

基于数字反馈控制的 Nd:YAG 激光器频率稳定技术

贺志刚^{1,2} 邓伦华³ 王贵师^{1,2} 汪磊^{1,2} 高晓明^{1,2}

¹中国科学院安徽光学精密机械研究所大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031
²中国科学院安徽光学精密机械研究所大气物理化学研究室, 安徽 合肥 230031
³华东师范大学精密光谱科学与技术国家重点实验室, 上海 200062

摘要 频率稳定的激光器在精密计量、高分辨率光谱等许多领域具有重要的应用。使用 KTP 晶体将 Nd:YAG 激光器输出的激光(1064 nm)倍频到 532 nm, 采用波长调制吸收光谱技术获得吸收峰的一次谐波信号作为鉴频信号, 并基于数字比例-积分-微分(PID)反馈控制技术, 把倍频后的频率稳定在碘分子 B-X 态(32-0)带的 R(56)吸收峰上, 在 1 h 的连续测量时间内, 频率漂移幅度小于 2 MHz, 远小于多普勒受限的光谱线宽, 频率稳定度达到了 10^{-9} 量级, 整套系统可以实现长时间连续工作。使用的数字 PID 稳频方案, 可以有效抑制激光的长期频率漂移, 具有方案简单、易于实现的优点, 同时显著降低了较大幅度随机噪声对系统稳定性的影响。

关键词 激光光学; 频率稳定; 数字比例-积分-微分; Nd:YAG 激光器

中图分类号 TN248.1⁺3 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0702009

Nd:YAG Laser Frequency Stabilization Technology Based on Digital Feedback Control

He Zhigang^{1,2} Deng Lunhua³ Wang Guishi^{1,2} Wang Lei^{1,2} Gao Xiaoming^{1,2}

¹Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
²Laboratory of Atmospheric Physico-Chemistry, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
³State Key Laboratory of Precision Spectroscopy, East China Normal University, Shanghai 200062, China

Abstract Frequency stabilized lasers are very important in many fields such as precision metrology and high resolution spectroscopy. A Nd:YAG laser (1064 nm) frequency stabilization scheme is reported. In this scheme, the laser frequency is doubled and stabilized at the R(56) absorption line of (32-0) band in the B-X system of molecular iodine based on digital proportion-integration-differentiation (PID) technique. The frequency stability reaches 10^{-9} and the frequency drift is less than 2 MHz in 1 h, which is far less than the Doppler-limited molecular absorption linewidth. This scheme can suppress the laser frequency drift effectively and minimize the large-amplitude random noise. It is proved simple and easy to implement.

Key words laser optics; frequency stabilization; digital PID; Nd:YAG laser

OCIS codes 140.3425; 140.3515; 140.3518

1 引 言

频率稳定的 Nd:YAG 激光器在很多科研领域都有重要应用^[1,2], 如精确计量^[3]、空间通信^[4] 以及

光谱分析^[5,6] 等。对于激光稳频技术, 选取频率参考标准非常关键^[7]。在对 Nd:YAG 激光器短期频率稳定度要求非常高时, 常用的频率参考标准是高

收稿日期: 2012-02-15; 收到修改稿日期: 2012-04-06

基金项目: 国家自然科学基金(41175036)与中国科学院大气成分与光学重点实验室开放基金资助课题。

作者简介: 贺志刚(1986—), 男, 硕士研究生, 主要从事激光稳频方面的研究。E-mail: zhiganghe@yahoo.com.cn

导师简介: 高晓明(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事大气分子光谱和高分辨率激光光谱技术等方面的研究。

E-mail: xmgao@aiofm.ac.cn(通信联系人)

精细度法布里-珀罗腔的透射峰^[8~10],由于透射峰的宽度非常窄,所以在腔本身很稳定的前提下可以获得很窄的激光线宽。然而法布里-珀罗腔本身的稳定度也会受到周围环境的影响。为了得到高复现性、低噪声水平的频率,通常以原子/分子或离子的跃迁谱线频率作为激光频率锁定的参考标准^[11,12],这种方法的优点在于其长期频率稳定性非常高,而且频率的复现性可以保证。

碘分子在 532 nm 附近具有很强的吸收光谱,并且 B-X 态(32-0)带的 R(56)跃迁超精细谱线的 a_{10} 分量已经成为国际米定义咨询委员会推荐的参考谱线之一^[13]。基于碘分子吸收的激光稳频技术主要有频率调制线性吸收稳频、频率调制饱和吸收稳频^[14]以及调制转移光外差稳频^[15]。目前,世界上很多国家和机构都已经或正在建立自己的稳频绿光系统^[16]。中国科学技术大学 Deng 等^[17]利用碘分子的频率调制线性吸收稳频技术,对 Nd:YAG 激光进行了稳频,并用于差频光源系统中作为信号光源。美国 JILA 联合实验室的 Eickhoff 等^[3]利用环形固体激光器腔外倍频,并采用调制转移光谱技术,探测到碘分子高信噪比的超精细吸收光谱,实现了 532 nm 激光频率标准,频率稳定度达到 2×10^{-14} 量级(1 s)。

线性吸收稳频可以满足一般的对激光频率稳定性的要求,结构比较简单;饱和吸收稳频可以得到更好的激光频率稳定性,但是装置相对复杂。在线性吸收的情况下,常用吸收谱线的一次微分曲线来做鉴频曲线;在饱和吸收的情况下,为了获得无多普勒

背景的信号,常采用三次谐波方法^[18]。本文采用线性吸收稳频的方法以碘分子的一条吸收线作为频率稳定标准,采用数字比例-积分-微分(PID)反馈的方式对 Nd:YAG 激光器进行频率稳定,频率漂移在 2 MHz 以内(1 h),远远小于多普勒受限的光谱线宽。这个方案的优点是简单、易于实现并保证有一定的频率稳定度。

2 实验装置

稳频的实验装置如图 1 所示,激光光源为 InnoLight 公司生产的 Nd:YAG 激光器(Mephisto/Prometheus Laser Series III),可提供最大输出功率为 1 W 的单模 1064 nm 波长的激光输出。将一个频率为 2 kHz,峰峰幅度为 1 V 的正弦波信号加在激光器谐振腔一侧的压电陶瓷(PZT)上,对应的频率调制幅度为 1 MHz,以此实现对激光输出频率的调制。激光首先通过光隔离器(OI),之后经透镜聚焦进入 KTP 晶体倍频,倍频光波长在 532 nm 附近,其功率约为 $80 \mu\text{W}$ 。经过双色片后,532 nm 的光被分离出来用于稳频,通过长度为 10 cm 的碘吸收池后入射到探测器。探测器探测到的光功率信号送到锁相放大器解调,获得碘分子的一次谐波信号,同时也是用于稳定频率的误差信号。利用采集卡将信号采集到计算机,滤波之后通过数字 PID 模块获得反馈信号,然后与信号发生器输出的幅度为 50 mV 的正弦调制信号叠加,经高压放大器(HV, ThorLABS 公司 HVA 200)放大 20 倍,加在 Nd:YAG 激光器谐振腔的 PZT 上。实验室温度为 20 °C。

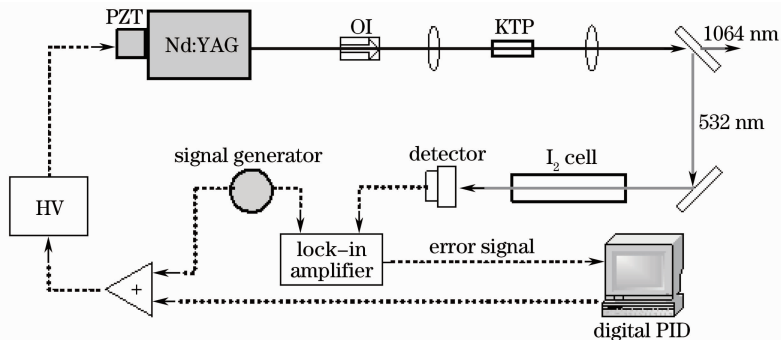


图 1 利用数字 PID 稳频的实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of digital PID frequency stabilization

图 2 所示为碘分子在 563257~563265 GHz 范围内的吸收谱线,该谱图通过扫描激光器的温度获得。图中的两条谱线分别为 B-X 态(32-0)带的 R(56) ($18788.338 \text{ cm}^{-1}$)和 P(53) ($18788.424 \text{ cm}^{-1}$)^[19],将频率锁定在 R(56)的吸收峰上,吸收峰的半峰全宽为

1.026 GHz。为获得一次谐波吸收谱线,在相同条件下再次做温度扫描,同时在谐振腔的 PZT 上加频率为 2 kHz,峰峰幅度为 1 V 的正弦波信号,用锁相放大器对吸收信号解调,从而获得频率扫描范围内的一次谐波信号。图 2 中一次谐波信号的信噪比约

为 36 dB。解调后的一次谐波信号过零点位置处的斜率与其他频率位置处的斜率不一致是因为在过零点位置碘分子对 532 nm 的光吸收很强,接近饱和所致,这并不影响测量结果,因为零点位置的斜率仍然能够满足实验要求。

3 数字反馈控制

从锁相放大器采集到的误差信号包含一些较大幅度的随机噪声,如果直接将包含噪声的信号传递给 PID 模块进行反馈控制,会造成控制系统的振荡,经过一段弛豫时间后才能重新恢复稳定。针对信号的这种噪声特性,对信号做限速滤波,可以有效降低噪声对反馈系统的影响,再将信号送入数字 PID 模块获得控制信号,软件设计流程如图 3 所示。限速滤波的原理是根据经验确定出相邻两次采样信号之间的最大偏差 ΔE ,如果采样得到的两个点差值超过此偏差,则认为是干扰信号,舍弃不用,若小于此偏差,则作为采样值。这种方法可以有效滤掉误差信号中包含的噪声,从而提高控制系统的稳定

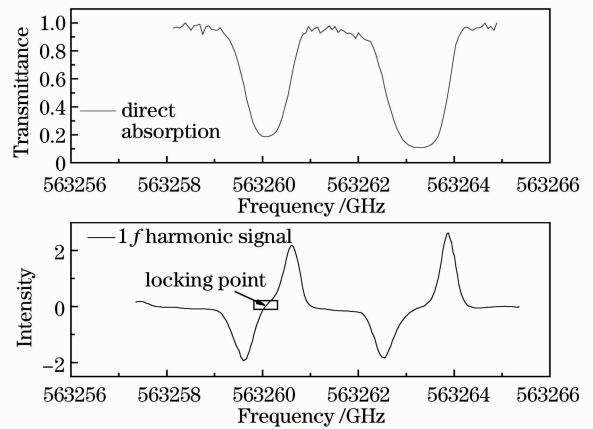


图 2 多普勒受限条件下扫描激光频率得到的碘分子(32-0)带的 R(56) ($18788.338 \text{ cm}^{-1}$) 和 P(53) ($18788.424 \text{ cm}^{-1}$) 谱线

Fig. 2 Doppler-limited absorption spectra R(56) $18788.338 \text{ cm}^{-1}$ and P(53) $18788.424 \text{ cm}^{-1}$ of the (32-0) band in the B-X system of molecular iodine

度。程序流程如图 3(b)所示,图中的 $E(1)$ 、 $E(2)$ 、 $E(3)$ 为相继采集的三个点。

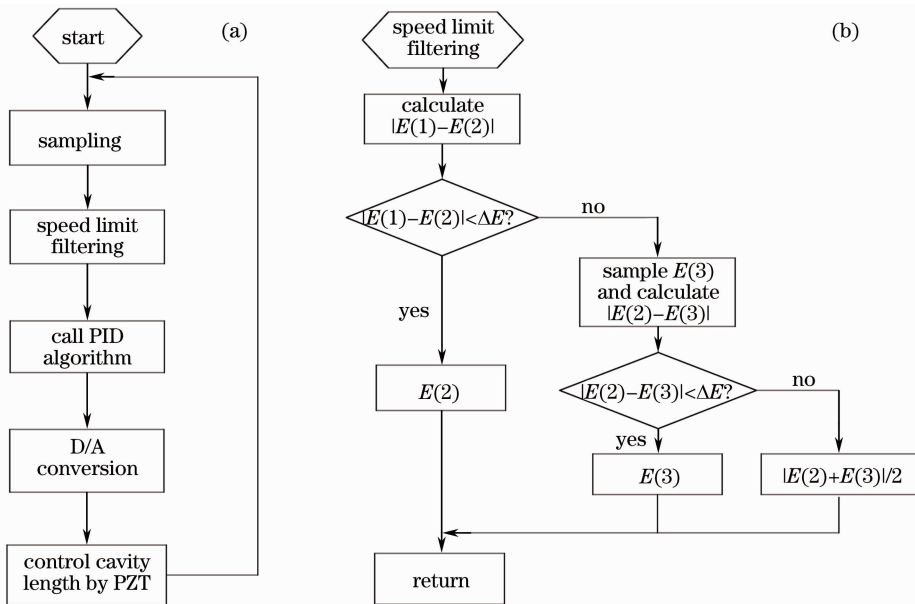


图 3 (a)程序控制流程图和(b)限速滤波子程序流程图

Fig. 3 (a) Control flowchart and (b) filter subroutine flowchart

PID 控制是连续系统中最成熟也是应用最广泛的控制方式,其实质是根据输入的偏差值 $e(t)$,按比例、积分、微分的线性组合进行运算,将运算结果作为输出控制量 $u(t)$ 。工作原理如图 4 所示,其控制规律为

$$u(t) = K_P \left[e(t) + T_D \frac{de(t)}{dt} + \frac{1}{T_I} \int_0^t e(t) dt \right]. \quad (1)$$

数字控制通过采样实现,其输入量是不连续的,因而(1)式中的积分项和微分项不能精确计算,只能通过数值计算逼近:

$$u_k = K_P \left[e_k + \frac{T_D}{T_S} (e_k - e_{k-1}) + \frac{T_S}{T_I} \sum_{j=0}^k e_j \right]. \quad (2)$$

(2)式就是通常的数字 PID 算法。(1)、(2)式中, e_k 是误差信号,由于频率锁定在一次谐波信号的零值,所以可以直接把锁相放大器输出的信号经滤波后作

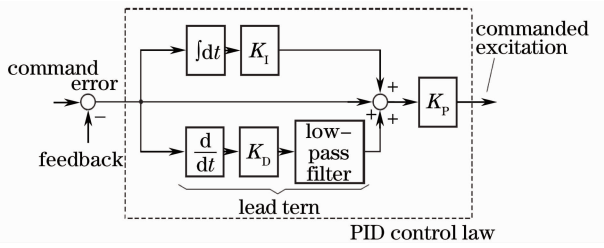


图 4 PID 控制原理示意图

Fig. 4 Schematic diagram of PID control

为误差信号。 K_P 是比例系数, T_S 是采样时间, T_D 和 T_I 分别是微分时间和积分时间。如果采样时间间隔很短, 那么控制过程可以与模拟控制过程非常相近。使用数字 PID 的优点在于可以非常直观地看到 PID 各个参数的设置对稳频结果的影响, 根据稳定的效果可以非常灵活方便地调节各个参数, 从而达到最好的控制效果。实验采用 PI 控制, 采样时间间隔为 0.05 s, 利用凑试法获得的参数 K_P 、 T_I 分别为 -5、0.01 min。

4 频率稳定度分析

实验根据误差信号的幅度来反推频率漂移的幅度, 误差信号实际上就是吸收谱线的一次谐波信号, 为了做出正确的频率漂移幅度估计, 首先必须要得到一次谐波信号和频率的对应关系。通过在一个连续范围内改变激光器温度实现对频率的扫描, 在此过程中, 将一小部分光导入波长计 (Burleigh WA-1500), 通过波长计监测激光器频率, 同时采集一次谐波信号。得到的一次谐波信号及对应的吸收峰透射率曲线见图 2。

把频率锁定在图 2 中箭头所指的位置, 也就是一次谐波信号的零值。可以认为在零点附近很小的一个范围内一次谐波信号和频率的关系是线性的, 如图 5 所示, 在这一小段范围内谐波信号 (也就是误差信号) 和频率的线性拟合关系式为

$$e = -1.13607 \times 10^6 + 2.01695 \times \nu_D, \quad (3)$$

式中 e 是误差信号, ν_D 是倍频光的频率, 单位为 GHz。Nd:YAG 激光器输出的 1064 nm 波长的基频光其频率与误差信号的关系式为

$$e = -1.13607 \times 10^6 + 4.03390 \times \nu_N, \quad (4)$$

ν_N 是基频光的频率。对 (4) 式两边做微分

$$de = 4.03390 \times d\nu_N, \quad (5)$$

de 是误差信号的漂移幅度, $d\nu_N$ 是对应的 Nd:YAG 激光器频率漂移幅度。对 (5) 式做变换, 从而有

$$d\nu_N = \frac{de}{4.03390} (\text{GHz}). \quad (6)$$

(6) 式可以认为是误差信号幅度和频率漂移幅度之间的对应关系式。监测到一定时间范围内的 de 之后, 就可以利用 (6) 式估算出这一段时间内的频率漂移幅度 $d\nu_N$ 。

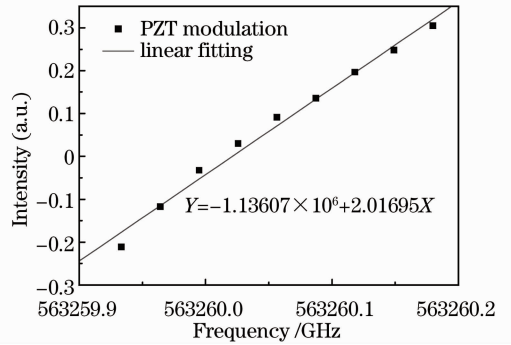


图 5 锁定点附近误差信号和频率的线性拟合

Fig. 5 Error signal (solid squares) and its linear fitting (line) at the locking point

5 结果与讨论

图 6 是时长 50 min 的锁定和未锁定的误差信号对比, 两者的幅度取峰峰值, 锁定前的频率漂移幅度为 0.15 V, 锁定后的幅度为 0.007 V。根据 (6) 式可以计算得出, 对应锁定前的频率漂移幅度为 37.18 MHz, 锁定后的频率漂移幅度为 1.74 MHz。根据 Nd:YAG 激光器的产品说明书, 激光器的长期频率漂移为每小时 40 MHz 左右, 因此可以看出这种方法估算的结果是可靠的。

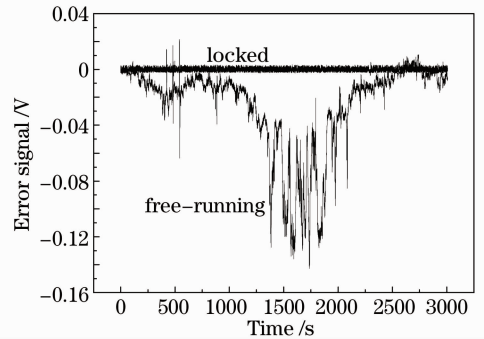


图 6 激光器自由运转和开启反馈控制的误差信号漂移幅度对比

Fig. 6 Comparison of error signals between free-running and locked

锁定后激光器的频率稳定度为

$$S_{\nu(\tau)}^{-1} = \frac{\Delta\nu(\tau)}{\bar{\nu}} = \frac{1.74 \times 10^{-3} \text{ GHz}}{281630.68 \text{ GHz}} = 6.18 \times 10^{-9}. \quad (7)$$

在近红外到中红外波段, 气体的线宽通常为 $10^2 \sim 10^3$ MHz 量级, 因此可以认为目前的频率稳定

度完全可以满足气体谱线探测应用的要求。

6 结 论

将 Nd:YAG 激光器发出的激光经过二次倍频, 然后利用波长调制技术获得频率信息, 并利用数字 PID 反馈的方法将其稳定在碘分子一条吸收线的吸收峰上。与其他方法相比, 此方法更为简单且易于实现, 反馈控制使用了数字 PID, 使得控制参数的调节非常方便。在这样的情况下得到了满意的效果, 频率稳定度达到了 10^{-9} 量级, 足够应用于通常的光谱探测。

参 考 文 献

- 1 G. Galzerano, C. Svelto, E. Bava *et al.*. High-frequency-stability diode-pumped Nd:YAG lasers with the FM sidebands method and Doppler-free iodine lines at 532 nm[J]. *Appl. Opt.*, 1999, **38**(33): 6962~6966
- 2 N. Ohmae, S. Moriwaki, N. Mio *et al.*. Wideband and high-gain frequency stabilization of a 100-W injection-locked Nd:YAG laser for second-generation gravitational wave detectors[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2010, **81**(7): 073105
- 3 M. L. Eickhoff, J. L. Hall. Optical frequency standard at 532 nm[J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 1995, **44**(2): 155~158
- 4 L. G. Kazovsky. Performance analysis and laser linewidth requirements for optical PSK heterodyne communications-systems [J]. *J. Lightwave Technology*, 1986, **4**(4): 415~425
- 5 A. Arie, R. L. Byer. Frequency stabilization of the 1064-nm Nd:YAG lasers to Doppler-broadened lines of iodine[J]. *Appl. Opt.*, 1993, **32**(36): 7382~7386
- 6 Zhao Nanjing, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. The fluorescence emission of water at upconversion of frequency by laser induced fluorescence [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2006, **26**(6): 980~982
赵南京, 刘文清, 张玉钧等. 激光诱导水体频率上转换的荧光发射[J]. *光谱学与光谱分析*, 2006, **26**(6): 980~982
- 7 Zhang Bin, Long Xingwu, Liu Jianping *et al.*. Lamb-dip frequency-stabilized He-Ne laser with an integrated cavity made of zerodur (I); structure and techniques[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **31**(8): 0814005
张 斌, 龙兴武, 刘贱平等. 微晶玻璃腔体一体化兰姆凹陷稳频 He-Ne 激光器(I): 结构与工艺[J]. *光学学报*, 2011, **31**(8): 0814005
- 8 T. Day, E. K. Gustafson, R. L. Byer. Sub-hertz relative frequency stabilization of 2-diode laser-pumped Nd:YAG lasers locked to a Fabry-Perot-interferometer[J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1992, **28**(4): 1106~1117
- 9 M. Bregant, G. Cantatore, F. Della Valle *et al.*. Frequency locking to a high-finesse Fabry-Perot cavity of a frequency doubled Nd:YAG laser used as the optical phase modulator[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(12): 4142~4144
- 10 Yuan Dandan, Hu Shuling, Liu Honghai *et al.*. Research of laser frequency stabilization [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2011, **48**(8): 081401
苑丹丹, 胡姝玲, 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
- 11 M. Musha, T. Kanaya, K. Nakagawa *et al.*. The short- and long-term frequency stabilization of an injection-locked Nd:YAG laser in reference to a Fabry-Perot cavity and an iodine saturated absorption line[J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**(1-4): 165~173
- 12 Meng Tengfei, Wu Yuelong, Ji Zhonghua *et al.*. Frequency stabilized diode laser based on cesium molecular saturated absorption spectroscopy[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(5): 1182~1185
孟腾飞, 武跃龙, 姬中华等. 铯分子饱和吸收谱的半导体激光器稳频[J]. *中国激光*, 2010, **37**(5): 1182~1185
- 13 T. J. Quinn. Practical realization of the definition of the metre (1997)[J]. *Metrologia*, 1999, **36**(3): 211~244
- 14 R. X. Guo, F. L. Hong, A. Onae *et al.*. Frequency stabilization of a 1319-nm Nd:YAG laser by saturation spectroscopy of molecular iodine[J]. *Opt. Lett.*, 2004, **29**(15): 1733~1735
- 15 L. S. Ma, L. Hollberg, J. H. Shirley *et al.*. Modulation transfer spectroscopy for stabilizing laser [P]. U. S. Patent, 4590597, 1986-5-20
- 16 Zang Erjun, Cao Jianping, Li Ye *et al.*. 532 nm iodine molecular optical frequency standards[J]. *Chinese J. Lasers*, 2007, **34**(2): 203~208
臧二军, 曹建平, 李 烨等. 532 nm 碘分子光频标[J]. *中国激光*, 2007, **34**(2): 203~208
- 17 W. P. Deng, B. Gao, C. F. Cheng *et al.*. A frequency-stabilized difference frequency generation laser spectrometer for precise line profile studies in the midinfrared [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2008, **79**(12): 123101
- 18 K. Nyholm, M. Merimaa, T. Ahola *et al.*. Frequency stabilization of a diode-pumped Nd:YAG laser at 532 nm to iodine by using third-harmonic technique [J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 2003, **52**(2): 284~287
- 19 J. Ye, L. Robertsson, S. Picard *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular 1-2 lines at 532 nm [J]. *IEEE Trans. Instrumentation and Measurement*, 1999, **48**(2): 544~549

栏目编辑: 宋梅梅