

# Temperature Characteristics of Three-Dimensional Photo Crystal

Yanfen Gong, Ziqiong Li, Xiaofeng Ji, Xiaogang Wu\*

School of Civil and Transportation Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo Zhejiang  
Email: \*wxgdsmy\_2014@126.com

Received: Apr. 9<sup>th</sup>, 2020; accepted: Apr. 23<sup>rd</sup>, 2020; published: Apr. 30<sup>th</sup>, 2020

---

## Abstract

In this paper, the relationship between the energy band of three-dimensional photonic crystal and the change of ambient temperature are studied by use of the plane wave expansion method. The change of the environment temperature will change the refractive index of the three-dimensional photonic crystal medium, and the change of the refractive index of the three-dimensional photonic crystal medium will change the energy band of the three-dimensional photonic crystal. This paper studies the influence of temperature on the band gap of three-dimensional photonic crystal, which can provide theoretical basis for the fabrication of three-dimensional photonic crystal temperature measuring devices.

## Keywords

3D Photo Crystal, Refractive Index, Band Gap

---

# 一种三维光子晶体温度特性研究

龚艳芬, 李紫琼, 嵇潇烽, 武校刚\*

宁波工程学院建筑与交通工程学院, 浙江 宁波  
Email: \*wxgdsmy\_2014@126.com

收稿日期: 2020年4月9日; 录用日期: 2020年4月23日; 发布日期: 2020年4月30日

---

## 摘要

本文采用平面波展开法研究了三维光子晶体的带隙与环境温度变化之间的关系。环境温度变化会使三维光子晶体介质的折射率发生变化, 三维光子晶体介质折射率的变化会引起三维光子晶体的带隙发生变化。

\*通讯作者。

本文研究温度对三维光子晶体带隙的影响，可为三维光子晶体温度测量器件的制作提供理论基础。

## 关键词

三维光子晶体，折射率，带隙

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

温度是科学与技术中最基本的物理量之一，也是工农业生产及工程技术中最普遍的重要参数之一。随着科技的快速发展，人们对平时的生活环境以及生产过程的要求越来越高，尤其是生产过程，因此，对新型的温度测量手段的研究具有重要意义。

光子器件的出现在技术发展中提供了解决方向与途径。在 1987 年 Yablonovich [1]和 S. John [2]提出光子晶体，它是由多种折射率的介质按照周期性排列而成的人工微结构。光子晶体最主要的特征就是具有光子带隙结构，在某一些频率范围之内的是不能透过去的，而另一些频率范围内的光是可以透过去的，就是因为它具备这种特征，它在很多的地方都有着应用的价值，可以加工成有价值的器件[3]。影响着光子带隙的主要原因有两个：第一个是光子晶体的结构，最基本的三维光子晶体结构有三种，钻石结构，木堆结构和面心立方结构[4]；第二个是介电常数的大小。本文以三维光子晶体的折射率作为研究点，分析介质折射率与环境温度的关系，从而去分析三维光子晶体与温度的关系，验证其作为光子温度测量器的可行性。

## 2. 理论模型

三维光子晶体相对于一维，二维光子晶体，它独特的地方是它在三个方向上都有着周期性结构，所以它可以容易的构成各个方位的光子带隙，因此可以有效控制着光的传播，所以说三维光子的结构会更为复杂[5]，但是它的理论计算相会简单一点。本文选用钻石结构光子晶体作为研究对象，晶体结构图如图 1 [6]所示。

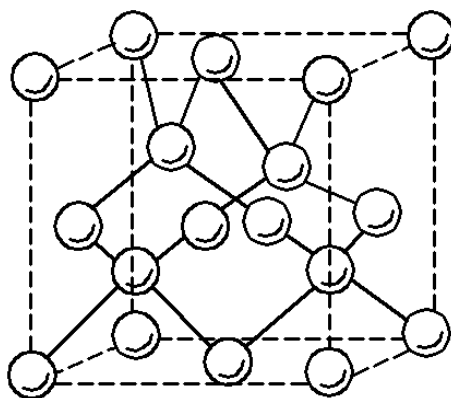


Figure 1. Schematic diagram of diamond crystal structure

图 1. 钻石晶体结构示意图

本文选用高介电材料 Si 作为背景材料，用空气小球来构成的钻石结构的三维光子晶体。我们假设这种结构是在介电材料 Si 中钻孔来形成的[7]。取晶格常数  $a = 1$ ，介质球半径  $r = 0.31$ ，空气折射率  $n = 1$ ，介电常数为 1。Si 的折射率  $n_1 = 3.3$ 。背景介质材料 Si 的折射率与温度关系如图 2 所示。

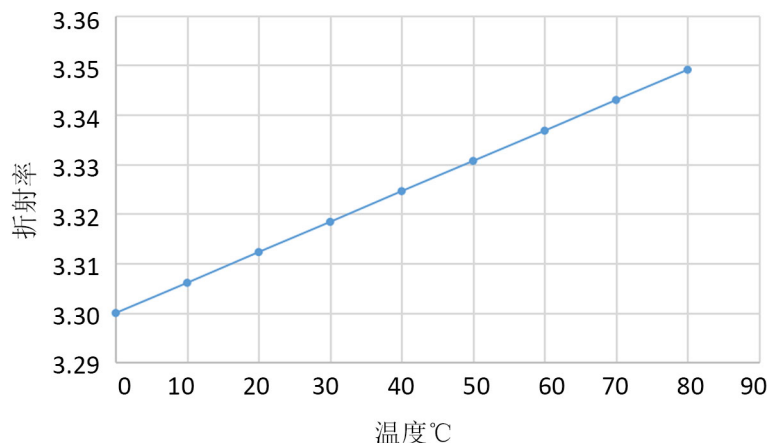


Figure 2. Relationship between temperature and refractive index of Si  
图 2. 介质硅折射率与温度的关系

由图可知，Si 的折射率随着温度的增而增大，折射率和温度成比例关系。环境的温度变化可以由材料的折射率来体现。折射率和材料 Si 介电常数的数量关系如式(1)所示：

$$n^2 = \epsilon \tag{1}$$

根据公式(1)我们可以知道，环境的温度变化是可以透过三维光子晶体的介电材料的介电常数来反应的。

现在我们知道的计算三维光子晶体的方法有这几种：传输矩阵法、时域有限差分法、平面波展开法等等[8]。对比前两种方法，平面波展开法是更加简单方便的，是我们计算光子晶体很常用的一种方法。平面波展开法建立在麦克斯韦方程的基础上。本文采用的麦克斯韦方程[9]如下所示：

$$\frac{1}{X(r)} \nabla \times \left[ \nabla \times \overset{d}{E}(r,t) \right] = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \overset{d}{E}(r,t) \tag{2}$$

$$\nabla \times \left[ \frac{1}{X(r)} \nabla \times \overset{d}{H}(r,t) \right] = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \overset{d}{H}(r,t) \tag{3}$$

式中， $X(r)$ 是一种线性的，各项周期性的函数和同性的函数，假如光子晶体是一种非磁性的介质，那么磁导率( $\mu = 1$ )，假如方程有波动形式的解，则方程可以写成：

$$\theta_E \overset{d}{E}(r,t) = \frac{1}{X(r)} \nabla \times \left[ \nabla \times \overset{d}{E}(r,t) \right] = \frac{k^2}{c^2} \overset{d}{E}(r,t) \tag{4}$$

$$\theta_H \overset{d}{H}(r,t) = \frac{1}{X(r)} \nabla \times \left[ \nabla \times \overset{d}{H}(r,t) \right] = \frac{k^2}{c^2} \overset{d}{H}(r,t) \tag{5}$$

通过傅里叶变换，得到公式如下：

$$\frac{1}{X(r)} = \sum_G \frac{1}{X(r)} (G) e^{iG \cdot r}, \overset{d}{H}(r) = \sum_{k,\lambda} \hat{e}(k,\lambda) h(k,\lambda) e^{ik \cdot r} \tag{6}$$

根据布里赫定理得到:

$$E^d(x,t) = \exp[i(k^o x - kt)] \sum_G^d E(G) \exp[iG^o x] \tag{7}$$

$$H^d(x,t) = \exp[i(k^o x - kt)] \sum_G^d H(G) \exp[iG^o x] \tag{8}$$

将公式(6), (7), (8)带入到(2), (3)得到以下方程式:

$$\left( \begin{smallmatrix} d & d \\ K+G \end{smallmatrix} \right) \times \left[ \left( \begin{smallmatrix} d & d \\ K+G \end{smallmatrix} \right) \times E_G^d \right] + \frac{K^2}{G^2} \sum E_G^d = 0 \tag{9}$$

$$\left( \begin{smallmatrix} d & d \\ K+G \end{smallmatrix} \right) \times \left[ \sum_G \frac{1}{X(r)} \left( \begin{smallmatrix} d & d \\ K+G \end{smallmatrix} \right) \times H_G^d \right] + \frac{K^2}{C^2} H_G^d = 0 \tag{10}$$

公式(9)、(10)是三维光子晶体中光传播的本征方程式,  $K$  和  $k$  通过解方程式(9), (10)就可以得出  $K$  和  $k$  的关系, 就可以算出三维光子的带隙结构。

### 3. 数据分析

本文用 **MALTB** 软件来模拟, 分析三维光子晶体的带隙结构。从而分析三维光子晶体的带隙结构和环境温度变化之间的关系。

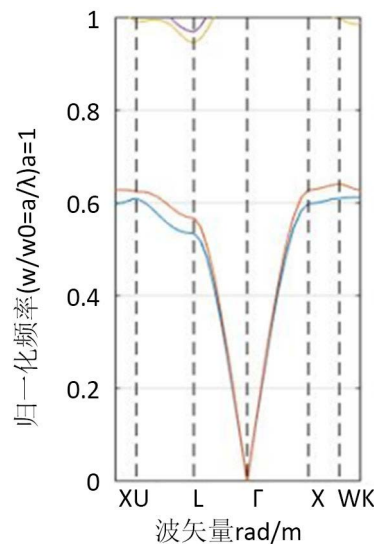
选用晶格常数  $a = 1$ , 空气介电常数 = 1, 介质球半径  $r = 0.31$  的情况下, 温度为  $0^\circ\text{C}$  和  $80^\circ\text{C}$  时的三维光子晶体的带隙结构分别如图 3 和图 4 所示。横坐标是波矢量, 单位是  $\text{rad/m}$ , 纵坐标是归一化频率。可以用归一化转换式计算波长:

$$\frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{w} = \frac{\lambda}{a} \tag{11}$$

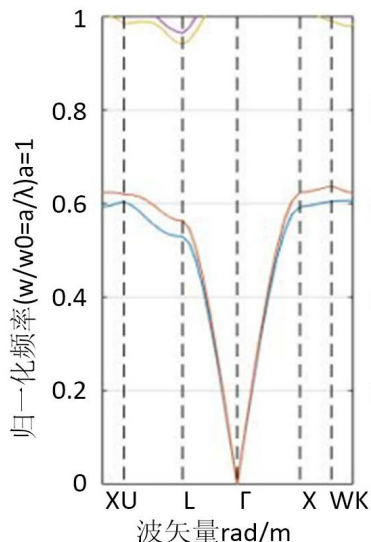
公式中:  $a$ ——晶格常数;

$w$ ——角频率;

$\lambda$ ——波长。



**Figure 3.** Energy band structure at  $0^\circ\text{C}$   
**图 3.** 温度为  $0^\circ\text{C}$  时带隙结构图

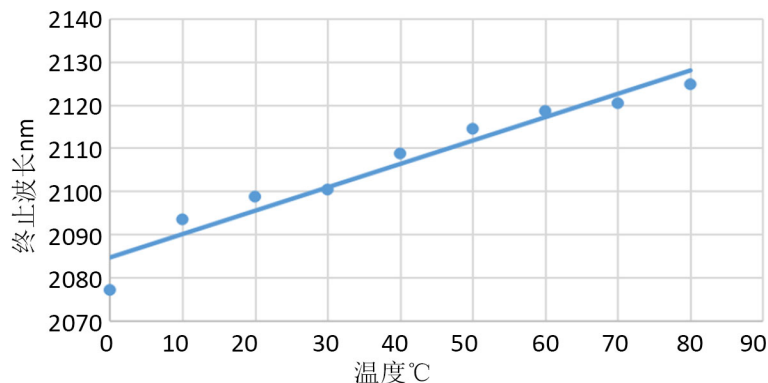


**Figure 4.** Energy band structure at 80°C  
**图 4.** 温度为 80°C 时带隙结构图

通过公式(11)求出三维光子晶体的起始波长，终止波长和禁带宽度，并分析环境温度与其关系[10]。我们通过 MATLAB 软件进行仿真，得出三维光子晶体带隙结构禁带的起始波长，终止波长和禁带宽度，并分别分析它们与环境温度之间关系。三维光子晶体的终止波长与环境温度变化之间的关系如图 5 所示。由图 5 可知，三维光子晶体带隙结构禁带的终止波长随着环境温度的升高而升高，三维光子晶体带隙结构禁带的终止波长变化与环境温度的变化呈线性关系。表明随着温度升高，背景介质材料的介电常数增大，随之禁带终止波长也增大了。经过研究分析得出，在温度由 0°C 变化到 80°C 时，光子带隙结构的禁带终止波长从 2077.15 nm 增加到 2117.75 nm。禁带终止波长和环境温度呈线性关系，其关系如下式：

$$\lambda_2 = 0.5075t + 2077.15 \tag{12}$$

式中， $\lambda_2$  为终止波长，单位为 nm； $t$  为环境温度，单位为 °C。



**Figure 5.** Relationship between termination wavelength and temperature  
**图 5.** 终止波长与温度关系

测量晶体的灵敏度，可以通过测量光子禁带的起始波长[11]。三维光子晶体禁带的起始波长与环境温度变化之间的关系如图 6 所示。由图 6 可知，三维光子晶体带隙结构禁带的起始波长随着环境温度的升高而升高，三维光子晶体带隙结构禁带的起始波长变化与环境温度的变化呈线性关系。表明随着环境温度升高，背景介质材料的介电常数增大，随之禁带起始波长也增大了。经过研究分析得出，环境温度从

0℃增加到 80℃时，起始波长从 3064.45 nm 增加到 3148.25 nm。禁带起始波长和环境温度呈线性关系，其关系如下式：

$$\lambda_1 = 1.0475t + 3064.45 \tag{13}$$

式中， $\lambda_1$  为起始波长，单位为 nm； $t$  为环境温度，单位为℃。

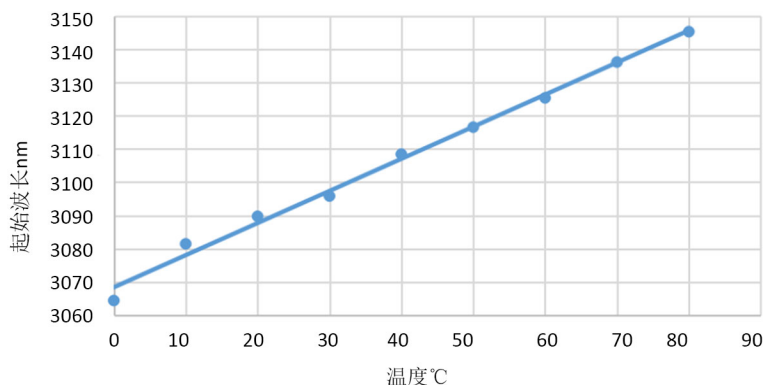


Figure 6. Relationship between start wavelength and temperature

图 6. 起始波长与温度关系

三维光子晶体带隙结构的禁带宽度与环境温度变化之间的关系如图 7 所示。由图 7 可知，三维光子晶体带隙结构的禁带宽度随着环境温度的升高而升高，三维光子晶体带隙结构的禁带宽度的变化与环境温度的变化呈线性关系。表明随着环境温度升高，背景介质材料的介电常数增大，随之禁带宽度也增大了。经过研究分析得出，温度从 0℃增加到 80℃时，禁带宽度从 987.3 nm 增加到 1020.5 nm。光子带隙的宽度越宽时，光子晶体的温度敏感性能越好。禁带宽度和和环境温度呈线性关系，其关系如下式：

$$\lambda_0 = 0.415t + 1020.5 \tag{14}$$

式中， $\lambda_0$  为起始波长，单位为 nm； $t$  为环境温度，单位为℃。

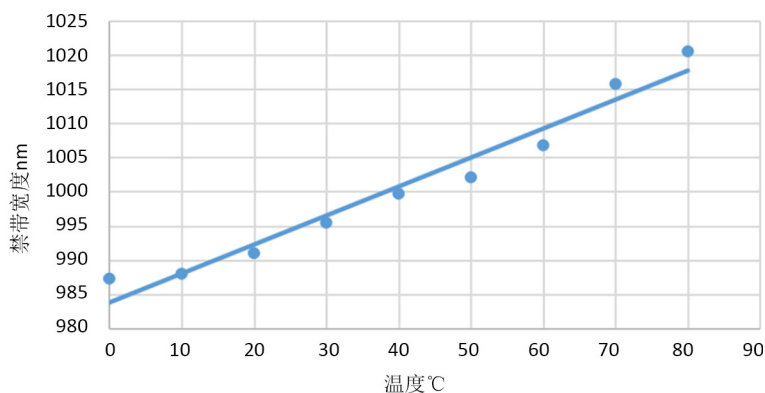


Figure 7. Relationship between band gap and temperature

图 7. 禁带宽度与温度关系图

#### 4. 结论

本文对三维光子晶体的带隙结构与温度变化之间的关系进行了研究，随着环境温度的变化，三维光子晶体的禁带起始波长、终止波长和禁带宽度都随温度的变化而变化。研究表明，三维光子晶体的禁带起始波长、终止波长和禁带宽度与温度都呈线性关系。

## 基金项目

浙江省科技创新活动计划资助项目(2018R428006)。

## 参考文献

- [1] Yablonovitch, E. (1987) Inhibited Spontaneous Emission in Solid State Physic and Electronics. *Physical Review Letters*, **58**, 2059-2062. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2059>
- [2] John, S. (1987) Strong Localization of Photos in Certain Disordered Dielectric Superlattices. *Physical Review Letters*, **58**, 2486-2489. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [3] 姜诚, 薛燕陵, 王瑞. 大面积三维光子晶体的制备与分析[J]. 光电子·激光, 2018, 29(11): 1179-1186.
- [4] 张裕仕, 高珊, 薛冬, 田贵才, 闫昕. 三维光子晶体完全带隙的数值计算[J]. 激光杂志, 2013, 34(4): 51+53.
- [5] 张明. 材料特性对金刚石结构三维光子晶体带隙特性的影响[J]. 激光杂志, 2013, 34(3): 36.
- [6] 杨颖. 不同结构三维光子晶体完全带隙及传输模式的研究[J]. 激光与红外, 2010, 40(6): 664-667.
- [7] 刘欢, 姚建铨, 李恩邦, 温午麒, 张强, 王鹏. 三维光子晶体典型结构完全禁带的最佳参数理论分析[J]. 物理学报, 2006(1): 230-237.
- [8] 刁述妍. 三维光子晶体带隙特性的数值模拟[J]. 激光杂志, 2018, 39(4): 9-10.
- [9] 张裕仕. 三维光子晶体 FCC 结构的带隙分析[J]. 光谱实验室, 2008(4): 766-769.
- [10] 周剑心. 光子晶体光纤传感器的理论及应用研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉工程大学, 2018.
- [11] 张爱华, 温廷敦, 许丽萍, 王志斌, 丰春芳. 厚度误差对特定波段光子晶体温度传感器的影响[J]. 电子元件与材料, 2015, 34(5): 34-37.