

偏心光纤倏逝场传感灵敏度的研究

刘建霞^{1,2} 薛丽² 陈官倬³ 李志军¹

¹黑龙江科技大学电子与信息工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150022

²湖北科技学院电子与信息工程学院, 湖北 咸宁 437100

³哈尔滨工程大学纤维集成光学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

摘要 利用有限元法对影响偏心光纤倏逝场传感灵敏度的模场特性和倏逝场特性进行了理论研究与仿真分析。利用瑞利散射机理对偏心光纤倏逝场的分布式传感长度进行了理论计算。研究表明,若要在倏逝场传感中获得较高的传感灵敏度,其偏心距离的设计范围为 $8\sim 10\ \mu\text{m}$;光纤涂层的折射率应尽量减小;估算偏心光纤倏逝场传感长度大约在 $16\sim 160\ \text{m}$ 。

关键词 集成光学; 偏心光纤; 倏逝场; 灵敏度

中图分类号 TN25 **文献标识码** A

doi: 10.3788/LOP53.071301

Sensitivity of Evanescent Field Sensors Based on Eccentric Core Optical Fiber

Liu Jianxia^{1,2} Xue Li² Chen Gongdai³ Li Zhijun¹

¹ School of Electronics and Information Engineering, Heilongjiang University of Science and Technology, Harbin, Heilongjiang 150022, China

² School of Electronics and Information Engineering, Hubei University of Science and Technology, Xianning, Hubei 437100, China

³ Key Laboratory of In-Fiber Integrated Optics, Ministry of Education, Harbin Engineering University, Harbin, Heilongjiang 150001, China

Abstract The properties of model field and evanescent field are theoretically studied and simulated using finite element method, which have a certain extent effect on the sensitivity of the fiber evanescent field sensors based on eccentric core optical fiber. The distributed sensing length of the fiber evanescent field sensors is also calculated based on the Rayleigh scattering theory. The results show that in order to obtain high sensitivity in evanescent field sensing, the eccentric distance is designed to be about $8\sim 10\ \mu\text{m}$ and the refractive index of fiber coating should be low as soon as possible. The sensing length of the fiber evanescent field sensors is estimated to be $16\sim 160\ \text{m}$.

Key words integrated optics; eccentric core optical fiber; evanescent field; sensitivity

OCIS codes 130.6010; 130.0250; 060.2370; 060.2310

1 引言

由于光纤通信为信息技术的发展提供了基础,且显示出诱人的前景和巨大的市场,因而主要依从于光纤通信的光纤技术得以发展。同时光纤产品主要针对光纤通信的要求也被研发和设计,因此早期用于传感器的光纤,大多数直接使用或使用某些特殊处理后的通信光纤。但随着光纤传感技术的发展,仅使用通信光纤已经无法满足光纤传感技术的要求。因此,开发各种适合于传感技术要求的特种光纤及其相关的器件技术^[1-8]显得尤为重要,这里的特种光纤是相对于传统的通信光纤而言的。

收稿日期: 2015-12-17; 收到修改稿日期: 2016-02-09; 网络出版日期: 2016-06-25

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究项目(12541703)

作者简介: 刘建霞(1979—),女,博士,讲师,主要从事纤维集成光学和光纤传感方面的研究。E-mail: fiber_ljx@126.com

偏心光纤(ECOF)是一种新型几何结构光纤,其光纤纤芯与包层呈非对称结构。这一概念最初是由日本科学家 Miyashita 等^[9]于 1974 年提出来的,其设计的光纤的纤芯偏离中心位置,仅有一小部分与折射率较低的外部套管的内表面相连,从结构上看,与其说是偏心光纤,不如称其为空芯光纤或悬挂芯光纤。普遍意义上的偏心光纤是由日本科学家 Matsuda 等^[10]于 1992 年提出。对于偏心光纤而言,光纤的纤芯偏离中心的距离和光纤包层的厚度是两个重要的参数^[11],这两个参数的选取直接影响了偏心光纤的特性及其应用领域。目前,对偏芯光纤的研究主要集中在 3 个方面,即偏芯光纤模式场的理论研究、基于偏心光纤的应用研究(包括器件与传感)以及新型偏心光纤结构等。例如,1997 年 Nakamura 等^[12]报道了一种矩形包层的偏心光纤;2011 年 Guan 等^[13]报道了一种嵌入式悬挂芯光纤;2014 年马林等^[14]对基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性进行了研究。

本文研究了偏心光纤的倏逝场传感特性,利用有限元法对影响偏心光纤倏逝场传感灵敏度的模场特性和倏逝场特性进行了理论与仿真分析。利用瑞利散射机理估算了偏心光纤倏逝场的分布式传感长度。

2 偏心光纤倏逝场传感原理

2.1 偏心光纤的制备

偏心光纤的预制棒可以通过超声钻孔技术或者是侧边开槽技术进行制备。以超声钻孔为例,其制作过程为:1) 在一个石英玻璃预制棒上,利用一个机械型超声钻子钻出一个偏心的孔;2) 选取一种折射率较高的玻璃棒进行填充;3) 利用熔融拉丝技术控制所需要的偏心光纤。本研究小组利用超声钻孔技术和侧边开槽技术制备的偏心光纤的样本如图 1 所示。光纤纤芯和包层的折射率差 $\Delta n = n_1 - n_2 = 0.005$ 。光纤的纤芯是圆形的,纤芯半径为 $R_c = 5.75 \mu\text{m}$,纤芯的边缘距包层的最短距离(偏心距离)为 $k = 4.6 \mu\text{m}$ 。

偏心光纤的横截面结构如图 2 所示,图中光纤包层的半径为 R_1 ,包层外涂层半径为 R_2 。光纤纤芯折射率为 n_1 ,包层折射率为 n_2 ,外涂层折射率为 n_3 。

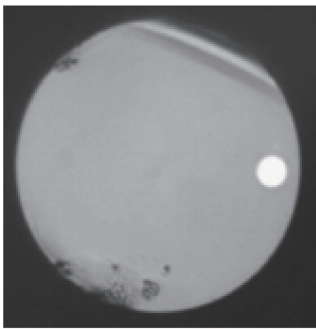


图 1 偏心光纤样本的横截面

Fig. 1 Cross section picture of ECOF sample

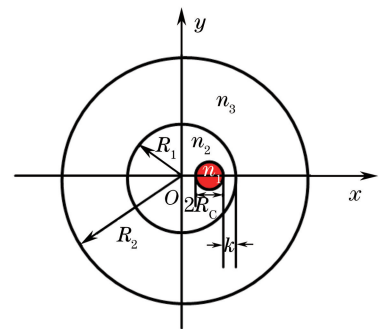


图 2 偏心光纤横截面结构

Fig. 2 Cross section diagram of ECOF

2.2 偏心光纤倏逝场传感原理

光纤倏逝场传感器是指当光在光纤中传输时,延伸到纤芯以外区域的光(倏逝光)与该区域中的物质发生相互作用,从而引起光纤中光场的重新分布以及传输特性的改变。通过检测光功率的变化,实现对外界物质的感知和识别,即光纤倏逝场传感。设传感光纤的长度为 l ,入射到光纤中的初始光强为 I_0 ,则从光纤另一端输出的光强可以表示为^[15-16]

$$I = I_0 \exp(-ralC), \quad (1)$$

式中 a 为光吸收系数, C 为渗入到光纤涂层中的物质的量浓度, r 为相对灵敏度,仅与物质对光的直接吸收有关,其定义为^[17]

$$r = (n_r/n_e) f, \quad (2)$$

式中 n_r 为被检测物质的折射率, n_e 为光纤导模的有效折射率, f 为与被检测物质相互作用的倏逝场的光强占总光强的百分比。由(2)式可知,偏心光纤导模的有效折射率 n_e 和倏逝波场光强比 f 是影响偏心光纤倏逝场传感灵敏度的两个关键因素。

3 偏心光纤倏逝场传感灵敏度的关键特性仿真分析

采用有限元法(FEM)并利用 COMSOL Multiphysics 4.3a 软件进行仿真分析。根据偏心光纤的几何结构,建立其在 COMSOL Multiphysics 中的光学波导模型。模拟分析中采用的参数如下: $n_1 = 1.4510$, $n_2 = 1.4468$, $R_c = 4.5 \mu\text{m}$, $R_1 = 62.5 \mu\text{m}$ 。

3.1 偏心光纤的模场特性

有效折射率是表征光波导的重要参数,用 n_{eff} 表示,已知有效折射率才能计算波导的传播常数。在波导中,传播常数 β 是真空中的 n_{eff} 倍,表示为

$$n_{\text{eff}} = \frac{\beta}{k_0} \quad (3)$$

有效折射率不仅和波长有关,也和模式相关,因此也称为模式折射率。有效折射率不仅仅是一种材料的性质,它也依赖于整个波导的设计。

仿真研究中,根据 FEM 法的基本原理和在 COMSOL Multiphysics 4.3a 模块中对光纤光学结构模型进行的模拟计算,得到了偏心光纤在不同工作波长下的基模有效折射率与偏心距离和涂层折射率的关系。

基模的有效折射率在不同波长条件下随偏心距离的变化 [$n_3 = 1$ (空气)] 如图 3 所示。结果表明,基模的有效折射率随着偏心距离的增加而增加,当偏心距离达到一定值时,基模的有效折射率不再发生变化,这意味着随着偏心距离的增加,偏心距离对基模有效折射率的影响越来越小。因此,若要在倏逝场传感中获得较高的传感灵敏度,偏心距离的设计范围为 $8 \sim 10 \mu\text{m}$ 。这是因为随着偏心距离的增加,这种非对称结构的偏心光纤将完全转变成一个轴对称的普通光纤,而这时偏心距离对基模有效折射率的影响也将趋于零。从图 3 还可以看出,在偏心距离相同的情况下,工作波长越长,基模的有效折射率反而越小。

基模的有效折射率在不同波长条件下随光纤涂层折射率的变化如图 4 所示,此时偏心距离 $k = 1 \mu\text{m}$ 。结果表明,基模的有效折射率随光纤涂层折射率的增加而增加。当涂层折射率较小时,有效折射率的变化是缓慢的,随着涂层折射率的不断增加,基模的有效折射率变化程度逐渐增大。由(2)式可知,要想获得较低的纤芯基模有效折射率同时实现较高的传感灵敏度,光纤涂层的折射率应该越接近包层的折射率;当涂层折射率增加到与包层折射率相同时,那么偏心光纤就转化为了传统的轴对称型单模光纤。从图 4 还可以看出,在光纤涂层折射率相同的情况下,工作波长越长,基模的有效折射率反而越小,其相应的传感灵敏度会增加。

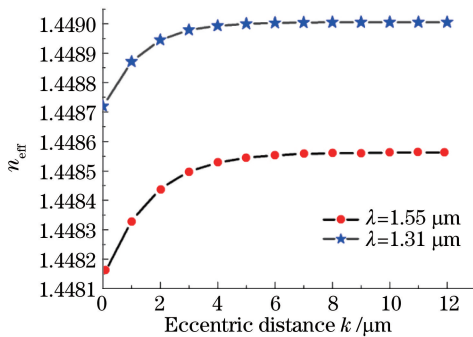


图 3 基模有效折射率与偏心距离的关系

Fig. 3 Relationship between effective index of fundamental mode and eccentric distance

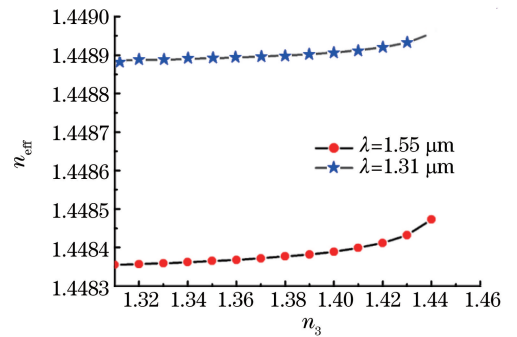


图 4 基模有效折射率与涂层折射率的关系

Fig. 4 Relationship between effective index of fundamental mode and refractive index of coating

3.2 基模的倏逝场特性

偏心光纤中两个低阶模的光场分布如图 5 所示。其中图 5(a)和(b)为最低阶模式(HE_{11} 模)的两个相互正交的偏振状态 HE_{11}^x 和 HE_{11}^y 。次高阶模是 4 种模式的简并模如图 5(c)~(f)所示,即准 $\text{TE}_{01}^{(1)}$ 、准 $\text{TE}_{01}^{(2)}$ 、准 $\text{TM}_{01}^{(1)}$ 和准 $\text{TM}_{01}^{(2)}$ 。

偏心光纤中的光场分布随偏心距离的变化如图 6 所示。当 $k = 1 \mu\text{m}$ 时,由于包层边界的原因,其光场形状发生了较为明显的变形。当 $k = 58 \mu\text{m}$ 时,偏心光纤就变成了轴对称光纤,其光场分布与轴对称光纤的光场分布一致。图 7 表示倏逝场光强占总光强的百分比随偏心距离的变化。由图 6 和 7 可知,轴对称光纤

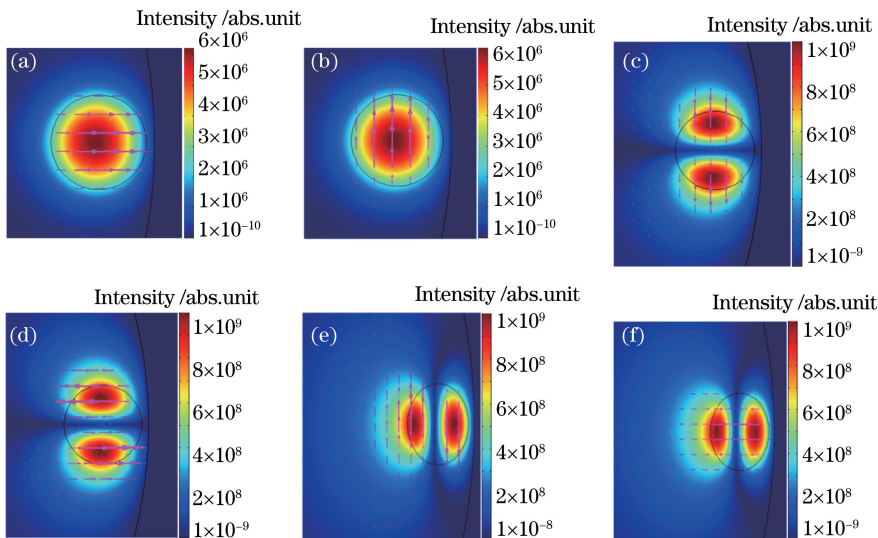


图 5 偏心光纤中两个低阶模的光场分布图。(a) $HE_{11}^{(1)}$ 模；(b) $HE_{11}^{(2)}$ 模；(c) 准 $TM_{01}^{(1)}$ 模；(d) $TE_{01}^{(1)}$ 模；(e) $TM_{01}^{(2)}$ 模；(f) $TE_{01}^{(2)}$ 模

Fig. 5 Distribution of light field of ECOF for two low-order modes. (a) $HE_{11}^{(1)}$ mode; (b) $HE_{11}^{(2)}$ mode; (c) quasi $TM_{01}^{(1)}$ mode; (d) quasi $TE_{01}^{(1)}$ mode; (e) quasi $TM_{01}^{(2)}$ mode; (f) quasi $TE_{01}^{(2)}$ mode

的光场分布随着纤芯的偏移其光场形状发生了变化,尽管会有相当一部分光能量以倏逝场的形式延伸到光纤包层的外部空间,但大部分光能量在光纤中依然保持向前传输。

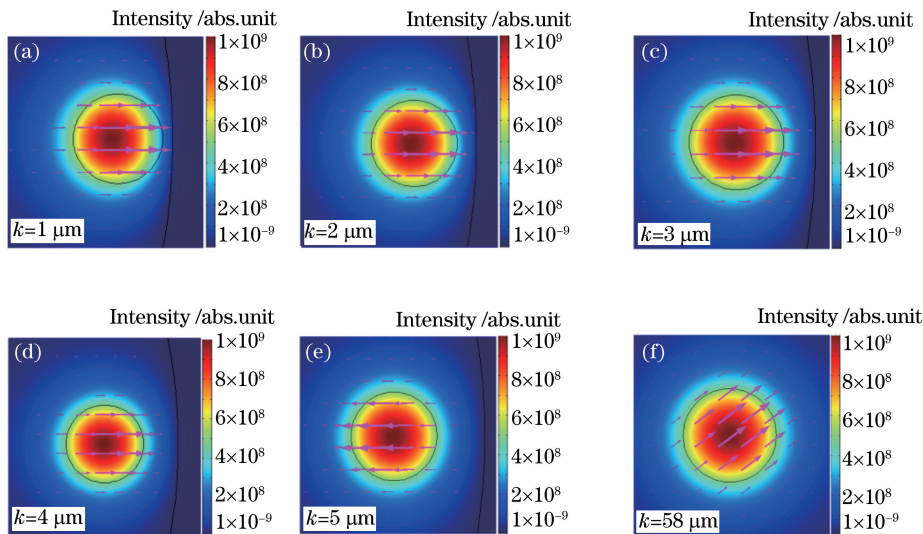


图 6 偏心光纤中的光场分布随偏心距离的变化

Fig. 6 Optics field distributions of ECOF versus eccentric distances

偏心光纤中的光场分布随光纤涂层折射率的变化关系如图 8 所示,图 9 表示倏逝场光强占总光强的百分比随涂层折射率的变化。偏心光纤的光场形状随着包层外部空间折射率的降低而发生轻微的变形,但是与纤芯的偏移量对光场形状的影响相比,外部空间折射率对光场形状的影响要弱一些。当外部空间折射率等于光纤包层折射率时,该偏心光纤就变成了一个包层无限大的轴对称光纤,其光场分布与轴对称光纤的光场分布一致。

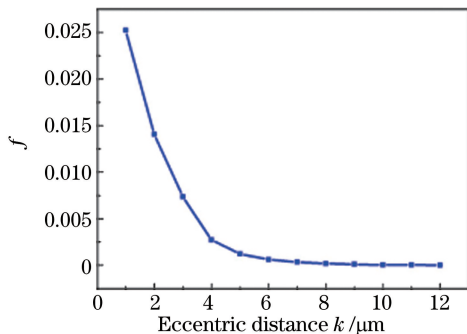


图 7 倏逝场光强占总光强的百分比随偏心距离的变化

Fig. 7 Variation of evanescent field intensity percentage in the total intensity with eccentric distance

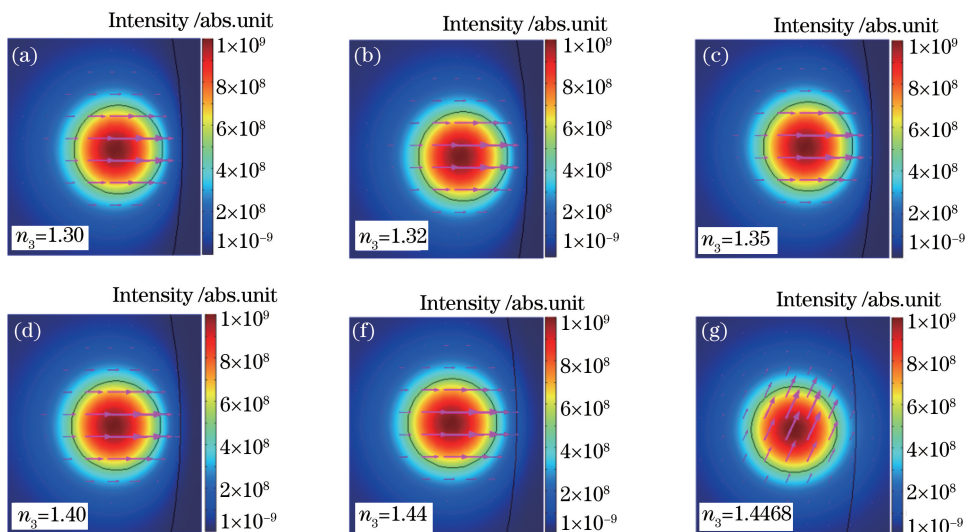


图 8 偏心光纤中的光场分布随光纤涂层折射率的变化

Fig. 8 Optics field distributions of ECOF versus refractive index of coating on fiber

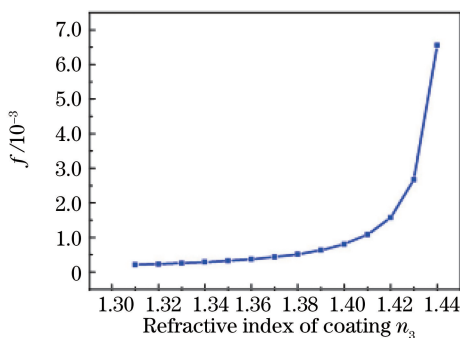


图 9 倏逝场光强占总光强的百分比随涂层折射率的变化

Fig. 9 Variation of evanescent field intensity percentage in the total intensity with refractive index of coating

3.3 倏逝场的传感长度

倏逝场传感可以利用光时域反射仪(OTDR)技术,通过测量光纤的损耗,实现对附着在光纤上的化学物质进行识别和定位。通常,有两种机理会引起传输损耗,一种是由于吸收化学物质涂层折射率的变化引起的光纤辐射损耗;另一种是由于物质渗透到光纤涂层中引起的光纤吸收损耗。本课题组主要研究第一种损耗机理,当光脉冲 $P(0)$ 激发并进入光纤中后,在光纤 z 处的散射能量沿着光纤返回激发端并被探测。光脉冲从激发到被探测所经历的时间可表示为

$$t = \frac{2z}{v_g}, \quad (4)$$

式中 v_g 为群速度。

在光纤激发端接收到的光纤 z 处散射光的能量为^[18]

$$P_{BS}(t) = \frac{v_g}{2} P(0) \alpha_s(z) B(z) \exp(-2\alpha z), \quad (5)$$

式中 α 表示光纤损耗。本地散射因子 $\eta(z)$ 定义为^[19]

$$\eta(z) = \frac{1}{2} \alpha_s(z) B(z) v_g. \quad (6)$$

其中 α_s 为瑞利散射损耗系数, $B(z)$ 为捕获因子, 表示光纤重新捕获的反射光占总反射光能量的百分数, 且与位置有关。通常情况, 对于单模光纤来讲, $\eta(z) \approx 10$ W/J。

将(6)式代入到(5)式中, 整理可得

$$P_{BS}(t) = P(0) \eta(z) \exp(-2\alpha z). \quad (7)$$

由(7)式可得传感长度

$$z = 1.151 \times \frac{\lg[P(0) \eta(z)] - \lg P_{BS}(t)}{\alpha}. \quad (8)$$

很明显, 传感长度与光源的输出功率 $P(0)$ 、激发端接收到的散射功率 $P_{BS}(t)$ 、本地散射因子 $\eta(z)$ 和光纤损耗 α 有关。为了估算偏心光纤传感器的传感长度, 采用高功率光纤激光器作为光源, 其输出功率为 50 mW, 脉冲宽度为 500 ns。光纤在 1.55 μm 波长处的损耗为 0.5~5.0 dB/km。设探测光功率计的分辨率为 0.001 dB, 则利用(8)式可以估算所设计的偏心光纤用作传感器时的传感长度大约在 16~160 m 的范围内。以上分析可知, 偏心光纤用作传感器时的传感长度除了可以由光纤自身的损耗调控之外, 还可以由光源的输出功率和功率探测计的分辨率来调控。

4 结 论

基于有限元法对偏心光纤倏逝场传感器的几个关键特性进行了仿真研究, 特性包括偏心光纤的基模有效折射率、光场分布以及传感长度。结果表明, 为了获取较高的传感灵敏度, 偏心距离的设计范围为 8~10 μm ; 光纤涂层折射率应尽量减小。轴对称光纤的光场分布随着纤芯的偏移其光场形状发生了变化, 尽管会有相当一部分光能量以倏逝场的形式延伸到光纤包层的外部空间, 但大部分光能量在光纤中依然保持向前传输。估算偏心光纤倏逝场传感长度范围大约为 16~160 m。另外, 传感长度除了可以由光纤自身的损耗调控之外, 还可以由光源的输出功率和功率探测计的分辨率来调控。以上结果, 为利用偏心光纤进行传感测量提供了理论依据。

参 考 文 献

- Chen Ying, Shi Jia, Cao Huiying, *et al.*. Study on refractive index sensing property of air gate photonic crystal F-P cavity based on evanescent wave resonance[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, 35(11): 1123001.
陈颖, 石佳, 曹会莹, 等. 基于倏逝波谐振的空气栅光子晶体 F-P 腔折射率传感特性研究[J]. *光学学报*, 2015, 35(11): 1123001.
- Luan Nannan, Wang Ran, Hao Congjing, *et al.*. High-sensitivity gas sensor based on suspended core subwavelength fiber[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(5): 0514001.
栾楠楠, 王然, 郝丛静, 等. 基于亚波长悬浮芯光纤的高灵敏度气体传感器[J]. *中国激光*, 2014, 41(5): 0514001.
- Kopp V I, Park J, Wlodawski M, *et al.*. Chiral fibers: Microformed optical waveguides for polarization control, sensing, coupling, amplification, and switching[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2014, 32(4): 605-613.
- Guan C, Ding M, Shi J, *et al.*. Experimental observation and analysis of all-fiber plasmonic double Airy beams[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18365-18371.
- Yuan L. In-fiber integrated optic devices for sensing applications[C]. *SPIE*, 2012, 8421: 84211D.

- 6 Liu Z, Zhang Y, Zhang Y, *et al.*. All-fiber self-accelerating Bessel-like beam generator and its application[J]. *Optics Letters*, 2014, 39(21): 6185-6188.
- 7 Ma Chengju, Xu Weifeng, Li Jiamei, *et al.*. Research progress of gas sensor based on microfiber evanescent field effects [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2015, 52(10): 100003.
马成举, 徐卫锋, 李佳美, 等. 基于微纳光纤倏逝场效应气体传感器的研究进展[J]. *激光与光电子学进展*, 2015, 52(10): 100003.
- 8 Lou Jun, Xu Hongzhi, Huang Jie, *et al.*. Novel segmented structure optic fiber evanescent wave sensor[J]. *Chinese J Lasers*, 2014, 41(11): 1105006.
楼俊, 许宏志, 黄杰, 等. 新型的分段结构光纤倏逝波传感器[J]. *中国激光*, 2014, 41(11): 1105006.
- 9 Miyashita T, Eda Hiro T, Takahashi S, *et al.*. Eccentric core glass optical waveguide[J]. *Journal of Applied Physics*, 1974, 45(2): 808-809.
- 10 Matsuda Y, Nishimoto M, Okada T, *et al.*. Some basic consideration for applications of eccentric-core fibers in the detection of methane gas and liquids[J]. *Furukawa Review*, 1992, 11: 83-89.
- 11 Nakamura K, Yoshida K. Special shape fibers and their sensor applications[C]. *Optical Fiber Sensors*, 1997, OFB: OFB1.
- 12 Nakamura K, Uchino N, Mdsuda Y, *et al.*. Distributed oil sensors by eccentric core fibers[J]. *Optical Fiber Sensors*, 1996, Th4: Th42.
- 13 Guan C, Tian F, Dai Q, *et al.*. Characteristics of embedded-core hollow optical fiber[J]. *Optics Express*, 2011, 19(21): 20069-20078.
- 14 Ma Lin, Guo Xinchun, Qi Yuanhui, *et al.*. Investigation on the vibration characteristic of fiber vibration sensor based on a core-offset structure[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(12): 1206007.
马林, 郭新春, 齐艳辉, 等. 基于偏芯结构的光纤传感器的振动传感特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(12): 1206007.
- 15 Ruddy V. An effective attenuation coefficient for evanescent wave spectroscopy using multimode fiber [J]. *Fiber & Integrated Optics*, 1990, 9(2): 143-151.
- 16 Stewart G, Culshaw B. Optical waveguide modelling and design for evanescent field chemical sensors [J]. *Optical and Quantum Electronics*, 1994, 26(3): S249-S259.
- 17 Stewart G, Norris J, Clark D F, *et al.*. Evanescent-wave chemical sensors: A theoretical evaluation[J]. *International Journal of Optoelectronics*, 1991, 6(3): 227-238.
- 18 Hartog A H, Gold M P. On the theory of backscattering in single-mode optical fibers [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1984, 2(2): 76-82.
- 19 Gold M P, Hartog A H. Measurement of backscatter factor in single-mode fibres[J]. *Electronics Letters*, 1981, 17(25): 965-966.