

# Effect of the Defect Thickness of Random Fluctuation on the PBG of One-Dimensional Photonic Crystals

Lei Wang, Yanhong Lu, Maosong Huang, Fucai Guo, Yihong Lu, Min Shi, Hengjiang Hu

The 63811 Unit of PLA, Xichang Satellite Launch Center, Wenchang Hainan

Email: [xian880512@sina.com](mailto:xian880512@sina.com)

Received: Sep. 6<sup>th</sup>, 2015; accepted: Sep. 25<sup>th</sup>, 2015; published: Sep. 28<sup>th</sup>, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

---

## Abstract

The effect of thickness of random fluctuation on the photonic band gap (PBG) of one-dimensional photonic crystals (PCs) is analyzed by the characteristic matrix method. The results show that the omnidirectional band gap and the gap ratio of the PCs change little according to the value of random degree equal to 0.03. Meanwhile, the transmission ratio also varies little in the defect layer. Both the omnidirectional band gap and the gap ratio of the PCs slightly vary when the random degree can reach to 0.3. However, the transmission ratio can only reach to 0.4 of the original one in the defect layer. There is only one omnidirectional band gap when the value of random degree reaches to 0.5. Meanwhile, the transmission ratio decreases to 0 in the defect layer. This study is valuable to the design and the preparation of the one-dimensional PCs.

## Keywords

Thickness, Random Degree, Omnidirectional Band Gap, Transmission Ratio

---

# 缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响

王磊, 路彦红, 黄茂松, 郭付才, 卢意红, 石敏, 胡恒江

中国西昌卫星发射中心63811部队, 海南 文昌

文章引用: 王磊, 路彦红, 黄茂松, 郭付才, 卢意红, 石敏, 胡恒江. 缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响[J]. 应用物理, 2015, 5(8): 83-87. <http://dx.doi.org/10.12677/app.2015.58012>

Email: [xian880512@sina.com](mailto:xian880512@sina.com)

收稿日期: 2015年9月6日; 录用日期: 2015年9月25日; 发布日期: 2015年9月28日

## 摘要

本文利用特征矩阵法, 分析了缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响。结果表明, 当随机度为0.03时, 光子晶体的全向带隙和全向带隙率变化不大, 同时缺陷处的透过率变化也不明显。当随机度达到0.3时, 光子晶体的全向带隙和全向带隙率变化较小, 但缺陷处的透过率只能达到原来的0.4。当随机度达到0.5时, 光子晶体只有一个全向带隙, 其缺陷处的透过率也降到0。本文的研究对一维光子晶体的设计和制备提供了有价值的参考。

## 关键词

厚度, 随机度, 全向带隙, 透过率

## 1. 引言

1987年, Yablonovitch 教授与 John 教授均发现了周期性介质结构可以有效地控制光波的传播, 几乎同时分别提出光子晶体这一概念[1] [2]。光子禁带是光子晶体的最基本特征[3], 指的是电磁波的频率如果落在光子禁带中, 其自发辐射就会被抑制住。光子局域是光子晶体另一个重要特征[4], 当在光子晶体结构中引入某种适合的缺陷时, 其带隙中就有可能出现局域态, 一旦其偏离缺陷位置, 光波就将会迅速衰减。因此, 可以利用光子晶体的禁带特性和局域特性, 设计实现用常规材料很难或者无法实现的特殊性能。高永芳[5]等人利用光子晶体的局域特性, 可以实现光子晶体在远红外波段的激光与远红外的兼容伪装效果。但在实际设计制备光子晶体过程中, 考虑到研究的光子晶体薄膜特性主要用于远红外波段, 其对薄膜的厚度精度要求高, 而当光子晶体含有缺陷时, 其对薄膜的厚度将会更加敏感。因此, 在光子晶体薄膜特性的分析中, 有必要对光子晶体厚度特别是缺陷层的厚度参数对光子晶体带隙的影响。本文基于光子晶体的局域特性, 采用特征矩阵法分析了缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响。

## 2. 模型和计算原理

本文利用特征矩阵法研究一维光子晶体的带隙特性, 根据薄膜的光学理论[6] [7], 在分层媒质中传输的光可以用 $2 \times 2$ 的特征矩阵来表示其特性。对于第 $l$ 层媒质, 其特征矩阵可以表示为

$$M_l = \begin{bmatrix} \cos \delta_l & j \frac{\sin \delta_l}{\eta_l} \\ j \eta_l \sin \delta_l & \cos \delta_l \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\delta_l = \frac{2\pi}{\lambda} n_l d_l \cos \theta_l$ ,  $n_l$ 、 $d_l$ 分别为媒质第 $l$ 层的折射率和厚度,  $\eta_l = \begin{cases} n_l / \cos \theta_l, & TM \text{波} \\ n_l / \cos \theta_l, & TE \text{波} \end{cases}$ ,  $\theta_l$ 为媒质第 $l$ 层的折射角, 它满足 Snell 折射定律, 即  $n_l \sin \theta_l = n_{l-1} \sin \theta_{l-1} = \dots = n_0 \sin \theta_0$ ,  $\lambda$ 为在真空中入射光的波长。当薄膜由 $k$ 层组成时, 总的特征矩阵为

$$M = \prod_{l=1}^k M_l \quad (2)$$

如果将特征矩阵记为

$$M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix} \quad (3)$$

可得入射光的反射率  $R$  为

$$R = \left| \frac{m_{11} + \eta_{k+1}m_{12} - \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{k+1}m_{22})}{m_{11} + \eta_{k+1}m_{12} + \eta_0^{-1}(m_{21} + \eta_{k+1}m_{22})} \right|^2 \quad (4)$$

### 3. 方法与分析

对于一维光子晶体，我们可以利用上面推导的特征矩阵法来研究它的光谱特性。通过计算机产生一维正态分布随机数，控制其在一定波动范围内，同时为了减小计算量，本文将均值和方差均设为 0.5，再用一个随机度  $\Delta$  来表示厚度的扰动程度。为了研究缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响，我们在缺陷层厚度上加上随机变量，具体的厚度随机变量变化表示为  $d(2n) = 1 - \Delta \times (0.5 + \text{sqrt}(0.5) \times \text{randn}(1))$ ，其中  $n$  为一维光子晶体周期数， $\text{sqrt}$  表示方差， $\text{randn}$  表示随机数组(满足一维正态分布)。这里设计的光子晶体中心波长为  $10 \mu\text{m}$ ，结构满足  $1/4$  波长，周期数取 10。本文通过设计缺陷层厚度随机度较小 ( $\Delta = 0$  和  $\Delta = 0.03$ ) 和随机度较大 ( $\Delta = 0.3$  和  $\Delta = 0.5$ ) 的光子晶体，更加清晰地说明缺陷层厚度的变化程度对光子晶体带隙的影响。具体的分析过程如下：

#### 3.1. 厚度的随机扰动对一维光子晶体反射光谱的影响

本文采用  $(AB)^5(BA)^5$  光子晶体结构，介质层单层厚度分别为  $0.626 \mu\text{m}$  和  $1.136 \mu\text{m}$ 。图 1 是对应于—维随机数组  $\text{randn}(1)$  在  $\Delta$  取不同值时光子晶体反射光谱，光子晶体全向带隙在图中用灰色阴影进行了标出，其反射率的数值  $\geq 0.99$ 。图 1(a) 为随机度  $\Delta = 0$  时，设计的光子晶体有两个全向带隙，第一全向带隙波段范围为  $8.23 \sim 8.91 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 7.93%；第二全向带隙波段范围为  $10.08 \sim 11.26 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 11.46%。当该光子晶体缺陷层厚度的随机度较小时， $\Delta = 0.03$ ，反射曲线如图 1(b) 所示，第一全向带隙波段范围为  $8.23 \sim 8.88 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 7.60%；第二全向带隙波段范围为  $10.04 \sim 11.26 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 11.60%。通过对比，我们发现在随机度  $\Delta$  较小的情况下，一维光子晶体全向带隙的宽度和全向带隙率随着  $\Delta$  数值的增大没有发生明显的变化。这是因为缺陷层厚度变化很小，一维光子晶体的缺陷结构受到的破坏较小，因此其对光子晶体带隙产生的影响不大。

当缺陷层厚度的随机扰动程度比较大时，在图 1(c) 中  $\Delta = 0.3$ ，一维光子晶体的两个全向带隙的波段范围分别为  $8.23 \sim 8.96 \mu\text{m}$  和  $10.13 \sim 11.26 \mu\text{m}$ ，全向带隙率相应为 8.49% 和 10.57%。当  $\Delta$  增大到 0.5 时，从图 1(d) 中我们发现该光子晶体第一全向带隙的波段范围为  $8.25 \sim 9.14 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 10.26%；第二全向带隙的波段范围为  $10.35 \sim 11.25 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 8.33%。通过对理想结构，我们发现当随机度在 0.3 时，光子晶体的全向带隙与全向带隙率变化幅度还是比较小。当随机度变为 0.5 时，我们发现图 1(d) 中只有一个全向带隙，这是因为原来的第一个全向带隙的截止波长向长波方向偏移，并且第二个全向带隙的起始波长则向短波方向偏移，最终两个带隙重合，最终导致只有一个全向带隙的出现。其带隙  $8.67 \sim 11.03 \mu\text{m}$ ，全向带隙率为 23.96%。表明随机度较大时，其对光子晶体的带隙产生了十分明显的影响。这是因为缺陷层厚度变化比较大，其对一维光子晶体的缺陷结构造成了较大地破坏，因此其必然对光子晶体带隙产生明显的影响。

#### 3.2. 厚度的随机扰动对一维光子晶体透射光谱的影响

上面我们研究了缺陷层厚度扰动对光子晶体反射光谱的影响，下面我们采用同样的方法对分析厚度

扰动对光子晶体透射光谱的影响。图 2 是计算的光子晶体透射曲线，其中横轴为波长，纵轴为反射率值。图 2(a)为随机度  $\Delta = 0$  时，该光子晶体的理想带隙结构，其缺陷处的透射率为 1。当随机度较小时， $\Delta$  取为 0.03，透射曲线如图 2(b)所示，其缺陷处的透射率变为 0.95，相比理想结构只稍稍地减小了 0.04，其

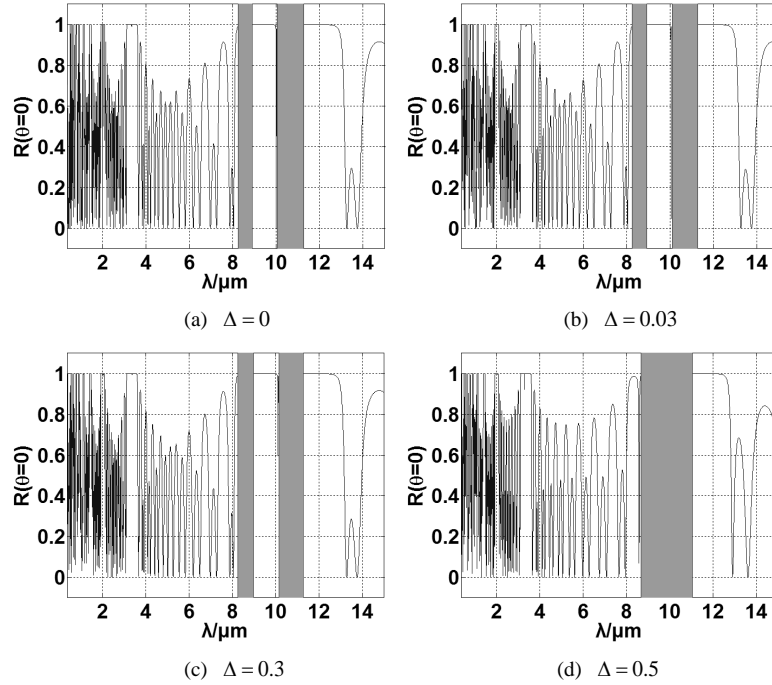


Figure 1. The reflection spectrum of 1D PCs for different random degrees

图 1. 不同随机度时一维光子晶体的反射谱

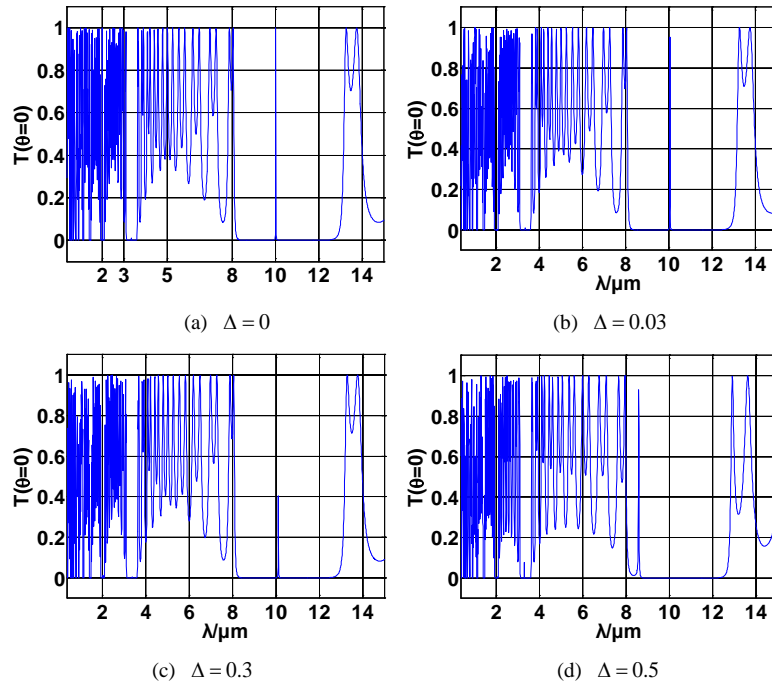


Figure 2. The transmission spectrum of 1D PCs for different random degrees

图 2. 不同随机度时一维光子晶体的透射谱

位置向长波方向偏移了  $0.04\ \mu\text{m}$ 。因此，我们分析当缺陷层厚度随机扰动幅度较小时，其对缺陷层的透射率影响不大。同样地，这是因为缺陷层厚度变化很小，一维光子晶体的缺陷结构受到的破坏较小，因此其对光子晶体透射率产生的影响不大。

当随机度较大时， $\Delta$  取为 0.3，透射曲线如图 2(c) 所示，光子晶体缺陷处的透射率降低到了 0.40，只有理想结构透射率的 0.4，其位置向长波方向偏移了  $0.09\ \mu\text{m}$ 。说明其对光子晶体的带隙已经产生了较大的影响。当随机度变为 0.5 时，如图 2(d) 所示，其缺陷处的透射率已经为 0。因此，我们分析得出，随着缺陷层厚度的扰动程度的增加，缺陷处的透射率越来越小直至降到 0，说明其对光子晶体带隙的影响越来越明显。同样地，这是因为缺陷层厚度变化比较大，其对一维光子晶体的缺陷结构造成了较大地破坏，因此其必然对光子晶体透射率产生明显的影响。

#### 4. 结论

利用薄膜光学中的特征矩阵方法，分别分析了缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体的反射光谱和透射光谱的影响。利用计算机产生了一维正态随机分布数组，并在此基础上建立了厚度的随机扰动方程。通过研究发现：在随机度为 0.03 时，厚度的扰动对全向带隙和全向带隙率影响不大，同时对缺陷模的透过率影响也不明显。当随机度达到 0.3 时，光子晶体的两个全向带隙的宽度和带隙变化都不大，但缺陷层的透过率却只能达到理想结构的 0.4。当随机度达到 0.5 时，由于带隙的偏移导致两个带隙重合，只出现一个全向带隙，同时缺陷处的透射率减小至 0。因此，缺陷层厚度的随机扰动对一维光子晶体带隙的影响还是十分明显的，本文的分析对一维光子晶体带隙的研究有较好的指导意义。

#### 参考文献 (References)

- [1] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited spontaneous emission in solid state physics and electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <http://dx.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. <http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [3] Fink, Y., Winn, J.N., Fan, S., et al. (1998) A dielectric omnidirectional reflector. *Science*, **282**, 1679-1682. <http://dx.doi.org/10.1126/science.282.5394.1679>
- [4] Wiersma, D.S., Bartolini, P., Lagendijk, A. and Righini, R. (1997) Localization of light in a disordered medium. *Letters to Nature*, **390**, 18-25.
- [5] 高永芳, 时家明, 赵大鹏, 等 (2011) 一种基于光子晶体的远红外与 10.6 激光兼容伪装材料的设计与制备. *光学学报*, **6**, 0616001.
- [6] 唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等 (2006) 现代光学薄膜技术. 浙江大学出版社, 杭州, 24-29.
- [7] 王辉, 李永平 (2001) 用特征矩阵法计算光子晶体的带隙结构. *物理学报*, **11**, 2172-2178.