

基于近 PMTP 区域双峰谐振效应的长周期 光纤光栅应变传感理论分析

顾铮先 凌 强

上海理工大学理学院光电功能薄膜实验室, 上海 200093

摘要 利用长周期光纤光栅(LPFG)的双峰谐振效应,结合 LPFG 传感器工作于近相位匹配转折点(PMTP)附近的高灵敏度,提出了一种新型的长周期光纤光栅应变传感器的设计方法。利用 LPFG 相位匹配条件,分析了长周期光纤光栅近 PMTP 附近的双峰谐振特性、应变传感特性,发现双峰波长间距对微小应变具有很高的响应度和线性度。进一步讨论了光栅结构参数和包层直径对双峰 LPFG 应变灵敏度的影响,发现光栅周期对该传感器的应变灵敏度、线性和应变测量范围具有很大的影响;光栅长度对谐振峰高度和宽度有较大影响,直接关系到传感器寻峰精度;通过增大包层直径,可以进一步增大应变灵敏度。结果表明,通过选取适合的光栅结构参量和包层半径,该传感器应变灵敏度可比一般长周期光纤光栅应变传感器的应变灵敏度提高2个数量级。这为设计高应变灵敏度双峰谐振 LPFG 应变传感器提供了结构优化的理论支持。

关键词 光纤光学;长周期光纤光栅;双峰谐振;相位匹配转折点;应变特性

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201636.0106005

Theoretical Analysis for Long-Period Fiber Grating Strain Sensor Based on Dual-Peak Resonance near PMTP

Gu Zhengtian Ling Qiang

*Laboratory of Photo-Electric Functional Films, College of Science, University of
Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China*

Abstract A novel long-period fiber grating (LPFG) strain sensor is presented, which is based on dual-peak resonance combined with high sensitivity of LPFG nearby phase-matching turning point (PMTP). The dual-peak resonant characteristics near PMTP and strain sensing properties of LPFG are analyzed firstly by phase-matching condition of LPFG. It is found that dual-peak wavelength spacing has high response and linearity on small strain. Then, the influence of grating structure parameters and cladding diameters on sensitivity of dual-peak based LPFG is discussed and it is found that the grating periods affect the sensitivity, linearity and the range of strain. And the grating lengths have a valid influence on the peak and width, which directly concerns the precision of peak-peak. The results show that the sensitivity could effectively be improved by two orders of magnitude compared with that of the conventional LPFG strain sensor, if selecting the appropriate grating structure parameters and cladding radii. The research provides theoretical foundation for structural optimization of dual-peak resonant LPFG strain sensors with high sensitivity.

Key words fiber optics; long-period fiber grating; dual-peak resonance; phase-matching turning point; strain characteristics

OCIS codes 060.2310; 060.2370; 050.2770

收稿日期: 2015-07-16; 收到修改稿日期: 2015-08-12

基金项目: 国家自然科学基金(60777035)、教育部科学技术研究重点项目(208040)、上海市教育委员会科研创新重点项目(11ZZ131)、上海市重点学科建设项目(S30502)、沪江基金(B14004)

作者简介: 顾铮先(1965—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电工程与测量、光电功能薄膜、光纤传感器等方面的研究。
E-mail: zhengtiangu@163.com

1 引 言

目前,光纤光栅应变传感器已被广泛应用于大型土木工程的结构健康监测,特别是光纤布拉格光栅应变传感器的发展已经相对成熟^[1-2]。长周期光纤光栅(LPFG)因其灵敏度高、抗电磁干扰、体积小、使用寿命长、无后向损耗和测量准确性较高等优点而备受瞩目,LPFG应变传感器的研究具有良好的发展前景。近年来关于LPFG应变的研究多是围绕应变灵敏度、谐振波长的偏移量与应变的线性度以及交叉敏感等方面进行的。刘宏月等^[3]提出了基于LPFG横向负载敏感特性设计出用于混凝土钢筋内部结构应变监测传感器,将应变监测应用到结构健康监测领域。Shu等^[4]提出了基于双峰谐振的LPFG应变传感器,该传感器能够有效监测应变,但线性度较差。

基于双峰谐振LPFG应变传感器充分利用谐振波长对应变引起的周期变化有较大响应的特点,结合LPFG损耗小等优点,可以有效用于应变监测,具有良好的发展前景。当LPFG的光栅周期相对较小时,相位匹配曲线(PMC)在相应波长范围内呈现二次曲线特性。在特定的光栅周期处呈现一个相位匹配转折点(PMTP)。当实际光栅周期小于该周期时,LPFG具有2个谐振峰,表现为双峰效应。当温度^[5]、环境折射率^[6]、应变^[7-8]发生微小变化时,双峰谐振波长将随之改变。基于这种传感机制可以设计高灵敏度的LPFG传感器。陈海云^[9]指出在PMTP附近,PMC的斜率趋近无穷大,即波长对周期变化最为敏感。基于这一思想,本文将其应用于应变监测当中,设计近PMTP区域双峰谐振效应LPFG应变传感器,将具有更高的应变灵敏度和线性度。此外,应变-温度交叉敏感问题^[10-11]一直是LPFG传感技术发展过程中的关注点,近PMTP附近双峰谐振效应LPFG应变传感器也需考虑交叉敏感对应变监测的影响,可以通过选取纤芯、包层热光系数相同的光纤^[12-13]刻制出对温度不敏感的LPFG应变传感器。

本文首先基于耦合模理论分析两包层LPFG双峰谐振效应,给出不同光栅周期下相位匹配转折点附近的透射谱变化曲线;讨论纤芯和包层热光系数相等的LPFG的温度敏感特性,籍以消除应变-温度的交叉敏感。进一步地研究双峰谐振LPFG的应变传感特性,分析光栅参数对双峰谐振波长间距的影响;探讨光纤光栅包层直径对不同应变的灵敏度影响,为设计高灵敏度长周期光纤光栅近PMTP区域双峰谐振应变传感器结构提供一定的理论依据。

2 理论分析

2.1 两包层LPFG结构

图1(a)、(b)分别给出了长周期光纤光栅的结构示意图和折射率分布示意图。采用两包层长周期光纤光栅模型进行耦合模理论分析,将外部介质看作外包层,光纤包层看作内包层。芯层折射率为 n_1 ,半径为 a_1 ;内包层折射率为 n_2 ,半径为 a_2 ;外包层折射率为 n_3 。光栅区域的平均折射率改变量为 σ ,数量级为 10^{-4} 。计算所采用的光纤参数为: $a_1=4.15\ \mu\text{m}$, $a_2=62.5\ \mu\text{m}$; $n_1=1.4628$, $n_2=1.4681$, $n_3=1$;光栅长度 $L=1.0\ \text{cm}$,纤芯平均折射率改变量为 4×10^{-4} 。

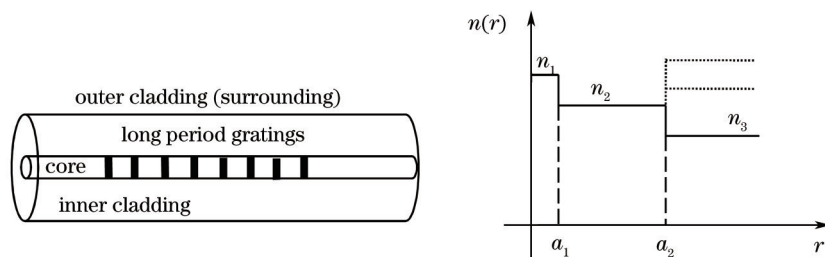


图1 两包层长周期光纤光栅结构示意图。(a)结构模型;(b)折射率分布模型

Fig.1 Schematic of double-cladding LPFG. (a) Structural model; (b) refractive index profile

2.2 相位匹配转折点的确定

LPFG相位匹配条件为

$$n_{\text{eff,co}}(\lambda) - n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda) = \frac{\lambda}{\Lambda}, \quad \nu = 1, 2, 3, \dots, \quad (1)$$

其中, $n_{\text{eff,co}}(\lambda)$ 为波长 λ 处前向传输纤芯模的有效折射率,即 $n_{\text{co}}^{\text{co}}$; $n_{\text{eff,cl}}^{\nu}(\lambda)$ 为波长 λ 处1阶 ν 次包层模式的有效

折射率, 即 $n_{\text{eff}}^{\text{cl}}$, Λ 为光栅周期。纤芯模有效折射率和包层模有效折射率可以通过求解各自特征方程得到^[14-15]。

纤芯模和包层模的有效折射率均和波长有关, 满足相位匹配条件的波长称为谐振波长。在谐振波长处, 纤芯模和高阶次包层模存在较强的能量耦合。当光栅周期较短时, 高阶次包层模 PMC 将呈现二次曲线特性^[16], 出现 2 个波长值可以满足(1)式, 即在透射谱中出现 2 个谐振峰, 称之为双峰效应。

为了获得双峰谐振波长, 利用相位匹配条件(1)式绘制了长周期光纤光栅的周期与各阶包层模式谐振波长的关系曲线, 如图 2 和图 3 所示。图 2 表示波长处在 1100~1900 nm 内低阶次包层模的 PMC。谐振波长随着光栅周期单调增大, 每条 PMC 与代表光栅周期的竖直线之间只存在 1 个交点, 透射谱上呈现为 1 个谐振峰。图 3 反映了高阶次包层模双峰谐振时 PMC 的二次曲线特性。对于给定的光栅周期和包层模, 竖直线与 PMC 之间出现 2 个交点。包层模序数越低, 双峰谐振对应的光栅周期越大。显然, 图 3 中每 1 条 PMC 中必然存在 1 个转折点, 即 PMTP。以包层模序数为 $\nu=17$ 的 $\text{HE}_{1,17}$ 包层模为例, 研究其 PMTP 的特性。

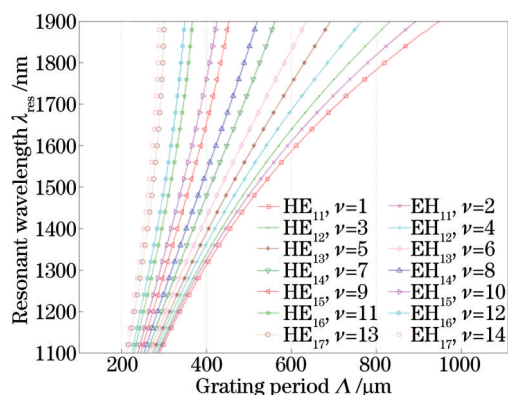


图 2 低次包层模谐振波长与光栅周期关系图

Fig.2 Relation between resonance wavelength and grating period for lower cladding modes

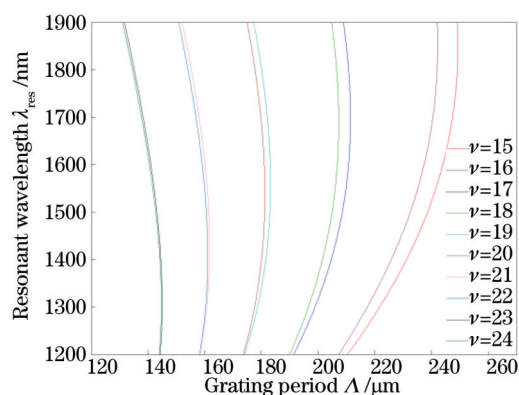


图 3 高次包层模谐振波长与光栅周期关系图

Fig.3 Relation between resonance wavelength and grating period for higher cladding modes

图 4 给出了包层模 $\text{HE}_{1,17}$ 的相位匹配曲线。显见, PMC 存在 1 个 PMTP, 在 PMTP 处, $|d\lambda_{\text{res}}/d\Lambda| \rightarrow \infty$, 即该点斜率为无穷大。当周期小于 PMTP 对应的周期时, 发生双峰谐振。在左趋近 PMTP 区域, $|d\lambda_{\text{res}}/d\Lambda|$ 随着周期的增大而不断增大, 即双峰谐振波长对周期变化更为敏感。考虑当 LPFG 受到应变作用引起的光栅周期的变化, 可利用 LPFG 工作在近 PMTP 区域对周期变化具有更高的响应特性设计高灵敏应变传感器。

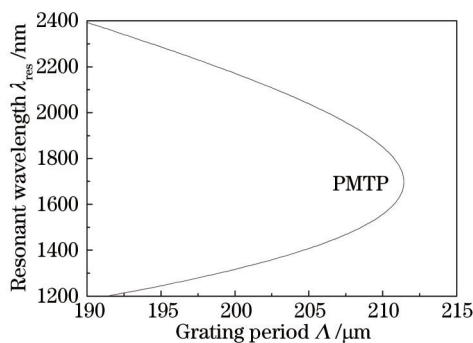


图 4 $\text{HE}_{1,17}$ 包层模相位匹配曲线

Fig.4 Phase-matching curve of $\text{HE}_{1,17}$

2.3 应变-温度交叉敏感的消除

对于 LPFG 应变传感器而言, 如何消除温度对应变测量所带来的干扰至关重要。考虑纤芯与包层热光系数相等时, 近 PMTP 区域双峰谐振效应的 LPFG 双谐振峰随温度变化情况如图 5 所示(其中, 纤芯和包层热光系数均等于 $6.45 \times 10^{-6}/^\circ\text{C}$)。在 $20^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 温度范围内, $\text{HE}_{1,17}$ 包层模双峰形状略有变化, 但谐振波长并无变化, 双峰间距保持不变。因此, 在该条件下近 PMTP 区域双峰谐振效应 LPFG 传感器对温度并不敏感, 能够有效消除应变-温度交叉敏感。

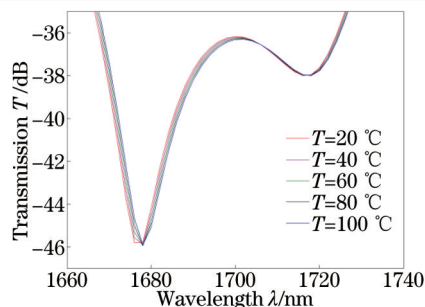


图5 不同温度下 HE_{1,17} 模式透射谱

Fig.5 Transmission spectra of HE_{1,17} at different temperatures

3 近 PMTP 双峰谐振长周期光纤光栅应变传感特性

3.1 近 PMTP 双峰谐振长周期光纤光栅应变传感

长周期光纤光栅受到应变作用时,将会引起 LPFG 的纤芯和包层半径、光栅周期以及折射率的改变。根据 LPFG 耦合模理论,纤芯、包层半径和折射率的变化将改变纤芯模和包层模的有效折射率,并在光栅周期变化的共同作用下进一步引起 LPFG 透射谱的变化。因此应变的微小变化,必定会引起透射谱中损耗峰的较大偏移。当 LPFG 高阶次包层模出现双峰谐振时,相应的 2 个谐振峰的位置将会随着应变的增大而相互靠近。在近 PMTP 区域,LPFG 对周期变化更为敏感。

根据图 4 可得到文中参数下 HE_{1,17} 包层模 PMTP 点对应的光栅周期 Λ_T 约为 211.43 μm 。图 6 给出光栅周期为 211.4 μm 时, HE_{1,17} 包层模在不同应变情况下的透射谱情况。随着应变的增大,双谐振峰不断靠近,且双谐振峰的幅值也有所变化。当应变大于 100 μe 时,双峰重合,仅有一个谐振峰,不能再基于双峰谐振效应进行应变检测,即该应变传感器达到应变检测极限。

图 7 给出了双峰波长间距随应变的变化情况以及仿真曲线。发现随着应变的增大,双峰间距逐渐减小,其应变灵敏度达到 0.162 nm/ μe ,远大于文献[7]中提出的应变传感器的应变灵敏度,为其应变灵敏度大小的 106 倍;另外通过仿真曲线发现其线性度高达 0.993。可见,该传感器能够有效检测微应变的变化,并具有高应变灵敏度和线性度的特点。

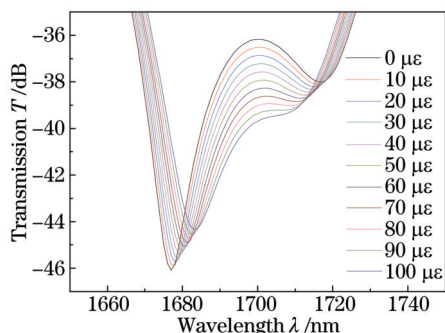


图6 不同应变大小下 HE_{1,17} 模式透射谱

Fig.6 Transmission spectra at different strains of HE_{1,17}

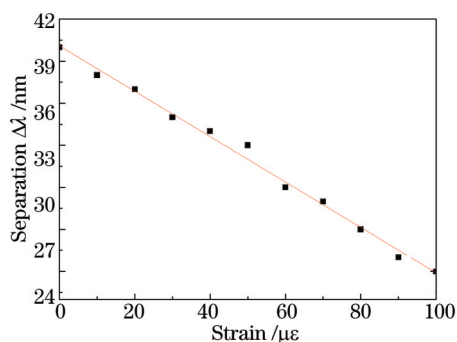


图7 双峰波长差随应变变化散点图及仿真曲线

Fig.7 Scattered point diagram and simulation curve of dual resonance peaks wavelength difference against strain

3.2 不同光栅参量下的双峰谐振应变传感器

为了优化近 PMTP 区域双峰谐振 LPFG 应变传感器的性能,以下就光栅长度、平均折变量和光栅周期对 LPFG 透射谱及应变传感特性的影响进行讨论。

对于 LPFG 而言,光栅长度影响模式耦合深度,耦合深度越大,损耗峰越高。图 8 为平均分析变量为 4×10^{-4} 、光栅周期为 210 μm 时 HE_{1,17} 模式在不同光栅长度时的透射谱。可以看出光栅长度只影响透射谱的高度和宽度,对谐振波长的偏移没有影响。在设计应变传感器时,需要选择合适的光栅长度,以期耦合深度足够大,以便波长解调仪对双峰精确寻峰,提高传感器性能^[17]。

图9为光栅长度为1.0 cm、光栅周期为210 μm时HE_{1,17}模式在不同的光栅平均折变量时的透射谱。可以看出随着光栅折变量的增加,纤芯模与包层模有效折射率将随之变化,使得双峰间距不断减小;且纤芯模与包层模耦合深度也将随之改变,致使透射峰的高度发生变化。对于应变传感器而言,透射峰峰值大,有利于双峰位置的监测。因此,在光栅写入过程中,通过设置曝光时间,实现对曝光量及折变量的控制,获得双谐振峰峰值较高的透射谱。

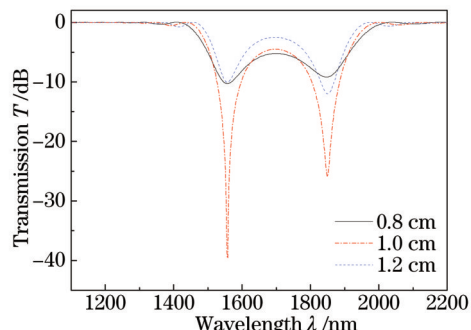


图8 HE_{1,17}模式在不同光栅长度下的透射谱图

Fig.8 Transmission spectra of HE_{1,17} for different grating lengths

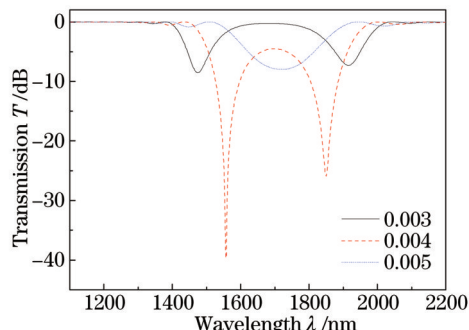


图9 HE_{1,17}模式在不同光栅折变量时的透射谱图

Fig.9 Transmission spectra of HE_{1,17} plotted against grating refractive index modulations

前面提到,光栅周期对传感器的影响较大,不同的光栅周期下,应变传感器具有不同的应变灵敏度。图10(a)、(b)分别给出 Λ_T 为211.43 μm附近2个不同光栅周期($\Lambda_0 = 210 \mu\text{m}$ 、 $211 \mu\text{m}$)下,该类型传感器的双峰间距与应变关系曲线。光栅周期为210 μm时,随着应变的增大,双峰间隔不断减小,即两谐振峰不断靠近。根据线性拟合,应变灵敏度约为0.0259 nm/μ ϵ ,线性度约为0.973,应变测量为0~8000 μ ϵ 。当光栅周期为211 μm时,随着应变增大,双峰间隔同样不断减小,应变灵敏度大小约为0.0455 nm/μ ϵ ,线性度约为0.982,应变测量为0 μ ϵ ~2000 μ ϵ 。由于应变引起光栅周期增大,当光栅周期大于 Λ_T 时,不再表现双峰效应,因此不能再用于波长测量的应变传感。由此可见,光栅周期对应变灵敏度和线性度具有较大影响。光栅周期越靠近 Λ_T ,则应变灵敏度越高,而应变测量范围越小。

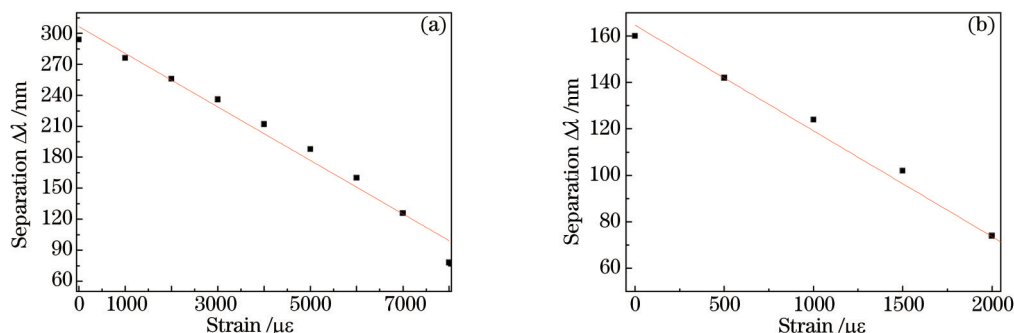


图10 HE_{1,17}模式在不同光栅周期时的双峰间距与应变的关系。(a) $\Lambda_0 = 210 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda_0 = 211 \mu\text{m}$

Fig.10 Separation of dual resonance peaks plotted against strains and simulation curves for different grating periods.

(a) $\Lambda_0 = 210 \mu\text{m}$; (b) $\Lambda_0 = 211 \mu\text{m}$

3.3 光纤光栅包层半径对传感特性的影响

LPFG包层半径对透射谱特性有着重要影响。包层半径的改变,必将引起包层模有效折射率的变化,谐振波长也随之改变。因此,近PMTF区域双峰谐振LPFG应变传感特性必将受到包层半径的影响。

图11给出包层半径分别为62.5、70、80 μm时长周期光纤光栅双峰间距随应变的变化情况。表1给出图11的长周期光纤光栅的PMTF对应的光栅周期 Λ_T 、光栅周期 Λ_0 和应变传感性能参数。对于不同包层半径的LPFG而言,随着应变的增大,双峰间距都在减小;随着包层半径的增大,应变传感灵敏度不断提高,线性度略有变化,但是整体线性度均很高。考察表1中的第3组数据,给定参数下应变灵敏度高达0.257 nm/μ ϵ ,相较文献[7]中提出的长周期光纤光栅应变传感器应变灵敏度为 $1.521 \times 10^{-3} \text{ nm}/\mu\epsilon$,两者相差了169倍。

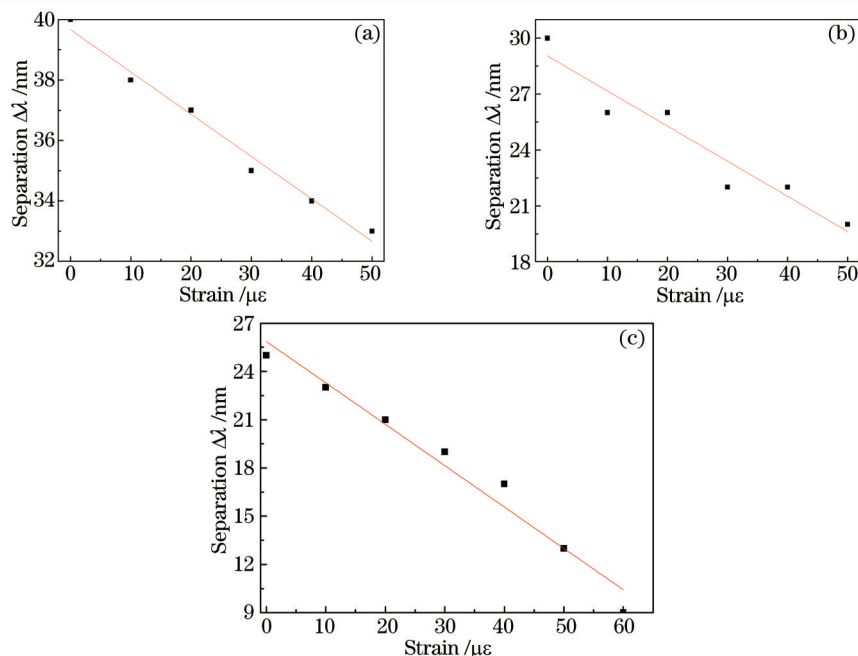


图 11 不同包层半径下双峰间距与应变的关系。(a) 62.5 μm ; (b) 70 μm ; (c) 80 μm .

Fig.11 Separation of dual resonance peaks plotted against strains and simulation curves for different cladding radii.

(a) 62.5 μm ; (b) 70 μm ; (c) 80 μm .

表 1 图 11 中 LPFG 的光栅周期和应变传感参数

Table 1 Grating period and strain sensing parameters of the LPFG in Fig.11

	$r_2 / \mu\text{m}$	$\Lambda_T / \mu\text{m}$	$\Lambda_0 / \mu\text{m}$	Sensitivity / (nm/ μE)	Linearity
1	62.5	211.43	211.40	0.163	0.973
2	70	189.07	189.06	0.191	0.974
3	80	182.02	182.01	0.257	0.964

综上所述,光栅长度影响谐振峰峰值大小,不影响谐振峰位置;纤芯折变量同时影响谐振峰峰值透射率和谐振波长。因此,在其他参量确定的情况下,可以在光栅刻制过程中,通过改变光栅长度和纤芯折变量,实时监测透射谱,得到耦合深度较大的 LPFG。光栅周期越靠近 PMTP,则传感器应变灵敏度越高,线性度越好,应变测量范围越小,因此可以根据实际需要选取光栅周期。包层半径对传感器应变传感性能有着重要影响,通过增大包层半径能够有效增大应变灵敏度,厚包层光纤可以在光纤拉制过程中获得^[18]。

3.4 光纤光栅的设计敏化及封装

通过前文分析,在该 LPFG 应变传感器的设计、敏化和封装过程中,需注意以下几个方面。首先,应选取纤芯热光系数和包层热光系数相等的光纤以用于 LPFG 刻制,从而消除应变-温度交叉敏感效应。其次,必须考虑近 PMTP 参数的选取。一方面,在 LPFG 刻制过程中,通过监测光栅长度对耦合深度的影响,刻制出耦合强度较大的 LPFG;另一方面,LPFG 光栅周期的选取,不仅要保证 LPFG 工作在近 PMTP 区域,还要考虑到 LPFG 应变传感器封装时对 LPFG 施加的一定大小预应力^[9]。对于本文所述的 LPFG 应变传感器而言,施加的预应力必然带来光栅周期的增大,引起应变测量范围和灵敏度的变化,若预应力过大,LPFG 谐振峰不再表现为双峰谐振,将无法用于基于双峰效应的 LPFG 应变监测。基于此,在 LPFG 刻制过程中光栅周期可较理论分析值略小,且预应力不宜过大。此外,为使 LPFG 传感器具有更高的应变灵敏度^[20],可以将高弹性衬底材料植入 LPFG 与待测件之间,实现 LPFG 对应变的敏化处理。最后,尽量选择和控制厚包层的 LPFG,以期获取更高应变灵敏度的 LPFG 应变传感器。

4 结 论

分析了基于近 PMTP 区域双峰谐振效应 LPFG 应变传感器的谐振和应变传感特性。通过双峰间距的变化监测应变变化,发现随着应变的增大,双峰相向移动且间距减小。通过选择纤芯热光系数与包层区热光

系数相同的 LPFG,可以有效消除温度在应变监测过程中带来的误差。此外,光栅周期影响该传感器的应变灵敏度、线性度和应变测量范围,光栅周期越靠近 Λ_r ,则应变灵敏度越高,而应变测量范围越小。通过选取合适的包层半径和光栅结构参量,应变灵敏度具有很大的提高,高于非双峰谐振的 LPFG 应变传感器 2 个数量级。这种新型长周期光栅应变传感器具有高应变灵敏度和良好的线性度,可望在微应变监测和结构健康监测中得到应用。

参 考 文 献

- 1 Tian Shizhu, Cao Changcheng, Wang Dapeng. Experimental study on fiber grating sensor monitoring the crack on concrete[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(1): 0114001.
田石柱,曹长城,王大鹏. 光纤光栅传感器监测混凝土简支梁裂缝的实验研究[J]. 中国激光, 2013, 40(1): 0114001.
- 2 Ma Weichao, Chen Shaohua, Zhao Kun, *et al.*. Phase-shifted fiber Bragg grating strain sensor demodulated by edge filter[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0905004.
马伟超,陈少华,赵 昆,等. 边缘滤波法解调的相移光纤布拉格光栅应变传感器[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0905004.
- 3 Liu Hongyue, Liang Dakai, Han Xiaolin. Long-period fiber grating transverse load effect-based sensors for rebar corrosion in concrete [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0406003.
刘宏月,梁大开,韩晓林. 基于长周期光纤光栅横向负载特性的混凝土结构钢筋锈蚀监测[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0406003.
- 4 Shu Xuewen, Zhang Lin, Bennion I. Sensitivity characteristics of long-period fiber gratings[J]. Journal of Lightwave Technology, 2002, 20(2): 255-266.
- 5 Garg R, Tripathi S M, Thyagarajan K, *et al.*. Long period fiber grating based temperature-compensated high performance sensor for biochemical sensing applications[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2013, 176: 1121-1127.
- 6 Cheung C S, Topliss S M, James S W, *et al.*. Response of fiber-optic long-period gratings operating near the phase-matching turning point to the deposition of nanostructured coatings[J]. Optical Society of America B, 2008, 25(6): 897-902.
- 7 Chen Shaohua, Tong Zhengrong, Zhao Qida, *et al.*. A smart bending sensor with a novel temperature- and strain-insensitive long-period grating[J]. Sensors and actuators A: Physical, 2004, 116(1): 103-106.
- 8 Shu Xuewen, Zhu Xuemei, Jiang Shan, *et al.*. High sensitivity of dual resonant peaks of long-period fibre grating to surrounding refractive index changes[J]. Electronics Letters, 1999, 35(18): 1580-1581.
- 9 Chen Haiyun. Structure Design of Coated Long-Period Fiber Grating and Photochemical Multi-Parameter Sensing[D]. Shanghai: University of Shanghai for Science and Technology, 2014: 1-168.
陈海云. 镀膜长周期光纤光栅结构设计及光化学多参量传感研究[D]. 2014, 上海: 上海理工大学, 2014: 1-168.
- 10 Gloge D. Weakly guiding fibers[J]. Applied Optics, 1971, 10(10): 2252-2258.
- 11 Liang Lili, Liu Mingsheng, Li Yan, *et al.*. Solutions of strain and temperature cross-sensitivity of long period fiber grating temperature sensing[J]. Infrared and Laser Engineering, 2015, 44(3): 1020-1023.
梁丽丽,刘明生,李 燕,等. 长周期光纤光栅温度传感器应变交叉敏感的研究[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(3): 1020-1023.
- 12 Zhuang Kuangwei, Zhang Shaojie, Zhao Xiaoxia, *et al.*. Application of FBG strain sensors in bridge structure monitoring system[J]. Optical Instruments, 2014, 36(1): 15-19.
张矿伟,张少杰,赵晓霞,等. 光纤 Bragg 光栅应变传感器在桥梁结构监测中的应用[J]. 光学仪器, 2014, 36(1): 15-19.
- 13 Zheng Shilie, Li Jing, Zhang Xianmin. A novel high-sensitivity fiber grating sensor for simultaneous measurement of temperature and pressure[J]. Optical Instruments, 2008, 30(5): 57-60.
郑史烈,李 静,章献民. 可同时测量温度和压力的高灵敏度光纤光栅传感器[J]. 光学仪器, 2008, 30(5): 57-60.
- 14 Xu Yanping, Gu Zhengtian, Chen Jiabi, *et al.*. Structure optimization of long-period fiber grating gas-sensing sensors[C]. SPIE, 2004, 5547: 49-56.
- 15 Shu Xuewen, Zhang Lin, Bennion I. Sensitivity characteristics near the dispersion turning points of long-period fiber gratings in B/Gc codoped fiber[J]. Optics Letters, 2003, 28(22): 1755-1757.
- 16 Huang Yonglin, Li Jie, Kai Guiyun, *et al.*. Temperature compensation package for fiber Bragg gratings[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 2003, 39(1): 70-72.
- 17 Wang Yongjun, Liu Yongchao, Zhang Jingtao, *et al.*. Interrogation technology for high-speed and high-resolution fiber Bragg grating sensing system[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0205003.
王拥军,刘永超,张靖涛,等. 高速高分辨率光纤布拉格光栅传感系统的解调技术[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0205003.

- 18 Chen Haiyun, Gu Zhengtian, Gao Kan. Multi-parameter photochemical sensing technology of long-period fiber grating and wavelength division multiplexing[J]. Chinese J Lasers, 2014 , 41(2): 0205003.
陈海云, 顾铮亮, 高 侃. 基于波分复用的长周期光纤光栅光化学多参量传感技术研究[J]. 中国激光, 2014 , 41(2): 0205003.
- 19 Tian Shizhu, Zhang Guoqing, Wang Dapeng. Study on strain transfer mechanism of surface fiber Bragg grating sensor[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805005.
田石柱, 张国庆, 王大鹏. 表面式光纤布拉格光栅传感器应变传递机理的研究[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805005.
- 20 Su Juan, Dong Xiaopeng, Shi Zhidong. Design of sensitivity enhanced strain sensor based on fine transmission spectrum of FBG[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(8): 0805002.
苏 娟, 董小鹏, 石志东. 基于FBG精细谱的应变增敏型传感器的设计[J]. 中国激光, 2014, 41(8): 0805002.

栏目编辑: 王晓琰