

文章编号: 0258-7025(2005)02-0164-03

## 调制转移光谱稳频的研究

左爱斌<sup>1,2</sup>, 李文博<sup>1</sup>, 彭月祥<sup>1</sup>, 曹建平<sup>2</sup>, 臧二军<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 北京交通大学理学院, 北京 100044; <sup>2</sup> 中国计量科学研究院, 北京 100013)

**摘要** 532 nm 激光的碘吸收谱线的频率被国际计量委员会(CIPM)推荐用于频率计量标准, 激光频率标准对长度和时间的计量是很重要的。碘分子在 532 nm 附近有丰富的强吸收谱线, 可以作为频率稳定的绝对参考谱线。使用 532 nm 单块固体激光器, 在 375 kHz 新的调制频率下, 利用调制转移技术, 将激光频率调谐到 <sup>127</sup>I<sub>2</sub> 的 R(56)32-0 跃迁的吸收谱线, 并观察到该吸收谱线相应的 15 条超精细结构分量。通过展宽的调制谱线可以看出 375 kHz 的调制频率得到比 312 kHz 调制频率更高的鉴频灵敏度, 并在实验上成功地将激光频率稳定在碘的超精细吸收谱线的 a<sub>10</sub> 分量上长达 10 h, 估计稳定度在 10<sup>-13</sup> 量级。准确的频率稳定性正在两台激光器上用拍频的方法进行测量。

**关键词** 激光技术; 固体激光器; 频率稳定; 调制转移; 碘超精细光谱

**中图分类号** TN 206 **文献标识码** A

## Research on Frequency Stabilization of Modulation Transfer Spectroscopy

ZUO Ai-bin<sup>1,2</sup>, LI Wen-bo<sup>1</sup>, PENG Yue-xiang<sup>1</sup>, CAO Jian-ping<sup>2</sup>, ZANG Er-jun<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> College of Science, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)  
(<sup>2</sup> National Institute of Metrology, P. R. China, Beijing 100013, China)

**Abstract** Iodine-stabilization lasers are becoming important wavelength standards and optical frequency standards. The frequency value of Iodine R (56) 32-0 transition was recommended as the standard frequency for practical realization of the meter by CIPM in 2001. Molecular iodine has rich strong absorption lines near 532 nm that can provide the absolute references for frequency stabilization. A monolith solid laser was tuned at the spectrum of transition R (56) 32-0 of iodine molecule with new modulation frequency 375 kHz. And 15 hyperfine components of this spectrum were observed using modulation transfer spectroscopy. The sensitivity of frequency detecting with 375 kHz modulation frequency was higher than that with 312 kHz modulation frequency by broadening one hyperfine component. The laser frequency was successfully locked at a<sub>10</sub> component for no less than 10 hours. The frequency stability was estimated about level of 10<sup>-13</sup>, and the exact value of frequency stability is under measurement by frequency beating between two same kind of lasers.

**Key words** laser technique; solid-state laser; frequency stabilization; modulation transfer; hyperfine spectra of I<sub>2</sub>

## 1 引 言

调制转移碘吸收 532 nm 波长固体激光频率稳定的研究, 以其重要的地位, 引起了世界上许多国家的重视。到 2000 年底, 国际计量局、美国、日本、澳大利亚、德国及中国台湾等已率先建立 532 nm 波

长附近的频率稳定系统, 稳频方法有导数谱, FM 光谱, 三/五次谐波和调制转移光谱(MTS)等<sup>[1~7]</sup>。目前, 一些国家得到的激光频率稳定度, 已达到或超过 10<sup>-13</sup> 量级<sup>[8]</sup>。最近, 中国计量科学研究院光频室利用 312 kHz 的调制频率, 将激光频率锁定在碘的超精细结构上<sup>[9]</sup>。这次我们使用德国 InnoLight 公司

收稿日期: 2004-02-15; 收到修改稿日期: 2004-05-14

基金项目: 国家自然科学基金(60178009)部分资助项目。

作者简介: 左爱斌(1975—), 男, 江西省永新县人, 北京交通大学理学院硕士研究生, 主要从事光电技术研究。E-mail: zuoab@sohu.com

生产的商品型单块激光器,并将全部其他光学元件集成到一整块光学平板上。采用腔外倍频方法<sup>[10]</sup>与调制转移碘饱和和吸收技术<sup>[11,12]</sup>,在 375 kHz 新的调制频率上,成功地观察到激光频率调谐在<sup>127</sup>I<sub>2</sub>的 R(56) 32-0 跃迁的 15 条超精细吸收线上,并将激光频率长时间锁定在其中的  $a_{10}$  分量上。

## 2 调制转移光谱稳频技术

### 2.1 实验装置

整个稳频系统如图 1 所示(其中光路用粗线,电路用细线表示),InnoLight 激光器输出功率为 10 mW 的 532 nm 倍频光,经滤光器除去残余的 1064 nm 基频光,然后分出一部分被两个反射镜分别送给扫描干涉仪和波长计,用以观察激光模式和波长。采用偏振分光镜(PBS<sub>1</sub>)使激光束分成抽运光束和探测光束。这两束光的偏振方向相互垂直,其功率比用  $\lambda/2$  波片进行控制。实验中的抽运光、探测光功率比为 2:1。为防止光反馈引入的干扰,抽运光通过声光调制器产生 80 MHz 频移。调制频率为 375 kHz 的电光调制器对抽运光进行相位调制。这时带有调制的抽运光,与无调制的探测光反向共线通过碘室。探测光束将带有新产生的调制边带经偏振分光镜(PBS<sub>2</sub>)反射到光电探测器上,获得拍频光电流。

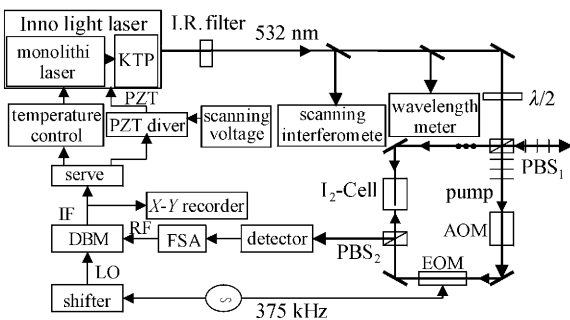


图 1 激光频率稳定框图

PZT: 压电陶瓷; PBS: 偏振分光片; AOM: 声光调制器;  
EOM: 电光调制器; FSA: 频率选择放大; DBM: 双平衡混频器

Fig. 1 Scheme of laser frequency stabilization

PZT: piezoelectric transducer; PBS: polarizing beam splitter;  
AOM: acoustic-optic modulator; EOM: electro-optic modulator;  
FSA: frequency-selecting amplifier; DBM: doubly-balanced  
mixer

调制转移信号经过选频放大进入双平衡混频器的 RF 输入端,本振信号用移相器进行适当移相后进入混频器的 LO 输入端。从中频(IF)端获得碘分

子调制转移光谱信号。IF 输出的中频信号经滤波放大,一路连接到示波器和 X-Y 记录仪上,检测并记录吸收谱线;另一路进入伺服系统,经环路滤波等处理后作为误差控制信号加到激光晶体的压电陶瓷上,实现频率稳定。

### 2.2 激光频率探测和锁定的电子伺服系统

在饱和吸收调制转移稳频系统中,激光器和电子系统的性能指标都很重要。为了获得具有高分辨率及高信噪比的饱和吸收光谱信号,实现对激光频率的高精度锁定,首先要求激光器能够比较稳定地输出单纵模。使用德国 InnoLight 公司生产的商品型单块固体激光器,它能在 2 A 以内的大电流范围内基本上实现单纵模运转,虽然精度不高,但能满足实验要求。

电路系统主要分成三部分:光电接收部分、本振驱动部分和滤波混频部分,如图 2 所示。其中,光电接收电路通过光电二极管把接收的光信号,经过伏安变换转换成微弱的电信号,再经放大电路放大、滤波后得到与本振信号同频率的电压信号,送到混频器进行混频。本振驱动电路由振荡源、移相器、滤波器、电光调制器驱动电路组成。为了得到稳定的、相位连续可移的本振调制频率,我们改变以往的无源起振和通过电阻电容网络(RC)相移,而选用晶振作为振荡源,并对晶振分频后产生的方波直接进行数字移相,因此很容易地得到了 360° 的连续相位调制。滤波混频电路包括:增益调节、双平衡混频电路、低通滤波、阻抗匹配、直流放大等,此电路的目的是把两路信号进行混频,并将得到的直流信号放大,送给自动伺服系统作为误差信号用来控制激光器腔长的变化,从而实现控制激光频率。

## 3 实验结果和讨论

理论研究表明,改变激光晶体的温度,可在大范围内对激光频率进行调谐。当我们在激光器的压电陶瓷上加锯齿波扫描电压时,可实现激光频率的精细扫描,此时可在示波器和 X-Y 记录仪上观测到碘的超精细结构的调制转移光谱信号。如图 3(a)所示,其结构属于 1,4,4,1,4,1 型,共 15 个超精细分量。其中  $a_{10}$  为国际米定义咨询委员会(CCDM)推荐值,  $a_3$  和  $a_4$  两条吸收线重叠在一起。

为了能更清楚地看到谱线的线型结构,将图 3 中  $a_{10}$  超精细谱线展宽,结构如图 3(b)。可见谱线中心的线性度比较好,斜率也较大,具有良好的鉴频

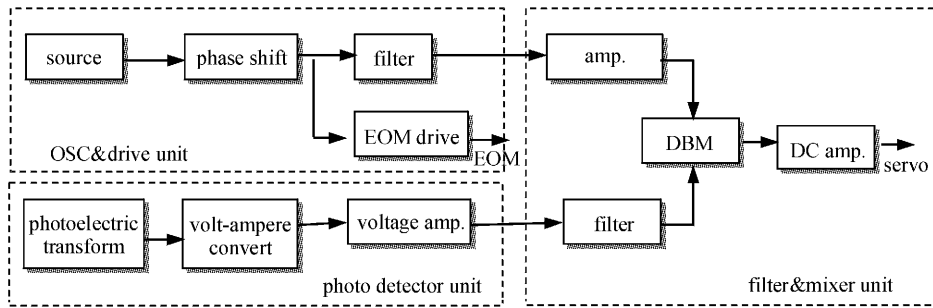


图 2 饱和吸收稳频的电路框图

OSC:振荡源;EOM:电光调制器;DBM:双平衡混频器;DC:直流电流;amp.:放大器

Fig. 2 Scheme of electro circuit of saturated absorption stabilization

OSC: oscillatory source; EOM: electro-optic modulator; DBM: doubly-balanced mixer; DC: direct current; amp.: amplifier

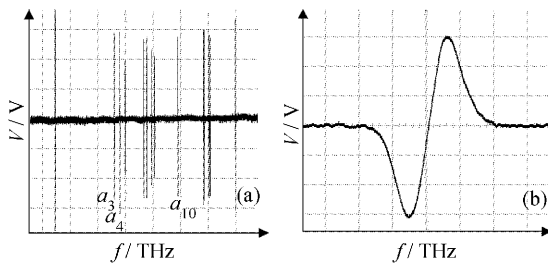


图 3

(a) 碘分子  $R(56) 32-0$  的超精细谱线;(b) 精细谱线  $a_{10}$  的展宽

Fig. 3

(a) Hyperfine spectrum  $R(56) 32-0$  of the iodine molecular;(b) Broadening of hyperfine component  $a_{10}$ 

特性,经测定谱线宽度为 560 kHz 左右。与调制频率为 312 kHz 的谱线比较可知,调制频率越高,则谱线越陡。该信号处理后作为误差信号控制谐振腔的压电陶瓷,实现了激光频率锁定。用示波器监视,连续 10 h 以上不失锁,估计稳定度在  $10^{-13}$  量级。准确的频率稳定性评估,需两台激光器用拍频的方法进行测量。

## 4 结 论

用调制转移技术和单块激光器,观察到波长为 532 nm 激光在  $^{127}\text{I}_2$  上的  $R(56) 32-0$  的 15 条超精细吸收谱线,实现了激光频率调谐并在  $a_{10}$  分量上的锁定,连续锁定时间超过 10 h。

## 参 考 文 献

- 1 Feng-lei Hong, Jun Ishikawa. Hyperfine structures of the  $R(122) 35-0$  and  $P(84) 33-0$  transitions of  $^{127}\text{I}_2$  near 532 nm [J]. *Opt. Commun.*, 2000, **183**:101~108
- 2 Ady Arie, R. L. Byer. Laser heterodyne spectroscopy of  $^{127}\text{I}_2$

hyperfine structure near 532 nm [J]. *J. Opt. Soc. Am. B*, 1993, **10**(11):1990~1997

- 3 P. Cordiale, G. Galzerano, H. Schnatz. International comparison of two iodine-stabilized frequency-doubled Nd:YAG lasers at  $\lambda = 532$  nm [J]. *Metrologia*, 2000, **37**(2):177~182
- 4 Hong Feng-Lei, Ishikawa Jun. Saturation spectroscopy of molecular iodine at 532 nm by Nd:YAG lasers and their application for frequency stabilization [C]. *Precision Electromagnetic Measurements Digest*, 1996. 92~93
- 5 G. Galzerano, C. Svelto, F. Bertinetto *et al.*. Saturated absorption spectroscopy of  $^{127}\text{I}_2$  at 532 nm and hyperfine splitting measurements [C]. *The 16th IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference (IMTC'99)*, Venice, Italy, 1999. 24~26
- 6 Bi Zhiyi, Luo Ming, Ding Jingxing *et al.*. Modulation transfer spectrum using Nd:YVO<sub>4</sub> minilaser [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(12):1699~1703
- 毕志毅,罗明,丁晶新等. 微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光在碘分子调制转移光谱中的应用 [J]. *光学学报*, 2000, **20**(12):1699~1703
- 7 Zheng Wenqiang, Bi Zhiyi, Luo Ming *et al.*. Applications of  $^{127}\text{I}_2$  Doppler-broadened FM spectroscopy to frequency stabilization of mini-Nd:YVO<sub>4</sub> laser [J]. *Chinese J. Lasers*, 2002, **A29**(2):161~163
- 郑文强,毕志毅,罗明等.  $^{127}\text{I}_2$  频率调制光谱在微型 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光稳频中的应用 [J]. *中国激光*, 2002, **A29**(2):161~163
- 8 Hong Feng-Lei, Ishikawa Jun, Bi Zhi-Yi *et al.*. A portable  $\text{I}_2$ -stabilized Nd:YAG laser for international comparisons [J]. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2001, **50**(2):486~489
- 9 Cao Jianping, Zuo Aibin, Zang Erjun *et al.*. Iodine stabilization of 532 nm monolithic solid laser [J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2003, **16**(16):1029~1031
- 曹建平,左爱斌,藏二军等. 碘稳定 532 nm 单块固体激光器 [J]. *光电子技术与信息*, 2003, **16**(16):1029~1031
- 10 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen *et al.*. Relaxed alignment tolerance of monolithic ring lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2002, **41**(33):7012~7017
- 11 P. Ajungner, S. Swartz, J. L. Hall *et al.*. Absolute frequency of molecular iodine transition  $R(56) 32-0$  near 532 nm [J]. *IEEE Trans. Instrum. -Meas.*, 1995, **44**(2):151~154
- 12 Yang Song. Investigation on electrocircuit for 532 nm saturated absorption iodine-stabilized Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP laser [D]. Beijing University of Technology, 2003. 30~60
- 杨松. 532 nm Nd:YVO<sub>4</sub>/KTP 激光器碘饱和吸收稳频电路的研究 [D]. 北京工业大学硕士论文, 2003. 30~60