

# 266 nm 紫外标准波长产生及应用技术研究

王少水 朱兴邦 孙权社 赵发财

(中国电子科技集团公司第四十一研究所, 山东 青岛 266555)

**摘要** 针对原子谱线灯谱线能量弱且无法实现波长量值溯源的难题,介绍了一种 266 nm 标准波长源的研制技术,以 1064 nm 单块固体环形激光器作为基频光,经过两次二倍频分别得到 532、266 nm 激光。采用调制转移光谱技术,将 532 nm 激光波长稳定在碘分子 $^{127}\text{I}_2$  R(56)32-0 的 a10 超精细谱线上;采用外部环形倍频技术,将稳频的 532 nm 激光倍频到 266 nm。将 532 nm 波长溯源至中国计量院的飞秒光梳波长标准装置,间接实现 266 nm 激光波长的量值溯源。实验结果表明,标准波长源频率稳定性的阿伦方差优于  $1 \times 10^{-10}$ ,采用标准波长源校准后的紫外光谱仪具有较好的波长测试准确度。

**关键词** 激光器;标准波长源;调制转移光谱技术;飞秒光梳;紫外光谱仪

中图分类号 O436 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL201441.s102007

## Research on Generating and Application in the 266 nm Ultraviolet Standard Wavelength

Wang Shaoshui Zhu Xingbang Sun Quanshe Zhang Facai

(The 41st Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,  
Qingdao, Shandong 266555, China)

**Abstract** As the atomic lines power of atomic spectrum light is weak and wavelength cannot trace to notional standard, this paper introduces a development technology of standard wavelength source at 266 nm. Using second harmonic generation and fourth harmonic generation technique, the laser beams at 532 nm and 266 nm are obtained which based on 1064 nm single solid-state ring laser. Using modulation transfer spectroscopy, the frequency of the 532 nm laser is stabilized at a10 hyperfine spectra of  $^{127}\text{I}_2$  R(56)32-0. Laser beam at 266 nm is obtained from frequency stabilization laser beam at 532 nm using external circular frequency doubling technology. The 532 nm laser is traced back to femtosecond laser based optical frequency comb apparatus in National Institute of Metrology, and this indirectly realizes the quantity traceability at 266 nm wavelength. The experiment results prove that the Allan variance of standard ultraviolet wavelength source at 266 nm is less than  $1 \times 10^{-10}$ . The ultraviolet spectrograph corrected by wavelength standard has fine wavelength precision.

**Key words** lasers; standard wavelength source; modulation transfer spectroscopy; femtosecond optical comb; ultraviolet spectrograph

**OCIS codes** 140.3460; 140.3580; 140.3610; 140.7240

## 1 引 言

近几年紫外光电子技术在军事上的应用越来越广泛,在空间技术领域,越来越多的紫外光谱计、多光谱相机、紫外相机、成像摄谱仪等载荷装备到卫星和空间站上,应用于太空环境检测、气象监测、太阳辐射测量等天文研究领域。

现阶段国际上对于紫外波段的光波长定标采用的是原子谱线灯的校准方法,最常用的原子谱线灯有低压汞灯、高压汞灯、空心阴极灯等,这些原子谱线灯的特征谱线能量太小,而且随着灯内压强及所充气体纯度的不同,谱线会有所不同,导致利用原子谱线灯进行波长校准时会产生较大不确定度。比如

收稿日期: 2013-10-20; 收到修改稿日期: 2013-11-11

基金项目: 技术基础科研项目(J312012B002, J312011A003)

作者简介: 王少水(1985—),男,硕士,主要从事光电子计量校准方面研究。E-mail: wss.2008@163.com

海洋光学的一款紫外光谱仪,分辨率优于 0.01 nm,但是用标准波长灯定标时,其准确度只有 0.5 nm,远低于光谱分辨率。

在可见光和近红外波段,常将稳频激光器作为波长标准仪器,如 532 nm 碘吸收稳频激光器、780 nm 铷吸收稳频激光器、1542 nm 乙炔吸收稳频激光器等。紫外波段的激光器有 He-Cd 激光器(325 nm)、四倍频激光器,但是没有合适的吸收气体可供稳频,无法实现紫外激光器的稳频。为此,本文提出一套产生 266 nm 紫外标准波长装置的设计方案,以 1064 nm 单块固体环形激光器发出的激光作为基频光,通过 PPKTP 晶体倍频得到 532 nm 激光,利用调制转移光谱技术,将 532 nm 激光波长稳定在<sup>127</sup>I<sub>2</sub> R(56)32-0 的 a<sub>10</sub> 超精细谱线上,将稳频后的 532 nm 激光经过 BBO( $\beta$ -BaBo-O<sub>2</sub>)倍频得到稳频的 266 nm 激光。

## 2 532 nm 稳频激光器系统设计

532 nm 激光器是整个标准波长装置的核心部件,输出激光必须具有单纵模、可调谐、窄线宽、频率稳定等特性;同时输出功率要大于 200 mW,以满足 266 nm 倍频对输入光功率的要求。

目前有三种方法可产生 532 nm 激光,详细介绍如下:

1) 1064 nm 光纤激光器倍频到 532 nm:该类型的光纤激光器的特点是光纤输出,1064 nm 光纤激光器的输出功率在 500 mW 左右,但是倍频后的 532 nm 激光功率小于 200 mW,因此不适合作为激光源。

2) 1064 nm 半导体激光器倍频到 532 nm:此类激光器的原理是:1064 nm 半导体激光器先经过半导体放大器,增大输出功率到 1 W 以上,然后再倍频到 532 nm,功率可以到 300 mW 以上。调谐方式通过 PZT 调谐,可以实现几十个兆赫兹的无跳模调谐,缺点是价格高,而且光谱质量没有固体激光好。

3) 1064 nm 固体激光器倍频到 532 nm:1064 nm 激光可采用 Nd:YAG 和 Nd:YVO<sub>4</sub> 增益介质产生,其中 Nd:YAG 产生的激光光谱质量好,但是功率小于 Nd:YVO<sub>4</sub> 产生的激光。

用于生产标准波长的激光必须具有高质量的光谱,所以采用优质的 Nd:YAG 晶体加工成具有半非平面单块结构的固体环形激光器(Miser),该结构激光器特别适合激光频标。为弥补 Nd:YAG 晶体产生的 1064 nm 激光功率偏小的缺陷,采用外部环形倍频腔来提高 1064 nm 到 532 nm 的转换效率。

整个 532 nm 激光器的工作过程如图 1 所示,808 nm 抽运光通过微透镜(lens 1A、lens 1B)压缩发散角,然后通过镀有 808 nm 波长增透膜的透镜(lens 2),使得抽运激光有效耦合进入单块晶体,产生 1064 nm 的基频光。基频光单次通过 PPKTP 晶体后,部分转换为 532 nm 激光,用于碘吸收稳频;剩余的 1064 nm 激光用于外部环形腔倍频,产生高能量的 532 nm 激光,用作 266 nm 激光产生的抽运光源。

图 1 系统中产生的 532 nm 激光会受到周围环境各种因素的扰动,输出激光频率不是稳定的,不能用于光波长的校准。为了获取频率稳定的 532 nm 的激光,需要对激光器采取一定的稳频措施来补偿外界所引起的频率起伏,达到稳频的目的<sup>[1]</sup>。

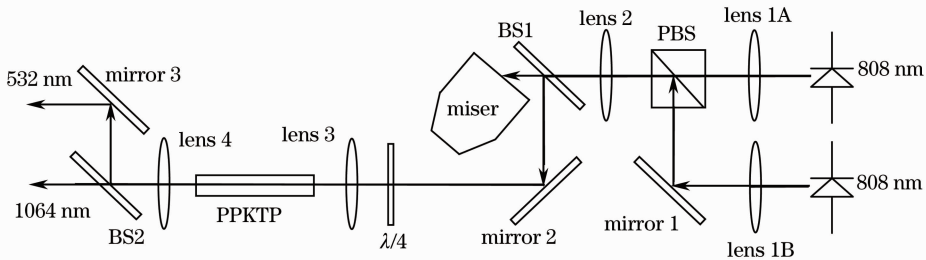


图 1 532 nm 激光产生系统示意图

Fig.1 Schematic diagram of generating of 532 nm laser

采用主动稳频方法中的饱和吸收稳频法,利用调制转移光谱(MTS)技术将 532 nm 激光稳定到碘分子的 R(56)32-0 的 a<sub>10</sub> 吸收谱线上,该吸收谱线是复现米定义的推荐谱线之一,因为 a<sub>10</sub> 谱线较为纯净,且两侧的谱线曲线特性明显,有利于确定 a<sub>10</sub>

位置,图 2 中曲线为 a<sub>10</sub> 及其两侧谱线的调制转移光谱。中国计量院(NIM)也成功将 532 nm 激光稳频到 R(56)32-0 吸收线上<sup>[2-4]</sup>,建立了 532 nm 国家标准,1 s 采样时间的激光频率稳定度的阿伦方差优于  $2.4 \times 10^{-14}$ 。

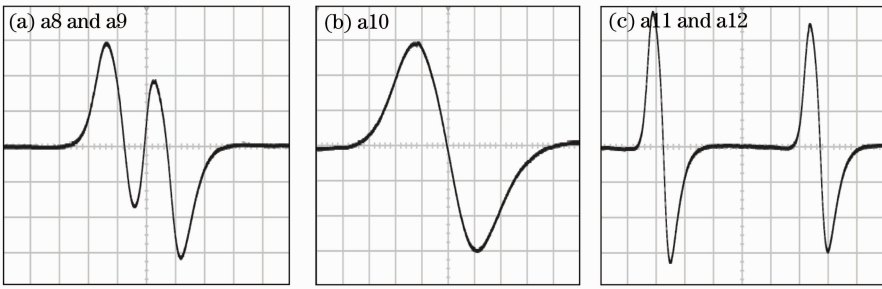


图 2 碘分子 R(56) 32-0 成分的调制转移光谱

Fig. 2 Modulation transfer spectroscopy of iodine R(56) 32-0 component

### 3 紫外倍频系统设计

光学倍频技术,是非线性光学现象的一个重要应用,偏振光满足相位匹配,通过非线性晶体就会产生二次谐波,即产生倍频。单次倍频转换效率低,直接的光反馈会造成频率不稳定。本文采用环形外腔倍频,光学倍频装置在激光器的谐振腔之外,且光路形成循环,多次通过非线性晶体。这样一方面可以通过控制腔长,跟踪基频激光频率,保证倍频激光输出的稳定,另一方面,由于多次通过非线性晶体,倍频光的功率得到增强,提高了转换效率<sup>[5]</sup>。

环形倍频腔工作原理如图 3 所示。

如图 3 所示,532 nm 基频激光经过  $\lambda/4$  波片和  $\lambda/2$  波片转换成线偏振光,实现偏振匹配,透镜将基频光耦合到腔体内,实现空间模式匹配。环形腔由平面镜  $M_1$ 、 $M_2$  和凹面反射镜  $M_3$ 、 $M_4$  组成,其中  $M_1$  为耦合镜,用来实现基频腔外和腔内光束的耦合,其透射率经过特殊选择,满足倍频要求。反射镜  $M_2$ 、 $M_3$ 、 $M_4$  对基频光具有高反射率,其中  $M_4$  同时对倍频光具有高透射率,以实现二次谐波的提取。探测器 detector 1 和 detector 2 用于监视倍频激光波长与谐波共振波之间的失调。失调时,会产生误差信号,该信号经过反馈系统,反馈到压电陶瓷驱动器,通过压电陶瓷的伸缩调节腔长,实现倍频腔与激

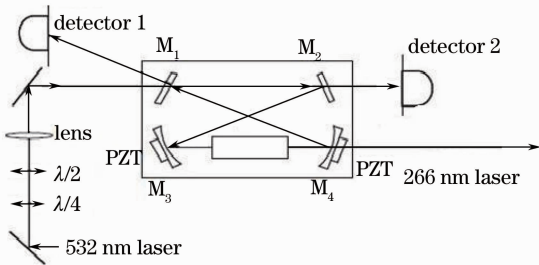


图 3 外部环形倍频腔示意图

Fig. 3 Schematic diagram of external circular frequency doubling cavity

光器之间的跟踪与锁定,腔内光功率由于谐振作用而获得增强,产生更大的倍频功率。

目前能够实现 532 nm 激光倍频到 266 nm 的非线性晶体包括  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  (KDP)、BBO、 $\text{CsLiB}_6\text{O}_{10}$  (CLBO)、 $\text{K}_2\text{Al}_2\text{B}_2\text{O}_7$  (KABO)、 $\text{KBeBO}_3\text{F}_2$  (KBBF),其中 KDP 晶体易潮解,不适用;CLBO 晶体轻微潮解,但是价格太高;KABO 晶体不易潮解,但是转换效率低;KBBF 晶体不易潮解,但是难于成长;BBO 晶体轻微潮解,转换效率高,比较适合用于 266 nm 的倍频,为避免潮解,必须保持实验室环境干燥,同时给晶体加热除湿。

### 4 实验数据分析

#### 4.1 功率测试

为测试激光器输出功率及功率稳定性,本实验采用以色列 OPHIR 公司的 PD300R-UV 型号功率计探头作为标准,该探头测量波长范围:200~1100 nm;功率范围:20 pW~300 mW;功率示值误差小于 2%;非线性度小于 1%。测量结果如表 1 所示。

表 1 激光器功率测试结果

Table 1 Test results of laser power

| Source       | Output power /mW | Power stability /(15 min) |
|--------------|------------------|---------------------------|
| 532 nm laser | 420              | 1%                        |
| 266 nm laser | 2.8              | 1%                        |

紫外光谱分析仪大多采用光电倍增管或加强 Si 作为探测器,灵敏度很高,采用本文所建立的装置对光谱分析仪进行波长校准时,需在光路中放置衰减片,保证被测光谱仪处于非饱和状态。

#### 4.2 频率/波长测试

目前可见光和近红外波段的稳频激光器可通过光梳溯源至铯原子钟,但是紫外光梳技术还不成熟,无法实现紫外激光器的波长量值溯源。本实验在非

线性晶体严格倍频的理论基础上,对 532 nm 稳频激光进行了测试,间接验证 266 nm 激光的波长准确性和稳定性。本次测试分为两个部分,首先是中国计量院的 532 nm 稳频激光器与飞秒光梳装置拍频得到 532 nm 激光器输出波长的绝对值;然后将本文设计的 532 nm 激光器与中国计量院的 532 nm 激光器进行拍频,得到频率稳定性,同时利用公式得到小型 532 nm 激光器的输出波长绝对值。

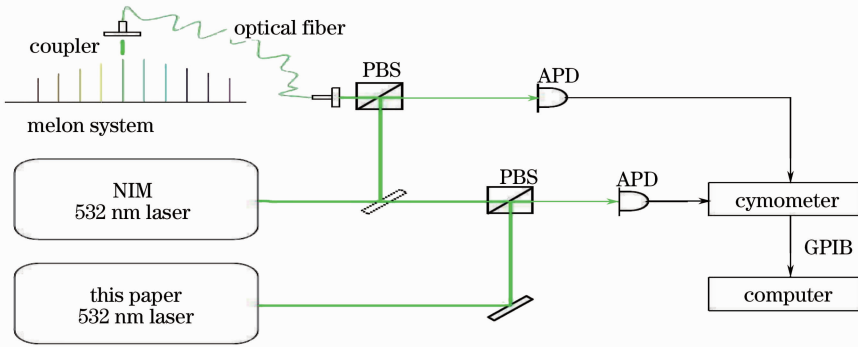


图 4 拍频测量系统示意图

Fig. 4 Schematic diagram of beat frequency system

小型化 532 nm 稳频激光器与中国计量院 532 nm 稳频激光标准装置的拍频测量结果如图 5 所示,标准差为 30367 Hz,若用波长表示,则小于 1 fm(1 MHz 的频率漂移对应 1 fm 的波长偏差)。拍频结果一般用阿伦方差表示,阿伦方差计算公式为<sup>[6]</sup>:

$$\sigma_A(\tau) = \frac{1}{\nu} \sqrt{\frac{1}{2(n-1)} \sum_{i=1}^{n-1} [f_{i+1}(\tau) - f_i(\tau)]^2}, \quad (2)$$

式中  $\tau$  为频率测量平均时间,  $\nu$  为 532 nm 绿光的频率值 ( $\nu = 5.6326 \times 10^{14}$  Hz),  $n$  为取样点数,  $f_i(\tau)$  为第  $i$  次取样平均的频率值。

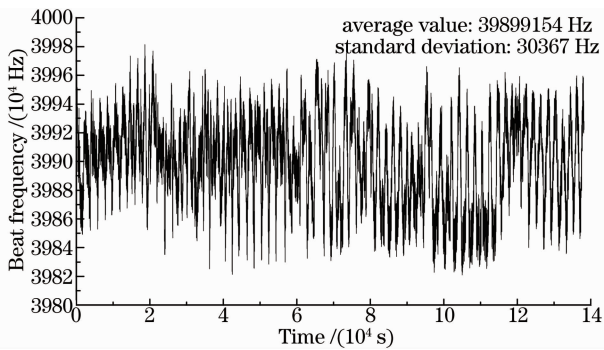


图 5 拍频测试结果

Fig. 5 Result of beat frequency

通过分析实验结果,小型化 532 nm 稳频激光器与中国计量院 532 nm 稳频激光标准装置的拍频

拍频测量系统<sup>[7]</sup>如图 4 所示,通过实验得到中国计量院 532 nm 碘稳频激光标准装置的频率绝对值为 563260223511 kHz,对应的标准偏差为 0.725 kHz。BIPM 推荐值为 563260223513(5) kHz,括号内为不确定度,测量值在国际推荐值的不确定度范围内。实验表明中国计量院的 532 nm 碘稳频激光标准装置的输出频率是稳定可靠的。

测量结果的阿伦方差优于  $1 \times 10^{-10}$ 。

### 4.3 紫外光谱仪波长测试实验

为验证标准波长源的实际应用效果,本实验采用标准波长源校准 Horiba Jobin Yvon 公司的 iHR550 型号光谱仪,该型号光谱仪采用电子制冷 Si 探测器,测量范围为 200~1100 nm。校准后的光谱仪测试低压汞灯谱线<sup>[8]</sup>的结果如表 2 所示。

表 2 低压汞灯谱线测试结果

Table 2 Test results of Low pressure mercury lamp spectral lines

| Theoretical value /nm | Measurements / nm | Bias /nm | Spectrometer indicators /nm |
|-----------------------|-------------------|----------|-----------------------------|
| 194.10                | 194.13            | 0.03     |                             |
| 253.65                | 253.76            | 0.11     |                             |
| 365.02                | 365.10            | 0.08     | $\pm 0.2$                   |
| 404.66                | 404.73            | 0.07     |                             |

由表 2 中数据可知,校准后的紫外光谱仪在 200~400 nm 范围内具有很好的波长测量准确度,测试结果均在指标范围内。

## 5 结 论

对于光谱的量值溯源体系,美国 NIST 采用了将光波长溯源到原子频标的技术,在可见光和近红外波段该技术较为成熟,对于紫外波段的研究正在进行中。现阶段国际上对于紫外波段的光波长定标

采用的是原子谱线灯的校准方法,但是用标准波长灯定标时,其准确度只有 0.5 nm,不能满足高精度紫外光谱仪的校准要求。本文设计的 266 nm 紫外标准波长源以 1064 nm 单块固体环形激光器产生的激光作为基频光,经过两次二倍频分别得到 532、266 nm 激光;采用调制转移光谱技术,将 532 nm 激光波长稳定在碘分子 $^{127}\text{I}_2$  R(56)32-0 的 a10 超精细谱线上,同时将 532 nm 波长溯源至中国计量院的飞秒光梳波长标准装置,间接实现 266 nm 激光波长的量值溯源。采用标准波长源校准的光谱分析仪具有较高的波长测试精度,具有很好的应用前景。

我国在光波长溯源方面进行了大量的研究工作,华东师范大学、中国计量院等单位已经部分解决了可见光及近红外波段的光波长到频率标准的溯源<sup>[9]</sup>,华东师范大学已开展了紫外光梳方面的技术研究,紫外光梳技术的发展,紫外光波长的标准最终需要溯源到频率基准上<sup>[10]</sup>。

### 参 考 文 献

- 1 Zhou Bingkun, Gao Yizhi, Chen Tirong, *et al.*. Laser Principle [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2010. 210—219.  
周炳琨, 高以智, 陈倜嵘, 等. 激光原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010. 210—219.
- 2 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.
- 3 Zang Erjun, Cao Jianping, Zhang Mingchen, *et al.*. Stable second harmonic generation using a monolithic ring laser and an

- extrnal ring cavity[J]. Acta Optical Sinica, 2003, 23(3): 335—340.  
臧二军, 曹建平, 钟明琛. 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.
- 4 Zhang Hui, Peng Xuexiang, Zang Erjun, *et al.*. Studies on the hyperfine structures of  $\text{I}_2$  absorption line with third harmonic frequency stabilization in Nd: YVO<sub>4</sub>-KTP ring laser [J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2005, 25(5): 641—643.  
张 辉, 彭月祥, 臧二军, 等. Nd: YVO<sub>4</sub>/KTP 环形倍频激光器三次谐波稳频碘吸收谱线超精细结构的研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2005, 25(5): 641—643.
- 5 He Jingliang, Lu Xingqiang, Jia Yulei, *et al.*. All-solid-state Nd: YVO<sub>4</sub> UV laser at 266 nm by fourth harmonic using a BBO crystal[J]. Acta Physica Sinica, 2000, 49(10): 2106—2108.  
何京良, 卢兴强, 贾玉磊, 等. BBO 四倍频全固态 Nd: YVO<sub>4</sub> 紫外激光器[J]. 物理学报, 2000, 49(10): 2106—2108.
- 6 Li Zongyang. Measurement Technology Base [M]. Beijing: Atomic Energy Press, 2002. 247—250.  
李宗扬. 计量技术基础[M]. 北京: 原子能出版社, 2002. 247—250.
- 7 T Udem, R Holzwarth, T W Hänsch, *et al.*. Optical frequency metrology[J]. Nature, 2002, 416(6877): 233—237.
- 8 Craig J Sansonetti, Marc L Salit, Joseph Reader. Wavelengths of spectral lines in mercury pencil lamps[J]. Appl Opt, 1996, 35(1): 74—77.
- 9 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, 王民明, 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.
- 10 Li Wenxue. Research on the High Repetition Frequency, High Power Laser System used in XUV Optical Frequency “combs” System[D]. Shanghai: East China Normal University, 2008.  
李文雪. 紫外光梳驱动源的研究[D]. 上海: 华东师范大学, 2008.

栏目编辑: 殷建芳