

欧洲 HiPER 项目激光驱动器概念设计研究现状

肖凯博^{1,2} 袁晓东¹ 蒋新颖¹ 严雄伟¹ 王振国¹ 李明中¹ 郑建刚^{1*} 郑万国^{1*}

¹中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

²中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

摘要 惯性聚变能源是公认的安全、无碳、可持续发展的洁净能源。简要介绍了欧洲高功率激光能源研究(HiPER)项目激光驱动器的基准设计, 然后从放大器的构型、热管理技术和放大的自发辐射抑制技术、激光系统的光束结构等方面重点讲述了满足HiPER项目的两种千焦耳级激光链路方案。最后介绍了HiPER项目实现商用激光聚变能源电站的发展规划。

关键词 激光光学; 惯性聚变能源; 二极管抽运固体激光器; 概念设计; 高功率激光能源研究; DiPOLE 激光系统; LVCIA 激光系统

中图分类号 TN242 文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.080005

Research Status of Conceptual Designs of Diode-Pumped Solid-State Laser Driver for HiPER

Xiao Kaibo^{1,2} Yuan Xiaodong¹ Jiang Xinying¹ Yan Xiongwei¹ Wang Zhenguo¹
Li Mingzhong¹ Zheng Jiangang¹ Zheng Wanguo¹

¹Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

²Graduate School, China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

Abstract Laser inertial fusion energy is a well-known safe, carbon-free, sustainable and clean energy source. A brief introduction to laser reference design in high power laser energy research (HiPER) project is presented. Then two schemes of multi kilojoule level laser chains concepts for HiPER program are emphasized on amplifier geometry, thermal, amplified spontaneous emission management, and beamline architecture, etc. Finally, the time schedule of the HiPER program for laser energy, namely the production of electricity using laser inertial fusion, is also introduced.

Key words laser optics; inertia fusion energy; diode-pumped solid-state laser; conceptual design; HiPER; DiPOLE laser system; LVCIA laser system

OCIS codes 140.2010; 140.3280; 140.3380; 140.3580

1 引言

能源危机是人类发展面临的共同挑战, 惯性聚变能源(IFE)是公认的安全、无碳、可持续发展的洁净能源。关于惯性聚变能的研究已经超过50年, 它作为解决人类能源的长久之计以及创造极端物理条件的一种方法, 具有很好的应用前景。在激光聚变需求的牵引下, 各国先后建成了一系列大型高功率激光驱动器装置, 如美国的国家点火装置(NIF)^[1]、法国的兆焦耳装置(LMJ)^[2]、我国的神光II升级装置^[3-5]以及神光III系列装置^[6-8]等。现今, 美国国家点火设施已经开始最后的点火优化调试, 标志着激光聚变能研究进入了一个新的阶段^[9]。目前, 美国的激光惯性聚变能源(LIFE)计划^[10]、欧洲的高功率激光能源研究(HiPER)^[11]项目及日本的反应堆 KOYO-F^[12]都将致力于证实激光聚变能电站的可行性。

从2006年开始, HiPER项目成为欧洲第一个激光聚变能国际合作研究计划, 26个团队将共同研究点火

收稿日期: 2015-03-18; 收到修改稿日期: 2015-06-02; 网络出版日期: 2015-07-21

基金项目: 中国工程物理研究院聚变能源中心项目(R2014-0202-02)

作者简介: 肖凯博(1988—), 男, 博士研究生, 主要从事重频高功率固体激光技术方面的研究。

E-mail: xiaokb1988@163.com

导师简介: 郑万国(1966—), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事高功率固体激光技术与工程方面的研究。

E-mail: wgzheng_caep@sina.com

*通信联系人。E-mail: zjg8861@163.com

方案、激光驱动器及其激光聚变能源相关技术。激光驱动器是HiPER的核心组成部分,其面临的最大挑战是如何确定一种满足系统所有需求(插头效率为15%~20%、重复频率为10 Hz)的激光器结构。为了完成这一目标,三个团队从增益介质、放大器结构、放大的自发发射(ASE)和热管理等方面分别提出了二极管抽运固体激光器(DPSSL)方案^[13]。结合以上二极管抽运固体激光器技术,本文将概要地介绍HiPER项目激光驱动器的基准设计及两种千焦耳级光束链路的概念设计方案。

2 激光驱动器的基准设计

点火很可能在间接驱动结构中得到证实,这将与国防项目相关,而HiPER将采用快点火或冲击点火的直接驱动方案,同时期待着用最小的激光能量获得最大的增益。为了获得最高的辐照均匀性,HiPER研究人员将聚焦在靶上的光束组设计为48束,每个光束组由很多子光束组成。激光直接驱动方案涉及两种类型的光束:压缩光束和点火光束。压缩光束作为48个焦点聚焦在靶丸上,其能量为250~300 kJ/50~75TW@10 ns/ 3ω (3ω 表示三倍频);同时,点火光束分为能量约100 kJ/7000 TW@15 ps/ 2ω (2ω 表示二倍频)的快点火光束或60~80 kJ/150~200 TW@400 ps/ 3ω 的冲击点火光束,如图1所示^[14]。

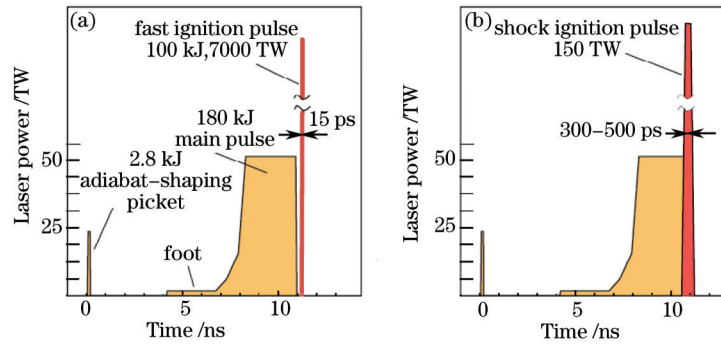


图1 (a)快点火和(b)冲击点火激光脉冲^[14]

Fig.1 Laser pulses for (a) fast ignition and (b) shock ignition

基于DPSSL技术,HiPER最初将在10 Hz的重复频率下运行,获得60~70倍的靶增益。激光系统将参考利用NIF和法国兆焦耳装置十多年的设计和工程研究成果^[15],主要包括以下几个方面:1)主放大器系统采用方形光束设计;2)驱动器采用多路束组设计:每路光束组中子束的大小和数量与放大器的设计有关;3)种子光使用任意波形发生器(AWG)产生不同形状的脉冲;4)相同类型的光束元件被安装在线性可替换单元(LRU)内便于系统快速修复、维护及运行;5)在主放大器内和终端光学组件内分别设计自适应光学元件(AO)、连续相位板(CPP)来调节焦斑;6)采用光谱色散平滑技术(SSD)提高靶面光强的均匀性。同时,系统中采用多路束组设计有利于焦斑调节、光学变焦放大和脉冲整形^[16]。

激光驱动器中,高强度机制将会导致非线性效应,引起光束空间、时间及光谱形貌的畸变。另外,光学元件的损伤也将随激光通量的增加而增大,其损伤阈值也是主要问题之一。因此,为了避免过多的非线性效应减少光学元件的损伤,要求激光系统在安全的机制下运行。激光器设计的红线以及光学元件的损伤要求为^[15]:1) B 积分:在压缩光束中 $\Delta B < 2$,对于快点火或冲击点火光束,在啁啾脉冲放大(CPA)过程中 $\Delta B < 1.5$;2) 由于空气中的非线性拉曼效应,如果光束在空气中从主放大器的输出端传输到终端组件内,则要求强度 $I < 2.5 \text{ GW/cm}^2$ 、脉宽 $\Delta t < 2 \text{ ns}$;3) 为了抑制小尺寸自聚焦效应,在三倍频部分的任何元件中强度 I 与长度 L 应满足 $I \times L < 25 \text{ GW/cm}$;4) 通常损伤通量随脉宽按 $\Delta t^{0.5}$ 定标放大,则脉宽为3 ns时,每发次后损伤增长的阈值通量应为4~5 J/cm²@ 3ω 。

为了获得高平均功率,也需处理好DPSSL中放大器内的ASE和高热负载问题,HiPER激光系统主放大器初步设计为^[15]:子束口径为12 cm×12 cm或14 cm×14 cm;基频光束最大激光损伤通量不超过10 J/cm²,并随脉宽的平方根定标放大;近场调制深度应接近2;三次谐波转换效率可能为50%;将CPA技术用于15 ps的快点火光束或400 ps的冲击点火光束,并将其展宽到2 ns。

HiPER的子束能量、子束总数量以及构成单束光的子束数量等关键参数如表1所示^[15]。表1中给定参数的子束能量和子束数量分别对应于12 cm×12 cm或14 cm×14 cm。当脉宽为4 ns时,最大提取能量大体为1 kJ。正如所期待的一样,直接放大400 ps的冲击点火光束并不会导致饱和,但需要大概2倍多的CPA光束。由于压缩和冲击点火都适合48个焦点的辐射方案,每个焦点或束组将需要总共18到23个子束。假定

光束的填充因子为70%,那么总计需要75 cm×75 cm的口径来匹配这些子束,12 cm×12 cm或14 cm×14 cm小口径阵列将分别为5×5或4×5阵列。

表1 压缩、冲击点火或快点火激光光子束数量^[15]

Table 1 Number of laser beamlets for compression, shock ignition or fast ignition

Type of beam	Energy /kJ	Duration /ns	Energy range per beamlet /J	Number of beamlets	Number of beamlets per bundle
Compression 3ω	250	4	830~925	540~600	11~13
Shock ignition 3ω	60	0.4	260~360	335~456	7~10
Shock ignition CPA 3ω	60	2	588~800	150~204	3~5
Fast ignition CPA 1ω	100	2	588~800	125~170	Single cone design

3 千焦耳级激光器概念设计

目前,根据HiPER激光系统的设计指标,英国STFC-RAL^[17]、法国LULI-CNRS^[18]和德国IOQ-FSU^[19]实验室分别在100 J的原型测试平台上探索适合于HiPER的高平均功率DPSSL方案,其中,前两个实验室还提出了满足HiPER激光系统的千焦耳级激光器概念,以下将主要简述这两种概念设计方案^[13]。

3.1 DiPOLE 激光系统

2009年,基于气冷多片放大器概念,英国STFC-RAL实验室提出了一种低温千焦耳级Yb:YAG放大器结构,并提出了DiPOLE计划^[20]。

3.1.1 放大器结构

DiPOLE放大器概念设计结构如图2所示,最初这种结构在LLNL的Mercury激光系统上得到证实。

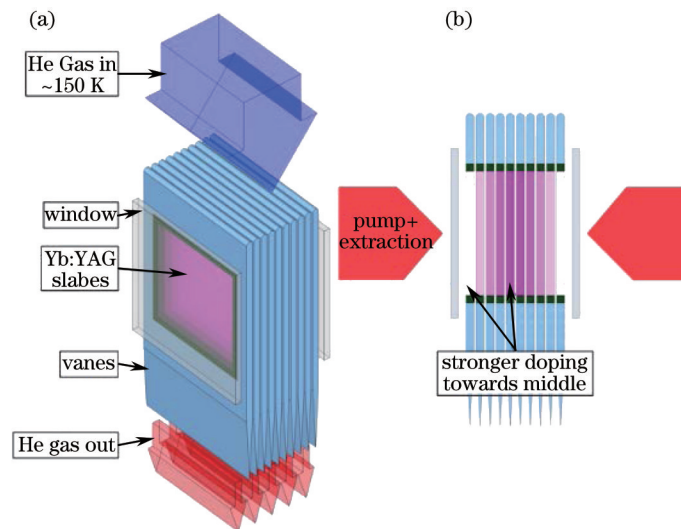


图2 放大器结构示意图^[17]

Fig.2 Illustration of amplifier concept

表2 低温多片放大器的设计参数^[21]

Table 2 Design and modelled performance parametrs of cryo-cooled multi-slab amplifier

Target output fluence	5 J/cm ²
Total pump intensity	10 kW/cm ²
Pump duration	1 ms
Pump wavelength	939 nm
Laser wavelength	1030 nm
Temperature	175 K
Saturation fluence	3.7 J/cm ²
Storage efficiency	50%(5 J/cm ² stored)
Small signal gain	3.8
Aperture	14 cm×14 cm
No. of slabs	10 (5 doping levels)
Slab thickness	10 mm

放大器通过两端面抽运和提取,He气注入片之间的狭缝进行冷却;同时,采用10片10 mm厚向中心掺杂浓度逐渐升高的片状Yb:YAG陶瓷。在给定最大增益系数下,这样既能减少放大器总厚度减小非线性效应的影响,节约材料,又能确保每片增益介质中的热平衡。放大器的参数设计指标如表2所示^[21]。

3.1.2 热管理技术和ASE抑制技术

在热管理方面,DiPOLE采用了He气分布式表面冷却的方法^[21]。因He气热传导效率高,因而折射率波动引起的散射损耗相对其他气体较低,同时增益介质的表面-体积比较大,有利于热量的移除,便于控制增益介质内的热负载,能够减少透射光束的热致光畸变。假定在10 bar(1 bar指1mm汞柱的压强,为133 Pa)下,He气的流速为35 m³/h,入口的温度为150 K,通过热力学和流体动力学数值模拟,可得放大器片的抽运区域和温度分布,如图3所示^[21]。可知,中心与抽运边缘的最大横向温度梯度仅有7 K,片的轴向温度梯度也小到1 K的量级。表明低温He气冷却能提供足够的冷却性能,有利于千焦级的放大器运行,减少光学畸变。

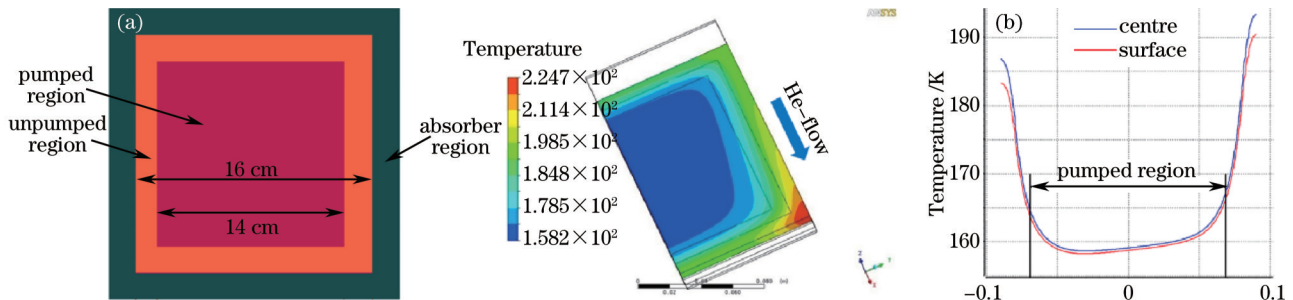


图3 (a) 放大器片的抽运结构; (b) 预测的千焦耳级放大器(半)片的温度分布^[21]

Fig.3 (a) Illustration of modelled slab geometry; (b) predicted temperature distribution in a kJ-class amplifier (half) slab

为了抑制ASE和寄生振荡,DiPOLE采用了低的总长宽比(放大器孔径/总长度)的方式,并在Yb:YAG放大器片周围引入一圈2 cm厚的Cr⁴⁺:YAG包边来吸收横向发射波长。这种方法虽然具有一定的作用,但仍需要优化,同时也对激光陶瓷的制作提出了较高的要求。

3.1.3 光束结构及参数优化

DiPOLE的千焦耳级激光器方案将采用与LMJ装置相似的光束结构,如图4(a)所示^[21]。通过像传递和角度复用技术,焦耳级的单脉冲经两个相同的放大器四程放大后得到千焦耳级的能量。

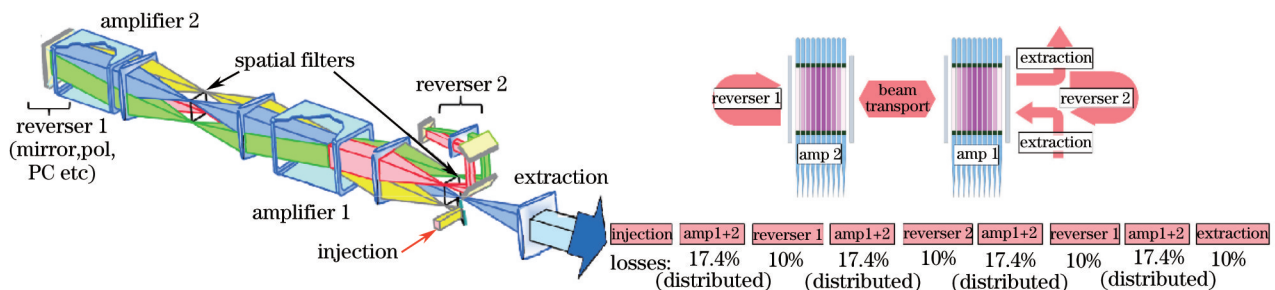


图4 (a) 光束结构概念设计图; (b) 参数优化损耗图^[21]

Fig.4 (a) Beamline concept; (b) block diagram of assumed optical losses

基于图4(b)所示的损耗系数进行参数优化,文献[22]数值模拟了光束的提取效率、脉冲形貌的瞬时变化和光传输中的B积分。假定放大器每片Yb:YAG的透射损耗为1%,每程额外的损耗(例如玻璃窗、空间滤波器、镜子、偏振片和普克尔斯盒等造成的损耗)为10%。表3给出了光束设计方案和效率优化后的参数。通过减小损耗,增大输入能量,可显著地提高效率。另外通过减小脉宽、增加抽运二极管数量也可实现相同的输出能量。

表3 不同光束方案的参数和结果^[22]

Table 3 Parameters and results for different beamline scenarios

Scenario	Pump duration /ms	Loss per slab	Loss after each pass	Input energy /J	Output energy /kJ	Pump energy /kJ	Efficiency	B-Integral
Baseline	1	1%	10%	0.32	1	4.0	25%	0.93
Optimised 1	0.6	0.5%	5%	10	1	2.5	40%	1.2
Optimised 2	0.6	0.5%	5%	10	1.3	3	43%	2.3

3.2 LUCIA 激光系统

基于低温、低气压、静态气体冷却有源镜放大器概念,法国 LULI-CNRS 实验室也提出了一种 HiPER 激光驱动器方案,并开展了 LUCIA 计划^[23]。

3.2.1 放大器结构

LUCIA 放大器结构设计如图 5 所示^[23-24]。抽运光和提取光通过 Yb:YAG 陶瓷顶层表面的增透膜折射进入介质中,经底部的高反膜反射后再次通过薄片。经底部反射后,增益介质可吸收几乎所有的抽运光,而入射的提取光束被两次放大折射输出。由于膜层的激光诱导损伤阈值最大为 $30\sim 40\text{ J/cm}^2$,因而光束的最大提取通量设置在约 10 J/cm^2 , 1 kJ 能量的光束将需要大约 100 cm^2 的口径。放大器将在高反膜的另一面进行冷却,以确保增益介质低温运行。

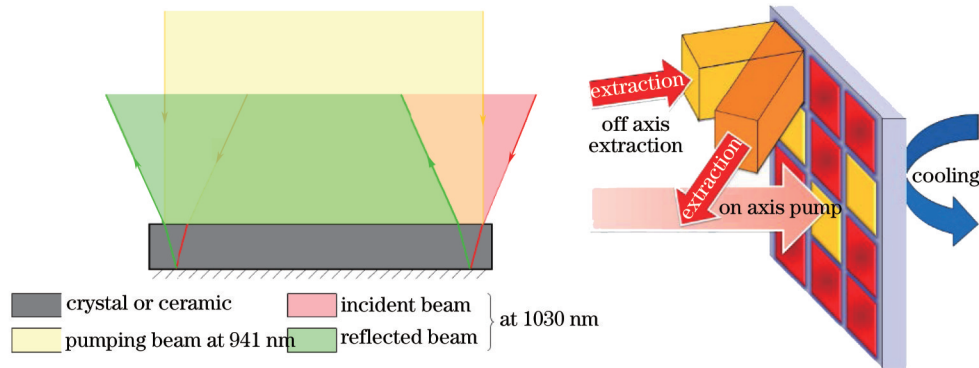


图 5 有源镜设计概念:同轴抽运、离轴提取光束和单面冷却分布^[23-24]

Fig.5 Active mirror concept: pump/extraction beams distribution and mosaic distribution with single side (blue arrow) cooling

3.2.2 热管理技术和 ASE 抑制技术

与 DiPOLE 激光系统的热管理方式不同,LULI-CNRS 的研究人员提出了一种新的热管理方法—低温、低气压、静态气体冷却结构,如图 6(a)所示^[25]。在 Yb:YAG 陶瓷介质高反射膜下表面,密闭的亚毫米低压 ($<1\text{ bar}$) 氦气将热量从增益介质传到 77 K 的热沉片上,从而减少介质内产生的废热。相比 DiPOLE 和 Mercury 放大器中的热管理,因避免了光束与冷却剂的直接接触,可减少冷却剂对光束的影响,有助于高反射膜的可靠性和增益介质的完整性。当气室厚度一定时,在 $1000\sim 5000\text{ Pa}$ 压强范围内,调节氦气的压强可灵活调节增益介质的平均温度,以便激光器在不同的重复频率下运行,如图 6(b)所示^[25]。

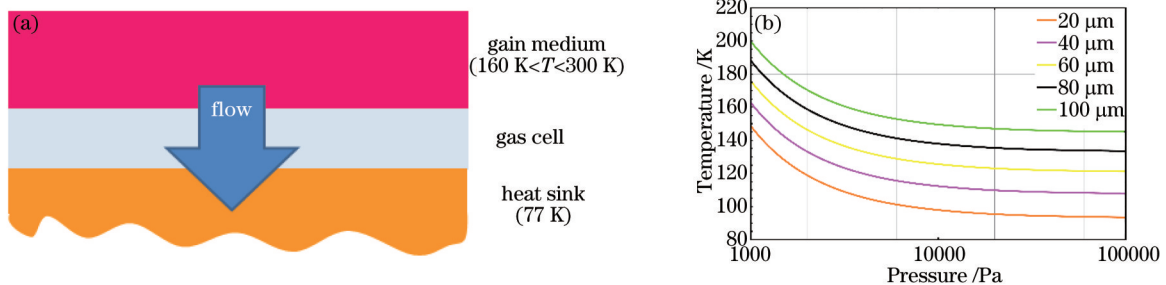


图 6 (a) 低温静态低气压气体冷却结构图; (b) 气室压强和厚度变化高反射表面温度分布图^[25]

Fig.6 (a) Schematic view of the proposed cooling scheme for thermalization; (b) slab high-reflectance surface temperature as a function of Helium pressure and thickness

由于 Yb:YAG 介质口径较大、低温运行时发射截面显著增大,可提高增益,但 ASE 也将成为影响放大器储能与增益的一个关键问题^[26]。LUCIA 采用了与 DiPOLE 一样的方法,在 Yb:YAG 陶瓷周围增加一圈共烧结的 $\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 包边来吸收发射波长,避免寄生振荡。此外,Chanteloup 等^[27]也考虑沿抽运方向对介质采用渐变掺杂浓度来减少横向 ASE 和增益介质的厚度,避免 ASE 的影响。

$\text{Cr}^{4+}:\text{YAG}$ 包边的掺杂浓度和宽度需要合适的设计。放大器中,采用真空隔热,Yb:YAG 介质的轴向温度将保持在准恒温下,温度梯度小于 1 K ,横向温度梯度也相对较小,小于 10 K ^[24]。在实际运行中,针对 Yb:YAG 介质和包边热生成的不同,LULI-CNRS 实验室还设计了两级热沉片,如图 7 所示^[26]。可知,包边处气室

厚度为 50 μm , 介质处为 200 μm , 可以确保包边和 Yb:YAG 介质中温度相同, 避免激光片中横向热传导。

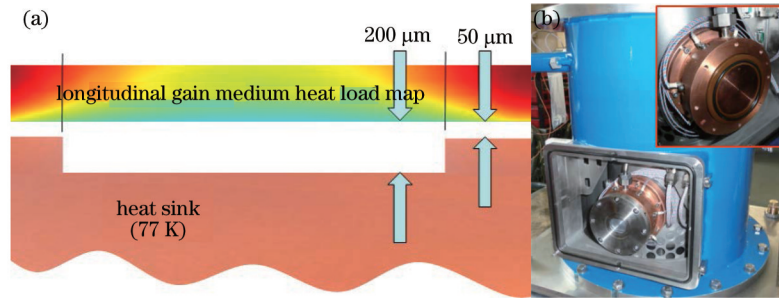


图 7 (a) 可调 He 气热传导率的两级铜热沉片结构; (b) 低温原型激光头实物图^[27]

Fig.7 (a) Two steps copper heat sink structure for adjustable Helium thermal conductivity;
(b) picture of the cryogenic prototype laser head

3.2.3 设计指标和光束结构

根据 HiPER 激光系统的基准设计, LULI-CNRS 设计的激光驱动器指标要求如图 8(a) 所示^[23]。每个放大器由 12 片小的有源镜组成, 可容纳 12 路光束, 其中 9 路光束将非相干叠加成所需的压缩脉冲, 剩余的 3 路光束将相干叠加形成冲击点火脉冲。

放大器链路设计采用了两程放大结构, 如图 8(b) 所示^[27]。为了获得 1 kJ 的能量, 种子光束将以 20 度入射到口径约 100 cm^2 的 6 个放大器片上, 经变形镜反射后, 光束双程通过放大系统, 而每个放大器将放大四次。增益介质将采用掺杂原子数分数为 0.1%, 厚度为 2 cm 的 Yb:YAG 陶瓷, 抽运强度为 6 kW/cm^2 。当在 100~200 K 之间运行激光器时, 因发射和吸收截面比常温下高, 光光转换效率将超过 30%。

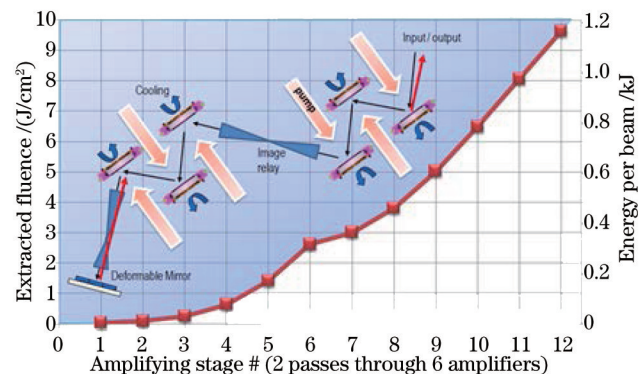
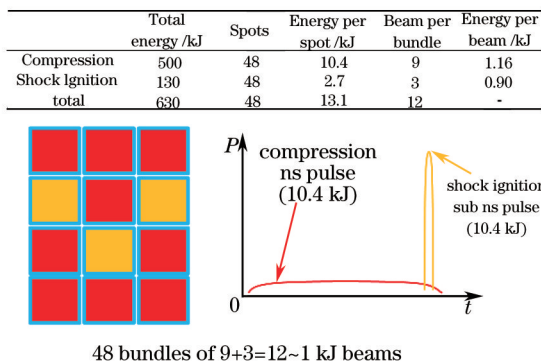


图 8 (a) HiPER 激光器设计指标; (b) 单路光束的能量和通量增长图^[23, 27]

Fig.8 (a) Laser requirements summary for HiPER;

(b) energy and fluence build-up through the LULI proposed beamline for HiPER

同时, 这 6 个放大器将采用大小约为 12.5 $\text{cm} \times 13 \text{ cm}$ 的 Z 形结构或 12 $\text{cm} \times 12 \text{ cm}$ 的 45° 等腰三角形结构, 如图 9 所示^[23]。如果增加并行多排光束, Z 形结构将更容易提供抽运源并进行定标放大。

4 结 论

为了实现激光聚变能应用, 2013 年 4 月 HiPER 已经完成了项目的准备阶段(P³), 并做了大量的商业评估, 并详细说明了 IFE 对全球能源投资、经济评价和科学技术瓶颈的作用。未来 7 年, HiPER 将进入技术发展和风险降低阶段(TDR²), 任务主要包括最佳点火方案的选择、项目所有元器件的设计及 10 $\text{kJ} @ 10 \text{ Hz}$ 二极管抽运激光链等特定原型的发展; 同时激光聚变物理、点火证实以及反应堆的设计和及相关技术的发展也将得到研究。从 2020 年开始演示电站的建造, 主要分成两个阶段: a) 先进点火方案和重复频率激光器运行验证的实验装置建造; b) 演示装置的建造, 并期待在 2036 年实现商用激光聚变电站^[28]。

目前, 在 100J 的原型激光系统中, DiPOLE 在 175 K 温度下的输出能量为 9.5 $\text{J} @ 1 \text{ Hz} / 10 \text{ ns}$, 7.4 $\text{J} @ 10 \text{ Hz} / 10 \text{ ns}$, 相应的光光效率为 24% 和 23%^[17]; LUCIA 在 300 K 的温度下获得了 14 $\text{J} @ 2 \text{ Hz} / 8 \text{ ns}$ 的输出能量, 光光效率为 20%^[18]。ASE 是制约效率提高的一个关键因素, 对于更大尺寸增益介质的 HiPER 激光系统将需要更好

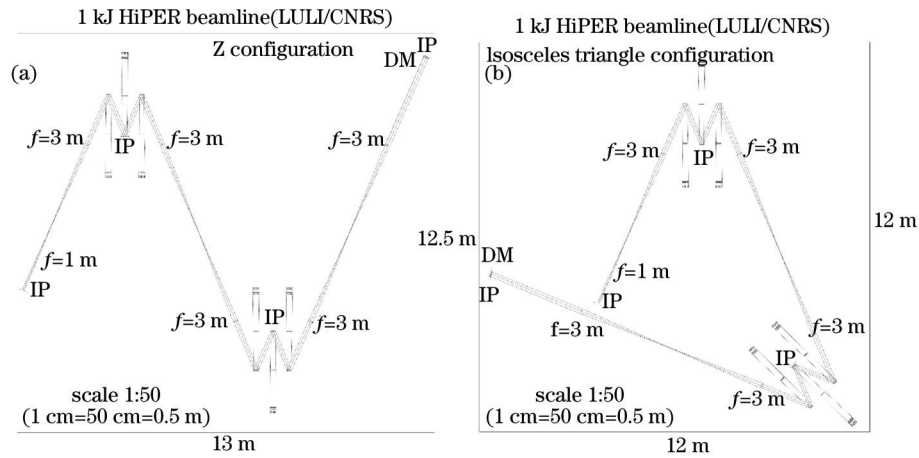


图9 LULI方案千焦耳级光束结构。(a) Z形结构; (b) 45°等腰三角形结构^[23]

Fig.9 LULI scheme for kilo joules HiPER beamlet. (a) “Z” configuration; (b) “isosceles triangle” configuration 的处理;此外,在重复频率运行下,光学元件的负载能力,高功率二极管抽运源也是亟待解决的关键问题。

参考文献

- 1 M J Edwards, P K Patel, J D Lindl, *et al.*. Progress towards ignition on the national ignition facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(7): 1.
- 2 J L Miquel, C Lion, P Vivini. The LMJ program: Overview and status of LMJ & PETAL projects[C]. CLEO: 2013, ATu1M. 4.
- 3 Yanqi Gao, Weixin Ma, Baoqiang Zhu, *et al.*. Status of the SG-II-UP laser facility[C]. *IEEE Photonics Conference (IPS)*, 2013: 73-74.
- 4 Guo Ailin, Zhu Haidong, Yang Zeping, *et al.*. Wavefront propagation modeling and verification of the SG-II Updated laser facility[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0214001.
郭爱林, 朱海东, 杨泽平, 等. 神光II升级装置波前传输计算模型与验证[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0214001.
- 5 Zhou Yang, Shao Ping, Zhao Dongfeng, *et al.*. Research on the system of the nanosecond target aiming and positioning of the SG-II Updated laser facility[J]. *Chinese J lasers*, 2014, 41(12): 1208002.
周洋, 邵平, 赵东峰, 等. 神光II升级装置纳秒靶瞄准定位技术研究[J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208002.
- 6 Wanguo Zheng, Xiaomin Zhang, Xiaofeng Wei, *et al.*. Status of the SG-III solid-state laser facility [J]. *Journal of Physics: Conference series*, 2008, 112(3): 032009.
- 7 Peng Xiaoshi, Wang Feng, Yang Dong, *et al.*. Characteristics study of the backscattering light on Shenguang-III prototype[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314004.
彭晓世, 王峰, 杨冬, 等. 神光III原型背向散射光特性研究[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314004.
- 8 Wen Shenglin, Yan Hao, Zhang Yuanhang, *et al.*. Calculation and experiment of the focal spot caused by continuous phase plate with wavefront distortion[J]. *Acta Optica Sinica*, 2014, 34(3): 0314001.
温圣林, 颜浩, 张远航, 等. 波前畸变下连续相位板焦斑的计算与实验[J]. *光学学报*, 2014, 34(3): 0314001.
- 9 E I Moses, TN Collaborators. The national ignition campaign: status and progress[J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104020-104024.
- 10 E Moses, T D Rubia, E Storm, *et al.*. A sustainable nuclear fuel cycle based on laser inertial fusion energy[R]. LLNL-CONF-413798, 2009.
- 11 M Dunne. A high-power laser fusion facility for Europe[J]. *Nat Phys*, 2006, 2(1): 2-5.
- 12 Y Kozaki. Power plant concepts and chamber issues for fast ignition direct-drive targets[J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(3): 542-552.
- 13 J C Chanteloup, D Albach, A Lucianetti, *et al.*. Multi kJ level laser concepts for HiPER facility[C]. *The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications*, 2010, 244(1): 012010.
- 14 B L Garrec, S Atzeni, D Batani, *et al.*. HiPER laser: from capsule design to the laser reference design[C]. *SPIE*, 2011, 7916: 79160F.
- 15 B L Garrec, M Novaro, M Tyldesley, *et al.*. HiPER laser reference design[C]. *SPIE*, 2011, 8080(1): 289-293.
- 16 B L Garrec, C Hernandez-Gomez, T Winstone, *et al.*. HiPER laser architecture principles[C]. *The Sixth International*

- Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2010, 244(3): 032020.
- 17 S Banerjee, K Ertel, P D Mason, *et al.*. High-efficiency 10 J diode pumped cryogenic gas cooled Yb:YAG multislabs amplifier[J] *Opt Lett*, 2012, 37(12): 2175-2177.
- 18 T Goncalves-Novo, D Albach, B Vincent, *et al.*. 14 J/2 Hz Yb³⁺:YAG diode pumped solid state laser chain[J]. *Opt Express*, 2013, 21(1): 855-866.
- 19 A Kessler, M Hornung, S Kepler, *et al.*. 16.6 J chirped femtosecond laser pulses from a diode-pumped Yb: CaF₂ amplifier[J]. *Opt Lett*, 2014, 39(6): 1333-1336.
- 20 K Ertel, C Hernandez-Gomez, P D Mason, *et al.*. Concept for Cryogenic kJ-Class Yb: YAG Amplifier[C]. *Lasers, Sources and Related Photonic Devices*, 2010: AWB20.
- 21 P D Mason, K Ertel, S Banerjee, *et al.*. Optimised Design for a 1 kJ Diode Pumped Solid State Laser System[C]. *SPIE*, 2011, 8080: 80801X.
- 22 K Ertel, S Banerjee, C Hernandez-Gomez, *et al.*. Performance modelling of a 1 kJ DPSSL system [C]. *OSA Proceedings of Topical Meeting on High-Intensity Lasers and High-Field Phenomena (HILAS)*, 2011.
- 23 J C Chanteloup, A Lucianetti, D Albach, *et al.*. Overview of the LULI diode-pumped laser chain proposal for HIPER kJ beamlines[C]. *SPIE*, 2011, 8080: 80801W.
- 24 J C Chanteloup, A Lucianetti, D Albach, *et al.*. Low pressure helium cooled active mirror amplifiers for HiPER kilojoule beamlines[J]. *Plasma and Fusion Research*, 2013, 59(1): 218-228.
- 25 A Lucianetti, D Albach, J C Chanteloup. Active-mirror-laser-amplifier thermal management with tunable helium pressure at cryogenic temperatures[J]. *Opt Express*, 2011, 19(13): 12766-12780.
- 26 D Albach, J C Chanteloup, G I Touzé. Influence of ASE on the gain distribution in large size, high gain Yb³⁺:YAG slabs [J]. *Opt Express*, 2009, 17(5): 3792-3801.
- 27 J C Chanteloup, D Albach, G Bourdet, *et al.*. Impact of variable doped gain medium on HiPER multiple kJ/~10 Hz diode pumped beam lines design[C]. *Advanced Solid-State Photonics*, 2009.
- 28 C Edwards, F Amiranoff. HiPER: The European path to laser energy[C]. *EPJ Web of Conferences*, 2013, 59: 01006.

栏目编辑: 宋梅梅