文章编号 1004-924X(2019)11-2281-08

基于电流扫描波长响应函数直接确定正弦波扫描 波长调制光谱中 DFB 激光器的相对波长响应

郭松杰,刘建鑫,周月婷,许 非,马维光*

(1. 山西大学 激光光谱研究所 量子光学与光量子器件国家重点实验室,山西 太原 030006;2. 山西大学 极端光学协同创新中心,山西 太原 030006)

摘要:为了研究适用于描述正弦波扫描波长调制光谱中相对波长响应的方法,提高正弦波扫描测量气体浓度的准确性, 对现有的描述激光器相对波长响应的方法进行了讨论。首先,分析现有的几种描述激光器波长响应的方法是否适用于 正弦波扫描。然后,比较由不同方法模拟的相对波长响应和实测的激光器波长响应残差,残差越小说明激光器波长响应 越准确。最后,用确定的准确快捷的方法测量二氧化碳气体浓度。实验结果表明,由电流扫描波长响应(CSWR)直接确 定相对波长响应(RWR)的方法描述激光器的波长响应更准确。将得到的相对波长响应与通过标准具实测的结果进行 比较,二者残差的标准偏差小于 5×10⁻³ cm⁻¹。利用该方法结合多光程池技术和免定标波长调制技术,能够准确测量二 氧化碳的气体浓度。

关 键 词:正弦波扫描;波长响应;波长调制;浓度误差 中图分类号:O433.1 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20192711.2281

Direct determination of relative wavelength response of DFB lasers in sinusoidal scanning wavelength modulation spectra based on current scanning wavelength response function

GUO Song-jie, LIU Jian-xin, ZHOU Yue-ting, XU Fei, MA Wei-guang*

(1. National Key Laboratory of Quantum Optics and Optical Quantum Devices, Institute of Laser Spectroscopy, Shanxi University, Taiyuan 030006, China;

2. Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan 030006, China) * Corresponding author, E-mail: mwg@sxu.edu.cn

Abstract: In order to identify a method suitable for describing the Relative Wavelength Response (RWR) in the sine wave scanning wavelength modulation spectrum, and to improve the accuracy of the sinusoidal scanning measurement of gas concentration, existing methods for describing the RWR

收稿日期:2019-06-03;修订日期:2019-06-26.

基金项目:国家重点研发计划资助项目(No. 2017YFA0304203);长江学者和创新团队发展计划资助项目(No. IRT_ 17R70);山西省1331重点学科建设计划;111计划资助项目(No. D18001);国家自然科学基金资助项目 (No. 61675122,No. 61875107,No. 61875108,No. 11704236,No. 61475093,No. 61775125);山西省回国留 学人员科研资助项目(No. 2017-016);中国科学院大气光学重点实验室开放课题基金项目资助(No. JJ-2018-02)

of the laser are discussed. First, several existing methods for describing the wavelength response of a laser for sinusoidal scanning are analyzed. Then, the RWR simulated by the different methods and the residuals of the measured laser wavelength response are compared. The smaller the residual, the more accurate the wavelength response of the laser. Finally, the carbon dioxide gas concentration is measured in a precise and accurate manner. The experimental results show that the method of directly determining the RWR by the current scanning wavelength response describes the laser wavelength response more accurately. The RWR obtained is compared with the results measured by the etalon, and the standard deviation of the residuals is less than 5×10^{-3} cm⁻¹. By combining this method with multichannel cell technology and calibration-free wavelength modulation technology, the accuracy of the method was verified by measuring the concentration of carbon dioxide gas.

Key words: sine wave scanning; wavelength response; wavelength modulation; concentration error

1 引 言

气体浓度检测在环境监测、工业生产、能源开 发以及日常生活中都具有非常重要的意义,一直 以来备受国内外科研工作者和相关人士的重视。 大气污染治理的第一步就是精确地检测大气中痕 量污染气体的成分以及含量。在工业生产中,通 过监测生产中的过程气或排放气,可以有目的地 调控生产过程^[1-2],从而提高生产效率,减少污染 气体的排放^[3]。在能源开发方面,为了避免天然 气管道泄漏事故带来的社会危害和经济损失,对 泄漏气体进行高选择性、高可靠性和高灵敏度的 快速检测已经成为迫切要求。另外,气体浓度检 测在生物、医学、养殖业、海洋治理等领域也有重 要作用。

可调谐二极管激光吸收光谱(Tunable Diode Laser Absorb Spectroscopy, TDLAS)技术是一 种高效的痕量气体检测技术,它具有高选择性、高 灵敏度、非接触以及可实时在线测量等优点^[4],主 要包括直接吸收光谱技术(Direct Absorb Spectroscopy, DAS)和波长调制光谱技术(Wavelengch Modulation Spectroscopy, WMS)。DAS 的探测灵敏度受探测系统低频噪声的影响很大, 最小可探测吸收只能达到 10^{-3} 。然而由于大部 分背景噪声,尤其是1/f噪声,具有低频功率 大、高频功率低的特点,因此,如在高频下检测 信号将会有效地抑制背景噪声。WMS 是在低 频扫描信号上附加一个高频的调制信号^[5](通 常频率为数千 Hz 到数万 Hz),调制的激光与吸 收线相互作用,在对应的调制频率的不同谐波 上产生信号,通过探测高频谐波信号来有效抑 制探测系统的低频噪声^[6],从而将最小可探测 吸收提高到了 10⁻⁵~10^{-6[7]},使它广泛应用于 痕量气体检测领域^[8-9]。

WMS 技术需将一个低频的三角波(或正弦 波)叠加一个高频的正弦波送到激光器的电流控 制端,实现对激光器注入电流的扫描和调制。与 三角波相比,正弦波频率成分单一,波形稳定,不 易失真,且可以实现高频扫描,从而可以获得更高 的气体检测灵敏度^[5]。本文重点研究了基于正 弦波扫描的免定标波长调制技术,确定一种经 验的描述 DFB 激光器相对波长响应(Relative Wavelength Response, RWR)的方法,根据测量 激光器的注入电流和由光学标准具测量的电 流扫描波长响应(Current Scanning Wavelength Response, CSWR)得到相应的参数,进而确定 激光 器的 RWR。最后,选用中心波长为 1578.22 nm 的 DFB 激光器实现正弦波扫描 方式下 CO₂气体浓度的免定标测量。

2 理论分析

根据 Beer-Lambert 定律,当一束频率为 ν ,强 度为 $I_0(\nu)$ 的激光通过气体样品时,输出光强 $I(\nu)$ 可以表达如下:

 $I(v) = I_0(v) \exp[-S(T)\varphi(v)PNL],$ (1) 其中:S(T)表示气体特征谱线强度; P 表示气体 总压强; N 表示待测气体体积浓度; L 表示激光在 气体介质中的传播距离; $\varphi(v)$ 表示吸收谱线的线 型函数,采用 Voigt 线型描述,它是 DFB 激光器 频率响应特性 $\nu(t)$ 、谱线碰撞展宽 $\Delta\nu_{\rm C}$ 、多普勒展 宽 $\Delta\nu_{\rm D}$ 和中心频率 ν_0 的函数。所以在测量气体 浓度之前需要预先确定 $\nu(t)$ 。

DFB 激光器频率响应特性的本质是对注入 电流的响应。电流注入 DFB 激光器时,有源区内 的电子-空穴进行复合,辐射出一定频率的光子从 而产生激光。注入电流的变化不仅影响电子-空 穴的复合率,而且影响激光介质的折射率,导致激 光 器 输 出 频 率 变 化 的 同 时 输 出 功 率 也 在 变化^[9-11]。

目前,描述激光器光学频率变化的方法有四种:第一种称为常数法,即将电流调制波长的响应 幅度看作常数,在扫描和调制同时作用下激光器 的 RWR 可以表示为^[12]:

 $u(t) = u_0(t) + a\cos(2\pi ft + \theta),$ (2) 其中: $u_0(t)$ 是 CSWR,第二项为电流调制波长响 应,a 是调制幅度, f 是调制频率。

第二种方法称为一阶导数法,即将 CMWR 的幅度看作正比于 CSWR 的一阶导数,激光器的 RWR 可以表示为^[13-14]:

 $u(t) = v_0(t) + av'_0(t)\cos(2\pi ft + \theta),$ (3) 其中 $v_0(t)$ 是 CSWR。对于正弦波扫描,电流与时 间不成线性关系,公式(3)的后一项描述 CMWR 是不准确的,所以一阶导数法不适用于正弦波 扫描。

第三种方法为倍频法,在考虑具有线性时间 相关幅度的一次谐波分量的基础上,又考虑了具 有恒定幅度的非线性二次谐波分量,激光器的输 出波长可以表示为^[15]:

$$\nu(t) = \nu_0(t) + (a + bt)\cos(2\pi ft) + \cos(4\pi ft + \theta_2),$$
(4)

其中:θ₂ 是频率调制的一次谐波和二次谐波之间 的相位差。正弦波扫描电流与时间成非线性关 系,倍频法也不适用于正弦波扫描。

第四种方法是利用 CSWR 直接确定三角波 扫描下的 RWR,可以表示为^[16]:

$$\nu(t) = \nu_0 [i_e(t)] = \sum_{n=0}^{N} A_n [i_e(t)]^n, \quad (5)$$

 $i_{e}(t) = i_{0}(t) + \kappa i_{a} \cos(2\pi f_{2}t + \varphi_{2} + \psi).$ (6) 其中: A_{n} 表示对 CSWR 采用多项式拟合的系数, $i_{e}(t)$ 表示有效电流, $i_{0}(t)$ 表示扫描电流, i_{a} 为电 流调制幅度。所以,这里称第四种方法为有效电 流法。

分析前三种方法,只有常数法适用于正弦波 扫描的 WMS。常数法对应恒定的调制幅度,这 是根据波长和电流调制之间存在线性响应得 出来的,然而由于调制幅度是扫描波长的函 数,采用常数法获得的 RWR 具有较大的误 差。有效电流法对于三角波扫描是合适的,因 此有必要分析正弦波扫描条件下该方法是否 适用。

本文测量有效电流和相对波长响应的方法思 路采用本课题组前期的思路^[16],与之不同的是, 这里采用正弦波扫描,注入电流不同于三角波扫 描。采用正弦波扫描,当只有扫描信号加载到激 光器时,激光器的扫描电流 *i*₀(*t*)可以表示为:

 $i_0(t) = i_{os} + i_s \cos(2\pi f_1 t + \varphi_1),$ (7) 其中: i_{os} 是电流偏置, i_s 是电流扫描幅度, f_1 是扫描标率, φ_1 是扫描信号相对于采集数据起始位置的相位差。

当扫描与调制电流同时加载到激光器时,激 光器注入电流的表达式可以表示为:

 $i(t) = i_0(t) + i_a \cos(2\pi f_2 t + \varphi_2),$ (8) 其中: i_a 是电流调制幅度, f_2 是调制频率, φ_2 是调制信号相对于采集数据起始位置的相位差。

综上,有效电流 *i*_e(*t*)和最终的 RWR 都采用 有效电流法进行推导。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示,由函数发生器 (AFG3022,Tektronix)产生扫描和调制信号经过 加法器后接入激光控制器(LDC-3724C,Newport),用于扫描和调制 DFB 激光器 (NLK1L5EAAA,NTT)的波长。激光器输出光 经过分束器后分为两路,一路光经过反射镜组后 进入多光程池,多光程池的有效光程为 22.8 m, 封闭的多光程池内气压稳定在 0.91×10⁵ Pa,经 过多次反射后出射光进入探测器 1(PDA10CS-EC,Thorlabs);另一路光经过自由光谱区(FSR) 为0.0417 cm⁻¹的自制标准具后入射到同型号探 测器 2 上。两个探测器信号最终通过采样率为 10 MHz,位数为 12 bits 的数据采集卡(PCF- 6115,NI)采集输送到 PC 端,然后用 LabVIEW 程序进行数据处理以及信号拟合。为了测量注入 电流,在驱动输入的电流与 DFB 激光器的 11 脚 (LD 正向输入端)之间加入一个 25 Ω 的低温漂 电阻(电阻温度系数小于±250×10⁻⁶),电阻精度 为±0.5%,实测阻值为 25.05 Ω。



图 1 有效电流法测量 RWR 以及有效电流法结合免定标波长调制技术测量 CO2 气体浓度的实验装置

Fig. 1 Experimental device for measuring RWR and CO₂ gas concentration respectively by effective current method and effective current method combined with calibration-free wavelength modulation technique

图 1 中的阴影部分表示有效电流法测量 RWR 的实验装置,整个图 1 表示有效电流法结 合免定标波长调制技术测量 CO₂气体浓度的实验 装置。

4 实验结果

4.1 幅度和相位响应因子测量

波长调制光谱技术需要选取适当的扫描频率 和调制频率,频率一旦确定,依据测量的 DFB 激 光器传递函数,该频率的幅度响应因子 κ 和相位 响应因子 ψ 也是确定的。

测量 κ 时,函数发生器产生一个正弦波信号 调制激光器的电流,通过标准具定标激光的输出 光学频率^[17]。在一个固定的正弦波频率下,改变 正弦波的幅度,使其半个周期内恰好出现两个腔 模,认为此时注入电流的幅度正好对应一个 FSR,因此 κ 可以表示为:

$$\kappa = \frac{FSR}{d},\tag{9}$$

其中:FSR 单位是 cm^{-1} , d 表示注入电流的幅度。

改变正弦波频率,重复上边的步骤,就可以测 出不同频率对应的 κ,最后采用 1 Hz 时的 κ 进行 归一化处理。

激光器输出光学频率与注入电流存在相位 延迟,而且正弦波频率越快二者的相位差越 大。在注入电流幅度刚好对应一个 FSR 的条 件下,通过测量注入电流波峰(或波谷)对应的 腔模与波峰(或波谷)的时间偏移量,就可以计 算出腔模相对于注入电流的相位延迟,即 ϕ ,通 过改变正弦波频率可以测出各个频率对应 的 ϕ 。实验测量的不同正弦波频率下的 κ 和 ϕ 如 表1所示。

表 1 本文中应用的五个典型正弦波频率下的 κ 和 ϕ

Tab. 1 Measurement of κ and ψ at five typical Fourier frequencies

正弦波 频率/Hz	10	32	55	7 k	16 k
κ	0.960	0.927	0.906	0.496	0.404
ψ	-0.052	-0.07	-0.089	-0.416	-0.55

4.2 注入电流测量

当扫描和调制信号同时作用于激光器时,通 过外接的 25 Ω 定值电阻测得此时激光器的注入 电流,如图 2 所示(彩图见期刊电子版),此时扫描 频率为 32 Hz,调制频率为 16 kHz。





Fig. 2 Measured and fitted injection current as a function of time

图 2(a)黑点表示实际测量的注入电流,红线 是通过公式(8)拟合的注入电流,为了更清楚地显 示,对局部约 200 μs 的区间进行了放大。图 2(b) 表示图 2(a)中注入电流的测量值与拟合值的残 差,残差在 1%范围内,拟合结果如下:

 $i_{\rm fit}(t) = 101.3 + 19.98 \times \cos(2 \times \pi \times 32 \times t - 2.62) + 12.5 \times \cos(2 \times \pi \times 16000 \times t + 1.47).$ (10)

对于 32 Hz 扫描频率和 16 kHz 调制频率来 说, $\kappa_a = 0.404, \kappa_0 = 0.927, \phi = -0.55, 根据公式$ (6),有效电流可以表示为:

```
i_{e}(t) = 101.3 + 19.98 \times \cos(2 \times \pi \times 32 \times t - 2.62) + 0.436 \times 12.5 \times \cos(2 \times \pi \times 16000 \times t + 1.47 - 0.55). (11)
```

4.3 CSWR 测量

为了测量激光器的 CSWR,只加扫描信号到 激光器,这里用正弦波扫描激光器的注入电流,通 过实时测量外接 25.05 Ω 定值电阻的电压值获得 电流值。激光器的一路光通过标准具后,由透射 峰的位置可以得到输出频率,这样就可以得到激 光器的输出波长随电流的变化关系,用三阶多项 式拟合的结果如式(13)和图 3 所示:

 $\nu_0(t) = 2.359 - 0.017 \times i(t) + 4.745 \times 10^{-5} \times i(t)^2 - 5.782 \times 10^{-7} \times i(t)^3.$ (12)



图 3 测量和拟合注入电流的波长响应关于电流(时间)的函数(CSWR)



此时激光器温度为 25.02 ℃、电流偏置 101 mA,把 117.5 mA 处的透射峰对应的频率作为相 对频率的起始点。

4.4 RWR 计算

按照公式(5),为了获得 RWR,也就是 DFB 激光器在的相对波长响应,需要将测量得到的有 效电流 $i_e(t)$ 代入测量得到的 CSWR(公式(12)) 中的 i(t)。为了验证该方法对正弦波扫描的普适 性,对不同扫描频率和不同调制频率下模拟得到 的 RWR 与直接用标准具测量得到的激光器波长 响应进行比较(波长调制系数均为 2. 2),结果如 图 4 所示(彩图见期刊电子版),其中黑点表示用 标准具实测的波长响应,红线表示模拟的 RWR, 为了便于观察,对局部进行了放大。下方的黑线 表示模拟的 RWR 与实测的波长响应之间的残 差。通过计算,图 4(a)~4(d)对应条件下模拟的 RWR 与实测的波长响应之间残差的标准偏差都 小于 5×10⁻³ cm⁻¹,并且发现在调制频率相同 时,扫描频率越快,残差越大。

为了比较常数法和有效电流法描述激光器频 率响应的准确性,在与图 4 相同的条件下,采用常 数法模拟得到波长响应与实际标准具测量的激光 器波长响应进行对比,如图 5 所示。



图 4 不同扫描和调制频率下(*f*_s和 *f*_m)模拟的 RWR 与实测的频率响应对比

Fig. 4 Comparison of simulated RWR and measured frequency response at different scanning and modulation frequencies(f_s and f_m)





Fig. 5 Frequency response of constant method simulation and measured frequency response

对比图 5 和图 4 可以发现,在正弦波扫描的 情况下,有效电流法描述的波长响应残差的标准 偏差比常数法小,说明有效电流法描述的波长响 应更接近测量值。 下面将依图 4 相同的条件,分别利用有效电 流法和常数法测得的 RWR 结合免定标波长调制 技术(CF-WMS)^[12]测量 CO₂ 气体的浓度,探究两 种方法对反演气体浓度造成的影响。

5 CF-WMS 测量 CO₂气体浓度

多光程池中充入浓度为 0.045 6 的 CO₂ 气 体,池内气压维持在 0.91×10⁵ Pa,为太原本地气 压。探测器探测到的吸收光强信号被数据采集卡 经过 AD 转换后,由计算机进行信号处理,用 LabVIEW 程序进行数字解调,得到 2f/1f 信号。 DFB 激光器工作在 25.02 ℃,101 mA 的状态下, 输出波长是 1 578.22 nm,对应于 CO₂在6 336.24 cm⁻¹处 0→ $3\nu_1$ 能级跃迁带的 $P_e(14)$ 吸收线,吸 收线强度为 1.587×10^{-23} cm⁻¹/mol·cm⁻²。



图 6 基于有效电流法得到四组不同的扫描和调制 频率的 RWR 测量和拟合 CO₂ 吸收线的 2*f*/ 1*f* 信号

图 6 中黑点表示测量的 2*f*/1*f* 信号,红线表 示根据无吸收光强模拟的相应信号,黑线表示测 量值与模拟值之间的残差(彩图见期刊电子版)。

Fig. 6 Four sets of RWR measurements with different scan and modulation frequencies and the 2f/1f signal that fits the CO₂ absorption line based on the effective current method

图 6(a)~6(d)对应图 4(a)~4(d)的实验条件。 表 2 显示了拟合返回的浓度值与直接吸收获得的 浓度值的误差。可以看出,四种条件下测量的浓 度误差均小于 3%。

表 2 与图 6 对应的四组不同扫描和调制频率下测量的 CO₂浓度误差

Tab. 2 CO_2 concentration error measured at four different scan and modulation frequencies corresponding to Figure 6 (%)

图 6	(a)	(b)	(c)	(d)
误差	2.1	2.3	2.2	2.7



图 7 基于常数法得到四组不同的扫描和调制频率的 RWR 测量和拟合 CO₂ 吸收线的 2*f*/1*f* 信号

Fig. 7 Four sets of RWR measurements with different scan and modulation frequencies and the 2f/1f signal of the CO₂ absorption line based on the constant method

参考文献:

- [1] LEWICKI R, DOTY J H, CURL R F, et al.. Ultrasensitive detection of nitric oxide at 5.33 m by using external cavity quantum cascade laser-based Faraday rotation spectroscopy[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106 (31): 12587-12592.
- [2] RIEKER G B, JEFFRIES J B, HANSON R K, et

图 $7(a) \sim 7(d)$ 表示与图 $6(a) \sim 7(d)$ 相同条 件下测量和拟合的 2f/1f 信号。表 3 表示利用 常数法拟合返回的浓度值与直接吸收获得的浓度 值的误差。

表 3 与图 7 对应的四组不同扫描和调制频率下测量的 CO₂浓度误差

 Tab. 3
 CO2 concentration error measured at four different scan and modulation frequencies corresponding to Figure 7

 (%)

 图 7
 (a)
 (b)
 (c)
 (d)

 误差
 5.2
 5.5
 4.8
 6.5

对比表 2 和表 3 可知,利用有效电流法拟合 返回的浓度误差比常数法小 1 倍,证明有效电流 法确定的 RWR 比常数法在波长调制技术反演气 体浓度中的准确度高。

6 结 论

本文主要将适用于线性光学扫描的 RWR 确 定方法,即有效电流法,应用于获取正弦扫描时的 RWR。对目前已有的 4 种描述激光器 RWR 方 法进行比较分析,结果表明有效电流法在描述正 弦波扫描时的 RWR 更准确且便捷,它与实测的 激光器频率响应残差的标准偏差小于 5×10^{-3} cm⁻¹,优于常数法。利用有效电流法得到的波长 响应结合免定标波长调制技术测量 CO₂ 气体浓 度,测量的浓度误差小于 3%,比常数法小 1 倍。 所以,有效电流法是一种相对准确的描述正弦波 扫描频率响应的方法。

al.. Diode laser-based detection of combustor instabilities with application to a scramjet engine [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2009, 32 (1): 831-838.

[3] 张志荣,夏滑,董凤忠,等.利用可调谐半导体激 光光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J].光学 精密工程,2013,21(11):2771-2777.
ZHANG ZH R, XIA H, DONG F ZH, et al...
Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21 (11): 2771-2777. (in Chinese)

- [4] LI H J. Near-infrared Diode Laser Absorption Spectroscopy with Applications to Reactive Systems and Combustion Control [D]. Palo Alto: Stanford University, 2007.
- [5] ZHAO G, TAN W, JIA M Y, *et al.*. Intensitystabilized fast-scanned direct absorption spectroscopy instrumentation based on a distributed feedback laser with detection sensitivity down to 4×10^{-6} [J]. Sensors, 2016, 16(9): 1544-1554.
- [6] WERLE P, MÜCKE R, SLEMR F. The limits of signal averaging in atmospheric trace-gas monitoring by tunable diode-laser absorption spectroscopy (TDLAS) [J]. Applied Physics B Photophysics and Laser Chemistry, 1993, 57(2): 131-139.
- [7] 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.
- [8] 郑守国,李森,张健,等. 痕量 N₂O 气体监测系统
 的设计与实现[J]. 光学 精密工程,2012,20(10):
 2154-2160.
 ZHENG SH G, LI M, ZHANG J, et al., Design

and implementation of trace N_2O detection system [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2012, 20(10): 2154-2160. (in Chinese)

[9] 李亚萍,张广军,李庆波,等. 空间双光路红外 CO₂ 气体传感器及其测量模型[J]. 光学 精密工 程,2009,17(1):14-19.
LIYP, ZHANGGJ, LIQB, *et al.*. Infrared CO, and connect based on space double beams and its

 ${\rm CO}_2$ gas sensor based on space double beams and its measurement module [J]. Opt. Precision Eng. , 2009, 17(1):14-19. (in Chinese)

- [10] FUKUDA M, MISHIMA T, NAKAYAMA N, et al.. Temperature and current coefficients of lasing wavelength in tunable diode laser spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2010, 100(2): 377-382.
- [11] PETERMANN K. Laser Diode Modulation and Noise[M]. Netherlands: Kluwer Academic Publisher, 1988.
- [12] SUN K, CHAO X, SUR R, et al.. Analysis of calibration-free wavelength-scanned wavelength modulation spectroscopy for practical gas sensing using tunable diode lasers[J]. Measurement Science and Technology, 2013, 24(12): 125203-125215.
- [13] QU Z C, GHORBANI R, VALIEV D, et al.. Calibration-free scanned wavelength modulation spectroscopy-application to H₂O and temperature sensing in flames[J]. Optics Express, 2015, 23 (12): 16492-16499.
- [14] QU Z C, SCHMIDT F M. In situ H2O and temperature detection close to burning biomass pellets using calibration-free wavelength modulation spectroscopy[J]. Applied Physics B, 2015, 119(1): 45-53.
- [15] ZHAO G, TAN W, HOU J J, et al.. Calibrationfree wavelength-modulation spectroscopy based on a swiftly determined wavelength-modulation frequency response function of a DFB laser[J]. Optics Express, 2016, 24(2): 1723-1733.
- [16] LIU J X, ZHOU Y T, MA W G, et al.. A novel methodology to directly pre-determine the relative wavelength response of DFB laser in wavelength modulation spectroscopy[J]. Opt. Expr., 2019, 27 (2): 1249–1261.
- [17] BASS M. Handbook of Optics [M]. America: McGraw-Hill Education, 2009.

作者简介:



郭松杰(1993一),男,山西长治人,硕士 研究生,2017 年于太原科技大学获得 学士学位,主要从事痕量气体检测技术 方面的研究。E-mail: 1017487441 @ qq.com

通讯作者:



马维光(1976一),男,山西大同人,教授,博士生导师,2000年、2005年于山西大学分别获得学士、博士学位,主要从事超灵敏激光光谱技术的研究。E-mail: mwg@sxu.edu.cn