

液体填充光子晶体光纤中长周期光栅的温度传感特性分析

宋晓利¹ 白育堃^{1,2} 任广军³ 马秀荣¹ 陆颖² 姚建铨²

¹天津理工大学计算机与通信工程学院 通信器件与技术教育部工程研究中心, 天津 300384

²天津大学精密仪器与光电子工程学院 激光与光电子研究所 光电信息科学技术教育部重点实验室, 天津 300072

³天津理工大学电子信息工程学院 天津市薄膜电子与通信器件重点实验室, 天津 300384

摘要 基于在折射率引导型光子晶体光纤(PCF)上印制长周期光栅(LPG),并填充折射率温度敏感型液体,提出了一种新型温度传感器。应用全矢量有限元法,计算了在六角形结构排列的大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的空气孔中填充液体乙醇前后,PCF的纤芯基模和包层模的模场分布和色散曲线。根据耦合模理论,分析了光子晶体光纤长周期光栅(PCF-LPG)的传输谱随温度变化的关系。研究表明,填充液体乙醇后,在-20℃~80℃范围内PCF-LPG传输谱中心波长随温度近似以线性变化,其温度敏感度为1.766 nm/℃。

关键词 光纤光学;温度传感器;长周期光栅;光子晶体光纤;耦合模理论

中图分类号 TP212.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201138.1205007

Analysis of Temperature Sensing Characteristics of a Long-Period Grating Formed in a Liquid-Filled Photonic Crystal Fiber

Song Xiaoli¹ Bai Yukun^{1,2} Ren Guangjun³ Ma Xiurong¹ Lu Ying² Yao Jianquan²

¹Engineering Research Center of Communication Devices and Technology, Ministry of Education, School of Computer and Communication Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

²Key Laboratory of Optoelectronic Information Science and Technology, Ministry of Education, Institute of Laser and Optoelectronics, College of Precision Instrument and Optoelectronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

³Tianjin Key Laboratory of Film Electronics and Communication Devices, School of Electronic Information Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China

Abstract Based on a long-period grating (LPG) formed in a index guiding photonic crystal fiber (PCF) that is filled with a liquid of temperature-sensitive refractive index, a novel temperature sensor is proposed. Using a full-vector finite element method, the modal profiles and the dispersion curves of the core mode and the cladding mode of a large mode area photonic crystal fiber (LMA-PCF) are calculated with their hexagonally arrayed air-holes filled and unfilled with liquid ethanol, respectively. By means of the coupled-mode theory, the temperature dependence of the transmission spectrum of the PCF-LPG is studied. The result shows that in the temperature range from -20℃ to 80℃ the PCF-LPG resonance wavelength varies almost linearly with the temperature when the PCF is filled with liquid ethanol and the temperature sensitivity is 1.766 nm/℃.

Key words fiber optics; temperature sensor; long-period grating; photonic crystal fiber; coupled-mode theory

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 060.4005; 060.5295

收稿日期: 2011-07-18; 收到修改稿日期: 2011-09-15

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)资助课题。

作者简介: 宋晓利(1988—),女,硕士研究生,主要从事光纤光栅、光子晶体光纤等方面的研究。

E-mail: xyzxiaoli@163.com

导师简介: 白育堃(1970—),男,博士,副教授,主要从事光通信及传感等方面的研究。

E-mail: tjutbai_1@163.com(通信联系人)

1 引 言

光子晶体光纤(PCF)从导光机理上可分为:全内反射型光子晶体光纤^[1](TIR-PCF)(或折射率引导型)和带隙型光子晶体光纤^[2](PBG-PCF)两种类型。与传统单模光纤不同,PCF一般由一种材料(SiO₂)所构成,其结构设计灵活,具有低损耗、无限单模、可控的色散及非线性特性、注入填充物质简便等许多理想特性^[3~9]。光纤光栅通过沿纵向在光纤上引入周期性的扰动,使得光纤中的模式发生耦合,从而改变了光纤的传输性质。PCF以及基于PCF的光纤光栅在光纤通信及传感^[1~17]等方面获得极为广泛的应用。

光纤光栅包括 Bragg 光栅(FBG)和长周期光栅(LPG)两种。其中,LPG沿光纤所引入周期性扰动的周期一般为几百微米,它能够将纤芯基模耦合到同方向传播的高阶包层模中,并且相应地在光栅的传输频谱中形成多个阻带低谷。当LPG将纤芯基模耦合到合适的高阶模时,其频谱特性对于待测参量的敏感度比FBG高很多,因此基于LPG可以实现各种高灵敏度的传感器。由于PCF由一种材料(及空气孔)所构成,在其上利用电弧法、CO₂激光法等方法直接写制的光栅传输特性具有很低的温度敏感度^[13~16],因而此类光栅在解决传感器的温度交叉敏感问题上有很好的应用价值。

通过对PCF掺杂、载氢等预处理过程后,利用传统的紫外(UV)光照射法写制的PCF-LPG可以达到与普通单模光纤相似的温度敏感度^[13](30~200 pm/°C),但光栅有限的使用寿命和较高的制作成本都使得此类光栅很难应用于温度传感器。Zhao等^[16]利用CO₂激光法写制的PCF-LPG将随温度漂移的FBG反射谱波长信息转变为LPG透射光的强度信息,间接解决了上述问题。

由于在PCF中填充折射率对温度敏感的材料可以极大地提高PCF和PCF-LPG传输特性的温度敏感度^[6~8],这就为PCF-LPG更好地应用于温度传感探头提供了可能。Eggleton等^[6]通过在PCF的Ge掺杂纤芯上以UV光写制LPG,再在PCF的包层空气孔中填充折射率对温度敏感的丙烯酸聚合物,首先在实验上实现了温度调谐的TIR-PCF长周期光栅滤波器,其温度敏感度是未填充PCF-LPG或普通单模光纤的10倍,但作为温度传感器仍存在UV光写制LPG以及温度敏感度线性度不够理想的问题。Noordegraaf等^[7]在PCF的包层空气孔中填充液晶材料,并且分别由电场和压力直接作用在

填充液晶的PCF上形成长周期光栅,实现了PBG-PCF长周期光栅中心波长的温度调谐。

本文基于已有填充折射率温度敏感材料的PCF-LPG实验研究,提出了一种在-20 °C~80 °C温度范围内波长漂移具有良好线性度(1.766 nm/°C)的TIR-PCF长周期光栅温度传感器。它由在大模场面积光子晶体光纤(LMA-PCF)的包层空气孔中填充折射率对温度敏感的液体乙醇,并在LMA-PCF上引起结构性改变直接写制LPG而制成。由此写制的光栅具有制作成本低、性能稳定的特点。结合该设计实例,采用全矢量有限元法模拟计算了LMA-PCF中的模场分布及其色散曲线,并根据耦合模理论分析了该PCF-LPG传输谱中心波长随温度变化的特性。文中所用理论分析方法可用于辅助和指导基于填充材料的PCF光栅器件的分析、设计工作。除了温度传感器,该PCF-LPG也可以作为可调谐滤波器应用于光纤通信。

2 理论分析

电磁波在光子晶体光纤中的传播特性可以用Maxwell方程描述。从Maxwell方程出发,可以得到光子晶体光纤的本征值方程为

$$\begin{cases} \nabla \times \left[\frac{1}{\epsilon(r)} \nabla \times \mathbf{H}(r) \right] = \frac{\omega^2}{c} \mathbf{H}(r) \\ \frac{1}{\epsilon(r)} [\nabla \times \nabla \times \mathbf{E}(r)] = \frac{\omega^2}{c} \mathbf{E}(r) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 \mathbf{H} 和 \mathbf{E} 分别表示磁场强度和电场强度, ϵ 为介电常数, c 为真空中光速, ω 为光波角频率。从(1)式出发,利用全矢量有限元的方法,设定入射光波长、PCF结构参数、PCF及填充液体(这里选取乙醇)的折射率,并选择完全匹配层(PML)吸收边界作为边界条件,计算可得PCF的光传输特性,包括纤芯基模和各包层模的模场分布,及其有效折射率。

PCF上写制的LPG将纤芯基模耦合到同方向传播的包层模式中,在弱耦合的条件下,耦合模式因光栅的写制而发生的变化很小,此时其耦合过程可由传统耦合模方程^[18~20]描述为

$$\begin{cases} \frac{dA}{dz} = \kappa B \exp[i(2\delta z)] \exp(-i\Phi) \\ \frac{dB}{dz} = \kappa A \exp[-i(2\delta z)] \exp(i\Phi) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 A 和 B 分别表示两个耦合模电场的振幅, $\delta = \frac{1}{2}(\beta_A - \beta_B) - \frac{\pi}{\Lambda}$ 表示相位失谐量,与两个耦合模式的传播常数 β_A 和 β_B 有关, κ 是耦合系数, z 是光传播

方向, Φ 表示光波初始相位。根据耦合模方程(2)可以求出通过 PCF-LPG 耦合的各模式的传输谱^[18~20]。

模式耦合相位匹配条件^[21]表示为

$$\lambda_0 = (n_{co} - n_{cl})\Lambda, \quad (3)$$

式中 λ_0 为中心波长, 即模式耦合最强的波长; n_{co} 和 n_{cl} 分别是基模和包层模的有效折射率; Λ 是光栅周期。

3 基于液体填充 PCF-LPG 特性分析

3.1 液体填充单模 PCF 的特性

本文建立的模型是在 LMA-PCF 的空气孔中填充高折射率温度敏感型材料——液体乙醇。LMA-PCF 采用空气孔/纯 SiO₂ 构成的 LAM-10 的参数。

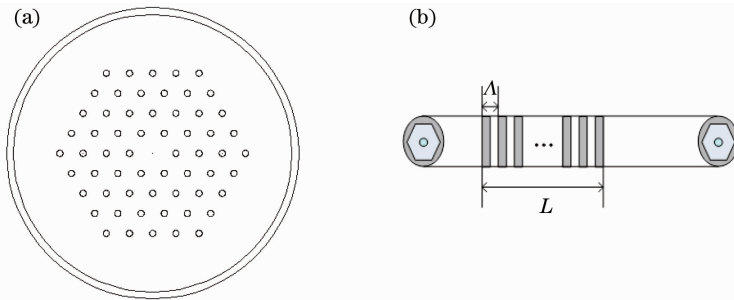


图 1 PCF-LPG 示意图。(a)横截面;(b)沿 PCF 方向上的 LPG

Fig. 1 Schematic drawing of a PCF-LPG. (a) PCF cross-section; (b) LPG formed along the PCF

应用全矢量有限元法, 计算了 20 °C 下填充乙醇后 PCF-LPG 的纤芯基模(LP01)和与之耦合的包层模(LP02)的模场分布图, 如图 2 所示, 其纵横坐标表示光纤横截面的二维长度, 颜色表示光纤截面上相应模式的功率流密度。同时计算了相同温度下填充前和填充后 PCF-LPG 中该耦合基模和包层模的有效折射率随波长变化的情况, 如图 3 所示。其中 n_1 表示未填充乙醇的有效折射率, n_2 表示填充乙醇

后的有效折射率, 波长选取范围为 1.25~1.75 μm, 填充乙醇前的分析结果与文献[15]中的实验结果一致。填充前后包层模式的有效折射率都小于纤芯 SiO₂ 的折射率, 符合全反射型光子晶体光纤的导光机制, 因此为 TIR-PCF。同时可以看到, 填充乙醇后纤芯基模和包层模的有效折射率都有所增大, 并且基模的增长速度更快, 因此填充后基模和包层模的有效折射率差值变大。

一般地, 材料的折射率温度系数 α 表示为

$$\alpha = (n_0 - n)/(T - T_0), \quad (4)$$

式中 T 为工作温度, $T_0 = 20$ °C, n 和 n_0 分别是温度为 T 和 T_0 时材料的折射率。纯 SiO₂ 的温度系数为 $8.6 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$, 乙醇温度系数为 $3.94 \times 10^{-4} \text{ K}^{-1}$ 。在 T_0 下, 乙醇的折射率为 1.3605。

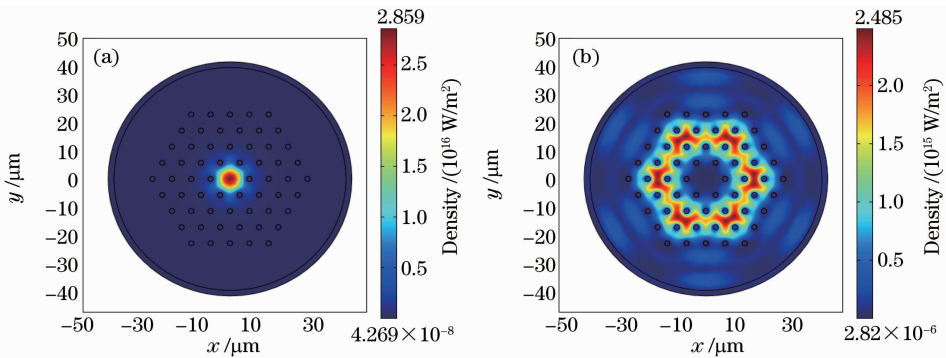


图 2 PCF-LPG 中的模场分布。(a)纤芯基模;(b)耦合包层模

Fig. 2 Calculated modal profiles of the PCF-LPG. (a) Fundamental core mode; (b) coupled cladding mode

3.2 基于液体填充 PCF-LPG 的传感特性

根据相位匹配条件(3)式, 耦合模式的有效折射

率确定后, LPG 的中心波长是光栅周期的函数, 写有 LPG 的 PCF 包层空气孔中填充乙醇后, 在 20 °C

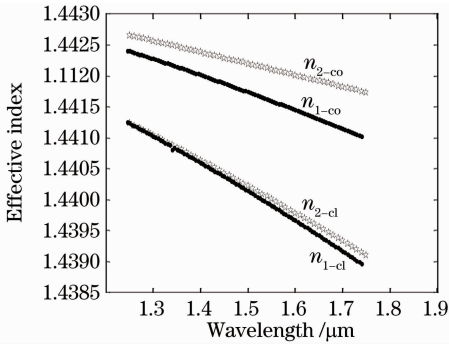


图 3 填充乙醇前后纤芯基模和包层模式的有效折射率色散曲线(温度 20 °C)

Fig. 3 Dispersion curves for the effective mode indices of fundamental core mode and cladding core before and after filling ethanol (temperature is 20 °C)

时,光栅周期与中心波长的关系如图 4 所示,由图可见随着光栅周期的增加,LPG 的中心波长逐渐降低。本文选择中心波长在 1.55 μm 处的光栅周期来分析 LPG 的特性,即光栅周期选取 738.8 μm,光栅长度选取 26.6 cm,此时两个模式间有最大的耦合效率。

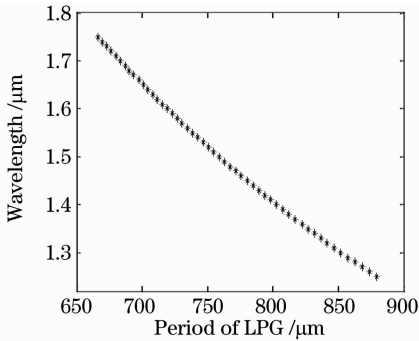


图 4 填充乙醇后 PCF-LPG 传输谱的中心波长与光栅周期的关系(温度 20 °C)

Fig. 4 Relationship between the resonance wavelength and the PCF-LPG pitch at the temperature of 20 °C

当外界温度改变时,填充物液体乙醇的折射率随之改变,如(4)式所示。同时,PCF-LPG 纤芯基模和包层耦合模的有效折射率亦随温度变化,当温度变化范围为 -20 °C ~ 80 °C (波长 1.55 μm) 时,其变化情况如图 5 所示。

可见随着温度增加,两个模式的有效折射率均有所下降。根据耦合模方程(2)和不同温度下的模式色散曲线,可以得到 LPG 在不同温度下的透射谱。图 6 分别给出了 -20 °C, -5 °C, 10 °C, 20 °C, 25 °C, 40 °C, 55 °C, 70 °C 下 LPG 的传输透射谱。其中,20 °C 时的透射谱如图中虚线所示,由于 PCF-LPG 长度的选取使得在中心波长(1.55 μm)处满足

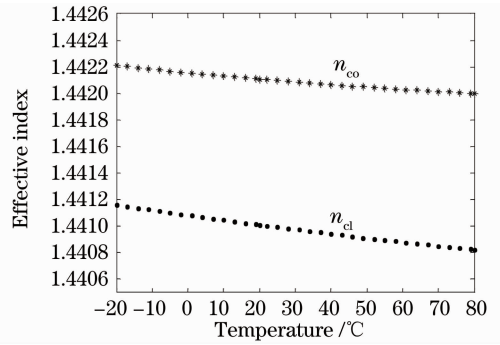


图 5 填充乙醇后两个耦合模式的有效折射率随温度变化的曲线(波长 1.55 μm)

Fig. 5 Variation of the mode effective indices of the coupled core mode and cladding mode with temperature after ethanol-filling at the wavelength of 1.55 μm

最大耦合效率的条件^[18],所以此温度下的透射谱中心波长处有显著的低谷,而在其他温度下由于模式间耦合系数的变化,中心波长处的耦合效率不能满足最大值条件而有所降低,因而在图中透射谱中心波长处的低谷不如 20 °C 时的显著。

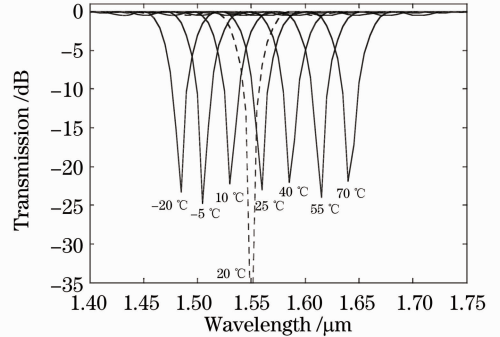


图 6 不同温度下 PCF-LPG 相应的传输谱
Fig. 6 Transmission spectra of the PCF-LPG at different temperatures

另外,从图 6 还可以看出,随着温度增加,透射谱向长波方向有着明显的漂移。图 7 给出了一 20 °C ~ 80 °C 温度变化范围内光栅传输谱中心波长随温度的漂移情况,表现为很好的线性增长特性,温度敏感度为 1.766 nm/°C,线性拟合度为 99.94%。

4 结 论

采用全矢量有限元法,计算了 PCF 包层空气孔填充液体乙醇前后,基模和耦合包层模有效折射率的色散曲线,并根据温度为 20 °C 时,中心波长为 1.55 μm,确定了光栅周期和长度。根据耦合模理论,分析和计算了 PCF-LPG 的传输谱及其随温度变化的特性,并且确定了其温度敏感度为 1.766 nm/°C。该

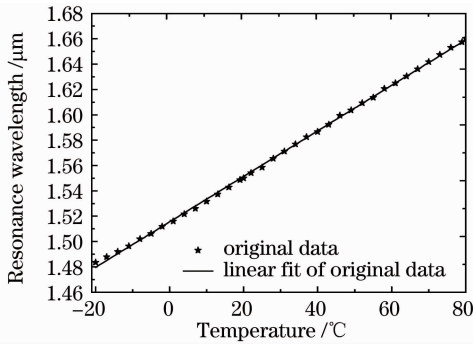


图7 温度范围为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,PCF-LPG 传输谱的中心波长随温度的变化曲线

Fig. 7 Variation of the PCF-LPG resonance wavelength with temperature in the range of $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$

PCF-LPG 在温度范围 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 具有良好的线性敏感度,在温度传感器或可调谐光滤波器等方面具有应用价值。

参 考 文 献

- 1 J. C. Knight, T. A. Birks, P. S. J. Russell *et al.* All-silica single mode optical fiber with photonic crystal cladding[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(19): 1547~1549
- 2 R. F. Cregan, B. J. Mangan, J. C. Knight *et al.* Single-mode photonic bandgap guidance of light in air[J]. *Science*, 1999, **285**(5433): 1537~1539
- 3 T. A. Birks, J. C. Knight, P. S. J. Russell. Endlessly single-mode photonic crystal fiber[J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(13): 961~963
- 4 T. A. Birks, D. Mogilevstev, J. C. Knight *et al.* Dispersion compensation using single-material fibers[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1999, **11**(6): 674~676
- 5 J. K. Ranka, R. S. Windeler, A. J. Stentz. Optical properties of high-delta air-silica microstructure optical fibers[J]. *Opt. Lett.*, 2000, **25**(11): 796~798
- 6 B. J. Eggleton, C. Kerbage, P. S. Westbrook *et al.* Microstructured optical fiber devices[J]. *Opt. Express*, 2001, **9**(13): 698~713
- 7 D. Noordegraaf, L. Scolari, J. Lægsgaard *et al.* Electrically and mechanically induced long period gratings in liquid crystal photonic bandgap fibers[J]. *Opt. Express*, 2007, **15**(13): 7901~7912
- 8 Li Xuejin, Yu Yongqin, Hong Xueming *et al.* Analysis on temperature sensing properties of photonic crystal fiber based on liquid filling[J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(5): 1140~1144

- 9 李学金, 于永芹, 洪学明 等. 基于液体填充的光子晶体光纤温度传感特性分析[J]. *中国激光*, 2009, **36**(5): 1140~1144
- 10 J. B. Jensen, J. Riisshede, J. Broengex *et al.* Photonic crystal fibers: fundamental properties and applications within sensors [C]. *Sensors*, 2003, Proc. IEEE, 269~278
- 11 T. M. Monro, W. Belardi, K. Furusawa *et al.* Sensing with microstructured optical fibres[J]. *Meas. Sci. & Technol.*, 2001, **12**(7): 854~858
- 12 L. Rindorf, J. B. Jensen, M. Dufva *et al.* Photonic crystal fiber long-period gratings for biochemical sensing [J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(18): 8224~8231
- 13 Luo Tao, Gu Zhengtian. Progress of biological and chemical sensors based on long period grating in photonic crystal fiber[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2009, **46**(11): 34~40
- 14 罗涛, 顾铮先. 光子晶体光纤光栅在生物和化学传感器领域研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2009, **46**(11): 34~40
- 15 J. S. Petrovic, H. Dobb, V. K. Mezentssev *et al.* Sensitivity of LPGs in PCFs fabricated by an electric arc to temperature, strain, and external refractive index[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(5): 1306~1312
- 16 C. L. Zhao, L. Xiao, J. Ju *et al.* Strain and temperature characteristics of a long-period grating written in a photonic crystal fiber and its application as a temperature-insensitive strain sensor[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2008, **26**(2): 220~227
- 17 W. Shin, Y. L. Lee, T. J. Eom *et al.* Temperature insensitive strain sensor based on a long period fiber grating pair in photonic crystal fibers [C]. Hong Kong: Proc. Optoelectronics and Communications Conference, 2009. 1~2
- 18 C. L. Zhao, M. S. Demokan, W. Jin *et al.* A cheap and practical FBG temperature sensor utilizing a long-period grating in a photonic crystal fiber[J]. *Opt. Commun.*, 2007, **276**(2): 242~245
- 19 Yu Chongxiu, Yuan Jinhui, Shen Xiangwei. Recent progress of study on photonic crystal fiber[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(9): 0900139
- 20 余重秀, 苑金辉, 申向伟. 光子晶体光纤的研究新进展[J]. *光学学报*, 2011, **31**(9): 0900139
- 21 A. Yariv, P. Yeh. *Photonics: Optical Electronics in Modern Communications*[M]. New York: Oxford University Press, 2007
- 22 Qi Yuefeng, Bi Weihong. Theoretical study on a kind of photonic crystal fiber grating based on structural change[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(1): 0106003
- 23 齐跃峰, 毕卫红. 一种基于结构性改变的光子晶体光纤光栅理论研究[J]. *光学学报*, 2011, **31**(1): 0106003
- 24 Y. Bai, K. S. Chiang. Analysis and design of long-period waveguide grating couplers[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2005, **23**(12): 4363~4373
- 25 V. Bhatia, A. M. Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensor[J]. *Opt. Lett.*, 1996, **21**(9): 692~694

栏目编辑: 谢 婧