

可调谐半导体激光吸收光谱中激光器温度补偿

袁 松 阚瑞峰 何亚柏 姚 路 陈玖英 许振宇 李 晗 阮 俊 何俊峰 魏 敏

(中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031)

摘要 可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)具有高分辨、高灵敏度和快速测量等特点,在环境检测、工业过程检测等方面具有很好的应用前景。但是 TDLAS 系统在长期连续工作时,存在激光输出波长随环境温度变化而发生漂移的问题。针对这一问题,研究了激光输出波长随环境温度变化特征及其对光谱处理的定量影响。为了消除激光输出波长的漂移,设计了基于 AD μ C841 的温度补偿电路。根据环境温度实时调整激光器的温度,对激光器进行谱线锁定,在温控试验箱中进行了实验,当环境温度为 20 °C~60 °C 时,激光器的波长漂移量为 4.1 pm。

关键词 光谱学;可调谐半导体激光吸收光谱;光谱处理;波长漂移;温度补偿

中图分类号 O463 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201340.0515002

Laser Temperature Compensation Used in Tunable Diode-Laser Absorption Spectroscopy

Yuan Song Kan Ruifeng He Yabai Yao Lu Chen Jiuying Xu Zhenyu
Li Han Ruan Jun He Junfeng Wei Min

(Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China)

Abstract Tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS) has a good prospect of application, such as environmental monitoring, industrial process detection, due to its high resolution, high sensitivity and rapid measurement. But the wavelength of laser shifts with the change of ambient temperature when the system is working continuously for a long period of time. Aim at this problem, the wavelength variation with the change of temperature and the quantitative impact on spectral processing is studied. In order to eliminate the shift of wavelength, AD μ C841 is used for temperature compensation, this system can re-set the temperature of the laser according to the ambient temperature to lock the laser spectrum. The experiment in temperature-controlled device at the temperature of 20 °C~60 °C shows that the shift of laser wavelength is about 4.1 pm.

Key words spectroscopy; tunable diode-laser absorption spectroscopy; spectral processing; wavelength shift; temperature compensation

OCIS codes 140.3600; 140.3425; 140.3518; 140.5960; 140.3460

1 引 言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,是利用半导体激光器的波长可调谐和窄线宽特性,通过电流控制波长扫描获得气体特征吸收光谱的一种

检测技术。具有非侵入、快速响应和现场实时测量等优点,在大气环境监测^[1]、节能减排^[2]、火灾早期预警^[3]、生态环境监测^[4]、工业过程检测控制^[5]和发动机检测^[6]等方面具有良好的应用前景。

收稿日期: 2012-12-18; **收到修改稿日期:** 2013-01-28

基金项目: 国家自然科学基金(61108034)、国家 973 前期先导专项(2010CB234607)和中国科学院先导专项(XDA05040102)资助课题。

作者简介: 袁 松(1986—),男,硕士研究生,主要从事燃烧过程重要组分的激光光谱测量与温度修正方面的研究。

E-mail: syuan@aiofm.ac.cn

导师简介: 阚瑞峰(1977—),男,博士,副研究员,主要从事光学与光谱学监测方法的研究。

E-mail: kanruifeng@aiofm.ac.cn(通信联系人)

激光器波长漂移的原因有很多^[7],如:1)电子元件非零的温度系数;2)设定温度和设定电流可能会漂移;3)随着周围环境温度的变化,激光器芯片和热沉温度间的不完全隔离会导致激光器温度漂离设定温度值而向着周围环境温度漂移;4)热敏电阻和激光器芯片的非完全热耦合连接同样会造成漂移;5)扫描波形的直流电平漂移也会引起电流的漂移,因而相继造成波长漂移。

TDLAS 技术中所采用的分布反馈(DFB)式半导体激光器,已经自带了温度控制器,激光器的温度控制器由热敏电阻(NTC)和半导体制冷器(TEC)组成。当环境温度变化时,激光器电流驱动根据 NTC 阻值的大小来调整 TEC 的电压,对激光器制冷或制热,从而实现温度的闭环控制。但在长时间连续工作过程中,尤其是环境温度变化范围比较大时,目前商用激光器温控系统并没有考虑环境温度变化对电路板的影响,激光器的波长会随环境温度发生变化,对吸光度的计算和浓度反演造成影响。本文用商用激光器温控系统进行了验证实验,当环境温度为 20 °C~60 °C 时,激光器的波长变化量为 78.1 pm,这将对吸光度的计算精度造成影响。

为了解决这一问题,国内外都开展了这方面的研究工作。国内对激光器的温度控制主要集中在室温下的单一温度,此时控制的精确度可以达到 0.01 °C,但当外界温度变化比较大时,温度控制精度就难以保证。美国 Zolo 公司用于发动机燃烧监测的 TDLAS 系统在环境温度为 0 °C~60 °C 时,激光器的波长漂移仅为 4.8 pm^[7],为当前激光波长输出稳定性比较高的研究结果。本文通过实验获得了 1397 nm DFB 激光器当环境温度为 20 °C~60 °C 时波长输出变化曲线,并根据其波长随环境温度变化的特征,在激光器自身闭环温控系统的基础上再加一个开环控制系统,通过 AD μ C841 的数模转换器(DAC)给 TEC 电流驱动一补偿信号,实时对激光器温度控制器进行补偿,以弥补目前商用激光器温控系统未考虑环境温度变化对电路板的影响,保证了激光器输出波长的稳定性。

2 实验原理

在直接吸收光谱测量中,需要采用基线拟合的方法获得背景光谱,从而进一步获得吸光度,这种处理需要对零线进行调整,然后去除特征吸收线的影响,实施多项式的最小二乘拟合。如图 1 所示,基线拟合通常选择距离吸收线中心频率 4 倍吸收谱线宽

度之外的部分,进行低阶的多项式拟合,可以得到近似的初始激光强度^[8]。

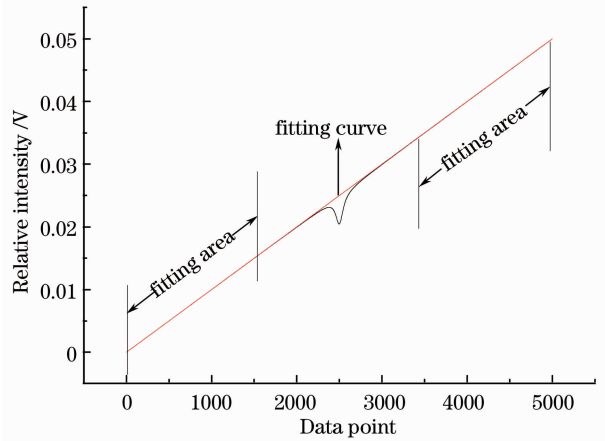


图 1 拟合吸收信号方法

Fig. 1 Method of fitting absorption signal

通过三次多项式拟合得到光谱基线。假设拟合

函数为 $p(x) = \sum_{k=0}^3 a_k x^k$, 对于采样得到的数据点 $(x_i, y_i) (i = 0, 1, \dots, m)$, x_i 对应着采样点数, y_i 对应着接收到的信号幅值, 去除特征吸收线后的采样点数为 $(m + 1)$ 个。根据最小二乘原理, 误差 $r_i = p(x_i) - y_i (i = 0, 1, \dots, m)$ 的平方和要最小, 即使

$$\sum_{i=0}^m r_i^2 = \sum_{i=0}^m [p(x_i) - y_i]^2 = \sum_{i=0}^m [\sum_{k=0}^3 a_k x_i^k - y_i]^2 \quad (1)$$

最小。通过求解关于 a_0, a_1, a_2, a_3 的线性方程组, 就可以得到拟合基线, 从而得到吸光度曲线。当由于环境温度发生变化而引起激光输出波长的改变时, 水汽的吸光度曲线也会相应发生变化, 如图 2 所示。但在数据处理过程中, 光谱拟合区域已经确定,

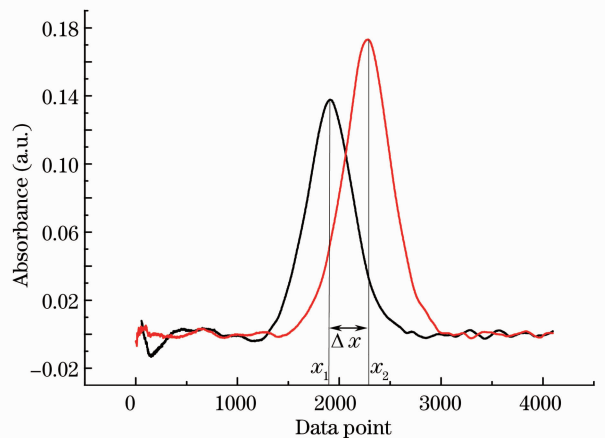


图 2 吸光度曲线

Fig. 2 Absorbance curves

这就可能导致吸收线落入之前无吸收部分,尤其是在多吸收谱线的情况下,这样就对吸光度的计算造成影响。

水汽吸光度曲线的峰值位置随激光输出波长变化而变化,因此可根据吸光度曲线峰值位置的变化获得激光器输出波长与环境温度之间关系曲线,即

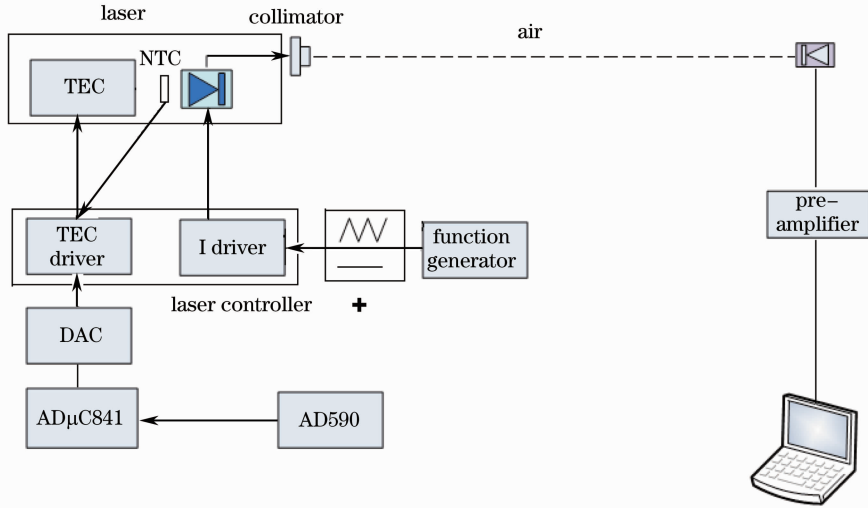


图3 半导体激光传感系统实验装置原理图

Fig. 3 Experimental schematic of the diode laser sensor system

图3中,光源为中心波长在1397 nm(对应 H_2O 的吸收线)附近的DFB激光器,激光器模块由电流驱动(含限值电流设定、调制信号输入等)和热沉温度控制(含NTC、闭环控制电路和TEC电流驱动等)两部分构成,NTC阻值随环境温度变化而改变,从而造成TEC两端电压的变化,TEC驱动根据电压大小对激光器进行制冷或制热,实现了温度的闭环控制。激光器的设置电压和设置温度之间有对应的关系,TEC电流驱动根据DAC输出的电压值来调制激光器的温度;激光器电流驱动根据函数发生器产生频率为500 Hz,幅度为950 mV的锯齿波电压信号与设置的直流偏置电压信号通过加法器相加来调制激光器的注入电流。同时通过单片机AD μ C841的DAC设定激光器的温度,使激光器的输出扫描到目标吸收线;温度传感器AD590紧贴电路板放置,用来测量温控箱内的温度,并通过AD μ C841的DAC来重新设置激光器的温度,以修正温控箱内温度变化时电路板上电子元件特性变化造成的波长漂移,保证吸收线位置的变化不对基线拟合的精度造成影响;采集卡的带宽为10 M,采样精度为12 bit,每个周期采样点数为20000;计算机用来处理水汽的吸收谱线及接收单片机串口发送的温度值,从而得到激光器输出波长与温控箱内温度

如图2中的 X_1 和 X_2 ,波长变化量 $\Delta X = X_2 - X_1$,并根据温度传感器采集到的环境温度,就可以得到激光器波长随环境温度的变化特征。

为了得到激光器波长随环境温度变化的特征,并实时对激光器温度控制器进行修正补偿,采用了如图3所示的实验装置。

之间的变化特征,为补偿量提供依据。

3 实验过程

由于造成激光器波长漂移的原因众多,漂移的根本原因也难以区分,但温度变化对激光器波长影响最大,所以实验采取用温度传感器来测量温控箱内的温度,然后每2 s重新设置一次激光器温度的方法,以修正温控箱内温度变化时电路板上电子元件特性变化造成的波长漂移,弥补目前商用激光器自身控制系统的不足,实现激光器的波长稳定。激光器的温度、电流驱动如图4所示。

温度控制芯片的温度稳定性为 $0.01\text{ }^\circ\text{C}$,且自带温度PID补偿单元,通过TEMPSP引脚,单片机的DAC可以设置激光器的工作温度;电流驱动芯片具有低噪声和低温漂的特点,通过LIS引脚,函数发生器产生的锯齿波信号和设置的偏置电压信号经过加法器相加可以对激光器进行电流调制。

实验时,将激光器及驱动电路板一起放入温控实验箱中,改变温控箱的温度以模拟环境温度的变化,单片机和温度传感器采集温控箱内的温度,并根据当前温度值来重新设置激光器的温度,同时计算机采集水汽吸收谱线,并将处理得到的吸光度峰值位置和此时的温度值对应保存,就可以得到激光输

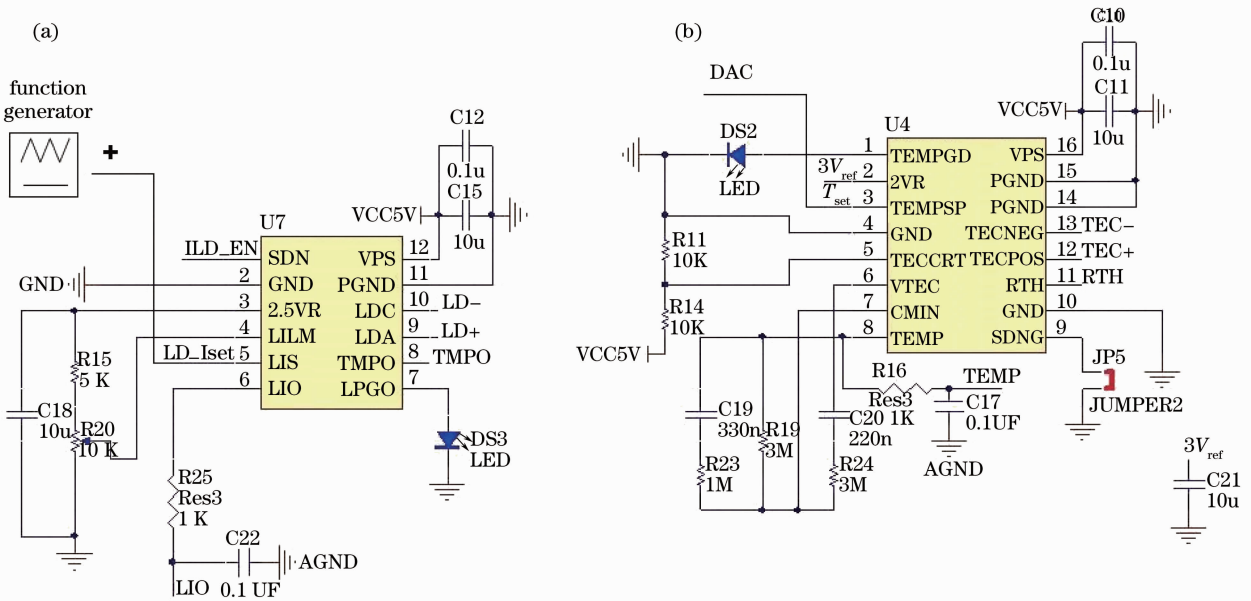


图 4 激光器控制原理图。(a) 电流驱动；(b) TEC 驱动

Fig. 4 Schematic of the diode laser. (a) Current drive; (b) TEC drive

出波长随温控箱内的温度变化特征。

4 实验结果及分析

把激光器和驱动电路板一起放入温控箱中,将激光器的温度设置为恒定值,得到的激光器输出波长随温控箱温度变化特征如图 5 所示。激光器的波长变化呈现单一特性,随着温控箱温度的升高,激光器的波长变短。

从图 5 可以看出,没有温度补偿时,激光器波长随温控实验箱温度变化量很大,因而需要利用 AD μ C841 的 DAC,根据温控箱内的温度每 2 s 补偿一次电子元件特性变化造成的激光器波长漂移。每次的补偿量为 1 LSB,由于 AD μ C841 的 DAC 为 12 bit,采用 5 V 电压基准,所以单次补偿量为 1.2 mV。

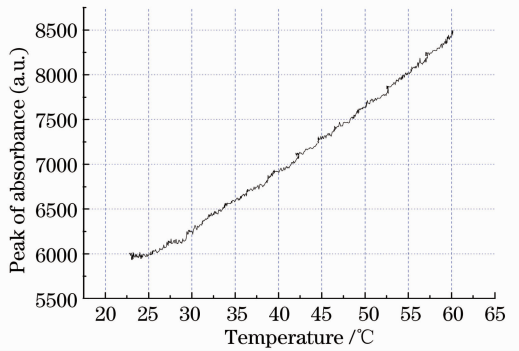


图 5 未进行温度补偿时吸光度峰值和温度关系

Fig. 5 Relationship between the peak absorbance and temperature without temperature compensation

45 °C 之前采用每 5 °C 补偿一次,45 °C 之后采用每 3 °C 补偿一次的办法,补偿后结果如图 6 所示,相比

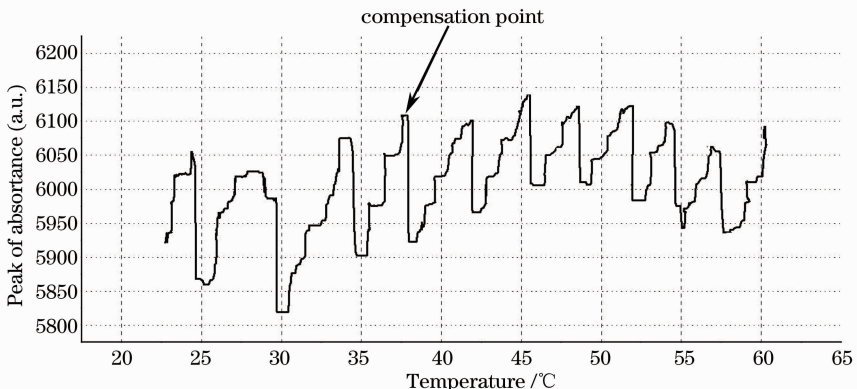


图 6 温度补偿后吸光度峰值和温度的关系

Fig. 6 Relationship between the peak absorbance and temperature with temperature compensation

于未加温度补偿,激光器波长漂移量减小,图中的阶梯状是由于温控实验箱设定的单次温度增量为 1°C ,并保持这一温度一段时间的缘故。

从图6可以看出,每次温度补偿后,激光器波长有个阶跃下降的变化,这主要是由于单次补偿电压偏大的原因。为了解决这一问题,可以对单片机AD μ C841的DAC输出进行电阻分压,由于激光器的设定工作电压为1.42V,因而可以对DAC的输出进行1/3分压,此时1LSB为0.4mV。由电阻分压并且每 2°C 补偿一次,单次补偿量为1LSB,得到的结果如图7所示,当减小温度补偿区间,增加补

偿次数,此时的阶跃变化量减小。虽然此时波长波动比较频繁,但是每次波动量不足100个采样点,相当于总采样点数的1/20,并不影响光谱处理的过程。

为了更直观的分析激光器的温度补偿效果,将以上讨论的三种情况下,吸光度峰值位置的变化量以及对应的波长变化量统计如表1所示,实验用的DFB激光器的扫描范围为0.5nm,每个周期采样点数为20000,减去锯齿波调制时激光器不出光的部分,采样有效点数为16000。

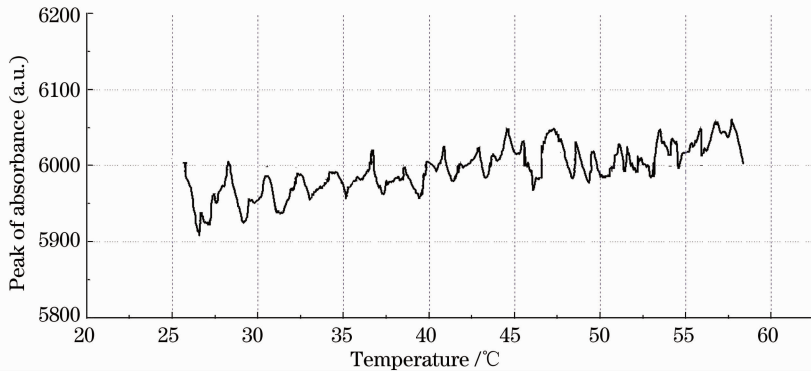


图7 温度补偿加电阻分压后吸光度峰值和温度的关系

Fig. 7 Relationship between the peak absorbance and temperature with temperature compensation and resistor divider

表1 三种情况下激光器波长漂移情况

Table 1 Laser wavelength shift of the three cases

	No temperature compensation	Temperature compensation without resistor divider	Temperature compensation with resistor divider
Shift of the peak absorbance (a. u.)	2500	315	132
Shift of the wavelength /pm	78.1	9.8	4.1

从表1可以看出,加入温度补偿后,激光器的波长总漂移量减小。当加入电阻分压,单次补偿后,激光器的波长变化量减小,由于补偿区间减小,补偿次数增多,可以达到更精确的补偿效果。同时激光器总的波长漂移量为4.1pm,当外界温度变化比较大时,温度控制精度得到了保证,把波长变化对光谱处理的影响大大减小。

如图6、图7所示,单次补偿后,激光器波长变化量相对较大,这主要由于激光器波长对温度比较敏感,可以加入电流调节,通过温度粗调和偏置电流微调的方式加以改善。同时,激光器驱动电路板使用低温漂的电子元件,对激光器和电路板进行隔热处理,都能达到减小波长漂移的目的。

5 结 论

造成DFB半导体激光器波长漂移的原因很多,这将对吸光度的计算和浓度反演造成影响,尤其是在多条吸收谱线的情况下。实验表明,采用根据环境温度重新设置激光器温度,以修正环境温度变化时电路板上电子元件特性变化造成的波长漂移的办法大大减小了激光器波长的漂移量,当外界温度变化比较大时,温度控制精度得到了保证,谱线锁定满足了实验要求,这对TDLAS应用于工业过程检测及其它恶劣环境下的气体检测提供了稳定性的保障。同时探讨了其他减小激光器波长漂移的方法,为TDLAS技术的推广应用奠定了基础。

参 考 文 献

- 1 Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei *et al.*. Application of digital frequency locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(10): 1008002
王贵师, 蔡廷栋, 汪磊等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(10): 1008002
- 2 Tang Yuanyuan, Liu Wenqing, Kan Ruifeng *et al.*. Rapid and sensitive measurements of motor vehicle exhausts using quantum cascade lasers[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(12): 1215003
汤媛媛, 刘文清, 阚瑞峰等. 基于量子级联激光器高灵敏快速检测机动车尾气排放气体浓度[J]. *中国激光*, 2011, **38**(12): 1215003
- 3 Chen Dong, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy system for fire gases sensing[J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(11): 1552~1556
陈东, 刘文清, 张玉钧等. 可调谐半导体激光光谱火灾气体探测系统[J]. *中国激光*, 2006, **33**(11): 1552~1556
- 4 He Ying, Zhang Yujun, Zhu Anning *et al.*. Open-path ammonia high sensitivity on-line monitoring in farmland based on laser techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100407
何莹, 张玉钧, 朱安宁等. 开放式农田氨气的高灵敏激光在线监测[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100407
- 5 Zhang Zhirong, Dong Fengzhong, Wang Yu *et al.*. On-line monitoring of industrial toxic gases with a digital-control module [J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(s1): s100304
张志荣, 董凤忠, 王煜等. 基于数字控制模块的工业有毒气体在线监测仪[J]. *光学学报*, 2011, **31**(s1): s100304
- 6 Yang Bin, He Guoqiang, Liu Peijin *et al.*. TDLAS-based measurements of parameters for incoming flow hot-firing test of air-breathing rocket engine[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0508006
杨斌, 何国强, 刘佩进等. 利用 TDLAS 技术开展吸气式发动机来流热试实验参数测量[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0508006
- 7 A. D. Sappey, L. Sutherland, D. Dwenby *et al.*. Flight-Ready TDLAS Combustion Sensor for the HIFiRE 2 Hypersonic Research Program [R]. Zolo Technologies Final Report for Period 1, 2006
- 8 Tang Yuanyuan, Liu Wenqing, Kan Ruifeng *et al.*. Spectroscopy processing for the NO measurement based on the room-temperature pulsed quantum cascade laser [J]. *Acta Physica Sinica*, 2010, **59**(4): 2364~2368
汤媛媛, 刘文清, 阚瑞峰等. 基于室温脉冲量子级联激光器的 NO 气体检测中的光谱处理方法研究[J]. *物理学报*, 2010, **59**(4): 2364~2368

栏目编辑: 李文喆