

基于两种光纤介质模型的长周期光纤光栅 传感特性分析

曹洪星¹ 白育堃^{1,2} 李敬辉³ 马秀荣¹ 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 天津大学仁爱学院计算机科学与技术系, 天津 301636

摘要 仿真分析了单轴晶体光纤的两层介质模型与三层介质模型所得纤芯模有效折射率的差别,并基于该差别对长周期光纤光栅的外界环境折射率、温度和轴向应变传感灵敏度进行了仿真分析。结果表明,对两层、三层介质模型的纤芯模,尤其对薄包层光纤有效折射率有较大差别;用两层介质模型和/或材料的折变系数计算所得的长周期光纤光栅的外界环境折射率、温度和轴向应变灵敏度有较大的误差,需应用三层介质模型以及模式的有效折变系数进行准确计算。据此计算了上述 3 种传感灵敏度与光纤包层半径及包层模序数的关系。为长周期光纤光栅传感器的分析设计提供了指导。

关键词 光纤光学; 光栅; 单轴晶体光纤介质模型; 薄包层光纤; 长周期光纤光栅; 传感器

中图分类号 TP212 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201441.0205001

Analysis of Sensing Characteristics of a Long-Period Fiber Grating Based on Two Fiber Analysis Models

Cao Hongxing¹ Bai Yukun^{1,2} Li Jinghui³ Ma Xiurong¹ Yao Jianquan²

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

² Key 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

³ Department of Computer Science and Technology, School of RenAi, Tianjin University, Tianjin 301636, China

Abstract The contrast between the effective refractive indices (RIs) of the core mode in a uniaxial-crystal fiber yielded respectively by two fiber analysis models, namely the two-layered medium model and three-layered medium model, is simulated and analyzed. Based on this, the surrounding RI, temperature and axial strain sensitivities of a long-period fiber grating (LPG) are calculated. The result shows that the core-mode effective RI difference produced by the two fiber analysis models is significant, especially in the case of thin cladding layer. Moreover, the surrounding RI, temperature and axial strain sensitivities calculated from the two layer model and/or the materials' sensing-parameter-induced optical coefficients have significant error, and it is necessary to employ the three layer model and the correspondent model effective RI coefficients to obtain accurate results. The relationship between the sensitivities and the cladding mode order for different clad radii is calculated. This paper provides guidance to the analysis and design of LPG based sensors.

Key words fiber optics; gratings; uniaxial-crystal fiber analysis model; thin cladding layer fiber; long-period fiber grating; sensors

OCIS codes 060.2270; 060.2310; 060.2370; 060.2430

收稿日期: 2013-07-17; 收到修改稿日期: 2013-09-09

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327801)、国家自然科学基金(11004152)

作者简介: 曹洪星(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: angelhuihui2006@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方面的研究。

E-mail: tjutbai_1@163.com(通信联系人)

1 引 言

长周期光纤光栅由于能够将纤芯基模耦合到同方向传播的包层模中,可以在特定波长处引起损耗,具有插入损耗低、后向散射小等优点,在光纤通信及传感^[1-7]等领域有广泛的应用。当长周期光栅将纤芯基模耦合到合适的包层模时,其对待测量具有很高的灵敏度^[8],因此基于长周期光栅可以实现各种高灵敏度的传感器^[9-11]。

对于长周期光纤光栅传感特性的理论和实验研究一直以来都是基于光纤纤芯模的两层介质模型。Shu等^[12]利用材料的折变系数仿真分析了两层介质模型下,包层半径为62.5 μm时,不同包层模序下,长周期光纤光栅的外界环境折射率、温度和轴向应变传感灵敏度。文献^[13-16]利用HF对长周期光纤光栅进行腐蚀,并实验研究了腐蚀后的长周期光纤光栅低阶包层模的外界环境折射率的传感特性,结果表明:随腐蚀时间的增加,即包层半径的减小,谐振波长向长波方向漂移,其灵敏度增大。此外,利用HF对长周期光纤光栅进行腐蚀^[17-19],还可以得到长周期光纤光栅低阶包层模的温度灵敏度随包层半径的减小而减小的特性。

当光纤半径变化较大,特别是对于薄包层光纤,采用纤芯模的两层介质模型和材料的折变系数分析

长周期光纤光栅的传感特性会出现较大的误差。本文对比分析了两层、三层介质模型与材料的折变系数、模式有效折变系数对长周期光纤光栅外界环境折射率、温度和轴向应变传感灵敏度的影响。并利用三层介质模型光纤、模式有效折变系数对不同包层半径及不同耦合包层模时的传感灵敏度进行了计算分析,所用理论方法可用于指导光纤光栅传感器的分析与设计。

2 单轴晶体光纤的介质模型及长周期光纤光栅的传感特性

2.1 单轴晶体光纤的介质模型

单轴晶体光纤的纤芯模的两层、三层介质模型以及包层模的三层介质模型是分析光纤模式的主要方法,也是分析光纤光栅模式耦合的理论基础。

2.1.1 纤芯模的两层和三层介质模型

1) 纤芯模的两层介质模型

对于一般的单模光纤,其包层半径 r_2 和纤芯半径 r_1 满足 $r_2 \gg r_1$,因此对其纤芯模的分析可以采用 $r_2 \rightarrow \infty$ 的两层介质模型。单轴晶体光纤,两层各向同性介质模型的纤芯模本征方程为

$$\epsilon^{\text{co}} = \epsilon^{\text{co}'}, \quad (1)$$

式中

$$\epsilon^{\text{co}} = \left[\frac{1}{(U^{\text{co}})^2} + \frac{1}{(W^{\text{co}})^2} \right] \left[\frac{J_1'(U^{\text{co}})}{U^{\text{co}} J_1(U^{\text{co}})} + \frac{K_1'(W^{\text{co}})}{W^{\text{co}} K_1(W^{\text{co}})} \right]^{-1},$$

$$\epsilon^{\text{co}'} = \left(\frac{k_0}{\beta^{\text{co}}} \right)^2 \left[\frac{1}{(U^{\text{co}})^2} + \frac{1}{(W^{\text{co}})^2} \right]^{-1} \left[n_1^2 \frac{J_1'(U^{\text{co}})}{U^{\text{co}} J_1(U^{\text{co}})} + n_2^2 \frac{K_1'(W^{\text{co}})}{W^{\text{co}} K_1(W^{\text{co}})} \right],$$

$U^{\text{co}} = u^{\text{co}} r_1, W^{\text{co}} = w^{\text{co}} r_1, (u^{\text{co}})^2 = k_0^2 [n_1^2 - (n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2], (w^{\text{co}})^2 = k_0^2 [(n_{\text{eff}}^{\text{co}})^2 - n_2^2], \beta^{\text{co}} = k_0 n_{\text{eff}}^{\text{co}}, k_0 = 2\pi/\lambda, J_1$ 和 K_1 为一阶第一类贝塞尔函数和一阶第二类虚宗量贝塞尔函数, J_1', K_1' 为相应的一阶导数, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}$ 为纤芯模的有效折射率, λ 为光在真空中的波长, n_1, n_2 为纤芯和包层的折射率, r_1 为纤芯的半径。

2) 纤芯模的三层介质模型

在光纤的包层半径 r_2 和纤芯半径 r_1 相差不大时的薄包层情况下,对纤芯模的分析应采用三层介质模型。单轴晶体光纤,三层各向同性介质模型的纤芯模的本征方程为

$$P_l^2 - 2[1/(\alpha_2 W_2^2)]^2 [n_2^2/(n_1 n_3)] X_1 X_2 + X_1^2 X_2^2 \{ J_b [K_b P_l - R_l/(\alpha_2 W_2)] + (1/W_2) [K_b Q_l - S_l/(\alpha_2 W_2)] \} \{ J_b [K_b P_l - s_{23} R_l/(\alpha_2 W_2)] + (s_{21}/W_2) [K_b Q_l - s_{23} S_l/(\alpha_2 W_2)] \} - X_1^2 (J_b P_l + Q_l/W_2) (J_b P_l + s_{21} Q_l/W_2) - X_2^2 [K_b P_l - R_l/(\alpha_2 W_2)] [K_b P_l - s_{23} R_l/(\alpha_2 W_2)] = 0, \quad (2)$$

式中 $P_l = P_l(r_2), Q_l = Q_l(r_2), R_l = R_l(r_2), S_l = S_l(r_2), J_b = J_1'(U_l)/[U_l J_1(U_l)], K_b = K_1'(W_3)/[W_3 K_1(W_3)], X_1 = n_1 U_1^2 W_2^2/(\sigma_0 V_{12}^2), X_2 = n_2 \alpha_2^2 W_2^2 W_3^2/(\sigma_0 V_{23}^2), \alpha_2 = r_2/r_1, W_2 = w_2 r_1, s_{21} = n_2^2/n_1^2, s_{23} = n_2^2/n_3^2$ 。

$$P_l(r) = I_l(w_2 r) K_l(w_2 r_1) - I_l(w_2 r_1) K_l(w_2 r), Q_l(r) = I_l(w_2 r) K_l'(w_2 r_1) - I_l'(w_2 r_1) K_l(w_2 r),$$

$$R_l(r) = I_l'(w_2 r) K_l(w_2 r_1) - I_l(w_2 r_1) K_l'(w_2 r), S_l(r) = I_l'(w_2 r) K_l'(w_2 r_1) - I_l'(w_2 r_1) K_l'(w_2 r),$$

式中 $U_1 = u_1 r_1, W_3 = w_3 r_2, \sigma_0^2 = (l\beta/k_0)^2, V_{12} = k_0 r_1 (n_1^2 - n_2^2)^{1/2}, V_{23} = k_0 r_2 (n_2^2 - n_3^2)^{1/2}, u_1^2 = k_0^2 (n_1^2 - n_{\text{eff}}^2),$

$\omega_2^2 = k_0^2(n_{\text{eff}}^2 - n_2^2)$, $\omega_3^2 = k_0^2(n_{\text{eff}}^2 - n_3^2)$, $\beta = k_0 n_{\text{eff}}$, $k_0 = 2\pi/\lambda$, I_l 和 K_l 为 l 阶第一类虚宗量贝塞尔函数和 l 阶第二类虚宗量贝塞尔函数, I'_l, K'_l 为相应的一阶导数, l 为贝塞尔函数的阶数, n_{eff} 为纤芯模的有效折射率, n_3 为环境的折射率, r_2 为包层的半径。

2.1.2 包层模的三层介质模型

单轴晶体光纤, 三层各向同性介质模型包层模的本征方程为

$$p_l^2 + 2x_1 x_2 [n_2^2/(n_1 n_3)] [2/(\pi \alpha_2 U_2^2)]^2 + x_1^2 x_2^2 \{J_b [K_b p_l + r_l/(\alpha_2 U_2)] - (1/U_2) [(K_b q_l + s_l/(\alpha_2 U_2))] \} \times \\ \{J_b [K_b p_l + s_{23} r_l/(\alpha_2 U_2)] - (s_{21}/U_2) [K_b q_l + s_{23} s_l/(\alpha_2 U_2)] \} - x_1^2 (J_b p_l - q_l/U_2) (J_b p_l - s_{21} q_l/U_2) - \\ x_2^2 [K_b p_l + r_l/(\alpha_2 U_2)] [K_b p_l + s_{23} r_l/(\alpha_2 U_2)] = 0, \quad (3)$$

式中 $p_l = p_l(r_2)$, $q_l = q_l(r_2)$, $r_l = r_l(r_2)$, $s_l = s_l(r_2)$, $x_1 = n_1 U_1^2 U_2^2 / (\sigma_0 V_{12}^2)$, $x_2 = n_3 \alpha_2^2 U_2^2 W_3^2 / (\sigma_0 V_{23}^2)$, $U_2 = u_2 r_1$ 。

$$p_l(r) = J_l(u_2 r) Y_l(u_2 r_1) - J_l(u_2 r_1) Y_l(u_2 r), q_l(r) = J_l(u_2 r) Y'_l(u_2 r_1) - J'_l(u_2 r_1) Y_l(u_2 r),$$

$$r_l(r) = J'_l(u_2 r) Y_l(u_2 r_1) - J_l(u_2 r_1) Y'_l(u_2 r), s_l(r) = J'_l(u_2 r) Y'_l(u_2 r_1) - J'_l(u_2 r_1) Y'_l(u_2 r),$$

$\sigma_0^2 = (\beta^{\text{cl}}/k_0)^2$, $u_1^2 = k_0^2(n_1^2 - n_{\text{eff}}^{\text{cl}2})$, $u_2^2 = k_0^2(n_2^2 - n_{\text{eff}}^{\text{cl}2})$, $\omega_3^2 = k_0^2(n_{\text{eff}}^{\text{cl}2} - n_3^2)$, $\beta^{\text{cl}} = k_0 n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$, J_l, K_l, Y_l 为 l 阶第一类贝塞尔函数、 l 阶第二类虚宗量贝塞尔函数和 l 阶第二类贝塞尔函数, J'_l, K'_l, Y'_l 为相应一阶导数, l 为贝塞尔函数的阶数, $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为包层模的有效折射率。

2.2 长周期光纤光栅的传感特性

2.2.1 长周期光纤光栅的外界环境折射率传感特性

长周期光纤光栅的外界环境折射率灵敏度为

$$K_n = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dn_3} = \lambda_{\text{res}} \gamma \Gamma_{n_3}, \quad (4)$$

式中 $\gamma = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}) - \lambda_{\text{res}} [\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})]/\partial\lambda}$, $\Gamma_{n_3} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})}{\partial n_3}$, γ 为波导色散因子, λ_{res} 为谐振波长, $n_{\text{eff}}^{\text{co}}, n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为纤芯模和包层模的有效折射率。

2.2.2 长周期光纤光栅的温度传感特性

1) 不同温度值下光纤的参数

当温度为 T 时, 光纤的纤芯、包层和环境的折射率及纤芯和包层的半径分别为 $n_1 = n_{10}(1 + \zeta^{\text{co}} \Delta T)$, $n_2 = n_{20}(1 + \zeta^{\text{cl}} \Delta T)$, $n_3 = n_{30}(1 + \zeta^{\text{en}} \Delta T)$, $r_1 = (1 + \alpha \Delta T)r_{10}$, $r_2 = (1 + \alpha \Delta T)r_{20}$ 。其中 $\Delta T = T - T_0$, 选取初始温度为 T_0 , n_{10}, n_{20}, n_{30} 为纤芯、包层和环境的折射率, r_{10}, r_{20} 为纤芯和包层的半径; $\zeta^{\text{co}}, \zeta^{\text{cl}}, \zeta^{\text{en}}$ 为纤芯、包层和环境材料的热光系数, α 为石英 (SiO_2) 热膨胀系数。

2) 长周期光纤光栅的温度灵敏度

长周期光纤光栅的温度灵敏度为

$$K_{L,T} = \frac{d\lambda_{\text{res}}}{dT} = \lambda_{\text{res}} \gamma (\alpha + \Gamma_{\text{temp}}), \quad (5)$$

式中 $\gamma = \frac{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}}{(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}) - \lambda_{\text{res}} [\partial(n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}})]/\partial\lambda}$, $\Gamma_{\text{temp}} = \frac{\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}} n_{\text{eff}}^{\text{co}} - \zeta_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}} n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}}{n_{\text{eff}}^{\text{co}} - n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}}$, $\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}} = \frac{1}{n_{\text{eff}}^{\text{co}}} \frac{dn_{\text{eff}}^{\text{co}}}{dT}$,

$\zeta_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}} = \frac{1}{n_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}} \frac{dn_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}}{dT}$, $\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}}, \zeta_{1v,\text{eff}}^{\text{cl}}$ 为纤芯模和包层模的有效热光系数。

2.2.3 长周期光纤光栅的轴向应变传感特性

1) 不同轴向应变值下光纤的参数

对各向均匀的材料, 当轴向应变为 s 时, 光纤的纤芯、包层和环境的折射率及纤芯和包层的半径分别为

$$n_1 = n_{10} - \frac{1}{2} n_{10}^3 [p_{1,12} - \mu(p_{1,11} + p_{1,12})] s, n_2 = n_{20} - \frac{1}{2} n_{20}^3 [p_{2,12} - \mu(p_{2,11} + p_{2,12})] s, n_3 = n_{30} - \frac{1}{2} n_{30}^3$$

$[p_{3,12} - \mu(p_{3,11} + p_{3,12})] s, r_1 = r_{10} - \mu s, r_2 = r_{20} - \mu s$ 。 μ 为泊松系数, $p_{1,11}, p_{1,12}, p_{2,11}, p_{2,12}, p_{3,11}, p_{3,12}$ 为纤芯、包层和环境的材料的泡克耳斯系数。

对各向均匀的材料, 一般可以引入材料的弹光系数 ϵ , 其表达式为 $\epsilon = \frac{1}{n} \frac{dn}{ds}$ 。

2) 长周期光纤光栅的轴向应变灵敏度

长周期光纤光栅的轴向应变灵敏度为

$$K_{L,s} = d\lambda_{res}/(ds) = \lambda_{res} \gamma (1 + \Gamma_{strain}), \quad (6)$$

式中 $\gamma = \frac{n_{eff}^{co} - n_{1v,eff}^{cl}}{(n_{eff}^{co} - n_{1v,eff}^{cl}) - \lambda_{res} [\partial(n_{eff}^{co} - n_{1v,eff}^{cl})/\partial\lambda]}$, $\Gamma_{strain} = \frac{\epsilon_{eff}^{co} n_{eff}^{co} - \epsilon_{1v,eff}^{cl} n_{1v,eff}^{cl}}{n_{eff}^{co} - n_{1v,eff}^{cl}}$, $\epsilon_{eff}^{co} = \frac{1}{n_{eff}^{co}} \frac{dn_{eff}^{co}}{ds}$, $\epsilon_{1v,eff}^{cl} = \frac{1}{n_{1v,eff}^{cl}} \frac{dn_{1v,eff}^{cl}}{ds}$, ϵ_{eff}^{co} 、 $\epsilon_{1v,eff}^{cl}$ 为纤芯模和包层模的有效弹光系数。

3 仿真结果与分析

仿真中用到单模光纤 SMF-28 参数如下, 温度 $T_0 = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, 纤芯半径 $r_1 = 4.15 \text{ }\mu\text{m}$; 包层半径 $r_2 = 62.5 \text{ }\mu\text{m}$; 纤芯折射率 $n^{co} = 1.4681$; 包层折射率 $n^{cl} = 1.4628$ 。

3.1 纤芯模的有效折射率

假设环境折射率 $n_3 = 1$, 由(1)式和(2)式可以得到不同波长、不同包层半径情况下, 两层、三层介质模型光纤的纤芯模有效折射率, 如图 1 所示。

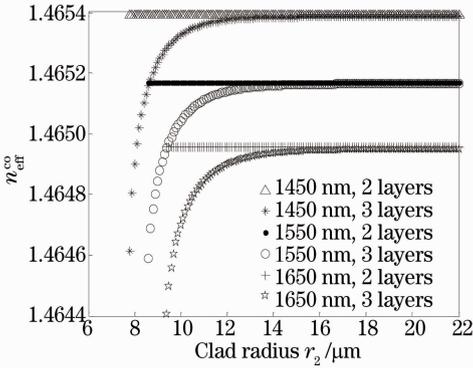


图 1 不同波长下两层、三层介质模型的纤芯模有效折射率与包层半径的关系

Fig. 1 Relationship between effective RIs of core mode and clad radius r_2 at different wavelengths for two-layered and three-layered medium models

图 1 给出了波长为 1450、1550、1650 nm 时, 不同包层半径下, 两层、三层介质模型光纤的纤芯模有效折射率。

由图 1 可以看出:

1) 包层半径一定时, 两层、三层介质模型光纤的纤芯模有效折射率均随波长的增大而减小。

2) 波长一定时, 两层介质模型光纤的纤芯模有效折射率不随包层半径的变化而变化。这是因为两层介质模型光纤的本征方程与包层半径无关。

3) 波长一定时, 包层半径小于一定值时, 两层、三层介质模型光纤的纤芯模有效折射率有较大差别, 如波长为 1550 nm, 包层半径小于 16.6 μm 时,

两者有较大差别。此时, 不能用两层介质模型做近似, 只能用三层介质模型进行计算。

3.2 长周期光纤光栅的传感特性

以下讨论传感特性, 假定长周期光纤光栅的谐振波长为 1550 nm, 包层模的角向序数 $l = 1$, 各阶包层模对应不同的径向序数为 m 。

3.2.1 长周期光纤光栅的外界环境折射率传感特性

选取外界环境折射率的初始值 $n_{30} = 1.4$ 。由(1)、(2)、(3)、(4)式可得到两层、三层介质模型下, 各阶包层模的外界环境折射率灵敏度。图 2 给出了包层半径为 12.45 μm 时, 部分包层模的外界环境折射率灵敏度。

由图 2 可以看出, 对部分包层模式, 在两层、三层介质模型下, 其外界环境折射率灵敏度差别较大。亦即, 采用两层介质模型计算折射率灵敏度有较大的误差, 应采用三层介质模型进行准确计算。

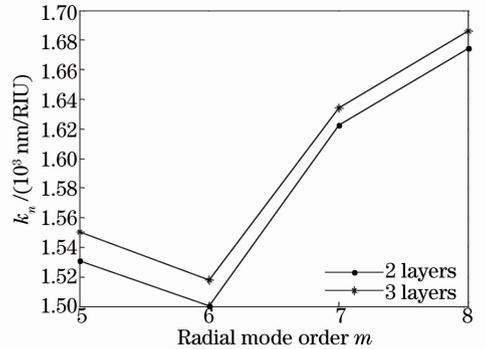


图 2 两层、三层介质模型的 $m = 5, 6, 7, 8$ 阶包层模的外界环境折射率灵敏度 ($r_2 = 12.45 \text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 2 Surrounding RI sensitivities of $m = 5, 6, 7, 8$ cladding modes for two-layered and three-layered medium models at clad radius of 12.45 μm

利用三层介质模型可得到不同包层半径下, 各阶包层模的外界环境折射率灵敏度, 如图 3 所示。可以看到:

1) 包层半径一定时, 随包层模序的增大, 外界环境折射率灵敏度由一个绝对值较小的负值减小到一个绝对值较大的负值; 再由一个绝对值较大的正值减小到一个绝对值较小的正值。由于 γ 波导色散

因子的正负号的变化,使得外界环境折射率灵敏度出现变号。变号点附近的包层模外界环境折射率灵敏度绝对值最大,序数向两边增减的包层模外界环境折射率灵敏度绝对值都减小。

2) 包层模序一定时,随着包层半径的减小,外界环境折射率灵敏度增大,这与文献[4]的实验结果一致。此结果为通过改变包层的半径,制作高灵敏度的折射率传感器提供了理论依据。

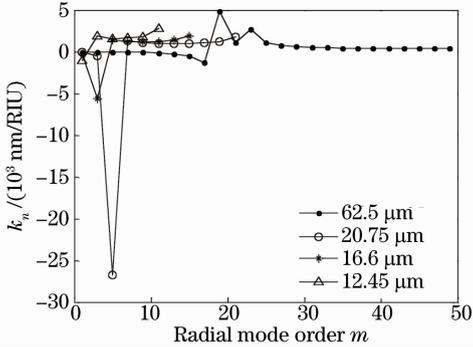


图3 不同包层半径 r_2 下外界环境折射率灵敏度与包层模序的关系

Fig. 3 Relationship between surrounding RI sensitivities and radial mode order at different clad radii

3.2.2 长周期光纤光栅的温度传感特性

温度 $T_0 = 20\text{ }^\circ\text{C}$ 时,纤芯、包层和环境的折射率 n_{10} 、 n_{20} 、 n_{30} ,纤芯和包层的半径 r_{10} 、 r_{20} 等参数如前所述,纤芯、包层和环境材料的热光系数分别为: $\zeta^{\text{co}} = 6.45 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $\zeta^{\text{cl}} = 6.34 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 、 $\zeta^{\text{en}} = 0$,石英(SiO_2)的热膨胀系数为 $\alpha = 5.5 \times 10^{-7}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

将不同温度值下光纤的参数代入(1)、(2)、(3)式中,可以得到不同包层半径、不同温度值下两层、三层介质模型光纤的纤芯模和三层介质模型光纤的各阶包层模的有效折射率。图4给出了包层半径为

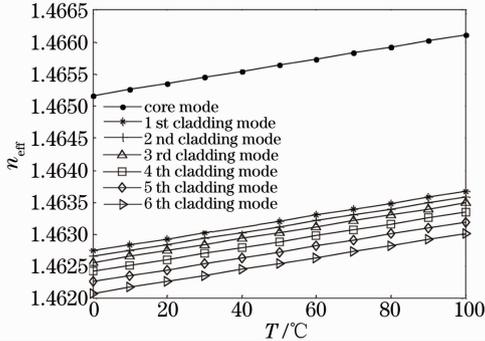


图4 纤芯模和前6阶包层模有效折射率随温度变化的曲线($r_2 = 62.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 4 Variation of mode indices of core mode and the first 6 cladding modes with temperature at clad radius of $62.5\text{ }\mu\text{m}$

$62.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,纤芯模和前6阶包层模有效折射率随温度变化的曲线。

对纤芯模和各阶包层模有效折射率与温度的关系图进行直线拟合,再由模式有效热光系数公式得到不同包层半径下,纤芯模和各阶包层模的有效热光系数。可得包层半径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 时, $\zeta_{\text{eff}}^{\text{co}} = 6.4398 \times 10^{-6}\text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。图5给出了包层半径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 时各阶包层模的有效热光系数,并与材料的热光系数进行对比。

由图5可以看出,模式的有效热光系数与材料热光系数的差别随包层模序的增大而增大,且差别较大。故不能忽略包层模的有效热光系数与材料热光系数之间的差别,而采用材料的热光系数作为模式的有效热光系数。

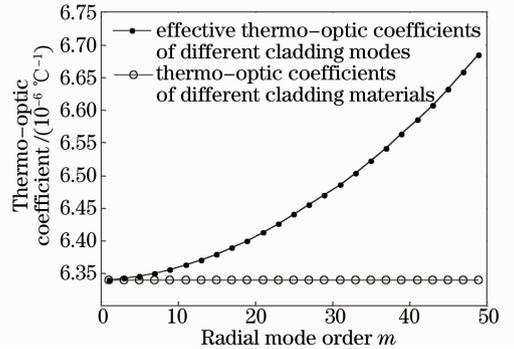


图5 包层材料的热光系数与各阶包层模的有效热光系数($r_2 = 62.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 5 Thermo-optic coefficient of cladding material and effective thermo-optic coefficients of different cladding modes at clad radius of $62.5\text{ }\mu\text{m}$

图6给出了包层半径为 $62.5\text{ }\mu\text{m}$ 时,利用材料的

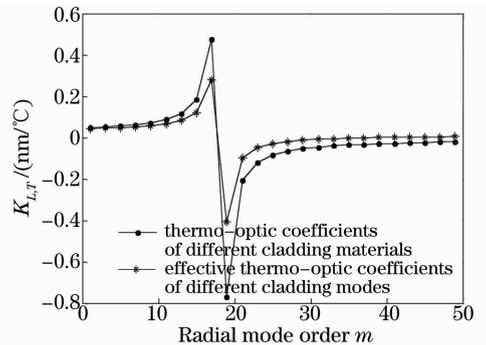


图6 用包层材料的热光系数与包层模有效热光系数得到的各阶包层模的温度灵敏度($r_2 = 62.5\text{ }\mu\text{m}$)

Fig. 6 Calculated temperature sensitivities of different cladding modes using thermo-optic coefficient of cladding material and effective thermo-optic coefficients of cladding modes at clad radius of $62.5\text{ }\mu\text{m}$

热光系数和模式的有效热光系数得到的各阶包层模的温度灵敏度。各阶包层模的温度灵敏度的值有较大差别,不能用材料的热光系数近似为模式的有效热光系数,需用模式的有效热光系数进行准确的计算。

如前所述,包层半径减小到一定值时,两层和三层介质模型的纤芯模式色散曲线显著不同。因而,当包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,采用模式的有效热光系数,对比计算了两层、三层介质模型的部分包层模的温度灵敏度,如图 7 所示。

由图 7 可以看出,当包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,两层、三层介质模型计算得到的各阶包层模的温度灵敏度差别较大。应采用三层介质模型进行准确计算。

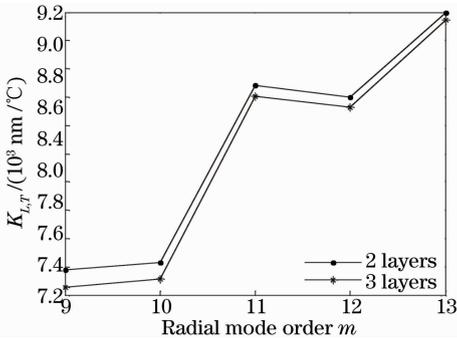


图 7 两层、三层介质模型的 $m=9,10,11,12,13$ 阶包层模的温度灵敏度($r_2=12.45 \mu\text{m}$)

Fig. 7 Temperature sensitivities of the $m=9,10,11,12,13$ cladding modes for two-layered and three-layered medium models at clad radius of $12.45 \mu\text{m}$

图 8 给出了包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,利用两层介质模型、材料的热光系数近似为模式的有效热

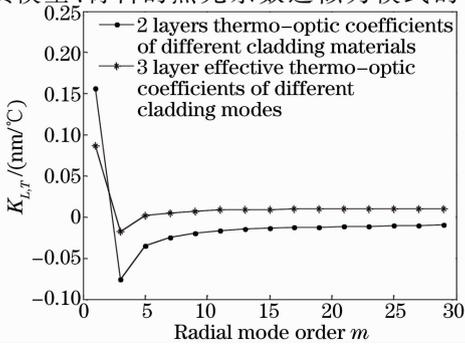


图 8 用两层介质模型、包层材料的热光系数与三层介质模型、包层模有效热光系数得到的各阶包层模的温度灵敏度($r_2=12.45 \mu\text{m}$)

Fig. 8 Calculated temperature sensitivities of different cladding modes using two-layered medium model with cladding material thermo-optic coefficient and three-layered medium model with effective thermo-optic coefficients of cladding modes at the clad radius of $12.45 \mu\text{m}$

光系数与利用三层介质模型、模式的有效热光系数得到的各阶包层模的温度灵敏度。

由图 8 可以看出,包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,利用两层介质模型、材料的热光系数近似为模式的有效热光系数有较大误差,需利用三层介质模型、模式的有效热光系数进行准确的计算。

在此结论的基础上,利用三层介质模型和模式的有效热光系数,计算了不同包层半径下,各阶包层模的温度灵敏度,如图 9 所示,可以看出:

1) 包层半径一定时,随着包层模序的增大,温度灵敏度由一个绝对值较小的正值增大到一个绝对值较大的正值;再由一个绝对值较大的负值增大到一个绝对值较小的负值。由于 γ 波导色散因子的正负号的变化,使得温度灵敏度出现变号。变号点附近的包层模温度灵敏度绝对值最大,序数向两边增减的包层模温度灵敏度绝对值都减小。

2) 包层模序一定时,随着包层半径的减小,包层模的温度灵敏度减小,这与文献[8]的实验结果一致。此结果为减小长周期光纤光栅温度灵敏度,提高器件温度稳定性,解决温度交叉敏感问题,提供了理论依据。

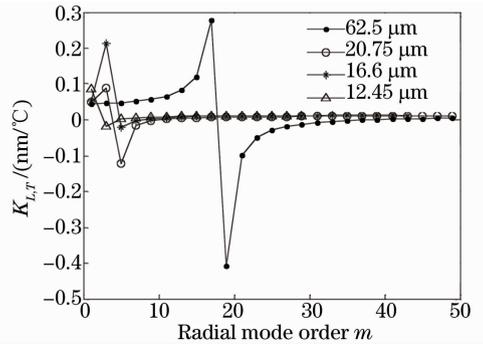


图 9 不同包层半径下温度灵敏度与包层模序的关系

Fig. 9 Relationship between the temperature sensitivities and the radial mode order at different clad radii

3. 2. 3 长周期光纤光栅的轴向应变传感特性

轴向应变 $s=0$ 时,纤芯、包层和环境的折射率 n_{10}, n_{20}, n_{30} ,纤芯和包层的半径 r_{10}, r_{20} 等参数如前所述,纤芯、包层和环境材料的泡克耳斯系数分别为 $p_{1,11}=0.113 \times (1+0.7\%)$ 、 $p_{1,12}=0.252 \times (1+0.7\%)$ 、 $p_{2,11}=0.113$ 、 $p_{2,12}=0.252$ 、 $p_{3,11}=0$ 、 $p_{3,12}=0$;泊松系数 $\mu=0.16$ 。

将不同轴向应变值下光纤的参数代入(1)、(2)、(3)式可得不同包层半径、不同轴向应变值下两层、三层介质模型光纤的纤芯模和三层介质模型光纤的各阶包层模的有效折射率。图 10 给出了包层半径

为 $62.5 \mu\text{m}$ 时,不同轴向应变值下纤芯模和前 6 阶包层模的有效折射率。

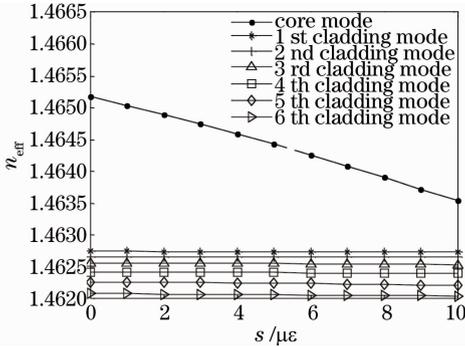


图 10 纤芯模和前 6 阶包层模有效折射率随轴向应变值变化的曲线($r_2 = 62.5 \mu\text{m}$)

Fig. 10 Variation of mode indices of core mode and the first 6 cladding modes with axial strain at cladding radius of $62.5 \mu\text{m}$

对纤芯模和各阶包层模有效折射率与轴向应变的关系图进行直线拟合,再由有效弹光系数公式可得不同包层半径下纤芯模和各阶包层模的有效弹光系数。可得包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 时, $\epsilon_{\text{eff}}^{\text{co}} = -111.4625/\epsilon$ 。图 11 给出了包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 时,各阶包层模的有效弹光系数,并与材料的弹光系数进行对比。模式的有效弹光系数与材料的弹光系数的差别随包层模序的增大而显著增大。

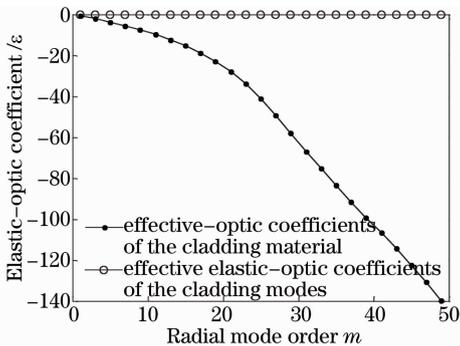


图 11 包层材料的弹光系数与各阶包层模的有效弹光系数($r_2 = 62.5 \mu\text{m}$)

Fig. 11 Elastic-optic coefficient of cladding material and effective elastic-optic coefficients of different cladding modes at cladding radius of $62.5 \mu\text{m}$

图 12 给出了包层半径为 $62.5 \mu\text{m}$ 时,分别利用材料的弹光系数和模式的有效弹光系数得到的各阶包层模的轴向应变灵敏度。各阶包层模的轴向应变灵敏度有较大差别。故不能用材料的弹光系数近似为模式的有效弹光系数,需用模式的有效弹光系数进行准确计算。

同理,为了对比两种介质模型的差异,图 13 给

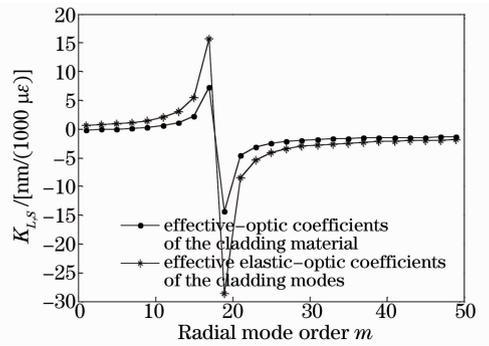


图 12 用包层材料的弹光系数与包层模有效弹光系数得到的各阶包层模的轴向应变灵敏度($r_2 = 62.5 \mu\text{m}$)

Fig. 12 Calculated axial strain sensitivities of different cladding modes using elastic-optic coefficient of cladding material and effective elastic-optic coefficients of cladding modes at cladding radius of $62.5 \mu\text{m}$

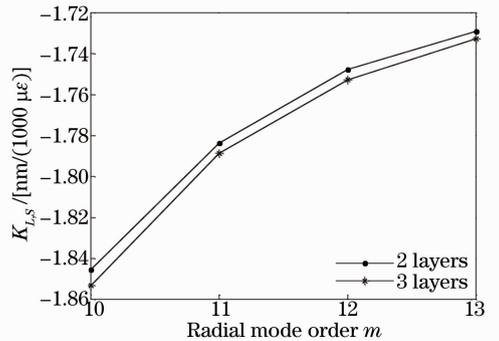


图 13 两层、三层介质模型的 $m=10, 11, 12, 13$ 阶包层模的轴向应变灵敏度($r_2 = 12.45 \mu\text{m}$)

Fig. 13 Axial strain sensitivities of $m=10, 11, 12, 13$ cladding modes for two-layered and three-layered medium models at cladding radius of $12.45 \mu\text{m}$

出了包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,采用模式有效弹光系数得到的两层、三层介质模型光纤的部分包层模的轴向应变灵敏度。两层、三层介质模型计算所得的轴向应变灵敏度差别较大。

图 14 给出了包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,分别利用两层介质模型、材料的弹光系数和三层介质模型、模式的有效弹光系数得到的各阶包层模的轴向应变灵敏度。各阶包层模之间的差别较大,这说明包层半径为 $12.45 \mu\text{m}$ 时,利用两层介质模型、材料的弹光系数近似为模式的有效弹光系数有较大误差,需用三层介质模型、模式的有效弹光系数进行计算。利用三层介质模型、模式的有效弹光系数,计算可得不同包层半径下各阶包层模的轴向应变灵敏度,如图 15 所示。由图 15 可以看出:

1) 包层半径一定时,随着包层模序的增大,轴向

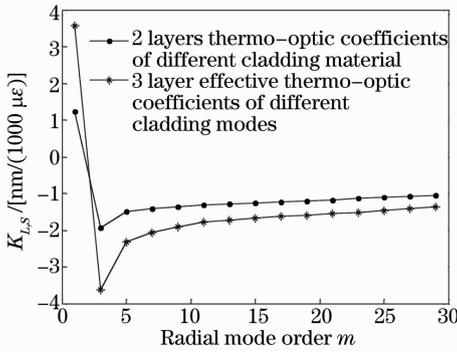


图 14 用两层介质模型、包层材料的弹光系数与三层介质模型、包层模有效弹光系数得到的各阶包层模的轴向应变灵敏度($r_2 = 12.45 \mu\text{m}$)

Fig. 14 Calculated axial strain sensitivities of different cladding modes using two-layered medium model with elastic-optic coefficient of cladding material and three-layered medium model with effective elastic-optic coefficients of cladding modes at clad radius of $12.45 \mu\text{m}$

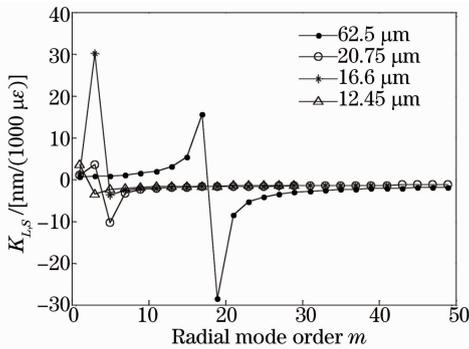


图 15 不同包层半径下轴向应变灵敏度与包层模序的关系

Fig. 15 Relationship between axial strain sensitivities and radial mode order at different clad radii

应变灵敏度由一个绝对值较小的正值增大到一个绝对值较大的正值;再由一个绝对值较大的负值增大到一个绝对值较小负的值。由于 γ 波导色散因子的正负号的变化,使得轴向应变灵敏度出现变号。变号点附近的包层模轴向应变灵敏度绝对值最大,序数向两边增减的包层模轴向应变灵敏度绝对值都减小。

2) 包层模序一定时,随着包层半径的减小,低阶包层模的轴向应变灵敏度增大,这与文献[10]的实验结论一致,高阶包层模的轴向应变灵敏度减小。此结果为轴向应变灵敏度传感器的设计提供了理论依据。

4 结 论

分析比较了两层、三层介质模型下单模光纤的

纤芯模有效折射率的差别。结果表明,波长为 1550 nm ,包层半径小于 $16.6 \mu\text{m}$ 时,两种模型的计算结果有较大差别,此时不应用两层介质模型分析纤芯模,而应该用三层介质模型进行计算。基于这两种介质模型,对长周期光纤光栅的外界环境折射率、温度和轴向应变传感灵敏度进行了对比分析。结果表明,采用三层介质模型以及模式的有效折变系数与采用两层介质模型及材料的折变系数相比较,尤其在薄包层情况下,二者的计算结果有明显差异,因而前者也具有更高的可靠性。通过计算给出了长周期光纤光栅的外界环境折射率、温度和轴向应变传感灵敏度与包层半径和包层模序数的关系。所提的分析方法和结果为长周期光纤光栅传感器的分析和设计提供了指导。

参 考 文 献

- 1 A M Vengsarkar, P Lemaire, J B Judkins, *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters[J]. *J Lightwave Technol.*, 1996, 14(1): 58–65.
- 2 V Bhatia, A M Vengsarkar. Optical fiber long-period grating sensor[J]. *Opt Lett*, 1996, 21(9): 692–694.
- 3 Song Yun, Zhu Tao, Rao Yunjiang, *et al.*. Simultaneous measurement of strain and temperature using a long-period fiber grating with rotary refractive index modulation[J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1129–1133.
宋 韵, 朱 涛, 饶 云 江, 等. 旋转型变型长周期光纤光栅实现应变和温度的同时测量[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1129–1133.
- 4 Y Bai, Q Liu, K P Lor, *et al.*. Widely tunable long-period waveguide grating couplers[J]. *Opt Express*, 2006, 14(26): 12644–12654.
- 5 H Tsuda, K Urabe. Characterization of long-period grating refractive index sensors and their applications[J]. *Sensors*, 2009, 9(6): 4559–4571.
- 6 Bao Jilong, Zhao Hongxia, Cheng Peihong, *et al.*. Research on optical-spectral characteristics of two-section and multi-layer long-period fiber grating[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(1): 0106001.
鲍吉龙, 赵洪霞, 程培红, 等. 一种双段多层长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(1): 0106001.
- 7 Wang Qingwei, Liu Yueming, Tian Weijian, *et al.*. Review and progress on sensing signal interrogation techniques of long-period fiber gratings[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012, 49(8): 080004.
王清伟, 刘月明, 田维坚, 等. 长周期光纤光栅传感信号解调技术研究现状[J]. *激光与光电子学进展*, 2012, 49(8): 080004.
- 8 Wei Shilei, Zhang Weigang, Fan Hongjian, *et al.*. Study on spectral properties of tilted long-period fiber grating written by high-frequency CO_2 laser pulses[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, 31(8): 0806006.
魏石磊, 张伟刚, 范弘建, 等. 高频 CO_2 激光脉冲写制的倾斜长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(8): 0806006.
- 9 Kang Juan, Dong Xinyong, Zhao Chunliu. Measurement of refractive index with a PM-LPG based Sagnac loop sensor[J]. *Spectroscopy & Spectral analysis*, 2011, 31(4): 902–905.
康 娟, 董新永, 赵春柳. 基于长周期光纤光栅嵌入型 Sagnac 环

- 光谱的折射率测量[J]. 光谱学与光谱分析, 2011, 31(4): 902—905.
- 10 G Statkiewicz-Barabach, D Kowal, M K Szczurowski, *et al.*. Hydrostatic pressure and strain sensitivity of long period grating fabricated in polymer microstructured fiber[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(5): 496—499.
- 11 Jieliang Li, Weigang Zhang, Shecheng Gao, *et al.*. Long-period fiber grating cascaded to an S fiber taper for simultaneous measurement of temperature and refractive index[J]. IEEE Photon Technol Lett, 2013, 25(9): 888—891.
- 12 Xuewen Shu, Lin Zhang. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. J Lightwave Technol, 2002, 20(2): 255—266.
- 13 A Iadicicco, S Campopiano, M Giordano, *et al.*. Spectral behavior in thinned long period gratings: effects of fiber diameter on refractive index sensitivity[J]. Optical Society of America, 2007, 46(28): 6945—6952.
- 14 A Iadicicco, G Servodio, P Pilla, *et al.*. Refractive index sensitivity in thinned long period gratings[C]. SPIE, 2007, 6585: 65851H.
- 15 K S Chiang, Y Liu, M N Ng, *et al.*. Analysis of etched long-period fibre grating and its response to external refractive index[J]. Electronics Lett, 2000, 36(11): 966—967.
- 16 A Martinez-Rios, D Monzon-Hernandez, I Torres-Gomez. Highly sensitive cladding-etched arc-induced long-period fiber gratings for refractive index sensing[J]. Opt Commun, 2010, 283(6): 958—962.
- 17 Zhao Hongxia, Bao Jilong, Chen Ying. Study on temperature stability of the etched long period fiber gratings[J]. Laser Journal, 2008, 29(5): 35—36.
- 赵洪霞, 鲍吉龙, 陈莹. 腐蚀长周期光纤光栅温度稳定性研究[J]. 激光杂志, 2008, 29(5): 35—36.
- 18 Jinhua Yan, A Ping Zhang, Liyang Shao, *et al.*. Simultaneous measurement of refractive index and temperature by using dual long-period gratings with an etching process[J]. IEEE Sensors J, 2007, 7(9): 1360—1361.
- 19 Zhao Hongxia, Cheng Peihong, Bao Jilong, *et al.*. Research on spectral characteristic of a semi-etched long-period fiber grating[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(12): 1205005.
- 赵洪霞, 程培红, 鲍吉龙, 等. 半腐蚀长周期光纤光栅光谱特性研究[J]. 中国激光, 2012, 39(12): 1205005.

栏目编辑:张腾