

文章编号: 1000-7032(2022)11-1789-19

## 重频纳秒大能量激光增益介质初探

陈 跃<sup>1,2</sup>, 姜本学<sup>1\*</sup>, 冯 涛<sup>1</sup>, 张 龙<sup>1</sup>

(1. 中国科学院上海光学精密机械研究所 中国科学院强激光材料重点实验室, 上海 201800;

2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 重频纳秒大能量激光器在科研探究、工业制造、军事防务等领域发挥着重要作用, 本文详细介绍了 Yb<sup>3+</sup> 或 Nd<sup>3+</sup> 稀土离子掺杂的激光晶体、激光玻璃和激光陶瓷的研究进展以及相应的重频纳秒大能量激光器代表性成果, 分析了激光增益介质发射截面、热导率、上能级寿命等参数特性对激光系统的影响。针对重频纳秒大能量激光器增益介质的选择制备、热管理、自发辐射放大效应管控展开讨论并梳理解决对策, 对其未来的发展前景进行了展望。

**关键词:** 重频脉冲激光器; 大能量激光器; Yb<sup>3+</sup>; Nd<sup>3+</sup>; 增益介质

中图分类号: TN242

文献标识码: A

DOI: 10.37188/CJL.20220264

## Repetition Rate Nanosecond Large Energy Pulse Laser Gain-media

CHEN Yue<sup>1,2</sup>, JIANG Ben-xue<sup>1\*</sup>, FENG Tao<sup>1</sup>, ZHANG Long<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Materials for High Power Laser, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,

Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;

2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

\* Corresponding Author, E-mail: jiangbx@siom.ac.cn

**Abstract:** The repetitive nanosecond high energy laser plays an important role in scientific inquiry, industrial manufacturing, military defense and other fields. In this paper, the research progress of Yb<sup>3+</sup> or Nd<sup>3+</sup> rare-earth ion doped laser crystals, laser glasses and laser ceramics, as well as the representative results of the corresponding repetitive nanosecond high energy lasers, are introduced in detail. The influence of the laser gain medium emission cross section, thermal conductivity, upper level life and other parameters on the laser system is analyzed. We discussed the selective preparation, thermal management and control of spontaneous emission amplification effect of gain medium for repetitive nanosecond high energy lasers, and sorted out the solutions. Finally, the prospect of its future development is discussed.

**Key words:** heavy frequency pulse laser; large energy laser; Yb<sup>3+</sup>, Nd<sup>3+</sup>, gain medium

### 1 引 言

重频纳秒大能量激光具有重复频率高、单

脉冲能量大、峰值功率高等优良特性, 无论在基础科学领域还是工业应用领域均表现出广阔的应用前景。在基础科学领域, 重频纳秒大能量

收稿日期: 2022-07-26; 修订日期: 2022-08-22

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFB0310503); 国家自然科学基金(U1830125, 11535010); 中国科学院青年创新促进会; 中国科学院创新交叉团队; 中国博士后科学基金(2016M601654)资助项目

Supported by National Key Research &amp; Development Program of China(2017YFB0310503); National Natural Science Foundation of China(U1830125, 11535010); Youth Innovation Promotion Association of CAS; Interdisciplinary Innovation Team of CAS; General Financial Grant from The China Postdoctoral Science Foundation(2016M601654)

激光可用于产生极紫外、X射线和太赫兹波等<sup>[1-5]</sup>,也可用于谐波转换产生紫外、可见光、光参量产生中红外、自相位调制产生超连续谱等光源<sup>[6-8]</sup>。在工业应用领域,激光冲击强化是其代表性应用,重频纳秒大能量激光可明显改善飞机和航空发动机叶片等重要材料的疲劳寿命,增强金属材料的抗疲劳、耐磨损和抗腐蚀能力<sup>[9-10]</sup>。但具有纳秒脉冲的高能级激光器通常被限制在非常低的重复频率下,即每分钟或每小时发射几次,导致平均功率较低。这种低平均功率激光器不能满足激光驱动惯性约束聚变(ICF)等先进应用的要求。因此,具有100 J、10 Hz、10 ns的良好光束质量和高转换效率的重频

纳秒大能量激光器是新世纪以来世界各主要研究团队默契设定且不断追求的首个“小目标”<sup>[11]</sup>。

“重频”和“大能量”两个特征对应用而言有明确的意义。“重频”的意义在于满足应用对效率的要求,“大能量”则是实现一些强场物理现象的必需条件。以材料探伤为例,需要大能量激光与电子相互作用产生 $\gamma$ 射线,对能量的需求一般要在十焦耳以上,脉冲频率要做到几十赫兹到百赫兹,才能满足探伤效率的要求。随着重频纳秒大能量激光应用领域的进一步拓宽,世界各地的几个研究小组针对不同的应用领域开发了多种重频纳秒大能量脉冲激光器。表1梳理了现有重频纳秒大能量脉冲激光器代表性的研究成果。

表1 现有公开报道的重频纳秒大能量激光及增益介质各项性能参数

Tab. 1 Performance parameters of heavy frequency large energy laser system and gain media

国家	实验室	激光系统	放大器结构	增益介质	输出指标	年份	
美国	LLNL	Mercury	气冷叠片	Yb:S-FAP晶体	61 J@10 Hz <sup>[12]</sup>	2006	
		HAPLS		Nd:APG-1玻璃	70 J@3.3 Hz <sup>[13]</sup>	2016	
	Osaka-IIE	GENBU	液冷激活镜	Yb:YAG陶瓷	1 J@100 Hz <sup>[14]</sup>	2015	
日本	Hamamatsu	HALNA	水冷板条	Nd:玻璃	21 J@10 Hz <sup>[15]</sup>	2008	
	Photonics	—	低温激活镜	Yb:YAG陶瓷	55 J@10 Hz <sup>[16]</sup>	2017	
法国	LULI-CNRS	LUCIA	液冷激活镜	Yb:YAG陶瓷/晶体	14 J@2 Hz <sup>[17]</sup>	2013	
		—	低温激活镜		30 J@10 Hz <sup>[18]</sup>	2016	
	Amplitude公司	—	透射激活镜	Nd:YAG	50 J@10 Hz <sup>[19]</sup>	2019	
		DiPOLE	—	—	6.1 J@10 Hz <sup>[20]</sup>	2012	
英国	STFC-RAL	DiPOLE10	气冷叠片	Yb:YAG陶瓷	10.8 J@10 Hz <sup>[21]</sup>	2013	
		DiPOLE100		105 J@10 Hz <sup>[22-23]</sup>	2017		
		DiPOLE100X		Yb:YAG陶瓷	120 J@1 Hz <sup>[24]</sup>	2019	
	清华大学	DPSSL	DiPOLE100X	Yb:YAG陶瓷	150 J@1 Hz <sup>[25]</sup>	2020	
			—	水冷激活镜	Nd:YAG晶体	2.3 J@10 Hz/2.1 J@20 Hz <sup>[26]</sup>	2015
			—	混合激活镜	Nd:LuAG陶瓷	12.2 J@10 Hz <sup>[27]</sup>	2017
			—	混合激活镜	Nd:LuAG-Nd:YAG混合晶体	10 J@10 Hz <sup>[28]</sup>	2019
中国	中科院上海光机所	—	混合激活镜	Nd:LuAG-Nd:YAG混合晶体	1.52 J@10 Hz <sup>[29]</sup>	2016	
		—	混合激活镜	Nd:LuAG-Nd:YAG混合晶体	100 J@10 Hz <sup>[11]</sup>	2021	
	中科院北京光电所	—	低温激活镜	Yb:YAG	3 J@10 Hz <sup>[30]</sup>	2013	
		—	—	Nd:YAG晶体	6.5 J@5 Hz <sup>[31]</sup>	2015	
		—	激活镜	Nd:YAG晶体	5.4 J@5 Hz <sup>[32]</sup>	2018	
	国防科大	—	激活镜	Nd:LuAG陶瓷	1.5 J@10 Hz <sup>[33]</sup>	2019	
		—	水冷板条	Nd:YAG晶体	5 J@200 Hz <sup>[34]</sup>	2017	
	中国工程物理研究院	DPSSL	水冷板条	Yb:YAG晶体	3.3 J@1 Hz <sup>[35]</sup>	2010	
华北光电技术研究所	—	水冷激活镜	Nd:YAG晶体	10 J@50 Hz <sup>[36]</sup>	2020		
—	DPL	—	Nd:YAG晶体	5.2 J@100 Hz <sup>[37]</sup>	2005		

重频纳秒大能量激光技术起源于21世纪初,在固体激光器技术底蕴之上经过了近20年的飞速发展,在思路、技术、工艺方面不断突破,同时也充满了更多的可能性。近20年来,世界各国研究团队不断向“100 J、10 Hz、10 ns”的目标努力进发。我国与美国、英国、法国和日本四国相比,在

重频纳秒大能量激光相关研究方面起步较晚,这主要与重频纳秒大能量激光用增益介质制备与放大器构型的设计有关。一方面重频纳秒大能量激光宜选用具有中等发射截面的增益介质,同时需要满足大尺寸制备、长上能级寿命、良好的热导率等多个方面的要求,因此满足条件的候选材料极

为有限,同时也受限于国内增益介质的制备工艺与设备前期的发展基础薄弱。另一方面,放大构型的设计同样与热管理、储能管理、时空管理等诸多维度的重要问题相关联,国内开展相关技术研究的时间较晚。虽然起步较晚但发展迅速,我国在重频纳秒大能量激光领域正在从一个“学习者”转变成“引领者”。

基于目前重频纳秒大能量激光技术的蓬勃发展态势,探索实现更高重频和更大能量的激光输出已经势在必行。而获得重频纳秒大能量激光输出最大的瓶颈之一便是选择和制备合适的激光增益介质。以常见的高性能高功率激光装置为例,如美国的国家点火设施(NIF)、中国的神光-III和法国的激光兆焦耳(LMJ),都是基于掺钕玻璃<sup>[38-39]</sup>。但遗憾的是,激光玻璃的热导率极低,导致装置每隔数小时才能产生单次脉冲。与玻璃相比,晶体具有较高的热导率,但由于晶体生长和晶体中生长条纹的挑战,晶体受到其尺寸的限制。在将透明陶瓷引入作为新型固态增益介质之前,晶体和玻璃作为固态激光器仅有的选择,它们已经得到了广泛的研究。1995年,透明陶瓷与晶体和玻璃一起被认为是重频纳秒大能量脉冲激光器领域的优秀候选材料<sup>[40]</sup>。

为了实现激光系统的高重复频率,激光放大器增益介质的选择是至关重要的。重频纳秒大能量激光所用增益介质主要是指掺杂稀土作为激活离子的晶体、陶瓷以及玻璃材料。由于 $\text{Yb}^{3+}$ 或 $\text{Nd}^{3+}$ 自身的优越性与重频纳秒大能量激光的匹配度更高,因此在对增益介质进行的广泛研究中多是围绕 $\text{Yb}^{3+}$ 与 $\text{Nd}^{3+}$ 开展的。具体而言, $\text{Nd}^{3+}$ 具有理想的四能级系统,在激光作用下,其激发态与基态的能级差约为 $2\ 000\ \text{cm}^{-1}$ ,激光阈值低,并且Nd无论是掺杂到晶体还是玻璃基质中,都具有合适的吸收截面和发射截面,为实现重频纳秒大能量激光输出创造了增益条件。 $\text{Yb}^{3+}$ 与 $\text{Nd}^{3+}$ 相比具有能级结构更简单、吸收带更宽且吸收波长与激光二极管的泵浦波长相对应等优势,在重频纳秒大能量脉冲激光器中同样具有广泛的应用前景,也引起了国内外的关注。因此,本综述以 $\text{Yb}^{3+}$ 和 $\text{Nd}^{3+}$ 为线索详细介绍了基于掺杂两种离子的激光晶体、激光玻璃和激光陶瓷的研究进展以及基于增益介质的重频纳秒大能量激光代表性成果,讨论了实现重频纳秒大能量激光对增益介质在发

射截面、热导率、上能级寿命以及材料可获得性等参数的需求。

## 2 重频纳秒大能量激光用增益介质

在重频纳秒大能量脉冲激光器所用的固体增益介质中,主要包括基质材料和激活离子两个部分。增益介质的光学、热学、机械以及其他物化性能主要由基质材料自身性能决定,而其激光性质则主要由掺杂的激活离子决定。

作为增益介质的基质材料,除要求其物理化学性能稳定、易制备出光学均匀性好的材料外,也要考虑它与激活离子间的适应性,如基质阳离子与激活离子的半径、电负性和价态应尽可能接近。目前被广泛研究的增益介质有三种基质材料,分别是激光晶体、激光玻璃、激光陶瓷。

激光晶体仍然是应用最为广泛的固体光学材料之一,例如在固体中应用的YAG单晶、非线性晶体等。同时也是最早尝试应用在重频纳秒大能量激光中的增益介质,如2006年美国LLNL实验室利用晶体 $\text{Yb}:\text{S-FAP}(\text{Yb}^{3+}:\text{Sr}_5(\text{PO}_4)_3\text{F})$ 作为增益介质成功实现了Mercury激光系统输出 $61\ \text{J}@10\ \text{Hz}$ 的指标。然而,晶体材料有其自有的很多限制,例如制备周期较长、设备成本高、难以大尺寸制备、难以制备高熔点材料等<sup>[41-44]</sup>。同时目前所制备的单晶材料都难以获得较高的激活离子掺杂浓度,且掺入的离子容易产生掺杂不均匀的现象<sup>[45-46]</sup>。较低的掺杂浓度和激活离子的不均匀一定程度上限制了单晶材料光学性能的表现<sup>[47-48]</sup>。

激光玻璃因其容易成型加工、容易获得各向同性、性能均匀一致的大尺寸等优点,也在重频纳秒大能量激光领域占据着一席之地。例如,钕玻璃由于在室温即可产生激光、温度猝灭效应小、发光量子效率高等特点,目前仍然是激光核聚变研究中最主要的激光材料之一。但是,激光玻璃硬度较低,热性能较差,而且其发光线宽相对较宽,这些都限制了玻璃材料在重频纳秒大能量激光上的进一步发展和应用。

近年来,激光陶瓷呈蓬勃发展之势,特别是经过近十几年的深入研究,激光陶瓷在重频纳秒大能量激光领域展示出其强有力的竞争地位。其优点主要包括:由于不存在偏析效应,可掺杂离子浓度较高且可控制得较均匀<sup>[49-52]</sup>;制备过程相对简单,成本低,可以获得大尺寸样品<sup>[53-54]</sup>;高热导率,利于基体材料的散热,提高材料的抗热冲击性能<sup>[55-57]</sup>。

面向重频纳秒大能量激光,增益介质需要具备四大特征<sup>[58-60]</sup>:(1)增益介质具有合适的发射截面,合适的发射截面既有利于实现有效的储能又有利于实现大脉冲能量激光的输出。适合高重频纳秒大能量激光的增益介质发射截面为  $3 \times 10^{-20} \sim 9 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。(2)对于高重频纳秒大能量激光系统,增益介质的热导率是一个非常重要的参数,热导率要大于  $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。(3)增益介质长的上能级寿命更有利于储能,如典型材料 Yb:S-FAP (1.14 ms) 和 Yb:YAG (1 ms)。(4)大尺寸,激光增益介质尺寸限制着激光输出功率,因此大尺寸是高重频纳秒大能量激光中增益介质的必备条件之一。

### 2.1 掺杂 Yb<sup>3+</sup> 的激光增益介质

之所以选择 Yb<sup>3+</sup> 掺杂到增益介质,主要是从材料的发射截面、热导率、长上能级寿命方面综合考量。首先从增益介质对发射截面的需求方面,对于纳秒级的输出而言,发射截面必须大于  $1.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。为了实现介质内的储能有效提取,末级的提取通量应达到激光饱和通量,而此时的激光饱和通量约  $20 \text{ J/cm}^2$ ,即使是小口径光学元件 ( $10 \text{ cm}^2$ ),膜层损伤阈值也很难稳定地达到该值。因

此更合理的是,介质的发射截面应不小于  $2.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,满足这一条件的激光材料包括 Yb:FAP ( $6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、Yb:KGW ( $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、Yb:KGW ( $2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、Yb:YAG ( $2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、Yb:LuAG ( $2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )<sup>[61]</sup>。单从发射截面角度来看,Yb:FAP、Yb:S-FAP这两种晶体材料的发射截面均大于  $4 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,应当作为更优选的候选材料。但值得注意的是,部分增益介质包括发射截面和热导率在内的增益特性对温度非常敏感,其中,具有代表性的是 Yb:YAG。激光材料的热导率也可以通过气冷/液冷等方式营造低温环境从而提高增益介质的热导率,在室温条件下热导率为  $7.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ,在 150 K 低温条件下热导率可提高为  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。如图 1(a)所示。图 1(b)给出了 Yb<sup>3+</sup> 的能级示意图,表征了 Stark 分裂子能级的布居系数。与其他稀土离子不同,Yb<sup>3+</sup> 没有另外的电子态,因此 Yb<sup>3+</sup> 不存在激发态吸收、荧光上转换、浓度猝灭等效应(这些都是影响 Nd 离子激光性能的重要因素),因此 Yb<sup>3+</sup> 可以实现高掺杂。同时,大多数 Yb<sup>3+</sup> 介质的上能级寿命都达到了 ms 量级,非常适合于功率受限的 LD 泵浦,也便于储能。

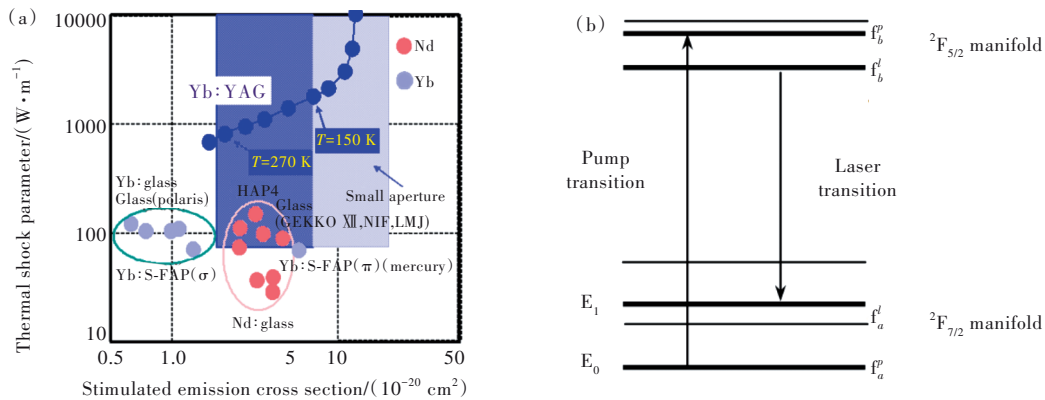


图 1 (a)掺杂 Yb 的激光材料的热冲击参数与受激发射截面,以及 Yb:YAG 的温度调谐特性;(b)Yb 离子能级示意图。

Fig. 1 (a) Thermal impact parameters and excited emission cross section of various laser materials, and temperature tuning characteristics of Yb:YAG. (b) Schematic diagram of the energy levels of Yb ions.

#### 2.1.1 掺杂 Yb<sup>3+</sup> 的激光晶体

2006 年,美国 LLNL 实验室利用晶体 Yb:S-FAP (Yb<sup>3+</sup>:Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F) 作为增益介质成功实现了 Mercury 激光系统输出  $61 \text{ J}@10 \text{ Hz}$  的指标<sup>[12]</sup>。Mercury 项目的目标是在一个架构框架内开发关键技术,演示扩展到惯性聚变能量(IFE)应用的更大的多千焦耳系统的基本构建。Yb:S-FAP 晶体具有许多吸引人的激光特性,又由于 Yb<sup>3+</sup> 掺入 S-FAP 晶体取代 Ca(2) 位置,每个 Yb<sup>3+</sup> 周围有 4 个近

邻 O<sup>2-</sup> 和一个近邻 F<sup>-</sup> (0.23 nm) 离子,晶格场畸变较大,导致 Yb<sup>3+</sup> 发射截面增大。同时,掺杂 Yb 的 S-FAP 具有宽松的二极管亮度要求,具有长寿命 (达 1.14 ms) 及中等的增益截面 ( $6.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^{-1}$ ),以上特性使其非常适合于中等热负载应用下的二极管泵送,是重频纳秒大能量激光增益介质的重要候选材料之一;但缺点是易挥发的特性严重影响晶体的大尺寸生长。

Yb:YAG 晶体也是一种非常具有吸引力的增

益介质,除了具备  $\text{Yb}^{3+}$  介质共有的属性外,  $\text{Yb}:\text{YAG}$  的光谱特性具有“适中”的特点,发射截面为  $2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ , 满足 ns 级脉冲储能器件的增益介质要求。低温条件下  $\text{Yb}:\text{YAG}$  更易转变为四能级系统,而且随着温度的逐步降低,  $\text{YAG}$  材料的发射截面和热机械性能都显著地改善,不少研究人员也就此开展研究实现了重频纳秒大能量的激光输出。大阪大学研究发现<sup>[62-63]</sup>,  $\text{Yb}:\text{YAG}$  晶体随温度降低受激发射截面增大,低温环境的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  晶体介质满足重频纳秒大能量脉冲激光器对于介质的要求。2010年,中国国防科技大学王明哲教授基于  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光晶体在低温条件下良好的热特性和激光特性,设计出一种高功率激光二极管(LD)阵列泵浦的 V 型腔低温  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光器<sup>[38]</sup>, 实现了重复频率大能量输出。2013年,上海光机所同样利用  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光晶体作为增益介质,开发了 LD 泵浦低温条件下工作的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  脉冲固体激光放大系统<sup>[30]</sup>。晶体用铜和金箔作为导热层压到金属热沉上,散热方式采用传导冷却,低温环

境由液氮冷却热沉来保证。实验结果表明,当晶体温度控制在 150 K 时,装置得到了  $3 \text{ J}@10 \text{ ns}$ 、 $10 \text{ Hz}$  的  $1030 \text{ nm}$  脉冲激光能量输出。

### 2.1.2 掺杂 $\text{Yb}^{3+}$ 的激光陶瓷

由于激光陶瓷的光学性能已经可以和单晶媲美,而且兼具单晶和玻璃的优势:生产周期短、成本低、可实现高浓度激活离子均匀掺杂、容易实现大尺寸制备、机械性能和热力学性能优异、可设计复合结构等,因此透明陶瓷已成为重频纳秒大能量激光器的一种较好的选择<sup>[64-66]</sup>。2013年,法国 LULI-CNRS 实验室设计研制了基于水冷  $\text{Yb}:\text{YAG}$  激光晶体/陶瓷激活镜放大器结构的 LUCIA 激光系统,实现了  $14 \text{ J}@2 \text{ Hz}$  的输出,系统光效率为 20%,考虑到实际到达增益介质的泵浦光的总量时,这个值下降到 13%。研究人员针对激活镜构型的 ASE 效应和热效应,开展了详细的建模分析<sup>[67]</sup>。如图 2 所示,在整个 1 ms 的泵浦持续时间内,泵浦光被有效吸收积累形成粒子数反转,泵浦时间内并没有观察到任何增益饱和和特征。

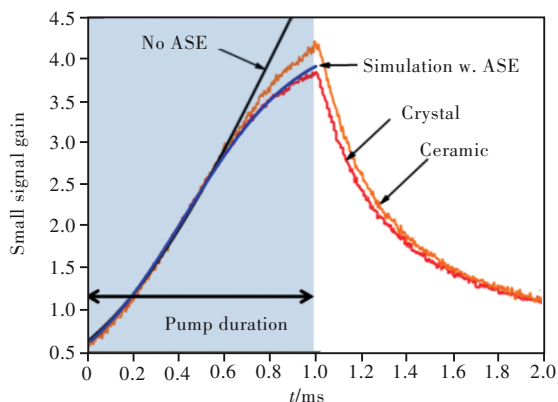


图 2 在 2 ms 期间以  $16 \text{ kW}/(\text{ms} \cdot \text{cm}^2)$  记录的小信号增益<sup>[67]</sup>,可以在没有任何饱和的情况下观察到增益的积累,直到当泵浦停止时开始出现指数衰减;橙色曲线是用余弦处理的陶瓷得到的,而红色曲线是用晶体测量得到的。固体曲线是使用(蓝色)和未使用(黑色)ASE来模拟的。

Fig. 2 The small signal gain recorded at  $16 \text{ kW}/(\text{ms} \cdot \text{cm}^2)$  during 2 ms<sup>[67]</sup>. Accumulation of gain can be observed without any saturation until exponential decay begins when the pump stops. The orange curve is obtained with the cosine-treated ceramics, while the red curve is obtained with the crystallographic measurement. The solid curves are simulated with (blue) and without (black) an ASE.

精心设计增益介质泵浦是抑制 ASE 散射的重要途径,但不是唯一解决方法。为达到大于 4 的小信号增益值,必须改进圆形增益晶体的边缘,以便于任何横向放大的散射都能被有效地吸收。研究人员认为有必要增加一圈包边材料,该研究团队基于时间、成本和技术考虑,排除了复合晶体结构的加工。首先选择的解决方案是显著增加晶体直径(从 45 mm 增加到 60 mm)。利用  $\text{Yb}^{3+}$ :

$\text{YAG}^{[41]}$  的  $1030 \text{ nm}$  吸收抑制 ASE 放大,泵浦限制在中心 30 mm 直径范围内。 $\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  圆盘的非泵浦外围因此充当包边层。截止到目前,该研究团队已经获得了 90 mm 直径的晶体,该尺寸可实现 kJ 级的高平均功率激光器输出<sup>[40]</sup>。

当考虑采用陶瓷作为系统的增益介质时,便不存在上述复合晶体的加工工艺上的困难。事实上,  $\text{Cr}^{4+}/\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  复合结构陶瓷被证明是快速、

经济且没有任何重大工程问题的材料。如图 3 所示,将一个 30 mm 直径的 ASE 管理掩模板安装到主放大器晶体表面,可提供一个 21.2 cm<sup>2</sup> 的未泵浦的 Yb<sup>3+</sup>:YAG 的外围区域,60 mm 直径的增益晶体厚度为 7 mm。这样泵浦区域为 7.1 cm<sup>2</sup> 的中心圆斑,实际有效泵浦面积为 6.7 cm<sup>2</sup>。经过 4 次完整的像传递放大后,直径为 60 mm 的晶体和 45 mm 的复合陶瓷(在陶瓷盒中使用了与图 3 所示不同的安装)分别得到 13.7 J 和 13.9 J。增益材料均为 2% 掺杂,泵浦强度为 16 kW/cm<sup>2</sup>,重复频率

为 2 Hz,光束截面如图 4 所示。

如图 3 所示,泵浦面积远远大于 20 mm×25 mm 的核心孔,在这个 6.7 cm<sup>2</sup> 表面内储存的最大能量超过 100 J。增加光束直径 20%,则可以提取 19 J 的储能。这需要略微增加 ASE 抑制掩模的水平尺寸,增益介质平面中的光束截面~24 mm×29.5 mm。与此同时,该研究团队为实现更高能量输出,采用一种创新的热管理方案,将其在低温下运行,与现有室温运转放大器相结合,经过三程放大可达到 30 J 水平。

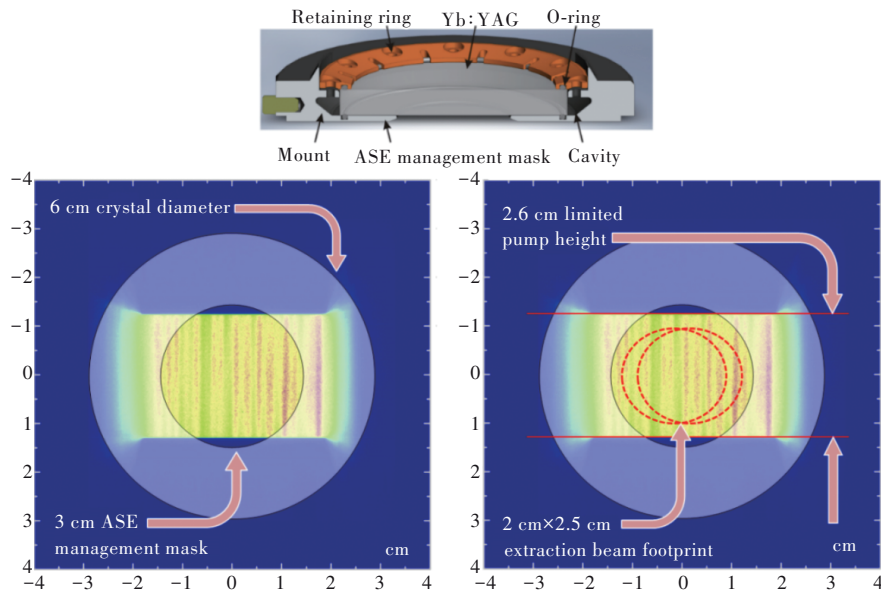


图 3 安装到主放大器晶体底座上的 ASE 管理掩模<sup>[17]</sup>

Fig. 3 The ASE management mask mounted on the main amplifier crystal base<sup>[17]</sup>

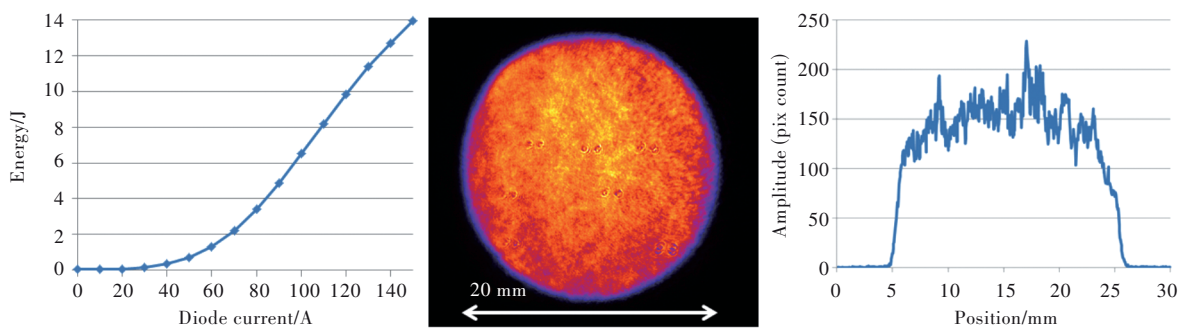


图 4 左图是当二极管阵列驱动电流增加到 150 A 时产生的能量。近场轮廓显示在中心图片上,从那里提取了一个水平线(右图,单位是像素数,8 位灰度)<sup>[17]</sup>。

Fig. 4 Left panel shows the energy generated when the diode array drive current increases to 150 A. Near-field profile is shown on the central image, from which a horizontal line is extracted(right panel, in pixels, 8 bits of gray scale)<sup>[17]</sup>.

在室温附近操作 Yb:YAG 放大器时,利用 1 030 nm 的 Yb<sup>3+</sup>重吸收被证明是相当有效的,可以缓解 ASE 引发的寄生振荡等效应<sup>[44-45]</sup>。然而,当在 150 K 以下运转时,1 030 nm 重吸收几乎消失(截面 < 5.10~22 cm<sup>2</sup>)<sup>[44]</sup>。因此,要吸收在该温度水平下

的自发辐射,需要有外围掺杂 Cr<sup>4+</sup> 的 YAG 包层。日本 Konoshima 制造了第一代 Cr<sup>4+</sup>/Yb<sup>3+</sup>:YAG 陶瓷(图 5(a)),其中 Cr<sup>4+</sup>掺杂的径向厚度为 5 mm,而掺杂浓度估计为 0.25%。虽然它可以非常有效地防止自发辐射放大效应,但由于 Cr<sup>4+</sup>的线性吸收系数

为  $6 \text{ cm}^{-1}$ , 证明掺杂了浓度太高的  $\text{Cr}^{4+}$ 。吸收功率太强, 导致  $\text{Cr}^{4+}/\text{Yb}^{3+}$  界面处产生热应力<sup>[46-47]</sup>。然后对第

二代 3 个陶瓷(图 5(b))进行优化,  $\text{Cr}^{4+}$  掺杂的径向厚度为 20 mm, 增加了 4 倍, 吸收系数下降了 3/4。

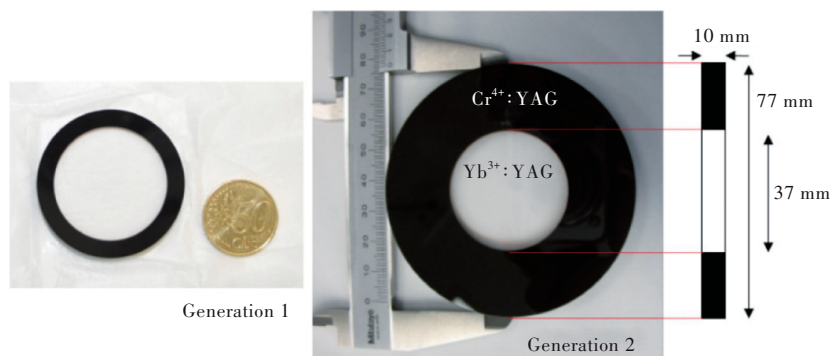


图 5 两代  $\text{Cr}^{4+}/\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  共烧结陶瓷<sup>[44]</sup>

Fig.5 Two generations of  $\text{Cr}^{4+}/\text{Yb}^{3+}:\text{YAG}$  co-sintering ceramics<sup>[44]</sup>

日本 Osaka-ILE 实验室在 2009 年<sup>[68]</sup>和 2012 年<sup>[14]</sup>先后基于  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷提出了 TRAM(全内反射激活镜)构型和 multi-TRAM 构型, 分别如图 6(a)<sup>[69]</sup>和图 6(b)<sup>[70]</sup>所示, 该构型中的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷还具有抑制 ASE 的作用。2015 年, 报道了用液氮作为冷却剂, 实现了  $1 \text{ J}@100 \text{ Hz}$  的激光输出, 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。 $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷在常温下由于激光下能级与基态非常接近, 波尔兹曼分布导致的激光下能级堵塞严重, 并且其发射截面也很低, 需要高通量提取才能实现高效提取, 这给光学元件损伤控制带来了巨大的挑战。为了克服以上缺点, 采用  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷的重频纳秒大能量激光器往往需要在低温运行, 低温下该晶体的下能级

堵塞问题、低发射截面问题都会有很大程度的缓解<sup>[67]</sup>。然而, 由于外加降温设施如液氮冷却或其他冷却方式导致系统更为庞大, 维护更加困难。因此, 研究紧凑型的重频纳秒大能量激光也正在成为重要趋势。

2017 年, 日本 Hamamatsu-Photonics 实验室在低温冷却条件下将激光能量放大到 64 J, 采用的增益介质同样为  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷。四个面阵二极管发射的泵浦光经过真空窗口照射到  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷上, 泵浦光与主激光在空间位置上错开, 主激光正面入射, 泵浦光斜入射。真空窗口的作用是隔热, 因为低温和常温的温差会引起空气中的水蒸气在低温表面凝结成霜, 使得激光不能通过, 因此必须采用一定的隔热措施使低温部分与空气隔绝。有任意脉冲整形光纤振荡器输出的种子光能量为  $1 \mu\text{J}$  量级, 注入到低温 LD 泵浦的  $\text{Yb}:\text{YAG}$  陶瓷预放大器, 经过 5 次放大之后, 输出能量达到 1 J 量级, 然后注入主放大器。主放由两个放大器单元组成, 双程通光, 设计输出能量大于 100 J。

在过去的近十年里, 中央激光设备(CLF)内的 DiPOLE 项目一直在开发高效、高能、纳秒脉冲二极管泵浦固体激光器(DPSSL), 基于的是低温气体冷却叠片陶瓷  $\text{Yb}:\text{YAG}$  放大器技术<sup>[71-75]</sup>。基于该技术在 CLF 建立的第一个 DiPOLE 原型放大器系统显示, 在 1 030 nm 的 10 Hz 重复频率下, 脉冲能量超过 10 J, 脉冲持续时间为 10 ns, 系统光光转换效率为 22%。一个更大规模的激光系统 DiPOLE100 目前正在捷克共和国为 CLF 中的 HILASE 项目开发<sup>[74]</sup>, 目标是实现高达 10 Hz 的脉冲重复频率以及提供 100 J 的纳秒脉冲能量。在

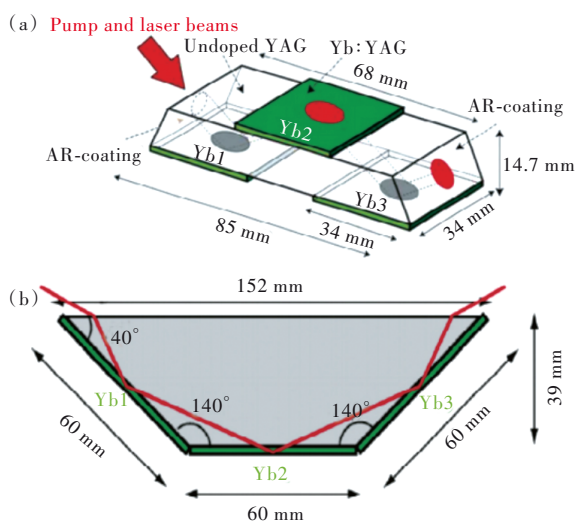


图 6 (a)TRAM 构型示意图<sup>[69]</sup>; (b)multi-TRAM 构型示意图<sup>[70]</sup>。

Fig.6 (a) Schematic of TRAM configuration<sup>[69]</sup>. (b) Schematic of multi-TRAM configuration<sup>[70]</sup>.

此比较了迄今为止开发的三代 DiPOLE 放大器系统所用增益介质。表 2 总结了用于 10 J 和 100 J 级放大器的陶瓷 Yb:YAG 增益介质的特性。两个 10 J 系统之间的主要区别在于陶瓷 Cr:YAG 包层宽度减

表 2 Yb:YAG 陶瓷作为增益介质实现 10 J 和 100 J 输出的性能

Tab. 2 Performance of Yb:YAG ceramics as a gain medium for 10 J and 100 J output

形状	大小	厚度/mm	块数	掺杂比例/%	包边宽度/mm	包边吸收@1 030 nm/cm <sup>-1</sup>	增益介质尺寸
DiPole	圆形	直径 35 mm	5	4	1.1, 2.0	10	3±1
DiPole10	圆形	直径 45 mm	5	4	1.1, 2.0	5	6±1
DiPole100	方形	100 mm×100 mm	8.5	6	0.4, 0.6, 1.0	10	3±1

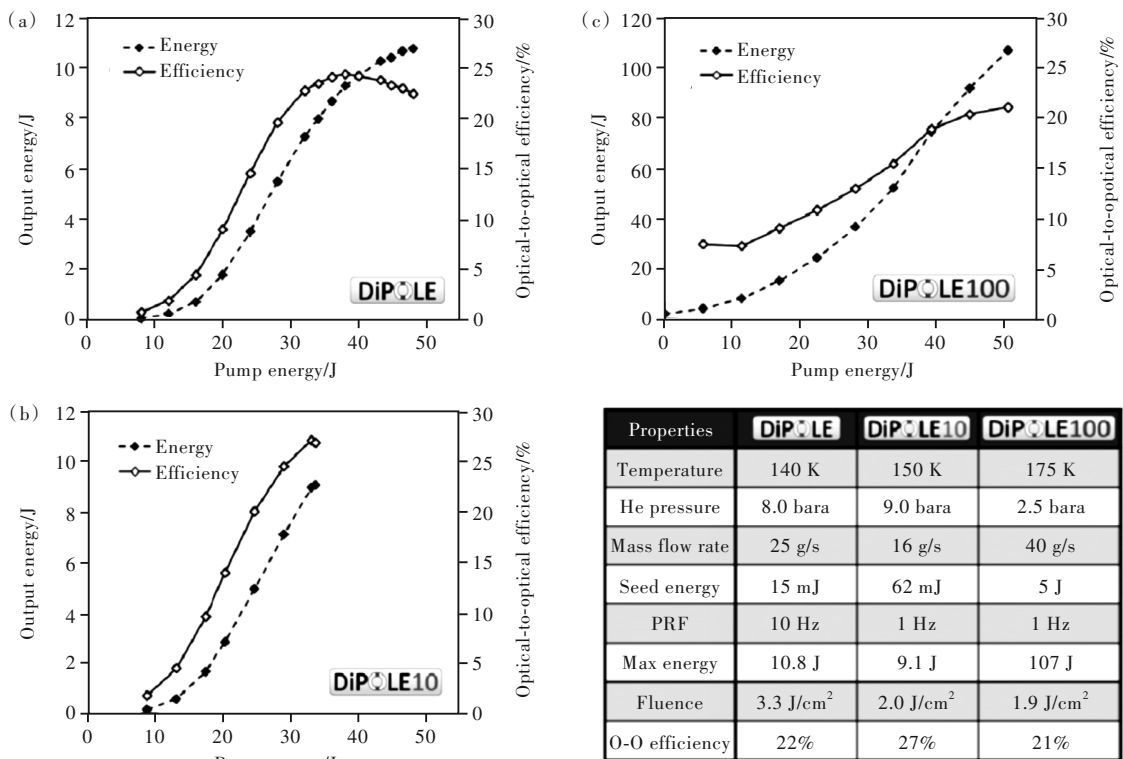
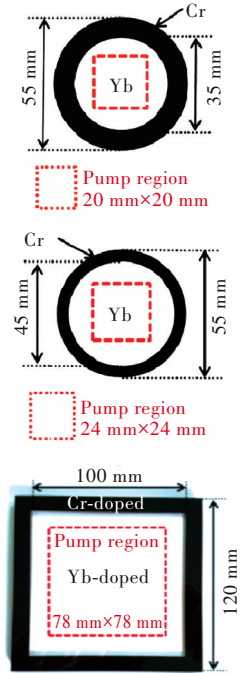


图 7 10 J 和 100 J 标度系统的放大曲线和性能数据<sup>[70]</sup>

Fig. 7 Amplification curves and performance data for 10 J and 100 J scale systems<sup>[70]</sup>



小。这增加了圆形陶瓷的有源区域和较热的包层之间的分离, DiPOLE 现在采用了更窄的包层, 可以减少高温引起的像差。由于光束尺寸的增加, 100 J 放大器的增益介质也相应缩放。这意味着由于没有合适尺寸的圆盘, 增益介质的外形由圆形板转向方形板。方形板还确保有源区和包层之间在板周围保持均匀分离, 从而减少空间温度的变化。100 J 放大器中的板条数量也增加到了 6 个, 具有三种不同的 Yb<sup>3+</sup> 掺杂水平。平均 Yb<sup>3+</sup> 掺杂水平低于 10 J 级放大器中使用的水平, 以确保较大光束尺寸上的横向增益同样更好地抑制 ASE 效应, 因此增益介质的厚度增加确保了最大的泵浦吸收。

图 7 给出了三种低温放大器系统对 10 ns 持续时间脉冲的放大性能结果。除非另有说明, 在所有情况下, 固定的泵浦脉冲持续时间为 1 ms, 以确保放大器内的均匀热负载。通过改变泵浦脉冲启动和注入种子脉冲之间的延迟来改变有效泵浦脉冲持续时间和泵浦能量。从 10 Hz 的 DiPOLE 原型放大器获得了接近 11 J 的输出脉冲能量, 系统光光转换效率为 22%<sup>[73]</sup>。通过在较低的温度(增加增益)和较长的泵浦脉冲持续时间(1.2 ms)下工作, 从 DiPOLE 前端获得相对较低的输入种子能量是可能的。在输出能量降低 7 J(平均萃取通量 ~2 J/cm<sup>2</sup>, 泵能量 32 J, 有效泵持续时间 0.8 ms)的情况下, 长期运行 50 h 以上的能量稳定性

优于 1% RMS, 没有发生光学损伤或光束恶化。

## 2.2 掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的激光增益介质

除了 Yb<sup>3+</sup> 外, 重频纳秒大能量激光器的激光增益介质中最常见的掺杂离子是 Nd<sup>3+</sup>。因为 Nd<sup>3+</sup> 具有四能级结构, 导致它的能级跃迁更为复杂。当激光作用时, 其激发态与基态的能级差约为 2 000 cm<sup>-1</sup>, 激光阈值低, 并且 Nd<sup>3+</sup> 掺杂到晶体、玻璃、陶瓷中都展示出合适的吸收和发射截面(9.67×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>)。因此, 掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的激光介质材料正在重频纳秒大能量激光领域被广泛研究与应用。2009 年首次报道的 Nd:LuAG 显示出作为重频纳秒大能量激光的增益介质的巨大潜力, 由于其合适的发射截面, 仅有 Nd:YAG 发射截面(28×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>)的 1/3, 而 Nd:YAG 发射截面过大, 无法实现高效储能。如图 8(a) 所示, 实现重频纳秒大能量激光的掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的激光增益介质的增益截面要大于 2×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup> 这一条件的激光材料包括 Nd:CaF<sub>2</sub>(3.7×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>)、Nd:SrCaF<sub>2</sub>(5×10<sup>-20</sup> cm<sup>2</sup>)。要实现高品质的重频纳秒大能量激光输出则一般要求增益介质的热导率要 ≥4 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>, 如图 8(a) 所示, 满足这一条件的激光材料包括 Nd:CaF<sub>2</sub>(4.8 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>), Nd:SrCaF<sub>2</sub>(5 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)、Nd:LuAG 陶瓷(5 W·m<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>)。如图 8(b) 所示, 掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的 LuAG 陶瓷吸收带宽为 5 nm, 且具有较长的上能级寿命, 同样满足对增益介质的吸收带宽和上能级寿命的需求。

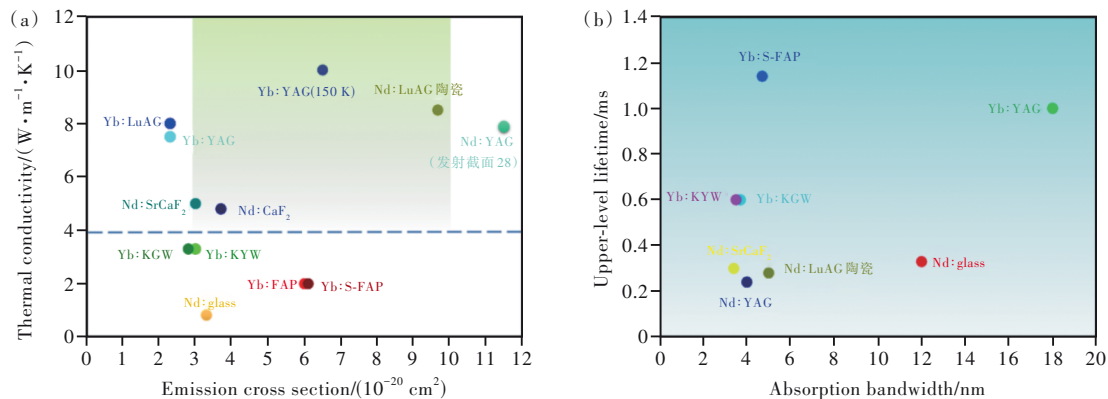


图 8 (a) 增益介质的热导率与发射截面; (b) 增益介质的吸收带宽与上能级寿命。

Fig. 8 (a) Thermal conductivity and emission cross section of gain medium. (b) Absorption bandwidth and upper-level lifetime of the gain medium.

### 2.2.1 掺杂 Nd<sup>3+</sup> 的激光晶体

2005 年, 中国研究人员孙维娜首次报道了一种基于 Nd:YAG 晶体的激光二极管抽运的高重复频率、大能量、高光束质量的激光主振荡功率放大器系统(MOPA)。为了实现最为合理的能量提

取, 利用计算优化每级放大的抽运强度, 最终输出的激光单脉冲能量达到 5.2 J, 重复频率为 100 Hz<sup>[37]</sup>。该研究方案虽然实现的光光效率仅有 15%, 但无疑为后续相关研究人员开展以掺杂 Nd 离子的激光晶体实现纳秒大能量重频激光奠定了

一定的技术和理论基础。随着大能量重频脉冲激光在工业应用领域的开发,人们发现用于工业领域的主要应用场景是冲击强化,国内外的研究团队围绕冲击强化用重频纳秒大能量激光也陆续开展了相关研究。2015年,中科院上海光机所冷雨欣研究员从满足激光冲击强化对大能量重频脉冲激光应用需求出发,同样采用MOPA技术基于闪光灯泵浦的Nd:YAG晶体,开发出一种大能量、高重频、脉宽可调的固体激光系统<sup>[31]</sup>。最终实现输出基频能量6.5 J,能量稳定性优于0.7%(RMS),倍频后绿光能量4.6 J,能量稳定性优于1%(RMS),激光系统可以工作在1~5 Hz重复频率。这为大能量重频脉冲激光用于激光冲击强化提出了一种新的实现路径。

国内重频纳秒大能量激光器研究针对的应用需求还有聚变能源、科学研究用的泵浦源等,近几年也取得了较快的进展。2015年,清华大学首次利用Nd:YAG激活镜作为增益介质(规格为:4

片×20 mm×14 mm×8 mm,掺杂原子百分比为0.6%),实现了2.3 J、10 Hz、1.5 ns的脉冲输出,最大的光光效率达到36%(10 Hz时)。这证实了焦耳级Nd:YAG激活镜概念的有效性,即高效、稳定的室温操作、良好的光束质量、低成本和降低的复杂性,使其成为未来高能放大器最有前途的替代方案之一<sup>[26]</sup>。激光器示意图如图9(a)所示,图9(b)给出了放大器的测量输出能量和整个系统(包括振荡器)的光光效率作为泵浦能量的函数。随后该团队于2017年提出了一种用于高能纳秒Nd离子掺杂激光器室温工作的DAMAC(分布式激活镜放大链)的新概念,其中增益和热沉积分布在多个增益模块和增益片上<sup>[27]</sup>。共有8块Nd:YAG的预放大器 and 主放大器,输出能量为1~12.2 J。此外,在开发的理论模型基础上实现了优化的ASE吸收包边,很好地证明了抑制横向寄生振荡的能力,并在全功率下将光电效率提高到20.6%。实验结果表明了Nd<sup>3+</sup>掺杂DAMAC结构在增益优

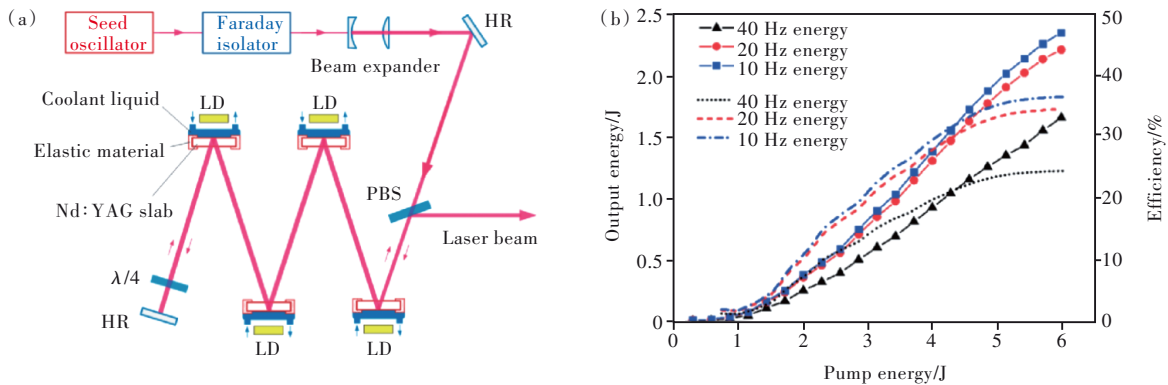


图9 (a)Nd:YAG激活镜激光器示意图;(b)输出能量和整个系统的光光效率<sup>[26]</sup>。

Fig. 9 (a)Schematic diagram of the Nd:YAG active mirror laser. (b)The output energy and the light-to-light efficiency of the entire system<sup>[26]</sup>.

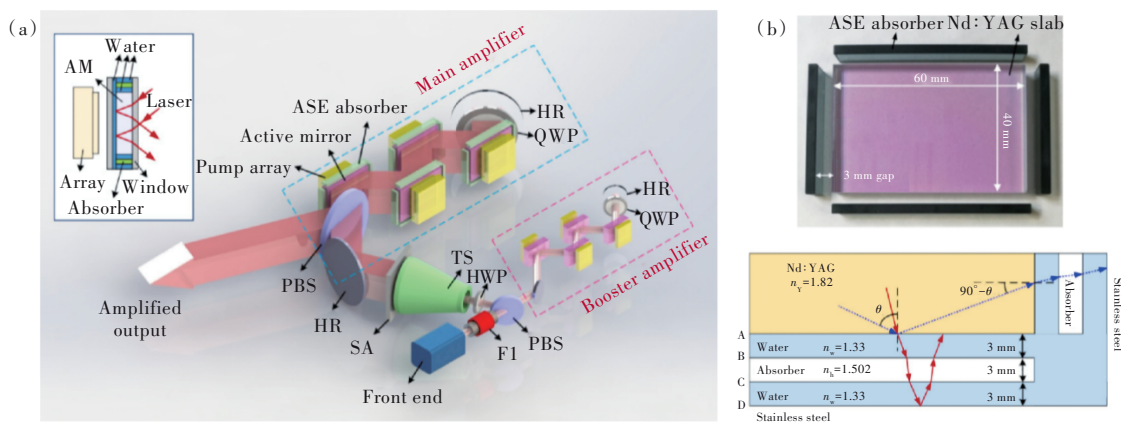


图10 (a)分布式激活镜激光器构型;(b)ASE吸收包边工作原理<sup>[27]</sup>。

Fig. 10 (a)Distributed activator mirror laser configuration. (b)Operating principle of the ASE absorber<sup>[27]</sup>.

化、热管理和多焦耳稳定操作等方面的可行性和有效性。图 10(a)为该激光器构型。该系统中为了抑制寄生振荡,4 个 ASE 吸收包边分别位于板条的 4 个侧面,间隙为 3 mm,在 1 064 nm 处的折射系数为 1.502,吸收系数为  $6.58 \text{ cm}^{-1}$  (800~1 100 nm 的波长超过  $5 \text{ cm}^{-1}$ )。图 10(b)描述了 ASE 吸收包边的工作原理。在板条和吸收包边之间的 3 mm 间隙充满了流动的去离子水。ASE 吸收包边通过独立的通道由两个最大的表面冷却。Nd:YAG 板条和去离子水的折射率分别为 1.82 和 1.33。经过验证的 DAMAC 概念有望通过在链中增加 10~12 块主动反射镜,将能量扩展到 50 J 或更高的水平。

2017 年,中国科学院光电科学院樊仲维研究员建造了一种新型的脉冲激光系统,具有高平均功率和高光束质量。激光二极管侧泵浦棒状和板条状晶体都被集成到放大器(AMP)系统中<sup>[34]</sup>。在 1 064 nm 处,脉冲能量为 1.6 倍衍射限制的输出光束,脉冲持续时间为 6.6 ns(FWHM),重复频率为 200 Hz。2018 年,王建磊研究团队首次开发了一个激活镜 Nd:YAG 板条激光放大器<sup>[32]</sup>。当泵浦能量为 26.8 J 时,在三相放大中,两个增益模块在 5 Hz 重复频率下获得 5.4 J 能量、11.3 ns 脉冲,对应的系统光光效率为 21.2%。输入能量为 3.6 mJ。当泵浦能量小于 27 J 时,小信号增益系数和能量存储显著增大;而当泵浦能量大于 27 J 时,增益达到饱和状态。

中国工程物理研究院于 2020 年在重频纳秒大能量激光研究领域也取得重要进展,利用 Nd:YAG 晶体作为放大级的增益单元,顺利实现了脉冲输出为 10 J-50 Hz 的重频纳秒大能量激光<sup>[36]</sup>。同时,经过研究人员长期的实验研究发现,重频纳秒大能量激光的热管理同样是阻碍激光系统进一步发展的关键问题。在该研究中,研究人员针对系统在 50 Hz 运行时热管理严重不足的问题,利用建模仿真分析,发现像散分布规律,完成了激光系统的热控设计。

### 2.2.2 掺杂 Nd<sup>3+</sup>的激光玻璃

高重频先进拍瓦激光系统(High repetition rate advanced petawatt laser system:HAPLS)是美国 LLNL 实验室为 ELI (Extreme light infrastructure) 所设计的一个 L3 束组。HAPLS 的泵浦激光系统采用重复频率纳秒 DPSSL 固体激光器,因此作

为本综述的主要分析对象,其分别在 2016 年和 2017 年实现了 70 J @ 3.3 Hz、97 J @ 3.3 Hz 的输出<sup>[13]</sup>。该系统的主放大级仍然采用 Mercury 系统的叠片构型以及室温氦气冷却技术,然而所采用的增益介质为掺 Nd<sup>3+</sup>的 APG-1 玻璃板条,并为了有效抑制寄生振荡采用固态包边的方法。钕玻璃不具有 Yb:S-FAP 晶体热导率高、适中的发射截面以及产热率低等优势,但钕玻璃介质最大的优势是可以做到大尺寸,满足更大能量激光装置对介质尺寸的需要。当然,随着技术的发展,钕玻璃作为增益介质的重频纳秒大能量脉冲激光器也有进一步提升频率的可能。

日本 Hamamatsu-Photonics 研究所研发的 HALNA 激光器在 2008 年实现了 21 J-10 Hz 的激光输出。该激光器采用钕玻璃材料。这种板条水冷激光器具有良好的热管理效果,采用玻璃材料也能实现 10 Hz 输出;但是这种构型的放大器不利于储能,ASE 问题是制约其向更大能量发展的一个关键问题。因此,该种类型的激光器适合于中等能量或者多路合束,不适合于大口径大能量激光器。

### 2.2.3 掺杂 Nd<sup>3+</sup>的激光陶瓷

Nd:LuAG 作为新一代激光材料,自 2009 年<sup>[76]</sup>报道首次用于激光器的增益介质以来,引起了广泛关注。Nd:LuAG 具有高热导率 ( $9.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ <sup>[74]</sup>),相对较长的荧光寿命 ( $277 \mu\text{s}$ <sup>[77]</sup>),特别是中等的发射截面 ( $9.67 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ <sup>[78]</sup>),仅有 Nd<sup>3+</sup>掺杂激光材料 Nd:YAG 的三分之一,而 Nd:YAG 过大的发射截面无法实现高效储能。所以才通过格位场调控,选择了 LuAG 作为激光陶瓷的基质。此外,Nd:LuAG 其他出色的物理和化学性质,使其成为一种非常有前途的开发激光驱动惯性聚变能量和产生其他短脉冲代表源的激光增益介质<sup>[79-81]</sup>。清华大学在 2019 年采用 Nd:LuAG 陶瓷与 Nd:YAG 晶体混合放大的方式,实现了 10 J/10 Hz 的激光输出,分析了 Nd:LuAG 的储能容量以及使用大口径增益介质的必要性。

2019 年,本课题组与清华大学合作利用激光镜构型的混合放大链实现了 10.3 J 的激光输出<sup>[32]</sup>,该系统中采用的增益介质是本课题组自主设计制备的三片大尺寸 Nd:LuAG 陶瓷。实验结果联系理论分析得出在满足抑制 ASE 效应条件下,大口径 Nd:LuAG 陶瓷的储能极限约为 15~16

J,是 Nd:YAG 的 3 倍。2019 年,中科院上海光机所王建磊研究员又进一步开发了一种具有高光束质量的焦耳级陶瓷 Nd:LuAG 激活镜面激光放大器。当泵浦能量为 11.6 J 时,通过双通放大得到了 1.5 J 能量、10 Hz 重复频率的 6.62 ns 脉冲,利用 SBS-PCM 补偿激光束失真,得到了衍射极限的 1.25 倍(DL)<sup>[33]</sup>。最新的研究报道显示,清华大学已将室温条件下运转的激光二极管泵浦的 Nd:YAG/Nd:LuAG 混合放大链实现了 100 J、10 Hz、10 ns 输出水平<sup>[11]</sup>。

Nd:LuAG 材料具有适合重频纳秒大能量激光器储能与提取的发射截面,其截面介于 Yb:YAG 与 Nd:YAG 之间,既可以实现单片较高的储能,又不需要太高的提取通量,从而可实现高效储能与安全提取,因此受到了国内外研究人员的关注。

### 3 存在的问题及对策

近年来,重频纳秒大能量激光作为固态激光器的研究热点已引起相关研究机构和研究者的极大关注与兴趣,同时在该领域的研究也不断获得新的进展和成果,输出激光系统的输出能量和重复频率逐步提高。然而,在重频纳秒大能量激光迅速发展的同时,系统及增益介质存在的一些问题也逐步暴露。

#### 3.1 合适的增益介质的选择与制备

虽然各国主要研究团队在重频纳秒大能量激光领域的研究发展迅速,但是由于种种原因目前均没有在激光聚变点火等应用领域发挥实际作用,其中增益介质的发展现状不足和激光系统高重频纳秒大能量对增益介质的需求为主要矛盾之一。因此,激光增益介质仍然是固体激光系统中最大瓶颈之一,发展探索新的、可以满足激光系统

需求的增益介质迫在眉睫!面向高重频纳秒大能量激光系统的理想激光增益介质应该具备以下的性能。

目前重频纳秒大能量激光的理想激光增益介质应该具备如下的性能:材料的发射截面应该大于  $2 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ,最好能够达到  $6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。Yb 掺杂的 S-FAP ( $\sim 6 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、KYW ( $\sim 3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、KGW ( $\sim 2.8 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、YAG ( $\sim 2.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ )、LuAG ( $\sim 2.3 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) 与 Nd: SrCaF<sub>2</sub> ( $\sim 2.5 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ ) 等晶体均能满足发射截面要求。对于高重频激光系统,激光增益介质的热导率是一个非常重要的参数,上述适合的晶体 Yb:YAG ( $> 7.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ , Yb 浓度小于 4%), 100 K 时热导率将提高至  $10 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  以上。Yb:LuAG ( $8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )、Yb:S-FAP ( $2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 和 Nd: SrCaF<sub>2</sub> ( $\sim 5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ ) 的热导率都大于 Nd 玻璃;长的上能级寿命有利于储能,Yb:S-FAP (1.14 ms) 和 Yb:YAG (1 ms) 的上能级寿命比 Yb:KYW (0.6 ms)、KGW (0.6 ms) 和 Nd: SrCaF<sub>2</sub> (0.3 ms) 要长很多。增益介质要能够大尺寸制备。Nd 玻璃目前可以制备成  $40 \text{ cm} \times 70 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ,而 Yb:YAG 或 Yb:LuAG 晶体非常难于生长大尺寸晶体,陶瓷制备技术可能是一条很好的解决途径,但 Yb:YAG 或 Yb:LuAG 材料作为增益介质需要冷却。Yb:S-FAP 晶体目前可以制备出直径为 7 cm 的材料,Yb:S-FAP 陶瓷则还有很长的路要走。

表 3 给出了几种典型增益介质的激光参数。这几种材料有的已经大量使用在激光器中,有的处于研发阶段,其中 APG-1 玻璃、Yb:S-FAP 晶体以及 Nd:YAG 晶体广泛应用于各种激光器中,虽然得到了应用并输出了大能量激光,但它们均不是最理想材料。APG-1 玻璃、Yb:S-FAP 晶体两种材料热导率较低,不利于向更高重频发展;Yb:

表 3 典型增益介质的激光参数

Tab. 3 Laser parameters of the typical gain media

名称	激光波长/nm	发射截面/ ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	吸收截面/ ( $10^{-20} \text{ cm}^2$ )	荧光寿命/ $\mu\text{s}$	热导率/ ( $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )	饱和通量/ ( $\text{J} \cdot \text{cm}^{-2}$ )
APG-1 玻璃	1 054	3.3	2.1	385	0.83	~6
Nd:LuAG 陶瓷	1 064	9.7	5	304	8	~2
Nd:CaF <sub>2</sub> 晶体	1 053	3.7	2.41	337	4.8	~5
Nd:YAG 晶体	1 064	28	4	240	8	~0.6
Yb:S-FAP 晶体	1 047	6.1	8.6	1 100	2	~3
Yb:YAG	1 030	2	0.76	995	7.5	~9

YAG 需要低温应用,且增益特性对温度非常敏感;Nd:YAG 的发射截面太大,不容易实现单口径大能量。Nd:LuAG 陶瓷和 Nd:CaF<sub>2</sub> 晶体尚处于研发阶段,它们的发射截面按照文献报道属于比较适中的范围,但尚需进一步工程应用实验验证。当下,要兼顾重频纳秒大能量激光高平均功率和高峰值功率的需求,首先就要选择适合的激光增益介质。作为激光器的核心部件,激光材料的特性对激光器的波长、效率、工作方式等都有重要的影响。前文提到,目前的激光材料或是热导率较低,或是发射截面过大,或是常温下需要强泵浦才能实现净增益,并没有特别合适的材料用于高重频纳秒大能量脉冲激光器。因此,在选择材料时需要根据实际需要,选取某一个或两个方面优秀的材料,然后在设计中通过一定的技术手段解决其缺点。

### 3.2 缺乏有效热管理

随着重频纳秒大能量激光不断向更高重复频率、更大输出能量以及系统小型化发展,对系统缺乏有效的热管理已经成为限制其性能进一步提升的最主要的阻碍之一。对系统热效应管控的缺失,容易破坏输出的光束质量;造成激光系统的损耗增加,在同样的泵浦功率条件下,反转粒子数减少,从而影响输出能量和效果;限制泵浦功率的提升,从而阻碍激光输出能量和重复频率进一步提升,最终导致系统的效率降低。到目前为止,国内外针对重频纳秒大能量激光的热管理研究也已经取得一定进展,具体梳理起来,实现途径主要围绕在以下三个方向:(1)限制增益介质发热。这是限制重频纳秒大能量激光热应力的最有效的方法。近十年来,陆续产生很多新的思路,其中比较有代表性的有辐射平衡激光器<sup>[82-83]</sup>、热助推<sup>[84]</sup>、直接泵浦<sup>[85-86]</sup>。但这些新技术对于泵浦波长的准确性、激光器构型等方面要求都较高,在实际工业应用中难以实现。另一方面,以增益介质均匀生热为目标,低温技术便是主要的实现途径。Nd:LuAG 等激光增益介质在低温条件下热导率迅速升高,因此便于降低温度梯度和热应力,所以低温激光器技术成为了目前国内外的研究热点之一<sup>[19,25-28]</sup>。(2)采用先进的冷却技术。针对激光器冷却的相关技术同样发展迅速,该技术要求既需要高效散热同时冷却模块尽量小型化,同时还要兼顾系统的稳定性。近些年,新的冷却技术包括射流冲击

沸腾<sup>[87]</sup>、微通道液冷技术<sup>[88]</sup>、喷雾冷却<sup>[89-90]</sup>、微尺度两相冷却<sup>[91]</sup>等不断涌现。其中射流冲击技术和微通道冷却技术在大尺寸增益介质中容易出现冷却不均匀的现象,从而引发增益介质内部热应力较大,若散热不及时、不充分,对光束质量影响较为严重,甚至会造成光学元器件损坏<sup>[90]</sup>。而微尺度两相冷却技术却可以在保证高效散热效率的同时还可通过调整结构提高冷却均匀性,更具发展前景。(3)优化激光系统结构。美国 Mercury 激光系统采用离轴四程气冷放大结构,为进一步满足热管理要求,增益介质采用片梯度掺杂的 Yb:S-FAP 晶体,Mercury 系统冷却的难点在于对冷却气流的控制均匀性要求极高,该冷却方案虽然可以满足冷却均匀性的要求,但光路损耗过大。日本 HALNA 激光系统采用“边缘热控制”的板条激光技术,目的是缩小板条边缘温度梯度,但同时侧效应、端效应会制约光路质量。法国 LUCIA 系统利用水冷有源反射镜盘片放大器,增益介质采用 Yb:YAG。该系统中明显的不足之处在于增益介质的热变形严重且冷却效率较低,从而影响输出。

尽管以上所述热管理技术各有效果,但也都存在缺陷之处。以水冷有源反射镜盘片放大器构型为代表的热管理技术在重频纳秒大能量激光热管理中仍具备极大的研究空间。

### 3.3 自发辐射放大效应(ASE)

为了获得重频纳秒大能量激光更高的输出能量和功率,常常会采用增大增益介质尺寸的方法,但大尺寸和高增益同时会引发严重的自发辐射放大效应。ASE 会降低增益介质的储能密度和效率,严重影响光束空间增益的均匀性,也会对整个重频纳秒大能量激光系统的性能产生很大负面影响,严重制约了重频纳秒大能量激光的进一步发展。

国外针对 ASE 问题的研究起步较早,为有效抑制 ASE,常见方法是在垂直于光路方向的增益介质侧面采用特定的材料和工艺包覆用来吸收 ASE 和寄生振荡的吸收介质。然而,随着放大器增益介质所用尺寸的不断增大,在增益介质侧面包覆吸收介质的工艺已经无法满足抑制 ASE 的需求。以下三个方法可能是未来抑制 ASE 的重要途径:(1)梯度掺杂。该方法的目的在于使增益介质中能提取的能量有所增加,利用增益介质在不同位置的不同掺杂浓度来调整泵浦能量沉积和

温度在增益介质中的空间分布。因此,该方法只对温度敏感的三能级材料有用;并且也受限于加工精度,例如在多片增益介质键合加工中,键合处很难完全吻合,这就将导致热导率下降甚至引发光学畸变,因此在实际应用中还有很多困难。(2)分脉冲提取合束。采用该方法主要是考虑到 ASE 会随着泵浦时间的延长而增大。然而该方法也存在一定不足之处,基于目前的工艺水平建立低损耗、高能量、长延迟、易调节的光脉冲延迟线仍然是较大难点。(3)可控禁带光子晶体。该方法从 ASE 的产生和放大的本质条件考虑,利用光子局域化和光子禁带抑制自发辐射的产生和传播,从根本上减小或消除 ASE,理论上适用于所有储能型的激光器。但目前受限于加工精度和加工方法,该方法需要的光子晶体仍然很难制备。

上述三个方法分别从空间、时间和 ASE 本质三个方面提供了抑制 ASE 的解决对策。如今,“100 J、10 Hz、10 ns”这一目标在超低温和室温条件下分别实现了较大的突破,目前制约重频纳秒大能量激光向更高效率、更高功率、更大能量发展的核心问题是热管理、ASE 效应管控以及增益介质的制备与选取三大问题。而以上三个问题并不是孤立的,而是相互关联、相互影响的,不能单一地看待,需要研究人员统筹考虑与协调三者才可以获得更高重复频率、更大输出能量的激光系统。因此,需要围绕利用更高品质的增益介质材料的制备优势,解决重频纳秒大能量激光面临的热管理及 ASE 效应问题,更好地开展进一步研究。

## 4 总结与展望

重频纳秒大能量激光系统用增益介质的选择与制备对于整个系统的长期工作稳定性而言至关重要。研究适用于重频纳秒大能量激光的增益介质的激光材料首先应该从材料的发射截面和热导率角度考虑,其次还应该对增益介质的吸收带宽、长上能级寿命以及样品的大尺寸制备难易程度综合考量和选择。

从增益介质对发射截面的需求方面,介质的发射截面应不小于  $2.0 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ 。在对增益介质的热导率需求方面,材料的热性能对于整个系统的热管理是关键节点,更高的热导率更有利于增益介质和激光系统的热管理,这有利于重频纳秒大能量激光的长效稳定输出。研究人员都把热导率  $\geq 2 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$  作为选择增益介质的基础条件,

但要实现高品质的重频纳秒大能量激光输出则一般要求增益介质的热导率要  $\geq 4 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ 。但实际上,为了营造低温的环境,往往需要外加大型的制冷设备,这不仅扩大了系统规模和复杂度,同时也增加了系统额外的运行成本。因此,研究低温运转、紧凑型的重频纳秒大能量激光也是重要的研究趋势。

在对增益介质的吸收带宽与上能级寿命需求方面,首先需要注意的是通常情况下 LD 泵源的发射带宽大约 5 nm,因此 Yb、Nd 离子掺杂材料的吸收带宽要在大于 5 nm 的条件下更易实现重频纳秒大能量激光输出。另一方面,长的上能级寿命(荧光寿命)更有利于增益介质的储能,这也是脉冲储能器件对增益介质的一个基本要求。

大尺寸增益介质的可获得性也是必须要考虑的。因为考虑到膜层损伤阈值,为获得 100 J 及以下的输出,增益介质的净通光口径应不低于  $10 \text{ cm}^2$ 。此外,从惯性聚变能源发展的长期规划来看,需要实现更高的重复频率和更大的输出能量,只有将晶体材料优良的热性能和玻璃材料可大尺寸制备的优势结合考虑和发展,才可以满足更大口径激光增益介质的需要。由于激光陶瓷不存在偏析效应,可掺杂离子浓度较高且可控制得较均匀,制备过程相对简单且可获得大尺寸样品以及具有较高热导率,因此相对而言,激光陶瓷兼具光热性能良好以及制备难度适中等优点,并且可设计性强,应用前景最为广阔。随着对重频纳秒大能量激光增益介质了解的深入,能够满足发射截面、热导率、吸收带宽与上能级寿命以及可大尺寸制备的必然需求的,目前仅有 Nd:LuAG 陶瓷、Nd:CaF<sub>2</sub> 以及低温条件下运转的 Yb:YAG 满足条件。开发更多符合重频纳秒大能量激光需要的增益介质仍然任重道远。

随着科研人员对重频纳秒大能量激光增益介质研究工作的不断深入,具有更加优异性能地适用于更高重频更大能量的新型激光增益介质的开发必将取得重大突破。可以预见,新型重频纳秒大能量激光用增益介质的研发将推动新一代激光驱动源在大科学装置、重大基础和应用领域中更加蓬勃发展。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:  
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20220264>.

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] LUO W, XU W, PAN Q Y, *et al.* X-ray generation from slanting laser-Compton scattering for future energy-tunable Shanghai Laser Electron Gamma Source [J]. *Appl. Phys. B*, 2010, 101(4): 761-771.
- [ 2 ] ZHANG Q R. Possible generation of a  $\gamma$ -ray laser by electrons wiggling in a background laser [J]. *Chin. Phys. B*, 2015, 24(5): 054208-1-9.
- [ 3 ] AGUSTSSON R, BOUCHER S, FINN O, *et al.* Laser-free RF-Gun as a combined source of THz and Ps-Sub-Ps X-rays [J]. *Phys. Procedia*, 2015, 66: 156-165.
- [ 4 ] 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 Phys. Control. Fusion*, 2016, 58(1): 014039-1-9.
- [ 5 ] BAYRAMIAN A J, BOPP R, BORDEN M, *et al.* High energy, high average power, DPSSL system for next generation petawatt laser systems [C]. *2016 Conference on Lasers and Electro-Optics, San Jose*, 2016.
- [ 6 ] WANG L, XING T L, HU S W, *et al.* Mid-infrared ZGP-OPO with a high optical-to-optical conversion efficiency of 75.7% [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(4): 3373-3380.
- [ 7 ] YUAN X D, WANG J S, CHEN Y Q, *et al.* Laser at 532 nm by intracavity frequency-doubling in BBO [J]. *J. Semicond.*, 2017, 38(6): 064007-1-4.
- [ 8 ] 苏艳丽. LD泵浦全固态213 nm深紫外激光器的研究 [D]. 济南: 山东师范大学, 2006.  
SU Y L. *Study of Diode-pumped All-solid-state Deep Ultraviolet Laser at 213 nm* [D]. Ji'nan: Shandong Normal University, 2006. (in Chinese)
- [ 9 ] SEE D W, DULANEY J L, CLAUER A H, *et al.* The air force manufacturing technology laser peening initiative [J]. *Surf. Eng.*, 2002, 18(1): 32-36.
- [ 10 ] GALLAIS L, DOUTI D B, COMMANDRÉ M, *et al.* Wavelength dependence of femtosecond laser-induced damage threshold of optical materials [J]. *J. Appl. Phys.*, 2015, 117(22): 223103-1-14.
- [ 11 ] 付星, 刘廷昊, 雷新星, 等. 二极管泵浦重复频率纳秒高能固体激光器研究进展 [J]. *中国激光*, 2021, 48(15): 1501003-1-21.  
FU X, LIU T H, LEI X X, *et al.* High energy diode-pumped rep-rated nanosecond solid-state laser [J]. *Chin. J. Lasers*, 2021, 48(15): 1501003-1-21. (in Chinese)
- [ 12 ] 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 Sci. Technol.*, 2007, 52(3): 383-387.
- [ 13 ] 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, Long Beach*, 2016.
- [ 14 ] 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]. *Opt. Lett.*, 2015, 40(6): 855-858.
- [ 15 ] 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]. *Opt. Lett.*, 2008, 33(15): 1711-1713.
- [ 16 ] SEKINE T, TAKEUCHI Y, KURITA T, *et al.* Development of cryogenic Yb:YAG ceramics amplifier for over 100 J DPSSL [C]. *Proceedings of SPIE 10082, Solid State Lasers XXVI: Technology and Devices, San Francisco*, 2017.
- [ 17 ] GONÇALVÈS-NOVO T, ALBACH D, VINCENT B, *et al.* 14 J/2 Hz Yb<sup>3+</sup>:YAG diode pumped solid state laser chain [J]. *Opt. Express*, 2013, 21(1): 855-866.
- [ 18 ] MARRAZZO S, GONÇALVÈS-NOVO T, MILLET F, *et al.* Low temperature diode pumped active mirror Yb<sup>3+</sup>:YAG disk laser amplifier studies [J]. *Opt. Express*, 2016, 24(12): 12651-12660.
- [ 19 ] FALCOZ F, GONTIER E, COURJAUD A, *et al.* Latest developments at Amplitude in the frame of the ELI-HU projects. PW laser at high repetition rate [C]. *CLEO: Science and Innovations 2019, San Jose*, 2019.
- [ 20 ] BANERJEE S, ERTEL K, MASON P D, *et al.* High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier [J]. *Opt. Lett.*, 2012, 37(12): 2175-2177.
- [ 21 ] BANERJEE S, ERTEL K, MASON P, *et al.* DiPOLE: a multi-slab cryogenic diode pumped Yb:YAG amplifier [C]. *Proceedings of SPIE 8780, High-Power, High-Energy, and High-Intensity Laser Technology; and Research Using Extreme Light: Entering New Frontiers with Petawatt-Class Lasers, Prague*, 2013: 878006-1-7.

- [ 22 ] MASON P, DIVOKÝ M, ERTEL K, *et al.* Kilowatt average power 100 J-level diode pumped solid state laser [J]. *Optica*, 2017, 4(4): 438-439.
- [ 23 ] 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 Sci. Eng.*, 2018, 6: e65-1-10.
- [ 24 ] 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, Munich*, 2019.
- [ 25 ] BANERJEE S, MASON P, PHILLIPS J, *et al.* Pushing the boundaries of diode-pumped solid-state lasers for high-energy applications [J]. *High Power Laser Sci. Eng.*, 2020, 8: e20-1-3.
- [ 26 ] 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]. *Appl. Phys. Express*, 2015, 8(9): 092702-1-3.
- [ 27 ] LIU T, ZHAN S, LIN C, *et al.* 12 J, 10 Hz diode-pumped Nd:YAG distributed active mirror amplifier chain with ASE suppression [J]. *Opt. Express*, 2017, 25(18): 21981-21992.
- [ 28 ] LIU T H, UI Z, CHEN L, *et al.* 50 mm-aperture Nd:LuAG ceramic nanosecond laser amplifier producing 10 J at 10 Hz [J]. *Opt. Express*, 2019, 27(11): 15595-15603.
- [ 29 ] 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]. *Opt. Lett.*, 2016, 41(22): 5322-5325.
- [ 30 ] 李磊, 王建磊, 程小劲, 等. 低温重复率 Yb:YAG 固体激光放大器 [J]. *红外与激光工程*, 2013, 42(5): 1170-1173.  
LI L, WANG J L, CHENG X J, *et al.* Cryogenic Yb:YAG solid state pulsed laser amplifier [J]. *Infrared Laser Eng.*, 2013, 42(5): 1170-1173. (in Chinese)
- [ 31 ] 冷雨欣, 彭宇杰, 陈俊驰. 面向激光冲击强化的大能量激光源 [C]. *上海市激光学会 2015 年学术年会论文集*, 上海, 2015.  
LENG Y X, PENG Y J, CHEN J C. Large-energy laser source facing laser impact reinforcement [C]. *Annual Meeting of Shanghai Laser Society, Shanghai*, 2015. (in Chinese)
- [ 32 ] LIU J, LI L, SHI X C, *et al.* High-beam-quality, 5.4 J, 5 Hz diode-pumped Nd:YAG active mirror laser amplifier [J]. *Chin. Opt. Express*, 2018, 16(12): 121402-1-3.
- [ 33 ] WANG J L, ZHAO K Q, FENG T, *et al.* 1.5 J high-beam-quality Nd:LuAG ceramic active mirror laser amplifier [J]. *Chin. Opt. Express*, 2020, 18(2): 021401-1-3.
- [ 34 ] FAN Z W, QIU J S, KANG Z J, *et al.* High beam quality 5 J, 200 Hz Nd:YAG laser system [J]. *Light: Sci. Appl.*, 2017, 6(3): e17004-1-2.
- [ 35 ] 王明哲, 段文涛, 曹丁象, 等. 激光二极管泵浦的重复频率大能量低温 Yb:YAG 激光器设计 [J]. *强激光与粒子束*, 2010, 22(1): 36-40.  
WANG M Z, DUAN W T, CAO D X, *et al.* Laser diode pumped cryogenically cooled Yb:YAG laser design for rep-rated and high-energy output [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2010, 22(1): 36-40. (in Chinese)
- [ 36 ] 蒋新颖, 肖凯博, 王振国, 等. 重频大能量脉冲激光技术研究取得重要进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2021, 33(2): 022001-1-1.  
JIANG X Y, XIAO K B, WANG Z G, *et al.* Important progress has been made in the research of heavy-frequency and large-energy pulsed laser technology [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2021, 33(2): 022001-1-1. (in Chinese)
- [ 37 ] 孙维娜, 王伟力, 秘国江, 等. 激光二极管抽运高重复频率大能量激光器 [C]. *第十七届全国激光学术会议论文集*, 绵阳, 2005: 28-30.  
SUN W N, WANG W L, MI G J, *et al.* LD pumped laser system of high frequency and high energy [C]. *National Laser Academic Conference, Mianyang*, 2005: 28-30. (in Chinese)
- [ 38 ] SAMARKIN V, ALEXANDROV A, BORSONI G, *et al.* Wide aperture piezoceramic deformable mirrors for aberration correction in high-power lasers [J]. *High Power Laser Sci. Eng.*, 2016, 4: e4-1-7.
- [ 39 ] 蒋新颖. 高效重频大能量脉冲激光器关键技术研究 [D]. 北京: 中国工程物理研究院, 2020.  
JIANG X Y. *Study on Key Technologies of High Efficiency Repetition Frequency Large Energy Pulse Laser* [D]. Beijing: China Academy of Engineering Physics, 2020. (in Chinese)
- [ 40 ] IKESUE A, KINOSHITA T, KAMATA K, *et al.* Fabrication and optical properties of high-performance polycrystalline



- Nd:YAG ceramics for solid-state lasers [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 1995, 78(4): 1033-1040.
- [41] LU J, PRABHU M, UEDA K, *et al.* Potential of ceramic YAG lasers [J]. *Laser Phys.*, 2001, 11(10): 1053-1057.
- [42] YAGI H, YANAGITANI T, TAKAICHI K, *et al.* Characterizations and laser performances of highly transparent Nd<sup>3+</sup>: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser ceramics [J]. *Opt. Mater.*, 2007, 29: 1258-1262.
- [43] LI X D, LI J G, XIU Z M, *et al.* Transparent Nd:YAG ceramics fabricated using nanosized  $\gamma$ -alumina and Yttria powders [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2009, 92(1): 241-244.
- [44] GONG H, TANG D Y, HUANG H, *et al.* Agglomeration control of Nd:YAG nanoparticles via freeze drying for transparent Nd:YAG ceramics [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2009, 92(4): 812-817.
- [45] WU Y S, LI J, PAN Y B, *et al.* Diode-pumped Yb:YAG ceramic laser [J]. *J. Am. Ceram. Soc.*, 2007, 90(10): 3334-3337.
- [46] IKESUE A, AUNG Y L, YODA T, *et al.* Fabrication and laser performance of polycrystal and single crystal Nd:YAG by advanced ceramic processing [J]. *Opt. Mater.*, 2007, 29(10): 1289-1294.
- [47] ZHOU J, ZHANG W X, WANG L, *et al.* Fabrication, microstructure and optical properties of polycrystalline Er: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramics [J]. *Ceram. Int.*, 2011, 37(1): 119-125.
- [48] ZHANG W, LU T C, WEI N, *et al.* Assessment of light scattering by pores in Nd:YAG transparent ceramics [J]. *J. Alloys Compd.*, 2012, 520: 36-41.
- [49] HOSTASA J, SCHWENTENWEIN M, TOCI G, *et al.* Transparent laser ceramics by stereolithography [J]. *Scripta Materialia*, 2020, 187: 194-196
- [50] MONCHAMP R R. The distribution coefficient on neodymium and lutetium in Czochralski grown Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *J. Cryst. Growth*, 1971, 11(3): 310-312.
- [51] SEKINO T, SOGABE Y. Progress in the YAG crystal growth technique for solid state lasers [J]. *Rev. Laser Eng.*, 1993, 21(8): 827-831.
- [52] 徐学珍, 陈熙基, 姜腾雨, 等. 提高Nd:YAG晶体中Nd<sup>3+</sup>离子浓度分布均匀性的研究 [J]. *人工晶体学报*, 1998, 27(3): 232-252.
- XU X Z, CHEN X J, JIANG T Y, *et al.* Study on improving the concentration homogeneity of Nd<sup>3+</sup> ions in Nd:YAG crystals [J]. *J. Synth. Cryst.*, 1998, 27(3): 232-252. (in Chinese)
- [53] KOPYLOV Y L, KRAVCHENKO V B, BAGAYEV S N, *et al.* Development of Nd<sup>3+</sup>: Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> laser ceramics by high-pressure colloidal slip-casting (HPCSC) method [J]. *Opt. Mater.*, 2009, 31(5): 707-710.
- [54] KAMINSKII A A, AKCHURIN M S, ALSHITS V L, *et al.* New data on the physical properties of Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>-based nanocrystalline laser ceramics [J]. *Crystallogr. Rep.*, 2003, 48(3): 515-519.
- [55] TER-GABRIELYAN N, MERKLE L D, KUPP E R, *et al.* Efficient resonantly pumped tape cast composite ceramic Er:YAG laser at 1 065 nm [J]. *Opt. Lett.*, 2010, 35(7): 922-924.
- [56] MAH T I, PARTHASARATHY T A, LEE H D. Polycrystalline YAG structural and functional [J]. *J. Ceram. Process Res.*, 2004, 5(4): 369-379.
- [57] QUARLES G J. State-of-the-art of polycrystalline oxide laser gain materials [C]. *46th Sagamore Army Materials Research Conference on Advances and Needs in Multi-Spectral Transparent Materials Technology*, St. Michaels, 2005.
- [58] 吴玉松. 稀土离子掺杂YAG激光透明陶瓷的研究 [D]. 上海: 中国科学院上海硅酸盐研究所, 2008.
- WU Y S. *Research on Lanthanides Doped YAG Transparent Ceramics* [D]. Shanghai: Shanghai Institute of Ceramics, Chinese Academy of Sciences, 2008. (in Chinese)
- [59] KAMINSKII A. Laser crystals and ceramics: recent advances [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2007, 1(2): 93-177.
- [60] 姜淳, 邓佩珍, 张俊洲, 等. 高发射截面掺镱氧化物玻璃 [J]. *光学学报*, 2000, 20(9): 1287-1290.
- JIANG C, DENG P Z, ZHANG J Z, *et al.* Yb:oxide glass with high emission cross section [J]. *Acta Opt. Sinica*, 2000, 20(9): 1287-1290. (in Chinese)
- [61] 於海武, 段文涛, 徐美健, 等. Yb激光材料综述 [J]. *激光与光电子学进展*, 2007, 44(5): 30-41.
- YU H W, DUAN W T, XU M J, *et al.* Review of ytterbium-doped laser materials [J]. *Laser Optoelectron. Prog.*, 2007, 44(5): 30-41. (in Chinese)
- [62] KAWANANKA J, MIVANAGA N, TSUBAKIMOTO K, *et al.* New concept of laser fusion energy driver using cryogenic Yb:YAG ceramics [C]. *21st IAEA Fusion Energy Conference, Chengdu*, 2006: 16-21.

- [ 63 ] LACOVARA P, CHOI H K, WANG C A, *et al.* Room-temperature diode-pumped Yb: YAG laser [J]. *Opt. Lett.*, 1991, 16(14): 1089-1091.
- [ 64 ] ZHANG L, ZHOU T, CHEN H, *et al.* Advances in transparent Nd: YAG laser ceramics [J]. *Mater. Rev.*, 2017, 31(7A), 41-50.
- [ 65 ] LIU Y, YAO Z. Progress of YAG ceramic laser [J]. *Laser Tech.*, 2014, 37(3): 326-329.
- [ 66 ] LU J R, MURAI T, TAKAICHI K, *et al.* 72 W Nd:Y<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic laser [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2001, 78(23): 3586-3588.
- [ 67 ] ALBACH D, CHANTELOUP J C, LE TOUZÉ G, *et al.* Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb<sup>3+</sup>:YAG slabs [J]. *Opt. Express*, 2009, 17(5): 3792-3801.
- [ 68 ] FURUSE H, KAWANAKA J, TAKESHITA K, *et al.* Total-reflection active-mirror laser with cryogenic Yb: YAG ceramics [J]. *Opt. Lett.*, 2009, 34(21): 3439-3441.
- [ 69 ] FURUSE H, KAWANAKA J, MIYANAGA N, *et al.* Zig-zag active-mirror laser with cryogenic Yb<sup>3+</sup>: YAG/YAG composite ceramics [J]. *Opt. Express*, 2011, 19(3): 2448-2455.
- [ 70 ] TOKITA S, DIVOKY M, FURUSE H, *et al.* Generation of 500-mJ nanosecond pulses from a diode-pumped Yb: YAG TRAM laser amplifier [J]. *Opt. Mater. Express*, 2014, 4(10): 2122-2126.
- [ 71 ] MASON P D, FITTON M, LINTERN A, *et al.* Scalable design for a high energy cryogenic gas cooled diode pumped laser amplifier [J]. *Appl. Opt.*, 2015, 54(13): 4227-4238.
- [ 72 ] 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]. *Opt. Express*, 2011, 19(27): 26610-26626.
- [ 73 ] 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]. *Opt. Express*, 2015, 23(15): 19542-19551.
- [ 74 ] NOVAK O, MIURA T, SMRŽ M, *et al.* Status of the high average power diode-pumped solid state laser development at HiLASE [J]. *Appl. Sci.*, 2015, 5(4): 637-665.
- [ 75 ] BAYRAMIA A J, BIBEAU C, SCHAFFERS K I, *et al.* Gain saturation measurements of ytterbium-doped Sr<sub>5</sub>(PO<sub>4</sub>)<sub>3</sub>F [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(6): 982-985.
- [ 76 ] XU X D, WANG X D, MENG J Q, *et al.* Crystal growth, spectral and laser properties of Nd: LuAG single crystal [J]. *Laser Phys.*, 2009, 6(9): 678-681.
- [ 77 ] KUWANO Y, SUDA K, ISHIZAWA N, *et al.* Crystal growth and properties of (Lu, Y)<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> [J]. *J. Cryst. Growth*, 2004, 260(1-2): 159-165.
- [ 78 ] 王晓丹, 徐晓东, 臧涛成, 等. Nd: Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub>晶体的生长与光谱性能研究 [J]. *无机材料学报*, 2010, 25(4): 435-440.
- WANG X D, XU X D, ZANG T C, *et al.* Growth and spectral properties of Nd: Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> crystal [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2010, 25(4): 435-440. (in Chinese)
- [ 79 ] BROWN D C, MCMILLEN C D, MOORE C, *et al.* Spectral properties of hydrothermally-grown Nd: LuAG, Yb: LuAG, and Yb: Lu<sub>2</sub>O<sub>3</sub> laser materials [J]. *J. Lumin.*, 2014, 148: 26-32.
- [ 80 ] QIAO S Q, ZHANG Y, SHI X C, *et al.* Spectral properties and laser performance of Nd: Lu<sub>3</sub>Al<sub>5</sub>O<sub>12</sub> ceramic [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2015, 13(5): 051602-1-4.
- [ 81 ] MA J, LU T T, ZHANG P X, *et al.* Actively Q-switched laser performance of Nd: LuAG crystal with birefringence compensator [J]. *Opt. Quantum Electron.*, 2015, 47(10): 3213-3220.
- [ 82 ] BOWMAN S R. Lasers without internal heat generation [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1999, 35(1): 115-122.
- [ 83 ] ANDRIANOV S N, SAMARTSEV V. Solid state lasers with internal laser refrigeration effect [C]. *Proceedings of SPIE* 4605, *PECS 2001; Photon Echo and Coherent Spectroscopy, Novgorod*, 2001: 208-213.
- [ 84 ] LAVI R, JACKEL S. Thermally boosted pumping of neodymium lasers [J]. *Appl. Opt.*, 2000, 39(18): 3093-3098.
- [ 85 ] LAVI R, JACKEL S, TZUK Y, *et al.* Efficient pumping scheme for neodymium-doped materials by direct excitation of the upper lasing level [J]. *Appl. Opt.*, 1999, 38(36): 7382-7385.
- [ 86 ] SATO Y, TAIRA T, PAVEL N, *et al.* Laser operation with near quantum-defect slope efficiency in Nd: YVO<sub>4</sub> under direct pumping into the emitting level [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(6): 844-846.
- [ 87 ] KIM J. Spray cooling heat transfer: the state of the art [J]. *Int. J. Heat Fluid Flow*, 2007, 28(4): 753-767.

- [ 88 ] 陈永平, 郑平. 新型分形树状微通道散热器的实验研究 [J]. 工程热物理学报, 2006, 27(5): 853-855.  
CHEN Y P, ZHENG P. Development on fractal tree-like microchannel heat sink [J]. *J. Eng. Thermophys.*, 2006, 27(5): 853-855. (in Chinese)
- [ 89 ] SILK E A, GOLLIHER E L, SELVAM R P. Spray cooling heat transfer: technology overview and assessment of future challenges for micro-gravity application [J]. *Energy Convers. Manage.*, 2008, 49(3): 453-468.
- [ 90 ] 王亚青, 刘明侯, 刘东, 等. 高功率激光器喷雾冷却的实验研究 [J]. 强激光与粒子束, 2009, 21(12): 1761-1766.  
WANG Y Q, LIU M H, LIU D, *et al.* Experimental study on spray cooling for high-power laser [J]. *High Power Laser Part. Beams*, 2009, 21(12): 1761-1766. (in Chinese)
- [ 91 ] AGOSTINI B, FABBRI M, PARK J E, *et al.* State of the art of high heat flux cooling technologies [J]. *Heat Transfer Eng.*, 2007, 28(4): 258-281.



陈跃(1997-),男,山东泰安人,博士研究生,2022年于上海应用技术大学获得硕士学位,主要从事透明光功能陶瓷应用的研究。

E-mail: 1576038515@qq.com



姜本学(1980-),男,山东青州人,博士,研究员,2007年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事激光与光电子材料的研究。

E-mail: jiangbx@siom.ac.cn