

# 用前馈控制方法提高连续紫外激光器的调谐性和稳定性

刘亢亢<sup>1,2</sup> 刘洪力<sup>1,2</sup> 赵儒臣<sup>1,2</sup> 付小虎<sup>1,2</sup> 徐震<sup>1\*</sup> 王育竹<sup>1,3</sup>

(<sup>1</sup> 中国科学院上海光学精密机械所中国科学院量子光学重点实验室, 中国科学院冷原子物理中心, 上海 201800)

<sup>2</sup> 中国科学院大学, 北京 100049; <sup>3</sup> 中国科学院上海高等研究院, 上海 201203

**摘要** 连续可调谐的紫外激光一般通过红外或可见激光进行外腔倍频获得, 然而倍频腔锁定电路的带宽限制了激光器的调谐性能。将前馈控制方法用于中性汞原子激光冷却的四倍频紫外激光器, 即在调谐基频激光频率的同时, 同步调节级联的两个倍频腔。这不仅降低了激光器频率调谐中引入的功率噪声, 还提高了紫外激光器的频率调谐范围, 使得紫外激光器的调谐能力得到大幅提高。通过汞原子的亚多普勒磁致双色光谱进行激光频率锁定, 发现前馈控制电路的应用能降低激光的频率噪声。在汞原子光谱和激光冷却实验中, 紫外激光的可调谐性和稳定性的提高将会带来很多优势。

**关键词** 激光器; 四倍频; 前馈控制方法; 中性汞原子; 激光冷却; 相对功率噪声

**中图分类号** O433 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.1202004

## Enhancement of Tunability and Stability of a Continuous-Wave Deep Ultraviolet Laser by Feed-Forward Control Method

Liu Kangkang<sup>1,2</sup> Liu Hongli<sup>1,2</sup> Zhao Ruchen<sup>1,2</sup> Fu Xiaohu<sup>1,2</sup> Xu Zhen<sup>1</sup> Wang Yuzhu<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory for Quantum Optics, Cold Atom Physics Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China

<sup>2</sup> University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

<sup>3</sup> Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201203, China

**Abstract** Continuous-wave tunable deep ultraviolet (UV) laser is commonly realized by extra-cavity frequency doubling of near infrared ray (NIR) or visible laser, but the bandwidth of cavity locking circuits limits the tunability of laser. A feed-forward control method is applied in the frequency quadrupled UV laser, which is used for laser cooling of neutral mercury atom; that is to say, synchronous adjustment two series frequency doubling cavity when tuning the frequency of fundamental laser. By this method, not only the power noise is induced by laser frequency tuning reduced, but also the frequency tuning range of the UV laser is enhanced. Hence, the tunability of UV laser is considerably increased. When the laser frequency on the Doppler-free dichroic locking spectroscopy of neutral mercury atom is locked, it is found that the laser frequency noise can be reduced by the application of feed-forward control circuit. The enhancement of the tunability and stability of UV laser provides a lot of advantages in the experiments of laser spectroscopy and laser cooling of mercury atom.

**Key words** lasers; frequency quadrupled; feed-forward control; neutral mercury atom; laser cooling; relative power noise

**OCIS codes** 140.3515; 140.3600; 140.3320

收稿日期: 2014-05-07; 收到修改稿日期: 2014-07-04

基金项目: 国家 973 计划(2011CB921504)、上海市科委基础研究重大项目(09DJ1400700)

作者简介: 刘亢亢(1987—), 男, 博士研究生, 主要从事汞原子冷却和光钟等方面的研究。E-mail: liukk@siom.ac.cn

导师简介: 王育竹(1932—), 男, 教授, 博士生导师, 中国科学院院士, 主要从事量子光钟和原子频标等方面的研究。

E-mail: yzwang@shnc.ac.cn

\* 通信联系人。E-mail: xuzhen@siom.ac.cn

本文电子版彩色效果请详见中国光学期刊网 www.opticsjournal.net

## 1 引言

随着激光技术和非线性光学的发展,紫外(UV)激光器在科学实验研究中有了广泛的应用<sup>[1-2]</sup>。特别在某些特定原子和离子气体的激光冷却实验中,需要对应原子跃迁波长的大功率窄线宽连续可调谐紫外激光器,如镱(Yb)原子的  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^1P_1$  跃迁为  $398.8\ \text{nm}$ <sup>[3]</sup>,汞(Hg)原子的  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_1$  跃迁为  $253.7\ \text{nm}$ <sup>[4]</sup>,镁(Mg)原子的  $3s^2\ ^1S_0 - 3s3p\ ^1P_1$  跃迁波长为  $285.2\ \text{nm}$ <sup>[5]</sup>,铟(In)离子的  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_1$  跃迁为  $230.6\ \text{nm}$ <sup>[6]</sup>。此外,作为原子频标的光频跃迁也需要紫外激光器,如铝(Al)离子的  $3s^2\ ^1S_0 - 3s3p\ ^3P_1$  跃迁为  $267.4\ \text{nm}$ <sup>[7]</sup>,Hg 离子的  $5d^{10}6s\ ^2S_{1/2} - 5d^9\ 6s^2\ D_{5/2}$  跃迁为  $281.6\ \text{nm}$ <sup>[8]</sup>,Hg 原子的  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_0$  跃迁为  $265.6\ \text{nm}$ <sup>[9]</sup>,In 离子的  $5s^2\ ^1S_0 - 5s5p\ ^3P_0$  跃迁为  $236.5\ \text{nm}$ <sup>[8]</sup>。目前技术成熟的连续窄线宽激光器大都在红外和可见光波段,要实现上述波长的激光就需要倍频或者四倍频。并且由于连续激光单次通过非线性晶体很难获得较高的倍频效率,通常需要采用环形腔做外腔倍频以提高倍频效率<sup>[10]</sup>。

外腔倍频的必要条件之一是倍频腔的纵模要和基频激光频率保持共振,因此要通过反馈控制保持倍频器的锁定<sup>[11]</sup>。倍频腔的锁定通常采用如下方法:通过 Pound-Drever-Hall (PDH) 方法<sup>[12]</sup> 或 Hänsch-Couillaud (HC) 方法<sup>[13]</sup> 获得误差信号,经伺服电路控制压电陶瓷(PZT)以改变腔长,使倍频腔的共振频率锁定在基频光频率上。但在原子分子光谱实验中常常需要对激光频率进行快速调谐,一般通过主动调谐基频光频率来实现,倍频腔则在锁定状态下被动跟随。在频率调谐的过程中,由于伺服电路带宽和 PZT 响应带宽的限制<sup>[14]</sup>,倍频腔的跟随能力也受到限制,因此会引起紫外激光的功率抖动,甚至倍频腔失锁,因此输出激光频率调谐的范围和速度受到限制,降低了激光器频率调谐的能力。本文对用于汞原子激光冷却的商品在四倍频激光器进行改进,采用前馈控制(FP)的方法使基频光频率和倍频腔的共振频率同步改变,从而克服了激光调谐过程中的倍频腔伺服电路的带宽限制,增强了调谐过程中紫外激光的稳定性,提高了激光器的调谐能力。

## 2 实验原理

前馈控制是指根据某些可预测可控制的扰动,提前对输出参量进行直接控制,以消除会出现的偏

差,达到抑制主要扰动的目的。前馈控制在可调谐激光技术中已有应用,例如在光栅反射式的外腔反馈半导体激光器中,通过 PZT 进行频率调谐时会引起外腔腔长和光栅面型的改变,导致内腔和外腔纵模不匹配而引起激光频率的跳变。采用前馈控制,在调节 PZT 电压的同时,改变激光二极管的电流,引起折射率的同步改变而改变内腔的光程,最终使内腔和外腔纵模同步改变,以增大激光调谐的不跳模范围<sup>[15]</sup>。

对于倍频紫外激光器,需要将倍频腔的谐振频率锁定在基频激光频率上,而伺服电路的带宽将限制激光器的调谐能力。若使用前馈控制电路给出一定比例的控制信号,使基频激光的频率和倍频腔的共振频率同步改变,就可以克服伺服电路的带宽限制,从而改善紫外激光的调谐能力。对于外腔反馈半导体二极管激光器,在小范围调谐情况下,其输出频率与频率调谐信号近似成线性关系<sup>[16]</sup>

$$\nu_1 = \nu_{01} + k_1 V_1, \quad (1)$$

式中  $\nu_{01}$  为频率初始值,  $V_1$  为调谐信号的电压,  $k_1$  为该激光器的线性调谐系数,与电路增益、PZT 特性和激光器腔型有关。对(1)式作微分,得到

$$d\nu_1 = k_1 \cdot dV_1, \quad (2)$$

式中  $dV_1$  为 PZT 控制电压的变化量,  $d\nu_1$  为基频激光的频率变化量。

对于倍频腔,针对相应的基频共振频率  $\nu_{02}$ , 倍频腔的共振频率与 PZT 控制电压也近似成线性关系

$$\nu_2 = \nu_{02} + k_2 V_2, \quad (3)$$

$$d\nu_2 = k_2 \cdot dV_2, \quad (4)$$

式中  $\nu_{02}$  为频率初始值,  $V_2$  为调谐信号的电压,  $k_2$  为该倍频腔的线性调谐系数,与电路增益、PZT 特性和倍频腔结构有关。  $dV_2$  为扫腔信号的变化,  $d\nu_2$  为频移。要满足前馈控制条件,需要使(2)式中基频激光频率的变化量和(4)式中倍频腔共振频率的变化量相等,因此可以得到  $dV_1$  与  $dV_2$  的关系

$$\frac{dV_1}{dV_2} = \frac{k_2}{k_1}. \quad (5)$$

对于第二个级联倍频腔,其谐振频率  $\nu_3$  为基频激光的频率  $\nu_1$  的两倍。与第一个倍频腔类似,倍频腔的共振频率与 PZT 控制电压也近似成线性关系:

$$\nu_3 = \nu_{03} + k_3 V_3, \quad (6)$$

$$d\nu_3 = k_3 \cdot dV_3. \quad (7)$$

其参数定义可类比于第一个倍频腔,但谐振频率为基频的两倍。类似(5)式,要满足前馈控制条件,需要使(7)式倍频腔共振频率的变化量等于(2)式基频

激光频率的变化量的 2 倍,即  $d\nu_3 = 2d\nu_1$ , 因此可以得到

$$\frac{dV_1}{dV_3} = \frac{k_3}{2k_1}. \quad (8)$$

通过上面的讨论,只需要通过实验测量相应的系数  $k_1$ 、 $k_2$  和  $k_3$ , 就可以确定前馈控制电路的增益, 从而实现紫外激光器调谐中的频率同步。

### 3 实验装置

实验系统如图 1 所示。选用 Toptica 公司的 TA-FHG pro-1020 型紫外激光器, 该激光器由外腔反馈半导体激光器(DL)、锥形放大器(TA)、倍频腔(SHG)、二次倍频腔(FHG)四部分组成。1014.8 nm的外腔反馈半导体激光器产生约 23 mW 的基频种子激光; 锥形放大器将种子激光放大到约 720 mW 的基频激光; 内置 LBO 晶体的倍频腔(SHG)将基频激光倍频后得到约 290 mW 的 507.4 nm绿色激光; 内置 BBO 晶体的二次倍频腔(FHG)再次倍频后得到约 30 mW 的 253.7 nm 连续可调谐紫外激光<sup>[9]</sup>。基频激光的频率由 DL 上调节光栅的 PZT 来控制, SHG 和 FHG 的谐振频率由调节腔镜的 PZT 来控制。激光器的控制器(LC)提供了相应的输入端口来控制 DL 和 SHG、FHG。探测倍频腔的 PDH 信号并通过比例积分微分(PID)伺服控制器, 可以将倍频腔的谐振频率锁定到基频激光频率上。输出的紫外激光经分束器(BS)分束, 其中一路约 10% 的紫外激光经过汞原子吸收池进行光谱探测, 通过探测汞原子气体的  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_1$  跃迁的亚多普勒磁致双色光谱(DFDL)产生鉴频信号<sup>[17-18]</sup>, 鉴频信号经过伺服控制器和前馈控制电路的处理, 产生 DL、SHG 和 FHG 的控制信号, 从而实现激光频率的锁定。需要进行激光频率调谐时, 用信号发

生器来产生频率调谐信号, 通过伺服控制器和前馈控制电路, 产生 DL、SHG 和 FHG 的控制信号, 对激光频率进行调谐。另一路紫外激光经衰减后由一个光电管(PD)(滨松公司的 S1336)接收, 转化为电信号, 来测量激光功率及其噪声。

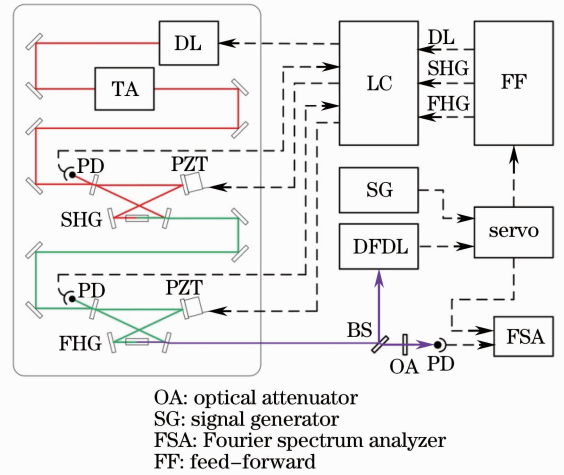


图 1 实验系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experimental setup

前馈控制电路的结构如图 2 所示。其中, MI 和 DI 端口为输入端口, 均可用来控制激光频率, 不同的是后者可以通过声光调制器的调频端口(FM)来同时控制声光调制移频光路的频移量<sup>[19]</sup>。这里仅使用 MI 端口。输入信号经过衰减器和加法器后分为三路, 经不同的增益得到同步变化的 DL、SHG 和 FHG 控制信号。在实验中, 选择让这些端口与对应的激光器控制器端口部分连接或者全部连接: 1) 如果三者均相连, 则两个倍频腔同时受前馈控制电路控制(with FF); 2) 如果只连接 DL, 则两个倍频腔不受前馈控制电路控制(without FF)。通过这两种连接方式下的实验结果之间的对比, 可以评估前馈控制电路的作用。

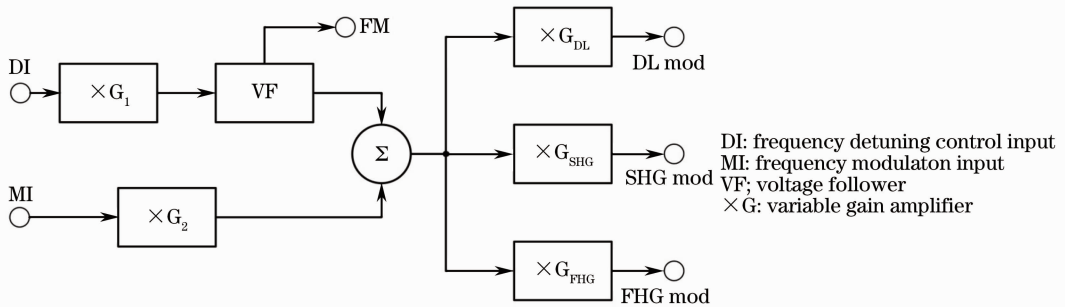


图 2 前馈控制电路结构示意图

Fig. 2 Diagram of feed-forward control circuit

实验中,采用三种方法测试前馈控制方法对紫外激光器的影响。1) 进行频率调谐时,测量紫外激光的功率噪声。测量方法有两种:直接用示波器显示;或使用频谱分析仪测量相对功率噪声(RIN)。2) 在不同的调谐频率下,测量激光器的最大频率调谐范围,以调谐时倍频腔不失锁为准。3) 测量激光器频率锁定后的频率噪声。其中,功率噪声和频率噪声均采用 SRS 公司的 SR770 傅立叶频谱分析仪(FSA)进行测量。激光的功率噪声由光电管直接探测衰减后的激光功率输入到 FSA 后进行测量。激光的频率噪声通过汞原子的紫外跃迁的 DFDL 光谱来获得。由于 DFDL 光谱的幅值与激光频率失谐近似成线性关系,因此光谱信号可以作为激光频率测量的信号。实验中,紫外激光通过 DFDL 光谱锁定在汞原子的  $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_1$  跃迁上,通过测量 DFDL 光谱信号(即稳频伺服控制器的误差信号)的噪声谱,就可以获得紫外激光的频率噪声谱<sup>[20]</sup>。

#### 4 实验结果和分析

首先测量了激光器自由运转状态下四倍频激光器 4 个部分(DL/TA/SHG/FHG)激光的相对功率噪声谱,如图 3 所示。可以看出经过倍频器以后,激光的功率噪声明显增大。比较 4 个部分激光的相对功率噪声可以得到,TA 放大后激光的噪声与 DL 输出激光的噪声几乎没有差别,而 SHG 输出激光的噪声在低频段( $<100\ \text{Hz}$ )增加了约 20 dB,在中频段( $100\ \text{Hz} \sim 10\ \text{kHz}$ )和高频段( $>10\ \text{kHz}$ )增加了约 40 dB。而 FHG 输出激光的噪声在此基础上又有一定增加。因此,倍频器带来了明显的功率噪声,特别在 100 Hz 以上更为明显,这主要归因于倍频器的伺服带宽限制。

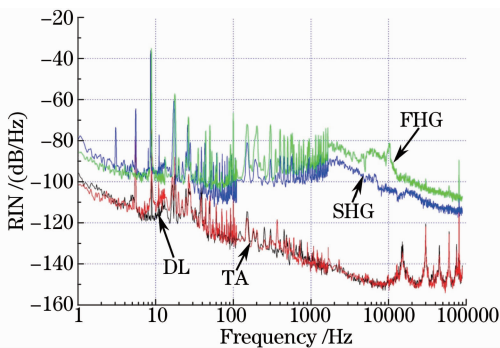


图 3 四倍频紫外激光器 4 个部分激光输出的相对功率噪声谱

Fig. 3 Relative intensity noise spectra of four laser outputs of frequency quadrupled UV laser

其次测量了进行激光频率调谐时的紫外激光功率噪声。通过示波器采样,对比了有前馈控制和无前馈控制两种情况下的激光功率相对起伏,如图 4 所示,激光器的调制频率为 65 Hz,调制幅度依次为 10、20、50、100 MHz。图中选用激光功率涨落对平均功率的百分比来表征激光功率相对起伏,以方便进行对比,因此纵坐标只有相对的意义。在较低的调制幅度(10 MHz)下紫外激光的功率没有明显的涨落,在较高的调制幅度(100 MHz)下紫外激光的功率出现明显的周期性涨落,而加入前馈控制则明显抑制了激光功率的涨落。同样,在其他的调制频率下进行了测量,发现在调制幅度不变的情况下,调制频率越高涨落越明显。加入前馈控制后,激光功率的涨落均受到明显的抑制。

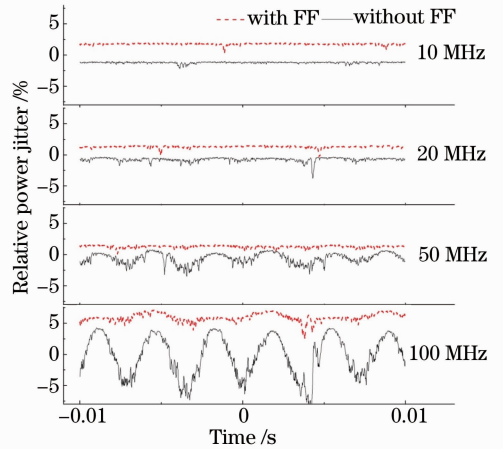


图 4 不同频率调制深度下激光输出功率的相对起伏  
Fig. 4 Relative power jitters of laser with different frequency modulation depths

另一种更为直观的比较方式是在频率调制情况下测量相对功率噪声谱,如图 5 所示。其中,对有频率调制的相对功率噪声谱,调制频率为 65 Hz,调制幅度为 100 MHz。从图 5 中可以看到,有激光频率调制情况下在 65 Hz 处出现了一个很高的尖峰,说明激光的频率调制引入了很大的噪声。在 15 Hz 和 140 Hz 的调制频率下,存在类似结果,即在调制频率处引入了额外的噪声,因此接下来只测量调制频率附近的噪声变化。图 6 比较了不同调制频率下三种连接模式下的相对功率噪声谱。除了有无前馈控制这两种情况之外,还增加了一种连接方式,即仅对 SHG 做前馈控制而不对 FHG 做前馈控制。从图中可以看到,在没有前馈控制的情况下,调制频率越高,噪声幅度越大。而通过前馈控制可以让频率调制引入的噪声大幅降低,在 15 Hz 调制频率情况下降低约 20 dB,调制引起的功率噪声几乎完全被抑

制;在 65 Hz 和 140 Hz 的频率调制下,功率噪声降低了 15 dB 以上,但调制噪声并不能被完全抑制。比较有趣的是,在图 6 (a)、(b) 中可以看到仅对 SHG 做前馈控制和无前馈控制时的曲线基本完全重合,这说明仅对 SHG 前馈控制并不能有效抑制噪声。而在较高的调制频率[图 6(c)]下,即使仅对 SHG 进行前馈控制也可以起到较弱的噪声抑制的作用。这是因为在经过两个级联的倍频器时,噪声是会累积的。对于低频的激光频率调制,SHG 的伺服电路还可以勉强跟随,噪声主要来源于 FHG。但随着频率升高,SHG 的伺服电路的跟随能力已经减弱了,最终体现在紫外激光的噪声里面。

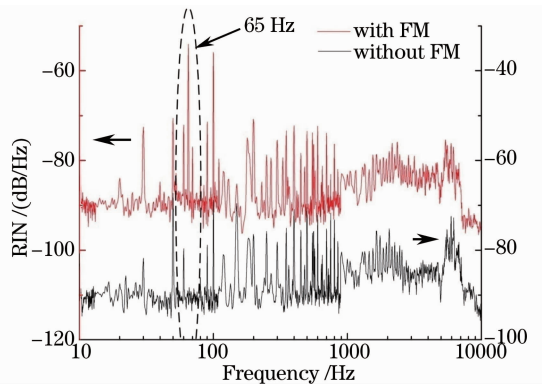


图 5 在 65 Hz 频率调制下和无调制情况下激光功率噪声的对比

Fig. 5 Comparison of laser power noises with and without 65 Hz frequency modulation

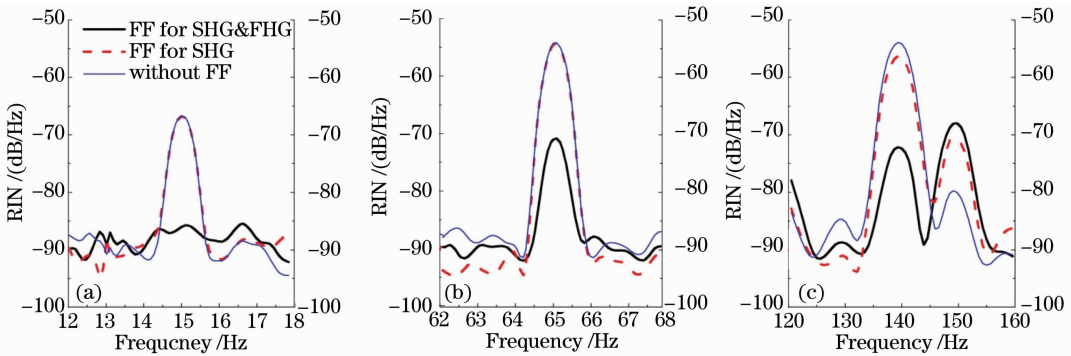


图 6 不同调制频率下 3 种连接模式的相对功率噪声谱。(a) 调制频率为 15 Hz; (b) 调制频率为 65 Hz;

(c) 调制频率为 140 Hz 且 150 Hz 处的噪声是市电频率谐波噪声

Fig. 6 Relative intensity noise spectra with different modulation frequencies under three connection modes. (a) Modulation frequency is 15 Hz; (b) modulation frequency is 65 Hz; (c) modulation frequency is 140 Hz, and peaks at 150 Hz is harmonic noise of mains frequency

测量了不同调谐频率下前馈控制对紫外激光器最大调谐范围的影响,如表 1 所示。发现采用前馈控制后,激光器的最大调制幅度分别增大了约 5 倍(15 Hz 调制)、8 倍(65 Hz 调制)和 12 倍(140 Hz 调制)。在 15 Hz 频率下频率可调谐范围达到了激光器 DL 所限制的最大值(对于 DL 基频光约 30 GHz)。出乎意料的是,有前馈控制的 140 Hz 调谐频率下的激光频率调谐范围,比在没有前馈控制的 15 Hz 调谐频率下的激光频率调谐范围更大。因此应用前馈控制,可以同时加快激光调谐的速率,并增大激光调谐的范围。另一方面,发现即使采用了前馈控制,随着调谐频率的升高,紫外激光器的最大可调谐范围还是会逐渐减小。理论上,压电陶瓷响应带宽为 1~10 kHz,前馈控制电路的带宽也在

100 kHz 以上,原则上前馈控制可以完全消除倍频腔跟随的延迟。但根据实验测量,仅在 140 Hz 的频率下,紫外激光器的最大可调谐范围就已经减小到了 34 GHz,分析认为这是系统中的非线性因素造成的。因为在前馈控制原理中假设激光的频率和电压控制信号是成线性关系的,而真实情况上却并不是完美的线性。例如基频激光的频率和 DL 激光器的控制电压之间存在一定的非线性关系<sup>[20]</sup>,而倍频腔的谐振频率和它的控制电压之间也存在一定的非线性关系等等。这些非线性关系导致了误差信号的不完全可预测性,因此前馈控制无法完全消除主误差。在较高的调制频率和较大的调制范围下,过大的误差信号使得倍频腔的伺服电路无法跟随,从而限制了激光调谐能力的进一步提高。

表 1 紫外激光在不同调谐频率下的最大频率调谐范围

Table 1 Maximal frequency tuning range of UV laser with different modulation frequencies

$f_{FM}$	15 Hz	65 Hz	140 Hz
without FF	25 GHz	5.3 GHz	2.4 GHz
with FF	130 GHz	49 GHz	34 GHz

在激光冷却的实验中,激光稳频之后的频率噪声是一个非常重要的参量。在实验中,通过<sup>202</sup>Hg的 $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_1$ 跃迁的DFDL信号进行激光稳频<sup>[21]</sup>,用频率锁定点附近的光谱信号来测量激光器的频率噪声。<sup>202</sup>Hg的 $6s^2\ ^1S_0 - 6s6p\ ^3P_1$ 跃迁的DFDL信号如图7中的插图所示,该光谱的信号幅值大,信噪比很好,在锁定点附近的光谱信号近似为线性,经拟合后其斜率约为8.17 mV/MHz。通过FSA测量光谱信号的功率谱密度,即可以换算为紫外激光的频率噪声,如图7所示。在低频段(小于100 Hz),前馈控制电路对噪声的抑制较小;在中频段(100 Hz~10 kHz),前馈控制电路对噪声的抑制较大,从10 dB到20 dB不等,频率噪声幅值有明显的降低;更高频段(大于10 kHz)的噪声不能得到有效抑制,主要来源于信号处理电路和FSA本身的电路噪声,其频率已经超出PZT的响应速度,可以忽略其影响。中频段的噪声抑制原因是,由于倍频腔的伺服电路带宽限制,不能覆盖到中频段,导致稳频伺服电路也不能控制该频段的噪声,而引入前馈控制电路则可以使得稳频伺服电路能够覆盖到这个频

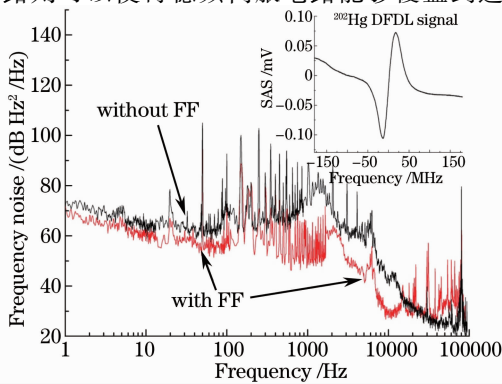


图 7 激光器在前馈控制下和没有前馈控制下稳频之后的频率噪声谱对比。右上角小图是用来激光频率锁定的<sup>202</sup>Hg原子的DFDL谱线

Fig. 7 Frequency noise comparison of frequency stabilized UV laser with or without feed-forward. The upper right inset shows the DFDL spectroscopy of <sup>202</sup>Hg atom, which is used for laser frequency locking

段,从而有效抑制该频段的噪声。因此,采用前馈控制在激光锁频中有效抑制紫外激光的频率噪声,压窄激光的线宽。

## 5 结 论

在冷原子物理实验中,激光频率调谐过程中激光功率和频率的稳定性对实验有着非常重要的影响。倍频紫外激光器由于倍频腔的伺服控制带宽限制,在频率调谐过程中引入相当大的功率噪声。对倍频激光器增加前馈控制,可以克服伺服控制带宽的限制,大大降低由此带来的噪声。通过对用于汞原子激光冷却的253.7 nm紫外光四倍频激光器进行前馈控制,使得外部频率调制引起的激光功率噪声明显降低,激光器的最大调谐范围和调谐速率均有大幅提高,显著提高了紫外激光的稳定性和调谐能力。用汞原子光谱锁定后的紫外激光的频率噪声也有显著降低,其频率噪声在中频段(100 Hz~10 kHz)有10~20 dB的抑制。通过这些改进,紫外激光器的性能获得大幅的提高,对于下一步进行汞原子的激光冷却实验有很重要的意义。

## 参 考 文 献

- 1 D L Elliott. Ultraviolet Laser Technology and Applications[M]. United States: Academic Press, 1995.
- 2 W W Duley. UV Lasers: Effects and Applications in Materials Science[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- 3 T Kuwamoto, K Honda, Y Takahashi, *et al.* Magneto-optical trapping of Yb atoms using an intercombination transition[J]. Phys Rev A, 1999, 60(2): R745-R748.
- 4 P Villwock, S Siol, Th Walther. Magneto-optical trapping of neutral mercury[J]. Eur Phys J D, 2011, 65(1-2): 251-255.
- 5 F Y Loo, A Bruschi, S Sauge, *et al.* Investigations of a two-level atom in a magneto-optical trap using magnesium[J]. J Opt B: Quantum Semiclass Opt, 2004, 6(1): 81-85.
- 6 M Eichenseer, A Y Nevsky, Ch Schwedes. Towards an indium single-ion optical frequency standard[J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2003, 36(3): 553-557.
- 7 C W Chou, D B Hume, J C J Koelemeij, *et al.* Frequency comparison of two high-accuracy Al<sup>+</sup> optical clocks[J]. Phys Rev Lett, 2010, 104(7): 070802.
- 8 J L Hall, J Ye. Optical frequency standards and measurement [J]. IEEE Trans Instrum Meas, 2003, 52(2): 227-231.
- 9 Liu Hongli. Study of Laser Spectroscopy and Laser Cooling of Neutral Mercury Atoms[D]. Shanghai: Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2013. 29-30.
- 10 刘洪力. 中性汞原子的激光光谱与激光冷却的研究[D]. 上海: 中国科学院上海光学精密机械研究所, 2013. 29-30.
- 11 G S He, S H Liu. Physics of Nonlinear Optics[M]. Singapore: World Scientific, 2003.
- 12 Sun Guixia, Liu Tao, Qian Jinning, *et al.* Tunable all-solid-state continuous wave intra-cavity frequency-doubled Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 671 nm ring laser[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(6): 0602011.

- 孙桂侠, 刘涛, 钱金宁, 等. 可调谐全固态 Nd:YVO<sub>4</sub>/LBO 倍频连续 671 nm 环形激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(6): 0602011.
- 12 E D Black. An introduction to Pound-Drever-Hall laser frequency stabilization[J]. Am J Phys, 2001, 69(1): 79–87.
- 13 M Vainio, J E Bernard, L Marmet. Cavity-enhanced optical frequency doubler based on transmission-mode Hansch-Couillaud locking[J]. Appl Phys B, 2011, 104(4): 897–908.
- 14 E K Sittig. Transmission parameters of thickness-driven piezoelectric transducers arranged in multilayer configurations [J]. IEEE Trans Sonics Ultrason, 1967, SU-14: 167–174.
- 15 L S Fock, R S Tucker. Simultaneous reduction of intensity noise and distortion in semiconductor lasers by feedforward compensation[J]. Electron Lett, 1991, 27(14): 1297–1299.
- 16 Wu Ying, Chen Dijun, Sun Yanguang, *et al.*. Research on optical chirp linearization technique of semiconductor lasers by an optoelectronic feedback loop[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902001.
- 吴映, 陈迪俊, 孙延光, 等. 半导体激光器光电负反馈线性调频技术研究[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902001.
- 17 T Petelski, M Fattori, G Lampoiesi, *et al.*. Doppler-free spectroscopy using magnetically induced dichroism of atomic vapor: A new scheme for laser frequency locking[J]. Eur Phys J D, 2003, 22(2): 279–283.
- 18 Shiqi Yin, Hongli Liu, Jun Qian, *et al.*. Observation and optimization of DAVLL spectra on the <sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub> transition of neutral mercury atom[J]. Opt Commun, 2012, 285(24): 5169–5174.
- 19 Liu Hongli, Qian Jun, Xu Zhen, *et al.*. A frequency tuning and locking system of a deep UV laser for laser cooling of mercury atoms[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(9): 0902005.
- 刘洪力, 钱军, 徐震, 等. 用于汞原子激光冷却的深紫外激光调谐和锁频系统[J]. 中国激光, 2013, 40(9): 0902005.
- 20 J P Toomey, D M Kane, M W Lee, *et al.*. Nonlinear dynamics of semiconductor lasers with feedback and modulation[J]. Opt Express, 2010, 18(16): 16955–16972.
- 21 Hongli Liu, Shiqi Yin, Qian Jun, *et al.*. Optimization of Doppler-free magnetically induced dichroic locking spectroscopy on the <sup>1</sup>S<sub>0</sub>-<sup>3</sup>P<sub>1</sub> transition of a neutral mercury atom[J]. J Phys B: At Mol Opt Phys, 2013, 46(8): 085005.

栏目编辑: 张雁