

## 二次谐波产生的光学倍频腔自锁定系统

伍 越, 陈国柱, 沈 咏, 刘 曲, 邹宏新

(国防科学技术大学 理学院 物理系, 湖南 长沙 410073)

**摘 要:** 二次谐波产生技术能有效扩展现有的激光波段, 被广泛应用于原子分子物理、光物理、生物医学等多个领域。倍频腔的长期锁定是倍频技术中的一项关键技术, 它直接关系到输出激光的功率稳定性和可靠性, 目前的商用二次谐波产生激光器都会存在不同程度上的失锁状态。提出了一种基于积分扫描来实现连续激光倍频器自锁定的方案, 能在没有人为调节的情况下连续工作, 不需要额外的功率监测和扫描信号, 失锁后可自动恢复锁定, 最终实现了长期稳定的二次谐波产生激光输出。

**关键词:** 二次谐波产生; Hansch-Couillaud 方法; 积分扫描; 自动锁定

**中图分类号:** TN911.8 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201645.0606002

## Optical frequency doubling cavity automatic locking system for second harmonic generation

Wu Yue, Chen Guozhu, Shen Yong, Liu Qu, Zou Hongxin

(Department of Physics, College of Science, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

**Abstract:** The second harmonic generation (SHG) technique can effectively extend the existing laser wavelengths range. It is widely applied in atomic, molecular physics and optical physics, biomedicine and other fields. Long-term stable locking of the optical frequency doubling cavity is a significant technology for the continuous wave frequency doubling technique, which is directly related to the laser output power stability and reliability. At present, the commercial SHG lasers have off-locking phenomena at different level. In this paper, an automatic locking scheme based on analog integral scanning technique was proposed. With this technique, the system could continuously work in the absence of artificial regulation, and no additional power monitoring and scanning signals were required. The system could automatically restore the locking state after it is out of locking. As a result, the long term and stable SHG laser output is obtained.

**Key words:** second harmonic generation; Hansch-Couillaud method; integral scanning; automatic locking

收稿日期: 2015-10-24; 修订日期: 2015-11-27

基金项目: 国家自然科学基金(91436103, 11204374)

作者简介: 伍越(1992-), 男, 硕士生, 主要从事量子光学和激光技术等方面的研究。Email: yuerfighting@gmail.com

导师简介: 邹宏新(1979-), 男, 副教授, 博士, 主要从事激光技术、量子信息和原子物理等方面的研究。Email: hxzou@nudt.edu.cn

## 0 引言

窄线宽高稳定连续激光在光学频率标准、精密光谱、冷原子(分子)等研究领域有着广泛的应用<sup>[1-5]</sup>。但很多实验系统需要的激光波长现有激光器无法直接产生,因此需要采用非线性频率变换的方式,其中最常用的就是倍频技术<sup>[6-8]</sup>。对于连续光,为了提高倍频效率,通常需要基频光在光学谐振腔内共振增强。然而基频光频率和光学谐振腔的长度都会在外界扰动下发生改变,这些环境因素会导致系统失锁,使非线性频率变换不能顺利进行<sup>[9]</sup>。为了实现高稳定的连续倍频激光输出,一方面要保证基频光足够稳定,另一方面也需要倍频腔能保持长期锁定状态,即使脱锁也能迅速恢复。

如果以基频光作为参考基准,则腔模频率与基频光之间的偏差将会产生误差信号,通过外部伺服电路处理形成反馈纠偏电压,加载到光学谐振腔的压电陶瓷或电光调制器等光学相位控制元件上改变腔模,达到锁相或稳频的目的,这样的控制回路就构成了基本的光学锁相环,其重点在于伺服电路的设计。传统的锁相环电路通常利用了模拟电路积分器的动态跟踪能力,使腔模与基频光之间频率保持一致<sup>[10]</sup>。但积分器在外界扰动下容易达到饱和状态,导致失锁,通常需要人为控制积分器放电实现重新锁定。为了解决这个问题,目前一种比较通用的做法是在控制电路中增加一个三角波(正弦波)扫描环节和失锁判断环节,一旦失锁就周期性扫描腔长重新寻找共振点,达到自动锁定的目的。随着数字处理器的大规模普及,基于可编程逻辑器件(FPGA)<sup>[11-12]</sup>和嵌入式微处理器<sup>[13]</sup>等的数字电路也被应用于光学锁相环系统。但受到电子学噪声、模数转换精度以及处理速度的限制,相对于传统的模拟伺服系统,数字锁相环在控制范围和锁定精度方面仍然存在不足<sup>[13]</sup>。

文中基于 532 nm 连续激光倍频产生 266 nm 激光的实验系统,提出了一种基于积分扫描的腔长自动锁定方案,以达到倍频腔失锁后能自动恢复的目的。在这个方案中,通过提取控制电路内部信号取代通常采用的输出激光强度作为失锁判据,用积分信号取代常用的额外三角波信号进行失锁扫描,这不仅简化了电路结构,而且避免了额外信号源引入

的干扰和噪声,改善了倍频系统的锁定性能。实验结果表明,这种锁定方案确实可行,而且有良好的锁定效果。

## 1 实验方案

如何获取高信噪比、稳定的误差信号是整个光学锁定系统的关键之一。Pound-Dever-Hall(PDH)方法<sup>[14]</sup>是一种被广泛采用的技术,它通过对基频激光进行相位调制后与外腔相互作用,将输入耦合镜的反射信号或输出镜的透射信号进行解调后取色散信号作为误差信号。这种方法虽然有良好的锁定性能,但是会引入额外的相位调制,增加了系统复杂性,且不利于一些特殊应用环境。另一种获得误差信号的典型方法是通过光学谐振腔对激光偏振态的选择特性来获得腔模的色散信号,形成纠偏电压,被称为 Hansch-Couillaud(H-C)方法<sup>[15-16]</sup>。这种稳频技术由于光路简单,无需额外调制,而且容易获得高信噪比的误差信号,因此被广泛应用于腔内频率变换过程。

实验中采用 H-C 方案对倍频腔进行锁定<sup>[17]</sup>。如图 1 所示,采用 532 nm 连续激光作为泵浦光(山西大学宇光公司生产),通过一个半波片和一个偏振分束棱镜控制入射光功率,同时保证其为水平偏振。之后经过两个透镜进行模式匹配,使基频光的束腰位于腔镜 M1 和 M2 中间,大小为 75 μm。系统采用一体化的倍频腔结构,四个腔镜调节架固定在封闭的腔体上,这样有效降低了腔镜对外界环境扰动的敏感度。倍频腔镜 M1 和 M2 是平面镜;M3 和 M4 是平

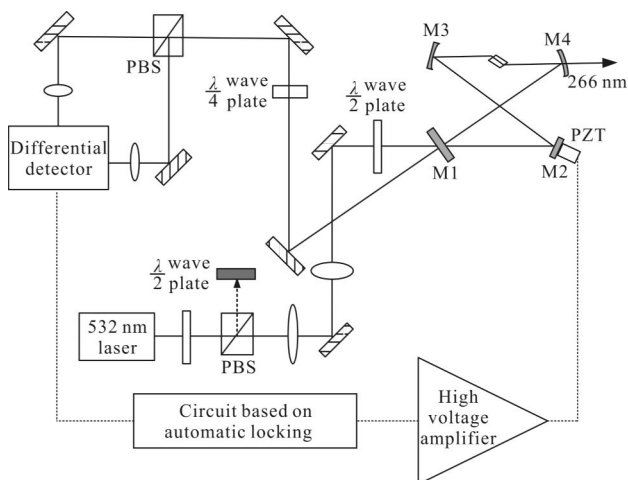


图 1 H-C 稳频实验装置

Fig. 1 H-C frequency stabilization system setup

凹球面镜, 曲率半径  $R_1=R_2=50$  mm。腔镜 M1 为输入耦合镜, 透射率为 2.3%, 其余三个腔镜均对 532 nm 高反, 反射率大于 99.9%。倍频过程采用 BBO 晶体的 I 类相位匹配, 晶体的相位匹配角  $\theta=47.6^\circ$ 。BBO 晶体尺寸 3 mm×3 mm×7 mm, 其端面采用布鲁斯特角切割, 这样只有水平偏振的基频光能够透过晶体, 以满足 H-C 锁定方案的条件。

倍频腔前的半波片用于微调基频光的偏振方向, 基频光入射到耦合镜 M1 上, 其反射信号经过一个四分之一波片和分束棱镜后分成两束进入一个自制的差分探测器中进行光强探测。由于基频光平行分量的相位变化正比于腔模线型的色散, 因此通过检测反射光合成偏振态的变化即可获得纠偏信号(误差信号)。让探测器产生的误差信号通过自行设计的模拟控制电路和高压放大后去驱动倍频腔镜上的压电陶瓷, 达到锁腔的目的。

在实际系统中, 由于外界环境的突变或长期单向漂移会引起系统失锁, 比如机械振动、气流变化、温漂等<sup>[10]</sup>。这些因素导致系统失锁的直接原因是锁定电路超过了其最大输出能力。文中的重点就是针对这个问题提出了一种新型的失锁自动恢复方案, 实现了倍频激光的长期稳定输出。

## 2 稳频电路的设计与实现

稳频控制电路的设计是整个锁定系统的关键。这里, 采用模拟电路设计了基于 PI 调节的倍频腔自动锁定系统, 主要包括模拟 PI 电路和自锁定控制电路, 系统方框图如图 2 所示。模拟 PI 电路由积分器、偏置调节电路、放大电路等组成, 用于对误差信号进行 PI 调节得到压电陶瓷相位控制信号; 自锁定控制电路是整个电路的核心, 由绝对值运算电路、电压跟随器电路、滞回比较器电路和反向放大电路组成, 如图 3 所示, 用于实现模拟 PI 自锁定控制。图中的锁定/扫描开关用于在锁定和扫描功能之间切换, 外接三角波发生器为系统提供扫描信号, 主要用于初期调节光路, 锁定后即可断开。

在倍频腔失锁的情况下, 积分电容往往达到饱和状态, 故积分电容上的电压信号(即模拟 PI 电路的输出信号)可作为倍频腔失锁的判断依据。由此, 设计的稳频电路优势在于通过提取电路内部信号判

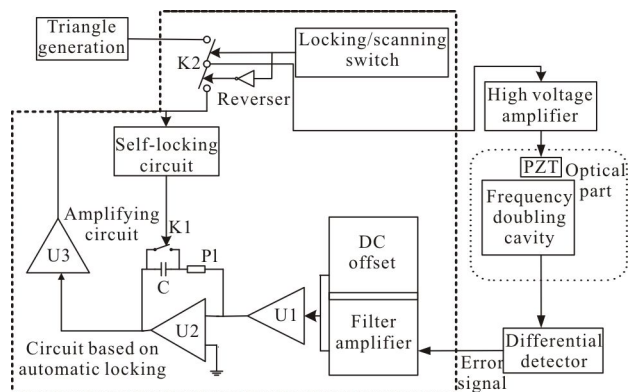


图 2 自锁系统方案图

Fig.2 Automatic locking system schematic

断倍频腔是否失锁, 不需要附加额外探测器, 能有效简化系统复杂性, 提高系统的抗干扰能力。在系统失锁后自锁定控制模块能够对模拟 PI 电路中的积分电容 C 进行放电, 重新开始积分扫描并锁定, 无需人为操作。

图 2 所示的稳频电路工作流程分为三步: 首先, 拨动锁定/扫描开关处于扫描状态, 则开关 K2 连接三角波发生器, 通过外部的高压放大单元放大之后, 加在压电陶瓷上, 进行腔长扫描, 便于对光学部分进行优化。随后, 拨动锁定/扫描开关处于锁腔状态, 开关 K2 连接 PI 调节输出, 同时积分电容 C 开始充电, 输出类似斜波的积分上升或下降曲线, 经过高压放大后驱动压电陶瓷寻找共振点, 并开始进行反馈控制; 最后, 自锁定控制模块实时采集 U3 输出的控制电压信号, 一旦外部扰动过大导致积分电压达到阈值(这里设置为  $\pm 14$  V), 自锁定电路将控制开关 K1 闭合对积分电容 C 进行放电, 当积分电容 C 充分放电达到阈值 0 V 左右时, 控制开关 K1 断开, 积分电容 C 开始重新充电, 实现自动锁定。

自锁定控制电路如图 3 所示, 其主要功能是在模拟 PI 输出信号超过阈值时, 输出高电平使 K1 处于导通状态, 当 PI 输出信号降到 0 V 附近时, 输出低电平使 K1 处于断开状态。电阻 R01、R02、R03、R04、运算放大器 1 和二极管 D01、D02 构成了绝对值运算电路; 运算放大器 2 构成了电压跟随器电路, 使信号取绝对值之后还能具有良好的带负载能力; 电阻 R05、R06、R07、R08、滑动变阻器 VR、运算放大器 3 和二极管 D03、D04 构成了滞回比较器电路, 能使积分电容充分放电, 重新积分; 电阻 R09、R10、

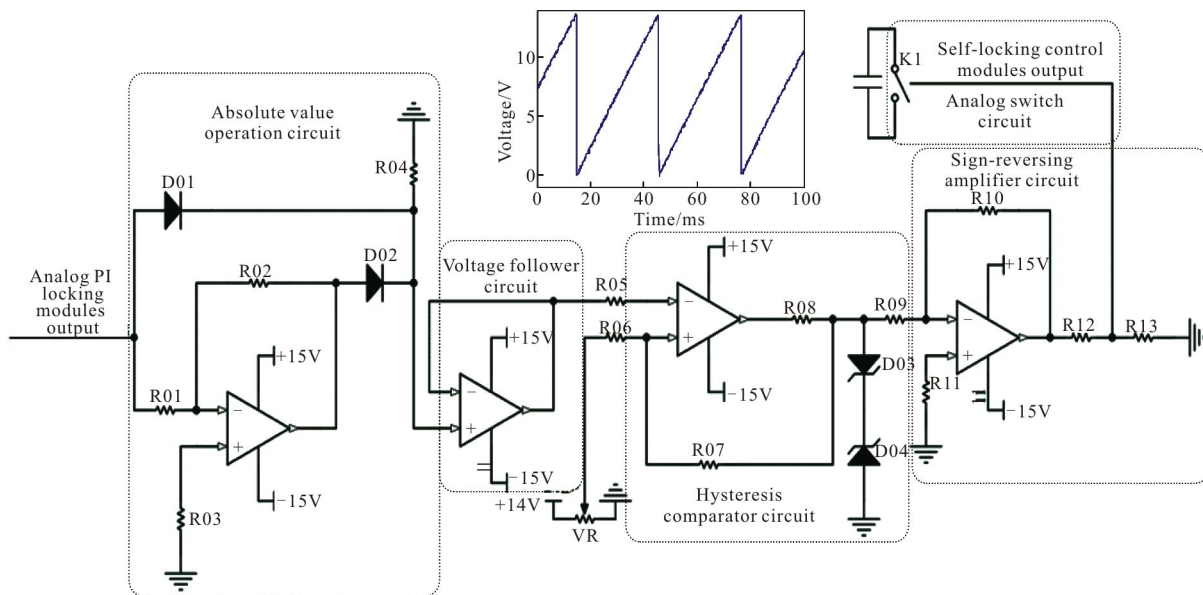


图 3 自锁定控制模块电路图

Fig.3 Self-locking control modules circuit diagram

R11、R12、R13 和运算放大器 4 构成了反向放大器电路，以实现正确逻辑驱动模拟开关电路对积分电容进行充放电控制。图 3 中小图显示了 PI 调节电容在自锁定控制模块控制下自动积分-放电的过程，图中电容正向积分，当达到积分阈值(14 V)时，模拟开关电路控制积分电容迅速放电达到 0 附近，此时逻辑翻转模拟开关断开，电容重新积分；反之电容负向积分，当达到积分阈值(-14 V)时，模拟开关电路也控制积分电容迅速放电，如此反复，完成不需要人为恢复的自动锁定控制。

### 3 锁定结果

在进行腔长扫描时，通过优化光路，观察鉴频曲线和透射峰，如图 4 所示。图 4(a)为扫描腔长时相应的透射信号，锁定的最理想结果是把信号锁在共振峰的最高点；而鉴频曲线需要消除直流部分的影响，可通过调节输入直流偏置来实现，如图 4(b)所示，鉴频曲线在零点附近波动。

优化光路，得到较理想的误差信号后就可以对系统进行锁定。图 5 显示了锁定-失锁-入锁的整个控制过程，通过对比图 4(a)的透射信号可以看出锁定后的输出信号被锁在了共振峰的最高点，观察透射信号的交流噪声，峰峰值不超过 10 mV。图中失锁过程是人为遮光操作导致，实验中腔失锁后自搜索

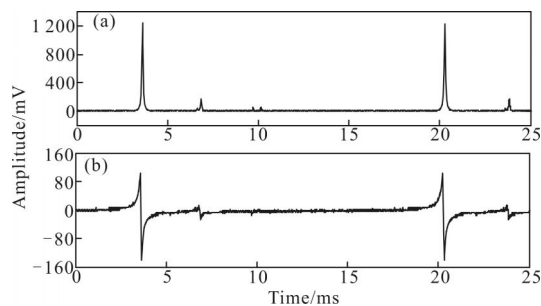


图 4 扫描腔长时反射的透射峰信号(a)及相应的鉴频曲线(b)

Fig.4 Reflected transmission peak(a) and frequency-discrimination curve(b) of the cavity while sweeping the cavity length

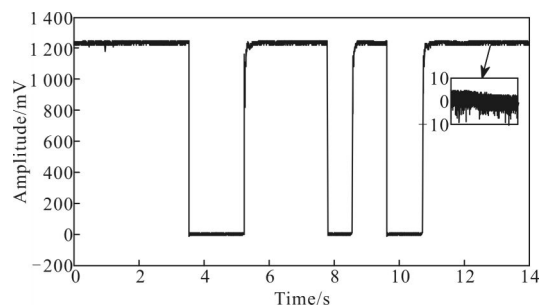


图 5 系统锁定-失锁-入锁过程中直流监视信号

Fig.5 Reflected DC monitor signal when the system varies from locking to out of locking and finally to relocking

过程一般不会超过 4 s，单次锁定时间超过 30 min。

锁定后 266 nm 激光输出功率与基频 532 nm 激光的功率关系如图 6 所示。在 1 W 基频光输入时可获得 150 mW 的倍频输出，在 2 W 输入时可获得

超过 340 mW 的 266 nm 紫外激光输出。但在高功率下,由于 BBO 晶体中的光折变效应,输出的 266 nm 激光很难长期运行。为了保证锁定数据的可靠性,后面的测试结果都是在低功率下 (300 mW 输入时)获得的。

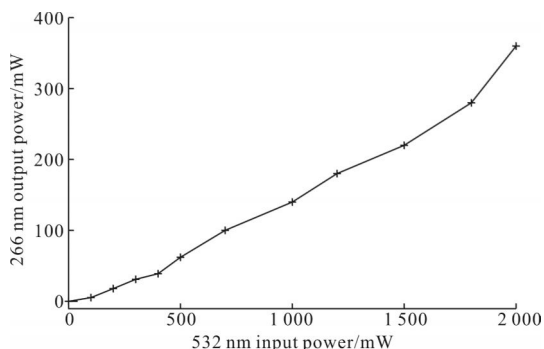


图 6 输出 266 nm 激光功率与输入 532 nm 激光功率的关系  
Fig.6 266 nm laser output power as a function of 532 nm laser input power

通过优化电路参数,在短时间内对倍频腔输入、输出功率起伏进行了测量。在对测量结果进行归一

化处理,时域中的功率起伏如图 7(a)和(b)所示。利用标准差公式:

$$\Delta P_{\delta} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}{n-1}} \quad (1)$$

式中: $\Delta P_{\delta}$ 为试验标准差; $\bar{P}$ 为  $n$  个测量值的平均值,为第  $i$  次测量的激光连续功率值; $n$  为测量次数。可计算出倍频光和基频光功率起伏的标准差分别为 8.79 mV 和 4.68 mV,它表示倍频光和基频光功率分别落在区间(1 225.30-8.79 mV, 1 225.30+8.79 mV)和区间(1 322.88-4.68 mV, 1 322.88+4.68 mV)内的置信概率为 68.3%。由此可看出,经过倍频后,归一化的输出功率起伏扩大了 2.03 倍。图 7(c)和(d)分别是倍频光和基频光的功率起伏概率分布。为了对比倍频光和基频光长时间下的功率波动,在 10 min 内记录了倍频光和基频光的功率,其中基频光测量时进行了衰减,使其电压直流分量和倍频光相当,如图 8 所示。

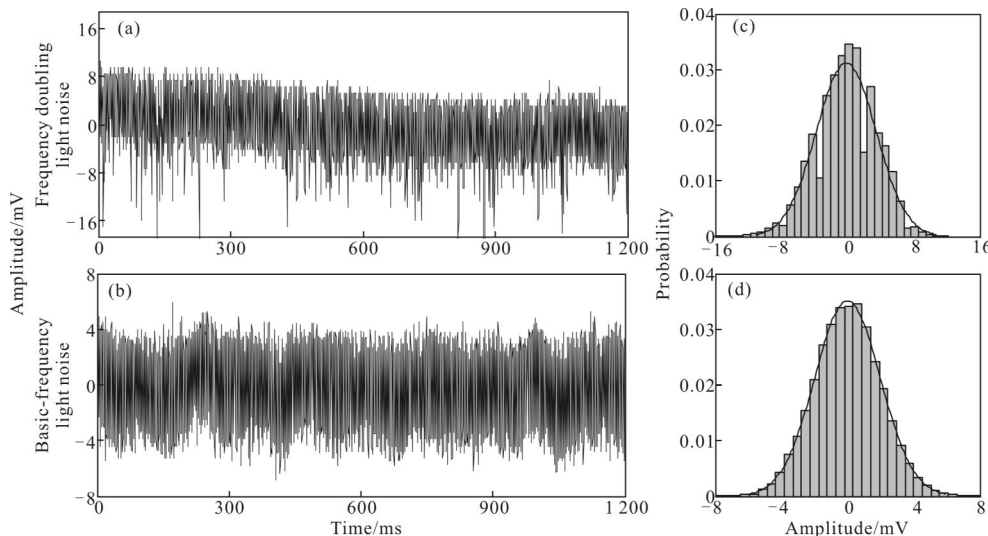


图 7 倍频腔输入、输出功率噪声及其概率分布

Fig.7 Power noise and probability distribution of frequency doubling cavity's input and output

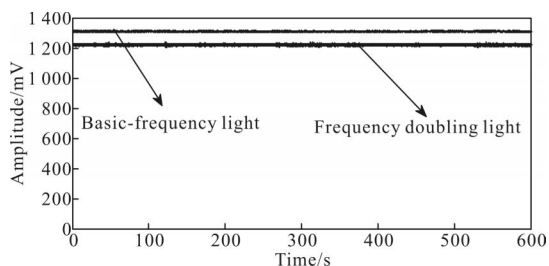


图 8 倍频腔输入、输出功率波动

Fig.8 Power fluctuation of frequency doubling cavity's input and output

根据前面的测量结果,文中对倍频腔输出功率的峰值不稳定性进行了计算。连续激光器输出功率的峰值不稳定性定义为<sup>[19]</sup>:相对应周期内激光连续功率 1 Hz 以下起伏变化量的峰值的一半与激光连续功率的比,将图 7 中的数据利用数字滤波器处理,滤除 1 Hz 以上高频干扰后,可计算出倍频腔输出功率的峰值不稳定性:

$$\Delta_{P_2} = \pm \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2P} \times 100\% = \frac{1\ 235 - 1\ 212}{2 \times 1\ 224} \times 100\% = 0.93\% \quad (2)$$

此外,在倍频器稳定工作状态下,对其输出激光功率中长期(测量连续时间为 10 min,每隔 1 s 采样一次)功率不确定度进行了测试,10 次独立测试,计算出每一次激光的连续功率如表 1 所示。

由此可以得出倍频腔激光输出功率中长期不稳定性:

$$\Delta_{P_1} = \pm \frac{2\Delta P_{\delta}}{\bar{P}} \times 100\% = 0.052\% \quad (3)$$

式中:  $\bar{P}$ 、 $\Delta P_{\delta}$  分别为倍频腔激光输出功率 10 次测量的平均值和实验标准差。

表 1 倍频光输出功率平均值的 10 次测量

Tab.1 10 times measurement of frequency doubling cavity's output power mean

Times	1	2	3	4	5
Power/mV	1 223.6	1 224.28	1 223.74	1 224.04	1 223.74
Times	6	7	8	9	10
Power/mV	1 224.1	1 223.58	1 224.18	1 223.5	1 224.26

#### 4 结束语

文中提出了一种基于积分扫描的腔长自锁定方案,对 532 nm 连续激光倍频产生 266 nm 紫外激光的实验系统进行了锁定。通过提取控制电路内部信号取代通常采用的输出激光强度作为失锁判据,同时用积分信号取代常用的三角波信号进行失锁扫描,有效解决了一般锁定电路积分饱和失锁不能自动回到锁定状态的问题,并简化了系统构成,避免了三角波信号源引入的噪声干扰。实验结果表明,锁定效果优良,实际系统失锁恢复时间一般不超过 4 s,单次锁定时间超过 30 min,在锁定情况下,倍频光功率起伏是基频光起伏的 2 倍,倍频输出光功率 10 min 内的峰值不稳定性达到 0.93%,中长期功率不稳定性达到 0.052%,优于一般商用连续光倍频器的锁定水平。这对于连续光倍频技术的提升具有一定的促进意义。

#### 参考文献:

[1] Jones-Bey Hassaun. Deep-UV applications await improved

nonlinear optics[J]. *Laser Focus World*, 1998, 34(8): 127-131.

[2] Yan X P, Liu Q, Gong M, et al. Over 8 W high peak power UV laser with a high power Q-switched Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator and the compact extra-cavity sum-frequency mixing [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 6(2): 93-97.

[3] Xiang Z, Ge J H, Zhao Z G, et al. 1.9 W flashlamp-pumped solid-state 266 nm ultraviolet laser[J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, 7(6): 502-504.

[4] Jia Fuqiang, Xue Qinghua, Zheng Quan, et al. All solid-state 556 nm yellow laser by LBO intra-cavity frequency doubling [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(8): 1017-1021. (in Chinese)

贾富强, 薛庆华, 郑权, 等. 全固态 LBO 腔内倍频 556 nm 黄光激光器[J]. *中国激光*, 2005, 32(8): 1017-1021.

[5] Zhang C, Zhang X Y, Wang Q P, et al. Diode-pumped Q-switched 946 nm Nd: YAG ceramic laser [J]. *Laser Physics Letters*, 2009, 7(6): 521-525.

[6] Wang Lirong, Wang Guiling, Zhang Xin, et al. Generation of ultraviolet radiation at 266 nm with RbBe<sub>2</sub>BO<sub>3</sub>F<sub>2</sub> crystal[J]. *Chinese Physics Letters*, 2012, 29(6): 064203.

[7] Peng Yu, Fang Zhanjun, Zang Erjun. Narrow-bandwidth diode-laser-based ultraviolet light source[J]. *Chinese Physics Letters*, 2011, 28(10): 104207.

[8] Sakuma J, Asakawa Y, Obara M. Generation of 5-W deep-UV continuous-wave radiation at 266 nm by an external cavity with a CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> crystal [J]. *Opt Lett*, 2004, 29(1): 92-94.

[9] Yan Xiaojuan, Li Zhixin, Zhang Yongzhi, et al. The hansch-couillaud frequency locking mechanism of dual-wavelength external cavity resonance system based on diffusion bonded KTP crystal[J]. *Acta Phys Sin*, 2011, 60(10): 104210. (in Chinese)

闫晓娟, 李志新, 张永智, 等. 基于 KTP 键合晶体的 Hansch-Couillaud 双波长外腔频率锁定机理[J]. *物理学报*, 2011, 60(10): 104210.

[10] Lin Yige, Chen Weiliang, Li Tianchu, et al. First harmonic saturated-absorption frequency stabilization of lasers using sampling integration technique [J]. *Chinese J Lasers*, 2009, 36(5): 1075-1079. (in Chinese)

林弋戈, 陈伟亮, 李天初, 等. 利用取样积分实现激光饱和吸收一次谐波稳频[J]. *中国激光*, 2009, 36(5): 1075-1079.

[11] Ma Xiangchun, Zou Hongxin, Shen Yong, et al. Study of digitized automatic phase locking based on field

- programmable gate array [J]. *Acta Optica Sin*, 2011, 31(7): 0714003. (in Chinese)
- 马祥春, 邹宏新, 沈咏, 等. 基于现场可编程门阵列的数字自动锁相技术研究[J]. *光学学报*, 2011, 31(7): 0714003.
- [12] Lam T T Y, Slagmolen B J J, Chow J H, et al. Digital laser frequency stabilization using an optical cavity [J]. *IEEE J Quant Electron*, 2010, 46(8): 1178–1183.
- [13] Canuto E, Musso F, Massotti L. Automation and control of Fabry-Perot interferometers [J]. *IEEE Trans Ind Electron*, 2007, 54(2): 848–857.
- [14] Drever R W P, Hall J L, Kowalski F V, et al. Laser interferometer gravitational radiation detectors[J]. *Appl Phys B*, 1983, 31(5): 336–342.
- [15] Hansch T W, Couillaud B. Laser frequency stabilization by polarization spectroscopy of a reflecting reference cavity[J]. *Opt Commun*, 1980, 35(3): 441–444.
- [16] Boon J M, Veer W E, Bente E A J M, et al. Scanning and locking of a single longitudinal mode  $\beta$ -BaB<sub>2</sub>O<sub>4</sub> OPO in a grazing incidence configuration [J]. *Opt Commun*, 1997, 136(3–4): 261–266.
- [17] Chen G Z, Shen Y, Zou H X, et al. Generation of 266 nm continuous-wave with elliptical Gaussian beams[J]. *Acta Phys Sin*, 2014, 63(5): 054204. (in Chinese)
- 陈国柱, 沈咏, 邹宏新, 等. 利用椭圆高斯光束产生 266 nm 紫外连续激光[J]. *物理学报*, 2014, 63(5): 054204.
- [18] Schlager J B, Callicoatt E E, Mirin R P, et al. Passively mode-locked waveguide laser with low residual jitter [J]. *IEEE Photon Technol Lett*, 2002, 14(9): 1351–1353.
- [19] GB/T13863 ~2011, Test methods for laser radiation power and its instability[S]. Beijing: China Standard Press, 2012.