

文章编号: 0258-7025(2009)02-0398-05

基于光纤光栅差分群时延的 磁感应强度测量新方法

彭 晖 苏 洋 李玉权

(解放军理工大学通信工程学院, 江苏 南京 210007)

摘要 提出了一种利用光纤光栅中法拉第效应和测量差分群时延(DGD)的直接测量磁感应强度的新方法,给出了理论分析和实验结果。当有外加磁感应强度时,光纤光栅中的法拉第效应致使两个圆偏振光的传播常数改变,从而导致光纤光栅的群时延发生改变。仿真结果表明,外加磁感应强度与 DGD 峰值在一定的测量范围内存在线性关系。分析了光纤光栅对测量性能的影响。实验结果表明,测量磁感应强度的灵敏度为 1.3 ps/T,利用现有精度为 10^{-5} ps 的光矢量分析仪得到最小可测磁感应强度为 10^{-5} T,实验与理论吻合较好,证明了该方案的可行性。

关键词 光纤光学;光纤光栅;磁感应强度测量;法拉第效应;差分群时延

中图分类号 TP212.14 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20093602.0398

New Measurement for Electromagnetic with the Differential Group Delay of Fiber Grating

Peng Hui Su Yang Li Yuquan

(Institute of Communications Engineering, PLA University of Science & Technology, Nanjing, Jiangsu 210007, China)

Abstract A new magnetic field measurement based on the Faraday effect and the measurement of differential group delay (DGD) in fiber grating was proposed. When the magnetic field was applied, the propagation constants of the two circularly polarized light in fiber grating were changed by the Faraday effect, then insulating in the change of the DGD of fiber grating. The simulations showed the linear relationship between the peak value of DGD and magnetic field in certain range. The influences of fiber grating on the measurement performance were analyzed. The measurement sensitivity was 1.3 ps/T and the smallest magnetic induction is 10^{-5} T using the optical vector analyzer with precision of 10^{-5} ps. The experimental results agree well with the theoretical analysis.

Key words fiber optics; fiber grating; magnetic field measurement; Faraday effect; differential group delay

1 引 言

光纤光栅是对外界条件如应力、温度等都很敏感的器件。将光纤光栅用作磁感应强度传感器受到人们的广泛关注^[1~4]。在光纤光栅磁感应强度测量中,最常见的方法是利用外界物质在光纤光栅外涂上磁致伸缩材料或者将光纤光栅嵌入磁致伸缩材料中形成磁感应强度传感头,通过磁力效应对光纤光栅形成外应力,基于光纤光栅对外应力的敏感性,达

到磁感应强度探测目的。在测量较弱的磁感应强度或传感材料的磁致伸缩较小时,可采用增敏措施来提高磁感应强度灵敏度。王黎蒙等^[1]分析了镍和铽两种强磁体条件下的磁致伸缩量、外磁感应强度、布拉格波长位移量和中心波长四个参数之间的相互关系。但利用磁致伸缩材料的缺点是,磁致伸缩作为机械效应,其高频响应必然较差。A. D. Kersey 等^[4]利用光纤光栅中的磁致双折射效应,提出了一

收稿日期:2008-03-17;收到修改稿日期:2008-05-21

基金项目:国家自然科学基金(60871075)资助项目。

作者简介:彭 晖(1979-),男,湖南人,博士研究生,主要从事光传感方面的研究。

E-mail:; maomaopenghui99@tom.com

导师简介:李玉权(1944-),男,四川人,教授,博士生导师,主要从事电磁感应强度与微波技术、光信息技术方面的研究。

E-mail: proflyq@126.com

种直接测量磁感应强度的方法,其基本原理是,在外加磁感应强度作用下,光纤光栅中的左旋和右旋圆偏振光的布拉格反射波长发生漂移,只需测出此漂移量即可直接确定磁感应强度的大小。但由于石英材料的韦尔代(Verdet)常数很小,磁感应强度导致的反射谱分裂很小,目前最普遍的光谱分析仪的精度约 50 pm,检测比较困难。A. D. Kersey 采用非平衡马赫-曾德尔(M-Z)光纤的检测方法测量磁感应强度的大小,因此这种方法不利于测量弱磁感应强度。本文提出了一种利用光纤光栅中左旋和右旋圆偏振光的群时延差与外加磁感应强度之间的关系来测量磁感应强度的新方法,该方法能够简单直接地测量磁感应强度,实验验证了这一方法的有效性。

2 测量原理

2.1 法拉第效应

根据菲涅耳理论,一束线偏振光可以分解为两束频率相同、振幅相等、旋转方向相反的圆偏振光。通过某些材料传输时,在磁感应强度作用下会发生法拉第效应,线偏振光的偏振面将发生旋转,旋转角度为^[5]

$$\varphi = (n_L - n_R) \frac{\pi l}{\lambda}, \quad (1)$$

式中 n_L, n_R 分别为左旋偏振光和右旋偏振光的有效折射率, λ 为入射光波长, l 为偏振光所经历的长度。

由法拉第效应可知,

$$\varphi = VIB, \quad (2)$$

式中, V 反映了磁感应强度对物质旋光作用影响的程度,称为 Verdet 常数, B 为磁感应强度。石英光纤在 1300 nm 波长附近的 Verdet 常数大约为 0.8 rad/(T·m)。

由(1),(2)式可得由磁感应强度引起的光纤左旋和右旋圆偏振光折射率之差为

$$n_L - n_R = \frac{VB\lambda}{\pi}. \quad (3)$$

2.2 待测磁感应强度导致的光纤布拉格光栅差分群时延

对于光纤布拉格光栅(FBG),其群时延为^[6~9]

$$\tau = \frac{n_{\text{eff}}}{c} \frac{\frac{\kappa^2}{\alpha\sigma^2} \sinh(\alpha L) \cosh(\alpha L) - L}{\frac{\kappa^2}{\sigma^2} \cosh^2(\alpha L) - 1}, \quad (4)$$

式中 n_{eff} 为有效折射率, κ 为交流耦合系数, σ 为直流耦合系数, $\alpha = \sqrt{\kappa^2 - \sigma^2}$, L 为光栅长度。假设光纤是理想正圆的,其 x, y 轴的折射率是相同的,不存在线双折射,即 $\tau_x = \tau_y$ 。线偏振光可以分解为同频、同幅、旋向相反的圆偏振光。在外加磁感应强度作用下,由于法拉第效应,左旋和右旋圆偏振光在光栅中的传播常数会有一定的差异,于是将左旋和右旋圆偏振光的群时延分别记为 τ_L 和 τ_R 。定义左旋和右旋圆偏振光之间的差分群时延(DGD)则为它们之间的群时延差,即

$$\Delta\tau = |\tau_L - \tau_R| = \left| \frac{n_L}{c} \frac{\frac{\kappa^2}{\alpha_L\sigma_L^2} \sinh(\alpha_L L) \cosh(\alpha_L L) - L}{\frac{\kappa^2}{\sigma_L^2} \cosh^2(\alpha_L L) - 1} - \frac{n_R}{c} \frac{\frac{\kappa^2}{\alpha_R\sigma_R^2} \sinh(\alpha_R L) \cosh(\alpha_R L) - L}{\frac{\kappa^2}{\sigma_R^2} \cosh^2(\alpha_R L) - 1} \right| \quad (5)$$

式中 $\kappa = \pi\nu\delta_n/\lambda, \sigma = 2\pi n_{\text{eff}}\left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B}\right) + \frac{2\pi}{\lambda}\delta_n$, ν 为折射率变化的条纹可见度,一般为常数,本文取 1, δ_n 为折射率调制系数, λ_B 为布拉格波长。由(5)式可见 $\Delta\tau$ 是波长的函数,在相同波长上,由于外加磁感应强度的改变, n_{eff} 将会改变, σ 也会随之变化,从而使左旋和右旋圆偏振光之间的差分群时延发生改变。

根据(5)式可得到 DGD 与波长的关系,如图 1 所示,可见在透射谱主阻带内有最大 DGD 值。

在 $\frac{\sigma^2}{\kappa^2} \gg 1$ 的条件下,对于给定波长,差分群时延差可以近似简化为

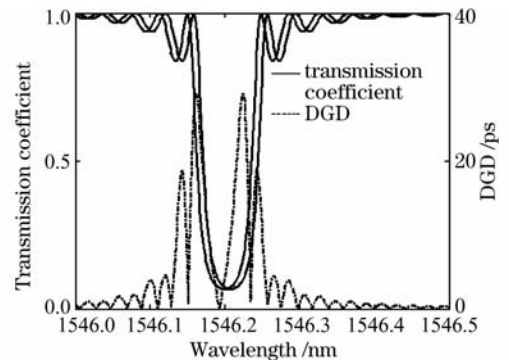


图 1 左旋和右旋圆偏振光的透射系数与 DGD
Fig. 1 Transmission coefficients (for two modes) and DGD evolution with wavelength

$$\Delta \tau = B \frac{6n_{\text{eff}}^2 V \Lambda}{c \lambda_B \sigma_L \sigma_R} \quad (6)$$

式中, c 为真空中光速, Λ 为光栅周期。在测量的磁感应强度动态范围内, σ_L, σ_R 可以近似认为是不变的。在这些合理的近似条件下, 由(6)式可见, DGD 值与磁感应强度成正比。如果磁感应强度太大, 就不能有 $\frac{\sigma^2}{\kappa^2} \gg 1$, DGD 值不再与磁感应强度成正比。利用该特性, 可测量磁感应强度的大小, 为了便于测量, 一般采用 DGD 峰值来测量磁感应强度。

3 仿真分析

设计一个光纤光栅, 其 $n_{\text{eff}} = 1.455$, $\Lambda = 535$ nm, 光栅长度 $L = 40$ mm, 折射率调制深度 $\delta_n = 5 \times 10^{-5}$ 。根据给定的光栅数据和(5)式, 进行数值仿真。

DGD 随磁感应强度改变的关系如图 2(a) 所

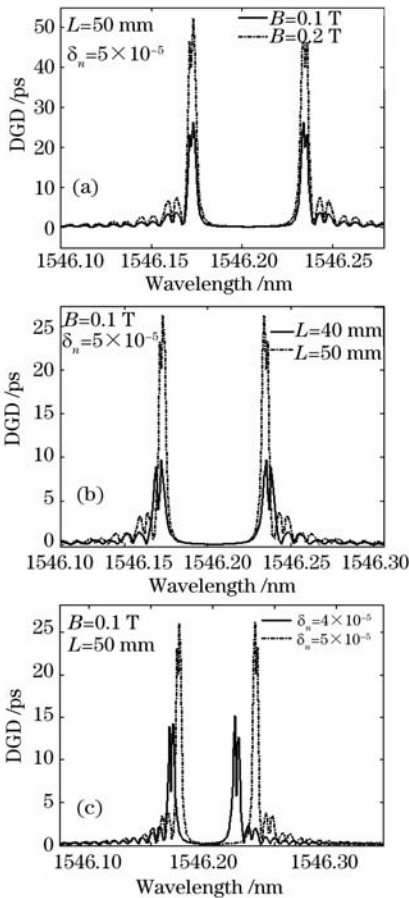


图 2 DGD 随波长的变化曲线。(a) 不同磁感应强度;(b) 不同光栅长度;(c) 不同折射率调制度

Fig. 2 DGD versus wavelength. (a) different magnetic inductions; (b) different grating lengths; (c) different modulation depths of refractive index

示, 可见 DGD 是一个以布拉格波长为中心的对称图形, 它随磁感应强度的增加而增加, 而且磁感应强度的变化并没有引起 DGD 谱形状的变化。

同样, 改变光栅的长度及调制深度也会影响 DGD, 如图 2(b), (c) 所示。增加光栅长度和调制深度会增加光栅的反射率, 同样会使 DGD 的峰值增加。利用该现象, 可以根据不同的需要来设计不同长度或调制深度的光栅。但同时从图 2(b), (c) 可见, 改变光栅的长度及调制深度会改变 DGD 的形状。

图 3 给出了在光栅长度分别为 50 mm 和 60 mm, 其他参数不变的条件下 DGD 峰值与磁感应强度变化的关系。由图 3 可见, DGD 的峰值趋近一个极限值, 光栅长度为 50 mm 时约 700 ps, 60 mm 时约为 1300 ps。在 0~1 T 量级之间, DGD 峰值随磁感应强度呈线性关系, 超过这一值后, DGD 峰值大小趋于饱和, 这给出在给定光栅参数下所能测量的磁感应强度范围。从图 3 还可见, 光栅的长度越长, 其测量的磁感应强度范围越小。

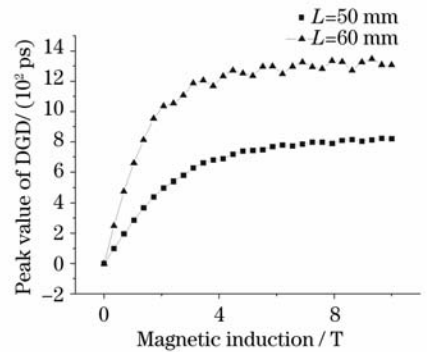


图 3 DGD 峰值与磁感应强度大小的关系
Fig. 3 Peak value of DGD versus magnetic induction

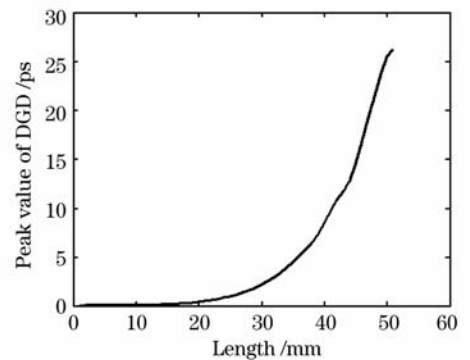


图 4 不同长度光栅的灵敏度

Fig. 4 Sensitivity at different lengths of fiber grating

利用长度 50 mm, 调制深度为 5×10^{-5} 的光栅进行仿真, 可以得到这种测量方法的灵敏度。磁感应强度每改变 10^{-4} T, DGD 的变化量为 $2.86 \times$

10^{-2} ps, 目前光矢量分析仪 (OVA) 测量 DGD 的精度在 10^{-5} ps 量级^[10~12]。因此在光栅长度为 50 mm 时, OVA 检测的灵敏度约为 10^{-8} T, 如果增加光栅的长度, 测量的灵敏度还可以增加。图 4 是磁感应强度变化 0.1 T 时, 利用不同长度的光栅测量得到的 DGD 改变量, 因此可以通过增加光栅的长度大大提高测量的灵敏度。但增加光栅的长度会使测量的动态范围减少, 所以在设计时应该根据实际的需要, 在测量动态范围和测量灵敏度上折中。

4 实验验证

采用自行研制的光纤布拉格光栅, 具体技术指标: 单模光纤载氢写入; 掩模周期为 $\Lambda = 535$ nm; 布拉格波长 $\lambda_B = 1547.24$ nm, 光栅长度 $L = 20$ mm; 有效折射率 $n_{\text{eff}} = 1.455$; 调制深度 $\delta_n = 2.4 \times 10^{-5}$ 。图 5 给出了磁感应强度测量的实验框图, 利用光矢量分析仪的外腔式激光器发出线偏振光, 通过偏振控制器 (PC) 后输入光纤布拉格光栅, 调节 PC 使透射的光功率最大。光栅放入磁感应强度发生器中, 光栅的透射光进入光矢量分析仪进行测量和分析。

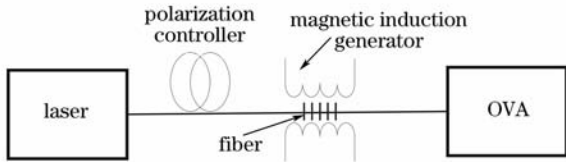


图 5 磁感应强度测量实验框图

Fig. 5 Schematics of magnetic measurement

图 6 给出了实测光栅的透射谱, 未加磁感应强度时, 中心波长为 1547.24 nm, 谱宽为 0.1 nm。随着磁感应强度的增加, 磁感应强度发生器的温度也增加, 导致透射谱向长波长漂移。图 7(a) 给出了在未加磁感应强度时光栅的差分群时延, 可见在透射

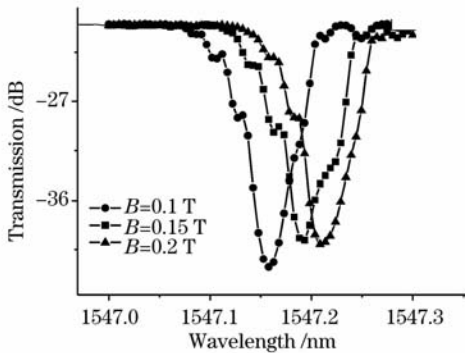


图 6 光栅实测的透射谱

Fig. 6 Measured FBG's transmission spectra

谱的范围内它并不为零, 而是杂乱无章的, 这是由于光栅本身固有的 DGD, 峰值处大约为 13 ps; 而在透射谱外的部分几乎为零。图 7(b) 所示为外加不同的磁感应强度后光栅的差分群时延, 光栅的 DGD 明显出现了变化, 在 5×10^{-2} T 磁感应强度下可发现明显有两个尖峰。随磁感应强度的增加, DGD 的峰值也在增加, 这与仿真相一致。

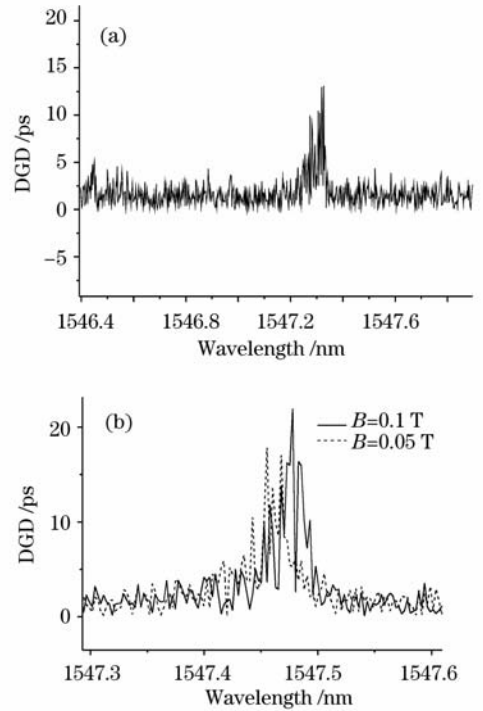


图 7 加入磁感应强度前(a)后(b)的 DGD

Fig. 7 DGD without (a) and with (b) magnetic induction

表 1 给出了在 $0 \sim 0.13$ T, 步长为 0.01 T 的磁感应强度下, 理论的 DGD 值与实测的 DGD 值。根据表 1 的数据, 分别给出了仿真和实测的磁感应强度大小与 DGD 峰值之间的关系, 如图 8 所示。可见实测的 DGD 峰值与所加磁感应强度的大小呈线性关系。理论计算得到光纤光栅磁感应强度传感器的磁感应强度灵敏度为 129 ps/T, 而实验测量灵敏度约为 99.9 ps/T, 比理论值略低一些, 这是由于在光栅的制作过程中, 仿真与制作出来的光栅在参数上会有一定的差异。

图 8 拟合曲线与仿真的拟合曲线之间存在的差距约为 13 ps, 这与图 7(a) 所给出的光栅自身固有的 DGD 值相符。由于实验使用的光栅长度为 20 mm, 则磁感应强度传感器的灵敏度为 1.3 ps/T, 采用精度为 10^{-5} ps 的 OVA 进行测量, 则磁感应强度传感器所能测量的最小磁感应强度约为 10^{-5} T。

从图 8 可见, 测量值的线性拟合度为 0.97, 测

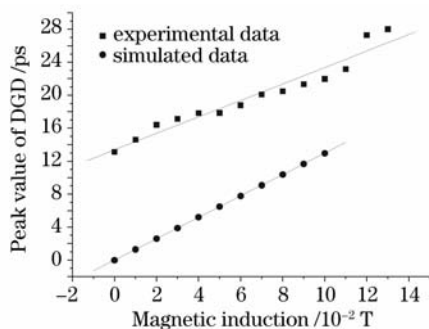


图8 磁感应强度与 DGD 峰值的关系

Fig. 8 Magnetic induction versus peak value of DGD

量值在拟合直线上下波动。通过分析,可以得知误差的来源有两个方面:一是由光栅与光纤的振动造成;二是连接光栅与光矢量分析仪所用的光纤是普通的单模光纤而非保偏光纤。

表1 仿真与实测的 DGD 值

Table. 1 Simulated value and experimental value of DGD

$B / (10^{-4} \text{ T})$	Simulated value of DGD/ps	Experimental value of DGD/ps
0	0	13.12726
100	1.29652	14.60624
200	2.59304	16.42063
300	3.88957	17.13327
400	5.18609	17.83672
500	6.48261	17.85026
600	7.77912	18.79838
700	9.07564	20.09866
800	10.3722	20.46394
900	11.6687	21.34911
1000	12.9652	21.97719
1100	14.2617	23.16708
1200	15.5582	27.30622
1300	16.8547	28.01819

通过实验验证,表明直接通过测量光栅透射光的 DGD 来测量磁感应强度的大小是可行的。实验结果与仿真结果吻合较好。

5 结 论

给出了一种新颖、简单的直接利用光纤光栅测量磁感应强度大小的方法。该方法利用光栅中左旋和右旋圆偏振光的群时延差值与磁感应强度大小呈线性关系来测量磁感应强度。分析了光栅长度、调

制深度对 DGD 的影响,以及该方案可以测量的磁感应强度范围。理论分析、数值仿真和实验结果均证实了该方案的可行性。实验中,磁感应强度测量的范围可达 1 T,测量精度约为 10^{-5} T。

致谢 感谢南京大学微波光子技术实验室陈向飞教授提供了光矢量分析仪。

参 考 文 献

- Wang Limeng, Zhu Ronghua. Sensing scheme for magnetic field with fiber Bragg grating. [J] *Laser & Infrared*, 1999, **29**(4): 238~242
王黎蒙,朱荣华. 光纤布喇格光栅磁感应强度传感方案[J]. 激光与红外, 1999, **29**(4): 238~242
- He Wanxun, Shi Wenkang, Ye Ailun. Realization of long period fiber grating based on magnetic field sensing scheme [J]. *Optical Technique*, 2001, **27**(6): 545~546
何万迅,施文康,叶爱伦. 基于长周期光纤光栅的磁场传感方案的实现[J]. 光学技术, 2001, **27**(6): 545~546
- Zhang Hucheng, Li Yuquan. Magnetic field sensor based on fiber Bragg grating [J]. *Journal of PLA University of Science and Technology*, 2004, **5**(2): 33~35
张虎成,李玉权. 基于 FBG 的磁场传感器实验设计方案[J]. 解放军理工大学学报(自然科学版), 2004, **5**(2): 33~35
- A. D. Kersey, M. J. Marrone. Fiber Bragg grating high-magnetic-field probe [C]. *SPIE*, 1994, **2360**: 53~56
- Zhong Xihua. Modern Fundamentals of Optics [M]. Beijing: The Publishing Company of Peking University, 2004
钟锡华. 现代光学基础. [M]. 北京: 北京大学出版社, 2004
- Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Spectral Characterization of Differential Group Delay in Fiber Bragg Grating Written into Hi-Bi Optical Fiber [C]. *ECCO*, 2005, **3**: 763~764
- S. Bette, C. Caucheteur, M. Wuilpart *et al.*. Theoretical and experimental study of differential group delay and polarization dependent loss of study of Bragg gratings written in birefringent fiber [J]. *Opt. Commun.*, 2007, **269**: 331~337
- Ping Lu, Dan Grobnc, Stephen J. Mihailov. Characterization of the birefringence in fiber Bragg gratings fabricated with an ultrafast-infrared laser [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25**(3): 779~786
- Ivan P. Kaminow, Tingye Li. Optical Fiber Telecommunications [M]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications Press, 2006
甘民乐, 房鼎毅. 光纤通信 [M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2006
- Guo Tuan, Zhao Qida, Liu Lihui *et al.*. Light intensity-referred and temperature-insensitive fiber Bragg grating dynamic pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **27**(2): 207~211
郭 团, 赵启大, 刘丽辉 等. 光强检测型光纤光栅温变不敏感动态压力传感研究 [J]. 光学学报, 2007, **27**(2): 207~211
- 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