

泵浦激光频率漂移对光声稳频信号的影响

郭晓阳¹, 李 婷¹, 王 度^{2,3}, 钟哲强¹, 孟庆龙¹, 张 彬¹

- (1. 四川大学 电子信息学院, 四川 成都 610064;
2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 成都 610041;
3. 中国工程物理研究院 太赫兹研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 在 CO₂ 激光泵浦的气体太赫兹源中, 泵浦激光的频率稳定性控制问题十分关键。针对基于光声效应的泵浦源稳频技术, 理论分析和数值模拟了光声信号的探测条件(光声腔内气压、传声器灵敏度等)对微弱光声信号检测的影响, 进而对探测条件进行了优化。在此基础上, 进一步分析了泵浦激光频率在气体吸收谱线中心频率附近漂移时光声信号的变化规律。结果表明: 在实际工作中, 为了实现高精度的稳频, 需要将光声腔的气压控制在低压范围内, 并采用高灵敏度的光声传感器; 当泵浦激光频率产生漂移时, 利用探测到的微弱光声信号通过反馈系统可以精确地改变激光器的腔长, 以实现高精度的光声稳频, 且频率漂移范围可控制在 MHz 量级以内。

关键词: 光声稳频; 频率漂移; 泵浦激光; 气体太赫兹源; 探测条件

中图分类号: TN248 **文献标志码:** A **文章编号:** 1007-2276(2015)06-1746-06

Influence of frequency shift of pump laser on photoacoustic signal for frequency stabilization

Guo Xiaoyang¹, Li Ting¹, Wang Du^{2,3}, Zhong Zheqiang¹, Meng Qinglong¹, Zhang Bin¹

- (1. College of Electronics and Information Engineering, Sichuan University, Chengdu 610064, China;
2. Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Chengdu 610041, China;
3. Terahertz Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

Abstract: The frequency stability of CO₂ pumping laser is of great importance for optically pumped terahertz (THz) gas laser. Aimed at frequency stabilization technique based on photoacoustic effect, the influence of detective conditions on the detection of weak photoacoustic signal in photoacoustic cell was theoretically analyzed and numerically simulated and the detective conditions were further optimized for high-precision detection of photoacoustic signal, including the pressure of methanol gas and the microphone sensitivity. On the basis, the variation of photoacoustic signal with the frequency shift of the pump laser from the center of the absorption line was analyzed. The results show that the low pressure condition and highly sensitive microphone are the keys for achieving high-precision photoacoustic frequency stabilization. When the laser frequency of CO₂ pumping laser shifts from the center of the absorption line, the cavity length can be adjusted accurately by the regulation of feedback photoacoustic

收稿日期: 2014-10-08; 修订日期: 2014-11-20

基金项目: 中物院-川大协同创新联合基金(xtcx2013003); 四川省教育厅创新团队计划资助(13TD0048)

作者简介: 郭晓阳(1989-), 男, 硕士生, 主要从事太赫兹方面的研究工作。Email: pctcp@foxmail.com

导师简介: 张彬(1969-), 女, 教授, 博士生导师, 主要从事强激光的传输与控制方面的研究工作。Email: zhangbinff@sohu.com

signal to ensure the frequency stability of output laser, and the frequency shift could be controlled within the magnitude of megahertz.

Key words: frequency stability based on photoacoustic effect; frequency shift; pumping laser; optically pumped terahertz (THz) gas laser; detective conditions

0 引言

在太赫兹成像、雷达探测、相干通信等许多应用领域中,太赫兹激光器输出频率的稳定性一直是影响其性能的关键指标^[1]。例如,在成像探测的过程中,由于不可预见的频率漂移会使从目标物体反射回来的太赫兹波产生相位差,从而引入多余的噪声信号。为了获得理想的无噪声信号的成像效果,要求接收回波信号的相位差控制在几度的范围内,这就要求将太赫兹源的频率漂移控制在极小的范围内;美国 Coherent 公司在 AURA 卫星上的一台 2.5 THz 振荡器中就应用光声稳频技术实现泵浦源的稳定,其输出频率稳定性就要求半高全宽为 100 kHz/s,且相对于中心频率长期频率漂移量不超过 2 MHz^[2-3],对太赫兹源的频率稳定性也提出了极高的要求。

光泵太赫兹辐射源是目前各类太赫兹辐射源中应用较为成熟的一种,其基本原理是用一台 CO₂ 激光器的远红外激光输出光抽运工作物质,由于工作物质的能级跃迁频率处于太赫兹波段范围,因而可以形成太赫兹波受激辐射。通过选择合适的工作介质、寻找新的能级跃迁谱线,就可以基本覆盖整个太赫兹波段。然而,光泵太赫兹辐射源也存在频率稳定性欠佳的问题,致使其应用性能受到影响。为了实现气体太赫兹输出频率的高稳定性,首先就要确保泵浦源的输出频率稳定在气体太赫兹源工作气体介质的吸收峰。稳定泵浦激光器输出频率的方法有多种,包括光声稳频技术、兰姆凹陷稳频法、相位调制光外差稳频等^[4]。其中,光声稳频技术是利用光声效应,使泵浦光激光器工作在光声样品气体的最大吸收峰处,从而可获得高的频率稳定性和输出功率稳定性。在该方案中,用于泵浦激光稳频的光声样品气体与气体太赫兹源工作气体完全相同。

文中从理论上分析了 CO₂ 激光器输出频率在单支线单调谐宽度范围内发生漂移时,光声腔内所产

生光声信号的变化规律,并讨论了光声腔内压强、声传感器结构参数等对光声探测的影响。

1 理论模型

光声信号的探测是光声稳频系统中的关键环节,其原理如图 1 所示。连续的 CO₂ 激光经斩波器后变为周期性的激光脉冲序列,再入射到一个充有特定的样品气体(甲醇)的密闭光声腔内。若入射波长与腔内气体分子吸收波长一致时,则气体分子被激发至高能级。激发态分子通过碰撞无辐射弛豫到基态时,气体分子吸收的能量便转变为气体的平动能,即热运动能。若对入射光加周期性调制,则在腔内产生一个周期性的压力信号,利用放置在腔内的高灵敏声传感器便可将气体光声效应所产生的压力信号转换为电信号^[5]。光声信号与泵浦光的频率和功率,以及气体的吸收系数有关系。

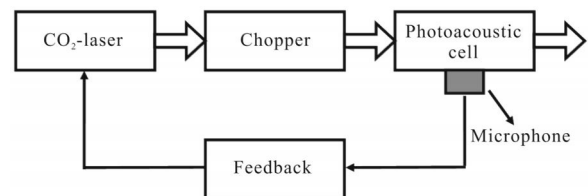


图 1 光声稳频原理示意图

Fig.1 Schematic illustration of photoacoustic frequency stabilization method

作为泵浦源的连续(CW)CO₂ 激光器的输出线型一般为均匀增宽的,其光强表达式为^[6]:

$$I_L(\nu) = I_0 \left[1 - \frac{4}{A \Delta \nu_1^2} (\nu - \nu_1)^2 \right] \quad (1)$$

式中: $I_0 = \frac{P}{S}$, P 为激光功率, S 为激光束的有效放电截面面积; $A = \frac{G_0}{\alpha} - 1$, G_0 为小信号增益系数, α 为损耗系数; ν_1 为泵浦激光的中心频率; $\Delta \nu_1$ 为激光线宽。

当光声腔内气压较高,即分子数浓度较大时,分子之间的碰撞越频繁,致使吸收谱线越宽。此时,吸收谱线呈洛伦兹线型,即:

$$g_H(\nu, \nu_2) = \frac{\Delta\nu_2}{2\pi} \frac{1}{(\nu - \nu_2)^2 + \left(\frac{\Delta\nu_2}{2}\right)^2} \quad (2)$$

式中: ν_2 为样品气体的中心吸收频率; $\Delta\nu_2$ 为吸收线宽。

当气压较低时, 多普勒加宽占优势。此时, 吸收谱线呈高斯线型, 即:

$$g_D(\nu, \nu_2) = \frac{2}{\Delta\nu_2} \left(\frac{\ln 2}{\pi}\right)^{1/2} \exp\left\{-\left[4\ln 2\left(\frac{\nu - \nu_0}{\Delta\nu_D}\right)^2\right]\right\} \quad (3)$$

当既考虑均匀加宽又考虑多普勒加宽时, 吸收谱线表达式为:

$$g(\nu, \nu_2) = [g_H^2(\nu) + g_D^2(\nu)]^{1/2} \quad (4)$$

对于一个简化的二能级系统, 当 CO_2 激光辐照一个密闭的气体样品腔时, 频率为 ν 的入射激光引起的腔内压强变化可表示为^[7]:

$$\Delta P(\nu) = \frac{2\tau_T}{3\tau_c} h\nu_2 \frac{N \frac{n}{c} B_{12} I_L(\nu) g(\nu, \nu_2)}{\frac{n}{c} (B_{12} + B_{21}) I_L(\nu) g(\nu, \nu_2) + \frac{1}{\tau}} \quad (5)$$

式中: $\tau^{-1} = (\tau_R^{-1} + \tau_e^{-1})$, τ_R 为辐射弛豫时间, τ_e 为上能级碰撞弛豫时间; B_{21} 、 B_{12} 为爱因斯坦系数; I_L 为入射光强; $g(\nu, \nu_2)$ 为气体吸收线型; n 为气体折射率; N 为气体总粒子数; τ_H 为气体的热弛豫时间。

于是, 入射激光所产生的总压强变化为:

$$\Delta P = \int \Delta P(\nu) d\nu = \frac{2\tau_T}{3\tau_c} h\nu_2 \int \frac{N \frac{n}{c} B_{12} I_L(\nu) g(\nu, \nu_2)}{\frac{n}{c} (B_{12} + B_{21}) I_L(\nu) g(\nu, \nu_2) + \frac{1}{\tau}} d\nu \quad (6)$$

采用高灵敏度的声传感器将声压转换为电信号, 进而可根据腔内声压的变化获得光声信号, 即^[8]:

$$S = \Delta U = S_{mic} \Delta P \quad (7)$$

式中: S_{mic} 为声传感器的灵敏度, 与传感器的类型及结构有关。对于硅微机械电容式传声器^[9], 其结构如图 2 所示, 灵敏度可表示为:

$$S_{mic} = \frac{a_d^4 (1 - \omega^2) V_b}{32E(d - d_b)(1 + C_s/C_m)h^3} \quad (8)$$

式中: V_b 为偏置电压; E 为复合敏感膜的杨氏模量; a_d 为两根横梁的间距; ω 为敏感膜的振动速度; d 为敏感膜与底板的间距; d_b 为横梁与敏感膜的间距; C_m 为工作电容; C_s 为寄生电容; h 为敏感膜厚度。

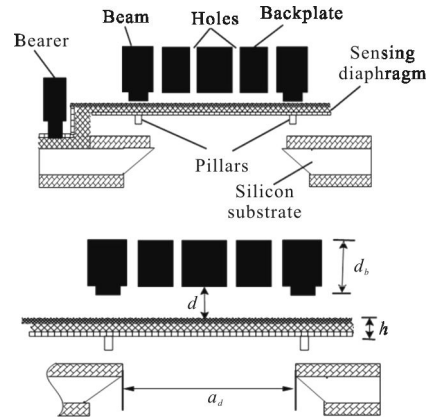


图 2 硅微机械电容式麦克风

Fig.2 Micromachined silicon condenser microphone

分析公式(8)可知, 硅微机械电容式传声器的灵敏度不仅与偏置电压 V_b 成正比, 还与其结构参数(两根横梁的间距 a_d 、敏感膜和底板的间距 d 、横梁与敏感膜的间距 d_b 和敏感膜厚度 h)密切相关。

2 数值模拟及分析

在光声信号探测过程中, 影响光声信号的因素较多。为了精确地对光声腔内产生的微弱光声信号进行探测, 首先对光声探测的条件进行优化, 而后进一步定量分析激光频率漂移对光声信号产生的影响。

2.1 腔内压强对光声信号的影响

密闭的光声腔中, 腔内气体压强的变化会导致光声信号的改变, 而气体压强对光声信号的影响则主要表现在气体分子的吸收系数的变化。图 3 给出了甲醇气体在不同压强下所对应的气体吸收线型。

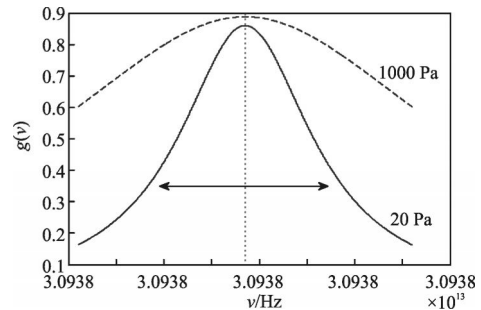


图 3 不同压强下的吸收线型

Fig.3 Absorption line under different pressures

从图 3 可以看出: 与气体压强较高情况相比, 气体压强较低时的吸收线型随光波频率的变化更加尖

锐。在高精度光声稳频中就是需要腔内的工作气体在中心频率处具有较窄的吸收峰,这样就能使光声信号的变化更好地反映出激光频率的波动。

图4进一步给出了不同压强情况下,光声信号归一化强度随泵浦光中心频率的变化曲线。分析图4可知,泵浦光中心频率与光声腔内气体吸收线型中心频率一致时,产生的光声信号最强,而当泵浦光中心频率产生漂移时,光声信号将明显减小。当泵浦光的中心频率在10 MHz范围内波动时,光声腔内气体压强为1 000 Pa时的光声信号只下降了其峰值的0.28%,而气体压强为20 Pa时的光声信号则下降了其峰值的1.43%。

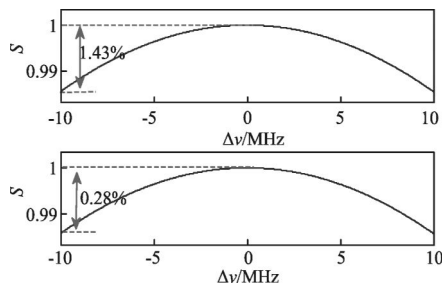


图4 不同压强下,光声信号强度随泵浦光中心频率漂移的变化
Fig.4 Variation curves of photoacoustic signal with frequency shift of the pump laser from the center of absorption line under different pressures

上述分析表明,在相同的频率波动范围内,气压较低时的光声信号改变幅度较大,光声信号对泵浦光的中心频率改变更为敏感,从而使光声传感器更容易探测到腔内声压的变化。然而,如果光声腔内气压太低,又将会导致光声信号太弱而难以检测。由此可见,在实际工作中,需要合理地控制光声腔内气体的压强,尽量控制在低压的环境中,并尽量提高光声传感器的检测灵敏度。为此,文中后续分析时采用20 Pa的腔内甲醇气体压强。

2.2 传声器结构参数对光声探测的影响

在光声信号的探测中,由于信号非常微弱,因而对声传感器的灵敏度要求很高,常规的传声器难以达到探测要求。为此,选择一种新型的传声器—硅微机械电容式传声器,并对其参数进行优化。该传声器利用振动膜将声压转换为膜片的变形,再利用敏感器件将膜片变形转换为电信号。

图5给出了硅微机械电容式传声器灵敏度随其

结构参数的变化。敏感振膜的参数对传声器灵敏度起着决定性的作用,敏感膜通常由氮化硅、多晶硅、氮化硅夹层构成。从图5(a)可以看出,传声器灵敏度随着敏感振膜厚度的减小而明显提高。因此,为了获得高灵敏度的硅微机械电容式传声器,应在制作工艺允许的条件下尽量减小敏感振膜的厚度。此外,进一步分析图5(b)~(d)可知,随着敏感膜与底板的间距 d 的减小,以及敏感膜与横梁的间距 d_b 和两根横梁的间距 a_d 的增大,传声器的灵敏度也将显著提高。

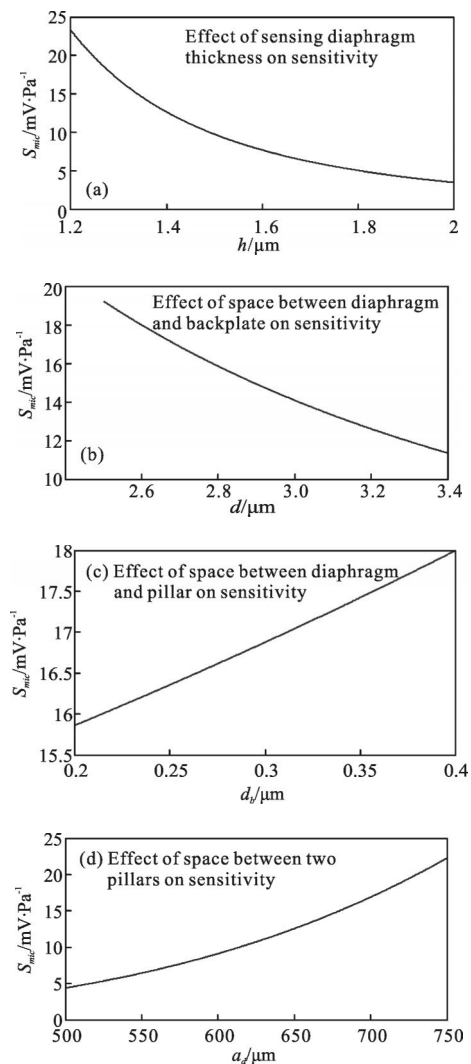


图5 传声器结构参数对灵敏度的影响
Fig.5 Effect of parameters of sensor structure on sensitivity

上述分析表明:合理设计微传声器的结构参数,可明显提高探测灵敏度。在光声腔内所产生的声压相同的情况下,灵敏度越高时所得到的光声信号也

就越强,从而可以探测到微弱的光声信号变化,即使泵浦光频率产生微小漂移也可以识别出来,因此稳频的精度就会越高。

经计算分析,设计了一组优化结构参数:敏感膜厚度 h 为 $1.3\ \mu\text{m}$,敏感膜与底板间距 d 为 $2.7\ \mu\text{m}$,敏感膜与横梁间距为 $0.3\ \mu\text{m}$,横梁间距 a_d 为 $700\ \mu\text{m}$ 。在偏置电压 V_b 为 $5\ \text{V}$ 时,相应的传声器灵敏度 S_{mic} 为 $16.9\ \text{mV/Pa}$ 。文中在后续计算中将采用该值作为计算光声信号时的传声器灵敏度。

2.3 泵浦激光频率漂移对光声信号的影响

图 6 给出了当泵浦光的中心频率与气体吸收线型的中心频率相同时,计算得到的腔内声压信号 $\Delta P(\nu)$ 随激光频率的变化。图中虚线标记了输入泵浦光的中心频率、吸收线型的中心频率以及声压信号峰值的位置。

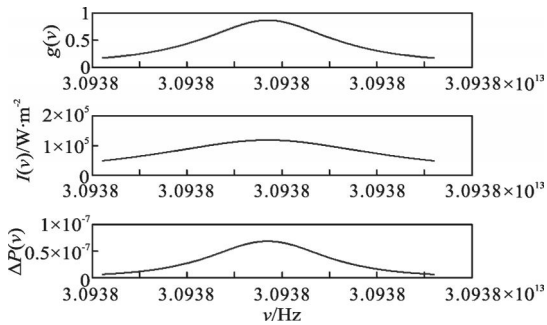


图 6 吸收线型、泵浦光功率密度和压强分量 $\Delta P(\nu)$ 随频率的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of absorption line, power density of pump laser, and pressure component with laser frequency

从图 6 可以看出:当入射泵浦光的中心频率与吸收线型函数的中心频率一致时, $\Delta P(\nu)$ 的最大值出现在泵浦光的中心频率处。然而,当入射泵浦光的中心频率与吸收线型函数的中心频率不一致时, $\Delta P(\nu)$ 整体下降且其极大值出现在泵浦光与吸收线型函数的中心频率之间,如图 7 所示。

进一步计算了泵浦激光中心频率在吸收线型中心频率附近产生漂移时的光声信号变化曲线,如图 8 所示。

分析图 8 可知,泵浦光的中心频率与气体吸收线型的中心频率越接近,则获得的光声信号越强。当泵浦光的中心频率相对于气体吸收谱中心频率出现一定的漂移时,随着频率漂移量 $\Delta\nu$ 的增大,光声信

号的强度明显减弱。由此可见,利用探测到的光声信号变化,反馈控制泵浦 CO_2 激光器腔长,即可达到泵浦激光稳频的目的。

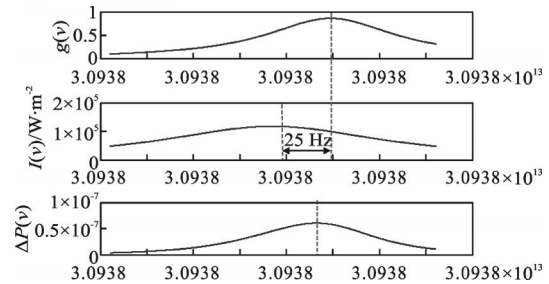


图 7 吸收线型、泵浦光功率密度和压强分量 $\Delta P(\nu)$ 随频率的变化曲线

Fig. 7 Variation curves of absorption line, power density of pump laser, and pressure component with laser frequency

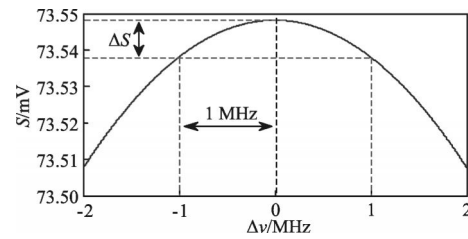


图 8 光声信号变化量随泵浦光频率漂移量的变化曲线

Fig. 8 Variation curves of photoacoustic signal with frequency shift of the pump laser from the center of the absorption line

图 8 中激光输出频率在气体吸收谱中心频率附近 $\pm 1\ \text{MHz}$ 范围内变化时,对应光声信号的变化量为 $\Delta S = \pm 0.010\ \text{mV}$,通过采用适合光声池微弱信号检测的变尺度差分方法^[10],可以精确地探测到这一微弱光声信号改变量。假设激光器腔长为 $120\ \text{cm}$,若要使激光频率稳定在中心频率附近 $\pm 1\ \text{MHz}$ 范围内,则要求腔长的变化范围在 $\Delta L = 0.077\ \mu\text{m}$ 内连续可调,这可以通过采用精确的腔长控制系统来控制激光腔镜上的压电陶瓷以纳米级的闭环控制精度改变腔长^[11],从而使激光器输出频率在中心频率附近小幅度波动,进而达到高精度稳频的目的。

3 结论

控制光泵太赫兹源泵浦激光器的频率漂移对于获得高稳定的气体太赫兹激光输出极为重要,而光声稳频技术则是一种实现泵浦激光器输出频率稳定的有效手段。文中针对光声信号探测过程中的探测

条件进行了优化,并定量分析了泵浦激光频率漂移对光声稳频信号的影响。研究表明,在实际工作中,需要将光声腔的气压控制在低压范围内,并尽量提高光声传感器的检测灵敏度;泵浦激光的频率漂移对光声信号产生的影响主要表现为:激光中心频率在吸收谱线中心频率附近变化时,光声信号随着频率漂移量的增大而减小,且激光的中心频率与吸收谱线中心频率重合时光声信号最大。当泵浦激光频率在一定范围内发生漂移时,可以利用探测到的光声信号通过反馈控制系统来精确地改变激光器的腔长,进而实现兆赫兹量级的高精度光声稳频。

参考文献:

- [1] Wang Ruijun, Wang Hongqiang, Zhuang Zhaowen, et al. Research progress of terahertz radar technology[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2013, 50(4): 040001. (in Chinese)
王瑞君,王宏强,庄钊文,等.太赫兹雷达技术研究进展[J].激光与光电子学进展,2013,50(4):040001.
- [2] Mueller E R, Henschke R, Robotham Jr W E, et al. Terahertz local oscillator for the microwave limb sounder on the aura satellite[J]. *Applied optics*, 2007, 46(22): 4907-4915.
- [3] Mueller E R, Robotham Jr W E, Meisner R P, et al. 2.5 THz laser local oscillator for the EOS Chem 1 satellite[C]// Proceedings of the Ninth International Symposium on Space Terahertz Technology, 1998: 563-574.
- [4] Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai, et al. Research of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, 48(8): 081401. (in Chinese)
苑丹丹,胡妹玲,刘宏海,等.激光器稳频技术研究[J].激光与光电子学进展,2011,48(8):081401.
- [5] Rosensweig A. Photoacoustic and Photoacoustic Spectroscopy [M]. Beijing: Science Press, 1986. (in Chinese)
罗森威格 A. 光声学 and 光声谱学 [M]. 北京: 科学出版社, 1986.
- [6] Chen Jiabi. Laser Principles and Applications [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2004. (in Chinese)
陈家璧. 激光原理及应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.
- [7] Zhang Zebo, Zhu Wensen, Zhao Yuying, et al. Opto-acoustic frequency stabilization of a CW CO₂ laser[J]. *Applied Laser*, 1984, 6: 011. (in Chinese)
张泽渤,朱文森,赵玉英,等. CW CO₂ 激光器的光声稳频[J]. 应用激光, 1984, 6: 011.
- [8] Wang W J, Lin R M, Zou Q B, et al. Modeling and characterization of a silicon condenser microphone[J]. *Journal of Micromechanics and Microengineering*, 2004, 14(3): 403.
- [9] Wang Wei, Dong Jian, Ji Shiming. Design and simulation of micromachined silicon condenser microphone with free floating diaphragm[J]. *Journal of Transduction Technology*, 2009(11): 1571-1575. (in Chinese)
王伟,董健,计时鸣. 具有自由悬浮敏感膜的硅微机械电容式麦克风的设计与仿真计算 [J]. 传感技术学报, 2009 (11): 1571-1575.
- [10] Xu Xuemei, Dai Peng, Yang Bingchu, et al. Duffing photoacoustic cell weak signal detection amplitude duffing[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013, 62(20): 204303. (in Chinese)
许雪梅,戴鹏,杨兵初,等. 光声池中微弱光声信号检测 [J]. 物理学报, 2013, 62(20): 204303.
- [11] Yu Xiao. Study on the control system of TEA CO₂ laser cavity [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009. (in Chinese)
喻筱. TEA CO₂ 激光器腔长控制系统研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.