

可调谐半导体激光吸收传感器的温度测量验证

王广宇, 洪延姬, 潘 虎, 宋俊玲

(装备学院 激光推进及其应用国家重点实验室, 北京 101416)

摘 要: 开发了一种可调谐半导体激光吸收传感器, 用于测量气体的温度, 应用扫描波长吸收谱和固定波长调制谱探测水蒸气在 $7\,454.4\text{ cm}^{-1}$ 和 $7\,185.6\text{ cm}^{-1}$ 附近的两条吸收谱线。传感器可实现绝对温度测量, 固定波长调制谱更可实现 10 kHz 以上的测量带宽。传感器的性能和精度在已知温度和压力的静室中进行测量验证, 在 $600\text{--}1\,000\text{ K}$ 的设定温度范围, 两种方法的测量误差(RMS)都小于 2% 。表明可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)传感器对于均匀的流场具有快速和精确的温度测量能力。

关键词: 可调谐半导体激光吸收光谱; 固定波长调制谱; 温度测量; 绝对测量; 水蒸气
中图分类号: O433.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2013)09-2358-06

Validation of temperature measurement for a tunable diode laser absorption sensor

Wang Guangyu, Hong Yanji, Pan Hu, Song Junling

(State Key Laboratory of Laser Propulsion & Application, Academy of Equipment, Beijing 101416, China)

Abstract: A tunable diode laser absorption sensor was developed to measure gas temperature, which exploited scanned-wavelength direct absorption spectroscopy and fixed-wavelength modulation spectroscopy with second harmonic detection on two water vapour spectral features near $7\,454.4\text{ cm}^{-1}$ and $7\,185.6\text{ cm}^{-1}$. The sensor was capable of making absolute measurement and could reach 10 kHz output bandwidth using fixed-wavelength modulation spectroscopy. Its performance and accuracy were validated and demonstrated in a static cell with known temperature and pressure. The measured temperature using two techniques agree to within 2% RMS of thermocouple reading for temperature from 600 to $1\,000\text{ K}$, which indicates the sensor is capable of making rapid and highly accurate temperature measurement for uniform flow.

Key words: tunable diode laser absorption spectroscopy; fixed-wavelength modulation spectroscopy; temperature measurement; absolute measurement; water vapour

收稿日期: 2013-01-11; 修订日期: 2013-02-17

作者简介: 王广宇(1976-), 男, 助理研究员, 硕士, 主要从事非接触流场诊断方面的研究。Email: wangguangyu1976@gmail.com

0 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)传感器能提供气体温度、浓度和质量流量等测量信息,这对于现代燃烧和推进系统的发展极为重要,因为这些信息有助于完善设计、提高效率、降低污染物排放等^[1-2]。气体温度是燃烧过程的关键参数,可作为燃烧效率的指示器^[2]。在燃烧动力学中,温度对化学反应速率有重要影响,因此也影响有害排放物的形成,温度还有潜力用作实时燃烧控制系统的控制变量以改善燃烧效率和降低污染物排放^[3]。温度测量在 TDLAS 技术中处于基础性地位,绝大多数的研究也都集中在温度测量^[2-6],温度得到后吸收分子的组分浓度随之确定。

从 20 世纪 90 年代中期开始,美国在汽轮机^[2]、脉冲爆震发动机^[4]、超燃冲压发动机^[5]、激波管^[6]等气动和燃烧流场广泛开展 TDLAS 的工程应用研究,经历了各种严苛和极端环境的考验,充分验证了 TDLAS 的技术能力和工程适用性。TDLAS 测量包括直接吸收谱(DA)和波长调制谱(WMS)两种方法。直接吸收谱通过扫描激光频率穿过吸收跃迁,透过的激光强度用光电探测器记录产生谱解析的吸收线型,分析线型得到流场参数信息。扫描波长直接吸收谱实现简单、无需标定,然而由于自身固有的一些不足,使其适用于吸光度适当(过大或过小都会降低测量灵敏度)、压力相对较低、吸收线相对孤立的场合^[1,7]。波长调制谱是激光频率除了扫描外还叠加了更高频率的正弦调制,在快速调制频率和非线性吸收线型的相互作用下在探测器信号中产生谐波分量,可由锁相放大器进行分离。波长调制谱的调制频率典型值在几百 kHz 以下,由于将探测信号移到更高频率上,波长调制谱可显著降低 1/f 噪声以及环境噪声,提高信噪比(SNR),另外由于无需基线拟合,使应用范围要比直接吸收宽得多。然而为实现免标定需要知道探测气体的压力并建立流场的吸收谱仿真模型,增加了复杂性^[8-9]。无论是直接吸收还是波长调制, TDLAS 基本的温度测量方法都是双线测温法。

文中重点研究利用扫描波长直接吸收谱和固定波长调制谱测量气体的温度。首先介绍扫描波长直接吸收谱和 1f 归一化的波长调制谱(WMS-2f/1f)以及温度的测量方法,然后说明吸收谱线的选择,最后

给出传感器在静室的温度测量验证结果。

1 理论

1.1 扫描波长直接吸收谱

二极管激光器的注入电流用线性斜坡信号(锯齿波)进行扫描,导致激光强度发生近似线性的变化,同时激光频率也产生近似线性的改变。激光频率扫描穿过所选的吸收跃迁,由于共振吸收,激光强度产生衰减。透过的激光强度用光电探测器记录产生吸收线型,对吸收线的非吸收翼进行多项式拟合得到基线。

入射强度(基线信号)和透过强度(探测器信号)的关系满足 Beer-Lambert 方程^[1,7]:

$$\tau_v = \left(\frac{I_t}{I_0} \right)_v = \exp(-\alpha_v) \quad (1)$$

式中: τ_v 为透过系数; I_t 为透过激光强度; I_0 为入射激光强度; α_v 为谱吸光度。通过对方程(1)的反演可得到吸光度曲线。

对于均匀的气体和孤立的吸收跃迁,吸光度可表示为:

$$\alpha_v = P \chi_i L S(T) \phi_v(T, P, \chi_i) \quad (2)$$

式中: P 为混合气体的总静压,atm(1 atm=1.013×10⁵ Pa); χ_i 为吸收分子的摩尔分数; L 为吸收路径长度,cm; S 为吸收跃迁的线强度,cm²·atm⁻¹; T 为气体温度,K; ϕ 为跃迁的线型函数,cm。

线型函数在频率空间是归一化的,因此对测得的吸光度进行函数(如 Voigt 函数)拟合并对频率进行积分(也就是吸收线型下的面积),得到谱积分吸光度:

$$A = \int_{-\infty}^{\infty} \alpha_v d\nu = P \cdot \chi_i \cdot S(T) \cdot L \quad (3)$$

谱积分吸光度已不包含复杂的线型函数,这为参数测量提供了很大方便。

吸收跃迁的线强度是吸收元素基本的谱特性,是跃迁频率、温度、跃迁的低能级能量和配分函数的函数。对于给定的跃迁频率,如果在某个参考温度下的线强度 $S(T_0)$ 已知,在任何温度下的线强度都可以计算得到

$$S(T) = S(T_0) \frac{Q(T_0)}{Q(T)} \left(\frac{T_0}{T} \right) \exp \left[-\frac{hcE''}{k} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right) \right] \cdot \left[1 - \exp \left(\frac{-hcv_0}{kT} \right) \right] \left[1 - \exp \left(\frac{-hcv_0}{kT_0} \right) \right]^{-1} \quad (4)$$

式中: $S(T_0)$ 为在参考温度 T_0 (通常取 296 K)下的线强

度; $Q(T)$ 为吸收分子的配分函数; h 为普朗克常量, $J \cdot s$; c 为光速, cm/s ; k 为玻耳兹曼常数, J/K ; E'' 为跃迁的低能态能量, cm^{-1} ; ν_0 为跃迁的线心频率, cm^{-1} 。同时测量具有同样压力、摩尔浓度和路径长度的两个跃迁的吸光度, 由方程(3)和(4), 两个积分吸光度之比简化为线强度之比:

$$R = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)} = \frac{S(T_0, \nu_1)}{S(T_0, \nu_2)} \cdot \exp\left[-\left(\frac{hc}{k}\right)(E_1'' - E_2'')\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (5)$$

由测量线型的积分面积之比可确定温度。

1.2 波长调制谱

这里简要介绍由 Li 和 Rieker 等人发展和完善的免标定 WMS-2f/1f 理论^[8-9]。如果二极管激光器的注入电流受到角频率为 $\omega = 2\pi f$ 的正弦调制, 将同时产生频率调制(FM)和强度调制(IM), 瞬时激光频率和强度可表示为:

$$\bar{\nu}(t) = \bar{\nu} + a \cos(\omega t) \quad (6)$$

$$I_0(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(\omega t + \psi_2)] \quad (7)$$

式中: $\bar{\nu}$ 为平均激光频率, cm^{-1} ; a 为调制深度, cm^{-1} ; \bar{I}_0 为平均激光强度; i_0 和 i_2 分别为线性和非线性 IM 的幅度(由 \bar{I}_0 归一化); ψ_1 和 ψ_2 为线性和非线性 FM/IM 相移。

由 Beer-Lambert 关系, 透过激光强度为:

$$I(t) = \bar{I}_0 [1 + i_0 \cos(\omega t + \psi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \psi_2)] \cdot \tau(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) \quad (8)$$

透过系数 $\tau(\nu)$ 是关于 ωt 的周期性偶函数, 可展开成 Fourier 余弦级数:

$$\tau(\bar{\nu} + a \cos(\omega t)) = \sum_{k=0}^{\infty} H_k(\bar{\nu}, a) \cos(k\omega t) \quad (9)$$

这里 $H_k(\bar{\nu}, a)$ 是透过系数的 k 次 Fourier 系数, 可表示为:

$$H_0(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos\theta) d\theta \quad (10)$$

$$H_k(\bar{\nu}, a) = \frac{1}{\pi} \int_{-\pi}^{\pi} \tau(\bar{\nu} + a \cos\theta) \cdot \cos k\theta d\theta \quad (11)$$

对于 2f 探测, 用锁相放大器分离透过激光强度的二次谐波信号。为了消除对探测器相位的敏感性, 将信号表示成分量形式。其过程是将探测器信号分别与 2 倍调制频率的余弦($\cos(2\omega t)$)和正弦($\sin(2\omega t)$)参考信号相乘, 然后再低通滤波得到 WMS-2f 信号的 X 和 Y 分量。

$$X_{2f} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \left[H_2 + \frac{i_0}{2} (H_1 + H_3) \cos\psi_1 + i_2 \left(H_0 + \frac{H_4}{2} \right) \cos\psi_2 \right] \quad (12)$$

$$Y_{2f} = -\frac{G\bar{I}_0}{2} \left[\frac{i_0}{2} (H_1 - H_3) \sin\psi_1 + i_2 \left(H_0 - \frac{H_4}{2} \right) \sin\psi_2 \right] \quad (13)$$

式中: G 为光电探测器增益。2f 信号的幅度可表示为:

$$S_{2f} = \sqrt{X_{2f}^2 + Y_{2f}^2} \quad (14)$$

如果气体对激光无吸收, $H_0=1, H_k=0$, 方程(14)

变为:

$$S_{2f}^0 = \frac{1}{2} G\bar{I}_0 i_2 \quad (15)$$

这个非零的背景 2f 信号是激光强度非线性调制的结果, 在大调制深度时更为显著。

使用与上面相同的步骤, 则 1f 信号的幅度可表示为:

$$R_{1f} = \sqrt{X_{1f}^2 + Y_{1f}^2} = \frac{G\bar{I}_0}{2} \cdot$$

$$\left\{ \left[H_1 + \frac{i_0}{2} \left(H_0 + \frac{H_2}{2} \right) \cos\psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 + H_3) \cos\psi_2 \right]^2 + \left[i_0 \left(H_0 - \frac{H_2}{2} \right) \sin\psi_1 + \frac{i_2}{2} (H_1 - H_3) \sin\psi_2 \right]^2 \right\} \quad (16)$$

无吸收的背景 1f 信号为:

$$R_{1f}^0 = \frac{1}{2} G\bar{I}_0 i_0 \quad (17)$$

为了得到完全由吸收产生的 WMS-2f/1f 信号, 测量的 2f 信号和背景信号必须归一化(用 1f 信号), 然后进行矢量相减

$$C_{2f/1f} = \sqrt{\left[\left(\frac{X_{2f}}{R_{1f}} \right) - \left(\frac{X_{2f}^0}{R_{1f}^0} \right) \right]^2 + \left[\left(\frac{Y_{2f}}{R_{1f}} \right) - \left(\frac{Y_{2f}^0}{R_{1f}^0} \right) \right]^2} \quad (18)$$

如果知道了具体的激光参数(i_0, i_2, ψ_1, ψ_2 和 a)和具体的谱参数(H_k 中的项), 就可完全仿真 1f 和 2f 信号。激光参数可由实验室测定^[8], 谱参数也可通过实验室测量^[10]或查分子数据库(如 HITRAN)得到。这样仿真就可完全“镜像”实验而无需标定。这个模型对任何的光学深度、调制幅度、环境条件(T, P, χ)都是有效的。在一定条件下模型可以简化。

为了获得温度, 首先给定 χ 的名义期望值, 然后建立两吸收谱线 WMS-2f/1f 信号峰值高度比 R 对温度和压力的仿真数据库。

$$R = \frac{C_{2f/1f}(\nu_{01})}{C_{2f/1f}(\nu_{02})} \approx f(T, P) \quad (19)$$

一旦压力独立获得, 则通过测量的 WMS-2f/1f 峰值比与仿真数据库对比获得温度。

2 吸收谱线的选择

TDLAS 传感器设计的第一步是选择目标分子和选取吸收线。由于 H₂O 是碳氢燃料燃烧的主要产物之一,在燃烧和推进的研究中 H₂O 是首选的目标分子。H₂O 在近红外和中红外区都有较强的转振谱,然而当前的绝大多数 H₂O 吸收测量系统都工作在近红外区的 2ν₁, 2ν₃ 和 ν₁+ν₃ 吸收带^[1-2,5-6],因为光纤耦合的通讯半导体激光器和光纤器件在这个波长范围有成熟的商业产品。

吸收线的适当选取对于传感器的性能至关重要,Zhou 等^[11]深入研究了水吸收线的选择问题,提出了选择准则并发展了计算机算法,对其他气体分子的选线也具有重要的借鉴意义,为其后的研究者所遵循和发展^[2,6]。

当被测流场环境确定后,选取吸收谱线时两个最重要的考虑因素是线强度和低能态能量。因为光的吸收与线强度直接成比例,而在给定温度下,吸收量子态的分子数目与低能态能量相关。因而测量系统的信号强度和温度敏感度高度依赖于跃迁的线强度 S 和低能态能量 E''。

传感器在静室中进行温度测量验证,温度范围 600~1000 K,压力~0.4 atm,H₂O 的摩尔含量~6%,吸收路径长度 50 cm。根据被测环境,按照吸收线强度 > 10⁻⁴ cm⁻²atm⁻¹ 的要求,在 1340~1470 nm 范围(通讯半导体激光器容易达到)进行选择,确定选线准则如下:

(1) 峰值吸光度 0.05 < α_{peak} < 1, 确保测量信号有较强的信噪比(SNR); (2) 与临近强吸收线的线心间隔大于 0.3 cm⁻¹, 确保充分的孤立,并能降低多普勒频移后的线型扭曲; (3) 低能态能量 E'' 应具有较大差别,并且对被测温度范围有较高的灵敏度。

基于上述准则,从 HITRAN2008 数据库选出的一对吸收线如表 1 所示。

表 1 两条吸收谱线的基本谱参数

Tab.1 Basic spectroscopic parameters of the two absorption lines

Wavelength/nm	Wavenumber/cm ⁻¹	Line strength /cm ⁻² ·atm ⁻¹	Lower state energy/cm ⁻¹
1391.7	7185.6	1.97×10 ⁻²	1045.06
1341.44	7454.4	1.86×10 ⁻⁴	1962.51

线对的线强度及温度灵敏度仿真结果如图 1 所示,可以看出,在整个温度范围,所选线对有较好的温度灵敏度。

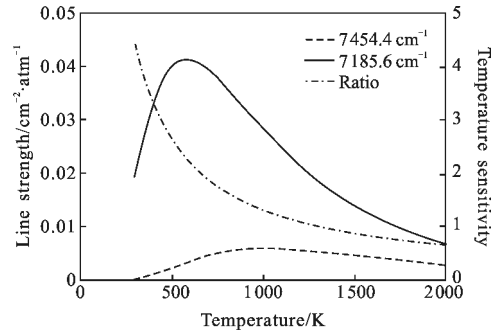


图 1 线强度及温度灵敏度的仿真结果

Fig.1 Simulation results of line strength and temperature sensitivity

3 温度测量验证

静室提供了温度测量验证的理想环境,装置主要包括控温管炉和石英气室。验证实验用可独立控制的 3 温区管炉,提供了 600 mm 长的均匀(~1%)温度环境,管炉内置 3 个热电偶,测量实际炉温。石英气室置于管炉中央,气室分为 3 段相互隔开,500 mm 长的中段内充入含有一定比例水蒸气的空气,置于管炉的恒温区域内。实验时气室的两个外段抽真空或充入纯净氮气。

直接吸收用时分复用方式,线性扫描频率 1 kHz,因为两个激光器交替工作,最大测量带宽 500 Hz。波长调制用频分复用方式,固定波长(无扫描),1392 nm 和 1341 nm 激光器的调制频率分别设定在 180 kHz 和 240 kHz。气室外部光路用干燥氮气净化,实验设备示意图如图 2 所示。

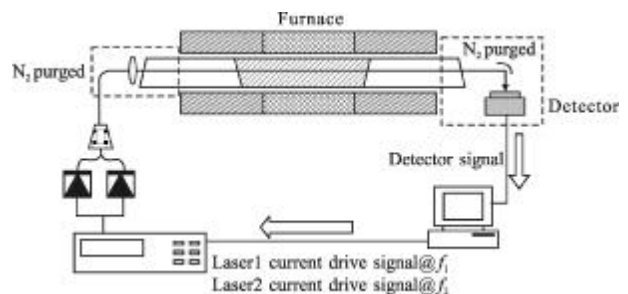


图 2 温度验证的实验设备示意图

Fig.2 Schematic of temperature validation facility

实验时,气室的 5 个温度设定点分别为 600 K、700 K、800 K、900 K 和 1000 K,气室压力约 0.4 atm,

H₂O 摩尔含量约 6%。

温度设定为 800 K 时，两条吸收跃迁吸光度的实验(圆形)和拟合(黑线)曲线及其残差如图 3 所示。7 185.6 cm⁻¹ 线型用双峰 Voigt 线型拟合, 7 454.4 cm⁻¹ 用单峰 Voigt 线型拟合。

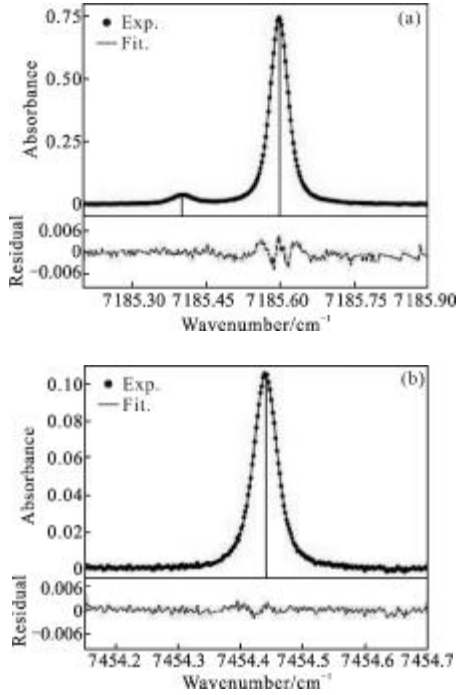


图 3 直接吸收线型拟合及残差

Fig.3 Lineshape fitting and residual for direct absorption

图 4 给出了在气室温度设定为 800 K、输出带宽 500 Hz 时,直接吸收的测量结果,测量均值 797.6 K,标准差 2.2 K。

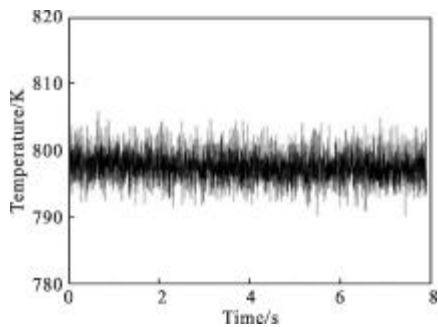


图 4 设定温度 800 K 时的直接吸收测量结果

Fig.4 Temperature measurement results by direct absorption at 800K

图 5 给出了在 5 个温度设定点直接吸收的温度测量结果(500 Hz),包括测量均值和误差棒(均方差),其中两条虚线为 2% 误差带。

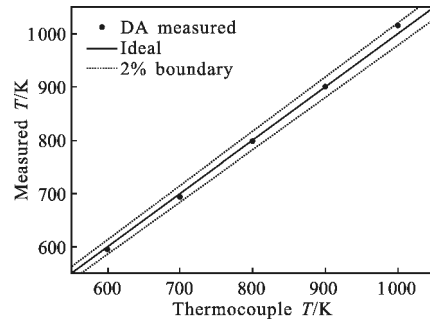


图 5 直接吸收测量与设定温度的比较

Fig.5 Comparison of temperature between direct absorption and setting

图 6 给出了气室温度设定为 800 K、输出带宽 10kHz 时,WMS-2f/1f 的测量结果,测量均值 808.7 K,标准差 2.4 K。

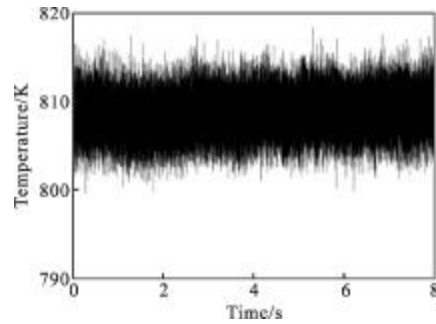


图 6 设定温度 800 K 时的波长调制测量结果

Fig.6 Temperature measurement results by wavelength modulation spectroscopy at 800 K

WMS-2f/1f 在 5 个设定点的温度测量结果与设定温度的比较如图 7 所示(10 kHz)。

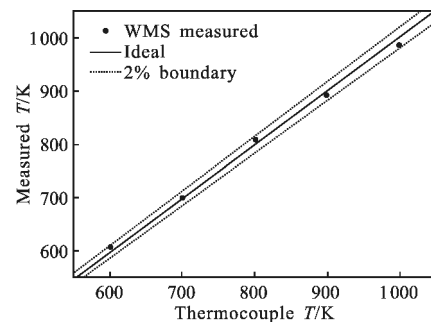


图 7 波长调制测量与设定温度的比较

Fig.7 Comparison of temperature between wavelength modulation spectroscopy and setting

整体而言,由于气室环境均匀,吸收较强,扫描波长直接吸收谱和固定波长调制谱都实现了高精度

(~2%)的温度测量验证。

4 结论

开发了基于 H₂O 吸收的可调谐半导体激光吸收传感器,应用扫描波长直接吸收谱和固定波长调制谱,传感器在静室中进行温度测量验证。在气室环境下,温度分布均匀,直接吸收和 WMS-2f/1f 的温度测量误差都在 2%以内,说明对于均匀的静态流场环境,TDLAS 传感器具有很高的温度精度。另外,用固定波长调制谱实现了 10 kHz 的输出带宽,证明传感器有潜力应用于脉冲爆震发动机和激波管等快速变化流场的温度测量。

参考文献:

- [1] Allen M G. Diode laser absorption sensors for gas-dynamic and combustion flows[J]. *Meas Sci Technol*, 1998, 9: 545-562.
- [2] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K. et al. Development of a tunable diode laser sensor for measurements of gas turbine exhaust temperature[J]. *Appl Phys B*, 2006, 82: 469-478.
- [3] Furlong E R, Mihalcea R M, Webber M E, et al. Combustion sensing and control using wavelength-multiplexed diode lasers[R]. AIAA-97-0320, 1997.
- [4] Ma L, Sanders S T, Jeffries J B, et al. Monitoring and control of a pulse detonation engine using a diode-laser fuel concentration and temperature sensor [C]//Proceedings of the Combustion Institute, 2002, 29: 161-166.
- [5] Rieker G B, Liu J T C, Jeffries J B, et al. Diode laser sensor for gas temperature and H₂O concentration in a Scramjet combustor using wavelength modulation spectroscopy [R]. AIAA-2005-3710, 2005.
- [6] Rieker G B, Li H, Liu X, et al. A diode laser sensor for rapid, sensitive measurements of gas temperature and water vapor concentration at high temperatures and pressures [J]. *Meas Sci Technol*, 2007, 18: 1105-1204.
- [7] Baer D S, Nagali V, Furlong, E R, et al. Scanned- and fixed-wavelength absorption diagnostics for combustion measurements using multiplexed diode lasers [J]. *AIAA Journal*, 1996, 34(3): 489-493.
- [8] Li H, Rieker G B, Liu X, et al. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases [J]. *Applied Optics*, 2006, 45(5): 1052-1061.
- [9] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Calibration-free wavelength modulation spectroscopy for measurements of gas temperature and concentration in harsh environments [J]. *Applied Optics*, 2009, 48(29): 5546-5560.
- [10] Liu X, Jeffries J B, Hanson R K. Measurements of spectral parameters of water-vapour transitions near 1388 and 1345nm for accurate simulation of high-pressure absorption spectra[J]. *Meas Sci Technol*, 2007, 18: 1185-1194.
- [11] Zhou X, Liu X, Jeffries J B, et al. Development of a sensor for temperature and water concentration in combustion gases using a single tunable diode laser [J]. *Meas Sci Technol*, 2003, 14: 1459-1468.