

# 基于倏逝波谐振的空气栅光子晶体 F-P腔折射率传感特性研究

陈颖<sup>1</sup> 石佳<sup>1</sup> 曹会莹<sup>1</sup> 韩洋洋<sup>1</sup> 朱奇光<sup>2</sup> 毕卫红<sup>2</sup>

<sup>1</sup>燕山大学电气工程学院河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

<sup>2</sup>燕山大学信息科学与工程学院河北省特种光纤与光纤传感器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

**摘要** 基于倏逝波理论和光学谐振原理,研究了倏逝波在光子晶体中的存在形式及空气栅光子晶体F-P腔的折射率传感机理,并建立谐振波长与待测气体折射率的关系模型。当入射光以大于全反射临界角的角度入射到光子晶体中,由于倏逝波的作用,在中心介质层形成F-P腔并产生谐振,电磁场被局部增强,与待测气体充分作用,从而使该传感结构对待测气体的折射率具有较高的敏感性。利用传输矩阵理论进行数值模拟,结果表明,折射率传感的 $Q$ 值可达3447.0,灵敏度可达1260.0 nm/RIU,证明该光子晶体F-P腔折射率传感结构具有很好的传感特性,可为高精度气体折射率传感器的设计与应用提供一定的理论参考。

**关键词** 光学器件; 折射率传感; 光子晶体; F-P腔; 倏逝波; 光学谐振

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.1123001

## Study on Refractive Index Sensing Property of Air Gate Photonic Crystal F-P Cavity Based on Evanescent Wave Resonance

Chen Ying<sup>1</sup> Shi Jia<sup>1</sup> Cao Huiying<sup>1</sup> Han Yangyang<sup>1</sup> Zhu Qiguang<sup>2</sup> Bi Weihong<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument of Hebei Province, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

<sup>2</sup>Key Laboratory of Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, School of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

**Abstract** Based on the theory of evanescent wave and optical resonance, the existence form of evanescent wave in photonic crystal and the refractive index sensing mechanism of air gate photonic crystal F-P cavity are studied, and the relationship model between the resonant wavelength and the detected gas refractive index is established. When the incident light travels through the photonic crystal at a certain angle, which is larger than the critical angle of total reflection, as a result of the action of evanescent wave, an F-P cavity is formed in the center of dielectric layer and produces resonance. The electromagnetic field is local enhanced, and contacts with detected gas sufficiently, which causes the refractive index sensing structure has a high sensitivity with the detected gas refractive index. The transfer matrix theory is used to numerical simulation, the results show that the  $Q$  value can attain 3447.0 and the sensitivity can attain 1260.0 nm/RIU. So the proposed photonic crystal F-P cavity refractive index sensing structure has good sensing properties, and provides certain theoretical references for the design and application of high precision gas refractive index sensors.

**Key words** optical devices; refractive index sensing; photonic crystals; F-P cavity; evanescent wave; optical resonance

**OCIS codes** 230.5298; 280.4788; 070.7345; 260.5740

收稿日期: 2015-05-18; 收到修改稿日期: 2015-06-30

基金项目: 国家自然科学基金(61201112,61172044,61475133)、河北省自然科学基金(F2013203250)、河北省普通高校毕业生青年拔尖人才计划项目(BJ2014056)、燕山大学青年教师自主研究计划项目(14LG013)

作者简介: 陈颖(1980—),女,博士,副教授,主要从事光子晶体应用技术方面的研究。E-mail: chenying@ysu.edu.cn

## 1 引 言

光学传感器是一个非常活跃的工程研究领域,是电磁学、光学和微电子学等学科的交叉结合产物。它是一种利用光学干涉、全反射和共振耦合等光学原理对待测样本的参数产生特异性响应,并将其转换成光信号的变化进行输出的传感器件。光子晶体传感器<sup>[1]</sup>因其结构简单和灵敏度高等诸多优势已被广泛地应用于光学传感的各个领域。Georgaki等<sup>[2]</sup>采用疏水性材料和亲水性材料交替排列制作聚合物光子晶体传感器,来实现环境湿度的测量。Rahmat等<sup>[3]</sup>提出了一种双缺陷的一维光子晶体光学传感器,来检测周围空气中的NO<sub>2</sub>浓度水平。可以发现,在光子晶体传感器的设计与研究中,大多是基于在周期性光子晶体中掺杂缺陷,打破其周期性排列,从而使得电磁波在缺陷处局域来实现的。目前基于倏逝波谐振而形成法布里珀罗(F-P)谐振腔,从而基于其光子局域特性来实现折射率传感的研究还较少。

倏逝波<sup>[4]</sup>是一种在光密介质和光疏介质界面处发生全反射时,透入到光疏介质中一定深度,并沿界面传输一定距离后再返回到光密介质的一种特殊的表面电磁波。倏逝波为非均匀波,随透入光疏介质的深度成指数形式衰减,一般情况下,倏逝波会透入光疏介质约一个波长的深度再返回到入射介质中,不能进行传输。然而最近研究表明,通过合理调控光疏介质厚度,也可将倏逝波耦合输出<sup>[5]</sup>,若合理地设计光子晶体结构,调整光子晶体参数,倏逝波在一维光子晶体中传播具有独特的光子局域特性,这为倏逝波应用于折射率传感提供了可能。

结合光栅<sup>[6]</sup>模型与光子晶体的结构特点,本文提出了一种空气栅光子晶体结构来实现气体折射率的检测,由于倏逝波的传输特性,在光子晶体中形成F-P腔。结合倏逝波理论和光学谐振<sup>[7]</sup>原理,分析了倏逝波在一维光子晶体中的存在形式及光子晶体F-P腔的折射率传感机理,建立谐振波长与待测气体折射率的关系模型,进而通过观测谐振波长的漂移,实现待测气体折射率的动态监测。

## 2 结构模型与理论分析

利用激光干涉光刻<sup>[8]</sup>和离子束刻蚀技术<sup>[9]</sup>,可在利用旋涂法层层沉积制备的一维光子晶体的基础上刻蚀如图1所示的一维空气栅光子晶体结构(BC)<sub>3</sub>BABAB(CB)<sub>3</sub>,其中介质层B选取折射率  $n_b = 1.45$ ,厚度  $d_b = 600$  nm 的 SiO<sub>2</sub>,介质层C选取  $n_c = 1.6$ ,  $d_c = 550$  nm 的环氧树脂,凹槽部分A为敏感气体介质层,耦合棱镜的折射率为 1.56。

入射光,以横电波(TE)为例,经棱镜耦合后以角度  $\theta$  入射到一维空气栅光子晶体结构中,并经棱镜耦合输出。当入射角度大于棱镜与空气的全反射临界角时,入射波会在界面1处发生全反射,由于电磁场的连续性,入射波不会在两种介质分界面上突然中断,因此电磁波会透入到空气介质层A中一定深度,从而产生了倏逝波。

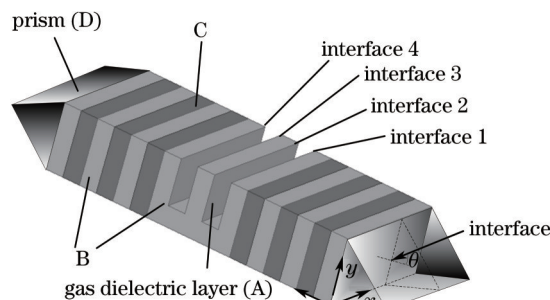


图1 空气栅光子晶体结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of air gate photonic crystals structure

倏逝波沿入射面上的介质边界  $x$  方向传播,振动方向在垂直于界面的  $z$  方向,其波函数可表示为<sup>[10]</sup>

$$E_i = E_i \exp[i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)] = E_i \exp(-kz) \exp[i(k_x x - \omega t)], \quad (1)$$

式中  $E_i$ 、 $E_t$  为光密介质的入射场强和光疏介质中的出射场强,  $\omega$  为入射光的角频率,  $k = \frac{\omega}{c}$  为入射光波矢,  $k_x$  为入射光波矢在  $x$  轴方向上的分量,  $k_x = k \cdot n_D \frac{\sin \theta}{n_A}$ ,  $n_D$  为耦合棱镜的折射率。

可以发现,倏逝波的振幅随透入光疏介质的深度按指数形式衰减,振幅衰减到其最大值的  $1/e$  时的穿透深度  $z_d$  为

$$z_d = \left[ k \sqrt{\sin^2 \theta - \left(\frac{n_A}{n_D}\right)^2} \right]^{-1}. \quad (2)$$

一般情况下,倏逝波会透入光疏介质约一个波长的深度再返回到入射介质中,不能进行传输。但当光疏介质层 A 较薄,即  $d_A < z_d$  时,倏逝波将穿透光疏介质层 A 进入光密介质层 B,倏逝波会在中心介质层 B 的两个表面不断发生全反射,同样产生倏逝波和  $x$  方向的古斯汉欣位移,如图 2 所示,由于倏逝波的衰减性,单独的倏逝波不再能够界面 4 继续传播。

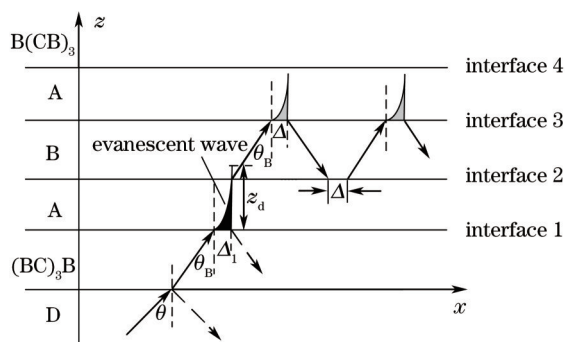


图 2 倏逝波的形成与传输

Fig.2 Formation and transmission of evanescent wave

中心介质层 B 可以看做 F-P 谐振腔,由界面 3 出射的倏逝波会形成多光束干涉,满足以下条件将产生谐振:

$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_d} n_B d_B \cos \theta_B + \frac{2\pi}{\lambda} \cdot (2\Delta) = 2k\pi, (k = 0, 1, 2 \dots), \quad (3)$$

其中古斯汉欣位移<sup>[11]</sup>  $\Delta$  为

$$\Delta = \frac{\lambda \tan \theta_B}{\pi(\sin^2 \theta_B - \sin^2 \theta_c)^{1/2}}, \quad (4)$$

式中  $\lambda$  为入射光波波长,  $\theta_c$  为界面 3 处的全反射临界角,  $\theta_c = \arcsin(n_A/n_B)$ ,  $\theta_B$  为中心介质层 B 的入射角,  $\theta_B = \arcsin[n_D \cdot \sin \theta / n_B]$ , 所以, (4) 式也可以表示为

$$\Delta = \frac{\lambda}{\pi} \cdot \frac{n_B \tan[\arcsin(n_D \sin \theta / n_B)]}{(n_D^2 \sin^2 \theta - n_A^2)^{1/2}}. \quad (5)$$

将(5)式代入(3)式可得透射谱禁带中的缺陷峰波长  $\lambda_d$  与介质层 A 折射率之间的关系。当  $n_A$  增大时,古斯汉欣位移增大,对应的谐振波长  $\lambda_d$  增大,缺陷峰红移,由此可以通过探测透射光谱中缺陷峰波长的变化在一定范围内探测介质层的折射率变化。

### 3 数值模拟及分析

#### 3.1 模拟方法—传输矩阵法

当光以一定角度  $\theta_i$  入射到光子晶体结构中,根据薄膜光学理论及电磁场的边界条件,电磁波在周期层状介质中的传输特性可用一个  $2 \times 2$  的特征矩阵表示<sup>[12]</sup>。

假设第  $N$  层介质的电场和磁场强度为  $E_N$ 、 $H_N$ , 则第  $N+1$  层介质电场和磁场强度  $E_{N+1}$ 、 $H_{N+1}$  满足

$$\begin{pmatrix} E_N \\ H_N \end{pmatrix} = \mathbf{M}_N \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}, \quad (6)$$

式中  $M_N$  为第  $N$  层介质传输的特征矩阵,逐层类推,可得电磁波在  $N$  层介质的特征方程为

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \mathbf{M}_1 \mathbf{M}_2 \cdots \mathbf{M}_{N-1} \mathbf{M}_N \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}. \quad (7)$$

对于有限多层介质膜系统,单层介质的传输矩阵表示为

$$M_j = \begin{pmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{pmatrix}, \quad (8)$$

式中  $\delta_j = -\frac{2\pi}{\lambda} n_j d_j \cos \theta_j$ ,  $\eta_j = n_j \cos \theta_j$ ,  $n_j$ 、 $\theta_j$ 、 $d_j$ 、 $\lambda$  分别为介质  $j$  的折射率、入射角、物理厚度和入射光波长。

若  $M = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$ , 可得任意角度入射光在一维光子晶体中传播的透射系数和透射率分别为<sup>[12]</sup>

$$t = \frac{E_{N+1}}{E_1} = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_0\eta_{N+1} + m_{21} + m_{22}\eta_{N+1}}, \quad (9)$$

$$T = t \cdot t^*, \quad (10)$$

式中  $\eta_0$  和  $\eta_{N+1}$  为光子晶体入射介质和出射介质的导纳。

### 3.2 光疏介质层厚度的选定及 $Q$ 值分析

若 A 为空气介质层,不考虑外界环境的变化及材料的吸收和色散,当入射光在界面处发生全反射时,产生的倏逝波会透入光疏介质层一定深度,合理地调整光疏介质层厚度可将倏逝波耦合输出,可以看出,光疏介质层 A 的厚度对倏逝波的传输有较大的影响。利用传输矩阵理论结合 Matlab 软件对不同厚度空气介质层的一维光子晶体进行数值模拟,仿真选定波长精度为 0.1 nm,介质层 A 的折射率为 1.0,入射角为  $56^\circ$ ,仿真结果如图 3 所示。

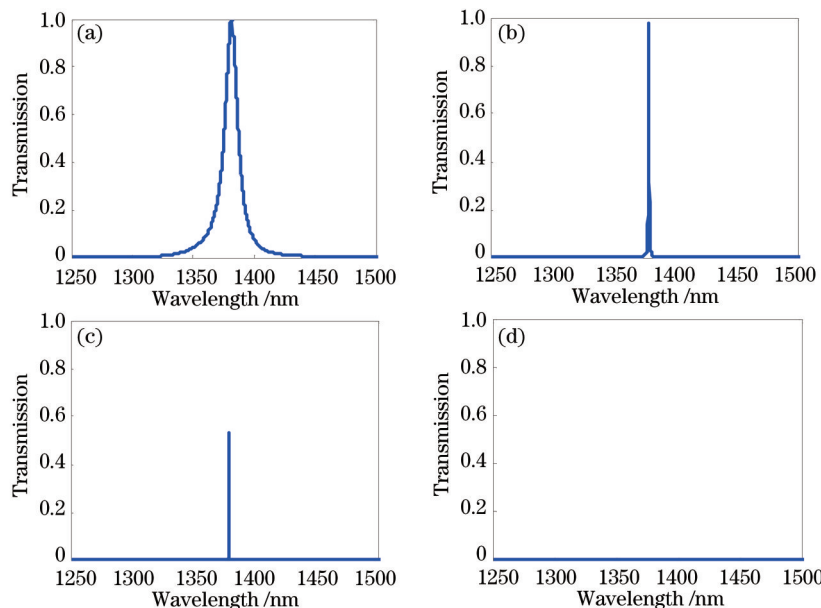


图 3 不同厚度介质层 A 对应的透射谱线。(a)  $d_A = 800$  nm ; (b)  $d_A = 1200$  nm ; (c)  $d_A = 1500$  nm ; (d)  $d_A = 2000$  nm

Fig.3 Transmission spectrum of different thicknesses of dielectric layer A. (a)  $d_A = 800$  nm ;

(b)  $d_A = 1200$  nm ; (c)  $d_A = 1500$  nm ; (d)  $d_A = 2000$  nm

为了准确描述光疏介质层厚度与透射率的关系,利用 Rsoft 软件对不同厚度介质层的光子晶体的透射光强进行模拟仿真,如图 4 所示,综合图 3 和图 4 可以看出,当介质 A 厚度较大时,倏逝波不能穿透介质层 A 进行传播,透射谱中观察不到透射峰。当介质 A 的厚度较小时,透射谱中存在谐振透射峰,随着 A 层厚度的增加,谐振峰的半峰全宽波长  $\Delta\lambda$  越小,相应的品质因数越大。但是随着  $\Delta\lambda$  的减小,谐振峰的半峰全宽小于波长精度,缺陷峰透射率较小,不利于测量。因此,综合考虑光谱透射率和缺陷峰  $Q$  值等因素,选定  $d_A = 1200$  nm。

当  $d_A = 1200$  nm,气体介质层 A 的折射率为 1.0,入射角为  $56^\circ$ 时,透射谱线如图 5 所示,缺陷峰的透射率近似为 1,缺陷峰波长为  $\lambda_d = 1378.8$  nm,半峰全宽波长为  $\Delta\lambda = 0.4$  nm,则对应品质因数  $Q$  为

$$Q = \frac{\lambda_d}{\Delta\lambda} = \frac{1378.8}{0.4} = 3447.0. \quad (11)$$

可以看出,基于倏逝波谐振的空气栅光子晶体具有高透射率和高  $Q$  值的光谱特性。

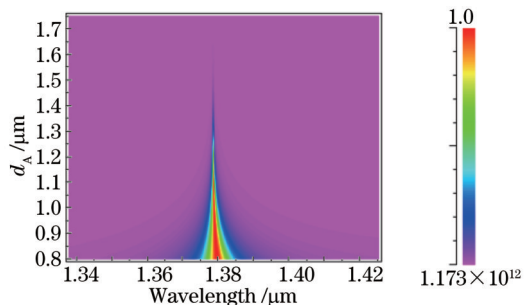


图4  $d_A$  与波长对应的透射光强分布谱图

Fig.4 Transmission light intensity distribution graph of  $d_A$  and wavelength

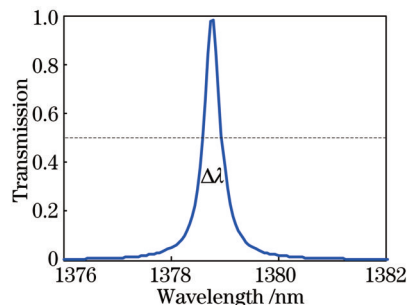


图5  $d_A = 1200 \text{ nm}$ ,  $n_A = 1.0$  时的透射谱线

Fig.5 Transmission spectrum when  $d_A = 1200 \text{ nm}$  and  $n_A = 1.0$

## 4 折射率传感特性分析

当光波以  $56^\circ$  的入射角经棱镜耦合入射到  $d_A = 1200 \text{ nm}$  的光子晶体传感结构中时,待测气体折射率变化对应的透射光谱图如图6所示,当气体介质层A的折射率分别为1.00、1.01、1.02、1.03和1.04时,其谐振波长分别为1378.8、1390.3、1402.5、1415.4和1429.2 nm。可以看出,随着待测气体折射率的增大,对应的谐振波长发生明显红移,两者之间成正比关系,与理论推导相吻合,因此可以通过探测透射光谱中缺陷峰波长的变化在一定范围内探测空气介质层的折射率变化。

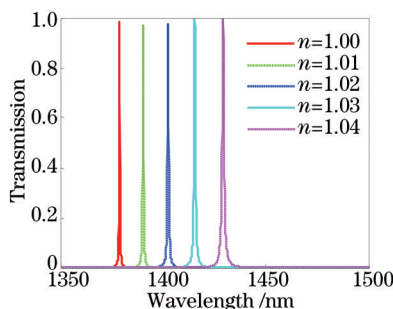


图6 气体折射率变化引起的缺陷峰波长的漂移

Fig.6 Defect peak wavelength shift with the change of gas refraction index

当待测气体折射率变化量为  $\Delta n = 0.04 \text{ RIU}$  时,谐振波长的漂移量为  $\Delta \lambda = 50.4 \text{ nm}$ ,进而得到其灵敏度  $S$  为

$$S = \frac{\Delta \lambda}{\Delta n} = 1260.0 \text{ nm/RIU} . \quad (12)$$

倏逝波在光密介质层形成的F-P腔中发生谐振,在待测气体介质层表面多次发生全反射,实现表面增强的电磁波与待测气体的充分接触,因此该传感结构对气体样本折射率的变化具有较高的敏感性,因此利用倏逝波进行传感可实现高  $Q$  值和高灵敏度的折射率检测。

## 5 结 论

提出了一种基于倏逝波谐振的空气栅光子晶体F-P腔折射率传感结构模型,将待测气体样本作为光子晶体的周期性介质层,当气体介质层的厚度满足一定条件时,倏逝波会在光子晶体中传输,在中心介质层形成F-P腔并发生谐振。利用倏逝波理论和谐振腔理论,建立谐振波长与待测气体折射率的关系模型,倏逝波在待测气体介质层表面不断发生全反射,倏逝波与待测气体样本充分作用,从而该传感结构对待测气体的折射率具有较高的敏感性,并结合传输矩阵理论对光子晶体传感模型进行数值模拟,其  $Q$  值可达3447.0,灵敏度可达1260.0 nm/RIU,因此基于倏逝波谐振形成的空气栅光子晶体F-P腔结构模型进行传感,具有高灵敏度、高  $Q$  值等特点,可为气体折射率检测提供一定的理论参考。

## 参 考 文 献

1 Tong Kai, Zeng Wenzhi, Gu Chaocong, *et al.*. Effects of coating on sensitivity of photonic crystal biosensor[J]. Chinese J Lasers, 1123001-5

- 2013, 40(2): 0214402  
童 凯, 曾文智, 谷朝聪, 等. 覆层介质对光子晶体生物传感器灵敏度的影响[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0214402.
- 2 M I Georgaki, A Botsialas, P Argitis, *et al.*. 1D polymeric photonic crystals as spectroscopic zero-power humidity sensors[J]. *Micro-electronic Engineering*, 2014, 115: 50-60.
- 3 M Rahmat, W Maulina, E Rustami, *et al.*. Performance in real condition of photonic crystal sensor based NO<sub>2</sub> gas monitoring system[J]. *Atmos Environment*, 2013, 79: 480-485.
- 4 Chen Long, He Sailing, Shen Linfang. Analysis for the propagation of evanescent waves and the photo tunneling effect in a multi-layered structure containing materials with negative refractive index[J]. *Acta Physica Sinica*, 2003, 52(10): 2386-2392.  
陈 龙, 何赛灵, 沈林放. 含负折射率介质的多层结构中倏逝波传播及隧道效应的分析[J]. 物理学报, 2003, 52(10): 2386-2392.
- 5 L Jin, J Zhou, C Xue, *et al.*. Multichannel double-polarization bandpass optical filter utilizing evanescent wave[J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2012, 123(11): 1030-1033.
- 6 Ali Saliminia, Réal Vallée. Fiber Bragg grating inscription based on optical filamentation of UV femtosecond laser pulses[J]. *Opt Commun*, 2014, 324: 245-251.
- 7 Meng Qingsheng, Ouyang Zhengbiao, Wang Zhongchun, *et al.*. Mode types and their related properties of one-dimensional photonic crystal resonant cavity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, 27(7): 1290-1294.  
孟庆生, 欧阳征标, 王仲淳, 等. 一维光子晶体谐振腔的模式类型及其性质[J]. 光学学报, 2007, 27(7): 1290-1294.
- 8 Yang Zheng, Zhang Zhiyou, Li Shuhong, *et al.*. Exposure developing simulation study of single-mode-resonance interference lithography[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33 (5): 0505001  
杨 正, 张志友, 李淑红, 等. 单模共振干涉光刻曝光显影模拟研究[J]. 光学学报, 2013, 33(5): 0505001.
- 9 M Renilkumar, Prita Nair. Properties of defect modes in geometrically chirped one-dimensional photonic crystals[J]. *Optical Materials*, 2011, 33: 853-858.
- 10 Li Xiangning, Jia Hongzhi, Zhu Weitao, *et al.*. *Engineering Optics*[M]. Beijing: Science Press, 2005: 240-241.  
李湘宁, 贾宏志, 朱维涛, 等. 工程光学[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 240-241.
- 11 Chen Ying, Lu Bo, Fan Huiqing. Refractive index sensing property of SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> photonic crystal defect cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6) : 0605003.  
陈 颖, 卢 波, 范卉青. SiO<sub>2</sub>-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>光子晶体缺陷腔的折射率传感特性[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0605003.
- 12 Gao Yongfeng. Design and Transmission Characteristics Investigation of Photonic Devices Based on Defect Photonic Crystal[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2013: 42-46.  
高永锋. 基于光子晶体缺陷结构光子器件设计与传输特性研究[D]. 镇江: 江苏大学, 2013: 42-46.

栏目编辑: 苏 岑