

# 基于声光频移器反馈控制的 397.5 nm 紫外激光 功率稳定研究

白乐乐<sup>1,2</sup>, 温馨<sup>1,2</sup>, 杨煜林<sup>1,2</sup>, 刘金玉<sup>1,2</sup>, 何军<sup>1,2,3</sup>, 王军民<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>山西大学量子光学与光量子器件国家重点实验室, 山西 太原 030006;

<sup>2</sup>山西大学光电研究所, 山西 太原 030006;

<sup>3</sup>山西大学极端光学协同创新中心, 山西 太原 030006

**摘要** 基于声光频移器设计的反馈环路,对 397.5 nm 紫外激光功率起伏进行反馈抑制。整套系统通过比例积分电路得到的误差信号来改变声光频移器的射频功率,利用声光频移器的布拉格衍射方式对激光功率进行控制,从而实现激光功率的长时间稳定。另外还对通过倍频产生的紫外激光特性进行了分析。最后,通过反馈系统在时域上实现了紫外激光功率的相对起伏,由 $\pm 11.739\%$ 降至 $\pm 0.053\%$ ,稳定度改善约 220 倍;在频域 1~8000 Hz 范围内,其功率谱密度得到明显的降低;在 5 kHz 频率处,功率谱密度由  $9.6 \times 10^{-5}$  dBV $\cdot$ Hz $^{-1/2}$  改善为  $1.9 \times 10^{-6}$  dBV $\cdot$ Hz $^{-1/2}$ 。

**关键词** 激光器; 声光频移器; 激光功率; 倍频; 反馈控制; 相对起伏; 功率谱密度

中图分类号 O436 文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.1001008

## 397.5 nm Ultra-Violet Laser Power Stabilization Based on Feedback Control via Acousto-Optic Frequency Shifter

Bai Lele<sup>1,2</sup>, Wen Xin<sup>1,2</sup>, Yang Yulin<sup>1,2</sup>, Liu Jinyu<sup>1,2</sup>, He Jun<sup>1,2,3</sup>, Wang Junmin<sup>1,2,3\*</sup>

<sup>1</sup>State Key Laboratory of Quantum Optics and Quantum Optics Devices, Shanxi University,  
Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>2</sup>Institute of Opto-Electronics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China;

<sup>3</sup>Collaborative Innovation Center of Extreme Optics, Shanxi University, Taiyuan, Shanxi 030006, China

**Abstract** Optical power of a 397.5 nm ultra-violet laser can be inhibited by the feedback loop based on acousto-optic frequency shifter. The laser power is stabilized through changing the radio frequency power of the frequency shifter by error signal obtained by feedback, and controlling the laser power by the Bragg diffraction of the frequency shifter. The characteristics of the ultraviolet laser generated through frequency doubling is analyzed. Finally, in the time domain, the fluctuation of ultra-violet laser is remarkably decreased from  $\pm 11.739\%$  to  $\pm 0.053\%$  by the feedback (220 times improvement). In the frequency domain of 1 Hz to 8000 Hz, the power spectra density of laser is dramatically reduced. Typically at 5 kHz, the power spectra density is improved from  $9.6 \times 10^{-5}$  dBV $\cdot$ Hz $^{-1/2}$  to  $1.9 \times 10^{-6}$  dBV $\cdot$ Hz $^{-1/2}$ .

**Key words** lasers; acousto-optic frequency shifter; laser power; frequency doubling; feedback control; relative fluctuation; power spectra density

**OCIS codes** 140.3490; 230.1040

收稿日期: 2018-03-28; 修回日期: 2018-05-14; 录用日期: 2018-06-04

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFA0304502)、国家自然科学基金 (61227902, 61475091, 11774210)、山西省 1331 重点学科建设工程项目

\* E-mail: wwjjmm@sxu.edu.cn

# 1 引 言

当前,激光器种类繁多,按工作介质主要可分为固体激光器、气体激光器、半导体激光器及染料激光器。激光器广泛应用于各类光学实验,其中紫外激光(UV)的实际应用潜力巨大,如在激光打印技术<sup>[1]</sup>、光学器件的精密测量<sup>[2]</sup>、冷原子物理<sup>[3]</sup>及原子钟<sup>[4]</sup>等量子物理学方面的应用。Ca离子在其 $3D_{5/2}$ 能级具有较长的寿命,因此Ca离子钟可作为一种潜在频率标准。而397.5 nm紫外激光对应Ca离子 $4S_{1/2}-4P_{1/2}$ 跃迁,可作为冷却激光捕获Ca,在Ca离子钟的应用方面发挥着重要作用<sup>[4]</sup>。同时397.5 nm紫外激光可用来抽运光学参量振荡(OPO)制备795 nm压缩光<sup>[5-8]</sup>。目前,紫外半导体激光器已商用化,但由于其输出功率有限且光束质量不太理想,不是光学实验的最佳选择。一般地,采用倍频方法产生紫外激光,其具有输出功率大、光斑质量好等特性。

同一激光源,其输出的激光功率起伏在不同频率范围内有所不同。一般地,在高频兆赫兹量级处,固体激光器由于其强度噪声接近散粒噪声水平,在此频率范围内不考虑激光的经典噪声;而在低频千赫兹量级处,激光功率起伏不仅受到激光器本身的影响(如抽运源的稳定性、内部机械振动及内部系统热效应),而且还会受到外界环境的影响(如环境温度、气流及外部机械噪声)。因此低频处,为防止激光功率起伏对实验的影响,需要设计反馈控制系统,有效抑制其强度起伏。有多种方法可以实现激光功率稳定,如光学模式清洁法<sup>[9-10]</sup>、光学注入锁定法<sup>[11-12]</sup>及光电反馈控制法<sup>[13-14]</sup>等。前两种方法操作不灵活且构建系统较为复杂,因此,光电反馈成为抑制激光功率起伏的首选。光电反馈通过控制声光调制器(AOM)的射频功率大小来改变其一级衍射光的衍射效率,实现激光功率的稳定。目前已经有相关研究小组对此方法进行了理论分析<sup>[15-17]</sup>,但是基于不同的实验设计及光波波长,最终激光功率起伏的抑制效果也会有明显的差异。目前商用化的功率控制器,如美国BEOC公司生产的激光功率控制器(LPC-NIR),其有效反馈带宽小于5 kHz,长时间的方均根(RMS)起伏为0.03%;THORLABS公司生产的激光功率控制系统(Noise Eater, NEL03),反馈带宽为2.5 kHz(DC)。此类激光功率控制器价格较贵,有效反馈带宽较窄且可承受的入射激光功率有限,因此不

是最好的选择。本文目的是在低成本的情况下,获得更好的激光功率起伏抑制,且克服带宽限制,使反馈系统的有效带宽尽可能扩展。结果表明,在开启反馈环路后极大地改善了激光功率的起伏,同时,该反馈系统的有效带宽也拓展至近10 kHz,对进一步工作及相关的光学实验将起到促进和改善作用。

## 2 实验原理及装置

### 2.1 倍频制备397.5 nm紫外激光

如图1所示,装置图中上半部分为倍频过程。采用的单频激光源为连续可调谐的钛宝石激光器,可输出795 nm红外激光500 mW作为基频光。首先经过一个30 dB的光隔离器,避免光反馈对激光器造成影响,之后经过一个位相型的电光调制器(EOM)(New Focus公司,美国),调制频率为3.6 MHz,在进入EOM前基频光需通过 $\lambda/2$ 波片旋转为S偏振。采用Pound-Drever-Hall(PDH)锁频技术将倍频腔共振频率锁定到基频光中心频率处,调制后的795 nm激光束入射到倍频腔,以一定的透射率经探测器后进行解调,此时获得的误差信号振幅正比于激光频率相对倍频腔谐振频率的失谐量,将误差信号经过低通滤波后,通过反馈执行机构(PZT),对频率进行补偿,使倍频紫外激光能够稳定输出。倍频采用“8”字型的4镜环形腔结构,由4面镜子组成,总腔长为600 mm,M1、M2为平面镜,M3、M4为凹面镜,曲率半径为100 mm。M1对795 nm的透射率为11.74%,此条件可满足倍频腔的阻抗匹配,M2、M3、M4对795 nm基频光高反,M4同时对397.5 nm激光高透。两凹面镜之间放置 $1\text{ mm}\times 2\text{ mm}\times 10\text{ mm}$ 的周期极化磷酸氧钛钾(PPKTP)晶体(Raicol公司,以色列),准位相0类匹配,两通光端面镀795 nm及397.5 nm的双增透膜,极化周期为 $3.15\ \mu\text{m}$ 。对于此类长度晶体,通过计算最佳聚焦条件所对应的腰斑为 $22\ \mu\text{m}$ 。由于波长越短,晶体对紫外光的吸收越严重。基于此,选取两凹面镜的实际距离为120 mm,对应晶体 $\text{TEM}_{00}$ 模的腰斑尺寸为 $40\ \mu\text{m}$ ,此腰斑约为最佳聚焦腰斑的2倍,这样可减弱由于紫外光吸收导致的热效应。最后将该匹配晶体放置在自制的控温炉中,控温炉由紫铜加工而成,其具有较好的导热性能。采用精度为 $\pm 0.01\ ^\circ\text{C}$ 的控温仪(TED200C, Thorlabs公司,美国)通过Peltier元件对晶体进行升温降温,通过温度传感器AD590实时监测温度。

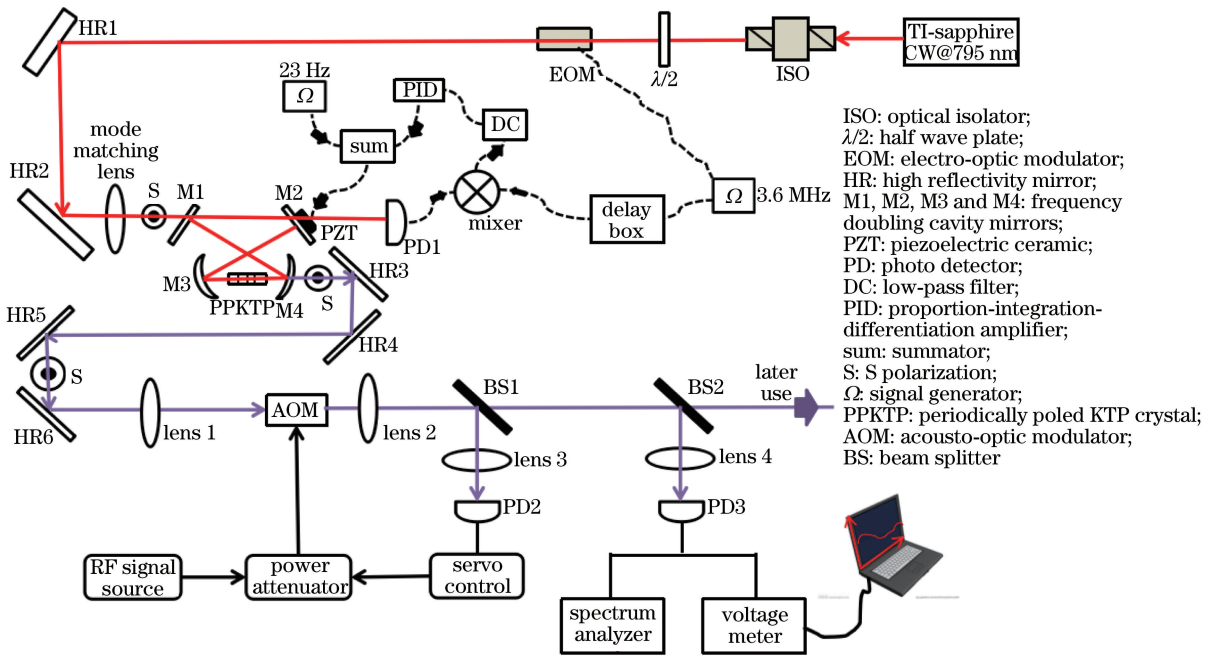


图1 实验装置图

Fig. 1 Schematic of experimental setup

不同功率下的基频激光,倍频产生的最大二次谐波功率也会不同<sup>[18]</sup>。如图2所示,红色圆点表示397.5 nm激光功率随795 nm激光功率的变化关系,这里选取输入耦合镜(M1)透射率为11.74%,基波功率为380 mW,产生最大功率为128 mW紫外激光,倍频效率约为33.8%。不同基波功率下,晶体最佳匹配温度为50.10 °C~52.80 °C。根据腔的精细度可以推算出内腔损耗约为4.5%,由于PPKTP晶体在紫外光照射下,会产生热效应,限制锁腔的稳定性,因此为了减弱晶体的热效应,同时可以长时间的对倍频腔进行锁定,基波功率不宜太大,在此取基波功率为280 mW。如图3所示,红线所标晶体最佳温度为52.80 °C,通过倍频产生的最大紫外激光功率为107 mW,倍频效率达38.2%,其匹配温度所对应的半峰全宽为0.88 °C。基于紫外激光是通过倍频腔产生的,受倍频过程中一系列因素的影响,所得到的紫外激光功率稳定性相比基波795 nm较差,因此倍频产生的紫外激光需要通过反馈控制抑制其功率起伏。

2.2 反馈基本原理

声光频移器作为本实验反馈系统的光功率控制模块,利用声子与光子非线性相互作用,经声电换能器转换形成超声波场,通过改变射频功率的大小改变其一级衍射效率。采用石英晶体作为声光晶体,衍射方式为布拉格衍射。如图4所示,入射光以一

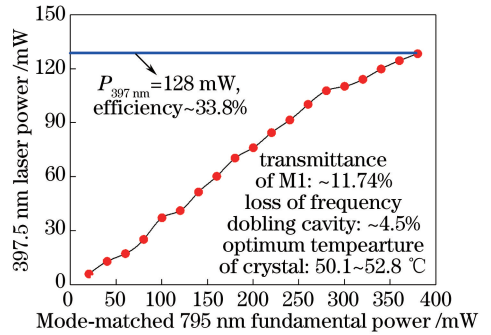


图2 397.5 nm 倍频光功率随795 nm基频光功率的变化关系  
 Fig. 2 Relationship between 397.5 nm double frequency laser power and 795 nm fundamental laser power

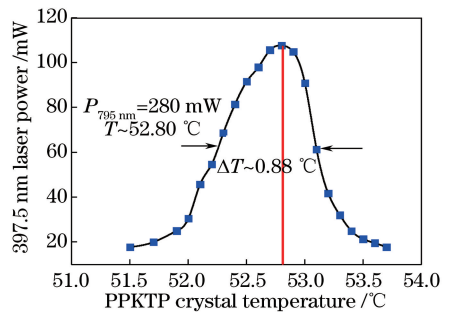


图3 280 mW基频光功率下倍频光功率随晶体温度的变化关系  
 Fig. 3 Relationship between double frequency laser power and crystal temperature at fundamental laser power of 280 mW

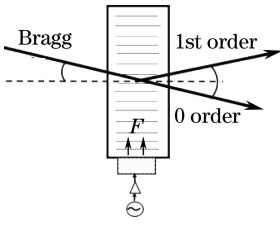


图 4 声光频移器的布拉格衍射

Fig. 4 Bragg diffraction of acousto-optic frequency shifter

定的角度入射 AOM 后只形成 0 级光和 +1 级光 (或 -1 级光), 1 级衍射光功率较大, 其中 0 级光沿入射光方向出射, 而 1 级光在 0 级光的另一端。在布拉格衍射中, 布拉格衍射角  $\theta_B = \lambda F / 2v$ , 式中  $\lambda$  为光波长,  $v$  为声波速度,  $F$  为射频功率。

线性区域内, AOM 一级衍射效率随射频功率大小的变化为

$$\eta = fP_{rf}, \quad (1)$$

式中  $\eta$  为 AOM 一级衍射效率的大小,  $f$  为线性区域内衍射效率系数,  $P_{rf}$  为射频功率的初始设定值。

假定  $X_{in}$  为入射 AOM 前的光场强度,  $X(t)$  为光场起伏大小, 则 AOM 后一级衍射光强为

$$X_{out} = \eta X_{in} + X(t). \quad (2)$$

输出光强经光电转换后得到的电压信号为

$$V_{det} = GX_{out}, \quad (3)$$

式中  $V_{det}$  为反馈取样探测器探测到的电压信号,  $G$  为光电探测器取样率的大小。

将得到的电压信号与预设的标准电压信号进行比较, 得到信号差为

$$\Delta V = V_{det} - V_{ave}. \quad (4)$$

然后通过比例积分放大电路, 产生误差信号:

$$V_{error} = p \times \left( \Delta V + I \int \Delta V dt + D \frac{d\Delta V}{dt} \right) + x_{offset}, \quad (5)$$

式中  $p$ 、 $I$ 、 $D$  分别为比例积分微分参数,  $x_{offset}$  为设定的偏置参数。

最后将产生的误差信号作为压控衰减器的控制电压, 控制最终驱动 AOM 的射频功率为

$$P'_{rf} = AV_{error}, \quad (6)$$

式中  $A$  为压控衰减器的衰减系数, 于是 AOM 衍射效率就变为

$$\eta' = fP'_{rf}. \quad (7)$$

经过不断反馈调试, 最终使 AOM 的一级衍射光强保持不变, 从而达到稳定激光功率的目的。

通过光电反馈将测得的电信号与标准的高精度电压信号作比较, 将得到的信号经比例积分放大电

路后产生误差控制信号; 通过压控衰减器控制最终加在 AOM 上的射频功率的大小; 通过 AOM 布拉格衍射方式利用其一级衍射效率随射频功率大小的变化实现激光功率的稳定。

图 5 所示为测得 397.5 nm 激光通过 AOM 后一级衍射率随射频功率大小的变化, 最大一级衍射效率约为 61%。在反馈回路开启之前, 射频功率的初始设定值要在其线性区域且小于最大一级衍射效率所对应的功率, 如图 5 中 B 点所示。为避免功率损耗太大, B 点所对应的功率值设定值不宜太小。另外, 测定了压控衰减器控制端口电压及衰减率的关系且控制端口典型电压值, 一般选为 8 V。

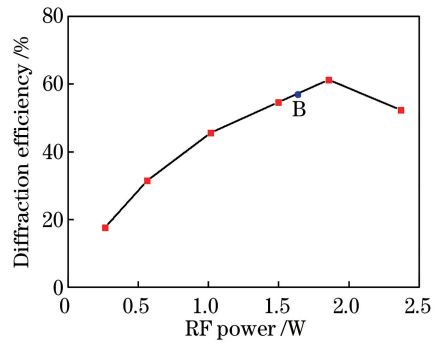


图 5 声光频移器的一级衍射效率随射频功率的变化情况

Fig. 5 Diffraction efficiency of acousto-optic frequency shifter versus the radio-frequency power

### 2.3 反馈实验装置

如图 1 下半部分所示, 在制备 397.5 nm 紫外激光的基础上, 将其通入反馈控制系统中。反馈装置主要由透镜、中心频率为 110 MHz 的声光频移器 (1-M110, Gooch & Housego 公司, 英国)、分束器 (BS1、BS2)、光电探测器 (PD2、PD3) (New Focus, 美国)、伺服控制模块、压控衰减器、射频源及射频功放构成。其中伺服控制系统为整个反馈环路的核心。

在紫外光进入 AOM 之前, 将光的偏振方向转为 S 偏振, 需要通过使用两个焦距合适的透镜 (L1, L2), 前者用于光斑的聚焦, 使 AOM 在不挡光的前提下光斑尽可能大, 从而使得到的一级衍射效率更高; 后者用于光束的准直。选用的透镜焦距  $f_1$  和  $f_2$  分别为 150 mm 和 50 mm, 得到最大一级衍射效率为 61%。因此, 后期将选用更为合适的透镜将提高衍射效率。

使用分束器 BS1 来代替传统方法进行分光, 一方面可以大大降低成本, 另一方面可以避免因使用偏振分束器 (PBS) 分光带来的偏振起伏, 从而影响激光的功率稳定性。在反馈环路中, 选取一部分激

光作为反馈取样光。由于探测器对 397.5 nm 紫外光的响应度较低,因此反馈取样时需要选取功率较大的紫外激光且不能饱和。探测器增益不宜太大,增益越大探测器引进的噪声也就越大。因此,取  $P_{\text{sample}} \approx 3 \text{ mW}$ , 探测器增益  $\times 3$ , 带宽设定为 300 kHz(DC), 通过光电转换得到一个电压信号, 将其与一个精密的电压信号作比较。将比较后的信号通过伺服控制模块从而输出误差信号, 用来控制 AOM 上的射频功率大小。通过 BS2 将 BS1 的另外一部分光分成两路, 一路用于激光功率起伏的实时监测, 另外一路后期使用。用于监视的一路探测器将分成两部分, 一部分将其通入到台式数字万用表 (Rigol DM3068), 在时域监测记录激光功率起伏, 其分辨率为 16 bit, 采样率为 100 Sa/s。另一路通入 SR785 快速傅里叶变换谱仪, 通过测量其每单位频率携带的信号功率大小即功率谱密度 (PSD), 在频域上记录激光的功率谱密度变化, 通过两者的数值变化调节反馈控制环路参数, 进而找到更好的锁定反馈参数值。

### 3 实验结果与分析

搭建实验装置后, 通过调节环路参数, 包括取样光功率大小、取样探测器的带宽及增益、伺服控制模块的参数及 AOM 的原始射频功率大小, 最终观察反馈效果, 锁定反馈环路。监测光功率为 10 mW, 探测器增益  $\times 1$ , 带宽为 100 kHz(DC)。利用数字万用表 (DM3068) 记录激光强度起伏值以及 SR785 记录 PSD 来评价激光功率反馈效果。如图 6 所示,

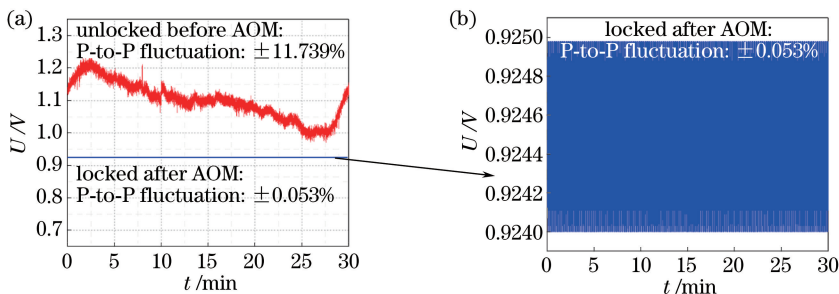


图 7 采用数字万用表测量反馈开启前后激光功率大小的变化。(a)开启前;(b)开启后

Fig. 7 Change of laser power before and after locking feedback system by using voltage meter. (a) Before locking; (b) after locking

### 4 结 论

基于声光频移器设计的反馈控制系统, 紫外激光的峰峰值起伏由  $\pm 11.739\%$  降到  $\pm 0.053\%$ , 成功实现了两个多数量级噪声的抑制。同时在 5 kHz 频率处, 实现了功率谱密度由  $9.6 \times$

在时域上测量了 3 组数据, 蓝线代表不加入 AOM 时所对应的激光功率谱密度, 黄线表示开启反馈环路后激光的功率谱密度, 发现在 1~8000 Hz 激光功率谱密度明显变小。典型地,  $f = 5 \text{ kHz}$  时, 功率谱密度由  $9.6 \times 10^{-5} \text{ dBV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  变为  $1.9 \times 10^{-6} \text{ dBV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ , 红线代表探测器的电子学噪声。

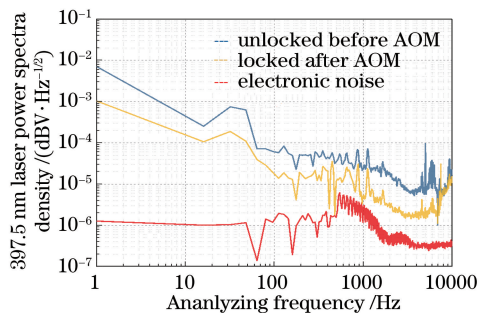


图 6 反馈前后激光功率谱密度

Fig. 6 Laser power spectral density before and after locking feedback system

同样利用数字万用表在时域上对其电压信号大小进行了 30 min 的测量与记录, 结果如图 7(a) 所示。红线代表 AOM 前, 397.5 nm 紫外激光对应的光电探测器输出电压值的起伏, 其峰峰值起伏为  $\pm 11.739\%$ ; 蓝线代表反馈后的激光功率起伏, 其峰峰值起伏为  $\pm 0.053\%$ , 激光强度相比起伏降低约为 1/220。在图 7(b) 中, 将反馈后情形下剩余起伏在更小的电压范围内显示, 可以观测到反馈后的信号大小变化范围为 0.924~0.925 V, 峰峰值起伏  $< 0.001 \text{ V}$ , 有效地改善了激光功率的不稳定性。

$10^{-5} \text{ dBV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  到  $1.9 \times 10^{-6} \text{ dBV} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$  的降低, 反馈带宽为 1~8000 Hz, 大大改善了激光的强度噪声。这种反馈方法通过换用不同型号 AOM 及反馈环路中参数的设置将适用于任意波段的激光, 对激光强度起伏都有改善作用。与此同时, 在实验过程中也发现了很多可以用来改善激光反馈控制系

统、提高反馈性能之处,如通过在 AOM 前选取更为合适的焦距透镜来改变光斑的大小,从而提高 AOM 一级衍射效率,减少功率的损耗;通过增加控温元件对 AOM 进行控温,减小由于 AOM 热效应带来的额外噪声;也可以尝试使用更加精密的电压信号与反馈取样信号进行比较;以及通过寻求更低噪声的光电探测器进行反馈取样探测,能够更好地进行激光功率起伏抑制。总体来说,激光的功率起伏是影响光学实验的重要因素之一,下一步工作将用反馈后的 397.5 nm 紫外激光抽运 OPO 腔制备 795 nm 低频压缩光,反馈后的激光在低频处具有较低的强度噪声,在一定程度上可以减少功率起伏对压缩光压缩度的影响。

## 参 考 文 献

- [1] Kim D I, Rhee H G, Song J B, *et al.* Laser output power stabilization for direct laser writing system by using an acousto-optic modulator [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2007, 78(10): 103110.
- [2] Miao S F, Li C X, Gao M, *et al.* Design of laser power stabilization system based on acousto-optic modulation for the transmissivity and reflectivity measurement of optical devices[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 9(2): 263-269.  
苗少峰, 李晨旭, 高苗, 等. 面向光学器件透反射率测量的声光调制型激光功率稳定系统设计[J]. *中国光学*, 2016, 9(2): 263-269.
- [3] Yun P, Tricot F, Calosso C E, *et al.* High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation [J]. *Physical Review Applied*, 2017, 7(1): 014018.
- [4] Wang X M, Meng Y L, Li L, *et al.* Frequency and intensity noises of probe laser in integrating sphere cold atom clock[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(9): 0912001.  
王秀梅, 孟艳玲, 李琳, 等. 积分球冷原子钟的探测光频率和强度噪声[J]. *中国激光*, 2017, 44(9): 0912001.
- [5] Linke N M, Ballance C J, Lucas D M. Injection locking of two frequency-doubled lasers with 3.2 GHz offset for driving Raman transitions with low photon scattering in  $^{43}\text{Ca}^+$  [J]. *Optics Letters*, 2013, 38(23): 5087-5089.
- [6] Wen X, Han Y S, Liu J N, *et al.* Generation of squeezed states at low analysis frequencies [J]. *Acta Physica Sinica*, 2018, 67(2): 024207.  
温馨, 韩亚帅, 刘金玉, 等. 低分析频率压缩光的实验制备[J]. *物理学报*, 2018, 67(2): 024207.
- [7] Wen X, Han Y S, Bai J D, *et al.* Cavity-enhanced frequency doubling from 795 nm to 397.5 nm ultraviolet coherent radiation with PPKTP crystals in the low pump power regime [J]. *Optics Express*, 2014, 22(26): 32293.
- [8] Yang W H, Jin X L, Yu X D, *et al.* Dependence of measured audio-band squeezing level on local oscillator intensity noise [J]. *Optics Express*, 2017, 25(20): 24262-24271.
- [9] Wen X, Han Y S, Liu J N, *et al.* Polarization squeezing at the audio frequency band for the Rubidium  $D_1$  line [J]. *Optics Express*, 2017, 25(17): 20737-20748.
- [10] Farinas A D, Gustafson E K, Byer R L. Frequency and intensity noise in an injection-locked, solid-state laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 1995, 12(2): 328-334.
- [11] Harb C C, Ralph T C, Huntington E H, *et al.* Intensity-noise properties of injection-locked lasers [J]. *Physical Review. A, Atomic, Molecular, and Optical Physics*, 1996, 54(5): 4370-4382.
- [12] Harb C C, Gray M B, Bachor H A, *et al.* Suppression of the intensity noise in a diode-pumped Nd: YAG nonplanar ring laser [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1994, 30(12): 2907-2913.
- [13] Chen Y L, Zhang J, Li Y M, *et al.* Reduction of intensity noise of single-frequency Nd: YVO $_4$  laser using mode cleaner [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2001, 28(3): 197-200.  
陈艳丽, 张靖, 李永民, 等. 利用模清洁剂降低单频 Nd:YVO $_4$  激光器的强度噪声[J]. *中国激光*, 2001, 28(3): 197-200.
- [14] Kuhr S, Alt W, Schrader D, *et al.* Deterministic delivery of a single atom [J]. *Science*, 2001, 293(5528): 278-280.
- [15] Li G, Zhang S, Isenhower L, *et al.* Crossed vortex bottle beam trap for single-atom qubits [J]. *Optics Letters*, 2012, 37(5): 851-853.
- [16] Jin G, Wen X, Yang B D, *et al.* Laser intensity stabilization by using of opto-electronic feedback control based on an acousto-optical frequency-shifting system [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(2): 234-239.  
靳刚, 温馨, 杨保东, 等. 采用声光频移器反馈控制实现激光强度稳定[J]. *中国光学*, 2014, 7(2): 234-

- [17] Du J J, Li W F, Li G, *et al.* Intensity noise suppression of light field by optoelectronic feedback [J]. *Optik-International Journal for Light and Electron Optics*, 2013, 124(18): 3443-3445.
- [18] Zhao R C, Fu X H, Sun J F, *et al.* High power

507.4 nm continuous laser generated by high efficient external cavity frequency doubling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2017, 44(7): 0701001.

赵儒臣, 付小虎, 孙剑芳, 等. 高效率外腔倍频产生大功率 507.4 nm 连续激光[J]. *中国激光*, 2017, 44(7): 0701001.