

# 基于残余幅度调制确定频率调制光谱探测相位的理论和实验研究

付小芳 马维光 谭巍 赵刚 李志新 董磊 张雷 尹王保 贾锁堂

(山西大学 激光光谱实验室, 量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006)

**摘要** 提出了一种基于残余幅度调制确定频率调制光谱探测相位的方法。基于理论分析得出当频率调制光谱系统存在残余幅度调制且无样品气吸收时, 光谱信号与探测相位的余弦成正比, 可直接确定探测相位。通过采用低频电压控制电光调制器提高了探测相位的测量精度, 通过与有吸收时频率调制光谱线型拟合获得的相位进行对比, 偏差控制在  $0.04 \text{ rad}(2^\circ)$  以内, 证实了该方案的可行性, 提高了探测相位的测量速度。

**关键词** 测量; 频率调制光谱; 探测相位; 残余幅度调制; 电光调制器

中图分类号 O433.1; TN247 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201333.0530002

## Theoretical and Experimental Researches on the Detection Phase Determination of Frequency Modulation Spectroscopy Based on the Residual Amplitude Modulation

Fu Xiaofang Ma Weiguang Tan Wei Zhao Gang Li Zhixin Dong Lei  
Zhang Lei Yin Wangbao Jia Suotang

(State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices,

Laser Spectroscopy Laboratory of Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China)

**Abstract** A method of determining the detection phase of frequency modulation spectroscopy based on the residual amplitude modulation is proposed. According to the theoretical analysis, when there is a residual amplitude modulation in the frequency modulation spectroscopy, the signal amplitude without absorption is proportional to the cosine of detection phase. Based on this result, the detection phase could be determined directly by experiment. In order to increase the measure accuracy, a low frequency voltage control is applied to the electro-optical modulator. Comparing with the detection phase given by fitting the lineshape of frequency modulation spectroscopy with absorption, the new measured detection phase shows a deviation of less than  $0.04 \text{ rad}(2^\circ)$ , which verifies the validity of the new detection method and raises the measure speed of detection phase.

**Key words** measurement; frequency modulation spectroscopy; detection phase; residual amplitude modulation; electro-optic modulator

**OCIS codes** 020.3690; 060.2340; 140.3518; 300.6190

## 1 引言

随着现代工业的迅猛发展, 大量污染、有毒及危

险气体(如:  $\text{CO}_2$ 、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_x$  等)的排放和泄漏严重地威胁着人类的安全, 对其的治理迫在眉睫, 而治理

收稿日期: 2013-01-22; 收到修改稿日期: 2013-02-01

基金项目: 国家 973 计划(2012CB921603)、国家 863 计划(2009AA063006)、国家自然科学基金(61127017、61275213、61205216、61108030、61178009、60908019)和山西省青年科学基金(2010021003-3、2012021022-1)资助课题。

作者简介: 付小芳(1987—), 女, 硕士研究生, 主要从事高灵敏痕量气体检测技术方面的研究。

E-mail: fxf\_sxdx2011@126.com

导师简介: 马维光(1976—), 男, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事激光技术和超灵敏红外痕量气体探测技术等方面的研究。E-mail: mwg@sxu.edu.cn(通信联系人)

的前提是对污染气体进行准确地浓度检测,掌握其空间分布及规模等相关信息<sup>[1]</sup>。因此,发展高灵敏、实时的痕量气体检测技术有着重要的现实意义。目前,传统的气体检测方法有电化学法<sup>[2]</sup>、气相色谱法<sup>[3]</sup>、接触燃烧法<sup>[4]</sup>、非分光红外技术法<sup>[5]</sup>及热导法<sup>[6]</sup>等。但是,这些方法需要采样、响应速度慢、效率和灵敏度低、选择性差。激光光谱技术由于具有可在线检测、实时反馈、响应速度快、灵敏度及分辨率高、动态范围大等优点被广泛地应用到痕量气体检测的相关领域<sup>[7]</sup>,成为该领域的发展方向 and 主流技术。

激光光谱技术是基于激光与原子、分子相互作用的机理来获得目标气体浓度的检测技术<sup>[8,9]</sup>。目前发展起来的激光光谱技术主要包括直接吸收光谱(DAS)技术<sup>[8]</sup>、波长调制光谱(WMS)技术<sup>[10]</sup>、频率调制光谱(FMS)技术<sup>[11]</sup>、腔增强吸收光谱(CEAS)技术<sup>[12]</sup>以及结合 FMS 和 CEAS 的噪声免疫腔增强外差分子光谱(NICE-OHMS)技术<sup>[13]</sup>,其最小可探测吸收覆盖范围为  $10^{-3} \sim 10^{-13}$ ,但这些技术复杂程度却越来越高。其中,DAS 技术最小可探测吸收约为  $10^{-3}$ ,是最简单的光谱技术也是各高灵敏激光光谱技术的基础。NICE-OHMS<sup>[13]</sup> 技术最小可探测吸收达到  $10^{-13}$ ,是目前探测灵敏度最高的激光光谱技术。DAS 和 WMS 由于其结构简单已经被广泛地应用到了现场检测中,相比于这两种技术,FMS 具有更高的探测灵敏度,但相比于其他技术又结构简单,因此成为可走向实用的光谱测量技术之一,同时在基础研究中不仅可用来同时测量原子、分子的吸收和色散,还是 NICE-OHMS 的关键技术,因此对其性能的研究具有非常重要的意义。在实际领域的测量应用中,采用光纤器件不仅可以使设备小型化,同时可以降低系统的复杂性,因此发展基于商品化的光纤电光调制器(EOM)、光纤环形器、光纤分束器等的光纤 FMS 技术成了一个新的方向。

FMS 技术是激光输出线偏振光被 EOM 射频调制后通过气体样品吸收池并入射到高速探测器,探测器探测到的射频信号与移相后的调制信号进行混频后获得 FMS 信号<sup>[11]</sup>。原理上讲,该技术是一项零背景的探测技术,需要通过标准气标定来最终应用到实际气体浓度的反演,同时信号的线型和幅度受探测相位影响很大,在应用中需要确定出混频前探测器输出的调制频率信号与解调射频信号的相位差(通常称为探测相位),该探测相位是由移相器中的多圈电位器控制,其大小只与光路、射频电路长

度,各种仪器的相移等有关,因此多圈电位器的具体刻度无法与探测相位准确对应。一般确定的方法是对测量获得的气体 FMS 信号进行线型拟合<sup>[13]</sup>,但是该方法需要标准气的参与,不仅测量速度慢,同时由于实际应用过程中标准气参数、调制频率及调制幅度等的测量不准确性,使得线型拟合存在较大的误差,因此急需一种快速且准确测量探测相位的方法。

本文提出了基于残余幅度调制(RAM)快速测量探测相位的新方案。RAM 是当系统引入光纤器件或光源输出光的偏振态不稳定等因素时,使得输入到 EOM 的线偏振光方向与调制方向不一致,在电光晶体的双折射效应影响下造成激光在调制方向和垂直调制方向上分解,这样两个方向的光程由于折射率不同而不同,使得输出 FMS 信号存在一个直流偏置和线型扭曲<sup>[14]</sup>,其中直流偏置极易使后续信号处理系统出现饱和,而线型扭曲又使得浓度测量出现较大误差,因此多个研究小组对 RAM 抑制进行了深入的研究<sup>[15~18]</sup>,基于低频控制来补偿 EOM 中双折射效应造成的调制方向和垂直调制方向传输光的相位差。通过对 RAM 的理论进行分析后得出当 FMS 系统中存在 RAM,且光路中无吸收样品时,解调后的 FMS 信号幅度与探测相位成余弦变化关系,通过测量移相器中多圈电位器不同刻度下的 RAM 幅度以最大值归一化后做反余弦操作即可确定出探测相位。

## 2 理论分析

EOM 中电场的调制通常沿着电光晶体的非寻常光轴(e 轴)方向,设置激光源输出的线偏振光方向与 e 轴一致,经过 EOM 调制的激光场通过气体样品池,而后被高速探测器探测。用于调制的射频信号分为两路,一路作为调制信号输入到 EOM 的射频输入端,另一路通过移相器与探测器探测信号进行混频,混频后的信号通过低通滤波之后便得到 FMS 信号<sup>[11]</sup>:

$$I_{\text{FM}} = I_0 J_0(\beta) J_1(\beta) \exp(-2\delta_0) [(\delta_{-1} - \delta_1) \sin \varphi + (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0) \cos \varphi], \quad (1)$$

式中  $I_0$  为初始光强, $J_{0,1}$  为零阶和一阶贝塞尔函数, $\beta$  为调制系数, $\delta_i$  和  $\varphi_i$  分别表示第  $i$  阶边带对应光场的幅度衰减和光学相移, $\varphi$  为探测相位。

然而,通常情况下激光器输出线偏振光的偏振不能完全沿 EOM 的 e 轴方向入射且成  $\alpha$  角,当该束频率为  $\omega_c$ ,幅度为  $E_0$  的激光场  $E_0 \exp(i\omega_c t)$  入射到 EOM 后,光场会沿 o 轴和 e 轴分解为

$$E_o = E_o \sin \alpha \exp[i(\omega_c t + \phi_o)]$$

$$E_e = E_o \cos \alpha \exp[i(\omega_c t + \phi_e + \phi_{if} + \beta \sin \omega_m t)], \quad (2)$$

式中  $\phi_o$ 、 $\phi_e$  为沿 o 轴和 e 轴偏振光传输通过 EOM 后的相位变化,  $\phi_{if}$  是 EOM 低频电压控制端输入电压引起的相位变化,  $\omega_m$  为调制射频频率。由于任意

玻璃尤其是探测器前的窗口具有一定的偏振效应, 因此为了分析方便, 这里假设探测器前放置一个偏振片, 其偏振方向与 EOM 的 o 轴方向夹角为  $\gamma$ , 透过该偏振片的激光场可以表示为

$$E_2(t) = E_o \{ \sin \alpha \cos \gamma + \cos \alpha \sin \gamma [J_0(\beta) \exp(-i\Delta\phi) + J_1(\beta) \exp[i(\omega_m t - \Delta\phi)] - J_1(\beta) \exp[-i(\omega_m t + \Delta\phi)]] \} \exp[i(\omega_c t + \phi_o)], \quad (3)$$

式中采用了贝塞尔函数展开, 其中  $\Delta\phi = \phi_o - \phi_e - \phi_{if}$ 。当  $\beta \ll 1$  时, 所有大于一阶的贝塞尔函数可以忽略不计。该激光场通过样品气经解调后的 FMS 信号可以表示为

$$I_{FM} = I_o J_0 J_1 \exp(-2\delta_0) \cos^2 \alpha \sin^2 \gamma [(\delta_{-1} - \delta_1) \sin \varphi - (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0) \cos \varphi] + 0.5 I_o J_1 \exp(-2\delta_0) \sin 2\alpha \sin 2\gamma \{ [(\delta_{-1} - \delta_1) \cos \Delta\phi + (\phi_{-1} - \phi_1) \sin \Delta\phi] \sin \varphi - [(2 + 2\delta_0 - \delta_1 - \delta_{-1}) \sin \Delta\phi + (\phi_1 + \phi_{-1} - 2\phi_0) \cos \Delta\phi] \cos \varphi \}. \quad (4)$$

(4) 式为存在 RAM 时的 FMS 信号, 与 (1) 式相比, 等式右边第二项为由于 RAM 引起的线型扭曲项, 严重依赖于  $\Delta\phi$  的变化。当样品池内无样品时, 该 FMS 信号可以简化为

$$I_{FM}^0 = -I_o J_1(\beta) \sin 2\alpha \sin 2\gamma \sin \Delta\phi \cos \varphi. \quad (5)$$

可知, 当  $I_o$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$  和  $\Delta\phi$  一定的时候,  $I_{FM}^0$  与探测相位  $\varphi$  成余弦关系, 因此可以通过测量  $I_{FM}^0$  幅度以最大值归一化后取反余弦即可获得探测相位。(5) 式中  $I_o$ 、 $\beta$ 、 $\alpha$ 、 $\gamma$  可通过光学或电学设定为常数, 而 EOM 中的  $\Delta\phi$  受环境影响较大, 实验中很难设定为常数, 这几个值的大小对探测相位都无影响。

### 3 实验装置及过程

基于 RAM 确定 FMS 探测相位的实验装置如图 1 所示。分布反馈 (DFB) 激光器 (NTT Electronics, NLK1S5GAAA, 日本) 由控制器 (ILX lightwave, LDC-3724C, 美国) 设定温度为 22.1 °C, 偏置电流为

120 mA, 并由单模光纤输出。该激光经过偏振片和 1/2 波片实现其偏振方向的控制, 然后耦合进光纤 EOM (Photline MPX-LN-0.5, 法国, 调制带宽 DC-500 MHz, 半波电压约 6 V), 输出的激光通过样品池 C 和偏振片 P 后入射到高速探测器 PD (NEW FOCUS 1611, 美国, 带宽 1 GHz)。射频源 RF 发出的信号分为两路, 一路送给 Bias T 与低频控制信号相加后送给 EOM 的输入端, 另一路经过移相器 PS (Mini Circuits JSPHS-446+, 美国, 带宽 366~446 MHz) 与功率放大器 PA (Mini Circuits ZRL-700+, 美国, 带宽 250~700 MHz, 放大倍数 30 dB) 放大的探测信号经混频器 (Mini Circuits ZLW-1, 美国) 混频, 输出信号再被低噪声前置放大器 LP (Stanford Research System SR560, 美国) 滤波放大后获得  $I_{FM}^0$ 。实验中的射频源输出信号频率为 369 MHz, 输入 EOM 的功率约为 10 dBm。实验中为了实现对光纤 EOM 的温度控制, 将其夹在两个厚约 5 mm

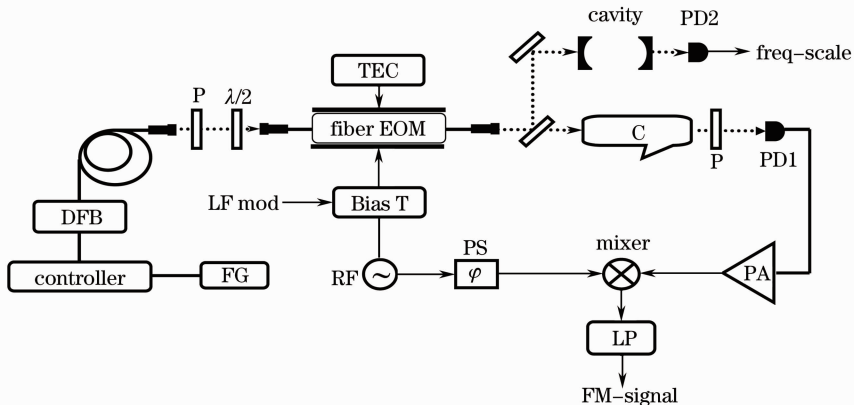


图 1 基于 RAM 确定 FMS 探测相位的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup for the detection phase of FMS based on the RAM

的铝板中间,通过热敏电阻和帕尔贴的组合来对系统的温度进行测量和控制,温度控制器采用 Newport 的 350B,其控温精度约  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。Mini Circuits 的移相器 Mixer 是通过加在 JSPHS-446+ 芯片的 1 和 7 脚加  $0\sim 12\text{ V}$  电压来获得射频信号的相位移动,实验中采用分压电路通过多圈电位器来控制加在 1 脚上的电压来实现,该多圈电阻阻值为  $10\text{ k}\Omega$ ,可调十圈,刻度为直接购买的多圈电阻刻度旋钮,该旋钮为 10 个一级刻度且每个一级刻度下有 10 个二级刻度,刻度与阻值成线性关系。EOM 通常有块状和波导型两种,都可以通过温度调节两正交偏振方向的相位,但前者半波电压一般在几百伏,后者很低,本研究采用的光纤 EOM 约为  $6\text{ V}$ ,因此极易实现低压低频控制。如果按照(5)式进行直接探测相位测量时,需要假定  $\cos\varphi$  前的系数为常数。然而考虑到环境的不稳定性,尤其是温度和输入到 EOM 的电压变化较大时,  $\Delta\phi$  不是常数,因此直接测量准确度不高。由于  $\cos\varphi$  前系数与  $\Delta\phi$  成正弦关系,如果连续改变  $\Delta\phi$ ,该系数将会出现正负极值,通过对其峰峰值的测量即可避免电压和温度的影响,从而获得不同刻度下的探测相位。

为了与该结果比较,同时还进行了对不同相位刻度下气体 FMS 线型的测量与拟合,具体是将光路中的吸收池充入乙炔样品气,同时对激光的频率进行三角波扫描,而激光的相对频率采用法布里-珀罗(FP)腔的透射信号来定标。激光中心频率在  $6546.8978\text{ cm}^{-1}$  附近,对应乙炔  $\nu_1 + \nu_3$  (对称 CH 拉伸振动和反对称 CH 拉伸振动的组合态)带 P4e 支吸收线,该线强度为  $2.675 \times 10^{-21}\text{ cm}^{-1}/(\text{molecule} \cdot \text{cm}^{-2})$ <sup>[19]</sup>。乙炔样品池长度为  $5\text{ cm}$ ,气压为  $5.282 \times 10^3\text{ Pa}$ (通过对直接吸收测量结果拟合获得),最终获得的 FMS 信号通过(1)式进行最小二乘法拟合。

## 4 实验结果

基于(5)式,为了精确确定探测相位,需要对  $\Delta\phi$  进行线性扫描,而通常的做法是通过 EOM 的温度控制和低频电压控制,因此为了验证  $\Delta\phi$  对两者的依赖关系,随意设定移相器的多圈电位器刻度为 '9.5',此时加在移相器上的电压为  $11.4\text{ V}$ ,分别对不同 EOM 温度和控制电压下无吸收且探测相位固定的 FMS 信号进行测量。如图 1 所示,通过调节光纤 EOM 前  $1/2$  波片以及探测器前偏振片角度,使得  $\alpha$  和  $\gamma$  都约为  $5^{\circ}$ ,由(5)式可知,FMS 存在 RAM,该小角度的选择对 FMS 线型影响较小,且无

吸收时的信号信噪比较大。测量 EOM 温度对  $\Delta\phi$  的影响,改变光纤 EOM 温度从  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  到  $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,每间隔  $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$  测量一个 FMS 信号的平均电压,测量结果如图 2 所示,其中圆点为不同温度下平均电压幅度,实线为正弦拟合结果,可见两者符合得较好,基于(5)式可以证明  $\Delta\phi$  随温度呈线性变化,同时可见温度控制相位变化周期约为  $0.76^{\circ}$ ,与文献[16]中图 3 的测量结果基本一致(两者使用的 EOM 皆为  $\text{MgO}:\text{LiNbO}_3$  材料制成)。另外,实验测量正弦峰峰值逐渐变大主要是由于偏振片前激光偏振态变化导致输入到 EOM 激光的功率起伏引起的,起伏大概在  $10\%$  左右,拟合的电压幅度约为  $1.62\text{ V}$ 。

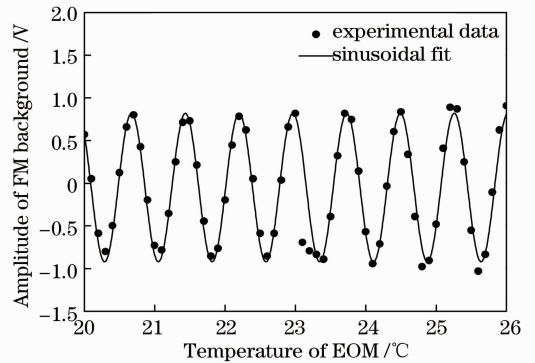


图 2 FMS 信号与 EOM 温度的响应关系  
Fig. 2 Response relationship between FMS signal and temperature of EOM

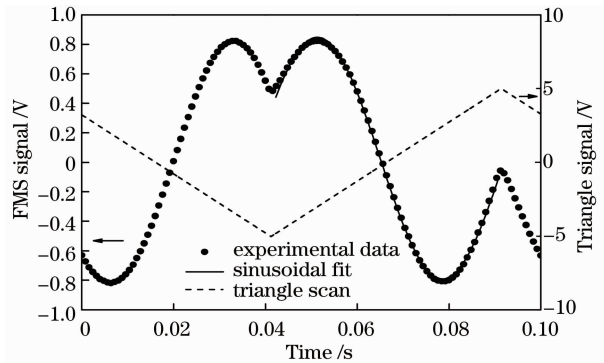


图 3 FMS 信号与 EOM 低频电压的响应关系  
Fig. 3 Response relationship between FMS signal and the low frequency voltage of EOM

接下来测量 EOM 控制电压对  $\Delta\phi$  的影响,将一峰峰值为  $10\text{ V}$ ,频率为  $10\text{ Hz}$  的三角波信号通过 Bias T 与射频信号同时送给 EOM,测量获得的无吸收 FMS 信号如图 3 所示,其中虚线为加在 EOM 上的三角波电压信号,圆点为实验测得 FMS 信号与 EOM 低频电压的响应关系曲线,图中每 40 个数据显示一个点,实线为正弦波拟合结果,图中仅对扫描三角波上升部分进行了拟合,获得的峰峰值约为

1.64 V, 与温度测量获得的峰峰值基本相同, 验证了电压对  $\Delta\phi$  的响应成线性关系。

考虑到温度的控制速度较慢, 无法对相位进行快速测量, 因此本研究最终选择电压控制来测量特定探测相位下  $I_{\text{FM}}^0$  随  $\Delta\phi$  变化的峰峰值。改变移相器刻度从 0 到 10, 每隔 0.5 刻度在低频电压扫描下测量一个  $I_{\text{FM}}^0$  的峰峰值, 实验中由于在不同相位刻度下移相器对射频功率的衰减不同, 这就使得混频后的  $I_{\text{FM}}^0$  也不同, 需要对其进行修正。另外由于混频器是将两个射频电压信号相乘获得  $I_{\text{FM}}^0$ , 因此需先将功率信号以混频器输入阻抗为  $50\ \Omega$  转换为电压, 以电压平均值作为标准, 其他各相位射频电压相对于平均电压的百分比作为修正系数对  $I_{\text{FM}}^0$  进行修正。如图 4 所示的五星为修正前的原始数据, 而原点为修正后的结果, 可见在刻度为‘6’时, 达到最大值, 此时对应色散相位, 也即  $\varphi=0^\circ$  或  $180^\circ$ 。在刻度为‘3’时接近零, 而在零位置处  $\varphi=90^\circ$ , 即吸收相位。对修正后的测量结果以刻度‘6’处的数值绝对值进行归一化, 并取反余弦, 即可获得探测相位如图 4 所示的三角形数据, 由于反余弦的取值范围为  $[0, \pi]$ , 对大于  $\pi$  的相位为了连续进行了如下变换:  $\varphi=2\pi - \cos^{-1}(f_{\text{NPP}})$ , 其中  $f_{\text{NPP}}$  为归一化的  $I_{\text{FM}}^0$  的峰峰值。

为了验证测量结果的准确性, 又实验测量了光路中存在样品气时的 FMS 信号, 并且通过调节 EOM 前  $1/2$  波片和探测器前偏振片, 使得  $\alpha$  和  $\gamma$  都接近  $0^\circ$ , 同时去掉加在 EOM 上的三角波扫描电

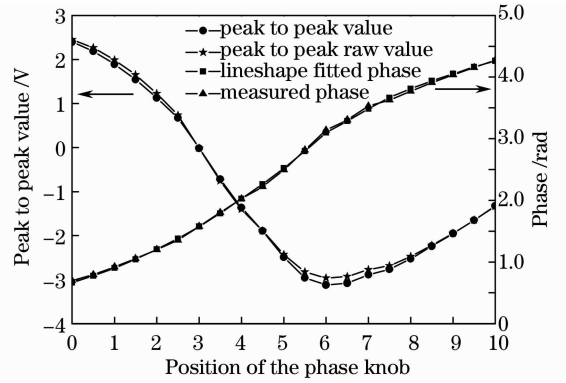


图 4  $I_{\text{FM}}^0$  峰峰值的原始结果与修正结果及探测相位的测量结果与拟合结果的比较

Fig. 4 Raw and revised results of  $I_{\text{FM}}^0$  and the comparison of measured and fitted detection phase

压, 此时 RAM 对 FMS 信号的影响可以忽略。然后给激光控制器加一峰峰值为 0.6 V、频率为 10 Hz 的三角波扫描电压, 测量不同相位刻度下的 FMS 信号, 测量出来的原始信号采用 FP 腔进行频率定标, 具体数据处理过程参考文献[15]。再后基于 Matlab 程序采用最小二乘法对测量数据进行拟合, 拟合参量包括吸收线中心、探测相位、信号幅度以及偏置, 图 5 为相位刻度设置为‘2.5’和‘6’时的拟合结果, 经过拟合其探测相位分别为 1.44 rad( $82.4^\circ$ ) 和 3.14 rad( $180^\circ$ ), 拟合后的误差控制在 4% 以内, 最终拟合获得的不同相位刻度下的探测相位如图 4 所示的方形数据所示, 可见与基于 RAM 确定的相位基本一致, 最大偏差约为  $0.04\ \text{rad}(2^\circ)$ 。

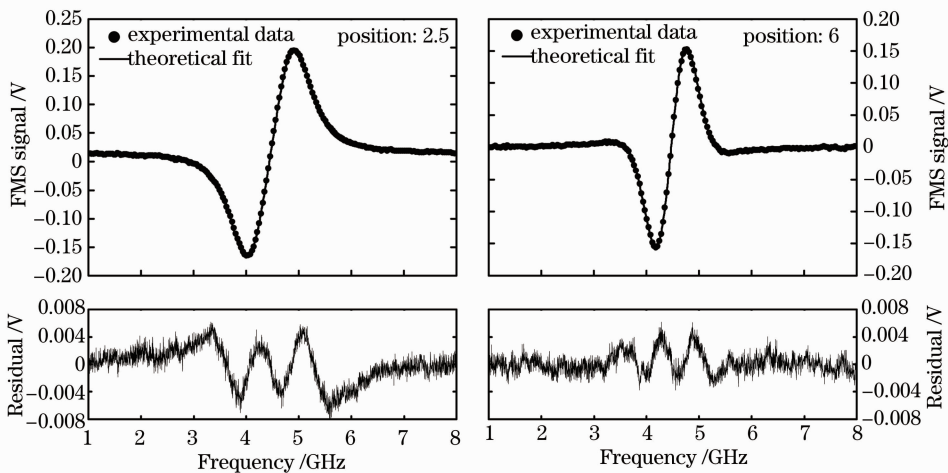


图 5 移相器刻度为 2.5 和 6 时的 FMS 信号拟合结果

Fig. 5 Fitted results of FMS signal at knob 2.5 and 6

## 5 结 论

理论上简单分析了 RAM 的产生机理, 推导了

存在 RAM 的有、无吸收时的 FMS 线型表达式, 提出了无样品气时基于 RAM 确定 FMS 探测相位的



方法。实验中采用扫描  $\Delta\phi$  的方法避免了环境温度和 EOM 输入端噪声电压对测量准确性的影响,同时通过实验确定了 EOM 温度和驱动电压与  $\Delta\phi$  成线性关系。考虑到温度控制较慢的原因,采用了低频电压控制  $\Delta\phi$  的方法测量出了探测相位。为了与该方法的结果进行比较,还对乙炔吸收线的 FMS 信号进行了测量,在与理论光谱线型拟合的误差小于 4% 的情况下确定出了探测相位。比较两种方法获得的相位结果偏差在 0.04 rad(2°) 以内。该技术快速、准确的优点将为 FMS 技术走向应用提供了必要的技术储备。

## 参 考 文 献

- Zheng Longjiang, Li Peng, Qin Ruifeng *et al.*. Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 24~32  
郑龙江, 李 鹏, 秦瑞峰等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 24~32
- Zhu Liang, Yan Long, Zou Bing *et al.*. Design of portable detection instrument for hydrogen sulfide [J]. *Instrument Technique and Sensor*, 2011, 3: 31~33  
朱 亮, 严 龙, 邹 兵等. 便携式硫化氢检测仪[J]. *仪表技术与传感器*, 2011, 3: 31~33
- Zhang Xiaoxing, Yao Yao, Tang Ju *et al.*. Actuality and perspective of proximate analysis of SF<sub>6</sub> decomposed products under partial discharge [J]. *High Voltage Engineering*, 2008, **34**(4): 664~669  
张晓星, 姚 尧, 唐 炬等. SF<sub>6</sub> 放电分解气体组分分析的现状和发展[J]. *高电压技术*, 2008, **34**(4): 664~669
- Song Xiaohui, Hai Zhongtian. The development of the contact combustion type of the gas sensor [J]. *Measurement Technique*, 2007, 8: 76~78  
宋晓辉, 海中天. 接触燃烧式气敏传感器的研制[J]. *计量技术*, 2007, 8: 76~78
- Zhang Jingchao, Liu Jin, Wang Yutian *et al.*. Study on a novel optical fiber CO gas sensor [J]. *J. Optoelectronics Laser*, 2004, **15**(4): 428~431  
张景超, 刘 瑾, 王玉田等. 新型光纤 CO 气体传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2004, **15**(4): 428~431
- Du Binxian, Chen Jinrun, Yin Jun. The improvement of the working principle and detection method of the thermal conductivity type gas sensor [J]. *Chemical Engineering & Equipment*, 2010, 2: 64~66  
杜彬贤, 陈今润, 尹 军. 热导式气体传感器工作原理及检测方法改进[J]. *化学工程与装备*, 2010, 2: 64~66
- Jiang Fuchun, Zhu Changping, Lin Shanming *et al.*. Current situation and application of gas thickness detecting technology [J]. *J. Hohai University Changzhou*, 2004, **18**(1): 16~19  
江福椿, 朱昌平, 林善明等. 气体浓度检测技术的现状和应用[J]. *河海大学常州分校学报*, 2004, **18**(1): 16~19
- V. Nagali, S. I. Chou, D. S. Baer *et al.*. Tunable diode-laser absorption measurements of methane at elevated temperatures [J]. *Appl. Opt.*, 1996, **35**(21): 4026~4032
- 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
- Ma Weiguang, Yin Wangbao, Dong Lei *et al.*. High-sensitivity detection of methane near 6106 cm<sup>-1</sup> using tunable external-cavity diode laser [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2005, **44**(4A): 1961~1965
- G. C. Björklund. Frequency-modulation spectroscopy: a new method for measuring weak absorptions and dispersions [J]. *Opt. Lett.*, 1980, **5**(1): 15~17
- B. A. Paldus, A. A. Kachanov. An historical overview of cavity-enhanced methods [J]. *Canadian J. Physics*, 2005, **83**(10): 975~999
- A. Foltynowicz, W. G. Ma, F. M. Schmidt *et al.*. Doppler broadened noise immune cavity enhanced optical heterodyne molecular spectrometry signals from optically saturated transitions under low pressure conditions [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 2008, **25**(7): 1156~1165
- Zhang Hu, Zhang Yongzhi, Yin Zhaoxia *et al.*. Theoretical analysis of the residual amplitude modulation of frequency modulation strong absorption spectroscopy [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, **32**(5): 1334~1338  
张 虎, 张永智, 尹朝霞等. 频率调制强吸收光谱中残余幅度调制的理论分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, **32**(5): 1334~1338
- Zhang Yongzhi, Li Zhixin, Yan Xiaojuan *et al.*. Optimization of frequency modulation spectral lineshape influenced by the residual amplitude modulation based on the low frequency control of electro-optic modulator [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, **32**(3): 0330001  
张永智, 李志新, 闫晓娟等. 电光调制器低频控制对受残余幅度调制影响的频率调制光谱线型优化研究[J]. *光学学报*, 2012, **32**(3): 0330001
- Li Liufeng, Liu Fang, Wang Chun *et al.*. Measurement and control of residual amplitude modulation in optical phase modulation [J]. *Review Scientific Instruments*, 2012, **83**(043111): 1~10
- Isak Silander, Patrick Ehlers, Junyang Wang *et al.*. Frequency modulation background signals from fiber-based electro optic modulators are caused by crosstalk [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 2012, **29**(5): 916~923
- N. C. Wong, J. L. Hall. Servo control of amplitude modulation in frequency modulation spectroscopy: demonstration of shot-noise-limited detection [J]. *Journal of Optical Society of America B*, 1985, **2**(9): 1527~1533
- L. S. Rothman, I. E. Gordon, A. Barbe *et al.*. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *J. Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2009, **110**(9-10): 533~572

栏目编辑: 李文誌