

# 具有介质柱缺陷的二维正方晶格光子晶体的带隙

陈义万<sup>1</sup>, 陈昭蓉<sup>2</sup>, 杜海霞<sup>3</sup>, 张群芝<sup>4</sup>, 李文兵<sup>1</sup>

<sup>1</sup>湖北工业大学理学院, 湖北 武汉

<sup>2</sup>湖北省鄂北水资源配置管理局, 湖北 武汉

<sup>3</sup>火箭军工程大学, 陕西 西安

<sup>4</sup>武汉市板桥中学, 湖北 武汉

Email: chenyiwan@yeah.net

收稿日期: 2021年7月2日; 录用日期: 2021年9月9日; 发布日期: 2021年9月15日

## 摘要

为了在二维光子晶体中对带隙位置和宽度进行调控, 观察介质柱缺陷对光子晶体带隙的影响, 文章研究了这样的二维光子晶体结构: 介质圆柱排列成正方形结构, 圆柱介质折射率沿半径阶梯性增加, 在该种光子晶体中设置介质柱缺陷。文章对比研究了下列几种结构: 1) 半径 $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数 $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿半径分3层增加幅度不同, 在晶体中预设1~3个空气柱缺陷; 2) 半径 $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数 $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿半径分4层增加幅度不同, 在晶体中预设1~2个空气柱缺陷; 3) 半径 $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数 $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿半径分4层增加幅度不同, 在晶体中预设1~2个介质柱缺陷; 4) 半径 $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数 $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿半径分4层增加幅度不同, 在晶体中分别预设5个空气柱缺陷和介质柱缺陷。用有限时域差分(FDTD)方法, 计算平面光波通过上述几种二维光子晶体后的透射率, 得到光子晶体的带隙。发现在相同结构下, 光子晶体的带隙主要由填充率和结构决定, 设置的空气柱缺陷和介质柱缺陷对光子晶体的带隙影响很小。

## 关键词

二维光子晶体, 有限时域差分, 折射率沿半径阶梯增加, 带隙, 缺陷

# The Band Gaps of Two-Dimensional Tetragonal Lattice Photonic Crystals with Dielectric Column Defects

Yiwan Chen<sup>1</sup>, Zhaorong Chen<sup>2</sup>, Haixia Du<sup>3</sup>, Qunzhi Zhang<sup>4</sup>, Wenbing Li<sup>1</sup>

<sup>1</sup>School of Science, Hubei University of Technology, Wuhan Hubei

文章引用: 陈义万, 陈昭蓉, 杜海霞, 张群芝, 李文兵. 具有介质柱缺陷的二维正方晶格光子晶体的带隙[J]. 光电子, 2021, 11(3): 110-124. DOI: 10.12677/oe.2021.113014

<sup>2</sup>North Hubei Water Resources Allocation Administration Bureau, Wuhan Hubei

<sup>3</sup>University of Rocket Force Engineering, Xi'an Shaanxi

<sup>4</sup>Wuhan Banqiao Middle School, Wuhan Hubei

Email: chenyiwan@yeah.net

Received: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2021; accepted: Sep. 9<sup>th</sup>, 2021; published: Sep. 15<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

In order to control band gap width and position in two-dimensional photonic crystal, to observe the influence of medium column defect with photonic crystal band gap, this article studied two-dimensional photonic crystal structure: dielectric cylinder arranged in a square construction, cylindrical dielectric refractive index stepwise increase along the radius, setting medium columns in this kind of photonic crystal as defect. The following structures are compared and studied: 1) The radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , the refractive index increases by three layers along the radius, and 1~3 air column defects are preset in the crystal; 2) The radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , the refractive index increases by four layers along the radius, and 1~2 air column defects are preset in the crystal; 3) The radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , the refractive index increases by four layers along the radius, and 1~2 dielectric column defects are preset in the crystal; 4) The radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , the refractive index increases by four layers along the radius, 5 air column defects and medium column defects are preset in the crystal, respectively. The band gaps of photonic crystals are obtained by using the finite difference time domain (FDTD) method to calculate the transmittance of plane light waves passing through the above two dimensional photonic crystals. It is found that for the same structure, the band gap of photonic crystals is mainly determined by the filling rate and structure, and the defects of air column and medium column have little effect on the band gap of photonic crystals.

## Keywords

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

Copyright © 2021 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

完整的晶体是由原子在空间周期性排列，电子在晶体中受到周期性的势能的作用，导致电子出现能带。类似的，光子晶体由介质球(三维)和介质柱周期性排列，光在该晶体中传播时，也能够得到类似电子能带的光子带隙[1][2]，在光子带隙的范围内，光在晶体中不能传播。这样的材料由于对光的传播有频率选择作用，而得到广泛的应用。比如激光腔体对震荡光波需要有强反射，就可以使用光子晶体材料做成激光的振荡腔，把需要增强的光波段约束在激光腔体内部。隐身飞机对雷达的探测波需要有很低的反射，可以通过设计光子晶体结构，让雷达探测波从光子晶体的表面涂层透射而不反射，从而达到极高的隐身效果。光子晶体中研究比较成熟的是常规光子晶体，它的介质球或介质柱的折射率分布是均匀的；相应的，光子晶体的带隙位置和带隙宽度也会是固定的[3]-[9]。为了按照要求灵活设计光子晶体的带隙，有人

提出了函数光子晶体[10] [11] [12]。所谓函数光子晶体，是指通过介质折射率和光的电场的非线性关系，由电场强度  $E$  在介质柱半径方向控制介质柱的折射率大小，即  $n = n_0 + \beta E^2$ ，从而灵活调控光子晶体的带隙。但是，在实验中沿半径方向控制电场的强度实际上难以实现，笔者提出了沿半径方向阶梯增加折射率的方法来实现函数光子晶体的功能，这样的介质柱，在实际生产中通过晶体生长或者介质的分子束溅射很容易实现。同时，考察设置缺陷介质柱对光子晶体带隙的影响，也是科研中一个有兴趣的问题。

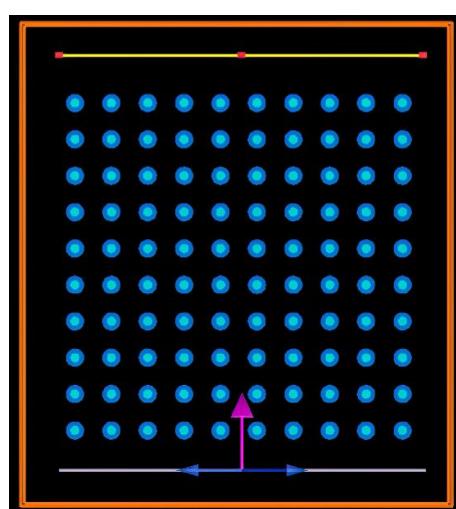
## 2. 折射率沿介质柱半径方向阶梯增加的二维光子晶体结构

在光子晶体的模拟计算中，使用较多的方法有转移矩阵方法，平面波展开法，有限时域差分方法(FDTD)。FDTD 方法是把光在晶体中的传播过程[13]，用离散化方法表达出来，通过迭代计算，模拟光波在晶体中的传播过程。FDTD 方法的优点是：对晶体的大小和边界条件要求不高，通过设定合适的计算网格，可以适用各种情况的光子晶体的模拟计算，而且可以实时显示光通过晶体时的能量分布。

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。

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，在计算开始前，对涉及到的各个参数进行适当的设置，既要保证计算精度，也要考虑计算时间和计算机内存大小。

介质柱为圆柱形，半径为  $r$ ，沿半径方向分为均匀的 3 层到 4 层，折射率  $n$  阶梯增加，圆柱介质柱排列成正方形结构，晶格常数为  $a$ ，背景材料为空气，折射率为 1。缺陷柱有两种：一种是折射率  $n = 1.0$ ，一种是折射率  $n = 4.0$ 。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)，通过光子晶体的光波被完全匹配层完全吸收，没有反射。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。

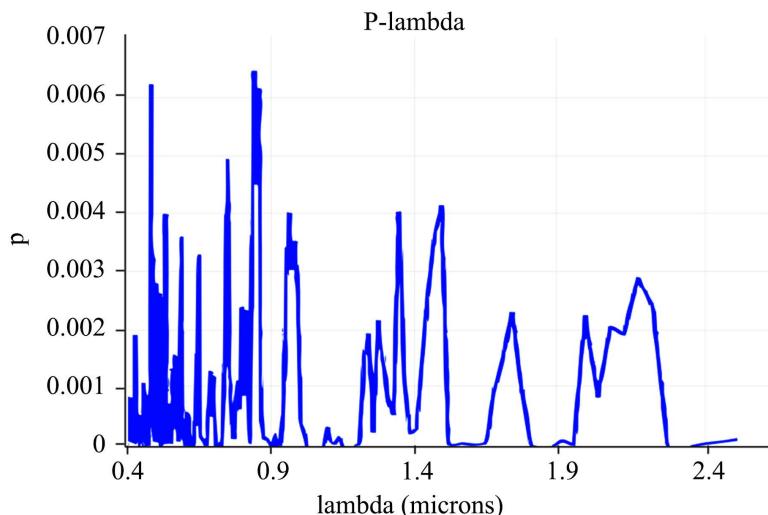


**Figure 1.** Photonic crystal structure of square lattice of cylindrical medium with increasing refractive index step by step with radius

**图 1.** 折射率沿半径阶梯增加的圆柱介质正方形晶格光子晶体结构图

### 3. 折射率沿介质柱半径分3层增加的光子晶体设置的光子晶体的带隙

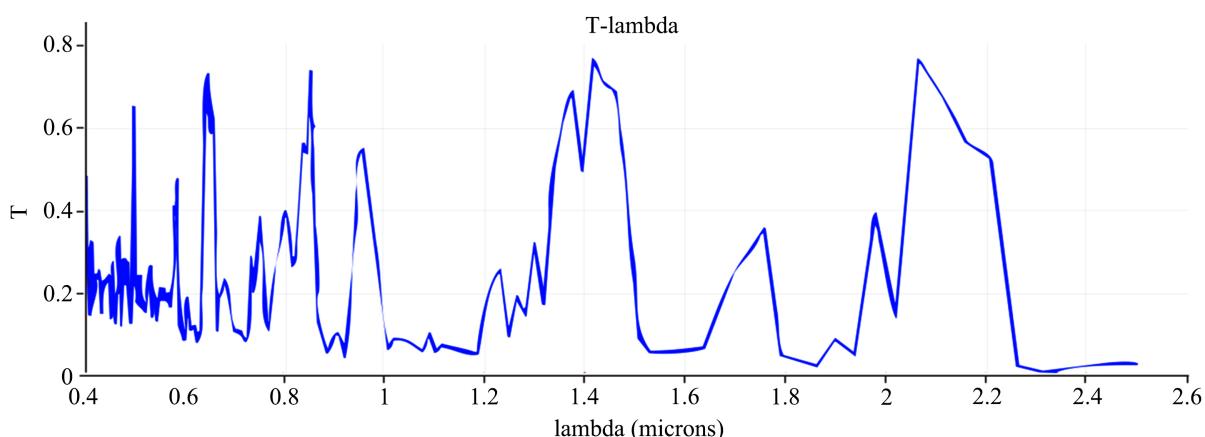
图2所对应的光子晶体结构与图1中的相同，介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ ，晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ ，折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$  的光子晶体。使用平面波光源，从结果中看到，在  $1.0\sim1.2 \mu\text{m}$ ,  $1.50\sim1.62 \mu\text{m}$ ,  $1.80\sim1.95 \mu\text{m}$  光的透射能量低，是晶体在Y方向的带隙。



**Figure 2.** Light wave transmission of photonic crystals with dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$  and refractive index  $n = 1.5$  and  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$  respectively

**图2.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$  的光子晶体的光波透射图

为了对比在相同的晶体结构条件下，引进空气柱缺陷时，光子晶体的带隙的变化，从而发现空气柱缺陷对光子晶体带隙的影响，我们与图1的结构和介质柱分布相同的情况下，在晶体中把一个介质柱换成空气柱，形成一个空气柱缺陷，结构类似于图1。使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图1也完全相同，得到如图3的透射曲线。

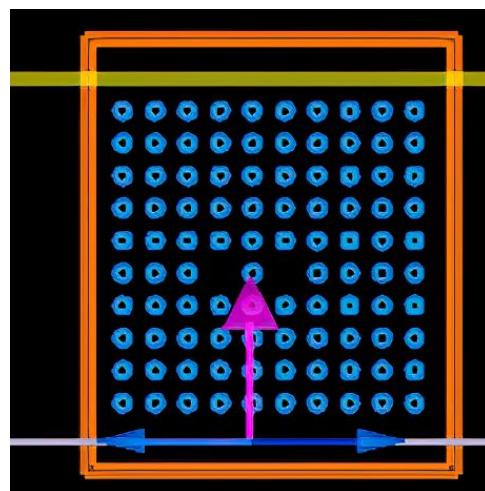


**Figure 3.** Light wave transmission of photonic crystals with dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$  and refractive index  $n = 1.0$  and  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$  respectively, with an air column defect in the middle

**图3.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$ , 中间设置一个空气柱缺陷的光子晶体的光波透射图

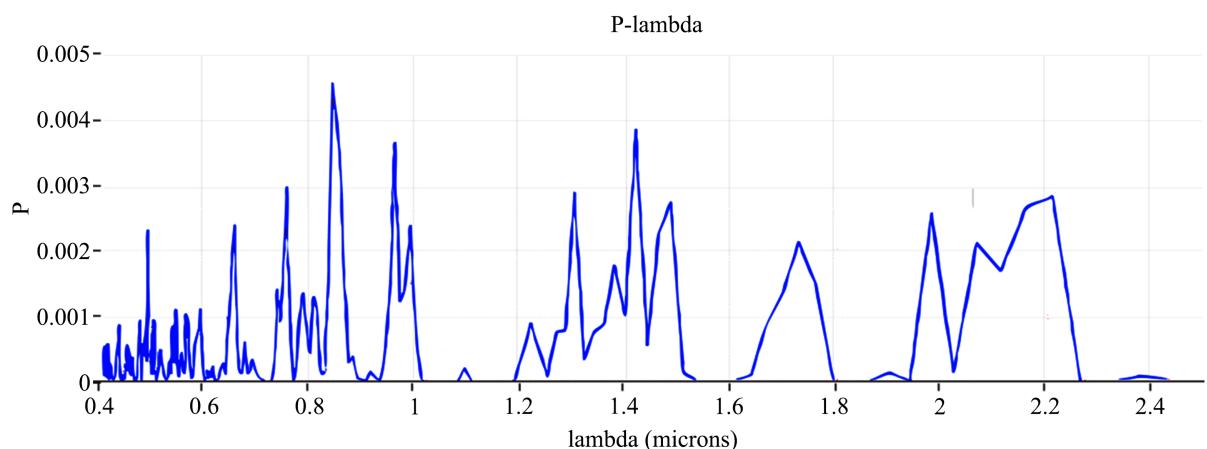
图 3 的光子晶体结构与图 1 中的类似，介质柱半径  $r = 0.60 \mu\text{m}$ ，晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ ，折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$ ，中间设置一个空气柱缺陷的光子晶体。使用平面波光源，从结果中看到，在  $1.0\sim1.2 \mu\text{m}$ ,  $1.50\sim1.62 \mu\text{m}$ ,  $1.80\sim1.95 \mu\text{m}$  光的透射系数低，是晶体在 Y 方向的带隙。图 3 的光子晶体结构与图 2 的光子晶体结构相同，不同的地方在于在晶体的中间设置了一个空气柱缺陷，但是它们的带隙位置完全相同。

为了对比在相同的晶体结构条件下，引进空气柱缺陷时，光子晶体的带隙的变化，从而发现空气柱缺陷对光子晶体带隙的影响，我们与图 1 的结构和介质柱分布相同的情况下，在晶体中把两个介质柱换成空气柱，形成两个间隔空气柱缺陷，结构如图 4，类似于图 1。使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图 1 也完全相同，得到如图 5 的透射曲线。



**Figure 4.** The structure of photonic crystals with two separated air defect columns with dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ , and  $n = 4.0$  along the dielectric column radius

**图 4.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$ , 设置两个间隔空气缺陷柱的光子晶体的结构图

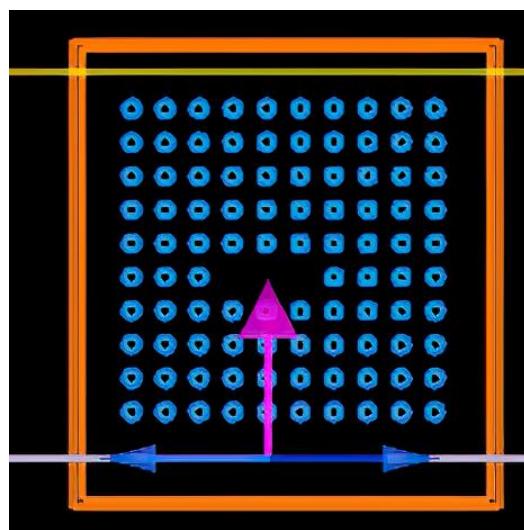


**Figure 5.** The dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , the refractive index along the dielectric column radius is  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$ , respectively. The photonic wave transmission pattern of two separated air defect columns is set

**图 5.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0$ ,  $n = 2.5$ ,  $n = 4.0$ , 设置两个间隔空气缺陷柱的光子晶体的光波透射图

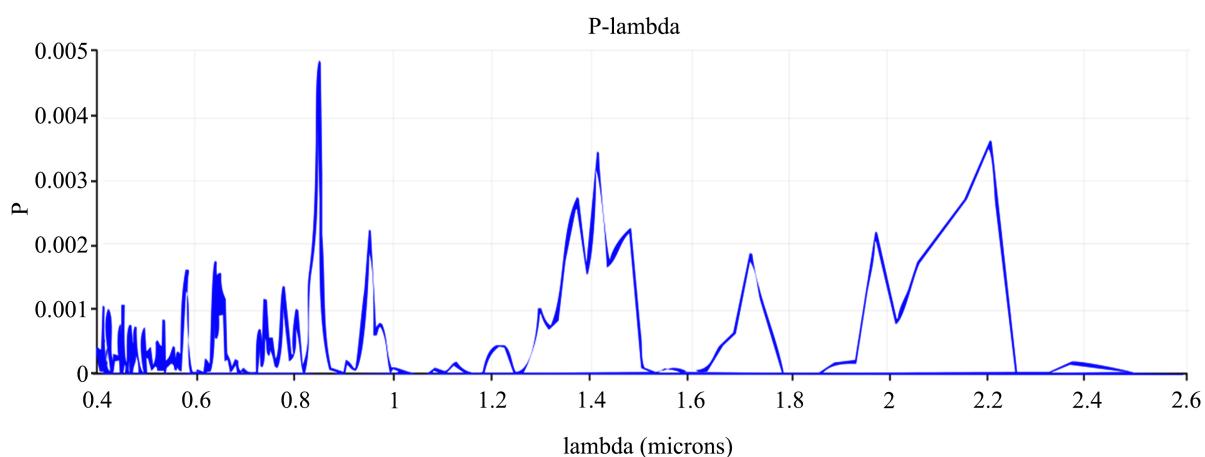
图 5 中介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.5, n = 4.0$ , 设置两个间隔空气缺陷柱的光子晶体的光波透射图, 从图中可以看到,  $1.0 \sim 1.2 \mu\text{m}, 1.50 \sim 1.62 \mu\text{m}, 1.80 \sim 1.95 \mu\text{m}$  是 3 个明显的 Y 方向的带隙。图 5 的结构与图 1 的结构相同, 不同之处在于图 5 的结构设置了两个间隔空气缺陷柱, 但是带隙的位置没有发生变化, 说明介质柱缺陷对光子晶体的带隙没有影响。

为了对比在相同的晶体结构条件下, 引进空气柱缺陷时, 光子晶体的带隙的变化, 从而发现空气柱缺陷对光子晶体带隙的影响, 我们与图 4 的结构和介质柱分布相同的情况下, 在晶体中把两个介质柱换成空气柱, 形成两个相邻空气柱缺陷, 结构如图 6, 类似于图 4。使用相同的平面波光源, 计算网格的划分与图 4 也完全相同, 得到如图 7 的透射曲线。



**Figure 6.** The structure diagram of the photonic crystals with dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , the refractive index along the dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.5, n = 4.0$ , and three connected air defect columns are set

**图 6.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.5, n = 4.0$ , 设置三个相连空气缺陷柱的光子晶体的结构图



**Figure 7.** Transmission diagram of photonic crystals with three connected air defect columns with dielectric column radius  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0, n = 2.5$ , and  $n = 4.0$ , respectively

**图 7.** 介质柱半径  $r = 0.6 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.8 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.5, n = 4.0$ , 设置三个相连空气缺陷柱的光子晶体的透射图

从图 7 中可以看到，在  $1.0\sim1.2 \mu\text{m}$ ,  $1.50\sim1.62 \mu\text{m}$ ,  $1.80\sim1.96 \mu\text{m}$  有三个明显的 Y 方向的带隙。尽管图 7 的结构中介质柱是相邻的，而图 5 的介质柱缺陷之间间隔一个折射率介质柱，但是它们的带隙完全相同，说明介质柱缺陷的形式对光子晶体带隙没有影响。

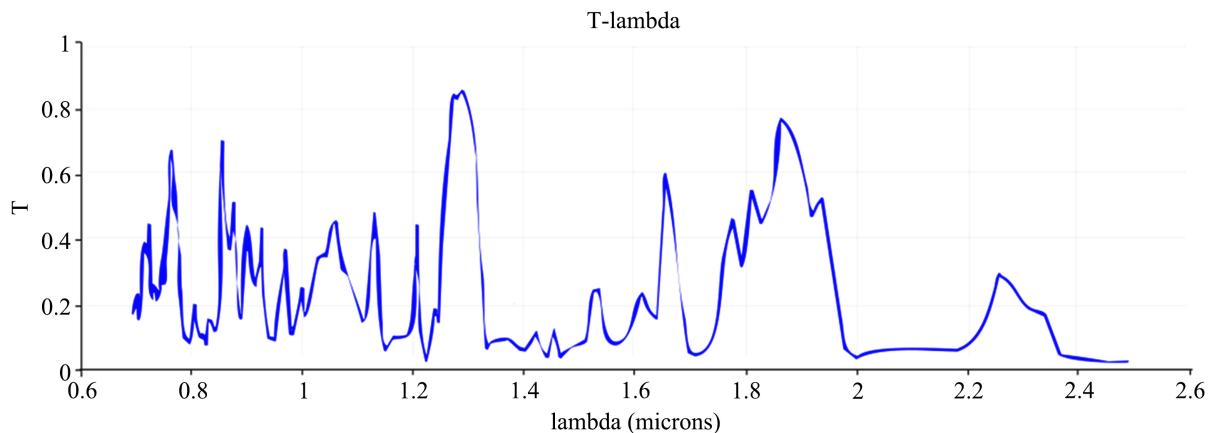
**Table 1.** Comparison of photonic crystal structure and light transmittance with radius  $r = 0.60 \mu\text{m}$  and lattice constant  $a = 1.80 \mu\text{m}$   
**表 1.** 半径  $r = 0.60 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 1.80 \mu\text{m}$  光子晶体结构和光透射率对比

	介质柱半径 $r (\mu\text{m})$	半径 $r_1$ , 折射率 $n_1$	半径 $r_2$ , 折射率 $n_2$	半径 $r_3$ , 折射率 $n_3$	晶格常数 $a (\mu\text{m})$	缺陷柱折射率/ 排列方式	填充率	带隙( $\mu\text{m}$ )
图 2	0.6	0.2, 1.0	0.4, 2.5	0.6, 4.0	1.8	无缺陷	0.349	1.0~1.2, 1.50~1.62, 1.80~1.95
图 3	0.6	0.2, 1.0	0.4, 2.5	0.6, 4.0	1.8	1.0/一个缺陷柱	0.349	1.0~1.2, 1.50~1.62, 1.80~1.95
图 5	0.6	0.2, 1.0	0.4, 2.5	0.6, 4.0	1.8	1.0/两个间隔缺陷柱	0.349	1.0~1.2, 1.50~1.62, 1.80~1.95
图 7	0.6	0.2, 1.0	0.4, 2.5	0.6, 4.0	1.8	1.0/三个相连缺陷柱	0.349	1.0~1.2, 1.50~1.62, 1.80~1.96

表 1 中的几种光子晶体的结构，半径相同， $r = 0.60 \mu\text{m}$ ，晶格常数相同， $a = 1.80 \mu\text{m}$ ，填充率均为 0.349，都是分 3 层折射率沿半径方向阶梯增加。从表 1 中几种结构的带隙的对比看出：尽管这几种结构的缺陷设置不同，但是它们的带隙位置和带隙宽度都相同。说明，光子晶体带隙的位置和宽度由晶体的结构参数决定，缺陷对带隙几乎没有影响。

#### 4. 折射率沿介质柱半径分 4 层阶梯增加的光子晶体的带隙

为了对比在不同的晶体结构条件下，引进空气柱缺陷时，光子晶体的带隙的变化，我们改变晶体的晶格常数，设定  $a = 2.4 \mu\text{m}$ ，介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ ，结构类似于图 1。使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图 1 也完全相同，得到如图 8 的透射曲线。

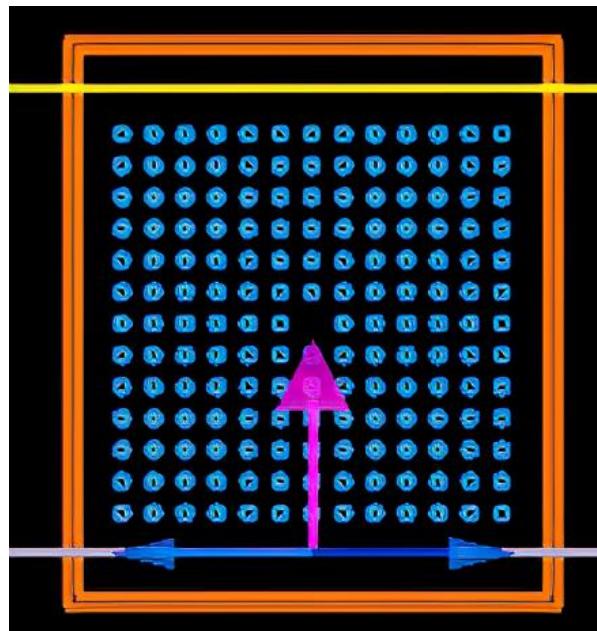


**Figure 8.** Light wave transmission diagram of a photonic crystal with Radius of dielectric column  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius is  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , respectively

**图 8.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$  的光子晶体的光波透射图

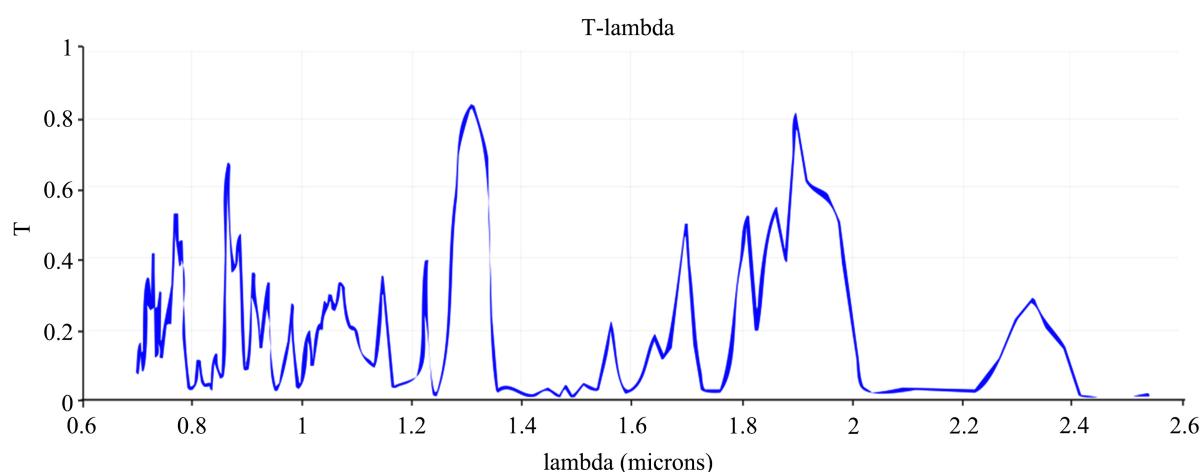
图 8 的带隙位置为  $1.34\sim1.404 \mu\text{m}$ ,  $2.0\sim2.24 \mu\text{m}$ 。

为了对比在相同的晶体结构条件下, 引进空气柱缺陷时, 光子晶体的带隙的变化, 我们与图 8 对应的结构和介质柱分布相同的情况下, 在晶体中把一个介质柱换成空气柱, 形成一个空气柱缺陷, 结构如图 9。类似于图 8 的结构。使用相同的平面波光源, 计算网格的划分与图 8 也完全相同, 得到如图 10 的透射曲线。



**Figure 9.** Photonic crystal structure with radius of dielectric column  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , respectively. an air defect column is set up

**图 9.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置一个空气缺陷柱的光子晶体的结构图

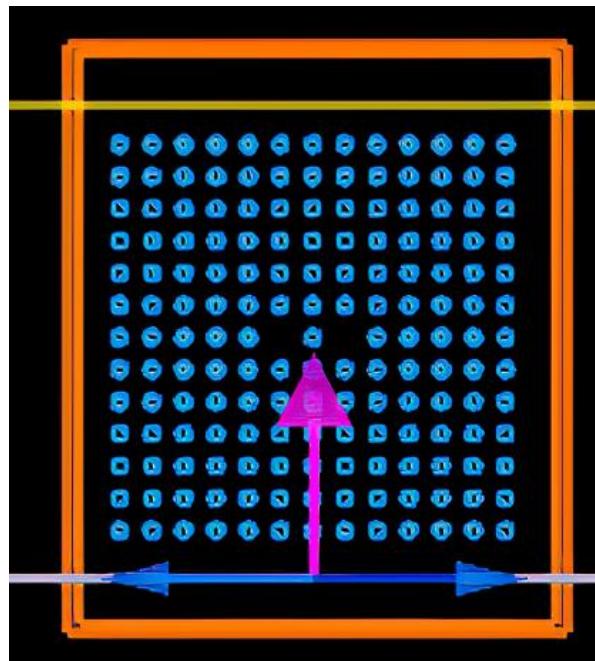


**Figure 10.** The light transmission diagram of photonic crystal with an air defect column is set, and radius of dielectric column  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , respectively

**图 10.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置一个空气缺陷柱的光子晶体的光透射图

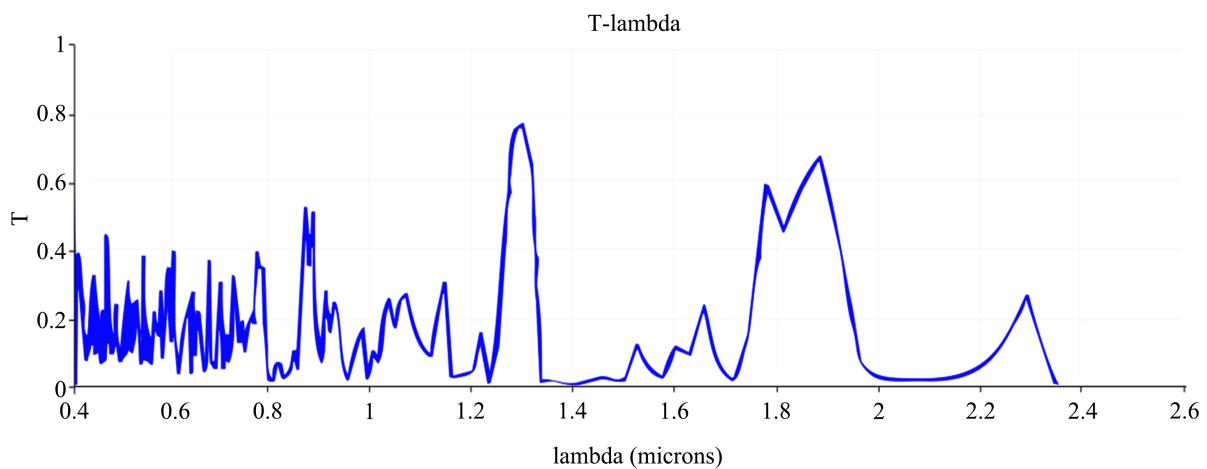
从图 10 中可以看出，在 Y 方向，带隙位置为  $1.34\sim1.50 \mu\text{m}$ ,  $2.0\sim2.2 \mu\text{m}$ 。

为了对比在相同的晶体结构条件下，引进不同空气柱缺陷时，光子晶体的带隙的变化，我们与图 9 的结构和介质柱分布相同的情况下，在晶体中把 2 个介质柱换成空气柱，形成两个间隔的空气柱缺陷，结构如图 11。类似于图 9，使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图 9 也完全相同，得到如图 12 的透射曲线。



**Figure 11.** Photonic crystal structure of two air defect columns with dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , respectively

**图 11.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 2 个空气缺陷柱的光子晶体的结构图

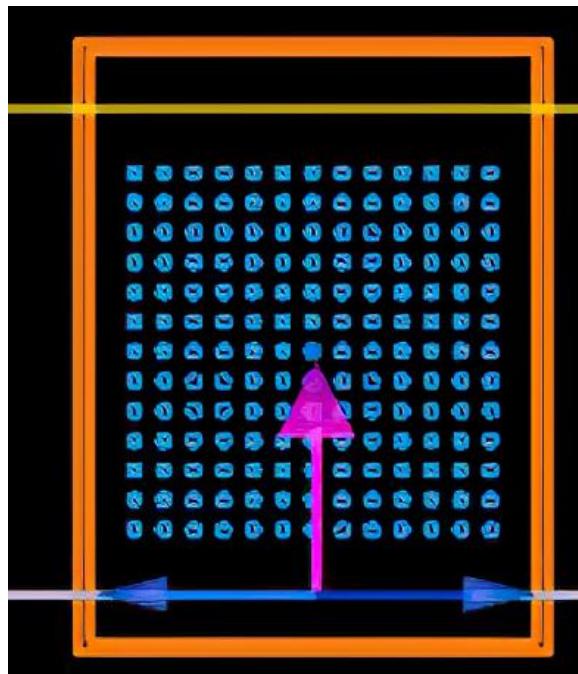


**Figure 12.** Photonic crystal transmittance diagram of two air defect columns with dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , respectively

**图 12.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 2 个空气缺陷柱的光子晶体的光波透射图

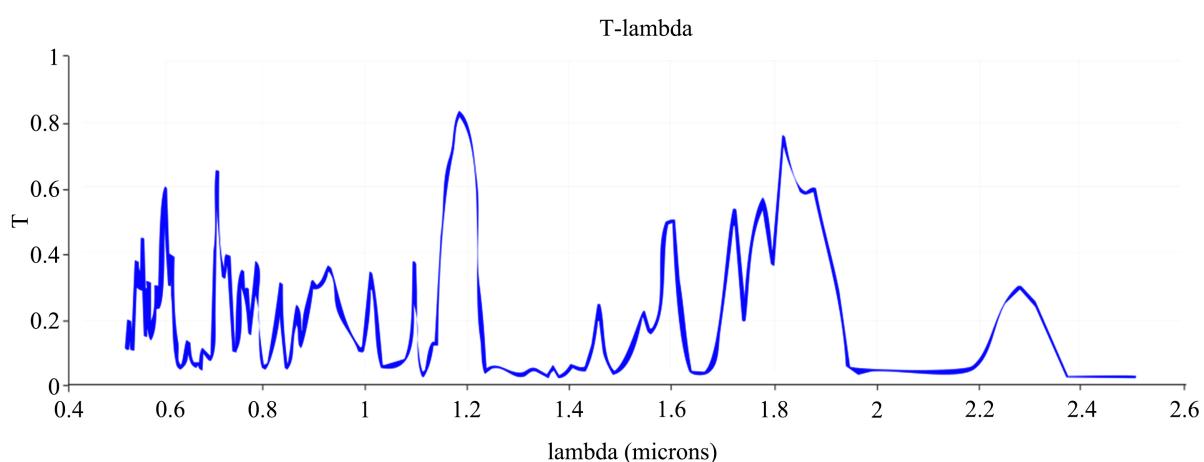
从图 12 可以看出, Y 方向带隙的位置是: 1.34~1.50  $\mu\text{m}$ , 2.0~2.2  $\mu\text{m}$ 。

为了对比在相同的晶体结构条件下, 引进介质柱缺陷时, 光子晶体的带隙的变化, 我们与图 11 的结构和介质柱分布相同的情况下, 在晶体中把一个介质柱换成折射率  $n = 4.0$  的介质柱, 形成一个介质柱缺陷, 结构如图 13。类似于图 11, 使用相同的平面波光源, 计算网格的划分与图 11 也完全相同, 得到如图 14 的透射曲线。



**Figure 13.** Photonic crystal structure diagram of dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , setting 1 defect column  $n = 4.0$

**图 13.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 1 个  $n = 4.0$  缺陷柱的光子晶体的结构图

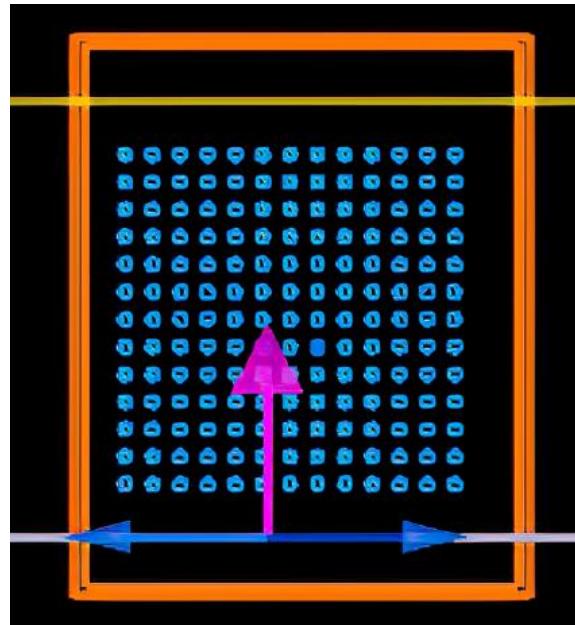


**Figure 14.** Light wave transmission diagram of photonic crystal with dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , set 1 defect column  $n = 4.0$

**图 14.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 1 个  $n = 4.0$  缺陷柱的光子晶体的光波透射图

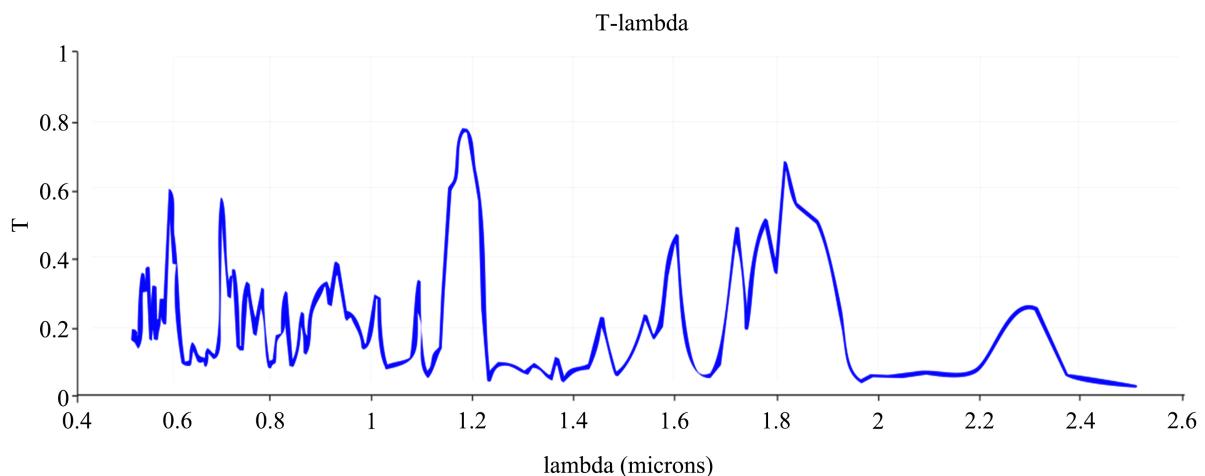
从图 14 可以看出，带隙的位置为：1.34~1.50  $\mu\text{m}$ , 1.70~1.72  $\mu\text{m}$ , 2.0~2.2  $\mu\text{m}$ 。

为了对比在相同的晶体结构条件下，引进不同介质柱缺陷时，光子晶体的带隙的变化，我们与图 13 的结构和介质柱分布相同的情况下，在晶体中把 2 个介质柱换成折射率  $n = 4.0$  的介质柱，形成间隔介质柱缺陷，结构如图 15。类似于图 13，使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图 13 也完全相同，得到如图 16 的透射曲线。



**Figure 15.** Photonic crystal structure of dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along the dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , and set two  $n = 4.0$  interval defect columns

**图 15.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 2 个  $n = 4.0$  间隔缺陷柱的光子晶体的结构图



**Figure 16.** Light wave transmission diagram of a photonic crystal of radius of dielectric column  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , set 2 columns with  $n = 4.0$  interval defect

**图 16.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 2 个  $n = 4.0$  间隔缺陷柱的光子晶体的光波透射图

从图 16 可以看出，沿 Y 方向的带隙位置为：1.34~1.50  $\mu\text{m}$ , 2.0~2.2  $\mu\text{m}$ 。

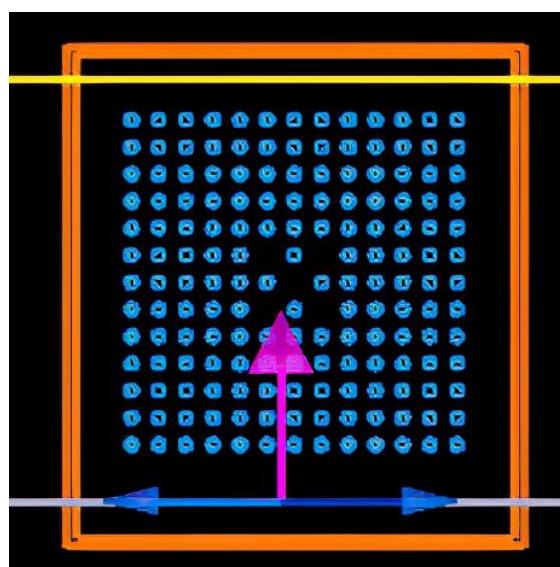
表 2 中的几种光子晶体的结构，半径相同， $r = 0.80 \mu\text{m}$ ，晶格常数相同， $a = 1.80 \mu\text{m}$ ，填充率均为 0.62，都是分 4 层折射率沿半径方向阶梯增加。图 8 是无缺陷结构，其它都是设置缺陷柱的结构。在图 14 中，多出了 1.70~1.72  $\mu\text{m}$  的带隙，说明在折射率沿半径方向阶梯增加的光子晶体结构中，带隙主要是由晶体的结构和填充率决定，缺陷柱的折射率和缺陷柱的数量对带隙没有影响。

**Table 2.** Comparison of photonic crystal structure and light transmittance with radius  $r = 0.80 \mu\text{m}$  and lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$   
**表 2.** 半径  $r = 0.80 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$  光子晶体结构和光透射率对比

	介质柱半径 $r (\mu\text{m})$	半径 $r_1$ , 折射率 $n_1$	半径 $r_2$ , 折射率 $n_2$	半径 $r_3$ , 折射率 $n_3$	半径 $r_4$ , 折射率 $n_4$	晶格常数 $a (\mu\text{m})$	缺陷柱折射率/ 排列方式	填充率	带隙( $\mu\text{m}$ )
图 8	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	1.8	无缺陷	0.62	1.34~1.40, 2.0~2.2
图 10	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	1.8	1.0/一个缺陷柱	0.62	1.34~1.50, 2.0~2.2
图 12	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	1.8	1.0/两个间隔缺陷柱	0.62	1.34~1.50, 2.0~2.2
图 14	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	1.8	4.0/一个缺陷柱	0.62	1.34~1.50, 1.70~1.72, 2.0~2.2
图 16	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	1.8	4.0/两个间隔缺陷柱	0.62	1.34~1.50, 2.0~2.2

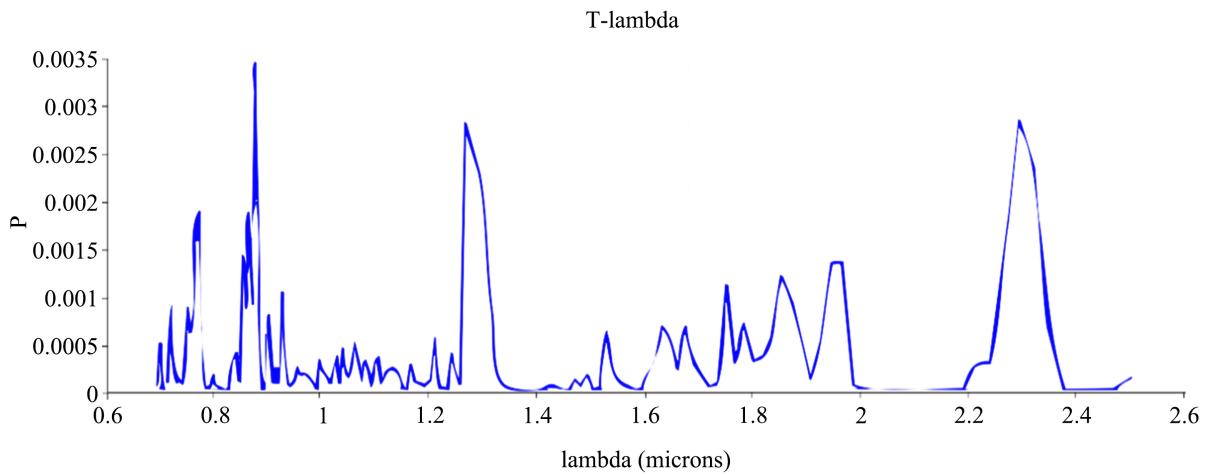
## 5. 折射率沿介质柱半径分 4 层阶梯增加的光子晶体和设置缺陷柱的光子晶体的带隙

为了进一步对比在相同的晶体结构条件下，引进不同介质柱缺陷数量和位置时，光子晶体的带隙的变化，我们与图 15 的结构和介质柱分布相同的情况下，在晶体中把 5 个介质柱换成折射率  $n = 1.0$  的空气介质柱，形成 5 个间隔空气柱缺陷，结构如图 17。类似于图 15，使用相同的平面波光源，计算网格的划分与图 15 也完全相同，得到如图 18 的透射曲线。



**Figure 17.** Photonic crystal structure of medium column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index along medium column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , setting 5 air defect columns  $n = 1.0$

**图 17.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 5 个  $n = 1.0$  空气缺陷柱的光子晶体的结构图

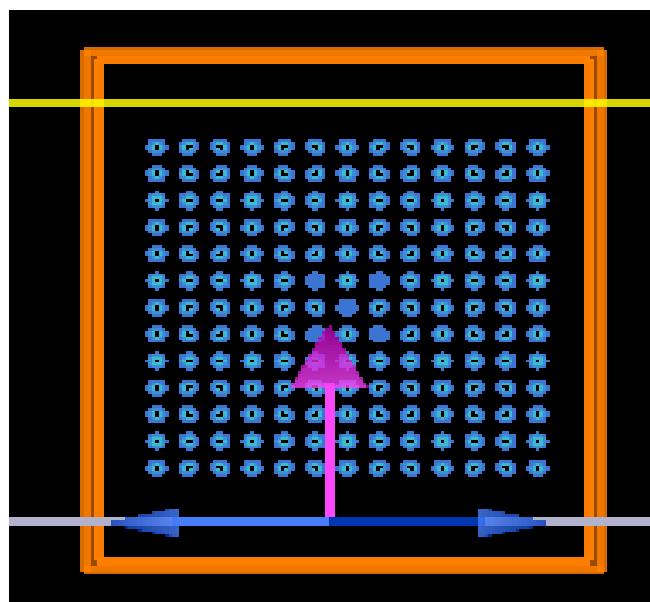


**Figure 18.** Light wave transmission diagram of photonic crystals with medium column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$  along medium column radius respectively, and 5 air defect columns with  $n = 1.0$

**图 18.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 5 个  $n = 1.0$  空气缺陷柱的光子晶体的光波透射图

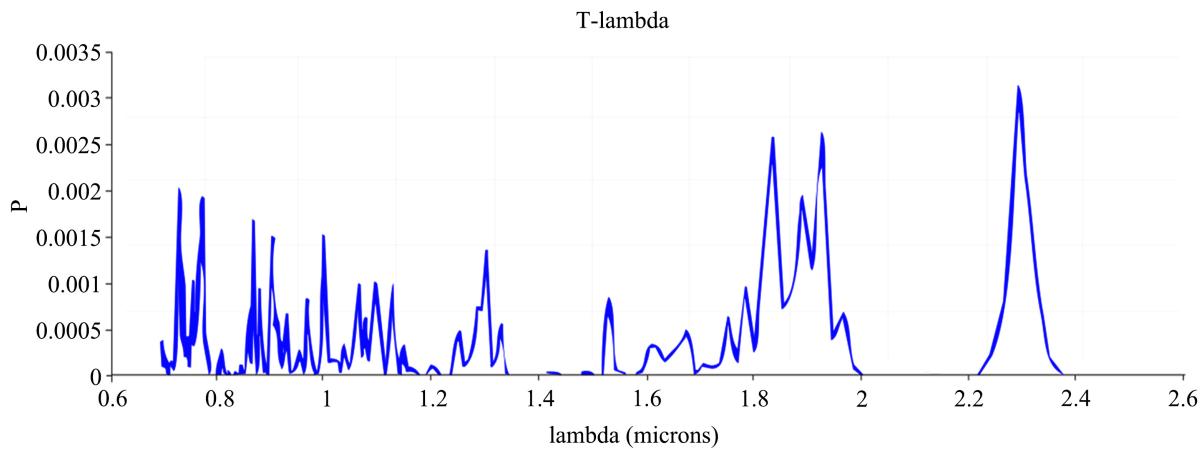
从图 18 中可以看到, 沿 Y 方向的带隙位置为:  $1.35\sim1.50 \mu\text{m}$ ,  $2.0\sim2.2 \mu\text{m}$ ,  $2.38\sim2.48 \mu\text{m}$ 。

为了与图 17 对比在相同的晶体结构条件下, 引进不同介质柱缺陷数量和位置时, 光子晶体的带隙的变化, 我们与图 17 的结构和介质柱分布相同的情况下, 在晶体中把 5 个介质柱换成折射率  $n = 4.0$  的介质柱, 形成 5 个间隔介质柱缺陷, 这 5 个介质柱排列成 5 边形, 结构如图 19。类似于图 17, 使用相同的平面波光源, 计算网格的划分与图 17 也完全相同, 得到如图 20 的透射曲线。



**Figure 19.** The structure diagram of photonic crystals with dielectric column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , the lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , the refractive index along the dielectric column radius  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , and setting five defect columns  $n = 4.0$

**图 19.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 5 个  $n = 4.0$  缺陷柱的光子晶体的结构图



**Figure 20.** Light wave transmission of photonic crystals with medium column radius  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , refractive index  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$  along medium column radius, respectively. Five defect columns with  $n = 4.0$  are set

**图 20.** 介质柱半径  $r = 0.8 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$ , 折射率沿介质柱半径分别为  $n = 1.0, n = 2.0, n = 3.0, n = 4.0$ , 设置 5 个  $n = 4.0$  缺陷柱的光子晶体的光波透射图

从图 20 可以看出, 沿 Y 方向的带隙位置为:  $1.35\sim1.50 \mu\text{m}, 2.0\sim2.2 \mu\text{m}, 2.4\sim2.5 \mu\text{m}$ 。

表 3 中的几种光子晶体的结构, 半径相同,  $r = 0.80 \mu\text{m}$ , 晶格常数相同,  $a = 2.40 \mu\text{m}$ , 填充率均为 0.349, 都是分 4 层折射率沿半径方向阶梯增加。从表 3 中几种结构的带隙的对比看出:

图 8 是无缺陷结构, 图 18, 图 20 是有缺陷的结构, 它们都有共同的带隙:  $1.34\sim1.40, 2.0\sim2.2 \mu\text{m}$ 。图 18, 图 20 在无缺陷的结构基础上, 增加了一个带隙  $2.38\sim2.48 \mu\text{m}$ , 虽然图 18 和图 20 的缺陷柱折射率不同, 但是它们的带隙位置和宽度很接近。说明缺陷介质柱的折射率对光子晶体带隙影响很小。

**Table 3.** Comparison of photonic crystal structure and light transmittance with radius  $r = 0.80 \mu\text{m}$  and lattice constant  $a = 2.4 \mu\text{m}$

**表 3.** 半径  $r = 0.80 \mu\text{m}$ , 晶格常数  $a = 2.4 \mu\text{m}$  光子晶体结构和光透射率对比

	介质柱半径 $r (\mu\text{m})$	半径 $r_1$ , 折射率 $n_1$	半径 $r_2$ , 折射率 $n_2$	半径 $r_3$ , 折射率 $n_3$	半径 $r_4$ , 折射率 $n_4$	晶格常数 $a (\mu\text{m})$	缺陷柱折射率/ 排列方式	填充率	带隙( $\mu\text{m}$ )
图 8	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	2.4	无缺陷	0.349	$1.34\sim1.40, 2.0\sim2.2$
图 18	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	2.4	1.0/5 个缺陷柱	0.349	$1.35\sim1.50, 2.0\sim2.2,$ $2.38\sim2.48$
图 20	0.8	0.2, 1.0	0.4, 2.0	0.6, 3.0	0.8, 4.0	2.4	4.0/5 个缺陷柱	0.349	$1.35\sim1.50, 2.0\sim2.2,$ $2.4\sim2.5$

## 6. 结论

本文对比研究了介质柱折射率沿半径方向阶梯增加的二维光子晶体的带隙, 对比了完整光子晶体和设置缺陷柱的光子晶体的带隙, 结果表明: 光子晶体的带隙, 主要由晶体的结构和填充率决定, 各种类型的缺陷介质柱对光子晶体的带隙影响很小, 这为光子晶体带隙的设计提供了重要参考。

## 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] Butt, M.A., Khonina, S.N. and Kazanskiy, N.L. (2021) Recent Advances in Photonic Crystal Optical Devices: A Review. *Optics & Laser Technology*, **142**, Article No. 107265. <https://doi.org/10.1016/j.optlastec.2021.107265>
  - [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 No. 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.jleo.2017.08.058>
  - [6] Yin, X.-G., Li, D.-C., Tang, S.-R. and Wu, H.-X. (2018) Study on Band Gaps Structure and Eigenfield Distribution of Two-Dimensional Function Photonic Crystals with Point Defect. *Optik*, **172**, 662-667. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2018.06.059>
  - [7] Hassanzadeh, M., Sovizi, M. and Mohsseni, M. (2013) Position Calculation of the Frequency Band Gap in the Finite Photonic Crystal with Multiple Alternations Using Boundary Element Method. *Optik*, **124**, 6869-6873. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.2013.05.153>
  - [8] Anghel, I. (2019) Numerical Investigation of Photonic Crystals Structure on Zinc Oxide Film. *Optik*, **185**, 282-286. <https://doi.org/10.1016/j.jleo.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] Wun, X.-Y., Zhang, B.-J., Liu, X.-J., et al. (2012) Light Field Distribution of General Function Photonic Crystals. *Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures*, **46**, 133-138. <https://doi.org/10.1016/j.physe.2012.09.009>
  - [11] 刘晓静, 梁禹, 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.
  - [12] 陈义万, 杜海霞, 陈昭蓉, 闵锐. 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.
  - [13] 葛德彪, 阎玉波. 电磁波时域有限差分方法(第3版)[M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2011.
  - [14] 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. <https://doi.org/10.12677/OE.2018.83016>
  - [15] 陈义万, 杜海霞, 陈昭蓉, 张群芝. 用折射率阶梯增加的二维正方晶格光子晶体获得宽带隙[J]. 光电子, 2020, 10(3): 53-59. <https://doi.org/10.12677/OE.2020.103007>