

# Study on Humidity Characteristics of Two-Dimensional Photonic Crystals

Hua Huang, Yong Yin, Ruixin Qiao, Yuhang Pu, Dingding Zhuang, Xiaogang Wu

School of Architecture and Traffic Engineering, Ningbo Institute of Technology, Ningbo Zhejiang

Email: wxgdsmy\_2004@126.com

Received: Dec. 5<sup>th</sup>, 2019; accepted: Dec. 18<sup>th</sup>, 2019; published: Dec. 25<sup>th</sup>, 2019

---

## Abstract

The purpose of this paper is to study the relationship between the change of environmental humidity and the forbidden band of two-dimensional photonic crystal. The change of ambient humidity causes the refractive index of the medium to change. The medium with different refractive indices constitutes a photonic crystal with different properties, that is, the photonic band structure of two-dimensional photonic crystal makes difference. Through continuous data simulation and simulation of its internal relationship, a system model for two-dimensional photonic crystal humidity measurement is designed. It provides a more energy-saving and convenient technical means for people to detect and control humidity in production and living environment.

## Keywords

Photonic Band Gap, Refractive Index, Wet Sensing Principle

---

# 二维光子晶体湿度特性研究

黄 华, 尹 勇, 乔瑞鑫, 蒲宇航, 庄丁丁, 武校刚

宁波工程学院 建筑与交通工程学院, 浙江 宁波

Email: wxgdsmy\_2004@126.com

收稿日期: 2019年12月5日; 录用日期: 2019年12月18日; 发布日期: 2019年12月25日

---

## 摘 要

本文研究了环境湿度变化与二维光子晶体禁带的关系, 环境湿度变化导致二维光子晶体介质折射率发生变化, 二维光子晶体介质的折射率变化将导致其光子能带结构的变化。本文对二维光子晶体光学湿敏特性进行研究, 为湿度检测与控制提供一个更为节能、便捷的技术手段。

## 关键词

光子禁带, 折射率, 感湿原理

Copyright © 2019 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



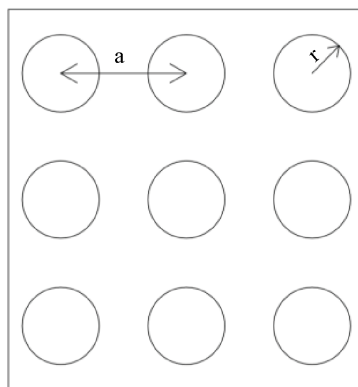
Open Access

## 1. 引言

湿度对人体舒适度有着重要影响, 湿度的控制显得尤为重要[1] [2]。传统的电感电容湿度传感器对环境的要求比较高, 在强电场和强磁场环境中会严重影响传感器的测量精度。因此, 不适合在高电压和强电场等恶劣环境中工作[3], 用光子代替电子作为信息载体, 改善在传统湿度测量仪器中存在的对环境要求高、能量损耗大、效率低下等问题。二十世纪八十年代, 光子晶体的概念首先是由Yablonovich [4]和S. John [5]提出的。光子带隙是光子晶体一个非常重要的光学特征, 它被称为“光子禁带”。光子禁带可以解释为一个频率区间, 即频率在此区间的光子, 它的传播会被光子禁带阻断。关于光子晶体的结构, 它可以由折射率不同的材料, 按照一定的空间规律进行组合, 使得其内部折射率按照一定的规律进行变化。光子晶体的物理结构决定了光子在其内部的运动与电子在半导体中的运动有一定的相似性。光子在光子晶体内部传播过程中会形成带状的色散曲线。在一定条件下, 带与带之间将会形成光子禁带[6]。本文以光子晶体的折射率作为研究点, 研究折射率与环境湿度的关系, 从另一个角度去研究光子晶体的湿度测量机理。

## 2. 理论模型

光子晶体是结构按照一定规律变化, 晶体内部折射率从高到低, 或者从低到高周期性变化的晶体结构。在一定波长条件下, 光子晶体的折射率变化幅度可以达到非常大。因此, 一些结构的光子晶体可能会出现与半导体禁带相似的结构[7]。二维光子晶体相对三维光子晶体结构相对来说更简单一些, 制造难度要低的多, 更有利于在相关领域的广泛应用。二维光子晶体根据内部材料结构不同可以分为正方形、三角形以及蜂窝状。正方形是这三种中结构最为简单的, 也就是更易于做光子特性研究的结构。本文采用正方形晶格结构如图 1 所示, 对光子禁带进行研究。



**Figure 1.** Schematic diagram of two-dimensional photonic crystal with square lattice

**图 1.** 正方晶格二维光子晶体示意图

晶格周期为 $a = 850 \text{ nm}$ ，介质柱的半径为 $r = 350 \text{ nm}$ ，介质柱采用气孔率为 30%的二氧化硅材料。采用折射率 $n_1 = 1.453$ 的 $\text{SiO}_2$ 、 $n_2 = 1.329$ 的水、 $n_3 = 1$ 的空气，背景介质材料 $\text{SiO}_2$ 的折射率和相对湿度的关系曲线如图 2 所示[8]。

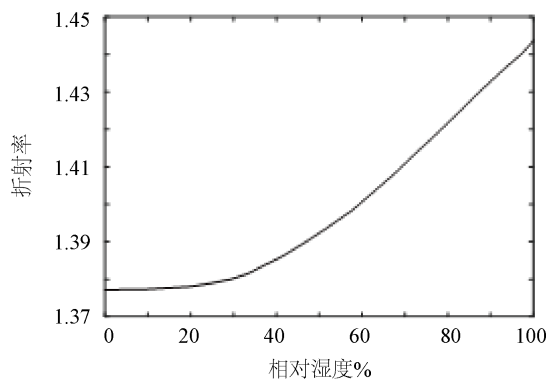


Figure 2. Relationship between refractive index and relative humidity

图 2. 折射率与相对湿度关系图

图 2 所示的 $\text{SiO}_2$ 薄膜的折射率与相对湿度关系图说明了 $\text{SiO}_2$ 薄膜的折射率与相对湿度的理论上的关系。通过图 2 可以发现折射率随着湿度的变化而变化，并且在 30%~100%的相对湿度范围内精度较高。因此，可以通过测量材料的折射率来间接测量湿度值。

二维光子晶体由折射率不同的介质材料构成，介质柱选择锐钛型 $\text{TiO}_2$ ，选择气孔率为 30%的 $\text{SiO}_2$ 作为背景介质。两种不同折射率的材料，按照一定的周期排列构成[8]。随着环境湿度的变化， $\text{SiO}_2$ 的折射率也会发生变化。因此，光子禁带的起始波长、终止波长和禁带宽度都会变化[9]。本论文通过数据模拟分析不同湿度下，二维光子晶体起始波长、终止波长和禁带宽度变化的趋势，分析环境湿度和光子禁带的定量关系。

目前，国内外分析光子晶体的理论方法主要有平面波法、有限差分法、光束传播法、有限元法及传输矩阵法等[10]。FDTD法是基于Yee网格的直接将时域Maxwell方程组转化为一组差分方程的数值算法，因其原理简单、编程方便受到广泛地应用[11]。为了方便计算，可以对模型进行简化[12]。通过理论模型分析光子晶体的能带结构。分析光在二维光子晶体中的分布模式[13]。利用FDTD模型，对不同湿度下的光子晶体采用归一化的计算过程进行能带计算。归一化后各个量的关系：

$$(X, Y) = a(\eta, \xi), \quad t = a \cdot \frac{\tau}{c}, \quad (1)$$

$c$ 为波速，微分公式变为：

$$\left( \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right) = \frac{1}{a} \cdot \left( \frac{\partial}{\partial \eta}, \frac{\partial}{\partial \xi} \right), \quad \frac{\partial}{\partial t} = \frac{c}{a} \cdot \frac{\partial}{\partial \tau} \quad (2)$$

介质参数处理如下：

$$\mu(r) = \begin{cases} \mu_1 & (r \in \Omega_1) \\ \mu_2 & (r \in \Omega_2) \\ 1 & (r \in \Omega_2) \end{cases}, \quad \varepsilon(r) = \begin{cases} \varepsilon_1 & (r \in \Omega_1) \\ \varepsilon_2 & (r \in \Omega_2) \\ 1 & (r \in \Omega_2) \end{cases} \quad (3)$$

式(3)中 1 代表基体；2 代表散射体； $\Omega_1$  代表散射体； $\Omega_2$  代表散体机制的分布区域，经过归一化处理后的

晶格稳定性参数[13]:

$$\gamma = \frac{\Delta\xi}{\Delta\tau} \cdot c \quad (4)$$

根据Bloch定理, 边界外格点对应的电磁分量的值和边界里相应的格点对应的电磁分量的值, 只差一个相位  $\exp(j \cdot \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})$ , 使用如下的方程进行处理[14]:

$$\begin{aligned} \varphi(-\Delta x, y) &= \varphi(x - \Delta x, y) \cdot \exp^{-1}(j \cdot k_x \cdot x) \\ \varphi(x + \Delta x, y) &= \varphi(\Delta x, y) \cdot \exp(j \cdot k_x \cdot x) \\ \varphi(x, -\Delta y) &= \varphi(x, y - \Delta y) \cdot \exp^{-1}(j \cdot k_y \cdot y) \\ \varphi(x, y + \Delta y) &= \varphi(x, \Delta y) \cdot \exp(j \cdot k_y \cdot y) \end{aligned} \quad (5)$$

最后通过仿真获得光子晶体的能带曲线图。

### 3. 数据分析

本文通过MATLAB方阵软件, 仿真分析二维光子晶体的能带结构, 包括禁带宽度变化、禁带起始波长变化、禁带终止波长变化与相对湿度变化的关系, 来研究二维光子晶体湿度传感器的感湿机理。

根据简化后的理论模型, 绘制了图3、图4正方形晶格二维光子晶体能带结构图。图3表示二维正方形晶格光子晶体在横电模式(TE)下, 0%与100%湿度环境中的能带结构。光子晶体在横磁模式(TM)下, 0%与100%湿度环境中的能带结构如图4所示。

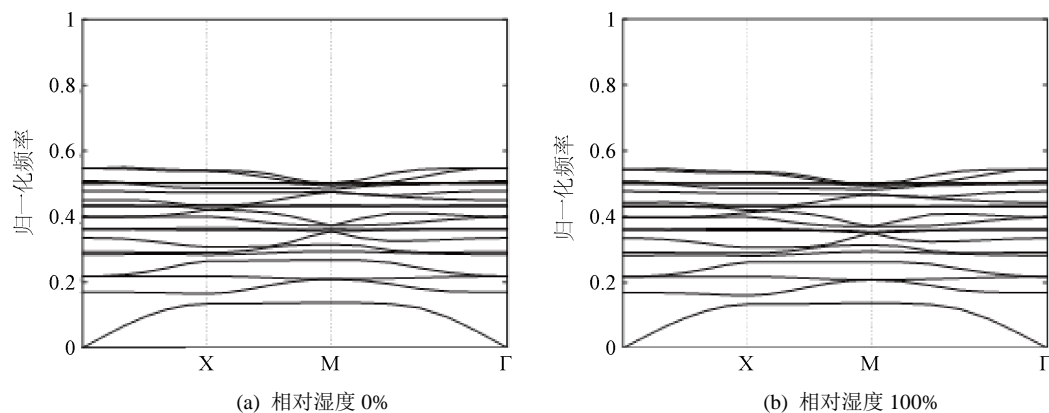


Figure 3. Band structure of two-dimensional photonic crystal for TE mode

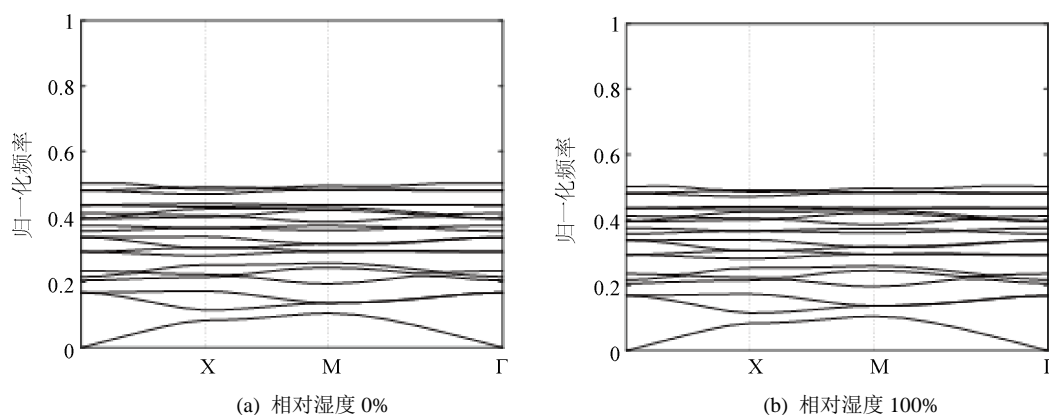
图3. TE模式下二维光子晶体能带结构

图3、图4的横坐标代表二维正方形晶格光子晶体的格栅。光子的波长可以通过归一化转化公式(6)求得。

$$\frac{a \cdot 2 \cdot \pi}{w} = \frac{\lambda}{a} \quad (6)$$

式(6)中 $a$ 代表周期;  $w$ 代表角频率;  $\lambda$ 代表波长。

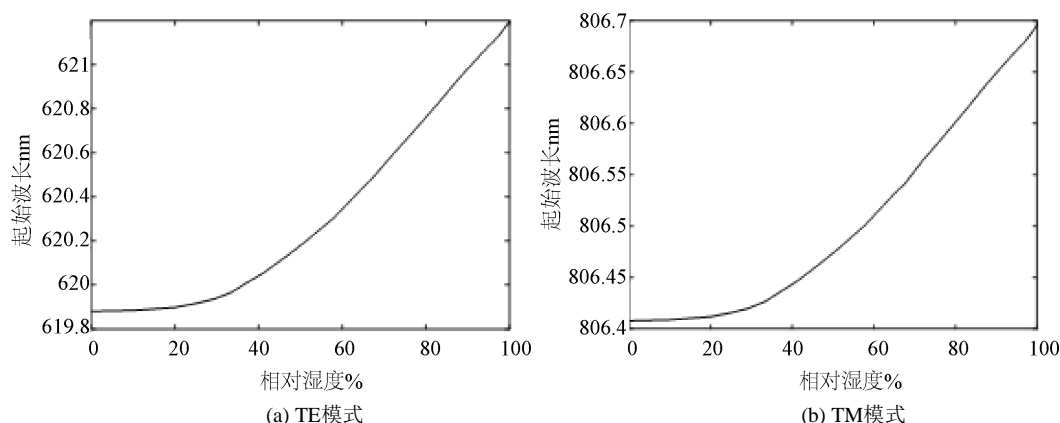
按照上述转换关系, 求出光子的波长。从能带图中可以看出, 光子晶体的禁带宽度、起始波长、终止波长都发生了变化, 并且在TM和TE的模式下变化不同。



**Figure 4.** Band structure of two-dimensional photonic crystal for TM mode

**图 4.** TM模式下二维光子晶体能带结构

二维光子晶体的禁带起始波长在TE和TM模式下，与相对湿度的关系如图5所示。



**Figure 5.** Relationship between initial wavelength and relative humidity

**图 5.** 起始波长与湿度之间的关系

如图5所示，二维光子晶体的禁带起始波长随着相对湿度的增加而增大。在TE模式下，光子禁带的起始波长从 619.881 nm增加到 621.198 nm；在TM模式下，光子禁带的起始波长从 806.408 nm增加到 806.695 nm。湿度在 30%~100% 的范围内，其变化显著。从图5可以得知，光子禁带的起始波长在TM模式下比在TE模式下更大，但是在TE模式下，光子禁带起始波长的变化更大大。在 40%~100%之间，相对湿度和光子禁带的起始波长趋于线性关系，经过数据拟合，其拟合公式为：

$$fx = p1x + p2 \quad (7)$$

TE模式：  $p1 = 0.03198$ ；  $p2 = 493.8$ 。

TM模式：  $p1 = 0.04952$ ；  $p2 = 576.8$ 。

二维光子晶体的禁带终止波长在TE和TM模式下，与相对湿度的关系如图6所示。

如图6所示，正方形晶格二维光子晶体的光子禁带终止波长随着相对湿度的增加而增大。在TE模式下，光子禁带的终止波长从 516.401 nm增加到 531.864 nm。在TM模式下，光子禁带的终止波长从 737.518 nm增加到 740.106 nm。光子禁带终止波长在湿度 30%~100% 的范围内，变化显著。光子禁带终止波长在TM模式下比在TE模式的波长要大，但是TE模式下的波长变化大。经过数据拟合，波长与相对湿度的函

数关系式为公式(7)。其中,

TE模式:  $p_1 = 0.06678$ ;  $p_2 = 437.5$ 。

TM模式:  $p_1 = 0.008566$ ;  $p_2 = 631$ 。

二维光子晶体的光子禁带禁带宽度在TE和TM模式下, 与相对湿度的关系如图7所示。

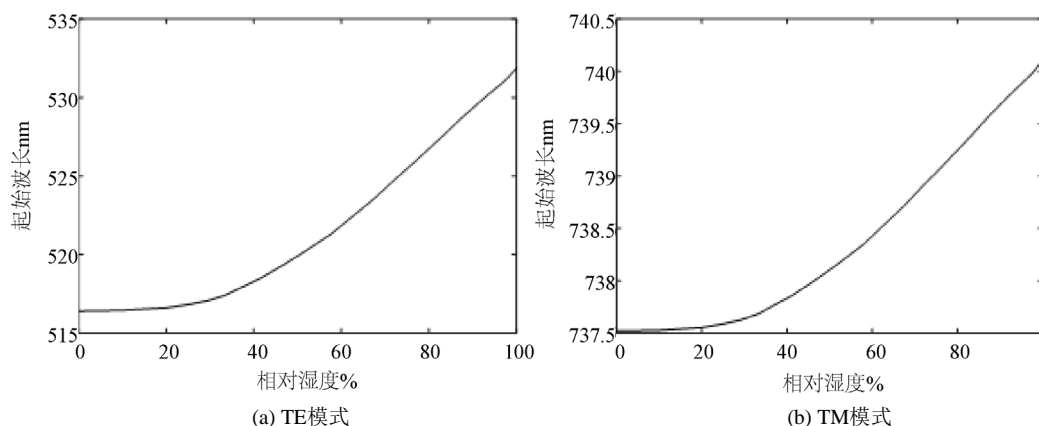


Figure 6. Relationship between termination wavelength and relative humidity

图6. 终止波长与湿度之间的关系

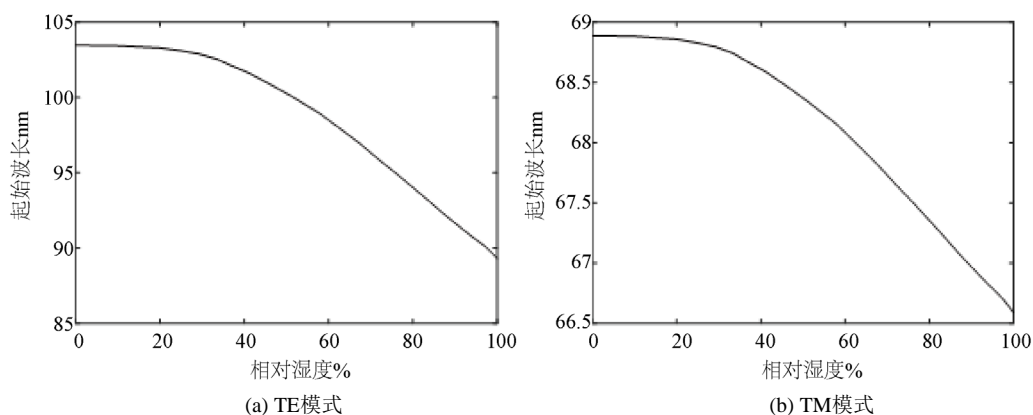


Figure 7. Relationship between band width and relative humidity

图7. 禁带宽度与湿度之间的关系

如图7所示, 光子晶体禁带宽度随着环境的相对湿度的增加而减小。在TE模式下, 光子晶体的禁带宽度从 103.479 nm减少到 89.333 nm。在TM模式下, 光子晶体的禁带宽度从 68.889 nm减少到 66.588 nm。在TE模式下的禁带宽度要比在TM模式下的大, 在TE模式的禁带宽度变化范围也要更大。经过数据拟合, 相对湿度与禁带宽度的函数关系为公式(7)。其中,

TE模式:  $p_1 = -0.03481$ ;  $p_2 = 56.27$ 。

TM模式:  $p_1 = -0.04095$ ;  $p_2 = 54.22$ 。

#### 4. 结论

二维光子晶体的禁带变化与相对湿度的关系可以作为湿度传感器的感湿机理, 可以实现传感器对空气相对湿度的探测。二维光子晶体在不同的湿度环境中, 起始波长、终止波长、禁带宽度变化呈现明显变化。起始波长变化在TE模式下达 1.317 nm, 在TM模式下达 0.287 nm。终止波长变化在TE模式下达 15.462

nm, 在TM模式下达 2.588 nm。禁带宽度变化在TE模式下达 14.145 nm, 在TM模式下达 2.301 nm。因此, 在TE模式下感湿性能更好。特别是湿度在 30%~100%之间, 对相对湿度的探测更为灵敏。上述仿真实验结果, 说明基于二维正方形晶格光子晶体折射特性的湿度传感器式理论上是可行的, 可以作为未来深入研究的一个方向。

## 基金项目

宁波工程学院王伟明基金资助项目(2017010)。

## 参考文献

- [1] 廖瑞钧. 电气设备外部环境因素的影响和对策[J]. 价值工程, 2016, 35(26): 182-183.
- [2] 李雯婷. 基于单片机的工业加湿器控制系统[D]: [硕士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2010.
- [3] 李涛. 光纤光栅湿度传感器的研究[D]: [硕士学位论文]. 杭州: 中国计量学院, 2012.
- [4] 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>
- [5] John, S. (1987) Strong Localization of Photos in Certain Disordered Dielectrics. *Physical Review Letters*, **58**, 2046. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.58.2486>
- [6] 陈诚, 董志强, 陈昊文, 等. 二维光子晶体[J]. 化学进展, 2018, 30(6): 775-784.
- [7] 石丹. 二维光子晶体结构设计的建模, 算法和仿真研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京邮电大学, 2016.
- [8] 王珍媛, 顾铮先. 光湿度传感器的折射率感湿机理[J]. 传感器与微系统, 2009, 28(5): 68-71.
- [9] 张晓娟, 赵旭东, 张修兴, 等. 二维正方晶格光子晶体的模场分析[J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(10): 232-237.
- [10] 尤双双, 李孝坤. 基于 PML 的 FDTD 法正演模拟[J]. 中国锰业, 2018, 36(6): 191-194.
- [11] 谢海鹤, 林振衡, 颜黄苹, 等. 膜层传输矩阵理论在布拉格光纤光栅分析中的应用[J]. 光子学报, 2015, 44(11): 20-25.
- [12] 周勤. 基于时域有限差分方法的二维光子晶体能带结构的计算[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2013.
- [13] 方可. Bloch 定理的严格证明及晶体电子态研究[J]. 四川师范大学学报(自然科学版), 1992(5): 53-57.
- [14] 柴什峰. 光子晶体带结构计算 FDTD 方法的 GPU 实现研究[D]: [硕士学位论文]. 北京: 北京交通大学, 2015.