

双螺旋圆单偏振光纤的偏振滤波特性研究

肖悦娱^{1,2} 高祎玮^{1,2} 颜锦奎¹ 彭 蕾^{1,2}

¹上海大学特种光纤与光接入网省部共建重点实验室, 上海 200072

²上海大学光纤研究所, 上海 201800

摘要 双螺旋手征光纤光栅具有波长和偏振的双重选择性,在光纤传感系统中极具应用价值。目前报道的具有圆偏振滤波作用的双螺旋手征光纤光栅螺距仅为几十微米,传输损耗高,机械强度低,限制了其应用范围。基于光纤的复耦合模方程,研究了常用的涂覆光纤,即当涂覆层折射率大于包层折射率时,双螺旋光纤的偏振滤波特性。研究表明,涂覆光纤不仅能增加光纤的机械强度,还能将光纤的螺距增加到数百微米。因此,光纤的传输损耗可被有效降低,有望满足中等距离的传输或传感光纤的要求。分析了光纤参数对双螺旋光纤偏振滤波性能的影响,结果表明增加芯层模和包层模的耦合系数是提高光纤偏振性能的有效途径,对双螺旋圆单偏振光纤的研制有一定的指导意义。

关键词 光纤光学; 圆单偏振光纤; 双螺旋光纤; 复耦合模方程

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0105002

Research on Polarization Filtering Properties of Double-Helix Circularly Polarizing Fibers

Xiao Yueyu^{1,2} Gao Yiwei^{1,2} Yan Jinkui¹ Peng Lei^{1,2}

¹Key Laboratory of Specialty Fiber Optics and Optical Access Networks, Shanghai University, Shanghai 200072, China

²Institute of Fiber Optics, Shanghai University, Shanghai 201800, China

Abstract The double-helix chiral fiber grating is a polarization and wavelength selective, which is very potential for applications in the field of optical fiber sensing. However, the spin pitch of the reported chiral fiber grating with circularly polarizing property is only tens of micrometers. The high insertion loss and low mechanical strength limit its application scope. The polarization filtering properties of the normally used coated fiber, whose refractive index of the jacket is higher than that of the cladding, are studied using the complex coupled mode equations. It is revealed that not only the mechanical strength increases in the coated fiber, but also the spin pitch increases to hundreds of micrometers. For this reason, loss can be reduced to meet the transmission requirement of a medium length of fiber. Influence of the parameters of the double-helix circularly polarizing fiber on the polarization filtering properties is analyzed. It is shown that increasing the coupling coefficient of the core mode and the cladding leaky mode is an effective way to improve the polarization filtering performance of the fiber. The results are instructive for the research and developing of the double-helix circularly polarizing fibers.

Key words fiber optics; circularly polarizing fiber; double-chiral fiber; complex coupled mode equations

OCIS codes 060.2310; 060.2400; 230.5440

1 引 言

随着光纤通信和传感系统需求的不断发展,许多新型特种光纤应运而生,单偏振光纤(PZF)就是其中的一种。线单偏振光纤的概念是20世纪80年代提出的^[1],由于克服了偏振串扰和偏振模色散的影响,单偏振

收稿日期: 2015-05-26; 收到修改稿日期: 2015-07-13

基金项目: 国家自然科学基金(61107075)、上海市重点学科建设项目(S30108)

作者简介: 肖悦娱(1977—),女,博士,助理研究员,主要从事特种光纤及光纤传感等方面的研究。

E-mail: yyx@staff.shu.edu.cn

光纤目前被广泛用于光纤起偏器,光纤陀螺和光纤激光器等对偏振态有严格要求的系统中^[2-3],线单偏振光纤的研究和开发也受到了极大的关注^[4-5]。相比于线偏振光,圆偏振光具有更好的空间对称性,而且在某些场合,如光纤电流传感器^[6],圆偏振光系统是线偏振光系统无法替代的,因此研制圆单偏振(CPZF)光纤具有重要的理论和应用价值。

2004年,Kopp等^[7]提出并制作了螺距为几十微米到几百微米的矩形纤芯旋扭光纤,称之为双螺旋手征光纤光栅。实验表明,该光纤结构可以实现偏振和波长的双重选择,即在某些频段,仅能通过一种圆偏振光(左旋或右旋),滤除与之正交的另一种圆偏振光。根据螺距的大小,双螺旋手征光纤光栅可分为两类:螺距为几十微米的中周期手征光纤光栅(CIPG)和螺距为几百微米的长周期手征光纤光栅(CLPG)。CLPG的偏振滤波特性与光纤长度有关,因此只有CIPG具有真正的圆偏振滤波作用。但是CIPG的螺距仅为几十微米,无法满足一些传感系统(如光纤电流传感器)中的传感光纤的传输损耗和机械强度要求,只能用于制作光纤器件。

本文基于光纤的复耦合模方程,研究了常用的涂覆光纤,即当涂覆层折射率大于内包层折射率时,双螺旋结构中光纤纤芯模式的耦合和损耗。研究表明高折射率的涂覆层不仅能增加光纤的机械强度,还能将光纤芯层模式和包层辐射模耦合所需的螺距增加到几百微米。由于降低了光纤的模式匹配损耗和制作的工艺要求,光纤长度有望增加到数米至数十米,可满足光纤系统中中等距离的传输或传感光纤的要求,因此将其称为圆单偏振光纤。模式间的耦合系数和包层泄露模的损耗系数,是影响光纤偏振滤波性能的主要参数,数值分析表明提高耦合系数能有效地改善光纤的偏振滤波性能。

2 双螺旋圆偏振光纤的复耦合模方程

双螺旋圆偏振光纤结构如图1所示(PML:完美匹配层)。纤芯为矩形,宽为 a ,长为 b 。纤芯折射率为 n_1 ,包层和涂覆层折射率分别为 n_2 和 n_3 ,其中 $n_2 < n_3$ 。螺旋光纤是在光纤拉丝的同时,同轴高速旋转光纤的预制棒制得的。设预制棒的旋转速度为 N r/min,光纤拉丝的速度为 V m/min,则在光传输方向,光纤的螺距为 $P=V/N$ 。

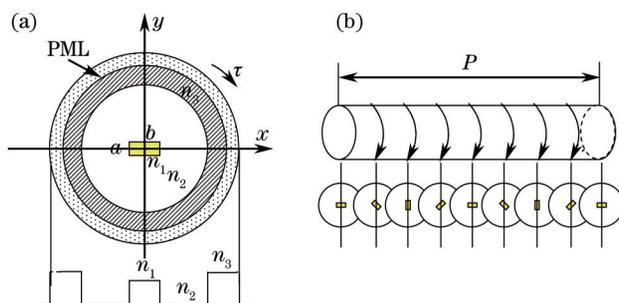


图1 双螺旋圆偏振光纤的结构。(a) 横向结构;(b) 纵向结构

Fig.1 Schematic of the double-helix CPZF. (a) Transversal structure; (b) longitudinal structure

当光纤的涂覆层折射率 n_3 高于包层折射率 n_2 时,光纤中不存在离散的包层模式,只有连续的辐射模,此时耦合模方程含有积分项,没有严格的解析解^[8]。Koyamada^[9]给出了耦合模方程解的近似形式,但只适合于弱耦合的情况。童治等^[10]采用数值积分求解方程,但求解过程仍较为复杂。Lu等^[11]提出了一种用带有完美匹配层(PML)边界的闭合波导代替开波导的方法,将连续的辐射模耦合问题转化为离散的泄露模耦合问题,如图1所示。在加入PML边界后,当包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 时,泄露模的传播常数之间相隔较远,可以只考虑和纤芯模式同步的泄露模之间的耦合,此时耦合模方程可写为:

$$\begin{cases} \frac{\partial a_{co}(z)}{\partial z} - \gamma_{co} a_{co}(z) = j a_{cl}(z) (\kappa'_{co-cl} + \kappa^z_{co-cl}) \\ \frac{\partial a_{cl}(z)}{\partial z} - \gamma_{cl} a_{cl}(z) = j a_{co}(z) (\kappa'_{co-cl} + \kappa^z_{co-cl}) \end{cases}, \quad (1)$$

式中 a_{co} 和 a_{cl} 分别是纤芯模式和泄露模式的复振幅, γ_{co} 和 γ_{cl} 是它们的复传播常数, $\gamma = j\beta - \alpha$ 。横向耦合系数为 $\kappa'_{co-cl} = \frac{\omega}{4} \iint \tilde{\epsilon} \mathbf{e}_{cot} \cdot \mathbf{e}_{cl}^* dx dy$,纵向耦合系数为 $\kappa^z_{co-cl} = \frac{\omega}{4} \iint \tilde{\epsilon} e_{coz} \cdot e_{clz}^* dx dy$ (ω 为光的角频率, $\tilde{\epsilon}$ 为折射率微扰, \mathbf{e}_{cot} 、 \mathbf{e}_{clt} 、 \mathbf{e}_{coz} 和 \mathbf{e}_{clz} 分别为纤芯模式和泄露模式的横向电场分布和纵向电场分布)。

由于螺旋光纤的折射率分布不仅在光的传输方向上具有周期性,而且在光纤的横截面上也具有周期性。对于矩形纤芯,当到中心的距离 $r < a/2$ 和 $r > [a^2/4 + b^2/4]^{1/2}$ 时,介电常数对半径 r 和角度 θ 的函数 $\varepsilon(r, \theta)$ 为常数;而当 $a/2 < r < [a^2/4 + b^2/4]^{1/2}$ 时,任意半径 r 上的介电常数 $\varepsilon(r, \theta)$ 随角度 θ 的函数是周期为 π 的函数,因此可表示为:

$$\varepsilon(r, \theta) = \varepsilon_0(r) + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_k(r) [\exp(j2k\theta) + \exp(-j2k\theta)], \quad (2)$$

当光纤沿 z 轴进行旋转时, $\theta \rightarrow \theta \mp k_u z$, 式中 \mp 表示光纤结构为左手或右手螺旋, $k_u = 2\pi/P$, 则(2)式可以写为:

$$\varepsilon(r, \theta, z) = \varepsilon_0(r) + \sum_{k=1}^{\infty} \varepsilon_k(r) \{ \exp[j2k(\theta \mp k_u z)] + \exp[-j2k(\theta \mp k_u z)] \}, \quad (3)$$

以 $\varepsilon_0(r)$ 作为正规波导,将 $\varepsilon(r, \theta, z)$ 代入耦合模(1)式,可得到左手双螺旋光纤的匹配条件为:

$$\begin{cases} \beta_{cl} - \beta_{co} + 2kk_u = 0 \\ m_{cl} - m_{co} - 2k = 0 \end{cases}, \quad (4)$$

或者为:

$$\begin{cases} \beta_{cl} - \beta_{co} - 2kk_u = 0 \\ m_{cl} - m_{co} + 2k = 0 \end{cases}, \quad (5)$$

式中 m_{cl} 和 m_{co} 分别为包层和芯层模式的周向周期数。由(4)式和(5)式可知,相比于传统的长周期光纤光栅,螺旋光纤增加了周向的匹配条件。一般而言,纤芯模的传播常数 β_{co} 大于包层模的传播常数 β_{cl} ,取一阶折射率微扰($k=1$),可知 $m_{cl} - m_{co} = 2$ 。左旋和右旋芯层基模 $HE_{co,1}^{\pm}$ 的 m_{co} 分别为 -1 和 $+1$,因此左旋基模能和 $m_{cl}=1$ 的包层模式($HE_{cl,1n}^-$ 和 $EH_{cl,1n}^+$)耦合,右旋基模能和 $m_{cl}=3$ 的包层模式(即 $HE_{cl,3n}^-$)耦合,而 $HE_{cl,3n}^-$ 和 $EH_{cl,1n}^+$ 是简并的,耦合强度相同。左旋芯层模的耦合项多了右旋包层 $HE_{cl,1n}^-$,这就是圆偏振光纤偏振选择的内在机理。只考虑左旋芯层模 $HE_{co,1}^+$ 和右旋包层 $HE_{cl,1n}^-$ 的耦合,横向耦合系数 $\kappa'_{co-cl} = 0$ 。设在光纤起始处芯层模 $HE_{co,1}^+$ 和包层模 $HE_{cl,1n}^-$ 的复振幅分别为 $a_{co}^+(0) = 1$ 和 $a_{cl}^-(0) = 0$,则耦合模(1)式的解为:

$$\begin{cases} a_{co}^+(z) = \left[\cos(sz) + \frac{\delta}{s} \sin(sz) \right] \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha_{cl}z\right) \\ a_{cl}^-(z) = \left[j\frac{\kappa}{s} \sin(sz) \right] \exp\left(-\frac{1}{2}\alpha_{cl}z\right) \end{cases}, \quad (6)$$

式中 $\delta = 0.5\alpha_{cl} + 0.5j\left(\beta_{co} - \beta_{cl} - \frac{2\pi}{0.5P}\right)$, $\kappa = \kappa'_{co-cl}$, $s = \sqrt{\kappa^2 - \delta^2}$ 。左旋芯层模的透射率为:

$$T(z) = \exp(-\alpha_{cl}z) \left| \cos(sz) + \frac{\delta}{s} \sin(sz) \right|^2, \quad (7)$$

与长周期光纤光栅类似,左旋芯层模的透射谱是一系列的损耗峰,表现为带阻滤波的特性,圆偏振光纤的偏振选择性只在某些频段发生。圆偏振光纤的谐振条件为 $\text{Im}(\delta) = 0$,即:

$$\beta_{co} - \beta_{cl} - \frac{2\pi}{0.5P} = 0, \quad (8)$$

设矩形纤芯的宽为 $a=6 \mu\text{m}$,长为 $b=8 \mu\text{m}$,纤芯折射率为 $n_1=1.47$,包层折射率为 $n_2=1.458$,涂覆折射率为 $n_3=1.5$ 。当中心波长为 $1.55 \mu\text{m}$ 时,左旋芯层模 $HE_{co,1}^+$ 的有效折射率为 $n_{\text{eff},co} = 1.465426$,右旋包层模 $HE_{cl,1n}^-$ 的有效折射率为 $n_{\text{eff},cl} = 1.457950$,则光纤最大螺距可取为 $P=414.66 \mu\text{m}$ (数值计算网格设为 $0.02 \mu\text{m}$,PML边界设为50层)。当外包层折射率取 $n_3=1.33$ (CLPG)时,螺距最大可取为 $P=414.72 \mu\text{m}$,因此当 $n_2 < n_3$ 时,涂覆光纤的螺距与CLPG是相当的,远大于CIPG的螺距。实验表明,螺距的大小对光纤的损耗有重要的影响,一方面光纤沿传输方向的折射率变化越快,光纤的模式匹配损耗越大;另一方面,由于光纤是在预制棒旋转的同时拉丝而成的,螺距越小要求马达的转速越快或拉丝速度越慢,工艺控制难度增加,严重影响光纤的传输损耗。因此用折射率较高的涂覆材料对圆偏振光纤进行涂覆,不仅能增加光纤的机械强度,还能有效降低光纤的传输损耗,在目前的工艺条件下,光纤可传输数米到数十米。

3 数值模拟结果及讨论

由(7)式可知,左旋圆偏振光的透射谱与光纤长度的关系受 α_{cl} 和 κ 这两个参数的影响。图2为当光纤长度 $L=1\text{ m}$ 时,透射损耗峰值 T_{\min} 与参数 α_{cl} 、 κ 的关系,图3为透射峰的3 dB半峰全宽与参数 α_{cl} 、 κ 的关系。从图中可以看出,当损耗系数 α_{cl} 一定时,随着耦合系数 κ 的增加,损耗峰加深,半峰全宽也增大;当耦合系数 κ 一定时, α_{cl} 的增加能增大损耗峰的半峰全宽,但会削减损耗峰的深度。因此,增加耦合系数 κ 是提高圆偏振光纤的偏振滤波性能的有效途径。

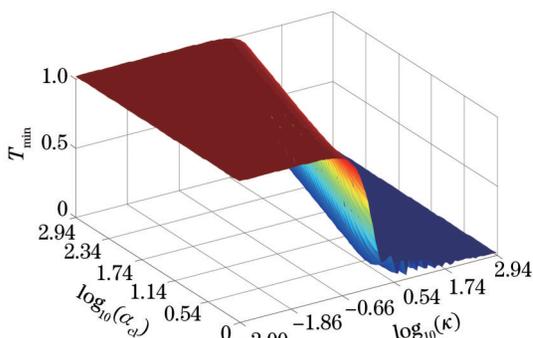


图2 损耗峰值与参数 α_{cl} 、 κ 的关系

Fig.2 Relationship between the minimum of loss peak and the parameters of α_{cl} and κ

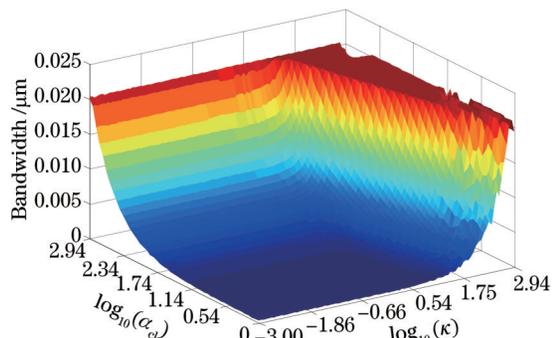


图3 损耗峰半峰全宽与参数 α_{cl} 、 κ 的关系

Fig.3 Relationship between the bandwidth of loss peak and the parameters of α_{cl} and κ

图4为光纤归一化频率不变时,模式 $HE_{11,co}^+$ 和 $HE_{11,cl}^-$ 的耦合系数 κ 和损耗系数 α_{cl} 随纤芯折射率 n_1 的变化情况。从图中可以看出,由于折射率微扰和芯层模式的分布都会受到芯层折射率的影响,耦合系数 κ 随 n_1 的变化较大。事实上,耦合系数受两分布相互关系的影响,变化规律比较复杂。包层模式 $HE_{11,cl}^-$ 主要分布在包层内,因此其传输特性受纤芯折射率变化的影响较小。随着芯层折射率的增加, $HE_{11,cl}^-$ 模的能量向纤芯集中,因此损耗系数降低。图5为当 n_1 分别为1.470,1.528和1.600时,左旋圆偏振光的透射谱随光纤长度的变化,从图中可以看出芯层折射率为1.600的光纤的偏振滤波性能最好。损耗峰最小值为0, $L=1\text{ m}$ 时,损耗峰3 dB半峰全宽为4 nm。

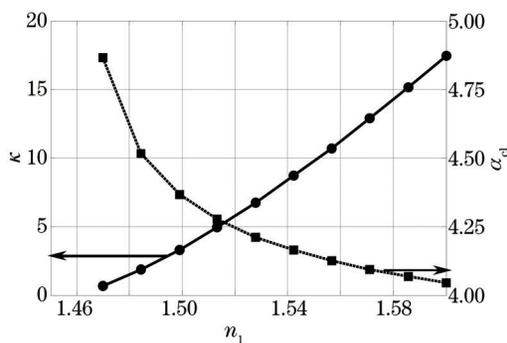


图4 损耗系数、耦合系数与纤芯折射率的关系

Fig.4 Attenuation coefficient and coupling coefficient along with the change of the refractive index of fiber core

与传统光纤光栅不同,圆偏振光纤各阶模式的耦合系数不仅和折射率的大小有关,还和折射率的分布有关。图6为当纤芯折射率和矩形的宽度不变时,耦合系数随矩形长度的变化。从图中可以看出,当纤芯为正方形时,一阶折射率微扰很小,耦合系数也很小;随着矩形长度 b 的增加,虽然一阶折射率微扰增加,但由于模式的分布也发生了变化,因此耦合系数并不是单调增加的。

4 结论

基于光纤的复耦合模方程,研究了常用的涂覆光纤,即当涂覆层折射率大于包层折射率时,双螺旋圆单偏振光纤的偏振滤波特性。研究结果表明,涂覆光纤不仅能增加光纤的机械强度,还能增加芯层模和包层

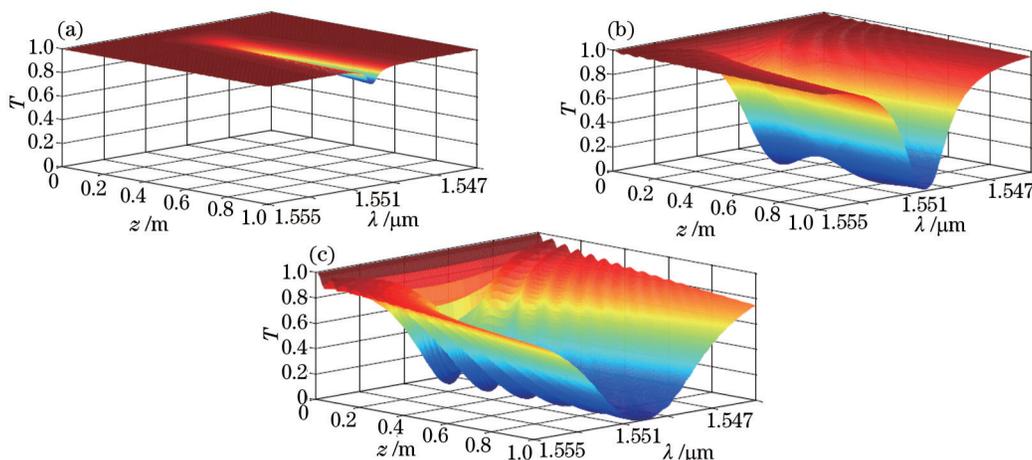


图5 损耗谱随光纤长度的变化。(a) $n_1=1.470$; (b) $n_1=1.528$; (c) $n_1=1.600$

Fig.5 Transmission spectrum along with the change of the length of fiber. (a) $n_1=1.470$; (b) $n_1=1.528$; (c) $n_1=1.600$

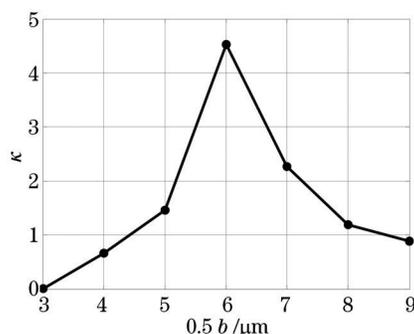


图6 耦合系数与矩形纤芯长度的关系

Fig.6 Coupling coefficient along with the change of the length of the fiber core

模耦合的螺距,有效地降低双螺旋光纤的传输损耗。数值分析了光纤参数对双螺旋圆单偏振光纤偏振滤波性能的影响,结果表明提高耦合系数是提高光纤偏振性能的有效途径,对双螺旋圆单偏振光纤的研制有一定的指导作用。

参考文献

- 1 J R Simpson, R H Stolen, F M Sears. A single-polarization fiber[J]. Journal of Lightwave Technology, 1983, 1(2): 370-374.
- 2 Shenping Li, Xin Chen, Dmitri V Kuksenkov. Wavelength tunable stretched-pulse mode-locked all-fiber erbium ring laser with single polarization fiber[J]. Optics Express, 2006, 14(13): 6098-6102.
- 3 Yuchao Yan, Huilian Ma, Zhonghe Jin. Reducing polarization-fluctuation induced drift in resonant fiber optic gyro by using single-polarized fiber[J]. Optics Express, 2015, 23(3): 2002-2009.
- 4 Wang Jingli, Chen Heming. Single-polarization single-mode rhombic-hole terahertz photonic crystal fibers[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(9): 0906002.
汪静丽,陈鹤鸣.菱形空气孔的单一偏振单模太赫兹光子晶体光纤[J].光学学报,2014,34(9):0906002.
- 5 Zhang Yanyu, Li Qianghua. Analysis of propagation properties of polarized wave in uniaxial anisotropic crystal fiber core[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(2): 0206004.
张岩宇,励强华.单轴各向异性晶体纤芯偏振光传播特性分析[J].光学学报,2014,34(2):0206004.
- 6 Wang Wei, Liu Xiaolong. Effect of azimuth of fiber optic principal axes on fiber optic current sensors[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114003.
王伟,刘晓隆.光纤主轴方位角对光纤电流传感器的影响[J].中国激光,2013,40(1):0114003.
- 7 Victor I Kopp, Vitor M Churikov, Jonathan Singer, et al.. Chiral fiber gratings[J]. Science, 2004, 305(5680): 74-75.
- 8 T Erdogan. Fiber grating spectra[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1277-1294.
- 9 Yahei Koyamada. Numerical analysis of core-mode to radiation-mode coupling in long-period fiber gratings[J]. IEEE Photonic Technology

Letters, 2001, 13(4): 308-310.

10 Tong Zhi, Tao Feng, Wei Huai, *et al.*. Numerical analysis of coupling from core mode to radiation mode in long period fiber gratings[J]. Acta Electronic Sinica, 2003, 31(1): 109-116.

童 治, 陶 锋, 魏淮, 等. 长周期光纤光栅中基模到辐射模耦合的数值分析[J]. 电子学报, 2003, 31(1): 109-116.

11 Yuchun Lu, Li Yang, Weiping Huang, *et al.*. Unified approach for coupling to cladding and radiation modes in fiber Bragg and long-period gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2009, 27(11): 1461-1468.

栏目编辑: 刘丰瑞