

# 小型化碘稳频 532 nm 固体激光器

林百科<sup>1,2</sup> 曹士英<sup>1</sup> 赵 阳<sup>1</sup> 李 焯<sup>1,2</sup> 王 强<sup>1,2</sup> 林弋戈<sup>1</sup> 曹建平<sup>1</sup>  
臧二军<sup>1,2</sup> 方占军<sup>1,2</sup> 李天初<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 中国计量科学研究院时间频率计量研究所, 北京 100029)  
<sup>2</sup> 清华大学精密仪器系, 北京 100084)

**摘要** 传统 532 nm 波长碘稳频固体激光频标装置虽然能达到很高的频率稳定性和不确定度, 但装置比较庞大, 不便搬运。而对于一些对激光频率稳定性要求不高的实际应用, 如绝对重力仪等, 缩小装置的体积以易于搬运, 成为更为关注的因素。建立一套小型化 532 nm 固体激光器, 该系统体积小, 易于搬运。通过与原有碘稳频 532 nm 固体激光标准装置的进行拍频测量实验, 得到 1 s 的阿伦偏差为  $2.4 \times 10^{-12}$ , 并计算得到该激光器的频率绝对值为 563260223436 kHz, 对应的频率不确定度为 52 kHz (包含因子  $k=2$ )。该系统已被用于中国计量科学研究院的绝对重力仪中。

**关键词** 激光器; 计量; 固体激光; 激光稳频

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0902002

## A compact Iodine-Stabilized Solid-State Laser at 532 nm

Lin Baike<sup>1,2</sup> Cao Shiyang<sup>1</sup> Zhao Yang<sup>1</sup> Li Ye<sup>1,2</sup> Wang Qiang<sup>1,2</sup> Lin Yige<sup>1</sup>  
Cao Jianping<sup>1</sup> Zang Erjun<sup>1,2</sup> Fang Zhanjun<sup>1,2</sup> Li Tianchu<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> Time and Frequency Metrology Division, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China)  
<sup>2</sup> Department of Precision Instruments, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**Abstract** Although the traditional iodine-stabilized 532 nm optical frequency standard is high frequency stability and uncertainty, it is complex and not portable. Lower frequency stability is acceptable in some cases such as absolute gravimeters, on which smaller size and portable are focused. A compact iodine-stabilized solid-state laser at 532 nm is established, which is portable for its small size. By the way of measuring the frequency beat with the original iodine-stabilized 532 nm optical frequency standard, the Allan deviation is  $2.4 \times 10^{-12}$  for 1 s averaging time, and the absolute frequency of the laser is 563260223436 kHz, whose uncertainty is 52 kHz (coverage factor  $k=2$ ). The system has been applied to absolute gravimeters at National Institute of Metrology.

**Key words** lasers; metrology; solid-state laser; laser frequency stabilization

**OCIS codes** 120.3490; 140.5680; 140.3425

## 1 引 言

在分子频标领域, Nd:YAG 激光倍频输出在 532 nm 波长附近与碘分子的一些吸收谱线相符合, 引起了人们的广泛关注<sup>[1]</sup>。20 世纪 90 年代, Eickhoff 等<sup>[2]</sup>利用单块固体环形激光器和调制转移光谱技术, 在 1.2 m 长的碘吸收室上成功地实现了 532 nm 波长附近, 以碘的超精细谱线作为自然基准

的稳频激光。并经过不断改进, 实现 1 s 和千秒的频率稳定度分别为  $5 \times 10^{-14}$  和  $5 \times 10^{-15}$ <sup>[3-4]</sup>。高稳定度的光频标准借助飞秒光梳和光纤网络<sup>[5]</sup>, 不仅可以转换成高稳定度的微波源, 而且还可以溯源到更高一级的频率基准上, 实现绝对频率的实时测量和校准<sup>[6]</sup>。

利用单块激光器和腔外倍频得到 532 nm 激

收稿日期: 2013-12-26; 收到修改稿日期: 2014-05-05

基金项目: 国家重大科学研究计划(2010CB922902)

作者简介: 林百科(1982—), 男, 硕士, 助理研究员, 主要从事光频标方面的研究。E-mail: linbk@nim.ac.cn

光<sup>[7]</sup>,以及调制转移光谱稳频技术锁定激光频率<sup>[8]</sup>,在2005年前后建立了532 nm波长碘稳频固体激光频标装置<sup>[9]</sup>,1 s和千秒的频率稳定度分别达到了 $2.4 \times 10^{-14}$ 和 $5 \times 10^{-15}$ ,但装置比较庞大,不便搬运。而对于一些对激光频率稳定度要求不高的实际应用<sup>[10]</sup>,缩小装置的体积以易于搬运,成为更为关注的因素。本文将提出一种简化的小型化532 nm固体激光频标实现方案,并给出它的频率稳定度和绝对频率测量结果。

## 2 实验装置

小型化碘稳频532 nm固体激光器(以下简称小型化532 nm激光器)的原理图如图1所示。虚线框内是光学部分。激光光源采用半非平面Nd:YAG固体激光器<sup>[9]</sup>,并利用激光强度噪声抑制技术<sup>[11]</sup>,产生功率为1 W的1064 nm激光。经过单次通过准相位匹配周期性极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体倍频后,产生功率为15 mW的532 nm激光输出。经过一个1/2波片(HWP1)调整偏振态后,532 nm激光由偏振分光棱镜(PBS)分束,透射部分约10 mW,作为小型化532 nm激光器

的输出。反射部分用于激光的频率锁定。这部分光首先经过1/2波片(HWP2)后约5 mW激光入射到长度约12 cm的碘吸收室中作为探测光,经采样片(M2)后,透射部分入射到一个电光调制器(EOM)中,调制频率为750 kHz。HWP2使激光的偏振态与EOM的电场相垂直,因此第一次通过EOM时激光没有相位调制。这束未调制的激光由采样片(M3)反射后两次通过1/4波片(QWP),此时激光的偏振态与EOM的电场相平行,因此当反向通过EOM时激光被相位调制。这束被调制的激光作为抽运光,与正向入射的探测光在碘室中产生共线对射。通过这样的光路设计,使一束激光同时作为探测光和抽运光,大大节省空间。在碘室中由于非线性四波混频和介质吸收谱线烧孔的共同作用,在超精细谱线附件探测光将产生新的边带,由光电探测器(PD)探测。信号进入双平衡混频器(DBM),与本地振荡器(LO)混频解调出误差信号,经过比例积分(PI)后分成快慢两路伺服控制,快环反馈到固体激光器谐振腔的压电陶瓷(PZT)上实现频率快速锁定,慢环用来控制谐振腔的温度以补偿激光频率长期漂移。

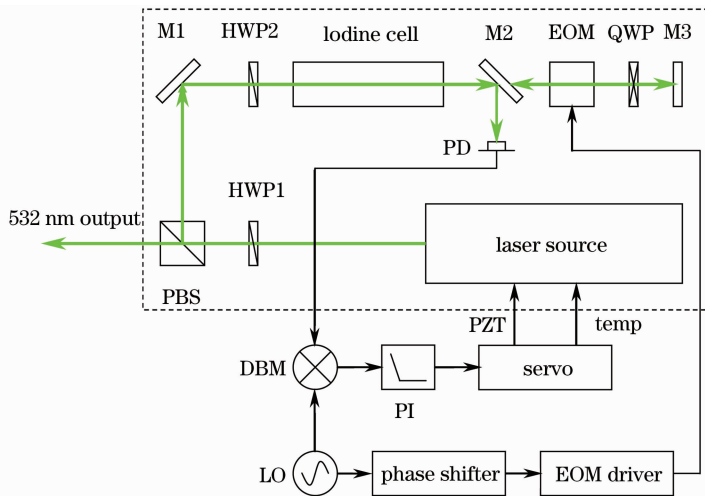


图1 小型化碘稳频532 nm固体激光器原理图

Fig.1 Scheme of the compact iodine-stabilized solid-laser at 532 nm

与参考文献[9]中碘稳频532 nm固体激光频率标准装置(以下简称532 nm激光频率标准装置)相比,小型化532 nm激光器在结构设计上做了较大改动。首先,原装置中采用将一束激光分为两束分别作为探测光和抽运光,从相反方向进入碘室实现调制转移,而在新装置中一束激光同时作为探测光和抽运光,光路更加简单。其次,原装置碘吸收室长度为45 cm且通过折叠光路的办法使激光四次通

过碘吸收室,激光在碘室里实际作用距离为1.8 m。而新系统的碘吸收室长度仅为12 cm且单次通过,同时原装置中为消除杂散光影响而在碘室两端放入四孔光阑以及光路中的多个偏振分光棱镜也被移除。最后,光路中没有声光调制器(AOM),激光器输出频率即为对应的碘吸收超精细谱线的中心频率。

从整体上看,原装置大小为70 cm×35 cm×18 cm,而小型化532 nm激光器大小仅为40 cm×

18.5 cm×11 cm, 体积是原来的 1/5, 易于搬运。既可以直接输出空间光, 又通过光纤耦合输出, 方便使用。另外, 当需要高功率 532 nm 倍频激光输出时, 可以利用外部环形倍频腔, 获得大于 450 mW 的 532 nm 稳频激光<sup>[12]</sup>。

### 3 测量结果

#### 3.1 频率稳定度

为了评价小型化 532 nm 激光器输出频率的稳定度, 使用实验室现有一台 532 nm 激光频率标准装置<sup>[9]</sup>作为参考激光与其拍频, 如图 2 所示。首先, 利用一套 Menlo Systems 公司的光纤光梳与参考激光拍频获得参考激光的稳定性, 光梳的偏置频率和重复频率均锁在氢钟标准信号上。图 3 所示参考激光与光梳的拍频结果, 测量时间约 9000 s, 对应的标准偏差为 0.725 kHz。之后, 参考激光与待测小型化 532 nm 激光器拍频测量, 如图 4 所示, 测量时间约 13000 s, 对应的标准偏差为 30.367 kHz。比

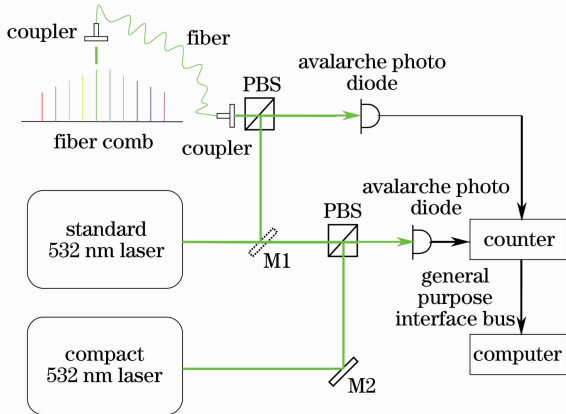


图 2 拍频光路示意图

Fig. 2 Scheme of optical path for the frequency beats

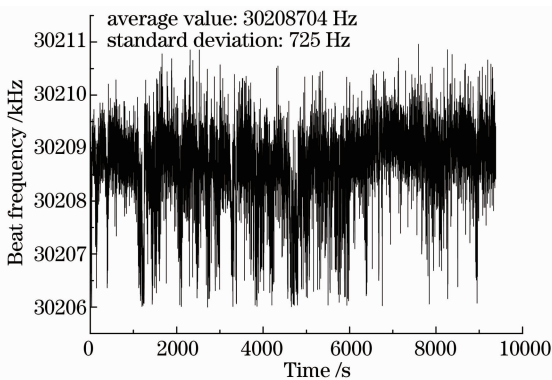


图 3 532 nm 激光频率标准装置与光梳拍频测量结果

Fig. 3 Frequency beats between 532 nm optical frequency standard and optical frequency comb

较图 3 与图 4 的结果, 可以发现 532 nm 激光频率标准装置稳定性要远高于小型化 532 nm 激光器, 因此图 4 体现的是后者的频率稳定性。图 5 为图 4 对应的阿伦偏差曲线, 其 1s 的阿伦偏差为  $2.4 \times 10^{-12}$ 。

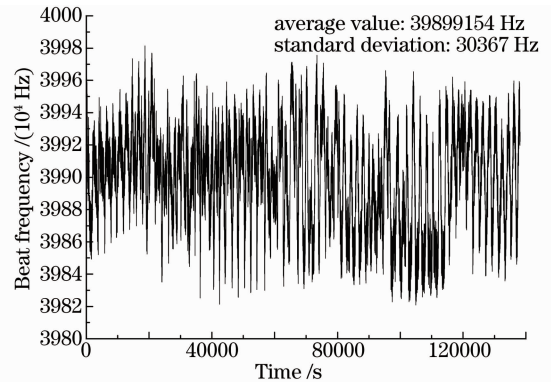


图 4 小型化 532 nm 激光器与 532 nm 标准装置拍频测量结果

Fig. 4 Frequency beats between the compact 532 nm laser and 532 nm optical frequency standard

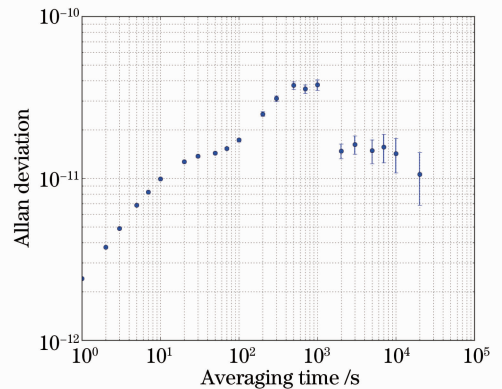


图 5 小型化 532 nm 激光器与 532 nm 标准装置拍频测量结果的阿伦偏差曲线

Fig. 5 Allan deviation of the frequency beats between the compact 532 nm laser and 532 nm optical frequency standard

#### 3.2 绝对频率值和不确定度

由于通过光梳可以测量得到 532 nm 激光频率标准装置的绝对频率值, 因此根据它与小型化 532 nm 激光器拍频所得测量结果, 得到小型化 532 nm 激光器的绝对频率值。考虑开关机对测量结果的影响, 在 5 天内, 共测量 10 组数据。每次开机预热 2~3 h 后, 闭环系统开始测量, 测量时间为 20~40 min, 测量结束后开环系统并关机。等待至少 1 h 后重新开机, 重复上述操作, 测量结果如图 6 所示。小型化 532 nm 激光器的绝对频率的实验平均值为 563260223436 kHz, 其合成实验标准偏差为 26 kHz, 取包含因子  $k=2$ , 则该测量结果的扩展不确定度为 52 kHz, 对应约 95% 的置信区间。

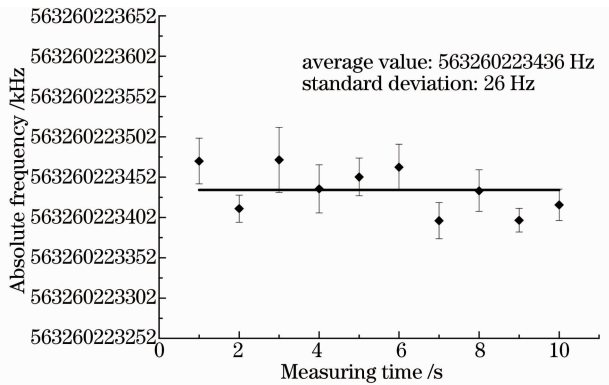


图 6 小型化 532 nm 激光器的绝对频率值测量结果

Fig. 6 Measurement of the absolute frequency of the compact 532 nm laser

## 4 结 论

综上所述,实验实现小型化碘稳频 532 nm 固体激光器,体积仅为原系统的 1/5。由于采用调制转移技术实现频率锁定,实现激光的无调制输出。实验利用光梳将小型化碘稳频 532 nm 激光器的绝对频率溯源到氢钟上,得到测量平均值为 563260223436 kHz,测量结果的扩展不确定度为 52 kHz( $k=2$ )。通过与碘稳频 532 nm 固体激光频率标准装置长时间拍频测量,得到 1 s 的阿伦偏差为  $2.4 \times 10^{-12}$ 。从实验结果可以看出,该小型化 532 nm 激光器的绝对频率值与对应的锁定参考碘分子超精细谱线中心频率值并不重合,千秒及千秒以下的阿伦偏差曲线不是很理想,激光频率存在周期性漂移现象。分析主要有以下原因:1) 经 EOM 调制返回的抽运光,有一部分杂散光进入探测器形成干扰,导致以碘吸收峰中心为参考的激光频率锁定零点随时间漂移,原因是在装置中出于节省空间的考虑省略了 AOM,未经 AOM 调制的抽运光对探测光形成干扰并耦合进探测器;2) 由于同样出于装置小型化考虑,碘吸收室长度缩小到 12 cm 并没有经过扩束处理的探测光束和抽运光束单次通过碘吸收室,碘吸收有效长度的缩小和单位面积上光功率的加强,使得吸收谱线线宽展宽且信噪比降低,从而对激光频率稳定度也造成不利影响。消除这些干扰因素是下一步工作的重点。利用小型化 532 nm 激光器输出频率的高稳定性,且可以通过飞秒光梳溯源到氢钟上,在一些对激光频率稳定度要求不是很高的场合,如绝对重力仪和长度测量等领域,有着广泛的应用前景。

## 参 考 文 献

- John L. Hall. Optical frequency measurement: 40 years of technology revolutions[J]. IEEE Journal on Selected Topics in Quantum Electronics, 2000, 6(6): 1136–1144.
- M L Eickhoff, J L Hall. Optical frequency standard at 532 nm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1995, 44(2): 155–158.
- Jun Ye, Lennart Robertsson, Susanne Picard, *et al.*. Absolute frequency atlas of molecular I<sub>2</sub> lines at 532 nm [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(2): 544–549.
- John L. Hall, Long-Sheng Ma, Mathew Taubman, *et al.*. Stabilization and frequency measurement of the I<sub>2</sub>-stabilized Nd:YAG laser [J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1999, 48(2): 583–586.
- Wu Xuejian, Li Yanwei, Hao Yun, *et al.*. Femtosecond optical frequency combs for precision measurement applications [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2012, 49(3): 030001.  
吴学健, 李岩尉, 昊 贇, 等. 飞秒光学频率梳在精密测量中的应用[J]. 激光与光电子学进展, 2012, 49(3): 030001.
- Fang Zhanjun, Wang Qiang, Wang Minming, *et al.*. Femtosecond frequency comb and optical frequency measurement of 532 nm Nd:YAG laser[J]. Acta Physica Sinica, 2007, 56(10): 5684–5690.  
方占军, 王 强, 王明明, 等. 飞秒光梳和碘稳频 532 nm Nd:YAG 激光频率的测量[J]. 物理学报, 2007, 56(10): 5684–5690.
- Zang Erjun, Cao Jianping, Zhong Mingchen, *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an external ring cavity[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3): 335–340.  
臧二军, 曹建平, 钟明琛, 等. 用单块激光器和环形外腔获得稳定的 532 nm 激光[J]. 光学学报, 2003, 23(3): 335–340.
- Zuo Aibin, Li Wenbo, Peng Yuexiang, *et al.*. Research on frequency stabilization of modulation transfer spectroscopy[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(2): 164–166.  
左爱斌, 李文博, 彭月祥, 等. 调制转移光谱稳频的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(2): 164–166.
- 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 焱, 等. 532 nm 碘分子光频标[J]. 中国激光, 2007, 34(2): 203–208.
- Zhang Hongxi, Zhu Xingbang, Liu Zhiming, *et al.*. Development of 266 nm ultraviolet laser wavelength standard device [J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(s1): s102009.  
张洪喜, 朱兴邦, 刘志明, 等. 266 nm 紫外激光波长标准装置的研制[J]. 中国激光, 2013, 40(s1): s102009.
- Li Ye, Cao Jianping, Zang Erjun, *et al.*. Study on the properties and suppression of the intensity noise in semi-nonplanar monolithic lasers[J]. Chinese J Lasers, 2005, 32(8): 1050–1054.  
李 焱, 曹建平, 臧二军, 等. 半非平面单块激光器强度噪声及其抑制的研究[J]. 中国激光, 2005, 32(8): 1050–1054.
- Yang Zhao, Baike Lin, Ye Li, *et al.*. High conversion efficiency and power stability of 532 nm generation from an external frequency doubling cavity[J]. Chin Phys Lett, 2012, 29(9): 094210.

栏目编辑:何卓铭