

文章编号 1004-924X(2013)02-0316-07

# 长周期光纤光栅的折射率梯度响应特性

赵明富<sup>1\*</sup>, 韩 汐<sup>1</sup>, 罗彬彬<sup>1</sup>, 王博思<sup>2</sup>, 全晓莉<sup>1</sup>

- (1. 重庆理工大学 电子信息与自动化学院, 重庆 400054;
2. 英国布里斯托大学, 工程学院, 英国 布里斯托 BS8 1TR)

**摘要:**通过模式耦合理论,建立了基于长周期光纤光栅(LPFG)的二层圆光波导模型;结合传输矩阵法,仿真得到了外部介质折射率呈线性分布情况下 LPFG 的透射谱。仿真结果表明:该结构下的 LPFG 透射谱特性强烈依赖于外部介质折射率梯度,当外部介质折射率梯度升高,透射谱的损耗峰深度逐渐降低,损耗峰 3dB 带宽逐渐增加,且增加量与折射率梯度的增加量呈较好的线性关系;当外部折射率梯度由  $1.1111 \times 10^{-7}$  riu/mm 增加到  $1.1111 \times 10^{-5}$  riu/mm 时,其梯度灵敏度可达到  $2.2 \times 10^7$  nm · mm/riu。这一结果使折射率梯度的高灵敏度测量成为可能,为设计和制作基于 LPFG 的折射率梯度传感器提供了一定的理论依据,并有望用于生化反应中微小尺度下折射率呈梯度分布的液相介质的测量。

**关键词:**光纤传感;长周期光纤光栅;模式耦合理论;传输矩阵法;折射率梯度

**中图分类号:** TN253 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132102.0316

## Response characteristics of refractive-index gradient based on long-period fiber gratings

ZHAO Ming-fu<sup>1\*</sup>, HAN Xi<sup>1</sup>, LUO Bin-bin<sup>1</sup>, WANG Bo-si<sup>2</sup>, QUAN Xiao-li<sup>1</sup>

- (1. College of Electronic Information and Automation, Chongqing University of Technology, Chongqing 400050, China;
  2. Faculty of Engineering, University of Bristol, Bristol, UK BS8 1TR)
- \* Corresponding author, E-mail: zmf@cqut.edu.cn

**Abstract:** A two-layer circle waveguide model based on Long-period Fiber Gratings(LPFG) was established according to the coupling theory. The transmission spectrum of a LPFG in external media with linear Refractive Index(RI) gradient distribution was obtained by using the transfer matrix method. Simulation results show that the transmission spectral characteristics of the LPFG are strongly dependent on the RI gradient distribution of external media. When the RI gradient of external media increases, the loss depth of the transmission spectrum decreases, the 3dB bandwidth increases, and there is a good linear relationship between bandwidth and RI gradient increment. When the RI gradient of external media increases from  $1.1111 \times 10^{-7}$  riu/mm to  $1.1111 \times 10^{-5}$  riu/mm, the gradient sensitivity can reach  $2.2 \times 10^7$  nm · mm/riu. This result allows the high sensitivity measurement of refractive index gradient to become possible, and provides a theoretical basis for the design and pro-

收稿日期:2012-08-30;修订日期:2012-11-01.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51276209; No. 50876120); 重庆高校创新团队建设资金资助项目(No. 201023)

duction of the RI gradient sensors based on LPFGs. It may be potentially suitable for application to the measurement of biochemical reactions in the small scale liquid refractive index(RI) gradient distribution.

**Key words:** optical fiber sensing; Long-Period Fiber Gratings (LPFG); mode coupling theory; transfer matrix method; Refractive Index (RI) gradient

## 1 引言

自 A. M. Vengsarkar 等人<sup>[1]</sup>于 1996 年首次研制出长周期光纤光栅(Long Period Fiber Grating, LPFG)以来,LPFG 以其制作工艺简单,插入损耗小,无后向反射,且对温度、应力、弯曲、折射率等物理量敏感等特性,引起了人们的重视并进行了深入研究,如今已被广泛应用于通信、传感等领域<sup>[2]</sup>。近年来,随着生物化学、生命科学等学科的发展,对微小尺度的均匀或非均匀折射率测量成为研究的热点<sup>[3-4]</sup>。在生化反应中,由于扩散现象的存在,溶液浓度常呈线性分布,常见的溶液如蔗糖溶液、氯化钠溶液等,其浓度与折射率有着较好的线性对应关系,因此,对折射率分布的测量可有效反映出液体浓度的分布情况,从而为生物化学、生命科学等领域的研究提供一种有效的测量手段<sup>[5-6]</sup>。

基于 LPFG 的折射率传感,利用了 LPFG 纤芯基模、同向传输的包层模以及辐射模之间的耦合特性。当外部折射率发生改变时,包层模与辐射模的耦合情况随之变化,进而影响基模与包层模的耦合,最终表现为 LPFG 透射谱的谐振波长产生漂移或波形发生变化,因此,通过测量透射谱的改变,可确定折射率的变化情况。已有文献表明,通过腐蚀包层等方法减小 LPFG 的包层半径,可以有效增强其对外部介质折射率的灵敏度<sup>[7-10]</sup>。因此,为了便于研究外部介质折射率变化对 LPFG 透射谱的影响,仿真中考虑的是去除 LPFG 包层的情况,以此可得到由外部介质和 LPFG 纤芯构成的二层圆光波导模型。

本文研究了 LPFG 对外部折射率环境呈线性分布时的响应特性,意在设计基于 LPFG 的折射率梯度传感器,并为进一步研究基于 LPFG 的非均匀折射率传感器提供重要的理论基础。

## 2 基本原理

### 2.1 模式耦合理论

LPFG 是纤芯基模与同向传输的包层模之间的耦合,根据模式耦合理论,这种耦合应满足相位匹配条件:

$$\lambda_D = (n_{\text{eff}}^o - n_{\text{eff}}^l) \Lambda, \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff}}^o$ 与 $n_{\text{eff}}^l$ 分别表示纤芯基模与包层模的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅周期, $\lambda_D$ 为设计谐振波长。仿真中使用的是二层圆光波导模型,因此光纤光栅所处的外部介质层即为该模型的包层,外部介质层对应的折射率函数 $n_2(z)$ 即为包层模的有效折射率 $n_{\text{eff}}^l$ 。对于弱导光纤,纤芯基模的有效折射率满足色散方程<sup>[11]</sup>:

$$v \frac{\sqrt{1-b} J_1(v \sqrt{1-b})}{J_0(v \sqrt{1-b})} = V \sqrt{b} \frac{K_1(v \sqrt{b})}{K_0(v \sqrt{b})}, \quad (2)$$

式中: $J_0$ 与 $J_1$ 表示0阶和1阶 Bessel 函数, $K_0$ 与 $K_1$ 表示0阶和1阶修正的第二类 Bessel 函数, $v = (2\pi/\lambda) a_1 \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$ 表示归一化频率, $b = (n_{\text{eff}}^o{}^2 - n_2^2)/(n_1^2 - n_2^2)$ 表示模式的归一化有效折射率,其中 $a_1$ 为纤芯半径, $n_1$ 为纤芯折射率, $n_2$ 为包层折射率。当 LPFG 的参数已知,即可通过式(2)求得纤芯基模的有效折射率。

### 2.2 传输矩阵法

传输矩阵法<sup>[12]</sup>是在模式耦合理论基础上发展起来的一种分析光纤光栅传输特性的方法,该方法没有太多近似,精确度较高,适合于数值运算,特别适合处理和解决光栅周期非均匀或待测物理量非均匀的情况。传输矩阵法将光栅分为 $M$ 个小段,每一小段可视为相对独立的微小 LPFG,当外部介质折射率呈非均匀分布时,对于每一小段光栅,其长度方向上折射率变化量很小,因此可近似视为均匀分布,每一段的传输特性由矩阵 $F_i$ 来描述,其中脚标 $i$ 代表小段的编号:

$$\mathbf{F}_i = \begin{bmatrix} \cosh(\gamma_c \Delta z) + i \frac{\sigma}{\gamma_c} \sinh(\gamma_c \Delta z) & i \frac{\kappa}{\gamma_c} \sinh(\gamma_c \Delta z) \\ i \frac{\kappa}{\gamma_c} \sinh(\gamma_c \Delta z) & \cosh(\gamma_c \Delta z) - i \frac{\sigma}{\gamma_c} \sinh(\gamma_c \Delta z) \end{bmatrix}, \quad (3)$$

式中:

$$\gamma_c = \sqrt{\kappa^2 + \sigma^2}, \quad (4)$$

$$\kappa = \frac{\omega n_{c_0} \bar{\delta} n_{c_0}(z)}{4} \iint_{\text{core}} dx dy e_{kt}(x, y) \cdot e_{jt}^*(x, y), \quad (5)$$

$$\sigma = \delta + \frac{\sigma_{11} - \sigma_{22}}{2} - \frac{1}{2} \frac{d\phi}{dz}, \quad (6)$$

$\kappa$  为交叉耦合系数,  $\sigma$  为总自耦合系数, 其中:

$$\sigma_{11} = \frac{\omega n_{c_0} \bar{\delta} n_{c_0}(z)}{2} \iint_{\text{core}} dx dy e_1(x, y) \cdot e_1^*(x, y), \quad (7)$$

$$\sigma_{22} = \frac{\omega n_{c_0} \bar{\delta} n_{c_0}(z)}{2} \iint_{\text{core}} dx dy e_2(x, y) \cdot e_2^*(x, y). \quad (8)$$

通过光纤的各项参数、外部介质折射率函数以及色散方程解出的纤芯基模有效折射率, 利用式(3), 可求得每段光栅的矩阵  $\mathbf{F}_i$ , 第  $i$  段到第  $i+1$  段的传输矩阵为:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_{i+1} \\ \mathbf{S}_{i+1} \end{bmatrix} = \mathbf{F}_i \begin{bmatrix} \mathbf{R}_i \\ \mathbf{S}_i \end{bmatrix}, \quad (9)$$

式中:  $\mathbf{R}_i$  和  $\mathbf{S}_i$  分别表示第  $i$  段光栅入射端的纤芯

基模和同向包层模的幅度,  $\mathbf{R}_{i+1}$  和  $\mathbf{S}_{i+1}$  分别表示第  $i$  段光栅出射端的纤芯基模和同向包层模的幅度。当所有小段的矩阵  $\mathbf{F}_i$  都求出后, 可由:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{R}_M \\ \mathbf{S}_M \end{bmatrix} = \mathbf{F} \begin{bmatrix} \mathbf{R}_0 \\ \mathbf{S}_0 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_M \cdot \mathbf{F}_{M-1} \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_i \cdot \dots \cdot \mathbf{F}_1, \quad (11)$$

得到总的传输矩阵, 式中  $\mathbf{R}_0$  和  $\mathbf{S}_0$  分别表示整段 LPFG 入射端的纤芯基模和同向包层模的幅度,  $\mathbf{R}_M$  和  $\mathbf{S}_M$  分别表示整段 LPFG 出射端的纤芯基模和同向包层模的幅度。

### 3 仿真结果及分析

仿真中采用的基于 LPFG 的二层圆光波导模型参数为:  $a_1 = 5.2 \mu\text{m}$ ,  $L = 90 \text{ mm}$ ,  $\Lambda = 553 \mu\text{m}$ ,  $n_{c_0} = 1.467$ , 平均有效折射率调制  $\bar{\delta} n_{\text{eff}} = 1 \times 10^{-5}$ 。外部折射率分布的边值条件以及梯度如表 1 所示。

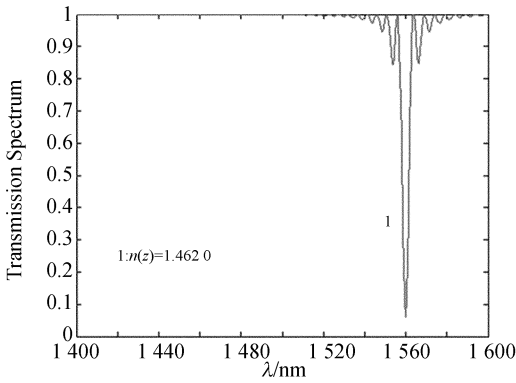
表 1 LPFG 外部介质的折射率边界条件、折射率线性分布函数以及对应的折射率梯度  $D_n$

Tab. 1 LPFG in the boundary conditions of the external medium RI, linear distribution function and the corresponding RI gradient  $D_n$

$n(-L/2)$	$n(L/2)$	$n(-L/2) - n(L/2)$	Linear distribution function	$D_n / (\text{riu/mm})$
1.462 00		0	$n(z) = 1.462 0$	0
1.462 05		$5 \times 10^{-5}$	$n(z) = -5.555 6 \times 10^{-7} z + 1.4620$	$-5.555 6 \times 10^{-7}$
1.462 10	1.462 0	$1 \times 10^{-4}$	$n(z) = -1.111 1 \times 10^{-6} z + 1.462 0$	$-1.111 1 \times 10^{-6}$
1.462 30		$3 \times 10^{-4}$	$n(z) = -3.333 3 \times 10^{-6} z + 1.462 0$	$-3.333 3 \times 10^{-6}$
1.462 50		$5 \times 10^{-4}$	$n(z) = -5.555 6 \times 10^{-6} z + 1.462 0$	$-5.555 6 \times 10^{-6}$

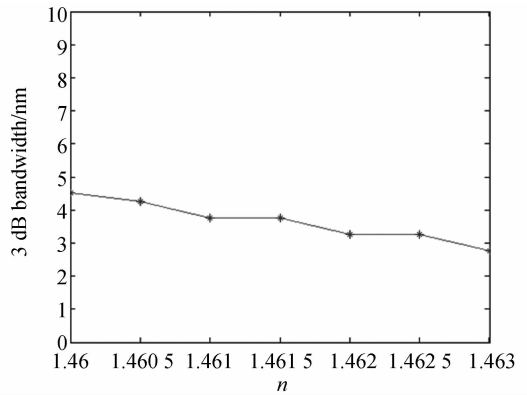
外部介质折射率呈均匀分布的情况以及外部介质折射率呈表 1 中线性分布的情况, 其对应的 LPFG 响应谱的仿真结果分别如图 1(a) 和 (b) 所示。图 1 表明, 二层圆光波导结构的 LPFG 透射谱与外部介质的折射率在光栅区轴向的分布特性有很大的关系。在折射率呈均匀分布的情况下,

如图 1(a), 此时外部折射率为 1.462, 透射谱的中心波长为 1 560 nm, 透射谱的损耗峰带宽很窄, 其 3 dB 带宽为 3.007 5 nm。当外部介质折射率呈线性分布时, 如图 1(b), 此时随外部介质折射率梯度的升高, 透射谱的深度逐渐减小, 带宽逐渐增大, 损耗峰也由单一波谷逐渐分裂为许多连续



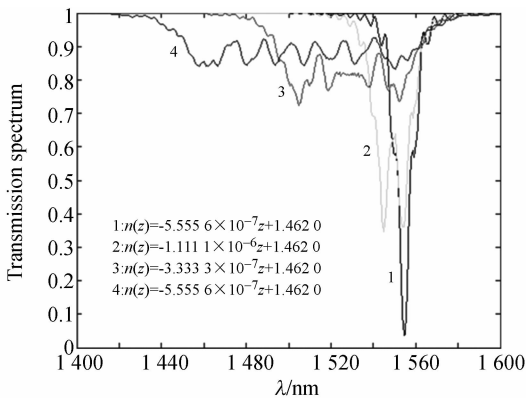
(a) 外部介质折射率呈均匀分布

(a) External RI with uniformly distribution



(a) 外部介质折射率呈均匀分布

(a) External RI with uniformly distribution

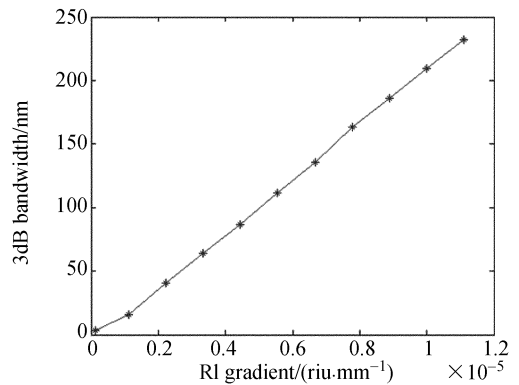


(b) 外部介质折射率呈 4 种不同梯度的线性分布

(b) External medium RI with linear distribution of four different gradients

图 1 LPFG 在外部介质环境下的透射谱

Fig. 1 LPFG transmission spectrum in external media environments



(b) 外部介质折射率呈线性分布

(b) External RI with linear distribution

图 2 损耗峰 3 dB 带宽随折射率梯度的变化趋势

Fig. 2 3 dB bandwidth of the loss peak and RI gradient changes

的微谐振峰。而且, 折射率梯度越大, 由波谷分裂出的微谐振峰个数越多, 但幅值总体上呈下降趋势。

为了进一步研究损耗峰 3 dB 带宽的变化趋势, 以表 1 的采样点为基础, 通过程序分别计算了多组外部介质折射率呈均匀与线性分布情况时损耗峰的带宽值, 并对两种情况分别绘图, 得到如图 2 所示的 3 dB 带宽变化曲线。

图 2 表明, 当外部介质折射率梯度变化时, 损耗峰 3 dB 带宽会随之发生变化。在折射率呈均匀分布的情况下, 如图 2(a), 随着折射率梯度的升高, 透射谱中损耗峰的带宽总体呈下降趋势, 但变化量不大。由模式耦合理论可知, 在光栅周期  $N \gg 1, \kappa L \leq \pi/2$  时, 长周期光纤光栅的带宽  $\Delta\lambda$  可

表示为:

$$\Delta\lambda = 2 \sqrt{\frac{(\lambda_D + \Lambda \overline{\delta n_{\text{eff}}})^2}{N^2} - \Lambda^2 \overline{\delta n_{\text{eff}}^2}} \quad (12)$$

由式(1)可知, 当外部折射率  $n_{\text{eff}}^i$  增大时, 谐振波长  $\lambda_D$  减小, 因此导致光纤光栅的带宽  $\Delta\lambda$  随之减小, 这表明仿真与理论分析的结论是一致的。

折射率呈非均匀线性分布的情况如图 2(b) 所示, 当外部折射率梯度升高时, 损耗峰带宽单调递增, 且带宽增量与折射率梯度增量呈较好的线性关系。与折射率均匀分布情况时的变化量相比, 以光栅两端折射率梯度升高  $1 \times 10^{-5}$  riu/mm 为例, 非均匀情况产生的带宽变化量比均匀情况产生的变化量要高出 2 个数量级。

仿真中使用的外部折射率分布的边值条件、折射率梯度以及得到的相应 3 dB 带宽如表 2 所示。

表 2 LPFG 外部介质的折射率边界条件、折射率梯度  $D_n$  以及对应的损耗峰 3 dB 带宽Tab. 2 LPFG in boundary conditions of external medium RI, RI gradient  $D_n$  and the corresponding 3 dB Bandwidth

$n(-L/2)$	$n(L/2)$	$n(-L/2) - n(L/2)$	$D_n / (\text{riu/mm})$	3 dB Bandwidth/nm
1.460 00	1.460 00	0	0	4.511 3
1.460 50	1.460 50	0	0	4.260 7
1.461 00	1.461 00	0	0	3.759 4
1.461 50	1.461 50	0	0	3.759 4
1.462 00	1.462 00	0	0	3.258 1
1.462 50	1.462 50	0	0	3.258 1
1.463 00	1.463 00	0	0	2.756 9
1.462 01	1.462 00	$1 \times 10^{-5}$	$1.111 1 \times 10^{-7}$	3.417 1
1.462 10	1.462 00	$1 \times 10^{-4}$	$1.111 1 \times 10^{-6}$	15.577 9
1.462 20	1.462 00	$2 \times 10^{-4}$	$2.222 2 \times 10^{-6}$	40.703 5
1.462 30	1.462 00	$3 \times 10^{-4}$	$3.333 3 \times 10^{-6}$	63.659 1
1.462 40	1.462 00	$4 \times 10^{-4}$	$4.444 4 \times 10^{-6}$	86.716 8
1.462 50	1.462 00	$5 \times 10^{-4}$	$5.555 6 \times 10^{-6}$	111.278 2
1.462 60	1.462 00	$6 \times 10^{-4}$	$6.666 7 \times 10^{-6}$	135.481 6
1.462 70	1.462 00	$7 \times 10^{-4}$	$7.777 8 \times 10^{-6}$	163.408 5
1.462 80	1.462 00	$8 \times 10^{-4}$	$8.888 9 \times 10^{-6}$	186.315 5
1.462 90	1.462 00	$9 \times 10^{-4}$	$1.000 0 \times 10^{-5}$	209.348 9
1.463 00	1.462 00	$1 \times 10^{-3}$	$1.111 1 \times 10^{-5}$	231.886 5

通过表 2 所示的仿真结果可以看出,当折射率梯度  $D_n$  由  $1.111 1 \times 10^{-7}$  增加到  $1.111 1 \times 10^{-5}$  riu/mm 时,外部折射率呈线性分布情况下损耗峰 3 dB 带宽的改变量为  $2.2 \times 10^2$  nm,因此其梯度灵敏度为  $2.2 \times 10^7$  nm · mm/riu,该特性为实现对折射率梯度变化的高灵敏度测量提供了可能。

利用传输矩阵理论,可以较好地解释上述现象产生的原因:传输矩阵将 LPFG 在轴向上划分为  $M$  小段,每一小段可视为相对独立的微小 LPFG。当外部介质折射率呈梯度分布时,每一小段光栅各自对应的梯度折射率区间很短,可近似视为均匀分布,其对应的微透射谱与图 1(a) 类似。不同位置的小段光栅对应的外部折射率不同,产生的微透射谱的中心波长位置也不相同,基本规律是,随着小段光栅外部折射率的升高,微透射谱的中心波长发生蓝移,因此众多微透射谱叠加之后的总透射谱与均匀情况相比发生了展宽和频率漂移。而且随着外部折射率梯度变化的增

大,小段与小段之间的平均折射率差升高,总带宽也会随之增大。同时,由于透射谱能量被分散到不同的波长上,总透射谱的损耗峰幅值会逐渐降低。

## 4 结 论

通过模式耦合理论建立了基于 LPFG 的二层圆光波导模型,利用传输矩阵法,研究了该模型对外部介质折射率呈线性分布情况的透射谱响应特性。研究表明,透射谱的带宽和幅值等特征与外部介质折射率梯度有着很大的关系,特别是 3 dB 带宽的增量与外部介质折射率梯度的增量有着较好的线性关系,当外部折射率梯度处于  $1.111 1 \times 10^{-7} \sim 1.111 1 \times 10^{-5}$  riu/mm,其梯度灵敏度可达到  $2.2 \times 10^7$  nm · mm/riu。此结论为设计基于 LPFG 的高灵敏度折射率梯度传感器提供了重要的理论依据,对进一步研究基于 LPFG 的非均匀介质折射率传感有着一定的帮助。

## 参考文献:

- [1] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, *et al.*. Long-period fiber gratings as band-rejection filters [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1996, 14(1):58-65.
- [2] 崔一平, 陈娜. 长周期光纤光栅传输模理论分析方法[J]. 自然科学进展, 2004, 14(11):1310-1317.
- CUI Y P, CHEN N. Long period fiber grating transmission mode theory analysis [J]. *Progress in Natural Science*, 2004, 14(11): 1310-1317. (in Chinese)
- [3] 桑新柱, 余重秀, 颜纷纷, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. 光学精密工程, 2006, 14(5): 771-774.
- SANG X ZH, YU CH X, YAN B B, *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):771-774. (in Chinese)
- [4] 罗彬彬, 赵明富, 周晓军, 等. 基于结构化光纤布拉格光栅的折射率梯度传感器研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3):0306004.
- LUO B B, ZHAO M F, ZHOU X J, *et al.*. Research on the refractive-index gradient sensor based on the structured fiber bragg grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(3):0306004. (in Chinese)
- [5] 赵明富, 钟年丙, 罗彬彬, 等. 用于生物量浓度在线检测的光纤衰减全反射传感器[J]. 光学精密工程, 2010, 18(8):1707-1714.
- ZHAO M F, ZHONG N B, LUO B B, *et al.*. Optical fiber attenuated total reflection sensor for on-line measurement of biomass concentration [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(8):1707-1714. (in Chinese)
- [6] 赵明富, 廖强, 陈艳, 等. 光纤生物量浓度在线检测传感器[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 478-485.
- ZHAO M F, LIAO Q, CHEN Y, *et al.*. Fiber sensor for biomass online testing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 478-485. (in Chinese)
- [7] 周春新, 黄平, 曾庆科, 等. 长周期光纤光栅结构参数与透射谱关系的仿真研究[J]. 应用光学, 2010, 31(4): 632-635.
- ZHOU CH X, HUANG P, ZENG Q K, *et al.*. Simulation study on the relation between the structural parameters and the transmission spectra of a long period fiber grating [J]. *Journal of Applied Optics*, 2010, 31(4):632-635. (in Chinese)
- [8] 丁金妃, 付宏燕. 包层腐蚀长周期光纤光栅对的光谱特性研究[J]. 浙江大学学报(工学版), 2007, 41(3):537-540.
- DING J F, FU H Y. Spectral characterization of long2period grating pair with etched fiber-cladding [J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2007, 41(3): 537-540. (in Chinese)
- [9] 陈青云, 石胜辉, 张旨遥, 等. 包层腐蚀机械写制长周期光纤光栅的耦合特性研究[J]. 光电子·激光, 2011, 22(5):677-680.
- CHEN Q Y, SHI SH H, ZHANG ZH Y, *et al.*. Coupling characteristics of mechanical-induced long-period grating with etched fiber-cladding [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(5): 677-680. (in Chinese)
- [10] 胡兴柳, 梁大开, 曾捷, 等. 长周期光纤光栅对结构参数的敏感特性[J]. 光电子·激光, 2011, 22(9):1295-1300.
- HU X L, LIANG D K, ZENG J, *et al.*. Sensitive properties of a long period fiber grating to structural parameters [J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2011, 22(9):1295-1300. (in Chinese)
- [11] ERDOGAN T. Cladding-mode resonances in short and long period fiber grating filters [J]. *J. Opt. Soc. Am. A.*, 1997, 14(8):1760-1773.
- [12] ERDOGAN T. Fiber grating spectra [J]. *J. of Lightwave Technology.*, 1997, 15(8): 1277-1294.

## 作者简介:



**赵明富**(1964—),男,重庆人,博士,教授,硕士生导师,电子科技大学兼职博士生导师,2003年于西安交通大学获得硕士学位,2007年于重庆大学获得博士学位,主要从事现代光电检测技术及仪器、生化信息获取与智能传感方面的研究。E-mail: zmf@cqut.edu.cn



**韩 汐**(1986—),男,天津人,硕士研究生,2009年于大连理工大学获得学士学位,主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: han.shane@yahoo.com.cn



**罗彬彬**(1981—),男,广西人,博士,副教授,2003年、2006年、2012年于电子科技大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事光纤传感技术、光信号处理方面的研究。E-mail: luobinbin@cqut.edu.cn



**王博思**(1989—),男,重庆人,现就读于英国布里斯托大学工程学院,主要从事光纤传感技术、信号处理方面的研究。E-mail: bw12012.2012@my.bristol.ac.uk



**全晓莉**(1975—),女,重庆人,硕士,讲师,1999年于四川师范大学获学士学位,2006年于重庆大学获硕士学位,主要从事光纤传感技术、医学成像技术方面的研究。E-mail: znq55555@163.com

(版权所有 未经许可 不得转载)