

# 中国激光

## 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器研究进展

付星<sup>1,2\*</sup>, 刘廷昊<sup>1,2</sup>, 雷新星<sup>1,2</sup>, 巩马理<sup>1,2</sup>, 柳强<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>清华大学精密仪器系, 北京 100084;

<sup>2</sup>光子测控技术教育部重点实验室, 北京 100084

**摘要** 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器(主要指单脉冲能量 10 J 以上, 脉冲重复频率 10 Hz 以上)在重大基础和应用研究领域发挥了重要的作用, 是科学研究的前沿热点之一。本文以叠片、激活镜、之字形板条三种放大构型为线索, 详细介绍了二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器的代表性成果和研究进展, 分析了激光器的优选技术路线, 并对未来的发展前景进行了展望。

**关键词** 激光器; 固体激光; 二极管泵浦; 高能激光; 重复频率纳秒激光

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202148.1501003

### 1 引言

大能量纳秒固体激光器具有单脉冲能量高、峰值功率高等突出特点, 在工业、科研、国防、医学等众多领域中备受青睐。长期以来, 闪光灯泵浦纳秒固体激光器得到广泛应用, 发挥了举足轻重的作用<sup>[1-3]</sup>。然而, 灯泵激光器具有效率低的固有缺陷, 而且工作重复频率提升严重受限。在高重复频率体制下, 灯泵的低成本优势因其缺点而消失殆尽: 低泵浦效率伴随大量废热和电能消耗、光束质量差、闪光灯使用寿命短导致维护频繁等。与之相比, 二极管泵浦的固体激光器(DPSSL)在重复频率纳秒体制下可实现“六高”运转: 高平均功率、高峰值功率、高重复频率、高效率、高光束质量、高可靠性, 能够更好地满足应用需求, 并且拓展出更多的应用场景。

本文讨论的高能固体激光系统主要集中于: 已实现或计划实现单脉冲能量 10 J 以上、脉冲重复频率 10 Hz 以上、脉冲宽度为纳秒量级的 DPSSL。此类高能激光系统在近二十年间兴起并蓬勃发展, 其综合性能指标优异、技术先进而且难度大、受关注程度高、应用需求强烈迫切, 应用领域包括但不限于: 1) 作为惯性约束核聚变(ICF)的下一代激光驱动

源<sup>[4-5]</sup>, 进而发展激光聚变能电站, 该目标是美国惯性聚变能源计划(LIFE)<sup>[6-7]</sup>、欧洲高功率激光能源研究(HiPER)<sup>[8-9]</sup>、日本终极高能激光产生装置(GENBU)<sup>[10]</sup>等多个重大项目的共同愿景, 要求激光器的能量提升至单束 kJ 级以上, 插头效率大于 15%, 运转重复频率在 10 Hz 以上; 2) 利用强激光创造出类似于天体环境的高能量密度(HED)物质状态<sup>[11]</sup>, 从而探索、揭示极端条件下物质的新结构和新特性, 欧洲极端光学重大科技基础设施(ELI)<sup>[12]</sup>、欧洲 X 射线自由电子激光装置(XFEL)<sup>[13]</sup>等项目围绕该目标进行了系统规划; 3) 作为泵浦源驱动飞秒拍瓦级固体激光器, 产生高重复频率拍瓦脉冲<sup>[14]</sup>, 实现高效紧凑的 X 射线、 $\gamma$  射线等辐射源<sup>[15-16]</sup>, 可激发粒子源(电子、质子、离子等)的产生和加速<sup>[17-19]</sup>等, 开展基础科学研究的同时还可造福于癌症靶向治疗、成像探测、放射性废料转化等诸多应用<sup>[20-22]</sup>; 4) 工业领域以激光冲击强化为典型应用, 高重复频率高能纳秒激光可显著提升航空发动机叶片、核反应堆元器件等关键材料的疲劳寿命, 增强抗应力腐蚀、抗裂纹、抗磨损等性能<sup>[23]</sup>。

本文梳理了国内外已有、在研的重复频率纳秒高能 DPSSL 系统, 首先围绕增益介质、放大构型,

收稿日期: 2021-03-15; 修回日期: 2021-04-02; 录用日期: 2021-04-08

基金项目: 国家万人计划青年拔尖人才支持计划、中国科协青年人才托举工程、北京市优秀人才培养资助(2017000020124G044)、中国兵器工业集团有限公司激光器件技术重点实验室开放基金资助

通信作者: \*fuxing@mail.tsinghua.edu.cn

分析此类系统主放大级的优选技术路线,然后以叠片、激活镜、之字形板条三种构型为线索,详细介绍重复频率纳秒高能 DPSSL 代表性成果的关键技术和研究进展。最后展望该系统技术的发展前景。

## 2 技术路线分析与思考

### 2.1 增益介质

重复频率纳秒高能 DPSSL 均采用主振荡功率

放大(MOPA)技术路线,在保持较高光束质量的同时,种子级输出的单脉冲能量通过助推级、预放大级、主放大级等多个环节逐步提升,其中主放大级是最核心的单元。

增益介质方面,表 1 比较了高能激光典型增益介质的参数。对于数十焦耳以上重复频率纳秒高能 DPSSL 的主放大级,建议首选具有中等饱和通量的激光增益材料。

表 1 高能激光系统典型增益介质参数对比

Table 1 Parameter comparison of typical gain media of high energy laser system

Gain medium	Saturation fluence / ( $\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$ )	Radiative lifetime /ms	Thermal conductivity / ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ )	Emission wavelength /nm
Yb:YAG (RT)	9.6	0.95	14.00	1030
Yb:YAG (CR)	4.3	1.00	16.60	1030
Yb:S-FAP (RT)	3.0	1.10	2.00	1047
Nd:glass (APG-1, RT)	5.8	0.39	0.83	1053
Nd:LuAG (RT)	1.9	0.28	9.60	1064
Nd:YAG (RT)	0.6	0.23	14.00	1064

(Note: RT is room temperature, CR is cryogenic temperature)

一方面,以室温运转的 Yb:YAG(饱和通量约为  $9.6 \text{ J/cm}^2$ )为典型代表的高饱和通量介质不宜选用,有如下两点原因:1)饱和通量接近膜系损伤阈值,为了降低风险需控制输出通量显著低于饱和通量,因而导致提取效率受限;为了尽可能提升效率,需采用复杂的像传递及多通复用结构进行光束多程提取;2)需要高亮度泵浦以获得较高增益水平,例如 LUCIA 主放大级的泵浦密度高达  $20 \text{ kW/cm}^2$ <sup>[24]</sup>。代价一是需设计搭建复杂的泵浦耦合系统;代价二是产生了较高热负载,恶化光束质量、限制运转重复频率。目前 LUCIA 系统的工作重复频率限制在 2 Hz。

另一方面,以 Nd:YAG(饱和通量约为  $0.62 \text{ J/cm}^2$ )为典型代表的低饱和通量介质也不宜选用。大能量脉冲激光放大链中,单个增益模块的储能表达式为  $E_{st} = g_0 VE_{sat}$ ,其中  $g_0$  为小信号增益系数, $V$  为增益介质体积, $E_{sat}$  为增益介质的饱和通量。为了抑制放大自发辐射(ASE)及其寄生振荡导致的退泵浦效应, $g_0$  不宜过高,而且低增益水平也有利于获得高提取效率;同时, $V$  的扩展也受限(增益介质的横向尺寸受 ASE 限制,厚度受散热能力限制),因而为了获得单个增益模块较高的储能  $E_{st}$ ,饱和通量  $E_{sat}$  不宜过低。若百焦耳主放大级选用了 Nd:YAG 这一类低饱和通量介质,单片的低储能

使得所需增益模块数目骤增,被动地扩大了系统规模和复杂度;同时,过多放大级数会引入非常可观的静态损耗,大幅度降低系统效率。

根据以上分析,数十焦耳以上的重复频率纳秒高能 DPSSL 宜选用具有中等饱和通量的增益介质,再加入光学、机械、热力学等综合性能的考量,满足条件的候选材料极为有限。英国 DiPOLE<sup>[25]</sup>、法国 LUCIA(在研的 30 J 级<sup>[26]</sup>)、日本大阪大学(multi-TRAM<sup>[27]</sup>、CcAMA<sup>[28]</sup>)、滨松集团装置<sup>[29]</sup>等多个高能激光系统均选用了超低温运转的 Yb:YAG,美国 Mercury 系统<sup>[30]</sup>选用了 Yb:S-FAP,美国 HAPLS(泵浦子系统<sup>[31]</sup>)和日本 HALNA<sup>[32]</sup>系统选用了磷酸盐钕玻璃,清华大学本研究团队选用了 Nd:LuAG<sup>[33]</sup>。四种增益介质横向对比而言,钕玻璃和 Yb:S-FAP 的热导率偏低,提升重复频率的难度较大,而且 Yb:S-FAP 生长制备尺寸受限,使得 Mercury 项目未达到预定指标而中止;面向持续跃升的高重复频率、高平均功率输出目标,超低温运转的 Yb:YAG 和室温运转的 Nd:LuAG 具有相对更大的发展空间和发展潜力。

### 2.2 放大构型

重复频率纳秒高能 DPSSL 主放大级的三种优选构型分别为:叠片、激活镜和之字形板条,如图 1 所示(泵浦光未示出)。

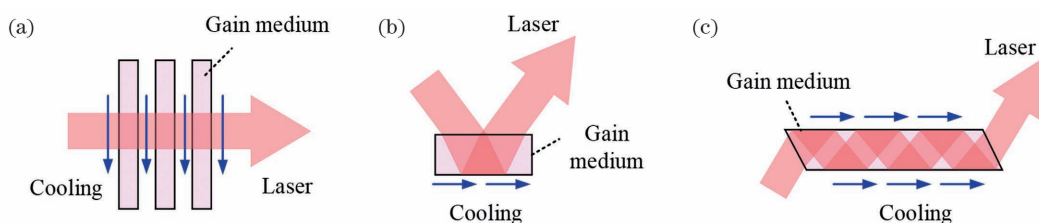


图 1 重复频率纳秒高能 DPSSL 主放大级优选构型示意图。(a)叠片;(b)激活镜;(c)之字形板条

Fig. 1 Preferred geometries of main amplifier in high energy rep-rated nanosecond DPSSL. (a) Multi-slab; (b) active mirror; (c) zigzag slab

叠片构型的示意图如图 1(a)所示,液相或气相冷却介质从多个平行放置的板条型增益介质间隙中高速流过,以强制对流换热带走板条表面的热量,泵浦光束与提取光束共轴传输。该构型的优点包括:1)可实现接近理想的激光/泵浦光模式匹配效率,有利于提高对储能的提取效率;2)产热密度最高的泵浦面被直接冷却,展现出高效散热能力;3)热梯度沿光轴方向,有利于控制光束质量。然而,该构型中激光通过冷却流体,如何克服流体折射率分布的变化导致的光束波前畸变<sup>[34-35]</sup>是一大难点。

激活镜构型如图 1(b)所示,板条型增益介质的一个大面作为反射镜,使激光光束以 V 字形折叠光路提取增益介质的储能,该反射面同时作为增益介质的泵浦、冷却窗口,可实现高效的对流换热冷却或热沉传导冷却(有些激活镜选用另外一个大面泵浦,避免了反射面镀制双色膜,但影响了散热能力<sup>[24]</sup>)。

该构型的优点包括:1)光束单次通过增益模块即实现双程提取,结构紧凑、提取效率高;2)冷却流道与激光光路分离,避免流体对波面的影响;3)可实现泵浦光与 V 字形激光模式的高匹配效率;4)热梯度近似沿光轴方向。该构型的不足是只有一个大面散热,需要着力消除强热条件下激活镜变形对输出的影响。

之字形板条构型如图 1(c)所示,激光光束被全内反射约束在板条内部,以之字形光路传输并提取储能。该构型可看作多个激活镜串接的产物,不仅具有激活镜提取效率高、结构紧凑等优点,而且两个大面都可以作为泵浦和散热的窗口,但同时也增加了结构的复杂度,需重点解决温度场不均匀性及其衍生热效应、未被之字形光路提取区域的储能利用等问题。

表 2 列举了重复频率纳秒高能 DPSSL 近二十年来的代表性研究成果。

表 2 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器的代表性研究成果

Table 2 Representative achievements of high energy repetition rate nanosecond DPSSL

Geometry	Project	Energy, repetition rate	Year	Gain medium (wavelength)	Cooling temperature	Passage number	Reference
Multi-slab	Mercury	61 J, 10 Hz	2006	Yb:S-FAP (1047 nm)	RT, helium gas	4	[30]
	DiPOLE	105 J, 10 Hz	2017	Yb:YAG (1030 nm)	150 K, helium gas	4	[25]
	HAPLS	97 J, 3.3 Hz	2019	Nd:glass (1053 nm)	RT, helium gas	4	[31]
	Hamamatsu	117 J, 0.05 Hz	2017	Yb:YAG (1030 nm)	175 K, helium gas	2	[29]
Active mirror	LUCIA	14 J, 2 Hz	2013	Yb:YAG (1030 nm)	RT, water	4	[24]
	CcAMA	9.3 J, 33.3 Hz	2021	Yb:YAG (1030 nm)	78 K, liquid nitrogen	2	[28]
	DAMAC	100 J, 10 Hz	2021	Nd:LuAG (1064 nm)	RT, water	2	-
	CAEP	12 J, 10 Hz	2019	Nd:YAG (1064 nm)	RT, water	2	[36]
Zigzag slab	HALNA	21.3 J, 10 Hz	2008	Nd:glass (1053 nm)	RT, water	4	[32]
	CAS	5 J, 200 Hz	2017	Nd:YAG (1064 nm)	RT, water	2	[37]

### 3 叠片构型激光器进展

#### 3.1 美国 Mercury

Mercury 激光系统由美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)主持建造,为重复频率体制的 ICF 激光驱动源设计开展了先期的技术探索和验证<sup>[38-40]</sup>。该系统面向 100 J, 10 Hz, 10 ns 的设计目标,最高获得了单脉冲能量 61 J、重复频率 10 Hz、脉宽 15 ns、波长 1047 nm 的脉冲输出,系统光光效率约为 7.6%<sup>[30]</sup>。

Mercury 系统的前端产生 550 mJ 种子光束,通过离轴像传递和角度复用方法,四程通过主放大级。主放大级包括 2 个增益模块,每个增益模块中含有 7 片平行放置的 Yb:S-FAP 板条<sup>[41-42]</sup>,各板条的掺杂浓度由两侧向中间逐片增大,通过梯度掺杂技术实现了各片较为一致的储能和产热密度。Yb:S-FAP 板条的尺寸为 40 mm × 60 mm × 7.5 mm,相邻板条间隔为 1 mm。每个增益模块由

4 组峰值功率 100 kW、中心波长 900 nm 的激光二极管(LD)阵列从两侧泵浦,每个 100 kW 阵列输出的泵浦光束先后经过导光锥和光束匀化器,实现高亮度均匀分布。

Mercury 增益模块采用了创新的室温高速气冷叠片构型,如图 2 所示<sup>[43]</sup>,氦气流以 0.1 Ma(1 Ma=340.3 m/s)的速度流过 Yb:S-FAP 板条的两个大口径通光面(亦为泵浦面)实现高效散热。研究人员针对泵浦均匀性、流场均匀性、增益介质横向热传导等多个方面开展了参数优化和控制,并通过实验验证:该构型可实现极低的波前畸变。如图 3 所示<sup>[43]</sup>,在 900 μs 脉宽、满功率泵浦下,单个放大器热致波前畸变的峰谷值约为 1 个波长(与理论仿真结果非常吻合),整个系统的波前畸变约为 8 个波长。采用含 41 个致动器、10 cm 口径的压电变形镜校正静态和热致动态畸变,光束质量可控制在 4.5 倍衍射极限。高速气冷叠片结构这一经典设计被此后的多个重复频率高能激光系统借鉴、效仿。

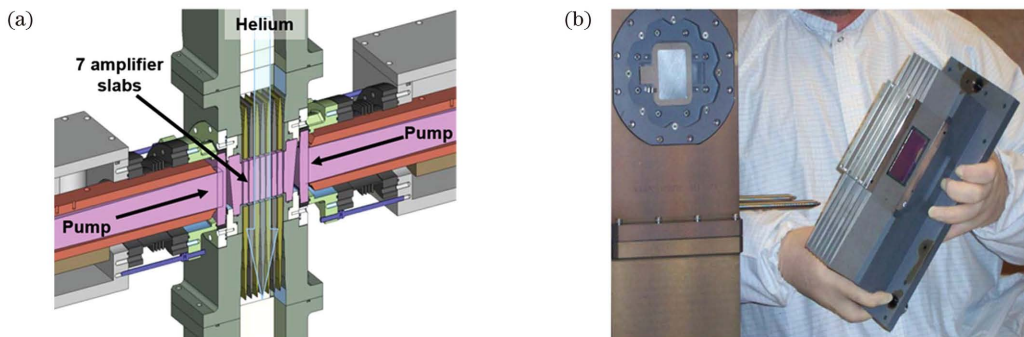


图 2 Mercury 室温高速气冷叠片构型设计<sup>[43]</sup>。(a)示意图;(b)实物照片

Fig. 2 Mercury multi-slab design with room temperature high speed gas cooling<sup>[43]</sup>. (a) Schematic; (b) photo

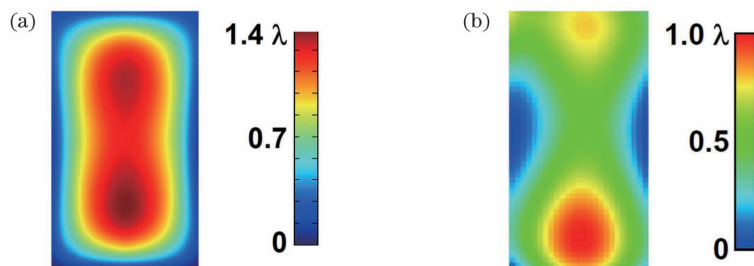


图 3 Mercury 系统单增益模块的热致波前畸变<sup>[43]</sup>。(a)仿真结果;(b)实验结果

Fig. 3 Thermally induced wavefront aberration of single gain module in Mercury main amplifier<sup>[43]</sup>. (a) Simulated result; (b) experimental result

#### 3.2 英国 DiPOLE

英国卢瑟福阿普尔顿国家实验室和捷克 HiLASE 激光中心合作建造了 LD 泵浦的 DiPOLE 高能激光系统。2015 年和 2016 年分别报道了 10.8 J, 10 Hz<sup>[44]</sup>和 107 J, 1 Hz<sup>[45]</sup>的输出结果,2017 年刷新了大能量纳秒脉冲激光器平均功率的世界纪

录并保持至今——平均功率 1.05 kW (105 J, 10 Hz, 10 ns),光光效率达到 22.5%。这是世界上首个平均功率 kW 级的高能 DPSSL<sup>[25]</sup>。

DiPOLE 系统包括三部分:前端、10 J 预放大级、100 J 主放大级。前端种子源为基于 Yb 掺杂光纤的振荡器,产生中心波长 1029.5 nm 的温度可调

谐窄线宽(70 kHz)连续输出,再通过声光调制器斩波,实现重复频率 10 kHz、脉宽 150 ns。输出光束依次经过多级光纤放大、宽带电光调制器、Yb:CaF<sub>2</sub>再生放大器(170 次往返,能量从 nJ 级放大至 4.5 mJ)、Yb:YAG 八通助推放大级(LD 泵浦峰值功率 1.8 kW),获得了脉宽 2~10 ns、时域任意波形可调、单脉冲能量 150 mJ、脉冲重复频率 10 Hz、21.5 mm 方形口径超高斯分布光束输出。10 J 预放大级由两个 940 nm 的 LD 阵列泵浦,每个阵列的最高峰值功率为 29 kW,脉宽 1 ms,重复频率 10 Hz。33.6 J 泵浦下 62 mJ 种子光被放大至 9.1 J,光光效率 27%。主放大级的泵浦源同样由两个 940 nm 的 LD 阵列构成,每个阵列最高峰值功率为 280 kW,脉宽 1.2 ms,重复频率 10 Hz,最大可用泵浦能量超过 650 J。纵向发散角 5°,横向发散角 2.5°,增益介质处方形泵浦口径为 79 mm,具有较高的均匀度,均方根(RMS)值小于 5%。预放大级和主放大级分别采用七通和四通的结构,方形提取光束的口径分别为 21.5 mm 和 75 mm,输出通量均控制在 2 J/cm<sup>2</sup> 以防止光学损伤。

增益介质方面,10 J 预放大级采用四片  $\Phi 55 \times$

5 mm 的 Yb:YAG 陶瓷,中心  $\Phi 45$  mm 为 Yb:YAG 增益区域,掺杂原子百分比为外侧两片 1.1%、中间两片 2.0% 从而实现轴向较均匀的增益和热负载;外围设置宽度 5 mm 的 Cr:YAG 包边以减小 ASE 并抑制寄生振荡。100 J 放大级采用六片 120 mm  $\times$  120 mm  $\times$  8.5 mm Yb:YAG 陶瓷作为增益介质,如图 4(a)所示,中心 100 mm  $\times$  100 mm 为 Yb:YAG 增益区,掺杂原子百分比为 0.4%、0.6%、1% 各 2 片,外围区域为宽度 10 mm 的 Cr:YAG 包边。冷却方面,预放大级和主放大级均采用了类似于 Mercury 系统的高速气冷叠片构型,如图 4(b)所示,但氦气流工作在超低温,而非室温条件。温度 150 K 的氦气流从平行放置的多片 Yb:YAG 增益介质间隙中流过,对通光面进行直接冷却,流道宽度分别为 1.5 mm 和 2 mm,氦气流的温度由液氮换热器控制调节。研究人员围绕 DiPOLE 系统的各环节效率优化<sup>[46]</sup>、热效应分析<sup>[47]</sup>、ASE 效应抑制<sup>[48]</sup>、晶体陶瓷性能比较<sup>[49]</sup>等主题开展了全面系统的建模分析与实验检验。图 5 展示了主放大级单模块(6 片陶瓷)在泵浦能量 377 J, 10 Hz,氦气质量流量 180 g/s 的条件下,不同输入偏振态对应的输出热退偏图样。

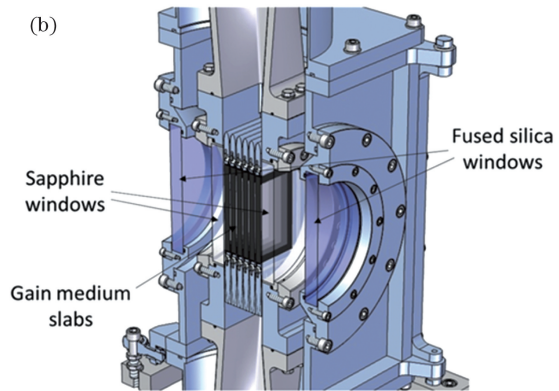
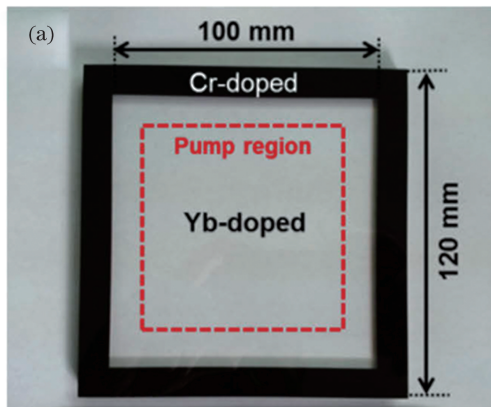


图 4 DiPOLE 系统主放大级增益模块<sup>[47]</sup>。(a)大口径 Yb:YAG/Cr:YAG 陶瓷;(b)超低温气冷叠片结构

Fig. 4 Gain module of DiPOLE main amplifier<sup>[47]</sup>. (a) Large-aperture Yb:YAG/Cr:YAG ceramic; (b) multi-slab amplifier head with cryogenic gas cooling

DiPOLE 主放大级在种子注入能量 6 J、泵浦能量 465 J 的情况下,实现了 105 J, 10 Hz, 10 ns 输出(1 h 的能量稳定性为 RMS 1%),光光效率为 22.5%。远场光斑中心主瓣的水平和垂直方向发散角分别为 28  $\mu$ rad 和 20  $\mu$ rad,对应的光束质量分别为 2.3 和 1.7 倍衍射极限。100 J 级 DiPOLE 系统的第一台装置(Bivoj/DiPOLE100)安装在捷克 HiLASE 中心,台面尺寸为 18 m  $\times$  2.5 m,自由空间传播的光程超过 100 m;第二台装置

(DiPOLE100X)服务于欧洲 XFEL,总体布局从一字型折叠为 U 字型<sup>[50]</sup>,结构更加紧凑,如图 6 所示。DiPOLE 系统进一步升级的目标包括:1)脉冲重复频率提升至 100 Hz;2)脉冲能量提升至 150 J;3)可见光、紫外波段频率变换;4)系统紧凑化;5)基于皮秒前端的直接啁啾放大<sup>[51]</sup>等。针对以上目标,DiPOLE 团队在 2019、2020 年分别报道了 120 J, 1 Hz, 光光效率 33%<sup>[52]</sup> 和 150 J, 1 Hz, 光光效率 26%<sup>[53]</sup> 的最新输出结果。10 J, 100 Hz 的原型系

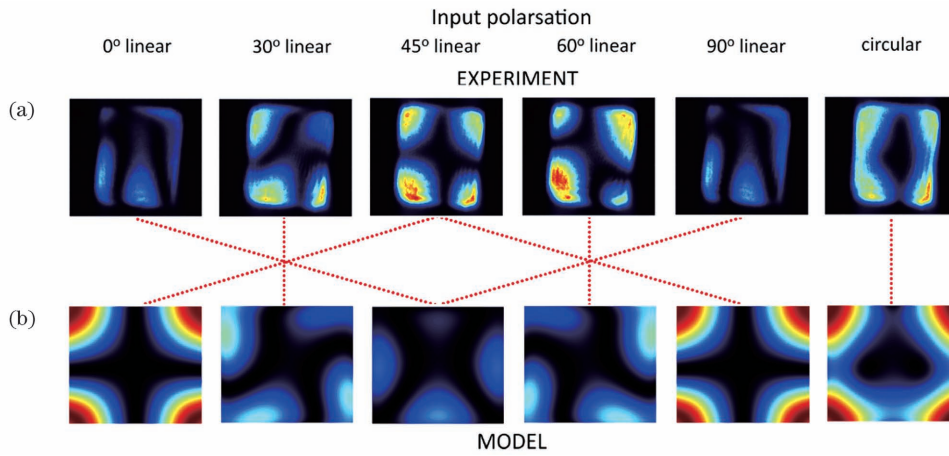


图 5 不同输入偏振态对应的输出热退偏图样。(a)实验结果;(b)仿真结果<sup>[47]</sup>

Fig. 5 Output thermal depolarization patterns corresponding to different input polarization states. (a) Experimental results; (b) simulation results<sup>[47]</sup>

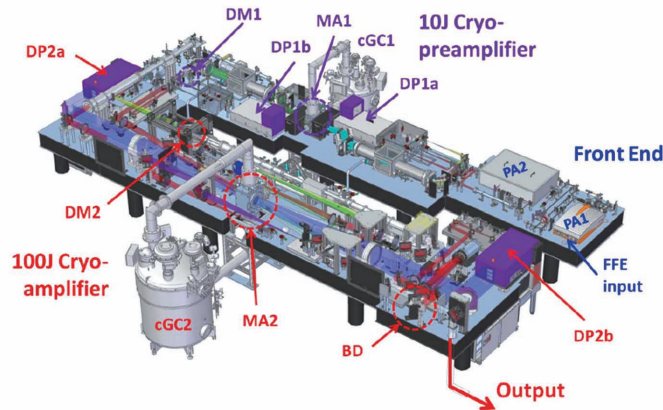


图 6 DiPOLE100X 的全系统结构示意图<sup>[50]</sup>

Fig. 6 Schematic of DiPOLE100X system<sup>[50]</sup>

统也在设计、搭建中<sup>[54]</sup>。

### 3.3 美国 HAPLS(泵浦子系统)

LLNL 研制的 HAPLS 系统全称为高重复频率先进拍瓦激光系统,是欧洲 ELI 装置的 L3 束组<sup>[55]</sup>,

全系统示意图如图 7 所示。HAPLS 系统的设计目标是输出能量大于 30 J 的拍瓦脉冲,脉宽小于 30 fs,重复频率 10 Hz,预计建成后将成为世界上平均功率最高的拍瓦激光系统,每小时产生 1.1 MJ 能量<sup>[56]</sup>。

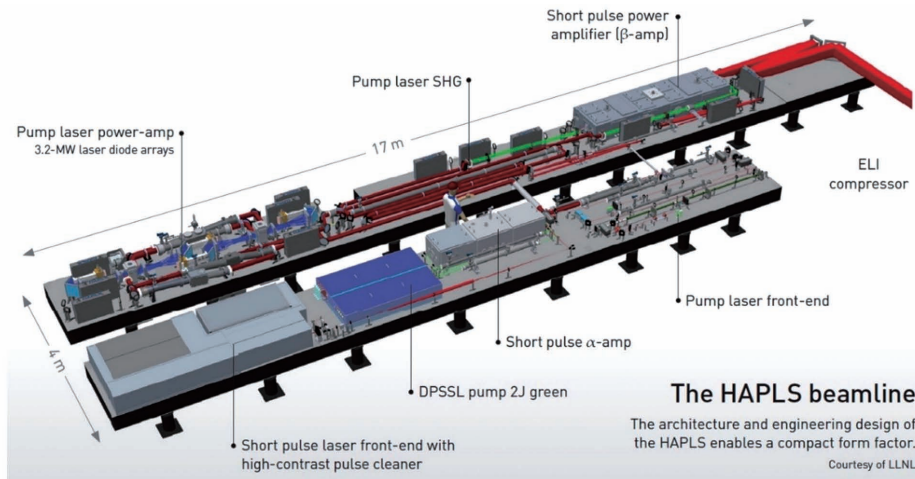


图 7 HAPLS 的全系统结构示意图<sup>[55]</sup>

Fig. 7 Schematic of HAPLS system<sup>[55]</sup>

本文重点关注 HAPLS 的泵浦激光子系统,它采用重复频率纳秒 DPSSL 体制<sup>[31]</sup>,目标是产生 200 J,10 Hz,1053 nm 的基频激光,进一步通过低吸收、大口径三硼酸锂(LBO)晶体倍频后,作为主激光链路中钛蓝宝石的泵浦源以产生 30 J 的飞秒脉冲;另一方面,仅采用泵浦子系统的 200 J 脉冲输出,也可以开展 HED 实验。

泵浦子系统的 500 mJ 种子脉冲被时域调制后产生 20 ns 方波,经过预放大级的 Nd:YLF 线性再生放大器和环形再生放大器,能量提升至 1 J,10 Hz。主放大级继承了该单位 Mercury 系统的叠片构型和室温高速氦气冷却技术,但是增益介质由 Mercury 的 Yb:S-FAP 更换为掺钕的 APG-1 玻璃板条,并采用固态包边抑制寄生振荡。泵浦源采用高功率智能激光二极管系统(HILADS)<sup>[57]</sup>,该系统由 LLNL 和 Lasertel 公司合作开发,是目前全球峰值功率最高、亮度最高的脉冲 LD 阵列系统,实物照片如图 8 所示<sup>[58]</sup>。每个 HILADS 输出最高峰值功率约 800 kW、泵浦脉宽 300 μs、重复频率 20 Hz、泵浦区域为 5.6 cm×13.8 cm。主放大级的两个钕玻

璃增益模块各由四个 HILADS 提供泵浦能量,放大构型采用四通、角度复用、被动偏振调制结构。2016 年,HAPLS 的泵浦子系统实现了 70 J,3.3 Hz 的输出结果<sup>[59-60]</sup>。2017 年实现了基频 97 J,3.3 Hz 的输出<sup>[61]</sup>,RMS 稳定性为 0.74%;传输至钛蓝宝石处的二倍频单脉冲能量为 62 J。如图 9 所示,主激光链路实现了 16 J 输出,RMS 稳定性为 2.4%,斜率效率为 50%,平均脉冲宽度为 28.6 fs<sup>[61-62]</sup>。

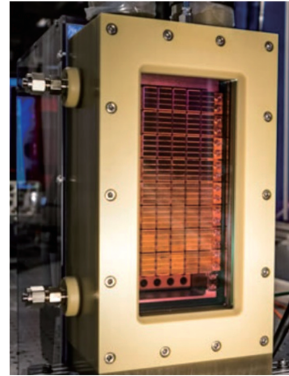


图 8 泵浦阵列 HILADS 的实物照片<sup>[58]</sup>  
Fig. 8 Photo of HILADS pump array<sup>[58]</sup>

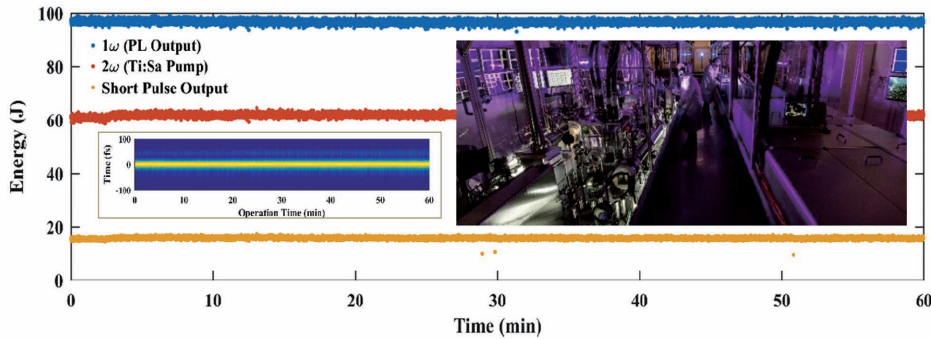


图 9 基频、倍频泵浦光与短脉冲主激光输出曲线<sup>[61]</sup>(插图:输出时域稳定性曲线和激光器工作照片)  
Fig. 9 Fundamental frequency, frequency doubled pump light and short pulse main laser output curve<sup>[61]</sup>  
(inset: output pulse shape stability curve and photo of operating laser)

### 3.4 日本滨松

日本滨松集团面向激光加工应用,研制 100 J,10 Hz 纳秒激光系统<sup>[63]</sup>。2017 年和 2019 年分别报道了 64 J,0.05 Hz<sup>[64]</sup>和 117 J,0.05 Hz<sup>[29,65]</sup>的输出结果。全系统结构如图 10 所示。种子光束指标为 5 J,40 ns,0.05 Hz,依次通过预放大级的两个双通模块和主放大级两个双通放大器。预放大级采用激活镜构型<sup>[66-67]</sup>,八片 Yb:YAG 陶瓷通过四个制冷机降温至 100 K,这一级的总泵浦能量超过 80 J。主放大级的尺寸为 9.2 m×1.5 m。采用叠片构型的每个放大模块有六片 Yb:YAG 陶瓷,直径 120 mm,厚度 10 mm,外围有宽度

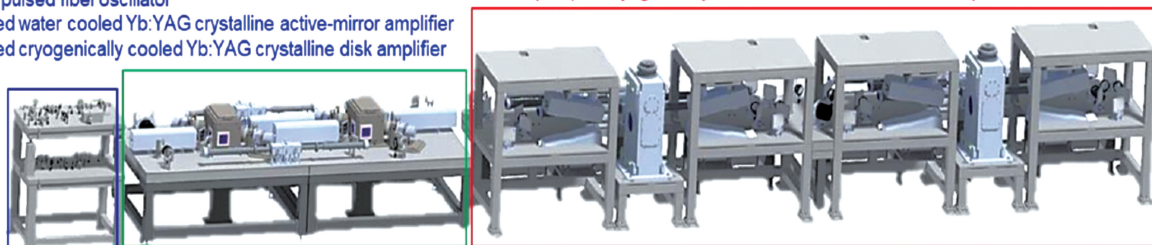
7 mm 的 Cr:YAG 陶瓷包边。六片陶瓷从两侧到中间的掺杂原子百分比分别为 0.5%,0.7%,1.0%。采用四个 LD 阵列斜泵浦,每个阵列输出能量 100 J,泵浦区域为 82 mm×75 mm。窗口采用 c 轴切割、直径 150 mm 的蓝宝石。氦气的压力为 1~5 atm(1 atm=1.013×10<sup>5</sup> Pa),温度调节范围为 150~300 K,循环系统实物照片如图 11 所示<sup>[68]</sup>。该系统在 895 J 泵浦条件下实现了 117 J 输出,光光效率为 12.5%,输出能量通量为 2.68 J/cm<sup>2</sup>。该系统的泵浦源具备 10 Hz 的输出能力,下一步的目标是将全系统的脉冲重复频率提升至 10 Hz。

**Frontend system**

- Arbitrarily pulsed fiber oscillator
- LD pumped water cooled Yb:YAG crystalline active-mirror amplifier
- LD pumped cryogenically cooled Yb:YAG crystalline disk amplifier

**Main-amplifier system**

- LD pumped cryogenically cooled Yb:YAG ceramic disk amplifier



**Pre-amplifier system**

- LD pumped cryogenically cooled Yb:YAG ceramic active-mirror amplifier

图 10 滨松 100 J 级系统设计<sup>[29]</sup>

Fig. 10 Layout of 100 J Hamamatsu system<sup>[29]</sup>



图 11 超低温氦气循环冷却系统照片<sup>[68]</sup>

Fig. 11 Photo of the cryogenic He-gas circulation cooling system<sup>[68]</sup>

## 4 激活镜构型激光器进展

### 4.1 法国 LUCIA

法国巴黎综合理工大学的 LULI 实验室研制了 LUCIA 二极管泵浦固体激光系统,目标同样是实现 100 J, 10 Hz, 10 ns 的激光输出。振荡级采用腔倒空方式产生 0.5 mJ, 10 Hz 的种子激光,经过两个 Yb:YAG 四通预放大级( $\Phi 30 \times 3$  mm, 掺杂原子百分比为 2%), 输出 500 mJ, 2 Hz, 最后经过四通主放

大级。预放大级和主放大级均采用单侧液冷的激活镜构型。

主放大级的泵浦源为包含 88 个叠阵的 LD 阵列,每个叠阵有 25 根巴条,单阵列的泵浦能量为 264 J。如图 12 所示,泵浦耦合装置中慢轴方向由多个不同倾角的棱镜会聚,快轴方向由两块铝反射镜限制,可实现  $20 \text{ kW/cm}^2$  的均匀泵浦密度。主放大级的第一个增益模块为室温运转、射流冷却,2013 年分别采用 2% 掺杂、 $\Phi 60 \times 7$  mm 的 Yb:YAG 晶

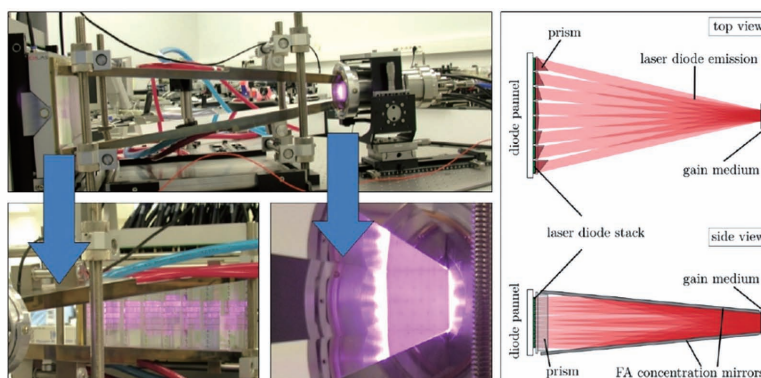


图 12 LUCIA 系统的泵浦耦合装置照片和原理图<sup>[24]</sup>

Fig. 12 Photo and schematic of pump coupling device of LUCIA system<sup>[24]</sup>



体和 2% 掺杂、 $\Phi 45 \times 7$  mm 的 Yb:YAG 陶瓷获得了 13.7 J 和 13.9 J 的 2 Hz 输出<sup>[24]</sup>, 输出脉宽为 8 ns。实验中仅使用 41 个泵浦叠阵, 在增益介质表面形成 50 mm  $\times$  26 mm 的矩形泵浦区域, 其中 30 mm  $\times$  26 mm 中心区域的泵浦密度为 11 kW/cm<sup>2</sup>。主放大级的提取光束直径为 20 mm, 根据总储能(超过 100 J)估算提取效率为 13%。研究人员针对激活镜构型的 ASE 效应和热效应, 开展了详细的建模与分析<sup>[69-71]</sup>。

为了将输出能量提升至 30 J 级, 主放大级的第二个增益模块计划采用 100~200 K 超低温运转, 可大幅度降低泵浦光强, 同时增大提取效率<sup>[26]</sup>。为此, LULI 实验室创新地提出了静态气冷方法<sup>[72-73]</sup>, 区别于 Mercury、DiPOLE、HAPLS 等系统采用的动态高速气体对流换热方法; 利用低压强(小于 1 bar)、百微米厚度的密封静态氦气薄层, 将热量从激活镜的高反射面传导至 77 K 冷却的铜热沉。实验表明, 通过微调气压水平(1~10 mbar)能够实现激活镜温度在 130~190 K 范围的调节<sup>[74]</sup>。该方法避免了晶体高反射膜层直接接触粘胶、冷却流体等, 从而提升了全反射膜层的使用寿命和可靠性。

Yb:YAG 在超低温运转的主要难点是 ASE 效

应的抑制。利用室温条件下 Yb:YAG 在激光波长 1030 nm 处的重吸收效应, 未被泵浦的晶体外围区域可发挥 ASE 包边的作用, 有效抑制横向寄生振荡<sup>[75-76]</sup>。然而, 这一重吸收效应在温度低于 150 K 的条件下不复存在, 因而超低温工作需采用掺 Cr<sup>4+</sup> 包边吸收 ASE 光束; 从增益材料制备上考虑, LULI 给出的唯一可行方案是使用 Cr<sup>4+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:YAG 共烧结陶瓷。LULI 与德国 HDZR 研究中心合作, 详细对比了直径 60 mm 的 Yb:YAG 晶体和直径 45 mm 的共烧结陶瓷(中心增益区直径为 35 mm, 外围区域 Cr<sup>4+</sup> 的掺杂原子百分比为 0.25%)的性能<sup>[77]</sup>, 验证了 Cr<sup>4+</sup> 包边对于抑制 ASE 的优异效果。然而, 陶瓷的严重热效应成为制约瓶颈, 包边陶瓷中 ASE 光线无法自由逃逸出增益介质, 占泵浦能量 40% 的 ASE 光束被包边吸收后成为主要热源(如图 13 所示), 实测的陶瓷热透镜焦距比晶体小一个数量级(平均泵浦光强 16 kW/cm<sup>2</sup>, 泵浦直径 30 mm), 而且陶瓷对应力(机械应力、热应力)非常敏感, 热退偏水平是晶体(选择最优取向)的 5 倍左右。下一步 LULI 计划实验 Cr<sup>4+</sup> 梯度掺杂的复合陶瓷, 匀化包边内的热分布以降低热效应的影响<sup>[77]</sup>。

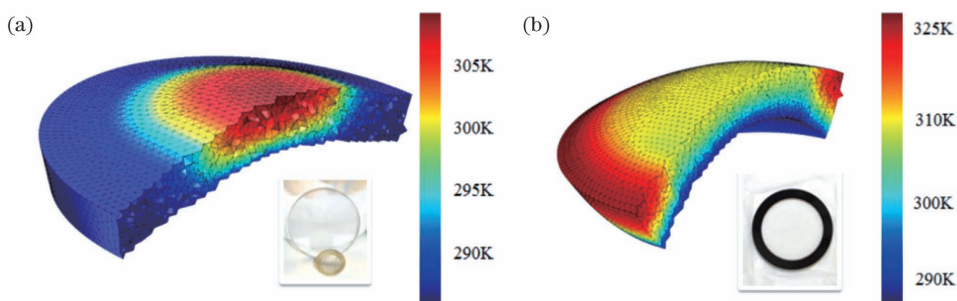


图 13 三维温度分布、热变形模型结果<sup>[77]</sup>。(a) Yb:YAG 晶体; (b) Cr<sup>4+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:YAG 共烧结陶瓷

Fig. 13 Three-dimensional temperature distribution and thermal deformation model results<sup>[77]</sup>. (a) Yb:YAG crystal;

(b) Cr<sup>4+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:YAG co-sintered ceramic

#### 4.2 日本 TRAM、CcAMA

日本大阪大学激光工程研究所在 2009 年<sup>[78]</sup>和 2012 年<sup>[79]</sup>先后提出了 TRAM(全称是全内反射激活镜)构型和 multi-TRAM(即多通 TRAM)构型, 分别如图 14<sup>[80]</sup>和图 15<sup>[81]</sup>所示。构型的主要特色是在整块 YAG 陶瓷的外表面键合数百微米厚度的 Yb:YAG 陶瓷薄板激活镜; 泵浦和提取光束共轴传输, 在各激活镜的背面发生全内反射, 从而避免了镀制高反射膜; 该结构中 YAG 陶瓷还兼具 ASE 抑制端帽(anti-ASE cap)的作用, 切断 ASE 光束的振荡回路<sup>[82]</sup>。针对超低温工作条件, 研究人员分析了该

构型的增益特性和波前畸变成因<sup>[83-84]</sup>, 精细测量

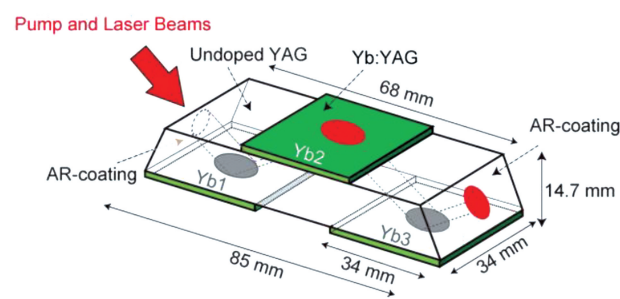
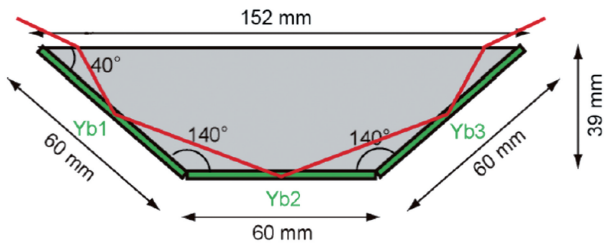
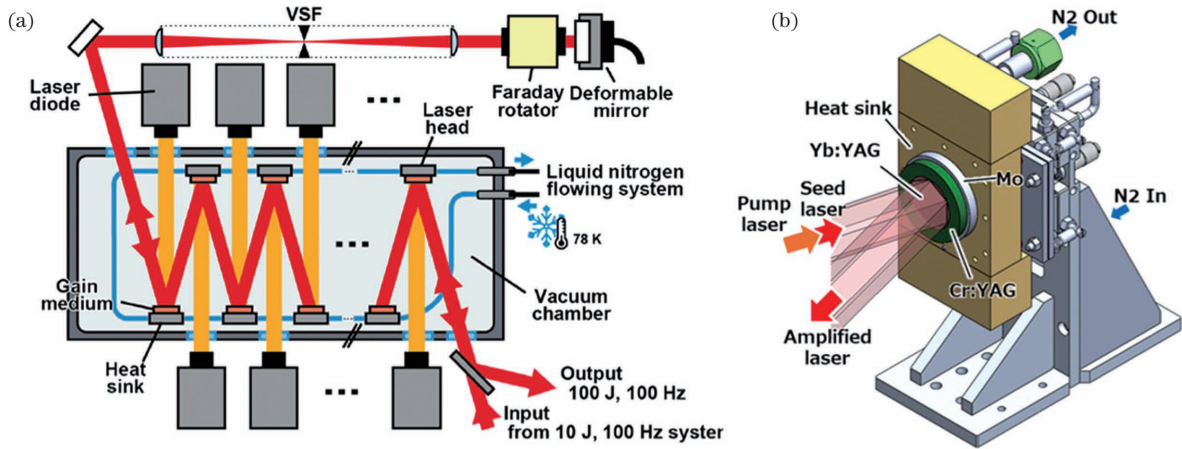


图 14 TRAM 构型示意图<sup>[78]</sup>

Fig. 14 Schematic of TRAM configuration<sup>[78]</sup>

图 15 multi-TRAM 构型示意图<sup>[79]</sup>Fig. 15 Schematic of multi-TRAM configuration<sup>[79]</sup>

了 Yb:YAG 陶瓷的热光系数、热膨胀系数、热导率等重要参数随温度的变化<sup>[85]</sup>。2015 年报道了液氮冷却 multi-TRAM 构型的 1 J, 100 Hz, 10 ns 输出结果<sup>[27]</sup>, 光束质量为 1.3 倍衍射极限, 但 100 Hz 重复频率下系统无法稳定运转, 运行 1 min 后能量迅速下降。

图 16 CcAMA 系统设计<sup>[28]</sup>。(a) 100 J, 100 Hz 放大器概念设计; (b) 激活镜模块的三维建模Fig. 16 CcAMA layout<sup>[28]</sup>. (a) Conceptual design of 100 J 100 Hz amplifier; (b) three-dimensional model of active-mirror head

大阪大学的研究表明, 在流体冷却、泵浦加热的过程中, 激活镜构型激光介质与热沉材料之间因热膨胀速率不同而导致应力, 该应力不但加大了热沉与激光介质的间隙而造成高热阻, 限制高重复频率运转, 而且会造成波面畸变, 影响光束质量。为此, CcAMA 在结构设计上通过钼层将 YAG 和铜热沉连接, 如图 16(b) 所示, 利用了钼的高杨氏模量和与 YAG 高度匹配的热膨胀系数, 同时采用较软的金属焊料, 降低钼与热沉之间的应力; 铜热沉被温度 78 K, 流速 7 L/min 的液氮冷却。实验表明, 50 Hz 和 100 Hz 重复频率下输出波前畸变的增量为 1.2 个波长, 即单次反射的波前畸变仅为 0.15 个波长。经过小信号测试和波前畸变分析确认, 低热阻结构设计具备了 10 J, 50 Hz 的热管理能力, 但是 100 Hz 运转时, 小信号增益会显著下降, 此时增益介质的工作温度估算为 116 K。定标放大实验中, CcAMA 系

2021 年, 大阪大学提出了面向 100 J, 100 Hz 纳秒输出的新设计——CcAMA, 全称是传导冷却激活镜放大器<sup>[28,86-87]</sup>, 如图 16(a) 所示。平均功率 5 mW、中心波长 1029.5 nm 的单纵模光纤种子光束, 通过 77 K 超低温 Yb:YAG 再生放大器、棒状多通放大器, 能量放大至 285 mJ(1~100 Hz), 然后通过软边光阑将圆形光斑校正为六边形, 并注入主放大级。主放大级包括直径 45 mm、厚度 7 mm 的四片 Yb:YAG 陶瓷, 掺杂原子百分比为 0.6% 和 1.0%, 陶瓷增益区域外围是宽度 7.5 mm 的 Cr<sup>4+</sup> 吸收包边(掺杂原子百分比为 0.25%)。泵浦源为 2 个 940 nm LD 阵列, 每个阵列的峰值功率为 50 kW。提取激光以 15° 入射、两次通过四片增益陶瓷。

统实现了单脉冲能量 10 J 的纳秒输出, 并在 20 Hz 重复频率下持续运转了 1 min 以上, 但是 33.3 Hz 重复频率下运行数秒后能量开始下降, 20 s 内的平均能量为 9.3 J, 光光效率为 12%。根据计算, 为了实现 10 J, 100 Hz 稳定运转, 需要进一步降低热阻, 使 Yb:YAG 工作在温度 100 K 以下<sup>[28]</sup>。

#### 4.3 清华大学 DAMAC

本研究团队致力于激活镜构型的高效率、大能量、室温运转 DPSSL 研究。2015 年, 清华大学采用 4 片 Nd:YAG 激活镜(20 mm×14 mm×8 mm, 掺杂原子百分比为 0.6%)作为放大级增益单元, 在种子能量 200 mJ, 泵浦能量 5.9 J 的情况下实现了 2.3 J, 10 Hz, 15 ns 的脉冲输出, 储能提取效率为 70%, 光光效率达到 36%, 这是 LD 泵浦焦耳级激光器所报道的最高光光效率<sup>[88]</sup>。同时, 团队针对激活镜的热特性开展了详细分析<sup>[89]</sup>。2016 年, 团队开展

了小口径 Nd:LuAG 新型增益介质的激活镜技术研究。采用 2 片 Nd:YAG 和 2 片 Nd:LuAG (15 mm × 10 mm × 7 mm, 掺杂原子百分比 1.5%) 组成的激活镜混合放大链, 实现了 1.5 J, 10 Hz, 10 ns 的输出, 首次实现了 Nd:LuAG 的近焦耳级能量提取<sup>[90]</sup>。实验中 Nd:LuAG 激活镜在 8 kW/cm<sup>2</sup> 峰值泵浦光强下能够以 10 Hz 稳定运转, 验证了良好的

导热性能; 如图 17 所示, 混合放大链的输出随泵浦能量线性增长, 光光效率达到 23.5%, 展现了 Nd:LuAG 与 Nd:YAG 发射谱线的高度相容性, 以及高效率混合放大的可行性。通过两种增益介质的小信号增益和储能特性对比, 体现了 Nd:LuAG 突出的储能优势, 可见该材料对于大能量脉冲激光的定标放大极具潜力。

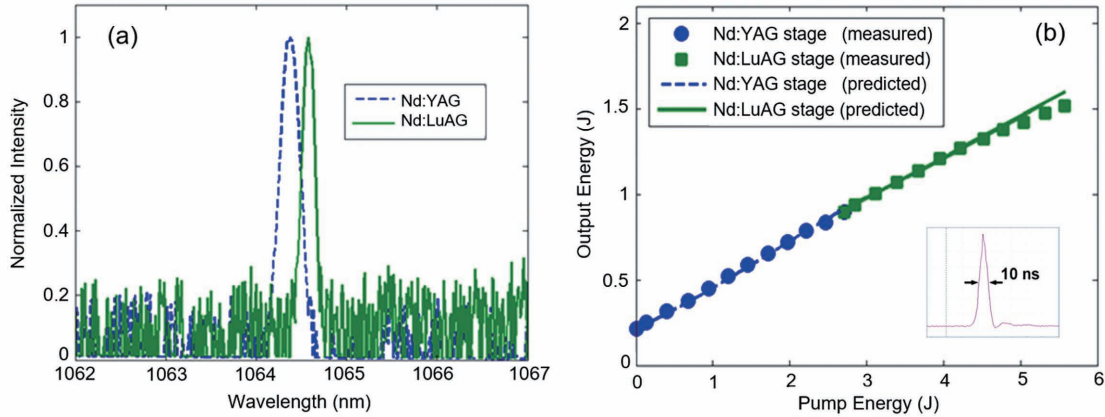


图 17 Nd:YAG-Nd:LuAG 混合放大<sup>[90]</sup>。(a) 两增益介质发射光谱; (b) 放大链输出曲线

Fig. 17 Nd:YAG-Nd:LuAG hybrid amplifier<sup>[90]</sup>. (a) Two-gain medium emission spectrum; (b) amplification chain output curve

2017 年, 清华大学针对高效率 100 J, 10 Hz 纳秒激光系统的设计目标, 提出了分布式激活镜放大链 (DAMAC) 的新概念<sup>[91]</sup>, 即采用多个片状激活镜增益单元进行链式放大, 将放大级总增益、总产热分散至多个增益单元。基于 DAMAC 构型, 研究团队采用四片大通口径 Nd:YAG 激活镜 (60 mm × 40 mm × 8 mm, 掺杂原子百分比为 0.6%) 和高速匀化流场换热<sup>[92-93]</sup>, 首次实现了 LD 泵浦 Nd<sup>3+</sup> 掺杂激活镜的 10 J 级纳秒激光<sup>[91]</sup>, 获得了单脉冲能量 12.2 J、重复频率 10 Hz、脉宽 10 ns 的输出, 光光效率 20.6%。其中, 每个增益单元的 LD 阵列由 201 根巴条组成, 最大峰值功率为 45 kW, 泵浦光强为 2.2 kW/cm<sup>2</sup>, 四个阵列的总泵浦能量为 54 J。团队遵循等通量设计理念<sup>[94]</sup>, 给出了 50 J 放大链的预测输出曲线<sup>[91]</sup>。2019 年, 与中国科学院上海光学精密机械研究所合作, 采用三片大通口径 Nd:LuAG 陶瓷 (尺寸分别为 58.5 mm × 40 mm × 5.5 mm、58.5 mm × 40 mm × 5.5 mm、51 mm × 39 mm × 7.5 mm, 掺杂原子百分比为 1%), 通过激活镜构型的混合放大链实现了 10.3 J 的输出<sup>[33]</sup>, 结构如图 18 所示。理论分析和实验结果表明, 在抑制 ASE 效应所允许的最大增益水平下 ( $g_0L$  约为 3,  $L$  为横向最大尺寸), 大通口径 Nd:LuAG 的储能极限

约为 15~16 J, 是 Nd:YAG 的 3 倍。近期, 清华大学将 LD 泵浦室温运转的 Nd:YAG/Nd:LuAG 混合放大链的输出水平大幅提升至了 100 J, 10 Hz, 10 ns。

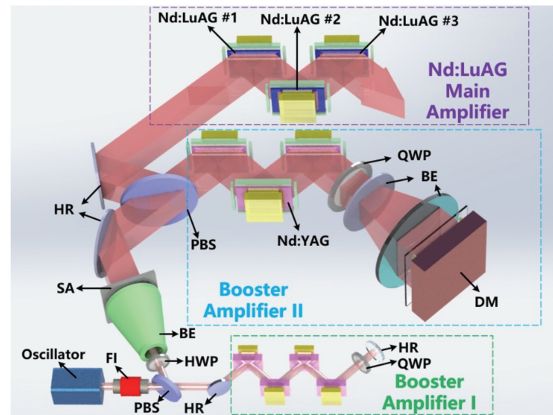


图 18 大通口径 10 J 级混合放大链示意图<sup>[33]</sup>

Fig. 18 Layout of 10 J large-aperture hybrid active mirror chain<sup>[33]</sup>

DAMAC 技术路线具有三个突出优势: 1) 放大级所需泵浦能量分散至多个增益单元, 因而每个单元中的 ASE 效应可被限制在较低水平; 同时, 大通口径增益单元所需的峰值泵浦光强可控制在 2~4 kW/cm<sup>2</sup>, 与商用 LD 阵列出光面功率密度匹配,

免除了额外的泵浦整形、耦合系统,显著提高了单元的紧凑性;此外,与 LUCIA、Mercury、HAPLS 等系统相比,单模块泵浦峰值功率降低了 60%~80%,从而大幅度放宽了对于同一阵列各巴条发光中心波长、光谱宽度一致性的要求。2)放大级的产热分散至多个增益单元,显著降低了单元内部的热透镜、热退偏等热效应,在一定程度上放宽了对激活镜单元冷却能力的要求,使系统重复频率具备向更高水平拓展的潜力,而且有利于获得高光束质量。3)多个激活镜增益单元使系统具有更大的调节自由度和灵活性,可以对各单元的频域(泵浦中心波长等)、时域(泵浦脉冲、提取脉冲的时序关系等)和空域(提取光束、泵浦光束的空间匹配程度等)进行独立调节,从而精细优化系统的提取效率。另外,可以对各单元的增益介质封装方式、冷却结构等进行具有差异化的独立设计和优化,使得单个激活镜引入的波前畸变(主要表现为离焦、像散)在放大链传输中获得抵消和补偿。

理论方面,清华大学提出了激光放大脉冲时空演化的分析和表征方法<sup>[95]</sup>。由于激活镜构型中光束时空交叠情况复杂,尤其对于双通构型,介质内部的储能最多被四个脉冲片段同时提取。研究团队提出的时空演化方法不进行光线循迹,而是以各时刻、各空间位置的脉冲片段为研究对象,被放大脉冲片段的时空特征通过增益窗口精准“定格”:在每一个时刻,入射纳秒脉冲的正、反向传输片段在晶体中被放大的时间窗口各为 100 ps 量级(对应数十毫米的晶体内光程)。如图 19 所示的正、反向增益窗口(GWF、GWB)清晰呈现了该时刻发生交叠的各脉冲片段(PS #1~#4)的时空信息,并给出了各片段之间的时空关联。该方法对激光时域畸变、激光能量及实时光强分布等重要特征在双通放大过程中的时空演化情况进行“逐帧”精细刻画,并通过优化输入能量、放大级数、脉冲往返距离等参数改善空间强度均匀性、提升输出能量、调控时域波形。该方法适用于激活镜、之字形板条等构型中脉冲放大过程的时空分析。

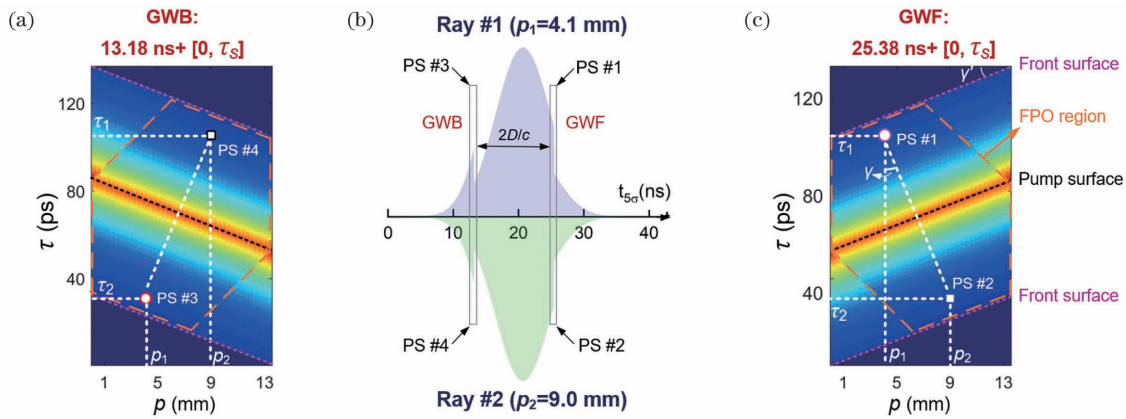


图 19 激活镜构型脉冲放大过程的时空表征<sup>[95]</sup>。(a)(c)反、正向增益窗口内的时空信息;(b)某一时刻发生交叠的各脉冲片段

Fig. 19 Spatiotemporal characterization of amplified pulse in active mirror geometry<sup>[95]</sup>. (a)(c) Spatiotemporal information of gain window for backward-and forward-propagating pulses; (b) pulse segments that overlap at a certain time

#### 4.4 中国工程物理研究院

中国工程物理研究院也开展了激活镜构型的重复频率高能激光系统研究。2014 年,主放大级采用两片室温运转的水冷 Yb:YAG 激活镜(Φ30×3 mm,掺杂原子百分比为 5%),实现了 8.5 J,1 Hz,10 ns 的输出结果<sup>[96-97]</sup>,光束质量约为 10 倍衍射极限。两个激活镜的 LD 泵浦阵列峰值功率分别为 60 kW 和 80 kW,均由峰值功率 200 W 的数百根巴条组合而成。泵浦源耦合采用

了导光锥设计,将泵浦密度由阵列出光面处的 1.1 kW/cm<sup>2</sup> 大幅提升至激活镜泵浦面处的 23 kW/cm<sup>2</sup>,以克服室温 Yb:YAG 的高泵浦阈值,泵浦耦合系统的损耗约为 16%。2019 年,基于主放大级的九片室温运转的 Nd:YAG 激活镜(50 mm×30 mm×7 mm,掺杂原子百分比为 1%),实现了 12 J,10 Hz,10 ns 的输出结果<sup>[36]</sup>,像散测量结果如图 20 所示。近期,10 J 输出的脉冲重复频率被提升至 50 Hz。

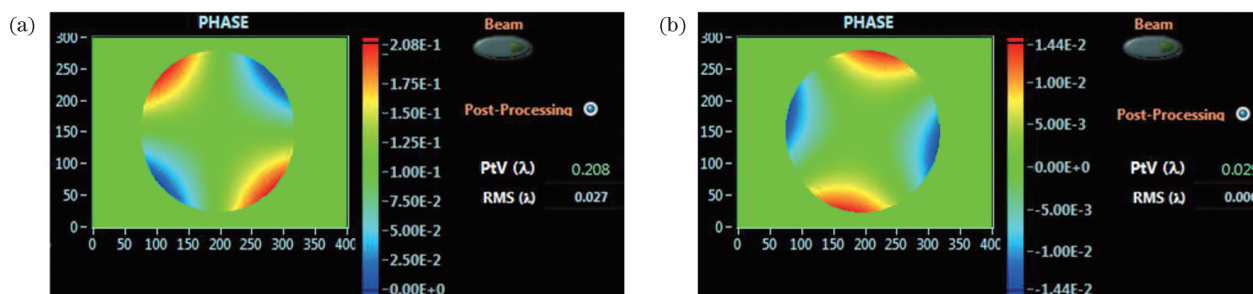


图 20 像散测量结果<sup>[36]</sup>。(a)调整前;(b)调整后

Fig. 20 Astigmatism measurement results<sup>[36]</sup>. (a) Before adjustment; (b) after adjustment

## 5 之字形板条构型激光器进展

### 5.1 日本 HALNA

日本滨松集团、大阪大学等单位合作研制了 HALNA 系统(全称是面向核聚变应用的高平均功率激光器),开展了针对核聚变驱动源的单束 10 kJ 概念设计<sup>[98]</sup>。2008 年报道了缩比验证系统 21.3 J, 10 Hz, 8.9 ns 的输出结果<sup>[32]</sup>,光束输出通量为  $6.2 \text{ J/cm}^2$ ,输出峰值功率达到 2.4 GW,输出能量稳定性 RMS 为 2%(1 h)。系统的光光效率和放大级提取效率分别为 11.7%和 33.2%。20 J 输出进一步通过硼酸锂铯 (CLBO) 晶体倍频,获得了 12.5 J, 0.6 Hz 的 527 nm 绿光输出<sup>[99]</sup>,频率转换效率高达 71.5%,代表了 CLBO 倍频的最高效率。

HALNA 系统的结构示意图如图 21 所示<sup>[100]</sup>。

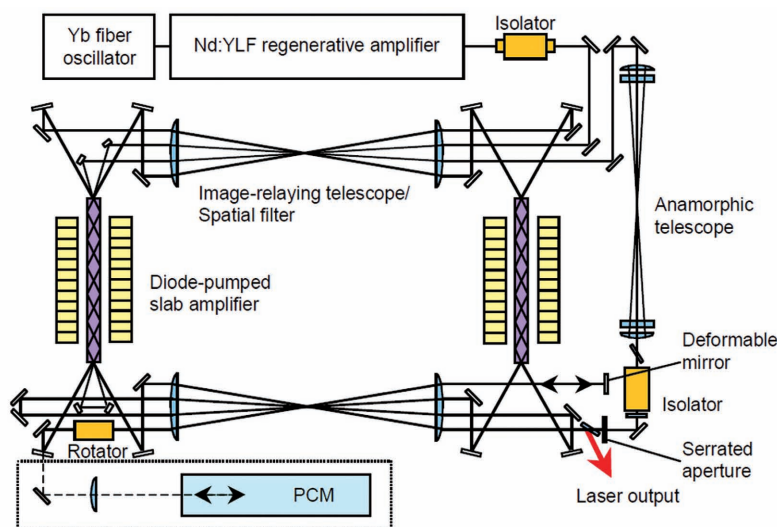


图 21 HALNA 系统示意图<sup>[100]</sup>

Fig. 21 Schematic of HALNA system<sup>[100]</sup>

HALNA 系统的突出特点是以边缘热管理技术结合受激布里渊散射(SBS)相位共轭镜,降低大能量光束的热致波前畸变。针对板条宽度方向的热致波前畸变,HALNA 系统提出了热边缘控制的之

字形板条构型激光器进展。前端由掺 Yb 分布式反馈光纤振荡器产生 1053 nm 种子光束,经过 LD 泵浦 Nd:YLF 环状腔再生放大器<sup>[101]</sup>获得 125 mJ 的种子光束,经扩束、整形后以像传递方式在放大级中传输。主放大级包括两个四通放大模块,增益介质采用掺钕磷酸盐玻璃(掺杂质量分数为 1%),长度 375 mm,宽度 50 mm,厚度 10 mm。每个增益模块的两侧各有一个 803 nm 的 LD 阵列进行泵浦,每个阵列的最高峰值功率为 200 kW,脉宽 200~300  $\mu\text{s}$ ,电光效率为 52%。通过光线追迹设计优化的柱面镜阵列,实现了  $\pm 10\%$  的泵浦均匀性。冷却水从 LD 阵列与增益介质两个大面(亦为泵浦面)的间隙流过,实现对流换热。研究人员开展了四通之字形板条的增益建模与优化<sup>[102]</sup>,仿真与实测结果表明 ASE 获得了有效抑制。91 J 泵浦能量下,单板条的小信号增益可达到 3.4。

字形光路板条技术(TECS),在板条边缘面设置主动加热层,将 50 mm 宽度的温差控制在 1 K 以内<sup>[103]</sup>,从而降低了宽度方向的热梯度。板条厚度方向的热畸变通过之字形光路补偿。如图 22 所

示,采用 TECS 放大器构型后,87 J, 1 Hz 泵浦时的波前畸变由 0.97 个波长降至 0.62 个波长; 87 J, 5 Hz 泵浦时的波前畸变由 2.9 个波长降至 0.73 个波长。此外,加热层与板条边缘面之间的

ASE 吸收层可有效抑制寄生振荡。光束质量通过 SBS 相位共轭镜(长度 800 mm,FC-77 氟化液)进行校正,可实现 60% 的输出能量集中于远场 2 倍衍射极限内。

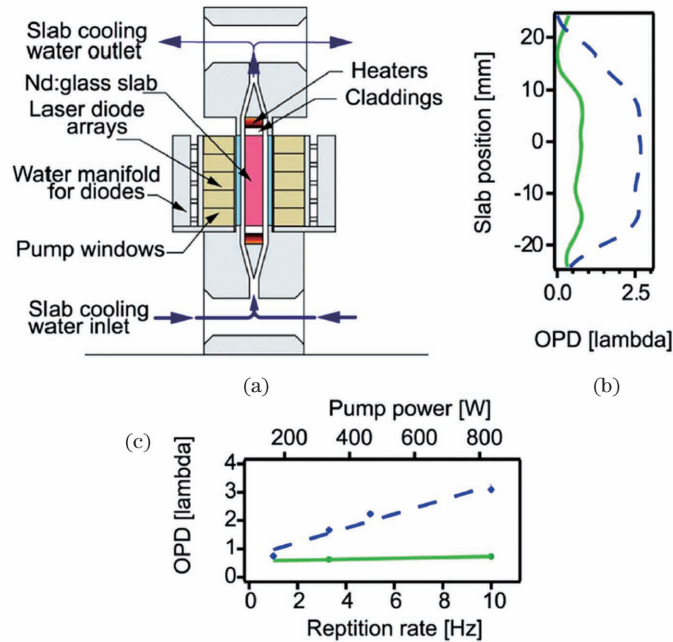


图 22 TECS 热管理技术<sup>[32]</sup>。(a)结构图;(b)使用 TECS 技术前(虚线)、后(实线),板条宽度方向的单通光程差对比;(c)使用 TECS 技术前后,各重复频率下的光程差对比

Fig. 22 TECS technique<sup>[32]</sup>. (a) Layout; (b) single-pass optical path difference along slab width of non-TECS mode (dashed line) and TECS mode (solid line); (c) optical path difference of non-TECS and TECS modes under different repetition rate

### 5.2 中国科学院光电研究院

中国科学院光电研究院也开展了之字形板条构型的相关研究。如图 23 所示,主放大级采用 Nd:YAG 之字形板条构型的三个增益单元(138 mm×35 mm×7 mm,掺杂原子百分比为 0.6%),实现了 5 J, 200 Hz, 6.6 ns 的脉冲输出<sup>[37,104-105]</sup>,6000 发的能量稳定性为 4.9%(峰谷值)。第一个增益单元采用角度复用的双程提取结构,第二、三个增益单元采用单程提取结构。每个板条增益单元能够储能 2.5 J,实现小信号增益大于 5,退偏损耗小于 2%,泵浦均匀性优于 90%,单程波前畸变小于 0.15 个波长。5 J, 200 Hz 输出的光束质量分别采用 SBS 相位共轭镜<sup>[37]</sup>(FC-77 氟化液)和简单透镜/自适应光学系统<sup>[106]</sup>校正,均可控制在 1.7 倍衍射极限以内。

## 6 总结与展望

重复频率纳秒高能 DPSSL 技术在 21 世纪兴起,继而飞速发展,它继承了固体激光器发展六十年

的雄厚研究基础,虽然年轻但充满底蕴。经过近二十年的摸索,思路、技术、工艺不断突破,优选放大构型集中于叠片、激活镜、之字形板条三大类,增益介质管理、热管理、储能管理、时空管理等诸多维度的可行性解决方案日渐明朗。

100 J, 10 Hz, 10 ns 是近二十年以来,国内外各研究团队默契设定、孜孜以求的第一个“小目标”。如今,这一目标在超低温条件、室温条件下分别取得了可喜的突破,意味着发展重复频率纳秒高能 DPSSL 技术的漫漫征程走过了第一个里程碑。预计在未来的二十年间,提升单脉冲能量(单束 kJ 级以上)、重复频率(百 Hz 乃至 kHz)、插头效率(大于 20%)的主基调不变,新构型、新增益介质、新技术必将持续涌现,系统紧凑化、融合兼容啁啾放大及更多体制、时/空/频域可编程调控等特色或将成为重要的发展趋势。相信在不远的未来,由重复频率纳秒高能 DPSSL 技术点亮的新一代激光驱动源将在大科学装置中、重大基础和应用领域中放射出耀眼的光芒。

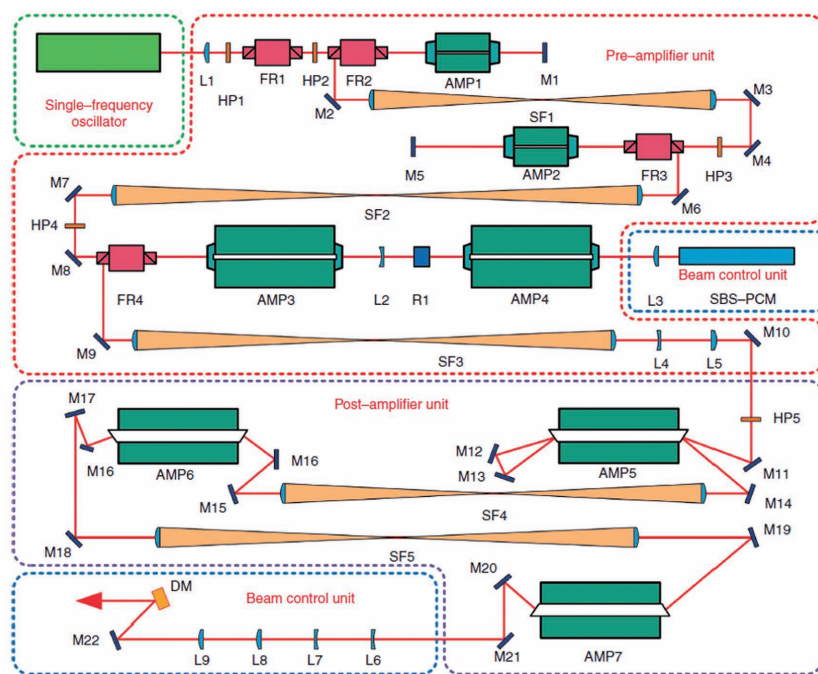


图 23 5 J, 200 Hz 系统示意图<sup>[37]</sup>

Fig. 23 Schematic of 5 J, 200 Hz system<sup>[37]</sup>

参 考 文 献

[1] Spaeth M L, Manes K R, Kalantar D H, et al. Description of the NIF laser[J]. Fusion Science and Technology, 2016, 69(1): 25-145.

[2] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002. 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.

[3] Swenson E J, Sun Y L, Dunskey C M. Laser micromachining in the microelectronics industry: a historical overview [J]. Proceedings of SPIE, 2000, 4095: 118-132.

[4] Bayramian A, Aceves S, Anklam T, et al. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 60(1): 28-48.

[5] Wang M Z, Ding L, Luo Y M, et al. Recent progress of laser diode-pumped solid-state laser drivers for inertial fusion energy [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(10): 56-63. 王明哲, 丁磊, 罗亦鸣, 等. 惯性聚变能领域的激光二极管抽运固体激光装置 [J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(10): 56-63.

[6] Anklam T M, Dunne M, Meier W R, et al. LIFE: the case for early commercialization of fusion energy [J]. Fusion Science and Technology, 2011, 60(1): 66-71.

[7] Xiao K B, Yuan X D, Jiang X Y, et al. Research status of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for LIFE [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(4): 040001. 肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(4): 040001.

[8] le Garrec B, Atzeni S, Batani D, et al. HiPER laser: from capsule design to the laser reference design [J]. Proceedings of SPIE, 2011, 7916: 79160F.

[9] Xiao K B, Yuan X D, Jiang X Y, et al. Research status of conceptual designs of diode-pumped solid-state laser driver for HiPER [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2015, 52(8): 080005. 肖凯博, 袁晓东, 蒋新颖, 等. 欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状 [J]. 激光与光电子学进展, 2015, 52(8): 080005.

[10] Kawanaka J, Yamakawa K, Tsubakimoto K, et al. Generation of energetic beam ultimate (GENBU) laser - main laser - [J]. The Review of Laser Engineering, 2008, 36(APLS): 1056-1058.

[11] Drake R P. A journey through high-energy-density physics [J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(3): 035001.

[12] The extreme light infrastructure (ELI) project [EB/OL]. [2021-03-10]. <http://www.eli-beams.eu/>.

[13] The high energy density (HED) beamline of the European XFEL [EB/OL]. [2021-03-10]. <http://www.xfel.eu/>.

[14] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt

- and exawatt class lasers worldwide[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2019, 7(3): 172-225.
- [15] Perry M D, Sefcik J A, Cowan T, et al. Hard X-ray production from high intensity laser solid interactions[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 265-269.
- [16] Ridgers C P, Kirk J G, Ducloux R, et al. Modelling gamma-ray photon emission and pair production in high-intensity laser-matter interactions[J]. *Journal of Computational Physics*, 2014, 260: 273-285.
- [17] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators[J]. *Reviews of Modern Physics*, 2009, 81(3): 1229-1285.
- [18] Hooker S M. Developments in laser-driven plasma accelerators[J]. *Nature Photonics*, 2013, 7(10): 775-782.
- [19] Hu Y T, Zhang H, Deng H X. Review of research developments and important applications of laser-driven ion acceleration[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(4): 0401006.  
胡艳婷, 张昊, 邓宏祥, 等. 激光驱动离子加速的研究进展及其重要应用综述[J]. *中国激光*, 2021, 48(4): 0401006.
- [20] Patera V, Prezado Y, Azaiez F, et al. Biomedical research programs at present and future high-energy particle accelerators[J]. *Frontiers in Physics*, 2020, 8: 380.
- [21] Wang X L, Xu Z Y, Luo W, et al. Transmutation prospect of long-lived nuclear waste induced by high-charge electron beam from laser plasma accelerator[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24(9): 093105.
- [22] Brenner C M, Mirfayzi S R, Rusby D R, et al. Laser-driven X-ray and neutron source development for industrial applications of plasma accelerators[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2016, 58(1): 014039.
- [23] Clauer A H. Laser shock peening, the path to production[J]. *Metals*, 2019, 9(6): 626.
- [24] Gonçalves-Novo T, Albach D, Vincent B, et al. 14 J/2 Hz Yb<sup>3+</sup>:YAG diode pumped solid state laser chain[J]. *Optics Express*, 2013, 21(1): 855-866.
- [25] Mason P, Divoky M, Ertel K, et al. Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser[J]. *Optica*, 2017, 4(4): 438-439.
- [26] Gonçalves-Novo T, Vincent B, Chanteloup J C. From 10 to 30 joules with the Lucia laser system: update on current performance and cryogenic amplifier development [C] // *Advanced Solid State Lasers 2013*, October 27-November 1, 2013, Paris, France. Washington, D. C.: OSA, 2013: ATu3A.19.
- [27] Divoky M, Tokita S, Hwang S, et al. 1-J operation of monolithic composite ceramics with Yb:YAG thin layers: multi-TRAM at 10-Hz repetition rate and prospects for 100-Hz operation[J]. *Optics Letters*, 2015, 40(6): 855-858.
- [28] Ogino J, Tokita S, Kitajima S, et al. 10 J operation of a conductive-cooled Yb:YAG active-mirror amplifier and prospects for 100 Hz operation[J]. *Optics Letters*, 2021, 46(3): 621-624.
- [29] Sekine T, Kurita T, Kurata M, et al. Development of a 100-J DPSSL as a laser processing platform in the TACMI consortium [J]. *High Energy Density Physics*, 2020, 36: 100800.
- [30] Bayramian A, Armstrong J, Beer G, et al. High-average-power femto-petawatt laser pumped by the Mercury laser facility [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2008, 25(7): B57-B61.
- [31] Haefner C L, Bayramian A, Betts S, et al. High average power, diode pumped petawatt laser systems: a new generation of lasers enabling precision science and commercial applications[J]. *Proceedings of SPIE*, 2017, 10241: 1024102.
- [32] Yasuhara R, Kawashima T, Sekine T, et al. 213 W average power of 2.4 GW pulsed thermally controlled Nd:glass zigzag slab laser with a stimulated Brillouin scattering mirror[J]. *Optics Letters*, 2008, 33(15): 1711-1713.
- [33] Liu T H, Feng T, Sui Z, et al. 50 mm-aperture Nd:LuAG ceramic nanosecond laser amplifier producing 10 J at 10 Hz[J]. *Optics Express*, 2019, 27(11): 15595-15603.
- [34] Li P L, Fu X, Liu Q, et al. Analysis of wavefront aberration induced by turbulent flow field in liquid-convection-cooled disk laser [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2013, 30(8): 2161-2167.
- [35] Fu X, Liu Q, Li P L, et al. Wavefront aberration induced by beam passage through a water-convection-cooled Nd:YAG thin disk [J]. *Journal of Optics*, 2013, 15(5): 055704.
- [36] Jiang X Y, Wang Z G, Yan X W, et al. LD end-pumped 12 J-10 Hz Nd:YAG pulse laser [J]. *Proceedings of SPIE*, 2019, 11333: 113330M.
- [37] Fan Z W, Qiu J S, Kang Z J, et al. High beam quality 5 J, 200 Hz Nd:YAG laser system [J]. *Light, Science & Applications*, 2017, 6(3): e17004.
- [38] Ebberts C, Caird J, Moses E, et al. The mercury laser moves toward practical laser fusion[J]. *Laser Focus World*, 2009, 45(3): 51-52, 55-56.



- [39] 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.
- [40] Bayramian A J, Campbell R W, Ebberts C A, et al. A laser technology test facility for laser inertial fusion energy (LIFE) [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2010, 244(3): 032016.
- [41] Erlandson A C, Aceves S M, Bayramian A J, et al. Comparison of Nd: phosphate glass, Yb: YAG and Yb: S-FAP laser beamlines for laser inertial fusion energy (LIFE) [J]. *Optical Materials Express*, 2011, 1(7): 1341-1352.
- [42] Bayramian A, Armstrong P, Ault E, et al. The mercury project: a high average power, gas-cooled laser with frequency conversion and wavefront correction [C] // *Advanced Solid-State Photonics 2006*, January 29-February 1, 2006, Incline Village, Nevada, United States. Washington, D. C.: OSA, 2006: MA4.
- [43] Bayramian A. Mercury project overview [R]. HEC DPSSL Workshop, 2006.
- [44] Banerjee S, Ertel K, Mason P D, et al. DiPOLE: a 10 J, 10 Hz cryogenic gas cooled multi-slab nanosecond Yb: YAG laser [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15): 19542-19551.
- [45] Banerjee S, Mason P D, Ertel K, et al. 100 J-level nanosecond pulsed diode pumped solid state laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(9): 2089-2092.
- [46] Ertel K, Banerjee S, Mason P D, et al. Optimising the efficiency of pulsed diode pumped Yb: YAG laser amplifiers for ns pulse generation [J]. *Optics Express*, 2011, 19(27): 26610-26626.
- [47] de Vido M, Mason P D, Fitton M, et al. Modelling and measurement of thermal stress-induced depolarisation in high energy, high repetition rate diode-pumped Yb: YAG lasers [J]. *Optics Express*, 2021, 29(4): 5607-5623.
- [48] Slezak O, Lucianetti A, Mocek T. Efficient ASE management in disk laser amplifiers with variable absorbing clads [J]. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, 50(12): 1-9.
- [49] Divoky M, Pilar J, Hanus M, et al. Performance comparison of Yb: YAG ceramics and crystal gain material in a large-area, high-energy, high average-power diode-pumped laser [J]. *Optics Express*, 2020, 28(3): 3636-3646.
- [50] Mason P, Banerjee S, Smith J, et al. Development of a 100 J, 10 Hz laser for compression experiments at the high energy density instrument at the European XFEL [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2018, 6: e65.
- [51] Ertel K, Banerjee S, Boyle A, et al. Design study for a kW-class, multi-TW, ps laser [C] // *Advanced Solid State Lasers 2017*, October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi, Japan. Washington, D. C.: OSA, 2017: JTU2A.44.
- [52] Mason P, Banerjee S, Smith J, et al. Efficient operation of a high energy Yb: YAG DPSSL amplifier [C] // *The European Conference on Lasers and Electro-Optics 2019*, June 23-27, 2019, Munich, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2019: ca\_9\_2.
- [53] Saumyabrata B, Paul M, Jonathan P, et al. Pushing the boundaries of diode-pumped solid-state lasers for high-energy applications [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8(2): 77-79.
- [54] de Vido M, Ertel K, Wojtusiak A, et al. Design of a 10 J, 100 Hz diode-pumped solid state laser [C] // *Advanced Solid State Lasers 2019*, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, D. C.: OSA, 2019: JTU3A.14.
- [55] Spinka T M, Haefner C. High-average-power ultrafast lasers [J]. *Optics and Photonics News*, 2017, 28(10): 26-33.
- [56] Haefner C L. High average power, scalable, all diode-pumped solid state petawatt laser system HAPLS: a robust driver for high intensity laser matter interactions enabling precision science and commercial applications [J]. *The Review of Laser Engineering*, 2018, 46(3): 138-141.
- [57] Fulkerson E S, Telford S, Deri R, et al. Pulsed power system for the HAPLS diode pumped laser system [C] // *2015 IEEE Pulsed Power Conference (PPC)*, May 31-June 4, 2015, Austin, TX, USA. New York: IEEE Press, 2015: 1-6.
- [58] Seaver L L. LLNL wins three R & D 100 awards [EB/OL]. (2015-11-16) [2021-03-10]. <https://www.llnl.gov/news/llnl-wins-three-rd-100-awards>.
- [59] Bayramian A, Bopp R, Borden M, et al. High energy, high average power, DPSSL system for next generation petawatt laser systems [C] // *Conference on Lasers and Electro-Optics 2016*, June 5-10, 2016, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2016: STU3M.2.
- [60] Bayramian A, Bopp R, Deri B, et al. High-energy diode-pumped solid-state laser (DPSSL) for high-repetition-rate petawatt laser systems [C] // *High Intensity Lasers and High Field Phenomena 2016*, March 20-22, 2016, Long Beach, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2016: HT1B.5.
- [61] Spinka T, Sistrunk E, Bayramian A, et al.

- Commissioning results of the world's first diode-pumped 10 Hz PW laser [C] // European Quantum Electronics Conference 2017, June 25-29, 2017, Munich, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2017: PD\_2\_7.
- [62] Sistrunk E, Spinka T, Bayramian A, et al. All diode-pumped, high-repetition-rate advanced petawatt laser system (HAPLS) [C] // CLEO: Science and Innovations 2017, May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington D. C.: OSA, 2017: STh1L.2.
- [63] Sekine T, Takeuchi Y, Kurita T, et al. Development of cryogenic Yb:YAG ceramics amplifier for over 100 J DPSSL [J]. Proceedings of SPIE, 2017, 10082: 100820U.
- [64] Sekine T, Takeuchi Y, Hatano Y, et al. 64 J output energy in 10 ns pulse from cryogenic Yb:YAG ceramics laser [C] // CLEO: Science and Innovations 2017, May 14-19, 2017, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2017: STh1L.4.
- [65] Kurata M, Sekine T, Hatano Y, et al. Development of a 100 J class cryogenically cooled multi-disk Yb:YAG ceramics laser [C] // Advanced Solid State Lasers 2019, September 29-October 3, 2019, Vienna, Austria. Washington, D. C.: OSA, 2019: ATu5A.3.
- [66] Kabeya Y, Morita T, Hatano Y, et al. Development of a 10-J, 10-Hz laser amplifier system with cryo-cooled Yb:YAG ceramics using active-mirror method [J]. Proceedings of SPIE, 2019, 10896: 108960M.
- [67] Morita T, Sekine T, Takeuchi Y, et al. Development of compact LD module for 10 J at 10 Hz cryo-cooled Yb:YAG ceramics active mirror laser amplifier [C] // Advanced Solid State Lasers 2017, October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi, Japan. Washington D. C.: OSA, 2017: JTu2A.31.
- [68] Mizuta Y, Takeuchi Y, Sekine T, et al. Low temperature gas cooling technique for a high efficiency 100 J class ceramics laser amplifier [C] // Advanced Solid State Lasers 2017, October 1-5, 2017, Nagoya, Aichi Japan. Washington, D. C.: OSA, 2017: JTu2A.36.
- [69] Albach D, le Touzé G, Chanteloup J C. Deformation of partially pumped active mirrors for high average-power diode-pumped solid-state lasers [J]. Optics Express, 2011, 19(9): 8413-8422.
- [70] Albach D, Chanteloup J C, le Touzé G. Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb<sup>3+</sup>:YAG slabs [J]. Optics Express, 2009, 17(5): 3792-3801.
- [71] Bourdet G L, Gouedard C. Theoretical analysis of an end-pumped Yb:YAG active mirror thin-disk amplifier with a longitudinal doping concentration gradient [J]. Applied Optics, 2014, 53(31): 7556-7565.
- [72] Lucianetti A, Albach D, Chanteloup J C. Active-mirror-laser-amplifier thermal management with tunable helium pressure at cryogenic temperatures [J]. Optics Express, 2011, 19(13): 12766-12780.
- [73] Marrazzo S, Gonçalves-Novo T, Vincent B, et al. High gain low temperature active mirror Yb:YAG laser amplifier qualification [C] // Advanced Solid State Lasers 2015, October 4-9, 2015, Berlin, Germany. Washington, D. C.: OSA, 2015: AM5A.18.
- [74] Marrazzo S, Gonçalves-Novo T, Millet F, et al. Low temperature diode pumped active mirror Yb<sup>3+</sup>:YAG disk laser amplifier studies [J]. Optics Express, 2016, 24(12): 12651-12660.
- [75] 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.
- [76] Gonçalves-Novo T, Marrazzo S, Vincent B, et al. Low temperature active mirror Yb:YAG laser amplifier gain studies [C] // CLEO: Science and Innovations 2014, June 8-13, 2014, San Jose, California, United States. Washington, D. C.: OSA, 2014: SM1F.2.
- [77] Albach D, Chanteloup J C. Large size crystalline vs. co-sintered ceramic Yb<sup>3+</sup>:YAG disk performance in diode pumped amplifiers [J]. Optics Express, 2015, 23(1): 570-579.
- [78] Furuse H, Kawanaka J, Takeshita K, et al. Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb:YAG ceramics [J]. Optics Letters, 2009, 34(21): 3439-3441.
- [79] Furuse H, Kawanaka J. 1 J, 100 Hz GENBU: front end laser system with multi-TRAMs [C] // The 7nd High Energy Class Diode Pumped Solid-State Laser workshop (HEC-DPSSL), Livermore, USA, Sept. 2012.
- [80] Furuse H, Kawanaka J, Miyanaga N, et al. Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb<sup>3+</sup>:YAG/YAG composite ceramics [J]. Optics Express, 2011, 19(3): 2448-2455.
- [81] Tokita S, Divoky M, Furuse H, et al. Generation of 500-mJ nanosecond pulses from a diode-pumped Yb:YAG TRAM laser amplifier [J]. Optical Materials Express, 2014, 4(10): 2122-2126.
- [82] Furuse H, Chosrowjan H, Kawanaka J, et al. ASE and parasitic lasing in thin disk laser with anti-ASE cap [J]. Optics Express, 2013, 21(11): 13118-13124.

- [83] Furuse H, Kawanaka J, Miyanaga N, et al. Output characteristics of high power cryogenic Yb : YAG TRAM laser oscillator[J]. *Optics Express*, 2012, 20(19): 21739-21748.
- [84] Furuse H, Sakurai T, Chosrowjan H, et al. Amplification characteristics of a cryogenic Yb<sup>3+</sup> : YAG total-reflection active-mirror laser[J]. *Applied Optics*, 2014, 53(9): 1964-1969.
- [85] Yasuhara R, Furuse H, Iwamoto A, et al. Evaluation of thermo-optic characteristics of cryogenically cooled Yb : YAG ceramics[J]. *Optics Express*, 2012, 20(28): 29531-29539.
- [86] Ogino J, Tokita S, Kitajima S, et al. Toward 10 J, 100 Hz active-mirror amplifier[C]//Advanced Solid State Lasers 2020, October 13-16, 2020, Washington, D. C., United States. Washington, D. C.: OSA, 2020: JTh6A.17.
- [87] Ogino J, Tokita S, Li Z Y, et al. Key technologies for the development of 100 J, 100 Hz cryogenically-cooled active-mirror amplifier[C]//2019 Conference on Lasers and Electro-Optics Europe & European Quantum Electronics Conference (CLEO/Europe-EQEC), June 23-27, 2019, Munich, Germany. New York: IEEE Press, 2019.
- [88] Fu X, Liu Q, Li P L, et al. High-efficiency 2 J, 20 Hz diode-pumped Nd : YAG active-mirror master oscillator power amplifier system [J]. *Applied Physics Express*, 2015, 8(9): 092702.
- [89] Fu X, Liu T H, Deng X Z, et al. Ultrahigh-efficiency 4-J, 10-Hz, Nd : YAG quasi-continuous-wave active mirror oscillator[J]. *Applied Physics B*, 2015, 121(4): 453-457.
- [90] Liu Q, Gong M L, Liu T H, et al. Efficient sub-joule energy extraction from a diode-pumped Nd : LuAG amplifier seeded by a Nd : YAG laser [J]. *Optics Letters*, 2016, 41(22): 5322-5325.
- [91] Liu T H, Sui Z, Chen L, et al. 12 J, 10 Hz diode-pumped Nd : YAG distributed active mirror amplifier chain with ASE suppression [J]. *Optics Express*, 2017, 25(18): 21981-21992.
- [92] Fu X, Li P L, Liu Q, et al. 3 kW liquid-cooled elastically-supported Nd : YAG multi-slab CW laser resonator[J]. *Optics Express*, 2014, 22(15): 18421-18432.
- [93] Fu X, Liu Q, Li P L, et al. Numerical simulation of 30-kW class liquid-cooled Nd : YAG multi-slab resonator[J]. *Optics Express*, 2015, 23(14): 18458-18470.
- [94] Gong M L, Sui Z, Liu Q, et al. Design of ultrahigh energy laser amplifier system with high storage energy extraction[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(3): 394-399.
- [95] Liu T H, Liu Q, Sui Z, et al. Spatiotemporal characterization of laser pulse amplification in double-pass active mirror geometry[J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2020, 8: e30.
- [96] Zheng J G, Jiang X Y, Yan X W, et al. Progress of the 10 J water-cooled Yb : YAG laser system in RCLF [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2014, 2: e27.
- [97] Jiang X Y, Wang Z G, Zheng J G, et al. Thermal management of water-cooled 10 Hz Yb : YAG laser amplifier[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2019, 32(1): 011010.  
蒋新颖, 王振国, 郑建刚, 等. 水冷 10 Hz Yb : YAG 激光放大器热管理[J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(1): 011010.
- [98] Kawashima T, Kanabe T, Matsumoto O, et al. Development of diode-pumped solid-state laser HALNA for fusion reactor driver [J]. *Electrical Engineering in Japan*, 2006, 155(2): 27-35.
- [99] Sekine T, Sakai H, Takeuchi Y, et al. High efficiency 12.5 J second-harmonic generation from CsLiB<sub>6</sub>O<sub>10</sub> nonlinear crystal by diode-pumped Nd : glass laser[J]. *Optics Express*, 2013, 21(7): 8393-8400.
- [100] Kawashima T, Kurita T, Matsumoto O, et al. 20-J diode-pumped zig-zag slab laser with 2-GW peak power and 200-W average power [C]//Advanced Solid-State Photonics 2005, February 6-9, 2005, Vienna, Austria. Washington, D.C.: OSA, 2005: TuB44.
- [101] Sekine T, Matsuoka S I, Yasuhara R, et al. 84 dB amplification, 0.46 J in a 10 Hz output diode-pumped Nd : YLF ring amplifier with phase-conjugated wavefront corrector[J]. *Optics Express*, 2010, 18(13): 13927-13934.
- [102] Matsumoto O, Kurita T, Yasuhara R, et al. Analysis of parasitic oscillation and evaluation of amplifier module of zig-zag slab laser system [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2008, 47(7): 5441-5449.
- [103] Kurita T, Kawashima T, Ikegawa T, et al. Thermally-edge-controlled slab laser for inertial fusion energy and applications [C]// (CLEO). Conference on Lasers and Electro-Optics, 2005, May 22-27, 2005, Baltimore, MD, USA. New York: IEEE Press, 2005: 168-170.
- [104] Guo G Y, Chen Y Z, He J G, et al. Diode-pumped large-aperture Nd : YAG slab amplifier for high energy nanosecond pulse laser [J]. *Optics Communications*, 2017, 400: 50-54.

- [105] Qiu J S, Tang X X, Fan Z W, et al. 200 Hz repetition frequency joule-level high beam quality Nd:YAG nanosecond laser [J]. Optics Communications, 2016, 368: 68-72.
- [106] Yu X, Dong L Z, Lai B H, et al. Adaptive aberration correction of a 5 J/6.6 ns/200 Hz solid-state Nd:YAG laser[J]. Optics Letters, 2017, 42 (14): 2730-2733.

## High Energy Diode-Pumped Rep-Rated Nanosecond Solid-State Laser

Fu Xing<sup>1,2\*</sup>, Liu Tinghao<sup>1,2</sup>, Lei Xinxing<sup>1,2</sup>, Gong Mali<sup>1,2</sup>, Liu Qiang<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>Department of Precision Instrument, Tsinghua University, Beijing 100084, China;

<sup>2</sup>Key Laboratory of Photonic Control Technology (Tsinghua University), Ministry of Education, Beijing 100084, China

### Abstract

**Significance** High-energy rep-rated nanosecond diode-pumped solid-state lasers (DPSSLs), mainly referring to nanosecond lasers with pulse energies greater than 10 J and repetition rates greater than 10 Hz, are crucial in major fundamental and applied research domains and are emerging as one of the hot topics at the frontier of scientific research. This study first analyzes the preferred technical paths of high-energy rep-rated nanosecond DPSSLs in terms of the gain medium and amplifier geometry and then reviews the representative achievements and research progress of high-energy rep-rated nanosecond DPSSLs in detail. Furthermore, the prospects of future development of DPSSLs are discussed herein.

**Progress** Favored for its moderate saturation fluence and high thermal conductivity, Yb:YAG at the cryogenic temperature and Nd:LuAG at room temperature have been proven to be the most promising gain media in achieving rep-rated nanosecond DPSSLs with even higher energy. Conversely, gain medium with high saturation fluence at room temperature, such as Yb:YAG, and that with low saturation fluence, such as Nd:YAG, is not suitable for high energy lasers primarily owing to the defect of high pump threshold from the quasi-three-level structure and high passive loss from too many stages. In addition, the three preferred amplifier geometries are the multislabs, active mirror, and zigzag slab (Fig. 1), as categorized by the representative achievements of high energy rep-rated nanosecond DPSSLs summarized in Table 2.

For the multislabs geometry, the Mercury system developed by Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL) produced a nanosecond output with the pulse energy of 61 J at the repetition rate of 10 Hz based on Yb:S-FAP multislabs, with ultralow wavefront aberration using a new high-speed gas cooling technology at room temperature (Fig. 2), a classical approach that was then widely used. Using similar gas cooling technology but operating at cryogenic temperature, the DiPOLE system based on Yb:YAG ceramic achieved 105 J, 10 Hz, and 10 ns in 2017, which was the world's first demonstration of a kW-level high energy DPSSL (Fig. 4). Researchers from STFC Rutherford Appleton Laboratory and HiLASE solved scientific and engineering problems in efficiency optimization, thermal effect management, depumping suppression, and other aspects. In the same year, LLNL reported the output level at 97 J, 3.3 Hz of a nanosecond Nd:glass multislabs laser for pumping the petawatt-level HAPLS system, using high-power intelligent laser diode system (HILADS), the highest peak power and brightest pulsed diode light delivery system in the world (Fig. 8).

For the active mirror mode, the LUCIA system reached 13.9 J at 2 Hz in 2013, using the Yb:YAG laser head at room temperature at the pump intensity of 11 kW/cm<sup>2</sup> by focusing on the mirror (Fig. 12). To improve the energy above the 30 J level, the researchers invented a static helium gas cooling technology and plan to use a cryogenically cooled cosintered Yb:YAG ceramic, which may suffer from much stronger thermal lensing and higher depolarization losses than the crystal counterpart. Total-reflection active-mirror (TRAM) and multi-TRAM structures have been proposed by researchers at Osaka University, which achieved 1 J, 100 Hz laser amplification in 2015, despite unstable operation. Later this year, they released a new configuration of the conductive-cooled active-mirror amplifier (CcAMA) and reported the 9.3 J, 33.3 Hz laser scaling, suppressing the wavefront distortion by an elaborate heat sink design (Fig. 16). In 2016, our group at Tsinghua University demonstrated excellent compatibility of the Nd:YAG seeder and Nd:LuAG booster (Fig. 17), and then proposed a new concept called

distributed active mirror amplifier chain (DAMAC) to disperse the gain and thermal deposition among several gain modules, thus achieving in 2019 a room temperature 10.3 J, 10 Hz, 10 ns laser from a large-aperture Nd:YAG-Nd:LuAG active mirror hybrid chain (Fig. 18), its output was recently raised to 100 J, 10 Hz at room temperature.

For the zigzag slab design, Hamamatsu developed the HALNA system, which demonstrated an output of 21.3 J, 10 Hz, 8.9 ns in 2008, with an optical-optical efficiency of 11.7%. The beam quality was controlled as 1.8 times diffraction limit, combining a thermally edge-controlled zigzag slab (TECS) design (Fig. 22) and a stimulated Brillouin scattering (SBS) mirror. In addition, the Chinese Academy of Sciences built an Nd:YAG system in 2017 (Fig. 23), which generated pulse energy of 5 J at 1064 nm with a pulse duration of 6.6 ns and a repetition rate of 200 Hz, while the output energy stability was 4.9% peak-to-valley over 6000 shots. It was verified that the beam quality could be improved to 1.7 times the diffraction limit by an SBS mirror or by a deformable mirror.

**Conclusions and Prospects** Over the past two decades, extensive efforts have been made into achieving the first milestone, that is, the output target of 100 J, 10 Hz, and 10 ns, which has been achieved in the development of high energy rep-rated nanosecond DPSSLs with breakthroughs in both cryogenic and room temperature. In the next two decades, as new geometry, new gain medium, and new technical approach will inevitably emerge, the main trend expected will be the continuous upgrade in beamlet pulse energy (beyond kJ level), repetition rate (hundreds to kilohertz), and plug efficiency (over 20%), whereas potential directions of development may include system miniaturization, open and flexible access to other operating mechanisms, such as chirped pulse amplification, and programmable control over temporal, spatial, and frequency tuning.

**Key words** lasers; solid-state laser; diode-pumped; high energy laser; rep-rated nanosecond laser

**OCIS codes** 140.3580; 140.3480; 140.3538