

# 高能固态激光器技术路线分析

陈金宝 郭少锋\*

(国防科学技术大学光电科学与工程学院, 湖南 长沙 410073)

**摘要** 近年来,随着激光二极管的快速发展,以及一些先进热管理方案和模式控制技术的涌现,固态激光器的输出功率迅速攀升至 100 kW,光束质量也得到了较好的控制。归纳高能固态激光器的特点,简要介绍了国外固态高能激光器研发计划的进展情况。对当前已经实现了 100 kW 功率输出或者具备 100 kW 功率输出潜力的几种技术路线进行了深入细致的分析,包括热容激光器、薄片激光器、板条激光器、液体冷却激光器和光纤激光器,分别介绍了其设计理念、最新进展,并评价了它们的光束质量控制措施。

**关键词** 高能激光; 固态激光器; 技术路线; 100 kW

**中图分类号** TN248.1 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201340.0602006

## Review on Technical Approaches of High Energy Solid-State Lasers

Chen Jinbao Guo Shaofeng

(College of Opto-Electronics Science and Engineering, National University of Defense Technology, Changsha, Hunan 410073, China)

**Abstract** With the rapid development of laser diode and the presence of advanced technology in thermal management and mode control, the average power of solid state laser has already rushed to 100 kW class in recent few years. The characteristics of solid state laser compared with chemical and gas lasers are outlined at first, followed by the detailed examination of several technical approaches which can enable 100 kW laser output, including heat capacity laser, thin disc laser, slab laser systems based on coherent combination, liquid cooling solid state laser (under HELLADS project) and finally fiber laser. After introducing the core concepts and presenting the current research status of these lasers, we conclude by pointing out the secrets behind the good beam quality.

**Key words** high energy laser; solid state laser; technical architecture; 100 kW

**OCIS codes** 140.3580; 140.3510; 140.3298

## 1 引 言

固态激光器,也称固体激光器,是指将激活离子掺杂到固体基质材料中的激光器,既包括常规的块状增益介质的固体激光器,又包括近年来新兴的光纤激光器。固体激光器从发明伊始就被考虑用作高能光源进行远距离应用,但是由于当时的固体激光器只能使用效率极低的闪光灯作为抽运源,热效应十分严重、激光的光束质量极差,相关的研究计划旋即搁浅。近十年来,随着激光材料和二极管激光技术的突飞猛进,以及热管理和自适应光学技术的成功应用,多种类型的固态激光器的输出功率攀升至

100 kW 或者已经验证具有定标放大至 100 kW 的能力,而且光束质量也得到了有效的控制。在工业需求和国防需求的牵引下,高能固态激光器正迎来另一个繁荣时期。

与化学或者气体高能激光器相比,固态高能激光器具有以下特点:1) 固体增益介质没有流动性,内部产生的热量不能通过介质流动的方式被迅速带走,而只能通过固体表面进行散热,表面制冷的方式使得增益介质在高功率抽运条件下产生较大的温度梯度,不均匀的温度场将产生热畸变和热应力;2) 固态激光器均采用光学抽运的方式,因此在某种意义上,固态

**收稿日期**: 2013-02-01; **收到修改稿日期**: 2010-03-20

**作者简介**: 陈金宝(1970—),男,研究员,博士生导师,主要从事高能激光技术和激光光学等方面的研究。

E-mail: kdchenjinbao@yahoo.com.cn

\* **通信联系人**。E-mail: sfguo@nudt.edu.cn

激光器可以看作是一种“亮度提升器<sup>[1]</sup>”，即将光束质量较差的抽运光转换成光束质量较好的信号光。由于抽运光能量可以完全由电能转化而来，因此固态激光器可以采用“全电化”的工作方式。3) 固态增益介质一般都有较长的上能级寿命和较宽的增益谱，这使得固态激光能够很好地用于脉冲制式。固态激光器的特点使得其在高能激光应用领域既具有结构紧凑、效费比高以及制式灵活等优点，同时也带来了增益介质热损伤和光束质量退化等固有难题。本文首先介绍国外固态高能激光器研发计划，然后结合几种特定的技术路线深入分析高能固态激光器的设计理念，评价其光束质量控制措施。

## 2 国外高能固态激光进展

美国、德国和日本的高能固态激光的发展水平较高，其中德国和日本高能固态激光的发展主要面向工业需求，由较大的激光公司自行投资进行技术开发工作；美国固态激光长期受政府和军方的巨额资助，面向多种军事需求，多年来在功率、光束质量指标以及小型化方面获得了一系列重大突破。美国固态激光的水平，代表着世界先进的水平。

为了加快高能固态激光器技术的发展步伐，2002年美国启动了“联合高功率固体激光器”(JHPSSL)计划，制定了一个输出功率100kW、光束质量优于2倍衍射极限的固体激光的目标，由多家军工企业分头采取不同的技术路线去实现。2009年，在该计划的支持下，诺格公司和达信公司均实现了里程碑式的100kW功率指标<sup>[2]</sup>，实验验证了固体激光器作为新一代高能激光系统光源的重要发展潜力。

尽管通过JHPSSL计划实现了100kW量级的高功率输出，但是由于光束质量较差，电光转换效率较低(小于20%)，且系统体积较为庞大，这些系统均难以走向战场应用。为此，美国军方先后推出了多个高功率固体激光的研究计划，其中最重要的是国防部及三军联合稳健电驱动激光器倡议(RELI)计划，项目的基本目标是开发一款全电驱动、高效稳定、可定标放大的军用激光模块，用于地面、海面和空中军事行动，并通过提高激光器的效率，增加强度，减轻功率和冷却负担，使得系统能够适配于轮船和飞机上。项目要求实现单模块功率25kW，电光转换效率大于30%，接近衍射极限的光束输出，该模块能够定标放大至100kW。该项目从2010年6月份开始，计划于2017年完成，承担单位包括洛克希德-马丁公司、雷神公司、诺格公司和通用原子

公司。

美国在高能固体激光器研发计划中成功采用了一种“赛马式”的管理策略，制定一个明确的阶段指标，允许各家单位采用不同的技术方案进行竞争，谁能实现这一阶段的指标将有机会获得下一阶段的合同。在这种竞争机制下，参研单位根据自身优势提出了多条有潜力的技术路线，一时出现了百花齐放的繁荣景象。特选取几种有代表性的技术路线加以剖析，分析其优缺点。

## 3 技术路线分析

各种在研的100kW级的高能固体激光计划，在技术路线上大致分为两类：一种是单口径输出方式，包括热容激光器、薄片激光器和液体冷却激光器，通过增加增益介质口径和模块数目进行定标放大，这种输出方式又分为谐振腔和主振荡功率放大(MOPA)两种类型；另一种是多链路合成方式，包括板条激光器和光纤激光器，通过多条链路能量叠加的方式(相干或非相干)进行定标放大。

### 3.1 热容激光器

严格地说，热容激光器不是一种新构型的激光器，“热容”指的是一种工作模式，即在激光激射过程中不对激光介质进行冷却，而是在两个激射过程的间隙才进行强制冷却<sup>[3]</sup>。采用热容方式工作时，由于不进行散热，激光介质内部的温度梯度较小，在理论上带来的热畸变也比较小；另外，由于表面温度高于内部温度，激光介质表面的应力表现为压力，激光介质能承受的压力比张力至少强5倍，激光介质的破坏阈值大幅度提高，从而使得允许的抽运强度也大幅提高。

早在1997年，劳伦斯利佛莫尔实验室(LLNL)就开展了固体热容激光器的研制，他们先后采用了大尺寸钽玻璃、GGG晶体和YAG陶瓷的增益介质。2006年1月，LLNL成功研制出二极管抽运5片板条激光陶瓷的热容激光器，平均功率为67kW<sup>[4]</sup>，但光束质量表现不佳，后又改面抽运为边抽运，改善热效应，但效果仍然不够理想。图1所示为热容激光器的光学结构示意图，从图中可以看出，为了校正光束质量，激光器中添加了比较复杂的自适应光学系统。

热容激光器的工作原理在本质上讲是增益介质表面的压应力设计，主要优点是增加了增益介质的抗损伤能力，从而使得输出功率比常规的散热方案大幅度增加。但是，热容工作模式存在两个致命缺

点:1)激光的光束质量随着出光时间的增加迅速退化,这主要是由抽运不均匀性造成的,即使采用了先进的自适应光学技术,也无法保证光束质量总是保持在2倍衍射极限之内;2)热容激光的工作机制决

定其不能长时间出光,冷却需要几十秒至数分钟,难以符合实用要求。因此,热容激光器虽然具有定标放大至100 kW的能力,但其应用前景并不乐观。事实上,美国已经放弃了对热容激光项目的支持。

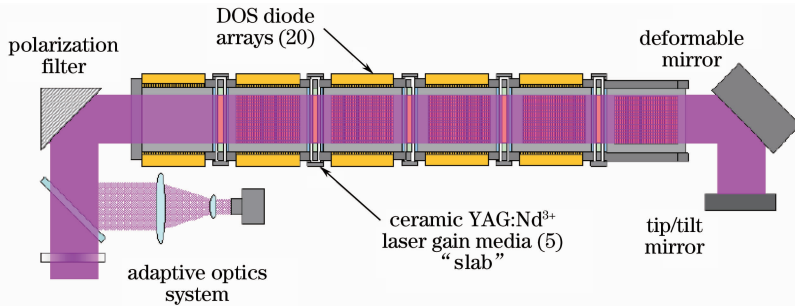


图1 热容激光器的光学结构示意图

Fig. 1 Optical schematic of heat capacity solid state laser

### 3.2 薄片激光器

“热容”是一种工作模式,而“薄片”是激光介质的一种构型。薄片激光器的基本工作原理如图2(a)所示,将工作介质制成很薄的圆片(厚度小于1 mm),固定在散热的刚性基体上,冷却面同时用作激光的反射面,另一面用作抽运面,由于热流的方向和激光的传播方向几乎完全一致,所以可以消除温度梯度带来的波前畸变<sup>[5]</sup>。

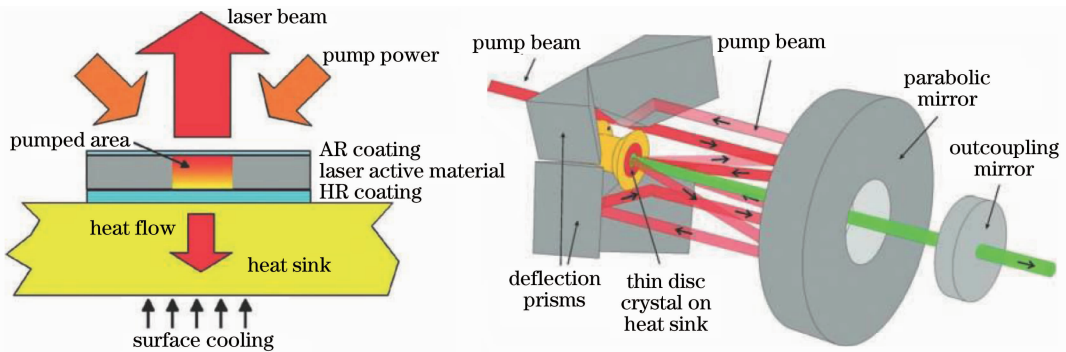


图2 薄片激光器的(a)基本原理和(b)抽运结构

Fig. 2 Schematic structures of microchip laser for (a) basic operational principle and (b) pump subsystem

2008年6月,波音公司宣布成功开发出新型薄片激光器系统,在数秒的持续时间内激光器的输出功率达到了25 kW,光束质量优良<sup>[7]</sup>。美国陆军的高能激光技术演示者(HELTD)计划,目标是开发车载的高能固体激光系统,经分析该计划采用的就是波音公司研发的薄片型高能固体激光器。该项目原定2010年完成第二阶段合同,并将激光系统交付陆军,但现在未看到相关报道。

薄片激光器的原理在本质上讲是一种有效的温度场设计,由于激光传播方向和热传导方向基本一致,温度梯度存在于激光传播方向,波阵面的各部分

基于这种理念,德国斯图加特大学开发出的工业级的薄片激光器最高输出功率达到16 kW,且可以耦合进入芯径为200  $\mu\text{m}$ ,NA为0.22的光纤内,展示出较好的光束质量<sup>[1]</sup>;美国波音公司开发出紧凑有源反射镜激光器(CAMIL)<sup>[6]</sup>,采用键合技术来进一步降低热效应,采用边抽运方案来增加增益介质对抽运光的吸收能力。

经历相同的温度变化,理论上热畸变非常小。但是,该方案也带来一系列的物理和工程问题:1)面抽运方式下,太薄的增益介质使得抽运光单程吸收能力很差,必须设计非常复杂的抽运光学系统以保证抽运能量的充分吸收,如图2(b)所示,这种设计削弱了激光器系统的稳定性;2)薄片激光器实际输出的光束质量并不像理论预测的那么理想,边缘效应、热应力以及抽运和散热的不均匀都使得光束质量严重退化;3)单块薄片的增益能力有限,100kW的输出功率需要很多块薄片进行级联放大,每块薄片都需要复杂的抽运光学系统,系统规模较大。

### 3.3 板条激光器

板条是另外一种旨在消除热畸变的激光介质构型。激光在板条结构的介质中以“Z”字形传播,较长的曲折光路匀化了长度方向和厚度方向温度梯度对波前的影响,大大减小了热致光学畸变<sup>[8]</sup>。

诺格公司采用传导冷却端面抽运的板条结构(CCEEDS),如图3所示,单个板条模块实现了4 kW的输出功率,4个板条形成的单链路最高输出功率

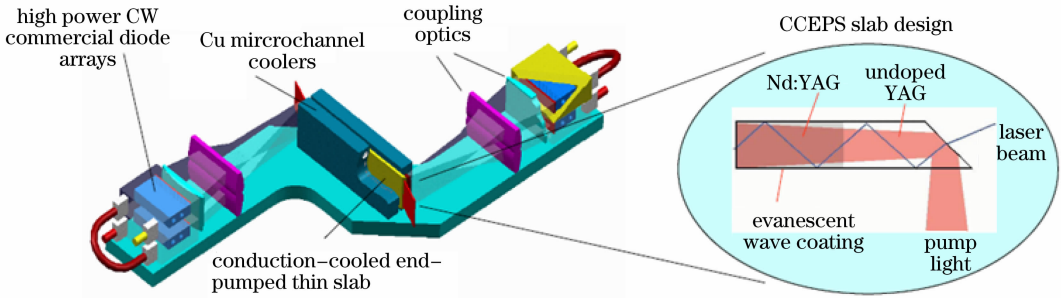


图3 端面抽运传导冷却板条激光器结构示意图

Fig.3 Schematic architecture of end pumped conduction cooled slab laser

在JHPSSL计划的第二阶段结束之时,固体热容激光器的输出功率远大于板条激光器,但联合高功率办公室最终还是选择了板条激光器的技术路线,主要原因在于热容激光器定标放大过程需要克服许多新的技术困难,而基于相干合成的板条激光器在解决定标放大方面具有决定性的优势,缓解了单链研制的技术压力,这样系统在进行定标放大时不会对介质材料、抽运源、电源系统、热管理等提出新的要求,并且应用于光束合成的自适应光学系统已经相对成熟。

诺格方案的问题在于相干合成后光束质量的退化效应比较明显,这主要是因为暂时无法找到有足够占空比的光束拼接方案。另外,随着链路数目的增加,将会对实时相位控制技术提出很大的挑战。针对合成后光束质量退化问题,有人尝试通过偏振合束和利用衍射光学元件合束的方式加以改善,并取得了不错的进展;随着波前控制技术的进步,可合成的路数也将逐步增加。

### 3.4 液体冷却激光器

这里所讲的液体冷却激光器专指美国HELLADS计划(High Energy Liquid Laser Area Defense System)中所采用的激光器。HELLADS是在DARPA支持下在研的最为保密的一项高能激光计划,其目标是研制出150kW的高能激光系统,并对激光器的重量和体积有非常严格的要求。

达到了15 kW,光束质量也接近了衍射极限<sup>[9]</sup>。但是,单链路的输出能力毕竟有限,诺格公司采用了新的定标方案以最终达到100 kW的功率指标——相干合成技术。2009年诺格公司高调推出突破100 kW的高能激光系统<sup>[2]</sup>,该系统由7个15kW的MOPA链路相干合成实现,每个MOPA链路又由4个4 kW的主放模块组成,合成光束的光束质量BQ值为2.9(相当于 $\beta$ 因子为7)。

从2002至2007年,通用原子公司是HELLADS计划唯一的合同承担者,他们采用的技术方案从未公开报道过,甚至没有谈及是何种介质类型的激光器,只是宣称该技术方案结合了固体激光器的高储能密度和液体激光器的流动热管理技术。经调研和分析,认为通用原子公司很可能采用了分布式增益的薄片YLF激光器专利技术<sup>[10]</sup>,其单元模块的结构如图4所示,一连串厚度为毫米量级(甚至有可能是亚毫米)的Nd:YLF薄片(图中标号14)固定在激光腔中(标号30和32为一对腔镜),冷却剂(标号34)沿Z方向流过增益介质薄片之间的区域并带走热量,抽运源(标号18)沿Y方向入射到增益介质内部。这种技术方案的要点是,在增益介质很薄的情况下,介质内部的温度场比较均匀,介质不会因为热应力而损伤,且由于温度场的梯度主要在X方向和激光传输方向一致,造成的波前畸变也较小,保证了激光束的光束质量,这与薄片激光器类似。若要实现更高功率的输出,可将几个模块串联使用。

通用原子公司2004年验证了千瓦级输出,2007年将功率水平定标放大至15 kW。2010年,该公司接受新的合同,转入最后一个研究阶段,按照合同要求应在2012年年底实现150 kW的地面演示验证激光器系统。

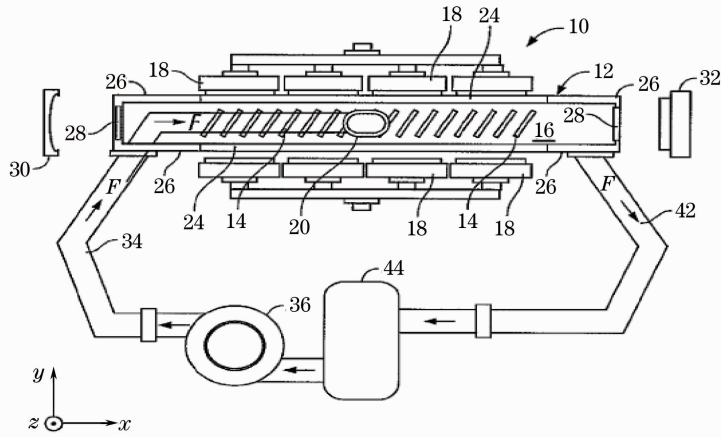


图 4 通用原子的分布式增益激光器的结构示意图

Fig. 4 Schematic architecture of distributed gain laser developed by General Atomics Corporation

2007年9月,达信公司也进入HELLADS计划,在DARPA支持下利用“薄Z字形”陶瓷板条的专利技术实现高能固体激光输出<sup>[11]</sup>。达信公司的液体冷却激光器从本质上讲也属于板条激光器构型,但是与诺格板条方案不同之处在于激光板条浸泡在冷却液之中,激光沿“Z”字形光路通过板条和冷却液。如图5所示,板条介质固定于两石英窗口之间,冷却液在窗口内流动,抽运光垂直入射板条大表面,信号光则通过特殊光楔导入,在石英窗体之间沿“Z”字形光路前进。达信公司先后开展了基于ThinZag技术的板条激光器定标试验,完成了板条数量、抽运面积和抽运功率的定标,先后实现了1.2, 5.6, 15 kW的单谐振腔输出,但是15 kW板条固体激光器的光束质量一直未公开报道。他们采用腔内自适应光学、腔外调节补偿和自适应补偿技术改善光束质量,但光束质量还是随输出功率增加明显下降。尽管如此,达信公司还是采用6个17 kW的模块串联单谐振腔方式实现了100 kW激光输出,

但未能实现第三个里程碑节点的光束质量指标。值得特别指出的是达信方案中使用了新型的陶瓷板条取代传统的单晶板条,陶瓷板条在大尺寸、高掺杂方面具有独特的优势。2010年之后,未见到达信公司进入HELLADS下一阶段研制任务的报道。

液体冷却激光器在热管理方面展示出很强的优势:通过分布增益的方式将热量分散在多个片状单元中,利用流体的强散热能力通过两个大面将薄片中的热量快速导出,这种热管理方式使得增益介质中的温升极低,且只在光轴方向具有温度梯度,既保证了介质的安全性,又大大降低了增益介质本身带来的热畸变。因此,这种方案展示出了超强的定标放大能力,单口径输出能力提升迅速。

液冷激光器的缺点主要在于冷却液包含在激光光路之中,这带来一系列技术难题和工程化问题。无论是通用原子的技术方案还是达信公司的方案,强激光都会经过流动的冷却液,冷却液的存在对激光性能产生了严重的影响:1)冷却液的折射率和

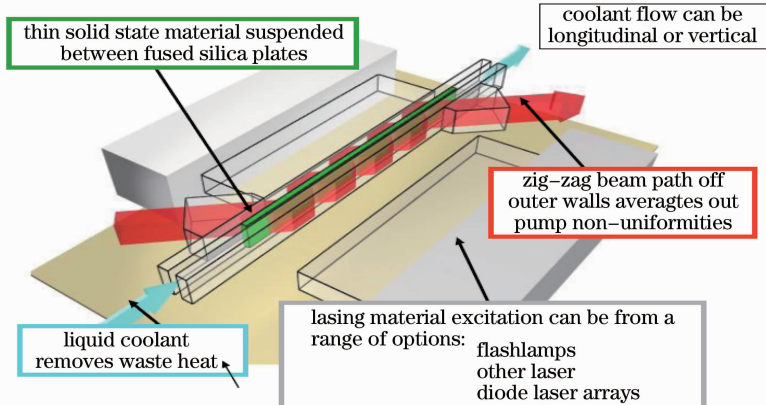


图 5 达信公司 ThinZag 板条激光器结构示意图

Fig. 5 Schematic drawing of ThinZag slab laser developed by Textron Defense Systems

固体增益介质的折射率须严格匹配,由于固液界面很多,很小的折射率失配就会带来很大的激光损耗;2)冷却液对抽运光和激光要足够透明,而现有的折射率匹配冷却液体(如  $\text{CS}_2$  和  $\text{CCL}_4$  的混合液)对  $1\ \mu\text{m}$ 波段的激光辐射具有一定的吸收( $0.1\ \text{m}^{-1}$ 的量级),在光路较长时会引起较大的吸收损耗;3)即使同时满足了折射率匹配条件和光学透明条件,由于液体的热光系数通常比固体 YAG 材料大两个数量级,很小的温度变化将引入较大的激光波前畸变,再加上流体的涡流状态也会影响到激光的传输特性。因此,这种激光器的光束质量不容乐观,很难在  $100\ \text{kW}$  量级达到两倍衍射极限的要求。

### 3.5 光纤激光器

光纤激光器采用柔软细长的掺杂光纤作为工作介质,其最大的优点在于优良的光束质量和方便的热管理。光纤激光器在发明之初只被看作是小功率器件,但是随着高功率 LD 抽运源技术的进步,包层抽运技术的发明,特别是近年来同带抽运技术的出现,单纤单模输出功率迅速攀升至  $10\ \text{kW}$ ,多模输出功率则到  $100\ \text{kW}$  量级,并在 LADS、LaWs 和 Mk38 等系统中得到成功应用。当前美国军方的研究项目中,基于光纤激光的高能激光项目越来越多,雷神公司的 APPLE 计划, DARPA 亚瑟神剑计划中的 RIFL 项目以及 RELI 计划中洛克希德公司、诺格公司的技术方案都选择了光纤激光。尤其是诺格公司,在此前的 JHPSSL 中,他们一直致力于板条激光器的研制,并获得了  $105\ \text{kW}$  输出,但是最近的 RELI 计划中,诺格公司却选择了光纤激光,以  $3\ \text{kW}$  光纤激光器为基本单元实现功率  $25\ \text{kW}$  的合成输出,这也说明光纤激光的确具有传统板条等激光不可比拟的优点。

光纤激光器的缺点是单纤的输出功率有限,一般在千瓦级,要达到  $100\ \text{kW}$  级的功率水平需要比较复杂的光束合成方案。光纤激光的光束合成有相干合成、谱合成以及功率合成等多种方式。相干合成和谱合成能够较好地保持光束质量,但是对激光的线宽有着苛刻的要求,这进一步限制了单纤的输出水平。随着窄线宽光纤激光技术的进步,光纤激光的合成功率得到了大幅提升。2011年,美国麻省理工学院以空间拼束的方式实现了8台光纤激光总功率  $4\ \text{kW}$  的相干合成输出<sup>[12]</sup>,光-光转换效率为  $78\%$ ,合成后的光束质量达到  $1.25$  倍的衍射极限;2012年,麻省理工学院又通过衍射光学元件将5路  $500\ \text{W}$  光纤激光器进行相干合成<sup>[13]</sup>,合成光束的光

束质量甚至优于输入的单元光束,光束质量因子  $M^2=1.1$ ;2011年德国 Fraunhofer 研究所通过体光栅对4台窄线宽的光纤放大器进行光谱合成,获得了  $8.2\ \text{kW}$  的高功率激光输出<sup>[14]</sup>,在输出功率  $7.3\ \text{kW}$  时光束质量因子  $M^2\approx 4$ ,这是迄今为止具有较好光束质量的最高功率的光纤激光合成输出。尽管取得了里程碑性的进展,但是合成光束的功率水平距离战术应用还有数量级的差别。功率合成是将多根单模光纤激光器进行熔融拉锥,将激光能量并入一根粗光纤再输出。理想的功率合束器可以使输出的功率相比单纤成倍增加,但是亮度守恒的条件使得其光束质量必然下降。例如,IPG 公司通过合束方式研制了  $50\ \text{kW}$  的多模光纤激光器,但是光束质量因子  $M^2$  退化到  $30$  左右,丧失了光纤激光光束质量的优势,很难用于远距离应用。

## 4 结束语

高能固体激光器的诸条技术路线的核心思想均是如何在高功率运行条件下保持光束质量,即如何进行定标放大的问题。提升光束质量或者在更高功率时保持光束质量的关键在于如何消除或者补偿固体增益介质中热积累带来的热畸变。首先,可以通过优化冷却方式和增益介质构型来减小温度梯度,例如热容激光器是通过激射期间不散热的方式来削减温度梯度,薄片激光器和光纤激光器是通过在一维或二维方向上大大缩减增益介质尺度的方式来削弱介质边缘和中心部分之间的温度差。其次,也可以通过选择光束传播和热流的相对方向来减小热梯度对波前的影响,例如,对薄片激光器来说,选择光束传播的方向与热流方向一致,从而消除温度梯度对波前的影响,而板条激光器选择了“之”字形的光路,激光波前虽然经历了温度场,但是波前各部分经历的变化大致相同,通过匀化的方式补偿了热畸变。第三,可以通过波导结构的选模功能来抑制热畸变对光束质量的影响,大模场的双包层增益光纤正是利用这种功能来实现大功率的基模输出的。

高能固体激光器的几种技术方案在光束质量控制方面都有一定的局限性,这表现在当功率定标放大到一定程度时光束质量的退化。事实上, JHPSSL 计划中的所有技术方案都没有实现光束质量的指标。对于热容、薄片等单口径技术方案来讲,光束质量退化的主要原因依然是随着抽运功率的增加,温度梯度和表面热变形增大,导致激光波前畸变程度加剧。而对于诺格公司相干合成方案来讲,单

链路的光束质量已经达到非常理想的程度,但是在合成过程中,由于空间拼束方式不可能保证子光束无缝密接,反映在远场图样上就是出现较多的旁瓣能量。光纤激光器面临相同的问题,合成光束也存在严重的光束质量退化的现象,如何保持光束质量是最近光纤激光领域研究的重点,麻省理工学院和诺格公司取得了较大的工作进展,基于相干合成的光纤激光在大功率输出的情况下已经能够获得近衍射极限的光束质量<sup>[13]</sup>。基于相干合成技术的光纤激光器,可能成为实现近衍射极限 100 kW 级激光系统的较好的技术途径。

### 参 考 文 献

- Hagop Injeyan. High-Power Laser Handbook[M]. New York: The McGraw-Hill Companies, 2011. 164~261
- S. J. McNaught, D. P. Asman, H. Injeyan *et al.*. 100-kW coherently combined Nd:YAG MOPA laser array[C]. *Frontiers in Optics*, 2009, FThD2
- C. T. Walters, J. L. Dulaney, B. E. Campbell *et al.*. Nd-glass burst laser with kW average power output [J]. *IEEE J. Quantum Electron.*, 1995, **31**(2): 293~299
- R. M. Yamamoto, B. S. Bhachu, K. P. Cutter *et al.*. The use of large transparent ceramics in a high powered, diode pumped solid state laser[C]. *Advanced Solid State Photonics Conference*, 2008, UCRL-CONF-235413
- C. Stewen, K. Contag, M. Larionov *et al.*. A 1-kW CW thin-disc laser[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.*, 2000, **6**(4): 650~657
- J. Vetrovec, Rashmi Shah, Tom Endo *et al.*. Progress in the development of solid-state disk laser[C]. *SPIE*, 2004, **5332**: 235~243
- Marc Selinger. Boeing Fires New Thin-Disk Laser, Achieving Solid-State Laser Milestone[EB/OL]. (2008-6-3)[2008-10-1] [http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080603a\\_nr.html](http://www.boeing.com/news/releases/2008/q2/080603a_nr.html)
- H. Injeyan, C. S. Hofer. End Pumped Zigzag Slab Laser Gain Medium[P]. U.S. Patent, 6094297. 2000-7-5
- S. Redmond, S. McNaught, J. Zamel *et al.*. 15 kW near-diffraction-limited single-frequency Nd:YAG laser[C]. *CLEO 2007*, 2007, CTuHH5
- M. D. Perry, P. S. Banks. Lasers containing distributed gain medium[P]. U.S. Patent; 6937629. 2005-8-30
- M. A. Wilmington. Textron defense systems awarded funding for the DARPA HELLADS Program[EB/OL](2008-10-3)[2008-3-1]. <http://www.globalsecurity.org/military/systems/aircraft/systems/hellads.htm>
- C. X. Yu, S. J. Augst, S. M. Redmond. Coherent combining of a 4 kW, eight-element fiber amplifier array[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(14): 2686~2688
- Shawn M. Redmond, Daniel J. Ripin, Charles X. Yu *et al.*. Diffractive coherent combining of a 2.5 kW fiber laser array into a 1.9 kW Gaussian beam[J]. *Opt. Lett.*, 2012, **37**(14): 2832~2834
- Christian Wirth, Oliver Schmidt, Igor Tsybin *et al.*. High average power spectral beam combining of four fiber amplifiers to 8.2 kW[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(16): 3118~3120

栏目编辑：宋梅梅