

## 基于外差相敏色散光谱技术的宽动态范围甲烷气体检测

周晨 马柳昊 王宇

### Measurement of methane concentration with wide dynamic range using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy

ZHOU Chen, MA Liu-hao, WANG Yu

引用本文:

周晨, 马柳昊, 王宇. 基于外差相敏色散光谱技术的宽动态范围甲烷气体检测[J]. *中国光学*, 2024, 17(4): 789–800. doi: 10.37188/CO.2023-0177

ZHOU Chen, MA Liu-hao, WANG Yu. Measurement of methane concentration with wide dynamic range using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2024, 17(4): 789-800. doi: 10.37188/CO.2023-0177

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CO.2023-0177>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 光致热弹光谱气体检测技术研究进展

Research progress of gas detection based on laser-induced thermoelastic spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(2): 229 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0137>

#### 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究

Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 151 <https://doi.org/10.37188/CO.2022-0029>

#### 基于表面等离子体共振的光子准晶体光纤甲烷氢气传感器

A novel methane and hydrogen sensor with surface plasmon resonance-based photonic quasi-crystal fiber

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 174 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0006>

#### 基于相移条纹投影的动态3D测量误差补偿技术

Dynamic 3D measurement error compensation technology based on phase-shifting and fringe projection

*中国光学 (中英文)*. 2023, 16(1): 184 <https://doi.org/10.37188/CO.EN.2022-0004>

#### 基于可见/近红外透射光谱技术的红提糖度和含水率无损检测

Non-destructive testing of red globe grape sugar content and moisture content based on visible/near infrared spectroscopy transmission technology

*中国光学 (中英文)*. 2021, 14(3): 566 <https://doi.org/10.37188/CO.2020-0085>

#### 基于宽波段光源拼接镜新型共相检测技术研究

A new co-phasing detection technology of a segmented mirror based on broadband light

*中国光学 (中英文)*. 2022, 15(4): 797 <https://doi.org/10.37188/CO.2021-0234>

文章编号 2097-1842(2024)04-0789-12

# 基于外差相敏色散光谱技术的 宽动态范围甲烷气体检测

周晨<sup>1</sup>, 马柳昊<sup>1,2\*</sup>, 王宇<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学汽车工程学院, 湖北武汉 430070;

2. 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室, 吉林长春 130033)

**摘要:**为实现痕量甲烷气体的宽动态范围高灵敏度检测, 本文开展了双边带拍频抑制模式的外差相敏色散光谱技术研究, 研究了电光调制器工作特性以及偏置电压调控方法, 对比了抑制与非抑制模式下的色散相位谱轮廓与信噪比, 并对检测性能(如线性动态检测范围)进行了系统研究。基于近红外分布式反馈激光器和电光调制器, 搭建了外差相敏色散甲烷气体检测系统, 通过探索和分析电光调制器的最佳工作区间, 实现了双边带拍频抑制进而得到了大幅值、高信噪比的色散相位信号。测量了典型高频(1.2 GHz)强度调制下甲烷/氮气标气的色散相位信号, 获取了色散相位信号峰峰值随气体浓度的变化规律。同时开展了波长调制光谱技术实验, 对两种技术的线性度、检测动态范围和对光功率波动的抗干扰性能进行对比研究。最后, 通过测量不同浓度的标气验证了该系统在宽动态、快速时间响应下的性能。所开发的基于外差相敏色散光谱技术的甲烷检测系统具有线性度高( $R^2 = 0.9999$ ), 动态检测范围宽(38.5 ppm~40%), 且对光功率波动免疫性高的显著优势。本文研发的基于外差相敏色散光谱技术的气体检测技术在宽动态范围检测和实际现场检测应用领域具有广阔的前景。

**关键词:**相敏检测; 色散光谱; 双边带拍频抑制; 甲烷检测; 宽动态范围

中图分类号: O433.5+4 文献标志码: A doi: 10.37188/CO.2023-0177

## Measurement of methane concentration with wide dynamic range using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy

ZHOU Chen<sup>1</sup>, MA Liu-hao<sup>1,2\*</sup>, WANG Yu<sup>1</sup>

(1. School of Automotive Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. State Key Laboratory of Applied Optics, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

\* Corresponding author, E-mail: liuhaoma@whut.edu.cn

**Abstract:** In this paper, we developed a dual-sideband beat-suppressed heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy (HPSDS) for sensitive detection of trace gases across a wide dynamic range and explored the operational characteristics of the electro-optic modulator (EOM) and bias voltage control methods under

收稿日期: 2023-10-10; 修订日期: 2023-12-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 52106221); 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所应用光学国家重点实验室开放基金项目(No. SKLA02022001A05)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No. 52106221); Open fund of State Key Laboratory of Applied Optics, CAS (No. SKLA02022001A05)

sideband suppression mode. The dispersion phase spectral profiles and the corresponding signal-to-noise ratios in both suppression and non-suppression modes were compared before a comprehensive evaluation of the detection performance. A HPSDS-based detection system was developed based on a near-infrared distributed feedback laser and an EOM. The suppression of the dual-sideband beat was achieved by exploring and analyzing the optimal operational range of the EOM, leading to the optimization of dispersion phase signals with increased amplitude and high signal-to-noise ratio. The dispersion phase signals under typical high-frequency (1.2 GHz) intensity modulation were recorded for different standard methane/nitrogen mixtures. The relationship between the peak-to-peak values of the dispersion phase signals and the varied gas concentrations was then summarized. Meanwhile, wavelength modulation spectroscopy (WMS) experiments were conducted; subsequently, the HPSDS and WMS techniques' performances were compared in terms of linearity, dynamic detection range, and immunity to optical power fluctuations. Finally, the HPSDS-based system's performance under a wide dynamic range and rapid time response was verified by measuring different concentrations of standard gases. Experimental results indicate that the HPSDS technique exhibits high linearity ( $R^2 = 0.9999$ ), a wide dynamic range (38.5 ppm to 40%), and remarkable immunity to optical power fluctuations. The dual-sideband-beat-suppression-HPSDS-based methane sensor developed in this paper shows great potential for applications involving wide dynamic range detection and on-site practical trace gas detection.

**Key words:** phase-sensitive detection; dispersion spectroscopy; dual-sideband beat suppression; methane detection; wide dynamic range

## 1 引言

激光光谱技术被广泛用于大气环境监测、深海热液/冷泉探测、医疗呼气分析、材料表征、燃烧诊断和排放的在线监测等领域<sup>[1-5]</sup>。“碳达峰,碳中和”目标的提出和日益迫切的应急管理需求对以甲烷为代表的具有温室效应、易燃易爆气体的检测能力提出了更高要求<sup>[6-7]</sup>。一方面,危险气体泄露预警要求传感器在有高探测灵敏度的同时具备更宽的动态检测范围以辅助泄露源定位;排放在线监测的主动控制也需要更宽的动态检测范围以保障变工况时的测量需求<sup>[8-9]</sup>。另一方面,对于复杂恶劣现场应用,由于光束偏折、杂散光引入和颗粒吸收/散射的存在,难以避免的光功率波动会影响测量结果的可靠性。因此,发展宽动态范围,高可靠性的检测技术至关重要。

在众多激光光谱技术中,激光吸收光谱(LAS)技术是最常用的气体检测技术之一,其具有高检测选择性、高探测灵敏度、时间响应快和系统布置简易的显著优势<sup>[10-13]</sup>。由于通过检测特定波长的激光穿过待测气体介质前后的光强变化,结合

光谱模型可以反演出气体的状态参数信息(如压力,温度和浓度)<sup>[14-15]</sup>,故基于LAS发展出的间接吸收光谱技术如光声光谱<sup>[16]</sup>和光致热弹光谱技术<sup>[17]</sup>也同样被成功应用于气体传感。直接吸收光谱(DAS)<sup>[18]</sup>和波长调制光谱(WMS)<sup>[19]</sup>技术是最具代表性的两种LAS检测技术。在DAS中,需要进行基线拟合以获取气体吸收光谱特征。当探测器接收到的激光功率发生波动时,测量结果可靠性会下降。尽管WMS克服了基线拟合问题,并将检测频率转移到更高的频率范围,极大程度上减小了闪烁噪声,然而,二次谐波信号的幅度仍对激光功率波动敏感。免标定的一次谐波(1f)归一化二次谐波(2f)检测的WMS策略(WMS-2f/1f)<sup>[20]</sup>在一定程度上消除了光功率波动的影响,但需要避免1f信号在吸收峰附近接近零的光学厚工况。

由于依赖光强探测的LAS技术易受到仪器自身噪音和探测器接收到光功率波动的干扰,激光色散光谱(LDS)技术在近十年受到极大关注。该方法通过探测经过高频(100 MHz~10 GHz)强度调制后的激光穿过吸收气体介质后的相位变化来反演气体状态信息,具有对探测器接收到的光

功率波动免疫,且动态范围宽的优势,因而突破了LAS技术的诸多限制。根据其所检测的目标的不同,分为Wysocki等人研发的频率检测式啁啾色散光谱(CLaDS)技术<sup>[21]</sup>和Martín-Mateos<sup>[22-24]</sup>和孙立群<sup>[25-26]</sup>等人发展的相位检测式外差相敏色散光谱(HPSDS)技术,并通过实验证实了这两项LDS技术对探测器接收光功率波动免疫,且检测动态范围比传统吸收光谱技术更宽。特别地,由于HPSDS技术具有光学系统布置简单、数据采集方便、气体状态参数反演简便等优点,同时相较CLaDS技术,HPSDS技术无需高性能的频谱分析仪用于实时监测拍频信号的瞬时频率,在应用成本上有显著优势。因此,近年来HPSDS技术的应用得到进一步拓展,除了常温气体传感应用外,HPSDS技术也在燃烧诊断和高温烟气检测中得到成功应用。Ma等人提出将激光色散光谱法用于燃烧诊断,基于带间级联激光器(ICL)发展了高频电流调制方法,实现了碳烟火焰中红外CO<sub>2</sub>的色散光谱测量,并验证了色散相位信号波形和幅值在光功率波动和强辐射环境下保持不变<sup>[27]</sup>。此外,该课题组还构建了免标定模型,准确反演了气体浓度,并进一步提出了基于HPSDS技术的双波长测温方法,实现了平面预混火焰温度和H<sub>2</sub>O浓度的同步测量<sup>[28]</sup>。近期Duan等人研发了基于外差相敏色散光谱技术的高温痕量氨传感器,利用单个9.06 μm量子级联激光器实现痕量氨气浓度的定量检测<sup>[29]</sup>。Hu等人开发了波长调制色散光谱技术,通过在百MHz强度调制电流上增加额外的kHz级正弦调制电流,并通过锁相放大器二次解调,将色散光谱气体的检测灵敏度提高了8.3倍,创造了色散光谱技术的检测灵敏度新纪录<sup>[30]</sup>。Lou等人研发了基于色散光谱技术的分布式光纤传感方法,实现了大空间场景内多点的宽动态范围检测<sup>[31]</sup>。从上述研究中可以发现HPSDS技术具有宽动态探测范围和对光功率波动免疫的显著优势,特别适合宽浓度变化范围、复杂恶劣环境的气体检测应用,但目前多数HPSDS技术的研究是通过直接加载高频电流的内部强度调制方法进行的,对于采用电光调制器(EOM)的外部强度调制HPSDS技术的深入分析较少。

本文发展了一种双边带拍频抑制模式的外差相敏色散光谱(heterodyne phase-sensitive disper-

sion spectroscopy, HPSDS)技术,并利用中心波长为1654 nm的分布式反馈激光器实现了宽动态范围的甲烷检测。利用电光调制器对激光进行外部强度调制,通过对电光调制器的偏置电压与功率输出特性进行分析,寻找并将电光调制器的偏置电压设置于最佳工作区间,使2倍频拍频信号得到极大抑制,色散相位信号的信噪比得到改善,从而得到大幅值、高信噪比的1倍频拍频相位信号来进行气体浓度探测。在此基础上,对比分析了双边带拍频抑制与非抑制条件下的色散相位信号轮廓。结果显示,该方法在0.2%~40%的检测范围内具有极高的线性度( $R^2=0.9999$ ),同时,在11.79 s的积分时间内,最低检测下限可低至38.5 ppm (7.7 ppm·m)。随后,通过与波长调制光谱技术的测量结果进行对比发现HPSDS技术在动态检测范围和对激光功率的免疫性上具有显著优势。

## 2 HPSDS 技术原理

激光色散光谱技术通过检测位于分子共振频率附近伴随气体吸收的固有折射率变化(即色散)来反演得到气体状态参数信息。Kramers-Kronig关系<sup>[32]</sup>描述了复折射率 $n(\omega)$ 与吸收系数 $\alpha(\omega)$ 间的关系:

$$n(\omega) = 1 + \frac{c}{\pi} \int_0^{+\infty} \frac{\alpha(\omega')}{\omega'^2 - \omega^2} d\omega' \quad (1)$$

其中 $\omega$ 为角频率, $n(\omega)$ 为频率位于 $\omega$ 时光在吸收介质中的复折射率, $\omega'$ 为0到正无穷范围变化的频率积分变量, $\alpha(\omega')$ 为频率位于 $\omega'$ 时的吸收系数, $c$ 为真空中的光速。

本文通过电光调制器对激光器输出的中心频率 $\omega$ 的光进行频率为 $f_m = \omega_m / 2\pi$  ( $f_m$ 为100 MHz~10 GHz)的外部强度调制,将产生等频率间隔的三色光束,包括频率为 $\omega$ 的载波,频率为 $\omega + \omega_m$ 的上边带,频率为 $\omega - \omega_m$ 的下边带,它们的光场表达式如下:

$$E_1 = A_1 \cos(\omega t) \quad (2)$$

$$E_2 = A_2 \cos[(\omega + \omega_m)t] \quad (3)$$

$$E_3 = A_3 \cos[(\omega - \omega_m)t] \quad (4)$$

其中 $A_1, A_2, A_3$ 分别为三色光束的光场振幅,载波

振幅通常大于边带的振幅, 即  $A_1 > A_2, A_1 > A_3$ 。

除了采用电光调制器实现外部强度调制外, 通过对激光器直接加载高频电流调制也可实现高频强度调制, 但后者会不可避免地引入频率调制, 增强色散相位谱的不对称性。而采用电光调制器可以在保障纯强度调制的同时最大限度地降低频率调制的影响。此外, 在近红外波段商用成熟的铌酸锂电光调制器稳定性较好, 可以提高测量系统的稳定性, 因此本文采用电光调制器来进行高频强度调制。

当三色光束穿过待测吸收介质时, 吸收与色散过程会同步发生, 进而导致三色光束出现光强衰减及相位变化, 三色光束穿过待测吸收介质后的光场表达式为<sup>[22]</sup>:

$$E'_1 = A'_1 \cos(\omega t - \varphi_1) \quad , \quad (5)$$

$$E'_2 = A'_2 \cos[(\omega + \omega_m)t - \varphi_2] \quad , \quad (6)$$

$$E'_3 = A'_3 \cos[(\omega - \omega_m)t - \varphi_3] \quad , \quad (7)$$

式 (5)~式 (7) 中的  $A'_1, A'_2, A'_3$  分别为三色光束衰减后的光场振幅;  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别为三色光束穿过吸收介质后相对穿过等长空气时的相对相移。相关光场振幅与相移的表达式如下<sup>[22]</sup>:

$$A'_1 = e^{-\frac{\alpha(\omega)L}{2}} A_1 \quad , \quad (8)$$

$$A'_2 = e^{-\frac{\alpha(\omega+\omega_m)L}{2}} A_2 \quad , \quad (9)$$

$$A'_3 = e^{-\frac{\alpha(\omega-\omega_m)L}{2}} A_3 \quad , \quad (10)$$

$$\varphi_1 = \frac{\omega L}{c} [n(\omega) - 1] \quad , \quad (11)$$

$$\varphi_2 = \frac{(\omega + \omega_m)L}{c} [n(\omega + \omega_m) - 1] \quad , \quad (12)$$

$$\varphi_3 = \frac{(\omega - \omega_m)L}{c} [n(\omega - \omega_m) - 1] \quad , \quad (13)$$

其中  $L$  为光程,  $n(\omega), n(\omega + \omega_m), n(\omega - \omega_m)$  分别为三色光束的折射率。值得注意的是, 若不考虑式 (11)~式 (13) 中“-1”项时, 则  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  分别为对应三色光束穿过长度  $L$  的目标气体介质后产生的绝对相移。

当透射的三色光束同时汇聚到高速光电探测器的感光面上后, 由于光电探测器的平方律特性,

将干涉并同时产生直流信号与拍频信号, 其强度与三色光束光场的关系如下:

$$I \propto (E'_1 + E'_2 + E'_3)^2 \propto E_1'^2 + E_2'^2 + E_3'^2 + 2E'_1 E'_2 + 2E'_1 E'_3 + 2E'_2 E'_3 \propto \underbrace{A_1'^2 + A_2'^2 + A_3'^2}_{\text{直流信号}} + \underbrace{2A'_1 A'_2 \cos[\omega_m t - (\varphi_2 - \varphi_1)] + 2A'_1 A'_3 \cos[\omega_m t - (\varphi_1 - \varphi_3)]}_{\text{1 倍频拍频信号}} + \underbrace{2A'_2 A'_3 \cos[2\omega_m t - (\varphi_2 - \varphi_3)]}_{\text{2 倍频拍频信号}} \quad . \quad (14)$$

由式 (14) 可知, 探测器所检测到的与光强正相关的信号  $I$  主要由直流信号、载波分别与上下边带干涉产生的两个 1 倍频拍频信号、以及上下边带干涉产生的 2 倍频拍频信号 3 部分构成, 而气体的折射率信息包含在拍频信号的相移  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$  中 (式 (11)~式 (13)),  $A'_1, A'_2, A'_3$  两两间的乘积决定了 1 倍频与 2 倍频成分的占比。其中, 1 倍频与 2 倍频拍频信号的相位分别为式 (11)~式 (13) 的两两之差。由于光频  $\omega$  远大于调制频率  $\omega_m$ , 有  $\omega L/c \approx (\omega + \omega_m)L/c \approx (\omega - \omega_m)L/c$ 。

本文选择 1 倍频相位作为测量目标, 由式 (14) 可知, 2 倍频拍频信号的相位仅由频率为  $\omega \pm \omega_m$  的双边带相移  $\varphi_2$  和  $\varphi_3$  决定, 而载波与双边带产生的 1 倍频拍频信号的相位中隐藏着更多相位变化信息, 包括载波与双边带三者的相移  $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$ 。同时, 1 倍频拍频信号的强度幅值大于双边带产生的 2 倍频拍频信号的强度幅值, 更易于被光电探测器检测到, 而检测 2 倍频拍频信号时需要额外的射频放大器<sup>[25]</sup>。因此, 本文将两个 1 倍频拍频信号的矢量和的相位 (即 1 倍频色散信号相位  $\varphi$ ) 作为测量目标, 即图 1 中幅值为  $A_{1st}$  的矢量相位  $\varphi$ 。

由图 1 可以推导出色散相位  $\varphi$  的表达式, 见式 (15)。可见色散相位  $\varphi$  与载波和上边带的光相位差  $\varphi_1 - \varphi_2$ , 以及载波和下边带的光相位差  $\varphi_3 - \varphi_1$  强相关。

$$\varphi = \arctan \left[ \frac{A'_2 \sin(\varphi_1 - \varphi_2) + A'_3 \sin(\varphi_3 - \varphi_1)}{A'_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2) + A'_3 \cos(\varphi_3 - \varphi_1)} \right] \quad . \quad (15)$$

1 倍频拍频信号的频率对应为强度调制频率  $f_m$ , 其量级范围一般为 100 MHz~10 GHz。通常锁相放大器由于带宽限制无法实现如此高频信号的相位解调。为解决此问题, 可采用外差检测的

方法,即通过将两个频率混频,将难以直接检测的高频信号降频到另一可探测的较低频率。在本研究中,使用混频器将拍频信号与频率同调制频率相差数百 kHz 的正弦降频信号(本文中降频频率为  $f_m-400$  kHz)混频,将搭载着相位信息的拍频信号频率降低至 400 kHz。降频后的信号位于锁相放大器的解调范围内,从而可以解调出目标相位信号。

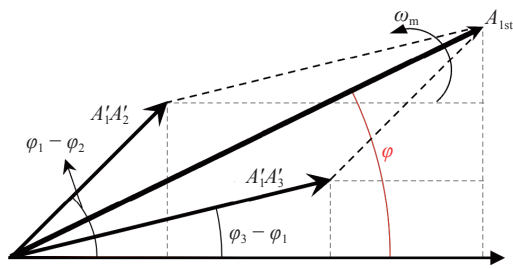


图1 两个1倍频拍频信号的矢量和信号的相位 $\varphi$

Fig. 1 The phase  $\varphi$  of the vector sum of two beat note signals with a frequency of  $\omega_m$

利用可调谐二极管激光器在吸收-色散特征附近的一定波长范围内进行扫描,可以得到目标特征附近的色散相位谱。

### 3 实验装置与方法

#### 3.1 实验系统

实验中,采用一台中心波长位于 1654 nm 附近、蝶形封装、窄线宽 (<3 MHz) 的半导体可调谐分布式反馈激光器 (EP1654-DM-B06-FA, Eblana) 作为  $\text{CH}_4$  色散光谱的检测光源。激光器的工作温度和驱动电流由低噪音激光器控制器 (LDTC-0520, Wavelength Electronics) 调节,其温度稳定性为 0.002  $^{\circ}\text{C}$ ,驱动电流的均方根噪音为 7.5  $\mu\text{A}$ 。由图 2 中激光器输出波长、功率与驱动电流的关系可知,当固定激光器工作温度为 34.5  $^{\circ}\text{C}$  时,通过设定扫描驱动电流在 0~95 mA 变化,可以使调谐波长范围覆盖中心频率为 6046.945  $\text{cm}^{-1}$  的  $\text{CH}_4$  吸收峰,该吸收峰的中心频率在 HITRAN 数据库中查询获得,同时吸收-色散特征位于所调谐波长范围中心附近,且波长、功率与驱动电流间均有良好的线性关系。

图 3 展示了本文开发的基于双边带拍频抑制模式 HPSDS 技术的宽动态范围甲烷 ( $\text{CH}_4$ ) 气体检测系统示意图。通过在激光器驱动电流端加

载 100 Hz 的三角波信号来扫描覆盖  $\text{CH}_4$  的特征光谱。激光器输出光在进入电光调制器 (MXAN-LN-10, iXblue) 前,经过偏振控制器优化偏振态。电光调制器由低噪音线性电源 (DP831, RIGOL) 和射频函数发生器 (SG382, SRS) 分别提供偏置电压和射频调制信号,用于对进入电光调制器的光进行外部强度调制,产生包含载波,上边带和下边带的三色光束。当三色光束穿过气体池 (光程  $L=20$  cm,  $P=1$  atm) 同时发生吸收与色散后,由凹面汇聚镜 (CM254-050-M01, Thorlabs,  $f=50$  mm) 汇聚到高速 InGaAs 光电探测器 (Model 1611, Newport, 1.2 GHz 带宽) 上 (图 3 中的 PD 1)。通过干涉产生频率为调制频率  $f_m$  的 1 倍频拍频信号。拍频信号和另一路降频信号 (由 RF2 产生,频率与调制频率相差 400 kHz) 混频后进入锁相放大器 (MFLI, Zurich Instruments AG) 以对降频后的探测信号进行相位解调。锁相放大器的参考信号来源于两路射频函数发生器 (即 RF1 和 RF2) 输出的经混频后的 400 kHz 差频信号。RF2 所输出的参考频率是由调制频率、所选择的探测拍频频率、锁相放大器的解调频率共同决定的。本文中调制频率确定为 1.2 GHz,目标探测信号为 1 倍频拍频的相位信号,解调频率为 400 kHz,得到参考频率为  $1 \times 1.2 \text{ GHz} - 400 \text{ kHz} = 1199.6 \text{ MHz}$ 。

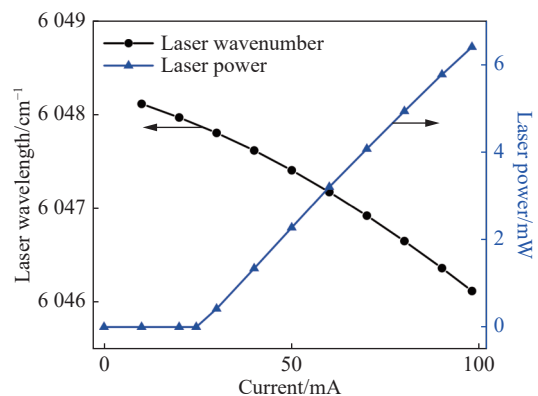


图2 34.5  $^{\circ}\text{C}$  下激光器波长、功率与电流的关系

Fig. 2 Laser wavelength and output power as a function of drive current at 34.5  $^{\circ}\text{C}$

本文在实验系统中额外安装了一个翻转镜,以将透射光反射至带宽为 100 kHz 的低速光电探测器 (Model 2011, Newport),用于开展波长调制吸收光谱 (WMS) 实验 (图 3 中的 PD 2),并与 HPSDS 技术进行对比研究。在 WMS 实验中,通过加载 100 Hz 扫描信号和 35 kHz 的调制信号来

进行 WMS 实验测量。在 HPSDS 和 WMS 实验中,通过一个 16 位、最大采样率为 2 MS/s 的多通道数据采集卡 (USB6363, NI Instrument) 记录解调后的色散相位信号、二次谐波信号和一次谐波归一化的二次谐波信号。

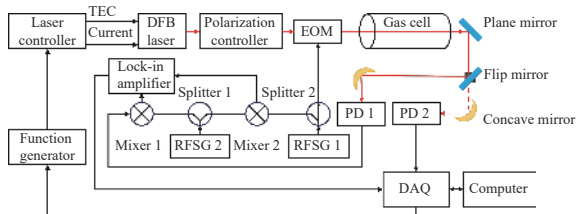


图 3 基于双带边拍频抑制模式 HPSDS 技术的  $\text{CH}_4$  检测系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of  $\text{CH}_4$  detection system based on dual-sideband beat-suppressed HPSDS

### 3.2 色散相位信号优化

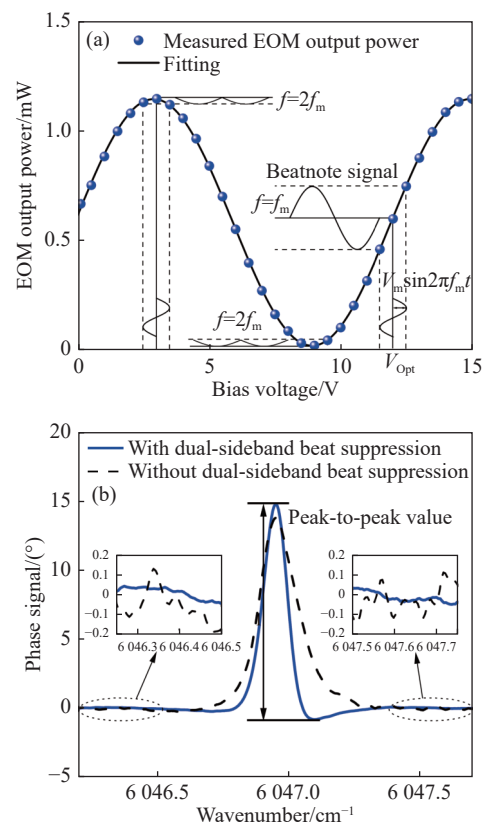
载波频率  $\omega$ 、载波与边带的频率差 ( $\omega_m=2\pi f_m$ ) 和折射率 (即  $n(\omega)$ ,  $n(\omega+\omega_m)$ ,  $n(\omega-\omega_m)$ ) 共同决定了三色光束与吸收介质作用后各自相位变化的大小,最终体现在拍频信号相位中。其中,通过加载激光器扫描电流改变载波的频率,以获得扫描波段内的色散相位谱。而调制频率和折射率共同决定了某一个载波频率下拍频信号的相位大小:调制频率主要影响两束边带的相位变化,即  $\varphi_2$  与  $\varphi_3$ , 因此其很大程度上决定了某一载波中心频率下的拍频相位;折射率由气体吸收介质的浓度决定,更高气体浓度对应着更高的折射率变化,载波和边带的相移均等比例增加,从而产生更强的相位信号。

在 HPSDS 中,理论最佳调制频率与对应吸收光谱信号的半高宽 (FWHM) 成正相关,已有研究表明 HPSDS 中色散相位信号在调制频率为 0.58 倍的半高宽时,色散相位信号的峰峰值达到理论最大值<sup>[22, 25, 27]</sup>。在本文的甲烷测量中,考虑到所使用探测器的带宽限制,最终将电光调制器的调制频率确定为 1.2 GHz,以获得最佳信噪比的色散相位信号。

本文采用 EOM 对激光进行外部强度调制, EOM 偏置电压  $V_{\text{Bias}}$  的大小影响着 1 倍频和 2 倍频拍频信号的强度与占比,间接影响着色散相位信号,因而在测量前对偏置电压进行了优化。图 4(a) 为实验测得的 EOM 偏置电压与调制光功率  $P$  之间的调制响应曲线。由光场和光功率的

关系  $P \propto (E_1 + E_2 + E_3)^2$ , 同式 (14) 可推导得,即使不经过吸收介质发生吸收与色散,1 倍频和 2 倍频拍频信号分量就已经存在,只是不会搭载因吸收介质产生的折射率变化导致的额外相位变化信息。

与技术原理中三色光束传播、检测的分析结果相对应,此处对调制响应曲线中偏置电压对 1 倍频和 2 倍频拍频信号的影响进行分析。当偏置电压设定在 EOM 最佳工作区间 (即 EOM 调制功率为最大调制功率一半时对应的电压,即调制响应曲线的正交偏置点,如图 4(a)  $V_{\text{Opt}}$  处) 时,加载高频调制信号  $V_m$  (通常  $V_m \ll V_\pi$ , 其中  $V_\pi$  为 EOM 的半波电压) 对激光进行强度调制,相应地产生频率与调制频率相同的拍频信号。在此工作点附近,输出光强随偏置电压的变化近似呈线性变化,于是信号就能以不畸变的正弦调制光输出,输出拍频信号与加载的调制电压频率相同,2 倍频拍频信号被极大抑制,且理想条件  $V_m \ll V_\pi$  下不会产生 2 倍频拍频信号的干扰。但实际应用中不可避免地存在非线性的影响,因而产生小量的 2 倍频信号,此时式 (14) 中 2 倍频拍频信号的幅值相对于两个 1 倍频拍频信号的幅值可忽略不计,对应有  $A'_2$  和  $A'_3$  远小于  $A'_1$ 。



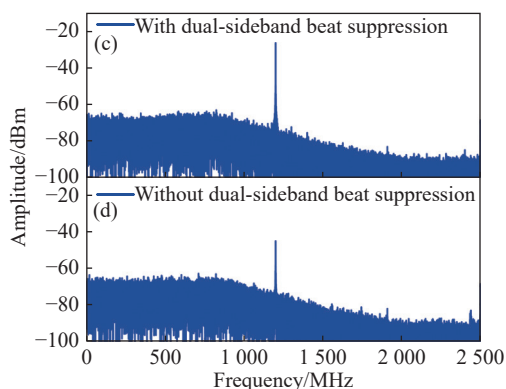


图4 (a) 实验测得的 EOM 输出光功率与其偏置电压的关系; (b) 调制频率为 1200 MHz, 在抑制模式与非抑制模式下测得的 10% CH<sub>4</sub> 的色散相位信号 ( $T = 298$  K,  $P = 1$  atm,  $L = 20$  cm); (c) 双边带拍频抑制后的拍频信号频谱图; (d) 无双边带拍频抑制时的拍频信号频谱图

Fig. 4 (a) The measured output power of EOM as a function of bias voltages; (b) measured dispersion phase signals of 10% CH<sub>4</sub> with or without dual-sideband beat suppression at the modulation frequency of 1200 MHz ( $T = 298$  K,  $P = 1$  atm,  $L = 20$  cm); (c) the frequency spectrum of the beat note signal with dual-sideband beat suppression; (d) the frequency spectrum of the beat note signal without dual-sideband beat suppression

同时,在最佳工作区间,EOM 输出光功率具有最强的单调变化趋势(斜率绝对值最大),即在该偏置电压下加载相同的调制电压将产生幅值最大的 1 倍频拍频信号。当 EOM 偏置电压设定到图 4 中峰值或谷值处时,其拍频信号的幅值大幅度降低,并伴随着显著的 2 倍频拍频信号产生。具体而言:当偏置电压对应调制响应曲线的波谷处时,输出光功率最小,载波被抑制且仅有奇数次边带输出(以频率为  $\omega \pm \omega_m$  的边带为主),主要检测由双边带干涉产生的 2 倍频信号,为文献 [25-26] 采用的偏置电压选择方案;当偏置电压对应调制响应曲线的波峰处时,输出光功率最大、输出光频包括载波与偶数次边带(以频率为  $\omega \pm 2\omega_m$  的边带为主),主要探测到的 2 倍频拍频信号由载波分别与  $\omega \pm 2\omega_m$  边带干涉产生。值得注意的是波峰波谷处光电探测器检测到的信号均可等效为式 (14) 中  $A_2$  和  $A_3$  远大于  $A_1$  的情况。所以,当偏置电压位于最佳工作点附近,即  $A_2$  和  $A_3$  远小于  $A_1$ ,从而 2 倍频信号被抑制。相对地,当偏置电压位于图 4(a) 在峰或谷处的调制,2 倍频分量占据主

导,由于一个调制频率对应的周期上升沿和下降沿的非对称性,故存在小量 1 倍频信号,此时的式 (14) 中有  $A_2$  和  $A_3$  远大于  $A_1$ 。

当 EOM 偏置电压设定于其他区间时,拍频信号由不同比例的 1 倍频和 2 倍频信号组成。因此,为了实现高保真、高信噪比的 1 倍频信号相位探测,在实验中寻找并确定了最佳工作区间  $V_{Opt}$ , 以实现双边带拍频的抑制。

图 4(b) 展示了调制频率为 1.2 GHz 时, EOM 在不同偏置电压(即边带拍频抑制和非抑制)调控下测得的 10% CH<sub>4</sub> 在 6046.945 cm<sup>-1</sup> 处的色散相位信号(即 HPSDS 信号)。图中的箭头代表着色散相位信号的峰峰值,一般作为特征变化参数用于标定相位信号与气体浓度间的变化关系。图 4(c) 和图 4(d) 对比了在双边带抑制模式与非双边带抑制模式下的拍频信号频谱图:在非抑制模式下,1 倍频拍频信号为 -46 dBm,且有较为明显的 2 倍频(2.4 GHz)拍频信号;在双边带抑制模式下 1 倍频拍频信号强度得到显著增加,达到了 -26 dBm,且 2 倍频拍频信号强度减弱,约为非抑制模式下的 20%。此外,从图 4(b) 可以看出,非抑制模式下的相位信号出现变形,且整体信噪比变差。

## 4 实验结果与分析

通过确定 EOM 的工作参数以实现双边带拍频抑制后,利用不同浓度的甲烷/氮气(CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>)标气对 CH<sub>4</sub> 检测系统的测量性能进行评估。通过对高纯度 CH<sub>4</sub> (99.99%) 和稀释气体 N<sub>2</sub> (99.999%) 流量的精准控制,配置出浓度分别为 0.2%、0.5%、1%、5%、10%、20%、30%、40% 的 CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> 标气。配气过程已由标定的 3 个质量流量控制器(Sevenstar, 精度  $\pm 1\%$ ) 完成。气室内压力为 1 atm。

图 5(彩图见期刊电子版) 给出了不同 CH<sub>4</sub> 浓度下测得的色散相位信号以及色散相位信号的峰峰值随浓度的变化关系。如图 5(a) 所示,当 CH<sub>4</sub> 浓度在 0.2%~40% 之间变化时,色散相位信号拥有良好的信噪比。从图 5(b) 可以看出色散光谱的峰峰值信号具有出色的线性响应,其中  $R^2$  值大于 0.9999。需注意,本实验中 CH<sub>4</sub> 浓度与色散信号峰峰值的响应关系是以 N<sub>2</sub> 作为载气进行校准



的,在测量复杂混合气体时,存在由于碰撞展宽跟多普勒展宽导致的展宽差异,需要进行额外的标定校准或者采用光谱拟合的方式进行反演<sup>[27]</sup>。

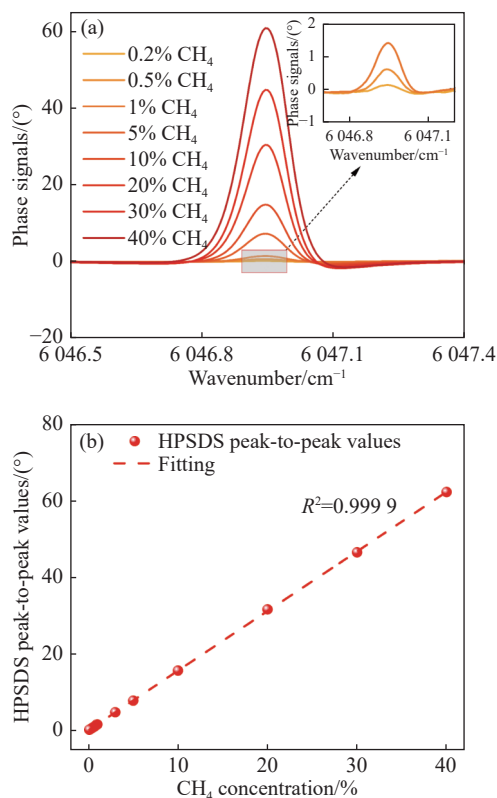


图 5 (a) 不同  $\text{CH}_4$  浓度下测得的色散相位信号; (b) HPSDS 信号峰峰值随  $\text{CH}_4$  浓度的变化关系

Fig. 5 (a) Measured dispersion phase signals at different  $\text{CH}_4$  concentrations; (b) peak-to-peak values of HPSDS signals as a function of  $\text{CH}_4$  concentration

图 6(a) 展示了 HPSDS 峰峰值、WMS- $2f$ 、WMS- $2f/1f$  信号随  $\text{CH}_4$  浓度的变化情况。可以看出 HPSDS 的线性动态范围远高于 WMS, 约为其 50 倍。如图 6(a) 及 6(b) 所示, HPSDS 在 0.2%~40% 范围内具有极高的线性度 ( $R^2=0.9999$ ), 相比较下 WMS 仅于 0.1%~0.8% 范围内具有较高的线性度 (WMS- $2f/1f$ :  $R^2=0.9966$ , WMS- $2f$ :  $R^2=0.9995$ ), 且随着浓度的继续增大, WMS 信号的非线性度逐渐增加。在测量更高浓度的  $\text{CH}_4$  气体时, 吸收处于非光学薄状态 (在本文中  $P=1$  atm 时吸光度  $>0.1$ ), WMS 随浓度呈现明显的非线性。

动态检测范围作为气体传感器的重要指标, 可以采用浓度与光程的乘积 (即积分浓度) 来衡量。图 6 中的结果显示本文的实测线性动态检测范围的最高检测限为  $0.400 \times 10^6 \text{ ppm} \times 0.2 \text{ m} =$

$80\,000 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ , 最低实测检测限 (实测浓度为 0.2%) 为  $0.002 \times 10^6 \text{ ppm} \times 0.2 \text{ m} = 400 \text{ ppm} \cdot \text{m}$ 。对比发现, 本文双边带拍频抑制模式 HPSDS 技术的实测线性动态检测范围 (400~80 000  $\text{ppm} \cdot \text{m}$ ) 比采用直接电流调制 HPSDS 技术<sup>[7]</sup>与载波抑制模式 HPSDS 技术<sup>[25]</sup>的实测线性动态检测范围要宽, 且实测最高检测限高近 1 倍, 实测最低检测限降低一半。

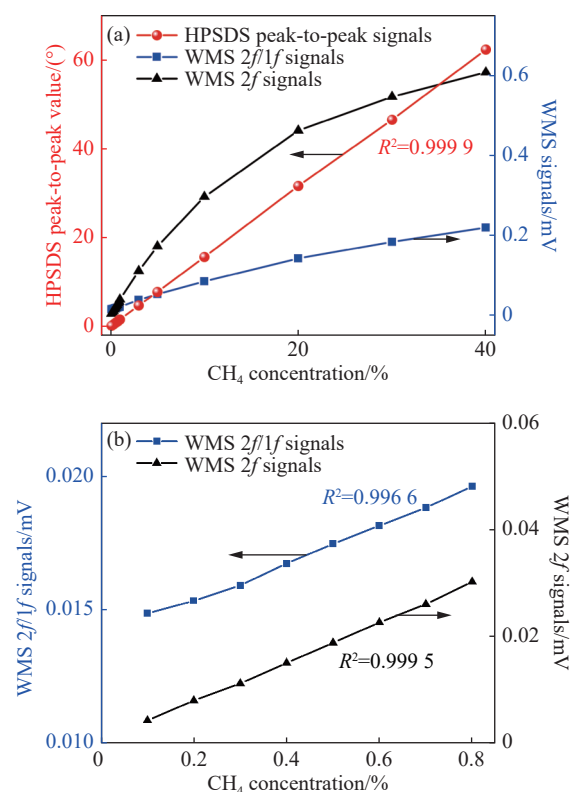


图 6 (a) 不同  $\text{CH}_4$  浓度下的 HPSDS 峰峰值、WMS- $2f$  和 WMS- $2f/1f$  信号值; (b) 0.1%~0.8% 浓度范围内的 WMS- $2f$ , WMS- $2f/1f$  信号值-浓度线性关系

Fig. 6 (a) HPSDS peak-to-peak values, WMS- $2f$  and WMS- $2f/1f$  signals at different  $\text{CH}_4$  concentrations; (b) linear relationship between WMS- $2f$ , WMS- $2f/1f$  signals and concentration within the range of 0.1% to 0.8%  $\text{CH}_4$ , respectively

接下来, 通过连续测量浓度为 10% 的  $\text{CH}_4$  来评估所开发的 HPSDS 系统的测量精度、检测下限和长期稳定性。图 7(a) 显示了在常温常压下对  $\text{CH}_4$  进行的连续 15 分钟测量时的浓度结果。浓度测量的频率分布在图 7(b) 中以直方图绘制。直方图可以很好地由高斯函数拟合, 这表明系统白噪声是主要噪声来源。高斯曲线的半高半宽 (HWHM) 为 0.22%。因此, 当前的痕量  $\text{CH}_4$  检测系统具有 2.2% 的测量精度 ( $(10 \pm 0.22) \%$ )。Allan

方差分析常被用于评估检测系统通过平均所能达到的理论最佳的探测灵敏度,以及对应的积分时间。图7(c)展示了HPSDS连续测量下的Allan方差分析,表明随着积分平均时间的增加,噪声水平不断减小。当前的CH<sub>4</sub>检测系统在1s内实现了211.6 ppm的最低检测下限,将积分时间提高至11.79 s时,最低检测下限可以降低至38.5 ppm。本文采用的气体池光程 $L=20$  cm,等效为积分时间等于1 s时,检测下限对应的积分浓度为42.32 ppm·m;积分时间为11.79 s时对应的积分浓度为7.7 ppm·m,均优于采用直接电流调制HPSDS技术<sup>[7]</sup>与载波抑制HPSDS技术<sup>[26]</sup>的结果。

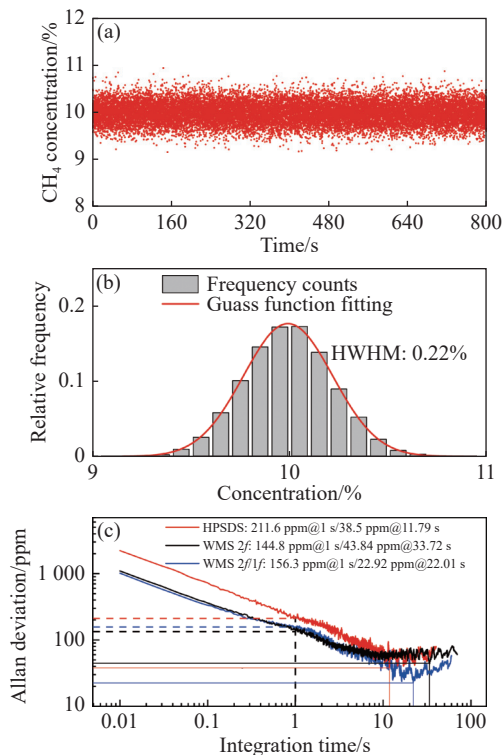


图7 (a) 15分钟连续测量10% CH<sub>4</sub>的结果浓度分布图; (b) 测量结果的频率分布直方图及高斯曲线拟合曲线; (c) HPSDS, WMS-2f和WMS-2f/1f信号的Allan方差分析

Fig. 7 (a) Diagram of concentration distribution results for continuous measurement of 10% CH<sub>4</sub> for 15 minutes; (b) frequency distribution of the measured concentration and the Gaussian profile fitting; (c) Allan deviation analysis of HPSDS, WMS-2f and WMS-2f/1f signals

此外,通过翻转镜改变出射光的光路并通过图3中PD2进行了波长调制光谱测量,并对比了

HPSDS, WMS-2f和WMS-2f/1f的最低检测下限。如图7(c)(彩图见期刊电子版)所示,WMS的最低检测下限略低于HPSDS,当积分时间1 s时,WMS-2f和WMS-2f/1f的最低检测下限分别为144.8 ppm和156.3 ppm,当积分时间分别提高到33.72 s和22.01 s时,WMS-2f和WMS-2f/1f的最低检测下限分别为43.84 ppm和22.92 ppm。

进一步研究了所开发的CH<sub>4</sub>检测系统在气体连续性监测中的应用。在实验中,以大约30 s为间隔,改变CH<sub>4</sub>和载气N<sub>2</sub>的流量来配置不同浓度的CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>标气,依次将浓度为20%、15%、10%、5%和3%的CH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>标气通入气体池,气室内压力为1 atm。图8展示了HPSDS系统测得的CH<sub>4</sub>浓度随时间变化的情况,小图中浓度测量的时间分辨率为0.33 s。此外,从改变标气的流量到达到所设定的配气浓度需要一定时间,由图8可知,HPSDS系统仍有足够的时间分辨率捕获每次调节时的配气波动。

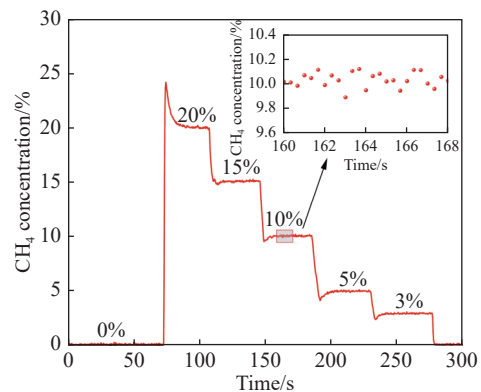


图8 连续监测下CH<sub>4</sub>浓度随时间的变化结果

Fig. 8 Continuous monitoring results of CH<sub>4</sub> in the gas flow

最后,对所开发的HPSDS系统对于激光功率波动的抗干扰性能进行测试,并与基于WMS方法的测量结果进行对比。通过调节光阑的大小模拟激光功率的波动与损耗,以穿过气体池后所检测到的光功率为参考,测量了不同光功率下的色散相位信号谱,并将HPSDS相位信号峰峰值与WMS-2f信号峰值、WMS-2f/1f信号峰值进行对比,如图9(a)(彩图见期刊电子版)所示。可见,当光功率在130~350 μW范围内波动时,色散相位信号的整体轮廓基本不受影响,与气体浓度直接相关的色散相位信号峰峰值保持不变。相比之下,从图9(b)可以看出,WMS-2f与WMS-2f/1f信

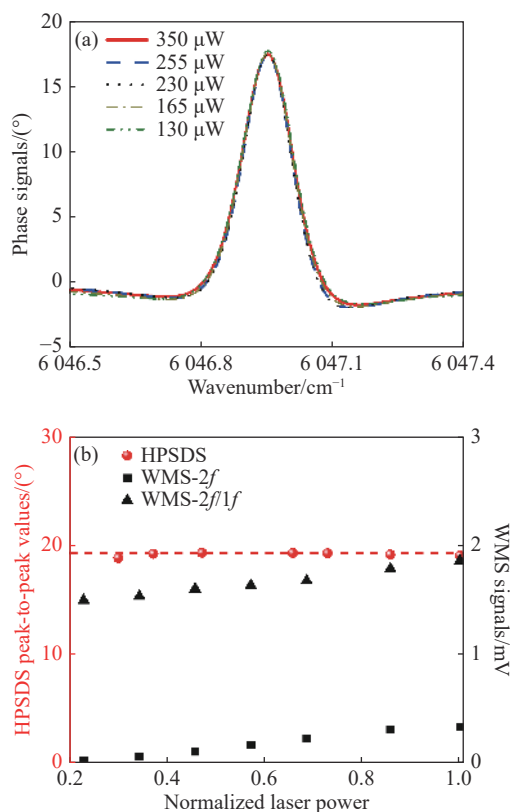


图9 (a)不同激光功率下的HPSDS色散相位信号;(b)HPSDS峰峰值,WMS-2f和WMS-2f/1f信号峰值在不同激光功率下的变化情况

Fig. 9 (a) Dispersion phase signals at different laser powers; (b) variation of HPSDS peak-to-peak values, peak values of WMS-2f and WMS-2f/1f signals at different laser powers

号峰值有较为明显的变化,当光功率下降时,二次谐波信号和归一化二次谐波信号的峰值有显著下降,当光功率衰减70%(即光功率为原始功率的30%)左右时,色散相位信号峰峰值仍为不衰减时

#### 参考文献:

- [1] FAROOQ A, ALQUAITI A B S, RAZA M, *et al.*. Laser sensors for energy systems and process industries: perspectives and directions[J]. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2022, 91: 100997.
- [2] 王倩, 蔡伟伟, 陶波. 基于层析成像的激光强度分布测量方法[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(4): 743-752. WANG Q, CAI W W, TAO B. Laser intensity distribution measurement method based on tomographic imaging[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(4): 743-752. (in Chinese).
- [3] 任颐杰, 颜昌翔, 徐嘉蔚. 增强吸收光谱技术的研究进展及展望[J]. *中国光学 (中英文)*, 2023, 16(6): 1273-1292. REN Y J, YAN CH X, XU J W. Development and prospects of enhanced absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(6): 1273-1292. (in Chinese).
- [4] 刘成员, 于江玉, 李奉翠, 等. 拉曼光谱测试技术在可充电铝离子电池储能机理的研究进展[J]. *应用化学*, 2023, 40(10): 1347-1358. LIU CH Y, YU J Y, LI F C, *et al.*. Research progress of Raman spectroscopy technique in energy storage mechanism of rechargeable aluminum-ion batteries[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2023, 40(10): 1347-1358. (in Chinese).

的98%,而当光功率衰减30%时(即光功率为原始功率的70%)左右时,WMS-2f与WMS-2f/1f信号峰值已分别衰减至最大值的68%和89%。由此可知,相较于WMS检测方法,本文发展的HPSDS技术对激光功率波动具有极高的抗干扰性。

## 5 结论

本文开发了一种基于双边带拍频抑制模式的外差相敏色散光谱技术,探索了边带抑制模式下的电光调制器工作特性以及偏置电压调控方法,实现了宽动态范围的甲烷检测。与依赖光强探测的吸收光谱不同,该技术通过探测载波与双边带拍频后的1倍频拍频信号相位信息来获取气体浓度信息。在实验中通过调控电光调制器的偏置电压实现双边带拍频的抑制和载波边带拍频的增强,并在边带抑制模式下得到了最高的信噪比与动态范围。结果表明:该检测系统在宽浓度范围内(0.2%~40%)具有极高的线性度( $R^2=0.9999$ ),同时能在11.79 s内达到38.5 ppm的最低检测下限;且与基于传统WMS-2f与WMS-2f/1f的检测方法相比,该检测系统对激光功率的波动具有更强的免疫性;此外,与采用载波抑制模式的HPSDS技术和直接电流调制模式的HPSDS技术相比,本文提出的双边带拍频抑制模式的HPSDS技术的实测线性动态范围更宽,实测检测下限更低,上限更高。基于该方法的检测技术在需求宽动态范围、光强衰减显著干扰等应用领域中具有广阔的前景。

- [5] 程军杰, 曹智, 杨灿然, 等. 便携式远程激光诱导击穿光谱系统及其定量分析性能[J]. 应用化学, 2022, 39(9): 1447-1452.  
CHENG J J, CAO ZH, YANG C R, *et al.*. Quantitative analysis with a portable remote laser-induced breakdown spectroscopy system[J]. *Chinese Journal of Applied Chemistry*, 2022, 39(9): 1447-1452. (in Chinese).
- [6] MA L H, WANG W, ZHOU CH, *et al.*. A laser absorption sensor for fuel slip monitoring in high-humidity flue gases from ammonia combustion[J]. *Measurement Science and Technology*, 2023, 34(9): 094005.
- [7] ZHANG H J, WU T, WU Q, *et al.*. Methane detection with a near-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectrometer at a stronger frequency modulation using direct injection-current dithering[J]. *Optics Express*, 2023, 31(15): 25070-25081.
- [8] LI Q, JI F Y, WANG W, *et al.*. A mid-infrared laser absorption sensor for calibration-free measurement of nitric oxide in laminar premixed methane/ammonia cofired flames[J]. *Microwave and Optical Technology Letters*, 2024, 66(1): e33815.
- [9] PELÉ R, BREQUIGNY P, BELLETTRE J, *et al.*. Performances and pollutant emissions of spark ignition engine using direct injection for blends of ethanol/ammonia and pure ammonia[J]. *International Journal of Engine Research*, 2024, 25(2): 320-333.
- [10] 杨舒涵, 乔顺达, 林殿阳, 等. 基于可调谐半导体激光吸收光谱的氧气浓度高灵敏度检测研究[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(1): 151-157.  
YANG SH H, QIAO SH D, LIN D Y, *et al.*. Research on highly sensitive detection of oxygen concentrations based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(1): 151-157. (in Chinese).
- [11] 杨天悦, 宫廷, 郭古青, 等. 氨气高精度激光光谱检测装置的设计及实现[J]. 中国光学(中英文), 2023, 16(5): 1129-1136.  
YANG T Y, GONG T, GUO G Q, *et al.*. Design and achievement of a device for high-precision ammonia gas detection based on laser spectroscopy[J]. *Chinese Optics*, 2023, 16(5): 1129-1136. (in Chinese).
- [12] 黄慧, 周亦辰, 彭宇, 等. 基于量子级联激光器中红外光谱技术的幽门螺旋杆菌呼气诊断的可行性研究[J]. 分析化学, 2022, 50(9): 1328-1335.  
HUANG H, ZHOU Y CH, PENG Y, *et al.*. Feasibility study of breath diagnosis in *Helicobacter pylori* based on quantum cascade laser mid-infrared spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2022, 50(9): 1328-1335. (in Chinese).
- [13] 胡晓, 倪世传, 杨娜娜, 等. 用于氢过氧自由基光谱和动力学分析的腔衰荡光谱装置[J]. 分析化学, 2023, 51(6): 994-1002.  
HU X, NI SH CH, YANG N N, *et al.*. A cavity ring-down spectrum instrument for analysis of HO<sub>2</sub> radical spectroscopy and kinetics[J]. *Chinese Journal of Analytical Chemistry*, 2023, 51(6): 994-1002. (in Chinese).
- [14] 聂伟, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术的应用研究进展[J]. 中国激光, 2018, 45(9): 911001.  
NIE W, KAN R F, YANG CH G, *et al.*. Research progress on the application of tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(9): 911001. (in Chinese).
- [15] 朱晓睿, 卢伟业, 饶雨舟, 等. TDLAS 直接吸收法测量 CO<sub>2</sub> 的基线选择方法[J]. 中国光学, 2017, 10(4): 455-461.  
ZHU X R, LU W Y, RAO Y ZH, *et al.*. Selection of baseline method in TDLAS direct absorption CO<sub>2</sub> measurement[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(4): 455-461. (in Chinese).
- [16] 房超, 乔顺达, 何应, 等. T 字头石英音叉的设计及其气体传感性能[J]. 光学学报, 2023, 43(18): 1899910.  
FANG CH, QIAO SH D, HE Y, *et al.*. Design and sensing performance of t-shaped quartz tuning forks[J]. *Acta Optica Sinica*, 2023, 43(18): 1899910.
- [17] MA Y F, HE Y, TONG Y, *et al.*. Quartz-tuning-fork enhanced photothermal spectroscopy for ultra-high sensitive trace gas detection[J]. *Optics Express*, 2018, 26(24): 32103-32110.
- [18] 聂伟, 许振宇, 阚瑞峰, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术测量低温流场水汽露点温度[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 1862-1869.  
NIE W, XU ZH Y, KAN R F, *et al.*. Measurement of low water vapor dew-point temperature based on tunable diode laser absorption spectroscopy[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2018, 26(8): 1862-1869. (in Chinese).
- [19] 臧益鹏, 许振宇, 夏晖晖, 等. 基于免标定波长调制技术的高温谱线参数测量方法[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1011001.

- ZANG Y P, XU ZH Y, XIA H H, *et al.*. Method for measuring high temperature spectral line parameters based on calibration-free wavelength modulation technology[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(10): 1011001. (in Chinese).
- [20] 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.
- [21] WYSOCKI G, WEIDMANN D. Molecular dispersion spectroscopy for chemical sensing using chirped mid-infrared quantum cascade laser[J]. *Optics Express*, 2010, 18(25): 26123-26140.
- [22] MARTÍN-MATEOS P, ACEDO P. Heterodyne phase-sensitive detection for calibration-free molecular dispersion spectroscopy[J]. *Optics Express*, 2014, 22(12): 15143-15153.
- [23] MARTÍN-MATEOS P, HAYDEN J, ACEDO P, *et al.*. Heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy in the mid-infrared with a quantum cascade laser[J]. *Analytical Chemistry*, 2017, 89(11): 5916-5922.
- [24] PAUL S, MARTÍN-MATEOS P, HEERMEIER N, *et al.*. Multispecies heterodyne phase sensitive dispersion spectroscopy over 80 nm using a MEMS-VCSEL[J]. *ACS Photonics*, 2017, 4(11): 2664-2668.
- [25] DING W W, SUN L Q, YI L Y, *et al.*. Dual-sideband heterodyne of dispersion spectroscopy based on phase-sensitive detection[J]. *Applied Optics*, 2016, 55(31): 8698-8704.
- [26] 丁武文, 孙利群. 相敏式激光啁啾色散光谱技术在高吸收度情况下的应用[J]. *物理学报*, 2017, 66(12): 120601.  
DING W W, SUN L Q. Phase sensitive chirped laser dispersion spectroscopy under high absorbance conditions[J]. *Acta Physica Sinica*, 2017, 66(12): 120601. (in Chinese).
- [27] MA L H, WANG ZH, CHEONG K P, *et al.*. Mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy in flame measurements[J]. *Proceedings of the Combustion Institute*, 2019, 37(2): 1329-1336.
- [28] MA L H, WANG ZH, CHEONG K P, *et al.*. Temperature and H<sub>2</sub>O sensing in laminar premixed flames using mid-infrared heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2018, 124(6): 117.
- [29] DUAN K, HU M Y, JI Y B, *et al.*. High-temperature ammonia detection using heterodyne phase-sensitive dispersion spectroscopy at 9.06 μm[J]. *Fuel*, 2022, 325: 124852.
- [30] HU M Y, REN W. Wavelength-modulation dispersion spectroscopy of NO with heterodyne phase-sensitive detection[J]. *Optics Letters*, 2022, 47(11): 2899-2902.
- [31] LOU X T, WANG Y, DONG Y K. Multipoint dispersion spectroscopic gas sensing by optical FMCW interferometry[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(23): 5950-5953.
- [32] TOLL J S. Causality and the dispersion relation: logical foundations[J]. *Physical Review*, 1956, 104(6): 1760-1770.

#### 作者简介:



马柳昊(1990—),男,湖北荆州人,博士,副研究员,硕士生导师,2012,2015年于华中科技大学分别获得学士和硕士学位,2019年于香港中文大学获得博士学位,主要从事大载荷、强辐射、非均匀燃烧流场光学诊断技术和新型激光色散光谱高温传感技术。E-mail: liuhaoma@whut.edu.cn