

## 基于 REC 技术的激光器阵列传感系统设计

秦逸轩<sup>1,2</sup>, 倪屹<sup>1</sup>, 姚辉轩<sup>1</sup>

- (1. 江南大学 物联网工程学院, 江苏 无锡 214122;
2. 南京大学 现代工程与应用科学学院, 江苏 南京 210093)

**摘要:** 分析并提出了基于重构等效啁啾(REC)技术激光器阵列的传感系统和解调算法。REC 工艺满足激光器阵列的低成本大量生产, 并具备小体积的优势, 在未来传感领域中有较大的实用价值。提出了一种激光器扫描的高效算法用来测量光纤布拉格光栅(FBG)因外界应力而产生的位移量。系统的独特性在于阵列激光器通道仅需调谐 0.4 nm 采样数据, 取代了扫描 FBG 主功率峰, 并且算法在 FBG 的任意谱段均适用, 可以用于多通道波峰复用的 FBG 传感网络中。在单通道和四通道的实验中对 FBG 反射谱的位移进行精确定位, 初步实验证明了该系统 and 算法的有效性和可行性。算法得出单通道中心波长与实际中心波长误差均在 5 pm 以下, 四通道可以到达在 2 pm 以下, 应力与算法结果中心波长呈现很好的线性度。对今后多通道激光阵列传感具有一定参考价值。

**关键词:** 光纤传感器; 激光阵列传感器; 解调算法; 多通道波分复用

**中图分类号:** TN249 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.1005002

## Design of laser array based on REC technology

Qin Yixuan<sup>1,2</sup>, Ni Yi<sup>1</sup>, Yao Huixuan<sup>1</sup>

- (1. School of Internet of Things Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China;
2. College of Engineering and Applied Sciences, Nanjing University, Nanjing 210093, China)

**Abstract:** The sensing system and demodulation algorithm of laser array based on REC technology were analyzed and put forward. REC process met the low-cost mass production of laser array, and had the advantages of small size, and a greater practical value in the field of sensing in future. An efficient algorithm for laser scanning was proposed to measure the displacement of fiber Bragg grating (FBG) due to external stress. The system was unique in that accurate demodulation can be achieved by scanning only 0.4 nm bandwidth FBG spectrum instead of relying on scanning FBG main power peak and the algorithm can be applied in any FBG band, which enable using of wavelength-division multiplexing (WDM) for FBG sensing network. In the experiment, the single-channel and four-channel can accurately search the displacement of FBG reflection spectrum. Preliminary experiments demonstrate the effectiveness and feasibility of the proposed method, results show that the error of single-channel is less than 5 pm, four-channel's is below 2 pm, stress and algorithm results show good linearity. It has certain reference value for the multi-channel laser array sensing.

**Key words:** fiber optic sensor; laser array sensor; demodulation algorithm; WDM

收稿日期: 2017-02-12; 修订日期: 2017-03-15

基金项目: 江苏省六大人才高峰计划(DZXX-023); 江苏省产学研联合创新资金-前瞻性联合研究项目(BY2014023-11)

作者简介: 秦逸轩(1991-), 男, 硕士生, 主要从事激光器传感方面的应用和研究。Email: qyxqj@126.com

导师简介: 倪屹(1970-), 男, 教授, 硕士生导师, 主要从事光电集成、光学材料方面的研究。Email: niy2011@163.com

## 0 引言

光纤布拉格光栅(FBG)自问世以来因其具有灵敏度高、不受电磁干扰、可靠性高、成本低、体积小等特点,广泛应用于建筑、航空航天、水下监听、大型机械等各个领域<sup>[1-4]</sup>。光纤光栅传感技术经过国内外多年研究,已经取得了巨大的成果,随着技术的成熟,人们将研究重点逐步转向了高精度、小体积、成本低的传感系统和解调方案<sup>[5-7]</sup>,使之满足市场化和产业化的需求。

文中所用激光器光源是自主研发的采用重构-等效啁啾(REC)技术的DFB激光器<sup>[8]</sup>。这种工艺是通过采样光栅在透射谱的±1级信道中引入等效λ/4相移代替真实相移,从而降低了工艺要求并提高激光波长精确度<sup>[9]</sup>。由于使用全息曝光和对应其他微米级光刻工艺即可完成原本纳米级的复杂光栅设计,大大降低了激光器成本,这为低成本、小体积传感系统创造了条件<sup>[10]</sup>,也是文中研究的价值所在。

目前提出许多对应可调谐DFB激光器的解调方案,例如质心检测算法(CDA)<sup>[11]</sup>,最小二乘法(LSQ)<sup>[12]</sup>,自相关算法(SC)<sup>[13]</sup>,互相关算法(CC)<sup>[14]</sup>。然而对于这些算法,可调谐激光光源必须覆盖一个较宽的调谐范围,对整个主功率峰上的反射谱进行采样,使算法能够正常的工作。由于较宽的调谐范围需要较长的调谐时间,所以他们不能在波分复用的光纤光栅传感网络中使用。并且对于可调谐激光器,它是热控制元件,长时间的扫描发热势必会影响它的工作进程。文中首次提出了基于REC激光器阵列传感系统的解调方案和算法,满足其针对性,同时减轻上述激光调谐范围和扫描时间问题的限制,并使之能够满足波分复用条件,及解调系统快速和准确的需要。经实验验证,对FBG反射谱仅需调谐采样0.4 nm的带宽足以满足系统的准确解调。采样的光谱可以随机分布在整个的反射谱(可以不包含主功率峰),包括功率值相对较低的反射谱。由于该算法具备该独特的功能,所提出的解调系统相比于传统的解调方案具备以下优势:(1)方案简单,且满足波分复用条件;(2)更少的采样点,更短的解调时间,

更快的解调速度;(3)在一定条件下,所采样的0.4 nm反射谱信息可以覆盖整个反射谱任何谱段,大大增强解调算法的可靠性。

## 1 实验系统及原理

搭建应力传感测量系统如图1所示。该系统由一个DFB激光器阵列芯片作为系统光源,一个三相环形器(Circulator)将激光器光源导入FBG,再将反射光导入一个高分辨率光谱分析仪(OSA)。FBG固定在一个位移台(Translation Stage),能够实时读出FBG的拉伸量。激光器调谐所得数据导入计算机进行算法处理。值得一提的是,该实验以短周期光纤布拉格光栅为研究对象,其中心波长为1550.7 nm,3 dB带宽为0.15 nm。此外,实验所用OSA分辨率为1 pm。

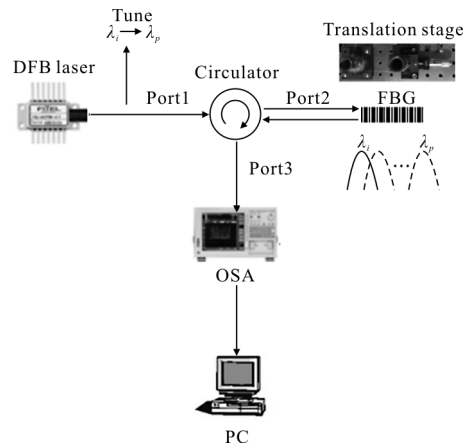


图 1 应力传感系统结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup for measuring strain response

在一个恒温场中,FBG中心波长随着应力的变化将由 $\lambda_B$ 移动到 $\lambda_{B1}$ ,则由耦合模理论<sup>[15]</sup>知动态位移变化量 $\Delta\lambda$ 可以表示为:

$$\Delta\lambda = \lambda_B [(1 - P_e)\epsilon] \quad (1)$$

式中: $P_e$ 为光纤材料的弹光系数; $\epsilon$ 为应变变化量; $\lambda_B$ 为FBG中心波长。

这个传感系统的解调算法原理:首先需要存贮初始状态下FBG反射谱的数据,它们可以表示为 $N_1, N_2 \dots N_x$ (实验时采集了10 nm的数据点)。当FBG处于应力中时,中心波长将会漂移,利用可调谐激光器对漂移后的FBG在带宽内随机进行0.4 nm的扫频,得到的数据可以表示为 $M_1, M_2 \dots M_y$

( $X \gg Y$ )。实验发现由于 FBG 拉伸,反射率光谱在振幅上有小范围的变化(形状不变)。由于光功率不同,所以在算法匹配之前,要将数据点进行统一的归一化处理,以每次匹配第一个点的比值进行处理。

$$A_1 = M_1 / N_1 \quad (2)$$

将采集的每一点按比值进行归一化,再与原始光谱功率求差,最后为降低算法的误码率且能够在较大带宽内使用,要除以原始光谱值,这样能得到一个水平基准值。

$$\Delta_1 = \sum_{i=1}^Y \left[ \frac{M_i - N_i}{A_1 N_i} \right]^2 \quad (3)$$

以此类推,求出  $\Delta_2, \Delta_3, \dots, \Delta_{X-Y+1}$ , 即:

$$A_2 = M_1 / N_2 \quad (4)$$

$$\Delta_2 = \sum_{i=1}^Y \left[ \frac{M_i - N_{i+1}}{A_2 N_{i+1}} \right]^2 \quad (5)$$

$$A_{X-Y+1} = M_1 / N_{X-Y+1} \quad (6)$$

$$\Delta_{X-Y+1} = \sum_{i=1}^Y \left[ \frac{M_i - N_{i+X-Y}}{A_{X-Y+1} N_{i+X-Y}} \right]^2 \quad (7)$$

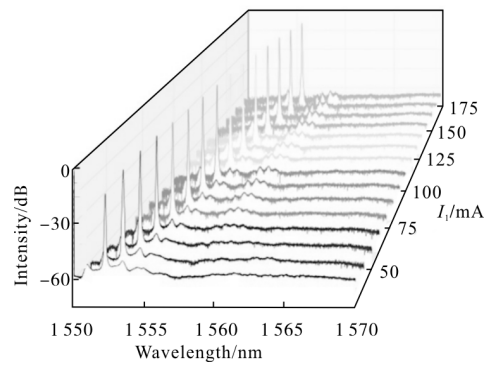
最终所得  $X-Y+1$  个  $\Delta$  值,求最小值  $\Delta_{\min} = \min(\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{X-Y+1})$ ,能得到  $M_1$  所对应的波长匹配至原始谱图  $N_{\min}$  所对应的波长,即漂移波长  $\Delta\lambda = \lambda_{M_1} - \lambda N_{\min}$ 。

## 2 实验与分析

为了验证文中提出解调方法即算法的有效性,搭建了光栅传感测量系统,如图 1 所示。

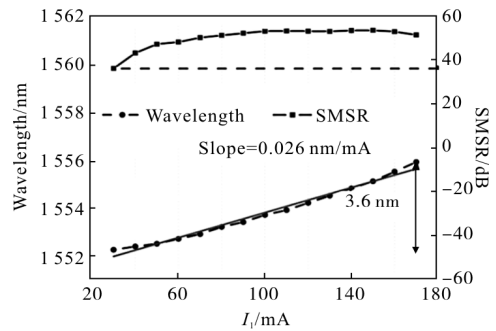
在传感实验前,验证了激光器光源的稳定性和可行性,以满足实验的需求。如图 2 所示,测试 REC 激光器芯片单通道的调谐模式。在室温 20 °C 时,通过加电 30~170 mA,单通道激光器可以调谐 3.4~3.6 nm,调谐速率在 10~30 ms,信噪比保持在 35 dB 以上,满足实验要求。并能够通过控制半导体光放大器(SOA)电极加电控制激光器出光光功率,使光功率在调谐过程中保持稳定 ( $\pm 0.01$  mW)。基于 REC 技术制作出来的多波长激光器阵列可以获得高精度的多波长,能够完全匹配该系统实现多波

长传感。



(a) REC 激光器光源的调谐范围

(a) Tuning range of the REC laser source



(b) 可调谐激光器的边模抑制比和线性度

(b) Side Mode Suppression Ratio (SMR) and linearity of the tunable laser source

图 2 REC 可调谐激光器的特性

Fig.2 Characteristics of REC tunable laser

图 3 为一次初步实验。在 1 551 nm 处做了一个 100  $\mu\text{s}$  的初步试验。测量 10 nm 原始数据谱,如图黑线所示。再给予 100  $\mu\text{s}$ ,在 1 551 nm 处调谐扫描 0.4 nm,算法匹配后如点线所示。如图所示可见实验所用 FBG 光纤布拉格光栅初始状态的反射谱线,中心波长为 1 550.7 nm。在采集初始数据时为保证原

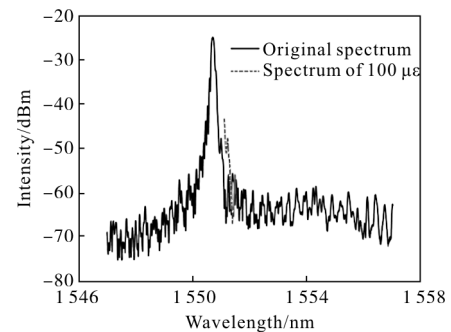


图 3 在 1 551 nm 处的 100  $\mu\text{s}$  的初步试验

Fig.3 System preliminary test(1 551 nm, 100  $\mu\text{s}$ )

始数据量足够,采集了 10 nm 的带宽。设置可调谐激光器初始扫描位置为 1 551 nm,调谐范围为 0.4 nm,对 FBG 处于 100  $\mu\epsilon$  应力下进行调谐扫频。算法归一化处理后,可以清晰看到波长的漂移,说明在应力下波形可以保持稳定性,也验证了系统的信噪比(SNR)非常高,这为图 4 的算法处理创造了条件。

图 4 为初步实验的算法处理结果。软件得出  $\Delta_{\min}$ (Min Value)为第 3 541 个点,其匹配至原始光谱 1 551 nm 所在的数据点。以此求出漂移波长  $\Delta\lambda$ 。

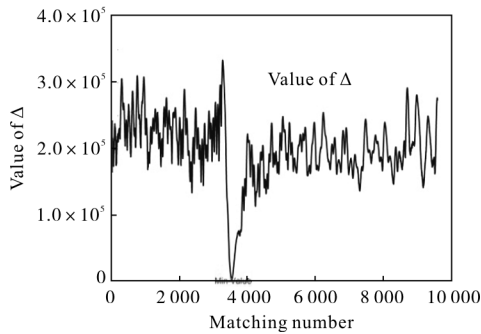
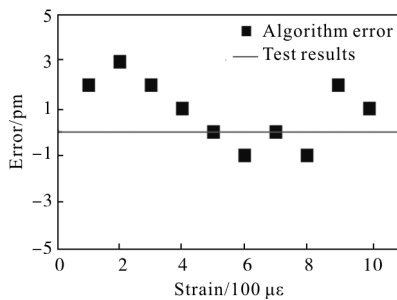


图 4 算法初步实验的结果

Fig.4 Preliminary test results from algorithm

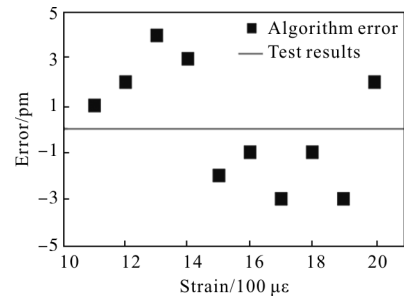
实验所用 FBG 光栅的光纤长 20 cm,每次拉升 0.02 mm,即对 FBG 每次给予 100  $\mu\epsilon$  的应变。一共拉升 29 次,对应变建模一共选取 29 个样本,在每个样本中测量 0.4 nm 的数据点。为验证算法的普遍适用性,从位移 1 到位移 10 在 -30~-40 dBm 处取点;位移 11 到位移 20 在 -40~-50 dBm 处取点;位移 20 到位移 29 在 -50~-60 dBm 处取点。将算法位移和实测位移进行比较,如图 5(a)~(c)所示。

由图 5 可见,误差并没有随着光栅受应力变化



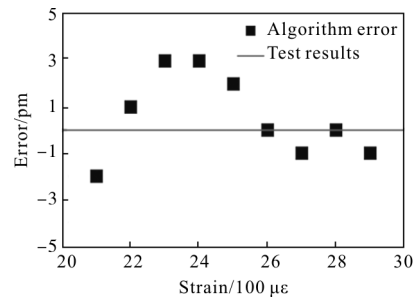
(a) 在 0~1 000  $\mu\epsilon$  应力范围内采集,数据在 -30~-40 dBm 范围内

(a) Collecting data within -30 to -40 dBm, strain from 0 to 1 000  $\mu\epsilon$



(b) 在 1 100~2 000  $\mu\epsilon$  应力范围内,采集数据在 -40~-50 dBm 范围内

(b) Collecting data within -40 to -50 dBm, strain from 1 100 to 2 000  $\mu\epsilon$



(c) 在 2 100~2 900  $\mu\epsilon$  应力范围内,采集数据在 -50~-60 dBm 范围内

(c) Collecting data within -50 to -60 dBm, strain from 2 100 to 2 900  $\mu\epsilon$

图 5 算法结果和实际测量的漂移误差

Fig.5 Drift error of the algorithm results and the actual measurement

产生较大波动,在取点过程中分别在不同功率值段调谐取数据,由图 4(c)可知,在功率值较低(-50~-60 dBm)时,误差依旧保持在 5 pm 以下,该算法基本能够保证在很大带宽内的有效性。

以应变 100  $\mu\epsilon$  为步进步长,将图 5 算法得出的位移后光谱的中心波长进行非线性回归分析,如图 6

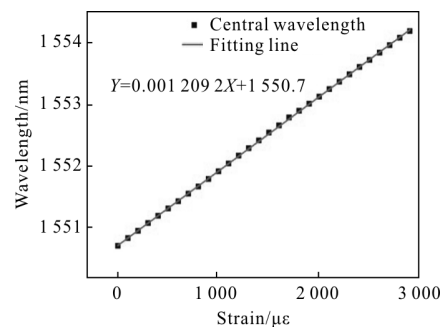


图 6 光谱漂移算法运行结果线性拟合

Fig.6 Running result fitting of spectrum shift algorithm

所示。模型的评价指标相关系数  $r$  为 0.999 133 23, 该实验和算法解调得到应变变化下引起的波长漂移为  $1.209 2 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。所选取的光栅中心波长为  $1 550.7 \text{ nm}$ , 光纤轴向应变灵敏度系数为  $K_{\epsilon}=1-P_{\epsilon}=0.781 25 \times 10^{-6}/\mu\epsilon$ , 则理论波长灵敏度为  $1.211 48 \text{ pm}/\mu\epsilon$ 。算法值和理论值基本一致。

为了验证该系统和算法在波分复用传感领域的可行性, 使用四个通道对 FBG 进行连续扫频(实验时方便处理数据, 实际应用时可以四通道不连续等间隔扫描), 如图 7 所示。在  $100 \mu\epsilon$  下, 单个通道扫描  $0.4 \text{ nm}$ , 共扫描  $1.6 \text{ nm}$ , 覆盖  $1 550.2 \sim 1551.8 \text{ nm}$  波段。算法得出匹配点后进行归一化处理, 得到图 7(a)。

图 7 (b)~(e) 分别是在  $100 \mu\epsilon$  应力下通道 1~4 算法解调的结果, 图中圆圈处可以得到算法最小匹配值, 从而每个通道都可以得到一个漂移结果, 将四个通道的结果进行均值处理。相比于单通道而言, 误

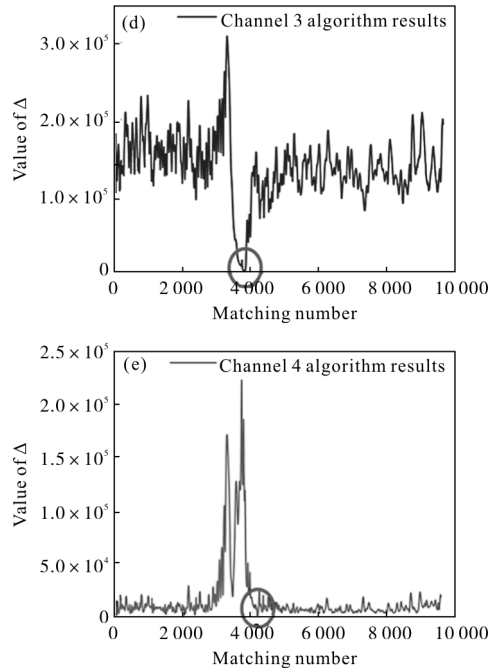
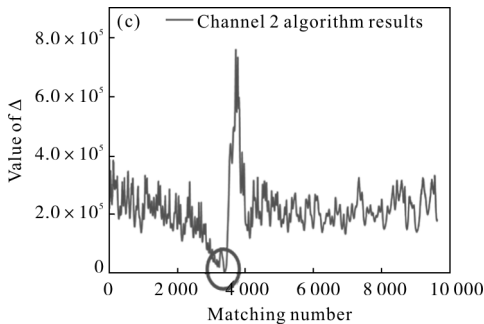
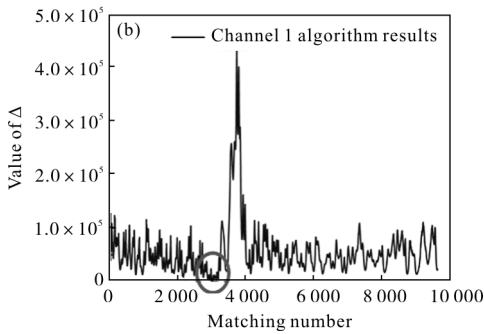
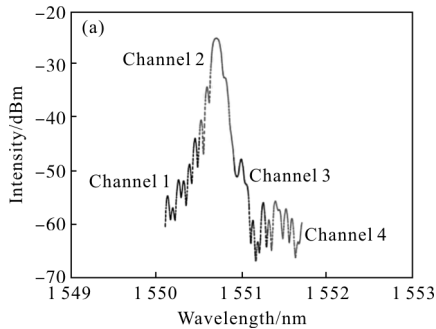


图 7  $100 \mu\epsilon$  四通道应力传感实验

Fig.7 Four-channels  $100 \mu\epsilon$ -strain sensor experiment



差将大大缩小。每次给予  $100 \mu\epsilon$  应力, 拉伸了 10 组, 误差均在  $\pm 2 \text{ pm}$  以内, 具体结果如表 1。

表 1 四通道误差结果

Tab.1 Error results of four-channels

Shift	Shift of theory/pm	Shift of algorithm/pm	Error/pm
0	/	/	/
1	121	122	+1
2	242	242	+0
3	363	364	+1
4	484	483	-1
5	605	605	0
6	726	725	-1
7	847	845	-2
8	968	967	-1
9	1 089	1 088	-1
10	1 210	1 210	0
11	1 331	1 333	+2

### 3 结论

文中给出一种新型传感系统及解调算法, 讨论了基于 REC 工艺的可调谐激光器芯片应用于传感

领域的优势及工作原理。单通道或多通道激光器在 FBG 漂移后的小范围扫频 (不用覆盖波峰), 设计出适用于此系统的解调算法, 采用归一化依次匹配寻找漂移量。实验验证了该方法的可行性和有效性, 且在大幅度应变下和反射光功率值较低时均能达到理想状态。这种集成化度高的多波长芯片在面向传感市场具有体积小和成本低的巨大优势, 且完全适合于多通道传感系统。初步实验证明将该种 REC 技术激光阵列芯片与多通道传感结合具有实际应用意义。实验中的误差来自于环境噪声, 光源的稳定性以及多通道之间的电串扰。在多通道实验中, 应当解决在不增大误差的情况下, 减少每个通道的扫描带宽问题, 这为以后进一步研制打下基础。

#### 参考文献:

- [1] Wu Jing, Wu Hanpin, Huang Junbin, et al. Large range FBG sensor for ship structure health monitoring [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2014, 22(2): 311–317. (in Chinese)  
吴晶, 吴晗平, 黄俊斌, 等. 用于船舶结构监测的大量程光纤布拉格光栅应变传感器 [J]. 光学精密工程, 2014, 22(2): 311–317.
- [2] Xu Ning, Dai Ming. Design of distributed optical fiber sensor for temperature and pressure measurement[J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(4): 629–635. (in Chinese)  
徐宁, 戴明. 分布式光纤温度压力传感器设计 [J]. 中国光学, 2015, 8(4): 629–635.
- [3] Li Fang, He Jun, Xu Tuanwei, et al. Fiber laser sensing technology and its applications [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2009, 38(6): 1025–1032. (in Chinese)  
李芳, 何俊, 徐团伟, 等. 光纤激光传感技术及应用[J]. 红外与激光工程, 2009, 38(6): 1025–1032.
- [4] Dai J, Yang M, Yu X, et al. Optical hydrogen sensor based on etched fiber Bragg grating sputtered with Pd/Ag composite film[J]. *Opt Fiber Technol*, 2013, 19(1): 26–30.
- [5] Li Jianzhong, Liu Zhenqing, Lei Jiangbo, et al. Wavelength division multiplexed optical fiber hydrogen sensing system for multi-point measurement [J] *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0822006. (in Chinese)  
李建中, 刘振清, 雷江波, 等. 可实现多点测量的波分复用光纤氢气传感系统 [J]. 红外与激光工程, 2016, 45(8): 0822006.
- [6] Chen Yong, Wang Kun, Liu Huanlin, et al. Processing FBG sensing signals with three-point peak-detection algorithm[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2751–2756. (in Chinese)  
陈勇, 王坤, 刘焕淋, 等. 三点寻峰算法处理光纤布拉格光栅传感信号[J]. 光学精密工程, 2013, 21(11): 2751–2756.
- [7] Wu Jing, Wu Hanping, Huang Junbin, 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.
- [8] Liu Sen, Ni Yi, Cao Baoli. Tunable laser module based on REC technology[J]. *Laser & Infrared*, 2016, 46(3): 289–293. (in Chinese)  
刘森, 倪屹, 曹宝丽. 基于 REC 技术的可调谐激光器模块 [J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 289–293.
- [9] Ni Yi, Zhang Jie, Kong Xuan. Designing and testing of tunable DFB laser array using REC technology[J]. *Chinese J Laser*, 2015, 42(5): 0502003. (in Chinese)  
倪屹, 张杰, 孔轩. 基于 REC 技术的可调谐 DFB 激光器阵列设计与测试[J]. 中国激光, 2015, 42(5): 0502003.
- [10] Chen X F, Liu W, An J M, et al. Photonic integrated technology for multi-wavelength laser emission [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2011, 56: 3064–3071.
- [11] Atkins C G, Putnam M A, Friebele E J. Instrumentation for interrogating many-element fiber Bragg grating arrays[C]// Proc SPIE, 1995, 2444: 257–257.
- [12] Ezbiri A, Kanellopoulos S E, Handerek V A. High resolution instrumentation system for fibre-Bragg grating aerospace sensors[J]. *Opt Commun*, 1998, 150(1–6): 43–48.
- [13] Caucheteur C, Chah K, Lhommé F, et al. Autocorrelation demodulation technique for fiber Bragg grating sensor [J]. *Photon Technol Lett IEEE*, 2004, 16(10): 2320–2322.
- [14] Huang C, Jing W, Liu K, et al. Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm [J]. *Photon Technol Lett IEEE*, 2007, 19(9): 707–709.
- [15] Shen Xiaoyan, Zhang Liangyue, Sun Jie, et al. Improved layer peeling algorithm to realize FBG non-uniform strain sense demodulation [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2015, 44(12): 3734–3739. (in Chinese)  
沈小燕, 张良岳, 孙杰, 等. 改进剥层法实现 FBG 非均匀应变传感解调[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(12): 3734–3739.