

# 一维窄带光子晶体制备与光学特性研究

杜倩倩<sup>1,2</sup> 王文军<sup>1,2</sup> 李淑红<sup>1,2</sup> 刘云龙<sup>1,2</sup> 史强<sup>1,2</sup> 张丙元<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>聊城大学物理科学与信息工程学院, 山东 聊城 252059

<sup>2</sup>聊城大学山东省光通信科学与技术重点实验室, 山东 聊城 252059

**摘要** 在实验上研究了不同材料构成的一维窄带光子晶体带隙特性,采用电子束热蒸发技术,制备了一系列可见光范围内的窄带光子晶体反射镜。实验结果表明:高低折射率比值能够影响光子晶体对相应频率光的抑制能力。折射率比值恒定时,随周期数的增多,最大反射率增大,带隙宽度减小;对于折射率比值不同的光子晶体,折射率比值越小,带隙越窄,达到高反射率所需的周期数目越多。通过构建异质结构光子晶体,显著缩小了光子晶体带隙,并使其在短周期内实现了窄带高反射率。

**关键词** 光学器件;光子晶体;电子束蒸发;光子禁带;异质结构

中图分类号 O484.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.112304

## Preparation and Optical Properties Research of One Dimensional Narrow Band Photonic Crystal

Du Qianqian<sup>1,2</sup> Wang Wenjun<sup>1,2</sup> Li Shuhong<sup>1,2</sup> Liu Yunlong<sup>1,2</sup> Shi Qiang<sup>1,2</sup>  
Zhang Bingyuan<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>School of Physical Science and Information Engineering, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

<sup>2</sup>Shandong Key Laboratory of Optical Communication Science and Technology, Liaocheng University, Liaocheng, Shandong 252059, China

**Abstract** The characteristics of one-dimensional narrow-band photonic crystal including different materials are primarily studied based on experiment. By the means of the electron beam evaporation, a series of narrow band photonic crystal reflectors are prepared in the visible light. The experimental results show that the refractive index ratio can affect inhibition ability of light wave at the corresponding frequency of the photonic crystal. For the same refractive index ratio, the maximum reflectivity is increasing with increasing of periods while band gap is decreasing. For the different refractive index ratio, the smaller the refractive index ratio, the narrower the photonic crystal band gap, the more periods are required to achieve the highest reflectance. Moreover, a hetero structure photonic crystal are also constructed, which can significantly narrow the photonic band gap of photonic crystal, realizing a narrow high reflectivity of the photonic crystal mirror in a shorter period.

**Key words** optical devices; photonic crystal; electron beam evaporation; photonic band gap; hetero structure

**OCIS codes** 230.1480; 310.2790; 310.4165

## 1 引言

光子晶体提供了一种全新的控制光子传播的新机制,呈现了许多有趣的、独特的物理现象。它是由两种或两种以上具有不同介电常数的材料在空间上呈周期性排列而构成的<sup>[1-5]</sup>。带隙特性是光子晶体的一个重要特征,它使光子晶体具有了调节光子传播状态的独特功能。当光在此介质中传播时,某些频率的光会

收稿日期: 2015-06-01; 收到修改稿日期: 2015-06-29; 网络出版日期: 2015-10-20

基金项目: 国家自然科学基金(61275147)、山东省科技攻关计划(2010GGX10127)、山东省自然科学基金(ZR2012AL11, ZR2013EML006)、山东省‘泰山学者’建设工程专项经费、聊城大学重点科研基金

作者简介: 杜倩倩(1991—),女,硕士研究生,主要从事非线性光学及有机电致发光器件方面的研究。

E-mail: dzdq0126@163.com

导师简介: 王文军(1962—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事非线性光学及有机光电子材料与器件方面的研究。

E-mail: phywwang@163.com(通信联系人)

受到抑制,光子自发辐射的几率与光子所在频率态的数目成正比,若自发辐射的频率正好落在禁带内,则该频率的光子数目为零,自发辐射也将受到抑制,而其他频率的光则能够透过光子晶体。正因如此,光子晶体成为了应用物理乃至材料科学领域的一个研究热点,一维光子晶体由于其制作简易、易于实现等优点而倍受关注<sup>[6-11]</sup>。目前,专家学者对于宽带隙的光子晶体研究较多,为获得带隙更宽的光子晶体,对其结构进行了大量的理论、实验研究<sup>[12-17]</sup>。例如王充等<sup>[14]</sup>通过理论计算,证明异质结构光子晶体带隙明显拓宽。在激光器光学谐振腔的制备方面,窄带比宽带光子晶体更具有使用价值和研究意义。然而,人们对窄带光子晶体的研究较少,且主要集中在理论推导方面,实验研究相对较少。

因此,本文在理论模拟运算的基础上,着重对窄带光子晶体进行了实验探索,采用电子束热蒸发技术,利用不同介质材料制备了一系列窄带光子晶体反射镜,分析了高低折射率比值及周期数对光子带隙的影响,通过设计异质结构光子晶体,显著提高其性能,在短周期内实现窄带高反射率的特性。

## 2 理论计算与实验过程

选用了多种不同高、低折射率介质材料进行两两组合,制备了一系列一维窄带光子晶体 $[3H/3L]_n$ 反射镜, $n$ 表示周期数。图1为一维窄带光子晶体反射镜结构示意图,其中 $n_i$ 为介质折射率, $d_i = \lambda/4n_i$ 为单层薄膜的物理厚度,选取中心波长 $\lambda = 450 \text{ nm}$ 。 $\delta$ 因子定义为两种介质材料的折射率比值,即 $\delta = n_H/n_L$ 。

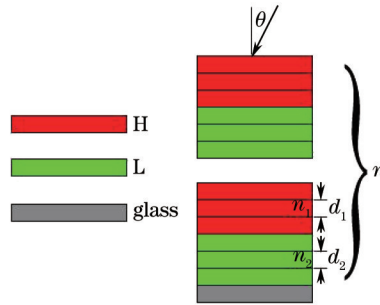


图1 一维窄带光子晶体反射镜结构示意图,其中 $n_1$ ( $n_2$ )和 $d_1$ ( $d_2$ )分别表示高低折射率材料的折射率及厚度

Fig.1 Lattice structures of one-dimensional narrow-band photonic crystal, where  $n_1$ ( $n_2$ ) and  $d_1$ ( $d_2$ ) represent refractive index and thickness of high-low refractive index materials, respectively

首先在理论上对光子带隙分布进行模拟运算,然后通过实验制备光子晶体器件,进而研究其带隙特性。运用传输矩阵方法模拟带隙分布,当频率为 $\nu$ 的光从左向右以 $\theta$ 角入射到周期性介质结构材料时,根据薄膜光学理论,电磁波在每层介质中的传输特性可用一个 $2 \times 2$ 的特征矩阵表示,对于第 $i$ 层介质,单层的特征矩阵为<sup>[18]</sup>

$$\mathbf{M}_i = \begin{pmatrix} \cos \delta_i & -\frac{i}{\eta} \sin \delta_i \\ -i\eta \sin \delta_i & \cos \delta_i \end{pmatrix}, \quad (1)$$

$$\delta_i = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{n_i d_i} \cos \theta, (\text{TM}), \quad (2)$$

$$\eta_i = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \sqrt{\varepsilon_i} \cos \theta, (\text{TE}), \quad (3)$$

式中 $\theta$ 和 $\lambda$ 分别为入射角和入射波长, $n_i d_i$ 为介质层光学厚度。 $\varepsilon_i$ 为介质层的介电常数, $\varepsilon_0$ 和 $\mu_0$ 为真空中的介电常数和磁导率常数。

对于一维光子晶体,假设膜层包含 $n$ 层膜,整个膜系的特征矩阵 $\mathbf{M}$ 则可由各个膜系的特征矩阵 $\mathbf{M}_i$ 连乘积求得,即

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_1 \times \mathbf{M}_2 \times \mathbf{M}_3 \times \cdots \times \mathbf{M}_n = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}. \quad (4)$$

可得出膜层的反射系数 $r$ 、透射系数 $t$ 及反射率 $R$ 、透射率 $T$ ,分别为

$$r = \frac{A\eta_0 + B\eta_0 - C - D\eta_0}{A\eta_0 + B\eta_0 + C - D\eta_0}, \quad R = |r|^2, \quad (5)$$

$$t = \frac{2\eta_0}{A\eta_0 + B\eta_0 + C - D\eta_0}, \quad T = [t]^2. \quad (6)$$

利用传输矩阵的方法计算光波在光子晶体的传播特性,进而得出禁带分布情况。

实验中,采用电子束热蒸发设备(中科院沈阳科仪公司 DSZ-500)制备光子晶体反射镜,热蒸发材料分别选用纯度为 99.99% 的 ZnS、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub> 和 MgF<sub>2</sub> 颗粒。本底真空为 1×10<sup>-4</sup> Pa, 高压 6 kV, 表 1 给出了不同薄膜材料的详细沉积参数,为了确保薄膜的均匀性,沉积过程中基板保持 20 r/min 的匀速转动,并采用 SQM-200 石英晶控监测薄膜的厚度与蒸发速率。室温条件下,采用美国 J A Woollam 公司生产的 M-2000II 型椭偏仪对不同介质材料的单层薄膜进行折射率拟合,通过日本日立公司生产的 UV-3100 型紫外-可见分光光度计测量单层薄膜和光子晶体的光谱特性。

表 1 不同材料薄膜的沉积参数

Table 1 Deposition parameters of different material films

Deposition parameters	Samples						
	ZnS	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgF <sub>2</sub>
Oxygen pressure /10 <sup>-2</sup> Pa	—	2	2	2	2	2	—
Beam current /mA	5	120	140	120	110	40	10
Deposition rate /(nm/s)	0.3	0.2	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3

图 2 是不同介质材料单层薄膜的透射光谱,从中可以看出:在可见光范围内,不同材料薄膜透射率稍有差异,但峰值透射率均在 90% 以上,符合光子晶体反射镜对介质材料的要求。表 2 给出了不同介质材料单层薄膜在波长 450 nm 处的折射率,以折射率大小为区分条件,分别选取 ZnS、Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、TiO<sub>2</sub>、HfO<sub>2</sub> 作为制备光子晶体反射镜的高折射率介质材料(记为 H);选取 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、SiO<sub>2</sub>、MgF<sub>2</sub> 为低折射率介质材料(记为 L),来组合一维窄带光子晶体反射镜。

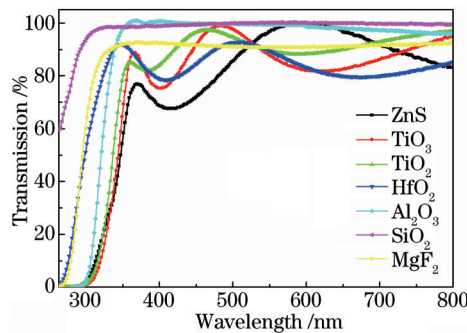


图 2 不同材料薄膜的透射光谱

Fig.2 Optical transmittance spectra of different material films

表 2 不同材料薄膜的折射率

Table 2 Refractive index of different material films

Materials	High				Low		
	ZnS	Ti <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	HfO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgF <sub>2</sub>
Refractive index @ 450 nm	2.460	2.136	2.081	1.919	1.594	1.516	1.454

### 3 实验结果分析

#### 3.1 周期数对光子带隙的影响

选取高低折射率材料组合 TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, 其折射率比值恒定(1.4089), 研究了周期数对光子带隙的影响。TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> 光子晶体反射镜的透射光谱随周期数的变化如图 3 所示, 插图是光子晶体最大反射率与周期数的关系曲线。可以看出:随着周期数的增加,中心波长处的透射率逐渐减小,最大反射率增大,其带隙逐渐减小;但当其周期数  $n > 7$  时,最大反射率几乎不再增加而趋于一个饱和值,且带隙宽度不再变化。

#### 3.2 折射率比值对光子禁带的影响

为了研究折射率比值对光子晶体禁带的影响,将不同的介质材料进行以下组合:HfO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>,

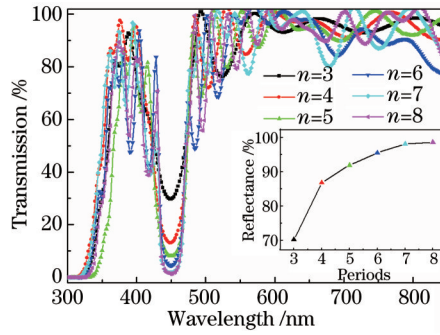


图3 不同周期数TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>光子晶体的透射光谱, 插图为最大反射率随周期数的变化曲线

Fig.3 Transmission spectra of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> photonic crystals with different cycles, the inset shows the curve of maximum reflectance with cycle number

TiO<sub>2</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>, Ti<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/SiO<sub>2</sub>, ZnS/SiO<sub>2</sub>, ZnS/MgF<sub>2</sub>, 折射率比值( $\delta$ 因子) 分别为 1.2036, 1.2658, 1.3038, 1.3782, 1.4089, 1.6294 和 1.6967, 测量其透射光谱。图4(a)给出了4周期时, 光子晶体随 $\delta$ 因子变化的透射光谱。不难看出: 周期数相同时, 中心波长的透射率随 $\delta$ 因子的增加而减小。为了便于分析, 图4(b)绘出了在相同周期数( $n=4$ )时, 中心波长透射率与 $\delta$ 因子的变化曲线, 可以得出: 随 $\delta$ 因子由 1.2036 升高至 1.6967, 中心波长处透射率由 45.5% 下降至 3.6%, 说明中心波长的透射率随 $\delta$ 因子的增大减小, 但由于薄膜存在吸收损耗, 实验值相对于理论值的透射率稍低。

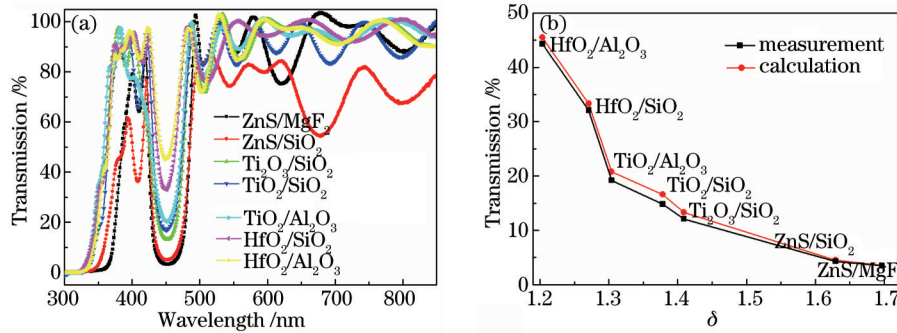


图4 (a) 不同折射率比值的光子晶体透射光谱; (b) 中心波长透射率与 $\delta$ 因子的变化曲线

Fig.4 (a) Optical transmittance spectra of different material films; (b) curve of center wavelength transmittance with different  $\delta$  factors

还探索了不同 $\delta$ 因子对光子晶体带隙宽度的影响, 为避免周期数对带隙宽度的影响, 所制备的光子晶体反射镜均达到高(最大)反射率。图5(a)给出了 [HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>]<sub>11</sub>、[TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>]<sub>8</sub>、[ZnS/SiO<sub>2</sub>]<sub>4</sub> 光子晶体的反射光谱。从图中可以看出: [HfO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>]<sub>11</sub>、[TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub>]<sub>8</sub>、[ZnS/SiO<sub>2</sub>]<sub>4</sub> 三种光子晶体的带隙宽度分别约为 24、34、50 nm。为了便于分析, 图5(b)绘出了 7 种不同 $\delta$ 因子的光子晶体禁带宽度。可以看出, 随 $\delta$ 因子由 1.2036 升高至 1.6967, 带隙宽度由 15 nm 增加至 55 nm, 即:  $\delta$  因子增大, 光子晶体带隙拓宽。但实验测量的带隙宽

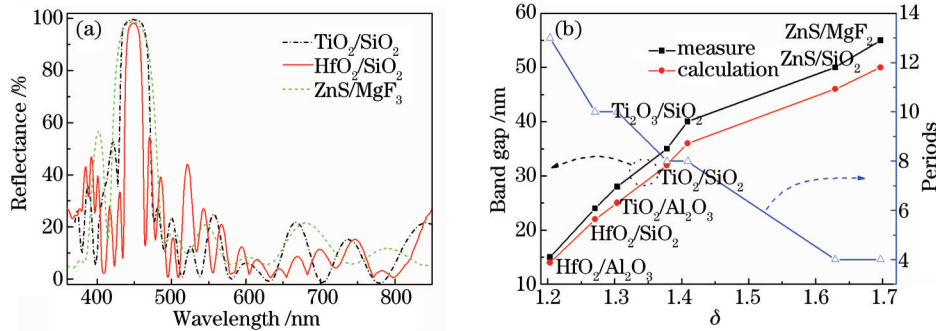


图5 (a) 不同 $\delta$ 因子的光子晶体反射光谱; (b) 带隙宽度及周期数随 $\delta$ 因子的变化曲线

Fig.5 (a) Optical reflectance spectra of the photonic crystals with different  $\delta$  factors; (b) curves of band gap width and cycles with the  $\delta$  factor



度相比于理论值稍宽,原因主要来自薄膜在制备过程中受蒸发速率、温度、杂质影响而存在的缺陷,以及不同介质薄膜之间的界面问题。实验还发现, $\delta$ 因子越小,达到高反射率所需周期数越多,如图5(b)所示。不同高低折射率比值的光子晶体反射镜,带隙不同,达到高反射率所需周期数不同,比值越大,周期数越少,带隙越宽。因此,可按照器件要求,选择合适的介质材料进行组合。

### 3.3 异质结构光子晶体

从以上实验结果可知:可选择 $\delta$ 因子值较小的材料组合来获得窄带隙的光子晶体,但随 $\delta$ 因子的减小,光子晶体达到高反射率所需周期数目增加,制备耗时长,并且随着薄膜层数增加,薄膜界面效应、粗糙度以及应力等问题愈加明显,容易导致薄膜脱落,进而影响器件的性能。因此,满足周期数少,窄禁带,高反射的器件要求,仅仅局限于单一结构来制备光子晶体是不够的。文献记载通过异质结构光子晶体可以拓宽光子禁带宽度<sup>[12-14]</sup>。王充等<sup>[15]</sup>利用带隙叠加的规律:当不同中心波长的光子禁带位置相互靠近时,会出现带隙的交叠,从而使禁带变宽。通过多次垂直沉积法制备了多重异质结构光子晶体,拓宽了光子带隙。因此设想若相同频段的光子禁带组合时,会不会在短周期内缩小相应的光子禁带宽度,并且还达到一个高反射率呢?因此,将不同 $\delta$ 因子的光子晶体进行组合,进行理论分析计算,发现光子晶体的带隙宽度会发生变化。实验上,制备了异质结构窄带光子晶体反射镜:器件B  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_2$ 和器件D  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{HfO}_2]_3[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_1$ ,以单一结构器件A  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_6$ 和器件C  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_8$ 为对照器件。器件A、B的反射光谱如图6(a)所示,可以看出:器件A  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_6$ 的带隙宽度为34 nm,最大反射率仅有94%,而具有同周期数的异质结构器件B,带隙宽度几乎保持不变,但最大反射率高可达98.67%。图6(b)为器件C、D的反射光谱,不难发现:器件C的最大反射率为99.3%,带隙宽度为34 nm,而具有同周期数目的异质结构器件D,在保持反射率不变的情况下,禁带宽度窄化为27 nm。且从图5(b)中可知,如果用传统的单一结构制备同样带隙宽度且高反的光子晶体,至少需要11个周期,而异质结构光子晶体仅仅需8个周期。异质结构光子晶体主要是利用相同频率禁带叠加的特点,来获得更窄的光子带隙,同时实现具有某一特殊频率光的高反射率。因此,异质结构光子晶体相比单一结构光子晶体,性能更加优异,更具有研究意义和使用价值。

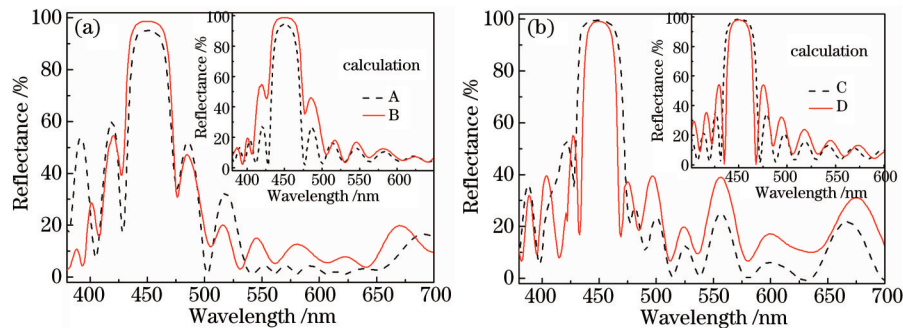


图6 不同器件的反射谱。(a) 器件A  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_6$ , B  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_2$ ;

(b) 器件C  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_8$ , D  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{HfO}_2]_3[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_1$ , 插图为相应的理论模拟曲线

Fig.6 Optical reflectance spectra of devices. (a) Devices A  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_6$  and B  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_2$ ;

(b) devices C  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_8$  and D  $[\text{SiO}_2/\text{TiO}_2]_4[\text{SiO}_2/\text{HfO}_2]_3[\text{SiO}_2/\text{ZnS}]_1$ , the insets show simulating curve

## 4 结 论

对于高低折射率恒定的材料组合光子晶体反射镜,随周期数的增加,中心波长处的透射率逐渐减小,最大反射率增加,带隙也不断减小,但周期数超过临界周期数后,最大反射率和带隙宽度不再变化。高低折射率比值对光子带隙及达到最大反射率所需周期数有较大影响,比值越小,带隙越窄,但达到高反所需周期数越多,随高低折射率比值由1.2036升高至1.6967,光子晶体带隙宽度由15 nm增加至55 nm,周期数由12降至4。实验发现,异质结构光子晶体比常规单一结构光子晶体性能更优异,在短周期内即可实现窄带高反射率,这对优化器件结构设计和提高材料选择的灵活性有重要意义。该研究对于不同需要的光子晶体的制备与设计提供了实验数据和依据。

## 参考文献

- 1 Weihua Lin, Guoping Wang, Suhui Zhang. Design and fabrication of omnidirectional reflectors in the visible range[J]. *Journal of Modern Optics*, 2005, 52(8): 1155-1160.
- 2 Yablonovitch E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics[J]. *Phys Rev Lett*, 1987, 58(20): 2059-2062.
- 3 Dardano P, Gagliardi M, Rendina I, *et al.*. Ellipsometric determination of permittivity in a negative index photonic crystal metamaterial[J]. *Light: Science & Applications*, 2012, 1(12): e42.
- 4 Chen Jian, Wang Qingkang, Li Haihua. Effect of random perturbation of structural parameters on the light extraction efficiency of light emitting diode with photonic crystal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(1): 233-236.  
陈健, 王庆康, 李海华. 光子晶体结构参数的随机扰动对光子晶体LED出光效率的研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(1): 233-236.
- 5 Chen Zhiyong, Hao Xiaolong, Zheng Yanmin, *et al.*. Large-angle polarization-independent broad band filter based on silicon photonic crystal slabs[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(3): 0305002.  
陈志勇, 郝小龙, 郑彦敏, 等. 大角度偏振无关硅膜光子晶体宽带滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(3): 0305002.
- 6 Xiaoyu Dai, Yuanjiang Xiang, Shuangchun Wen, *et al.*. Thermally tunable and omnidirectional terahertz photonic bandgap in the one-dimensional photonic crystals containing semiconductor InSb[J]. *J App Phys*, 2011, 109(5): 053104.
- 7 Konoplev I V, McGrane P, Phelps A D R, *et al.*. Observation of photonic band-gap control in one-dimensional Bragg structures[J]. *Appl Phys Lett*, 2005, 87(12): 121104.
- 8 Konoplev I V, Doherty G, Cross A W, *et al.*. Photonic band gap control in one-dimensional dielectric Bragg structures [J]. *Appl Phys Lett*, 2006, 88(11): 111108.
- 9 Su An, Gao Yingjun. Light propagation characteristics of one-dimensional photonic crystal with double-barrier quantum well[J]. *Acta Phys Sin*, 2012, 23(61): 234208.  
苏安, 高英俊. 双重势垒一维光子晶体量子阱的光传输特性研究[J]. *物理学报*, 2012, 23(61): 234208.
- 10 He Jie, Song Litao, Guo Tao, *et al.*. Optical characteristics of one-dimensional photonic crystals with two element compound defect layers[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(3): 211-215.  
何杰, 宋立涛, 郭涛, 等. 二元复合缺陷对一维光子晶体光学特性的影响[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(3): 211-215.
- 11 Su An, Meng Chengju, Gao Yingjun. Filter with one-dimensional photonic crystal quantum well possessing high quantity filtering functions[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10):1006001.  
苏安, 蒙成举, 高英俊. 实现高品质滤波功能的一维光子晶体量子阱滤波器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1006001.
- 12 Zengyou Meng, Shaling Huang, Zhe Liu, *et al.*. Design and fabrication of a novel high damage threshold HfO<sub>2</sub>/TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> multilayer laser mirror[J]. *Optoelectronics Lett*, 2012, 8: 190-192.
- 13 Xin Wang, Xinhua Hu, Yizhou Li, *et al.*. Enlargement of omnidirectional total reflection frequency range in one dimensional photonic crystals by using photonic heterostructures[J]. *Appl Phys Lett*, 2002, 80(23): 4291-4293.
- 14 Wang Chong, Peng Tongjiang, Duan Tao. Preparation and band-gap properties of heterostructure photonic crystal[J]. *Journal of Synthetic Crystals*, 2010, 39(2): 474-480.  
王充, 彭同江, 段涛. 异质结构光子晶体的制备与带隙特性研究[J]. *人工晶体学报*, 2010, 39(2): 474-480.
- 15 Yan Hongwei, Zhang Lin, Zhu Fanghua, *et al.*. Fabrication and properties of silica photonic crystal heterostructures [J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, 30(12): 3592-3596.  
严鸿维, 张林, 朱方华, 等. 二氧化硅光子晶体异质结构的制备与性质研究[J]. *光学学报*, 2010, 30(12): 3592-3596.
- 16 Zhao Yuhui, Zhang Huiyun, Zheng Yi. The band gap properties of one dimension hetero structure photonic crystal [J], *Acta Sinica Quantum Optica*, 2006, 12(3): 159-162.  
赵玉辉, 张会云, 郑义. 异质结构光子晶体的能带特性研究[J]. *量子光学学报*, 2006, 12(3): 159-162.
- 17 Chai Hu, Hu Minglie, Fang Xiaohui, *et al.*. Advances in femtosecond laser technologies with photonic crystal fibers[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(1): 0101001.  
柴路, 胡明列, 方晓惠, 等. 光子晶体光纤飞秒激光技术研究进展[J]. *中国激光*, 2013, 40(1): 0101001.
- 18 Tang Jinfa, Gu Peifu, Liu Xu, *et al.*. *Modern Optical Thin Film Technology*[M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 2006.  
唐晋发, 顾培夫, 刘旭, 等. *现代光学薄膜技术*[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 2006.

栏目编辑: 韩峰