

一维镜像空气栅光子晶体折射率传感特性研究

陈颖 石佳 刘腾 董晶

(燕山大学电气工程学院, 测试计量技术及仪器河北省重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

摘要 基于光子晶体的局域特性, 提出一维镜像空气栅光子晶体结构。引入镜像结构在光子晶体中间形成缺陷腔, 从而在透射谱禁带中得到谐振透射峰。基于传输矩阵法, 建立谐振波长与光子晶体结构参数之间的关系模型。通过观测谐振透射峰值波长的漂移, 利用矩形空气栅光子晶体结构即可实现待测气体样本参数的动态监测。以甲醛为待测样本, 对该折射率传感器的 Q 值和灵敏度进行分析。结果表明, 其 Q 值可达 1739.48, 其灵敏度可达 $816.67 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ (RIU 表示单位折射率), 证明了结构设计的有效性。该结构可为空气污染监测和气体组分分析等方面提供一定的理论参考。

关键词 传感器; 镜像空气栅光子晶体; 折射率; 传输矩阵法; 缺陷腔

中图分类号 O436 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201434.1116003

Study on Refractive Index Sensing Property of One-Dimensional Mirror Air Gate Photonic Crystal

Chen Ying Shi Jia Liu Teng Dong Jing

(Hebei Province Key Laboratory of Test/Measurement Technology and Instrument, School of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

Abstract Based on the photonic local feature of photonic crystals, one-dimensional mirror air gate photonic crystal structure is proposed. Due to the introduction of mirror structure, a defect cavity is formed in the middle of the photonic crystal, and then the resonant transmission peak can be obtained in the forbidden band of transmission spectrum. The transfer matrix method is used to establish the relationship model between the resonant transmission peak and the structure parameters of the photonic crystals. Using the rectangular air gate photonic crystal structure, the dynamic monitoring of the detected gas sample parameters can be achieved from the shift of the resonant transmission peak. Taking formaldehyde as the detected sample, the Q value and sensitivity of the refractive index sensor are analyzed. The simulation results show that the Q value can attain to 1739.48 and the sensitivity can attain to $816.67 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}$ (RIU is refraction index unit), which demonstrates the effectiveness of the sensing structure. The structure can provide certain theoretical reference for air pollution monitoring and gas component analysis.

Key words sensors; mirror air gate photonic crystal; refractive index; transfer matrix method; defect cavity

OCIS codes 160.5298; 230.5298; 080.4035; 130.6010; 260.5740

1 引言

光子晶体是不同折射率的介质材料在空间周期性排列形成的人工晶体结构, 基于其光子带隙和光子局域特性, 通过调节光子晶体结构可有效地控制光在光子晶体中的传播, 在周期性结构中引入缺陷, 便可在禁带中获得具有某一特征频率的透射峰。因

此, 光子晶体在光学器件的设计中具有极为广泛的应用前景, 如光子晶体滤波器^[1]、光子晶体激光器^[2]、光子晶体光开关^[3]和光子晶体传感器^[4]等。在光子晶体传感器的研究和设计中, 大多是通过光学折射率调制^[5-6]的原理来实现的。当待测物理量发生变化时, 将导致光子晶体结构中材料的折射率

收稿日期: 2014-05-07; **收到修改稿日期**: 2014-06-17

基金项目: 国家自然科学基金(61201112, 61172044)、河北省自然科学基金(F2013203250, F2012203169)、中国博士后科学基金(2012M510765)

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
本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

发生变化,进而导致其光谱特性发生动态变化,通过建立光子晶体的光谱特性与材料折射率及外界待测物理量之间的关系,即可实现对待测物理量的测量。因此,设计光子晶体结构,研究和分析其折射率传感特性是十分必要的。

目前关于一维缺陷态光子晶体光学特性的研究较为广泛,沈杰等^[7]用替换式掺杂方式在准周期光子晶体中引入双缺陷,提出了一种双缺陷光子晶体结构;刘启能等^[8]在一维周期光子晶体中加入吸收缺陷,分析了杂质吸收对缺陷模的影响;闫江周等^[9]提出了一种非完整表面缺陷模式的光子晶体结构,并用来设计折射率传感器;陈海波等^[10]采用一种两端对称缺陷复合光子晶体结构,设计光学滤波器和光开关。然而,目前对镜像光子晶体的设计和研究还比较少。

本文提出镜像空气栅光子晶体结构,从Maxwell方程组出发,将传输矩阵法与谐振腔理论^[11]相结合,分析了一维镜像光子晶体的介质层参

数对光学传输特性的影响。采用镜像光子晶体结构,在晶体的中部形成缺陷腔,从而在透射谱的禁带中得到谐振透射峰,建立谐振透射波长与光子晶体结构参数之间的关系模型。将镜像光子晶体设计成空气栅结构,通过观测谐振透射峰值波长的漂移,利用矩形空气栅光子晶体结构即可实现待测气体样本参数的动态监测。

2 理论分析

通常,在光子晶体结构中改变某一层的厚度或在某一层处填充其他材料,将会打破其周期性排列,都可在周期性结构中引入缺陷。利用镜像光子晶体结构 $(AB)_m(BA)_m$ 作为基本结构,相当于在光子晶体中心构造出缺陷腔,如图1所示,周期介质层A、B的折射率和厚度分别为 $(n_a, d_a), (n_b, d_b)$,周期为 $d = d_a + d_b$ 。

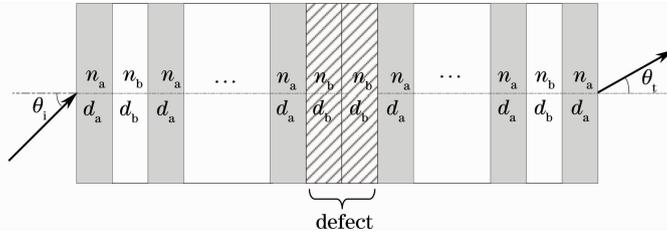


图1 一维镜像对称光子晶体结构

Fig. 1 Structure of an one-dimensional photonic crystal with mirror symmetry

当光以一定角度 θ_i 入射到该光子晶体结构中时,利用Maxwell方程及相应的边界条件,考虑TE模,分析光在光子晶体中的传播特性。

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

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

式中 \mathbf{M}_N 为第 N 层介质传输的特征矩阵,则电磁波在 N 层介质的特征方程为

$$\begin{pmatrix} E_1 \\ H_1 \end{pmatrix} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j \cdot \begin{pmatrix} E_{N+1} \\ H_{N+1} \end{pmatrix}, \quad (2)$$

对于有限多层介质膜系统,单层介质的传输矩阵表示为

$$\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} \cos \delta_j & -\frac{i}{\eta_j} \sin \delta_j \\ -i\eta_j \sin \delta_j & \cos \delta_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

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。逐层应用(3)式,就可以得到整个一维光子晶体的传输矩阵

$$\mathbf{M} = \prod_{j=1}^N \mathbf{M}_j = (\mathbf{M}_a \mathbf{M}_b)^m \cdot (\mathbf{M}_b \mathbf{M}_a)^m, \quad (4)$$

若 $\mathbf{M} = \begin{bmatrix} m_{11} & m_{12} \\ m_{21} & m_{22} \end{bmatrix}$,根据第一个界面和第 $N+1$ 个界面上的电磁分量方程,结合(2)~(4)式即可求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

$$t = \frac{E_{t,N+1}}{E_{i,1}} = \frac{2\eta_0}{m_{11}\eta_0 + m_{12}\eta_{N+1} + m_{21} + m_{22}\eta_{N+1}}, \quad (5)$$

$$T = t \cdot t^*, \quad (6)$$

式中 η_0 和 η_{N+1} 为光子晶体入射介质和出射介质的导纳。

由(1)~(6)式即可得出光波在周期性层状介质中的透射特性,透射特性与光子晶体介质层的折射

率、周期厚度、光的入射角及入射波长等因素有关,通过观察透射谱的变化,即可得出其光子带隙及谐振峰的漂移特性。

对于镜像光子晶体 $(AB)_m(BA)_m$,将周期性介质B挖空,制成空气栅结构,作为气体敏感层。对于以周期性材料B为敏感层的镜像空气栅光子晶体,光子晶体的周期层可以看作以B为腔体的级联法布里-珀罗(F-P)腔,光子晶体的中心处可以看作是以BB为腔体的缺陷腔,光子晶体缺陷峰的位置由光子晶体的周期层和缺陷层共同决定。对于周期层敏感介质B,光波进入该层后会在该层前后两个界面发生多次反射和透射,满足(7)式将形成谐振,即

$$\frac{2\pi}{\lambda_d} n_b d_b \cos \theta_b = k\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (7)$$

同理,对于缺陷层的敏感介质B,若满足(8)式即可形成谐振,即

$$\frac{2\pi}{\lambda_d} n_b (2d_b) \cos \theta_b = k\pi, \quad k = 1, 2, 3, \dots \quad (8)$$

综合(7)和(8)式,敏感介质层B若满足(8)式则光波通过整个一维光子晶体将产生谐振。显然,当 d_b 和 θ_b 不变时,随着 n_b 的增加,缺陷峰值波长将向长波长方向移动。

3 传感器结构与参数优化设计

利用激光干涉光刻和离子束刻蚀技术,在 SiO_2

基底上刻蚀如图2所示的一维镜像空气栅光子晶体结构,突出部分A为 SiO_2 层($n_a=1.45$),凹槽部分B为敏感气体介质层,周期层厚度 $d_a=241\text{ nm}$, $d_b=345\text{ nm}$ 。

利用传输矩阵法分析该光子晶体结构的传输特性,介于光谱仪分辨率的限制,仿真选定波长精度为 0.05 nm ,仿真结果如图3所示,可以看出周期数 m 越大,缺陷峰越尖锐,半峰全宽波长 $\Delta\lambda$ 越小,相应的品质因数 Q 越大。但随着 $\Delta\lambda$ 的减小,谐振峰的半峰全宽小于波长精度,仿真时使得透射率最大时的谐振波长 λ_d 可能采样不到,造成较大的测量误差,使得仿真得到缺陷峰的透射率会变小,综合考虑透射峰 Q 值、光谱透射率、结构的复杂性及光谱仪分辨率的限制,选定周期层数 $m=8$ 。通过以上讨论和分析,以TE波为例,利用传输矩阵法对所设计的光子晶体结构进行特性分析。

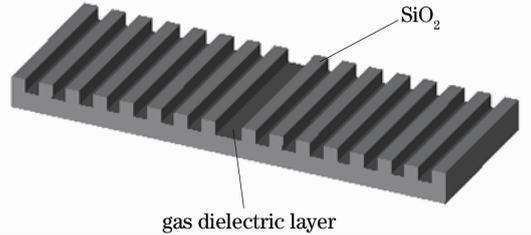


图2 传感结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the sensor structure

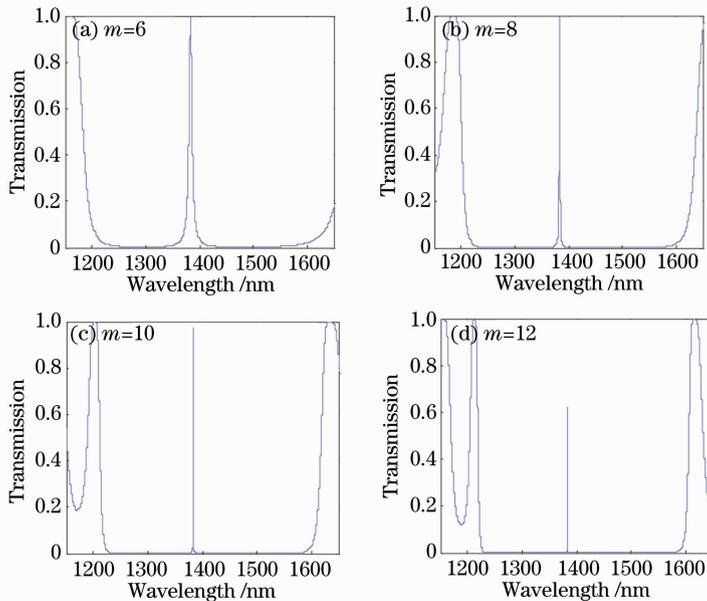


图3 不同周期层数对应的光谱图

Fig. 3 Spectra of different cycle layers

4 数值模拟与性能分析

4.1 折射率传感器的 Q 值及灵敏度分析

气体介质层 B 的折射率不同时,透射峰的位置会发生相应的变化,通过 Matlab 仿真得到气体的折

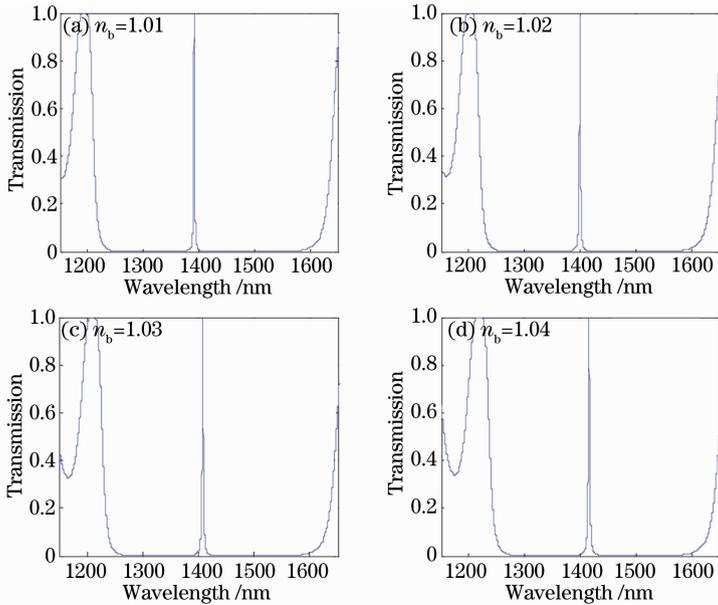


图 4 不同气体折射率对应的光谱缺陷峰

Fig. 4 Spectral peak defect of different gas refraction indexes

当气体介质层 B 的折射率为 1.01 时,透射谱如图 5 所示,缺陷峰的透射率 $T=1$,缺陷峰的波长 $\lambda_d=1391.58$ nm,半峰全宽波长为 $\Delta\lambda=0.8$ nm,则品质因数 Q 为

$$Q = \frac{\lambda_d}{\Delta\lambda} = 1739.48 \text{ nm}. \quad (9)$$

可以看出,该折射率传感器具有较高的 Q 值和透射率。

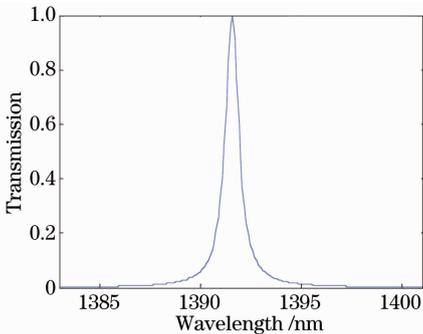


图 5 气体介质层折射率为 1.01 时的透射谱线

Fig. 5 Transmission spectrum of gas dielectric layer refractive index of 1.01

当气体层 B 的折射率分别为 1.0150,1.0151,1.0152,1.0153,1.0154,1.0155,1.0156 时,透射谱如图 6(a)所示。可以发现,即使待测气体的折射率变化很小时,缺陷峰也会发生相应的漂移,通过仿真计算

射率为 1.01,1.02,1.03,1.04 的透射谱线,如图 4 所示,对应的缺陷透射峰波长分别为 1391.58,1399.67,1407.70,1415.66 nm。可以看出,随着气体折射率的增大,缺陷峰的波长发生明显的红移。

得到气体介质层 B 的折射率由 1.0150 变化到 1.0156 时,缺陷峰波长由 1395.63 nm 漂移到 1396.12 nm,该传感器的灵敏度 S 为

$$S = \frac{\Delta\lambda_d}{\Delta n_b} = 816.67 \text{ nm} \cdot \text{RIU}^{-1}, \quad (10)$$

式中 RIU 表示单位折射率。可以看出,该光子晶体传感器可以实现较高灵敏度的折射率检测,并且缺陷峰波长 λ_d 与介质层折射率 n_b 有较高的线性拟合关系,如图 6(b)所示,缺陷峰波长与气体介质层折射率可线性拟合为 $\lambda_d=816.67 \times n_b + 566.71$ 。

4.2 传感器对甲醛含量的响应特性

如图 7 所示,该光子晶体传感器系统主要包括光源(In-GaAsP 型激光器,可调谐波长范围为 1100~1650 nm),光子晶体传感器芯片,光谱采集系统及计算机软件分析系统。实验过程是将光子晶体所在的气室用真空泵抽成真空,并将整个实验装置置于待测环境中,使环境中的气体充满光子晶体的空气栅内,形成气体介质层,充当光子晶体的周期性材料。激光器发出的信号通过准直镜、起偏器、光电调制器、扩束器之后,垂直射入光子晶体芯片,另一侧采用微型光谱仪来探测透射光,光谱再经过光谱分析仪(MSC9710C)对采集的数据进行分析。

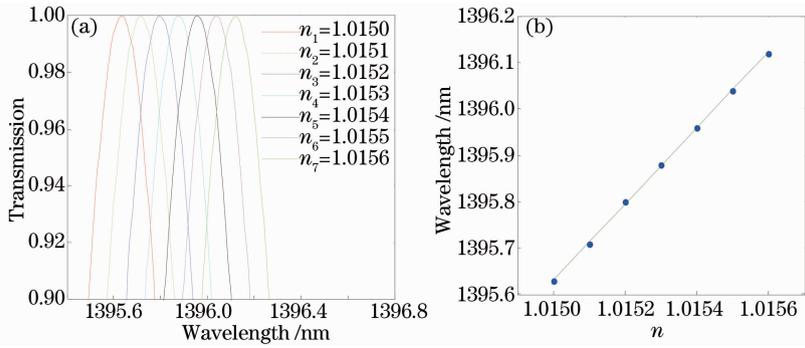


图 6 不同气体折射率的响应特性。(a)不同折射率气体介质层对应的透射谱线；(b)缺陷峰波长与气体介质层折射率的线性拟合关系

Fig. 6 Response characteristics of different gas dielectric layer refractive indexes. (a) Transmission spectra of dielectric layers with different gas refractive indexes; (b) linear fitting relationship between the defect peak wavelengths and the gas dielectric layer refractive indexes

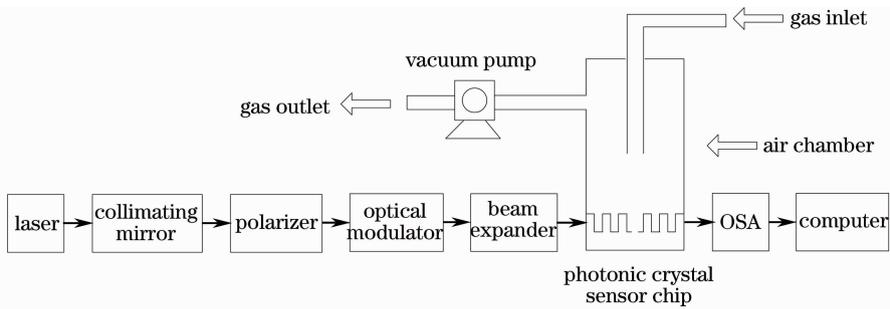


图 7 传感系统结构框图

Fig. 7 Sensing system structure

由于甲醛的折射率较高,其含量对待测气体的折射率影响较大,暂不考虑其他组分对空气折射率的影响,利用上述的一维光子晶体结构传感器测量混合气体中甲醛的含量,不同含量的甲醛混合气体的折射率满足

$$n = x \times n_{\text{CH}_2\text{O}} + (1 - x) \times n_0, \quad (11)$$

式中 x 为甲醛的含量(即质量分数,下同), $n_{\text{CH}_2\text{O}}$ 、 n_0 分别为甲醛和新鲜空气的折射率,又由 $n_{\text{CH}_2\text{O}} = 1.3746$, $n_0 = 1.000272$, 所以有

$$n = 1.000272 + 0.37433 \times x, \quad (12)$$

仿真甲醛含量分别为 10%, 20%, 30%, 40%, 50% 时的透射谱线,如图 8(a)所示,发现甲醛的含量增大时,缺陷峰波长向长波长方向漂移。为了表达甲醛含量与其缺陷峰波长的关系,将甲醛含量与对应的谐振峰值波长数据在 Matlab 中进行拟合,可得如图 8(b)所示的拟合曲线,拟合度达 0.9993。其中,甲醛含量与缺陷峰波长的关系为

$$x = 0.00373\lambda_d - 5.17164, \quad (13)$$

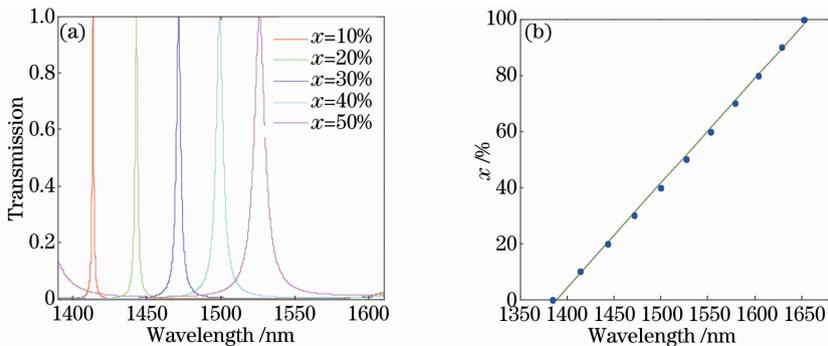


图 8 不同甲醛含量的响应特性。(a)不同甲醛含量对应的透射谱线；(b)缺陷峰波长与甲醛含量的线性拟合

Fig. 8 Response characteristics of different formaldehyde contents. (a) Transmission spectra of different formaldehyde contents; (b) linear fitting between the defect peak wavelengths and the formaldehyde contents

则该传感器对甲醛含量测量的灵敏度为

$$S = \frac{\Delta\lambda_d}{\Delta x} = 268.4 \text{ nm}. \quad (14)$$

结果表明,所设计的一维镜像光子晶体折射率传感器具有良好的光谱响应特性和较高的灵敏度,可为实现甲醛含量的检测提供了一种行之有效的方案。

5 结 论

提出了一种一维镜像空气栅光子晶体折射率传感器结构,待测的气体环境作为光子晶体的介质材料之一形成空气栅。将传输矩阵与谐振腔理论相结合,分析了一维镜像光子晶体的光学传输特性及其介质层的参数对其透射谱的影响,从而建立谐振波长与气体介质层折射率的关系模型,通过观测谐振波长的漂移,实现对待测样本的动态监测。以含甲醛气体为待测样本,通过数值模拟,得出了甲醛含量与缺陷峰波长的关系,其灵敏度可达 268.4 nm。该传感器结构简单,并具有高 Q 值和高灵敏度的优点,特别适宜在低浓度、小分子和恶劣的环境下进行测量,将在空气污染监测及气体组分分析等方面具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- 1 Liu Yanhong, Dong Lijuan, Liu Lixiang, *et al.*. Narrow bandpass angular filter based on anisotropic photonic band gap [J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(8): 0823001.
刘艳红,董丽娟,刘丽想,等.基于各向异性光子晶体带隙的窄带带通角度滤波器[J].*光学学报*,2013,33(8):0823001.
- 2 U Chakravarty, A Kuruvilla, H Harikrishnan, *et al.*. Study on self-pulsing dynamics in Yb-doped photonic crystal fiber laser [J]. *Opt & Laser Technol*, 2013, 51: 82–89.
- 3 W Rao, Y Song, M Liu, *et al.*. All-optical switch based on photonic crystal microcavity with multi-resonant modes [J].

- Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2010, 121(21): 1934–1936.
- 4 Tong Kai, Zeng Wenzhi, Gu Chaocong, *et al.*. Effects of coating on sensitivity of photonic crystal biosensor [J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(2): 0214002.
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):0214002.
- 5 V N Konopsky, E V Alieva. A biosensor based on photonic crystal surface waves with an independent registration of the liquid refractive index [J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2010, 25(5): 1212–1216.
- 6 F L Hsiao, Y T Ren. Computational study of slot photonic crystal ring-resonator for refractive index sensing [J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, 205: 53–57.
- 7 Shen Jie, Ma Guohong, Zhang Zhuangjian, *et al.*. Research on two-photon absorption enhancement in one-dimensional photonic crystals with double defect modes [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, 26(9): 1404–1408.
沈杰,马国宏,章壮健,等.双缺陷模一维光子晶体的双光子吸收增强研究[J].*光学学报*,2006,26(9):1404–1408.
- 8 Liu Qineng. Effect of impurity absorption on one-dimensional photonic crystal defect mode [J]. *Chinese J Lasers*, 2007, 34(6): 777–780.
刘启能.杂质吸收对一维光子晶体缺陷模的影响[J].*中国激光*,2007,34(6):777–780.
- 9 Yan Jiangzhou, Wu Yihui, Xuan Ming, *et al.*. High resolution refractive index sensor based on non-complete surface state of 1D photonic crystal [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(2): 565–569.
闫江周,吴一辉,宣明,等.基于非完整表面缺陷模式的一维光子晶体高分辨率折射率传感器[J].*光谱学与光谱分析*,2011,31(2):565–569.
- 10 Chen Haibo, Hu Sumei, Gao Yingjun. Multiple channeled filters and optical switches using compound photonic crystal with two symmetrical defect layer at the two ports [J]. *Journal of Luminescence*, 2010, 31(1): 7–11.
陈海波,胡素梅,高英俊.用两端对称缺陷复合光子晶体实现多通道滤波和光开关[J].*发光学报*,2010,31(1):7–11.
- 11 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.

栏目编辑:王晓球