

## Study on the Compensation Technology of Remaining Light Intensity Modulation in TDLAS\*

LIANG Bo<sup>1</sup>, ZHU Yong<sup>1\*</sup>, BAO Weiyi<sup>1</sup>, CHEN Junqing<sup>2</sup>, ZHANG Jun<sup>2</sup>, CHEN Jun<sup>2</sup>

(1. The Key Laboratory for Optoelectronic Technology & Systems, Education Ministry of China, Chongqing University, Chongqing 400030, China; )  
(2. Technical Center, Chongqing Sichuan Instrument Complex Co. Ltd, Chongqing 400030, China)

**Abstract:** The influence of the remaining intensity modulation on second harmonic detection and digital signal processing in tunable diode laser absorption spectroscopy system was analyzed. A synchronous compensation method was put forward and an experimental setup based on the variable optical attenuator (MEMS VOA) was put up. The experimental result shows that with the synchronous compensation of the VOA, the remaining intensity modulation level was dropped down to 1/20 of its original level, and about 60 % of the second harmonic distortion was removed. The feasibility of this synchronous compensation method was tentatively demonstrated by our experiments.

**Key words:** absorption spectroscopy; remaining light intensity modulation; attenuator; compensation

EEACC: 7220

## 可调谐激光二极管吸收光谱残余光强调制补偿技术研究\*

梁波<sup>1</sup>, 朱永<sup>1\*</sup>, 鲍伟义<sup>1</sup>, 陈俊清<sup>2</sup>, 张军<sup>2</sup>, 陈俊<sup>2</sup>

(1. 重庆大学光电技术及系统教育部重点实验室, 重庆 400030; )  
(2. 重庆四联集团技术中心, 重庆 401121)

**摘要:** 分析了可调谐激光二极管吸收光谱仪器中残余光强幅度调制对谐波探测和全数字化信号处理的影响; 搭建了基于电压可调谐光强衰减器 (MEMS VOA) 的光强残余幅度调制的补偿实验系统平台; 实验结果表明, 本补偿装置可以把残余光强调制降低到补偿前的 1/20, 并将其带来的二次谐波线型畸变降低 60 % 以上; 初步证实了利用本方法消除二次谐波畸变并实现全数字化处理的可行性。

**关键词:** 吸收光谱; 残余光强调制; 衰减器; 补偿

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2010)07-0939-05

大气污染日益成为人类面临的严重环境问题。高消耗、高排放工矿企业在生产过程中所排放的煤烟、粉尘及有害化合物为能源利用效率的重要指标<sup>[1-2]</sup>, 因此, 对这些气体的浓度进行准确、快速的在线测量监测则显得尤为重要<sup>[3]</sup>。相比各种气体检测技术<sup>[4]</sup>, 可调谐二极管激光吸收光谱技术<sup>[5-6]</sup> (Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy) 具有恶劣环境适应性强, 精度高, 响应快, 可同时检测多种气体参数等优点, 已经被广泛应用于环境监测、大气科学、痕量分析、光谱测量等领域<sup>[7-9]</sup>。

目前采用的可调谐激光二极管通过注入电流改变波长实现对激光波长的调制, 但输出光强也随注

入电流呈线性变化, 在波长调制的同时也引入了光强的调制, 由此产生的残余光强调制信号<sup>[10-11]</sup>作为谐波探测的主要背景信号严重地影响弱吸收信号的探测<sup>[12]</sup>。具体而言, 引入光强余弦调制, 增加了探测的奇次谐波成份, 使检测到的二次谐波信号不对称导致线型的畸变, 给检测造成了一定的误差; 其次, 吸收信号非常微弱, 与余弦调制光强噪声相差 3~4 个数量级, 不易检测; 如前端信号放大后直接采用 A/D 处理, 则需要采用位数很高的 A/D 芯片来保证测量精度, 这也对实现全数字化信号解调的电路设计提出了更高的要求。

针对以上两个问题, 本文分析了残余光强调制

项目来源: 国家“863”计划项目资助 (2006AA040311)

收稿日期: 2010-01-20 修改日期: 2010-03-01

对信号处理的影响,提出了基于电压可调谐光强衰减器(MEMS VOA)的光强补偿方案,对残余光强调制的干扰信号进行抑制。

## 1 理论分析

### 1.1 波长调制

在未饱和的弱吸收情况下,气体对光的吸收可以用 Beer-Lambert 定律<sup>[13]</sup>来描述:

$$I(v) = I_0(v) \exp[-S(T)g(v-v_0)PL\rho] \quad (1)$$

其中,  $I_0, I(v)$  分别为激光输入光强和透射光强,  $S(T)$  为气体吸收谱线在温度  $T$  时候的谱线强度,  $g(v, v_0)$  为气体该吸收谱线的线型函数  $\int g(v, v_0) dv = 1$ ,  $P$  为工作气体压力,  $\rho$  为气体浓度,  $L$  为激光穿过气体的长度。

气体的吸收线型函数是 Voigt 函数,它是洛伦兹函数(Lorentzian)和高斯函数(Gaussian)的卷积,在不同的温度和气压情况下,可以等效为高斯函数或洛伦兹函数,对压力展宽占优的环境,  $g(v)$  用洛伦兹函数表示<sup>[14]</sup>:

$$g(v, v_0) = \frac{1}{\pi \Delta v} \frac{1}{1 + \left(\frac{v - v_0}{\Delta v}\right)^2} \quad (2)$$

其中  $v_0$  为吸收谱线中心频率,  $\Delta v$  为谱线宽度的一半。激光的中心频率  $v_0$  受到频率为  $\omega$  的调制波调制时,瞬时频率可以表示为:

$$v = v_c + kt + \delta v \cos \omega t \quad (3)$$

其中,  $\delta v$  为频率调制幅度。激光通过气体吸收后探测强度可以用  $I(v)$  的余弦傅里叶级数来表示:

$$I(v, t) = I_0 \sum_{n=0}^{\infty} A_n(v) \cos(n\omega t) \quad (4)$$

考虑理想情况下  $I_0$  不变,通过扫描得到吸收线,同时忽略调制给  $I_0$  带来的幅度调制成份,当  $S(T)g(v-v_0)PL\rho \ll 1$  时,谐波分量  $A_n$  通过锁相放大器傅里叶  $n$  阶分量可以表述如下<sup>[15]</sup>:

$$A_n(v) = I_0 L \rho S(T) P \frac{2^{1-n}}{n!} a^n \frac{d^n g(v)}{dv^n} \quad n \geq 1 \quad (5)$$

其中由锁相放大器检测出来的二次谐波分量为:

$$A_2(v) = \frac{1}{4} I_0 L \rho S(T) P a^2 \frac{d^2 g(v)}{dv^2} \quad (6)$$

半导体激光器波长调制是通过注入电流的变化来实现调制的。理想情况下,不考虑残余光强幅度调制的影响,波长调制下气体吸收信号如图1所示。

### 1.2 残余光强调制分析

电流变化必然会引起一定的激光器输出光功率的能量起伏。在大多数情况下,对于多数激光器可

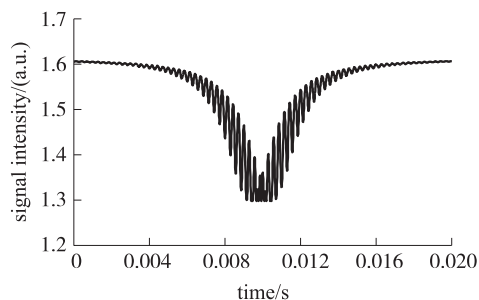


图1 气体吸收的光强信号示意

以认为在波长调制的工作区域内引起的幅度调制相对于注入电流是线性的,则输出光强可以表示为:

$$I_0 = I_c + kt + \delta I \cos \omega t \quad (7)$$

其中  $I_c$  为平均输出激光光强,  $\delta I$  为光强调制幅度。由此得出经过气体吸收的探测光强如图2所示。经过气体吸收的有用信号为光强调制信号的包络,由于吸收信号非常微弱,不容易检测,需要对其放大进行检测解调,在一个周期内波长扫描信号又引起光强线性调制;整个信号的信噪比很小,如直接数字化,并锁相放大器实现全数字化信号调理,对 A/D 采样电路提出了很高的要求。

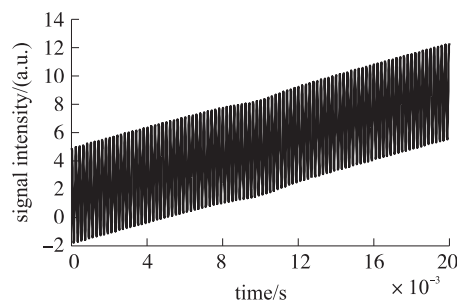


图2 激光经过气体吸收的探测光强示意

对常见的 DFB 激光二极管,激光器驱动电流的余弦变化,产生一个余弦的残余光强调制,其频率为  $f$ ,幅值为激光器输出光功率的  $k$  倍,即  $\delta I = kI_c$ 。考虑幅度调制以后的透射光强即可表示为:

$$I(v, t) = (I_c + kt + \delta I \cos \omega t) \sum_{n=0}^{\infty} A_n(v) \cos(n\omega t) \quad (8)$$

在二次谐波检测时,通过隔直电路处理可以将波长扫描引起的线性调制的部分滤除,这样可以主要考虑余弦调制的非线性部分对二次谐波检测输出信号的影响,忽略线性调制  $kt$  的影响,对应的波长调制吸收信号二次谐波分量则可以表示成:

$$I_{2f}(v, t) = \frac{\delta I}{2} A_1(v) + I_c A_2(v) + \frac{\delta I}{2} A_3(v) \quad (9)$$

从式(9)可以看到,检测到的  $2f$  信号除了包括起主要作用的吸收线形的二阶傅里叶分量  $A_2$  外,还包括由于线性幅度调制引入的奇次谐波分量  $A_1, A_3$ 。这些项的引入,使  $2f$  信号失去了原来的对称性。

图 3 为利用上式的数值解得到的实际  $2f$  信号以及各次谐波分量的模拟关系,考虑到压力展宽占优势的情况下,吸收谱线取洛伦兹线型,  $m$  取二次谐波最优调制参数。

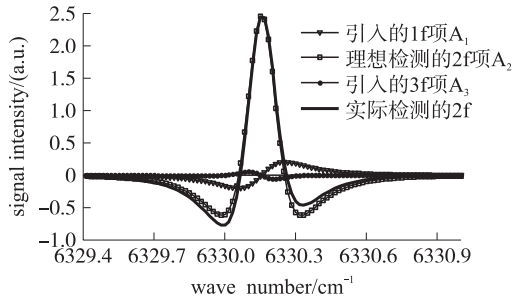


图 3 各次谐波分量和实际二次谐波

从图中可以看出,实际二次谐波  $2f$  信号由于光强残余调制引入的奇次谐波分量  $A_1$  和  $A_3$ , 相对于理想的二阶傅里叶分量  $A_2$  在线型上发生了改变,但只影响到了线型的两翼,由于对称吸收线型的奇次谐波分量在中心频率处为零,所以对  $2f$  信号的中心频率处的峰值并没有影响。

但在实际光电检测的中,并没有谐波分量为零的基准,一般采用波峰值与波谷值来表示信号幅值。其幅值表达式为:

$$S_2 = A_2(v_0) - A_2(v)_{\min} \quad (10)$$

由于线型的改变,通过计算,相对于理想二次谐波分量幅值,如果取实际  $2f$  信号波峰值与第一个波谷值,其误差为 5.06%;如果取  $2f$  信号波峰值与第二个波谷值,其误差为 4.94%。由此可见,光强的残余调制引起信号线型的畸变对于检测信号精度有较大影响。

## 2 补偿方案

考虑残余光强调制的影响,为了不改变原有电路数据处理部分,我们在光路中加入可调衰减器,使调制电压信号与波长调制信号同步匹配,以实现残余光强幅度干扰信号相应的抑制。图 4 为光路中的补偿方案,采用电压可调谐光强衰减器,对光强残余调制的幅度变化进行对应的衰减。

实验采用浙江海宁华平公司 MEMS VOA,其衰减和驱动电压的关系为:

$$\tau = 0.04 u^3 - 0.68 u^2 + 4.39 u - 8.44 \quad (11)$$

其中  $\tau$  为衰减度,单位 dB,  $u$  为调制电压,单位 V。

实验中,根据衰减器特性曲线与残余光强调制的关系在 MATLAB/Simulink 中建立如图 5 所示的信号仿真模型,产生时间同步波长调制信号和衰减器驱动电压信号。

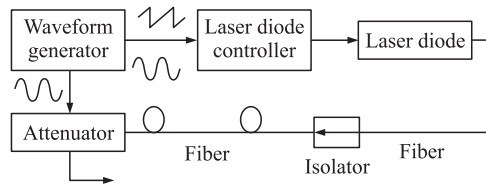


图 4 光路补偿方案示意

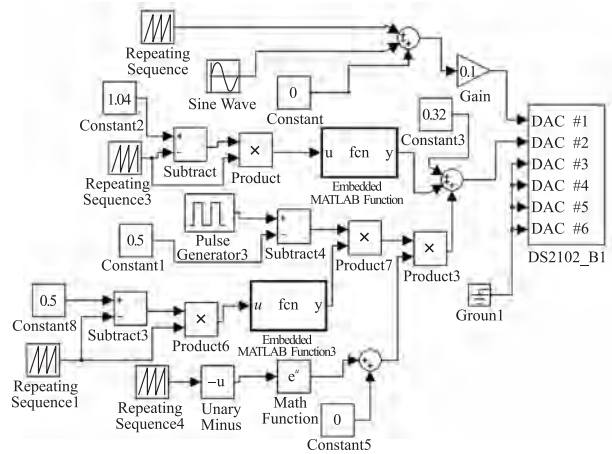


图 5 同步信号仿真模型

## 3 补偿实验

### 3.1 补偿实验系统

图 6 为利用电压可调 MEMS VOA 对波长调制中引入的光强残余调制的补偿实验系统装置示意图。可调谐分布反馈激光器(DFB)由激光二极管控制器(ITC 502)设定运转于恒定工作温度(22 ℃)模式, dSPACE 实时仿真系统产生激光二极管波长 100 Hz 的余弦调制信号和 1 Hz 的锯齿扫描电压信号,以及可调 VOA 的驱动电压信号。调制信号送入激光驱动器的频率调制输入口 MODE1, 转换成对应的半导体二极管电流调制信号。由于本实验系统将用于 CO<sub>2</sub> 的测量,因此实验中采用波长为 1 580 nm 的 DFB 激光二极管,并通过温度控制将其中心波长控制在 1 579.74 nm 附近,在此波长附近进行波长扫描和余弦调制。

经过调制的输出光,接入中心波长为 1 580 ± 5 nm 的光隔离器。为了对比补偿前后的效果,通过 Y 型耦合器分为两路光信号,其中,未进行补偿处理的信号直接接入硅光电探测器作为对比信号由示波器显示;另一路信号则接入 VOA,经过补偿的信号接入光电探测器,再由示波器显示,根据显示结果在 MATLAB/Simulink 中修正输入衰减器的驱动电压信号模型,由 AutoBox 产生所需波形调制衰减器,达到期望的残余光强调制的补偿效果。

根据图 6 的系统原理图,搭建了如图 7 的补偿实验系统平台。

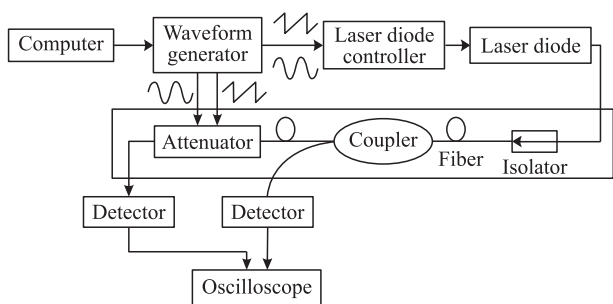


图 6 实验系统原理框图

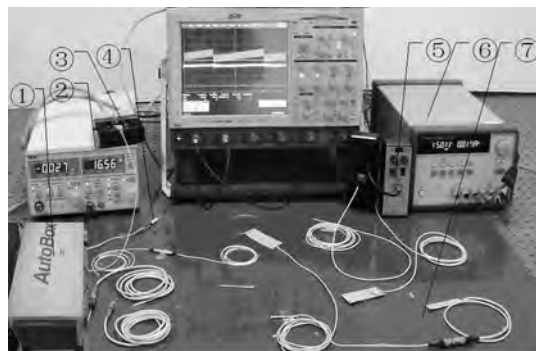
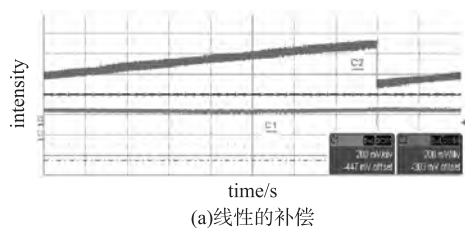


图 7 实验系统平台

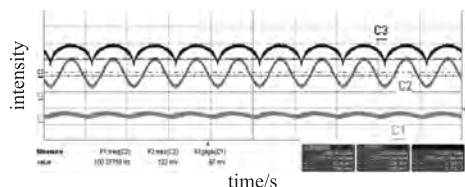
- ① AutoBox 信号仿真箱;②激光二极管控制器;③带尾纤的 DFB 激光器;④MEMS VOA;⑤硅光电探测器;⑥可调直流电源;⑦光路系统。

### 3.2 实验结果

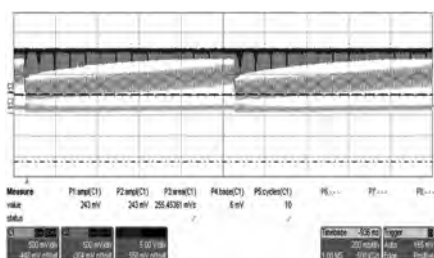
激光器工作温度 22 ℃,以 1 Hz 的锯齿波和 100 Hz 余弦信号调制,调制后激光通过同步驱动的衰减器经光电探测器,示波器实测的光强补偿效果如图 8 所示。图中,  $C_1$  为经过衰减补偿的光强波



(a)线性的补偿



(b)余弦调制幅度的补偿



(c)光强整体补偿效果

图 8 残余光强幅度调制补偿效果

形,  $C_2$  为未经过衰减的光强波形,  $C_3$  为衰减器加载的电压驱动波形。

图 8(a)中可以看出  $C_1$  较于  $C_2$  光强有整体的衰减,光强斜坡部分明显趋于平缓。  $C_1$ 、 $C_2$  的最大的幅度动态范围分别是 0 ~ 20 mV 和 0 ~ 400 mV,由此可知,采用相同的 A/D 转换器满量程采样,经过补偿残余光强调制下降为原来的 1/20,提高了系统信噪比。图 8(b)为加上余弦调制的激光光强补偿效果。通过衰减器补偿,光强的残余余弦调制的幅值约为原来的 1/10。图 8(c)为包含线性调制和余弦调制的残余光强调制的整体补偿后效果。把补偿前后的余弦调制信号幅值带入公式(9),可计算出信号左右两边谷值畸变比未补偿的信号分别改善 61.42 % 和 67.49 %;初步证明了这种补偿方法对二次谐波畸变的抑制效果。

## 4 结论

本文从理论上分析了可调谐激光二极管光谱测量系统中残余光强调制的影响,提出了利用可调光衰减器对该光强调制进行同步抑制的补偿方案;并搭建了相关实验系统平台,进行了补偿实验。实验结果表明,补偿后波长线性扫描的引起的强度调制降低为补偿前的 1/20,光强余弦调制信号幅度降低为补偿前的 1/10;在提高系统信噪比的同时,将使二次谐波左右波谷畸变分别改善了 61.42 % 和 67.49 %;初步证实了本方法的有效性。

实验中仍然存在一些不足,如所采用的 MEMS 衰减器调制响应速度比较慢,只在低频下进行了波长调制的补偿实验;此外,衰减器驱动电压与衰减度为非线性关系,采用经验公式补偿,余弦幅度调制补偿效果不是很理想;下一步工作将选用具有高调制频率的衰减器以及优化电压驱动模型,以期完善补偿的效果,并进行实际的过气体检测验证。

### 参考文献:

- [1] Frish M B, White M A, Allen I G, et al. Handheld Laserbased Sensor for Remote Detection of Toxic and Hazardous Gases[C]// SPIE, 2000, 4199: 19 - 28.
- [2] Ebert V, Teichert H, Strauch P, et al. Sensitive In-Situ Detection of CO and O<sub>2</sub> in a Rotary Kiln Based Hazardous Waste Incinerator Using 760 nm and 2.3 μm Diode Lasers[J]. Proc. Comb. Inst, 2005, 30(1): 1611 - 1618.
- [3] 刘文清,崔志成,刘建国,等. 在气痕量气体测量的光谱学和化学技术[J]. 量子电子学报. 2004, 21(2): 202 - 210.
- [4] 刘建国,刘文清,魏庆农,等. 我国的环境监测仪器产业状况及监测高技术创新的研究[J]. 光电子技术与信息. 2002, 4: 14 - 18.



- [5] Wang J, Sanders S T, Joffries J B, et al. Oxygen Measurements At high Pressures with Vertical Cavity Surface-Emitting Lasers [J]. Appl. Phys. B, 2001, 72(7): 865-872.
- [6] 黄伟,高晓明. 高分辨率高灵敏度可调谐近红外二极管激光光谱探测[J]. 光学与光电技术,2004,2(3):5-8.
- [7] Linnerud I, Kaspersen P, Jaeger T, et al. Gas Monitoring in the Process, Industry Using Diode Laser Spectroscopy [J]. Appl. Phys. B, 1998, 67(3): 297-305.
- [8] Michael E Webber, Suhong Kim, Scott T Sanders, et al. In-Situ Combustion Measurements of CO<sub>2</sub> by Use of a Distributed Feedback Diode Laser Sensor Near 2.0 μm[J]. Appl. Opt, 2001, 40(6): 821-828.
- [9] 阚瑞峰,刘文清,张玉钧,等. 可调谐二极管激光吸收光谱法监测环境空气中甲烷的浓度变化[J]. 中国激光,2005,32(9): 1217-1220.
- [10] 马维光,董磊,尹王保,等. 消除波长调制光谱中激光能量起伏对谐波信号干扰的新技术[J]. 光子学报,2005,34(7):1046-1048.
- [11] 邓勇开,李焯,曹建平,等. 电光相位调制器中剩余幅度调制变化的抑制[J]. 光学学报,2006,26(7):1065-1068.
- [12] 涂兴华,刘文清,张玉钧,等. CO和CO<sub>2</sub>的1.58 μm波段可调谐二极管激光吸收光谱的二次谐波检测研究[J]. 光谱学与光谱分析. 2006,26(7):1190-1194.
- [13] Yong ZHU, Jun ZHANG, Junqing CHEN, et al. Online Self-Calibration Technique for Trace Gas Analyzer Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy[C]//2009, SPIE, 7160(2S): 1-8.
- [14] 李倩,肖连团,李昌勇,等. 低频波长调制光谱的理论及实验研究. 光学学报[J]. 2001,21(3):317-319.
- [15] 邵杰,高晓明,袁恽谦,等. 信号处理改善波长调制光谱灵敏度的实验研究. 物理学报[J]. 2005,54(10):4638-4642.



朱永(1973-),男,重庆大学光电工程学院教授、博士生导师;主要研究方向为光纤传感、光纤通信器件、激光吸收光谱学、微型红外光谱仪器等,yong-zhu@cqu.edu.cn;



梁波(1983-),男,重庆大学硕士研究生,研究方向为智能化光电技术及仪器,liangbo1116@foxmail.com。