

文章编号: 0258-7025(2010)06-1490-06

光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式传感器 灵敏度

尹国路^{1,2} 娄淑琴^{1,2} 彭万敬^{1,2} 陶沛琳^{1,2} 任文华^{1,2} 谭中伟^{1,2} 刘 艳^{1,2}

(¹ 北京交通大学全光网络与现代通信网教育部重点实验室, 北京 100044)

² 北京交通大学光波技术研究所, 北京 100044

摘要 在光纤布拉格光栅法布里-珀罗干涉式(FBG FPI)传感器的实验研究和工业应用中,其灵敏度一直受到广泛关注。在考虑光源线宽的情况下,推导出了其灵敏度的理论表达式,讨论了光源相干长度、法布里-珀罗(F-P)腔腔长及光栅反射率对灵敏度的影响,指出腔长与光源相干长度比值越小,灵敏度越高;在腔长与光源相干长度比值一定时,存在一个最佳反射率使灵敏度达到最大。最后通过不同腔长的灵敏度对比实验和不同反射率的灵敏度对比实验,验证了理论仿真结果的正确性。

关键词 传感器;光纤布拉格光栅;法布里-珀罗干涉仪;灵敏度;法布里-珀罗腔腔长;相干长度

中图分类号 TN253 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20103706.1490

Sensitivity of Fiber Bragg Grating-Based Fabry-Pérot Interferometric Sensor

Yin Guolu^{1,2} Lou Shuqin^{1,2} Peng Wanjing^{1,2} Tao Peilin^{1,2}

Ren Wenhua^{1,2} Tan Zhongwei^{1,2} Liu Yan^{1,2}

(¹ Key Laboratory of All Optical Network & Advanced Telecommunication Network of Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

² Institute of Lightwave Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China

Abstract In the experimental research and industry applications of the fiber Bragg grating-based Fabry-Perot interferometric (FBG FPI) sensor, its sensitivity has been widespread concerned. Considering the linewidth of the light source, the power transmission coefficient is amended and the theoretical formula of the sensitivity is deduced. Then, the key influence factors on the sensor sensitivity are discussed, including the cavity length, the coherence length of the light source, and the reflectivity of the FBG. The results show that the smaller the ratio between the cavity length and the coherence length is, the higher the sensitivity will be. When the ratio is chosen, there is an optimum reflectivity. If the reflectivity of FBG equals the optimum, the sensitivity is the highest. The results of comparison experiment on the sensitivity with different cavity lengths and sensitivity experiment on different reflectivities verify the correctness of the theoretical simulation.

Key words sensors; fiber Bragg grating; Fabry-Pérot interferometer; sensitivity; Fabry-Perot cavity length; coherent length

1 引 言

自 1997 年 M. G. Shlyagin 等^[1]利用光纤光栅法

布里-珀罗干涉仪(FBG FPI)作为传感单元后,光纤光栅法布里-珀罗干涉式传感器以其制作简单、物理强

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-08

基金项目: 国家自然科学基金(60977033, 60707007)资助课题。

作者简介: 尹国路(1985—), 男, 博士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 08111030@bjtu.edu.cn

导师简介: 娄淑琴(1965—), 女, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感、光纤通信等方面的研究。

E-mail: shqlou@bjtu.edu.cn

度高、灵敏度高和易于组成大规模传感网络等优势,在结构健康监控、管道检测、压力和温度测量等领域得到广泛的应用^[2,3]。表征 FBG FPI 传感器性能的一个重要指标是灵敏度,而影响传感器灵敏度的关键因素有光源线宽、腔长和 FBG 反射率等,因此对这 3 个因素的控制成为研制高灵敏度 FBG FPI 传感器的关键问题。德州农工大学的 X. K. Wan 等^[4]制作了用于温度传感的 FBG FPI 传感器,其采用的 FBG 反射率约为 100%,实现了 0.005 °C 的测量精度;日本福井大学的 K. Takao 等^[5]为了提高传感器灵敏度,采用 FBG 反射率低于 5%,腔长为几个毫米,光源是谱

宽为 0.2 nm,脉冲宽度为 3 ns 的脉冲激光器;浙江大学的 Z. G. Guan 等^[6]采用低反射率 FBG 和低相干光源也进行温度传感的研究,灵敏度达到了 $-1.92\%/^{\circ}\text{C}$ 。

本文在对 FBG FPI 透射率理论分析的基础上,给出了其灵敏度的表达式,从理论仿真和实验两方面研究了光源线宽、腔长及 FBG 反射率对灵敏度的影响。

2 理论分析

作为 FBG FPI 传感器的重要光纤元件,长度为 L_g 的均匀 FBG 的反射率^[7]

$$R = \frac{\kappa^2 \sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_g)}{(\kappa^2 - \sigma^2) \cosh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_g) + \sigma^2 \sinh^2(\sqrt{\kappa^2 - \sigma^2} L_g)}, \quad (1)$$

这里,光栅的直流和交流耦合系数分别表示为

$$\sigma^2 = 2\pi n_0 \left(\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{\lambda_B} \right), \kappa = \pi \delta n, \quad (2)$$

式中 $\lambda_B = 2n_0/\Lambda$ 为光栅的布拉格波长, n_0 为光栅区域有效折射率的直流部分, δn 为光致折射率改变的交流部分的幅度, Λ 为折射率调制周期。

光纤布拉格光栅法布里-珀罗 (FBG F-P) 腔由

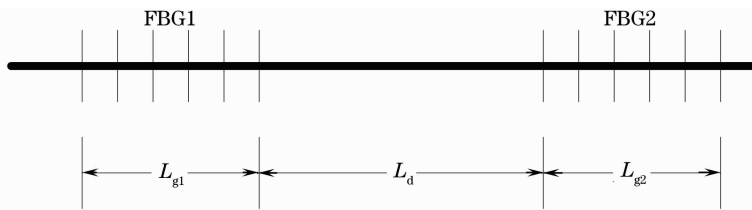


图 1 光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的结构图

Fig. 1 Structure of FBG F-P cavity

在忽略腔内损耗时,可以得到 FBG F-P 腔的透射率和反射率^[8,10]

$$\begin{aligned} T_{\text{FBGFP}} &= \frac{(1-R_1)(1-R_2)}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 \phi}, \\ R_{\text{FBGFP}} &= 1 - T_{\text{FBGFP}} = \\ &= \frac{(\sqrt{R_1} - \sqrt{R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 \phi}{(1-\sqrt{R_1 R_2})^2 + 4\sqrt{R_1 R_2} \sin^2 \phi}, \end{aligned} \quad (3)$$

式中 R_1 和 R_2 分别为 FBG1 和 FBG2 的反射率, ϕ 为光在 FBG F-P 腔中的单程相位因子。

当信号作用于 FBG F-P 腔时,由于折射率改变、光纤长度变化以及光纤芯径变化,在其中传输的光相位将发生变化 $\Delta\phi$ 。对于固定波长的入射激光,在传感信号作用前后,由于相位项发生了变化,干涉仪的透射率/反射率也将发生变化,通过对透射功率/反射功率的检测,便可以实现对传感信号的

两个相隔一定距离的 FBG 组成,两个 FBG 之间由光纤连接,其结构如图 1 所示。两个 FBG 的长度分别为 L_{g1} , L_{g2} , 其折射率调制幅度分别为 δn_1 , δn_2 , 之间间隔为 L_d 。由于光栅具有分布式反射的特性,与传统的 F-P 腔相比,FBG F-P 腔的腔长除了 L_d 外,还应包含充当腔长的部分光栅长度^[8,9]。

解调。

(3) 式实际上假设了入射光为单频光,即 $I_0(\nu) = I_0 \delta(\nu_0)$,但在实际中使用的光源总具有一定的谱线宽度,因此需要修正(3)式。设入射光的功率谱密度分布为 $I_0(\nu) = I_0 g(\nu, \nu_0)$,谱线半宽度为 $\Delta\nu$ 。为了简化过程,突出主要问题,在分析中假设组成 FPI 的两个 FBG 具有相同的特性,则 $R_1 = R_2 = R$ 。此时 FBG FPI 透射率中的 FBG 反射率 R 和相位因子 ϕ 都将是入射光频率的函数,透射输出总功率 I 表示为

$$\begin{aligned} I &= \int_0^{\infty} I_0 g(\nu, \nu_0) T_{\text{FBGFP}}(\nu) d\nu = \\ &= I_0 \int_0^{\infty} g(\nu, \nu_0) \frac{[1-R(\nu)]^2}{[1-R(\nu)]^2 + 4R(\nu) \sin^2 \phi(\nu)} d\nu. \end{aligned} \quad (4)$$

由于激光器线宽一般都为千赫兹到吉赫兹数量级,FBG 反射带宽通常在 $0.01\sim 1\text{ nm}$ 范围,两者相比较,前者远远小于后者,故假定在激光器谱线宽度内,FBG 反射率 R 是一个定值,等于激光器中心波长处的反射率,即 $R(\nu) = R(\nu_0)$ 。通常使用的激光器光谱密度都呈现为洛伦兹型,即

$$g(\nu, \nu_0) = \frac{2\pi\Delta\nu}{(\pi\Delta\nu)^2 + 4\pi^2(\nu - \nu_0)^2}, \quad (5)$$

将(5)式带入(4)式,利用平稳随即过程理论和维纳-辛钦定理,可以得到修正后的 FBG FPI 透射率和反射率为

$$T_{\text{FBGFPI}} = \frac{I}{I_0} = \frac{P}{1 + Q\sin^2\phi}, \quad (6)$$

$$R_{\text{FBGFPI}} = 1 - T_{\text{FBGFPI}} = \frac{(1 - P) - Q\sin^2\phi}{1 + Q\sin^2\phi},$$

式中

$$P = \frac{1 - R(\nu_0)}{1 + R(\nu_0)} \frac{1 + R(\nu_0)\exp(-2m)}{1 - R(\nu_0)\exp(-2m)},$$

$$Q = \frac{4R(\nu_0)\exp(-2m)}{[1 - R(\nu_0)\exp(-2m)]^2}, \quad (7)$$

$m = L/L_c$, 表征腔长与光源相干长度的比值, $L_c = c/(n_0\pi\Delta\nu)$ 为洛伦兹型光源的相干长度。当光源为理想单色光,相干长度趋于无穷, $m = 0$ 时,(6)式就变成(3)式。

FBG FPI 传感器灵敏度 G 通常定义为透射率/反射率对相位 ϕ 的一次导数 $dT/d\phi$,为了讨论方便, G 一般取绝对值,即

$$G = \left| \frac{dT_{\text{FBGFPI}}}{d\phi} \right| = \left| \frac{PQ\sin(2\phi)}{(1 + Q\sin^2\phi)^2} \right|. \quad (8)$$

对于干涉式传感器而言,其工作点一般选在响应曲线的斜率最大点,这样传感器的灵敏度达到最大^[11,12]。即 $d^2G/d^2\phi = 0$ 时对应的 ϕ 值就是工作点,将此时的 ϕ 值带入(8)式得到的灵敏度为工作点灵敏度,记为 G_{max} 。在本文中,除特殊说明外,所指灵敏度均表示工作点处的灵敏度。

$$\cos(2\phi) = \frac{-(2 + Q) + \sqrt{9Q^2 + 4Q + 4}}{2Q}, \quad (9)$$

$$G_{\text{max}}(m, R) = \frac{2P[10Q^2 + 8Q + 8 - 2(Q + 2)\sqrt{9Q^2 + 4Q + 4}]}{[-6Q^2 - 8Q - 8 + 2(Q + 2)\sqrt{9Q^2 + 4Q + 4}]^{3/2}}, \quad (10)$$

结合(7)式和(10)式,不难发现,比值 m 和 FBG 反射率 R 都会影响传感器灵敏度。

假定激光器入射波长等于 FBG 的布拉格波长,即有 $R_1(\nu_0) = R_2(\nu_0) = R(\lambda_B)$ 。 $G_{\text{max}}(m, R)$ 对理想单

色光时的灵敏度 $G_{\text{max}}(m = 0, R)$ 归一化后,可以得到 G_{max} 随比值 m 变化的归一化曲线,如图 2 所示。

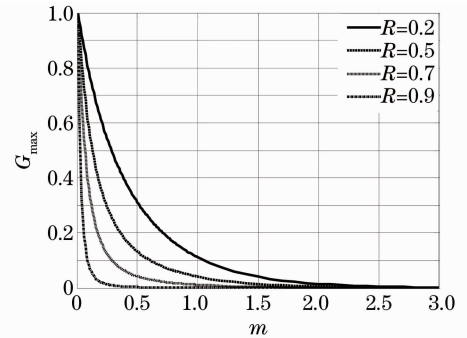


图 2 灵敏度 G_{max} 随比值 m 变化情况

Fig. 2 Sensitivity G_{max} versus the ratio m

由图 2 可知,随着比值 m 的增大,归一化灵敏度逐渐降低,FBG 反射率大小将影响灵敏度的下降速度。当 FBG 反射率较低时($R = 20\%$),曲线变化趋势较为缓慢;当 FBG 反射率很高时($R = 90\%$),曲线变得很陡峭,在比值 $m = 0.5$ 时,归一化灵敏度就已经趋近于零。当比值 m 大于 1 时,无论 FBG 反射率取何值,此时反射率对工作点灵敏度影响不大。由于长相干长度光源和短腔长会使 m 值较小,灵敏度较高。因此,在研制 FBG FPI 传感器时,为了提高传感器灵敏度,应选择窄线宽激光器和短腔结构。

为了进一步说明 FBG 反射率对传感器灵敏度的影响,固定比值 m ,研究了灵敏度随反射率变化的关系。图 3 给出了 m 取不同值情况下,灵敏度随反射率变化的曲线。从图中可以看出,一般情况下,灵敏度均随着反射率的增加呈先升高后降低的趋势,存在一个最佳反射率 R_g 使灵敏度达到最大值。该最佳反射率随着比值 m 的增大而变小,当比值 m 趋近于 1 时,如果再增大比值 m ,灵敏度与反射率的关系曲线变化很小,最佳反射率 R_g 几乎不再变化。然而,当

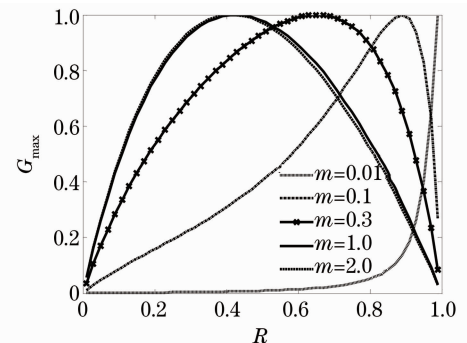


图 3 灵敏度随反射率的变化情况

Fig. 3 Sensitivity versus reflectivity

比值 $m \rightarrow 0$ 时,即光源线宽很窄或腔长极短时,灵敏度可以近似地看着随反射率的增大而升高。图 4 给出了随比值 m 的增大,最佳反射率 R_g 的变化曲线。因此,在光源线宽很窄或腔长极短时,选用反射率越高的 FBG,会实现越高的灵敏度;在使用宽谱光源或长腔时,选用反射率为最佳反射率的 FBG 会得到较高的灵敏度。

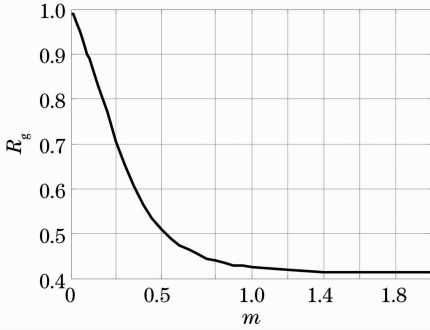


图 4 最佳反射率随比值 m 的变化
Fig. 4 Optimum reflectivity versus m

3 实验结果与分析

实验系统如图 5 所示,选用线宽为 2 MHz 的半导体激光器作为入射光源,对应的相干长度约为 100 m,其波长和输出光功率均可调。外部振动信号作用在 FBG F-P 腔上,经环形器、光电变换和模数变换被终端机采集,可以得到振动信号幅度随时间变化情况。尽力保证振动信号和输入光强等条件不变,可以近似使用幅度大小确定传感器灵敏度。实验中选取了 7 对不同反射率的 FBG 对,其参数如表 1 所示。

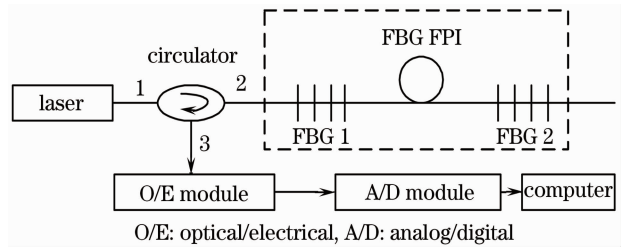


图 5 FBG FPI 传感系统示意图

Fig. 5 Schematic diagram of FBG FPI sensor system

表 1 实验中光栅的参数

Table 1 Parameters of gratings in the experiment

	$R / \%$	λ_0 / nm	$R / \%$	λ_0 / nm
F-A	20.57	1557.732	F-E	35.65 1557.743
F-B	49.88	1557.698	F-F	75.32 1557.727
F-C	68.38	1557.721	F-G	80.24 1557.704
F-D	90.00	1557.719		

在实验中,首先固定光栅反射率,进行不同腔长灵敏度的对比实验。选用编号为 F-D 的光栅对,输入激光的峰值功率为 -10 dBm ,设定 FBG F-P 腔的腔长分别为 0.1, 5, 25 和 50 m,将相同的振动信号加载到 F-P 腔中,在接收端检测幅值波动分别如图 6(a)~(d)所示。由图 6 可知,当腔长远小于激光相干长度时,输出幅值很大,灵敏度高。随着腔长的增加,其幅值和信噪比都逐渐下降。当腔长等于 50 m 时,振动信号已经几乎完全被噪声淹没,这可以用 FPI 的多光束干涉原理解释。当腔长为 1 m 数量级时,光在 FBG F-P 腔中经历多次反射之后就超出了该光源的相干长度,不能再形成有效的相干加强,于是多光束干涉的效果随着腔长的增加而减弱,直至最后的双光束都不再有干涉现象产生。

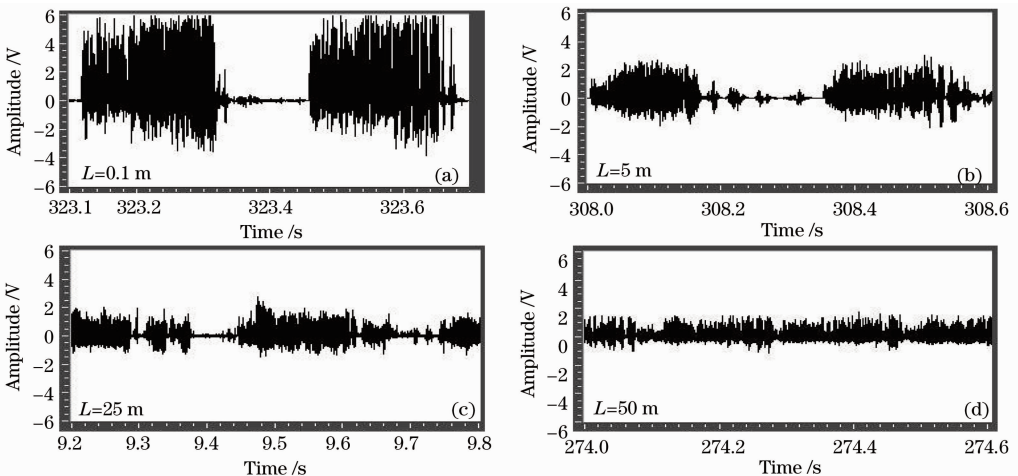


图 6 $R=0.9$ 时不同腔长下幅值随时间的变化情况

Fig. 6 Amplitude versus time when $R=0.9$ under different cavity lengths

了更清晰地验证这一变化趋势,增加腔长 L 为 1.5, 3, 10 和 40 m 时的对比实验。将以上所有腔长对应输出的平均幅值对 $L=0.1$ m 时的平均幅值做归一化,可以得到图 7,其结果验证了图 2 所示 $R=0.9$ 时,归一化灵敏度的变化趋势。

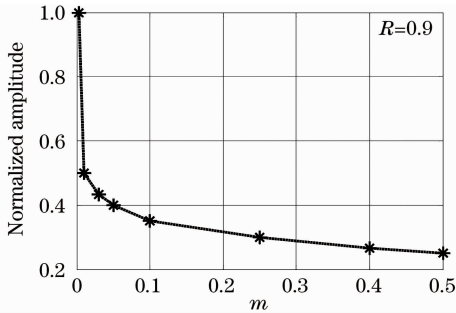


图 7 归一化幅值随比值 m 的变化

Fig. 7 Normalized amplitude versus m

其次,固定腔长 L 为 25 m,选用表 1 中 7 组不同反射率的 FBG 对进行实验,输入激光峰值功率为 -15 dBm,检测各自的平均幅值,并将其对编号为

F-C 光栅对的平均幅值做归一化,可以得到图 8 所示归一化幅值随反射率的变化情况。由图 8 可知,随着反射率的增加,输出幅值先增大后减小,在光栅反射率为 68.38% 时,传感器灵敏度达到最大,这与图 4 所示比值 $m=0.25$ 时,最佳反射率约为 70% 基本符合。图 9 给出了 7 组 FBG 对中 F-A, F-B, F-C, F-D 4 对 FBG 的实验结果图。

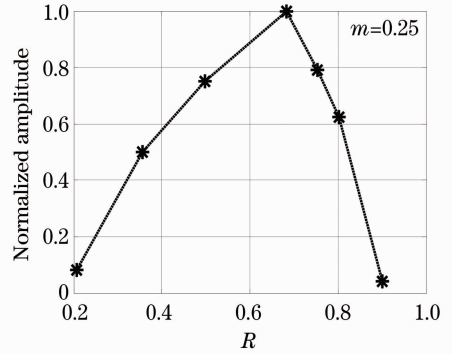


图 8 归一化幅值随反射率的变化

Fig. 8 Normalized amplitude versus reflectivity

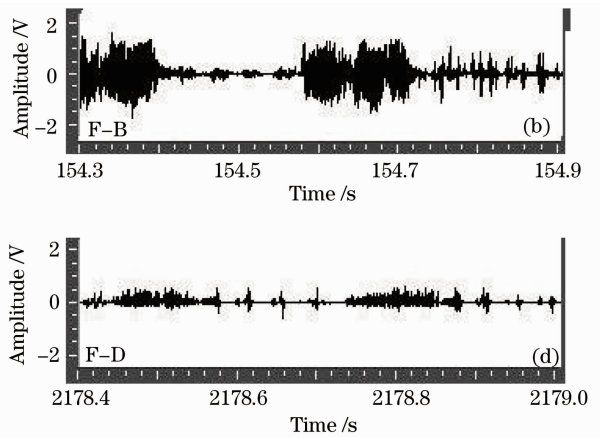
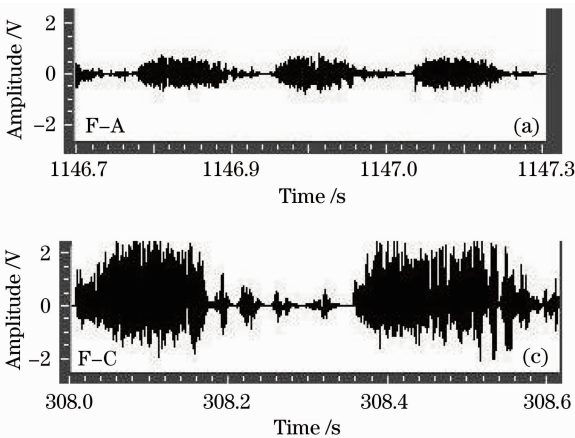


图 9 $m=0.25$ 时 4 对 FBG 幅值随时间的变化情况

Fig. 9 Amplitude of four FBGs versus time when $m=0.25$

4 结 论

影响 FBG FPI 传感器灵敏度的关键因素有腔长、光源相干长度和光栅反射率等。在光栅反射率一定时,增大腔长与光源相干长度的比值,灵敏度会降低,增大反射率将使这一变化趋势更加迅速;固定腔长与光源相干长度时,存在最佳反射率使灵敏度达到最大,该最佳反射率随着腔长与光源相干长度的比值增大而减小,当这个比值大于 1 后,最佳反射率几乎不再变化。研究结果不但具有一定的理论价值,而且在腔长、光源和光栅反射率选择方面,对研制高灵敏度 FBG FPI 传感器具有实际意义。

参 考 文 献

- 1 M. G. Shlyagin, S. V. Miridonov, D. Tentori *et al.*. Twin grating-based interferometric fiber sensor [C]. *Optical Fiber Sensors, OSA Technical Digest, Optical Society of America*, 1997. OThC17
- 2 Y. J. Rao, M. R. Cooper, D. A. Jackson *et al.*. Absolute strain measurement using in fiber Bragg grating-based Fabry-Perot sensor[J]. *Electron. Lett.*, 2000, **36**(8): 708~709
- 3 D. R. Chen, W. S. Liu, M. Jiang *et al.*. High-resolution strain/temperature sensing system based on a high-finesse fiber cavity and time-domain wavelength demodulation [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2009, **27**(13): 2477~2481
- 4 X. K. Wan, H. F. Taylor. Intrinsic fiber Fabry-Perot temperature sensor with fiber Bragg grating mirrors[J]. *Opt. Lett.*, 2002, **27**(16): 1388~1390
- 5 K. Takao, E. Yasufumi, I. Hiroshi. Highly accurate fiber strain sensor based on low reflective fiber Bragg gratings and fiber

- Fabry-Perot cavities[C]. *Optical Fiber Sensors, DSA Technical Digest, Optical Society of America*, 2006. TuE12
- 6 Z. G. Guan, D. R. Chen, S. L. He. Coherence multiplexing of distributed sensors based on pairs of fiber Bragg gratings of low reflectivity [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2007, **25** (8): 2143~2148
- 7 T. Erdogan. Fiber grating spectra[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 8 Wenhua Ren, Peilin Tao, Zhongwei Tan *et al.*. Theoretical and experimental investigation of the mode-spacing of fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2009, **7**(9): 775~777
- 9 S. V. Miridonov, M. G. Shlyagin, D. Tentori. Twin-grating fiber optic sensor demodulation [J]. *Opt. Commun.*, 2001, **191**(3-6): 253~262
- 10 Wang Yanhua, Liu Yan, Tan Zhongwei *et al.*. Modified rouard method for fiber Bragg grating Fabry-Perot cavity [J]. *Acta*

- Optica Sinica*, 2008, **28**(5): 840~845
- 王燕花,刘艳,谭中伟等.用于光纤布拉格光栅法布里-珀罗腔的改进的 Rouard 算法[J]. *光学学报*, 2008, **28**(5): 840~845
- 11 Yuan Zongheng, Liu Yongzhi, Yang Yapei. Influence of linewidth on sensitivity of intrinsic fiber optic Fabry-Perot magnetic sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20** (8): 1112~1116
- 袁纵横,刘永智,扬亚培.光源线宽对内置式光纤法布里-珀罗磁场传感器灵敏度影响的分析[J]. *光学学报*, 2000, **20**(8): 1112~1116
- 12 Kang Chong, Liu Furong, Huang Zongjun *et al.*. The influence of spectrum width of optical source on the sensitivity of Fabry-Perot optical fiber sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(3): 337~340
- 康崇,刘芙蓉,黄宗军等.光源谱宽对法布里-珀罗干涉式光纤传感器工作灵敏度的影响[J]. *光学学报*, 2004, **24**(3): 337~340

含 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相的微晶玻璃实现 $1.54 \mu\text{m}$ 脉冲激光的调 Q 输出

掺钕玻璃 $1.54 \mu\text{m}$ 波长的被动调 Q 激光器具有结构简单,成本相对较低的特点,可广泛应用于激光测距、测速、雷达探测等领域。目前国外应用较为成熟的被动调 Q 材料是 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体。掺 Co^{2+} 微晶玻璃作为新型的调 Q 材料,调 Q 性能与 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶体相当。且微晶玻璃更易于大尺寸制备。白俄罗斯国际激光中心以含有 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相的微晶化硅酸盐玻璃作为调 Q 元件,在闪光灯抽运的 Er^{3+} 玻璃调 Q 激光器中获得了单脉冲能量 4.6 mJ ,脉宽 60 ns 的输出。在国内,本实验室率先开展了对掺 Co^{2+} 微晶玻璃的研究,制备出了含有 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相的微晶化硅酸盐玻璃。

采用熔融法制备了组成为 $\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{MgO}-\text{TiO}_2-\text{ZrO}_2-\text{CoO}$ 的硅酸盐玻璃,并对制备出的硅酸盐玻璃进行了分步热处理。X 射线衍射(XRD)数据表明经过热处理后的样品含有 MgAl_2O_4 晶相。在玻璃中, Co^{2+} 以六配位存在,在 MgAl_2O_4 晶相中则以四配位存在。具有六配位的 Co^{2+} 在 $1.5 \mu\text{m}$ 处的吸收截面很小,不能作为调 Q 材料。通过微晶化前后吸收光谱的对比,微晶化的样品在 $1.5 \mu\text{m}$ 波长处的吸收有了明显的增强,表明 Co^{2+} 已经进入到了 MgAl_2O_4 晶相中,形成了四配位。

采用含有 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相的硅酸盐微晶玻璃作为调 Q 元件,进行闪光灯抽运钕玻璃棒激光调 Q 实验。采用输出耦合镜的反射率 $R=80\%$ ($1530\sim 1560 \text{ nm}$),腔长为 270 mm 的平平腔结构。对于 $\phi 3 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$ 钕玻璃棒,实现了窄脉宽,

高峰值功率激光输出。如图 1 所示,在 180 J 抽运能量下,获得了脉冲能量 40 mJ ,脉宽 42 ns ,峰值功率 0.95 MW 的 $1.54 \mu\text{m}$ 脉冲激光输出。当重复频率为 0.5 Hz 时,调 Q 脉冲序列的幅度起伏约 40% 。这一结果表明,我们制备的含 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相硅酸盐微晶玻璃能够在 $1.54 \mu\text{m}$ 波长处实现较好的调制,具有实用化的潜力。目前正在对微晶玻璃光学质量、掺杂浓度等进行优化,进一步提高含有 $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ 晶相的硅酸盐微晶玻璃的调 Q 效率。

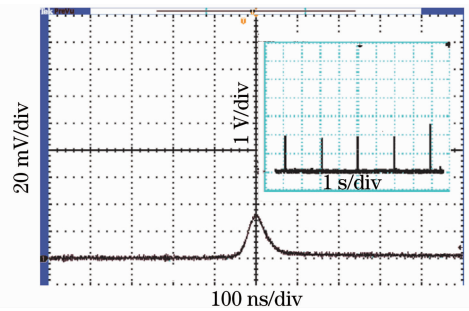


图 1 180 J 抽运能量下的单激光脉冲波形及激光序列

Fig. 1 Output single pulse and pulse train at 180 J pump energy

冯素雅 于春雷 陈力 李顺光 胡丽丽 陈伟
(中国科学院上海光学精密机械研究所,中国科学院强激光材料重点实验室,上海 201800)