

文章编号: 1001-3806(2008)05-0508-02

## 1 维光子晶体的带隙研究

何修军<sup>1,2</sup>, 谢康<sup>1\*</sup>, 向安平<sup>2</sup>, 蒋孟衡<sup>2</sup>

(1. 电子科技大学 光电信息学院, 成都 610054; 2. 成都信息工程学院 光电技术系, 成都 610225)

**摘要:** 为了得到给定波长为通带或禁带的光子晶体, 采用光学传输矩阵方法, 模拟研究了由光子带隙结构如何得到相应的光子晶体结构。通过优化计算得到了指定波长带隙结构的光子晶体。结果表明, 光学传输矩阵法完全能得到给定波长为通带或禁带的光子晶体。这一结果有助于光子晶体的广泛应用。

**关键词:** 光学器件; 光子晶体; 传输矩阵法; 光子带隙

**中图分类号:** O734 **文献标识码:** A

## Research of band gap of 1-D photonic crystals

HE Xiu-jun<sup>1,2</sup>, XIE Kang<sup>1</sup>, XIANG An-ping<sup>2</sup>, JIANG Meng-heng<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science & Technology of China, Chengdu 610054, China; 2. Department of Optoelectronic Technology, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

**Abstract** For photonic crystals whose certain wavelength is forbid band or permit band how to gain the photonic crystals structure from the photonic band gap structure was studied by means of transfer matrix method. Simulation result was obtained about the photonic crystals of the certain wavelength band gap. The result shows the method can completely gain the photonic crystals whose the certain wavelength is forbid band or permit band. The result conduces to the extensive application of the photonic crystals.

**Key words** optical devices, photonic crystals, transfer matrix method, photonic band gap

### 引 言

光子晶体是介质的折射率在空间呈周期性变化的结构, YABLONOVITCH 等从理论上预言了介电常数呈周期性排列的光子晶体具有光子带隙 (photonic band gap, PBG), 光子模式在 PBG 区的重新分布使光子晶体内部活性物质的光发射完全禁止或发射效率异常提高, 在光子晶体中引入缺陷, 可使光子局域化<sup>[1-3]</sup>, 这些独特的光学特性及潜在的应用前景吸引了研究者的研究兴趣, 人们利用这些效应可以设计多种光子晶体器件, 如光子晶体光纤、光子晶体波导、光子晶体滤光器、光子晶体分束器、光子晶体反射镜、光子晶体偏振器、光子晶体开关、光子晶体微腔、光子晶体激光器以及光子晶体天线等<sup>[4-7]</sup>。与电子晶体相似, 光子晶体也具有 1 维、2 维与 3 维结构之分。1 维光子晶体为两种不同介电常数的介质层一层排列的结构, 其排列周期长度

与光子波长同数量级; 2 维光子晶体主要通过电子束、离子束刻蚀在某种介质上打孔技术实现, 由于受刻蚀精度的限制, 制备近红外、可见光波长量级的 3 维光子晶体还存在挑战。到目前为止, 大量的研究工作集中在各种类型结构的 2 维光子晶体的制作、光子禁带的存在性研究以及有关的器件的应用研究方面。但随着应用研究的深入, 实际应用有时需要得到给定频段的带隙结构, 这样开展任意带隙的光子晶体研究就显得十分必要了。作者试图就给定频段的禁带或通带, 而寻求相对应的光子晶体结构, 对 1 维光子晶体的光子禁带特性的影响做深入研究, 这对于设计特定要求的光子禁带特性和开展有关的应用研究具有指导意义。

### 1 光子晶体带隙计算理论

设 1 维光子晶体是由两种相对介电常量分别为  $\epsilon_A$ 、 $\epsilon_B$  的不同材料 A 和 B 交替构成, 所含周期单元 AB 或 BA 数为  $N$ , 每个周期单元中各介质层均分别为  $d_A$ 、 $d_B$ , 该 1 维光子晶体的结构简写为  $(AB)^N$ , 空间周期为  $u = d_A + d_B$ , 一束频率为  $\omega$  的光从左向右入射到图中所示的 1 维周期性结构材料中。当光波入射到光子晶体时, 下面利用传输矩阵来计算透射谱。

每一个介质层的特征矩阵为:

基金项目: 成都信息工程学院院选科研发助项目 (CRF200602)

作者简介: 何修军 (1970-), 男, 博士研究生, 主要从事光通信及光学材料方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: kangxi@uestc.edu.cn

收稿日期: 2007-05-17; 收到修改稿日期: 2007-09-03

$$M_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & \frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ \eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中,  $\delta_j = -\frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\epsilon_j} d_j \cos \theta_j$ ,  $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \sqrt{\epsilon_j} \cos \theta_j$  (TE) 或  $\eta_j = \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \cdot \frac{\sqrt{\epsilon_j}}{\cos \theta_j}$  (TM), 其中,  $\lambda$  为入射光波的真空中的波长,  $\theta_j$  为入射光波跟入射面法线的夹角, 则整个 1 维光子晶体的总传输矩阵为<sup>[8]</sup>:

$$M = (M_A M_B)^N = \begin{bmatrix} a & b \\ c & d \end{bmatrix} \quad (2)$$

由此可得光子晶体的透射率。

$$\text{反射系数: } r = \frac{a\eta_0 + b\eta_{N+1} - c - d\eta_{N+1}}{a\eta_0 + b\eta_{N+1} + c + d\eta_{N+1}} \quad (3)$$

$$\text{透射系数: } t = \frac{2\eta_0}{a\eta_0 + b\eta_{N+1} + c + d\eta_{N+1}} \quad (4)$$

$$\text{透射率: } T = t \cdot t^* \quad (5)$$

式中,  $\eta_0, \eta_{N+1}$  为光子晶体的两个外侧情况, “\*” 表示共轭。

### 2 给定带隙的光子晶体结构计算

在计算光子晶体某一波长范围的带隙时, 通常在这一波长范围内取多个点  $\lambda_i$ , 波长  $\lambda_i$  的光通过 1 维光子晶体其透射率为  $T_i$ , 所有点的透射率之和为  $\sum T_i$ ,

其平均值为  $\bar{T}$ , 并设  $u = \sum_m^n T_i, v = \sum_m^n (T_i - \bar{T})^2$ , 如要使  $\lambda_m, \dots, \lambda_n$  范围内的光成为通带或禁带, 只需  $u, v$  取极值即可。当  $u$  取极大值且  $v$  取极小值时为通带; 当  $u$  取极小值且  $v$  取极小值时为禁带, 由此可求出相应的光子晶体的结构参量。

### 3 计算结果

取  $\theta_j = 0, \epsilon_A = 12.96, \epsilon_B = 2.1025$ , 光子晶体厚度为  $15\mu\text{m}$ , 即采用正入射情况, 通过上面的计算可得到指定带隙的光子晶体结构。图 1 为一个通带或禁带, 其中图 1a 中波长  $1\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$  为禁带, 对应的结构参量  $d_A = 125\text{nm}, d_B = 62.5\text{nm}$ , 图 1b 中波长  $1\mu\text{m} \sim 1.2\mu\text{m}$  为通带, 对应的结构参量  $d_A = 125\text{nm}, d_B = 250\text{nm}$ 。图 2 为一个通带和禁带, 其中图 2a 中波长  $0.8\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$  为禁带,  $1.2\mu\text{m} \sim 1.4\mu\text{m}$  为通带, 对应的结构参量  $d_A = 150\text{nm}, d_B = 300\text{nm}$ ; 图 2b 中波长  $0.8\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$  为通带,  $1.2\mu\text{m} \sim 1.4\mu\text{m}$  为禁带, 对应的结构参量  $d_A = 125\text{nm}, d_B = 100\text{nm}$ 。

结果表明, 运用此优化方法完全能得到某个波长为通带或禁带的光子晶体结构。

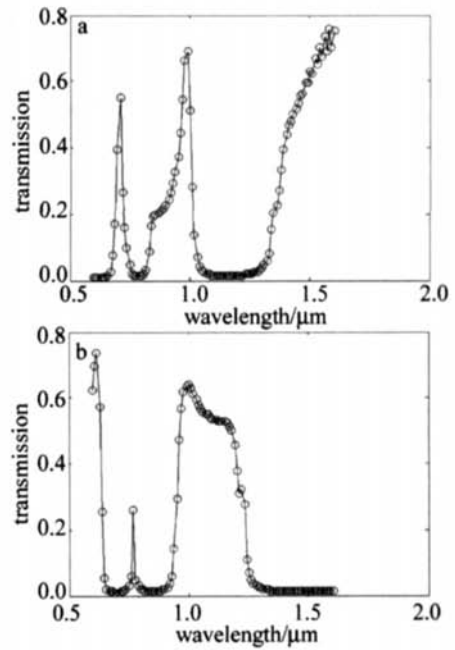


Fig. 1 The simulation result of one forbid band or permit band

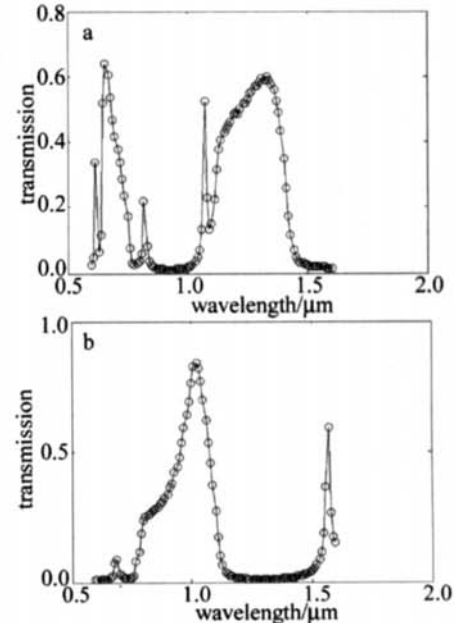


Fig. 2 The simulation result of one forbid band and permit band

### 4 结 论

根据光子晶体的实际应用需要, 即很多情况下需要某个给定波长为通带或禁带, 讨论了指定带隙的计算, 并运用传输矩阵和优化计算得到了满意的结果。证明采用该优化方法计算指定带隙的光子晶体是可行的。

#### 参 考 文 献

- [ 1 ] VLASOV A Y, LUTEROVA K, PELANT I *et al.* Enhancement of optical gain of semiconductors embedded in three-dimensional photonic crystals [ J ]. *A P L*, 1997, 71 ( 12 ): 1616-1618.
- [ 2 ] WANG W J, ZHOU J Y, XIAO W N. Light distribution and localization in one-dimensional periodic structure [ J ]. *Acta Photonica Sinica* 2005, 34 ( 7 ): 1086-1089 ( in Chinese ).

### 2.3 塑料焊接

制作完毕的全息图相当于 1 个衍射光栅,并记录了焊缝图形的全部信息(相位和振幅)。如图 3 所示,

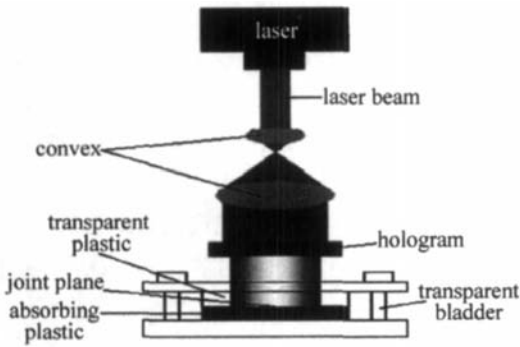


Fig 3 Schematic diagram of laser welding of plastics with hologram

当激光束再次照射全息图衍射后得到共轭光波,形成焊缝图形的实像,即激光束的光斑形状被调制成与预知焊缝图形形状一致。利用调制完的激光束照射两塑料的接合面,激光被下层塑料所吸收产生热量并传入上层塑料,在热集中区域(焊缝区域),塑料就被融化,热熔融状态下的塑料大分子在焊接压力的作用下相互扩散,产生范德华力,在后续压力冷却后紧密地连接在一起,此过程由一个对激光束透明的夹具提供压力。最终理想所得焊缝形状与预知焊缝形状相同。

### 3 小结

由于实验条件限制,作者提出了基于全息技术的激光透射塑料焊接方法,并对其进行了理论研究,详细阐述了该方法的基本原理,为将来进一步的实验研究打下坚实的理论基础。该方法的全息图是通过记录两束激光束的干涉图制成,该方法要求建立一套非常稳定的光学记录平台,从而保证记录光束有一个准确的偏转角。绝大部分全息记录材料仅仅对短波长范围的光敏感,因此,希望记录下波长大于 700nm 的光束相

干涉产生的干涉图就比较困难。将来的研究可以使用计算全息方法记录全息光学元件,就不再受到记录光束波长的限制。在制作计算全息光学元件时,只要给出所希望成像波前的数学描述方式,就可以利用计算机综合出任意的记录波前。

### 参 考 文 献

- [1] WANG J Ch. Development and expectation of laser welding technology [J]. Laser Technology 2001, 25(1): 48-53( in Chinese).
- [2] WANG H M. The application of laser in plastic reprocessing [J]. Modern Plastics Processing and Application 2004 16(4): 28-30( in Chinese).
- [3] Shanghai Institute of Laser Technology Multidimensional equipment of laser welding of plastics China 200420090111. 8 [P]. 2005-10-12 ( in Chinese).
- [4] IAN J Laser welding for plastic components [J]. Assembly Automation 2002, 22(2): 129-135.
- [5] WANG Y L. The latest application of laser processing [EB/OL]. [2005-03-22]. <http://www.see.net.cn/viewNews.asp?id=545>.
- [6] Leister Machine Technology Corporation Laser welding methods and equipment of joining plastics parts or plastics and other materials Switzerland 99101816. 9 [P]. 2000-09-20.
- [7] Leister Company. Radial welding [EB/OL]. [2006-11-01]. <http://www.leister.com/en/radialschweissen.html>
- [8] CHEN J W. The third dimension laser transmission welding [J]. Kunststoff Plast Europe 2004, 94(5): 86-88
- [9] GREWELL D A. Modeling of molecular healing from micro-Laser welding of plastics with diffractive optical elements as spatial modulators [EB/OL]. [2007-01-15]. <http://gradworks.umi.com/31/79/3179681.html>
- [10] Gentex Corporation. Clearweld [EB/OL]. [2007-05-05]. <http://www.clearweld.com>.
- [11] ZHOU H X, CHENG Y F. Holographic optics [M]. Beijing Chemical Industry Press 2006: 22-23( in Chinese).
- [12] WARD A A, SOLYMAN L D. Diffraction efficiency limitations of hologram recorded in silver-halide emulsions [J]. Appl Opt 1989, 28(10): 1850-1855
- [13] FRIESEM A A, KOZMA A, ADAM S F G. Recording parameters of spatially modulated coherent wavefronts [J]. Appl Opt 1967, 6(5): 851-856
- [6] ZHU Zh H, YE W M, JI J R, *et al* Analysis of photonic crystal filter [J]. Acta Photonica Sinica 2004 33(6): 700-703( in Chinese).
- [7] NODA S, YOKOYAMA M, MADA M, *et al* Polarization mode control of two-dimensional photonic crystal laser by unit cell structure design [J]. Science, 2001, 293(5532): 1123-1125.
- [8] FANG Y T, SHEN T G, LIN G H. Photo wave propagation in one dimension random photonic crystal [J]. Laser Technology, 2004 28(2): 153-155( in Chinese).

(上接第 509 页)

- [3] DUAN X F, NIU Y X, ZHANG Ch *et al* Light propagation characteristics of one dimensional photonic crystal [J]. Acta Photonica Sinica 2003 32(9): 1086-1089( in Chinese).
- [4] PAN Y Zh, ZHANG J, HU G J *et al* Photonic crystal fiber and laser [J]. Laser Technology, 2004, 28(1): 48-51( in Chinese).
- [5] YAR W A. Coupled resonator optical waveguide: a proposal and analysis [J]. Opt Lett 1999, 24(11): 711-713