

# 氙灯抽运液冷叠片式重复频率钕玻璃放大器研制

王冰艳<sup>1</sup>, 李养帅<sup>1\*</sup>, 张攀政<sup>1\*\*</sup>, 王利<sup>1</sup>, 刘强<sup>1</sup>, 朱海东<sup>1</sup>, 郭爱林<sup>1</sup>, 张艳丽<sup>1</sup>,  
张旭<sup>1</sup>, 周琼<sup>1</sup>, 周申蕾<sup>1</sup>, 朱俭<sup>2</sup>, 马伟新<sup>2</sup>, 朱宝强<sup>1</sup>, 朱健强<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室, 上海 201800;

<sup>2</sup>中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所, 上海 201800

**摘要** 重复频率激光放大器是实现重复频率激光器的关键器件,其重复频率取决于对抽运及放大过程中产生热量的有效控制。针对千焦耳量级输出重复频率激光器的需求,通过合理的结构设计、冷却液选型及测试等,研制出一台基于氙灯抽运、钕玻璃增益介质、液体冷却、通光直径为  $\Phi 130$  mm 的激光放大器样机。测试结果表明,该放大器样机可实现每分钟一次的重复频率运行,同时具备双程 1.3189 倍净增益,双程动态波前 PV(peak to valley)平均值为 0.2718 波长( $\lambda$ )(20 °C,  $\lambda=1053$  nm, 10 发次计)和 0.3223 $\lambda$ (30 °C,  $\lambda=1053$  nm, 10 发次计)。

**关键词** 激光器; 重复频率激光放大器; 液体冷却; 氙灯抽运; 钕玻璃

中图分类号 O436

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201946.1001007

## Nd:Glass Amplifier with Repetition Rate Fabricated by Flash-Lamp Pumping and Liquid Cooling Method

Wang Bingyan<sup>1</sup>, Li Yangshuai<sup>1\*</sup>, Zhang Panzheng<sup>1\*\*</sup>, Wang Li<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>,  
Zhu Haidong<sup>1</sup>, Guo Ailin<sup>2</sup>, Zhang Yanli<sup>1</sup>, Zhang Xu<sup>1</sup>, Zhou Qiong<sup>1</sup>, Zhou Shenlei<sup>1</sup>,  
Zhu Jian<sup>2</sup>, Ma Weixin<sup>2</sup>, Zhu Baoqiang<sup>1</sup>, Zhu Jianqiang<sup>1</sup>

<sup>1</sup>National Laboratory on High Power Lasers and Physics, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

<sup>2</sup>Shanghai Institute of Laser Plasma, China Academy of Engineering and Physics, Shanghai 201800, China

**Abstract** A repetition rate laser amplifier is the key component of a repetition rate laser; here, the repetition rate of the amplifier is determined by precisely controlling the heat produced during pumping and amplifying. To achieve a repetition rate laser exhibiting kilojoule output energy, a repetition rate laser amplifier prototype with a diameter of 130 mm is developed based on flash-lamp pumping, a neodymium glass gain medium, and liquid cooling. After ensuring the rational mechanical design and selecting a coolant with suitable properties, the developed amplifier prototype operates at 1 shot per minute and exhibits a double pass small signal gain of 1.3189. At 1053 nm, the PV (peak to valley) of 10-shot average double pass wavefronts for the amplifier prototype are 0.2718 $\lambda$  and 0.3223 $\lambda$  when the temperatures of coolant are 20 °C and 30 °C, respectively.

**Key words** lasers; laser amplifier with repetition rate; liquid cooling; flash-lamp pumping; neodymium glass

**OCIS codes** 140.3280; 140.3295; 140.3320

## 1 引 言

为实现激光惯性约束聚变(ICF),发展了一批高功率激光装置,如国家点火装置(NIF)<sup>[1]</sup>,兆焦耳激光装置(LMJ)<sup>[2]</sup>,神光(SG)装置<sup>[3-4]</sup>等,由于大口径片状放大器热效应的影响,这类装置的发次间隔

时间通常大于 2 h,不能满足未来聚变电站的需求。劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)提出了 LIFE 计划<sup>[5]</sup>,阐述了激光惯性聚变-裂变能源设想,指出适用于惯性聚变能(IFE)的激光驱动器需要满足 5~16 Hz 重复频率运行条件,并研制了一路原型机 Mercury 装置,该装置中激光放大器以 Yb:SFAP

收稿日期: 2019-03-28; 修回日期: 2019-04-30; 录用日期: 2019-05-13

\* E-mail: yshli@siom.ac.cn; \*\* E-mail: nwpuzhangpanzheng@163.com

为增益介质,采用二极管抽运、高速氦气冷却、多程放大技术路线,实现了 55 J/10 Hz 输出,由于大尺寸激光晶体生长困难,该装置后期主要作为啁啾脉冲放大(CPA)系统的抽运源<sup>[6]</sup>。随后,重复频率激光放大器获得了迅速的发展,发展了如 Dipole<sup>[7]</sup>, HiLase<sup>[8]</sup>, ELI-Beamlines L2、L3 激光装置<sup>[9]</sup>, SIOM 叠片式气冷放大器<sup>[10-11]</sup>等使用的高速氦气冷却技术路线,以及 Lucia<sup>[12]</sup>, SIOM 蓝宝石传导冷却放大器<sup>[13]</sup>等使用的热沉传导冷却技术路线。此类重复频率激光放大器通常采用二极管抽运,以镱粒子掺杂晶体/陶瓷或钕玻璃为增益介质,采用高速气体或者热沉传导冷却方式,可实现 1~10 Hz 重复频率输出。由于大尺寸激光晶体不易获取以及二极管造价高昂,目前此类重复频率激光装置的输出能量通常为百焦耳量级。

钕玻璃是高功率激光放大器中的常用增益介质,且可获得具有较好均匀性及光学质量的大尺寸样品,如 NIF 中使用的钕玻璃尺寸已达 802 mm×457 mm×41 mm<sup>[14]</sup>。氙灯抽运技术成熟、造价便宜,是大尺寸钕玻璃的良好抽运源。氙灯的发光光谱相对二极管较宽,在抽运钕玻璃过程中产生大量废热,但通过对氙灯释放热量的合理优化及有效控制,可以实现氙灯抽运钕玻璃激光放大器重复频率运行。法国 Apollon 装置采用氙灯抽运钕玻璃以及液体冷却技术方案报道了输出能量为 400 J,重复频率为 1 shot/min 的抽运激光器<sup>[15]</sup>。ELI-Beamlines 中的 L4 激光装置为实现 1.5 kJ、1 shot/min 的重复频率输出,使用了通光口径为 200 mm 的硅酸盐磷酸盐混合玻璃放大器和通光口径为 300 mm 的磷酸

盐玻璃放大器,均采用氙灯抽运以及液体冷却方式<sup>[16]</sup>。目前二极管抽运造价昂贵,掺镱激光晶体生长尺寸受限,因此氙灯抽运钕玻璃以及高效热控制技术是现阶段有希望实现千焦耳量级重复频率激光器的技术方案之一。

中等口径重复频率激光放大器研制对发展千焦耳量级重复频率激光系统具有重要意义,国内还鲜有相关的研究工作报道。本课题组基于氙灯抽运、钕玻璃以及液体冷却技术研制了一台通光直径为  $\Phi 130$  mm 的重复频率样机(RAP),通过合理的结构设计、冷却液选型及测试等,实现了 1.3189 倍双程净增益、双程动态波前 PV(peak to valley)平均值为 0.2718 波长( $\lambda$ )(20 °C)和 0.3223 $\lambda$ (30 °C)(10 发次, $\lambda=1053$  nm)、1 shot/min 重复频率运行。

## 2 结构设计

重复频率样机的设计不但需要具有高增益和增益均匀性,以及分钟/亚分钟级重复频率运行能力,同时要满足结构紧凑、超净、易于加工、拆装与维护方便等要求。该样机结构设计如图 1 所示,主要包含灯箱组件、片框组件、片腔组件和端镜组件 4 个部分。灯箱组件非对称排布于片腔组件两侧,端镜组件非对称安装于片腔组件另外两侧,片腔组件中采用全反射腔结构。片框组件为由上而下插拔式安装,采用侧面抽运端面冷却方式;钕玻璃采用叠片结构,叠片之间预留冷却通道,为了匹配偏振及透过率要求,选择了 45°放置。在满足刚度和洁净度的前提下,整机采用铝合金轻量化加工。

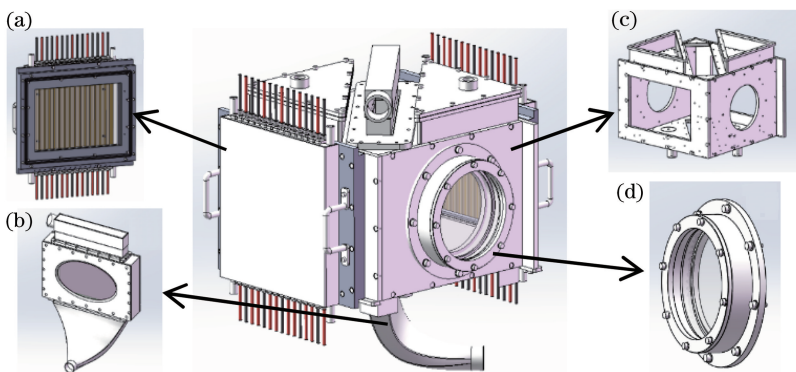


图 1 RAP 结构示意图。(a)灯箱组件;(b)片框组件;(c)片腔组件;(d)端镜组件

Fig. 1 Structural diagram of RAP. (a) Lamp module; (b) slab module; (c) cavity module; (d) side mirror module

对于液体直冷放大器,光场、流场和温度场耦合均会对光束质量产生影响。在重复频率样机研制过

程中,采取了以下措施保证光束质量:1)采用控温精度较高的恒温冷却水循环机,保证重复频率样机运

行期间主激光经过的冷却液温度偏差不超过  $\pm 0.01\text{ }^{\circ}\text{C}$ ; 2) 钽玻璃叠片采用无应力装夹; 3) 片框冷却液采用下进上出的循环流动方式, 并对进液口结构进行优化, 避免循环液体产生湍流; 4) 使用高面型质量要求的窗口玻璃和钽玻璃。

### 3 冷却液选型以及测试

高效热控制技术有助于控制抽运放大过程中的热量积累, 决定了样机可以获得的重复频率, 同时冷却方式的选择对于光束放大波前质量具有重要影响。常见的冷却方式有气体冷却和液体冷却, 液体的折射

率通常大于气体, 光通过冷却液界面产生的菲涅耳损耗相对于气体冷却较小, 可以获得更有效的抽运能量, 同时液体具有较高的比热, 可以更快带走抽运及放大过程中产生的废热, 获得更高的重复频率。该 RAP 需要冷却的部件分别为灯箱组件中的氙灯和片框组件中的钽玻璃叠片, 其冷却方式如图 2 所示: 氙灯浸泡在灯箱冷却液中, 液体由下而上循环流动带走氙灯抽运过程中产生的热量, 片框组件采用端面冷却方式, 冷却液由下而上循环流动。RAP 运行时, 氙灯光经过循环冷却液进入片框组件, 经过片框内的循环流动冷却液辐照至钽玻璃, 进而实现激光放大。

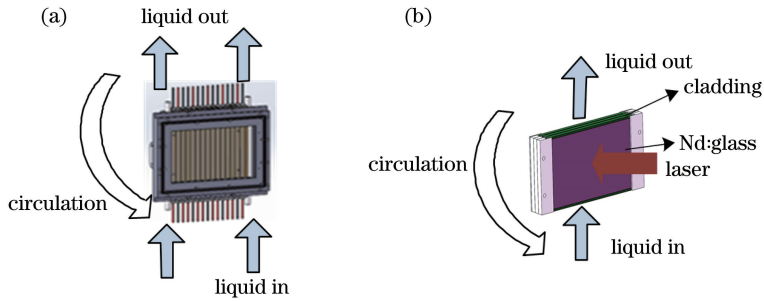


图 2 RAP 冷却示意图。(a) 灯箱组件冷却; (b) 片框组件冷却

Fig. 2 Diagrams of RAP cooling. (a) Lamp module cooling; (b) slab module cooling

冷却液的性能对重复频率样机性能具有重要影响, 因此对灯箱以及片框冷却液的性质进行了实验研究。

#### 3.1 冷却液的基本性质

优良的冷却液需要满足流动性好、无毒或低毒、比热高、高强度氙灯及 1053 nm 激光辐照下性质稳定、与接触的材料耐溶剂性较好等。去离子水流动性好、比热大、氙灯及 1053 nm 激光辐照下性质稳定, 是一种常用的优良冷却液, 可用于实现灯箱冷却。钽玻璃由于其本身易潮解, 需另选不含水基的冷却液。针对非水基冷却液选型, 已报道的冷却液有二硫化碳、四氯化碳<sup>[17]</sup>、二溴乙烷、四溴乙烷<sup>[18]</sup>等, 这些溶液毒性较大, 且为有机物, 氙灯辐照下分解风险比无机溶液较大, 不适合作为 RAP 钽玻璃叠片冷却方案的首选冷却液。无机溶液重水(D<sub>2</sub>O)和 FC-770 相关性质如表 1 所示。

由表 1 可知, 重水的折射率为 1.35, 热导率、比热容等性能均优于 FC-770, 但其光学击穿阈值低于 FC-770, 吸收系数较大, 具有吸水性且价格昂贵, 不易获取。FC-770 是一种电子氟化液, 对 1053 nm 激光吸收较低且无毒, 综合性能优越, 因此 FC-770 溶液为钽玻璃叠片冷却液的首选, 对其性质进行了实验研究。

表 1 FC-770 和重水溶液性质<sup>[19]</sup>  
Table 1 Properties of FC-770 and D<sub>2</sub>O<sup>[19]</sup>

Parameter	FC-770	D <sub>2</sub> O
Density / (10 <sup>3</sup> kg·m <sup>-3</sup> )	1.79	1.10
Water solubility / (mg·L <sup>-1</sup> )	0.0662	
Thermal conductivity / [W·(m·K) <sup>-1</sup> ]	6.3×10 <sup>-2</sup>	0.595
Dynamic viscosity / [kg·(m·s) <sup>-1</sup> ]	1.416×10 <sup>-3</sup>	1.12×10 <sup>-3</sup>
Refractive index	1.27	1.35
Temperature coefficient of refractive index	-4.2×10 <sup>-4</sup>	-8×10 <sup>-5</sup>
Optical breakdown threshold / (GW·cm <sup>-2</sup> )	100	10
Specific heat capacity / [J·(kg·°C) <sup>-1</sup> ]	1038	4200
Absorption coefficient (1064 nm) / m <sup>-1</sup>	2.0×10 <sup>-4</sup>	0.15
Pressure drop-viscosity / kPa	2.859	2.260
Temperature drop along channel / K	0.33	0.13
Price / (dollar·L <sup>-1</sup> )	158.73	374

#### 3.2 FC-770 溶液化学稳定性测试

采用 FC-770 溶液作为片框结构冷却液, 需要对溶液辐照化学稳定性进行测试。考虑冷却液的使用环境, 冷却液的透过率和折射率对 RAP 的增益及波前特性有较大影响。通常情况下, 如果溶液的

透过率在辐照后会发生变化,则透过率在短时间(5 min)内会产生较大的变化(29.80%)<sup>[18]</sup>,考虑测量仪器以及测试环境引起的误差,若较长时间辐照(氙灯辐照不小于 200 发次,1053 nm 激光辐照不小于 15 h)后冷却液的折射率及透过率变化率均小于

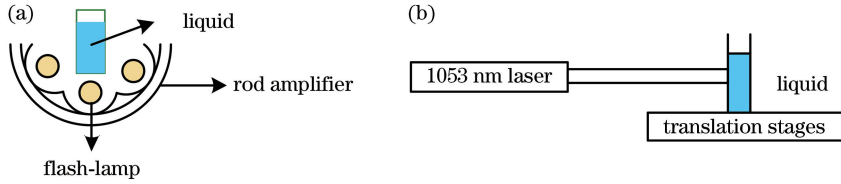


图 3 FC-770 化学稳定性测试。(a)耐氙灯辐照测试;(b)耐 1053 nm 激光辐照测试

Fig. 3 Test of chemical stability of FC-770. (a) Test under flash-lamp irradiation; (b) test under 1053 nm laser irradiation

如图 3(a)所示,氙灯的放电条件如下:辐照通量为  $10 \text{ J/cm}^2$ ,以每分钟一次的重复频率运行,共发射 200 次。使用分光光度计(精度为  $\pm 0.5\%$ )和椭偏仪(精度为  $\pm 0.25\%$ )测量 FC-770 溶液经辐照前后 1053 nm 处的透过率以及折射率,如表 2 所示,其中  $\Delta$  代表变化率。

表 2 氙灯辐照 200 发次前后 FC-770 溶液透过率及折射率值  
Table 2 Transmissivity and refractive index of the FC-770 before and after flash-lamp irradiation for 200 shots

Parameter	Before irradiation	After irradiation	$\Delta / \%$
Transmissivity (1053 nm)	0.92576	0.90366	2.3
Refractive index (1053 nm)	1.27437	1.26312	0.8

辐照前后溶液透过率及折射率的变化率  $\Delta$  分别为 2.3% 和 0.8%,均小于 3%,满足冷却液选型对折射率及透过率稳定性要求。

如图 3(b)所示,1053 nm 激光辐照实验条件如下:辐照通量为  $8.93 \text{ J/cm}^2$ ,频率为 1 Hz,辐照时间为 19 h。采用分光光度计和椭偏仪测试辐照前后 1053 nm 波段 FC-770 溶液的透过率和折射率,结果如表 3 所示。

表 3 1053 nm 激光辐照 19 h 前后 FC-770 溶液透过率及折射率

Table 3 Transmissivity and refractive index of the FC-770 before and after 1053 nm laser irradiation for 19 h

Parameter	Before irradiation	After irradiation	$\Delta / \%$
Transmissivity (1053 nm)	0.92576	0.91624	1.0
Refractive index (1053 nm)	1.27437	1.26373	0.8

3%,则认为其化学性质较为稳定。

将 FC-770 溶液放置于尺寸为  $10 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$  的 jgs1 石英比色皿中,分别进行溶液耐氙灯辐照以及耐 1053 nm 激光辐照实验。图 3 为 FC-770 化学稳定性测试的实验示意图。

辐照 19 h 后,溶液透过率和折射率的变化率分别为 1.0% 和 0.8%,均小于 3%,满足冷却液选型对折射率及透过率稳定性的要求。文献[18]中激光辐照后溶液透过率变化率(29.80%)明显大于折射率变化率,结合已完成的测试,后续将重点关注透过率的变化情况。

### 3.3 FC-770 溶液耐溶剂性实验

利用 FC-770 溶液作为片框结构冷却液,需要对溶液与钽玻璃及片框中的零部件(密封条、铝合金、铜、不锈钢材料、液管、螺钉)的耐溶剂性进行测试。结合冷却液的使用环境,材料在该溶液中浸泡较长时间(超过 20 d)后质量无明显下降(小于 3%),且浸泡材料 FC-770 溶液的透过率无明显变化(小于 3%),则认为溶液的耐溶剂性较好。将钽玻璃及片框中的零部件(密封条、铝合金、铜、不锈钢材料、液管、螺钉)分别编号为 1~7,采用精密天平对浸泡前后的零部件进行称重(精度为 0.0001 g),并对浸泡样品前后溶液透过率进行测量(钽玻璃浸泡 20 d,片框零部件浸泡 37 d),浸泡

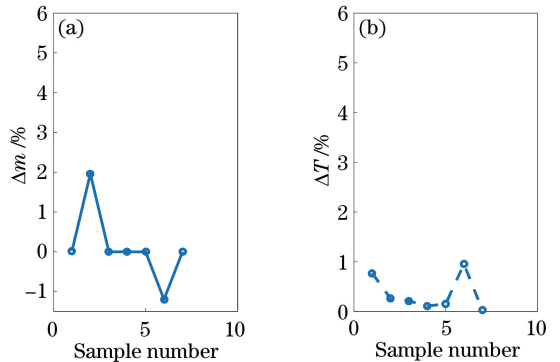


图 4 1~7 号样品浸泡前后的属性。(a)质量变化率;(b)透过率变化率

Fig. 4 Characteristics of samples 1-7 before and after immersing. (a) Change rate of mass; (b) change rate of transmissivity

前后材料质量变化率  $\Delta m$  及溶液透过率变化率  $\Delta T$  如图 4 所示。

1~7 号样品浸泡前后质量变化率及溶液透过率变化率均小于 3%，满足钽玻璃及片框零部件对冷却液选型的要求。根据以上三组 FC-770 溶液性质分析结果，认为 FC-770 溶液是一种可用于氙灯抽运钽玻璃重复频率放大器的优良冷却液。

## 4 性能测试

增益特性和波前特性是重复频率放大器样机的两个重要性能指标，经过单元部件测试后，对该样机

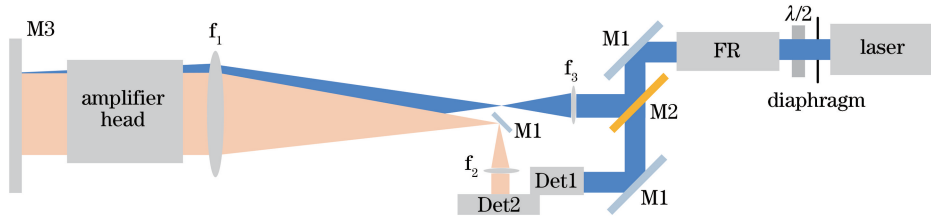


图 5 小信号增益特性测量光路示意图

Fig. 5 Diagram of light path for small signal gain measurement

不同主泵延迟下该 RAP 的小信号净增益  $G_0$ 。如图 6 所示。当主泵延迟为 190  $\mu s$  时，得到了最大双程小信号净增益，为 1.3189(主泵最佳延迟代表了氙灯抽运过程中反转粒子数最大的时刻，此时钽玻璃内部存储的能量最大，主激光通过增益介质提取的能量最多，获得的放大能力最强)。

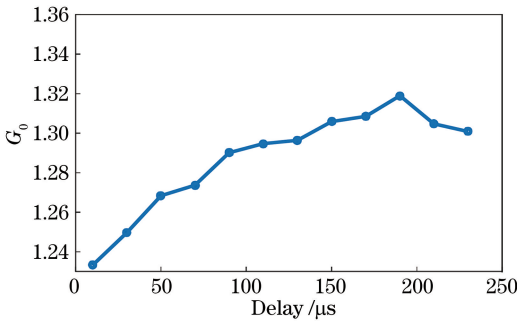


图 6 不同主泵延迟时的 RAP 双程小信号净增益  
Fig. 6 Net gain of RAP double-pass small signal under different main pump delay

### 4.2 动态波前测试

波前质量是激光器的另一个重要指标，影响激光系统的损伤特性、近场光斑均匀性以及远场焦斑能量集中度，热量积累条件下维持稳定的波前是 RAP 的必然前提。图 7 为本课题组搭建的波前测量实验的光路示意图，其中 M1 为 45°全反镜，M2 为 0°全反镜， $f_1$ 、 $f_2$  分别代表焦距为 4977 mm 和 175 mm 的透镜。将 1053 nm 连续点光源放置在长

的增益特性和波前特性进行实验研究。

### 4.1 增益特性测试

RAP 采用双程放大方式，测试口径为  $\Phi 130$  mm，测试采用 Continuum 公司的 1053 nm、10 Hz 激光器，该激光器输出线偏振光且全光斑能量为 50 mJ，脉冲宽度为 20 ns。图 5 为 RAP 增益特性的实验光路示意图，其中  $\lambda/2$  为半波片，FR 为法拉第隔离器，M1 为 45°全反镜，M2 为半透半反镜，M3 为 0°全反镜， $f_1$ 、 $f_2$ 、 $f_3$  分别代表焦距为 4977，175，150 mm 的透镜，Det1 和 Det2 分别为参考光探测器和信号光探测器。

焦透镜  $f_1$  的焦点处进行扩束，采用哈特曼传感器[测量精度为  $1/10\lambda$  ( $\lambda = 1053$  nm)]测量两次经过 RAP 的双程动态波前(动态波前去除静态波前)，测量口径为  $\Phi 110$  mm，测量过程中灯箱及片框冷却液处于循环工作状态。

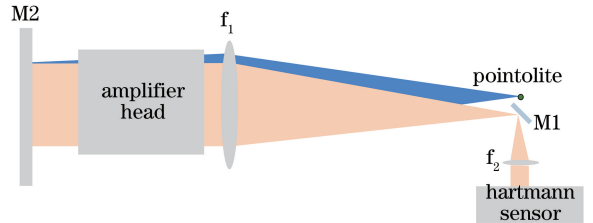


图 7 RAP 波前测量系统实验示意图

Fig. 7 Diagram of RAP wavefront measurement system

由于冷却液在不同温度下具有不同的流动特性，将冷却液温度控制在 20  $^{\circ}C$  和 30  $^{\circ}C$  对，10 发次重复频率运行时的双程动态波前 PV 值如图 8 所示。

由图 8 可知，10 发次实验中双程动态波前 PV 值均小于  $1\lambda$ 。当冷却液温度为 20  $^{\circ}C$  时，10 发次 PV 平均值为 0.2718 $\lambda$ ，方差为 0.0113；当冷却液温度为 30  $^{\circ}C$  时，10 发次 PV 平均值为 0.3223 $\lambda$ ，方差为 0.0059。根据测试结果可知，冷却温度越低，其 PV 平均值越小，使用较低温度的冷却液有利于散热，但 FC-770 溶液的黏性随着温度的降低而增加，导致其流动性变差，进而影响散热效率。虽然 PV

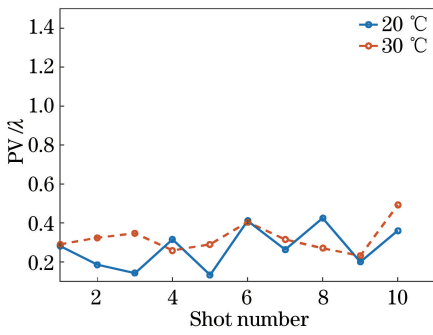


图 8 不同冷却液温度下 RAP 10 发次双程动态波前测量  
Fig. 8 Double-pass wavefront of RAP for 10 shots under different coolant temperatures

平均值较小,但其发次之间存在一定抖动,一方面需要在更多发次下观察波前变化情况,另一方面需要通过优化冷却参数提高波前质量的稳定性,并进一步减小 PV 值。冷却液参数对波前质量具有重要影响,冷却液参数优化原则如下:1)冷却液温度。冷却液温度会影响液体折射率、流动状态(黏稠度)、光学元件(隔板玻璃等)形变等,优化冷却液温度,在保证光束质量的前提下,提升放大器重复频率。2)冷却液流速和压力。理论上,增加流速可以提升散热速度,冷却液的流速与冷却水循环机压力有关,流速增大,需要的压力增大,引起的光学元件变形增大,对密封性要求也增大,因此需在满足密封性和元器件形变要求的前提下,优化冷却液的流速和压力。对于该重复频率激光放大器样机,在目前的构型下优化波前及增益是下一步工作的重点。

## 5 结 论

通过合理的结构设计及冷却液选型等,研制了一台通光口径为  $\Phi 130$  mm、氙灯抽运钕玻璃液体冷却激光放大器样机。采用该样机获得了 1.3189 倍双程小信号净增益,且双程动态波前 PV 平均值分别为  $0.2718\lambda$  和  $0.3223\lambda$ (相应的冷却液温度分别为  $20\text{ }^{\circ}\text{C}$  和  $30\text{ }^{\circ}\text{C}$ ),同时实现了 1 shot/min 重复频率运行,为研制更大口径的千焦耳量级输出分钟级重复频率激光系统提供了参考。通过有效控制抽运过程和放大过程中的热量累积,采用氙灯抽运钕玻璃液体冷却技术方案有望实现亚分钟级重复频率运行,在该样机结构上优化波前和增益是下一步工作的重点。

## 参 考 文 献

[1] Spaeth M L, Manes K R, Bowers M, *et al.* National ignition facility laser system performance[J]. Fusion

Science and Technology, 2016, 69(1): 366-394.  
 [2] Manson M G. The laser megajoule facility: personnel safety system [C] // International Conference on Accelerator and Large Experimental Control Systems, October 8-13, 2017, Barcelona, Spain. Geneva: JCoW Publishing, 2018: 994-996.  
 [3] Zheng Y X, Zhu J, Qian L J, *et al.* Investigation of “Shengguang- II ” main amplifier[J]. Chinese Journal of Lasers, 1996, 23(4): 289-294.  
 郑玉霞, 朱俭, 钱列加, 等. “神光- II ”主放大器的研制[J]. 中国激光, 1996, 23(4): 289-294.  
 [4] Zheng W G, He S B, Zhang X M, *et al.* Development progress for the amplifier of the SG-III laser facility[J]. Proceedings of SPIE, 1999, 3492: 586-591.  
 [5] Kramer K J, Latkowski J F, Abbott R P, *et al.* Neutron transport and nuclear burn up analysis for the laser inertial confinement fusion-fission energy (LIFE) engine[J]. Fusion Science and Technology, 2009, 56(2): 625-631.  
 [6] Bayramian A, Armstrong P, Ault E, *et al.* The mercury project: a high average power, gas-cooled laser for inertial fusion energy development [J]. Fusion Science and Technology, 2007, 52(3): 383-387.  
 [7] Banerjee S, Ertel K, Mason P, *et al.* DiPOLE: a multi-slab cryogenic diode pumped Yb : YAG amplifier [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 8780: 878006.  
 [8] Lucianetti A, Divoky M, Sawicka M, *et al.* HiLASE cryogenically-cooled diode-pumped laser prototype for inertial fusion energy [J]. Proceedings of SPIE, 2013, 8602: 860208.  
 [9] Rus B, Bakule P, Kramer D, *et al.* ELI-beamlines: progress in development of next generation short-pulse laser systems[J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10241: 102410J.  
 [10] Huang W F, Wang J F, Lu X H, *et al.* Thermal wavefront distortion compensation in gas cooled Nd: glass amplifier based on edge heating [J]. Chinese Journal of Lasers, 2017, 44(1): 0101001.  
 黄文发, 王江峰, 卢兴华, 等. 基于边缘加热的气冷钕玻璃放大器热波前畸变补偿[J]. 中国激光, 2017, 44(1): 0101001.  
 [11] Huang W F, Wang J F, Lu X H, *et al.* LD-pumped gas-cooled multislabs Nd: glass laser amplification to joule level [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6(2): e15.  
 [12] Albach D, Arzakantsyan M, Bourdet G, *et al.* Current status of the LUCIA laser system [J]. Journal of Physics: Conference Series, 2010, 244

- (3): 032015.
- [13] Huang T R, Huang W F, Wang J F, *et al.* High energy diode-pumped sapphire face-cooled Nd:glass multi-slab amplifier[J]. *Optics & Laser Technology*, 2018, 107: 415-423.
- [14] Hu L, Chen S B, Tang J P, *et al.* Large aperture N31 neodymium phosphate laser glass for use in a high power laser facility [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2014, 2: e1.
- [15] Papadopoulos D N, Zou J P, Le Blanc C, *et al.* The Apollon 10 PW laser: experimental and theoretical investigation of the temporal characteristics[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2016, 4: e34.
- [16] Gaul E, Chériaux G, Antipenkov R, *et al.* Hybrid OPCPA/glass 10 PW laser at 1 shot a minute[C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics: Science and Innovations 2018, May 13-18, 2018, San Jose, California, USA. Washington, D. C. : OSA, 2018: Stu# M.2.*
- [17] Perry M D, Banks P S, Zweiback J, *et al.* Laser containing a distributed gain medium: US6937629B2 [P/OL]. 2008-08-30[2019-03-15]. <https://patents.glgoo.top/patent/US6937629B2/en>.
- [18] Gui L. Research on a novel fluid state laser technology [D]. Shanghai: University of Chinese Academy of Sciences, 2013: 36-44. 桂路. 新型流体激光技术探索研究 [D]. 上海: 中国科学院大学, 2013: 36-44.
- [19] Todd D. Toward rep-rated kJ-class femtosecond 10 PW lasers[C] // *The 2nd International Symposium on High Power Laser Science and Engineering, March 15, 2016, Suzhou, Jiangsu, China. [S.l.: s.n.], 2016, oral talk.*