

文章编号: 1001-3806(2004)05-0506-04

传感用光纤光栅写入技术的研究和发展

张向东¹, 李育林¹, 王卫平¹, 洪新华¹, 彭文达², 武翠琴³

(1. 中国科学院 西安光学精密机械研究所, 西安 710068; 2. 深圳大学 光电子学研究所, 深圳 518060; 3. 第二炮兵工程学院, 西安 710025)

摘要: 为克服目前传感应用领域借用传感性能并不优异的通信用光纤光栅的不足, 在总结传感用光纤光栅制作技术的特点和要求基础上, 对近年来传感用光纤光栅的制作技术进行了系统回顾, 具体分析了耐高温、高机械强度、增敏/去敏等常见传感用布喇格光纤光栅的写入技术以及紫外曝光、机械变形、红外激光逐点写入等传感用长周期光纤光栅的制作方法, 最后对传感用光纤光栅制作技术的发展方向进行了预测。

关键词: 光纤光栅; 布喇格光纤光栅; 长周期光纤光栅; 制作技术; 传感器

中图分类号: TN253 **文献标识码:** A

Recent research and development of fiber-optic grating writing technologies for sensing applications

ZHANG Xiang-dong¹, LI Yu-lin¹, WANG Wei-ping¹, HONG Xin-hua¹, PENG Wen-da², WU Cui-qin³

(1. Xi'an Institute of Optics and Precision Mechanics, the Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710068, China; 2. Opto-Electronics Institute, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. the Second Artillery Engineering Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: To overcome the adverse circumstance of the fiber-optic gratings designed for communication used in sensing applications, based on the summarization of the general demands and characteristics of the sensing fiber-optic gratings, the writing technologies on several sensing fiber Bragg gratings such as those with good resistance property of high temperature, excellent enhancing/weakening sensitivity and high mechanical strength are described concretely. Then the UV-exposing, mechanical-distorting and IR-laser point-by-point inscribing methods for sensing long period fiber gratings are presented respectively. At last the trend of writing technologies for the sensing fiber-optic gratings is forecasted.

Key words: fiber-optic grating (FOG); fiber Bragg grating; long period fiber grating; writing technology; sensor

引 言

自 1979 年光纤光栅 (FOG) 问世以来, 尤其是 1989 年侧面干涉写入技术和 1991 年相位掩模写入技术发明后, FOG 在通信和传感两大领域得到了大量应用^[1~3]。同光纤通信应用相比, 传感用 FOG 由于被测参量类型多, 使用环境恶劣, 写入技术具有难于规范、统一的突出特点, 加上需要高成本、 μm (10^{-12}m) 量级的波长解调系统相配合, 对传感用 FOG 制作技术的研究和投入远远落后于通信用

FOG, 导致在大量的传感应用现场, 人们不得不借用传感性能并不优异的通信用 FOG 来测量, 测量效果不够理想。本文中首先总结出了传感用 FOG 的特点和要求, 然后以耐高温、高机械强度、增敏和去敏传感用 FOG 为例, 系统阐述了近年来传感用 FOG 制作技术的发展概况, 最后对传感用 FOG 制作技术的发展方向进行了预测, 旨在引起科研、工程人员的重视, 促进 FOG 在传感领域的发展。

1 传感用 FOG 的特点和制作要求

虽然传感用 FOG 按是否具有周期性, 也分为周期性和非周期性 (又称啁啾) 光纤光栅 (CFG) 两大类, 周期性 FOG 包括短周期 (又称布喇格) 光纤光栅 (FBG) 和长周期光纤光栅 (LPG) 两种类型; 按光纤光栅的成栅机理, 传感用 FOG (主要指 FBG) 也可分

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60177028)

作者简介: 张向东 (1971-), 男, 博士研究生, 主要从事光纤光栅传感与微光学方面的研究。

E-mail: zhangxiangdong202@hotmail.com

收稿日期: 2003-10-21; 收到修改稿日期: 2003-12-09

为 I 型、II 型、IA 型和 IIA 型 4 类^[4],但被测参量类型多、使用环境恶劣的传感应用环境,要求传感用 FOG 具有不同于通信用 FOG 的光学和机械特性,与之相对应的制作技术和要求也区别于通信应用,具体分析在峰值反射率 R_B 、中心波长 λ_B 的范围和准确性等光谱特性和温度、应力、腐蚀等环境适应性方面具有如下特点。

1.1 对光敏性和中心波长的精确度要求较低、但对中心波长选择范围和谱宽要求高

光纤光栅波长编码特性,降低了传感系统对能量的要求,传感用 FOG 无须追求过高的反射率(或透射率),尤其是在 TDM 分布式测量系统中,为避免各 FOG 反射信号相互间的串绕,10%~30%左右的反射率即可满足要求^[2]。低的反射率要求,还有助于采用超短长度的 FOG,以获得高的空间测量分辨率。传感用 FOG 希望得到高的中心波长位移灵敏度,对中心波长可以通过标定方法加于修正。

为提高测量精度,传感用 FBG 的中心波长选择范围往往超出 3 个常用的通信窗口,以降低灵敏度矩阵元测量误差的影响;对谱宽的要求从理论上是越小越好,考虑实际的解调系统精度和制作工艺,反射带宽一般位于 0.05nm~0.3nm 范围内。

1.2 光谱信号简单,易于处理

为便于后续电路的处理,传感用 FOG 往往要求简单的光谱输出,尤其是在多个 FOG 复用的传感网络中更为重要,因此,具有单一反射峰值的 FBG 应用最多,LPG 其次,CFG 最少,而在光通信领域,CFG 由于好的色散波长作用,用得较多。

1.3 对被测参量敏感,对其它干扰量去敏

为克服被测量和干扰量之间的交叉敏感问题,传感用 FOG 要求有好的增敏和去敏措施,为此往往需要研究双重曝光 FOG、一次和高次衍射 FOG 的制作技术以及在高双折射光纤上刻写 FOG 技术等^[5]。

1.4 对环境承受能力要求较高

恶劣的工作环境,比如 300℃~700℃甚至 1000℃高温,-170℃的液氮、液氦超低温,100MPa~120MPa 的高压以及酸、碱、盐等腐蚀性物质,是传感用 FOG 经常面临的问题^[6~8],在敏化光纤上制作的通信用 FOG 显然无法满足这一要求,研究耐高温(或低温)、耐高压、防腐蚀的传感用 FOG 写入技术迫在眉睫。

2 几种常见传感用 FBG 写入技术

2.1 耐高温 FBG

通信用 FBG 多为采用载氢敏化处理光纤刻制的 I 型 FOG,只能用于 300℃以下的测量环境。在非载氢敏化光纤上,采用能量大于 0.7J/cm² 的单一 UV 光脉冲制作出的 II 型、IIA 型 FOG,由于物理损伤的写入机理,具有更好的温度稳定性,更适合于高温领域的传感应用^[4]。1997 年,俄罗斯科学院的 DIANOV 等人研究了掺氮非含锗光纤中的 FBG 写入技术,发现具有负折射率变化系数 IIA 型光纤光栅可用于 600℃以下的温度测量,加上具有比掺锗光纤更好的耐 γ 射线辐射特性,非常适合于核电站等辐射环境的温度、应力测量^[9]。2002 年,该单位的 BU TOV 等人在由表面等离子体 (SPCVD) 技术制作的掺 N 硅光纤上,利用 193nm 的光脉冲写出的 IIA 型 FBG,可在 900℃高温下长期工作^[10]。1996 年,瑞典 Acreo 的 FOKINE 发现在 F/Ge 共掺载氢单模光纤上,利用 UV 光束照射相位掩模板所形成的周期性干涉光场去激发芯区氟和羟基发生化学反应,导致被曝光区域的氟含量周期降低和折射率的周期升高,一种新的化学组分光纤光栅 (CCG) 问世^[11],该型光纤光栅化学组分调制的机理赋予其耐高温的独特特性,在随后的研究中,FOKINE 发现 CCG 是目前唯一能胜任 1000℃高温测量领域的传感用光纤光栅^[12]。

2.2 高强度 FBG——直接写入技术

采用去除被覆层——UV 写入——重新涂覆的传统工艺制作出的 FOG,由于物理接触、化学(主要是空气中的水分子)腐蚀等因素,光纤表面的微裂纹会扩大,其强度往往只有原始光纤的 35%左右,光纤光栅写入段就成为最易断裂的区域,影响了 FOG 传感系统的推广和应用。

1995 年,日本三菱公司的 NAKAI 等人以透过紫外线的特殊丙烯酸脂材料为包层,研究了 250nm 波段紫外光的直接写入技术,新加坡理工大学的 LAO 课题组也开展了采用特殊被覆材料实现紫外熔融、刻写、冷却涂覆的直接写入技术研究。

1997 年,俄罗斯科学院的 STARODUBOV 等人发现采用 334nm UV 光可实现透过普通光纤的丙烯酸脂被覆层,直接在纤芯中写入光纤光栅^[13],不仅简化了制作工艺,而且由于无须去除被覆层,不会对光纤产生物理、化学损伤,保证了写出的光纤光栅具有和原始光纤同样的强度,利用该专利技术,美国的 Sebaus 公司成功地将 FBG 传感器用到油气井中的温度、压力测量系统中,在 0~120MPa,-25℃

~250℃的测量范围内实现了精度为0.1MPa和0.1℃,且其设计和使用寿命可达10年之久,受到了石油工程师的青睐。

1998年,澳大利亚Macquarie大学激光应用中心的PADDISON等人采用Ba₂B₂O₄晶体倍频铜蒸气激光器技术所输出的高功率的289nm和255.3nm UV光脉冲实现了光纤被覆层光去除和芯区写入技术制作出光纤光栅^[14],由于光去除被覆层的无接触特性,同样保证了光纤光栅的强度特性,此外,高的输出激光功率,写入时间缩短为334nm UV光写入时间的1/10左右,FBG制作效率和成品率大大提高。

2.3 去敏和增敏用FBG

在温度、应变以及压力、流量、振动、加速度等可转化为应变的其它参量的多参量或单参量测量现场,往往需要采取有效的措施去对被测量进行增敏和对干扰量进行去敏,即解决被测量之间以及被测量和其它干扰量之间的交叉敏感问题,此外,为克服通信用光纤光栅传感器对温度、压力参量波长响应灵敏度低的不足,开展在保偏光纤、聚合物光纤等特种光纤上刻写传感用光纤光栅的研究也很有必要。

美国Blue road公司的UDD等人在高双折射光纤上刻写出的双周期FBG^[15],实现了在同一光纤上x, y, z 3个自由度的应力测量,与传统的应变花测量方案相比,结构更加简单,已经用于机场、高速公路、大坝等民用工程结构以及航天飞机、火箭等军用领域的应力测量和健康监测中;与此相类似,Schumbeger的SCHROEDER等人利用包层中带双孔的高双折射光纤上刻写的FBG来测量油气井中油气水等多相流体的静压力^[16,16],不仅成功解决了压力和温度的交叉敏感性问题,而且使其压力灵敏度提高了1.7倍;利用聚合物光纤杨氏模量低于硅基光纤、热光系数为负且绝对值高于硅基光纤的特性,香港理工大学的LIU等人在其上刻写出了FBG^[17],其应变灵敏度达到1.7pm/με,比硅基FBG提高了1.5倍,其温度灵敏度达到152pm/℃,比硅基FBG提高了10倍多,有望在民用结构、肿瘤热疗等领域得到推广,同正温度系数的石英光纤光栅配合,可用于需要应力和温度同时区分测量的传感系统中。

此外,利用同一光纤中刻写的不同类型FBG(I型、II型、IA型、IIA型)以及不同掺杂光纤(Ge, Ge/B)的同一类型FBG之间相近的应变灵敏度系数和不同的温度灵敏度系数,同样可解决温度

和应变之间的交叉敏感性,且获得好的测量精度。

3 传感用LPG写入技术

与FBG相比,LPG具有更加灵活的写入方法,传感用LPG的制作难度相对于FBG要小。除振幅掩模技术外,先后发展了微透镜阵列技术、刻槽法、可调电极放电法、CO₂激光逐点等写入技术。

3.1 UV曝光写入法

振幅掩模技术和微透镜阵列技术都是基于UV光子和芯区的Ge⁺相互作用引起折射率变化写入机理而工作的,微透镜阵列技术是为克服振幅掩模技术中掩模板对光能的限制而发明的,两者仍然存在载氢敏化LPG高温稳定性差的不足。对于UV曝光写入技术,主要是探索高写入效率的新波段激光器,2001年,加拿大多伦多大学的CHEN等人以157nm的F₂激光脉冲为写入光^[18],在非载氢预处理的SMF-28通信光纤上采用振幅掩模技术制作出温度特性稳定的传感用LPG;新加坡南洋理工大学的TANG等人利用三倍频后的NdYAG激光器输出的355nmUV脉冲光束透过被覆层直接写入LPG^[19],保证了传感用LPG具有足够的机械强度。

3.2 机械变形法

刻槽法、可调电极放电法、齿板加压法等可归结为机械变形法^[3],它们是利用在包层刻槽、电弧放电微弯、齿板加压微弯所导致的芯区局部应力释放所导致的折射率周期调制而工作的,适合于在非敏化光纤中高温传感用LPG的写入。

3.3 红外激光逐点写入法

红外激光逐点写入法包括CO₂激光脉冲写入法和红外飞秒脉冲写入法等。1998年,美国贝尔实验室的DAVIS等人采用10.6μm的低能量CO₂激光脉冲^[20],在两端加拉应力的普通单模光纤上制作出了耐高温的LPG;2000年,Fujikura公司的YAMASAKI等人采用同一波段的功率为9W的重复激光脉冲^[21],在纯硅芯特种光纤中写出了温度和应力稳定性都很优异的LPG;韩国青洲科技大学的HAN等人根据GeO₂、B₂O₃热光系数相对于SiO₂热光系数具有正负号相反的性质,采用CO₂激光,在不同掺杂比例的光纤中制作出了温度灵敏度系数调节范围为-0.14nm/℃~0.28nm/℃的传感用LPG^[22],很好地解决了LPG温度和应力的交叉敏感性问题;最近,重庆大学的王义平等利用10.6μm高频CO₂激光脉冲写入的LPG对弯曲、扭曲、

横向载荷等参量的方向相关性^[23],解决了弯曲和其它参量之间的交叉敏感问题,实现了温度和横向载荷的单 LPG 的同时测量。

1999 年,日本京都大学的 KONDO 等人利用波长为 800nm、脉宽为 120fs 的高频光脉冲在非敏化光纤上写入的 LPG^[24],同样具有优良的高温稳定性;西安光机所也正在开展这项研究工作。

光子晶体光纤由于具有“光子带隙”、“无限的单模输出”等独特性质,正在成为研究的热点,英国 Bath 大学的 KAKARANTZAS 等人利用高能量的 CO₂ 激光脉冲,周期性地烧蚀光子晶体光纤 (POF) 芯区的中心孔,形成纯结构性 LPG^[25],基于 POF 的纯结构性 LPG 具有耐高温性能稳定的特性,有望在高温传感领域得到应用。

4 发展趋势和结论

传感用 FOG 制作技术在写入波段上,将突破目前的 157nm~355nm UV 波段,及 LPG 写入中的 800nm,1060nm 的近红外等波段,向更宽光谱波段发展,写入激光器的选择将更加灵活;在写入介质上,将从目前的敏化石英光纤、聚合物光纤向非敏化光折变材料及光子晶体等介质发展;在写入方法上,除继续完善主流的 FBG 相位掩模技术、LPG 的振幅掩模技术外,微透镜阵列技术、刻槽法、可调电极放电法、CO₂ 激光逐点写入法等非主流技术将得到发展,尤其是 CO₂ 激光逐点写入技术更值得引起重视和发展;在写入机理上,除传统的 Ge-O 色心机理外,传感用 FOB 更多地涉及到应力释放机理和局部致密化机理,光纤光敏性机理的探索工作将更加深入。

总之,传感用 FOG 的写入技术虽取得了不少成绩,但离满足 FOG 现实和潜在的巨大传感市场所需的低制作成本、高质量、好的重复性和灵活性等要求还相差甚远,有待人们进行更深入的研究,相信在不远的将来,其制作技术会逐步成熟起来,光纤光栅传感系统也会由于性能提高和价格降低等因素得到推广和普及。

参 考 文 献

- [1] MELTZ G. Overview of fiber grating-based sensors [J]. SPIE, 1996, 2838: 2~22.
- [2] KERSAY A D, DAVIS M A, PATRIK H J *et al.* Fiber grating sensors [J]. J Lightwave Technol, 1997, 15(8): 1440~1463.
- [3] JAMES S W, TATAM R P. Optical fiber long-period grating sensors: characteristics and application [J]. Meas Sci Technol, 2003, 14: 49~61.
- [4] SHU X W, LIU Y. Dependence of temperature and strain coefficients on fiber grating type and its application to simultaneous temperature and strain measurement [J]. Opt Lett, 2002, 27(9): 701~703.
- [5] ZHANG S L, LEE S B, XIE F. In-fiber grating sensors [J]. Optics Laser Engineering, 1999, 32: 405~418.
- [6] SCHROEDER R J, YAMATE T, UDD E. High temperature and pressure sensing for the oil industry using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber [J]. SPIE, 1999, 3745: 42~48.
- [7] LEE Y W, LEE B. High resolution cryogenic optical fiber sensor system using erbium-doped fiber [J]. Sensors and Actuators, 2002, A96: 25~27.
- [8] UDD E, SCHULZ W L, SEIM J *et al.* Fiber optic distributed sensing systems for harsh aerospace environments [J]. SPIE, 1999, 3674: 136~147.
- [9] DIANOV E M, GOLANT K M. Grating formation in a germanium free silicon oxynitride fiber [J]. Opt Lett, 1997, 33(3): 236~339.
- [10] BUTOV O V, GOLANT K M. Ultra-thermo-resistant Bragg gratings written in nitrogen-doped silica fibers [J]. Electron Lett, 2002, 38(11): 523~525.
- [11] FORKINE M. High temperature resistant Bragg gratings fabricated in silica optical fibers [A]. Australian Conference on Optical Fiber Technology [C]. Queensland: Proc ACOFT96, 1996. 1325~1330.
- [12] FORKINE M. Formation of thermally stable chemical composition gratings in optical fiber [J]. J O S A, 2002, B19(8): 1759~1765.
- [13] STARODUBOV D S, GRUBSKY V, FEINBERG J. Bragg grating fabrication in germanosilicate fibers by use of near-UV light: a new pathway for refractive-index changes [J]. Opt Lett, 1997, 22(14): 1086~1088.
- [14] PADDISON C J. Multiple fiber gratings fabricated using frequency doubled copper vapour lasers [J]. Electron Lett, 1998, 34(25): 2407~2408.
- [15] UDD E, LAWRENCE C M. Development of a three-axis strain and temperature fiber optic grating sensor [J]. SPIE, 1997, 3042: 229~237.
- [16] SCHROEDER R J, ROMAS R T, YAMATE T. Fiber optic sensors for oilfield services [J]. SPIE, 1999, 3860: 12~22.
- [17] LIU H Y. Observation of type I and type II gratings behavior in polymer optical fiber [J]. Opt Commun, 2003, 220: 337~343.
- [18] CHEN K V, HERMAN P R. Fabrication of strong long-period gratings in hydrogen-free fibers with 157nm F₂-laser radiation [J]. Opt Lett, 2001, 26(11): 771~773.
- [19] TANG D Y, SHEN D Y, BLOWS J *et al.* Strong fiber gratings written with a frequency tripled Nd:YAG laser [J]. SPIE, 2001, 4579: 227~236.
- [20] DAVIS D D, GAYLORD T K, GLYTSIS E N *et al.* Long-period fibre grating fabrication with focused CO₂ laser pulses [J]. Electron Lett, 1998, 34: 302~303.
- [21] YAMASAKI S. Characteristics of long-period fiber grating utilizing periodic stress relaxation [J]. IEICE Trans Electron, 2000, E83-C: 440~443.
- [22] HAN V G, LEE S B. Simultaneous measurement of temperature and strain using dual long-period fiber gratings with controlled temperature and strain sensitivities [J]. Opt Exp, 2003, 11(5): 476~481.

(下转第 520 页)

内的散射强度,然后对接收到的散射光进行放大。

在不透明材料中,由于高光学吸收,散射截面限制在垂直于样品表面,即后向散射。该效应可用波矢转换进行计算, $\mathbf{K} = \mathbf{K}_{in} - \mathbf{K}_s$, \mathbf{K} 是转换波矢也即声学波矢, \mathbf{K}_{in} , \mathbf{K}_s 分别是入、散射光的波矢。而 \mathbf{K} 在不透明材料中是复数,即 $\mathbf{K} = \mathbf{k}_r - i\mathbf{k}_i$ 。则散射矢 \mathbf{G} 中的积分 I_v 可写成如下形式^[41]:

$$I_v = \int_{u_{in}} \exp[-i(\mathbf{k}_r - i\mathbf{k}_i) \cdot \mathbf{r}] dV \quad (5)$$

式中, I_v 表示散射矢 \mathbf{G} 在整个散射体积中的积分, u_{in} 表示材料对入射波矢的应变, \mathbf{r} 为径向矢量, V 为材料表面附近的散射空间。式中的 \mathbf{k}_r 和 \mathbf{k}_i 分别是转换波矢 \mathbf{K} 的实、虚部。在简单的配置中,由于散射截面被限制在垂直于散射体的表面,所以 \mathbf{K} 垂直于表面,即 $\mathbf{K} = k \cdot \mathbf{z}$ 。因此,(5)式可写为:

$$I_v = \frac{i}{2} e_{in} q_z \delta_{q_x,0} \delta_{q_y,0} L_x L_y \times \int_0^\infty \exp[i(q_z - k_r) \cdot z - k_i \cdot z] \cdot dz = \frac{i}{2} e_{in} q_z L_x L_y \delta_{q_x,0} \delta_{q_y,0} \frac{1}{i(q_z - k_{z,r}) - k_{z,i}} \quad (6)$$

式中, e_{in} 表示入射光子位移量, $\delta_{q_x,0}$, $\delta_{q_y,0}$ 表示初始位置声子波矢的增量, L_x , L_y 分别表示散射截面的长和宽, q_z 表示声子在 z 方向的波矢分量。由此可得单位立体角散射功率为:

$$\frac{dP}{d\Omega} \approx \frac{1}{(q - k_r)^2 + k_i^2} \approx \frac{1}{(q/k_0 - 2n_i)^2 + (2n_i)^2} \quad (7)$$

式中, q 表示声子的波矢, k_0 表示声子波矢的最大值。对于背向光散射,当发射激光功率为1W时,散射中心频移处的最大立体角散射功率可表示为:

$$\left(\frac{dP}{d\Omega} \right)_{\max} = \frac{1}{4n_i^2} \quad (8)$$

上式表明,最大立体角散射功率只和材料对某波长的光的复折射率的虚部 n_i 有关。对材料进行数值模拟,当波长为 $0.532\mu\text{m}$ 的激光,Al和 Al_2O_3 的最大立体角散射功率分别为 0.012625W , 0.0807103W 。对于隐身目标,最大立体角散射功率为相应的隐身材料和金属涂层的乘积。对涂Al的隐身材料,最大立体角散射功率为 0.008954W ;对于涂 Al_2O_3 的隐身材料,最大立体角散射功率为 0.057241W 。而量子放大器的放大倍数为 10^4 倍~ 10^6 倍^[31],所以,能对接收到的光进行足够的放大,再采用高分辨率的滤光探测装置测量背向散射光从而达到探测空间目标的目的。

3 结论

不同构成成分的隐身材料,它们的介电常数和磁导率显然不同。通过模拟计算一些单质金属在大气背景下的布里渊散射光波,得出大气背景和目标的频移大小相差至少大于一个数量级。这种使用调频的探测方式比调幅的方式更准确,所需的功率更小,表明用 $0.532\mu\text{m}$ 的激光可以比微波更准确地探测空间目标。和应用微波探测空间目标相比,应用布里渊散射探测空间目标具有很多优点,比如精确度高、抗干扰能力强,以及体积小、重量轻、便于机载和星载等。所以,采用布里渊散射探测空间目标不但可行,还更精确、更方便。

参考文献

- [1] 王连亮,任刚,张彬 *et al.* 大气布里渊散射特性研究[J]. 激光技术,2003,27(4):365~367.
- [2] WEBER MJ. Optical materials [M]. Florida: CRC Press, 1986. 137,304.
- [3] 华欣生. 介绍一种“全天候”的激光雷达[A]. 第四届四川省光电技术学术交流会论文集[C]. 绵阳:中国工程物理研究院, 2002. 145.
- [4] CARDONA M, GUNTHERODT G. Light scattering in solids [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1982. 187.
- [24] KONDO K, NOUCHI K, MISTUYU T *et al.* Fabrication of long-period fiber gratings by focused irradiation of infrared femtosecond laser pulses [J]. Opt Lett, 1999,24(10):646~648.
- [25] KA KARANTZAS G, BIRKSTA, RUSSEL PS. Structural long-period gratings in photonic crystal fibers [J]. Opt Lett, 2002, 27(12):1013~1015.

(上接第509页)

- [23] RAO YJ, WANG YP, RAN ZL *et al.* Novel fiber-optic sensors based on long-period fiber gratings written by high frequency CO₂ laser pulse [J]. J Lightwave Technol, 2003, 21(5):1320~1327.