

碘分子吸收稳定中红外差频激光频率

孙明国^{1,2} 马宏亮¹ 王贵师² 汪磊² 曹振松^{1*} 梁万国³
陈怀曦³ 周煌³ 邹小林³ 陈卫东^{2,4} 高晓明^{1,2}

¹ 中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院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 中国科学院福建物质结构研究所, 福建 福州 350002
⁴ 法国滨海大学大气物理化学实验室, 法国 敦刻尔克 59140

摘要 差频光源用于大气分子稳定同位素丰度研究需要频率稳定的连续输出的空闲光。基于连续可调谐钛宝石激光器和单频连续 Nd:YAG 激光器建立差频系统, 为了稳定差频系统产生的红外光源的波长, 利用 MgO:PPLN 作为倍频晶体, 采用有多普勒展宽的碘分子吸收稳频方法, 结合数字比例-积分-微分 (PID) 反馈控制技术, 将 Nd:YAG 激光器的频率漂移量稳定在 1.2 MHz/h 内, 稳定度为 4.26×10^{-9} 。实验结果表明: 增加对压电陶瓷 (PZT) 的调制电压时, Nd:YAG 激光在 1 h 内的频率漂移量迅速减小, 超过 1 V 后漂移量趋于稳定; 改变对 PZT 调制频率没有获得较高的稳定度。将频率稳定后的 Nd:YAG 激光用于产生 3.42 μm 附近的差频光源, 通过对低压下 CH₄ 气体分子吸收谱线的测量, 去卷积运算得到差频系统的线宽约为 6.9 MHz。实验结果既为该方法用于稳定激光频率提供了重要的参考, 又为痕量气体探测提供了频率稳定的差频光源。

关键词 非线性光学; 激光稳频; 数字比例-积分-微分技术; 一次谐波; 差频产生

中图分类号 TN248.1 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.0702006

Frequency Stabilization of Mid-Infrared Difference Frequency Laser by Iodine Molecule Absorption

Sun Mingguo^{1,2} Ma Hongliang¹ Wang Guishi² Wang Lei² Cao Zhensong¹
Liang Wanguo³ Chen Huaixi³ Zhou Huang³ Zou Xiaolin³
Chen Weidong^{2,4} Gao Xiaoming^{1,2}

¹ Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
² Laboratory of Atmospheric Physico-Chemistry, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China
³ Fujian Institute of Research on the Structure of Matter, Chinese Academy of Sciences, Fuzhou, Fujian 350002, China
⁴ Laboratoire de Physico-Chimie de l'Atmosphère, Université du Littoral Côte d'Opale, Dunkerque 59140, France

Abstract Difference frequency laser used for the study of atmospheric molecule isotope abundance requires stable frequency and continuous idler radiation. A difference frequency generation (DFG) system is established based on a tunable continuous wave (CW) Ti:sapphire laser and a CW single-frequency Nd:YAG laser. In the DFG system,

收稿日期: 2014-01-22; 收到修改稿日期: 2014-02-27

基金项目: 国家自然科学基金(41205021, 41175036)、中国科学院大气成分与光学重点实验室开放基金

作者简介: 孙明国(1981—), 男, 博士研究生, 主要从事大气分子稳定同位素丰度探测技术方面的研究。

E-mail: sunmguo@ahpu.edu.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及应用等方面的研究。E-mail: xmgao@aiofm.ac.cn(通信联系人)

frequency stabilization method of iodine molecule Doppler-broadened absorption combined with digital proportion integration differentiation (PID) feedback control technology is adopted to stabilize the wavelength of infrared laser arising from the DFG system, while MgO:PPLN is used as the frequency doubling crystal. The Nd:YAG laser frequency shift is stabilized within 1.2 MHz/h and the stability is 4.26×10^{-9} . The experimental results show that the frequency shift within 1 h of Nd:YAG laser decreases rapidly with the increase of the voltage loaded on piezoelectric ceramic (PZT), but smaller shift is not achieved beyond 1 V; better stability is not achieved by changing the frequency of modulation voltage. Nd:YAG laser with stabilized frequency is used to generate difference frequency laser near $3.42 \mu\text{m}$. By detecting low pressure absorption line of CH_4 , the 6.9 MHz line width of this difference frequency system is derived. The results provide not only an important reference for laser frequency stabilization by this technology, but also a stable difference frequency laser for trace gas detection.

Key words nonlinear optics; laser frequency stabilization; digit proportion integration differentiation technology; first harmonic; difference frequency generation

OCIS codes 140.3070; 140.3425; 140.3515; 140.3518

1 引 言

近年来,随着新型非线性光学材料、准相位匹配技术和激光技术的发展,基于非线性差频产生连续相干红外辐射源技术已趋于成熟。这种技术拓宽了现有激光波长覆盖范围,提供了新的相干光波段。通过可见或红外激光在非线性光学晶体中的差频,已经成功获得了连续中红外相干光源^[1-2],并广泛应用于各种痕量气体高灵敏度监测和大气高分辨率吸收光谱研究等^[3-6]。

差频光源的频率稳定性由抽运光和信号光的频率稳定性共同决定^[7]。钛宝石激光器和 Nd:YAG 激光器常用来作为产生 $2 \sim 5 \mu\text{m}$ 中红外差频光的种子光源。目前,钛宝石激光技术比较成熟,能够实现激光的窄线宽及频率稳定输出,如英国 M Squared Lasers 公司生产的窄线宽钛宝石激光器,说明书上标称线宽小于 50 kHz,实验室实测 780 nm(文中均指真空中波长)处的线宽为 25 kHz,自带的参考腔锁定系统,使得钛宝石激光器频率稳定性较好;而对于 YAG 激光器,由于受环境温度变化等因素影响,其输出频率漂移幅度较大(1 MHz/min),甚至发生突变现象,YAG 激光器的频率稳定性是影响差频光频率稳定性的主要因素。因此,需要对 Nd:YAG 激光器进行稳频。在频率稳定技术中,选取频率参考标准非常重要,常用的频率参考标准是法布里-珀罗(F-P)腔的透射峰^[8]。在较高腔镜反射率时,F-P 腔透射峰的线宽很窄,其信号幅度值对频率的变化非常灵敏,因而在腔本身稳定的前提下,可以实现很窄的激光线宽。但 F-P 腔本身的稳定性易受环境的影响,使频率参考标准产生波动。在压力变化不大的条件下,原子、分子或离子的跃迁谱线的中心频率稳定,常被选作激光频率稳定的参考标准^[9]。在对 Nd:YAG 激光器进行稳频时,常采用碘分子吸收线

作为频率标准,相关技术主要有碘分子线性或饱和吸收的奇次谐波稳频^[10]和调制转移光外差稳频^[11]。目前,多个研究小组已建立了激光光源稳频系统。Eickhoff 等^[12]采用调制转移光谱技术,以碘分子吸收的超精细结构为频率标准,成功地实现了对一环形固体激光器稳频,频率稳定度低于 1×10^{-13} (1 s)量级。中国科学技术大学的 Deng 等^[13]采用碘分子吸收一次谐波稳频技术,对 YAG 激光器进行了稳频,并将稳频后的 YAG 光源用于差频,实验上对比了稳频前后差频光的稳定性。中国科学院安徽光学精密机械研究所的贺志刚等^[14]采用 KTP 晶体倍频 YAG 激光光源,通过数字比例-积分-微分(PID)反馈控制的方法成功实现了对 YAG 激光器的稳频,稳频后的光源可以长期稳定工作。碘分子多普勒展宽吸收奇次谐波稳频相对饱和吸收稳频,结构简单,较宽的吸收线为稳频提供了更大的动态范围,有利于实现长时间的稳频,便于差频光源的长时间应用。

本文采用碘分子多普勒展宽吸收一次谐波信号稳频技术,通过数字 PID 反馈的方式,成功地稳定了 Nd:YAG 光源的频率,讨论了压电陶瓷(PZT)的不同调制条件对频率稳定性的影响,并测量了稳定后差频系统的线宽。

2 实验原理

光与非线性光学晶体相互作用时,常见的频率转换过程有以下几种:二次谐波产生(SHG)过程和频产生(SFG)过程和差频产生(DFG)过程。一束频率为 ω 的激光光源注入到一个非线性介质上,产生一个频率为 2ω 的激光辐射,称为二次谐波产生即倍频过程;频率为 ω_p 和 ω_s 的两束激光光源注入到一个非线性光学晶体上,产生一个频率为 $\omega_i = \omega_p - \omega_s$ 的激光辐射,称为差频产生过程,其实质是在

非线性光学晶体中产生新的激光光源的频率下转换过程。3种光波在晶体中相互作用时会由于波矢的失配引起相位失配现象, $\Delta k = k_p - k_s - k_i$ 是波矢的失配, 其中 k_p, k_s, k_i 为3种光波的波矢。实现有效频率转换的方法之一是利用相位匹配技术或称动量守恒条件, 由 $\Delta k = 0$ 给出。准相位匹配技术的基本原理是通过周期性极化非线性晶体改变有效非线性系数 d_{eff} 的符号, 让非线性过程产生 180° 的相移来实现。当非线性系数被周期性调制时, 波矢的失配可以表示为

$$\Delta k = k_p - k_s - k_i - \frac{2\pi}{\Lambda}, \quad (1)$$

式中 Λ 为晶体的光栅周期。通过把晶体的光栅周期调节到 $\Lambda = 2\pi/(k_p - k_s - k_i)$, 就可以在传统相位匹配技术无法达到匹配条件的位置取得相位匹配。

实验中用钛宝石激光作为抽运光, Nd:YAG 激光作为信号光, 通过周期性极化的 PPLN 晶体实现差频中红外激光输出。选用另一块 MgO:PPLN 晶体将 1064 nm 的 YAG 激光倍频至 532 nm。

在分子或原子吸收稳频实验中, 直接吸收谱线中心两侧的功率信号对称, 无法作为鉴频信号使用。为获取单调单值的鉴频信号并抑制噪声, 采用波长或频率调制光谱技术, 锁相解调分子或原子吸收奇次微分光谱信号作为稳频的鉴频信号。实验中通过调制 YAG 激光器的 PZT, 改变其腔长, 来实现对其输出频率的调制。

通常情况下, 测量得到的吸收谱线的线宽是分子吸收线宽与系统线宽的卷积。在低压条件下, 分子谱线的线宽为多普勒线宽 γ_D , 其值为

$$\gamma_D = 3.58117 \times 10^{-7} \nu_0 \sqrt{\frac{T}{M}}, \quad (2)$$

式中 M 为吸收气体的分子量, T 为测量时的温度, ν_0 为谱线的位置。低压条件下测量出吸收谱线的线宽, 理论计算出分子吸收谱线的多普勒线宽, 通过去卷积计算得到系统的线宽为

$$\gamma_{\text{sys}} = \sqrt{\gamma_M^2 - \gamma_D^2}, \quad (3)$$

式中 γ_M 为低压下测量的谱线线宽。

3 实验装置

实验装置如图 1 所示。YAG 激光器经光隔离器(OI)及 1/4 波片(QWP)后, 用分束镜(BS)分出约 4% 的激光用于稳定频率, 其余的约 96% 用于产生差频光。4% 的一束先通过一个 1/2 波片, 然后入射到光栅周期为 $9 \mu\text{m}$ 的 MgO:PPLN 晶体上, 旋转

1/2 波片调节入射光的偏振方向, 同时通过 PID 控制帕尔贴的电流将晶体的温度控制在约 28°C , 使 YAG 激光在 MgO:PPLN 晶体中满足倍频相位匹配条件。1064 nm 的光倍频至波长为 532 nm 的绿光后, 经双色片分离出 532 nm 的绿光用于稳频。用函数发生器产生一幅度为 100 mV、一定频率的正弦信号经高压放大器(HV)后加载在 YAG 激光器谐振腔一侧的 PZT 上, 实现对激光器输出频率的调制, 另一路作为参考信号送入锁相放大器。倍频以后的绿光经长为 2 cm 的碘吸收池后入射到探测器。探测器接收到的光功率信号送入锁相放大器解调, 锁相放大器解调出的一次谐波信号即为稳频的误差信号。利用采集卡将信号送入计算机, 通过 Labview 编写的采集和数字 PID 反馈控制程序产生反馈电压信号, 经高压放大器放大后控制 YAG 激光器的 PZT, 来实现对 YAG 激光器输出频率的稳定。

钛宝石激光器输出的激光经金膜镜片(M)反射后用分束镜将其分成两束, 功率较小的一束送入波长计用于监测和采集其输出波长, 另一束光被斩波后与 96% 的 YAG 激光经合束镜(DM)合为一束, 透镜(L)会聚后入射到 PPLN 晶体上, PID 控制晶体的温度使两束光在晶体中满足准相位匹配条件, 产生一定波长中红外差频光, 用锗滤光片(GF)滤除钛宝石和 YAG 的光。将差频光导入充有低压 CH_4 气体的 100 m 长多通池(OAC)中, 用探测器(D)采集低压 CH_4 气体的吸收信号, 用于推算锁频后差频系统的线宽。

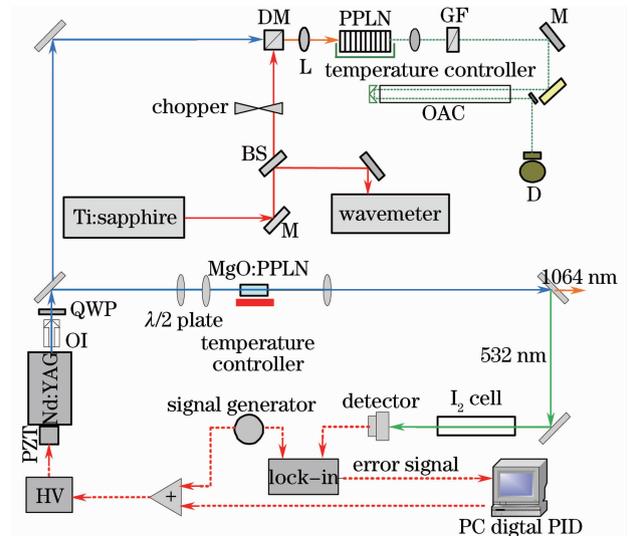


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

4 结果与讨论

4.1 稳定 Nd:YAG 激光器频率

利用计算机结合 Labview 程序控制采集卡模拟输出电压信号来控制 YAG 激光晶体的温度,从而改变 YAG 激光的频率,实现对其频率的连续扫描,YAG 激光的温度调谐系数为 -3 GHz/K 。YAG 激光晶体的温度从 $30.21 \text{ }^\circ\text{C}$ 扫至 $31.71 \text{ }^\circ\text{C}$,扫描步长为 $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$ 。图 2 为在该温区内扫描得到的碘分子两吸收峰,用 A,B 表示。比较可知,峰 A 比峰 B 窄,但对称性较差,故实验上将 YAG 频率锁定在峰 B 的峰心处,峰 B 为碘分子吸收精细结构 P(53),P(103)和 R(53)谱线的叠加轮廓。

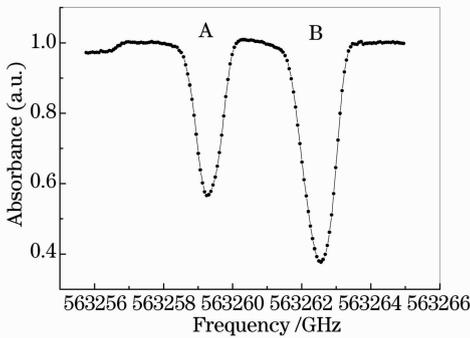


图 2 碘分子吸收谱带的 $18788.338 \text{ cm}^{-1}$ 处峰 A 和 $18788.424 \text{ cm}^{-1}$ 处峰 B

Fig. 2 Spectral peaks A ($18788.338 \text{ cm}^{-1}$) and B ($18788.424 \text{ cm}^{-1}$) of iodine molecule absorption band

经碘分子吸收后的信号直接送入锁相用于一次谐波信号的解调。函数发生器发出 100 mV 、 10 kHz 的正弦波,其幅度经加法器后衰减一半即 50 mV ,再经高压放大器放大 20 倍至 1 V 后加载在 YAG 激光器的 PZT 上,实现对 YAG 激光器频率的调制,调制系数为 1 MHz/V 。计算机控制采集卡扫描 YAG 的晶体温度来调谐波长。碘分子吸收峰 B 的一次谐波信号如图 3 所示。箭头所指一次谐波

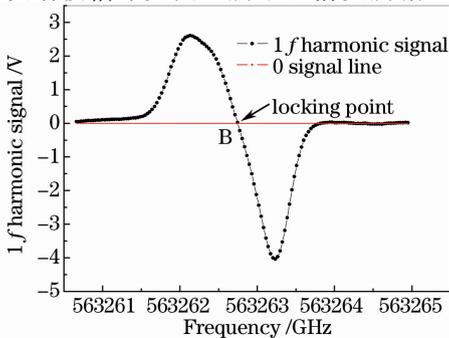


图 3 碘分子吸收峰 B 的一次谐波信号

Fig. 3 $1f$ harmonic signal of iodine molecule absorption peak B

信号的零点位置即为吸收峰的中心处,亦为 YAG 激光频率的待锁定位置。

为验证该调制及锁相条件下一次谐波信号零点附近的 PZT 控制时的信号线性部分幅度足以满足锁频的需要,将该幅度值与 1 h 内误差信号的幅度进行了比较。如图 4 所示,计算机输出 $-8 \sim +8 \text{ V}$ 的扫描电压,经高压放大器放大至 $-80 \sim +80 \text{ V}$ 后,加载至 YAG 激光器的 PZT 上,扫描一次谐波信号的值为 $-2.5 \sim 2 \text{ V}$ (幅度: 4.5 V)。1 h 内的误差信号值为 $-0.5 \sim 0.15 \text{ V}$ (幅度: 0.65 V)。比较可知,该实验条件下的一次谐波信号完全可以作为误差信号用来稳定 YAG 激光的频率。

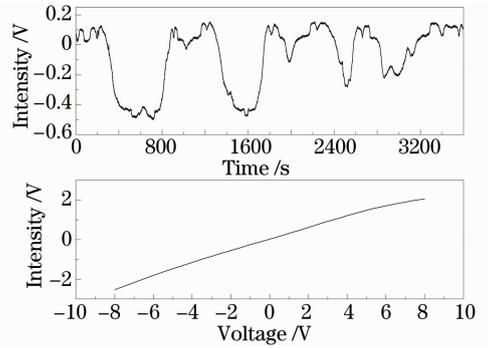


图 4 一次谐波信号零点处的信号幅度与 1 h 内误差信号漂移幅度比较

Fig. 4 Comparison of amplitude between $1f$ harmonic signal near zero and error signal shift within 1 h

实验根据误差信号即一次谐波信号的幅度来反推频率漂移的幅度。零点附近频率与误差信号的关系如图 5 所示,图中 R 为相关系数,SD 为拟合的标准偏差。在零点附近范围内频率和一次谐波信号的关系是线性的,其线性拟合关系式为

$$\nu_{\text{YAG}} = 281631.3735 - 0.0634e, \quad (4)$$

式中 ν_{YAG} 为 YAG 激光器的频率,单位为 GHz , e 为误差信号值,单位为 V 。在零点附近一个很小的范围内对(4)式作微分,得

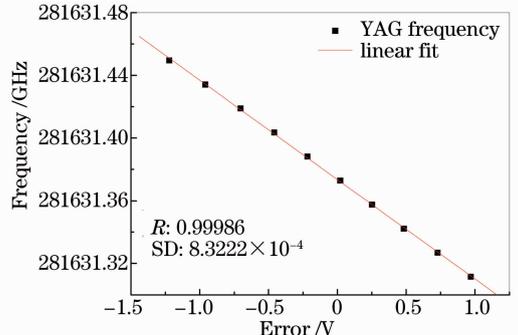


图 5 零点附近频率与误差信号的关系

Fig. 5 Frequency as a function of error signal near zero

$$\Delta\nu_{\text{YAG}} = -63.4 \times \Delta e, \quad (5)$$

式中 $\Delta\nu_{\text{YAG}}$ 为 YAG 激光器的频率漂移幅度, 单位为 MHz, Δe 为误差信号的漂移幅度。实验上, 监测一定时间内的误差信号幅度后, 就可以利用(5)式计算出这一段时间内的频率漂移幅度。

YAG 激光器的频率漂移情况稳定前后对比如图 6 所示, 图中纵轴为 YAG 激光器(1064 nm)的频率漂移量。由图 6 可知, 在 1 h 内, 稳定前 YAG 激光器的频率漂移幅度为 42 MHz, 这与说明书中给出的 40 MHz 值相近。利用(5)式由误差信号推算锁定后 1 h 内的漂移幅度为 1.2 MHz, 很好地实现了对 YAG 激光器频率的稳定。稳定后激光器的长期频率稳定度为

$$S_{\nu(\tau)}^{-1} = \frac{\Delta\nu(\tau)}{\bar{\nu}} = \frac{0.0012 \text{ (GHz)}}{281631.3735 \text{ (GHz)}} = 4.26 \times 10^{-9}, \quad (6)$$

式中 $\bar{\nu}$ 为 1 h 内的频率平均值。 10^{-9} 的稳定度完全可以满足气体谱线探测应用的要求^[14]。

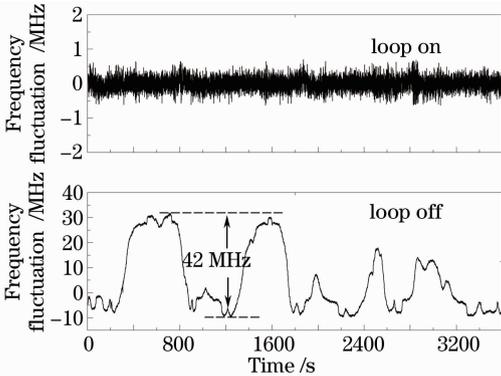


图 6 YAG 激光器(1064 nm)1 h 内频率漂移量稳定前后对比

Fig. 6 Frequency shifts with and without stabilization comparison of YAG laser (1064 nm) within 1 h

4.2 不同调制条件下的稳频

采用调制激光器 PZT 来稳频的方法, 在锁定的同时也对 YAG 激光的频率产生了附加扰动, 在满足光谱探测需求的光源稳定性和实现对 YAG 激光的频率稳定间需要寻求一合适的调制深度。图 7 为采用上述方法 10 kHz 调制频率时不同调制电压下, 获得的 1 h 内 YAG 激光器频率漂移幅度与调制电压的关系。

由图 7 可知, 随着调制电压的增加, YAG 激光的频率漂移幅度迅速减小即稳定度迅速提高, 当调制电压为 1 V 时, 其频率漂移幅度为 1.2 MHz/h。继续增加调制电压时, 其频率漂移幅度减小并不明

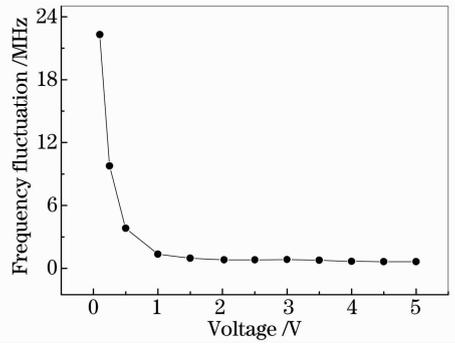


图 7 不同调制电压下 1 h 内 YAG 激光器的频率漂移幅度
Fig. 7 YAG laser frequency shift within 1 h changing with modulation voltage

显。一方面是由于较大的调制电压对 YAG 的 PZT 扰动过大, 使得锁定数据精度无法明显提高; 另一方面是因为随着调制电压增加, 反馈控制作用增强, 使得锁定后误差信号幅值趋近噪声信号幅值水平所致。因而, 系统的调制电压为 1 V 时, YAG 激光的频率稳定度能够满足光谱实验需求, 且对光频率的扰动在可接受范围内。

PZT 对所加交变电压有一定的响应时间, 所加调制频率的不同, PZT 的跟随行为也会有所变化。为寻找合适的 PZT 调制频率, 实验上采集调制频率为 0.5、1、2、5、10、20、30、40 kHz 的 8 组锁定后的频率漂移曲线。通过计算发现在满足锁定的条件下, 调制频率的变化并没有明显地提高 YAG 激光器的频率稳定度。数字 PID 运算从获得误差信号到输出反馈电压有一个时间周期。要稳定激光器频率, 解调误差信号所用锁相的积分时间常数要小于一次 PID 输出的时间周期。当提高对 PZT 的调制频率时, 一次谐波信号的噪声得到抑制, 但较高的调制频率需要较大的锁相积分时间常数, 这就使得在满足锁定的条件下没能提高频率的稳定度。

4.3 稳频后差频系统线宽的测量

函数发生器产生 100 mV、10 kHz 的正弦信号用于调制 YAG 激光器的频率。调节钛宝石的输出波长在 811.86 nm, YAG 激光器的波长稳定在 1064.4853 nm 处, 合束后经透镜会聚入射到光栅周期为 22.25 μm 的 PPLN 晶体上, 晶体的温度控制在 47 $^{\circ}\text{C}$, 产生波长为 3.42 μm 的中红外差频光。调谐钛宝石激光器扫描 CH_4 在 2922.911 cm^{-1} 处的一吸收谱线, 小于 10 Pa 低压下采集 6 组不同压强 P 的吸收谱线。图 8 中给出的是 6 组数据中, 高斯线型拟合得到的最大和最小线宽的两组拟合曲线, γ_{fit} 为拟合得到的线宽, R_{SN} 为信噪比。理论计算出谱线的多

普勒线宽为 135.258 MHz。差频系统具有一定的线宽,由(3)式可知测量谱线拟合线宽应大于多普勒线宽。但实验中有 2 组数据的拟合结果小于多普勒线宽,这是因为差频系统线宽较窄,使得与多普勒线宽卷积作用后的线宽值处于测量系统的不确定度范围内所致。实验测量的线宽平均值为 135.433 MHz,去卷积运算后得系统的线宽为 6.9 MHz。

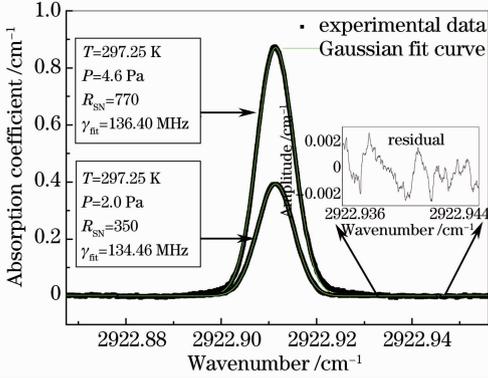


图 8 高斯线型拟合 CH₄ 在 2922.911 cm⁻¹ 处吸收谱
Fig. 8 Gaussin fitting of CH₄ absorbtion spectra at 2922.911 cm⁻¹

5 结 论

采用碘分子吸收稳频方法稳定了 Nd:YAG 激光器的频率,并详细地讨论了采用不同调制条件对 YAG 激光 PZT 进行调制时对锁定结果的影响。将频率稳定后的 YAG 激光用于产生差频光源,低压下测量了 CH₄ 气体吸收线宽并进而推算出差频系统的线宽。实验结果不但实现了差频光的频率稳定输出,而且为该差频光源应用于痕量气体探测提供了线宽参数。如果控制碘池的温度来降低碘的饱和蒸气压,可以进一步提高 YAG 激光的频率稳定度,但会增加系统的复杂性。当前的差频光的频率稳定性已足够满足通常的光谱探测要求。

参 考 文 献

1 Deng Lunhua, Gao Xiaoming, Cao Zhensong, *et al.*. Widely phase-matched tunable difference-frequency generation in periodically poled LiNbO₃ crystal[J]. Opt Commun, 2008, 281(6): 1686-1692.

2 Wang Liusan, Cao Zhensong, Wang Huan, *et al.*. A widely tunable (5 ~ 12.5 μm) continuous-wave mid-infrared laser spectrometer based on difference frequency generation in AgGaS₂ [J]. Opt Commun, 2011, 284(1): 358-362.

3 H Waechter, M W Sigrist. Mid-infrared laser spectroscopic determination of isotope ratios of N₂O at trace levels using wavelength modulation and balanced path length detection[J]. Appl Phys B, 2007, 87(3): 539-546.

4 K P Petrov, S Waltman, E J Dlugokencky, *et al.*. Precise measurement of methane in air using diode-pumped 3.4 μm difference-frequency generation in PPLN[J]. Appl Phys B, 1997, 64(5): 567-572.

5 T Yanagawa, O Tadanaga, Y Nishida, *et al.*. 4.6 μm-band difference generation and CO isotopologue detection [J]. Electronics Letters, 2009, 45(7): 369-371.

6 D Rehle, D Leleux, M Erdelyi, *et al.*. Ambient formaldehyde detection with a laser spectrometer based on difference-frequency generation in PPLN[J]. Appl Phys B, 2001, 72(8): 947-952.

7 Chen Changshui, Wei Junxiong, Liu Songhao. Mid-infrared laser linewidth analysis based on difference frequency generation[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(2): 021404.

陈长水, 韦俊雄, 刘松豪. 差频产生中红外光源的线宽分析[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(2): 021404.

8 M Bregant, G Cantatore, F D 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.

9 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. 铯原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.

10 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.

11 Chen Yanping, Jiang Yanyi, Bi Zhiyi, *et al.*. Modulation transfer spectroscopy of I₂ enhanced by external optical cavity[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(5): 6557-6558.

陈燕萍, 蒋燕义, 毕志毅, 等. 光学谐振腔增强碘分子调制转移光谱[J]. 中国激光, 2005, 32(5): 6557-6558.

12 M L Eickhoff, J L Hall. Optical frequency standard at 532 nm [J]. IEEE Trans Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2): 155-158.

13 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 mid-infrared[J]. Rev Sci Instrum, 2008, 79(12): 123101.

14 He Zhigang, Deng Lunhua, Wang Guishi, *et al.*. Nd:YAG laser frequency stabilization technology based on digital feedback control[J]. Chinese J Lasers, 2012, 39(7): 0702009.

贺志刚, 邓伦华, 王贵师, 等. 基于数字反馈控制的 Nd:YAG 激光器频率稳定技术[J]. 中国激光, 2012, 39(7): 0702009.

栏目编辑: 史 敏