

切趾超短 FBG 中心波长解调实验研究

李 凯¹, 钟国舜², 辛璟焘¹, 祝连庆¹

(1. 北京信息科技大学光电信息与仪器北京市工程研究中心, 光电测试技术北京市重点实验室, 北京 100016; 2. 华北光电技术研究所, 北京 100015)

摘要:为提高光纤光栅传感器的测量范围和可靠性,本文采用单缝衍射方法实现了栅区长度小于 1.5 mm, 3 dB 带宽大于 1 nm, 反射谱边缘有效线性区大于 0.6 nm 的切趾超短光纤光栅。并用其作为传感单元,提出了一种利用超短光纤光栅线性区域的中心波长解调方法。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 2.4 nm。实验结果表明,光功率与中心波长之间的线性度达到 0.992。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潜在优势。

关键词:光纤布拉格光纤光栅;切趾;光谱线性区;双波长激光;解调

中图分类号:TN253 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.05.016

Experimental study on wavelength demodulation of apodized ultra-short fiber grating

LI Kai¹, ZHONG Guo-shun², XIN Jing-tao¹, ZHU Lian-qing¹

(1. Beijing Engineering Research Center of Optoelectronic Information and Instruments, Beijing Key Laboratory for Optoelectronics Measurement Technology, Beijing Information Science and Technology University, Beijing 100016, China; 2. North China Research Institute of Electro-Optics, Beijing 100015, China)

Abstract:To improve the measurement range and reliability of fiber Bragg grating sensors, apodized ultra-short fiber grating was fabricated by single slit diffraction, its grating length is less than 1.5 mm, 3 dB bandwidth is over 1.2 nm, and the edge linear region of the reflection spectrum is over 0.6 nm. Taking apodized ultra-short fiber grating as sensor unit, a central wavelength demodulation method based on linear region of the reflection spectrum is proposed. In order to make full use of the linear region on the two sides of reflection spectrum, the complementary demodulation method with dual-wavelength lasers is used to extend the wavelength demodulation range. The experimental results show that the linearity between optical power and the central wavelength is 0.992, and the dynamic demodulation range of the central wavelength is 2.4 nm. The measured values are in great agreement with the actual values. The method has the potential advantages of simple structure, low power consumption and high spatial resolution.

Key words: fiber Bragg grating; apodized; spectral linear region; dual-wavelength laser; demodulation

基金项目:教育部“长江学者和创新团队”发展计划项目(No. IRT_16R07);北京市教委 2015 年度创新能力提升计划项目(No. TJSHG201510772016);北京市优秀人才培养资助项目(No. 2016000020124G070)资助。

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

通讯作者:钟国舜(1982 -),男,硕士,工程师,主要从事光纤传感与激光器等方面的研究。E-mail:zhongguoshun@163.com

收稿日期:2017-09-25

1 引言

相比于传统电器传感器,光纤布拉格光栅(fiber Bragg grating, FBG)传感器具有比热容小、质量轻、抗电磁干扰、易组网复用以及对待测参量干扰小等优点^[1-3],是光纤传感领域的一个重要分支。目前,已广泛地应用于航空航天、生物医学、结构健康和安全管理等诸多领域^[4-8]。

光纤光栅的栅区长度一般达到厘米量级^[9],其反射率大于 90%,反射光谱带宽小于 0.3 nm。较小的反射谱带宽有利于提高解调精度,较大的反射率有利于提高信噪比。但是较长的光栅长度在封装过程中易导致光谱啁啾^[10],引起非线性失真。并且在进行非均匀温度场测量时,反射峰出现分裂以致振荡^[11],给解调带来困难,从而影响了测量精度,限制了空间测量分辨率。超短光纤光栅(ultra-short fiber Bragg grating, US-FBG)作为光纤光栅的一种,栅区长度只有几百甚至几十微米,因此能够克服上述传统光纤光栅测量非均匀温度场的不足。同时,基于超短光纤光栅的构建的准分布式传感系统在功率预算和感测能力方面也有显著的提高^[12]。

高性能光纤光栅传感器的实现依赖于高检测精度和分辨率的解调系统。随着光纤光栅应用领域的不断扩大,工程应用对光纤光栅的解调技术的要求越来越高。目前,多使用基于衍射光栅和线阵 CCD 的光纤光栅解调仪对光纤光栅波长进行解调,具有解调速度快,集成度高的独特优势^[13]。但光纤光栅较宽的线宽特性以及衍射光栅的分辨率限制了提高解调仪检测分辨率性能的技术途径^[14]。在一些特殊的应用环境下,如爆炸冲击波分析、超声波探伤及航空发动机叶片振动检测等应用领域,需探测的信号频率一般在千赫兹到兆赫兹高频级别^[15],同时要求解调系统功耗低、质量轻。解调仪构建的解调系统往往难以满足这些要求。因此,找到一种功耗较低的光纤光栅传感高速解调方法,具有重要的科学研究和实际应用价值。

本文设计了单缝衍射方法对准分子激光进行光强分布调制,实现了超短光纤光栅的切趾,不仅提高了 US-FBG 的边模抑制比,还提高了反射谱两侧的线性区域。为了充分利用 US-FBG 反射光谱的左右两侧线性区,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。不仅扩展了

光纤光栅传感器的测量范围,还可实现高空间分辨率的测量,也避免了栅区长度长,在封装过程中产生啁啾的问题。将本实验方案应用在实际工程中,仅需半导体激光器、耦合器和光电探测器等质量轻、体积小的元器件。相比于基于衍射光栅和线阵 CCD 的光纤光栅解调系统,该解调方法具有结构简单、质量轻、体积小、系统功耗低和稳定性高的潜在优势。因此,具有重要的工程化应用前景。

2 切趾超短 FBG 中心波长解调原理

较之于传统光纤光栅,超短光纤光栅的栅区长度要短,其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,超短光纤光栅的反射谱更宽,反射率更低。光纤光栅可以等效为若干个均匀的子栅,每个子栅都可以看作是一个矩阵,通过矩阵连乘即可表示整个光栅^[16]。利用传输矩阵法,模拟仿真了均匀 US-FBG 以及切趾 US-FBG 的反射光谱,光栅长度 1.5 mm,折射率调制深度 6×10^{-4} 。如图 1 所示,从图中可以看到,通过切趾可以很好地抑制 US-FBG 的边模和增加左右两侧反射谱的有效线性区域。

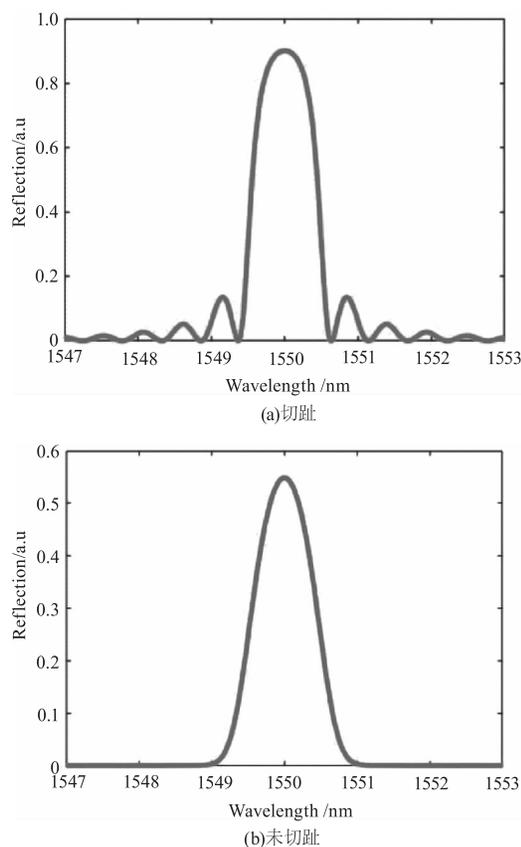


图1 US-FBG 仿真反射光谱

Fig.1 Reflection spectrum simulation of US-FBG

稳频激光具备线宽窄、高稳定性等优点,其线宽远小于 US-FBG 的反射谱宽度^[17]。图 2 是采用单波长稳频激光和 US-FBG 反射光谱单侧线性区的测量原理示意图。

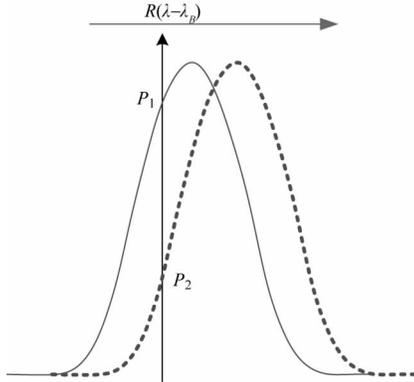


图 2 单波长激光解调原理示意图

Fig. 2 Schematic of interrogation by single-wavelength laser

激光经过 US-FBG 后的反射光功率信号可以表示为^[18]:

$$P(\lambda) = \int_0^{\infty} R(\lambda) S(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

其中, $R(\lambda)$ 和 $S(\lambda)$ 分别是 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,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:

$$P(\lambda) = \int_0^{\infty} R(\lambda) d\lambda = R(\lambda) S \quad (2)$$

其中, S 是激光功率。由式(2)可知,反射光功率只与超短光纤光栅的反射谱函数有关,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的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,将引起 US-FBG 光谱的漂移,从 US-FBG 反射的光功率随之线性变化,进而通过光功率的变化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,只利用了单侧的线性区,并且存在着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。

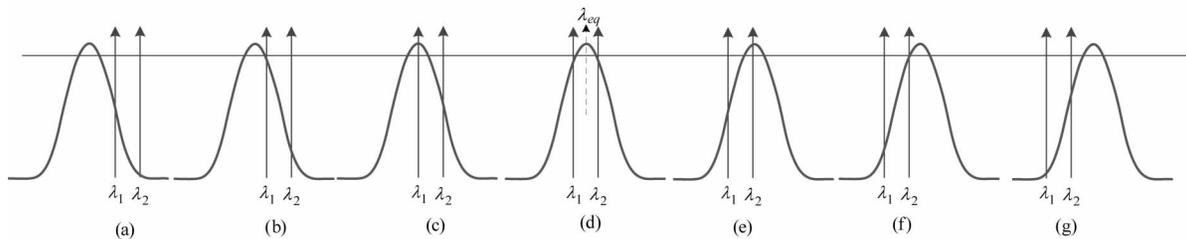


图 3 双波长激光的解调原理示意图

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 λ_1 和 λ_2 , 分别对应于左右两侧光谱线性区反射率最高位置。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(d) 所示的位置,此时 $P_1 = P_2 = P_{eq}$, US-FBG 的中心波长 $\lambda_{center} = \lambda_{eq}$ 。当 $\lambda_{center} < \lambda_{eq}$, $P_1 > P_2$, 如图 3(a)、3(b) 和 3(c) 所示,其中图 3(a) 表示 $P_1 < P_{eq}$ 的状态,此时激光 1 位于光谱

右侧线性区,此时, P_1 与中心波长满足线性关系;其中图 3(b) 表示 $P_1 = P_{eq}$ 的状态,此时 $\lambda_{center} = \lambda_{eq} - \lambda_d$, $\lambda_d = \lambda_2 - \lambda_1$ 为两束激光波长的差值;其中图 3(c) 表示 $P_1 > P_{eq}$ 的状态,此时激光 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;当 $\lambda_{center} > \lambda_{eq}$, $P_1 < P_2$, 如图 3(e)、3(f) 和 3(g) 所示,其中图 3(e) 表示 $P_2 > P_{eq}$ 的状态,此时激光 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;其中图 3(f) 表示 $P_2 = P_{eq}$ 的状态,此时 $\lambda_{center} = \lambda_{eq} + \lambda_d$;其中图 3(g) 表示 $P_2 < P_{eq}$ 的状态,此时激光 2 位于光

谱左侧线性区,此时, P_2 与中心波长满足线性关系。综上所述,US-FBG 的中心波长可以分段由 P_1 和 P_2 计算得到,具体关系表达式为:

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

其中, K_1 和 K_2 为左右两侧光谱线性区域的斜率。

3 实验装置

图 4 是该解调方法的实验装置示意图,通过 3dB 耦合器将可调谐激光器 1 和 2 输出激光束进行合束,耦合器后接入隔离器,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分别通过光开关的两端连接到环形器的 1 端口。环形器的 2 端口连接用于传感的 US-FBG。经由 US-FBG 反射回来的光波由环形器的 3 端口,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和功率计输入。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 3 端口输出,被通过功率计 2 监测。激光 2 信号则通过 FBG,由功率计 1 监测。最后,光谱仪、功率计的输出信号由 PC 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。

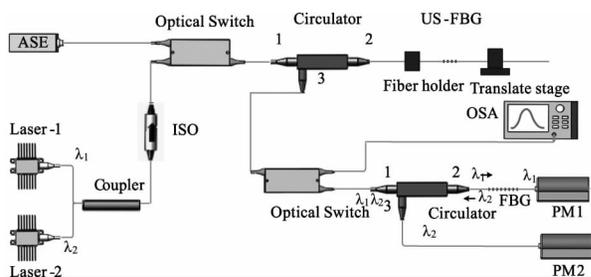


图 4 基于双波长激光解调实验装置示意图
Fig. 4 Schematic of interrogation experimental setup by dual-wavelength laser

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,功率稳定性波动小于 0.5% (实验测试 30 min)。

4 实验结果及分析

均匀光纤光栅折射率调制可以看作是带有矩形包络的正弦调制,为了去除光栅的旁瓣,需要对光栅进行切趾,即在写入光栅时,去除折射率调制在光栅起始和终止处的折射率突变,从而抑制这些由突变引起的反射光谱的边模^[19]。本文在 US-FBG 刻写时,将一个竖直方向、宽 0.25 mm 的狭缝置于相位掩模板前 0.7 m,通过单缝衍射将刻写光场调制成 sinc² 函数形式,实现了超短 FBG 的切趾。如图 5 所示,图 5(a)是未经过高斯切趾后的 US-FBG 反射光谱,图 5(b)是经过高斯切趾后的反射光谱,可以很明显的看到,经过高斯切趾后,US-FBG 的边模得到了有效的抑制,反射光谱左右两侧的有效线性区域明显增加。实验结果与图 1 的数值仿真结果一致。

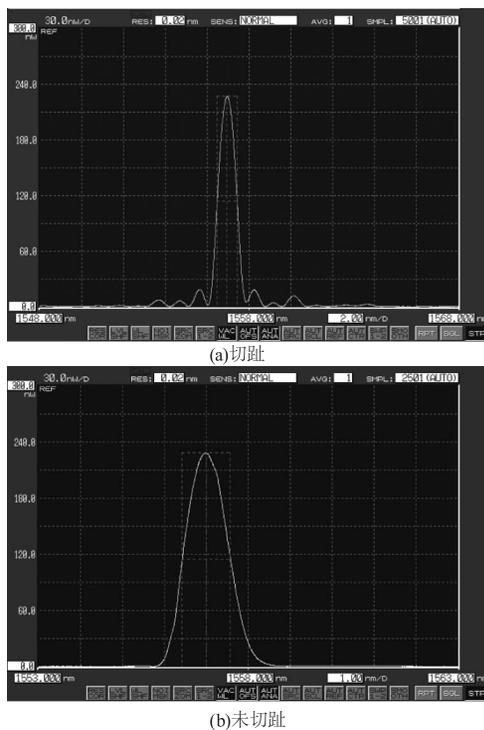


图 5 US-FBG 反射光谱
Fig. 5 Reflection spectrum of US-FBG

对制备完成后的切趾 US-FBG 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,在 1556.096 ~ 1556.696 nm 和 1557.296 ~ 1557.896 nm 的范围内,线性拟合度均达到 0.99 以上,证明了 US-FBG 反射光谱两侧各拥有 0.6 nm 的线性区。根据实验原理可知,采用该 US-FBG 用于实验,可实现中心波长漂移 2.4 nm 的测量范围。

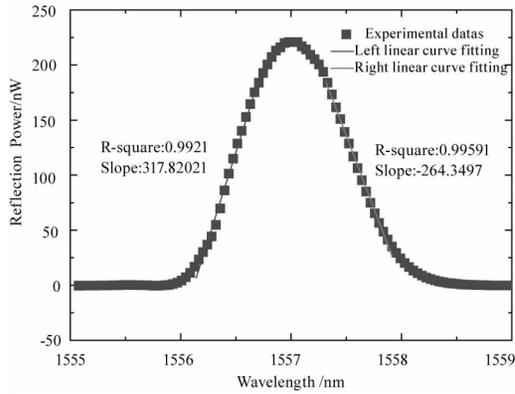


图 6 US-FBG 反射光谱两侧线性化数据分析
Fig. 6 Analysis of linearization data on both sides of US-FBG reflection spectra

将光纤光栅的一端尾纤固定,另一端固定在微位移平台上,通过微位移平台的移动对光纤光栅施加轴向拉力。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 。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 1557.896 nm,可调谐激光器 2 的输出波长为固定值为 1558.496 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 0.05 nm 取一个点,记录每个样本点处 P_1 和 P_2 的值。当 $P_1 = P_2 = P_{eq} = 48.75 \mu\text{W}$ 时,US-FBG 的中心波长 $\lambda_{center} = \lambda_{eq} = 1558.200 \text{ nm}$ 。由于两束激光的输出光功率相等,在 US-FBG 反射光谱边缘线性区的同一位置处,两束激光的反射光功率相等。因此 K_1, K_2 的系数可以由经 US-FBG 反射光谱左右两侧线性区反射回的光功率 P_1 或 P_2 与 US-FBG 中心波长的关系来确定。

将实验中测得的 P_1 的值与中心波长绘制如图 7 所示的关系曲线,从图中可以看到,在 1557.00 ~ 1557.60 nm 和 1558.2 ~ 1558.8 nm 的范围内,US-FBG 中心波长 λ_{center} 与 P_1 之间具有良好的线性关系。

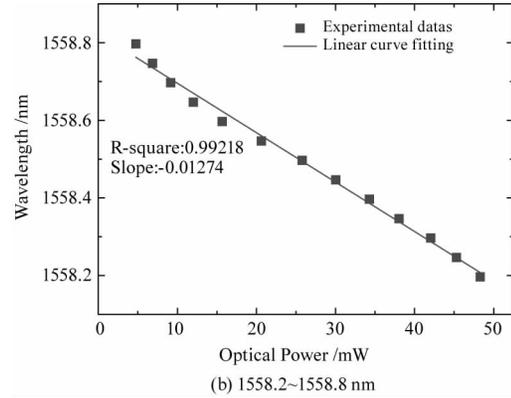
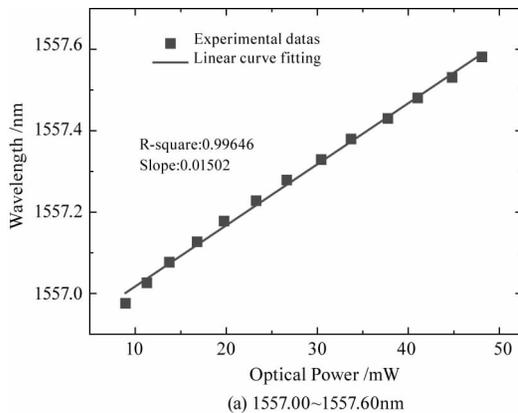


图 7 P_1 与 US-FBG 中心波长之间的关系
Fig. 7 The relationship between P_1 and central wavelength of US-FBG

对这两段中心波长范围内的实验结果进行拟合,线性度均达到 0.99 以上。根据拟合的结果,可以得到系数 $K_2 = 0.01502, K_1 = -0.01274$,将最终所得到的数据,代入公式(3)中,得到如下 US-FBG 中心波长关于反射光功率的分段函数:

$$\lambda_{center} = \begin{cases} 1557.600 + 0.01502(P_1 - 48.75) & P_1 > P_2, P_1 \leq 48.75 \\ 1558.200 + 0.01502(P_2 - 48.75) & P_1 > P_2, P_1 \geq 48.75 \\ 1558.200 - 0.01274(P_1 - 48.75) & P_1 < P_2, P_2 > 48.75 \\ 1558.800 - 0.01274(P_2 - 48.75) & P_1 < P_2, P_1 < 48.75 \end{cases} \quad (4)$$

图 8 是根据上式,利用反射光功率计算得到的中心波长与实际中心波长的比较,从图中可以看到,测量值与实际值具有较好的一致性,证明了本文设计的中心波长传感解调方法具有可行性,测量范围为 2.4 nm。

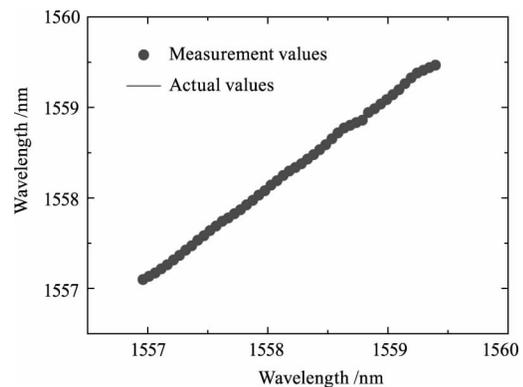


图 8 US-FBG 中心波长测量的实验结果与理论值的比较
Fig. 8 Comparison of Experimental Results and Theoretical Values of US-FBG Center Wavelength

5 结论

本文采用单缝衍射方法进行准分子激光的光强分布调制,实现了栅区长度小于 1.5 mm,3 dB 带宽大于 1 nm,反射谱边缘有效线性区大于 0.6 nm 的切趾超短光纤光栅的制作。提高的超短

FBG 的边模抑制比和反射谱两侧的线性区域。提出了基于双波长激光的 US-FBG 中心波长解调方法,通过实验验证了解调方法可行性,将波长解调范围扩展到 2.4nm。本文设计的中心波长解调系统具有结构简单、质量轻、体积小、系统功耗低和稳定性高等潜在优势。因此,具有重要的工程化应用前景。

参考文献:

- [1] XIN Jingtao, ZHUANG Wei, YAN Guang, et al. Spectral characteristics of FBG inscribed by femtosecond laser under electrode discharge [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47 (1): 103 - 107. (in Chinese)
辛璟焘, 庄炜, 闫光, 等. 飞秒激光刻写 FBG 在电极放电下的光谱特性 [J]. *激光与红外*, 2017, 47 (1): 103 - 107.
- [2] SU Hong, WANG Jian, LIU Lanlan, et al. Optical fiber grating temperature and axial tension sensing system based on swept source [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2017, 54(4): 40601. (in Chinese)
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): 40601.
- [3] LIU Shulin, LU Jiyun. Tunable linear chirp method of fiber Bragg grating based on bending lever [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(4): 485 - 489. (in Chinese)
柳树林, 芦吉云. 基于弯曲压杆的光纤光栅可调谐线性啁啾化 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(4): 485 - 489.
- [4] ZHAO Hongxia, CHEN Peihong, DING Qunzhi, 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. (in Chinese)
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 & Technology*, 2017, 63: 101 - 109.
- [6] SUN Yuankai, XIE Tao, LI Yingna, et al. Heat loss characteristics of transformer magnetic leakage and fiber grating monitoring [J]. *Laser & Infrared*, 2017, 47(1): 92 - 97. (in Chinese)
孙媛凯, 谢涛, 李英娜, 等. 变压器漏磁热损特征与光纤光栅监测研究 [J]. *激光与红外*, 2017, 47(1): 92 - 97.
- [7] LUO Binbin, ZHOU Wengeng, ZHAO Mingfu, et al. pH Sensor Based on Fiber Grating with Extremely Large Tilt Angle and Its Sensitivity Enhancement [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(1): 106009. (in Chinese)
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): 106009.
- [8] PAL A, DHAR A, GHOSH A, et al. Sensors for Harsh Environment: Radiation Resistant FBG Sensor System [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2017, (99): 1 - 1.
- [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] ZHANG Faye, JIANG Mingshun, SUI Qingmei, et al. High sensitivity and low-frequency FBG acceleration sensors based on flexure hinge structure [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(3): 253 - 260. (in Chinese)
张法业, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于柔性铰链结构的高灵敏度低频光纤光栅加速度传感器 [J]. *红外与激光工程*, 2017, 46(3): 253 - 260.
- [11] ZHAO Mingfu, CAO Lihua, LUO Binbin, et al. Study on spectral response of raised cosine apodized FBG under Non-uniform temperature field [J]. *Semiconductor optoelectronics*. 2014, 35(2): 184 - 189. (in Chinese)
赵明富, 曹李华, 罗彬彬, 等. 非均匀温度场下上升余弦变迹 FBG 的光谱响应研究 [J]. *半导体光电*, 2014, 35 (2): 184 - 189.
- [12] CHENG R, XIAO, 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.
- [13] WU Jin, WU Hanping, HUANG Junbing, et al. Research progress in signal demodulation technology of fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(4): 519 - 531. (in Chinese)
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.
- [14] WU Hongbo, CHEN Shuang, ZHAO Yinming, et al. Research on fabrication of apodized FBG with short grating length of 2mm based on double-exposure apodizing technology [J]. *Metrology & Measurement Technology*, 2013, 33(3): 28 - 32. (in Chinese)
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.
- [15] LI Zhengyin, ZHOU Lei, SUN Wenfeng, et al. High speed and high precision demodulation method of fiber grating based on dispersion effect [J]. Acta Phys. Sin. 2017, 66(1): 112-120. (in Chinese)
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.
- [16] LIU Pengfei, HAO Fenghuan, HE Shaoling, et al. Wavelength Demodulation for Distributed Feedback Active Fiber Grating Sensor Based on Wavelength Scanning [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(10): 1010002. (in Chinese)
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.
- [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.
- [19] DAR A B, JHA R K. Design and comparative performance analysis of different chirping profiles of tanhaped fiber Bragg grating and comparison with the dispersion compensation fiber for long-haul transmission system [J]. Journal of Modern Optics, 2017(6): 1-12.