

文章编号: 1001-3806(2012)03-0357-04

## 剩余振幅调制对波长调制光谱信号线型的影响

伍昂, 吴尚谦\*, 蔡彦, 董跃辉, 翟维  
(昆明理工大学 理学院, 昆明 650093)

**摘要:** 在基于可调谐二极管激光吸收光谱技术的痕量气体检测中, 波长直接调制时剩余振幅调制也会伴随发生, 并对检测信号的线型和系统噪声产生严重影响。为了探讨剩余振幅调制对波长调制光谱二次谐波信号线型的影响, 采用同时考虑振幅调制和波长调制两种影响因素的计算方法, 理论分析出二次谐波信号的计算公式, 与仅考虑波长调制的信号计算方式进行同条件线型计算比对, 取得了二次谐波信号基线和正负峰值随剩余振幅调制的变化数据。结果表明, 剩余振幅调制的大小对检测信号的线型和信号基线有直接影响, 采用这种方法计算得出的二次谐波信号线型更贴近实际检测。

**关键词:** 光谱学; 可调谐二极管激光吸收光谱; 波长调制光谱; 二次谐波检测; 剩余振幅调制

中图分类号: O433.5<sup>+</sup>1 文献标识码: A doi: 10.3969/j.issn.1001-3806.2012.03.018

### Effect of RAM on WMS signal line shape

WU Ang, WU Shang-qian, CAI Yan, DONG Yue-hui, ZHAI Wei

(Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093, China)

**Abstract:** In the detection of trace gas based on tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS), residual amplitude modulation (RAM) might happen simultaneously when wavelength modulation is performed directly by input current. This RAM will affect line-shape of measurement signal and system noise. In order to study the influences of RAM on the line-shape of the second harmonic signal of wavelength modulation spectroscopy (WMS), a calculation method of the second harmonic signal was put forward simultaneously considering amplitude modulation and frequency modulation (AM-FM) factor. After analyzing the method, the corresponding expression was derived. Quantitative calculation results were compared between AM-FM method and traditional FM method. The baseline, positive and negative peak of the second harmonic signal were obtained. The results show that the RAM has direct influences on detection signal line shape and signal baseline. The signal line shape calculated with the AM-FM method more close to detected results.

**Key words:** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; wavelength modulation spectroscopy; second-harmonic detection; residual amplitude modulation

## 引言

可调谐二极管激光吸收光谱 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 技术凭借其高灵敏度、可实时响应、能够实现在线非接触监测等特点而越来越广泛地应用于大气污染痕量气体实时监测以及各种工业气体的检测<sup>[1-2]</sup>。为了降低噪声对检测信号的影响提高信噪比, 在信号检测方法上通常采用直接波长调制光谱 (wavelength modulation spectroscopy, WMS) 技术, 即通过在半导体激光器的注入电流中添加调制信号对激光波长进行直接调制、在探测器信号

中提取调制信号频率的二倍频谐波成分的检测方法<sup>[3]</sup>。与直接吸收检测方法相比, 波长调制光谱技术得到的是一个直接与被测气体浓度成正比的信号。在提高检测系统信噪比方面, 可以通过提高调制信号频率的方法有效地抑制  $1/f$  噪声的影响<sup>[4]</sup>。

在 TDLAS 二次谐波信号检测方法的研究中, 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, 研究历史比较久远。早在 20 世纪 80 年代初, OLSON<sup>[5]</sup> 等人就利用高斯线型函数的二次微分对 TDLAS 二次谐波的线型进行了定量的分析研究, 之后 REID<sup>[4]</sup> 将 ARNDT<sup>[6]</sup> 对核磁共振二次谐波信号的研究成果应用到 TDLAS 二次谐波线型的研究, 具体地阐述了调制参量对信号线型的影响, 得出了调制系数  $m = 2.2$  时二次谐波信号的峰值最大的结论。但这些对 TDLAS 二次谐波线型的理论研究都是在仅考虑频率调制方法 (frequency

作者简介: 伍昂 (1986-), 男, 硕士研究生, 主要从事基于 TDLAS 的大气痕量气体检测方法的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: wusq@kmutd.edu.cn

收稿日期: 2011-07-14; 收到修改稿日期: 2011-08-18

modulation, FM) 的条件下得出的结论。

另一方面,在降低 TDLAS 系统噪声的研究中,GEHRTZ 和 BJORKLUND 等人提出了剩余振幅调制(residual amplitude modulation, RAM) 的概念<sup>[7-8]</sup>,RAM 是由于激光受到频率调制而伴随产生的激光幅度变化,RAM 是一种噪声,对检测系统的信噪比有负面的影响,特别是被测气体的压力相对较高时,这种影响就更加明显。关于 RAM 对信号线型影响的研究,国内外已有有人在纯频率调制方法的基础上,采用傅里叶分析的方法来考虑 RAM 对信号的影响<sup>[9-10]</sup>。其实质是对纯频率调制方法的一种后续修正,在理论推导上依据不足,且该方法完全忽略了调幅-调频(amplitude modulation and frequency modulation, AM-FM) 相位差的影响。

为进一步探讨伴随发生的振幅调制对检测信号线型的影响,本文中采用不同于傅里叶分析的另一种方法(AM-FM 方法),从二次谐波信号计算公式推导时就考虑 RAM 的影响,根据检测光与吸收气体相互作用的实际情况出发,对二次谐波信号进行分析及提取,得出二次谐波信号线型的计算表达式。并对不同条件下的二次谐波线型进行计算,通过与仅考虑 FM 调制影响的计算方法进行同条件比对,从理论上深入探究 RAM 对二次谐波信号线型的影响,得出了与实际检测更加接近的二次谐波线型。

## 1 二次谐波信号计算方法

### 1.1 AM-FM 二次谐波信号计算方法

图 1 为 TDLAS 检测系统的基本构成图。检测系统中由温控器将半导体激光器的温度保持一定,正弦波信号发生器把频率调制信号加载到可调二极管激光器调谐电流上进行直接调制。由半导体激光器的特性可知,此时激光器的出射光中同时包含频率调制和振幅调制,输出光的电场可表示为<sup>[7-8, 11-12]</sup>:

$$E(t) = E_0 [1 + M \sin(\omega_m t + \phi)] \cdot \exp[i\omega_1 t + i\beta \sin(\omega_m t)] \quad (1)$$

式中  $E_0$  为未调制时的激光光电场的幅值,  $M$  为振幅调制系数,  $\omega_m$  为调制频率,  $\omega_1$  为激光载波频率,  $\beta$  为频

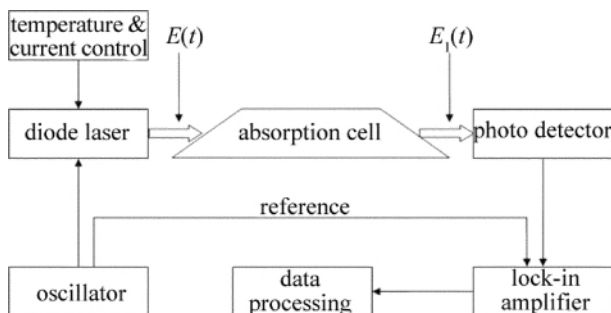


Fig. 1 Diagram of a TDLAS system

率调制系数  $\phi$  为 FM 与 AM 的相位差,由测量结果得出的代表性数值为  $\pi/2$ <sup>[12-14]</sup>。

根据贝塞尔函数的生成函数转换关系式为:

$$\exp[i\beta \sin(\omega_m t)] = \sum_{n=-\infty}^{\infty} J_n(\beta) \exp(in\omega_m t) \quad (2)$$

利用(2)式可将(1)式可转化为:

$$E(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n(\beta, M, \phi) \exp(i\omega_1 t + in\omega_m t) \quad (3)$$

式中,  $r_n = J_n(\beta) + \frac{M}{2i} \exp(i\phi) J_{n-1}(\beta) -$

$$\frac{M}{2i} \exp(-i\phi) J_{n+1}(\beta) \quad (4)$$

受到 AM-FM 调制的激光光束射入气体吸收池后因气体的吸收而衰减,通过吸收池后的光电场变为:

$$E_1(t) = E(t) \cdot T(\omega) \quad (5)$$

式中  $T(\omega) = \exp[-\delta(\omega) - i\varphi(\omega)]$  为复传输函数(复透光率),其实部  $\delta(\omega)$  为吸收衰减系数,虚部  $\varphi(\omega)$  为色散系数。由于受调制激光可以用谐波成分表示,因此传输函数也可以按谐波成分表示为  $T_n(\omega) = \exp(-\delta_n - i\varphi_n)$ 。将其代入(5)式后得到:

$$E_1(t) = E_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_n(\beta, M, \phi) \cdot \exp(i\omega_1 t + in\omega_m t) \exp(-\delta_n - i\varphi_n) \quad (6)$$

从吸收池出射后的激光又入射到光电探测器上进行光电变换,载波成分转换为直流电流  $I_0$ ,依电场平方率产生的光电流可表示为:

$$I(t) = |E_1(t) \cdot E_1(t)^*| = I_0 \sum_{n, n'=-\infty}^{\infty} r_n r_{n'} \exp[i(n - n')\omega_m t] \cdot \exp(-\delta_n - \delta_{n'}) \exp[-i(\varphi_n - \varphi_{n'})] \quad (7)$$

式中  $E_1(t)^*$  为电场  $E_1(t)$  的共轭复数。令  $n - n' = 2$ ,对(7)式提取二次谐波成分,提取吸收信号时忽略色散的影响,即取  $\exp[-i(\varphi_n - \varphi_{n'})] = 1$ ,则 AM-FM 方法气体吸收的二次谐波成分的电流表达式可写成:

$$I_{AM-FM}(\nu) = I_0 \sum_{n=-\infty}^{\infty} r_{n+1} r_{n-1} \exp(-\delta_{n+1} - \delta_{n-1}) \quad (8)$$

式中的吸收衰减系数  $\delta_n$  内含有吸收线型函数<sup>[11]</sup>,计算时用洛伦兹线型函数代入,对于低压条件高斯线型函数同样可以代入计算。

### 1.2 FM 二次谐波信号计算方法

FM 二次谐波信号计算方法是仅考虑频率调制而忽略振幅(功率)调制的信号计算方法。为了与第 1.1 节中的 AM-FM 方法相比较,这里采用 ARNDT<sup>[6]</sup> 和 REID<sup>[4]</sup> 的计算式,在吸收线型函数取洛伦兹函数的情况下,傅里叶变换后的第 2 阶傅里叶系数为:

$$H_2^{-1}(\nu, m) = \frac{4}{m^2} - \frac{2^{1/2} (M_1 + 1 - \nu^2) [(M_1^2 + 4\nu^2)^{1/2} + M_1]^{1/2} + 4\nu [(M_1^2 + 4\nu^2)^{1/2} - M_1]^{1/2}}{m^2 (M_1^2 + 4\nu^2)^{1/2}} \quad (9)$$

$H_2^{-1}(\nu, m)$  是一个与二次谐波信号成正比的量。式中, 定义  $M_1 = 1 - \nu^2 + m^2$ ,  $\nu = (\bar{\nu} - \nu_0) / \Delta\nu$ ,  $m = a / \Delta\nu$ ,  $\bar{\nu}$  为受到调制的出射激光中心频率,  $\nu_0$  为气体吸收线中心频率,  $a$  为调制幅度,  $\Delta\nu$  为吸收线的半峰全宽值 (full width at half maximum, FWHM) [4]。

## 2 计算比对方法与参量的选取

### 2.1 计算比对方法

$M = 0$  时, AM-FM 方法中无剩余振幅调制的影响, 即和 FM 方法的计算条件完全一致。在这种情况下, 对两种方法按相同条件计算得出的谐波信号线型进行对比及误差分析, 同时分析调制幅度  $m$  的变化对二次谐波信号线型正峰和负峰值出现位置、峰值大小及宽度的影响, 验证不同计算方法的一致性。

$M > 0$  时, AM-FM 方法中存在剩余振幅调制的影响, 对信号基线 (代表无气体吸收时的信号强度) 和左右负峰的变化情况进行分析, 即讨论线型随  $M$  值的变化情况。

### 2.2 计算参量的选取

为了考察 RAM 对检测信号线型的影响, FM 方法和 AM-FM 方法中的计算参量必须统一, 其中 AM-FM 方法中的频率调制系数  $\beta$  和 FM 方法中  $m$  的关系最为重要, 两者的关系为 [11]:

$$m = \beta \cdot \frac{\omega_m}{2\pi \cdot \Delta\nu} \quad (10)$$

式中  $\omega_m / (2\pi \cdot \Delta\nu)$  为调制频率与吸收线宽的比值, 代表相对调制频率。因此, 只要在进行比对计算时  $m$  与  $\beta$  的取值满足 (10) 式, 则两种计算方法的频率调制系数取值相同。为了方便起见, 在之后的计算中均用  $m$  值来表示频率调制系数  $\beta$ 。

另外, 其它参量的选取情况如下: 计算时取  $\nu_0 = 0$ , 即将吸收线的中心置于扫描范围的中心, 两种方法的  $\nu$  值扫描范围及计算点的间隔均一致。在对两种方法的谐波信号计算结果进行比较时先做归一化处理。

## 3 计算结果及分析

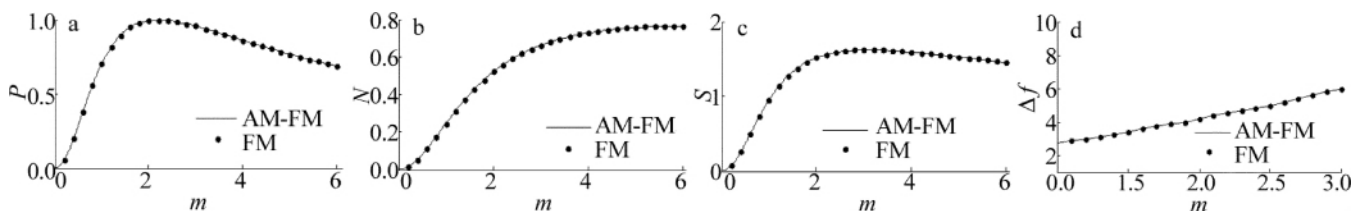


Fig. 3 Variations of  $P, N, S$  and  $\Delta f$  with  $m$

a—variation of  $P$  with  $m$  b—variation of  $N$  with  $m$  c—variation of  $S$  with  $m$  d—variation of  $\Delta f$  with  $m$

为了便于分析比较, 首先定义二次谐波信号的正峰值为  $P$ , 负峰值为  $N$ , 信号的峰谷差值  $S = P + N$ , 二次谐波信号左右两边负峰之间的频率间隔为  $\Delta f$ 。

图 2 为  $M = 0, m = 2.2$  时, 分别使用 FM 方法和 AM-FM 方法计算得到的二次谐波信号, 图中横坐标为相对扫描频率, 纵坐标代表归一化处理后的二次谐波信号相对强度, 圆点和实线分别为 FM 方法和 AM-FM 方法计算得到的信号。两种方法的计算结果在线型上是完全吻合的, 通过数据分析可知, 两种方法计算结果的最大差值仅为 0.32%。最大差值点出现在正峰的两侧, 而测量的关键点 (信号中心正峰和两侧的负峰) 对应的差值为 0。故而可以判定当不考虑剩余振幅调制影响时, FM 方法和 AM-FM 方法的线型计算结果完全相同。

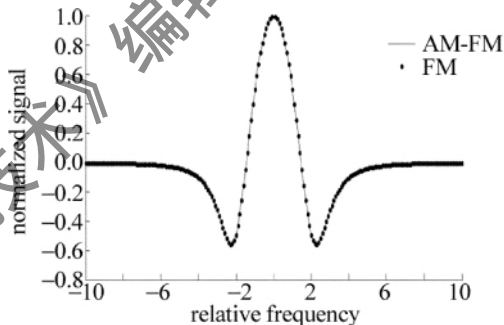


Fig. 2 Comparison of line-shape calculation results with AM-FM and FM method

用两种方法分别计算, 并经归一化处理得到的  $P, N, S$  及  $\Delta f$  值随  $m$  值的变化情况如图 3 所示。图中圆点和实线分别代表 FM 方法和 AM-FM 方法计算得到的对应信号。观察图形可知, 两种方法对应的  $P, N, S$  及  $\Delta f$  随  $m$  的线型基本重合。把两种方法得到数据做差值分析, 结果表明  $\Delta f$  的差值为 0,  $P, N$  和  $S$  的差值最大值在  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  量级, 产生差值的主要原因是峰谷值取点时造成的误差。从变化趋势上看也是一致的, 最初  $P$  随  $m$  的增大而增大, 当  $m = 2.2$  时,  $P$  达到最大值, 随后  $P$  随  $m$  的增大而减少;  $N$  随  $m$  的增大以近似指数函数形式增大;  $S$  的变化与  $P$  相似, 只是当  $m = 3.1$  时,  $S$  达到最大值。  $\Delta f$  随  $m$  的增大而线性增大, 差值保持为 0, 说明左右负峰间距完全一致。

由上面的对比可知,无论是从计算得到的二次谐波信号线型分析,还是考虑  $m$  的变化对  $P, N, S, \Delta f$  及相应差值的影响,在不考虑剩余振幅调制的情况下,通过 FM 方法和 AM-FM 方法计算得到的线型在可忽略的误差范围内保持一致,这一结果说明在  $M=0$  的条件下,两种计算方法可以相互替代。

当  $M>0$  时,采用 AM-FM 方法考察了信号线型随  $M$  值的变化。图 4 为  $M=0.05$  时  $m$  值分别等于 1.0, 2.2, 3.1 的情况下对应的二次谐波信号。计算结果表明  $P$  值在  $m=2.2$  时达到最大,  $S$  值在  $m=3.1$  时达到最大值,  $m$  对  $P, N, S$  和  $\Delta f$  的影响及其变化趋势与  $M=0$  时相似;但同时也存在差异。由于剩余振幅调制的影响,两边负峰值不再相等,即存在左右负峰差值,这一结论与现有文献中的实测结果是一致的<sup>[9-10]</sup>;二次谐波信号线型的基线不再为 0(基线表示无吸收时的信号线),而是随着  $M$  的变化而变化;信号峰值及信号线也随之移动。

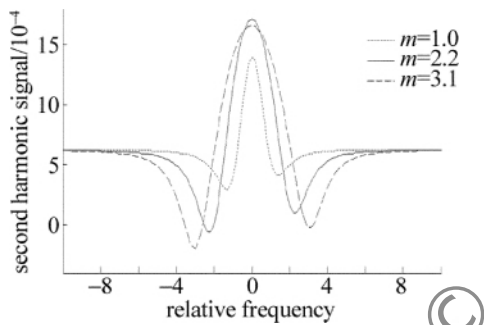


Fig. 4 Variations of second-harmonic signal with  $m$

图 5 为  $m=2.2$  时,二次谐波信号线型的基线随  $M$  值的变化情况,其中横坐标为幅度调制系数  $M$ ,纵坐标为对应基线值。由图可知,随着  $M$  值的增大,基线呈非线性加速增大。深入研究基线随  $M$  值的变化情况,有助于更准确地分析信号的分布情况,并判断是否需要排除基线对信号的影响。

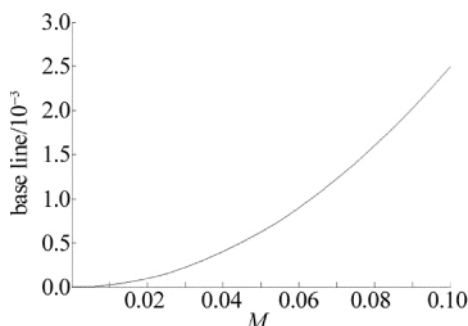


Fig. 5 Variation of second-harmonic signal baseline with  $M$

图 6 为  $m=2.2$  时,左右负峰及其差值随  $M$  的变化情况。横坐标为振幅调制系数  $M$ ,纵坐标为对应负峰值及差值。其中两条虚线分别表示左右负峰值,实线表示对应差值。由图可知,在  $M$  为 0 到 0.4 的范围内,左侧负峰值线性增大,右侧负峰值线性减小,对应

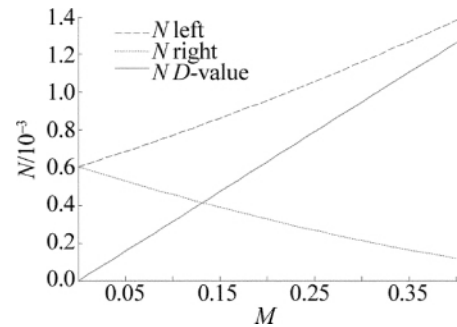


Fig. 6 Variations of left, right negative peaks and corresponding difference value with  $m$

差值呈线性增大趋势。

左侧负峰值的线型拟合方程为  $y = 0.002x + 0.0006$ ,拟合相关系数为  $R^2 = 0.9967$ ;右侧负峰值的线型拟合方程为  $y = -0.0011x + 0.0006$ ,拟合相关系数为  $R^2 = 0.9883$ ;对应差值的线型拟合方程为  $y = 0.0032x$ ,拟合相关系数为  $R^2 = 1$ 。

## 4 结论

为研究剩余振幅调制对 WMS 二次谐波信号线型的影响,在同时考虑振幅调制和波长调制两种因素影响的基础上,推导二次谐波信号的计算公式,与仅考虑波长调制的信号计算方式进行同条件线型计算对比,在  $M=0$  时,两种方法的计算结果相同,信号线型的关键点上结果完全一致,二次谐波信号的线型为左右对称,信号基线为 0。

在  $M>0$  时,由 AM-FM 方法得出的二次谐波信号的计算结果为非左右对称,这与大量的实测结论是吻合的<sup>[9-10,15]</sup>。不对称主要表现为左右负峰差值,差值的大小随  $M$  值呈线性变化关系。随着  $M$  的增大,基线也偏离纵坐标零点,偏离程度随  $M$  值的增大以二次形式增大。以上结果表明,剩余振幅调制的大小对检测信号的线型和信号基线都有直接影响,采用 AM-FM 方法计算得出的二次谐波信号线型更贴近实际检测得到的线型。

## 参考文献

- [1] CHEN H, ZHOU F X, XU Zh, et al. An integrated control system for carbon monoxide detection, emission and recycling [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 360-363 (in Chinese).
- [2] ZHOU N, LI L S, CAO M D, et al. Development of 1650nm DFB lasers applied in trace methane detection [J]. Laser Technology, 2011, 35(3): 289-292 (in Chinese).
- [3] LINS B, ZINN P, ENGELBRECHT R, et al. Simulation based comparison of noise effects in wavelength modulation spectroscopy and direct absorption TDLAS [J]. Applied Physics, 2010, B100(2): 367-376.
- [4] REID J, LABRIC D. Second-harmonic detection with tunable diode lasers: comparison of experiment and theory [J]. Applied Physics, 1981, B26(3): 203-210.

(下转第 378 页)

薄、眼开度大  $Q$  因子为 119, 误比特率为 0。在与采用现在常用的 AWG 解复用器进行比较后发现, 该系统接收端串扰要明显低于 AWG 系统, 且其系统性能也要优于采用 AWG 下行解复用 PON 系统。在下行方向用户端机加入 FBG 滤波器, 和系统已有的无源光分路器构成了波长解复用器, 从而在不改变网络结构的基础上, 就可完成系统的升级, 不仅增加了系统容量, 还保持了原有网络具有的灵活性优点, 节约了成本。该系统性能优异, 能满足用户需求。

#### 参 考 文 献

- [1] PETERNEL V L, STULAR B, KOS M, *et al.* Broadband access network investment optimization in rural areas [C]//2010 15th IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference. Valletta, Malta: IEEE Mediterranean Electrotechnical Conference-MELECON, 2010: 482-486.
- [2] NADARAJAH N, CHAE C J, TRAN A V, *et al.* Optical layer local area network emulation in a multifunctional repeater-based optical access network [J]. *Journal of Optical Communications and Networking*, 2009, 1(1): 43-49.
- [3] PARK S, LEE C, JEONG K, *et al.* Fiber-to-the-home services based on wavelength-division-multiplexing passive optical network [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 2004, 22(11): 2582-2591.
- [4] ANDRADE M D, KRAMER G, WOSINSKA L, *et al.* Evaluating strategies for evolution of passive optical networks [J]. *IEEE Communications Magazine*, 2011, 49(7): 176-184.
- [5] GUAN A H, ZHANG Q H, FU H L, *et al.* Experimental study of four-wave mixing influence in WDM optical networks [J]. *Laser Technology*, 2009, 33(1): 5-7 (in Chinese).
- [6] BANERJEE A, PARK Y, CLARKE F, *et al.* Wavelength-division-multiplexed passive optical network (WDM-PON) technologies for broadband access: a review [J]. *Journal of Optical Networking*, 2005, 4(11): 737-758.
- [7] HU X F, ZHANG L, CAO P, *et al.* Reconfigurable and scalable all-optical VPN in WDM-PON [J]. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2011, 23(14): 941-943.
- [8] XIA G Q, WU Zh M, CHEN J G, *et al.* Effect of the fiber grating length on its peak reflectivity [J]. *Laser Technology*, 2002, 26(2): 106-107 (in Chinese).
- [9] HILL K O, MELTZ G. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1263-1276.
- [10] GILES C R. Lightwave applications of fiber Bragg gratings [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1997, 15(8): 1391-1404.
- [5] OLSON M L, GRIEBLE D L, GRIFFITHS P R. Second derivative tunable diode laser spectrometer for line profile determination I: Theory [J]. *Applied Spectroscopy*, 1980, 34(1): 50-56.
- [6] ARNDT R. Analytical line shapes for Lorentzian signals broadened by modulation [J]. *Journal of Applied Physics*, 1965, 36(8): 2522-2524.
- [7] GEHRTZ M, BJORKLUND G C, WHITTAKER F A. Quantum-limited laser frequency-modulation spectroscopy [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1985, B2(9): 1510-1526.
- [8] CARLISLE C B, COOPER D E. Tunable diode laser frequency modulation spectroscopy through an optical fiber: high-sensitivity detection of water vapor [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(9): 805-807.
- [9] CHEN D, JIA Zh L. Signal analysis of tunable diode laser based wavelength modulation spectroscopy [J]. *Journal of Atmospheric and Environmental Optics*, 2008, 3(3): 193-198 (in Chinese).
- [10] AXNER O, KLUCZYNSKI P, LINDBERG A M. A general non-complex analytical expression for the nth Fourier component of a wavelength-modulated Lorentzian lineshape function [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2001, 68(3): 299-317.
- [11] SILVER J A. Frequency-modulation spectroscopy for trace species detection: theory and comparison among experimental methods [J]. *Applied Optics*, 1992, 31(6): 707-717.
- [12] WU Sh Q, KIMISHIMA T, KUZE H, *et al.* Efficient reduction of fringe noise in trace gas detection with diode laser multipass absorption spectroscopy [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2000, 39(7A): 4034-4040.
- [13] LEHTH W. High frequency heterodyne spectroscopy with current-modulated diode lasers [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1984, 20(9): 1045-1050.
- [14] GEHRTZ M, LENTH W, YOUNG A T, *et al.* High-frequency-modulation spectroscopy with a lead-salt diode lasers [J]. *Optics Letters*, 1986, 11(3): 132-134.
- [15] LIANG B, ZHU Y, BAO W Y. Study on the compensation technology of remaining light intensity modulation in TDLAS [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuators*, 2010, 23(7): 939-943 (in Chinese).

(上接第 360 页)