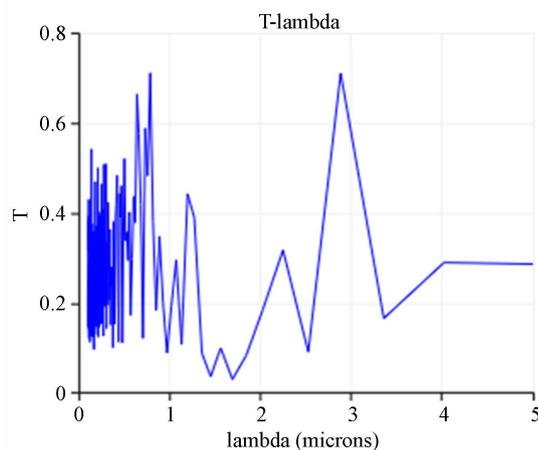


Figure 6. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 0.8 \mu\text{m}$, transmission coefficient and wavelength relationship

图 6. $r = 0.4 \mu\text{m}$, $a = 0.8 \mu\text{m}$, 透射光透射系数与波长关系图

为了让数据便于分析,把上述各个光子晶体透射能量(系数) - 波长关系中出现的带隙的中心波长和带隙的宽度汇总成表 1。

Table 1. Parameters and band gaps of two-dimensional cylindrical photonic crystals with incremental refractive index
表 1. 折射率阶梯增加二维圆柱光子晶体的参数和带隙表

	圆柱介质半径 r (μm)	晶格常数 a (μm)	折射率沿 y 方向排列方式	晶格大小	带隙宽度 (μm)
图 2	0.2	0.6	1.5, 1.5, 2.0, 2.0, 2.5, 2.5, 3.0, 3.0, 3.5, 3.5	10×15	0.60~1.50
图 3	0.4	1.2	1.5, 1.5, 2.0, 2.0, 2.5, 2.5, 3.0, 3.0, 3.5, 3.5	10×15	1.25~2.80
图 4	0.4	1.6	1.5, 1.5, 2.0, 2.0, 2.5, 2.5, 3.0, 3.0, 3.5, 3.5	10×15	2.50~3.40
图 5	0.4	1.2	1.5, 2.0, 2.5, 1.5, 2.0, 2.5, 1.5, 2.0, 2.5	9×9	1.25~1.60
图 6	0.4	0.8	1.5, 1.5, 2.0, 2.0, 2.5, 2.5, 3.0, 3.0, 3.5, 3.5	10×15	不明显

图 2 和图 3 是同一类型的光子晶体,填充率相同,不同之处是圆柱介质的半径和晶格常数不同,图 3 的圆柱半径和晶格常数比图 2 中的要大,带隙的中心波长明显的向长波长方向移动,而且带隙的宽度也变大;图 4 的填充率比图 2 和图 3 的小,晶格常数比图 2 和图 3 的大,带隙中心波长向长波长移动明显;图 5 与图 2 和图 3 的填充率相同,但是图 5 中的折射率在 y 方向的排列方式是 1.5, 2.0, 2.5, 阶梯增加,然后周期性排列,带隙的宽度比图 2, 图 3 的变小了;图 6 中介质圆柱相切,是紧密型光子晶体,带隙不明显。

4. 结论

综上所述,以空气($n = 1.0$)为背景,以圆柱形介质构成二维正方形光子晶体结构,每 2 行的介质折射率相同,沿 y 方向,折射率阶梯性增加,构成 10×15 的阵列。入射光源是平面波,对通过光子晶体的光波测量透射率。

从图 2~图 6, 以及表 1 中的数据, 得到以下结论:

- 1) 折射率阶梯增加的紧密型圆柱介质正方形光子晶体, 完全带隙不存在, 说明当原型介质柱相切时,

不能获得完全带隙；

2) 填充率在 0.1962 到 0.3488 之间，随着晶格常数增加，带隙的中心波长向长波长方向移动；

3) 在相同的填充率下，折射率阶梯增加，并呈周期性变化时，带隙位置没有变，但是带隙宽度变小。

本文首次提出了这样一种结构：用均匀折射率圆柱介质，构成二维光子晶体，圆柱的折射率在 Y 方向阶梯性增加。一方面，这样的光子晶体的折射率变化，相对于用电场控制圆柱介质的折射率在半径方向的变化方法易于实现；另外一方面，可以通过介质柱的折射率在 y 方向的阶梯变化，通过改变光子晶体的圆柱半径、晶格常数、填充率，可以灵活的调控光子晶体带隙的中心位置和带隙宽度。为人工控制光子晶体的带隙位置和带隙宽度，提供了一个很灵活的手段，为人工设计光子晶体提供了很新的思路。

参考文献

- [1] Ablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid-State Physics Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [2] John, S. (1987) Strong Localization of Photons in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [3] 刘洋, 唐吉玉, 王茜. Ge 基二维正方晶格光子晶体带隙优化设计[J]. 发光学报, 2014, 35(4): 491-495.
- [4] Gómez-Urrea, H.A., Ospina-Medina, M.C., et al. (2020) Tunable Band Structure in 2D Bravais-Moiré Photonic Crystal Lattices. *Optics Communications*, **459**, Article ID: 125081. <https://doi.org/10.1016/j.optcom.2019.125081>
- [5] Liu, X.-J., Lu, J.-B., et al. (2017) Adjustable Band Gaps Structures and Semi-Dirac Points in Two-Dimensional Linear Function Photonic Crystals. *Optik*, **149**, 252-260. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2017.08.058>
- [6] Yin, X.-G., Li, D.-C., Tang, S.-R. and Wu, H.-X. (2018) Study on Band Gaps Structure and Eigen Field Distribution of Two-Dimensional Function Photonic Crystals with Point Defect. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, **172**, 662-667. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2018.06.059>
- [7] 陈彦, 唐吉玉, 刘洋. 二维三角型金属氧化物光子晶体全带隙研究[J]. 激光与红外, 2015, 45(6): 702-705.
- [8] Anghel, I. (2019) Numerical Investigation of Photonic Crystals Structure on Zinc Oxide Film. *Optik—International Journal for Light and Electron Optics*, **185**, 282-286. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2019.03.127>
- [9] 熊翠秀, 邓杨保, 邓曙光. 峰值折射率对正弦型函数光子晶体带隙的影响[J]. 激光与红外, 2014, 44(8): 913-916.
- [10] Zhang, H.-F., Kong, X.-R. and Liu, G.-B. (2019) Investigation on the Extraordinary Mode in the 3D Magnetized Plasma Photonic Crystals Containing the Function Dielectric with Woodpile Lattices. *Solid State Communications*, **292**, 27-35. <https://doi.org/10.1016/j.ssc.2019.01.018>
- [11] 章海锋. 3 维函数光子晶体的特性研究[J]. 激光技术, 2018, 42(3): 318-323.
- [12] 刘晓静, 梁禺, 刘继平, 等. 新型二维函数光子晶体的透射特性[J]. 吉林大学学报(理学版), 2017, 55(4): 985-989.
- [13] 陈义万, 杜海霞, 陈昭蓉, 等. 二维光子晶体带隙与结构的关系[J]. 湖北大学学报(自然科学版), 2016, 33(3): 220-223.
- [14] 葛德彪, 阎玉波. 电磁波时域有限差分方法(第 3 版)[M]. 西安: 西安电子科技大学, 2011: 10.
- [15] 陈义万, 杜海霞, 陈昭蓉. 一种获得二维光子晶体多个宽带隙的新方法[J]. 光电子, 2018, 8(3): 113-122.