

# 波长调制技术中光强调制对二次谐波线型的影响研究

胡雅君<sup>1</sup> 赵学珏<sup>1</sup> 张锐<sup>1,2</sup> 郭媛<sup>1</sup> 汪曩<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 天津大学精密仪器与光电子工程学院, 天津 300072)  
(<sup>2</sup> 天津科技大学电子信息与自动化学院, 天津 300222)

**摘要** 基于可调谐二极管吸收光谱技术(TDLAS)的痕量气体检测中,由于波长调制光谱(WMS)中光强也被调制,因此会伴随着剩余振幅调制(RAM)的产生,对检测信号的线型和系统噪声产生一定程度的影响。在傅里叶分析的基础上对任意调制度的二次谐波信号进行了建模分析,给出了光强幅度调制引起吸收谱线畸变的理论解释,并分析了光强调制的线性与非线性部分以及调制度对谱线畸变的影响情况,给出了二次谐波不对称及RAM噪声产生的根本原因。以NH<sub>3</sub>为例在考虑光强幅度调制的情况下进行基于TDLAS的二次谐波检测实验,给出了调制度对二次谐波线型及噪声水平的影响,并对理论分析进行了实验验证。

**关键词** 光谱学;波长调制;建模;二次谐波线型;背景噪声

**中图分类号** O443.4 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1130002

## Research on the Effect of Light Intensity Modulation on the Line Shape of the Second Harmonic in the Wavelength Modulation Technology

Hu Yajun<sup>1</sup> Zhao Xuehong<sup>1</sup> Zhang Rui<sup>1,2</sup> Guo Yuan<sup>1</sup> Wang Yan<sup>1</sup>

<sup>1</sup> College of Precision Instruments and Opto-Electronics Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

<sup>2</sup> College of Electronic Information and Automation, Tianjin University of Science Technology,

Tianjin 300222, China

**Abstract** Since the light intensity is modulated in the wavelength modulation spectroscopy (WMS) in the trace gas detection based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), the output signal can be accompanied by the residual amplitude modulation (RAM), which can affect the line shape of the detection signal and the noise to a certain extent. Theoretical model and analysis of the second harmonic signal of arbitrary large modulation amplitude based on Fourier analysis are presented, and the theoretical explanations about the distortion of the absorption lines are given. The effect of linear intensity modulation and non-linear modulation on the spectral distortion is analyzed, and the basic reasons of the asymmetry of the second harmonic and the noise are given. Considering the intensity amplitude modulation, the experiment of the the second harmonic detection of NH<sub>3</sub> based on the TDLAS is conducted and the effect of the modulation amplitude on the distortion of absorption lines is evaluated. The experimental results confirm the theoretical analysis.

**Key words** spectroscopy; wavelength modulation; modeling; line shape of the second harmonic; background noise

**OCIS codes** 200.4560; 300.6170; 300.6260

## 1 引言

由于可调谐激光二极管吸收光谱技术(TDLAS)具有高灵敏度、高选择性和快速响应等优点,使得其广泛应用于在线痕量气体检测。为了降

低噪声对检测信号的影响,提高信噪比,在信号检测方法上常采用波长调制光谱(WMS)检测法,其中二次谐波检测最为常用<sup>[1-5]</sup>。

在TDLAS二次谐波信号检测方法的研究中,

收稿日期: 2013-04-23; 收到修改稿日期: 2013-07-03

基金项目: 高等学校博士点基金(20090032110053)

作者简介: 胡雅君(1988—),女,硕士研究生,主要从事光谱技术及仪器等方面的研究。E-mail: hyj13781185@163.com

导师简介: 赵学珏(1956—),男,副教授,研究生导师,主要从事分析仪器方面的研究。E-mail: zhaoxh@tju.edu.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

由于谐波信号线型中蕴藏着丰富的检测信息,因此对信号线型的理论研究一直是焦点问题之一。在波长调制的长期理论研究中,早期使用的是吸收线型的泰勒展开,其来自于吸收线型的  $n$  阶导数,但该方法只适用于很小的调制度  $m^{[6]}$ ,在最优调制度  $m = 2.2$  时,线型的泰勒展开并不适用。为了解决该问题,以往的学者进行了大量的研究。Arndt<sup>[7]</sup> 基于傅里叶分析给出了线型的洛伦兹展宽的各次谐波的分析解。然而上述研究均是在不考虑光强调制的情况下得出的,而实际上在波长调制技术中,随着输入电流对激光二极管的输出波长调制的同时,激光二极管的输出光强也得到了相应的调制。Kluczynski 等<sup>[8]</sup> 在考虑光强调制的情况给出了基于傅里叶分析的波长调制光谱分析,但未对引起二次谐波畸变的参数进行深入探讨。Schilt 等<sup>[9]</sup> 给出同时考虑频率调制和光强调制及任意夹角下的洛伦兹线型的理论模型,并结合实验分析光强调制对二次谐波的影响,但只是考虑光强调制的线性部分而忽略了非线性部分带来的剩余振幅调制(RAM)噪声。目前光强调制及其带来的 RAM 的研究及应用越来越广泛<sup>[10-13]</sup>,涉及到二次谐波线型不对称及 RAM 噪声的研究,少有对其产生的根本原因进行讨论,或忽略频率调制和光强调制的夹角或忽略光强调制的非线性部分。已有研究中也鲜有从噪声的产生机理及特点出发进行实验参数的选取来抑制噪声,并未给出理论依据<sup>[14]</sup>。

本文根据傅里叶级数展开方法进行 TDLAS 系统建模,并就光强调制组成部分、系统调制度对二次谐波线型的影响进行分析研究,阐述了在考虑光强调制下的 TDLAS 系统二次谐波检测的线型变化规律,给出了线型不对称性、RAM 噪声产生的根本原因,以及调制幅度对线型及 RAM 噪声水平的影响规律,为调制幅度这一实验参数的选取提供理论依据。

## 2 理论分析

### 2.1 波长调制

经过波长调制后的激光输出频率为

$$\nu(t) = \nu_c + \nu_a \cos(2\pi ft), \quad (1)$$

式中  $\nu_c$  代表激光中心频率; $\nu_a$  代表频率调制幅度,激光频率调制幅度和注入电流调制幅度  $i_a$  的关系为  $\nu_a = k_{\nu,ic} i_a$ ,其中  $k_{\nu,ic}$  为激光电流到激光频率线性响应系数。

当激光二极管通过注入电流被调制时,激光强度  $I_L(\nu)$  也被调制了,从而带来了 RAM。考虑系统

中较小的非线性<sup>[15]</sup>,此时激光器输出的光强可示为线性和非线性部分的和:

$$I_L(t) = k'_{L,ic} [i_{ic}(t) - i_{th}] + k''_{L,ic} [i_{ic}(t) - i_{th}]^2, \quad (2)$$

式中  $k'_{L,ic}$  为注入电流和激光光强的线性转换系数, $k''_{L,ic}$  为注入电流和激光光强的非线性转换系数, $i_{ic}$  为注入的激光电流, $i_{th}$  为激光器发光的阈值电流。

由(1)、(2)式进一步得到激光输出强度依赖时间的表达式:

$$I_L(t) = I_{L,0}(\nu_c) [1 + k_1 \nu_a \cos(2\pi ft + \phi_1) + k_2 \nu_a^2 \cos(2\pi \cdot 2ft + \phi_2)], \quad (3)$$

式中  $I_{L,0}(\nu)$  为激光中心功率, $k_1 \nu_a$  为线性光强调制幅度, $k_2 \nu_a^2$  为非线性光强调制幅度, $k_1$  和  $k_2$  分别为光强调制的线性和非线性系数, $\phi_1$  和  $\phi_2$  分别为频率调制和光强调制的线性和非线性部分夹角。

由 Arndt 推算的归一化洛伦兹线型可表示为

$$\bar{\chi}^n(x, m) = \frac{2 - \delta_{n0}}{2} \times \frac{\{[(1 - ix)^2 + m^2]^{1/2} - (1 - ix)\}^n}{m^n \{[(1 - ix)^2 + m^2]^{1/2}\}} \times i^n + c. c., \quad (4)$$

式中  $x$  为归一化中心频率失谐量,对洛伦兹线型情况定义为  $(\nu_c - \nu_0) / \Delta\nu_L$ ;  $m$  为归一化频率调制幅度,也称为调制深度,定义为  $\nu_a / \Delta\nu_L$ ;  $\Delta\nu_L$  为吸收线的半峰全宽, $\delta_{n0}$  为克罗内克常数,  $i = \sqrt{-1}$ ,  $c. c.$  代表共轭部分。

### 2.2 光强调制带来的二次谐波线型畸变

定义穿过气体吸收池的光强信号经探测器探测得到的信号为

$$S(\nu) = \beta I_L(\nu) \exp[-\alpha_0 \bar{\chi}(\nu)] \approx \beta I_L(\nu) [1 - \alpha_0 \bar{\chi}(\nu)] = S_{BG}(\nu) + S_{AS}(\nu), \quad (5)$$

式中  $S(\nu)$  为探测信号; $S_{BG}(\nu)$  为背景信号,以  $\beta I_L(\nu)$  表示; $S_{AS}(\nu)$  为分析信号,以  $-\beta \alpha_0 \bar{\chi}(\nu) I_L(\nu)$  表示; $\beta$  为仪器因数; $\alpha_0$  为光学厚度; $\bar{\chi}(\nu)$  为归一化线型函数,这里取洛伦兹函数。

设锁相放大器的输出信号为  $S_k(x, m)$ ,进行傅里叶级数展开表示为

$$S_k(x, m) = S_k^{\text{even}}(x, m) \cos \theta_k + S_k^{\text{odd}}(x, m) \sin \theta_k, \quad (6)$$

$$S_k^{\text{even}}(x, m) = \frac{2 - \delta_{k0}}{\tau} \int_0^{\tau} S(x, m, t) \cos(2\pi kft) dt, \quad (7)$$

$$S_k^{\text{odd}}(x, m) = \frac{2}{\tau} \int_0^{\tau} S(x, m, t) \sin(2\pi kft) dt, \quad (8)$$

式中  $\delta_{k0}$  为克罗克内常数,  $\tau$  为积分时间,  $\cos(2\pi ft)$  为参考信号,  $\theta_k$  为锁相放大器的输入信号和参考信

号的夹角。 $S_k^{\text{even}}$  为探测信号的傅里叶展开的偶次成分,  $S_k^{\text{odd}}$  为奇次成分, 将其分别看成锁相放大器的 X 通道和 Y 通道输出信号<sup>[16]</sup>, 通常采用 X 通道的数据作为探测信号, 有

$$S_{\text{BG},k}^{\text{even}}(x, m) = \beta I_{L,k}^e(v_c, v_a), \quad (9)$$

$$S_{\text{AS},k}^{\text{even}}(x, m) = -\beta \alpha_0 \left[ \frac{1 + \delta_{k0}}{2} \sum_{n=0}^k \bar{\chi}_{k-n}^e(x, m) I_{L,n}^e(v_c, v_a) + \frac{2 - \delta_{k0}}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\chi}_{k+n}^e(x, m) I_{L,n}^e(v_c, v_a) + \frac{2 - \delta_{k0}}{4} \sum_{n=0}^{\infty} \bar{\chi}_n^e(x, m) I_{L,k+n}^e(v_c, v_a) \right]. \quad (10)$$

当  $k = 2$ , 得二次谐波的分析信号  $S_{\text{AS},2}^{\text{even}}(x, m)$ 、背景信号  $S_{\text{BG},2}^{\text{even}}(x, m)$ 、探测信号  $S_2^{\text{even}}(v)$  分别为

$$S_{\text{AS},2}^{\text{even}}(x, m) = -\beta \alpha_0 I_{L,0}^e(v_c) \left[ \bar{\chi}_2^e + \frac{1}{2} (\bar{\chi}_1^e + \bar{\chi}_3^e) k_1 v_a \cos \phi_1 + \left( \bar{\chi}_0^e + \frac{1}{2} \bar{\chi}_4^e \right) k_2 v_a^2 \cos \phi_2 \right], \quad (11)$$

$$S_{\text{BG},2}^{\text{even}}(x, m) = \beta I_{L,2}^e(v_c, v_a) = \beta I_{L,0}^e(v_c) k_2 v_a^2 \cos \phi_2, \quad (12)$$

$$S_2^{\text{even}}(v) = S_{\text{AS},2}^{\text{even}}(x, m) + S_{\text{BG},2}^{\text{even}}(x, m). \quad (13)$$

由(11)~(13)式可知, 与传统 WMS 分析相比, 考虑到光强调制的线性和非线性部分的存在, 二次谐波的探测及分析信号中引入了奇次谐波成分及高次谐波成分, 使二次谐波的线型发生畸变, 不再保持传统理论分析上的对称性。同时, 非线性部分的存在又使得探测信号产生了与吸收无关的噪声  $S_{\text{BG},k}^{\text{even}}(x, m)$ , 即 RAM, 作为一种背景噪声影响信号的基线水平<sup>[17]</sup>。同时, 从(11)式可以看出, 考虑光强调制时, 二次谐波的线型是由其线性部分、非线性部分以及调制幅度和吸收线型共同决定的。

下面主要就光强调制的线性部分和非线性部分的各参数及调制幅度对二次谐波线型的对称性和基线水平带来的影响进行系统分析。

### 3 模型建立及二次谐波线型畸变情况分析

根据上述理论分析过程, 采用 Simulink 对其进行数学模型的建立, 并对其进行仿真分析, 下面逐一分析光强调制的线性和非线性部分。这里将左右峰高比(PHR)定为线型对称性的判别依据, 峰高比为  $L_a/L_b$ , 如图 1 所示。

#### 3.1 线性部分影响

给定非线性部分参数, 通常非线性部分较小, 设置非线性部分参数如下:  $\phi_2 = 100^\circ$ ,  $k_2 = 0.05$ , 模拟结果如图 2 和 3 所示。

##### 3.1.1 线性夹角 $\phi_1$ 的影响

图 2(a)、(b) 分别为分析信号和探测信号在不

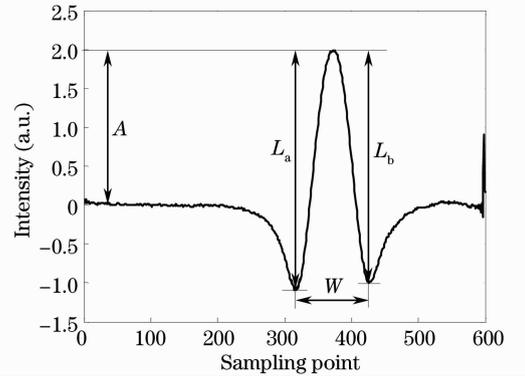


图 1  $2f$  示意图

Fig. 1  $2f$  schematic diagram

同  $\phi_1$  时随失谐  $x$  的变化。可知分析信号和探测信号的基线随线性夹角基本保持不变, 但由于非线性部分的存在, 可以看到探测信号较之分析信号, 其基线发生了偏移。此外, 分析信号和探测信号的峰高比随  $\phi_1$  的变化相同, 如图 4(a) 所示, 可知当  $\phi_1$  为  $90^\circ$  时, 峰高比为 1, 线型完全对称; 当  $\phi_1$  小于  $90^\circ$  时, 峰谷的左低右高; 当  $\phi_1$  大于  $90^\circ$  时, 呈现峰谷的左高右低, 并且随着角度对  $90^\circ$  的接近, 峰高比接近 1, 对称性逐渐变好。

##### 3.1.2 线性系数 $k_1$ 的影响

固定线性角  $\phi_1$ , 改变线性系数  $k_1$ 。当线性角  $\phi_1 = 90^\circ$  时, 由(11)、(13)式知分析信号和探测信号同, 线性部分为零,  $k_1$  对信号无影响。

当线性角  $\phi_1 \neq 90^\circ$  时, 改变线性系数  $k_1$ , 二次谐波的分析信号和探测信号分别如图 3 中(a)、(b)所示, 可知分析信号和探测信号的基线随线性系数基

本保持不变,较之分析信号,探测信号依旧存在基线偏移。两者峰高比随  $k_1$  变化相同,如图 4(b)所示,

均随着  $k_1$  的增大而减小,对称性变差,即  $k_1$  影响线型不对称程度。

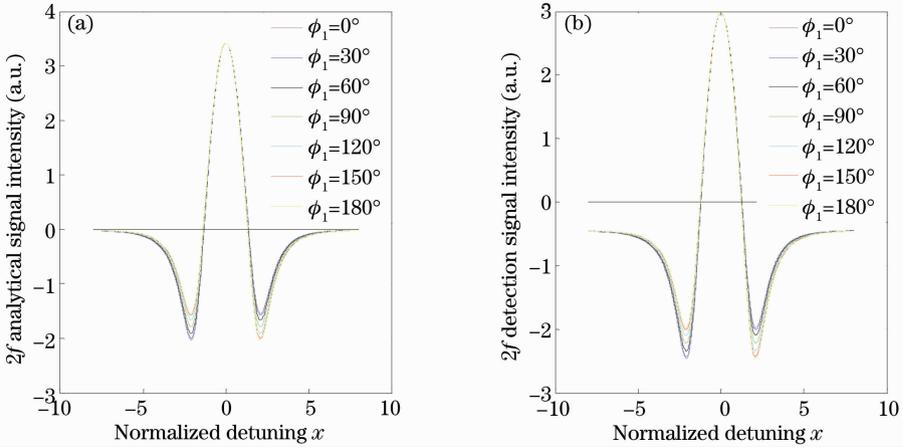


图 2 不同  $\phi_1$  下(a)分析信号和(b)探测信号随失谐  $x$  的变化

Fig. 2 (a) Analytical signal and (b) detection signal with different  $\phi_1$  versus detuning  $x$

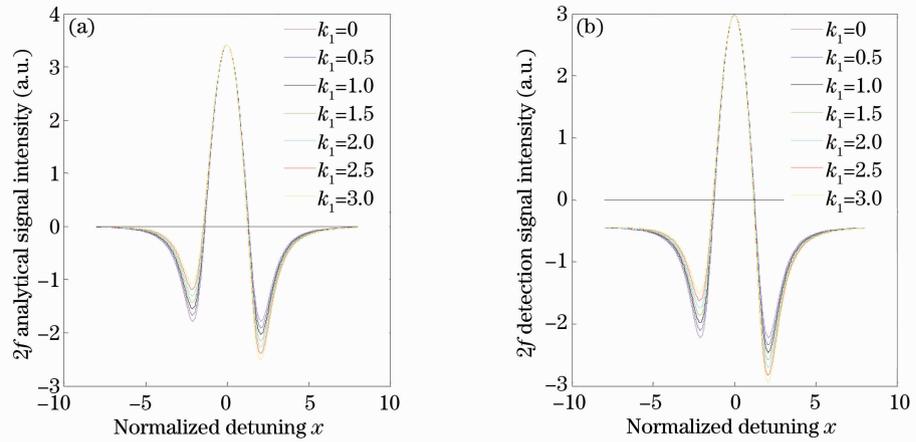


图 3 不同  $k_1$  下(a)分析信号和(b)探测信号随失谐  $x$  的变化

Fig. 3 (a) Analytical signal and (b) detection signal with different  $k_1$  versus detuning  $x$

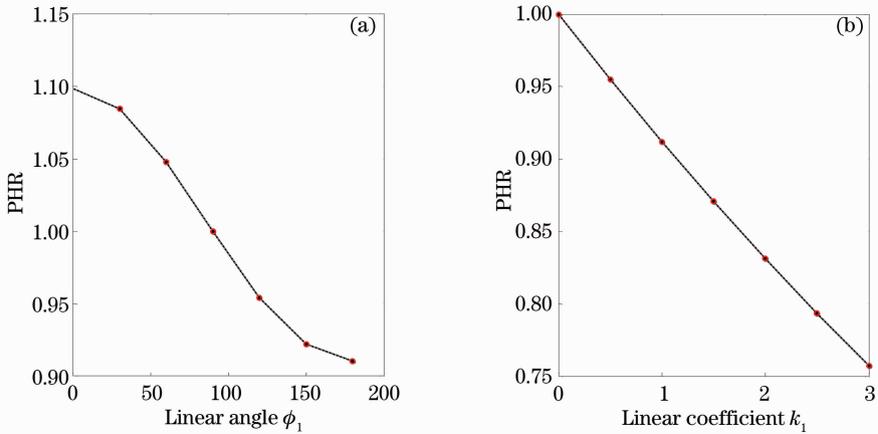


图 4 PHR 随(a)  $\phi_1$  和(b)  $k_1$  变化

Fig. 4 (a) PHR versus (a)  $\phi_1$  and (b)  $k_1$

### 3.2 非线性部分影响

给定线性部分参数,已经有理论证明,光强调制和频率调制的夹角和调制频率有关,当调制频率在兆赫兹以下时,光强调制和频率调制之间的夹角近为 $180^\circ$ <sup>[18-19]</sup>。而对于波长调制技术来说,使用的调制频率都在兆赫兹以下,因此设置线性部分夹角为 $180^\circ$ 进行建模分析。设置参数如下: $\phi_1 = 180^\circ, k_1 = 0.1$ 。

#### 3.2.1 非线性夹角 $\phi_2$ 的影响

固定非线性系数令 $k_2 = 0.05$ ,图 5(a)、(b)分别为分析信号和探测信号在不同 $\phi_2$ 时随 $x$ 的变化。由图 5(a)可知分析信号幅值基本不随 $\phi_2$ 而变化,由图 5(b)知探测信号的基线随 $\phi_2$ 的增大而减小,峰

高比基本保持不变,具体变化情况如图 6(a)和(b)所示,可知探测信号峰高比基本不随 $\phi_2$ 而变化, $\phi_2$ 严重影响二次谐波探测信号的基线水平,当 $\phi_2 = 90^\circ$ 时基线水平为 0,基线水平随 $\phi_2$ 呈余弦变化趋势,带来严重的背景偏移信号。

#### 3.2.2 非线性系数 $k_2$ 的影响

固定非线性夹角,令 $\phi_2 = 100^\circ$ ,图 7(a)、(b)分别为分析信号和探测信号在不同 $k_2$ 时随 $x$ 的变化。由图 7(a)可知分析信号幅值基本不随 $k_2$ 而变化,由图 7(b)知探测信号的基线随 $k_2$ 的增大而减小,峰高比基本保持不变,在存在非线性造成的基线偏移的情况下, $k_2$ 进一步使得基线偏移情况加重,变化情况如图 8(a)、(b)所示。

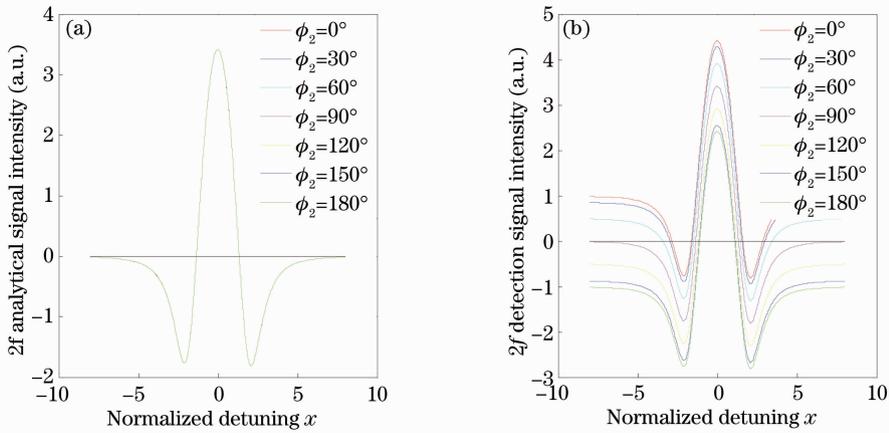


图 5 (a)分析信号和(b)探测信号随失谐  $x$  变化( $k_2 = 0.05$ )

Fig. 5 (a) Analytical signal and (b) detection signal versus detuning  $x$  ( $k_2 = 0.05$ )

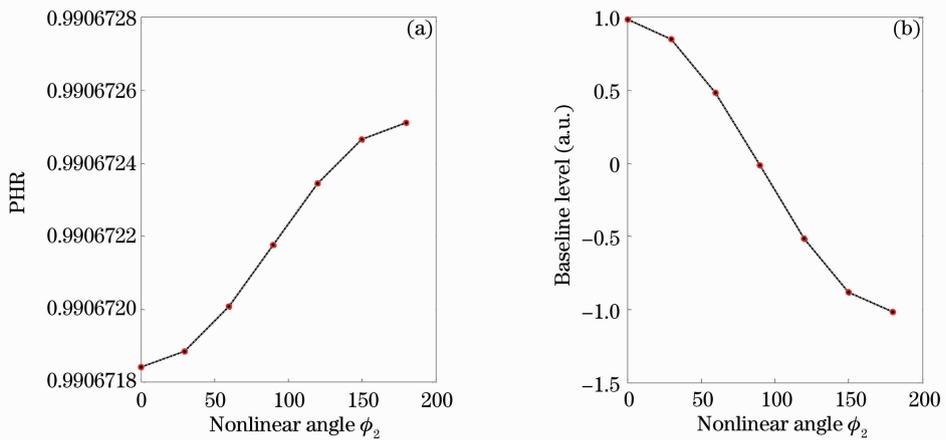


图 6 (a) PHR 和(b)基线随  $\phi_2$  变化

Fig. 6 (a) PHR and (b) baseline versus  $\phi_2$

由以上结论可以看出,线型不对称性产生的根本原因是光强调制的线性部分中光强调制和频率调制之间存在某一特定的夹角 $\phi_1$ ,而 RAM 噪声产生的根本原因在于光强调制的非线性部分中光强调制

和频率调制之间存在某一特定的夹角 $\phi_2$ 。作为导致二次谐波畸变的主要因素,光强调制的线性部分和非线性部分各参数可以通过特殊的实验方法进行测得,Li等<sup>[16]</sup>曾对其展开研究,结果表明在其他参

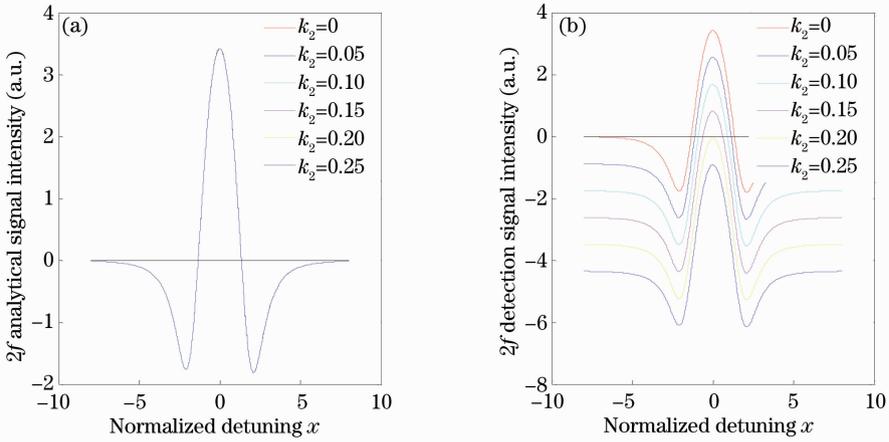


图 7 (a)分析信号和(b)探测信号随失谐  $x$  变化( $\phi_2 = 100^\circ$ )

Fig. 7 (a) Analytical signal and (b) detection signal versus detuning  $x$  ( $\phi_2 = 100^\circ$ )

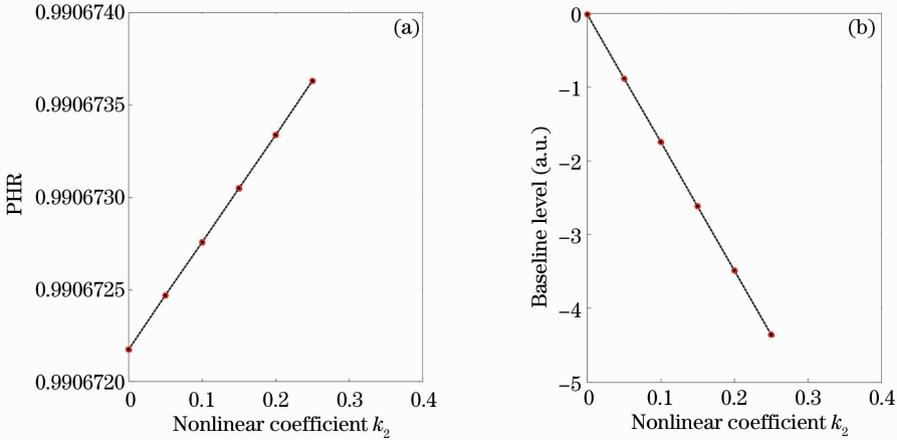


图 8 (a) PHR 和(b)基线随  $k_2$  变化

Fig. 8 (a) PHR and (b) baseline versus  $k_2$

数不变的情况下这两部分参数  $\phi_1, k_1, \phi_2, k_2$  基本不随调制幅度变化。同时,由(11)、(12)式知在考虑光强调制的情况下,调制幅度(等效调制度)和系数  $k_1, k_2$  相乘而影响这两部分的幅值,因而推知在其

他条件不变的情况下,调制幅度也会对二次谐波的线型及噪声水平产生影响。

### 3.3 考虑光强调制下的调制参数对线型的影响

在上述模型的基础上,改变调制深度  $m$ ,观察二

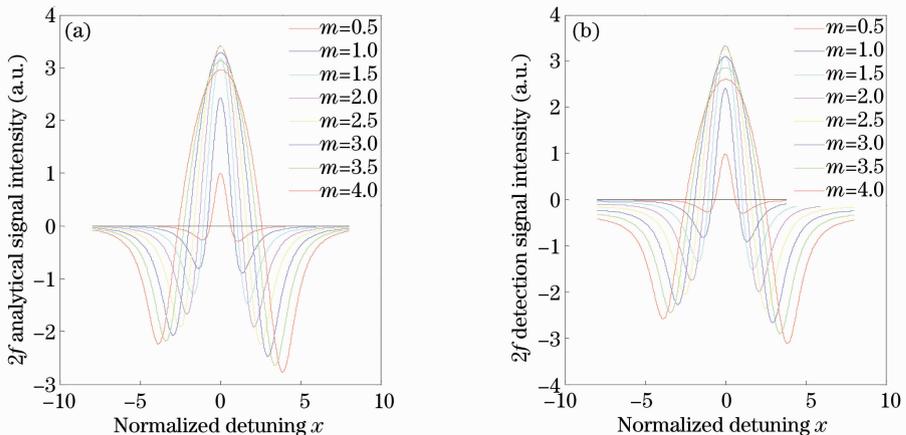


图 9 不同调制深度  $m$  下(a)分析信号和(b)探测信号随失谐  $x$  变化

Fig. 9 (a) Analytical signal and (b) detection signal with different  $m$  versus detuning  $x$

次谐波线型的变化,如图 9 所示,可知在考虑光强调制及其带来的 RAM 影响时, $m$  对探测信号和分析信号的峰高比的影响是相同的,随着  $m$  的增大信号

的对称性变差,如图 10(a)所示。由于 RAM 的存在, $m$  影响信号的基线水平,影响背景信号的大小,如图 10(b)所示。

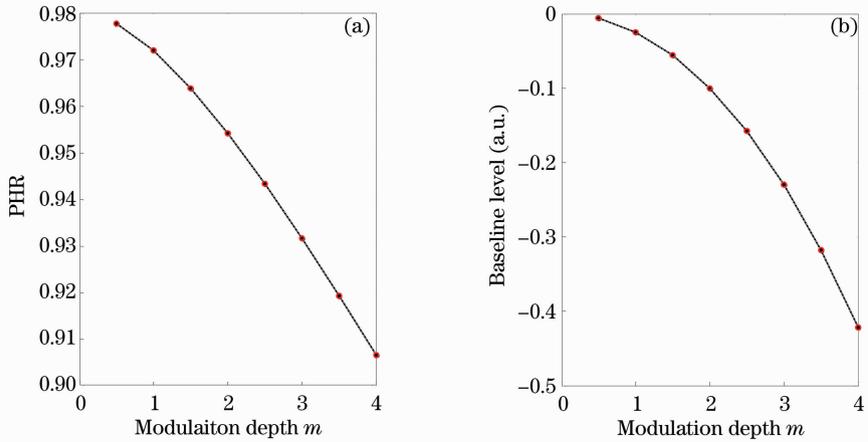


图 10 (a) PHR 和(b)基线随调制深度  $m$  变化

Fig. 10 (a) PHR and (b) baseline versus modulation depth  $m$

#### 4 二次谐波信号线型的理论计算与实验数据对比

为了观察调制对实际二次谐波探测信号的影响,以  $\text{NH}_3$  的 TDLAS 谐波检测为例进行了相应的实验分析,并与理论计算分析结果对比。

##### 4.1 TDLAS 实验装置

检测装置如图 11 所示:信号发生器产生低频扫描信号(5 Hz)和正弦调制信号(15 kHz),叠加形成

调制信号加载到激光控制器上,使输出的激光波长在位于 1512 nm 处的  $\text{NH}_3$  谱线附近进行扫描和调谐。输出光经过准直器准直后,射入装有探测气  $\text{NH}_3$  的光程池,透射出的光信号由光电探测器转化为电压信号,通过锁相放大器对信号进行相敏检波,再由数据采集卡对从锁相放大器出来的二次谐波信号进行模数(A/D)转换,得到气体吸收谱线的二次谐波信号。

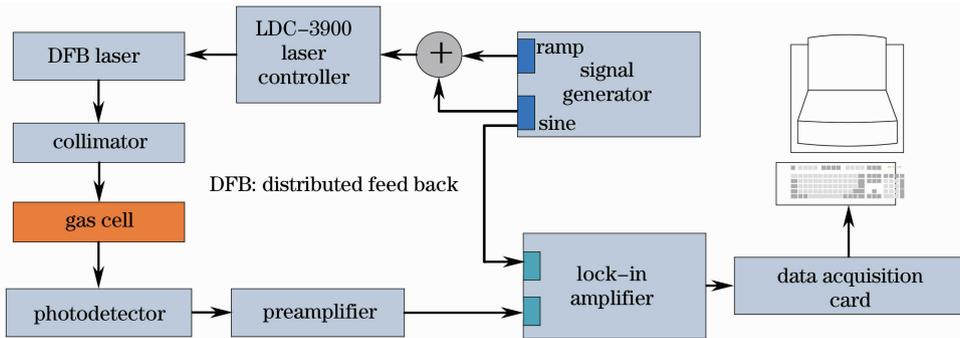


图 11 TDLAS 检测系统

Fig. 11 TDLAS detection system

##### 4.2 实验结果分析

将调制幅度从 100 mV 调节到 500 mV,得到二次谐波曲线如图 12 和 13 所示。

从实验结果可以看出,调制幅度的改变对二次谐波的线型产生了一定影响,随着调制幅度的增加,二次谐波的对称性发生改变,逐渐变差,基线水平也逐渐偏移,和上述的理论分析结果很一致。这该结

果也表明,在调制幅度增大的同时,RAM 噪声也越来越大。通过计算不同调制幅度下的信号标准差来表明信号的噪声水平,得到图 14 和图 15 处理结果。

可以看出,实验结果与理论分析相符,即调制幅度严重影响信号的噪声水平,在大调制度情况下,分析信号与背景噪声可能处于同一量级,因此,可以通过调整调制幅度来降低信号的噪声水平,获得最大

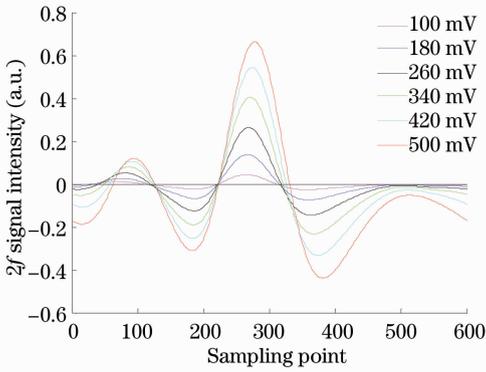


图 12  $2f$  信号随调制幅度变化

Fig. 12  $2f$  signal versus modulation amplitude

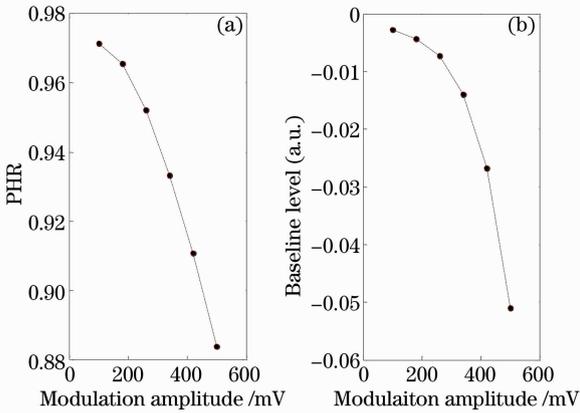


图 13 (a)峰高比和(b)基线水平随调制振幅变化

Fig. 13 (a) PHR and (b) baseline level versus modulation amplitude

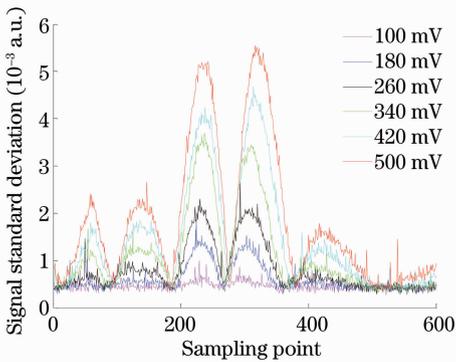


图 14 信号标准差随调制幅度变化

Fig. 14 Signal standard deviation versus modulation amplitude

信噪比来进行取值计算浓度。

## 5 结 论

通过上述分析可知,波长调制过程带来的光强调制会对传统理论二次谐波的线型产生一定程度的影响从而发生畸变,主要表现在线型的对称性和基

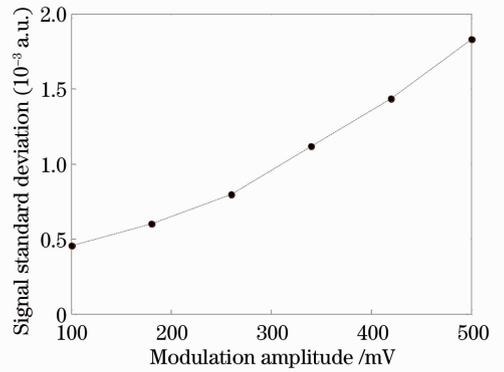


图 15 信号标准差随调制幅度的变化

Fig. 15 Signal standard deviation versus modulation amplitude

线水平。其中线型的对称性主要受光强调制的线性部分影响:线性夹角影响对称性,线性系数影响不对称的程度;线型不对称性产生的根本原因是光强调制的线性部分中光强调制和频率调制之间存在某一特定的夹角  $\phi_1$ 。线型的基线水平即 RAM 噪声水平主要受光强调制的非线性部分影响:非线性夹角影响基线水平,非线性系数影响基线漂移的程度;RAM 噪声产生的根本原因是光强调制的非线性部分中光强调制和频率调制之间存在某一特定的夹角  $\phi_2$ 。这些参数可以预先通过特殊的实验方法及曲线拟合的方法测得,由(12)式求得这些参数及调制参数可推出此时由光强调制带来的 RAM 噪声水平。考虑光强调制的线性和非线性影响下,调制度对二次谐波的线型及噪声水平有很大程度的影响,在一定范围内,随着调制度的增大,线型的不对称性增大,基线偏移程度增大带来更大的噪声,因此,在实际中选取适当的调制幅度对于提高检测精度尤为重要,通常以最大信噪比作为调制幅度的选择依据来抑制 RAM 噪声,这也为 RAM 噪声的抑制提供理论依据。

## 参 考 文 献

- 1 Fan Fengying, Song Zengyun. Measurement of CO<sub>2</sub> concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy near 2  $\mu$ m [J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(2): 0215002.  
范凤英, 宋增云. 2  $\mu$ m 附近二极管激光吸收光谱 CO<sub>2</sub> 浓度测量研究[J]. 中国激光, 2012, 39(2): 0215002.
- 2 Wang Guishi, Cai Tingdong, Wang Lei, et al.. Application of digital frequency locking techniques in real-time measurement of methane in atmosphere [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(10): 1008002.  
王贵师, 蔡廷栋, 汪磊, 等. 基于数字频率锁定技术实时探测实际大气中甲烷浓度[J]. 中国激光, 2011, 38(10): 1008002.
- 3 Kan Ruifeng, Liu Wenqing, Zhang Yunjun, et al.. Infrared absorption spectrometer of monitoring ambient methane [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(1): 67-70.

- 阚瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 等. 基于可调谐激光吸收光谱的大气甲烷检测仪[J]. 光学学报, 2006, 26(1): 67-70.
- 4 Xia Hua, Dong Fengzhong, Tu Guojie, *et al.*. Sensitive detection of carbon monoxide based on novel multi pass cell [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(9): 2596-2601.
- 夏 滑, 董凤忠, 涂郭结, 等. 基于新型长光程多次反射池的CO高灵敏度检测[J]. 光学学报, 2010, 30(9): 2596-2601.
- 5 Gao Nan, Du Zhenhui, Qi Rubin, *et al.*. Data preprocessing of broad-spectrum tunable-diode-laser absorption spectroscopy [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(4): 0430004.
- 高 楠, 杜振辉, 齐汝宾, 等. 宽谱调谐二极管激光吸收光谱的数据预处理研究[J]. 光学学报, 2012, 32(4): 0430004.
- 6 A M Russel, D A Torchia. Harmonic analysis in systems using phase sensitive detectors[J]. Sci Instrum, 1962, 33(4): 442-444.
- 7 R Arndt. Analytical line shapes for Lorentzian signals broad ened by modulation [J]. Appl Phys, 1965, 36(8): 2522-2524.
- 8 Pawel Kluczynski, Ove Axner. Theoretical description based on Fourier analysis of wavelength-modulation spectrometry in terms of analytical and background signals [J]. Appl Opt, 1999, 38(27): 5803-5815.
- 9 S Schilt, L Thevenaz, P Robert. Wavelength modulation spectroscopy; combined frequency and intensity laser modulation [J]. Appl Opt, 2003, 42(33): 6728-6738.
- 10 K Ruxtona, A L Chakrabortya, W Johnstonea. Tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation; elimination of residual amplitude modulation in a phasor decomposition approach [J]. Sens Actuators B, 2010, 150(1): 367-375.
- 11 Andrew J McGettrick, Walter Johnstone, Robert Cunningham, *et al.*. Tunable diode laser spectroscopy with wavelength modulation; calibration-free measurement of gas compositions at elevated temperatures and varying pressure [J]. J Lightwave Technol, 2009, 27(15): 3150-3161.
- 12 Kevin Duffin, Andrew James McGettrick, Walter Johnstone, *et al.*. Tunable diode-laser spectroscopy with wavelength modulation; a calibration-free approach to the recovery of absolute gas absorption line shapes [J]. J Lightwave Technol, 2007, 25(10): 3114-3125.
- 13 Bao Weiyi, Zhu Yong, Chen Jun, *et al.*. Signal analysis and spectrum distortion correction for tunable diode laser absorption spectroscopy system [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2011, 31(4): 1015-1019.
- 鲍伟义, 朱 永, 陈 俊, 等. 可调谐激光二极管吸收光谱系统信号分析及谱线畸变校正技术研究[J]. 光谱学和光谱分析, 2011, 31(4): 1015-1019.
- 14 Gao Nan, Du Zhenhui, Tang Mao, *et al.*. System parameters selection and optimization of tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2010, 30(12): 3174-3178.
- 高 楠, 杜振辉, 唐 邈, 等. 可调谐二极管激光吸收光谱技术参数选择及优化[J]. 光谱学与光谱分析, 2010, 30(12): 3174-3178.
- 15 Zhang Rui, Zhao Xuehong, Hu Yajun, *et al.*. Background elimination method based on harmonic detection in no absorption spectral region [J]. Acta Optica Sinica, 2013, 33(4): 0430006.
- 张 锐, 赵学珏, 胡雅君, 等. 基于无吸收谱线区域检测谐波的背景消除方法[J]. 光学学报, 2013, 33(4): 0430006.
- 16 Hejie Li, Gregory B Rieker, Xiang Liu, *et al.*. Extension of wavelength-modulation spectroscopy to large modulation depth for diode laser absorption measurements in high-pressure gases [J]. Appl Phys, 2006, 45(5): 1052-1061.
- 17 Arup Lal Chakraborty, Keith Ruxton, Walter Johnstone. Suppression of intensity modulation contributions to signals in second harmonic wavelength modulation spectroscopy [J]. Opt Lett, 2010, 35(14): 2400-2402.
- 18 Pawel Kluczynski, Jorgen Gustafsson, Asa M Lindberg, *et al.*. Wavelength modulation absorption spectrometry an extensive scrutiny of the generation of signals [J]. Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy, 2001, 56(8): 1277-1354.
- 19 Masaaki Imai, Koji Kawakita. Measurement of direct frequency modulation characteristics of laser diodes by Michelson interferometry [J]. Appl Phys, 1990, 29(3): 384-353.

栏目编辑: 王晓琰