

文章编号: 0253-2239(2007)10-1730-5

CO₂ 激光脉冲边缘写入的长周期光栅折射率特性研究*

王久玲¹ 饶云江^{1,2} 朱涛^{1,2} 宋韵¹

(¹ 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400044
² 电子科技大学宽带光纤传输与通信系统技术教育部重点实验室, 成都 610054)

摘要: 报道了一种用高频 CO₂ 激光脉冲在普通通信光纤包层边缘单侧写入的新型长周期光纤光栅。研究发现, 这种长周期光纤光栅的折射率变化主要发生在光纤包层区域, 而纤芯的折射率变化较小; 同时该光栅的附加损耗低于 0.5 dB。进一步折射率特性实验研究表明, 由于其特殊的折变结构, 这种光栅具有较高的外界环境灵敏度, 当外界折射率在 1.41~1.45 范围内变化时, 其谐振波长漂移量高达 15.52 nm, 比实验测得的用传统方法写入的长周期光纤光栅谐振波长漂移量高出近 3 倍, 这种光栅结构在光纤传感中将具有重要的应用。

关键词: 导波光学; 长周期光纤光栅; 高频 CO₂ 激光; 包层折变; 折射率测量

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Refractive Index Characteristic for Edge-Written Long-Period Fiber Gratings Induced by CO₂ Laser Pulses

Wang Jiuling¹ Rao Yunjiang^{1,2} Zhu Tao^{1,2} Song Yun¹

(¹ Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400044
² Key Laboratory of Broadband Optical Fiber Transmission and Communication Networks Technologies, Education Ministry of China, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu 610054)

Abstract: A novel long-period fiber grating (LPGF) is fabricated in common communication optical fiber by using an edge-written exposure method with high-frequency CO₂ laser pulses. Studies show that this kind of long-period fiber grating has refractive index disturbance mainly in cladding of optical fiber, and its excess loss is less than 0.5 dB. Experimental results of the refractive index characteristic show that it has a resonant peak shift of 15.52 nm when the surrounding refractive index varies in the range of 1.41~1.45, which is three times higher than that of a conventional long-period fiber grating due to especial refractive index disturbance. The novel long-period fiber grating can find important applications in the field of optical sensing.

Key words: guided-wave optics; long-period fiber grating; high-frequency CO₂ laser; cladding refractive index disturbance; measurement of refractive index

1 引言

近年来,以沿光纤轴向折变呈周期性的长周期光纤光栅^[1](LPGF)为基础,研究人员设计制作出光纤带阻滤波器^[2]、增益平坦滤波器^[3]、化学传感器^[4]、温度传感器^[5]、压力传感器^[6]等器件,使得长

周期光纤光栅在光纤通信和光纤传感领域展现出良好的应用前景。目前,制作长周期光纤光栅的方法有很多,常用的有紫外曝光写入法^[7]、电弧放电法^[8]、腐蚀刻槽法^[9]、机械微弯法^[10,11]等。其中用紫外曝光法写入长周期光纤光栅,主要发生的是光

* 国家自然科学基金重点基金(60537040)、教育部重点基金(104210)和重庆市自然科学基金(8415)资助课题。

作者简介: 王久玲(1977-),女,四川人,硕士研究生,主要从事光纤通信及传感技术等方面的研究。

E-mail: wjl490@163.com

导师简介: 饶云江(1962-),男,云南人,教授,博士生导师,主要从事光纤及微纳传感技术等方面的研究。

E-mail: yjrao@cqu.edu.cn

收稿日期: 2007-01-31; 收到修改稿日期: 2007-04-18

纤纤芯的折射率变化,这种光栅结构对外界环境的灵敏度较低;而基于电弧放电法制作的长周期光纤光栅虽然在纤芯和包层均有折射率变化,对外界环境灵敏度较高,但插入损耗高,制作效率低且不灵活;腐蚀刻槽法和机械微弯法制作光栅时对光纤有物理损伤,光栅机械强度较差,因而在光纤通信和传感系统中不能被广泛应用。

本文在高频 CO₂ 激光脉冲写入法^[12,13]的基础上,提出了一种新的长周期光纤光栅制作方法,即用高频 CO₂ 激光脉冲在光纤包层边缘曝光写入长周期光纤光栅。

2 包层边缘写入长周期光纤光栅的制作

包层边缘写入长周期光纤光栅制作装置如图 1,整个系统由一个全功率为 10 W 的 CO₂ 激光器(Synrad, USA)、宽带光源(SLD)、光谱分析仪(OSA, Agilent 68140A)和一组三维微动台组成。将一根普通通信光纤去掉涂覆层后呈水平直线状态放置在三维微动台上,并确保光纤轴线与 CO₂ 激光焦斑平行。光纤一端固定,另一端悬挂轻质重物,使光纤在加热过程中保持恒定的轴向应力而始终处于直线水平状态。调整微动台使光纤包层边缘切线与激光光束焦斑重合,然后通过计算机精确控制激光光束沿光纤横向(y 方向)从光纤包层向纤芯扫描光纤。由于光纤直径约为 125 μm ,而纤芯直径仅 8~10 μm ,若不考虑其它因素的影响,仅扫描深度 $l < 55 \mu\text{m}$ 就可使激光光束只在光纤包层曝光,但实际上在光栅写入过程中必须考虑到残余应力、加热温度、激光焦斑大小及传播速度的影响,扫描深度过

小将难以成栅,而过大则又会使纤芯折变过大,所以一般将激光脉冲进入光纤的扫描深度 l 控制在 15~35 μm ,这样即使将其他因素考虑在内,也可确保激光光束只在光纤包层曝光。在激光沿 y 方向对包层完成一次曝光后,控制激光光束沿光纤轴向(x 方向)偏移一个光栅周期,再次沿 y 方向对光纤包层曝光。激光光束沿 x 方向每偏移一次就沿 y 方向对光纤包层曝光一次,最终完成所有周期的曝光,以致沿光纤轴向在包层形成周期性折变,并根据需要可以在同一位置对光纤进行多次曝光,加深包层的折变程度以达到长周期光纤光栅设计要求。在长周期光纤光栅制作过程中,高频 CO₂ 激光脉冲只在包层区域对光纤进行曝光,由于激光脉冲能量集中、单个脉冲加热时间短、加热效率高,对光纤结构的物理损伤小,可以认为激光光束主要引起光纤包层产生光致折变,而无物理损伤,同时光纤纤芯变化较小。

同用高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅^[12,13]一样,CO₂ 激光光束的偏转由专门的 HAN'S LASER Marking System 软件控制,只要用 CoreDraw 软件预先设计好激光光束扫描轨迹,计算机便可以自动控制激光光束进入光纤包层的深度 l 和沿 x 方向的偏移距离(即光栅周期 Δ),从而方便地制作出具有不同谐振峰波长和幅度的长周期光纤光栅,以满足应用需要。

图 2~图 4 分别为用相同能量的 CO₂ 激光在普通通信光纤(Corning SMF-28)上写入的周期 $\Delta = 500 \mu\text{m}$,周期数 $N = 60$ 的长周期光纤光栅透射峰生长谱。其中图 2 为用原有方法写入的长周期光纤光栅,即控制激光脉冲沿 y 方向越过整个光纤,使光纤包层和纤芯同时产生折变,在这里称之为普通长周期光纤光栅,图 3、图 4 分别为激光进入包层边缘深度 $l = 15 \mu\text{m}$ 和 $l = 35 \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅,其

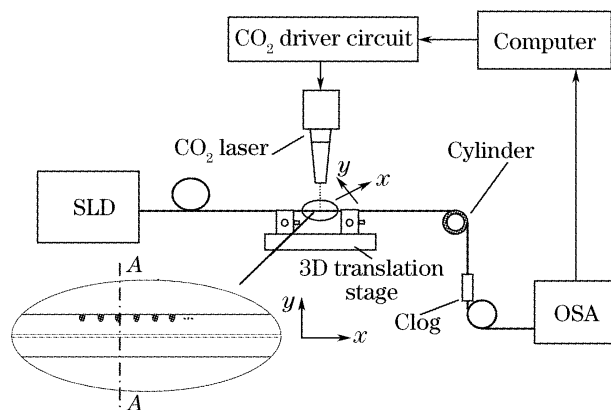


图 1 CO₂ 激光脉冲包层边缘写入法制作长周期光纤光栅装置图

Fig. 1 Set-up for fabrication of long-period fiber grating in cladding side-written with the high-frequency CO₂ laser pulses

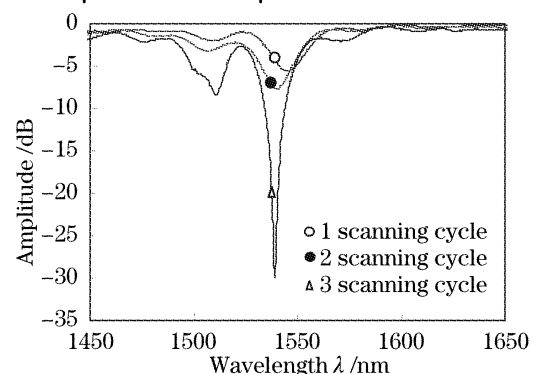


图 2 普通长周期光纤光栅传输谱

Fig. 2 Transmission spectrum evolution of the traditional long-period fiber grating

中 \circ 、 \bullet 、 Δ 分别表示激光对光栅各周期进行第一、第二、第三次曝光时的光栅光谱。从图中可以看出,与普通长周期光纤光栅相比较,包层边缘写入长周期光纤光栅的谐振峰波长向短波方的漂移量较小;同时,在同样的激光能量下,普通长周期光纤光栅谐振峰幅度大于包层边缘写入的长周期光纤光栅,而同样对于包层边缘写入的长周期光纤光栅,激光脉冲进入包层深度大的光栅其耦合深度大于进入深度小的光栅,表现为谐振峰幅度较大。

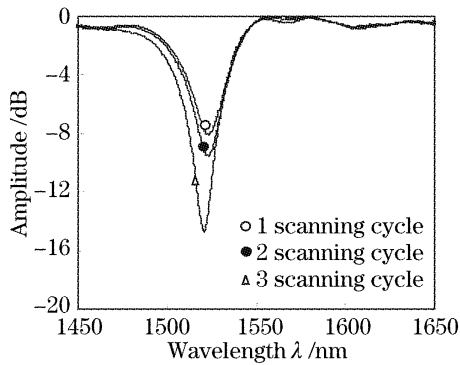


图 3 进入包层深度 $l=13.5 \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅传输谱
Fig. 3 Transmission spectrum evolution of the long-period fiber grating with written depth $l=15 \mu\text{m}$

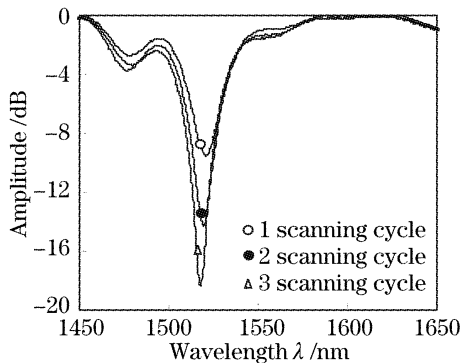


图 4 进入包层深度 $l=35 \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅传输谱
Fig. 4 Transmission spectrum evolution of the long-period fiber grating with written depth $l=35 \mu\text{m}$

3 分析讨论

根据模式耦合理论^[1],长周期光纤光栅把纤芯中传输的基模 LP_{01} 能量耦合到正向传输的包层模 LP_{0m} 中,第 m 阶包层模的谐振波长为

$$\lambda^m = \Lambda(n_{co} - n_{cl}^m), \quad (1)$$

其中 n_{co} 和 n_{cl}^m 分别是纤芯基模和第 m 阶包层模的模式有效折射率, Λ 为光栅周期。当光栅周期 Λ 确定时,谐振波长主要由基模和包层模的有效折射率差决定。

按常用的三层模型分析法将光纤分成纤芯、包层和外界三层,纤芯直径为 $2a$,包层直径为 $2b$ (图 5)。

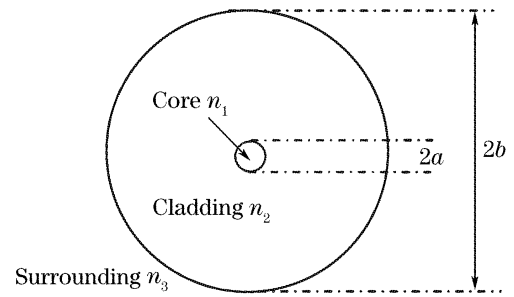


图 5 三层阶跃光纤模型

Fig. 5 Diagram of three-layer step-index fiber

由于普通通信光纤为阶跃光纤,纤芯和包层折射率均为定值,对于包层边缘写入的长周期光纤光栅,包层折射率由定值变为沿光纤轴向呈周期性变化,而纤芯和外界折射率不变,故折射率分布函数可表示为

$$n(r, z) = \begin{cases} n_1, & r \leq a \\ n_2(z), & a < r \leq b \\ n_3, & r > b \end{cases} \quad (2)$$

其中 n_1 、 n_2 、 n_3 分别为光纤纤芯、包层和外界折射率。通过对纤芯基模的色散方程和包层模色散方程的数值求解^[14],可知 $n_1 < n_{co} < n_2(z)$, $n_2(z) < n_{cl}^m < n_3$, 即 n_{co} 主要由纤芯和包层折射率共同决定: $n_{co} \approx n_{co}[n_1, n_2(z)]$, n_{cl}^m 主要由光纤包层和外界环境折射率共同决定: $n_{cl}^m \approx n_{cl}^m[n_2(z), n_3]$, 且不同区域的折射率不同。在光纤的不同包层模式中,靠近纤芯的为低阶包层模,远离纤芯的为高阶包层模。根据模式耦合理论,一般认为普通纤芯折变的长周期光纤光栅主要发生的是纤芯基模与一阶低奇次包层模在纤芯区域的耦合,而在包层边缘写入的长周期光纤光栅,其折射率变化主要发生在包层区域,二者发生模式耦合的区域不同,这两个区域的折射率也是不同的,结合相位匹配条件可知,包层边缘写入的长周期光纤光栅与普通长周期光纤光栅之间存在谐振波长差异。相对于普通长周期光纤光栅来说,包层边缘写入长周期光纤光栅的纤芯受激光作用较小,相应地纤芯残余应力释放和掺杂剂热扩散作用对光栅形成的影响较小,从而使得在相同激光能量作用下,普通长周期光纤光栅的包层和纤芯有效折射率变化大于包层边缘写入长周期光纤光栅包层和纤芯有效折射率变化,因而与普通长周期光纤光栅相比较,包层边缘写入的长周期光纤光栅在生长过程中谐振峰波长的漂移量较小。

对于谐振峰幅值而言,由于光纤中传输的纤芯基模的能量主要集中在纤芯,只有少量能量存在于包层中,由包层周期性折变引起的纤芯基模与包层模在包层区域的耦合效率远低于直接在纤芯中的耦

合,因此在相同激光能量下,普通方法写入长周期光纤光栅的谐振峰幅值大于包层边缘写入长周期光纤光栅的谐振峰幅值。要使谐振峰幅值增加,可以通过增加激光在光纤包层的扫描深度使光纤包层折变深度增加,以提高基模与一阶奇次包层模间的耦合效率,从而达到增加谐振峰幅值的目的。事实上,通过比较图 3、图 4 可以看出:在实际光栅制作过程中,激光能量相同时,激光光束扫描深度 $l=35\ \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅其谐振峰幅值大于 $l=15\ \mu\text{m}$ 的长周期光纤光栅。

同样,由于单模光纤中传输的光功率主要集中在纤芯中,当光纤折变主要发生在包层时,其功率衰减系数必然小于纤芯折变时的功率衰减,因此包层边缘写入的长周期光纤光栅应该是一种低附加损耗光纤光栅,从图 3、图 4 中可以看出,包层边缘写入的长周期光纤光栅的附加损耗均在 0.5 dB 以下,若能继续改进高频 CO₂ 激光边缘写入法的写入参量和技术,使光栅折变完全集中在光纤包层,形成真正意义上的包层折变型长周期光纤光栅,则其附加损耗将可能进一步降低。

4 折射率特性实验

当环境折射率即外界折射率 n_3 变化时,受其影响,光纤光栅包层模式有效折射率必将变化,特别是当外界环境由空气变为匹配液时, n_3 增大,包层模式有效折射率 n_{cl}^m 主要受 n_2 和 n_3 影响,所以也会随之增加,而纤芯基模的有效折射率 n_{co} 主要受 n_1 和 n_2 制约, n_3 的变化对其影响不大,与 n_{cl}^m 的变化程度相比,可以近似认为 n_{co} 无变化。因此,纤芯基模与包层模的有效折射率差 $n_{co} - n_{cl}^m$ 将减小,由(1)式可知,外界环境折射率增加会使得光栅谐振波长向短波方向漂移,其漂移灵敏度与折射率变化有直接关系,结合长周期光纤光栅相位匹配条件,可得

$$\frac{d\lambda^m}{dn_3} = \Lambda \left(\frac{dn_{co}}{dn_3} - \frac{dn_{cl}^m}{dn_3} \right) \approx -\Lambda \frac{dn_{cl}^m[n_2(z), n_3]}{dn_3}, \quad (3)$$

由(3)式可以看出,外界折射率主要影响包层模有效折射率,从而使长周期光纤光栅谐振波长发生变化。对于包层边缘写入的长周期光纤光栅来说,其折变主要发生在光纤包层, n_{cl}^m 占主要地位,与在普通长周期光纤光栅相比,更易发生纤芯基模和高阶包层模的耦合,而外界环境的变化极易对高阶包层模产生影响,因此,这种特殊折变结构的长周期光纤光栅将具有较高的环境灵敏度。

为验证包层边缘写入长周期光纤光栅的高环境

灵敏度特性,在普通长周期光纤光栅与包层边缘写入长周期光纤光栅之间进行了折射率特性对比实验。实验装置如图 6,在恒定室温下,将长周期光纤光栅穿过 V 型槽后一端固定,另一端悬挂与制作光栅时所悬挂的重物质量相同的轻质重物以保证在实验过程中光栅始终处于绷直状态。实验过程中,向 V 型槽中倒入具有不同折射率的匹配液以改变长周期光纤光栅的外界环境折射率,同时用光谱仪监测光栅谐振峰变化,实验结果如图 7。图 7 中 a、b 分别为普通长周期光纤光栅、包层边缘写入长周期光纤光栅的谐振峰波长随环境折射率变化曲线,可以看出,在 1.33~1.45 折射率变化范围内,普通长周期光纤光栅的中心波长漂移量仅为 7.8 nm,而包层边缘写入长周期光纤光栅的中心波长漂移量可达 24.2 nm,且在越靠近包层折射率的地方其漂移量越大,尤其在 1.41~1.45 折射率范围内,包层边缘写入长周期光纤光栅的谐振波长漂移量可达 15.52 nm,而相同实验条件下测得的普通长周期光纤光栅折谐振波长漂移量仅为 4.32 nm,前者灵敏度远高于后者,与分析讨论相符。

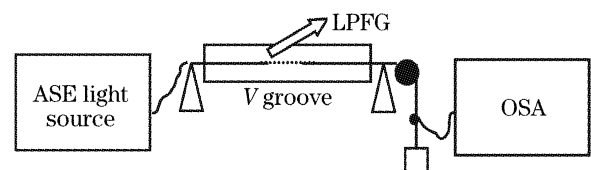


图 6 折射率实验装置

Fig. 6 Experimental setup for refractive index measurement

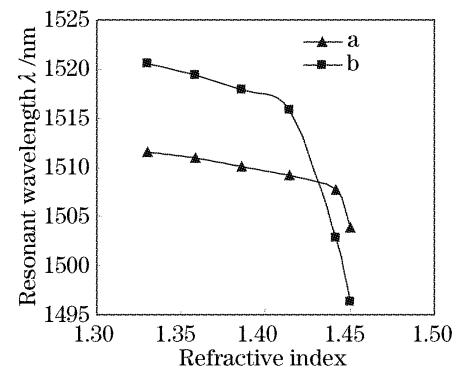


图 7 长周期光纤光栅谐振峰与折射率关系图

Fig. 7 Relationship between resonant wavelength and refractive index

5 结 论

通过精确控制高频 CO₂ 激光脉冲的能量和在光纤上的曝光位置,实现对普通通信光纤的包层曝光,成功写出了折变主要发生在光纤包层而纤芯受

激光影响较小的新型长周期光纤光栅。这种光栅是在能量集中、单个脉冲加热时间短、加热效率高的高频 CO₂ 激光脉冲曝光下形成的,成栅过程中对光纤结构的物理损伤小,光栅插入损耗低。同时,由于折变结构的特殊性,包层边缘写入长周期光纤光栅在模式耦合中更易发生纤芯基模和高阶包层模的耦合,因而具有较高的外界环境灵敏度。实验证明,与文献[15]报道的用普通方法写入的超长周期光纤光栅(ULPFG)相比较,在 1.41~1.45 折射率范围内,实验测得其谐振波长漂移量增加了 5.92 nm,若将这种包层边缘写入光栅的方法用于制作超长周期光纤光栅,则可利用超长周期光纤光栅不同阶次谐振峰具有不同温度灵敏度的特性,以实现折射率测量的温度补偿,从而可望用于制作高灵敏度的温度补偿型折射率传感器。此外,对于包层边缘写入的长周期光纤光栅是用高频 CO₂ 激光脉冲在光纤包层边缘单侧曝光,就光纤横截面而言,是一种非对称的写入方式,若在此基础上改进,控制激光同时在光纤包层多侧曝光,使光纤横截面呈对称折变将可能降低光栅偏振相关损耗,使光栅能在光纤通信领域中得到适当的应用。

参 考 文 献

- 1 A. M. Vengsarkar, P. J. Lemaire, J. B. Judkins *et al.*. Long period fiber gratings as band rejection filters[J]. *J. Lightwave Technology*, 1996, **14**(1): 58~65
- 2 Y. J. Rao, T. Zhu, Z. L. Ran *et al.*. Novel long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses and applications in optical fiber communication[J]. *Opt. Commun.*, 2004, (1): 209~221
- 3 Li Bin, Wei Huai, Jian Shuisheng. Dynamic gain flattening filters based on long-period grating[J]. *J. Opto Electronics • Laser*, 2006, **17**(3): 274~279 (in Chinese)
李 彬,魏 淮,简水生. 基于长周期光纤光栅的动态增益平坦滤波器[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(3): 274~279
- 4 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 (in Chinese)
徐艳平,顾铮先,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
- 5 Zhan Yage, Cai Haiwen, Xiang Shiqin *et al.*. Study on high resolution fiber Bragg grating temperature sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(1): 83~86 (in Chinese)
詹亚歌,蔡海文,向世清等. 高分辨率光纤光栅温度传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(1): 83~86
- 6 Qian Jingren, Liang Ming, Sun Jian. Optical fiber Bragg grating load sensing with high primary resolution[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(7): 961~964 (in Chinese)
钱景仁,梁 明,孙 箭. 高初始分辨率的光纤光栅横向负载传感[J]. *中国激光*, 2005, **32**(7): 961~964
- 7 H. Kawano, H. Muentz, Y. Sato *et al.*. Reduction of transmission spectrum shift of long-period fiber gratings by a UV-preexposure method [J]. *J. Lightwave Technology*, 2001, **19**(8): 1221~1228
- 8 T. Enomoto, M. Shigehara, S. Ishikawa *et al.*. Long-period fiber grating in a pure-silica-core fiber written by residual stress relaxation[J]. *OFC '98 Technical Digest*, 1998. 277~278
- 9 C. Y. Lin, L. A. Wang. Loss-tunable long period fibre grating made from etched corrugation structure [J]. *Electron. Lett.*, 1999, **35**(21): 1872~1873
- 10 E. Wu, R. C. Yang, K. C. San *et al.*. A highly efficient thermally controlled loss-tunable long-period fiber grating on corrugated metal substrate[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(3): 612~614
- 11 Lijun Li, Lei Sun, Wande Fan *et al.*. A strain-induced birefringent double-clad fiber Bragg grating [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2005, **3**(7): 383~385
- 12 Y. J. Rao, Y. P. Wang, Z. L. Ran *et al.*. Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high-frequency CO₂ laser pulses[J]. *J. Lightwave Technol.*, 2003, **21**(5): 1320~1327
- 13 Wang Yiping, Rao Yunjiang. A technique fabricating long period fiber gratings by high-frequency CO₂ laser pluses [J]. *Acta Electronica Sinica*, 2004, **32**(8): 1322~1325 (in Chinese)
王义平,饶云江. 高频 CO₂ 激光脉冲写入长周期光纤光栅的方法 [J]. *电子学报*, 2004, **32**(8): 1322~1325
- 14 N. Chen, B. F. Yun, Y. P. Cui. Cladding index modulated fiber grating[J]. *Opt. Commun.*, 2006, **259**: 587~591
- 15 T. Zhu, Y. J. Rao, Q. J. Mo. Simultaneous measurement of refractive index and temperature using a single ultralong-period fiber grating[J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2005, **17**(12): 2700~2702