

全光式石英增强光声光谱系统光纤法珀解调技术研究

田莉 朱永 韦玮 林成 许祖稳

重庆大学光电工程学院光电技术与系统教育部重点实验室, 重庆 400044

摘要 基于光纤法珀工作点稳定技术提出了一种适用于全光式石英增强型光声光谱(QEPAS)探测技术的光纤法珀解调系统。利用可调谐光纤激光器作为探测光源,采用法珀干涉光强的直流信号作为误差反馈信号,将工作点锁定在正交相位点上,提高光纤法珀系统的稳定性,从而提高了光声信号探测的准确性。将其应用于全光式石英增强型光声光谱气体探测系统,并在开放环境中完成了对水蒸气的探测实验,得到其归一化噪声等效吸收系数为 $1.81 \times 10^{-7} \text{ W}(\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ 。实验结果表明,相比于一般的全光式石英增强型光声光谱系统,该方法的探测灵敏度提高了1.2倍。

关键词 光纤光学; 石英增强光声光谱; 法珀解调; 静态工作点

中图分类号 TH744.1 **文献标志码** A **doi**: 10.3788/LOP51.060602

Research on the Fiber Fabry-Perot Demodulation Technique Based on All-Optical Quartz Enhanced Photoacoustic Spectroscopy System

Tian Li Zhu Yong Wei Wei Lin Cheng Xu Zuwen

Key Laboratory of Optoelectronic Technology and Systems Ministry of Education, College of Optoelectronic Engineering of Chongqing University, Chongqing 400044, China

Abstract In all-optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy (QEPAS) system, a Fabry-Perot demodulation method based on operating point stabilization technology is proposed. For improving the detection accuracy of the photoacoustic signal, a tunable erbium-doped fiber ring laser is used as the detection light source and a detection technique based on the direct-current error signal is employed to lock the operating point to the quadrature phase point in the system. The experiment for detection of water vapour in the open environment is carried out and a normalized noise equivalent absorption coefficient of $1.81 \times 10^{-7} \text{ W}(\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$ is achieved, which is about 1.2 times higher than that of conventional QEPAS.

Key words fiber optics; quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy; Fabry-Perot demodulation; static operating point

OCIS codes 060.2310; 300.6360; 300.6430; 120.7280; 120.2230

1 引言

2002年由美国奈斯大学 Kosterev等^[1]首次提出了一种石英音叉增强型光声光谱(QEPAS)气体探测系统。该系统采用体积小和品质因数高的石英音叉代替传统光声光谱系统中的麦克风,不仅具有动态范围大、成本低和结构小等特点,而且对环境噪声抗干扰性很强,在环境空气质量监测以及工业生产过程控制等领域中得

收稿日期: 2013-10-06; 收到修改稿日期: 2013-11-14; 网络出版日期: 2014-05-20

基金项目: 中央高校基本科研业务项目(106112013CDJZR120008,106112013CDJZR120006)、高等学校博士学科点专项科研基金新教师类(20120191120021)

作者简介: 田莉(1987—),女,硕士研究生,主要从事光纤传感与激光吸收光谱学等方面的研究。

E-mail: 20110802016@cqu.edu.cn

导师简介: 朱永(1973—),男,博士,教授,主要从事光微纳器件及系统、智能光电仪器等方面的研究。

E-mail: yongzhu@cqu.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

到了广泛应用^[2-4]。

2007年 Koskinen 等^[5]提出了一种基于悬臂梁增强型的光声光谱探测装置,系统采用悬臂梁代替石英音叉作为光声探测器件,由迈克耳孙干涉仪检测悬臂梁的位移信号来实现气体浓度检测。这种方法避免了电解调方式容易受到外界电磁干扰、不能用于易燃易爆、高温高湿度等恶劣环境中等问题。但是,悬臂梁的品质因数较低,导致系统的信噪比较低。为此,结合 QEPAS 系统的优点,课题组提出一种全光式 QEPAS 气体探测系统^[6],该系统采用法珀解调方法得到音叉的振动幅度,从而得到被测气体的光声光谱信号实现气体检测。音叉的共振频率为 32.768 kHz,超出了相位解调^[7-8]所能达到的速度响应范围,因此选用解调速度快的强度解调作为法珀动态解调的方法^[9-11]。然而,法珀的静态腔长容易受到外界机械抖动、温度漂移等因素的影响而发生改变,致使工作点偏离中心位置,导致测量结果不准确^[12]。为了提高测量结果的准确性,本文提出了一种基于法珀工作点稳定技术的全光式石英增强型光声光谱气体探测系统。

本文建立了基于工作点补偿技术的光学法珀解调模型,基于 LABVIEW 软件设计了工作点稳定控制模块,采用法珀干涉光强的直流值作为误差反馈信号,通过调整波长补偿初始腔长由环境干扰所发生的微小变化,将法珀的工作点锁定在最佳工作点上,从而改善法珀解调结果,提高光声光谱信号探测的准确性。为了验证该稳定系统的有效性,在开放环境中对水蒸气进行探测实验。

2 理论分析

2.1 QEPAS 基本原理

当激光照射到被测气体上,特定波长的光子被气体分子吸收后,受激的气体分子通过无辐射跃迁将光能转化为热能并加热周围空气,从而引起气压的变化。当激光被周期性调制时,气压发生周期性变化,从而产生声波并引起音叉振动,通过探测音叉振幅可以得到气体的光声光谱信号。气体吸收光能后产生的声波可以用波动方程表示^[13]为

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2} - c^2 \Delta p = (\sigma - 1) \frac{\partial H}{\partial t}, \quad (1)$$

式中 c, p, t, σ, H 分别表示声速、光声压强、时间、气体绝热系数和气体吸收光能产生的热量密度。由气体吸收激光光能所产生的声压使得音叉发生振动,在 QEPAS 系统中音叉的振动位移方程可以表示为^[14]

$$u(y, t) = \frac{|M_1(y_0)|}{2\beta\omega} \Phi_1(y) \sin[\omega t - \delta_1(y_0)], \quad (2)$$

$$M_n(y_0) = \frac{1}{\rho A} \frac{\int_0^L f(y; y_0) \Phi_n(y) dy}{\int_0^L \Phi_n^2(y) dy}, \quad (3)$$

式中 u 为音叉叉指的振动位移, y 和 y_0 分别表示叉指垂直高度和激光入射点高度, β 为阻尼系数, ω 为音叉的共振频率, Φ_1 和 Φ_n 分别为第一和第 n 阶特征函数, δ_1 为初始相位, ρ 和 $A = TW$ 分别为音叉的密度和叉指横截面积, T, W 和 L 分别为音叉厚度、宽度和高度, f 表示音叉的一个叉指所受的合力。因此,音叉的振动是振幅与音叉所受的声压作用力相关的正弦或余弦振动。

2.2 法珀解调原理

音叉叉指侧面和光纤端面形成法珀腔发生干涉,由于音叉侧面和光纤端面反射率约为 4%,因此干涉光强可以由双光束干涉公式表示,并且由第一类贝塞尔函数展开得^[15]:

$$I = A + B J_0(C) \cos \phi_p + 2B \left[\sum_{k=1}^{\infty} J_{2k}(C) \cos 2k\omega t \cdot \cos \phi_p - \sum_{k=0}^{\infty} J_{2k+1}(C) \sin(2k+1)\omega t \cdot \sin \phi_p \right], \quad (4)$$

式中 $C = |u(y, t)|$, 为音叉振动的幅值, I 为干涉光强, A 和 B 是与光源相关的常数, ϕ_p 为法珀初始腔长所产生的相位,由(4)式可以看出,当 ϕ_p 受到环境干扰,即外界的机械抖动和温度的变化导致初始腔长发生变化时,法珀干涉光强的幅值也会发生变化。

根据(4)式,利用 Matlab 仿真得到干涉光强随着腔长变化的分布图,如图 1(a)所示。假设光源中心波长为 $\lambda_a = 1550 \text{ nm}$ 时, $A1 \sim A3$ 分别是初始腔长为 30.02、30.12、30.22 μm 时的工作点;中心波长为 $\lambda_a = 1555 \text{ nm}$ 时, $B1$ 为初始腔长为 30.12 μm 时的工作点。同样,对激励信号幅值相同而工作点不同时输出信号的情况进

行仿真计算,如图1(b)所示。假设光源中心波长为1550 nm,音叉的共振频率为32 kHz,振幅为100 nm。其中三条曲线分别为不同工作点A1~A3时的相应的输出信号,可以看出,输出信号分为三种情况:线性调制、非线性调制和过调制。当工作点位置偏离中心位置时,法珀传感器不具有线性响应特性,输出干涉光强信号对比度减小或出现倍频现象。

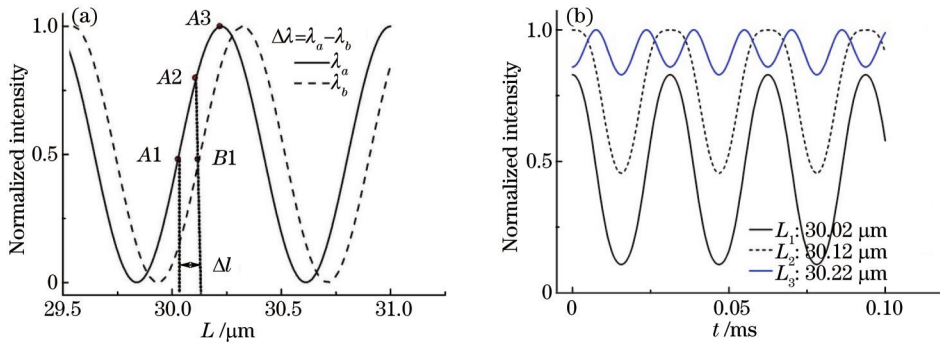


图1 (a) 光强与法珀腔长关系曲线; (b) 相同激励下不同初始腔长处法珀传感器输出光强图

Fig.1 (a) Intensity versus cavity length; (b) output intensity of FP sensor at different initial cavity lengths under the same input excitation

由法珀干涉光的相位差可知,反射光强随着腔长或入射光波长的变化而变化,其相位变化量为^[16]

$$\Delta\phi_p = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta l - \frac{4\pi l}{\lambda^2} \Delta\lambda, \tag{5}$$

式中 l 为法珀静态腔长, Δl 为腔长变化量, λ 为激光波长, $\Delta\lambda$ 为波长变化量。由(5)式可知,通过补偿波长来稳定初始相位,消除腔长的变化所产生的工作点漂移,从而保证工作点始终位于正交相位点上,如图1(a)所示,当初始腔长改变 Δl 时(工作点从A1变化到A2),可以调整波长从 λ_a 到 λ_b ,对应工作点由A1变化到B1。因此,基于法珀干涉/强度解调系统工作点稳定的思想,设计了一种基于可调谐光纤激光器的反馈式石英增强型光声光谱法珀解调系统。

3 实验

3.1 实验系统

反馈式石英增强型光声光谱探测系统如图2所示,其主要包括激励音叉模块、法珀传感器探测模块和信号处理模块。

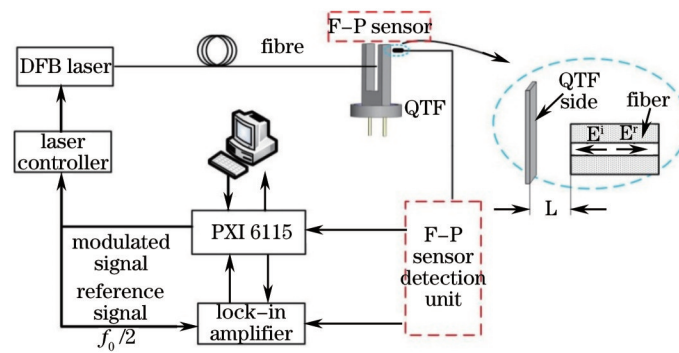


图2 反馈式石英增强型光声光谱系统图

Fig.2 Schematic diagram of feedback type QEPAS system

系统中采用中心波长为1392 nm的分布反馈激光器(DFB, NLK1E5EAAA)作为激励光源,其驱动电流由激光控制器(Thorlabs, ITC502)控制输入,包括高频正弦调制电流(频率为音叉共振频率的一半)和低频锯齿波(频率为4 MHz)扫描电流。被调制的激光由光纤导入到石英音叉(QTF)叉指中央,音叉周围的气体吸收光能产生声波,使音叉发生振动。音叉侧面和光纤端面形成法珀腔,两个端面的反射光干涉构成一个法珀传感器,探测模块接收到目标信号后送入锁相放大器,进行二次谐波解调,解调后的信号通过PXI 6115采集卡送入计算机做进一步的数据分析和处理,从而得到被测气体的光声光谱信号。

3.2 法珀传感器探测模块设计

法珀探测模块具体结构如图3所示,采用可调谐光纤激光器^[14]作为探测光源。其主要包括:抽运光源、波分复用器(WDM)、掺铒光纤(EDF)、可调谐法珀滤波器(FFP-TF)。激光器输出的光经耦合器分为两路,一路由光电探测器PD1(New Focus, Model 2053)探测作为消除光源强度波动的参考信号,另一路经法珀传感器两个端面反射后发生干涉,干涉光强由PD2(New Focuss, Model 2053)探测。两个探测器的信号由采集卡(NI-PXI6115)输入计算机,计算误差信号并转换为可调谐滤波器的驱动电压,控制光纤激光器的输出波长,稳定法珀传感器的静态工作点。同时,PD2的信号送入锁相放大器(SR830)进行二次谐波解调。

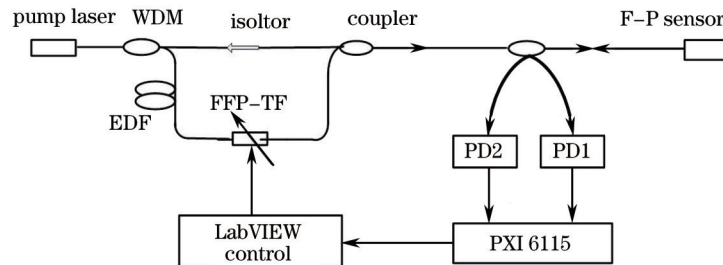


图3 F-P传感器探测模块示意图

Fig.3 Schematic diagram of detection unit of F-P sensor

实现法珀传感器(F-P Sensor)静态工作点稳定的具体实现过程为:两个光电探测器(PD1、PD2)的信号由高速采集卡PXI 6115采集并送入计算机进行相除,去除光源强度的波动影响,相除后的信号经过低通滤波器并对滤波后的结果取平均得到其直流电压值,然后采用比例积分微分(PID)控制算法来实现工作点稳定。程序中使用直流电压值与设定参考电压值(静态工作点)之差作为误差信号,由该误差信号的比例、积分和微分线性组合计算出可调谐法珀滤波器的驱动电压,控制光纤激光器的输出波长,从而实现对工作点的反馈控制。其PID算法的实现及驱动电压的生成是由LABVIEW软件来完成,具体程序框图如图4所示。

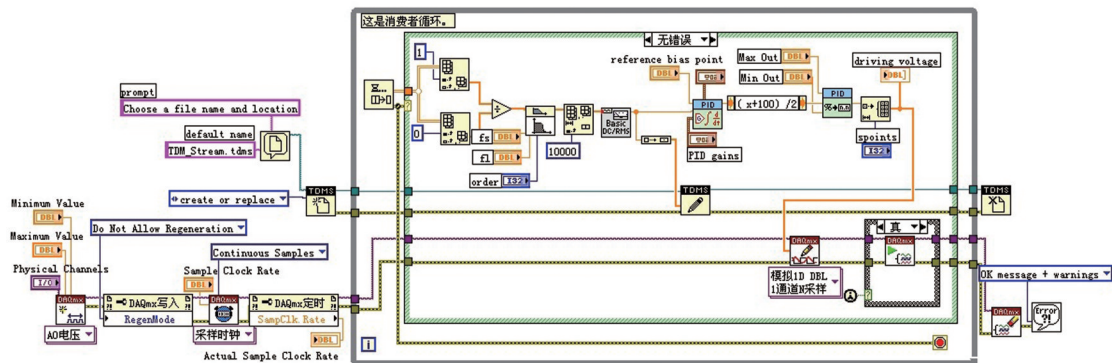


图4 反馈控制程序框图

Fig.4 Block diagram of feedback control program

4 实验结果及分析

根据图3搭建了可调谐光纤激光器,其中采用波长为980 nm的激光器作为抽运光源(功率为0~400 mW),掺铒光纤长度为20 m,可调谐F-P滤波器(美国微光光学MOI, FFP-TF2)驱动电压为6~15 V。输出光谱如图5(a)所示,带宽小于0.001 nm,输出功率为1 mW(0~10 mW可调),波长扫描范围为1525~1565 nm。窄带宽有利于提高法珀干涉光强信号的对比度,从而提高系统的探测灵敏度。可调谐光纤激光器输出波长和F-P滤波器驱动电压的关系如图5(b)所示,由图可知,激光波长与电压成线性关系,因此,可以通过改变F-P滤波器的驱动电压来调整激光器的输出波长。

为了使法珀传感器工作在线性区域且灵敏度最大,将传感器的初始工作点放置在正交相位点上。实验中,首先通过六维平台把法珀初始腔长固定在30 μm左右,给F-P滤波器施加6~10 V的三角波电压进行周期性的扫描,光纤激光器的输出波长对应地从1565 nm到1545 nm周期性变化,得到法珀传感器输出的干涉光强信号的直流电压值。采用输出电压的最大值和最小值的中间值作为传感器的静态参考电压,此时,

工作点位于正交相位点上,传感器灵敏性达到最大。

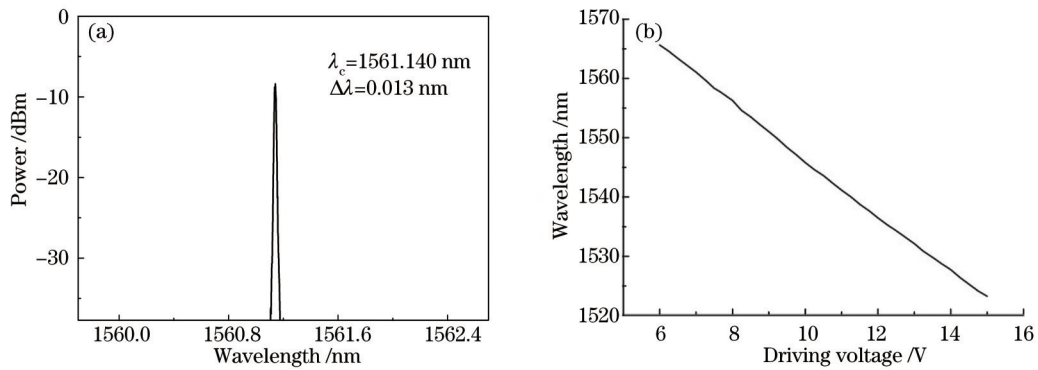


图5 (a) 光纤激光器光谱图; (b) 波长与F-P滤波器驱动电压关系图

Fig.5 (a) Spectrum of fiber laser; (b) wavelength versus driving voltage of F-P filter

根据图2搭建了基于法珀工作点稳定技术的反馈式全光石英增强型光声光谱气体探测系统,如图6所示,在开放环境中,对空气中的水蒸气进行探测实验。为了避免空气中 N_2 , CO_2 , O_2 等气体的干扰,根据HI-TRAN04数据库,选择水蒸气线强为 7.947×10^{-22} cm/mol,其对应的中心波长为1391.6728 nm。通过实验测试得到激光器的输入电流与输出波长之间的线性关系,并且通过输入低频锯齿电流信号实现波长扫过一条完整的气体吸收谱线,其波长扫描范围为1391.66~1391.68 nm,此时对应的激光器的输入电流为32~36 mA,即图7中横坐标所示的电流。实验中空气的相对湿度和环境温度分别为60%和26℃,即水蒸气含量为2.37%,系统测得的水蒸气的吸收谱线如图7(a)所示,其中黑色和红色分别表示实际测量曲线和拟合曲线。从图中可以得到水蒸气的光声信号幅度为1.499 mV,且根据文献[4]的定义,空气中水蒸气非吸收部分的本底基线即为噪声水平,其值为 $5.59 \mu V$,可以得出电压信噪比为268。由此可以得到系统的归一化噪声等效吸收系数为 1.81×10^{-7} W/(cm· \sqrt{Hz})。在相同实验条件下,采用传统的全光式QEPAS系统对水蒸气进行探测,得到其光声光谱信号如图7(b)所示,其归一化噪声等效吸收系数为 2.17×10^{-7} W/(cm· \sqrt{Hz})。由图可知,相比于传统的全光式QEPAS系统,采用基于法珀工作点稳定技术的反馈式全光QEPAS系统光声信号幅值波动更小,探测灵敏度提高了1.2倍。

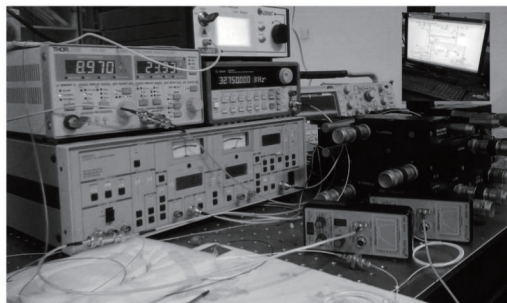


图6 石英增强型光声光谱气体探测系统实物图

Fig.6 Picture of all-optical quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy system

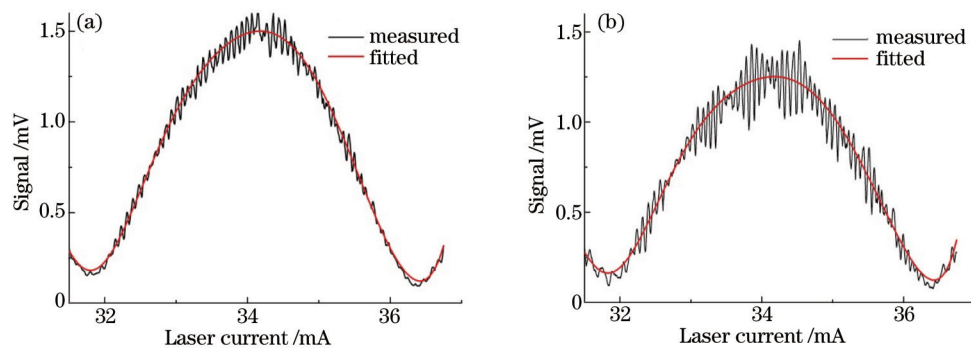


图7 全光式QEPAS得到的光声光谱信号。(a) 反馈式; (b) 非反馈式

Fig.7 Photoacoustic signal obtained by all-optical QEPAS system. (a) Feedback; (b) non-feedback

5 结 论

从光纤法珀解调原理出发,分析了环境干扰对解调结果准确性的影响,利用法珀工作点补偿技术建立了一种基于可调谐光纤激光器的反馈式全光石英增强型光声光谱法珀解调系统。详细介绍了该系统的原理结构,采用可调谐光纤激光器作为法珀解调的探测光源,通过调整其波长来弥补相位的变化,并且基于LABVIEW技术实时监测法珀工作点漂移情况,结合数字PID技术始终将工作点稳定在正交相位点上,有效改善了法珀腔长受环境干扰而导致的漂移问题,搭建了实验系统,在开放环境下对空气中水蒸气含量进行测试,得到其归一化噪声等效吸收系数为 $1.81 \times 10^{-7} \text{ W}/(\text{cm} \cdot \sqrt{\text{Hz}})$,与非反馈式法珀解调系统相比,系统探测灵敏度提高了1.2倍。该系统具有体积小、成本低和探测效率高等优点。为了进一步提高系统的灵敏性和长期稳定性,还可以通过优化光纤法珀膜系参数、PID算法和提高DFB激光器功率。

参 考 文 献

- 1 Kosterev A A, Bakhirkin Y A, Curl R F, *et al.*. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Opt Lett, 2002, 27(21): 1-11.
- 2 Liu K, Li J, Wang L, *et al.*. Trace gas sensor based on quartz tuning fork enhanced laser photoacoustic spectroscopy[J]. Appl Phys B-Lasers Opt, 2009, 94(3): 527-533.
- 3 Li Li, Xie Wenming, Li Hui. Applications of photoacoustic spectroscopy in the field of modern biomedicine[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 100008.
李 莉, 谢文明, 李 晖. 光声光谱技术在现代生物医学领域的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(10): 100008.
- 4 Sun Shanwen, Yi Hongming, Wang Guishi, *et al.*. Impact of water on quartz enhanced photo-acoustic absorption spectroscopy methane sensor performance[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0715001.
孙善文, 易红明, 王贵师, 等. 水气含量对基于QEPAS甲烷气体探测性能的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0715001.
- 5 V Koskinen, J Fonsen, K Roth, *et al.*. Cantilever enhanced photoacoustic detection of carbon dioxide using a tunable diode laser source[J]. Appl Phys B, 2007, 86(3): 451-454.
- 6 Lin Cheng, Zhu Yong, Wei Wei, *et al.*. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy trace gas detection system based on the Fabry-Perot demodulation[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 33(5): 1163-1166.
林 成, 朱 永, 韦 玮, 等. 法珀解调的石英增强光声光谱气体探测系统[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 33(5): 1163-1166.
- 7 Ning Wang, Yong Zhu, Tiancheng Gong, *et al.*. Multichannel fiber optic Fabry-Perot non-scanning correlation demodulator[J]. Chin Opt Lett, 2013, 11(7): 070601.
- 8 Wang Daihua, Liu Shuxin, Yuan Gang, *et al.*. Study on parallel multiplexed Fabry-Perot fiber optic accelerometers and the signal demodulation method[J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(6): 1776-1782.
王代华, 刘书信, 袁 刚, 等. 并联复用光纤法珀加速度传感器及解调方法的研究[J]. 光学学报, 2010, 30(6): 1776-1782.
- 9 Qianyun Wang, Qingxu Yu. Polymer diaphragm based sensitive fiber optic Fabry-Perot acoustic sensor[J]. Chin Opt Lett, 2010, 8(3): 266-269.
- 10 J Li, X Gao, L Fang, *et al.*. Resonant photo acoustic detection of trace gas with DFB diode laser[J]. Opt Laser Technol, 2007, 39(6): 1144-1149.
- 11 D Kim, B Koo, C Kim, *et al.*. Damage detection of composite structures using a stabilized extrinsic Fabry-Perot interferometric sensor system[J]. Smart Mater Struct, 2004, 13(3): 593-598.
- 12 A Miklos, P Hess, Z Bozoki. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology[J]. Rev Sci Instrum, 2001, 72(4): 1937-1955.
- 13 N Petra, J Zweck, A A Kosterev, *et al.*. Theoretical analysis of a quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy sensor [J]. Appl Phys B, 2009, 94(4): 673-680.
- 14 Dong Xinyong, Zhao Chunliu, Guan Baiou, *et al.*. Output characteristics of tunable fiber ring laser: modeling and experimentation[J]. Acta Physica Sinica, 2002, 51(12): 2750-2755.
董新永, 赵春柳, 关柏欧, 等. 可调谐光纤环形腔激光器输出特性的理论与实验研究[J]. 物理学报, 2002, 51(12): 2750-2755.
- 15 Wang Zefeng, Huang Lei, Luo Hong, *et al.*. Improvement on signal detection technique of controlling the working point by closed loop of fiber optic sensors[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(8): 977-980.
王泽锋, 黄 磊, 罗 洪, 等. 光纤传感器闭环工作点控制检测方法的改进[J]. 光电子·激光, 2007, 18(8): 977-980.
- 16 Jianyong Chen, Wancai Li, Hong Jiang, *et al.*. Stabilization of a fiber Fabry-Perot interferometric acoustic wave sensor [J]. Microwave Opt Technol Lett, 2012, 54(7): 1668-1671.