

文章编号: 0258-7025(2008)12-1919-05

# 用非线性光纤连接的长周期光栅对的光开关特性

李淳飞 臧志刚

(哈尔滨工业大学理学院物理系, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要** 提出用一根掺铒光纤连接两个对称的长周期光纤光栅(EDF-LPFG)对构成的新型全光开关。数值模拟了在交叉相位调制下对应于不同抽运功率的信号光的透射谱;还研究了在不同光栅的有效折射率调制幅度和光纤吸收系数下,信号光透射率随抽运光功率的变化。导出了器件的阈值开关功率公式。EDF-LPFG 对光开关的阈值开关功率比单 LPFG 光开关的开关功率降低了 5 个数量级,不到 25 mW。

**关键词** 光纤光学;全光开关;长周期光纤光栅;掺铒光纤;低阈值开关功率

**中图分类号** TN 929.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083512.1919

## Optical Switching in a Nonlinear-Fiber Connected Long-Period Fiber Grating Pair

Li Chunfei Zang Zhigang

(Department of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin, Heilongjiang 150001, China)

**Abstract** A new all-optical switching device, which is constructed by connecting an erbium-doped fiber with two symmetrical long-period fiber gratings (EDF-LPFG) pair was proposed. The transmission spectra of signal light for different pump powers in cross-phase modulation are simulated, and the transmissions of signal light as a function of the pump power under different effective index change and absorption coefficients are also discussed. The formula for threshold switching power of EDF-LPFG pair switch is derived. Compared with the single LPFG switch, the threshold switching power of EDF-LPFG pair switch is dramatically reduced by 5 orders, less than 25 mW. Such kind all-optical switch is hopeful to be used in future all-optical communication.

**Key words** fiber optics; all-optical switching; long period fiber grating;  $\text{Er}^{3+}$ -doped fiber; low threshold switching power

## 1 引 言

长周期光纤光栅(LPFG)具有插入损耗小、背向反射弱、传感特性好以及制作成本较低等优点,在光纤通信和光纤传感领域有着广泛的应用前景,它可以使掺铒光纤放大器获得理想的平坦增益谱<sup>[1,2]</sup>,可以做成高性能的滤波器<sup>[3]</sup>和传感器<sup>[4~6]</sup>,还可以用来做全光开关。J. Eggleton 等<sup>[7]</sup>提出用单个 LPFG 构成全光开关,并进行实验验证。其原理是用强光改变光纤光栅的折射率,进而改变光栅的中心波长,当光栅中心波长移动半个谱宽,即可实现对信号光输出功率的开关转换。然而单个 LPFG 的透射谱较宽(一般大于 20 nm),而且石英光栅的非线性系数很小 ( $n_2 \approx 10^{-20}$  esu),需要大到

20 GW/cm<sup>2</sup> (200 W/ $\mu\text{m}^2$ ) 的激光光强才能移动半个谱宽,对于截面为 50  $\mu\text{m}^2$  的石英光纤,相当于阈值开关功率达到  $10^4$  W。这样高的开关功率,在实际光通信中是不实用的。因此本文提出:1) 将一对 LPFG 组成一个马赫-曾德尔(M-Z)干涉仪,其透射光谱变成多个窄带组成的干涉峰,每峰的带宽很窄,可以成十倍地降低阈值开关功率。2) 以非线性光纤,如掺铒光纤(EDF) ( $n_2 \approx 10^{-15}$  esu)代替普通光纤连接两个光栅,使介质的非线性系数增加 5 个数量级,由于阈值开关功率与非线性折射率成反比,阈值开关功率将降低 5 个数量级。采取以上两个措施,将使阈值开关功率降低 5 个数量级,即降为毫瓦量级,这与光通信中光信号的功率接近,因此这种光

收稿日期:2008-03-14; 收到修改稿日期:2008-04-30

**作者简介**:李淳飞(1938—),男,江西人,教授,主要从事非线性光学、光子技术以及广泛应用于光通信、光计算和光传感中的光开关器件方面的研究。E-mail:cfli@yahoo.cn

开关器件有望在光通信中获得应用。

## 2 非线性 LPFG 对光开关的工作原理

新的全光开关的工作原理如图 1 所示,波长为 1550 nm 的信号光与波长为 980 nm 的抽运光,通过波分复用器(WDM)一起耦合进入在两个 LPFG 之间连接一根非线性光纤组成的器件——非线性 LPFG 对。设两 LPFG 是线性器件,非线性光纤采用掺铒光纤。输出端装有一个滤波器,用以滤除抽运光,后面有一个光电探测器,将光信号变为电信号,再送入示波器。抽运光引起掺铒光纤的折射率发生变化,使通过器件的信号光中的纤芯模和包层模间产生附加的相位差,致使器件的透射谱向长波方向移动半个谱宽,从而实现对信号光强的开关作用。

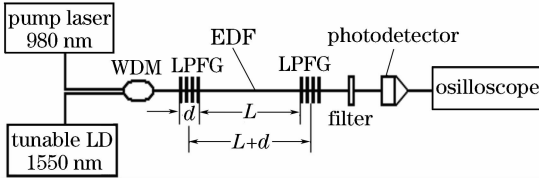


图 1 非线性掺铒光纤连接的长周期光栅对全光开关原理图

Fig. 1 Schematic of all-optical switch in a nonlinear EDF connected LPFG pair

## 3 无抽运光作用时 LPFG 对的透射谱

只考虑信号光对 LPFG 对的作用,根据长周期光纤光栅对的模式耦合理论,第一个 LPFG 将入射的信号光的纤芯模部分地耦合为包层模(模式 2),它与剩余的纤芯基模(模式 1)同向传输,两者在第二个 LPFG 处干涉,再被耦合回纤芯中。可以把两光栅的作用视为耦合器,LPFG 对则如同 M-Z 干涉仪,模式 1 和模式 2 分别在 M-Z 干涉仪的两臂中传播。假设在两个 LPFG 间同向传输的纤芯模和包层模在输出端的场振幅分别为  $A_1(z)$  和  $A_2(z)$ ,设初始条件为  $A_1(0) = 1, A_2(0) = 0$ ,  $d$  和  $L$  分别为光栅长度和两 LPFG 的间隔,则信号光通过 LPFG 对的透射光振幅可用传输矩阵来描述

$$\begin{pmatrix} A_1(L+2d) \\ A_2(L+2d) \end{pmatrix} = e^{i(\beta_1+\beta_2)d} \begin{pmatrix} e^{i\frac{\kappa}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\kappa}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\beta_1 L} & 0 \\ 0 & e^{i\beta_2 L} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{-\alpha_1 L} & 0 \\ 0 & e^{-\alpha_2 L} \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} e^{i\frac{\kappa}{2}d} & 0 \\ 0 & e^{-i\frac{\kappa}{2}d} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t & r \\ r & t^* \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad (1)$$

式中  $\mathbf{K}$  为光栅波矢,  $\mathbf{K} = 2\pi/\Lambda$ , 其中  $\Lambda$  为光栅常数。 $\alpha_1$  和  $\alpha_2$  分别为纤芯模和包层模的吸收系数。 $\beta_1$  和  $\beta_2$  分别为纤芯模和包层模的传播常数; $\beta_1 = (2\pi/\lambda)n'$  和  $\beta_2 = (2\pi/\lambda)n''$ ,  $n'$  和  $n''$  分别为介质对纤芯模和包层模的有效折射率, $\lambda$  为入射光的波长。 $t$  和  $r$  分别为入射光通过单个 LPFG 的透射系数和反射系数,由耦合方程可求得

$$t = \cos(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}d) + i \frac{\delta}{\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}d), \quad (2)$$

$$r = i \frac{\kappa}{\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}} \sin(\sqrt{\kappa^2 + \delta^2}d), \quad (3)$$

式中  $\kappa$  为两模式间的耦合系数,有  $\kappa = \frac{\pi}{\lambda} \overline{\delta n_{\text{eff}}}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  为光栅模式平均有效折射率调制幅度。(2), (3) 式的  $t$  和  $r$  主要由参数  $\delta$  决定,  $\delta$  是失谐量,定义为

$$\delta = \frac{1}{2} \left[ (\beta_1 - \beta_2) - \frac{2\pi}{\Lambda} \right] = \pi \Delta n_0 \left( \frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_D} \right), \quad (4)$$

式中  $\Delta n_0 = n' - n''$ , 表示在线性情况下介质对纤芯模和包层模的有效折射率之差; $\lambda_D = \Delta n_0 \Lambda$  为谐振波长。

可以推得入射光通过 LPFG 对的透射率公式为<sup>[8]</sup>

$$T_{\text{pair}} = |T \exp(i\Delta\phi) - \gamma R|^2 = T^2 + \gamma^2 R^2 - 2\gamma TR \cos \Delta\phi, \quad (5)$$

式中  $T = |t|^2$  和  $R = |r|^2$ ,  $\gamma$  为光在非线性光纤中的损耗系数,  $\gamma = \exp[-(\alpha_1 + \alpha_2)]L$ 。一般  $\alpha_2 \gg \alpha_1$ 。在无抽运光条件下,其中  $\Delta\phi = \Delta\phi_0$ ,  $\Delta\phi_0$  为纤芯模和包层模经过 LPFG 对后的相位差。若两光栅中点间的距离为  $L + d$  (见图 1), 则  $\Delta\phi_0$  为

$$\Delta\phi_0 = \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n_0 (L + d), \quad (6)$$

取  $\Lambda = 300 \mu\text{m}$ ,  $\Delta n_0 = 5 \times 10^{-3}$ ,  $\lambda_D = \Delta n_0 \Lambda = 1550 \text{ nm}$ ,  $\gamma = 0.8$ ,  $d = 50 \text{ mm}$ ,  $L = 35 \text{ cm}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.75 \times 10^{-5}$ , 由(2)~(6)式算得 LPFG 对的透射谱如图 2 所示。图 2 中还画出了同参数的单个 LPFG 的透射谱(虚线),以供比较。

从图 2 可见, LPFG 对的透射谱是在原单个 LPFG 的宽透射谱范围内形成的等间隔的、线宽极窄的多个干涉峰,这些干涉峰是周期性的余弦函数谱。由于两干涉峰的间距  $S$  对应于相位差  $\Delta\phi_0$  为  $2\pi$  时的波长变化  $\Delta\lambda$ , 即

$$S = \Delta\lambda \left| \frac{2\pi}{\Delta\phi_0} \right|, \quad (7)$$

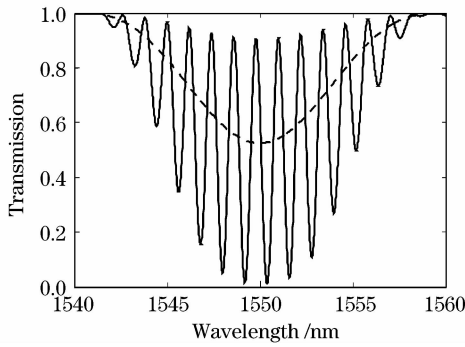


图2 当光栅谐振波长为  $\lambda_D = 1550$  nm 时 LFPG 对的透射谱与单个 LFPG 透射谱比较

Fig. 2 When the resonance wavelength is  $\lambda_D = 1550$  nm, the transmission spectra for both the LFPG pair and the single LFPG

由(6)式,有  $\Delta\phi_0 = \frac{d\phi_0}{d\lambda}\Delta\lambda = -\frac{2\pi}{\lambda^2}\Delta n_0(L+d)\Delta\lambda$ ,再利用(7)式可求出干涉峰的间距为

$$S = \frac{\lambda^2}{\Delta n_0(L+d)}. \quad (8)$$

可见干涉峰间距与有效折射率差及两光栅中心的距离成反比。图3给出了波长  $\lambda = 1550$  nm,  $\Delta n_0 = 5 \times 10^{-3}$  和  $d = 50$  mm 时,干涉峰的间距  $S$  与两光栅间隔的关系。可见当两光栅间隔小于 10 cm 时,峰间距对光栅间隔很敏感,两光栅间隔越小,峰间距越大。而当两光栅间隔  $L$  大于 30 cm 时,峰间距的变化不大。

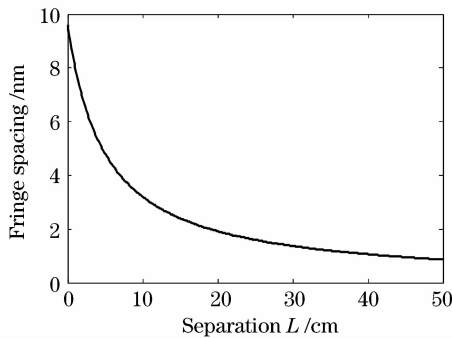


图3  $\lambda = 1550$  nm 时,干涉峰间距  $S$  与两光栅的间隔  $L$  的关系

Fig. 3 Dependence of the fringe spacing on the interval between two LFPGs when the wavelength is 1550 nm

## 4 不同参量对透射率与抽运功率关系的影响

### 4.1 不同抽运光功率下的透射谱

根据光克尔效应,抽运光会引起介质折射率发生变化。这里假设抽运光强度引起线性光栅折射率

的变化可以忽略,只考虑掺铒光纤折射率的变化。在  $z$  点处掺铒光纤折射率的变化为

$$\Delta n(z) = 2n_2 \frac{P(z)}{A} = 2n_2 \frac{P(0)e^{-\alpha z}}{A}, \quad (9)$$

式中  $P(0)$  为  $z = 0$  处入射抽运光的功率,  $\alpha$  为掺铒光纤对抽运光的吸收系数,  $A$  为抽运光在光纤中的模平均面积,  $n_2$  为非线性折射率系数,对掺铒光纤,  $n_2 = 2.7 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ <sup>[9]</sup>。因此当信号光通过非线性 LFPG 对后,其相位变化可分为线性与非线性两部分

$$\Delta\phi = \Delta\phi_0 + \Delta\phi_{\text{NL}}, \quad (10)$$

其中  $\Delta\phi_0$  由(6)式表述;  $\Delta\phi_{\text{NL}}$  是在信号光传输间隔  $L$  后的非线性相位变化(这里假设  $L \gg d$ ), 则有

$$\Delta\phi_{\text{NL}} = \int_0^L \frac{2\pi}{\lambda} \Delta n(z) dz = \frac{4\pi n_2 P(0)}{\alpha \lambda A} (1 - e^{-\alpha L}), \quad (11)$$

可见相位变化与入射抽运光强度及非线性折射系数成正比。将(6),(10)和(11)式代入(5)式,以算出在不同抽运光功率下,信号光波长在 1548~1552 nm 范围内非线性 LFPG 对的透射谱如图4所示。数值模拟时选取数据:  $\lambda = 1550$  nm,  $A = 50 \mu\text{m}^2$ ,  $n_2 = 2.7 \times 10^{-15} \text{ m}^2/\text{W}$ ,  $d = 50$  mm,  $\alpha = 0.012 \text{ cm}^{-1}$ ,  $\overline{\delta n_{\text{eff}}} = 0.75 \times 10^{-5}$ 。可见当抽运光功率  $P(0)$  增大时,非线性 LFPG 对的透射谱向长波方向移动。对比图4(a)和图4(e)可以看出,当  $P(0)$  增大到 23.89 mW 时,实现了相位差  $\Delta\phi = \pi$ ,透射谱移动了半个干涉峰间隔( $S/2$ ),也就是完成了开关动作。

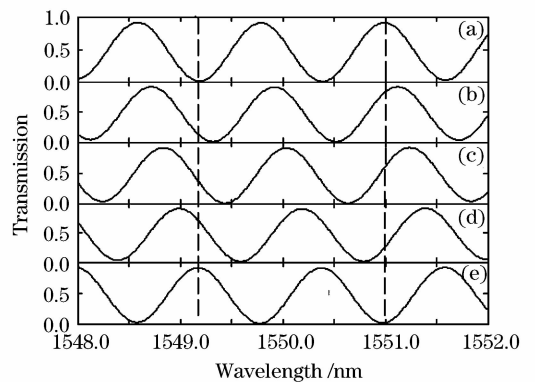


图4 在不同抽运光功率下 LFPG 对的透射谱

Fig. 4 Transmission spectra of the LFPG pair under different pump powers. (a) 0 mW; (b) 5.31 mW; (c) 10.16 mW; (d) 16.28 mW; (e) 23.89 mW

### 4.2 光栅的有效折射率调制幅度 $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$ 对透射谱的影响

在数值模拟中,发现光栅的有效折射率调制幅度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  对透射谱和开关特性有明显的影

所示。图 5(a)~(d) 表示  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  分别为  $0.75 \times 10^{-5}$ ,  $0.96 \times 10^{-5}$ ,  $1.11 \times 10^{-5}$ ,  $1.25 \times 10^{-5}$  时的透射谱, 其所取参数与图 4 相同。表明随着  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  的增大, 在 1550 nm 谐振波长附近的干涉峰的消光比逐渐减小, 这对光开关不利。

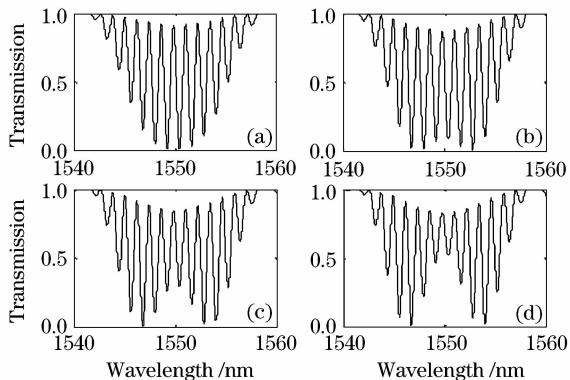


图 5 在不同有效折射率调制幅度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  下的非线性 LPFG 对的透射谱

Fig. 5 Transmission spectra of the nonlinear LPFG pair under different  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$

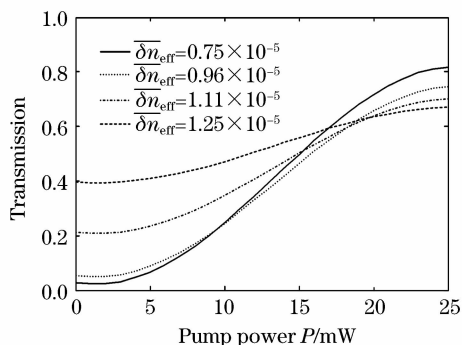


图 6 在不同的  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  下, 波长为  $\lambda = 1550$  nm 的信号光的透射率随抽运光功率的变化

Fig. 6 Transmission of the signal light at  $\lambda = 1550$  nm as a function of the pump power under different  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$

图 6 为在不同光栅有效折射率调制幅度  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  下,  $\lambda = 1550$  nm 时信号光的透射率随抽运功率的变化规律, 可以看出, 在抽运光功率范围相同的情况下, 随着  $\overline{\delta n_{\text{eff}}}$  的增大, 对于相同波长的信号光 ( $\lambda = 1550$  nm), 其开关的对比度 (开启和关闭的透射率之比) 变小, 甚至会使开关现象消失。

#### 4.3 不同损耗系数下透射率与抽运功率间的关系

图 7 给出了信号光波长为  $\lambda = 1550$  nm 时, 对于不同损耗系数  $\gamma$ , 信号光的透射率随抽运光功率的变化规律。可以看出, 随光纤掺杂浓度的增大, 吸收增大,  $\gamma = \exp(-\alpha_2 d)$  减少, 开关的对比度也减小。

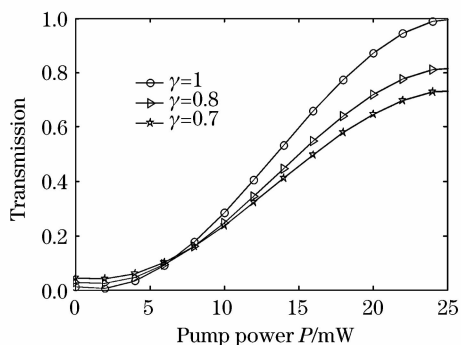


图 7 信号光波长  $\lambda = 1550$  nm 时, 在不同损耗系数下信号光透射率随抽运光功率的变化

Fig. 7 Transmission of the signal light at  $\lambda = 1550$  nm as a function of the pump power under different loss coefficients  $\gamma$

#### 4.4 非线性 LPFG 对的阈值开关功率

非线性 LPFG 对实现开关的必要条件是  $\Delta\phi_{\text{NL}} = \pi$ , 由(11)式可得, 实现开关所需要的阈值开关功率  $P_{\text{th}}$  为

$$P_{\text{th}} = \frac{\lambda A \alpha}{4n_2(1 - e^{-\alpha L})}. \quad (12)$$

从图 6 和图 7 可见, 对于本文设计的用掺铒光纤连接的 LPFG 对, 开关的阈值功率仅为 23.89 mW。与单个长周期光纤光栅的光开关功率<sup>[7]</sup>相比, 非线性 LPFG 对的开关功率降低了约 5 个数量级。从(12)式可见, 阈值功率  $P_{\text{th}}$  与光纤的非线性折射系数  $n_2$  成反比, 与光纤的有效截面成正比。若减少光纤的横截面, 提高光纤的非线性系数可进一步降低阈值开关功率。阈值功率  $P_{\text{th}}$  与吸收系数  $\alpha$  的关系如图 8 所示。

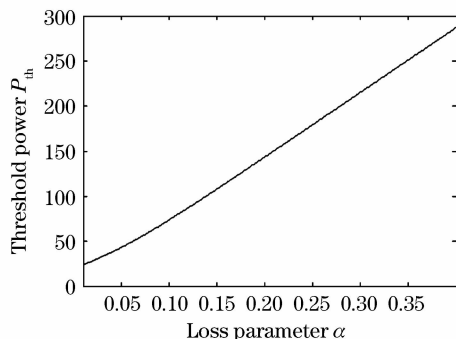


图 8 阈值开关功率  $P_{\text{th}}$  随吸收系数  $\alpha$  的变化

Fig. 8 Variation of the threshold switching power  $P_{\text{th}}$  as a function of the parameter  $\alpha$

吸收系数  $\alpha$  与光纤中掺铒离子浓度有关, 一般铒离子掺杂浓度越大, 吸收系数  $\alpha$  越大, 由图 8 可见, 对于同样长度的掺铒光纤, 阈值功率  $P_{\text{th}}$  也就要求越高。但是铒离子掺杂浓度大也意味着非线性折射

系数  $n_2$  越大, 由(12)式可见, 这有利于降低阈值开关功率, 因此适当地选择掺铒光纤的掺杂浓度是重要的, 这对光开关器件阈值功率有很大的影响。

## 5 结 论

提出了一种含有非线性光纤的双长周期光纤光栅的全光开关。其工作原理是通过抽运光对非线性光纤的光克尔效应, 实现对信号光的交叉相位调制。用数值模拟方法, 研究了在不同失谐量与不同吸收系数下信号光的透射率随抽运光功率的变化规律。还推导了器件的阈值开关功率公式, 讨论了非线性折射率和吸收系数对开关功率的影响。计算结果表明, 与单个长周期光纤光栅全光开关相比, 设计的掺铒光纤连接的 LPFG 对的开关阈值功率比单 LPFG 开关器件降低了 5 个数量级。

## 参 考 文 献

- 1 M. Harunoto, M. Shigehara, H. Suganurna. Gain-flattening filter using long-period fiber gratings [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2002, **20**(6):1027~1033
- 2 I. B. Sohn, J. W. Song. Gain flattened and improved double-pass two-stage EDFA using microbending long-period fiber gratings [J]. *Opt. Commun.*, 2004, **236**:141~144
- 3 Liu Bo, Tong Zhengrong, Chen Shaohua *et al.*. A novel method of edge filter linear demodulation long-period grating in fiber sensor system [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):199~202  
刘波, 童峥嵘, 陈少华等. 一种长周期光纤光栅边沿滤波线性解调新方法[J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):199~202
- 4 Gao Kan, Zhou Yingwu, Lin Feng *et al.*. A novel pressure sensor based on long period fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(8):997~1000  
高侃, 周赢武, 林峰等. 基于长周期光纤光栅的压力传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(8):997~1000
- 5 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing film sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(3):326~330  
徐艳平, 顾铮, 陈家璧等. 长周期光纤光栅气敏薄膜传感器结构优化[J]. *光学学报*, 2006, **26**(3):326~330
- 6 Wang Jiuling, Rao Yunjiang, Zhu Tao. High-temperature and strain characteristics of long period grating with asymmetric refractive index profile in the cross section of fiber [J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(3):389~392  
王久玲, 饶云江, 朱涛. 截面折变非对称型长周期光栅高温应变特性[J]. *中国激光*, 2007, **34**(3):389~392
- 7 J. Eggleton, R. E. Slusher, J. B. Judkins *et al.*. All-optical switching in long-period fiber gratings [J]. *Opt. Lett.*, 1997, **22**(12):883~885
- 8 H. L. Byeong, Nishii Junji. Dependence of fringe spacing on the grating separation in a long-period fiber grating pair [J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(16):3450~3459
- 9 R. H. Pantell, M. J. F. Digonnet, R. W. Sadowski. Analysis of nonlinear optical switching in an erbium-doped fiber [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1993, **11**(9):1416~1424