

基于紧束缚法的空气栅光子晶体双缺陷模传感机理研究

陈颖¹ 石佳¹ 卢波¹ 刘腾¹ 董晶¹ 朱奇光² 陈卫东²

¹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

²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 为了降低外界环境温度变化对单缺陷光子晶体折射率传感的干扰,提出了一种双缺陷空气栅光子晶体的传感模型。通过紧束缚法分析光子晶体双缺陷模的产生机理,并结合传输矩阵理论分析该光子晶体结构的光学传输特性。针对折射率和温度的交叉敏感问题,提出了一种消除温度干扰的方法,并建立两缺陷模波长与光子晶体结构参数之间的关系模型。利用该空气栅光子晶体,通过观测双缺陷峰波长的漂移,即可实现待测气体样本参数的动态监测。通过数值模拟可以发现,两缺陷模的波长均与待测气体的折射率呈线性关系,该传感具有结构简单和精度高等优点。

关键词 传感器; 空气栅光子晶体; 双缺陷; 紧束缚法; 折射率

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0514001

Study on Double Defect Mode Sensing Mechanism of Air Gate Photonic Crystal Based on Tight-binding Method

Chen Ying¹ Shi Jia¹ Lu Bo¹ Liu Teng¹ Dong Jing¹ Zhu Qiguang² Chen Weidong²

¹Measurement Technology and Instrument Key Laboratory of Hebei Province, College of Electrical Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²The Key Laboratory for Special Fiber and Fiber Sensor of Hebei Province, College of Information Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract In order to reduce the interference of ambient temperature changes to the single defect photonic crystal sensing, a double defect mode sensing model of air gate photonic crystal is proposed. The mechanism of the double defect mode is analyzed by tight-binding method, and the optical transmission property of the photonic crystal structure is analyzed by the transmission matrix method. For the cross-sensitive issue of temperature and refractive index, a method to eliminate the temperature interference is proposed, and the relation model between the two defect mode wavelengths and the structure parameters of the photonic crystal are established. Using the 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. The numerical simulation shows that the relation between double defect sensor has the features of double defect mode wavelengths and the gas refractive index is linear. The sensor has the advantages of simple structure and high precision.

Key words sensors; air gate photonic crystal; double defect; tight-binding method; refractive index

OCIS codes 280.4788; 230.5298; 160.2220

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,具有独特的禁带特性和光

收稿日期: 2015-01-05; 收到修改稿日期: 2015-01-12

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, F2012203169)、河北省普通高学校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

子局域特性。基于光子局域特性,通过调节光子晶体结构及参数可以有效地控制光在光子晶体中的传播性能。在光子晶体中掺杂多个缺陷,局域在不同缺陷处的电磁波之间将产生耦合作用,导致本征模式分裂,光子禁带中会局域多个缺陷模,合理设计缺陷态光子晶体^[1]结构,利用光子晶体缺陷模具有较高的意义,目前已被广泛应用于光子晶体滤波器^[2]、光子晶体光纤^[3]、光子晶体传感器^[4]等方面。

近年来,光子晶体传感器因其灵敏度高、响应速度快、结构紧凑等优点,在生物分子检测、环境分析等领域得到了广泛的关注。在光子晶体传感器的设计和研究中,大多是通过折射率调制^[5-6]来实现的,它主要是通过探测折射率的变化,实现对待测物质种类、组分或浓度等信息的监测。闫江周等^[7]提出了一种非完整表面缺陷模式的一维光子晶体折射率传感器,并用来探测有机溶剂二甲基砷的折射率;童凯等^[8]基于两种介质的热光效应和热膨胀效应,提出了一种一维缺陷光子晶体温度传感器。而光子晶体折射率传感器的研究,大部分是通过观测单缺陷模的漂移来探测待测物质折射率的变化,这种折射率传感模式在待测物的折射率测量时,温度的影响不可避免,从而易造成较高误差。因此,如何设计光子晶体结构模型,克服温度和折射率的交叉敏感十分必要。

为了实现气体折射率的探测,本文在光栅结构模型^[9]的基础上,与不同周期性材料组成的光子晶体结构相结合,提出了一种空气栅光子晶体双缺陷模传感结构模型。从麦克斯韦方程出发,基于紧束缚理论分析了光子晶体双缺陷模的产生机理,并结合传输矩阵理论^[10]分析光子晶体的光学传输特性。通过在光子晶体中心掺杂缺陷,在透射谱禁带中得到两个分裂的缺陷峰,利用两缺陷模合理的差动可有效地减小环境温度变化对缺陷波长的干扰。通过观测两缺陷波长的漂移,利用空气栅光子晶体即可实现待测气体样本折射率的动态监测。

2 结构模型与理论分析

电磁波在周期性层状介质中的传播特性由麦克斯韦方程决定,利用传输矩阵法进行逐层分析可得其传输特性。在由两种材料周期性生长的一维镜像对称光子晶体的中心对称层掺杂两层介质材料C,以此来构造形如 $(AB)_mCC(BA)_m$ 的光子晶体结构,如图1所示。

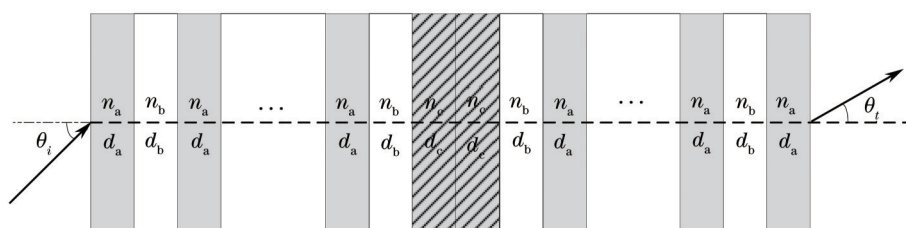


图1 $(AB)_mCC(BA)_m$ 光子晶体结构

Fig.1 Photonic crystal structure of $(AB)_mCC(BA)_m$

电磁波在光子晶体中的传播特性,满足麦克斯韦方程:

$$-\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r}) \frac{\omega^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}), \quad (1)$$

式中 ω 为入射光的频率, c 为真空中的光速, $\varepsilon(\mathbf{r})$ 为介质层的介电常数。

光子晶体中存在单个缺陷时,光子禁带中存在本征频率为 ω_0 的强局域单缺陷模,满足(1)式,即

$$-\nabla^2 \mathbf{E}(\mathbf{r}) = \varepsilon(\mathbf{r}) \frac{\omega_0^2}{c^2} \mathbf{E}(\mathbf{r}). \quad (2)$$

光子晶体中存在两个缺陷时,本征模式 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 将分裂为两个单独的模式 $\mathbf{E}(\mathbf{r})$ 和 $\mathbf{E}_i(\mathbf{r}-\mathbf{R})$, 其中 \mathbf{R} 是两缺陷的相对位置,光子晶体的本征频率 ω_0 就会分裂成两个相互耦合的缺陷模式 ω_1 和 ω_2 ,由紧束缚理论^[11]可知

$$\omega_1 = \omega_0 \left(\frac{1 + J_0 + J_1 + J_2}{1 + J_2} \right)^{1/2}, \quad \omega_2 = \omega_0 \left(\frac{1 + J_0 - J_1 - J_2}{1 - J_2} \right)^{1/2}, \quad (3)$$

式中 J_0 为单缺陷作用项, J_1 和 J_2 两分裂缺陷模的耦合系数。缺陷的距离越小,缺陷模之间耦合作用越强, J_1 和 J_2 就越大,可见缺陷模频率与光子晶体掺杂缺陷的相对位置有关,通过调控缺陷层的相对位置,即可调

控光子晶体缺陷模。

利用激光干涉光刻^[12]和离子束刻蚀技术^[13],可在利用旋涂法^[14]层层沉积制备的一维光子晶体的基础上刻蚀如图2所示的一维空气栅光子晶体结构,其中介质A选取折射率为 $n_a = 3.42$ 的Si,介质B选取折射率为 $n_b = 2$ 的水晶,凹槽部分为敏感气体介质层。周期性介质的光学厚度为中心波长的1/4,即 $n_a d_a = n_b d_b = \lambda_0/4$, $\lambda_0 = 1400 \text{ nm}$ 为禁带中心波长。

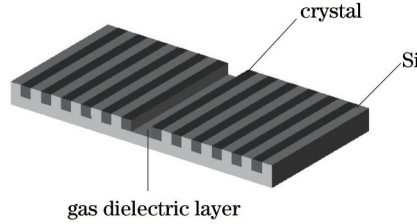


图2 传感结构示意图

Fig.2 Schematic diagram of the sensor structure

当利用光子晶体进行待测气体折射率的测量时,温度的变化无法避免,因而,解决温度和折射率的交叉敏感问题十分必要。两个透射波长的偏移量分别为

$$\Delta\lambda_1 = K_{T1} \Delta T + K_{n1} \Delta n, \quad (4)$$

$$\Delta\lambda_2 = K_{T2} \Delta T + K_{n2} \Delta n, \quad (5)$$

式中 K_T 和 K_n 分别为温度和折射率变化系数, ΔT 为温度的变化量, Δn 为气体浓度或含量变化带来的折射率的变化量。

由(4)式和(5)式可得

$$\Delta\lambda_2 - \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \Delta\lambda_1 = \frac{K_{T1}K_{n2} - K_{n1}K_{T2}}{K_{T1}} \Delta n, \quad (6)$$

即

$$(\lambda_2 - \lambda_{2,0}) - \frac{K_{T2}}{K_{T1}} (\lambda_1 - \lambda_{1,0}) = \frac{K_{T1}K_{n2} - K_{n1}K_{T2}}{K_{T1}} (n - n_0), \quad (7)$$

式中 $\lambda_{1,0}$ 、 $\lambda_{2,0}$ 分别为低波段和高波段的初始波长, n_0 为气体的初始折射率, λ_1 、 λ_2 分别为测得的两缺陷峰波长, n 为待测的气体的折射率。

(7)式可以简化为

$$\lambda_2 - A\lambda_1 = C \times n + B, \quad (8)$$

式中 A 、 B 、 C 为常量, $A = \frac{K_{T2}}{K_{T1}}$, $B = \lambda_{2,0} - \frac{K_{T2}}{K_{T1}} \lambda_{1,0} - \frac{K_{T1}K_{n2} - K_{n1}K_{T2}}{K_{T1}} n_0$, $C = \frac{K_{T1}K_{n2} - K_{n1}K_{T2}}{K_{T1}}$ 。

可以看出 $\lambda_2 - A\lambda_1$ 是折射率的线性函数与 T 无关,这样通过观察两波长的漂移,利用两缺陷模合理的差动即可得到气体浓度的变化带来的折射率的变化,同时消除了温度带来的误差。

3 数值模拟及分析

3.1 中心缺陷层厚度对缺陷模的影响

若缺陷层C为空气缺陷,不考虑外界环境温度的变化,当一束光垂直入射到该光子晶体中,缺陷层介质材料C的厚度对缺陷模将产生较大的影响。介质材料C的厚度较小时,中心缺陷层可以看作单个缺陷,禁带中会出现一个频率为 ω 的局域模,随着缺陷介质材料厚度的增加,光子晶体的禁带中会出现频率不同的两个模式 ω_1 和 ω_2 ,利用传输矩阵理论对不同缺陷层厚度的一维光子晶体进行数值模拟,如图3所示。

缺陷层厚度与波长对应的透射光强分布如图4所示,在透射光强谱图中可以看出,光子禁带在1100~1600 nm处,当 $d_c = 200 \text{ nm}$ 时,在光子禁带中能看到两个频率间隔较大的缺陷峰,为了得到双缺陷透射峰,以下仅对 $d_c = 200 \text{ nm}$ 的光子晶体进行讨论分析。

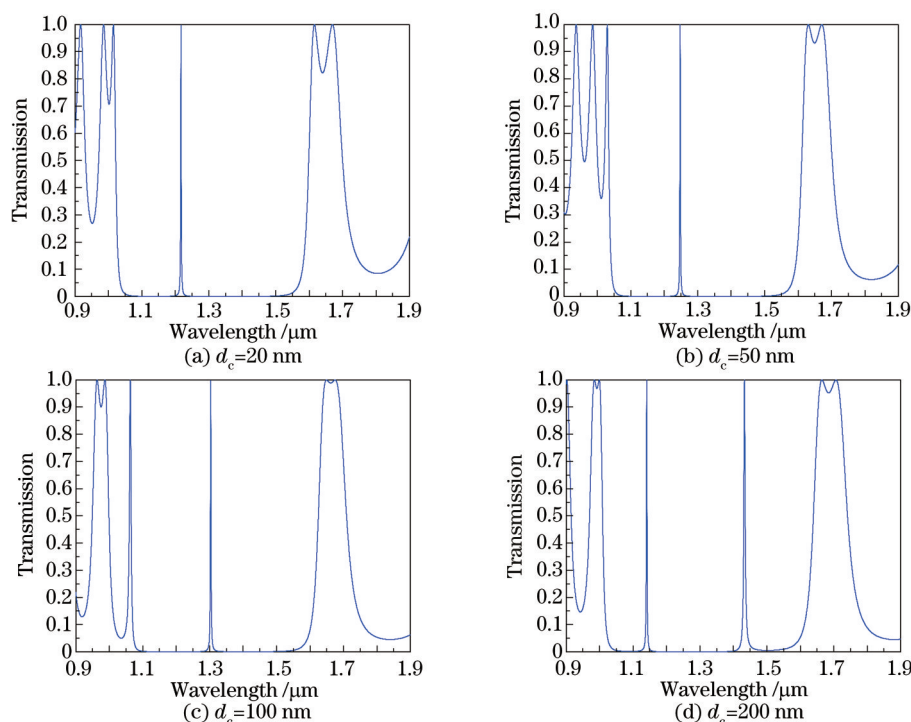


图3 不同缺陷层厚度对应的透射谱线

Fig.3 Transmission spectrum of defect layer of different thicknesses

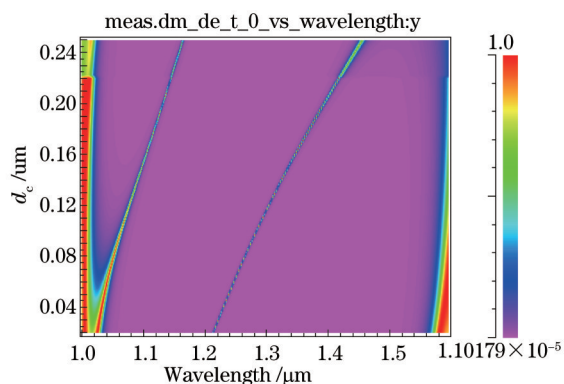


图4 缺陷层厚度与波长对应的透射光强分布谱图

Fig.4 Transmission intensity distribution of d_c and the wavelength

3.2 周期层数对光子晶体透射谱线的影响

当一束光正入射到 $d_c = 200$ nm 的一维光子晶体中,周期层层数 m 对透射谱线有很大的影响。利用传输矩阵理论分析不同周期层数的光子晶体的传输特性,仿真选定波长精度为 0.1 nm,仿真结果如图 5 所示。

由图 5 可知,周期层数 m 越大,禁带中两缺陷峰的半峰全宽波长 $\Delta\lambda$ 越小,相应的品质因数越大。但与此同时,随着 $\Delta\lambda$ 的减小,缺陷峰的半高全宽小于波长精度,导致缺陷峰峰值有所降低,不利于测量。从图中

可以看出,周期层数 $m = 6$ 时,两缺陷峰的透射率为 1,高低波段缺陷峰的 Q 值分别为 $Q_1 = \frac{\lambda_{d2}}{\Delta\lambda_2} = 1257.6$,

$Q_2 = \frac{\lambda_{d1}}{\Delta\lambda_1} = 995.7$ 。综合考虑透射峰 Q 值、光谱透射率及结构的复杂性,选定周期层数 $m = 6$,故以下仅讨论周

期层数为 6,缺陷层厚度为 200 nm 的一维光子晶体结构。

4 折射率传感特性分析

随着气体介质层的折射率的增加,透射光谱会发生明显的变化,当气体介质层的折射率从 1.000 增大到 1.020 时,低波段的缺陷模波长分别为 1131.8, 1132.3, 1132.7, 1133.1, 1133.6 nm,高波段的缺陷模波长分别为

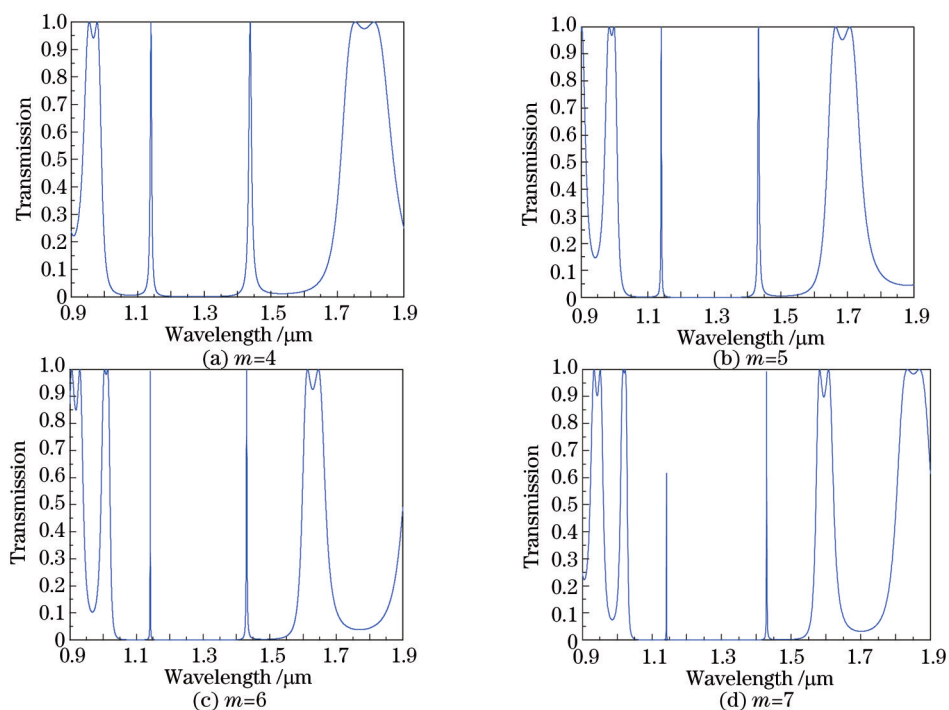


图5 不同周期层对应的光谱图

Fig.5 Spectrum of different cycle layers

1394.0, 1395.9, 1397.7, 1399.6, 1401.5 nm, 如图6所示,可以看出,在光谱分辨率为0.1 nm时,对折射率的探测可以达到 10^{-3} ,并且随着气体折射率的增加,光子禁带中高低波段的缺陷模均会随着缺陷层折射率的增大发生明显红移,缺陷峰的峰值和 Q 值几乎不变。

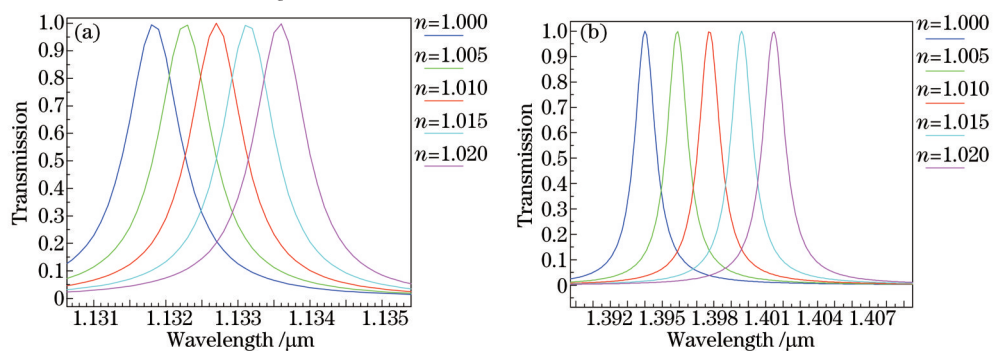


图6 不同折射率气体介质层对应的透射谱线。(a) 低波段缺陷峰;(b) 高波段缺陷峰

Fig.6 Transmission spectrum of gas with different refractive indexes. (a) Defect peak of low band; (b) defect peak of high band

为了准确地描述两缺陷模波长与待测气体折射率之间的关系,应用Rsoft软件对不同折射率介质光子晶体

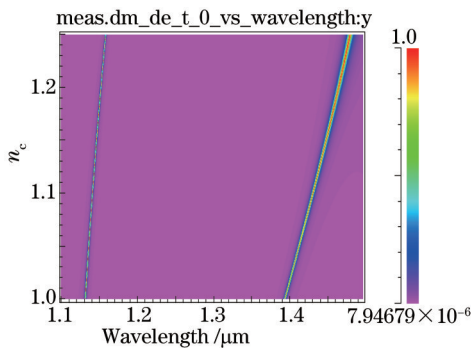


图7 待测气体折射率与波长对应的透射光强分布谱图

Fig.7 Transmission intensity distribution of the tested gas refractive index and the wavelength

透射光强进行模拟仿真分析,可得待测气体折射率与波长对应的光强分布谱,如图7所示。可以看出,在1100~1500 nm的光子禁带中局域两条明显的透射峰,两缺陷峰缺陷波长均与待测气体折射率有较高的线性关系。

为了准确地发现待测气体折射率与两缺陷峰波长之间的关系,将这些数据进行线性拟合,可以发现,两缺陷模波长均与待测气体的折射率可线性拟合为 $\lambda_1 = 103.8n + 1028.1$, $\lambda_2 = 350.9n + 1044.0$ 。这样,利用高低波段的缺陷峰即可实现待测气体折射率的检测,通过两缺陷的差动即可消除外界环境温度带来的误差。

5 结 论

提出了一种基于紧束缚法的空气栅光子晶体双缺陷模传感结构模型,待测气体样本作为光子晶体的缺陷介质材料层。当缺陷介质层的厚度满足一定条件时,缺陷模会分裂成两个不同的模式,并且随着敏感介质层的折射率变化,两缺陷模波长均随待测气体折射率的增大而增大。通过数值模拟,得到了两缺陷模与待测气体折射率的关系。通过两缺陷模合理的差动即可消除外界环境温度带来的误差。该传感结构简单,并且有效地克服了外界环境温度变化对缺陷模位置的干扰,具有较高的精度,可为气体折射率的检测提供一定的理论参考。

参 考 文 献

- 1 M Rahmat, W Maulina, E Rustami, *et al.*. Performance in real condition of photonic crystal sensor based NO₂ gas monitoring system [J]. Atmospheric Environment, 2013, 79: 480-485.
- 2 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.
- 3 He Xiaoli, Chen Zhe, Yu Jianhui, *et al.*. Theoretical analysis of optical propagation characteristics of side-polished photonic crystal fiber[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(3): 0306003.
何小莉,陈哲,余健辉,等.侧边抛磨光子晶体光纤传输特性理论分析[J].光学学报,2014,34(3):0306003.
- 4 Chen Ying, Lu Bo, Fan Huiqing. Refractive index sensing property of SiO₂-Al₂O₃-SiO₂ photonic crystal defect cavity[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0605003.
陈颖,卢波,范卉青.SiO₂-Al₂O₃-SiO₂光子晶体缺陷腔的折射率传感特性[J].中国激光,2014,41(6):0605003.
- 5 L Li, G Q Liu, K Huang, *et al.*. The water content sensor in heavy oil based on one-dimensional photonic crystals[J]. Optik, 2013, 124(16): 2519-2521.
- 6 Hsiao F L, Ren Y T. Computational study of slot photonic crystal ring-resonator for refractive index sensing[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2014, 205: 53-57.
- 7 Yan Jiangzhou, Wu Yihui, Xuan Ming, *et al.*. High resolution refractive index sensor based on non-complete surface state of 1-D 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.
- 8 Tong Kai, Cui Weiwei, Wang Meiting, *et al.*. Temperature measurement with one dimensional defect photonic crystal[J]. Acta Phys Sin, 2008, 57(2): 762-765.
童凯,崔卫卫,汪梅婷,等.一维缺陷光子晶体温度的测量[J].物理学报,2008,57(2):762-765.
- 9 Ali Salimnia n, Réal Vallée. Fiber Bragg grating inscription based on optical filamentation of UV femtosecond laser pulses[J]. Optics Communications, 2014, 324: 245-251.
- 10 Yi Lin, Huan Xu. Research in light transmission characteristics of 1-dimensional photonic crystal[J]. Optik, 2012, 123(4): 314-318.
- 11 Huang Xiaoqin, Cui Yiping. Degeneracy and split of defect states in photonic crystals[J]. Chin Phys Lett, 2003, 20(10): 1721-1724.
- 12 Liu Guoqiang, Zhang Jin, Zhou Chongxi. Implementation method for three-beam interference lithography[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011, 23(12): 3250-3254.
刘国强,张锦,周崇喜.三光束激光干涉光刻的实现方法[J].强激光与粒子束,2011,23(12):3250-3254
- 13 M Renilkumar, Prita Nair. Properties of defect modes in geometrically chirped one-dimensional photonic crystals[J]. Optical Materials, 2011, 33(6): 853-858.
- 14 Bai Ming, Zhao Baobao, Song Yanwei, *et al.*. Fabrication of one-dimensional photonic crystal of PAAm/TiO₂[J]. Journal of Yanan University (Natural Science Edition), 2010, 29(4): 71-75.
白明,赵宝宝,宋延卫,等.PAAm/TiO₂一维光子晶体的制备[J].延安大学学报(自然科学版),2010,29(4):71-75.

栏目编辑:韩峰