

基于布洛赫理论的光子晶体表面波形成及 传感机理

陈 颖¹ 范卉青¹ 卢 波¹ 曹会莹¹ 朱奇光² 陈卫东²

¹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

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 结合布洛赫理论和麦克斯韦方程组, 针对一维光子晶体表面缺陷态结构形成的布洛赫表面波进行理论分析, 并研究了布洛赫表面波的局域特性和入射电磁波波长与角度对布洛赫表面波的影响。在此基础上, 对一维光子晶体表面缺陷态结构的传感特性进行分析, 当TE偏振分量以一定角度入射到光子晶体中时, 在待测溶液形成的缺陷层中发生谐振, 电磁场被局域增强, 与待测溶液分子充分作用, 其形成的布洛赫表面波对待测溶液折射率变化具有高度的敏感性。数值模拟结果表明, 其 Q 值可达2620.29, 灵敏度 S 为 62°RIU^{-1} , 因此布洛赫表面波在一维光子晶体结构中具有很好的传感特性, 可为折射率传感器的设计和应用提供理论参考。

关键词 表面波; 布洛赫表面波; 光子晶体; 表面缺陷态; 折射率传感

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.0116002

Formation and Sensing Mechanism of Photonic Crystal Surface Wave Based on Bloch Theory

Chen Ying¹ Fan Huiqing¹ Lu Bo¹ Cao Huiying¹ Zhu Qiguang² Chen Weidong²

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

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

Abstract Combining the Bloch theory and Maxwell equations, the Bloch surface wave forming on the surface defect of one-dimensional photonic crystal is analyzed theoretically. The local characteristics of Bloch surface wave and the influences of incident angles and incident wavelengths on the Bloch surface are discussed. On this basis, the sensing performance of the surface defect photonic crystal structure is studied. When the incident TE polarization component travels through the photonic crystal at a certain angle, the surface wave resonance occurs in the defect layer forming by the detected solution, and the electromagnetic field is located and enhanced. The Bloch surface wave has a high sensitivity with the change of the refractive index of the solutions. The simulation results show that the Q value can up to about 2620.29, and the sensitivity S is about 62°RIU^{-1} . Therefore, the Bloch surface wave has good sensing performance in the one-dimensional photonic crystal structure. It can provide certain theoretical references for the design and application of refractive index sensors.

Key words surface wave; Bloch surface wave; photonic crystal; surface defect mode; refractive index sensor

OCIS codes 240.6690; 230.5298; 280.4788

1 引 言

布洛赫表面波(BSW)是TE或TM偏振模式在周期阵列型电介质层表面处产生的一种电磁波^[1]。尽管布

收稿日期: 2015-08-10; 收到修改稿日期: 2015-09-10

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,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

洛赫表面波这一概念已被提出多年,但直到最近才被重新认识,主要原因是,与表面等离子体激元(SPP)相比,布洛赫表面波与表面等离子体波的一些特点相似,表面等离子体波是在电磁波与金属表面自由电子之间相互作用的情况下,激发出等离子体而形成一种特殊的电磁波模式。两者都是通过改变电磁场的空间分布,从而使表面处电磁场局域增强,而布洛赫表面波具有更好的特性。特别是在传感领域,与表面等离子体传感器相比,布洛赫表面波传感器有着许多优势:表面等离子体波只能由TM偏振光激发,而布洛赫表面波在TE及TM偏振光下均可激发;表面等离子体波波长由金属层的特性决定,因此不能改变,而布洛赫表面波波长可以通过改变周期层介质的结构参数(如周期层的厚度和折射率等)来形成任意波长的表面波;布洛赫表面波被激发时不用考虑金属的吸收损耗,从而使得发生谐振后的表面波更尖锐,从而可以得到更高的灵敏度和谱线分辨率^[2-4]。

Li等^[5]对一个有限周期的光子晶体^[6-8]中产生布洛赫表面波的相位特性进行了分析,发现由于在表面波谐振的情况下,布洛赫波的相位角对光子晶体外表面介质的折射率变化具有很好的响应特性,通过实验可以得到,相位角传感的灵敏度比幅值传感的灵敏度高一个数量级。Ballarini等^[9]提出了一种改善荧光物质检测的设计方案,用多孔硅材料构成的一维光子晶体进行检测,形成的布洛赫表面波替代了表面等离子体的荧光特性,荧光辐射的光波与布洛赫表面波耦合,增强了其极化特性。Namdar等^[10]利用光子晶体负折射率材料的特性,在周期光子晶体中引入负介电常数材料,在其表面形成的表面波可以使全反射产生很大的古斯汉欣位移,对探测物具有较强的敏感性,并制备了基于表面波的光纤纳米传感器,用于多层纳米谐振腔分子的检测。

基于以上分析,布洛赫表面波在一维光子晶体结构中具有很好的传感特性。基于布洛赫理论,由麦克斯韦方程组出发,对一维光子晶体表面缺陷态结构形成的布洛赫表面波进行了理论分析,得出了电磁波在表面缺陷处的局域场强特性,并对入射电磁波波长与角度对布洛赫表面波的影响进行了讨论,最后对一维光子晶体表面缺陷态结构的传感特性进行分析,其 Q 值可达2620.29,灵敏度 S 为 62°RIU^{-1} ,与传统表面等离子体共振(SPR)传感器相比,基于布洛赫表面波的光子晶体传感器具有高灵敏度、高 Q 值的特性^[11]。

2 结构模型与理论分析

2.1 光子晶体表面波结构模型

如果电磁波在均匀介质与一个有限的一维光子晶体结构的接触面处传播,会形成布洛赫表面波,也叫光子晶体表面波。由于光入射到光子晶体后反复发生衍射和反射,在垂直于接触面方向上,随着偏离接触面距离的增加,电磁波振幅会逐渐衰减,而在均匀介质中的场强衰减比较迅速。

光子晶体表面波传感结构如图1所示,光子晶体由 TiO_2 和 SiO_2 两种介质周期排列而成,并与Kretschmann棱镜结构进行耦合,在光子晶体上表面滴定待测样本,即可看作在周期光子晶体结构表面加入了一层缺陷,从而形成表面缺陷态光子晶体结构。

TE偏振光以一定的角度透过棱镜入射到光子晶体中,在由待测样本形成的表面缺陷层处发生多次反射,形成谐振^[12]。由于表面波谐振的作用,该表面缺陷态结构将改变光子晶体表面电磁场的分布,在缺陷层中进行多次反射形成相干干涉,使得电磁场局域增强,同时可使电磁场与待测样本分子充分作用,从而可提高待测样本动态监测的灵敏度特性。

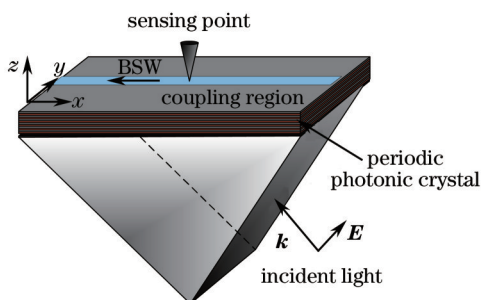


图1 Kretschmann棱镜-光子晶体耦合型传感结构

Fig.1 Coupled sensing structure of Kretschmann prism and photonic crystal

2.2 光子晶体表面波的存在形式及产生条件

光子晶体表面波可以看成是一种被限制在局域平面内传播的电磁波,因此光子晶体表面波满足麦克斯韦理论的关系。建立一个光子晶体表面波的模型,设介电常数 $\varepsilon(z) = n^2(z)$, 单色光波角频率为 ω , 真空波数为 $k = \omega/c$, 以TE偏振波为例,光波传播在介质内部平行于 xz 平面,电场 \mathbf{E} 垂直于光波传播方向为 y 方向,坐标如图1中所示,则电场 \mathbf{E} 和磁场 \mathbf{H} 分别为

$$\mathbf{E} = E(z)\mathbf{e}_y \exp[i(k\beta x - \omega t)], \quad (1)$$

$$\mathbf{H} = [H_x(z)\mathbf{e}_x + H_z(z)\mathbf{e}_z] \exp[i(k\beta x - \omega t)]. \quad (2)$$

根据麦克斯韦方程组可知,在 z 方向上的波函数方程满足

$$\frac{d^2}{dz^2} E(z) + k^2(z)[n^2(z) - \beta^2]E(z) = 0, \quad (3)$$

式中 $\beta = n_0 \sin \theta_0$, $k^2(z) = \omega n(z)/c$, n_0 为入射介质即空气的折射率, θ_0 为光入射到光子晶体的入射角,根据(1)~(3)式,并结合麦克斯韦方程中电场与磁场的关系可以得出

$$i \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} H_j = -i \frac{k c}{\omega \mu_r} [E_j^+ \exp(ik\Delta z) - E_j^- \exp(-ik\Delta z)] \exp[i(k_y x - \omega t)], \quad (4)$$

式中 ε_0 和 μ_0 分别为真空中的介电常数和磁导率, H_j 为 j 层的磁场, μ_r 为介质层的相对磁导率, E_j^+ 和 E_j^- 分别为光子晶体的某一层(j 层)沿 z 轴正向和负向的电场, k_y 为入射光波矢在 y 轴的垂直分量

根据布洛赫定理,布洛赫波是电磁波在周期性光子晶体中传播的本征解,即

$$\bar{\psi}_j(z + \Delta z) = \exp(\pm i\phi) \bar{\psi}_j(z) = \mathbf{M}_j \bar{\psi}_j(z), \quad (5)$$

式中 \mathbf{M}_j 为第 j 单元电磁波的传输矩阵。令 $\mathbf{M}_j = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} \\ x_{21} & x_{22} \end{bmatrix}$, 结合(4)和(5)式可得到光子晶体中在真空背景下的布洛赫表面波表达式:

$$i \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} \frac{k_0}{\omega \mu_0} = - \frac{x_{11} - \cos \phi \left(1 - \sqrt{1 - \frac{1}{|\cos \phi|^2}} \right)}{x_{12}}, \quad (6)$$

式中 ϕ 为布洛赫波相位差值, $\phi = k_0 \cdot \Delta z = \Delta z \cdot \sqrt{\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_0 \mu_0 - k_y^2}$ 。考虑到布洛赫表面波的解形式, ϕ 为纯虚数时,其布洛赫波对应的波长在光子禁带范围内,因此布洛赫表面波形成的条件为 $\frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_0 \mu_0 - k_y^2 < 0$, 而此时电磁场场强沿界面法线方向呈 e 指数衰减,且在待测溶液层方向衰减迅速,电磁场场强分布如图2所示。由麦克斯韦方程组可以得知,布洛赫表面波分布在场强最大处,即光波局域增强的区域,并沿着两介质界面方向传播。

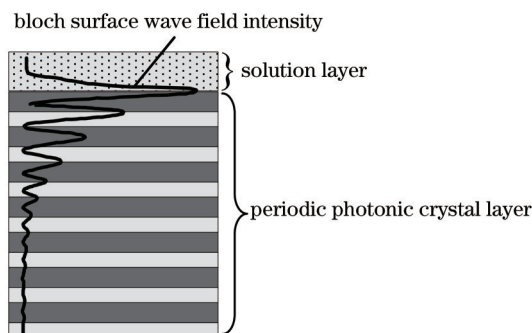


图2 光子晶体内部与界面处场强分布示意图

Fig.2 Field intensity distribution schematic diagram of inside and the interface of photonic crystal

3 光子晶体表面波的传感机理及其特性分析

光子晶体由TiO₂和SiO₂周期排列组成,将其周期层数 N 设为 8, 折射率分别为 $n_{\text{SiO}_2}=1.45$ 和 $n_{\text{TiO}_2}=2.6$, 棱镜的折射率 $n_{\text{prism}}=1.5163$ 。其工作波长 $\lambda_0=1150$ nm, 根据布拉格定理, 周期层结构参数需满足 $n_{\text{SiO}_2} \cdot H_{\text{SiO}_2} = n_{\text{TiO}_2} \cdot H_{\text{TiO}_2} = \lambda_0/4$, 从而可知, 其周期层厚度分别为 $H_{\text{SiO}_2}=200$ nm 和 $H_{\text{TiO}_2}=112$ nm。在周期光子晶体上表面处滴入待测溶液, 构成表面缺陷, 其厚度可用微流装置控制, 设定为 $H_s=200$ nm, 对应的光子晶体结构示意图如图 3 所示。利用传输矩阵法进行数值模拟, 其计算区域为方框标示区域, 光源位置设定在棱镜介质中, 分析其场强分布和光谱特性。

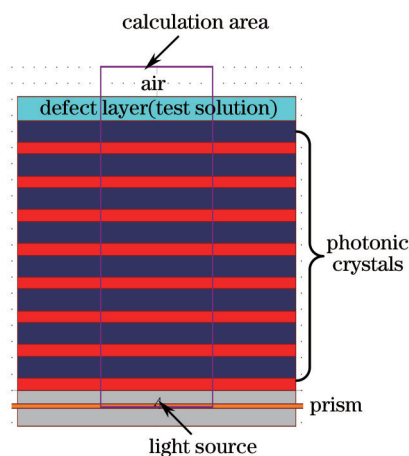


图 3 一维光子晶体分层结构示意图

Fig.3 Layered structure diagram of one-dimensional photonic crystal

图 4 所示为入射角度 θ 和入射光波长 λ 同时变化时对应的反射光强 $R(\theta, \lambda)$ 分布谱图, 其滴定的待测溶液折射率为 1.40。可以看出, 布洛赫表面波耦合发生在反射光强相对较低的非常狭小的区域(如图 4 中的标示所示), 也就是对应的表面缺陷层形成的局域缺陷态, 入射光波透过光子晶体在其表面缺陷层处发生多次反射形成谐振腔, 谐振波与布洛赫表面波发生耦合, 使得光子局域增强, 从而在反射光谱中产生较窄的缺陷峰。其谐振波长和角度满足

$$2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda_r} n_s H_s \cos \theta_s = (2k + 1)\pi, (k = 0, 1, 2, \dots), \quad (7)$$

式中 λ_r 为谐振波长, n_s 为缺陷层(即待测溶液层)折射率, θ_s 为光在缺陷层中传播的角度, 由折射定律可以得到 $\theta_s = \arcsin[(n_{\text{prism}} \cdot \sin \theta_r)/n_s]$, θ_r 为谐振角度。待测溶液折射率 n_s 与谐振角度 θ_r 成正比关系, 因此可以通过探测反射光谱中谐振角度的漂移来检测待测溶液折射率的变化, 从而实时动态检测待测溶液的信息。

当 TM 波在光子晶体中传播时, 虽然传播时电磁场方向不同, 但是表面波的存在形式和产生条件的分析是一致的, 其传感机理也完全相同, 两种模式用于布洛赫表面波传感方面没有本质的差别, 二者均可用于表面波传感。

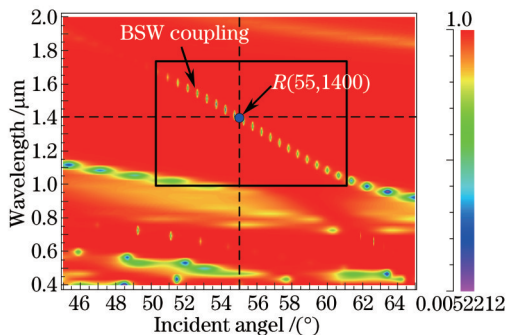


图 4 溶液折射率为 1.40 时对应的反射光强 $R(\theta, \lambda)$ 分布谱图

Fig.4 Spectral distribution of reflectance light intensity $R(\theta, \lambda)$ when solution refractive index is 1.40

可以看出,当入射光波长处于 1000~1700 nm 之间时,入射角度在 50°~60° 范围内(即方框区域),其缺陷光谱效果较好,因此传感器调控的范围控制在该区域内。

图 5 为当入射角度为 55° 时,入射光波长分别为 1250、1300、1350、1400 nm 所对应的一维光子晶体电场场强分布(E_y 分量)。如图 5(a)所示,当入射光波长为 1250 nm 时,光子晶体表面处没有局域光强,不产生表面态,这是由于此时的入射光波矢相对分量 $k'_y < 1$,不满足布洛赫表面波产生的条件 $\frac{\omega^2}{c^2} \epsilon_0 \mu_0 - k_y^2 < 0$ 。布洛赫表面波对应的场强被局域在光子晶体表面附近,而随着入射光波长的增大,表面缺陷态的场局域性越强,布洛赫表面波也就越明显。根据布洛赫波矢的表达式 $k_{\text{BSW}} = \frac{\omega}{c} n_s \sin \theta_{\text{BSW}}$ (θ_{BSW} 为布洛赫表面波的谐振角,即光子禁带中缺陷峰所对应的角度),可以得到布洛赫波矢的值。当入射光波达到 1400 nm 时[见图 5(d)],局域场强达到最大入射光强的 47 倍,此时布洛赫表面波最为明显。从图 4 中所标示的点处也可以看到,此时入射光的波长和角度同时满足谐振的条件,谐振波与布洛赫表面波发生耦合,从而在反射光谱中出现一个尖锐的谐振峰。

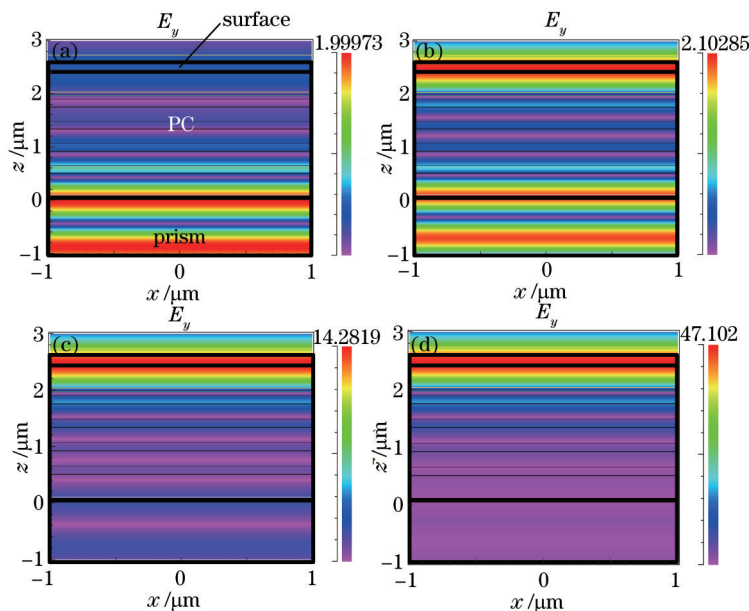


图 5 入射光波长不同时一维光子晶体的场强分布图。(a) $\lambda = 1250$ nm; (b) $\lambda = 1300$ nm; (c) $\lambda = 1350$ nm; (d) $\lambda = 1400$ nm
Fig.5 Photonic crystal's field intensity distributions with different incident light wavelengths. (a) $\lambda = 1250$ nm; (b) $\lambda = 1300$ nm; (c) $\lambda = 1350$ nm; (d) $\lambda = 1400$ nm

图 6 为不同待测溶液折射率变化时对应的反射光谱图,当待测溶液折射率分别为 1.390、1.395、1.400、1.405、1.410 时,其谐振角度分别为 54.408°、54.715°、55.026°、55.339°、55.656°。可以看出,随着待测溶液折射率的增大,对应的谐振峰发生明显红移,与前面分析一致,其谐振峰的半峰全宽 $\theta_{\text{FWHM}} = 0.021^\circ$,当待测溶液折射率变化量 $\Delta n = 0.005$ 时,谐振峰漂移量在 0.31° 左右。进而可以得到其 Q 值和灵敏度 S 分别为

$$Q = \frac{\theta_r}{\theta_{\text{FWHM}}} \approx 2620.29, \quad (8)$$

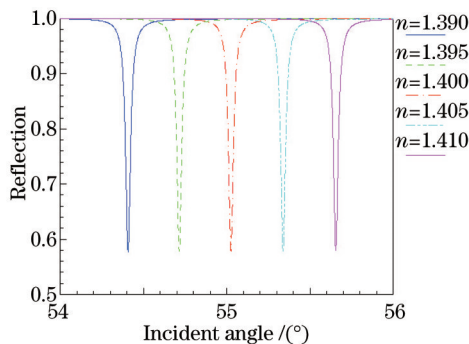


图 6 不同待测溶液折射率引起的反射光谱中缺陷峰的漂移
Fig.6 Defect peak shifts with the change of tested solution refractive index
0116002-5

$$S = \frac{\Delta\theta}{\Delta n} = 62^\circ \text{RIU}^{-1}. \quad (9)$$

由于电磁波在待测溶液形成的表面缺陷层中发生相干干涉,电磁波被局域在溶液层当中,与待测溶液充分接触,因此电磁波对溶液样本分子的变化具有较高的敏感性。可以看出,利用布洛赫表面波来进行传感具有较高的 Q 值和灵敏度特性。

4 结 论

研究了一维光子晶体布洛赫表面波的特性,得出布洛赫表面波在一维光子晶体中的表达形式及产生条件,为分析布洛赫表面波的局域特性和一些参数的选择提供了理论基础。TE偏振光以一定角度入射到光子晶体中,在由待测样本形成的表面缺陷层处发生了多次反射,电磁场被局域增强,从而形成布洛赫表面波。布洛赫表面波分布在场强最大处,即光波局域增强的区域,并沿着两介质界面方向传播,与待测溶液分子充分作用,因此布洛赫表面波对待测溶液折射率的变化具有较高敏感性,其 Q 值约为2620.29,灵敏度 S 可达 62°RIU^{-1} 。利用一维光子晶体布洛赫表面波进行传感,具有传输损耗低、表面波局域特性强、设计结构简单、易于实现调控等优点,可在基于角度调制检测的布洛赫表面波传感系统中进行应用。

参 考 文 献

- 1 Wan Y, Zheng Z, Kong W, *et al.*. Nearly three orders of magnitude enhancement of Goos-Hanchen shift by exciting Bloch surface wave [J]. *Optics Express*, 2012, 20(8): 8998-9003.
- 2 Yamazaki T, Ohtsuka M, Kotaka Y, *et al.*. Bloch wave simulations in the frozen lattice approximation[J]. *Ultramicroscopy*, 2013, 135: 16-23.
- 3 Toma K, Descrovi E, Toma M, *et al.*. Bloch surface wave-enhanced fluorescence biosensor[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2013, 43: 108-114.
- 4 Kong W, Zheng Z, Wan Y, *et al.*. High-sensitivity sensing based on intensity-interrogated Bloch surface wave sensors[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2014, 193: 467-471.
- 5 Yanhui Li, Tianlin Yang, Shumei Song, *et al.*. Phase properties of Bloch surface waves and their sensing applications[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 103(4): 041116.
- 6 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通角度滤波器[J].*光学学报*, 2013, 33(8): 0823001.
- 7 Yi Lin, Huan Xu. Research in light transmission characteristics of 1-dimensional photonic crystal[J]. *Optik*, 2012, 123(4): 314-318.
- 8 Chen Ying, Lu Bo, Fan Huiqing. Refractive index sensing property of $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ photonic crystal defect cavity[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0605003.
陈颖,卢波,范卉青. $\text{SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ 光子晶体缺陷腔的折射率传感特性[J].*中国激光*, 2014, 41(6): 0605003.
- 9 Ballarini M, Frascella F, Michelotti F, *et al.*. Bloch surface waves-controlled emission of organic dyes grafted on a one-dimensional photonic crystal[J]. *Applied Physics Letters*, 2011, 99(4): 043302.
- 10 Namdar A, Talebzadeh R, Ghaleh K J. Surface wave-induced enhancement of the Goos-Hanchen shift in single negative one-dimensional photonic crystal[J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, 49: 183-187.
- 11 Zhao Donge, Zhao Yushu. Research on SPR sensors using theoretical simulation[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2008, 22(3): 265-268.
赵冬娥,赵豫姝.表面等离子体共振传感理论仿真研究[J].*测试技术学报*, 2008, 22(3): 265-268.
- 12 Li Minghui, Ma Kezhen, Luo Liang, *et al.*. Influence of coupling gap on the performance of silicon-no-insulator microring resonator[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(6): 0610001.
李明慧,马可贞,骆亮,等.耦合间距对绝缘体上硅微环谐振腔的性能影响[J].*中国激光*, 2014, 41(6): 0610001.

栏目编辑: 张 雁