

# 光子晶体的减反特性研究

王 婷 梁斌明 蒋 强 曹 恒 高 伦

上海理工大学光电信息与计算机工程学院, 上海 200093

**摘要** 利用时域有限差分法研究了光在三角形晶格二维光子晶体中的传播特性,从TM波的反射着手,系统研究了不同入射光角度、波长以及温度的变化对于光子晶体减反特性的影响。通过仿真可以看到,设置合适的光子晶体参数,很大带宽波长和入射角度范围内光子晶体在TM波反射端面都有较低的剩余反射率,具有较好的减反特性;温度的漂移对减反效果的影响小,具有较好的温度稳定性。

**关键词** 材料;光子晶体;减反;时域有限差分;剩余反射率

**中图分类号** TH74 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/LOP53.041602

## Anti-Reflection Characteristics of Photonic Crystals

Wang Ting Liang Binming Jiang Qiang Cao Heng Gao Lun

*School of Optical-Electronic and Computer Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

**Abstract** The light propagation characteristic in a two-dimensional triangle lattice photonic crystal is studied by finite-difference time-domain method. Based on reflection of transverse magnetic (TM) wave, the influences on anti-reflection characteristics of the photonic crystal resulting from incident angle, wavelength and temperature are systematically studied. The simulation results show that the great residual reflectivity of TM wave can be achieved in wide range of wavelength and incident angle by setting a suitable wave guide width parameter, which demonstrates a good performance in anti-reflection. Moreover, the temperature change has slight impact on anti-reflection, which shows a good stability in temperature drifting.

**Key words** materials; photonic crystals; anti-reflection; finite-difference time-domain; residual reflectivity

**OCIS codes** 160.5298; 130.5440; 130.3120; 310.5448

## 1 引 言

光子晶体是由介电常数不同的材料构成的周期性微结构,其特征是存在光子禁带和光子导带,频率落在光子禁带内的光子在光子晶体中沿任何方向都无法传播<sup>[1]</sup>。1987年美国科学家Yablonovitch等<sup>[2]</sup>提出了光子禁带理论,立即引起了学术界和产业界的密切关注,各国政府机构和一些研究机构纷纷投入开展与光子晶体有关的理论、材料和器件的研究工作。当光子晶体作为一种负折射材料时,具有一些奇异特性,比如反常多普勒效应、反常切连科夫辐射、反常古斯汉欣位移等。值得一提的是,这种材料可用于制作突破衍射极限的理想透镜<sup>[3-4]</sup>,恢复光的倏逝场部分。此外,光子晶体在高密度光学存储器<sup>[5]</sup>、偏振分束器<sup>[6]</sup>、LED<sup>[7]</sup>、光学微腔<sup>[8-9]</sup>和开放式谐振腔<sup>[10]</sup>等方面也具有重要应用,对高分辨率成像、光通信、高密度光存储和集成光学领域产生了深远的影响。由于光子晶体存在带隙,能很好地限制光在其中的传播能力,在滤波器<sup>[11]</sup>、光开关<sup>[12]</sup>、调制器<sup>[13]</sup>等方面具有广泛应用而且能极大地改善这些器件的性能。

本文基于光子晶体带隙探讨了其在减反方面的作用,利用时域有限差分(FDTD)法研究光在三角形晶格二维光子晶体中的传播特性,从TM波的反射着手研究了不同入射光角度和波长对于光子晶体减反特性

收稿日期: 2015-10-14; 收到修改稿日期: 2015-11-19; 网络出版日期: 2016-03-17

基金项目: 国家973计划(2007CB935300)、国家自然科学基金(61177043,11104184)

作者简介: 王 婷(1990—),女,硕士研究生,主要从事光子晶体器件方面的研究。E-mail: quence90@163.com

导师简介: 梁斌明(1977—),男,博士,副教授,主要从事微纳光学方面的研究。

E-mail: liangbinming@sina.com(通信联系人)

的影响。通过 Rsoft 软件仿真可以看到, 介质柱半径常数取 0.4、入射光角度在  $34^\circ$  时, 光子晶体 TM 波反射端面在近紫外、可见光、远红外波长区域都有 10% 以下的剩余反射率;  $-200^\circ\text{C}\sim 170^\circ\text{C}$  时, 入射光角度在  $28^\circ\sim 56^\circ$  之间变化对减反特性的影响不大, 具有很好的入射光角度和温度稳定性。

## 2 二维光子晶体结构

光子晶体是介质折射率具有一定周期性分布的结构, 在模拟仿真实验中, 采用的三角形光子晶体结构如图 1(a) 所示。图 1 中黑色圆点表示介质柱(折射率为  $n=3.42$  的硅柱), 介质柱的单元形状为圆柱体, 呈三角形排列。图 1(b) 所示的两个介质柱中心之间的距离为晶格常数  $a$  ( $a = \lambda f$ ,  $f$  为归一化频率,  $\lambda$  为自由空间波长)。介质柱直径又称波导宽度, 常被定义为  $b \cdot a$ , 其中  $b$  是 0 到 1 之间的常数, 为介质柱半径常数。

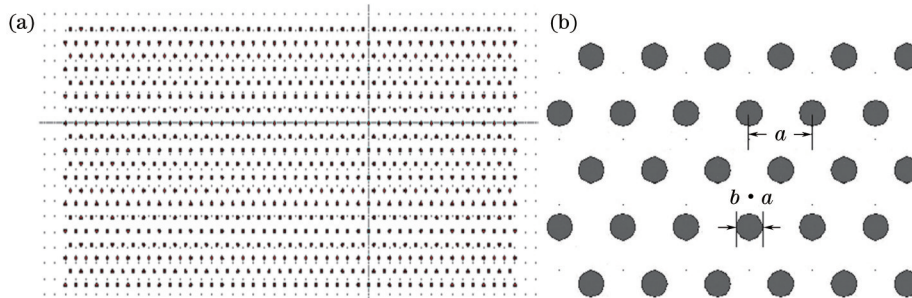


图 1 三角形光子晶体结构示意图。(a) 光子晶体二维结构图; (b) 三角结构

Fig.1 Structure diagram of triangle photonic crystal. (a) Structure for two dimensional photonic crystal; (b) triangle structure

## 3 数据仿真与结果分析

以 FDTD 方法模拟了在以硅材料为介质柱、空气为基底介质且硅柱呈三角形排列的二维光子晶体中光的传播过程。借助 Rsoft 软件, 可以得到如图 2 所示光子晶体的晶体能带结构图, 纵坐标表示入射光的归一化频率, 横坐标表示介质柱半径常数  $b$ 。图中阴影区域对应频率的光可以在具有对应  $b$  值的结构中传播, 称阴影区域为导带, 反之, 空白区域称为禁带。图 2 中主要的禁带都是随着  $b$  的增大, 先是变宽然后逐渐变窄并且逐渐下移形成图中的禁带形。可以看出  $b$  值取 0.4 时正好有部分位于 TM 波的禁带上, 此时若无缺陷则 TM 波端将无法透过。

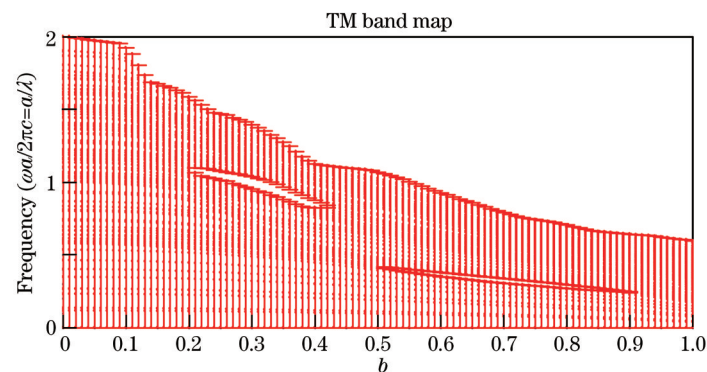


图 2 光子晶体能带结构随硅柱半径常数  $b$  变化图谱

Fig.2 Band structure of photonic crystal polarization influenced by radius constant of silicon column  $b$

入射光功率设定为 1, 反射光功率即为剩余反射率。采用 Rsoft 对 TM 波在光子晶体样品中的传播情况进行仿真, 图 3 是以 Fullwave 模拟仿真的光在光子晶体中的传播过程。图中  $\theta$  为入射角度, TM 波的反射值为  $R_{\text{TM}}$ , 透射为经过光子晶体出射后的光束。

为了研究入射光角度  $\theta$  和  $b$  值的变化对光子晶体减反特性的影响, 分别就  $b=0.4$  对入射光角度  $\theta$  从  $0^\circ$  到  $90^\circ$  的扫描, 找出一个合适的入射光角度  $\theta$ , 使得 TM 波的反射端具有较小的剩余反射率, 并在该入射光角度的基础上对  $b$  值从 0.01 到 0.8 以 0.01 的步长进行扫描研究。仿真研究的结果分别如图 4 中 (a)、(b) 所示。

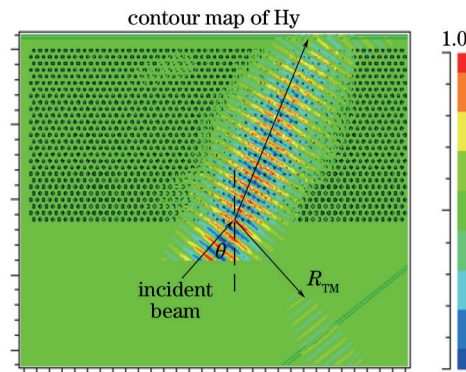


图3 光子晶体的传播图

Fig.3 Light propagation of photonic crystal

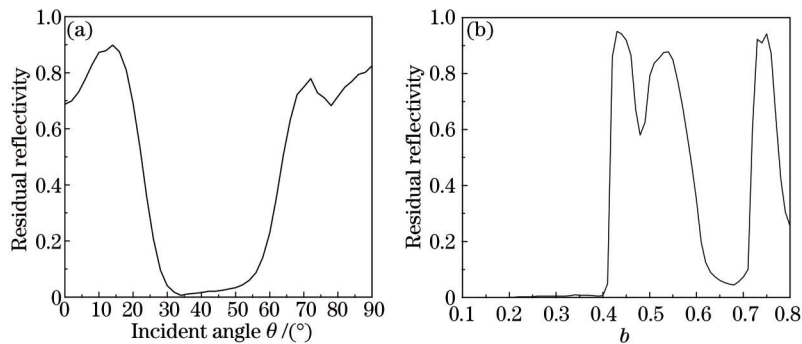


图4 光子晶体减反特性随(a)入射光角度和(b)介质柱半径的变化关系。

Fig.4 Residual reflectivity of photonic crystal changing with (a) incident angles and (b) radii of dielectric cylinder

由图4(a)TM波的剩余反射率随着入射光角度变化的关系图,可以看出入射光角度从 $0^\circ$ 到 $90^\circ$ 增加时剩余反射率呈现先增大后减小再增大的趋势。其中入射光角度在 $30^\circ$ 至 $52^\circ$ 之间时剩余反射率均控制在5%以内,尤其入射角度为 $34^\circ$ 时剩余反射率仅为0.6%。也就是说入射光角度控制在 $30^\circ$ 至 $52^\circ$ 之间对于TM波是能起到很好的减反效果。

由图4(b)TM波的剩余反射率随着光子晶体介质柱半径常数变化的关系图,可以看出介质柱半径常数从0.1到0.4,其剩余反射率均在0附近,体现了很好的减反效果;而随着 $b$ 值的增大,减反效果呈现波动性。尤其 $b$ 值在0.43和0.75附近剩余反射率达到90%左右,原因是此时的 $b$ 值刚好位于禁带反射区。

由于减反特性跟入射光波长有关<sup>[14]</sup>,而波长与归一化频率之间满足 $a = \lambda f$ 。为了研究波长范围对于光子晶体减反特性的影响,就 $a = 5 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 34^\circ$ ,  $b = 0.4$ 对波长从 $0.3 \mu\text{m}$ 到 $20 \mu\text{m}$ 进行扫描,得到不同波长对于光子晶体的剩余反射率的结果,如图5所示。

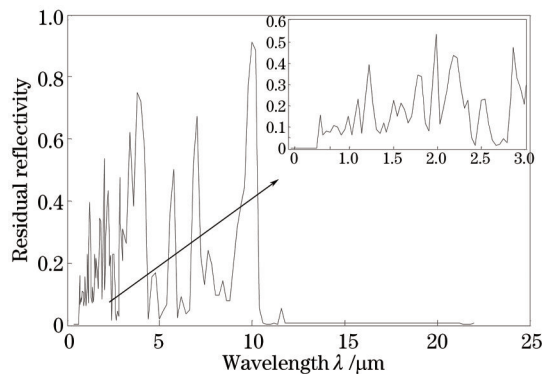


图5 光子晶体减反特性随入射光波长的变化关系

Fig.5 Residual reflectivity of photonic crystal changing with incident light wavelength

图5中可以看出波长在 $0.3 \sim 0.38 \mu\text{m}$ 的紫外波段剩余反射率均只有0.6%左右, $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$ 的可见光波段剩余反射率也几乎控制在10%以内,波长在 $3 \sim 10.2 \mu\text{m}$ 之间的红外波段,剩余反射率随波长的增加显示了

较大的波动性,仅有极少数波长附近有较好的减反效果。而从  $10.4 \mu\text{m}$  向后一直到  $20 \mu\text{m}$  很大波长远红外范围内均维持了一个较低的剩余反射率值,也就是说当晶格常数设为  $5 \mu\text{m}$ ,该光子晶体对于近紫外、远红外波段以及可见光波段 TM 端的减反效果都是很理想的。由于入射光是归一化的,只需相应改变晶格常数,就能实现其余各个波长入射光的减反。如实现  $0.555 \mu\text{m}$  可见光波段的减反,可将晶格常数设置为  $0.262 \mu\text{m}$ ,  $0.3 \mu\text{m}$  紫外光波段的减反仅需将晶格常数设置为  $0.142 \mu\text{m}$  即可实现。

由于光子晶体(硅)具有温热效应,在一定温度范围内,当温度发生变化时,介质柱折射率的变化为:

$$\Delta n = \alpha n \Delta T, \quad (1)$$

式中  $\alpha$  为硅的热光系数,  $\alpha = 1.86 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ ,保持光子晶体结构参数不变,改变光子晶体的温度,介质折射率会产生相应变化。通过仿真折射率的变化对减反特性产生的影响,可间接得到温度与光子晶体减反特性之间的关系,如图 6 所示。图中  $T$  表示光子晶体的温度。

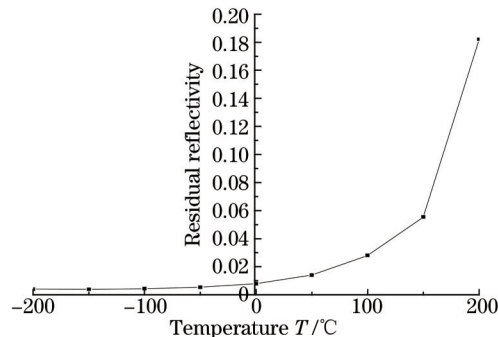


图 6 光子晶体减反特性随温度的变化关系图

Fig.6 Residual reflectivity of photonic crystal changing with temperatures

可以看出随着温度的升高,光子晶体剩余反射率在逐渐升高。温度在  $-200 \text{ } ^\circ\text{C}$  到  $170 \text{ } ^\circ\text{C}$  范围, TM 波的剩余反射率均控制在 10% 以内,也就是说在此温度范围 TM 波均能够获得较好的减反效果。

工作小组已对入射光波长  $10.6 \mu\text{m}$  光子晶体结构有了比较成熟的研究<sup>[15]</sup>,以入射光波长  $10.6 \mu\text{m}$  拟定的相关验证实验平台如图 7 所示,激光器出射的光依次经过偏振片、半波片和透镜斜入射到光子晶体样品上,在反射端探测经过光子晶体反射的光。探测器与计算机输入端相连,记录输出数据。

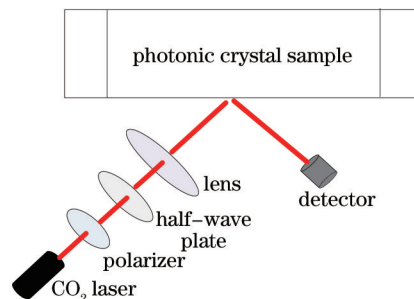


图 7 减反效果验证实验平台

Fig.7 Experiment platform set-up for verification of the anti-reflection effect

平台中,线性偏振片用于偏振经过激光器出射的光,经过偏振片后偏振度可达到 99.9%;通过改变半波片的角度,可以实现 TE 波和 TM 波的模式转换;透镜用于实现高斯光束的聚焦,可以将光子晶体样品放置在高斯光束的束腰处,从而方便数据的采集。

## 4 结 论

采用时域有限差分法研究了三角晶格圆柱晶胞二维光子晶体的能带结构和光学传输特性,系统分析了介质柱半径常数、入射光角度、入射光波长、温度的变化对光子晶体减反特性的影响。仿真结果表明就 TM 波的反射端来讲,光子晶体介质柱半径常数在 0.4 左右,入射光角度在  $34^\circ$  附近具有较好的减反特性;对于  $5 \mu\text{m}$  的晶格周期结构能实现近紫外、可见光、远红外波长范围的减反;很大温度变化范围内剩余反射率都很低,具有较好的温度稳定性。传统减反一般基于减反射膜,其对于镀膜工艺的要求很高,而光子晶体微小尺

寸、优越的减反特性和成熟的制备有望为未来高度集成的减反器件的研究和生产提供新的思路。

### 参考文献

- 1 Yablonovitch E, Gmitter T J, Leung K M. Photonic band structure: the face-centered-cubic case employing nonspherical atoms[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(17): 2295-2298.
- 2 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Physical Review Letters*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 3 Zhang Xiangdong. Absolute negative refraction and imaging of unpolarized electromagnetic waves by two-dimensional photonic crystals[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(20): 205102.
- 4 Zhang Xiangdong. Image resolution depending on slab thickness and object distance in a two-dimensional photonic-crystal-based superlens[J]. *Physical Review B*, 2004, 70(19): 195110.
- 5 Li Heng, Wang Jingxia, Lin Hui, *et al.*. Amplification of fluorescent contrast by photonic crystals in optical storage[J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(11): 1237-1241.
- 6 Wang Ting, Liang Binming, Jiang Qiang, *et al.*. Design and verification of the polarization beamsplitter based on photonic crystals[J]. *Optics Communications*, 2015, 351: 40-44.
- 7 Shen Xiaoxia, Cai Lüzhong, Dong Guoyan, *et al.*. Impact of structure design of photonic crystals on LED light extraction efficiency[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(s1): s106006.  
沈晓霞, 蔡履中, 董国艳, 等. 光子晶体LED结构优化设计对光提取效率的影响[J]. *中国激光*, 2014, 41(s1): s106006.
- 8 Tong Kai, Zhang Zhenguo, Lu Jianru, *et al.*. Hybrid plasmonic photonic crystal nano micro-cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(9): 0905009.  
童凯, 张振国, 卢建如, 等. 混合光子晶体等离子激元纳米微腔[J]. *中国激光*, 2014, 41(9): 0905009.
- 9 Yu Ping, Qiu Huiye, Wu Feiqing, *et al.*. Silicon photonic crystal nanobeam cavities fabricated by deep-etching method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(8): 0813001.  
喻平, 邱晖晔, 吴飞青, 等. 一种基于深刻蚀的硅基周期波导微腔[J]. *光学学报*, 2015, 35(8): 0813001.
- 10 Ruan Zhichao, He Sailing. Open cavity formed by a photonic crystal with negative effective index of refraction[J]. *Optics Letters*, 2005, 30(17): 2308-2310.
- 11 胡小永, 江萍, 杨宏, 等. 超快速可调谐有机光子晶体滤波器[J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(2): 23.
- 12 Wei Xiaoying, Chen Heming. Photonic crystal optical switch based on direct coupling structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(s2): s223004.  
卫晓颖, 陈鹤鸣. 基于直接耦合结构的光子晶体光开关[J]. *光学学报*, 2014, 34(s2): s223004.
- 13 Jiang Qiang, Liang Binming, Hu Aiqing, *et al.*. Terahertz-wave modulator based on self-collimation effect and Fabry-Pérot cavity[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(6): 062301.  
蒋强, 梁斌明, 胡艾青, 等. 基于自准直效应和法布里珀罗腔的太赫兹波调制器[J]. *激光与光电子学进展*, 2013, 50(6): 062301.
- 14 Hao Dianzhong, Su Fufang, Song Lianke, *et al.*. Development of antireflection thin films based on Glan-Taylor prism in visible spectrum and 1064 nm[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, 38(2): 307-310.  
郝殿中, 苏富芳, 宋连科, 等. 可见光波段及1064 nm波长处用于Glan-Taylor棱镜减反射膜[J]. *光子学报*, 2009, 38(2): 307-310.
- 15 Chen Jiabi, Wang Yan, Jia Baohua, *et al.*. Observation of the inverse Doppler effect in negative-index materials at optical frequencies[J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(4): 239-242.

栏目编辑: 张浩佳