

## 基于波长调制技术的激光器调制特性研究

张步强<sup>1,2</sup>, 许振宇<sup>1</sup>, 刘建国<sup>1</sup>, 夏晖晖<sup>1</sup>, 范雪丽<sup>1</sup>, 聂伟<sup>1,2</sup>, 袁峰<sup>1,2</sup>, 阚瑞峰<sup>1</sup>

1. 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
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026

**摘要** 在流场诊断技术中, 可调谐半导体吸收光谱技术(TDLAS)成为主要的诊断技术之一, 其可实现非接触、原位检测。波长调制(WMS)和直接吸收(DA)是两种最常用的 TDLAS 气体传感方法, 在目标含量很低或者极端流场环境下, 波长调制技术呈现出更多的优势, 检测灵敏度与直接吸收相比可以提高 1~2 个数量级。在近红外波长调制技术应用领域, 分布反馈式(DFB)半导体激光器成为流场诊断技术的光源选择之一, 无论利用谐波信号(或者归一化谐波信号)的线型拟合, 还是选择谐波信号的峰值来反演流场参数, 吸收模型的准确建立均十分重要。在模型建立时, 激光器频率-时间响应以及光强-时间响应的准确表示尤为重要。为解决吸收模型准确建立问题, 提出了一种准确测量激光器调制参数的完整方法, 通过实验测量了用于探测水汽吸收的 1 392 和 1 469 nm 激光器的调制特性, 研究了分布反馈式激光器的调制参数随调制幅度, 调制频率以及工作温度的变化。根据该方法得到的调制参数, 建立吸收模型, 测得常温下空气中水汽浓度为 1.97%, 直接吸收方法测得浓度为 1.99%, 验证了该测量方法的准确性。研究表明, 调制深度随调制幅度的增加线性增加, 随调制频率的增加非线性单调减小, 随工作温度的升高线性增加; 激光器的出光强度和频率同时被调制, 强度变化超前频率变化的相位, 随调制幅度的变化不明显, 随调制频率的增加单调增加, 随工作温度的升高单调减小; 归一化一次谐波振幅和二次振幅均随调制幅度的增加而增加, 随调制频率的增加而减小, 随工作温度的变化不明显。在吸收光谱应用领域, 波长调制技术发挥的作用愈加重要, 调制系数与谐波信号的峰值息息相关, 在波长调制技术应用时, 选取适当的调制参数, 有利于得到合适的谐波信号, 可通过改变调制幅度、调制频率、工作温度得到最优调制系数。研究了近红外分布反馈式半导体激光器的调制特性, 该方法同样适用于不同封装和不同波段激光器调制特性的研究, 利于推广吸收光谱技术在各领域的应用。

**关键词** TDLAS; 波长调制; 调制深度; 调制幅度; DFB; 吸收模型

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)09-2702-06

### 引言

可调谐半导体激光吸收光谱(tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS)技术是一种非侵入式光谱测量技术, 具有高选择、高灵敏度、高分辨、信号高保真<sup>[1-2]</sup>的特点; 可以同时检测气体的浓度、温度、压强、流速等多参数流场信息<sup>[3]</sup>, 当前被广泛应用于燃烧流场诊断, 环境监测, 农业生产等领域<sup>[4-5]</sup>。其技术主要分为直接吸收(direct absorption, DA)和波长调制(wavelength modulation spectroscopy, WMS)两种主要技术手段, 直接吸收技术主要应用在吸收较强, 所选吸收线相对孤立, 受临近干扰吸收比较

弱, 信噪比较大的情况<sup>[6]</sup>。对于较弱的吸收, 难以获得高的信噪比; 或者在压力升高以后, 目标分子本身的展宽变大, 谱线之间相互重叠严重, 基线选取困难, 非洛伦兹效应变得严重<sup>[7]</sup>, 而波长调制技术对非洛伦兹效应不敏感, 由于其本质是提取快变化特征, 对因高压下展宽引起的吸收本底抬升不敏感, 利于高压流场测量, 该技术更有利于解决这些情况下的流场参数反演问题<sup>[8]</sup>, 其广泛应用在高压燃烧系统(燃气轮机、内燃机、煤气化炉、爆型燃烧器等<sup>[9-12]</sup>)检测中。

在波长调制技术中, 波长(频率)被调制的同时, 强度也被调制, 调制深度(modulation depth)是主要的参数之一。调制幅度(高频调制信号峰峰值), 调制频率和工作温度都对其产生影响, 并且影响频率调制相对强度调制的相位延迟, 同

收稿日期: 2018-07-07, 修订日期: 2018-11-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFC0201104)资助

作者简介: 张步强, 1989年生, 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博士研究生 e-mail: bqzhang@aiofm.ac.cn

时还对各次谐波信号产生影响。本文通过实验,研究了用于探测水汽吸收的分布反馈式激光器(DFB)的调制参数随调制幅度,调制频率,工作温度的变化规律,有助于更好的认识激光器出光特性。利用该方法建立  $1f$  归一化的  $2f$  吸收模型,测量了常温下空气中的水汽浓度,与直接吸收技术测量结果一致,验证了该参数标定方法的准确性。

### 1 理论部分

DFB(distributed feedback)激光器出光波长满足布拉格定律

$$\Lambda = \frac{m\lambda}{2} \tag{1}$$

其中,  $\Lambda$  为光栅周期,  $\lambda$  为激光器的输出光的波长,  $m$  为 DFB 激光器激励模式级次 ( $m=1, 2, 3, \dots$ , 一般取 1)<sup>[13]</sup>。当一束频率为  $\nu$  的激光通过待测气体,其出射光强和入射光强满足 Beer-Lambert 定律,即

$$\tau_\nu = \left(\frac{I_t}{I_o}\right)_\nu = \exp(-\alpha_\nu) \tag{2}$$

其中,  $\tau_\nu$  为透过率,  $I_t$  和  $I_o$  分别为透射和入射光强,  $\nu$  为入射光的频率,  $\alpha_\nu$  为吸光度,对其在频域积分,得到积分吸光度为

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_\nu d\nu = PXS(T)L \tag{3}$$

其中  $P$  为混合气体的总压强(单位: atm),  $X$  为水汽的浓度,  $L$  为有效光程(单位: cm),  $S(T)$  为温度  $T$  下的吸收线线强(单位:  $\text{cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ )。对于波长调制理论的认识,可以追溯到几十年前<sup>[14]</sup>, Reid 等在实验中测量了洛伦兹、福伊特、高斯三种线型的二次谐波信号<sup>[15]</sup>,为了更好的描述激光器的出光特性,其频率一时间响应表示为

$$\nu(t) = \bar{\nu}(t) + a\cos(\omega t) \tag{4}$$

初始相位取 0, 其中  $\bar{\nu}(t)$ (单位:  $\text{cm}^{-1}$ )为激光器的中心频率,  $\omega$  为角频率( $\omega=2\pi f$ ),  $a$ (单位:  $\text{cm}^{-1}$ )为调制深度,激光器输出初始光强可表示为

$$I_o(t) = \bar{I}_o(t)[1 + i_0 \cos(\omega t + \varphi_1) + i_2 \cos(2\omega t + \varphi_2)] \tag{5}$$

式(5)中,  $\bar{I}_o(t)$  为激光器中心光强,  $i_0$  和  $i_2$  分别为归一化一次和二次调制振幅,  $\varphi_1$  和  $\varphi_2$  分别是一次和二次调制的初相位,这些参数均依赖于激光器本身的调制特性。

波长调制技术的调制系数(modulation index)表示为

$$m = a/\Delta\nu_{\text{HWHM}} \tag{6}$$

其中  $a$  是调制深度,  $\Delta\nu_{\text{HWHM}}$  是线型函数的半高半宽,波长调制技术中,常利用  $1f$  归一化的  $2f$  谐波信号反演流场参数

$$\begin{aligned} S_{2f/1f\text{-background-subtracted}} &= \\ \sqrt{\left(\frac{X_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{X_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0}\right)^2 + \left(\frac{Y_{2f}(t)}{R_{1f}} - \frac{Y_{2f}^0(t)}{R_{1f}^0}\right)^2} \\ &= f(A, \phi, \text{laser modulation}) \end{aligned} \tag{7}$$

$S_{2f/1f\text{-background-subtracted}}$  表示扣除背景后被  $1f$  归一化的  $2f$  信号,  $X_{2f}$  和  $Y_{2f}$  表示经锁相放大器解调得到的  $2f$  的  $X$  分量和  $Y$  分量信号,  $X_{2f}^0$  和  $Y_{2f}^0$  表示  $2f$  的  $X$  分量和  $Y$  分量的背景信号,  $R_{1f}$  和  $R_{1f}^0$  分别表示双通道解调得到的  $1f$  信号和背景。

### 2 实验部分

#### 2.1 仪器

光源为 NEL 公司生产的 1 469 和 1 392 nm DFB 激光器,控制器为 THORLABS 公司生产,型号为 ITC102 的控制器。激光器输出的光分成两束,其中一束直接打到探测器(GPD 公司,型号: GAP3000L),用来得到激光器出光强度的时间响应,另一束光通过 MOI 公司生产,型号为 FFP-I 的标准具,其自由光谱范围为 100 MHz,用来对激光器出光频率进行标定。

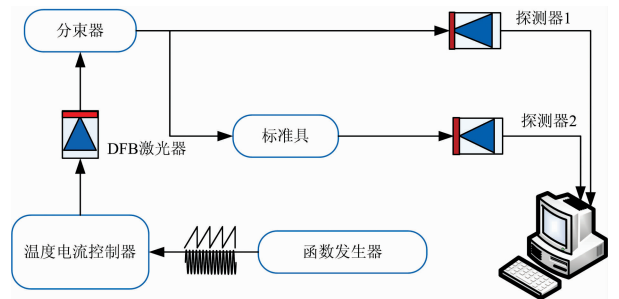


图 1 实验装置简图

Fig. 1 Experimental instruments diagram

#### 2.2 数据处理

采集卡(NI, PCI-5105, 采样率:  $60 \text{ M} \cdot \text{s}^{-1}$ )采集的信号分别为无吸收的原始光强和经过标准具的标定信号,对原始光强信号直接进行非线性最小二乘拟合,即可得到强度的时间响应  $I_o(t)$ 。对标定信号进行寻峰,并根据相同时刻强度的变化对峰排列,可得到频率的时间响应  $\nu(t)$ 。以工作波长在 1 392 nm 附近的激光器某个工作状态为例,对其过程进行说明,实验中选用的控制器以电压值代替电流值,二者的转换关系为:  $40 \text{ mA} \cdot \text{V}^{-1}$ 。保持偏置电压为 625 mV,调制幅度为 550 mV,调制频率为 100 kHz,工作温度为 25 °C,为减小误差,所采集的数据均进行 100 次平均,图 2 为原始数据,虚线表示原始光强信号,实线表示干涉信号。

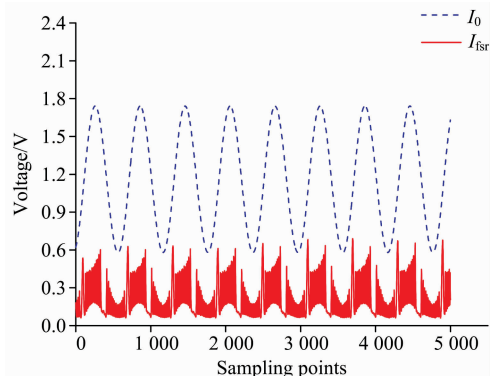


图 2 波长为 1392nm 的激光器探测到的强度信号(虚线)和同步干涉信号(实线)

Fig. 2 The intensity signal (dotted line) and synchronized interference signal (solid line) detected by the laser with a wavelength of 1 392 nm

根据 DFB 激光器的调制特性,可以得到其调制参数,图 3 表示激光器强度和频率的时间响应,  $\Delta t$  为强度超前频率变化的时间。

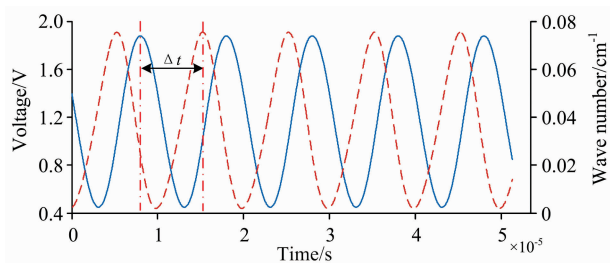


图 3 光强-时间响应(实线)和频率-时间响应(点画线)

Fig. 3 Time response of intensity (solid line) and frequency (Point line)

### 2.3 标定参数准确性验证

利用标定的调制参数建立吸收模型,通过和实际测量值的直接对比,对空气中水汽浓度反演,使激光器扫描吸收中心为  $7\,185.6\text{ cm}^{-1}$  的水汽吸收线,测量温度为  $300\text{ K}$ ,当前温度标定的线强为  $0.019\,0\text{ cm}^{-2} \cdot \text{atm}^{-1}$ ,有效光程  $27.5\text{ cm}$ ,图 4 是利用该方法建立吸收模型,得到的扣除背景的归一化二次谐波信号全线性拟合结果。

其结果显示,拟合残差  $< 1.5\%$ ,利用直接吸收[式(3)]得到的当前环境水汽浓度为  $1.99\%$ ,归一化谐波信号拟合[式(7)]得到的浓度为  $1.97\%$ ,相对偏差为  $1\%$ ,验证了该标

定方法的准确性。

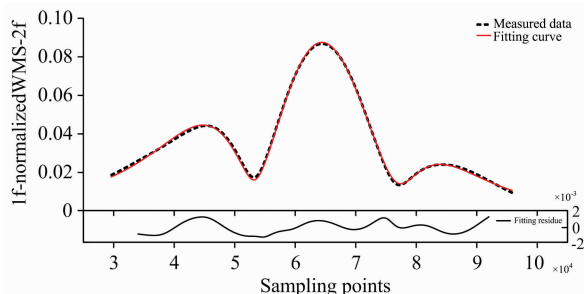


图 4 谐波信号拟合结果

Fig. 4 Fitting result of harmonic signal

## 3 结果与讨论

实验选用探测水汽吸收的工作波长为  $1\,392$  和  $1\,469\text{ nm}$  的激光器,分别改变调制幅度,调制频率以及激光器的工作温度,探究其变化对调制参数的影响,下面以  $1\,392\text{ nm}$  的激光器进行分析。

### 3.1 调制幅度对调制参数的影响

实验中扫描信号的频率为  $500\text{ Hz}$ ,高、低电平分别为  $400$  和  $100\text{ mV}$ ;正弦调制频率为  $100\text{ kHz}$ ,偏置电压为  $625\text{ mV}$ ,工作温度为  $25\text{ }^\circ\text{C}$ 。改变加载的调制幅度,并对比激光器是否叠加扫描信号两种状态下其调制参数的变化情况,图 5 表示激光器调制参数随调制幅度变化的情况。

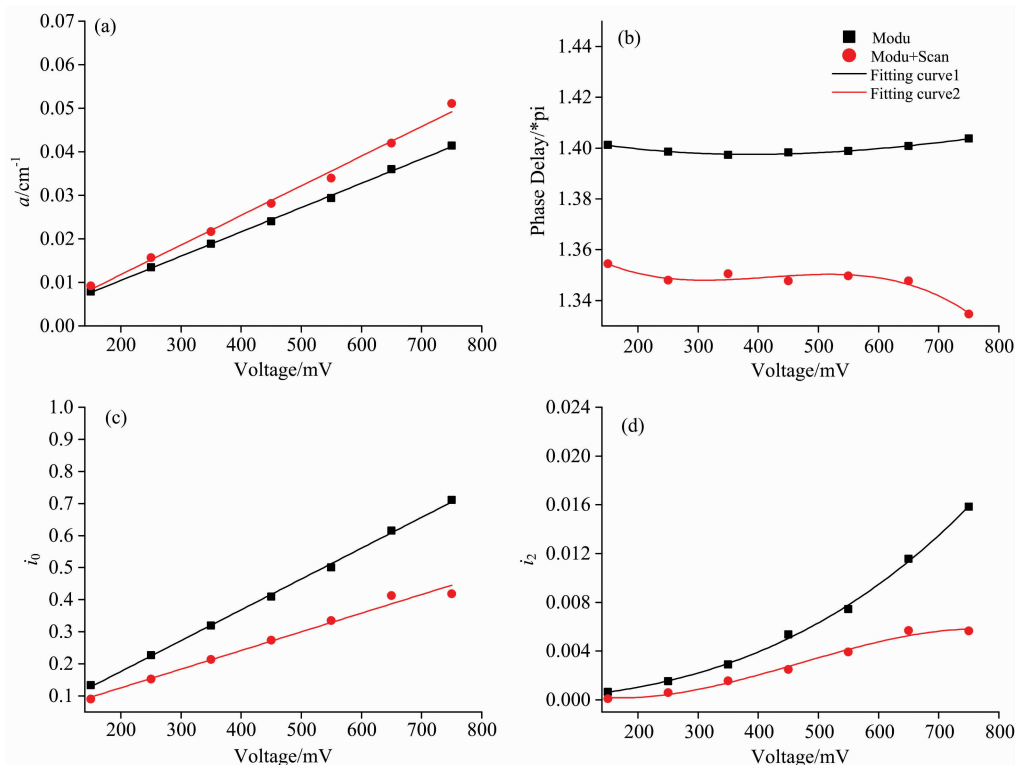


图 5 调制参数随调制幅度的变化

Fig. 5 Modulation parameters vary with modulation amplitude

图 5(及图 6、图 7)中(a), (b), (c)和(d)分别表示调制深度  $a$ , 强度变化超前频率变化的相位  $\Delta\varphi$ , 某时刻被  $\bar{I}_0$  归一化一次谐波分量振幅  $i_0$  以及二次谐波分量振幅  $i_2$ , 对实验数据分别进行拟合[图 6(d)中未进行拟合]。由图可知,  $a$ ,  $i_0$  和  $i_2$  均随调制幅度的增加而增加,  $\Delta\varphi$  变化不明显, 并且  $a$  和  $i_0$  与调制幅度呈线性变化。随着调制幅度的增加, 调制深度是频率-时间响应的幅度, 其值也必定增加。各次谐波分量也会有不同程度的提高, 由于强度中的一次谐波分量占主要成

分, 所以  $i_0$  随调制幅度的增加呈线性变化。

### 3.2 调制频率对调制参数的影响

保持扫描信号的频率为 500 Hz, 高、低电平分别为 400 和 100 mV; 调制幅度为 750 mV, 偏置电压为 625 mV, 工作温度为 25 °C, 只改变加载的调制信号频率, 其值从 100 到 700 kHz。图 6 表示的是激光器调制参数随调制频率变化的情况。

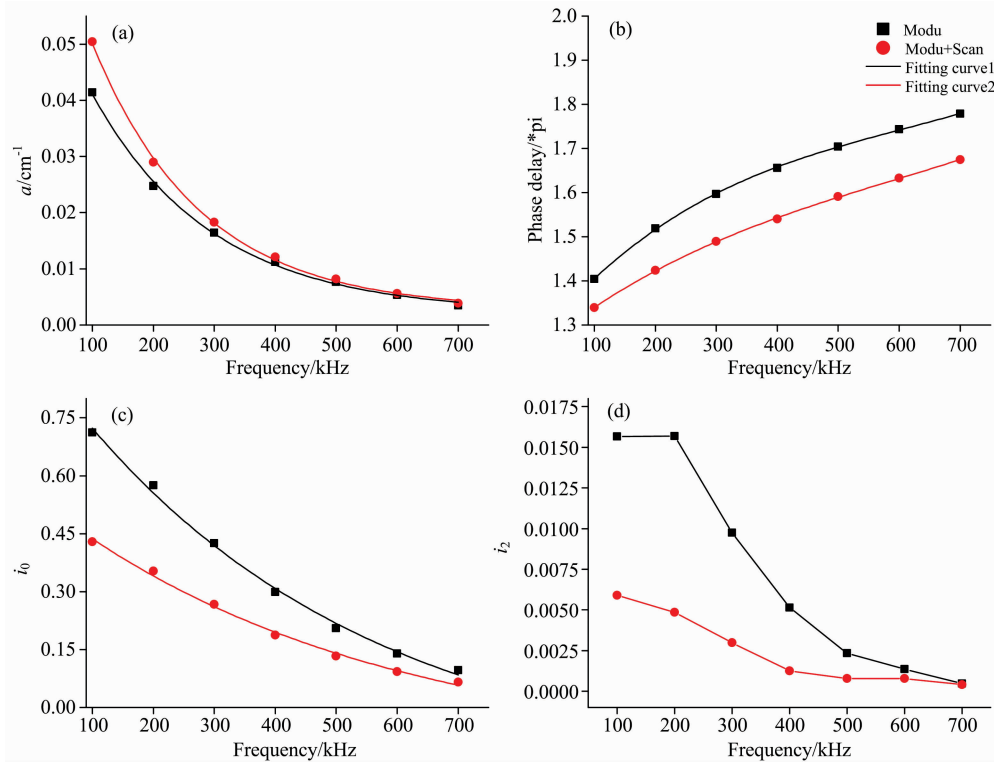


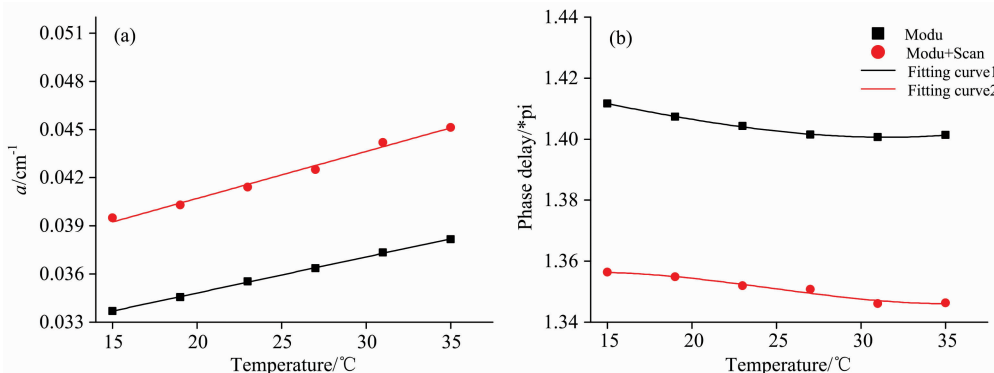
图 6 调制参数随调制频率的变化

Fig. 6 Modulation parameters change with modulation frequency

当频率升高时,  $a$ ,  $i_0$  和  $i_2$  均减小, 而  $\Delta\varphi$  一直变大, 激光器强度和频率同时被调制, 其出光响应时间固定, 随着调制频率的升高, 激光器的出光变化落后于加载信号变化, 导致其调制深度逐渐降低, 并且强度变化超前频率变化的相位越来越大, 各次谐波成分降低。

### 3.3 工作温度对调制参数的影响

为了减小低频噪声及各次谐波信号互不干扰, 保持扫描信号的频率为 500 Hz, 高、低电平分别为 400 和 100 mV; 正弦调制信号的频率为 100 kHz, 调制幅度为 650 mV, 偏置电压为 625 mV, 改变激光器的工作温度, 图 7 是激光器调制参数随工作温度变化的情况。



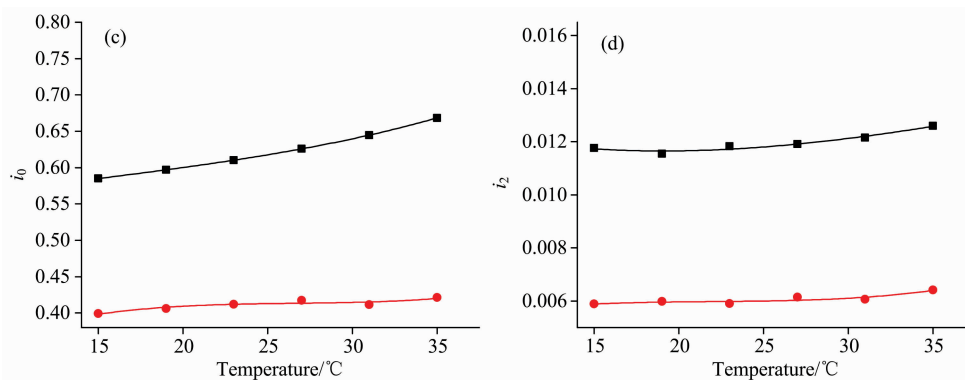


图 7 调制参数随工作温度的变化

Fig. 7 Modulation parameters change with the working temperature

当温度升高时,  $a$  和  $i_1$  均变大, 而  $\Delta\varphi$  减小,  $i_2$  变化不明显。由上述结果, 调制加扫描的工作模式, 其调制深度大于只加调制的工作模式, 是由于注入电流增加, 引起结温升高, 与升高工作温度其调制深度变大一致, 而其余调制参数正好相反, 当注入低频扫描信号时, 慢变的直流成分增加, 则谐波成分相对减小, 注入电流变大, 等价于温度升高, 其相位延迟变小。另一只工作波长在 1 469 nm 附近的激光器的参数变化, 与 1 392 nm 的激光器变化一致。

同波长 DFB 激光器的调制参数变化, 并且对只加调制信号和在扫描信号上叠加调制信号的两种工作状态的参数变化进行对比, 验证了 DFB 激光器的电流注入特性与温度变化特性相互影响, 注入电流增大时, 等效于温度的升高, 其出光波长往长波方向移动。并通过测量空气中的水汽浓度, 验证了调制参数测量方法的准确性。在选择合适的调制系数时, 可以综合考虑调制幅度、调制频率和工作温度的改变, 获得理想的调制系数, 以拓展吸收光谱技术的应用。

## 4 结 论

通过改变调制幅度、调制频率和工作温度, 研究两只不

## References

- [ 1 ] Christopher S. Goldenstein. Stanford University, 2014.
- [ 2 ] XU Zhen-yu, LIU Wen-qing, LIU Jian-guo, et al(许振宇, 刘文清, 刘建国, 等). Acta Physica Sinica(物理学报), 2012, 61(23): 234204.
- [ 3 ] Rieker G B, Jeffries J B, Hanson R K. Applied Optics, 2009, 48(29): 5546.
- [ 4 ] Xing C, Jeffries J B, Hanson R K, et al. Applied Physics B, 2013, 110(3): 359.
- [ 5 ] Hanson R K. Proceedings of the Combustion Institute, 2011, 33(1): 1.
- [ 6 ] Wei M, Kan R F, Chen B, et al. Applied Physics B, 2017, 123(5): 149.
- [ 7 ] Sepman A, Ögren Y, Qu Z, et al. Proceedings of the Combustion Institute, 2017, 36: 4541.
- [ 8 ] Sun K, Sur R, Chao X, et al. Proceedings of the Combustion Institute, 2013, 34(2): 3593.
- [ 9 ] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, et al. Progress in Energy & Combustion Science, 2017, 60: 132.
- [10] Makowiecki A S, Hayden T R, Nakles M R, et al. Aiaa/sae/asee Joint Propulsion Conference, 2017.
- [11] Girase K, Deguchi Y, Kamimoto T, et al. International Forum on Advanced Technologies, 2016.
- [12] Sun K. Stanford University, 2013.
- [13] Chung Y, Oh S H. Microwave & Optical Technology Letters, 2017, 59(2): 252.
- [14] Ian Schultz. Stanford University, 2014.
- [15] Chang H T, Chang J, Wang P P, et al. Optical & Quantum Electronics, 2016, 48(3): 212.

# Modulation Characteristics of Laser Based on Wavelength Modulation Technology

ZHANG Bu-qiang<sup>1,2</sup>, XU Zhen-yu<sup>1</sup>, LIU Jian-guo<sup>1</sup>, XIA Hui-hui<sup>1</sup>, FAN Xue-li<sup>1</sup>, NIE Wei<sup>1,2</sup>, YUAN Feng<sup>1,2</sup>, KAN Rui-feng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Environmental Optics and Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

**Abstract** Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) has become one of the main diagnostic techniques in flow field diagnostics, and it can be used for non-intrusive and in-situ detection. Wavelength modulation spectroscopy (WMS) and direct absorption (DA) are the two main methods for TDLAS sensing, the WMS method is advantageous for applications with small absorbance, high pressure or hostile flow field, and detection sensitivity is 1~2 orders of magnitude higher than direct absorption. In the field of near-infrared wavelength modulation technology, distributed feedback (DFB) semiconductor lasers have become one of the choices for flow field diagnosis, and whether using fitting of harmonic signals (or normalized harmonic signals) or selecting peaks of harmonic signals to invert flow field parameters, the accurate establishment of the absorption model is very important. The precise representation of the laser frequency-time response and intensity-time response is especially important when modeling. In order to solve the problem of establishing the accurate absorption model, this paper presents a complete method for accurately measuring the modulation parameters of lasers. The modulation characteristics of the 1 392 and 1 469 nm lasers used to detect water vapor absorption are measured. The modulation parameters of the distributed feedback laser with modulation amplitude, modulation frequency and operating temperature are studied. According to the modulation parameters obtained by the method, the absorption model was established. The concentration of water vapor in the air was 1.97% at room temperature, and the concentration measured by the direct absorption method was 1.99%. The accuracy of the measurement method of the modulation parameters was verified. The research shows that the modulation depth increases linearly with the increase of the modulation amplitude, decreases monotonously with the increase of the modulation frequency, and increases linearly with the increase of the operating temperature. The intensity and frequency of the laser are modulated simultaneously. Phase difference between the intensity and the frequency is not obvious with the change of modulation amplitude. It increases with the increase of the modulation frequency and decreases with the increase of the operating temperature. The normalized first and second harmonic amplitude increase with the increase of the modulation amplitude, decrease with the increase of the modulation frequency, and are not significant differences with the change of the operating temperature. In the field of absorption spectroscopy, wavelength modulation spectroscopy play an important role, the modulation index is closely related to the peak value of the harmonic signal. When applying the wavelength modulation technique, selecting the appropriate modulation parameters is beneficial to obtain a suitable harmonic signal. The optimal modulation index can be obtained by changing the modulation amplitude, modulation frequency and operating temperature. In this paper, the modulation characteristics of near-infrared distributed feedback semiconductor lasers are studied. The method is also applicable to other types of lasers, which is beneficial to the application of absorption spectroscopy in various fields.

**Keywords** TDLAS; Wavelength modulation; Modulation depth; Modulation amplitude; DFB; Absorption model

(Received Jul. 7, 2018; accepted Nov. 20, 2018)