

基于波长调制技术的内腔式气体传感研究

刘 琨 刘铁根 江俊峰 梁 霄 贾大功 张红霞 汪 曩 井文才 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 气体传感理论和实验研究已成为当今光纤传感领域的热点之一。波长调制法和有源内腔法是提高气体传感灵敏度的两种有效方式。结合上述两种气体传感方法,构建一个基于波长调制技术的内腔式气体传感系统。讨论气体吸收光谱二次谐波分量与气体浓度之间的函数关系,从理论和实验两方面确定系统的最佳参数。利用提取多条吸收谱线的二次谐波分量,采用平均算法进一步提高系统灵敏度,进行乙炔气体传感的灵敏度可达 7.5×10^{-5} 。以光纤光栅作为波长参考,建立系统的波长-电压响应曲线,进而检测气体的吸收波长值。进行乙炔气体传感时吸收波长检测的绝对误差不超过 0.445 nm。

关键词 气体传感;灵敏度;吸收波长;波长调制;有源内腔

中图分类号 TN253 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201138.0105008

Investigation of Intra-Cavity Gas Sensing Technology Based on Wavelength Modulation

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

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

Abstract Theoretical and experimental research of gas sensing technique is one of the focus in modern fiber sensing area. Wavelength modulation and active intra-cavity methods are two effective ways which increase the sensitivity obviously. Combined with these two methods, an intra-cavity gas sensing system based on wavelength modulation technique (WMT) is established. The relationship between the second-harmonic component of gas absorption spectra and concentration is investigated. And then the optimized parameters of the system are obtained theoretically and experimentally. The second-harmonic components of several gas absorption spectra can be detected. And the average algorithm is used to increase the sensitivity further. The sensitivity of acetylene can be less than 7.5×10^{-5} . With fiber Bragg grating (FBG) as wavelength reference, the wavelength-voltage relationship model of the system can be established. This model can be used to detect the absorption wavelength of different gases. When the system is used to measure acetylene, the maximum absolute error of the detected absorption wavelength is less than 0.445 nm.

Key words gas sensing; sensitivity; absorption wavelength; wavelength modulation; active intra-cavity

OCIS codes 140.3518; 280.4788; 300.6390

1 引 言

在环境安全监测领域,检测诸如甲烷、一氧化碳和乙炔等几种主要有害气体的浓度是十分重要的^[1]。基于光纤传感技术的气体检测方法越来越多地引起人们的广泛关注^[2]。借助于光通信器件的广泛应用,

近红外吸收光谱定量检测技术在近 20 年内得到了迅猛发展^[3]。国内外在这方面做了大量工作,提出了多种有效的传感解调方法,并已广泛应用于实际检测中。常用的近红外吸收光谱气体传感方法包括 Fourier 变换光谱法^[4]、差分吸收法^[5]、波长调制/二

收稿日期: 2010-08-23; 收到修改稿日期: 2010-10-19

基金项目: 国家 973 计划(2010CB327802)、中国博士后科学基金(20090460690,201003298)、国家自然科学基金(30770597)、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,副教授,主要从事光纤传感和光电检测等方面的研究。E-mail: beiyangkl@tju.edu.cn

次谐波法^[6]、法-珀(F-P)腔法^[7]、声-光可调谐滤波器法^[8]、衰荡腔法^[1]以及有源内腔法^[9,10]等。目前研究的重点主要是如何提高气体传感灵敏度,其中应用最广泛的是差分吸收法和波长调制/二次谐波法。

作为一种新型的光纤气体传感方法,有源内腔法将气室放入激光器的谐振腔内,并使激光器的激励波长与待测气体的吸收光谱相对应,激光在谐振腔内振荡过程中多次经过待测气体,从而将较小的气室长度等效为很大的有效吸收光程,极大地提高了气体传感灵敏度^[11,12]。

本文将波长调制技术引入有源内腔气体传感系统,构建一个基于波长调制技术的内腔式气体传感系统。从理论和实验两方面对系统进行优化设计,提取气体吸收谱线的二次谐波分量,进行乙炔气体传感。基于光纤光栅建立系统的波长调谐响应曲线,进而检测气体的吸收波长值。

2 系统结构及传感原理

结合波长调制技术的内腔式气体传感系统如图1所示。系统中的谐振内腔主要由掺铒光纤放大器(EDFA)、可调谐光衰减器以及可调谐光滤波器等构成。EDFA通过一个光波分复用器由980 nm 半导体激光器抽运。可调谐光滤波器的带宽和自由光谱范围分别为1.25 GHz和11.23 THz。气室通过一对带尾纤的C-lens透镜实现空间光路和光纤光路之间的耦合转换^[13],气室长度为10 cm,气室中被测气体与信号光之间进行充分的作用(吸收)。一个气室与一个光反射镜一起构成一路气体传感器。光纤光栅阵列作为系统的波长参考,与气体传感器一起由耦合器合束,并通过光环行器接入环腔谐振

系统。光探测器用于采集系统输出的光强,其输出由计算机控制的数据采集卡模拟输入端口进行采样。数据采集卡模拟输出端口生成的同步控制信号用于驱动可调谐光滤波器。

在气体吸收传感系统中,通常用测量信号光透过待测物质后的消光比来表征不同物质的特性。消光比检测遵循朗伯-比尔定律^[11]

$$I(\lambda) = I_0(\lambda)\exp[-\alpha(\lambda)cL], \quad (1)$$

式中 $I_0(\lambda)$ 和 $I(\lambda)$ 分别为透过待测物质前后的单频激光光强, $\alpha(\lambda)$ 代表待测物质的吸收系数, c 为待测物质的浓度, L 为待测物质的有效吸收长度。 $I_0(\lambda)$, $I(\lambda)$ 以及 $\alpha(\lambda)$ 均取决于单频激光的波长。图1所示系统中运行的单频激光波长由可调谐光滤波器的透射波长决定。作为由压电陶瓷驱动的F-P型可调谐光滤波器,其透射波长是驱动电压的函数,因此(1)式可表示为

$$I(V) = I_0(V)\exp[-\alpha(V)cL], \quad (2)$$

式中 V 是可调谐光滤波器的驱动电压,可视为时间函数。

对F-P可调谐光滤波器的驱动电压进行正弦调制,同时采用一个低速锯齿波信号对其进行驱动,则可同时实现波长调制。调制了的驱动电压信号可表示为

$$V(t) = V_0(t) + V_m \cos(2\pi ft), \quad (3)$$

式中 $V_0(t)$ 为慢变包络, $V_m \cos(2\pi ft)$ 为调制电压, f 为调制频率。对接收端采集到的光强信号按余弦 Fourier 级数展开

$$I(t) = \sum_{n=0}^{\infty} A_n(V_0) \cos(2n\pi ft), \quad (4)$$

式中 $A_n(V_0)$ 是检测光强信号的第 n 次谐波分量。

当气室中气体的浓度较低时,谐波分量 $A_n(V_0)$ 与气体浓度成正比^[14]

$$A_n(V_0) = \frac{2I_0 cL}{\pi} \int_0^{\pi} -\alpha(V_0 + V_m \cos \theta) \cos(n\theta) d\theta, \quad (5)$$

式中 $\theta = 2\pi ft$ 。当调制信号幅值 V_m 较小时,吸收系数 $\alpha(V_0 + V_m \cos \theta)$ 可由泰勒级数展开,此时谐波分量 $A_n(V_0)$ 可表示为

$$A_n(V_0) = -I_0 cL \frac{2^{1-n}}{n!} V_m \left. \frac{d^n \alpha}{dV^n} \right|_{V=V_0}, \quad (6)$$

在标准状况下,气体的吸收谱线可视为 Lorentzian 型,则吸收系数为

$$\alpha^L(V) = \frac{1}{1 + [(V - V_c)/V_L]^2}, \quad (7)$$

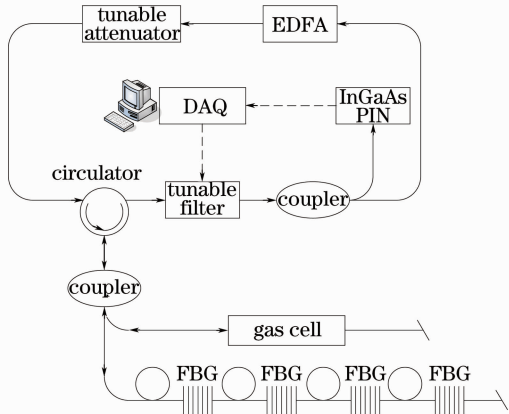


图1 内腔式气体传感系统实验结构图
Fig.1 Experimental setup of intra-cavity gas sensing system

式中 V_c 和 V_L 分别代表待测气体吸收峰中心波长和吸收峰半峰全宽对应的驱动电压值。由于气体吸收谱线关于吸收峰对称,故偶次谐波分量在 V_c 处幅值达到最大,奇次谐波在 V_c 处为 0。当谐波次数增

加时,偶次谐波的峰值值随之以 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。将(7)式代入(6)式,展开可得二次谐波分量为

$$A_2(V_0) = -I_0 cL \left(\frac{V_m}{V_L} \right)^2 \left\{ \frac{2(V_0 - V_c)^2}{V_L^2 \{1 + [(V_0 - V_c)/V_L]^2\}^3} - \frac{1}{2\{1 + [(V_0 - V_c)/V_L]^2\}^2} \right\}, \quad (8)$$

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

$$R_2 = \left| \sum_{k=0}^{N-1} I(k) W_N^{2k} \right|, \quad (9)$$

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。

系统中,光纤光栅作为波长参考,用于建立系统的波长-电压曲线。由于在较大波长范围内,可调谐光滤波器的波长响应曲线是非线性的。而系统输出的激光波长值是由可调谐光滤波器的透射波长决定的。因此,系统的波长-电压曲线也是非线性的。若要标定这种非线性,至少需要 3 支以上的光纤光栅,同时光纤光栅之间需有一定的波长间隔。这里采用 4 支光纤光栅构建波长参考阵列,用于标定系统波长扫描响应,实现气体吸收波长检测。光纤光栅的波长值分别为 1550.103, 1552.857, 1554.455 以及 1558.017 nm, 实测反射谱带宽分别为 147, 153, 172 和 168 pm。

当可调谐光滤波器在掺铒光纤放大器激光波段范围内连续扫描时,可同时获得气体吸收光谱和光纤光栅阵列的二次谐波曲线。可调谐光滤波器的波长-电压关系为

$$\lambda_{B,k} = f_R(V_k), \quad (k = 1, 2, \dots) \quad (10)$$

式中 $\lambda_{B,k}$ 是光纤光栅阵列的波长值, V_k 为光纤光栅峰值对应的驱动电压值, $f_R(\cdot)$ 代表二者之间的非线性函数关系。采用多项式拟合描述非线性函数 $f_R(\cdot)$ [15]

$$\lambda_{B,k} = f_R(V_k) = \sum_{i=0}^N a_i V_k^i, \quad (11)$$

式中 N 为多项式拟合次数, $\{a_i\}$ 是采用最小二乘算法获得的最佳拟合系数。根据多项式拟合系数,将气体吸收光谱峰值对应的驱动电压值代入(11)式,可计算气体的吸收波长值。

3 系统优化与浓度传感

当 F-P 可调谐光滤波器的驱动电压取不同值时,由 GPIB 卡控制的光谱分析仪实际采集到的系统输出激光光谱如图 2 所示。由图 2 可知,输出激光的信噪比不低于 35 dB, 30 nm 范围内输出激光光谱的峰值功率波动不超过 1.5 dB。光谱分析仪 (OSA) 显示输出激光的 3 dB 带宽为 30 pm, 该值为 OSA 的波长分辨率。实际的激光谱线宽度远小于可调谐光滤波器的带宽 (1.25 GHz 相当于约 10 pm), OSA 无法分辨故而显示为该值。系统输出激光的线宽远小于气体吸收光谱的宽度,保证了系统采集气体吸收光谱的准确性和有效性。

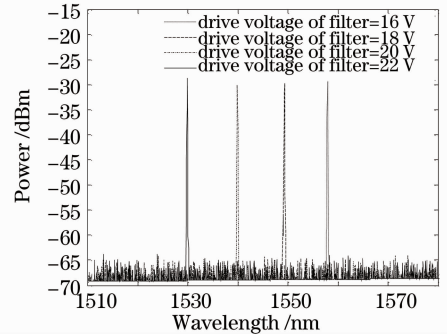


图 2 系统输出的激光光谱

Fig. 2 Output laser spectra of the system

气体传感的灵敏度取决于系统输出激光的信噪比。信噪比越大,气体传感灵敏度越高。定义二次谐波曲线中吸收峰的幅值均值与其均方差之比为二次谐波信噪比。以乙炔气体传感为例,研究系统的优化参数。

当气室中充入体积分数为 1% 的乙炔气体,其余均为氮气时,设定驱动电压的调制频率为 10 Hz,调制信号幅值为 62.5 pm,调节抽运驱动电流,可得气体二次谐波信噪比 (SNR) 与抽运驱动电流之间的关系如图 3 所示。由图 3 可知,系统最佳抽运驱动电流为 60 mA。

气体浓度不变,设定抽运驱动电流为 60 mA,调制信号幅值为 62.5 pm,改变驱动电压的调制频率,

可得气体二次谐波信噪比与调制频率之间的关系如图4所示。由图可知,系统最佳调制频率为5 Hz。

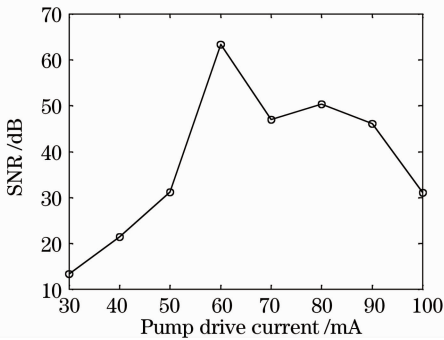


图3 二次谐波信噪比与抽运驱动电流的关系

Fig. 3 Relationship between SNR and pump current

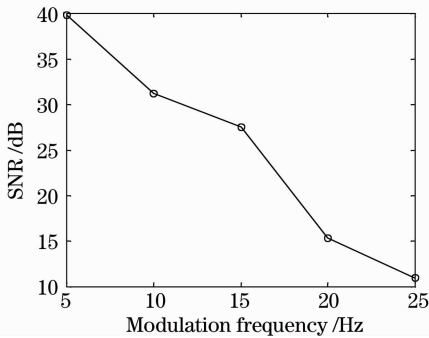


图4 二次谐波信噪比与调制频率的关系

Fig. 4 Relationship between SNR and modulation frequency

气体浓度不变,设定抽运驱动电流为60 mA,调制频率为5 Hz,改变驱动电压的调制信号幅值,可得气体二次谐波信噪比与调制信号幅值之间的关系如图5所示。由图可知,实验获得系统最佳调制信号幅值为81.25 pm。根据Arndt等^[16,17]的研究,波长调制的最佳调制深度应为气体吸收谱线 Lorentzian 半宽的2.2倍。由光谱数据库可知乙炔气体吸收峰的 Lorentzian 半峰全宽约为37 pm,调

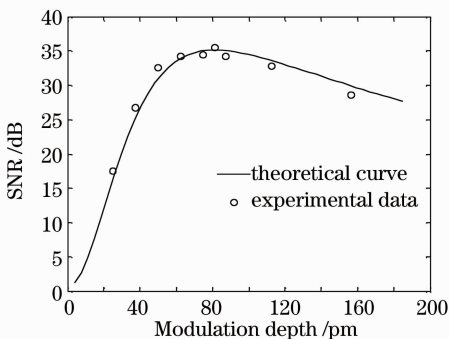


图5 二次谐波信噪比与调制信号幅值的关系

Fig. 5 Relationship between SNR and modulation amplitude

制深度的最佳值为81.4 pm。实验与理论计算结果完全吻合。

因此,气体传感系统的最佳参数为抽运驱动电流60 mA,调制频率5 Hz,调制深度81.25 pm。

系统在参数优化条件下,进行乙炔气体传感实验。当气室中充入体积分数为1%的乙炔气体时,气体吸收峰和光纤光栅阵列的二次谐波曲线如图6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。

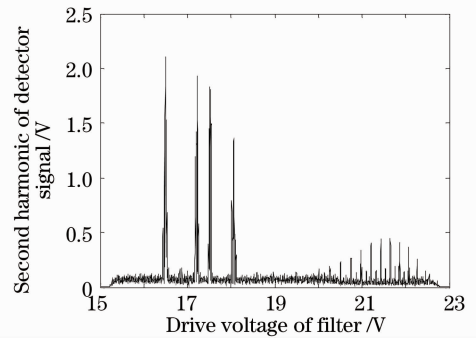


图6 气体吸收峰和参考光栅的二次谐波曲线

Fig. 6 Second harmonic spectra of acetylene and reference FBG

乙炔气体吸收峰的二次谐波曲线幅值可用于进行气体浓度标定。以幅值最大的第6条吸收峰为例,当气体的体积分数由 1×10^{-3} 逐渐变化至 1×10^{-2} 时,二次谐波曲线幅值与气体浓度之间的关系如图7所示。两者之间呈线性关系,拟合斜率为 3.02×10^1 V,拟合误差 1.34×10^{-4} 。若采用多条吸收谱线的平均反演结果进行气体传感,浓度传感的误差基本上可控制在 7.5×10^{-5} 以内。因此,结合波长调制技术,可大幅提高气体传感灵敏度。

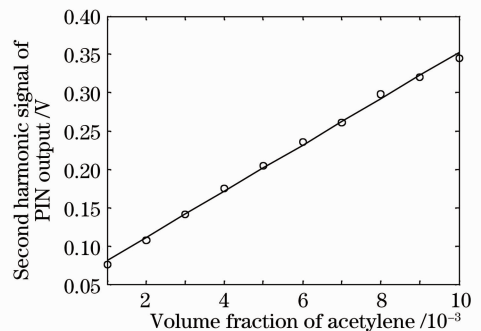


图7 乙炔气体浓度标定结果

Fig. 7 Acetylene concentration calibration result

4 气体吸收波长检测

系统中光纤光栅阵列的波长值已知,采用功率

加权算法计算光纤光栅阵列波长值对应的驱动电压值^[18]。将上述结果代入(11)式,采用最小二乘算法计算不同拟合次数下的最佳拟合系数,所得结果如表1所示。二次拟合的误差远远小于线性拟合,因此采用二次拟合系数刻画可调谐光滤波器的非线性。

表1 可调谐光滤波器的非线性拟合系数

Table 1 Polynomial fit coefficients of tunable filter

Fitting order	a_0/nm	$a_1/(\text{nm}/\text{V})$	$a_2/(\text{nm}/\text{V}^2)$	Deviation / nm
1	1641.867	-5.081		0.0199
2	1621.221	-2.684	-0.069	0.0038

在图6中,采用峰值检测法搜寻二次谐波曲线中气体吸收峰的大概位置,采用 Lorentzian 拟合计算吸收峰对应的精确电压值和二次谐波分量幅值^[11]。后者用于反演计算气体浓度。将吸收峰对应的电压值代入(11)式,根据表1中的二次拟合系数计算气体的吸收波长值。乙炔气体在1530 nm附近有多条吸收谱线,其中吸收强度最大的3条谱线对应吸收波长值分别为1529.1,1530.4,和1531.6 nm。采用该方法检测乙炔气体在不同浓度下的吸收波长值如图8所示。由图8可知,检测波长与实际理论波长之间的误差不超过0.445 nm,小于乙炔气体不同吸收峰之间不低于1 nm的波长间隔。

在气体吸收波长检测中,采用光纤光栅作为波长参考。由于气体吸收波长和光纤光栅波长处于不同波段,因此利用外差值法计算的气体吸收波长误差较大。若采用F-P标准具作为系统的参考波长进行检测^[19],波长参考值覆盖整个气体吸收波段,可采用内差值法进行计算,气体吸收波长的检测误差进一步提高。同时,在近红外波段,不同气体的吸收波长不同,并且吸收带之间间隔一般不低于几个纳米。吸收带距乙炔最近的氨气,其吸收峰波长也

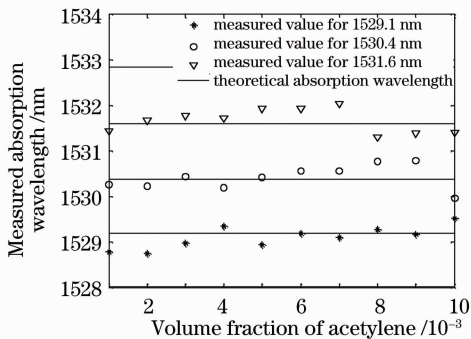


图8 不同浓度下的检测吸收波长值

Fig. 8 Measured absorption wavelength under different concentrations

在1544 nm附近。因此该方法可用来实现气体种类识别。

5 结 论

将波长调制技术引入有源内腔气体传感系统,理论推导了采用气体吸收光谱二次谐波分量进行浓度和吸收波长传感的方法。以乙炔气体为例,阐述了进行系统优化的方法,乙炔气体传感的最佳系统参数为抽运驱动电流60 mA,调制频率5 Hz,调制深度81.25 pm。在此基础上进行乙炔气体传感的灵敏度可达 7.5×10^{-5} 。采用光纤光栅作为波长参考,建立了可调谐光滤波器波长-电压响应曲线,进而检测不同浓度下气体的吸收波长值。进行乙炔气体传感时吸收波长检测的绝对误差不超过0.445 nm,可同时实现乙炔气体的浓度和种类传感,这种技术还可用于检测其他种类气体。

参 考 文 献

- 1 G. Stewart, K. Atherton, H. B. Yu *et al.*. An investigation of an optical fibre amplifier loop for intra-cavity and ring-down cavity loss measurements [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2001, **12**(7): 843~849
- 2 J. Marshall, G. Stewart, G. Whitenett. Design of a tunable L-band multi-wavelength laser system for application to gas spectroscopy [J]. *Meas. Sci. Technol.*, 2006, **17**(5): 1023~1031
- 3 M. Zhang, D. N. Wang, W. Jin *et al.*. Wavelength modulation technique for intra-cavity absorption gas sensor[J]. *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 2004, **53**(1): 136~139
- 4 Li Changzhi. Infrared Fourier transform spectroscopy and its application in analytical chemistry [J]. *Chinese J. Analytical Chemistry*, 1981, **9**(1): 112~117
李长治. 红外傅里叶变换光谱及其在分析化学上的应用[J]. *分析化学*, 1981, **9**(1): 112~117
- 5 K. Chan, H. Ito, H. Inaba. Remote sensing system for near-infrared differential absorption of CH₄ gas using low-loss optical fiber link[J]. *Appl. Opt.*, 1984, **23**(19): 3415~3420
- 6 K. Uehara, H. Tai. Remote detection of methane using a diode laser[J]. *Appl. Opt.*, 1992, **31**(6): 809~814
- 7 W. Jin, G. Stewart, B. Culshaw. Absorption measurement of methane gas with a broadband light source and interferometric signal processing[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1364~1366
- 8 P. B. David, S. Z. Daniel, P. D. Arthur. High-resolution spectroscopy using an acousto-optic tunable filter and a fiber-optic Fabry-Perot interferometer[J]. *Appl. Spectrosc.*, 1996, **50**(4): 498~503
- 9 Y. Zhang, M. Zhang, W. Jin. Multi-point, fiber-optic gas detection with intra-cavity spectroscopy [J]. *Opt. Commun.*, 2003, **220**(4-6): 361~364
- 10 Jia Dagong, Liu Kun, Jing Wencai *et al.*. Method of gas detection based on intra-cavity erbium-doped fiber laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(9): 2384~2387
贾大功, 刘 琨, 井文才等. 基于环腔光纤激光器的气体检测方法[J]. *中国激光*, 2009, **36**(9): 2384~2387
- 11 V. M. Baev, T. Latz, P. E. Toschek. Laser intracavity absorption spectroscopy [J]. *Appl. Phys. B: Laser Optics*,

- 1999, **69**(3): 171~202
- 12 Liu Kun, Liu Tiegen, Jiang Junfeng *et al.*. Research of hybrid fiber physical and chemical sensing system [J]. *Chinese J. Lasers*, 2009, **36**(S2): 299~305
刘 琨, 刘铁根, 江俊峰 等. 一种混合式光纤物理和化学传感系统[J]. *中国激光*, 2009, **36**(S2): 299~305
- 13 K. Liu, W. C. Jing, G. D. Peng *et al.*. Wavelength sweep of intracavity fiber laser for low concentration gas detection [J]. *IEEE Photon. Technol. Lett.*, 2008, **20**(18): 1515~1517
- 14 Yongtao 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
- 15 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**(12): 3286~3290
- 16 R. Arndt. Analytical line shapes for Lorentzian signals broadened by modulation [J]. *J. Appl. Phys.*, 1965, **36**(8): 2522~2524
- 17 J. Reid, D. Labrie. Second harmonic detection with tunable diode lasers-comparison of experiment and theory [J]. *Appl. Phys. B: Lasers Optics*, 1981, **26**(3): 203~210
- 18 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 光栅特征波长检测 [J]. *光电子•激光*, 2007, **18**(9): 1022~1025
- 19 Liang Xiao, Liu Tiegen, Liu Kun *et al.*. Method of real-time calibration for tunable optical filter nonlinearity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(6): 1445~1449
梁 霄, 刘铁根, 刘 琨 等. 一种可调谐光滤波器非线性实时标定方法研究 [J]. *中国激光*, 2010, **37**(6): 1445~1449