

# 基于双波长激光的超短 FBG 中心波长解调方法

李凯<sup>1,2,3</sup>, 辛璟焘<sup>1,2,3</sup>, 骆飞<sup>1,2,3</sup>, 娄小平<sup>1,2,3</sup>, 祝连庆<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 北京 100016;

<sup>2</sup>现代测控技术教育部重点实验室, 北京 100192;

<sup>3</sup>北京信息科技大学光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100192

**摘要** 为实现光纤光栅中心波长的解调, 编制了栅区长度小于 1 mm、反射率大于 60%、3 dB 带宽大于 1.5 nm、反射谱边缘有效线性区大于 1.5 nm 的超短光纤布拉格光栅(US-FBG)。以 US-FBG 为传感单元, 提出了一种基于双波长激光的中心波长解调方法。当中心波长位于光谱线性区的稳频激光入射到 US-FBG, 随着光栅光谱的漂移, 反射光功率随之变化并具有良好的线性关系, 其实验结构的线性度为 0.998。为了充分利用其反射光谱左右两侧的线性区, 采用双波长激光的互补解调方法, 将波长解调范围扩展到 3 nm。将测量值与实际值进行比较, 两者具有较好的一致性。该方法具有结构简单、功耗小、测量空间分辨率高等优势。

**关键词** 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 光谱线性区; 双波长激光; 解调

中图分类号 TN29; TN253

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.030602

## Central Wavelength Interrogation Method of Ultra-Short FBG by Dual-Wavelength Laser

Li Kai<sup>1,2,3</sup>, Xin Jingtao<sup>1,2,3</sup>, Luo Fei<sup>1,2,3</sup>, Lou Xiaoping<sup>1,2,3</sup>, Zhu Lianqing<sup>1,2,3</sup>

<sup>1</sup>Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Modern Measurement Control Technology, Ministry of Education, Beijing 100192, China;

<sup>3</sup>Beijing Key Laboratory of Optoelectronic Test Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100192, China

**Abstract** To realize the demodulation of the fiber grating center wavelength, we fabricate an ultra-short fiber Bragg grating (US-FBG), with grating length of less than 1 mm, reflectivity of over 60%, 3 dB bandwidth of more than 1.5 nm, and the edge linear region of the reflection spectrum of more than 1.5 nm. We use US-FBG as the sensing element, and propose a central wavelength interrogation method based on dual-wavelength laser. When the frequency stabilized laser with the central wavelength in the spectral linear region is incident on the US-FBG, the reflected optical power changes linearly with the drifts of the US-FBG spectrum, whose linearity is 0.998. In order to make full use of the linear region on the two sides of reflection spectrum, we use the complementary interrogation method with dual-wavelength lasers to extend the wavelength demodulation range to 3 nm. The measured values are in great agreement with the actual values. The method has the advantages of simple structure, low power consumption, and high spatial resolution.

**Key words** fiber optics; fiber Bragg grating; spectral linear region; dual-wavelength laser; interrogation

**OCIS codes** 060.3735; 060.2310; 060.2370

收稿日期: 2017-08-25; 收到修改稿日期: 2017-09-14

基金项目: 教育部“长江学者和创新团队”发展计划(IRT\_16R07)、北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(TJSHG201510772016)、北京市优秀人才培养资助项目(2016000020124G070)

作者简介: 李凯(1992—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: 1339363718@qq.com

导师简介: 祝连庆(1963—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤传感与激光器、光纤光源、精密测量与系统方面的研究。E-mail: zhulianqing@sina.com(通信联系人)

## 1 引言

光纤布拉格光栅(FBG)传感器采用波长编码的方式进行测量,是光纤传感技术的一个重要分支。与传统电学类传感器相比,FBG传感器具有比热容小、质量轻、抗电磁干扰、易组网复用和对待测参量干扰小等优点<sup>[1-3]</sup>。目前,已被广泛应用于航天航空、生物医学、电力工业、土木工程等领域<sup>[4-7]</sup>。

FBG传感解调系统的测量分辨率和测量速度依赖于其窄线宽光谱特性<sup>[8]</sup>。为了保证FBG较窄的反射光谱(一般小于0.2 nm),传统FBG的栅区长度一般达到厘米级<sup>[9]</sup>。在传感应用中,FBG长度决定了被测点的尺寸,光栅长度越短,测试点越精确。在航空领域,往往需要对毫米级小尺寸部位进行结构健康监测,对结构的监测和复合材料损伤的识别都需要精确到点<sup>[10-11]</sup>。实际工程应用中,多使用基于衍射光栅和线阵CCD的FBG解调仪对光纤光栅波长进行解调,该方法具有解调速度快、集成度高的独特优势<sup>[12]</sup>。和多数解调方法一样,解调仪依赖于FBG的窄线宽,并且其分辨率受限于衍射光栅分辨率<sup>[13]</sup>。在一些特殊的应用环境下,如爆炸冲击波分析、超声波探伤和航空发动机监测等应用领域,需探测的信号频率一般为千赫兹到兆赫兹<sup>[14]</sup>,同时要求解调系统功耗低、质量轻。由解调仪构建的解调系统往往难以满足这些要求。因此,找到一种具有宽带宽、反射率随波长线性分布的FBG,以实现中心波长信号向光功率信号的转化,具有重要的科学研究和实际应用价值。目前,多使用具有三角形反射谱的FBG,其边缘线性区大小可控,同时具有反射率高、中心波长解调范围大的优点<sup>[15]</sup>,但制作工艺比较复杂,且光栅长度为厘米级。相比于三角形光谱FBG,超短光纤光栅(US-FBG)制备方法简单,光栅长度只有

几百甚至几十微米,利于点式测量。同时,基于US-FBG构建的传感系统在功率预算和感测能力方面也有一定的提升<sup>[16]</sup>。

本文通过高掺铈载氢增敏和优化紫外曝光功率撰写了具有宽光谱特性的US-FBG,其反射谱两侧各有一段线性区。当采用单波长激光进行线性解调时,只利用了反射光谱单侧线性区,仍存在动态解调范围不足的问题。为了充分利用US-FBG反射光谱左右两侧的线性区,实现较大范围的解调,设计了基于双波长激光的US-FBG中心波长解调系统,该系统具有结构简单、功耗低的优点。并且利用US-FBG作为传感元件,实现了高空间分辨率测量。因此,该方法具有重要的工程化应用价值。

## 2 超短光纤光栅中心波长解调原理

相比于传统FBG,US-FBG的栅区长度较短,光谱特性也有明显的区别,主要表现在同一折射率调制深度下,US-FBG的反射谱更宽、反射率更低。利用传输矩阵理论,对不同栅区长度和不同折射率调制深度的FBG反射光谱进行仿真计算,结果如图1所示。其中,图1(a)是 $8 \times 10^{-4}$ 折射率调制深度下,不同栅区长度的光栅反射谱。观察光谱图可以发现,随着长度的增加,光纤光栅边沿变得更加陡峭,反射光谱宽度逐渐变窄。图1(b)是0.8 mm栅区长度下,不同折射率调制深度的光栅反射谱。当光栅长度不变时,反射光谱宽度随折射率调制深度的增加而增加。综上所述,为了实现光纤光栅的边缘线性区区域的最大化,同时兼顾反射率,可以通过减小栅区长度和提高折射率调制深度来实现。从栅区长度为0.8 mm、折射率调制深度为 $8 \times 10^{-4}$ 的光纤光栅反射谱看到,在其反射峰值两侧各有一段近似线性区域,利用该线性区可以实现对中心波长的近似线性解调。

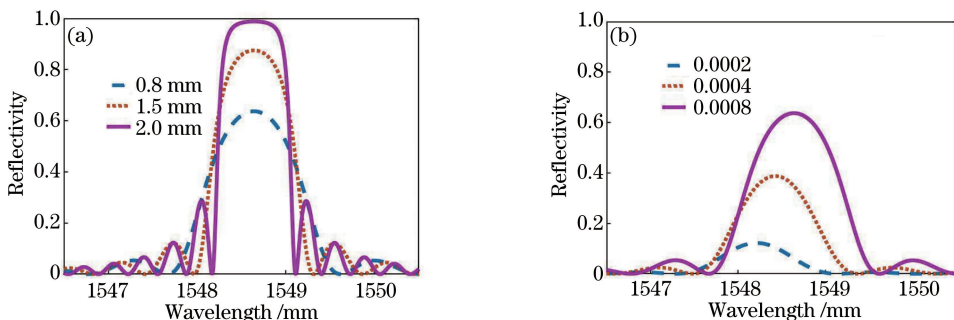


图1 FBG反射谱特性。(a)不同栅区长度;(b)不同调制深度

Fig. 1 Reflective of FBGs. (a) Different grating lengths; (b) different refractive index modulation depths

稳频激光具备窄线宽、高稳定性等优点,其线宽远小于 US-FBG 的反射谱宽度<sup>[17]</sup>。图 2 为采用单波长稳频激光和 US-FBG 反射光谱单侧线性区的解调原理示意图。图 2 中  $P_1$  和  $P_2$  分别是 FBG 中心波长漂移前后,反射光功率的值; $R(\lambda - \lambda_B)$  为中心波长漂移过程中,FBG 的反射光谱函数。

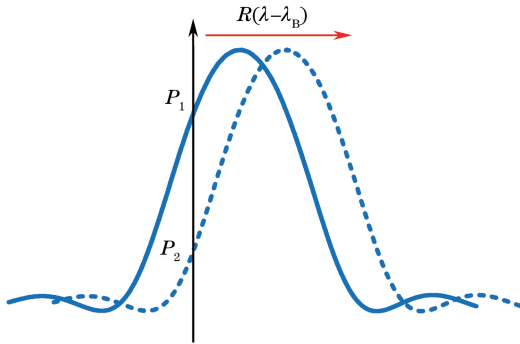


图 2 单波长激光解调原理示意图

Fig. 2 Schematic of interrogation by single-wavelength laser  
激光经过 US-FBG 后的反射光功率信号  $P_r(\lambda)$  可以表示为<sup>[18]</sup>

$$P_r(\lambda) = \int_0^{\infty} R(\lambda) P_L(\lambda) d\lambda, \quad (1)$$

式中  $R(\lambda)$  和  $P_L(\lambda)$  分别为 US-FBG 的反射谱函数和激光的光功率函数。由于稳频激光器线宽远小于反射谱的带宽,当 US-FBG 处于一个特定状态时,

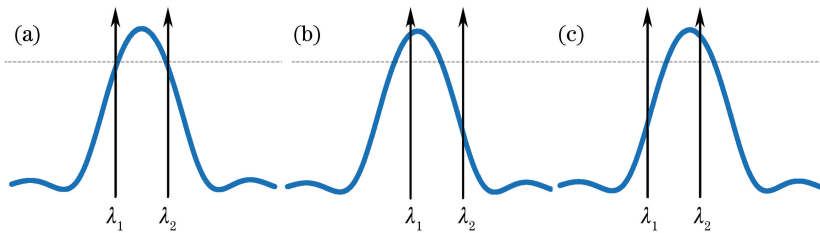


图 3 双波长激光的解调原理示意图

Fig. 3 Schematic of interrogation by dual-wavelength laser

当外界被测参量发生变化时,US-FBG 的反射光谱随之发生漂移。在 US-FBG 的反射光谱左右两侧各有一段近似线性区。激光器 1 和 2 分别输出功率相等的两束稳频激光,激光中心波长为  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$ ,分别对应左右两侧光谱线性区反射率的最高位置。两束激光经 US-FBG 反射回功率计的光功率分别记为  $P_1$  和  $P_2$ 。如图 3(a) 所示的位置,此时  $P_1 = P_2 = P_{eq}$ ,US-FBG 的中心波长  $\lambda_{center} = \lambda_{eq}$ ,其中  $P_{eq}$  和  $\lambda_{eq}$  分别为  $P_1$ 、 $P_2$  相等时,光功率的值和该状态下 FBG 的中心波长值。当 US-FBG 蓝移时,即  $\lambda_{center} < \lambda_{eq}$ , $P_1 > P_{eq}$ , $P_2 < P_{eq}$ ,激光 1 位于反射光谱

可将其反射谱函数看成一个稳定的常量,则反射光功率函数可表示为

$$P_r(\lambda) = P_L \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda = R(\lambda) P_L, \quad (2)$$

式中  $P_L$  为激光功率。由(2)式可知,反射光功率仅与 US-FBG 的反射谱函数有关,因此可利用反射谱的线性区域进行传感解调,光谱线性区域越大,解调范围越大。传统 FBG 的光谱线性区域仅为百皮米量级,无法用于传感解调,US-FBG 的栅区越短,线性区域越大。但是随着栅区长度的减小,光栅反射率下降,系统反射光强下降,导致测量范围也大幅下降,降低了解调精度。根据上述传感解调原理,将中心波长位于光谱线性区域且功率稳定的窄线宽激光入射到传感系统,当外界环境发生变化时,US-FBG 光谱发生漂移,US-FBG 反射的光功率随之发生线性变化,最终通过光功率的变化可实现中心波长的解调。

由上述仿真光谱可知,US-FBG 反射光谱左右两侧均存在线性区。采用单波长激光进行线性解调,仅利用了单侧的线性区,仍存在动态解调范围不足的问题。为了充分利用 US-FBG 反射光谱的左右两侧线性区,同时实现较大测量范围的解调,继而设计了基于双波长激光的解调系统,其解调原理如图 3 所示。

非线性区,激光 2 位于光谱右侧线性区,此时, $P_2$  与中心波长满足线性关系,如图 3(b) 所示。当 US-FBG 红移时,即  $\lambda_{center} > \lambda_{eq}$ , $P_1 > P_{eq}$ , $P_2 < P_{eq}$ ,激光 2 位于反射光谱非线性区,激光 1 位于光谱左侧线性区,此时, $P_1$  与中心波长满足线性关系,如图 3(c) 所示。综上所述,US-FBG 的中心波长可以分别由  $P_1$  和  $P_2$  计算得到,具体关系表达式为

$$\lambda_{center} = \begin{cases} \lambda_{eq} + K_2 (P_2 - P_{eq}), & P_2 \leq P_{eq} \\ \lambda_{eq} + K_1 (P_1 - P_{eq}), & P_1 \leq P_{eq} \end{cases}, \quad (3)$$

式中  $K_i$  ( $i=1,2$ ) 为线性系数。该传感解调系统可实现的动态解调范围大于  $2(\lambda_2 - \lambda_1)$ 。

### 3 实验装置

图4为基于双波长激光解调方法的实验装置示意图,通过耦合器将可调谐激光器1和2输出的激光束进行合束,合束后接入隔离器(ISO),以避免反射回来的光波对激光器造成损坏。将合束后的光束与宽带光源(ASE)分别通过光开关的两端连接到环形器的端口1。环形器的端口2连接用于传感的US-FBG。经US-FBG反射回来的光波由环形器的端口3进入到另一光开关的公共端,该光开关的另外两端分别用于光谱仪(OSA)和功率计(PM)输入。由于需要同时监测两束激光经US-FBG反射回来的光功率,设计了基于FBG和环形器的波分复用结构,其中FBG的中心波长对应激光1的中心波长,激光1信号被反射后由端口3输出,由功率计2监测。激光2信号则通过FBG,由功率计1监测。

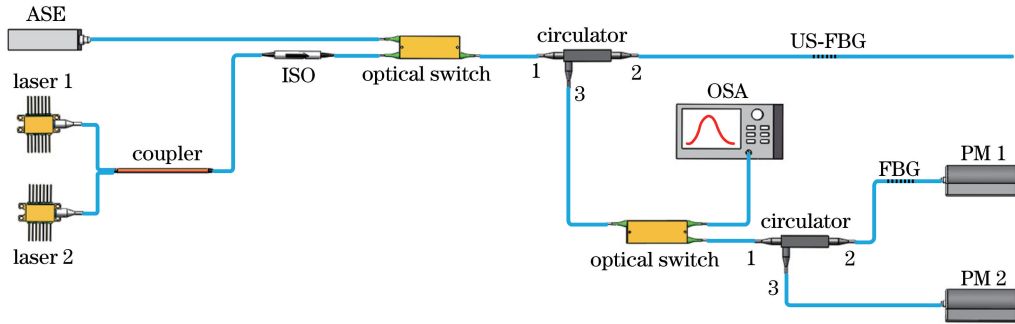


图4 基于双波长激光解调实验装置示意图

Fig. 4 Schematic of interrogation experimental setup by dual-wavelength laser

### 4 实验结果及分析

US-FBG的制备方法类似于传统FBG,本文采用相位掩模板下准分子激光器紫外曝光的方法。由于普通的商用掩模板的厚度一般为10 mm,US-FBG的栅区长度只有几个微米。因而在掩模板3 cm的位置上放置宽度可调的光阑,通过调节光阑的大小实现光栅长短的控制。

由上述分析可知,US-FBG的光栅长度较短,其反射率较低。为获得高反射率US-FBG,本文分别在经低温高压载氢2周后的Corning SMF-28和Corning HI1060 FLEX上刻写了中心波长、光栅长度一致的US-FBG。反射光谱如图5(a)所示,比较两者的光谱,在同一曝光时间下,HI1060光纤光栅具有更高的反射率,通过分析认为,相比于普通SMF-28单模光纤,该光纤具有更小的纤芯直径,更利于紫外光聚焦在纤芯上,同时,HI1060锗含量浓

最后,光谱仪、功率计的输出信号由计算机进行处理。实验中,通过同步触发的方式,实现两个光开关的同时切换,以保证宽谱光源-光谱仪和可调谐激光器-功率计两路的通断。在实际工程应用中,仅需用到可调谐激光器、耦合器、隔离器、环形器和功率计,从而简化了传感系统,具备结构简单、功耗低的优势。

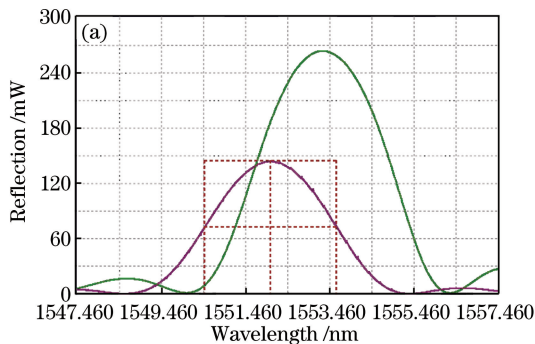
实验中,光谱仪型号为YOKOGAWA公司的AQ6370C,分辨率为0.02 nm,扫描波长范围为600~1700 nm。宽带光源为实验室自行研制的放大自发辐射光源,输出功率为13.3 dBm,波段为C+L波段(1525~1610 nm)。功率计为Newport公司的2936-C。可调谐激光器为FINISAR公司的S7500,C波段范围内波长可调,最大输出功率为13 dBm,激光线宽小于5 MHz,波长稳定性小于1 pm。1 min内功率稳定性波动小于0.5%。

度更高,可以增加纤芯折射率的调制深度。此外,在刻写过程中还发现,准分子激光器的功率不宜过高。随着曝光功率的增加,光纤的温度随之上升,高温加快了光纤中氢气的扩散速度,降低了光纤的光敏性,从而导致折射率调制深度的下降。但如果功率过低,则增加刻写时间,增加擦写的可能性。图5(b)为不同长度光纤光栅的反射光谱,从图中可以看出,栅区越短,其反射光谱边缘越陡峭,线性区越大,与数值分析结果一致。刻写完成后,将US-FBG置于120 °C高温箱中退火,其目的在于消除纤芯中未稳定的缺陷中心以及未充分反应的氢气,以保证US-FBG的光谱特性可以长期保持稳定。

退火后的US-FBG中心波长为1552.704 nm,栅区长度为0.5 mm,反射率大于60%,对其反射光谱两侧进行线性化数据分析,并进行曲线拟合,如图6所示,1550.304~1551.804 nm和1553.604~1555.104 nm范围内,线性拟合度 $R^2$ 均达到0.998,



这表明 US-FBG 反射光谱两侧各拥有 1.5 nm 可用于的线性分析的区域。根据实验测量原理可知,将



US-FBG 用于实验,可实现具有中心波长漂移 3 nm 的测量范围。

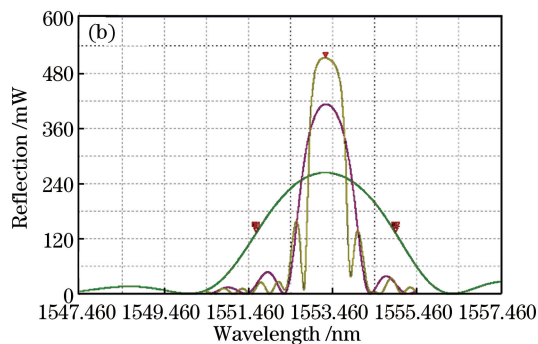


图 5 US-FBG 反射光谱。(a)不同光纤种类;(b)不同栅区长度

Fig. 5 Reflection spectra of US-FBG. (a) Different kinds of fibers; (b) different lengths of grating region

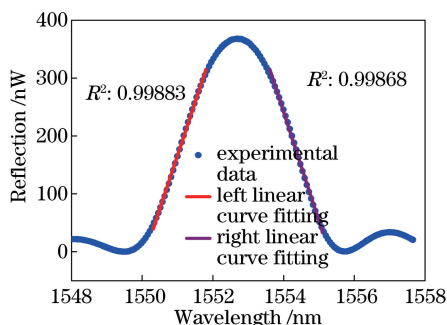


图 6 US-FBG 反射光谱两侧线性化数据分析

Fig. 6 Analysis of linearization data on both sides of US-FBG reflection spectra

将光纤光栅的一端尾纤固定,另一端固定在微位移平台上,通过移动微位移平台对光纤光栅施加轴向应力。分别通过光谱仪和功率计记录 US-FBG 的中心波长和两束激光经 US-FBG 反射回来的光功率  $P_1$  和  $P_2$ 。为了保证实验的准确性,对光纤光栅施加一定的预拉力。预拉力加载后的光纤光

栅中心波长为 1552.902 nm。根据上述测量原理分析,设置可调谐激光器 1 的输出波长为固定值 1553.5 nm,可调谐激光器 2 的输出波长为固定值 1555.3 nm。调节微位移移动平台,对 US-FBG 施加轴向应力,US-FBG 中心波长向长波方向漂移。实验中,中心波长每漂移 0.1 nm 取一个点,记录每个样本点处  $P_1$  和  $P_2$  值。当  $P_1 = P_2 = P_{eq} = 32.41 \mu\text{W}$  时,US-FBG 的中心波长  $\lambda_{center} = \lambda_{eq} = 1554.402 \text{ nm}$ 。之后,反方向调节微位移移动平台,释放拉力,使 US-FBG 反射光谱蓝移,记录返程每个样本点处  $P_1$  和  $P_2$  的值。

根据实验中测得的  $P_1$  和  $P_2$  值与中心波长绘制关系曲线(见图 7)。从图中可以看出,在 1552.902~1554.402 nm 范围内,US-FBG 中心波长  $\lambda_{center}$  与  $P_2$  具有良好的线性关系,而在 1554.402~1555.902 nm 范围内,US-FBG 中心波长与  $P_1$  具有良好的线性关系。

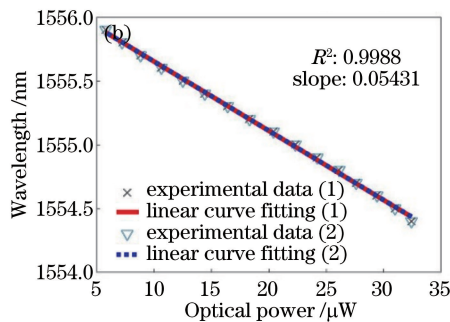
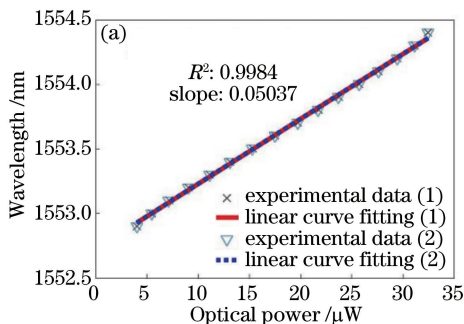


图 7 (a)  $P_1$  与 US-FBG 中心波长之间的关系;(b)  $P_2$  与 US-FBG 中心波长之间的关系

Fig. 7 (a) Relationship between  $P_1$  and the central wavelength of US-FBG; (b) relationship between

$P_2$  and the central wavelength of US-FBG

使用最小二乘法对实验结果进行拟合, $P_1$ 、 $P_2$  与中心波长的线性度均达到 0.998。根据拟合的结

果,可以得到系数  $K_2 = 0.050$ 、 $K_1 = -0.054$ 。之后,重复往返实验 3 次,并对各次数据进行拟合,拟合的

线性度与线性系数均能保持一致,说明该解调方法拥有较好的重复性与一致性。将最终所确定的系数,代入(3)式,得到如下 US-FBG 中心波长关于反射光功率的分段函数。

$$\lambda_{\text{center}} = \begin{cases} 1554.402 + 0.050(P_2 - 32.41), & P_2 \leq 32.41 \\ 1554.402 - 0.054(P_1 - 32.41), & P_1 \leq 32.41 \end{cases} \quad (4)$$

图 8 是根据(4)式,利用反射光功率计算得到的中心波长与实际中心波长,从图中可以看到,测量值与实际值具有较好的一致性,证明本文设计的中心波长传感解调方法具有可行性。

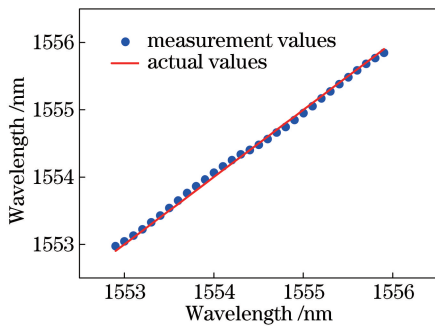


图 8 US-FBG 中心波长测量的实验结果与理论值比较

Fig. 8 Experimental results and theoretical values of US-FBG central wavelength

## 5 结 论

通过优化紫外曝光功率等方法在高掺锗载氢增敏光纤上写制了 US-FBG。以 US-FBG 为传感单元,利用稳频双波长激光和 US-FBG 光谱线性区实现了 US-FBG 中心波长的近似线性解调。通过理论分析和数值计算对实验的可行性进行了分析。实验结果表明,反射光功率与中心波长之间的线性度达到 0.998,实现了测量范围 3 nm 的中心波长解调,将中心波长测量值与实际值进行比较可知,两者具有较好的一致性。该方法具有结构简单、功耗小、测量空间分辨率高等潜在优势,对实际工程应用具有重要的参考价值。

## 参 考 文 献

[1] Su H, Wang J, Liu L L, *et al.* Optical fiber grating temperature and axial tension sensing system based on swept source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 040601.  
苏红, 王健, 刘岚岚, 等. 基于扫频光源的光纤光栅温度和轴向拉力传感系统[J]. *激光与光电子学进*

展, 2017, 54(4): 040601.

- [2] Wang Y P, Tang J, Yin G L, *et al.* The fabrication method and sensing application of fiber grating [J]. *Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis*, 2015, 35(5): 809-819.  
王义平, 唐剑, 尹国路, 等. 光纤光栅制作方法及传感应用[J]. *振动、测试与诊断*, 2015, 35(5): 809-819.
- [3] Li K, Xin J T, Xia J B, *et al.* Research of rapid annealing of fiber Bragg gratings based on arc plasma [J]. *Laser Technology*, 2017, 41(5): 649-653.  
李凯, 辛璟焘, 夏嘉斌, 等. 基于电弧等离子体的光纤光栅快速退火的研究[J]. *激光技术*, 2017, 41(5): 649-653.
- [4] Zhao H X, Chen P H, Ding Z Q, *et al.* Simultaneous measurement of temperature, refractive index and liquid level based on biconical fiber gratings [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(10): 1010005.  
赵洪霞, 程培红, 丁志群, 等. 双锥形光纤光栅实现温度、折射率和液位同时测量[J]. *中国激光*, 2016, 43(10): 1010005.
- [5] Gao Z, Zhu X, Fang Y, *et al.* Active monitoring and vibration control of smart structure aircraft based on FBG sensors and PZT actuators [J]. *Aerospace Science and Technology*, 2017, 63: 101-109.
- [6] Zhang X h, Wang L T, Fang N. Study on power frequency electric-field measurements based on fiber Bragg grating sensing technology [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2016, 53(2): 020603.  
张旭辉, 王陆唐, 方捻. 基于光纤光栅传感技术的工频电场测量研究[J]. *激光与光电子学进展*, 2016, 53(2): 020603.
- [7] Luo B B, Zou W G, Zhao M F, *et al.* pH sensor based on fiber grating with extremely large tilt angle and its sensitivity enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 0106009.  
罗彬彬, 邹文根, 赵明富, 等. 极大倾斜角度光纤光栅 pH 值传感器及其增敏研究[J]. *光学学报*, 2017, 37(1): 0106009.
- [8] Wang Y, Gong J, Dong B, *et al.* A quasi-distributed sensing network with time-division multiplexed fiber Bragg gratings [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(2): 70-72.
- [9] Zhang Q, Zhu T, Yin F, *et al.* Temperature-insensitive real-time inclinometer based on an etched fiber Bragg grating [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2014, 26(10): 1049-1052.

- [10] Jing S M, Zhang X Y, Liang J F, *et al.* Ultrashort fiber Bragg grating written by femtosecond laser and its sensing characteristics[J]. Chinese Optics, 2017, 10(4): 449-454.  
敬世美, 张轩宇, 梁居发, 等. 飞秒激光刻写的超短光纤布拉格光栅及其传感特性[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 449-454.
- [11] Wu H B, Chen S, Zhao Y M, *et al.* Research on fabrication of apodized FBG with short grating length of 2 mm based on double-exposure apodizing technology [J]. Metrology & Measurement Technology, 2013, 33(3): 28-32.  
武洪波, 陈爽, 赵印明, 等. 基于二次曝光法的切趾 2 mm 短栅距光纤布拉格光栅制作研究[J]. 计测技术, 2013, 33(3): 28-32.
- [12] Wu J, Wu H P, Huang J B, *et al.* Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors[J]. Chinese Optics, 2014, 7(4): 519-531.  
吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 光纤光栅传感信号解调技术研究进展[J]. 中国光学, 2014, 7(4): 519-531.
- [13] Liu P F, Hao F H, He S L, *et al.* Wavelength demodulation for distributed feedback active fiber grating sensor based on wavelength scanning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010002.  
刘鹏飞, 郝凤欢, 何少灵, 等. 基于波长扫描的分布反馈有源光纤光栅传感器波长解调[J]. 中国激光, 2016, 43(10): 1010002.
- [14] Li Z Y, Zhou L, Sun W F, *et al.* High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect[J]. Acta Physica Sinica, 2017, 66(1): 112-120.  
李政颖, 周磊, 孙文丰, 等. 基于色散效应的光纤光栅高速高精度解调方法研究[J]. 物理学报, 2017, 66(1): 112-120.
- [15] Huang R, Chen G, Dong Z R, *et al.* Synthesis and fabrication of fiber Bragg gratings with triangular and broad-bandwidth reflection spectrum[J]. Acta Optica Sinica, 2004, 24(2): 179-182.  
黄锐, 陈刚, 董作人, 等. 三角形大带宽反射光谱光纤光栅的设计和制备[J]. 光学学报, 2004, 24(2): 179-182.
- [16] Cheng R, Xia L, Sima C, *et al.* Ultra-short FBG based distributed sensing using shifted optical Gaussian filters and microwave-network analysis[J]. Optics Express, 2016, 24(3): 2466-2484.
- [17] Zhang L, Peyghambarian N, Norwood R A, *et al.* Review of recent progress on single-frequency fiber lasers[J]. Journal of the Optical Society of America B, 2017, 34(3): A49-A62.
- [18] Rohollahnejad J, Xia L, Cheng R, *et al.* Fast and reliable interrogation of USFBG sensors based on MG-Y laser discrete wavelength channels[J]. Optics Communications, 2017, 38(2): 253-257.