

文章编号: 0258-7025(2004)08-0983-05

# 光纤光栅传感系统有源时域解调技术

余有龙, 赵洪霞, 刘盛春, 高来勋

(黑龙江大学光纤技术研究所, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要** 将传感光栅用作环形器光纤激光器的端镜, 腔中接一受压电陶瓷(PZT)驱动的具滤波功能的匹配光栅, 受正弦波电压信号驱动, 通过观察同一驱动周期中激光输出两谷值在时域中的间隔, 进而判断作用在传感光栅上的轴向待测应变。在  $-140 \sim 720 \mu\epsilon$  范围内, 其传感分辨率为  $1.8 \mu\epsilon$ , 灵敏度为  $88.152 \mu\epsilon/\text{ms}$ 。理论和实验均证实该装置的感测结果不受环境温度变化的影响。

**关键词** 集成光学; 光纤光栅; 传感系统; 时域解调; 有源

**中图分类号** TP 212.14 **文献标识码** A

## Time-Domain Demodulation Technique for Active Fiber Bragg Grating Sensor System

YU You-long, ZHAO Hong-xia, LIU Sheng-chun, GAO Lai-xu

(Research Institute of Fiber Optics, Heilongjiang University, Harbin, Heilongjiang 150080, China)

**Abstract** A ring-cavity fiber laser based fiber Bragg grating (FBG) sensor system, in which two FBGs are used, is reported in this paper. One of the employed gratings, acted as the end mirror, is sensor element. Another is used as a tunable filter controlled by a piezoelectric stack, which is driven by an electrical sine wave signal. The measured strain applied on the sensor axially can be judged by observing the interval of the output laser between two notches within a driving period in time-domain. Experiment demonstrated that the sensing sensitivity and the resolution of this system are  $88.152 \mu\epsilon/\text{ms}$  and  $1.8 \mu\epsilon$  respectively, within the work range of from  $-140 \mu\epsilon$  to  $720 \mu\epsilon$ . The perturbation of the environmental temperature was proved not to affect the measured results theoretically. It was verified by experiments.

**Key words** integrated optics; fiber Bragg grating; sensor system; demodulation in time-domain; active

## 1 引 言

自 Hill 等于 1978 年首次研制出光纤光栅 (FBG) 以来<sup>[1]</sup>, 该波长编码的具带阻滤波功能的光子器件就被广泛应用于各种物理量的传感探测<sup>[2~8]</sup>, 有别于其他类传感器的是, 其感测结果不受光路连接以及各种器件插入损耗的影响, 免受电磁场干扰, 易于复用和网络化处理, 因此倍受人们青睐。然而适当、有效的解调方法是 FBG 传感器实用化面临的关键技术, 已有的解调方式归纳起来有滤

波法<sup>[9]</sup>、干涉法<sup>[10]</sup>和色散法<sup>[11]</sup>, 这些方法均在频域中进行操作, 所用的解调设备(滤波器、扫描干涉仪和色散光栅)均非常规设备, 不利于降低成本, 何况均无温漂补偿功能, 因而有待改进。

将传感光栅在频域中的波长漂移信息, 变为时域中的可用示波器观测的时间变化信息, 从而判断待测量的大小, 这较其他方案便捷得多。但此技术目前还停留在无源阶段<sup>[12]</sup>, 其信噪比、分辨率均有待提高。改用有源方式, 为二者的改善提供了可能。

收稿日期: 2003-05-06; 收到修改稿日期: 2003-06-25

基金项目: 黑龙江省教育厅科学技术研究重大项目(编号: 10531Z010)、黑龙江省 2001 年杰出青年基金、国家自然科学基金和中国节能投资公司联合研究基金(批准号: 60177029)资助课题。

作者简介: 余有龙(1965—), 男, 安徽桐城人, 黑龙江大学光纤技术研究所教授, 博士, 主要从事光纤通信、传感、光纤激光器等方面的研究。E-mail: youlongyu@hotmail.com

本文将传感光栅用作环形腔光纤激光器的端镜,腔中接一受压电陶瓷(PZT)驱动的起滤波作用的光栅,正弦电压信号驱动时,观察同一驱动周期中激光功率谱的两谷值在时域中间隔的大小,进而判断待测应变的值。

## 2 实验原理

如图 1 所示,半导体激光器的 980 nm 抽运光经波分复用器(WDM)耦合至长度为  $l$  的掺铒光纤(EDF),形成放大自发辐射,经 3 dB 耦合器 C 耦合至传感光栅 FBG1,布拉格反射后,波长为  $\lambda_{B1}$  的光波经 C 耦合至起带阻滤波作用并受 PZT 驱动的滤波光栅(FBG2)和隔离器(Is<sub>1</sub>),然后至 EDF,完成一个周期的循环,这些器件总的就构成环形腔光纤激光器。只要抽运光功率高于阈值,环形腔中将建立由隔离器规定循环方向的环形振荡,探测器 D 处将观测到激光输出。

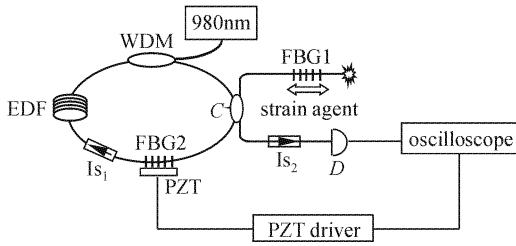


图 1 有源时域解调装置原理图

Fig. 1 Diagram of time-domain active demodulation scheme

光纤光栅的反射率随波长变化可近似成高斯分布关系<sup>[13]</sup>,因此  $\lambda_{B1}$  波长处 FBG2 的反射率为

$$R = R_0 \exp \left[ -4 \ln 2 \left( \frac{\lambda_{B1} - \lambda_{B2}}{\Delta \lambda_{B2}} \right)^2 \right] \quad (1)$$

其中  $R_0$  为 FBG2 在其布拉格波长 ( $\lambda_{B2}$ ) 处的反射率,  $\Delta \lambda_{B2}$  为其 3 dB 带宽。

记自由状态时  $\lambda_{B1}$  和  $\lambda_{B2}$  的值分别为  $\lambda_{B10}$  和  $\lambda_{B20}$ , 则  $\lambda_{B1}$  是 FBG1 轴向待测应变 ( $\epsilon$ ) 和环境温度变化 ( $\Delta T_1$ ) 的函数

$$\lambda_{B1} = \lambda_{B10} + (1 - P_e) \epsilon \lambda_{B10} + (\alpha + \xi) \Delta T_1 \quad (2)$$

其中  $P_e$  为有效弹光系数,  $\alpha$  和  $\xi$  分别为光纤的热膨胀系数和热光系数。若 PZT 的驱动电压为一幅值  $V_p$ , 直流电平为  $V_0$ , 角频率为  $\omega$ , 初位相为  $\phi$  的正弦信号, 即

$$V(t) = V_0 + V_p \sin(\omega t + \phi) \quad (3)$$

受其驱动, 滤波光栅所在光纤的轴向应变正比于  $V(t)$ , 若 FBG2 环境温度变化为  $\Delta T_2$ , 则其波长可表述为

$$\lambda_{B2} = \lambda_{B20} + C \lambda_{B20} (1 - P_e) \times [V_0 + V_p \sin(\omega t + \phi)] + (\alpha + \xi) \Delta T_2 \quad (4)$$

其中  $C$  为取决于压电陶瓷电致伸缩特性以及被拉伸段光纤长度的系数, 考虑两光栅处在同一环境温度中, 则彼此间的波长失配为

$$\Delta \lambda(t) = \lambda_{B10} - \lambda_{B20} + (1 - P_e) \times \{ \epsilon \lambda_{B10} - C \lambda_{B20} [V_0 + V_p \sin(\omega t + \phi)] \} \quad (5)$$

结合(1)式和(5)式, 不计 FBG2 的吸收损耗, 则其透过率为

$$T(t) = 1 - R_0 \exp \left\{ -4 \ln 2 \left[ \frac{\lambda_{B10} - \lambda_{B20} + (1 - P_e) \{ \epsilon \lambda_{B10} - C \lambda_{B20} [V_0 + V_p \sin(\omega t + \phi)] \}}{\Delta \lambda_{B2}} \right]^2 \right\} \quad (6)$$

可见滤波光栅透过率的大小与待测应变和 PZT 的驱动电压有关。

FBG2 的布拉格反射对共振光波来说意味着损耗, 它引起的平均单程损耗因子  $\delta(t) = (-\ln T)/2$ , 记腔中其他损耗(包括各器件的插入损耗、连接损耗、介质吸收损耗等)对平均单程损耗因子的贡献为  $\alpha$ , 则激光器的阈值抽运功率<sup>[14]</sup>

$$P_{\mu}(t) \propto \delta(t) + \alpha \quad (7)$$

而激光器输出功率

$$P(t) \propto P_p - P_{\mu}(t) \quad (8)$$

其中  $P_p$  为被 EDF 吸收的抽运光功率。

若  $V_p = V_0, V(t)/2V_0$ 。如图 2(a) 中曲线 a 所

示,  $\lambda_{B10} = 1563.0 \text{ nm}$ ,  $\lambda_{B20} = 1562.682 \text{ nm}$ ,  $\epsilon = 0 \mu\epsilon$ ,  $\phi = 0.94\pi$ ,  $C = 7.61 \times 10^{-6}/V$ ,  $R_0 = 90\%$ , 考虑  $P_e = 0.22$ , 根据(6)式可确定  $T(t)$  和  $\delta(t)$  的时间分布规律分别为图 2(a) 中曲线 b 和 c 所示, 而  $\Delta \lambda(t)$  的时间变化规律见图 2(b) 所示, 不难看出  $T(t)$  的谷值与  $\delta(t)$  的峰值同时出现在  $\Delta \lambda(t) = 0$  处, 此时带阻滤波将导致光纤激光器阈值激增, 若抽运光功率有限, 则将导致无激光输出; 而  $\lambda_{B2}$  偏离  $\lambda_{B1}$  时,  $\delta(t)$  引起的损耗将骤减, 阈值低于抽运光功率时, 输出端将辐射出传感光栅布拉格波长的激光。

PZT 的驱动电压是交变的, 只要  $V_0, V_p$  等参量取值合适, 同一驱动周期中将出现两次激光输出为

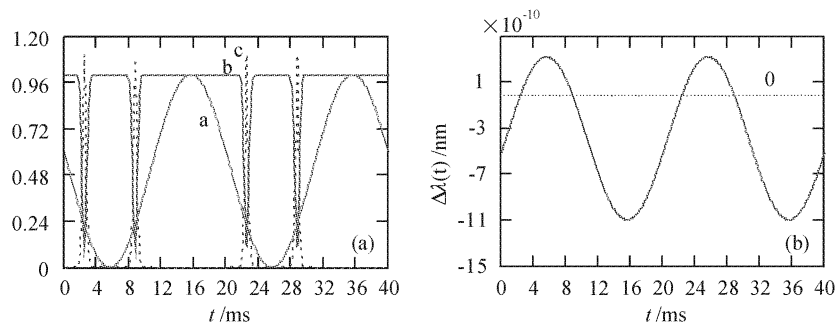


图 2 各参量的时间变化规律

Fig. 2 Time relationship of different parameters

(a) a:  $V(t)/2V_0$ , b:  $T(t)$ , c:  $\delta(t)$ ; (b)  $\Delta\lambda(t)$

零,记间隔为  $\tau$ ,据  $\sin(\omega t + \phi) = \sin[\omega(t + \tau) + \phi]$ , 不难导出  $\sin(\omega t + \phi) = \cos(\omega\tau/2)$ ,  $\Delta\lambda(t) = 0$  时由 (5) 式可导出

$$\epsilon(\tau) = \frac{C\lambda_{B20}[V_0 + V_p \cos(\omega\tau/2)]}{\lambda_{B10}} - \frac{\lambda_{B10} - \lambda_{B20}}{(1 - P_e)\lambda_{B10}} \quad (9)$$

可见同一周期中出现的两脉冲在时域中的间隔是所测微应变的量度,而与环境温度无关。

### 3 实验结果

实验中所用抽运光的功率为 100 mW,EDF 的长度为 26.84 m,插入损耗为 17.96 dB,隔离器的插入损耗为 0.4 dB,耦合器左侧环路的总损耗为 21.9 dB。选用的传感光栅和滤波光栅在自由状态下的布拉格波长分别为 1563.00 nm 和 1562.682 nm,反射率分别为 93%和 90%,带宽分别为 0.140 nm 和 0.123 nm,FBG1 的轴向应变由微动平台的轴向拉力提供;环形腔光纤激光器的阈值功率为 9.66 mW。

FBG2 所在的能被拉伸段光纤的长度为 1.25 cm,将其用胶固定于 PZT 两端,施 40 V 直流电压于 PZT 时,FBG2 的波长变为 1563.06 nm,根据(4) 式可确定 C 值为  $7.75 \times 10^{-6}/V$ 。

为验证图 1 装置的时域解调能力,将 PZT 驱动电压设置为幅值和直流电平均为 75 V,频率为 50 Hz 的正弦信号,受其驱动 PZT 轴向伸缩量呈周期性变化,以致  $\lambda_{B2}$  在 1562.682~1563.98 nm 范围内与之同步周期性改变。

两光栅的布拉格波长不一致时,抽运光功率高于阈值,输出端便能观察到取决于传感光栅布拉格波长的激光输出,图 3 中曲线 a 为其输出的光谱。两光栅的工作波长一致时,FBG2 的带阻滤波使得

共振腔中的损耗大为增加,从而影响环形腔激光器的阈值功率,以致抽运光低于 14.57 mW 时,输出端无激光输出(图 3 中曲线 b 所示);而高于 14.57 mW 时,抽运光足以克服腔中损耗,以致腔中建立新的振荡,重新出现激光输出(图 3 中曲线 c 所示)。

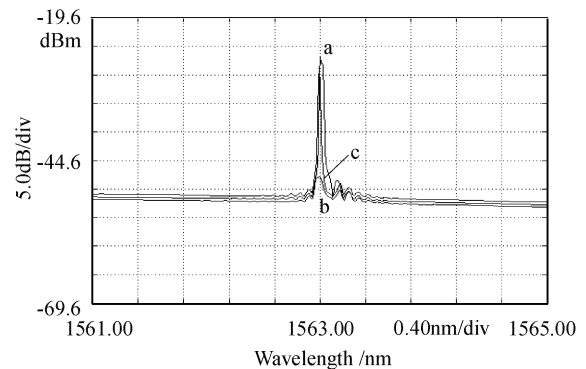


图 3 不同情况下的输出光谱

Fig. 3 Output spectra for

a:  $\lambda_{B1} \neq \lambda_{B2}$ ,  $P_P > 9.66$  mW; b:  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2}$ ,

$9.66$  mW  $< P_P < 14.57$  mW; c:  $\lambda_{B1} = \lambda_{B2}$ ,  $P_P > 14.57$  mW

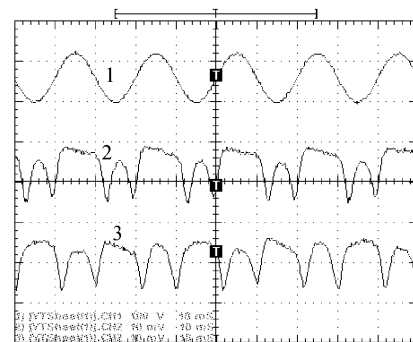


图 4 曲线 1: PZT 驱动信号;

曲线 2 和 3: 激光输出信号(2:  $0 \mu\epsilon$ , 3:  $480 \mu\epsilon$ )

Fig. 4 Curve 1: PZT driving signal; Curve 2 and 3: outputs of the fiber laser (2:  $0 \mu\epsilon$ , 3:  $480 \mu\epsilon$ )

实验中用带宽为 500 MHz 的 Tektronix 714L 型示波器观察探测器输出信号,探测器的响应频率可达 125 kHz。抽运光在 9.66~14.57 mW 范围内任取一值,PZT 驱动下 FBG2 工作波长变化的每一个周期内,激光输出的强度曲线上均出现两个谷值(见图 4 所示),这与图 2 所预期的结果一致。调节微动平台的控制电压,增加待测应变值,使 FBG1 的工作波长向长波长方向移动,可发现两谷值在时域中的间距  $\tau$  随待测应变  $\epsilon$  的变化明显改变,图 5(a)

为两者关系的实验曲线,而(9)式所确定的理论曲线见图 5(b)所示,不难看出  $\tau \in (5.8 \sim 16)$  ms 时  $\epsilon$  与  $\tau$  间几乎成直线关系,且与实验曲线  $E(\tau)$  非常接近,后者斜率的数值  $88.152 \mu\epsilon/\text{ms}$  就是该装置应变传感灵敏度的实验值。

三角函数只在主值区间呈单值对应关系,这规定了本系统的测量范围,兼顾线性工作区的要求,本装置的测量范围为  $-140 \sim 720 \mu\epsilon$ ,采用高阶近似虽偏离线性关系,但有利于拓展系统的测量范围。

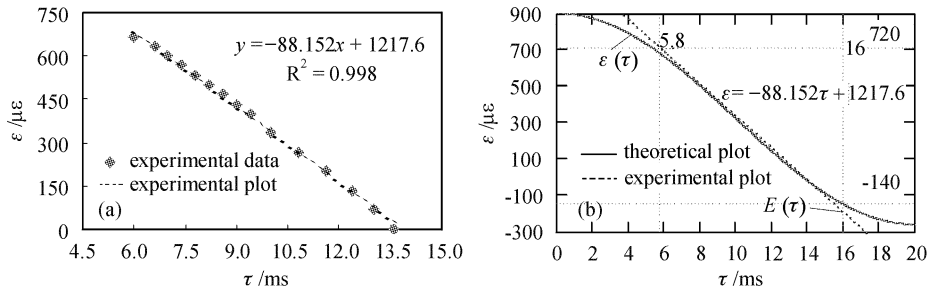


图 5  $\epsilon$  与  $\tau$  间的关系

(a) 实验数据;(b) 理论和实验曲线

Fig. 5 Relationship between  $\epsilon$  and  $\tau$

(a) experimental data; (b) theoretical and experimental plots

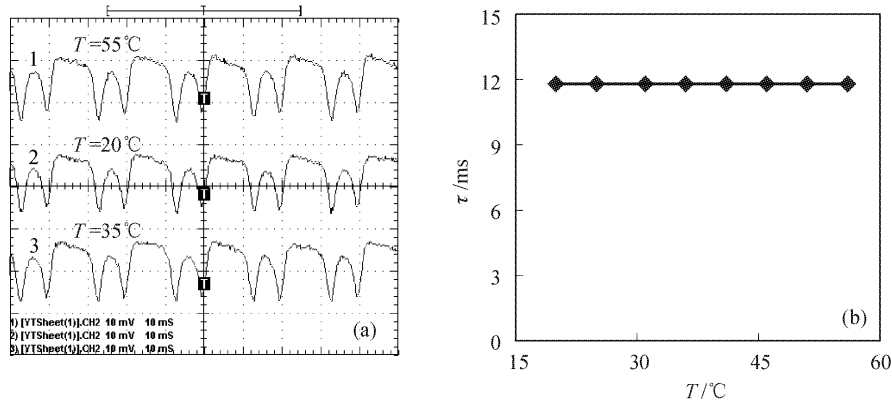


图 6 (a)  $\epsilon = 65 \mu\epsilon$  时不同温度下的激光输出;(b)  $\epsilon = 180 \mu\epsilon$  时  $\tau$  与  $T$  的实验关系

Fig. 6 (a) Outputs of the fiber laser at different temperature for  $\epsilon = 65 \mu\epsilon$ ;

(b) Relationship between  $\tau$  and  $T$  for  $\epsilon = 180 \mu\epsilon$

将解调装置置于温控箱中,设置  $\epsilon = 65 \mu\epsilon, 0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  范围内改变环境温度  $T$ ,示波器显示  $\tau$  值为 13.1 ms 不变(见图 6(a)所示),而图 6(b)为  $\epsilon = 180 \mu\epsilon$  时记下的  $\tau$  与  $T$  间的实验关系,从而证实该装置的温漂补偿功能。 $T$  值的起伏通过 PZT 影响  $\lambda_{B20}$  导致测量范围的少许偏移,温度太高(如高于  $60^\circ\text{C}$ )会影响封装材料和胶的性能,从而影响 WDM 耦合器和滤波光栅的工作状态。

系统输出的信噪比好于 20 dB,而传感分辨率

与负脉冲的脉宽、示波器的带宽和取样频率、探测器的性能等有关,而脉宽主要取决于 FBG2 的带宽,因此选用窄带滤波光栅和高速示波器与探测器将有利于提高系统的分辨率。本系统具备分辨  $1.8 \mu\epsilon$  的能力。对同一周期中相继出现的两谷值位置的时间间隔的观测要求所测应变应具有一定的稳定性,因此本装置适合于对静应变进行感测。

## 4 结 论

利用起带阻滤波作用的可调光纤光栅的波长周期性调节,通过影响传感光栅作为端镜的环形腔光纤激光器的损耗来改变阈值,进而在输出的功率谱中出现谷值。观察同一驱动周期中两谷值在时域中的间隔,对待测应变成功地进行了传感探测。系统的传感分辨率为  $1.8 \mu\epsilon$ ,灵敏度为  $88.152 \mu\epsilon/\text{ms}$ ,感测结果在  $0^\circ\text{C} \sim 60^\circ\text{C}$  范围内几乎不受环境温度的影响。本装置简单、实用,具有推广使用的价值。

## 参 考 文 献

- 1 K. O. Hill, Y. Fujii, D. C. Johnson *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides; application to reflection filter fabrication [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, **32**(6):647~649
- 2 M. Volanthen, H. Geiger, M. J. Cole *et al.*. Measurement of arbitrary strain profiles within fibre gratings [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **23**(11):1028~1029
- 3 M. G. Xu, H. Geiger, J. P. Dakin. Fibre grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2):128~129
- 4 G. A. Ball, W. W. Morey, P. K. Cheo. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1994, **12**(4):700~703
- 5 Yu Youlong, Geng Shuwei, Tam Hwayaw. A novel active fiber Bragg grating sensor system for monitoring mechanical vibration in real-time [J]. *Acta Optica Sinica*, 2003, **23**(3):293~296  
余有龙,耿淑伟,谭华耀. 用于机械振动实时监测的光纤光栅有源传感装置[J]. *光学学报*, 2003, **23**(3):293~296
- 6 Yu Youlong, Yie Hongan, Zhao Weifeng *et al.*. Fiber Bragg grating current sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5):586~588  
余有龙,叶红安,刘治国等. 光纤光栅电流传感器[J]. *光学学报*, 2001, **21**(5):586~588
- 7 Huang Yonglin, Tong Zhengrong, Xiang Yang *et al.*. Temperature-insensitive displacement sensing using the chirp effect of fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(11):1015~1018  
黄勇林,童峥嵘,项阳等. 用光纤光栅的啁啾效应实现温度不敏感的位移传感[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(11):1015~1018
- 8 Zhang Weigang, Liu Yange, Wang Yue *et al.*. Study of sensing and measurement for vertically mechanical quantities using single fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2003, **30**(1):71~74  
张伟刚,刘艳格,王跃等. 利用单光纤光栅实现力学量垂直感测的研究[J]. *中国激光*, 2003, **30**(1):71~74
- 9 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength filter [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16):1370~1372
- 10 A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron. Lett.*, 1992, **28**(3):236~238
- 11 S. W. James, M. L. Dockney, R. P. Tatam. Photorefractive volume holographic demodulation of in-fiber Bragg grating sensors [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 1996, **8**(5):664~666
- 12 Yu Youlong. Research on fiber Bragg grating & its application in sensing field [D]. *A Dissertation for the Ph. D Degree of Nankai University*, Tianjin, 1999. 100~114  
余有龙. 光纤光栅及其在传感领域中应用的研究[D]. 南开大学博士学位论文,天津,1999. 100~114
- 13 A. B. L. Ribeiro, L. A. Ferreira, J. L. Santos *et al.*. Analysis of the reflective-matched fiber Bragg grating sensing interrogation scheme [J]. *Appl. Opt.*, 1997, **36**(4):934~939
- 14 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong *et al.*. Principle of Laser [M]. 4th ed., Beijing: National Defence Industry Press, 2000. 166~169  
周炳琨,高以智,陈倜嵘等. 激光原理[M]. 第4版,北京:国防工业出版社,2000. 166~169