

文章编号: 0258-702X(2002)02-0161-03

# $^{127}\text{I}_2$ 频率调制光谱在微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光 稳频中的应用

郑文强, 毕志毅, 罗明, 马龙生

(华东师范大学光谱学与波谱学教育部重点实验室, 华东师范大学物理系, 上海 200062)

**提要** 采用 480 MHz 频率调制和光外差光谱检测技术, 将半导体激光抽运 Nd:YVO<sub>4</sub> 微型激光器的频率锁定在碘分子 532 nm 波段多普勒加宽的吸收谱线上。分析伺服误差信号表明, 采用该技术锁定微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光频率, 其稳定度可达到  $10^{-10}$  (1 s 积分时间)。

**关键词** 微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器, 频率调制光谱, 稳频激光器

中图分类号 TN 248.1 文献标识码 A

## Application of $^{127}\text{I}_2$ Doppler-broadened FM Spectroscopy to Frequency Stabilization of Mini-Nd:YVO<sub>4</sub> Laser

ZHENG Wen-qiang, BI Zhi-yi, LUO Ming, MA Long-sheng

(Key Laboratory for Optical and Magnetic Resonance Spectroscopy,

Department of Physics, East China Normal University, Shanghai 200062)

**Abstract** By using frequency modulation optical heterodyne technique, the frequency of diode-pumped Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP intra-cavity frequency-doubling mini-laser is locked to Doppler-broadened absorption line of  $^{127}\text{I}_2$  near 532 nm. The analysing of error signal shows that it is possible to make laser frequency stability up to  $10^{-10}$  at 1 s average time.

**Key words** Nd:YVO<sub>4</sub> microchip laser, FM spectroscopy, frequency-stabilized laser

### 1 引言

半导体激光抽运全固体激光器具有体积小、效率高、调谐性能好等特点, 近年来得到迅速发展。在此领域, 人们对 Nd:YAG 激光器的研究比较成熟, 已经实现了高精度的 Nd:YAG 全固化稳频激光器<sup>[1,2]</sup>。Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体不仅具有和 Nd:YAG 晶体相似的光学特性, 而且其增益带宽较宽, 增益系数也比 Nd:YAG 晶体的高, 因此它也引起了人们的高度重视。使用微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 全固体激光器已获得碘分子在 532 nm 波段无多普勒背景饱和吸收光谱和调制转移光谱, 并成功地将激光频率锁定在碘分子超精细结构光谱线上<sup>[3,4]</sup>。

然而, 在很多实际应用中, 既需要较高的激光频

率稳定度, 同时激光稳频系统应具有小型化和操作简便性的特点。文献 [5] 中报道了在 532 nm 波段把 Nd:YAG 激光器锁定在碘分子多普勒加宽的吸收线上。文献 [6] 将 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器倍频后输出的 532 nm 波段的激光锁定在碘分子多普勒加宽的吸收谱线上, 稳定度为  $10^{-9}$ 。本文报道采用 480 MHz 射频频位相调制和光外差光谱检测技术, 将激光频率锁定在碘分子多普勒加宽的吸收谱线上。理论计算表明, 与文献 [6] 中采用 100 MHz 调制频率得到的吸收信号相比, 本文得到的信号幅度可以提高将近一个数量级, 从而可以提高激光频率锁定的精度。同时, 整个稳频系统结构简单, 操作方便, 对于研制开发小型实用化的稳频激光器具有重要意义。

收稿日期 2000-11-10; 收到修改稿日期 2001-02-13

基金项目 国家自然科学基金(69778021)和上海市科学技术发展基金(98JC14007)资助项目。

作者简介: 毕志毅(1956—), 男, 上海市人, 硕士, 副教授, 主要从事精密激光光谱及激光稳频技术研究。

## 2 激光稳频实验装置

图 1 为微型 Nd:YVO<sub>4</sub>激光稳频系统实验装置。半导体激光抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>腔内倍频单频激光器<sup>3</sup>的输出波长在 532 nm 波段。输出光经透镜 L 准直, λ/2 波片和偏振片 P 调节光束的光强和偏振方向后,进入声光调制器(AOM),其调制频率为 80 MHz,取声光调制器输出的一级衍射光,入射到电光位相调制器(EOM),EOM 采用 MgO:LiNbO<sub>3</sub>晶体,射频(RF)驱动频率为 ω<sub>m</sub> = 480 MHz。经 EOM 得到的频率调制光包含载波和上下边带,通过 50 mm 长碘样品池后,由于样品对调制光载波和上下边带吸收强度不一样,从而在探测器上载波和上下边带拍频得到频率为 ω<sub>m</sub> 的外差信号。外差信号经前置放大器(AMP)放大和经移相器移相后的 RF 参考信号一起送入到双平衡混频器(DBM)中,解调得到 I<sub>2</sub> 光外差吸收光谱信号,经伺服电路控制激光器腔镜上的压电陶瓷(PZT)实现激光频率锁定。法布里-珀罗(F-P)腔用以监控激光模式和测量光外差光谱信号峰-峰之间的频率间隔和中心区域斜率。调节激光晶体的温度可以实现激光频率的大范围扫描,而改变 PZT 驱动电压则可以小范围调谐激光频率。移相器的作用是通过选择参考信号和外差信号之间的相位差,以得到具有良好鉴频特性和信噪比的光谱信号。声光调制器为光隔离器,防止反射光进入激光腔中形成干扰。

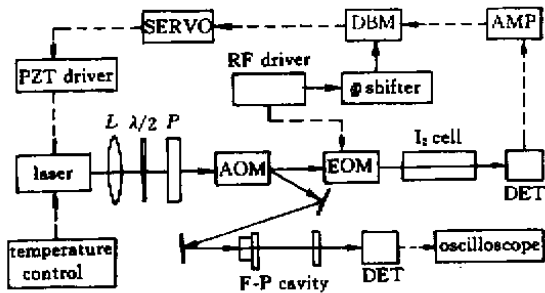


图 1 微型 Nd:YVO<sub>4</sub>激光稳频系统实验装置

Fig.1 Schematic diagram of the frequency-stabilized system for mini-Nd:YVO<sub>4</sub> laser

## 3 实验结果

入射到 AOM 的激光功率约为 2.6 mW。实验得到的 I<sub>2</sub> 光外差吸收光谱信号如图 2 所示,信号峰-峰值 260 mV。利用 F-P 腔的自由光谱区来测定光外差光谱信号峰-峰之间的频率间隔和中心区域斜率。

F-P 腔为共焦腔,腔长为 50 mm,自由光谱区 FSR = 1.5 GHz,测得谱线峰-峰之间的频率间隔 540 MHz。考虑到激光频率锁定后的频率抖动范围位于鉴频曲线中心零点区域,取鉴频信号曲线中心零点附近 100 mV,对应频率间隔为 172 MHz,所以鉴频曲线的中心区域斜率为 K = 0.58 mV/MHz。实验得到的激光频率锁定误差信号如图 3 所示。误差信号的均方差值为 0.37 mV(时间常数为 4.2 μs),由此估算激光频率稳定度可达到 10<sup>-10</sup>(1 s 积分时间)。

该激光稳频系统可以在室温下连续工作,且具有很好的稳定性和重复性,有利于实用化。

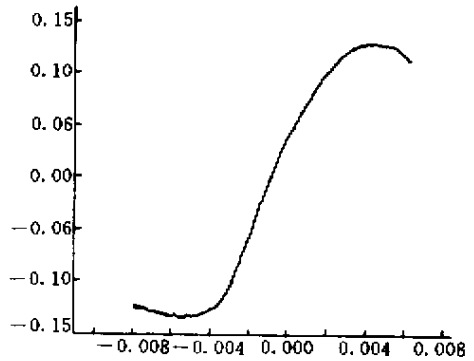


图 2 I<sub>2</sub> 的频率调制光外差吸收光谱

Fig.2 FM optical heterodyne spectrum of I<sub>2</sub>

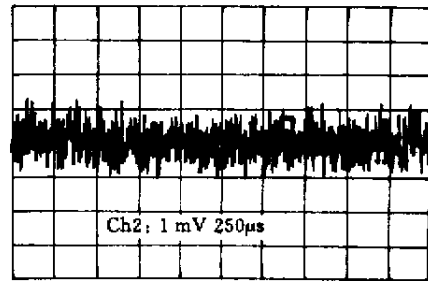


图 3 激光频率锁定误差信号

Fig.3 Servo error signal while the laser is locked

## 4 影响激光频率锁定的因素和解决办法

为了提高激光稳频系统的稳定精度,必须要获得高信噪比且具有良好的鉴频特性的光谱信号。

### 4.1 良好鉴频特性曲线的获得

理论计算<sup>7</sup>得到的色散型光谱信号线型为

$$D_{FM}(\omega) = \Phi(\omega, +1) + \Phi(\omega, -1) - 2\Phi(\omega, 0) \quad (1)$$

其中

$$\mathcal{A}(\omega, n) = -\frac{4\sqrt{\ln 2}}{\Delta w \cdot \pi} \exp\left\{-\left[\frac{\alpha(\omega + n\omega_m - \omega_0)}{\omega_0\sqrt{2kT/m}}\right]^2\right\} \times \int_0^{\frac{\alpha(\omega + n\omega_m - \omega_0)}{\omega_0\sqrt{2kT/m}}} \exp(-\mu^2) d\mu \quad (2)$$

这里,  $n = \pm 1$ ,  $\rho$ ,  $\omega_m$  为调制频率,  $m$  为碘分子质量,  $\omega_0$  为分子跃迁频率,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为绝对温度,  $c$  为光速,  $\Delta w$  为碘分子线宽 (FWHM)。

从式 (1) 可知, 不同的位相调制频率  $\omega_m$ , 在激光频率  $\omega$  扫描时, 将得到不同鉴频特性的色散型信号。因此, 调制频率的选择将直接影响激光频率锁定的精度和稳定性。理论分析表明:  $\text{I}_2$  分子多普勒背景下超精细结构的存在, 会使  $\text{I}_2$  分子多普勒加宽变宽, 因此通过碘分子超精细结构拟合得到的线宽比理论计算得到的线宽要宽。当碘分子样品温度约为  $T = 300 \text{ K}$  时, 通过拟合得到的  $\text{FWHM} = 630 \text{ MHz}$ 。图 4 为在不同调制频率  $\omega_m$  时理论计算鉴频曲线中心区域斜率和信号幅度的比较 (相对理论值)。

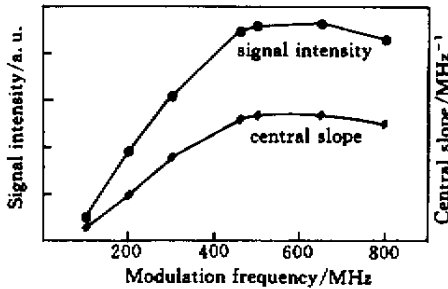


图 4 理论计算调制频率与信号幅度和中心斜率的关系

Fig. 4 Relative signal intensity and central slope vs the modulation frequency

从图 4 中可以直观地看出: 当调制频率在 460 MHz ~ 600 MHz 范围时, 鉴频曲线具有较大的幅度和中心斜率值, 能提高激光频率锁定的精度。考虑到电光调制器、光电探测器、放大器和双平衡混频器等单元器件, 提高频率对元件的选取和单元器件设计制作带来困难。所以, 综合考虑上述因素, 选用 480 MHz 作为激光的电光位相调制频率是合理的。

#### 4.2 消除 EOM 剩余幅度调制

EOM 的剩余幅度调制将会引起光谱信号的基线偏离零电平, 而剩余幅度调制又随环境和实验条件的改变而变化<sup>[8,9]</sup>。因此, 克服剩余幅度调制对提高稳频效果很重要。在实验中通过调节入射光的偏振方向, 使其与晶体切割方向有很好的匹配, 可有效地消除剩余幅度调制, 同时, 电光晶体采用两端面

非平行结构, 可以消除电光晶体 F-P 腔效应, 从而可进一步减少剩余幅度调制。

## 5 结 论

根据理论计算得到的调制频率与鉴频信号幅度和中间斜率之间的关系, 选择合适的 EOM 调制频率, 采用光外差光谱检测技术, 获得具有良好鉴频特性和信噪比的吸收光谱信号, 并将微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器频率锁定在  $\text{I}_2$  多普勒加宽的吸收谱线上。分析伺服误差信号表明, 采用该技术锁定微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光频率, 其稳定度可达到  $10^{-10}$  (1 s 积分时间)。这对于研制开发小型实用化的稳频激光器具有重要意义。

## 参 考 文 献

- 1 John L. Hall, Long-Sheng Ma, Matthew Taubman *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the  $\text{I}_2$ -stabilized Nd:YAG laser [J]. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1999, **48** (2): 583 ~ 586
- 2 Jun Ye, Lennart Robertsson, Susanne Picard *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular  $\text{I}_2$  lines at 532 nm [J]. *IEEE Trans. Instrum. & Meas.*, 1999, **48** (2): 544 ~ 549
- 3 Bi Zhi-yi, Luo Ming, Ding Jing-xin *et al.*. Modulation transfer spectrum using Nd:YVO<sub>4</sub> minilaser [J]. *Acta Optica Sinica* (光学学报), 2000, **20** (12): 1699 ~ 1703 (in Chinese)
- 4 Zhi-yi Bi, Jing-xin Ding, Wen-qiang Zheng *et al.*. Stabilization of mini-Nd:YVO<sub>4</sub> laser using  $\text{I}_2$  hyperfine transition [J]. *Chinese Science Bulletin* (科学通报), 2000, **45** (22): 2461 ~ 2464 (in Chinese)
- 5 Cao Hongjun, Zhang Erjun, Zhao Kun *et al.*. Frequency stabilization of a Nd:YAG laser to Doppler-broadened lines of iodine near 532 nm [J]. *SPIE*, 1998, **3549**: 23 ~ 28
- 6 Naicheng Shen, Erjun Zang, Jiangping Cao *et al.*. Frequency stabilization at  $^{127}\text{I}_2$  Doppler-broadened line center near 532 nm using Nd:YVO<sub>4</sub> intra-cavity doubled lasers [C]. *CPEM2000*, May 14 ~ 19, 465 ~ 466
- 7 Simon W. North, Xiaonan S. Zheng, Ruian Fei *et al.*. Line shape analysis of Doppler broadened frequency-modulated line spectra [J]. *J. Chem. Phys.*, 1996, **104** (6): 2129 ~ 2135
- 8 E. A. Whittaker, M. Gehrtz, G. C. Bjorklund. Residual amplitude modulation in laser electro-optic phase modulation [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2** (8): 1320 ~ 1326
- 9 N. C. Wong, J. L. Hall. Servo control of amplitude modulation in frequency-modulation spectroscopy: demonstration of shot-noise-limited detection [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1985, **2** (9): 1527 ~ 1533