

文章编号: 1000-7032(2018)08-1157-06

光子晶体传感器对溶液折射率和浓度的测量

李旭峰^{1*}, 刘圆圆¹, 赵亚丽²

(1. 太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原 030024; 2. 中国电子科技集团 第三十三研究所, 山西 太原 030024)

摘要: 为了得出光子晶体缺陷透射峰位置与溶液折射率及溶液浓度的关系,从而得知溶液的折射率和浓度之间的关系。本文构造了 $(AB)^N C (AB)^N$ 型的一维光子晶体模型,采用时域有限差分法对该一维光子晶体的透射光谱做了数值模拟和分析。结果表明,蔗糖溶液折射率和浓度与光子晶体透射峰位置之间为严格的线性关系,光子晶体缺陷透射峰位置随溶液浓度百分比的改变而变化。该溶液测量方法的溶液折射率测量灵敏度高达498.087 nm/RIU。这为光子晶体溶液折射率及浓度测量传感器的设计制作提供了参考,有助于该溶液浓度检测传感器在实际应用中的推广。

关键词: 光子晶体; 缺陷; 透射谱; 溶液浓度; 时域有限差分法

中图分类号: 0439

文献标识码: A

DOI: 10.3788/fjxb20183908.1157

Measurement of Refractive Index and Concentration of Solution Based on Photonic Crystal Sensor

LI Xu-feng^{1*}, LIU Yuan-yuan¹, ZHAO Ya-li²

(1. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, China;

2. No. 33 Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation, Taiyuan 030024, China)

* Corresponding Author, E-mail: xfli@mail.dlut

Abstract: In order to obtain the relationship between the position of the transmission peak of the photonic crystal defect and the refractive index (concentration) of the solution, the model of $(AB)^N C (AB)^N$ one-dimensional photonic crystal was constructed in this paper. The transmission spectra of the one-dimensional photonic crystal were numerically simulated and analyzed by the finite difference time domain method. The results show that there is a strict linear relationship between the refractive index and the concentration of sucrose solution and the peak position of photonic crystal. The position of the transmission peak changes with the percentage of solution concentration. The solution measurement method of solution refractive index measurement sensitivity up to 498.087 nm/RIU. This provides a reference for the design and manufacture of photonic crystal solution refractive index and concentration measurement sensor, which is helpful for the promotion of the solution concentration detection sensor in practical application.

Key words: photonic crystals; defect; transmission spectrum; solution concentration; finite difference time domain method

收稿日期: 2017-12-11; 修订日期: 2018-02-04

基金项目: 山西省应用基础研究计划(201701D121007, 201701D121050)资助项目

Supported by Shanxi Provincial Research Foundation for Basic Research(201701D121007, 201701D121050)

1 引 言

光子晶体^[1-2]是一种在空间某一或某几个方向上介电常数按一定周期变化的、由不同折射率的介质材料周期性排列而成的人工材料^[3-4]。与半导体晶格对电子波函数的调制相类似,当电磁波在光子晶体中传播由于受布拉格散射的作用,其能量也会形成能带结构^[5-6]。由于光子晶体存在光子带隙,因此其本身就是一个天然的滤波器^[7-9],在微波电路、天线以及全新光子器件设计等方面具有重要的科研应用价值。光子晶体理论最早是由 E Yablonovitch 和 S John 分别独立提出^[10],此后经过近二十年的发展,对其理论与实验的研究已逐步从微波阶段发展到红外、可见光波段,并且在其制备和加工方面也取得了一定的进展^[11-14],目前对光子晶体溶液浓度测量的研究已成为国内外微纳光子学领域中的热点问题之一^[15-19]。一维光子晶体溶液浓度及折射率测量传感器由于制作工艺比较简单,成本相对较低,相比于其他传感测量器件,它具有灵敏度高、抗干扰能力强、结构简单等特点,所以成为了液体传感器的研究热点之一。溶液浓度测量与控制应用广泛,如生物技术、现代科学研究、制药、饮料、食品、化学工业和农业等领域,这是一个提高产品质量的重要手段。测量溶液浓度的方法有很多种,如极化旋转法、基于 Lambert-Beer 法则的光吸收法、表面等离子体共振传感器法、光子晶体谐振腔等,这些技术和方法为科学研究生产和生活提供了一定的技术服务。针对市场对高灵敏度光学生物传感器的需求,国际上展开了对光学生物传感器的研究,光学生物传感器是近几年才开始研制的一种基于导模共振(GMR)^[20-21]效应的新型光学生物传感器^[22-23]。在一维光子晶体中引入缺陷可以表现出强的场限制。透射率对腔的局部变化(如尺寸和折射率)高度敏感,受光子晶体腔的这种特征的启发,我们应用时域有限差分法(Finite difference time domain, FDTD)分析了一维光子晶体缺陷腔^[24-29]透射峰与溶液浓度及折射率的关系。溶液作为一维光子晶体中的缺陷层填充在空腔内,在本文中,以蔗糖溶液的浓度为例子,通过计算分析,发现该方法可以准确分析蔗糖溶液的浓度,这为进一步研究溶液浓度及溶液折射率的测量提供了新方法。结果表明,该

方法简单有效,由于这种光子晶体传感器件具有灵敏度高、结构简单、尺寸小等特点,满足浓度测量系统发展的新要求,有望应用于将来的浓度测量系统中。

2 研究模型与方法

本文构建了 $(AB)^N C (AB)^N$ 型的一维光子晶体模型(C 代表待测溶液缺陷膜),在此基础上通过调节缺陷膜厚度、入射角度以及电介质膜厚度等参量来研究其透射峰位置与溶液浓度的关系。

如图 1 所示,文中设计的光子晶体模型 $\text{SiO}_2/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^N/\text{defect}/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^N$ 分为 3 个部分:衬底层、波导层和缺陷层。衬底材料为石英玻璃(SiO_2 , 折射率 $n_{\text{glass}} = 1.53$),波导层由二氧化钛(TiO_2 , 折射率 $n_1 = 2.49$)薄膜和二氧化硅(SiO_2 , 折射率 $n_2 = 1.53$)薄膜交替组成,其厚度分别为 d_A 和 d_B , $d_A = \lambda_0/(4 \times 2.49)$, $d_B = \lambda_0/(4 \times 1.53)$, 其中 λ_0 为中心波长,对缺陷层选用材料为待测溶液,厚度为 d_C 。计算采用时域有限差分法进行仿真研究。根据 FDTD 算法的收敛准则,在 x - y 平面内将单元网格划分为 $2 \text{ nm} \times 2 \text{ nm}$ 大小(该尺度远小于入射波长的 $1/10$),以确保计算结果的准确可靠。对计算边界的处理:在 x 方向选用布洛赫(Bloch)边界条件, y 方向选用 PML 吸收层用于吸收向外散射的电磁波。计算采用平面 TM 波自 y 轴负方向入射,在波长 $900 \sim 1\ 200 \text{ nm}$ 波长范围内,电介质的色散关系采用多项式拟合技术给出。

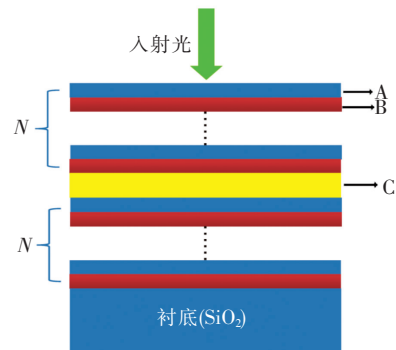


图 1 一维光子晶体结构

Fig. 1 1D structure of photonic crystal filter

3 结果与讨论

取周期 $N = 5, 6, 7, 8, 9$ 来模拟 $\text{TiO}_2/\text{SiO}_2$ 组

成的 $\text{SiO}_2/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^N/\text{defect}/(\text{TiO}_2/\text{SiO}_2)^N$ 光子晶体结构, 得出的透过率曲线图如图 2 所示。随着 N 的增大, 一维光子晶体在 900 ~ 1 200 nm 波段范围内波峰位置不再有明显变化, 但随着 N 增大, 波峰半波宽变窄, 优化了滤波效果。从图中可以看到当 $N = 8$ 时, 透过谱波峰降低到 0.8 左右, 当 $N = 9$ 时波峰透过率仅为 0.4。再根据波峰的半高宽及波峰质量, 最终选择 $N = 7$ 。

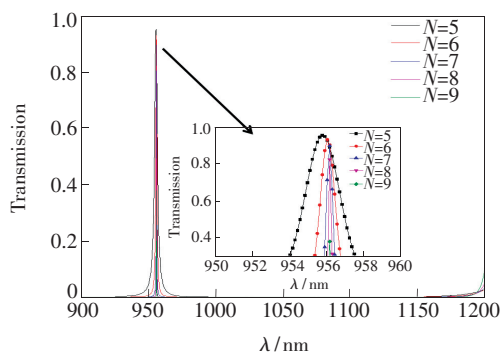


图 2 不同周期对应的透射谱

Fig. 2 Transmission spectra corresponding to different cycles

由图 3 可知, 缺陷厚度以 50 nm 为界逐渐增大时, 一维光子晶体的透射峰也会向长波方向移动。当缺陷厚度较小时, 透射峰位置移动幅度和缺陷的增大情况成正比。通过观察波峰位置及波峰半高宽可以看出当缺陷厚度较大时会出现多个波峰, 且峰值高低不同。从图中还可以看出 d_c 值越大波峰效果越好, 波峰的半波宽越窄, 但同时在 900 ~ 1 200 nm 波谱范围内出现的波峰越多, 这样会影响检测结果。综合分析, 最终 $d_c = 2\ 000\ \text{nm}$ 。

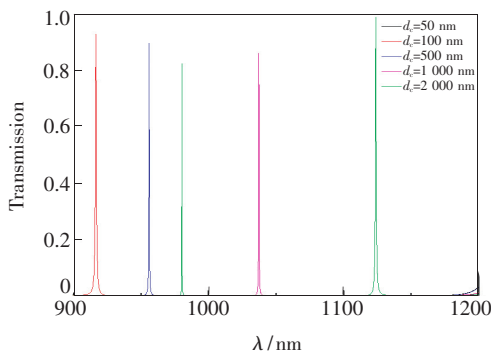


图 3 不同缺陷厚度对应的透射谱

Fig. 3 Transmission spectra corresponding to different defect thicknesses

根据薄膜光学理论, 中心波长决定了薄膜的光学厚度, 从而会影响薄膜的反射率和透射率。选取中心波长 (λ_0) 分别为 900, 1 000, 1 100,

1 200 nm, 周期 $N = 7, d_c = 2\ 000\ \text{nm}$, 缺陷折射率为 1.33, 计算一维光子晶体的透过率。结果如图 4 所示, 随着中心波长的增大, 一维光子晶体透过峰向长波方向移动, 且移动的幅度与中心波长增大的幅度成正比。由此证明中心波长也可以决定波峰的位置。在 1 050 ~ 1 200 nm 范围内, 随着中心波长的增大, 对应的缺陷模波峰值和透过峰半高宽值几乎不变。所以中心波长的改变只影响波峰位置, 而不改变波峰的其他性质。最终我们取中心波长 $\lambda_0 = 1\ 100\ \text{nm}$ 来进行仿真计算。

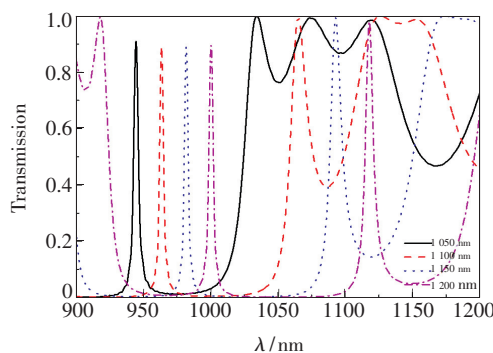


图 4 不同中心波长 (λ_0) 对应的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra corresponding to different central wavelengths (λ_0)

图 5 为不同溶液浓度对应的透射谱, 由图可以看出, 增大缺陷溶液浓度, 在 1 000 nm 附近波峰向长波方向移动, 移动幅度与溶液浓度变化成正比。根据已有文献得到蔗糖溶液浓度与折射率关系为

$$n = aW + b, \quad (1)$$

其中 a, b 为常数, W 为溶液浓度百分比。查阅文献[30]可得 $a = 0.001\ 827\ 4, b = 1.328\ 3$ 。将数据带入式(1)可得蔗糖溶液质量百分比浓度与溶液折射率的关系

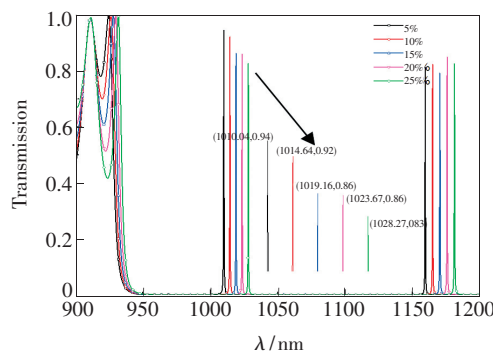


图 5 不同溶液浓度对应的透射谱

Fig. 5 Transmittance spectra corresponding to the concentration of different solutions

$$n = 0.0018274W + 1.3283. \quad (2)$$

表 1 蔗糖溶液浓度对应折射率和透射峰位置

Tab.1 Concentration of sucrose solution corresponds to the refractive index and the transmission peak position

蔗糖溶液浓度 $W/\%$	溶液折射率 n	峰位 L/nm
5	1.337 4	1 010.04
10	1.346 6	1 014.64
15	1.355 7	1 019.16
20	1.364 8	1 023.67
25	1.374 0	1 028.27

由表中数据可得该溶液折射率传感器的灵敏度为

$$\Delta n_1 = \frac{1028.27 - 1010.04}{1.3740 - 1.3374} = 498.087,$$

溶液浓度传感器灵敏度为

$$\Delta n_2 = \frac{1028.27 - 1010.04}{0.25 - 0.05} = 91.15.$$

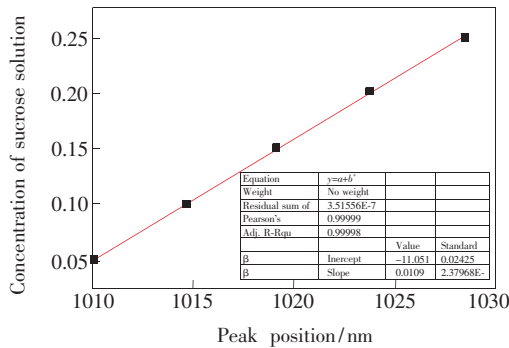


图 6 透射峰位置随蔗糖浓度拟合曲线

Fig.6 Fitting curve of the transmission peak position with concentration of sucrose solution

图 6 是根据表 1 中的计算数据拟合的蔗糖浓度随缺陷模透射峰位置的线性关系。由图可知,蔗糖溶液浓度与缺陷模透射位置为线性关系,缺陷模波峰位置和蔗糖浓度成正比。通过数据分析得到的溶液浓度与波峰位置之间的拟合方程为

$$W = 0.0109X - 11.051, \quad (3)$$

参 考 文 献:

- [1] RUSSELL P. Photonic crystal fibers [J]. *Science*, 2007, 24(12):4729-4749.
- [2] KRAUSS T F, RUE R M D L. Photonic crystals in the optical regime-past, present and future [J]. *Prog. Quant. Electron.*, 1999, 23(2):51-96.
- [3] 顾国昌, 李宏强. 一维光子晶体材料中的光学传输特性 [J]. *光学学报*, 2000, 20(6):728-734.

式中, W 为溶液浓度, X 为缺陷模位置(nm),线性拟合质量 $R^2 = 0.9999$, R 为线性拟合度,可以看到拟合度非常高,接近 1。

图 7 是依据表 1 中数据拟合成的蔗糖溶液折射率与缺陷模透射谱的线性关系图。由图可知,蔗糖溶液折射率与缺陷模透射峰位置呈现线性关系。通过数据分析得到的溶液浓度和缺陷模位置之间的拟合方程为

$$n = 0.002X - 0.692, \quad (4)$$

式中, n 为溶液折射率, X 为缺陷模峰位置,线性拟合质量 $R^2 = 1$, R 为线性拟合度。

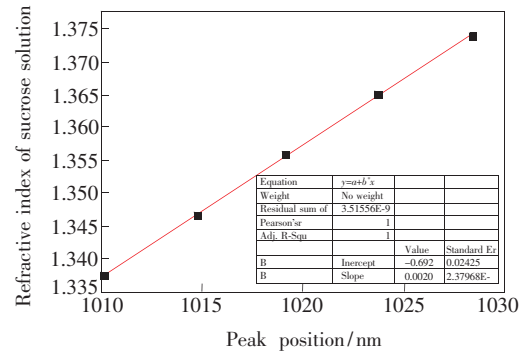


图 7 透射峰位置随蔗糖溶液折射率的拟合曲线

Fig.7 Fitting curve of the transmission peak position with refractive index of sucrose solution

4 结 论

本文应用时域有限差分法,研究了一维光子晶体以待测溶液为缺陷的透射光谱,探讨了透射峰位置随溶液浓度的变化情况。模拟结果表明,随着溶液浓度的增大,光子晶体透射峰位置线性红移。拟合结果表明,溶液浓度、溶液折射率与光子晶体缺陷透射峰位置变化呈线性关系,线性拟合质量 $R^2 = 1$ 。结果显示,该溶液测量方法对溶液折射率的测量灵敏度高达 498.087 nm/RIU,溶液浓度灵敏度为 91.15 nm/RIU。结论可以应用于溶液浓度及溶液折射率的检测中,为溶液浓度及折射率的检测提供了参考依据。

- GU G C, LI H Q. Properties of light propagation in 1-D periodic dielectric structure [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2000, 20(6):728-734. (in Chinese)
- [4] 段晓峰, 牛燕雄, 张维, 等. 一维光子晶体的光学传输特性分析 [J]. *光子学报*, 2003, 32(9):1086-1089.
DUAN X F, NIU Y X, ZHANG C, *et al.*. Light propagation characteristics of 1-D photonic crystal [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2003, 32(9):1086-1089. (in Chinese)
- [5] 沈娟娟, 何兴道, 刘彬, 等. 基于太极形介质柱六角光子晶体禁带特性研究 [J]. *物理学报*, 2013, 62(8):084213.
SHENG J J, HE X D, LIU B, *et al.*. Photonic band gaps of two-dimensional hexagon-lattice photonic crystals based on Taiji-shaped dielectric rods [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2013, 62(8):084213. (in Chinese)
- [6] 陈慰宗, 申影, 宋应谦, 等. 一维光子晶体的带隙分析 [J]. *光子学报*, 2001, 30(9):1077-1080.
CHEN W Z, SHEN Y, SONG Y Q, *et al.*. Analysis on band gap of one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2001, 30(9):1077-1080. (in Chinese)
- [7] 陈卫东, 董昕宇, 陈颖, 等. 对称双缺陷光子晶体的可调谐滤波特性分析 [J]. *物理学报*, 2014, 63(15):179-183.
CHEN W D, DONG X Y, CHEN Y, *et al.*. Analysis of the tunable filtering properties of a photonic crystal with symmetric dual defects [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2014, 63(15):179-183. (in Chinese)
- [8] 王学渊, 朱正为. 基于磁化等离子体缺陷层的一维新颖可调谐的光子晶体滤波特性 [J]. *发光学报*, 2012, 33(7):747-753.
WANG X Y, ZHU Z W. A novel tunable filter using magnetized plasma defect in one-dimension photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(7):747-753. (in Chinese)
- [9] 刘晚果, 潘凤明. 超导-介质型 Fibonacci 光子晶体的透射谱与滤波特性分析 [J]. *发光学报*, 2013, 34(9):1250-1257.
LIU W G, PAN F M. Transmission spectra and filter property analysis of superconductor-medium fibonacci photonic crystal [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2013, 34(9):1250-1257. (in Chinese)
- [10] YABLONOVITCH E. Inhibited spontaneous emission in solid-state physics and electronics [J]. *Phys. Rev. Lett.*, 1987, 58(20):2059.
- [11] 郭红霞, 范吉军, 赵晓鹏. 光子晶体及其制备方法研究进展 [J]. *功能材料*, 2003, 34(1):5-8.
GUO H X, FAN J J, ZHAO X P. Research progress on photonic crystals and the ways of preparation [J]. *J. Funct. Mater.*, 2003, 34(1):5-8. (in Chinese)
- [12] 许兴胜, 熊志刚, 孙增辉, 等. 半导体量子阱材料微加工光子晶体的光学特性 [J]. *物理学报*, 2006, 55(3):1248-1252.
XU X S, XIONG Z G, SUN Z H, *et al.*. Optical properties of semiconductor quantum-well material using photonic crystal fabricated by micro-fabrication machine [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2006, 55(3):1248-1252. (in Chinese)
- [13] 宋明丽, 王小平, 王丽军, 等. 光子晶体制备及其应用研究进展 [J]. *材料导报*, 2016, 30(7):22-27.
SONG M L, WANG X P, WANG L J, *et al.*. Advances in the fabrication and application of photonic crystals [J]. *Material. Rev.*, 2016, 30(7):22-27. (in Chinese)
- [14] 万伦, 张漫波, 王京霞, 等. 金属基光子晶体的研究进展 [J]. *化学学报*, 2016, 74(8):639-648.
WAN L, ZHANG M B, WANG J X, *et al.*. Research progress of the metal-based photonic crystals [J]. *Acta Chim. Sinica*, 2016, 74(8):639-648. (in Chinese)
- [15] PALAI G, TRIPATHY S K. A novel method for measurement of concentration using two dimensional photonic crystal structures [J]. *Opt. Commun.*, 2012, 285(10-11):2765-2768.
- [16] ZHANG Y N, ZHAO Y, HU H F. Miniature photonic crystal cavity sensor for simultaneous measurement of liquid concentration and temperature [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2015, 216:563-571.
- [17] PALAI G, TRIPATHY S K. Measurement of glycerol concentration in B-H-G solution using 3D photonic crystal structure [J]. *Opt. Int. J. Light Electron Opt.*, 2014, 125(12):2875-2879.
- [18] KANWAR A, YADAV P S. Measurement of refractive indices of cholesteric liquid crystal solution at various temperature and concentration [C]. *UGC Sponsored State Level Conference on Frontiers in Materials Science, Mumbai*, 2011.
- [19] CHEN W, YU N, CHEN Y, *et al.*. Sensing property analysis on lattice rotating photonic crystal Mach-Zehnder interferometer [J]. *High Power Laser & Particle Beams*, 2014, 26(1):11004.

- [20] WANG S S, MOHARAM M G, MAGNUSSON R, *et al.*. Guided-mode resonances in planar dielectric-layer diffraction gratings [J]. *J. Opt. Soc. Am. A*, 1990, 7(8):1470-1474.
- [21] WANG S S, MAGNUSSON R. Theory and applications of guided-mode resonance filters [J]. *Appl. Opt.*, 1993, 32(14):2606-2613.
- [22] CUNNINGHAM B, QIU J, LI P, *et al.*. Enhancing the surface sensitivity of colorimetric resonant optical biosensors [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2002, 87(2):365-370.
- [23] LIN B, LI P, CUNNINGHAM B T. A label-free biosensor-based cell attachment assay for characterization of cell surface Molecules [J]. *Sens. Actuators B: Chem.*, 2006, 114(2):559-564.
- [24] 苏安, 蒙成举, 高英俊, 等. 两端对称缺陷对对称结构光子晶体透射谱的影响 [J]. *激光与红外*, 2014, 44(11):1253-1257.
SU A, MENG C J, GAO Y J, *et al.*. Effect of bilateral symmetrical defect on symmetrical photonic crystal transmission spectrum [J]. *Laser & Infrared*, 2014, 44(11):1253-1257. (in Chinese)
- [25] 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):031602.
HE J, SONG L T, GUO T, *et al.*. Optical characteristics of one-dimensional photonic crystals with two element compound defect layers [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2015, 52(3):031602. (in Chinese)
- [26] 陈宪锋, 蒋美萍, 沈小明, 等. 一维多缺陷光子晶体的缺陷模 [J]. *物理学报*, 2008, 57(9):5709-5712.
CHEN X F, JIANG M P, SHEN X M, *et al.*. The defect modes in one-dimensional photonic crystal with multiple defects [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2008, 57(9):5709-5712. (in Chinese)
- [27] 安丽萍, 刘念华. 一维光子晶体中多缺陷耦合导致的杂质带 [J]. *光子学报*, 2003, 32(9):1083-1085.
AN L P, LIU N H. The impurity band based-on defects coupled in one-dimensional photonic crystal [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2003, 32(9):1083-1085. (in Chinese)
- [28] 潘继环, 苏安, 唐秀福, 等. 缺陷奇偶性对光子晶体光传输特性的影响 [J]. *激光与红外*, 2015, 45(6):706-709.
PAN J H, SU A, TANG X F, *et al.*. Effect of defect parity on transmission properties of photonic crystal [J]. *Laser & Infrared*, 2015, 45(6):706-709. (in Chinese)
- [29] 王媛媛, 何晓东, 胡贵军, 等. 一维光子晶体微谐振腔的调谐特性与品质因子 [J]. *光子学报*, 2009, 38(2):285-288.
WANG Y Y, HE X D, HU G J, *et al.*. Tuning characteristics and quality factor of one-dimension photonic crystal micro-cavity [J]. *Acta Photon. Sinica*, 2009, 38(2):285-288. (in Chinese)
- [30] 张志伟, 尹卫峰, 温廷敦, 等. 溶液浓度与其折射率关系的理论和实验研究 [J]. *中北大学学报(自然科学版)*, 2009, 30(3):281-285.
ZHANG Z W, YIN W F, WEN T D, *et al.*. Study on the relational expression of solution concentration and its refractive index [J]. *J. North Univ. China*, 2009, 30(3):281-285. (in Chinese)



李旭峰(1980-),男,山西太原人,博士,副教授,硕士生导师,2011年于大连理工大学获得博士学位,主要从事光波导理论与设计的研究。
E-mail: xfli@tyust.edu.cn