

doi: 10.3788/gzxb20164507.0706003

基于可调谐半导体激光器的高分辨率多路复用 光纤光栅波长解调系统

崔巍, 苏建加, 姜培培, 吴波, 沈永行

(浙江大学 光电科学与工程学院 现代光学仪器国家重点实验室, 杭州 310027)

摘要: 构建了一套高分辨率的可复用光纤光栅波长解调系统. 采用波长调谐范围为 1 546 nm 至 1 558 nm 的紧凑型可调谐半导体激光器作为光源, 来提高系统的紧凑性、波长分辨率以及响应速度, 加入标准气室作为波长基准以提高系统的长期稳定性. 使用多个电极电流共同调谐的办法, 实现了在 12 nm 范围内半导体激光器波长分辨率高达 1 pm 的准连续波长扫描. 利用重心算法提高光纤光栅中心波长的解调精确度和稳定性, 并对解调过程进行模拟. 解调系统的波长分辨率优于 1 pm, 精确度接近 2 pm. 整个光纤布拉格光栅温度传感系统在 1 550 nm 附近实现了 0.1℃ 的温度分辨率.

关键词: 光纤光学; 光纤光栅传感系统; 可调谐半导体激光器; 重心算法

中图分类号: O433.1

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2016)07-0706003-8

High-Resolution Multiplexed Fiber Bragg Grating Wavelength Interrogation System Based on Tunable LD

CUI Wei, SU Jian-jia, JIANG Pei-pei, WU Bo, SHEN Yong-hang

(State Key Laboratory of Modern Optical Instrumentation, College of Optical Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: A compact and high-resolution multiplexed Fiber Bragg Grating (FBG) wavelength interrogation system was reported. A compact tunable Laser Diode(LD) covering wavelength from 1 546 nm to 1 558 nm is applied as the light source to improve the simplicity, wavelength resolution and the response rate of the FBG demodulation system. A standard HCN gas-cell is incorporated as the wavelength reference. The 1 pm quasi-continuous wavelength tuning of the LD over 12 nm is realized by the combination of current control on multiple electrodes. A spectral centroid algorithm is used to determine the FBG's wavelength, which results in robustness of the demodulation and then the high accuracy of the FBG interrogation. The demodulation process is simulated. The experimental results show an excellent wavelength resolution of better than 1 pm and precision of about 2 pm, which corresponds to temperature resolution of 0.1℃ around 1 550 nm in an FBG-based fiber sensor.

Key words: Fiber optics; Fiber Bragg grating sensor system; Tunable laser diode; Centroid algorithm

OCIS Codes: 060.2310; 060.2370; 060.3735

0 引言

光纤布拉格光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)传感系统具有高灵敏度、高可靠性、高稳定性以及抗电磁干扰的特性,且结构紧凑、抗腐蚀、扩展度和集成度高,已经在结构监测、电力通讯、宇航等领域中得到广泛应用^[1-3].

FBG 的传感原理基于 FBG 中心波长随环境温度、应变等各种环境因素的变化关系,其中最基本的实验方案是采用宽带光源作为系统光源,获得 FBG 的反射谱线,通过对谱线数据的处理来进行波长解调^[4].但宽带光源,如放大自发辐射(Amplified Spontaneous Emission, ASE)光源,其本身光功率和反射信号强度较低,解调系统的信噪比难以提高,因此相应的波长分辨率也受到限

基金项目:国家自然科学基金(No. 10377016)资助

第一作者:崔巍(1989-),男,硕士研究生,主要研究方向为光纤传感和光纤激光器. Email: shineboyew@163.com

导师(通讯作者):沈永行(1965-),男,教授,博士,主要研究方向为光纤激光器、中波红外激光器和光纤传感器. Email: physyh@zju.edu.cn

收稿日期:2016-02-24;录用日期:2016-03-08

<http://www.photon.ac.cn>

制^[5]. 光栅中心波长在 1 550 nm 附近随温度变化的灵敏度约为 10 pm/°C, 因此, 为达到 0.1 °C 的温度分辨率, 需要有 pm 级别的波长精确解调以及较高的输出信噪比, 这是常规宽带光源解调无法达到的.

按照解调原理, 已有的解调方法主要有边缘滤波法、干涉扫描法、光栅匹配法以及可调滤波器法^[6-7]等. 其中, 可调滤波器法具有调制速度快和可调波长范围大的优势, 得到广泛应用^[8]. Yang 等在 2014 年提出一种基于可调谐滤波器高准确度的 FBG 解调系统, 采用法珀标准具和分段算法进行动态解调以消除误差, 达到了 0.65 pm 和 0.23 pm 的稳定度和分辨率^[9]. 然而, 传统的电调制滤波器存在的温度漂移效应、蠕动效应以及其他非线性效应等固有弊病^[10], 导致其本身调谐的可重复度难以获得进一步的提升^[11-12]. 另外, 由于滤波器本身体积较大, 驱动电路复杂, 使得此类系统难以进一步实现结构的紧凑化和高集成度.

针对这些问题, 采用体积小巧的半导体激光器的紧凑型解调系统成为一种可行的思路. 此类光源主要有分布反馈式 (Distributed Feedback Bragg, DFB)、分布式布拉格反射式 (Distributed Bragg Reflection, DBR) 半导体激光器以及单片式激光二极管等^[13-15]. 由于具有调谐可重复度高、驱动电路简单、波长分辨率高等优点, 相对于传统的基于电调制滤波器的解调系统具有明显优势. Yan 等于 2010 年提出一种基于可调谐 DFB 激光器的 FBG 温度传感系统, 达到了 10 pm 的波长分辨率和 $\pm 1^\circ\text{C}$ 的稳定度^[16]. Müller 等于 2010 年提出了采用单片激光二极管作为光源, 达到了 2 pm 的波长分辨率^[17]. 熊燕玲等于 2015 年提出的基于可调谐 DFB 激光器的解调系统, 波长测量范围约为 5 nm, 分辨率为 1 pm, 准确度为 10 pm^[18]. 然而, 由于所用半导体光源本身较窄的波长调谐范围和较低的光功率, 难以实现大范围的波长调谐, 以致测量范围有限, 至今为止并没有得到广泛的工程应用.

本文提出并实验验证了一个基于紧凑型宽带可调谐半导体激光器的高分辨率多路复用光纤光栅波长解调系统. 在该系统中, 采用的可调谐半导体激光器具有较大可调谐范围和较高的波长分辨率. 系统同时加入了标准 HCN 气室作为波长基准, 用以实时校准波长, 并部分消除传统方法中的非线性效应以提高解调准确度, 保证解调系统的长期稳定性. 系统采用波长重心算法进行解调, 充分利用了光源的高波长分辨率, 实现了分辨率优于 1 pm 的波长解调, 且提高了解调的稳定性. 该系统结构紧凑、成本较低, 波长调谐范围较大, 实用型大为提高.

1 系统结构及解调原理

1.1 系统结构

FBG 解调系统的结构如图 1. 可调谐激光二极管

(Laser Diode, LD) 的调谐范围为 1 546 nm 到 1 558 nm, 输出功率约为 10 mW. 从 LD 发出的光经由一个 1×2 耦合器分为两路. 一路进入参考通道, 穿过透射式 HCN 标准气室, 被光探测器 PD₀ 探测到. 另一路为传感通道, 经由光纤环形器进入 FBG 链, 其反射信号被光探测器 PD₁ 探测. 两个探测器上接收到的模拟信号经放大后被转化为数字信号, 由 FPGA 构成的数据采集模块进行采集和处理, 最终传输至上位计算机进行检测和数据处理. 整个系统紧凑度高, 可单机运行, 且具备一定的扩展性.

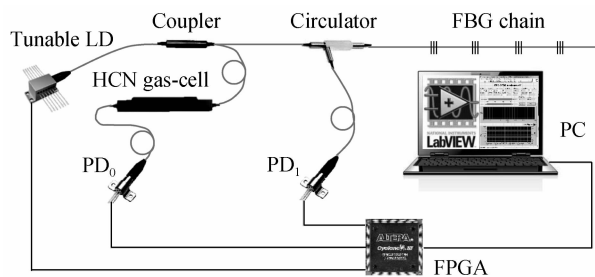


图 1 解调测试系统结构原理

Fig. 1 Schematic setup of the FBG interrogation system

1.2 准连续波长扫描

系统中采用的激光光源是一种 V 形腔反射半波耦合器结构的 LD, 具有宽带波长调谐特性. 通过直接改变二极管各组电极的电流, 可以实现输出波长的调谐^[19]. 这些电极电流主要包含粗调谐、精调谐和温度调谐电流.

实验中所用半导体激光器的输出光谱如图 2, 其单模抑制比可达 40 dB, 线宽可达到 kHz^[20]. 输出波长与粗调谐和精调谐电流的关系如图 3 和图 4. 波长随着粗调谐电流的增大而增大, 在各个“通道”内连续变化且变化不大, 但在交界处会发生模式跳变, 使得波长到达下一个“通道”, 呈现台阶式上升的趋势. 同时, 波长会随着精扫描电流的增大而减小, 并呈台阶式下降. 粗调谐及精调谐中关键的跳模节点无法在理论上进行精确确定, 只能采用实验测量的方式获得.

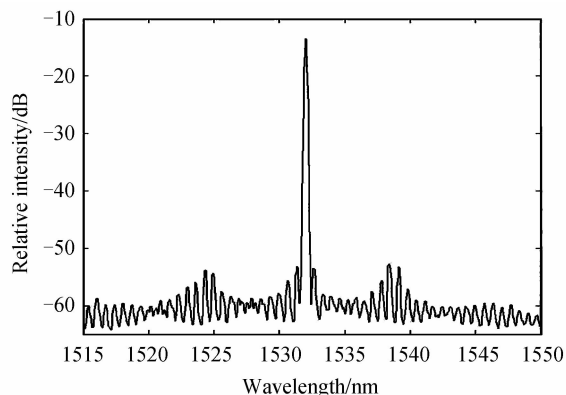


图 2 半导体激光器的输出

Fig. 2 Output spectrum of the semiconductor LD

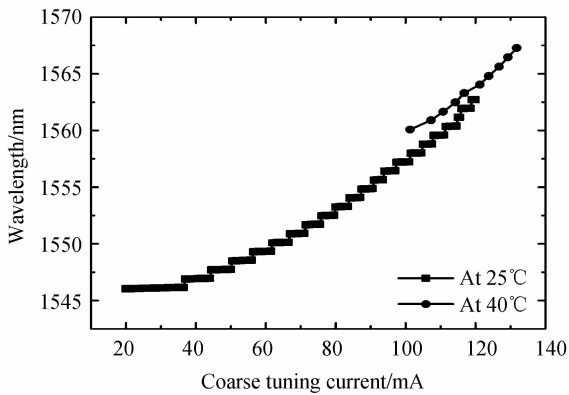


图3 激光器输出波长和粗调谐电流的变化关系

Fig. 3 Relationship of the coarse tuning current and the output wavelengths

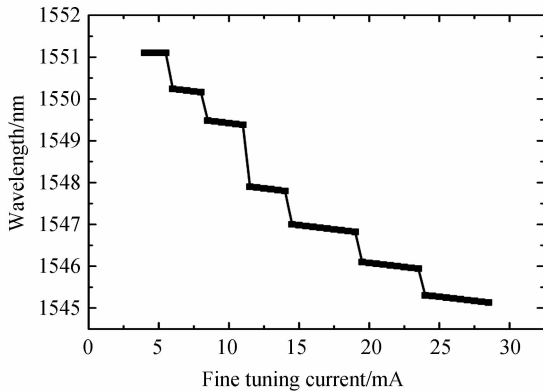


图4 激光器输出波长和精调谐电流的变化关系

Fig. 4 Relationship of the fine tuning current and the output wavelengths

为了解决以上问题,本系统中引入了温度调谐并与粗调谐、精调谐相结合以实现准连续波长调谐.在粗调谐变化的各个“通道”的中点附近,引入精调谐进行连续变化.借助精调谐 0.05 mA 的电流分辨率,可以实现 1 pm 的最小波长变化,如图 5.为避免过度调谐带来的模式跳变,在可能跳变的各个边界节点采用温度调谐以保证各个“通道”之间平稳的过渡,如图 6.需要指出的是,此处所说的“温度调谐”仅利用半导体激光器本身内部的控温装置,通过改变驱动电流少量改

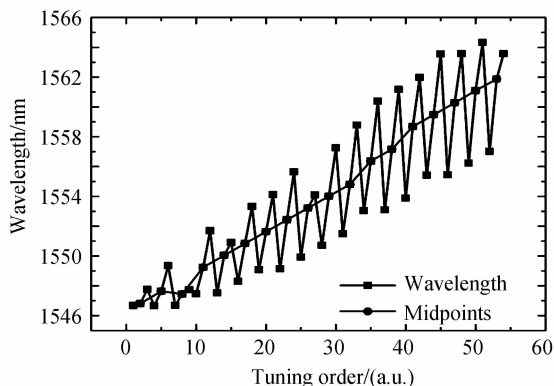


图5 粗扫描“通道”中点附近的波长变化

Fig. 5 Wavelength variance around the “midpoints”

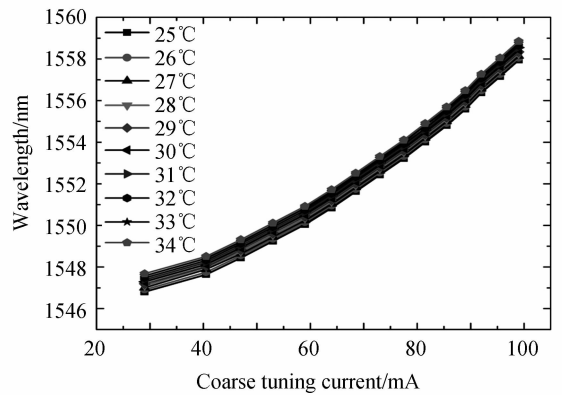


图6 温度调谐曲线

Fig. 6 Temperature tuning effects

变 LD 的结温,以此改变激光输出波长.鉴于温度调谐实时性相对较差,此处采用的温度变化很小,相邻的温度调谐变化范围均为 0.2°C,以保证 LD 能快速稳定.为保证系统准确度,实验系统中,在激光器控制指令发送的速度上作了一定的调整,留出足够的稳定时间,以确保温度调谐时激光器输出波长的稳定.

为保证系统的响应速率和可重复性,充分利用精扫描的高分辨率优势,同时避免跳模现象,采用粗调谐、精调谐和温度调谐三者同时变化的方式,得出了波长范围为 1 546 nm 至 1 558 nm,最小波长分辨率达 1 pm 的准连续波长调谐方法,波长调谐结果如图 7.

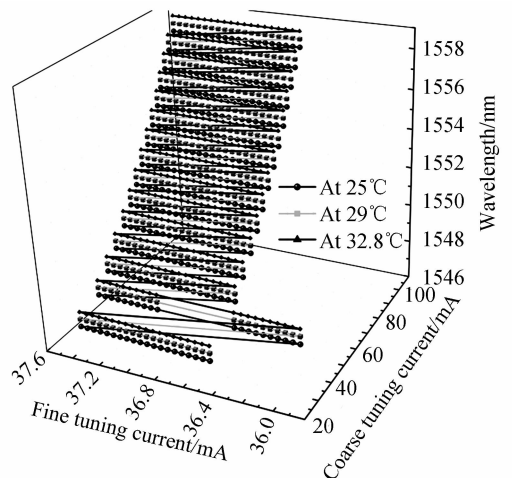


图7 准连续波长调谐曲线

Fig. 7 Quasi-continuous wavelength tuning curves

1.3 解调原理

为了提高波长精确度和稳定性,加入一个光纤化的透射式 HCN 标准气室作为波长基准.该气室的波长精确度优于 0.2 pm,温度系数小于 0.01 pm/°C.在 200°C 的温度变化范围内,其波长漂移小于 2 pm.在解调的开始阶段,使用参考通道的气室标准谱线数据对激光器输出波长进行标定.气室谱线各个特征峰之间的波长间隔约为 0.4 nm,在 C 波段有明显的特征谱线可用以校准^[21],以此保证波长标定结果的准确性和可

信度. 采用这种标定方法, 系统的长期稳定性可以得到有效保证.

采用分段解调和重心算法^[22]进行 FBG 中心波长的解调. 整个过程可以分为粗扫描、精扫描和重心计算. 首先, 如图 8, 可调谐激光器以 20 pm 的步长扫描 12 nm 的波长范围, 称之为“粗扫描”, 得到的每个 FBG 的峰值波长组成序列 $[\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_n]$. 其次, 激光器再以 1 pm 的步长扫描每个峰值波长 λ_i 附近 1 nm 的波长范围, 称之为“精扫描”, 得到从 $I_{\lambda_{i-d}}$ 到 $I_{\lambda_{i+d}}$ 的 1 000 个强度数值, 其中 $2d$ 为扫描对应的波长范围, 组成序列 $[I_1, I_2, \dots, I_i, \dots, I_n]$. 最后, 为了提高解调的稳定性和精确度, 引入重心算法. 该算法实质上是计算近高斯分布的离散数据的期望值. 当数据呈现近高斯分布的趋势并且边界连续时, 其计算结果可以较好地消除噪声和偶然跳变数据的影响, 适合激光谱线数据的计算.

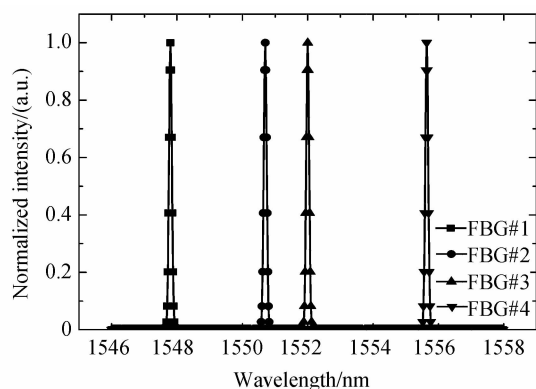


图 8 “粗扫描”及分段解调示意

Fig. 8 Schematic diagram of peak detection

利用重心算法, 从一个离散序列 (x_i, I_i) 计算出重心特征值 x_c , 计算公式为

$$x_c = \frac{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i I_i}{\sum_{i=1}^n I_i} \right)}{\sum_{i=1}^n I_i} \quad (1)$$

此处, x_c 对应的重心特征波长 λ_c 落在相临近的波长 λ_s 和 λ_{s+1} 之间, 相应的序列坐标分别为 x_s 和 x_{s+1} . 该特征波长值与序列数据之间的关系可由式(2)进行计算.

$$\lambda_c = \lambda_s + \frac{(x_{s+1} - x_c)(\lambda_{s+1} - \lambda_s)}{x_{s+1} - x_s} \quad (2)$$

经过系统比较和实验证实, 结合可调谐 LD 的准连续调谐, 采用重心算法进行解调可以达到较好的 FBG 解调效果, 具有较高的实验准确度和很好的稳定性.

2 解调过程模拟及误差分析

图 9 和图 10 为一个解调过程模拟. 假设 FBG 的带宽为 0.1 nm, 波长扫描的步进波长分别为 1 pm 和 20 pm, 可调谐 LD 的激光谱线宽度为 5 pm. 波长扫描的范围为 2.4 nm.

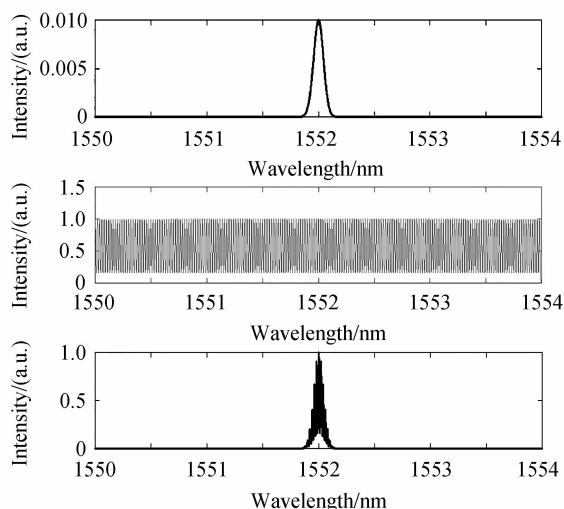


图 9 “粗扫描”过程模拟

Fig. 9 The “rough scan round” simulation

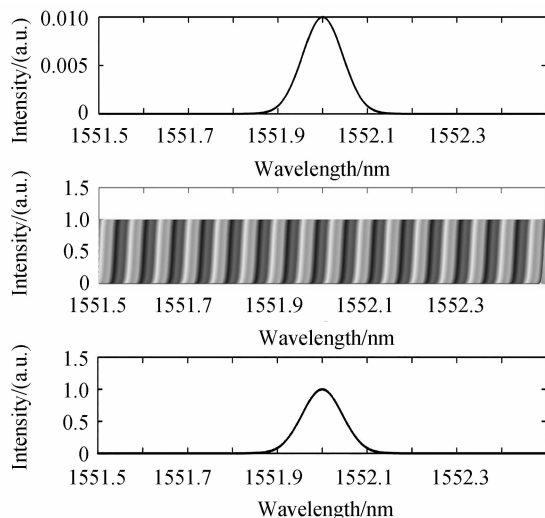


图 10 “精扫描”过程模拟

Fig. 10 The “fine scan round” simulation

经由以上的模拟过程, 并采用重心算法模拟解调, 结果如图 11. 从中可以发现: 波长解调的误差与扫描步长基本相当(略小于对应的扫描步长), 随着扫描步长的增大而增大. 因此提高 LD 波长的扫描分辨率是

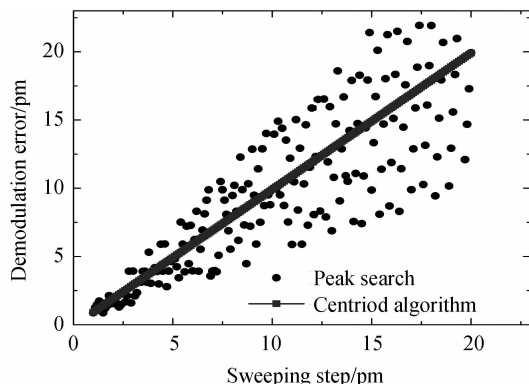


图 11 直接寻峰与重心算法解调误差对比
Fig. 11 Comparison between the direct peak search and the simulation results using centroid algorithm

提高 FBG 解调准确度的重要手段。

3 实验结果及分析

3.1 单根 FBG 升降温测试

测试开始前,可调谐激光器必须通过 HCN 气室谱线进行校正以保证解调准确度。系统中采用光电探测器将 FBG 反射后得到的模拟光信号转化为电信号,再经模数转换电路 ADC 转化为数字信号,使用高速 FPGA 进行信号处理。通过高效的 FPGA 片上解调算法,解调得到的数据被处理并传输至上位机。上位机程序采用 LabVIEW 进行编程^[23],可以控制 FPGA 及可调谐激光器进行 FBG 中心波长的自动解调,并将探测得到的谱线和解调计算结果显示出来。

实验中所用的 FBG,均使用 Sb-Ge 共掺的光纤作为光敏光纤^[24],采用 193 nm 准分子激光经过相位掩模板进行写入,经退火后,其本身具有良好的长期稳定性并可维持较好的谱线形状,为系统的波长精确解调提供了良好的基础。

为了验证系统的线性度和重复度,控温炉的温度在 30℃ 至 35℃ 之间来回变动,变化步长为 1℃,每次测量都保持 10 分钟以上,待其稳定后再进行测量。整个升、降温的过程进行 20 次,如图 12。图 13 中的误差线

表示 20 次循环过程中解调数据的波动范围,散点则表示在各个标定温度点测得的 20 组数据的平均值^[25],随后对这两组均值分别进行拟合,得到的解调数据用以说明解调系统的各项指标。

可以看到,20 次测量过程的温度变化趋势接近,各个测量点没有明显的漂移或迟滞等现象,能较好地反映环境温度的变化。

如表 1 所示,在 20 次升降温过程中,各个标定温度点上的解调波长波动标准差均在 2 pm 以内,相应的解调温度波动也在 0.2℃ 以下,表明解调系统的可重复性较好。

表 1 20 次升降温过程解调数据波动统计
Table 1 Statistic of the demodulation in 20 cycles

Oven temperature/℃	Standard deviation of the demodulated temperature/℃	Standard deviation of the demodulated wavelength/pm
30.0	0.24387227	0.753937035
31.0	0.234183913	1.755442664
32.0	0.095145318	0.510417786
33.0	0.228208123	2.073017761
34.0	0.104629673	0.670820393
35.0	0.091766294	0.587142949

解调系统的温度灵敏度为 10.2 pm/℃,波长随环境温度变化的线性度良好($R^2=0.9881$)。

随后大范围调节炉温,变化范围为 30℃ 到 120℃,变化步长为 10℃。每一次温度改变后都保持 10 min,待其稳定后再进行测量和数据记录。测试过程和结果如图 14。

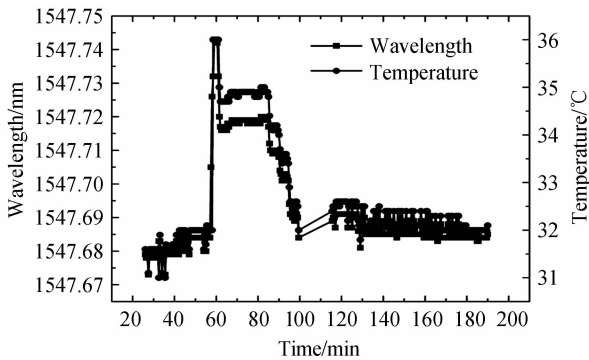


图 12 升降温过程中的解调数据

Fig. 12 Demodulation data over the temperature changing process

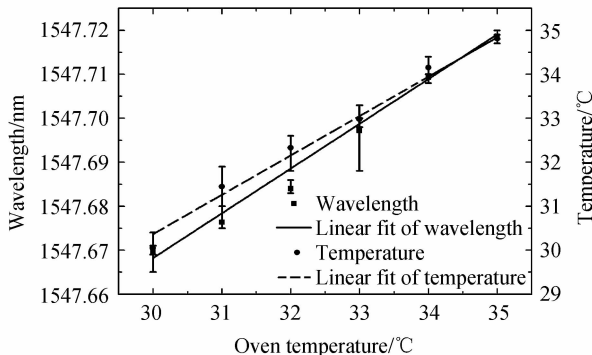


图 13 解调数据和标定温度之间的拟合

Fig. 13 Comparison between demodulated points and calibration value

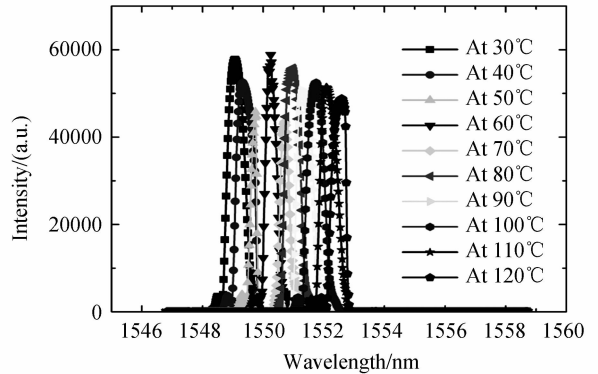


图 14 大范围温度变化过程中的扫描谱线

Fig. 14 Wide range temperature variance test

如图 15,解调波长和炉温之间的线性度良好($R^2=0.9956$)。此处受限于实验条件,没有在更高温下进行测试。结合升降温测试以及大范围温度测试的结果,可以得出,解调系统具有较宽的测温范围(30℃ 至 120℃)、较高的可重复度以及良好的线性度(大温度变化范围下, $R^2=0.9956$)。

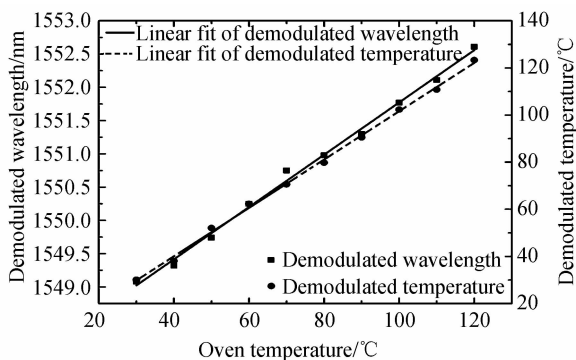


图 15 解调数据和标定温度间的拟合

Fig. 15 Linear fitting of the demodulated data

3.2 单根 FBG 稳定性测试

为测试波长解调的稳定性,该 FBG 放置在微型控温炉内进行控温测试. 通过改变环境温度同时监测解调过程,可以获知系统的分辨率、准确度、稳定度以及线性度等相关参量. 在 1 550 nm 附近,FBG 的温度系数约为 10 pm/°C,因而 1 pm 的波长分辨率即对应 0.1°C 的温度分辨率. 由于控温炉自身的控温准确度也是 0.1°C,所以解调过程中 0.2°C 的温度波动是合理的.

在 0.5 h 的时间内,系统每 30s 解调一次,共获得 60 组数据. 控温炉温度设定在 35.0°C. 同时,未控温时系统的解调数据也被列出,用来与之进行对比.

对比未控温和控温环境下的解调数据,控温情况下的温度波动得到有效减小,如图 16 和图 17. 通过前向差分得到各个采样点间的数据波动,如图 18 和图 19. 可以看到,相对于未控温环境,在控温环境下,基本上所有的温度变化都被控制在 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 的范围内,这与控温炉的控温准确度相符合.

经过数据处理和分析,解调得到的波长为 $(1\ 547.718 \pm 0.002)\text{nm}$,相应的波长标准偏差为 1 pm (1.008 pm). 因而,系统的分辨率和精确度分别为 1 pm 和 2 pm.

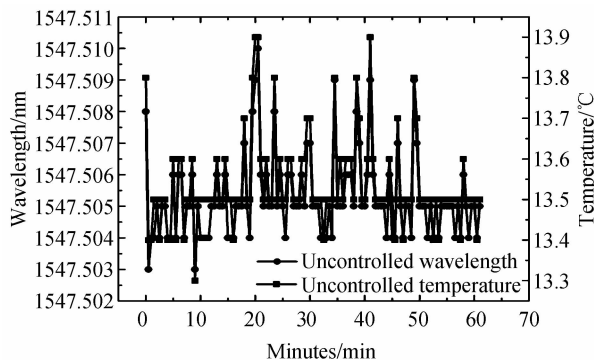


图 16 未控温环境下的解调数据变化情况

Fig. 16 Uncontrolled wavelength and temperature demodulation

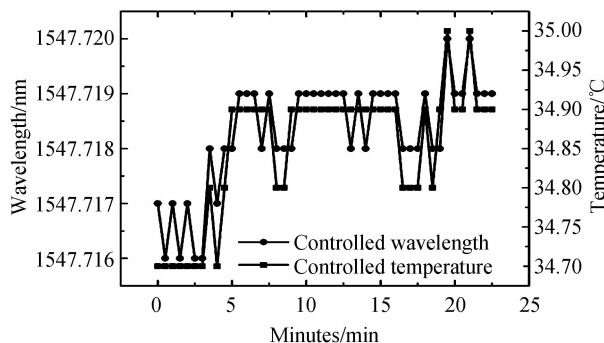


图 17 控温环境下的解调数据变化情况

Fig. 17 Controlled wavelength and temperature demodulation

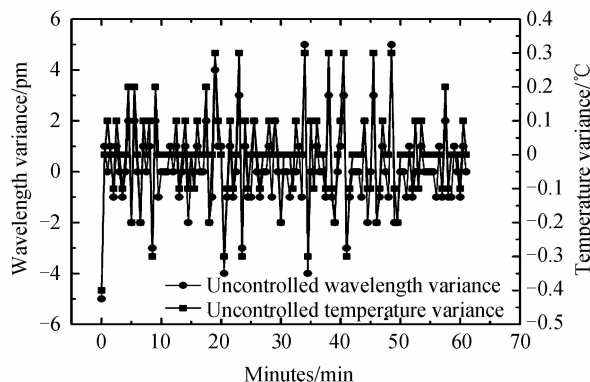


图 18 未控温环境下的数据波动情况

Fig. 18 Uncontrolled wavelength and temperature variance

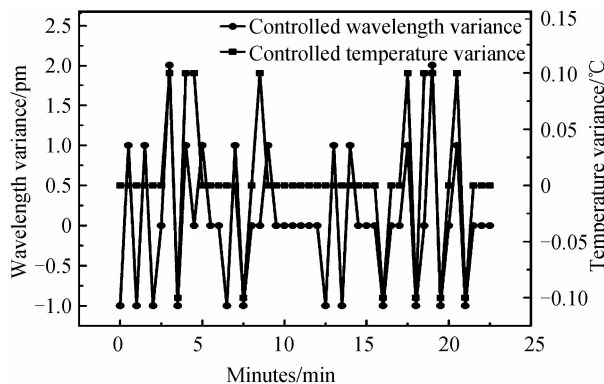


图 19 控温环境下的数据波动情况

Fig. 19 Controlled wavelength and temperature variance

3.3 多根 FBG 解调测试

为验证测试系统的复用能力,将 4 根不同波长的 FBG 串接成一组 FBG 链接入系统,进行波长扫描和解调测试. FBG 的参量如表 2.

粗扫描中,以 20 pm 的分辨率扫描 12 nm 的范围,可以得到 4 根 FBG 的反射谱线,由于可调谐激光器的输出功率与波长相关,同时光纤器件的耦合情况也不同,所得到的强度谱线,与 FBG 写入时监测得到的反射率并不是严格相关,如图 20.

表 2 FBG 参量

Table 2 Parameters of the FBGs

Number/#	Center wavelength/nm	Reflectivity/dB
1	1547.80	14
2	1 550.70	15
3	1 552.00	27
4	1 555.64	23

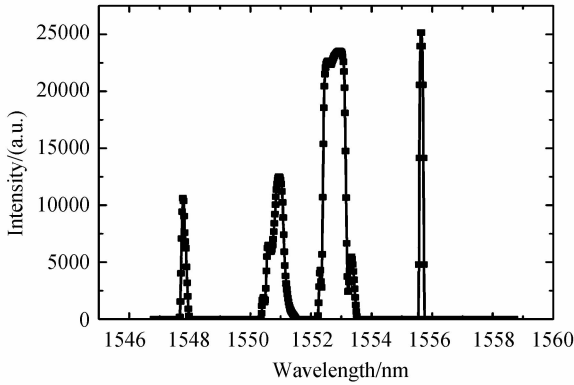


图 20 粗扫描下的 4 根 FBG 谱线(20pm 分辨率)

Fig. 20 Reflectivity of an FBG chain with 4 FBGs (20pm rough scan)

随后,根据粗扫描得到的各个光栅的峰值波长,进行 1 pm 的分段精扫描,得到各个光栅中心波长附近的反射率谱线。

然后进行多根 FBG 的温度解调测试,一段时间内的波长变化曲线可以进行监测并记录,以待后续处理,如图 21。

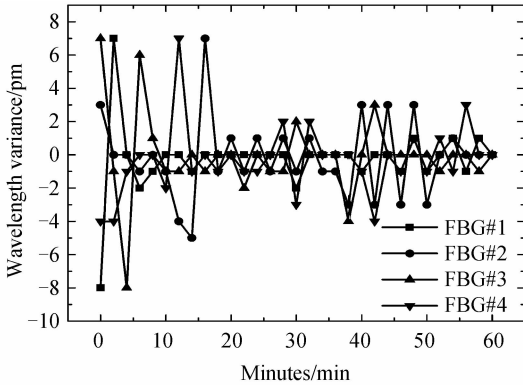


图 21 各个 FBG 的解调波长变化情况

Fig. 21 Wavelength variance in the demodulation of the FBG chain (4 FBGs)

受限于实验条件,仅进行了 FBG 在常温至高温(30℃至 120℃)温度范围内的实验测试,并没有进行低温区(-20℃至 30℃)的测试。另外,受限于体积因素,多个 FBG 组成的 FBG 链测试并未置于控温环境中,因此 FBG 本身的温度波动略大于控温环境,约为 ±1℃,相应的波长波动范围在 10 pm 以内,经过一段时间后,解调波长呈现逐渐稳定的趋势,如图 21。

需要提出的是,以上所得测试结果均是在一般室内环境下得到,并没有对解调系统的工作环境进行特

殊的温控、减震等处理。

3.4 讨论和分析

通过单根和多根 FBG 的测试,经过多次升降温循环,得出了系统的分辨率和精确度分别为 1 pm (1.008 pm)和 2 pm,且具有良好的可重复度和线性度。然而,考虑到激光器调制电流的分辨率,相应的解调波长分辨率实际上仍有进一步提升的空间。同时,目前系统的全波长采样时间为 30 s,已经能较好地满足实际应用需求。该时间响应速率受限于激光器驱动电路的命令传输速度,若采用更高速率的传输接口,时间响应率可以得到进一步的提升。另外,系统的稳定度也可以通过系统器件进行更高准确度的环境温控而得到提高。总体来看,系统结构紧凑,分辨率高,测试准确度高,具有实用性。其不足之处是,可调谐激光器的初始波长标定较为费时费力,在一定程度上可能影响其更广泛的应用。

4 结论

本文提出了一种基于可调谐半导体激光器的高分辨率多路复用光纤光栅波长解调系统。采用电流直接调谐实现 LD 激光波长的宽带准连续扫描,同时使用标准 HCN 气室作为波长基准。通过改变环境温度并监测解调数据,证实系统具有优于 1 pm 的分辨率和 2 pm 的精确度,解调周期约为 30 s。该紧凑型系统适合于对多根 FBG 的同时监测以实现复用,可以用于桥梁、道路或油库等场景的环境监测。另外,在对 FBG 进行高分子镀膜和加入不锈钢套管的保护后,传感网络可以适应化学溶液、核辐射及宇宙空间环境等各类极端恶劣环境的监测。

参考文献

- [1] KERSEY A D, DAVIS M A, PATRICK H J, *et al.* Fiber grating sensors[J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, **15**(8): 1442-1463.
- [2] JIN W. Multiplexed FBG sensors and their applications[C]. International Symposium on Photonics and Applications. International Society for Optics and Photonics, 1999: 468-479.
- [3] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors [J]. *Optical Fiber Technology*, 2003, **9**(2): 57-79.
- [4] ZHANG X, MAX J J, KASSI H. C+ L band erbium-doped fiber ASE source enables high-speed FBG sensor interrogation [C]. Photonics North 2006. International Society for Optics and Photonics, 2006: 63430P-63430P-6.
- [5] LUO Z, WEN H, GUO H, *et al.* A time-and wavelength-division multiplexing sensor network with ultra-weak fiber Bragg gratings[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(19): 22799-22807.
- [6] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. Fiber-grating based strain sensor with phase sensitive detection[C]. European Conference on Smart Structures and Materials, 1992, 1777: 61-67.
- [7] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fibre-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electronics Letters*, 1992, **28**

- (3): 236-238.
- [8] YUN B, WANG Y, LI A, *et al.* Tunable fiber laser based fiber Bragg grating strain sensor demodulation system with enhanced resolution by digital signal processing[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2006, **48**(7): 1391-1393.
- [9] YANG G, GUO J, XU G, *et al.* A novel fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on FP etalon [C]. SPIE/COS Photonics Asia. International Society for Optics and Photonics, 2014: 92700V-92700V-7.
- [10] JIANG Jun-feng, HE Pan, LIU Tie-gen, *et al.* Research of temperature-stable fiber Bragg grating sensing demodulation based on composite wavelength references[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015, **35**(10): 74-79.
江俊峰, 何盼, 刘铁根, 等. 基于复合波长参考的温度稳定光纤光栅传感解调研究[J]. *光学学报*, 2015, **35**(10): 74-79.
- [11] WANG Peng, ZHAO Hong, LIU Jie, *et al.* Dynamic real-time calibration method for fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on tunable Fabry-Perot filter[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015(8): 77-84.
王鹏, 赵洪, 刘杰, 等. 基于可调谐 FP 滤波器的 FBG 波长解调系统的动态实时校准方法[J]. *光学学报*, 2015(8): 77-84.
- [12] WANG Y, ZHANG X, LIU Y, *et al.* High multiplexing capability and ultrahigh resolution interrogation for optical fiber Bragg grating sensing system [C]. OFS2012 22nd International Conference on Optical Fiber Sensor. International Society for Optics and Photonics, 2012: 842146-842146-4.
- [13] OHN M M, HUANG S Y, BIGUE J, *et al.* Tunable laser demodulation of various fiber Bragg grating sensing modalities [J]. *Smart Materials and Structures*, 1998, **7**(2): 237.
- [14] LI Zheng-ying, SUN Wen-feng, WANG Hong-hai. Research on the ultra-weak reflective fiber Bragg grating sensing technology based on Optical frequency domain reflection technology[J]. *Acta Optica Sinica*, 2015(8): 56-63.
李政颖, 孙文丰, 王洪海. 基于光频域反射技术的超弱反射光纤光栅传感技术研究[J]. *光学学报*, 2015(8): 56-63.
- [15] WANG Li-jun, NING Yong-qiang, QIN Li, *et al.* Development of high power diode laser[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2015, **36**(1): 1-19.
王立军, 宁永强, 秦莉, 等. 大功率半导体激光器研究进展[J]. *发光学报*, 2015, **36**(1): 1-19.
- [16] YAN L S, YI A, PAN W, *et al.* A simple demodulation method for FBG temperature sensors using a narrow band wavelength tunable DFB laser[J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2010, **18**(22): 1391-1393.
- [17] MÜLLER M S, HOFFMANN L, BODENDORFER T, *et al.* Fiber-optic sensor interrogation based on a widely tunable monolithic laser diode[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2010, **59**(3): 696-703.
- [18] XIONG Yan-ling, REN Nai-kui, LIANG Huan, *et al.* Fiber Bragg grating wavelength demodulation system based on dynamic scanning of distributed feedback laser [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, **27**(01): 27011003.
熊燕玲, 任乃奎, 梁欢, 等. 分布式反馈激光器动态扫描光纤布拉格光栅波长解调系统[J]. *强激光与粒子束*, 2015, **27**(01): 27011003.
- [19] ZHANG S, MENG J, GUO S, *et al.* Simple and compact V-cavity semiconductor laser with 50×100 GHz wavelength tuning[J]. *Optics Express*, 2013, **21**(11): 13564-13571.
- [20] WU L, HE J J, GALLAGHER D. Modeling of widely tunable V-cavity semiconductor laser using time-domain traveling-wave method[J]. *JOSA B*, 2015, **32**(2): 309-317.
- [21] LEGON A C, MILLEN D J. Gas-phase spectroscopy and the properties of hydrogen-bonded dimers. HCN. cntdot.. cntdot.. cntdot.. HF as the spectroscopic prototype [J]. *Chemical Reviews*, 1986, **86**(3): 635-657.
- [22] CHEN Zhi-jun, BAI Jian, WU Zu-tang, *et al.* Optimization and comparison of the peak-detection algorithms for the reflection spectrum of fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(11): 1112001.
陈志军, 白剑, 吴祖堂, 等. 光纤布喇格光栅反射谱寻峰算法优化及比较[J]. *光子学报*. 2015, **44**(11): 1112001.
- [23] LIU Chun-tong, LI Hong-cai, HE Zhen-xin, *et al.* Design of fiber Bragg grating automatic analysis test system based on LabVIEW [J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(2): 0206002.
刘春桐, 李洪才, 何镇鑫, 等. 基于 LabVIEW 的光纤光栅自动检测及分析系统[J]. *光子学报*, 2016, **45**(2): 0206002.
- [24] SHEN Y, HE J, SUN T, *et al.* High-temperature sustainability of strong fiber Bragg gratings written into Sb-Ge-codoped photosensitive fiber; decay mechanisms involved during annealing[J]. *Optics Letters*, 2004, **29**(6): 554-556.
- [25] RAO Chun-fang, LIU Chen, YE Zhi-qing. Stress evolution sensing technique for electrodeposition based on fiber Bragg grating[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2015, **44**(2): 206002.
饶春芳, 刘程, 叶志清. 基于布喇格光纤光栅的电沉积应力演变测试[J]. *光子学报*, 2015, **44**(2): 206002..