

文章编号: 0258-7025(2009)Supplement 2-0299-07

一种混合式光纤物理和化学传感系统

刘 琨 刘铁根 江俊峰 井文才 汪 曩 张红霞 贾大功 张以谟

(天津大学精密仪器与光电子工程学院光电信息技术科学教育部重点实验室, 天津 300072)

摘要 报道了采用 Fabry-Perot(F-P)可调谐光滤波器和掺铒光纤放大器(EDFA)构建混合式光纤物理和化学传感系统。系统具有开环和闭环两种结构,采用 1×2 光开关进行相互切换,可分别实现物理和化学参量的准分布式、高灵敏度传感。在开环系统中,EDFA 作为宽带光源,光纤 Bragg 光栅(FBG)为传感器,F-P 可调谐光滤波器通过波长扫描实现 FBG 光谱采集,进而解调得到应变、温度等物理量。在闭环系统中,EDFA 和 F-P 可调谐光滤波器构成环腔光纤激光器,将基于 C-lens 设计的传感气室放入光纤谐振腔内,激光器在 EDFA 增益带内扫描一个周期可获得气室内多种气体的吸收光谱,从而实现不同种类气体的同时传感。系统用于应变传感时灵敏度优于 $3 \mu\epsilon$,用于乙炔气体传感时灵敏度优于 75×10^{-6} ,同时还可实现气体种类识别。

关键词 传感器;光栅;可调谐光滤波器;掺铒光纤放大器;环腔光纤激光器

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL200936s2.0299

Research of Hybrid Fiber Physical and Chemical Sensing System

Liu Kun Liu Tiegen Jiang Junfeng Jing Wencai Wang Yan
Zhang Hongxia Jia Dagong Zhang Yimo

(Key Laboratory of Opto-Electronics Information and Technical Science of Ministry of Education,
College of Precision Instrument and Opto-Electronics Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A hybrid fiber physical and chemical sensing system is developed in this paper, using Fabry-Perot (F-P) type tunable optical filter (TOF) and erbium-doped fiber amplifier (EDFA). The system has two configurations of open loop and closed loop, which can be switched by two 1×2 optical switches. And the system can be used to realize physical and chemical sensing with quasi-distributed ability and high sensitivity respectively. In the open loop system, the EDFA acts as system light source, while the fiber Bragg grating (FBG) acts as sensor. The spectra of FBGs are collected through wavelength scanning of F-P type TOF, and the physical parameters like strain and temperature can be obtained as the results of wavelength demodulation. In the closed loop system, the ring-cavity fiber laser is constituted of EDFA and F-P type TOF. The gas cell made by C-lens is put into the fiber resonant cavity. And when the wavelength of the laser scans through the gain spectrum, all absorption lines of multi-gas in the cell can be obtained. So different gas sensing can be realized at the same time. The sensitivity of strain sensing is less than $3 \mu\epsilon$, while the sensitivity of gas sensing is less than 75×10^{-6} with probability of gas recognition at the same time.

Key words sensors; gratings; tunable optical filter; erbium-doped fiber amplifier; ring-cavity fiber laser

1 引 言

目前,煤炭是我国最主要的能源之一。由于开采中对作业环境的监测不力,造成全国煤矿重大事

故频繁,安全生产形势非常严峻。事故的原因是多方面的。首先,地下挖掘和爆破会造成周围地层的应力体系变化,导致岩石形变并引起周围环境不稳

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、国家自然科学基金(60627002,60577013)、天津市应用基础研究计划(06YFJZJC00400)、教育部博士点新教师基金(200800561020,200800561022)和天津大学青年教师培养基金(TJU-YFF-08B47)资助课题。

作者简介: 刘 琨(1981—),男,博士,在站博士后,主要从事光纤传感方面的研究。E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

导师简介: 刘铁根(1955—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光纤传感和光电检测等方面的研究。

E-mail: tgliu@tju.edu.cn

定从而威胁工人的安全并造成破坏^[1];另外,矿业开采中尚无成熟的配套安全技术对作业环境中的有害气体实施有效监测,导致有害气体浓度超过安全指标进而引发事故^[2]。因此,对矿区的应力、应变、温度以及有害气体等参量进行实时监测是保障矿区安全生产的必要手段。光纤传感器具有灵敏度高、抗电磁干扰、耐腐蚀、电绝缘性好、结构简单、体积小和重量轻等优点^[3],完全能够满足煤矿安全生产监测领域的重大需求,具有十分广阔的应用前景。

通常采用基于光纤布拉格光栅(FBG)的准分布式光纤传感系统实现应力、应变等物理参量的传感监测^[4],采用差分吸收法^[5]和波长调制法^[6]实现有害气体浓度检测。目前尚无在一个系统中同时实现物理量和化学量传感的文献报道。

本文采用 Fabry-Perot(F-P)可调谐光滤波器和掺铒光纤放大器(EDFA)构建混合式光纤物理和化学传感系统。该系统具有开环和闭环两种结构,采

用 1×2 光开关进行相互切换,可分别实现物理和化学参量的准分布式、高灵敏度传感。

2 系统结构及传感原理

基于 F-P 可调谐光滤波器和 EDFA 构建的混合式光纤物理和化学传感系统如图 1 所示。系统具有开环和闭环两种结构,采用两个 1×2 光开关实现两者之间的相互切换。当光开关 1,2 均与各自的 1 号通路连接时,系统采用开环结构,将 FBG 传感阵列连入系统,可实现应力、应变和温度等物理参量的传感解调。当光开关 1,2 均与 2 号通路连接时,系统采用闭环结构,将气体传感阵列连入系统,可实现气体浓度及其种类的传感解调。采用 1×4 光开关在传感阵列的不同通路之间依次切换,可实现基于时分复用和空分复用的准分布式传感。

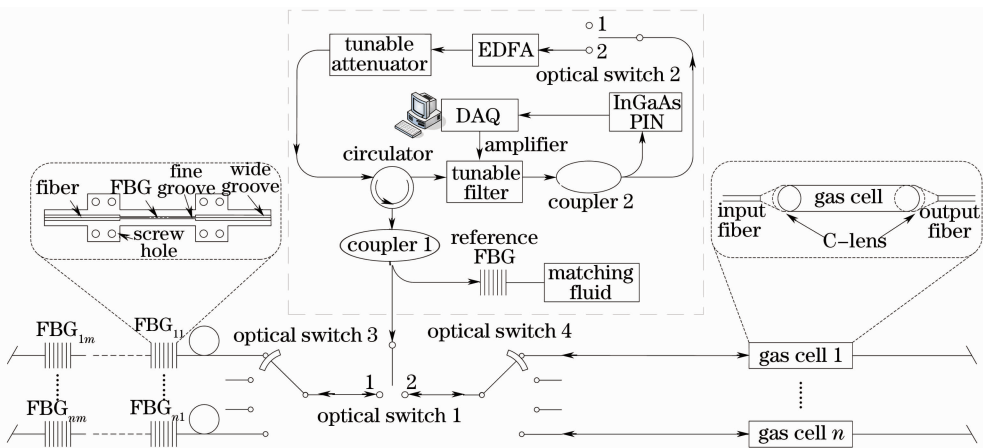


图 1 混合式光纤物理和化学传感系统结构

Fig. 1 Structure of hybrid fiber physical and chemical sensing system

2.1 开环系统

在开环系统中,EDFA 为系统提供放大自发辐射(ASE)宽谱光源,并采用光衰减器调节光强。光强适当的宽谱光经光环形器、光耦合器 1 后分成两束,一束经光开关 3 进入 FBG 传感阵列接受待测物理量调制,另一束直接进入本地非测量环境中的参考光栅。所有光栅的反射光进入 F-P 可调谐光滤波器以实现光谱采集。计算机上数据采集卡模拟输

出(AO)端口输出的电压经放大后用于驱动 F-P 可调谐光滤波器实现透射波长扫描,模拟输入(AI)端口采集光探测器检测到的光电压值,AO 与 AI 端口的同步实现保证了透射波长与光功率值之间的一一对应关系。

包含 FBG 的一段裸光纤无涂敷保护,极容易脆断^[7]。采用 45 号钢设计衬底对 FBG 进行增强增敏封装。封装后的 FBG 传感器如图 2 所示。实测结果



图 2 FBG 封装实物图

Fig. 2 Picture of packaging FBG sensor

表明封装后 FBG 传感器的插入损耗不超过 0.75 dB。

由耦合理论可知,当外界的应变与温度参量同时作用于 FBG 时,其中心波长在两个外界条件的联合作用下产生移位^[8]:

$$\frac{\Delta \lambda_D}{\lambda_D} = K_\epsilon \Delta \epsilon + K_T \Delta T, \quad (1)$$

式中 $\Delta \epsilon$ 为应变变量, ΔT 为温度变化量, K_ϵ 为应变传感系数, K_T 为温度传感系数, $\Delta \lambda_D, \lambda_D$ 分别为波长移位量和波长值。可采用多光纤光栅级联的方法实现对光纤 Bragg 光栅的传感解调^[9]

$$\begin{cases} \Delta T = \frac{\Delta \lambda_{BR}}{K_{TR}} \\ \Delta \epsilon = \frac{\Delta \lambda_{Bi} - (K_{Ti}/K_{TR}) \Delta \lambda_{BR}}{K_{\epsilon i}} (i = 1, 2, 3, \dots) \end{cases}, \quad (2)$$

式中 $\Delta \lambda_{BR}$ 为参考光栅中心波长移位量, $\Delta \lambda_{Bi}$ 为传感光栅中心波长移位量, K_{TR} 为参考光栅的温度系数, K_{Ti} 为传感光栅 i 的温度系数, $K_{\epsilon i}$ 为传感光栅 i 的应变系数。由于 FBG 制成后, K_ϵ 与 K_T 均为常数, 故

$$\begin{cases} \partial(\Delta T) = \frac{1}{K_{TR}} \partial(\Delta \lambda_{BR}) \\ \partial(\Delta \epsilon) = \frac{1}{K_{\epsilon i}} \sqrt{[\partial(\Delta \lambda_{Bi})]^2 + \left[\frac{K_{Ti}}{K_{TR}} \partial(\Delta \lambda_{BR}) \right]^2} (i = 1, 2, 3, \dots) \end{cases}, \quad (3)$$

由(3)式可知,温度与应变参量的解调误差仅与中心波长移位量的检测误差有关,它们之间的关系曲线如图 3 所示。其中图 3(a)为温度误差与参考光栅中心波长移位误差之间的关系,图 3(b)为应变误差

与参考光栅和传感光栅中心波长移位误差之间的关系。由图可知,欲提高系统灵敏度,必须降低中心波长的移位误差。

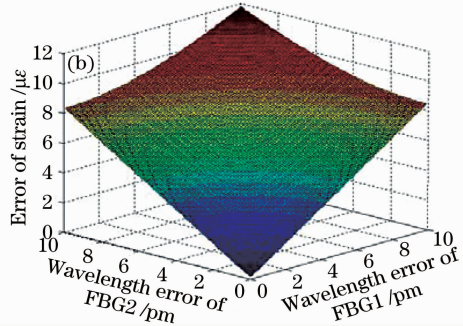
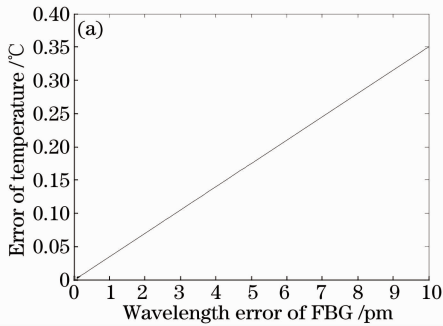


图 3 温度与应变误差关系曲线。(a)温度误差与参考光栅中心波长移位误差之间的关系;(b)应变误差与参考光栅和传感光栅中心波长移位误差之间的关系

Fig. 3 Error of temperature and strain. (a) relationship between temperature error and the wavelength shift error of reference FBG; (b) relationship between strain error and the wavelength shift errors of reference and sensing FBG

数据采集卡采集到的 FBG 光谱数据在计算机中进行分析处理,合适的波长移位解调算法有助于降低中心波长移位量的检测误差,提高系统灵敏度。本系统采用中心波长法^[10]、功率加权法^[11]、线性拟合法^[12]以及互相关法^[13]分别实现应变参量的传感解调。上述算法之间的比较如表 1 所示,其中功率

加权法解调速度快、灵敏度高,特别适合在光纤传感系统中使用。

在开环系统中,对 F-P 可调谐光滤波器进行波长扫描可实现被测物理量的传感解调。如果已知 FBG 反射谱的中心波长,则可用来研究 F-P 可调谐光滤波器的非线性特性^[14]。FBG 中心波长 $\lambda_k (k =$

表 1 几种波长解调算法的比较

Table 1 Comparison of several wavelength demodulation algorithms

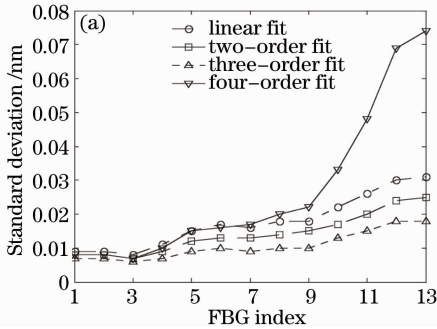
	FBG1 / $\mu\epsilon$	FBG2 / $\mu\epsilon$	FBG3 / $\mu\epsilon$	Demodulation speed
Central wavelength algorithm	3.0	2.0	1.5	fast
Weighted wavelength algorithm	2.0	1.5	0.5	fast
Linearity fit algorithm	3.0	1.0	0.5	little slow
Cross-correlation algorithm	1.5	1.2	0.4	slow

1, 2, \dots, 14) 与相应驱动电压 V_k ($k = 1, 2, \dots, 14$) 之间的关系可表示为

$$\lambda_k = f_R(V_k) = \sum_{i=0}^N a_i V^i, \quad k = 1, 2, \dots, 14. \quad (4)$$

式中 a_i 为多项式拟合系数。

在开环系统中接入 14 支已标定的 FBG 传感器, 其中一支位于本地恒温箱中作为参考光栅。采



用三角波电压驱动 F-P 可调谐光滤波器, 记录每周期上升沿中所有 FBG 中心波长对应的驱动电压值, 并根据(4)式计算相应波长值。扫描 1000 个周期的 FBG 波长随机误差如图 4 所示。由图可见, 在开环系统中引入参考光栅, 可极大地提高 F-P 可调谐光滤波器在其他波长处的定位精度^[15]。

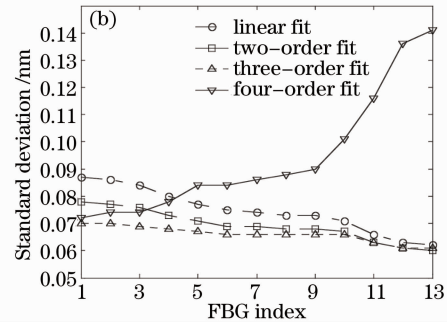


图 4 FBG 波长随机误差。(a)采用参考 FBG 时的差分波长;(b)不采用参考 FBG 时的波长

Fig. 4 Random error of measured FBG wavelength. (a) differential wavelengths with reference FBG; (b) wavelengths without reference FBG

2.2 闭环系统

在闭环系统中, EDFA, 可调谐光衰减器, F-P 可调谐光滤波器以及光耦合器 2 构成环腔光纤激光器的谐振腔。可调谐光衰减器用于调节系统损耗大小。F-P 可调谐光滤波器用于激光器的选频和滤波。通过 F-P 可调谐光滤波器的窄带光由光耦合器 2 进行分束, 一束由 InGaAs PIN 光探测器检测激光功率, 另一束输入 EDFA 进行放大以实现自激振荡。

采用 C-lens 透镜设计完成全封闭式传感气室, C-lens 主要用于实现空间光路与光纤光路耦合。此法制备的气室实物如图 5 所示, 气室长度 10 cm, 截面直径 15 mm, 实测耦合损耗低于 1.84 dB。

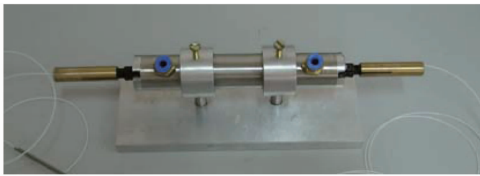


图 5 气室封装实物图

Fig. 5 Picture of gas cell

气体传感的理论基础是 Lambert-Beer 定律 $I = I_0 \exp(-\alpha cL)$, 其中 I_0 为输入的单色激光, 通过吸收系数为 α , 浓度为 c , 长度为 L 的吸收介质后, 在接收端测得光强为 I 。

对 F-P 可调谐光滤波器的驱动电压进行调制, 可实现环腔光纤激光器的波长调制和波长扫描

$$v(t) = v_0(t) + v_m \cos(2\pi ft), \quad (5)$$

式中 $v_0(t)$ 为慢变包络, $v_m \cos(2\pi ft)$ 为调制信号。对接收端采集到的光强信号按余弦傅里叶 (Fourier) 级

数展开

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(v_0) \cos(2n\pi ft). \quad (6)$$

式中 A_n 为探测光强的 n 次谐波分量。

当气室中气体的浓度较低时, A_n 与气体浓度成正比^[16]

$$A_n(v_0) = \frac{2I_0 cL}{\pi} \int_0^{\pi} -\alpha(v_0 + v_m \cos \theta) \cos n \theta d\theta. \quad (7)$$

由于气体吸收谱线关于吸收峰对称, 故偶次谐波分量在 v_0 处幅值达到最大, 奇次谐波在 v_0 处为 0。当谐波次数增加时, 偶次谐波的峰值随之以 10^{-2} 倍率递减, 因此在波长调制技术中一般检测二次谐波分量而不是高次谐波分量。

对于锯齿波 $v_0(t)$ 上的每一个值, 利用离散 Fourier 级数分别计算相应周期光功率信号的二次谐波分量幅值

$$R_2 = \left| \sum_{k=0}^{N-1} I(k) W_N^{2k} \right|, \quad (8)$$

式中 $I(k)$ 代表每个数据点对应的光功率值, $W_N = \exp(-j2\pi/N)$ 。当环腔光纤激光器在气体吸收带内扫描一个周期时, R_2 与 $v_0(t)$ 之间的关系曲线即为气体吸收光谱的二次谐波曲线。

根据 Arndt 等^[17,18] 的研究, 二次谐波曲线峰值和调制深度之间的关系如图 6 所示。由图可知, 气体传感系统中波长调制的最佳调制深度为 $\delta\lambda = 2.2\gamma_L$, 其中 γ_L 为气体吸收谱线的 Lorentzian 半峰全宽。

掺铒光纤在 1550 nm 附近的增益带覆盖了一氧

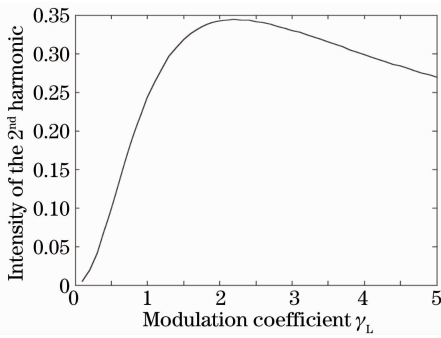


图 6 二次谐波曲线峰值和调制深度之间的关系

Fig. 6 Relationship between the 2nd harmonic peak and modulation depth

化碳、硫化氢、乙炔、氨气等多种气体的吸收谱线,当环腔光纤激光器在掺铒光纤增益带内扫描一个周期可获得气室内上述气体在该波段的吸收光谱,从而实现了不同种类气体的同时传感。根据(4)式还可计算气体的吸收波长,由于不同气体的吸收波长不同且间隔较大,因此本系统还可实现气体的种类识别。

在闭环系统中,波长调制/二次谐波检测是通过基于虚拟仪器技术的软硬件系统实现的。其中调制函数由 LabVIEW 软件生成并通过数据采集卡输出,而周期性光功率信号的二次谐波提取则是基于软件算法完成。采用该方案的气体传感系统具有结构紧凑,便于集成的特点。与传统上采用信号发生器和锁相环放大器实现波长调制/解调相比^[19],极大的降低

了系统成本。但是数据采集卡的电压分辨率较低,系统采样频率不高,因此损失了一部分精度。

3 实 验

3.1 应变传感

选取 3 支 FBG 传感器进行应变传感实验,参考光栅用于提供波长基准。当 FBG 传感器均处于自由状态时,连续 800 次实验解调得到的方差及均值如表 2 所示,由此可知系统进行应变传感的灵敏度优于 $3 \mu\epsilon$,绝对偏差不超过 $\pm 4 \mu\epsilon$ 。

表 2 自由状态下各光栅的应变量

Table 2 Demodulation strain of FBGs without stress $\mu\epsilon$

	FBG1	FBG2	FBG3
Deviation	2.82	2.38	2.12
Mean	-2.10	-0.78	3.96

3 支 FBG 传感器均竖直固定,通过悬吊砝码对其中 1 支施加轴向应力。在添加和减少砝码过程中,解调得到受力光栅和未受力光栅的应变变量如图 7 所示。

添加砝码和减少砝码过程中,砝码总质量与系统实际解调应变平均值之间的关系曲线如图 8 所示。线性拟合的斜率分别为 $-0.0161 \mu\epsilon/g$ 和 $-0.0135 \mu\epsilon/g$ 。由于光栅中存在应变残留,使添加砝码过程中解调得到的应变变量小于减少砝码过程中解调的应变变量,添加砝码过程应变量的变化速率略大于减少砝码过程。

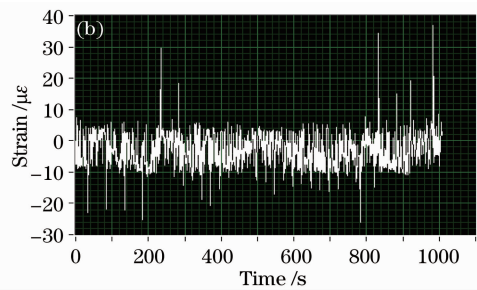
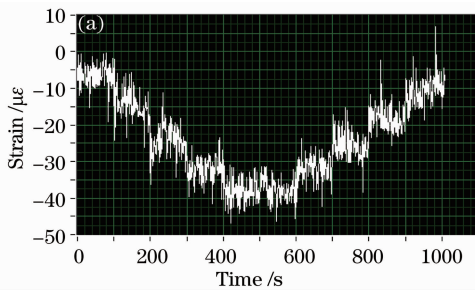


图 7 系统解调得到的应变变量。(a) 受力光栅的应变变量;(b) 未受力光栅的应变变量

Fig. 7 Strain demodulated by the system. (a) strain of FBG with stress; (b) strain of FBG without stress

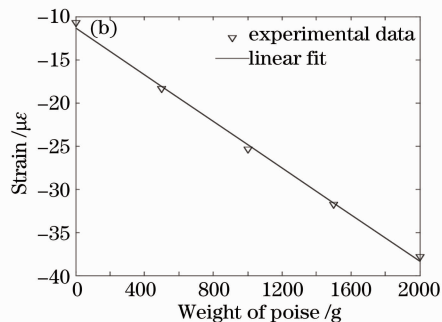
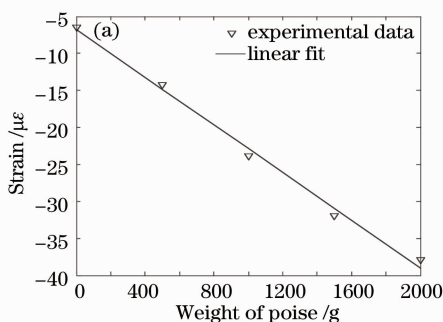


图 8 砝码总质量与解调应变变量之间的关系曲线。(a) 添加砝码;(b) 减少砝码

Fig. 8 Relationship between demodulated strain and weight of poise. (a) adding poises; (b) reducing poises

3.2 气体传感

以乙炔为例进行气体传感实验,参考光栅用于提供波长基准。乙炔气体的吸收峰半峰全宽约为 37 pm, F-P 可调谐光滤波器的驱动电压每变化 1.6 mV 对应透射波长移位约 10 pm, 根据 2.2 节理论推导可知最佳调制深度为 $v_m \approx 13$ mV。当气室中充入体积分数为 1% 的乙炔气体时, 气体吸收峰和参考光栅的二次谐波曲线如图 9 所示。图中左侧尖峰为参考光栅的二次谐波谱线, 右侧若干条小峰为乙炔气体吸收峰的二次谐波曲线, 图中可分辨不少于 9 条吸收谱线。由(4)式计算得到乙炔气体最强吸收峰的波长值为 1530.697 nm, 与光谱数据库的理论值 1530.371 nm 相差仅 0.326 nm, 远低于不同气体吸收峰之间数十纳米的波长间隔。

选取图 9 中信噪比最高的 5 条吸收谱线进行浓度标定及反演计算。采用体积分数分别为 1×10^{-3} , 3×10^{-3} , 5×10^{-3} , 7×10^{-3} 以及 9×10^{-3} 对

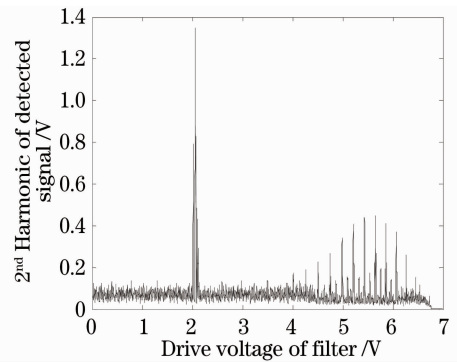


图 9 气体吸收峰和参考光栅的二次谐波曲线

Fig. 9 2nd Harmonic spectra of acetylene and reference FBG

应的实验数据进行线性拟合。利用拟合结果反演计算其他浓度值, 所得结果如表 3 所示。由表可知, 波长扫描技术将多条吸收谱线反演浓度的平均值作为解调结果, 一次扫描相当于多次测量求平均, 极大地提高了系统灵敏度。

表 3 气体浓度反演计算

Table 3 Retrieving calculation of gas concentration

Practical concentration	2000	4000	6000	8000	10000
spectrum 1	1822	4239	6053	8050	9610
spectrum 2	1973	3779	6057	7574	10040
spectrum 3	2145	3973	6110	8313	10120
spectrum 4	1728	4236	5776	7907	9769
spectrum 5	2174	3795	5859	7780	9952
Average concentration / 10^{-6}	1968	4004	5971	7925	9898
Absolute error	32	4	29	75	102
Relative error /%	1.58	0.11	0.48	0.94	1.02

4 结 论

采用 F-P 可调谐光滤波器和 EDFA 构建混合式光纤物理和化学传感系统, 系统具有开环和闭环两种结构, 可分别实现物理和化学参量的准分布式、高灵敏度传感。设计了 FBG 传感器的增强增敏封装, 研究了高灵敏度波长移位解调算法, 基于该系统实现了 F-P 可调谐光滤波器的非线性特性分析。设计了全封闭式传感气室, 采用波长调制与参考光栅相结合实现了气体的浓度传感与种类识别。本系统用于应变传感的灵敏度优于 $3 \mu\epsilon$, 用于乙炔气体传感的灵敏度优于 75×10^{-6} , 具有同时实现建筑结构安全检测和有害气体实时监测的能力, 在矿业安全生产检测领域应用前景十分广阔。

参 考 文 献

1 Jiang Desheng, He Wei. Review of application for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, **13**(4):

420~430

姜德生, 何 伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 420~430

2 Li Hui, Hao Jianjun, He Qiusheng. The application of fiber sensing technology in mine safety monitoring[J]. *Safety in Coal Mines*, 2006, (4): 37~40

李 辉, 郝建军, 何秋生. 光纤传感技术在矿井安全检测中的应用[J]. *煤矿安全*, 2006, (4): 37~40

3 Sun Shenghe, Wang Tingyun, Xu Ying. *Fiber Measurement and Sensing Technology* [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2000. 97

孙圣和, 王廷云, 徐 影. *光纤测量与传感技术*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2000. 97

4 Zhu Zongjiu, Cheng Hua, Zang Dongliang. The application of optical fiber sensor on the examination of safety in the sidewall of coal mine[J]. *Coal Mine Machinery*, 2003, (12): 98~99

朱宗玖, 程 桦, 藏东亮. 光纤传感器在煤矿井壁安全检测中的应用[J]. *煤矿机械*, 2003, (12): 98~99

5 Wang Yanju, Wang Yutian, Zhang Yuyan. Study on methane gas sensor system based on difference absorption[J]. *Chinese J. Scientific Instrument*, 2006, **27**(12): 1647~1650

王艳菊, 王玉田, 张玉燕. 差分吸收式甲烷气体传感系统的研究[J]. *仪器仪表学报*, 2006, **27**(12): 1647~1650

6 Wang Tiejun, Zhang Lei, Dong Lei et al.. Minimum detection

- limit for methane with single laser remote sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(3): 405~407
王铁云, 张 雷, 董 磊等. 激光遥测甲烷气体最低可探测浓度[J]. *中国激光*, 2006, **33**(3): 405~407
- 7 Li Dongsheng, Li Hongnan. Strain transferring analysis of embedded fiber Bragg grating sensors [J]. *Chinese J. of Theoretical and Applied Mechanics*, 2005, **37**(4): 435~441
李东升, 李宏男. 埋入式封装的光纤光栅传感器应变传递分析[J]. *力学学报*, 2005, **37**(4): 435~441
- 8 Jianjun Ma, Weizhong Tang, Wen Zhou. Optical-fiber sensor for simultaneous measurement of pressure and temperature: analysis of cross sensitivity[J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(25): 5206~5210
李智忠, 孙崇峰, 杨华勇等. FBG 中心波长的可调谐光源法检测中光强起伏研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 413~417
- 9 Zhang Zhulin, Yang Zhenkun, Wu Huihua *et al.*. Temperature and strain-sensed research of double fiber Bragg gratings[J]. *J. Xi'an Jiaotong University*, 2004, **38**(6): 607~610
张祝林, 杨振坤, 伍辉华等. 双光纤布拉格光栅温度和应变传感研究[J]. *西安交通大学学报*, 2004, **38**(6): 607~610
- 10 Li Zhizhong, Sun Chongfeng, Yang Huayong *et al.*. Study on optical power fluctuation measurement in FBG center wavelength detecting with tunable laser[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 413~417
李智忠, 孙崇峰, 杨华勇等. FBG 中心波长的可调谐光源法检测中光强起伏研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 413~417
- 11 Jing Wencai, Wang Guanghui, Liu Kun *et al.*. Application of weighted wavelength algorithm on the demodulation of a fiber Bragg grating optical sensing system[J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(9): 1022~1025
井文才, 王光辉, 刘 琨等. 功率加权法用于光纤 Bragg 光栅特种波长检测[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(9): 1022~1025
- 12 Dong Hai, Jing Wencai, Liu Kun *et al.*. A calculating method for obtaining the wavelength shift of fiber Bragg grating [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2007, **18**(2): 144~146
董 海, 井文才, 刘 琨等. 一种光纤 Bragg 光栅波长移位的计算方法[J]. *光电子·激光*, 2007, **18**(2): 144~146
- 13 Cen Huang, Wencai Jing, Kun Liu *et al.*. Demodulation of fiber Bragg grating sensor using cross-correlation algorithm[J]. *IEEE Photonic. Tech. L.*, 2007, **19**(9): 707~709
- 14 K. Liu, W. C. Jing, G. D. Peng *et al.*. Investigation of PZT driven tunable optical filter nonlinearity using FBG optical fiber sensing system[J]. *Opt. Commun.*, 2008, **281**: 3286~3290
- 15 Chen Changyong, Qiao Xueguang, Wang Xiaofeng *et al.*. Demodulation system for fiber Bragg grating sensors based on a real-time calibration technique [J]. *Chinese J. Lasers*, 2005, **32**(6): 825~828
陈长勇, 乔学光, 王小凤等. 基于实时校准技术的光纤光栅传感解调系统[J]. *中国激光*, 2005, **32**(6): 825~828
- 16 Yuntao Wang, Haiwen Cai, Jianxin Geng *et al.*. Behaviors of harmonic signals in wavelength-modulated spectroscopy under high absorption strength [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(9): 552~555
- 17 R. Arndt. Analytical line shapes for Lorentzian signals broadened by modulation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(8): 2522~2524
- 18 J. Reid, D. Labrie. Second harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B-Lasers O.*, 1981, **26**(3): 203~210
- 19 Y. Zhang, M. Zhang, W. Jin. Sensitivity enhancement in erbium-doped fiber laser intra-cavity absorption sensor [J]. *Sensor. Actuat. A-Phys.*, 2003, **104**(2): 183~187