

# 紧凑型被动风冷 Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒振荡器设计

于海波<sup>1,2</sup> 刘可<sup>1</sup> 陈莹<sup>1,2</sup> 涂伟<sup>1,2</sup> 申玉<sup>1</sup> 许家林<sup>1</sup> 高宏伟<sup>1</sup> 薄勇<sup>1</sup> 彭钦军<sup>1</sup> 许祖彦<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院理化技术研究所激光物理与技术研究中心, 北京 100190

<sup>2</sup>中国科学院大学, 北京 100049

**摘要** 提出被动风冷的高光束质量、高稳定性半导体可饱和吸收镜(SESAM)锁模 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒振荡器。在对 SESAM 被动锁模理论进行理论分析和实验验证的基础上, 获得更精确的 SESAM 锁模脉宽表达式。测得该振荡器的脉宽为 15.5 ps, 平均功率为 210 mW, 重复频率为 100 MHz。其光束质量因子  $M^2=1.15$ , 长时间均方根(RMS)功率不稳定性优于 1%。整机外形紧凑, 尺寸为 350 mm×150 mm×50 mm。该激光器能够作为可靠的皮秒种子源用于后续的功率放大并应用于科研和工业等领域。

**关键词** 激光器; 被动风冷; 锁模; 皮秒; 半导体可饱和吸收镜

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201542.0802009

## Design of a Compact Passively Air Cooled Picosecond Nd:YVO<sub>4</sub> Oscillator

Yu Haibo<sup>1,2</sup> Liu Ke<sup>1</sup> Chen Ying<sup>1,2</sup> Tu Wei<sup>1,2</sup> Shen Yu<sup>1</sup> Xu Jialin<sup>1</sup>

Gao Hongwei<sup>1</sup> Bo Yong<sup>1</sup> Peng Qinjun<sup>1</sup> Xu Zuyan<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center for Laser Physics and Technology, Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Science, Beijing 100190, China

<sup>2</sup>University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China

**Abstract** A compact and robust, passively air cooled picosecond 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator mode-locked by semiconductor saturable absorber mirror (SESAM) is demonstrated. Based on the theoretical analysis and experimental verification of the passive mode locking method, a more precise formula describing the pulse width of a mode locked laser is proposed. The laser operates at pulse duration of 15.5 ps and a repetition rate of 100 MHz with output power of 210 mW. It is proven to be TEM<sub>00</sub> mode according to measured beam quality factor of  $M^2=1.15$ . The root mean square (RMS) power fluctuation is less than 1%. The footprint of the laser is only 350 mm × 150 mm × 50 mm. Thus, this laser can be a reliable seed source to be amplified for more applications in research and industrial fields.

**Key words** lasers; passively air cooled; mode locking; picosecond; semiconductor saturable absorber mirror

**OCIS codes** 140.7090; 140.4050; 140.3410; 140.3580

## 1 引 言

由于皮秒(ps)激光具有超短脉宽和良好的光束质量,其在诸如物理学、生物学、测距、雷达、光谱学以及微加工等研究和应用领域已经成为越来越重要的工具<sup>[1-3]</sup>。对于微加工应用来说,皮秒激光不但具有热影响区小、对材料损伤极低、无等离子屏蔽效应等飞秒激光所具有的优点,还具有加工效率高、成本低等纳秒激光所具有的优点<sup>[4-5]</sup>。高能量皮秒脉冲只能从极微弱的种子源经过逐级功率放大才能获得。因此,实用化的高光束质量、高稳定性的紧凑型皮秒种子源成为重中之重。

收稿日期: 2015-04-17; 收到修改稿日期: 2015-04-29

基金项目: 国家自然科学基金(61138004)

作者简介: 于海波(1983—),男,硕士研究生,主要从事全固态皮秒激光器方面的研究。E-mail: yuhaibo@mail.ipc.ac.cn

导师简介: 许祖彦(1940—),男,博士,研究员,博士生导师,中国工程院院士,主要从事宽调谐激光器方面的研究。

E-mail: zyxu@mail.ipc.ac.cn(通信联系人)

尽管产生锁模皮秒激光脉冲的方法多种多样,但大量的研究表明,采用辅助锁模器件实现被动锁模是目前获得实用化锁模激光器的优选方案。目前已经开发的辅助锁模器件包括半导体可饱和吸收镜 (SESAM)、碳纳米管、石墨烯等<sup>[6-7]</sup>,其中技术最为成熟且应用最广泛的是 SESAM。需要特别指出的是,全光纤化被动锁模光纤激光器近年来发展迅猛。但是由于其需要利用光纤自身非线性双折射效应对光场强度的依赖性来实现锁模,其动力学特性十分复杂,存在多脉冲、光谱边带、量子噪声以及单脉冲能量低等问题<sup>[8-9]</sup>。因此,对于获得单脉冲能量大、稳定性好、量子噪声小、系统集成度高的实用化锁模脉冲,SESAM 被动锁模固体激光器是更好的选择。Li 等<sup>[10]</sup>采用 880 nm 低量子亏损抽运技术完成了高功率高效率 SESAM 锁模 1342 nm Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒激光输出,重复频率为 76 MHz,最高输出功率为 2.3 W,脉宽为 29.2 ps;Liu 等<sup>[11]</sup>实现了 SESAM 被动锁模 1341 nm Nd:GdVO<sub>4</sub>皮秒激光输出,平均功率为 1.27 W,脉冲重复频率为 85.3 MHz,脉宽为 45 ps;毛小洁等<sup>[12]</sup>实现了 SESAM 被动锁模端面抽运 Nd:YVO<sub>4</sub>全固态激光输出,输出重复频率为 20 MHz,脉冲宽度为 14.2 ps,平均功率为 6.14 W。如上所述的传统 SESAM 被动锁模技术方案中,激光器都需要主动冷却,这将带来额外的材料成本、电消耗,占用更多的空间,甚至还会影响到激光器的稳定运转。

本文对 SESAM 被动锁模激光器的设计原理和过程进行详细的分析,提出一个更精确的锁模脉宽表达式并进行实验验证。结合被动风冷热设计原理,研制一款结构简单、紧凑的被动风冷 SESAM 锁模 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub>皮秒激光振荡器。该激光器输出功率为 210 mW,重复频率为 100 MHz,脉宽为 15.5 ps。测得其光束质量因子  $M^2=1.15$ ,表明其处于 TEM<sub>00</sub>模运转。其 3 h 连续运转均方根(RMS)功率稳定性优于 1%。整机尺寸仅为 350 mm×150 mm×50 mm,结构紧凑适于系统集成。该激光器能够作为皮秒种子源用于后续的功率放大并应用于科研、工业等领域。

## 2 SESAM 被动锁模设计

Hönninger 等<sup>[13]</sup>从速率方程出发,推导出一个简单直观的抑制调  $Q$  锁模(QML)的表达式:

$$E_p^2 > E_{p,c}^2 = E_{\text{sat,L}} E_{\text{sat,A}} \Delta R = F_{\text{sat,L}} A_{\text{eff,L}} F_{\text{sat,A}} A_{\text{eff,A}} \Delta R, \quad (1)$$

式中  $E_p$  是腔内单脉冲能量,  $E_{p,c}$  是腔内临界单脉冲能量,  $E_{\text{sat,L/A}}$  和  $F_{\text{sat,L/A}}$  分别是激光晶体/SESAM 上的饱和能量和饱和能流密度,  $A_{\text{eff,L/A}}$  是激光晶体/SESAM 上的有效光斑面积。从(1)式中可以看出,要获得稳定的连续锁模(CML)脉冲输出,需要腔内单脉冲能量超过  $E_{p,c}$ ;否则,激光器将进入调  $Q$  锁模运转。通常设计腔内单脉冲能量为腔内临界能量的 3~5 倍。另外,由于  $F_{\text{sat,L}} = h\nu/m\sigma_L$ ,式中  $h\nu$  为单光子能量,  $m$  为脉冲在腔内往返一次时通过增益介质的次数,对驻波腔  $m=2$ ,对行波腔  $m=1$ ,  $\sigma_L$  为晶体发射截面,因此,具有大的受激发射截面的激光增益介质有利于连续锁模。

根据 Haus<sup>[14]</sup>的快速可饱和吸收锁模理论,连续锁模的脉宽为

$$\tau_p = \frac{1}{2\pi\Delta\nu_L} \sqrt{\frac{2g}{q\nu_0^2/P_A}} = \frac{1}{2\pi\Delta\nu_L} \sqrt{\frac{g}{1+q-g}}, \quad (2)$$

式中  $\Delta\nu_L$  是激光晶体的增益线宽;  $g$  是小信号增益与腔内总损耗之比;  $q$  是可饱和吸收体的线性损耗与腔内总损耗之比;  $\nu_0$  是脉冲包络,  $\nu_0^2$  具有功率量纲;  $P_A$  是可饱和吸收体的饱和功率。

刘可<sup>[15]</sup>进行了锁模脉宽随抽运功率变化的实验,结果表明随着抽运功率的连续大范围变化,锁模脉宽几乎保持不变,即锁模脉宽与增益无关。考虑到激光器的阈值条件,即增益与损耗相等,于是得到  $g=1$ 。可饱和吸收体的线性损耗是非饱和损耗与调制深度之和;腔内总损耗是腔内损耗与输出损耗之和,则

$$\tau_p = \frac{1}{2\pi\Delta\nu_L} \sqrt{\frac{\delta - \ln R}{\delta_{\text{NA}} + \Delta R}}, \quad (3)$$

式中  $\delta$  是腔内损耗,  $-\ln R$  是输出损耗,  $\delta_{\text{NA}}$  和  $\Delta R$  分别是可饱和吸收体的非饱和损耗和调制深度。以上各参量均可通过实验和仪器测量得到。

根据 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> SESAM 连续锁模激光器中脉宽随输出损耗变化的结果<sup>[15]</sup>,假定

$$\tau_p' = K \sqrt{\frac{\delta - \ln R}{\delta_{\text{NA}} + \Delta R}}, \quad (4)$$

式中  $K$  是常量。

拟合结果如图 1 所示,得到  $K=5.333, \delta=0.0778$ , 与文献[15]中的线性拟合结果  $\delta=0.125$  不同。

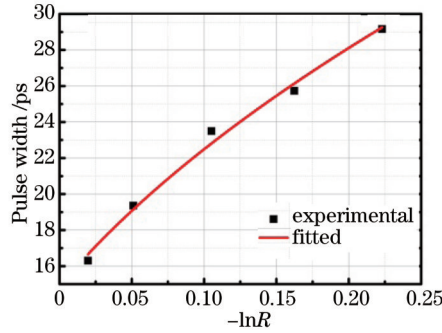


图 1 SESAM 锁模 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒激光器脉宽随输出损耗的变化曲线

Fig.1 Pulse width of the 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> oscillator mode-locked by SESAM versus the output loss

Nd:YVO<sub>4</sub> 的增益线宽是 0.8 nm<sup>[16]</sup>, 将(3)式和  $K$  代入(4)式, 得 SESAM 被动锁模 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 皮秒激光器实际脉宽表达式:

$$\tau_p' = \frac{1.13}{\Delta\nu_L} \sqrt{\frac{\delta - \ln R}{\delta_{NA} + \Delta R}} \quad (5)$$

Paschotta 等<sup>[17]</sup>得到的脉宽表达式为

$$\tau_p' \approx \frac{1.07}{\Delta\nu_L} \sqrt{\frac{\delta - \ln R}{\Delta R}} \quad (6)$$

(5)式和(6)式具有相似的形式。但是,由于(5)式还考虑到了非饱和损耗,因而得到的结果更准确。尤其是当非饱和损耗与调制深度相当的情况下,二者的差异将非常明显。

由(5)式可知,可以通过减小激光器总损耗、提高可饱和吸收体的线性损耗或者选择具有更宽增益线宽的激光介质实现激光器更窄脉宽的输出。

### 3 被动风冷设计

热能传递有 3 种方式,分别为热传导、热对流、热辐射。热设计基础便是基于上述热传导过程的手工计算。

对于激光器,系统输入的热负荷包括激光二极管(LD)发热、激光晶体吸收抽运导致发热、未吸收的抽运自由传输过程中被其他元器件吸收造成的发热;而散热过程则为热源将热量传导至热沉,并通过空气自然对流和热辐射对外散热。假设整体激光器系统处于热平衡状态,则对于被动风冷系统,其热负荷只有通过空气自然对流和热辐射散热。

根据传热理论,空气自然对流和热辐射的数学描述分别为牛顿冷却公式和斯特藩-玻耳兹曼定律的经验修正形式<sup>[18-19]</sup>:

$$Q_{NC} = hA\Delta T = 2.51F \left( \frac{\Delta T}{L_{eff}} \right)^{1/4} A\Delta T, \quad (7)$$

$$Q_R = \varepsilon A \sigma T_A^4 = 4\varepsilon A \sigma T_A^3 \Delta T$$

式中  $Q_{NC}$  为自然对流传热量;  $h$  为传热系数;  $A$  为散热表面积;  $\Delta T$  为传热两介质温差;  $F$  为姿势系数,  $L_{eff}$  为代表长度,不同散热面的形状及设置方向,其姿势系数和代表长度也不同,表 1 显示了垂直和水平设置平板时的情况;  $Q_R$  为热辐射量;  $\varepsilon$  为物体的辐射率,其值总小于 1,它与物体的种类及表面状态有关;  $A$  为辐射表面积;  $\sigma=5.67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$  为斯特藩-玻耳兹曼常量;  $T_A=(T_1+T_2)/2$  为发生热辐射两物体的热力学平均温度。

假设系统的热负荷为 10 W,矩形金属热沉和空气的温度分别为 36 °C 和 26 °C。如果热沉的尺寸为 350 mm×150 mm×10 mm,并经过氧化发黑处理以增大辐射率,取  $\varepsilon=0.9$ ;将其水平悬空放置,计算得到  $Q_{NC}=3.4 \text{ W}$ ,  $Q_R=6.6 \text{ W}$ ;系统总散热量  $Q_{Total}=Q_{NC}+Q_R=10.1 \text{ W}$ ,与系统输入热负荷相当,能够维持热平衡状态。

表 1 垂直和水平放置平板时各面的姿势系数和代表长度

Table 1 Shape coefficients and the equivalent lengths for a rectangle plate placed vertically and horizontally

	Vertical	Horizontal	Horizontal
Orientation of the rectangle plate			
$F$	0.56	0.52	0.26
$L_{\text{eff}}$	$H_{\text{height}}$	$\frac{L_{\text{length}} \times W_{\text{width}} \times 2}{L_{\text{length}} + W_{\text{width}}}$	

### 4 实验过程与结果分析

根据上述理论,设计了被动风冷 SESAM 被动锁模 1064 nm Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器,实验装置如图 2 所示。

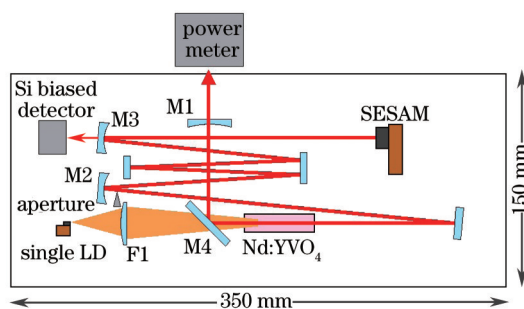


图 2 被动风冷 SESAM 锁模皮秒振荡器光路示意图

Fig.2 Schematic of the passively air cooled ps oscillator mode-locked by SESAM

采用一个最大输出功率为 8 W 的 808 nm 单管 LD 作为抽运源,并将其通过螺钉固定在紫铜热沉上。紧贴着 LD 出射端面用紫外胶固定一小截光纤,将快轴发散角压缩到与慢轴发散角基本相同,均为 10°。采用一块尺寸为 2 mm×2 mm×5 mm 的 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体作为增益介质,其激活离子掺杂粒子数分数为 0.3%。晶体两端面镀 1064 nm 和 808 nm 增透膜,抽运出射端切 2° 楔角以抑制标准具效应。激光晶体用铝箔包裹后置于紫铜热沉中。LD 抽运光通过单片焦距  $f=30$  mm 的平凸透镜 F1 成像至 Nd:YVO<sub>4</sub> 晶体中央。

为了使激光器高效紧凑,使用 7 片反射镜和一片 SESAM 组成单端输出折叠腔,其中 M1 为凹面耦合输出镜,输出透过率  $T=2\%$ ,曲率半径  $R_1=100$  mm。M2 和 M3 均为凹面 0° 全反镜,对应曲率半径分别为  $R_2=800$  mm 和  $R_3=400$  mm。由于 M2 和 M3 是曲面反射镜,会引起腔内光束的像散,将严重影响锁模过程。为了尽可能减小像散的影响,入射光与反射光的夹角均控制在 8° 以内。M4 是抽运耦合 45° 转折镜,其朝向抽运的表面镀有 808 nm 增透膜,而朝向腔内的一面镀有 1064 nm 反射膜和 808 nm 增透膜。其他 3 片均为平面全反镜。实验中采用的商品化 SESAM 被焊接在紫铜热沉上,其主要参数为:饱和能量密度  $F_{\text{sat,A}}=70 \mu\text{J}/\text{cm}^2$ ,非饱和损耗  $\delta_{\text{ns}}=0.4\%$ ,损伤阈值  $J_t=3 \text{ mJ}/\text{cm}^2$ ,调制深度  $\Delta R=0.6\%$ ,恢复时间  $t=1$  ps。为了增加激光器的稳定性,除了 SESAM 镜架可调外,其他所有元件都使用不可调的固定镜架并用螺钉固定在尺寸为 350 mm×150 mm×10 mm 经过氧化发黑的铝制底板上。

由于增益介质内和 SESAM 上的光斑尺寸不仅关系到激光模式,还关系到连续锁模的阈值条件和 SESAM 的损伤,两者需仔细匹配。考虑到增益介质的热焦距(TFL),利用高斯光束 ABCD 矩阵方法可以模拟激光器的热稳区。通过设定 M1 到增益介质、增益介质到 M2、M2 到 M3、M3 到 SESAM 这 4 臂的长度分别为 90、400、800、200 mm,得到增益介质内和 SESAM 上的光斑半径分别为  $\omega_t=100 \mu\text{m}$  和  $\omega_s=50 \mu\text{m}$ ,如图 3 所示。可见,当 TFL 大于 200 mm 时, $\omega_t$  和  $\omega_s$  基本保持不变,表明该热稳腔具有稳定的激光模式和输出功率。仔细调节 F1 的位置,使其成像在 Nd:YVO<sub>4</sub> 中对应于 LD 的快慢轴发光方向的光斑尺寸为 200  $\mu\text{m}$ ×400  $\mu\text{m}$ ,同时在靠近 M2 位置处插入刀口光阑对 LD 慢轴发光方向限模,以达到抽运光与腔内激光的模式匹配从而实现稳定的基模输出。



考虑到增益介质的长度和折射率,该谐振腔的光学长度为 1.5 m,对应的锁模脉冲重复频率为 100 MHz。腔内临界单脉冲能量  $E_{p,c}=35.2$  nJ;按稳定锁模腔内单脉冲能量为  $E_{p,c}$  的 3~5 倍计算,SESAM 上的能量密度为 1.34~2.24 mJ/cm<sup>2</sup>,均小于 SESAM 的损伤阈值  $J_l$ ,由此可知不会对 SESAM 造成损伤。

激光器在基模运转下的输出功率随抽运功率的变化,如图 4 所示。当吸收抽运光功率为 344 mW 时激光器开始出光。当吸收抽运光功率增加至 520 mW 时开始出现稳定的连续锁模脉冲,此时激光器输出的平均功率为 97.5 mW。当吸收抽运光功率为 1.1 W 时,激光器输出 210 mW 的连续锁模激光,对应光-光转换效率和斜效率分别为 20.5% 和 25.6%。增加抽运光功率到最大,吸收抽运功率为 2.82 W,此时激光器输出 412 mW 的连续锁模激光。从图中可以看出,当吸收的抽运功率小于 1.5 W 时,激光器输出呈现良好的线性;当继续增加抽运,饱和趋势逐渐显现,光-光效率和斜效率均有所下降。

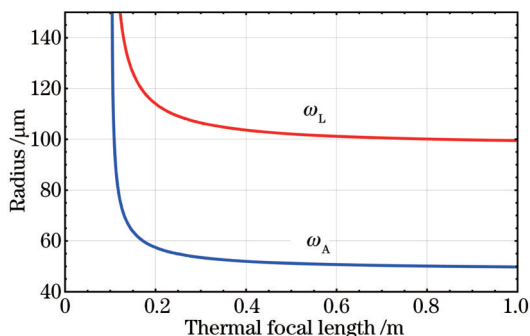


图 3 激光晶体内和 SESAM 上光斑半径随热焦距的变化  
Fig.3 Radii in the middle of the crystal and on the SESAM versus thermal focal length

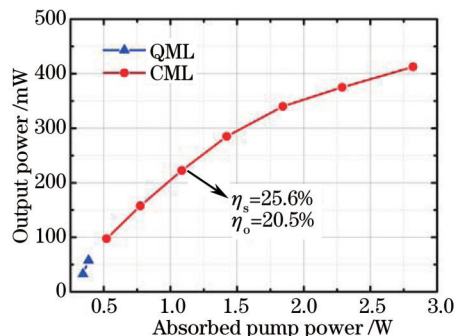


图 4 输出功率随抽运功率的变化  
Fig.4 Output power versus the absorbed pump power

由于激光器为被动风冷散热,必须时刻关注整套激光系统的热稳定状态。当吸收的抽运功率为 1.1 W 时,LD 发热为 8.06 W;Nd:YVO<sub>4</sub>发热为 0.87 W;假设未吸收的 4.65 W 抽运光功率在自由传输过程中有 1 W 被激光器中各元件吸收,则总热负荷为 9.93 W,与手工计算热平衡态相符。因此,虽然激光器能输出更高功率的种子光,但是考虑到系统的热稳定性,限定输出 210 mW 处为其工作点。

用一个上升沿时间为 1 ns 的快速硅光电探测管(DET10A/M, Thorlabs)和一个带宽为 1 GHz 的数字示波器(DPO 4104, Tektronix)监测工作点处的锁模脉冲波形,如图 5 所示。图 5(a)的时间分辨率为 10 ns/div,可以清晰地看到脉冲周期为 10 ns,对应重复频率为 100 MHz,与腔长相符;图 5(b)的时间分辨率为 400 ns/div,可以看出锁模脉冲非常平滑、稳定。

在工作点处,用刀口法测量输出激光的光束质量,如图 6 所示。测得输出激光在 LD 快慢轴方向的光束质量因子均为  $M_x^2 = M_y^2 = 1.15$ ,表明稳定连续锁模时激光器运行在 TEM<sub>00</sub>模式。

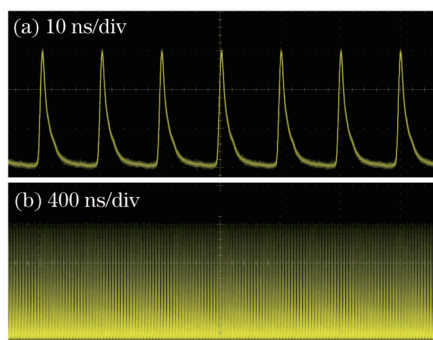


图 5 工作点处的不同时间分辨率下的锁模脉冲序列  
Fig.5 Oscilloscope traces of ps pulse trains in different time resolutions at the work point

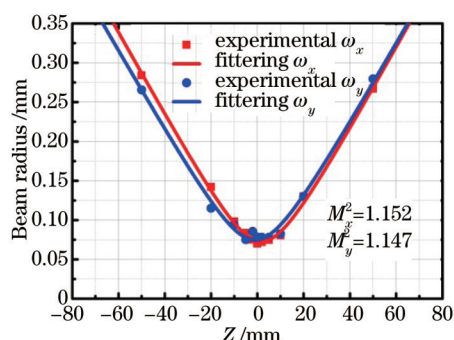


图 6 刀口法测得工作点处光束质量因子  
Fig.6 Beam quality factor measured by knife edge method

用非共线自相关仪测量工作点处激光的脉宽,其归一化强度自相关曲线如图 7 所示,假定输出脉冲为 sech<sup>2</sup>分布,则其脉宽约为 15.5 ps。由(5)式和(6)式估算的锁模脉宽分别为 16.7 ps 和 21.6 ps。与实测脉宽相

比,(5)式较(6)式的准确度提高了约32%。(5)式与实测脉宽的微小偏差应是由腔内损耗和输出损耗与理论值之间的微小偏差引起的。

对工作点处的长时间热稳定性和功率稳定性进行了测试,连续3 h测试结果如图8所示。激光输出功率和LD热沉温度通过电脑实时自动采集,功率采样间隔约为0.3 s,温度采样间隔约为30 s。可见,激光功率随温度同步变化,开机经过约15 min的预热时间后,激光功率和LD温度即达到稳定状态。经计算,激光功率RMS波动不超过1%,稳定性相当好,表明根据手工计算而设计的被动风冷散热方式性能良好。

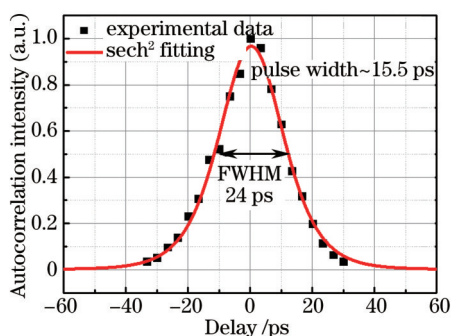


图7 锁模脉冲的强度自相关曲线

Fig.7 Autocorrelation traces of the mode-locked ps pulses

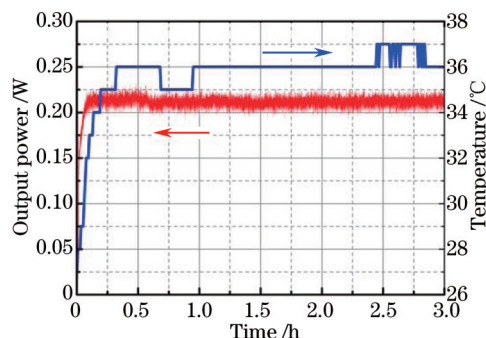


图8 功率和温度稳定性测试

Fig.8 Measurement of the output power and temperature stabilities over three hours

根据工作点以及连续锁模阈值处的参数,对之前的锁模设计进行验证。工作点处平均功率 $P_{\text{out}}=210$  mW,重复频率为100 MHz,则输出单脉冲能量 $E_{\text{out}}=2.2$  nJ;考虑到输出透过率,则腔内单脉冲能量 $E_{\text{in}}=110$  nJ,约为 $E_{\text{p,c}}$ 的3倍,能够支撑连续锁模的稳定运转;测得连续锁模最小功率和调Q锁模最大功率,分别为100 mW和60 mW,对应腔内单脉冲能量分别为50 nJ和30 nJ,与理论计算的 $E_{\text{p,c}}=35.2$  nJ吻合。

## 5 总 结

通过对SESAM被动锁模理论的分析,提出并验证一个更为准确的被动锁模脉宽表达式。研制一台高稳定性、高光束质量的被动风冷1064 nm SESAM锁模皮秒激光振荡器。其外形尺寸仅为350 mm×150 mm×50 mm,结构相当紧凑;其工作点处的平均输出功率为210 mW,重复频率为100 MHz;测得其脉宽为15.5 ps;光束质量因子 $M^2=1.15$ ;其长时间平均输出功率RMS稳定性优于1%。该激光器可被作为可靠的种子激光用于后续的皮秒激光放大。

## 参 考 文 献

- 1 Keller U. Recent developments in compact ultrafast lasers[J]. Nature, 2003, 424(6950): 831-838.
- 2 Dabu R, Stratan A, Fenic C, *et al.*. Picosecond laser system based on microchip oscillator seed[C]. SPIE, 2007, 7022: 70221B.
- 3 Eichenholz J M, Li M, Read I, *et al.*. Future trends and applications of ultrafast laser technology[C]. SPIE, 2006, 6100: 61000H.
- 4 Weiler S. Ultrafast lasers: High-power pico- and femtosecond lasers enable new applications[J]. Laser Focus World, 2011, 47(10): 55-61.
- 5 Liu X, Du D, Mourou G. Laser ablation and micromachining with ultrashort laser pulses[J]. IEEE J Quantum Electronics, 1997, 33(10): 1706-1716.
- 6 Huang Wenyu, Feng Dejun, Jiang Shouzhen, *et al.*. Erbium-doped fiber laser based on single-layer graphene saturable absorber[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202001.  
黄文育, 冯德军, 姜守振, 等. 基于单层石墨烯可饱和吸收的掺铒光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202001.
- 7 Zhu Pan, Sang Mei, Gao Yang, *et al.*. Wavelength switchable passive mode-locking fiber laser based on single-wall carbon nanotube[J]. Chinese J Lasers, 2013, 40(2): 0202005.  
朱 攀, 桑 梅, 高 杨, 等. 基于单壁碳纳米管的波长可切换被动锁模光纤激光器[J]. 中国激光, 2013, 40(2): 0202005.
- 8 Chen Guoliang. Research on Novel Passively Mode-Locked Fiber Laser[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2011.

- 陈国梁. 新型被动锁模光纤激光器研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2011.
- 9 Liu Jinghui, Tian Jinrong, Hu Mengting, *et al.*. Burgeoning developments in high repetition rate mode locked solid-state laser[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2014, 51(12): 120001.
- 刘京徽, 田金荣, 胡梦婷. 蓬勃发展的高重复频率固体锁模激光器[J]. *激光与光电子学进展*, 2014, 51(12): 120001.
- 10 Li F, Liu K, Han L, *et al.*. High-power 880 nm diode-directly-pumped passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser at 1342 nm with a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Optics Letters*, 2011, 36(8): 1485-1487.
- 11 Liu K, Li F, Liu Y, *et al.*. Compact diode-directly-pumped passively mode-locked TEM<sub>00</sub> Nd:GdVO<sub>4</sub> laser at 1341 nm using a semiconductor saturable absorber mirror[J]. *Laser Physics*, 2012, 22(1): 95-99.
- 12 Mao Xiaojie, Bi Guojiang, Pang Qingsheng, *et al.*. 20 MHz compact high power passively mode-locked Nd:YVO<sub>4</sub> laser[J]. *Chinese J Lasers*, 2013, 40(10): 1002004.
- 毛小洁, 秘国江, 庞庆生. 20 MHz 紧凑型高功率被动锁模 Nd:YVO<sub>4</sub> 激光器[J]. *中国激光*, 2013, 40(10): 1002004.
- 13 Hönninger C, Paschotta R, Morier-Genoud F, *et al.*. Q-switching stability limits of continuous-wave passive mode locking[J]. *J the Optical Society of America B*, 1999, 16(1): 46-56.
- 14 Haus H A. Theory of mode locking with a fast saturable absorber[J]. *J Applied Physics*, 1975, 46(7): 3049-3058.
- 15 Liu Ke. Investigation of High Average Power Ultra-Short Solid State Laser Technology[D]. Beijing: Sciences Technical Institute of Physics and Chemistry, Chinese Academy of Sciences, 2014.
- 刘 可. 高平均功率超短脉冲固体激光技术研究[D]. 北京: 中国科学院理化技术研究所, 2014.
- 16 Koehner W. Solid State Laser Engineering[M]. New York: Springer, 2006.
- 17 Paschotta R, Keller U. Passive mode locking with slow saturable absorbers[J]. *Applied Physics B*, 2001, 73(7): 653-662.
- 18 Pitts D, Sissom L. Schaum's Outline of Heat Transfer, 2nd Edition[M]. New York: McGraw-Hill, 2011.
- 19 Yang Shiming, Tao Wenquan. Heat Transfer[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006.
- 杨世铭, 陶文铨. 传热学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

栏目编辑: 张 雁