

文章编号: 0258-7025(2010)06-1525-07

强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪的 应变传感灵敏度分析

樊帆 赵建林 文喜星 姜碧强

(西北工业大学理学院, 陕西省光信息技术重点实验室, 教育部空间应用物理与化学重点实验室, 陕西 西安 710072)

摘要 根据强度解调型光纤光栅法布里-珀罗干涉仪(FBG-FPI)的应变传感原理, 分析讨论了其光栅栅长、折射率调制深度、干涉仪腔长以及与换能器的结合方式等因素对传感器最大应变灵敏度的影响; 同时对比分析了强度解调型 FBG-FPI 与单个光纤布拉格光栅(FBG)以及传统光纤法布里-珀罗干涉仪的应变传感灵敏度差异。结果表明, 强度解调型 FBG-FPI 应变传感器的理论可探测最小应变量达 10^{-12} 量级。利用 FBG-FPI 粘贴压电陶瓷(PZT)提供的微小周期性应变实验证明, 强度解调型 FBG-FPI 应变传感器具有对微弱交变应变信号的探测能力, 并且在进行非线性修正后, 该应变传感器还具有良好的线性响应特性。

关键词 传感器; 光纤传感; 光纤布拉格光栅; 法布里-珀罗干涉仪; 应变灵敏度

中图分类号 TN253; TP212.14 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103706.1525

Sensitivity Analysis on Strain Sensor Based on Fabry-Perot Interferometer with Intensity Interrogation

Fan Fan Zhao Jianlin Wen Xixing Jiang Biqiang

(Shaanxi Key Laboratory of Optical Information Technology, The Key Laboratory of Space Applied Physics and Chemistry, Ministry of Education, School of Science, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072, China)

Abstract Based on the principle of intensity interrogation, the sensitivity of the fiber Bragg grating Fabry-Perot interferometer (FBG-FPI) strain sensor is analyzed and the influences of the grating length, the effective refractive index change and the cavity length of FBG-FPI resonator on the maximum strain sensitivity are also discussed. The strain sensitivities of two structures which FBG-FPI fibers are affixed to the transducer by different ways are also considered. The comparison between FBG-FPI and single fiber Bragg grating as well as traditional fiber Fabry-Perot interferometer with intensity interrogation is also presented. It is shown that the minimum theoretically detectable strain of the FBG-FPI strain sensors with intensity interrogation should be on the order of 10^{-12} . The corresponding experiments, in which a periodic strain stimulated by a piezoelectric (PZT) affixed to the FBG-FPI, show that such a FBG-FPI strain sensor can be used to detect weak alternating strain signal and it has good linear character after the non-linear correction.

Key words sensors; fiber sensor; fiber Bragg grating; Fabry-Pérot interferometer; strain sensitivity

1 引言

自从 Hill^[1]于 1993 年提出利用紫外光照射相位掩模板制备光纤布拉格光栅(FBG)以来, FBG 的制作真正走向了实用化和产业化。十多年来, FBG 的应用研究迅猛发展, 已成为目前最有发展前途和

最具代表性的光纤无源器件之一。

FBG 应用于传感领域, 由于具有体积小、质量轻、可靠性高和电磁绝缘性好等优点, 受到了广泛关注^[2-6], 其传感的基本原理是将各类待测信号, 通过换能器结构转化为 FBG 的应变, 进而利用 FBG 发

收稿日期: 2009-09-21; 收到修改稿日期: 2009-11-10

作者简介: 樊帆(1984—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感技术方面的研究。E-mail: doublefan@yahoo.com.cn

导师简介: 赵建林(1958—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光信息技术及应用等方面的研究。

E-mail: jlzhao@nwpu.edu.cn(通信联系人)

生应变时所引起的光谱中心波长的漂移,实现对待测信号的探测^[4~8]。因此,具有换能结构的各种 FBG 传感器,都可以归结为 FBG 应变传感器。

现有的 FBG 应变传感器,包括基于单 FBG^[7,8], 双重 FBG^[9] 以及光纤光栅法布里-珀罗干涉仪(FBG-FPI)^[10] 等类型,多以波长解调为主。而目前的波长解调设备价格普遍较昂贵,且解调精度有限,对 FBG 中心波长的漂移量的检测很难达到皮米以下量级^[11],无法用于微弱应变信号的检测。此外,大多数波长解调设备的响应频率很低,仅为几赫兹,无法解调较高频率的应变信号,因而也限制了其在某些领域的发展。强度解调型 FBG-FPI 应变传感器^[12,13],虽然在绝对测量范围上受到一定的限制,但该解调方式可以极大地提高检测灵敏度,同时,可检测的信号频率范围较大,因而特别适合于微弱应变信号的探测。本文根据强度解调型 FBG-FPI 的应变传感原理,从理论上分析该类型传感器的最小应变探测量以及 FBG-FPI 的各种参量和 FBG-FPI 与换能器的结合方式等对应变灵敏度的影响,同时给出强度解调型 FBG-FPI 与单 FBG 以及传统的光纤法布里-珀罗干涉仪(FFPI)应变传感器的灵敏度比较结果。

2 强度解调型 FBG-FPI 的应变灵敏度计算

在同一根单模光纤中相隔一定距离写入两个参数相同的 FBG,便构成一个 FBG-FPI,其中两个 FBG 之间部分构成一个谐振腔。强度解调型 FBG-FPI 的应变传感原理如图 1 所示,在 FBG-FPI 的反射光谱最大干涉峰两侧,分别有一段近似线性的光谱区,当 FBG-FPI 受到沿轴线方向的均匀应力作用时,所产生的应变会导致其反射光谱发生漂移。当采用频率与强度较为稳定的窄带光源,并将其中心

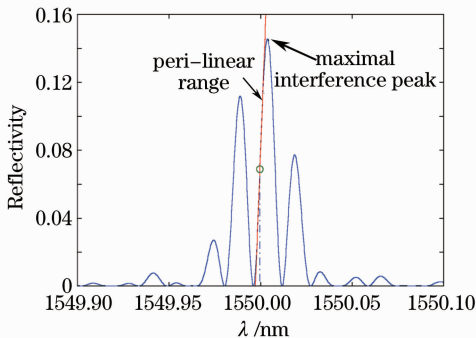


图 1 强度解调型 FBG-FPI 的应变传感原理

Fig. 1 Strain sensing principle of the FBG-FPI with intensity interrogation

波长固定于 FBG-FPI 反射光谱的线性区时,应变导致的光谱漂移会使反射光强随应变呈近似线性变化(假设应变大小不致使窄带光源偏离光谱线性区域)。通过光电检测装置解调反射光强,即可得知 FBG-FPI 的应变信息。

根据强度解调原理,FBG-FPI 的反射率可以表示成以波长 λ 为参量、应变 ϵ 为自变量的函数,即可表示为 $I_R(\epsilon; \lambda)$ 。设反射率对应变的导数 $dI_R(\epsilon; \lambda)/d\epsilon$ (即应变灵敏度)取最大值时的波长为 λ_0 ,即

$$\left(\frac{dI_R}{d\epsilon} \right)_{\max} = \left. \frac{dI_R(\epsilon; \lambda)}{d\epsilon} \right|_{\lambda=\lambda_0} \quad (1)$$

若将窄带光源的工作波长稳定在 λ_0 处,则当 FBG-FPI 受到微小应变 $\Delta\epsilon$ 的扰动时,即可获得最大的反射光强变化。

原则上可以求出应变灵敏度 $dI_R(\epsilon; \lambda)/d\epsilon$ 随波长 λ 变化关系的解析表达式,但其过于繁琐。为方便起见,本文采用数值解。现根据换能器与 FBG-FPI 结合的不同方式,分两种情况讨论 ϵ 对 FBG-FPI 反射率的变化。

2.1 应变仅作用于 FBG-FPI 的谐振腔

应变仅作用于 FBG-FPI 的谐振腔时,其对 FBG-FPI 反射率的变化,主要取决于弹光效应引起的谐振腔纤芯有效折射率的变化,以及应变引起的谐振腔腔长的变化,具体表示为^[14]

$$h'_c = h_c(1 + \epsilon), \quad (2)$$

$$n'_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(1 - \epsilon P_e), \quad (3)$$

式中 n_{eff} 与 n'_{eff} 分别为受应变作用前后谐振腔纤芯的有效折射率, h_c 与 h'_c 分别为受应变作用前后谐振腔的腔长, P_e 为光纤材料的有效弹光系数。通过(2), (3)式的代换,将新的反射率表达式对应变 ϵ 求导,即可得到该情况下 FBG-FPI 的应变灵敏度随波长的变化关系。由图 2 可以看到,最大应变灵敏出现在 FBG-FPI 反射光谱线性区某处。取光栅长度 $L =$

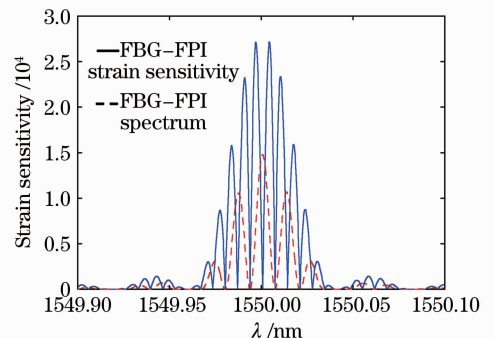


图 2 FBG-FPI 应变灵敏度随波长的变化

Fig. 2 Strain sensitivity of the FBG-FPI versus wavelength

2 cm, 折射率调制深度 $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$, 谐振腔腔长 $h_c = 4$ cm, 可得最大应变灵敏度为 $dI_R/d\varepsilon|_{\max} = 2.7 \times 10^4$ 。

为提高 FBG-FPI 的最大应变灵敏度, 改变其参数, 考察谐振腔腔长 h_c 以及光栅长度 L 与折射率调制深度 Δn 对最大应变灵敏度的影响。

图 3 给出了应变仅作用于 FBG-FPI 的谐振腔时, 最大应变灵敏度随 h_c 的变化关系。由于 h_c 在波长范围的改变即会引起反射光强的变化, 导致最大应变灵敏度在局部范围内振荡。但从整体上观察, 最大应变灵敏度随 h_c 基本呈线性变化, 且振荡的幅度随 h_c 的增大基本保持不变。图 4 为谐振腔两侧光栅的栅长 L 与 Δn 对最大应变灵敏度的影响。从图中可以看到, 最大应变灵敏度随 L 及 Δn 非线性地加速增长。

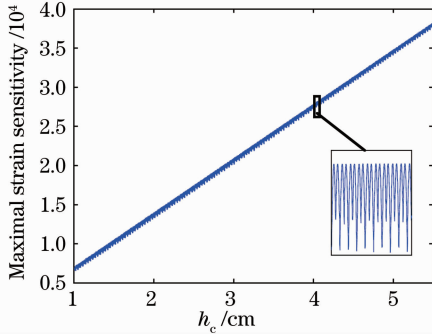


图 3 应变仅作用于谐振腔腔体时 FBG-FPI 最大应变灵敏度随腔长 h_c 的变化

Fig. 3 Maximal strain sensitivity of the FBG-FPI versus h_c , while strain only applied to the cavity

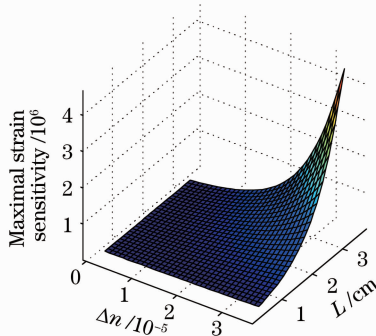


图 4 应变仅作用于 FBG-FPI 的谐振腔时, 最大应变灵敏度随 L 及 Δn 的变化

Fig. 4 Maximal strain sensitivity of the FBG-FPI versus L and Δn , while strain only applied to cavity

2.2 应变同时作用于 FBG-FPI 的谐振腔及两侧光栅

当应变同时作用于 FBG-FPI 谐振腔及两侧光栅时, 应变 ε 会引起谐振腔腔长 h_c 及纤芯有效折射率 n_{eff} 的改变, 同时, 也会引起两侧光栅周期 Λ 以及

光栅有效折射率 $n_{\text{eff}2}$ 的改变, 即有

$$n'_{\text{eff}1} = n_{\text{eff}1} (1 - \varepsilon P_c), \quad (4)$$

$$n'_{\text{eff}2} = n_{\text{eff}2} (1 - \varepsilon P_c), \quad (5)$$

$$\Lambda' = \Lambda (1 + \varepsilon), \quad (6)$$

$$h' = h (1 + \varepsilon). \quad (7)$$

同样, 最大应变灵敏度随 h_c , 光栅栅长 L 及折射率调制深度 Δn 的变化情况分别如图 5 与图 6 所示。由图 5 可以看出, h_c 在 1~5.5 cm 变化范围内, 最大应变灵敏度总是高于图 3 的结果; 同时, 最大应变灵敏度同样具有在局部范围内振荡, 整体上呈线性增长的特点, 但与图 3 的不同是振荡的幅度随着 h_c 的增大而逐渐减小。图 6 与图 4 结果十分相似, 所不同的是, 在图 6 的取值范围内, 最大应变灵敏度略高于图 4 结果。

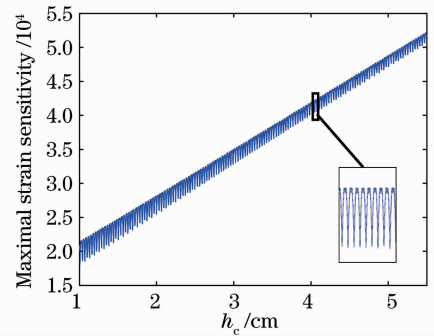


图 5 应变同时作用于谐振腔及两侧光栅时 FBG-FPI 最大应变灵敏度随腔长 h_c 的变化

Fig. 5 Maximal strain sensitivity of FBG-FPI versus h_c , while strain applied to both the cavity and FBG

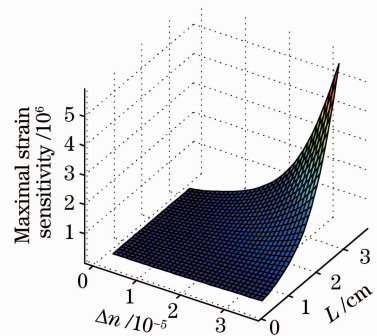


图 6 应变同时作用于谐振腔及两侧光栅时 FBG-FPI 最大应变灵敏度随 L 及 Δn 的变化

Fig. 6 Maximal strain sensitivity of FBG-FPI versus L and Δn , while strain applied to both the cavity and FBG

3 强度解调型 FBG-FPI 与 FBG 的比较

利用 FBG 反射谱两侧的近似线性区域 (图 7), 同样可以实现强度解调型传感。此时, 应变 ε 对 FBG 反射率的改变主要是通过通过对 FBG 栅长 L 及光

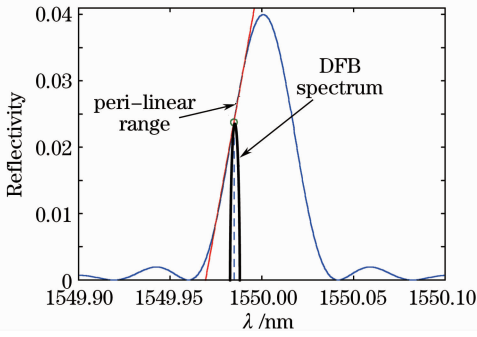


图 7 强度解调型 FBG 的应变传感原理

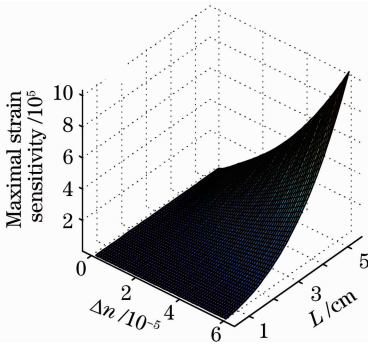
Fig. 7 Strain sensing principle of the FBG with intensity interrogation

栅周期 Λ 的改变来实现,即

$$n'_{\text{eff}} = n_{\text{eff}}(1 - \epsilon P_e), \quad (8)$$

$$\Lambda' = \Lambda(1 + \epsilon). \quad (9)$$

图 8 给出了 FBG 最大应变灵敏度随 L 及 Δn 的变化关系,对比图 4 与图 6 可以看出,在相同的光栅参数情况下,FBG 的应变灵敏度远小于 FBG-FPI 的应变灵敏度,大致为 FBG-FPI 应变灵敏度的 1/10。取 $L=2 \text{ cm}$, $\Delta n=5 \times 10^{-6}$, 可得 FBG 最大应变灵敏度为 $dI_R/d\epsilon|_{\text{max}} = 2.0 \times 10^3$ 。

图 8 L 与 Δn 对 FBG 最大应变灵敏度的影响Fig. 8 Maximal strain sensitivity of FBG versus L and Δn

4 强度解调型 FBG-FPI 与 FFPI 的比较

传统的 FFPI 是在相隔一定距离的光纤两相对端面上制作两个反射率相同的镜面而形成的。与 FBG-FPI 的不同之处在于,FFPI 的镜面反射谱不会受到 FBG 反射谱型的调制。图 9 为采用强度解调时,FFPI 的应变灵敏度随波长的变化关系。由于应变作用于 FFPI 时,只改变 FFPI 的腔长 h_c 及谐振腔纤芯的有效折射率 n_{eff} ,而其他参数不受影响,类似于应变仅作用于 FBG-FPI 谐振腔的情况。

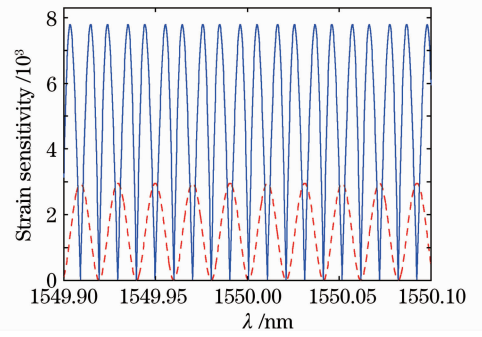


图 9 FFPI 应变灵敏度随波长的变化

Fig. 9 Strain sensitivity of the FFPI versus wavelength

取与 FBG-FPI 中 FBG 参数等效的 FFPI 镜面反射率 R (取 $L=2 \text{ cm}$, $\Delta n=5 \times 10^{-6}$ 时, $R=3.99 \times 10^{-2}$), 对比该反射率下 FFPI 的最大应变灵敏度随 h_c 的变化关系,如图 10 所示。可以看出,由于干涉峰不受 FBG 反射谱调制,FFPI 的最大应变灵敏度不会发生局部振荡,但由于计算时截取一段光谱窗口,FFPI 的最大应变灵敏度呈阶跃式增长。但整体上,FFPI 最大应变灵敏度随 h_c 的变化与 FBG-FPI (图 3) 相比并无大异,均按照相同的斜率近似线性地增长,因而对于强度解调而言,完全可以利用 FBG-FPI 替代传统的 FFPI。

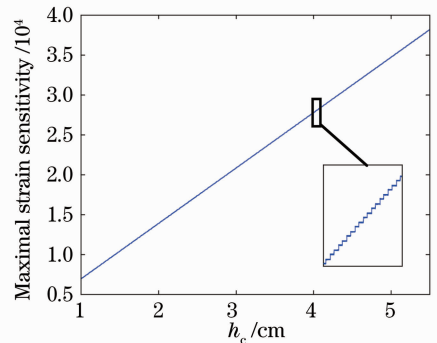


图 10 FFPI 应变灵敏度最大值随腔长的变化

Fig. 10 Maximal strain sensitivity of the FFPI versus h_c

5 强度解调型 FBG-FPI 传感器可探测的最小应变

设 FBG-FPI 初始时所受应变 $\epsilon_0 = 0$, 之后受到一个微小应变 $\Delta\epsilon$ 的扰动,使得光强发生改变,由于 $\Delta\epsilon$ 很小,在忽略高次项情况下,归一化光强反射率可表示为

$$I_R(\epsilon_0 + \Delta\epsilon) \Big|_{\epsilon_0=0} = I_R(\epsilon_0) + \Delta\epsilon \left(\frac{dI_R}{d\epsilon} \right)_{\text{max}} \Big|_{\epsilon_0=0}. \quad (10)$$

当反射光输出至光电二极管时,应变所导致的光电流变化 i_p 为^[15]

$$i_p = I_0 \frac{e\eta}{h\nu} \Delta\epsilon \left(\frac{dI_R}{d\epsilon} \right)_{\max}, \quad (11)$$

式中 e 为电子电量, η 为量子效率, h 为普朗克常量, ν 为光源频率, I_0 为光源光强。

光电二极管的噪声主要考虑散粒噪声对它的影响, 其最大均方噪声电流可表示为^[15]

$$\overline{i_n^2} = 2e \left(\frac{I_0 I_R e \eta}{h\nu} \right) \Delta f. \quad (12)$$

则光电二极管的信噪比为

$$\frac{S}{N} = \frac{\overline{i_p^2}}{\overline{i_n^2}} = \frac{I_0}{2\Delta f I_R} \frac{\eta}{h\nu} \left[\Delta\epsilon \left(\frac{dI_R}{d\epsilon} \right)_{\max} \right]^2. \quad (13)$$

忽略其他电路噪声, 当光电流的变化 i_p 完全淹没于散粒噪声电流中, 即信噪比 $(S/N) = 1$ 时, 得到理论上可探测的最小应变为

$$(\Delta\epsilon)_{\min} = \frac{1}{(dI_R/d\epsilon)_{\max}} \sqrt{\frac{2\Delta f I_R}{I_0} \cdot \frac{h\nu}{\eta}}, \quad (14)$$

式中 $\lambda = 1550 \text{ nm}$, $\eta = 0.5$, $\Delta f = 1 \text{ kHz}$, $h = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$, $I_0 = 4 \text{ mW}$ 。当取 $L = 2 \text{ cm}$, $\Delta n = 5 \times 10^{-6}$, $h_c = 4 \text{ cm}$ 时, FBG-FPI 灵敏度的最大值为 $(dI_R/d\epsilon)_{\max} = 2.7 \times 10^4$, 可以探测的最小应变量为 $\Delta\epsilon_{\text{FBG-FPI}}|_{\min} = 3.46 \times 10^{-12}$ 。

需要指出的是, (14) 式中, 分子含有 $(I_R)^{1/2}$ 项。当 $I_R \rightarrow 0$ 时, 似乎可以得到 $\Delta\epsilon_{\min} \rightarrow 0$ 。实际上, 因为 I_R 的零值点也是 $dI_R/d\epsilon$ 的零值点, 当 $I_R \rightarrow 0$ 时, 一般有 $(I_R)^{1/2}/(dI_R/d\epsilon) \rightarrow \infty$, 同时, 由于 $(I_R)^{1/2}/(dI_R/d\epsilon)$ 的极值点一般在 $(I_R)^{1/2}/(dI_R/d\epsilon)_{\max}$ 附近出现, 且二者相差无几, 因而, 采用 $(dI_R/d\epsilon)_{\max}$ 对传感器在散粒噪声极限下可探测的最小应变量进行估算是可信的。

6 强度解调型 FBG-FPI 的应变实验研究

图 11 为强度解调型 FBG-FPI 的应变传感实验装置。其中所用光源为分布反馈式激光器 (DFB), 其带宽 $\Delta f < 10 \text{ MHz}$, 所用 FBG-FPI 腔长为 2 cm ,

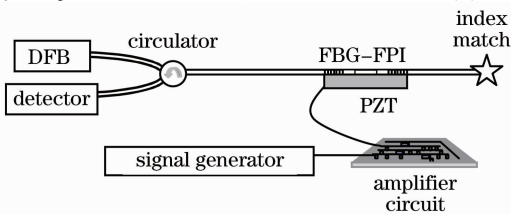


图 11 强度解调型 FBG-FPI 应变传感实验装置示意图

Fig. 11 Experimental setup of strain sensor based on FBG-FPI with intensity interrogation

单栅的中心波长为 1551.308 nm , 反射率大于 95% 。将 FBG-FPI 粘贴于压电陶瓷 (PZT) 上, 其与压电陶瓷的有效作用长度为 2 cm 。强度解调所用的 FBG-FPI 光谱区如图 12 所示。实验时, 由信号发生器与放大电路产生周期性电压, 驱动压电陶瓷产生应变, 由于电压值很小, 可认为驱动电压与压电陶瓷应变成线性变化关系。

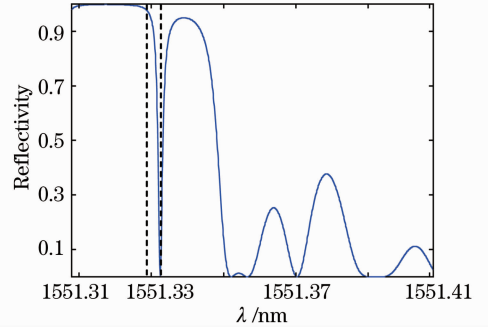


图 12 强度解调所用的 FBG-FPI 光谱段

Fig. 12 Used range of FBG-FPI spectrum

室温下 ($20 \text{ }^\circ\text{C}$), 当压电陶瓷驱动为频率 10 Hz , 电压幅值分别为 90 mV 和 180 mV 的锯齿波时, 得到探测波形与模拟波形对比如图 13 和 14 所示。可以看出, 由于所选 FBG-FPI 光谱区域的非线性性 (图 12), 所得到的光电探测波形会发生畸变, 这与模拟结果一致。同时, 由图 13 和 14 还可以看出, 由于光源的不稳定性、未知振动噪声以及光电探测电路噪声的干扰, 实际探测波形较之模拟波形存在较大噪声。

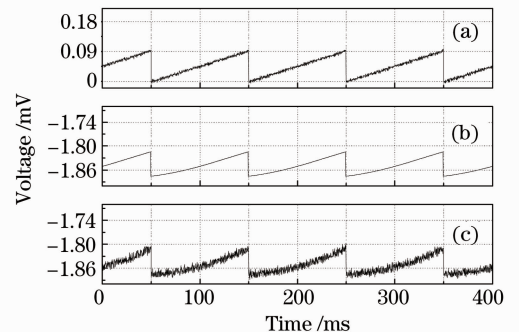


图 13 10 Hz 90 mV 锯齿波驱动得到的探测波形与模拟波形的对比。(a) 驱动电压波形; (b) 相应的模拟波形; (c) 探测波形

Fig. 13 Experimental and simulated output waves with the drive voltage of 10 Hz sawtooth wave and the intensity of 90 mV . (a) drive voltage wave; (b) simulated output wave; (c) experimental output wave

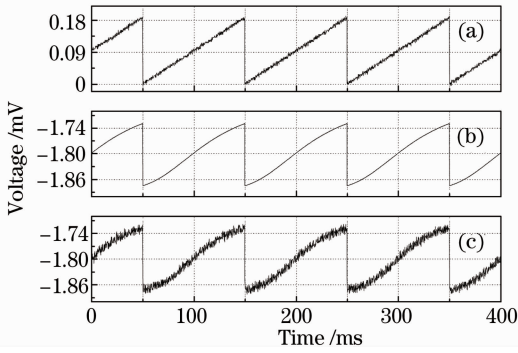


图 14 10 Hz 180 mV 锯齿波驱动得到的探测波形与模拟波形的对比。(a) 驱动电压波形;(b) 相应的模拟波形;(c) 探测波形

Fig. 14 Experimental simulated output waves with the drive voltage of 10 Hz sawtooth wave and the intensity of 180 mV. (a) drive voltage wave; (b) simulated output wave; (c) experimental output wave

图 15 和 16 为 10 Hz 正弦电压驱动时(幅值分别为 90 mV 与 180 mV),探测波形与模拟波形的对比。同样是由于光谱的非线性性,使得探测波形较之驱动电压波形略有畸变。

调整驱动电压,得到压电陶瓷驱动电压峰-峰值与光电探测器探测电压峰-峰值关系如图 17 所示。由图 17 可知,当驱动电压大于 165 mV 时,由于 FBG-FPI 光谱的非线性性,使得探测电压出现饱和。根据图 12 所使用的 FBG-FPI 光谱曲线,对非线性部分进行修正。修正后的驱动电压与探测电压的线性关系得到改善,其线性度为 99.6%。

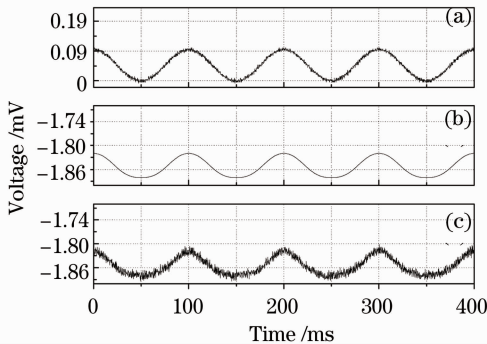


图 15 10 Hz 90 mV 正弦波驱动得到的探测波形与模拟波形的对比。(a) 驱动电压波形;(b) 相应的模拟波形;(c) 探测波形

Fig. 15 Experimental and simulated output waves with the drive voltage of 10 Hz sine wave and the intensity of 90 mV. (a) drive voltage wave; (b) simulated output wave; (c) experimental output wave

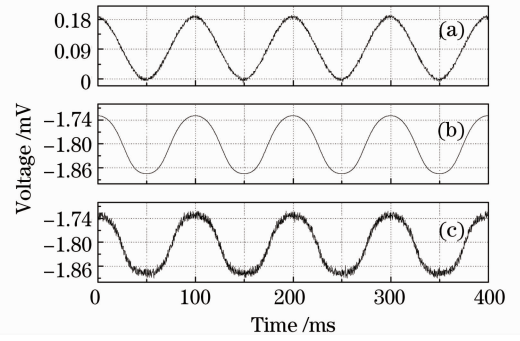


图 16 10 Hz 180 mV 正弦波驱动得到的探测波形与模拟波形的对比。(a) 驱动电压波形;(b) 相应的模拟波形;(c) 探测波形

Fig. 16 Experimental and simulated output waves with the drive voltage of 10 Hz sine wave and the intensity of 180 mV. (a) drive voltage wave; (b) simulated output wave; (c) experimental output wave

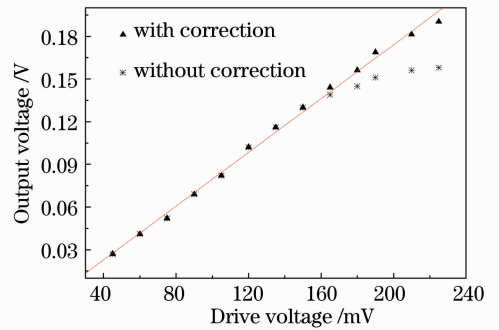


图 17 驱动电压与实验输出电压的关系

Fig. 17 Drive voltage versus output voltage

7 结 论

根据强度解调型 FBG-FPI 的应变传感原理,分析了 FBG-FPI 的各种参数以及 FBG-FPI 与换能器的结合方式对应变灵敏度的影响。结果表明,1) 改变 FBG-FPI 的栅长 L 与折射率调制深度 Δn ,可非线性地提高最大应变灵敏度,而改变腔长 h_c 只能近似线性地提高最大应变灵敏度,因此,对于增大应变灵敏度而言,改变 L 与 Δn 的效果优于改变 h_c ; 2) 根据 FBG-FPI 与换能器结合两种不同方式,应变作用于 FBG-FPI 谐振腔及两侧光栅方式的最大应变灵敏度略高于仅作用于谐振腔方式; 3) 选用典型参数的 FBG-FPI 最大应变灵敏度高于 FBG 1 个数量级以上; 4) 对于强度解调型传感,利用 FBG-FPI 可达到与 FFPI 相同的探测灵敏度,因此完全可以用 FBG-FPI 替代传统的 FFPI; 5) 采用典型参数的 FBG-FPI 可探测的最小应变可达到 10^{-12} 量级,因

而该类型传感器特别适合于对微弱交变信号的探测。6)非线性修正后的强度解调型 FBG-FPI 应变传感器,线性响应度较好,具有对较高频率的应变信号的探测能力。

应当指出的是,在增大应变灵敏度的同时,强度解调型传感器对光源的波长稳定性要求也将大大提高,对于具有一定波长稳定性的光源,强度解调型应变传感器的灵敏度是有上限的,不可能无限提高;同时,灵敏度的提高会相应地减小应变的绝对测量范围。因此,对于灵敏度与绝对测量范围要求都很高的情况,可以考虑采用波长解调与强度解调相结合的方法,以达到最佳探测效果。

参 考 文 献

- 1 Kenneth O. Hill. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV expose through a phase mask [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1993, **62**(10): 1035~1037
- 2 Turan Erdogan. Fiber grating spectra [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1277~1294
- 3 Alan D. Kersey, Michael A. Davis, Heather J. Patrick *et al.*. Fiber grating sensor [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8): 1422~1463
- 4 Yu Youlong, Ye Hong'an, Liu Zhiguo *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
- 5 Wentao Zhang, Yudong Liu, Fang Li. Fiber Bragg grating hydrophone with high sensitivity [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(9): 631~633
- 6 Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang *et al.*. High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating [J]. *Acta Optica Sinica*, 2006, **26**(8): 1136~1139
陈建军, 张伟刚, 涂勤昌等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器 [J]. *光学学报*, 2006, **26**(8): 1136~1139
- 7 Dong Xinyong, Guan Bai'ou, Zhang Ying *et al.*. Simultaneous displacement and temperature measurement using one fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2001, **A28**(7): 621~624
董新永, 关柏鸥, 张 颖等. 单个光纤光栅实现对位移和温度的同时测量 [J]. *中国激光*, 2001, **A28**(7): 621~624
- 8 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying *et al.*. Research on the simultaneous measurements of pressure and temperature using one fiber grating [J]. *Chinese J. Lasers*, 2000, **A27**(11): 1003~1006
刘云启, 郭转运, 张 颖等. 单个光纤光栅压力和温度的同时测量 [J]. *中国激光*, 2000, **A27**(11): 1003~1006
- 9 Bao Jilong, Zhang Xianmin, Chen Kangsheng *et al.*. Analysis of dual overwritten fiber Bragg grating by coupled-mode theory [J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(10): 1165~1170
鲍吉龙, 章献民, 陈抗生等. 双重光纤布拉格光栅的耦合理论分析 [J]. *光学学报*, 2001, **21**(10): 1165~1170
- 10 Shen Zhenqiang, Zhao Jianlin, Zhang Xiaojuan. Frequency-division multiplexing technique of fiber grating Fabry-Pérot sensors [J]. *Acta Optica Sinica*, 2007, **27**(7): 1173~1177
沈震强, 赵建林, 张晓娟. 光纤光栅法布里-珀罗传感器频分复用技术 [J]. *光学学报*, 2007, **27**(7): 1173~1177
- 11 Wang Yunxin, Liu Tiegeng, Jiang Junfeng. Development of a portable wavelength demodulation instrument for fiber Bragg grating [J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2007, **28**(6): 1104~1107
王云新, 刘铁根, 江俊峰. 便携式光纤 Bragg 光栅波长解调仪的研制 [J]. *仪器仪表学报*, 2007, **28**(6): 1104~1107
- 12 Lü Quanchao, Zhao Jianlin, Zhou Wangmin *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for simultaneous measurement of current and temperature [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2009, **38**(11): 2810~2815
吕全超, 赵建林, 周王民等. 一种同时测量电流和温度的光纤光栅传感器 [J]. *光子学报*, 2009, **38**(11): 2810~2815
- 13 Cheng Zhenlong, Zhao Jianlin, Zhou Wangmin *et al.*. A vibration sensor on fiber Bragg grating Fabry-Pérot cavity [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2010, **39**(1): 47~52
成振龙, 赵建林, 周王民等. 一种基于光纤光栅法布里-珀罗腔的低频振动传感器 [J]. *光子学报*, 2010, **39**(1): 47~52
- 14 C. D. Butter, G. B. Hucker. Fiber optics strain sensor [J]. *Appl. Opt.*, 1978, **17**(18): 2867~2869
- 15 Mu Jiading, Xu Wenjuan, Mou Tongsheng. Optoelectronic Technique. [M]. Hangzhou: Zhejiang University Press, 1995. 52~56
缪家鼎, 徐文娟, 牟同升. 光电技术 [M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1995. 52~56