

# 美国 LIFE 计划激光驱动器概念设计研究现状

肖凯博<sup>1,2</sup> 袁晓东<sup>1</sup> 蒋新颖<sup>1</sup> 严雄伟<sup>1</sup> 王振国<sup>1</sup> 李明中<sup>1</sup> 郑建刚<sup>1\*</sup> 郑万国<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900

<sup>2</sup>中国工程物理研究院研究生部, 北京 100088

**摘要** 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。从技术指标, 光束结构、放大器结构、增益介质和系统效率、二极管抽运源等激光器结构, 以及热致双折射和退偏振补偿技术、圆柱形空间滤波器等关键单元技术方面详细地介绍了美国激光惯性聚变能源(LIFE)计划二极管抽运固体激光驱动器的概念设计。LIFE 计划将对高平均功率激光技术、高功率二极管和激光材料的发展产生重大影响。

**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; 激光惯性聚变能源; 美国国家点火设施; Mercury 激光系统

中图分类号 TN242

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP52.040001

## Research Status of Conceptual Design of Diode-Pumped Solid-State Laser Driver for LIFE

Xiao kaibo<sup>1,2</sup> Yuan Xiaodong<sup>1</sup> Jiang Xinying<sup>1</sup> Yan Xiongwei<sup>1</sup> Wang Zhenguo<sup>1</sup>  
Li Mingzhong<sup>1</sup> Zheng Jiangan<sup>1</sup> Zheng Wanguo<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

<sup>2</sup>Graduate School of China Academy of Engineering Physics, Beijing 100088, China

**Abstract** Inertial fusion energy (IFE) is a well-known safe, carbon-free, sustainable and clean energy source. An overview of conceptual design of diode-pumped solid-state laser driver for laser inertial fusion energy (LIFE) project is presented while some emphases are given on laser system requirements, laser architecture and some key technical units. Among those, the laser architecture consisting of optical layout, amplifier architecture, gain medium and system efficiency, and diode laser pump source are introduced in detail. Key technical units, such as thermal birefringence and depolarization compensation, cylindrical spatial filter concept, are also summarized. The development of LIFE project has an important effect on high average power laser technology, high power diode and laser material.

**Key words** laser optics; inertial fusion energy; diode-pumped solid-state laser; conceptual design; LIFE; national ignition facility; Mercury 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。近年来, 激光聚变能源研究已经引起了人们的广泛关注, 尤其是高能高功率激光装置的发展, 如美国的国家点火装置(NIF)<sup>[1]</sup>、法国的兆焦耳装置<sup>[2]</sup>以及我国的神光系列装置<sup>[3-5]</sup>等。NIF的建成和国家点火攻关的开展, 标志着激光聚变能源研究进入了一个新的阶段<sup>[6]</sup>。目前, 美国的激光惯性聚变能源(LIFE)计划<sup>[7]</sup>、欧洲

收稿日期: 2014-09-04; 收到修改稿日期: 2014-10-27; 网络出版日期: 2015-04-04

基金项目: 中国工程物理研究院聚变能源中心项目

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

的 HiPER 装置<sup>[8]</sup>、日本的反应堆 KOYO-F<sup>[9]</sup>都将致力于证实激光聚变能电站的可行性。

2009 年,美国利弗莫尔国家实验室(LLNL)提出了从聚变点火通往商用聚变电站的 LIFE 计划<sup>[10]</sup>。LIFE 是 NIF 激光技术的完美扩展,除了满足 NIF 激光系统的需求外,还不得不处理高效、高平均功率(HAP)、长时间运行的需求。二极管抽运固体激光器(DPSSL)是解决这些需求的一个较好的技术途径。早在 1989 年, Krupke 等<sup>[11]</sup>就提出了采用二极管抽运源,形成多光束几兆焦耳的固体激光器来驱动聚变反应堆的概念。基于这一概念,从 1998 年开始,LLNL 实验室启动了致力于 LIFE 研究的 HAP-DPSSL 计划 Mercury,并取得了许多重要成果<sup>[12-13]</sup>。Mercury 激光器集成了二极管、晶体和气体冷却等方面的关键技术,采用了独特的定标放大光束结构,文献[14-15]对此已做了详细的介绍。根据 NIF 的建造经验和 Mercury 的技术基础, Bayramian 等<sup>[16]</sup>对 LIFE 的激光驱动器进行了详细的概念设计,并分析了一些关键的技术单元。本文将从设计指标、激光器结构、以及关键单元技术等方面综述 LIFE 的激光驱动器概念设计。

## 2 设计指标

LIFE 聚变电站与其他发电装置相比,必须具有非常好的经济效益和竞争性<sup>[17]</sup>。为了实现这一目的, LIFE 的光束设计将以可靠性、可用性、可维护性和检查性(RAMI)为指导原则和根本目标,激光器的总体效率和电能成本也将得到实质性的改进<sup>[18]</sup>。按照 RAMI 的原则、电站和点火的需求, LIFE 激光系统的顶层技术设计指标如表 1 所示<sup>[16]</sup>。从表 1 中可以看出, LIFE 的激光系统将使用 48 个束组,总共 384 路光束在 16 Hz 处来输出 2.2 MJ,插头效率为 15%的总能量。

表 1 LIFE 激光系统的顶层设计指标<sup>[16]</sup>

Table 1 Top level laser system requirements

Characteristic	Requirement
Total laser energy /MJ	2.2
Total peak power /TW	633
# Beamlines	384(48×8)
Energy per beamline ( $3\omega$ ) /kJ	5.7
Wallplug efficiency /%	15
Repetition rate /Hz	16
Lifetime of system /shots	$30 \times 10^9$
Availability	0.99
Maintenance /hrs	< 8
Beam pointing (rms) / $\mu\text{m}$	100
Beam group energy stability (8 beams, rms) /%	<4%
Beam to beam timing at target (rms) /ps	<30
Focal spot ( $w/\text{CPP}^{\dagger}$ ), 95% enclose /mm	3.1
Spectral bandwidth, $3\omega$ /GHz**	180
Prepulse (20 ns prior to main) /( $\text{W}/\text{cm}^2$ )	< $10^8$

\* CPP = continuous phase plate-used to modify the far field from a peak to a flat top for target drive

\*\*Used for suppression of stimulated raman scattering, stimulated Brillouin scattering, and in conjunction with a diffraction grating for smoothing by spectral dispersion (SSD) of the laser speckle induced by use of the CPP on target.

## 3 激光器结构

为满足激光系统 RAMI 的需求,整个光束结构被封装在一个线性可替换单元(LRU)内,如图 1 所示<sup>[16]</sup>。LIFE 的激光系统由 384 个 LRU 的基频光路以及频率转换器、传输镜和终端光学组件组成。相比 NIF 基频光束几十米的长度, LIFE 的 LRU 非常小,在  $31 \text{ m}^3$  的空间内 16 Hz 处就能产生 8.1 kJ,插头效率为 25%的基频光<sup>[19]</sup>。它利用了一些先进的激光技术,如:高功率激光二极管阵列、氦气冷却、Nd:glass 增益介质、光学制造技术及结构变化技术等。通过移除更换单个 LRU,同时确保其他光束继续运行并补偿临近维修光束的能

量,以满足系统的 RAMI 原则。在合理的平均无故障时间下,统计模型预言激光系统的可用性高于 99%。

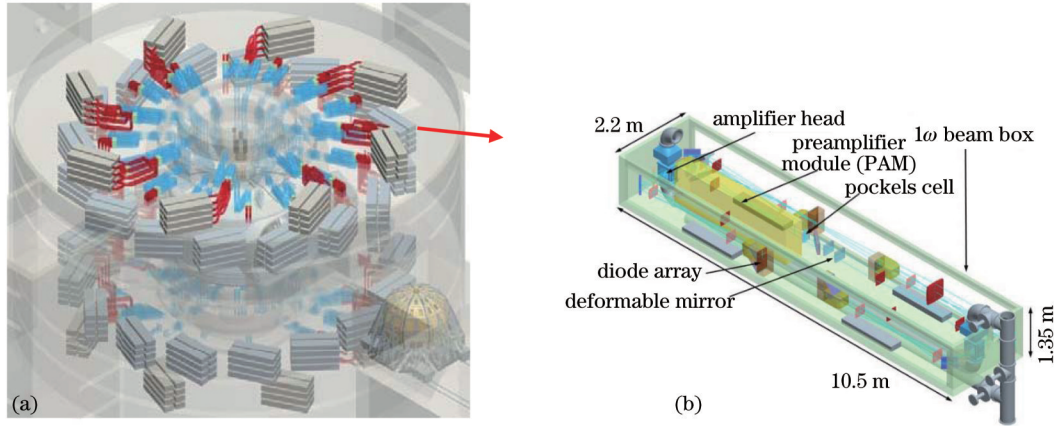


图 1 (a)LIFE 电站紧凑光束结构侧视图;(b)光束盒的内部扩展侧视图<sup>[16]</sup>

Fig.1 (a) Isometric view of a LIFE power plant showing compact beam architecture;(b) isometric view of an expanded view showing the contents of a beam box

### 3.1 光束结构

与 NIF 激光系统设计相似,LIFE 也分别采用远场空间滤波器和像传递来控制光束小尺寸强度的非线性增长,限制衍射对光束质量的影响,如图 2 所示<sup>[16,20]</sup>。主振荡器产生纳焦耳种子脉冲经 Nd:YLF 介质的预放模块(PAM)放大到 0.5~1 J 后,在扩束镜的远端附近通过反射镜注入到主放大器腔内。扩束镜放大并准直种子光的口径到 25 cm×25 cm。为了保证高的提取效率,激光束填充因子较高,经四程放大后,出射光束的通量是饱和通量的几倍。位于主放大器和偏振片之间的 1/4 波片将相对于偏振片 s 偏振的光变成圆偏光。圆偏光相比线偏光减少了 1/3 的非线性相移,从而降低了光束强度分散成高空间频率的风险。因为两个主放大器具有相同的抽运冷却条件及温度分布,位于它们之间的 90°石英偏振旋转器将相互补偿两放大器的热致双折射,也使光束 4 次通过放大器和 1/4 波片后仍为 s 偏振光直接从偏振片反射出去而不需要使用额外的主动偏振开关。普克尔斯盒并没用作调节开关,仅用来避免后向反射脉冲进入前端,并且减少寄生激光作用。最后,扩束镜增大光束口径到 41.7 cm×41.7 cm,传输像平面到频率转换器;然后,光束通过 3 个终端传输望远镜进入靶丸。终端传输望远镜利用两个中子针孔来保护激光系统免受 LIFE 腔内产生的中子辐射。第二个传输望远镜利用额外的放大倍率,将光束放大到 48.6 cm×48.6 cm,从而确保最后光学元件的光圈数  $f$  足够小而获得要求的焦斑。最终的光学元件是一个菲涅耳透镜,它将光束偏折到靶,避免中子直接穿透第二个中子针孔,为终端光学组件提供第一道屏障。

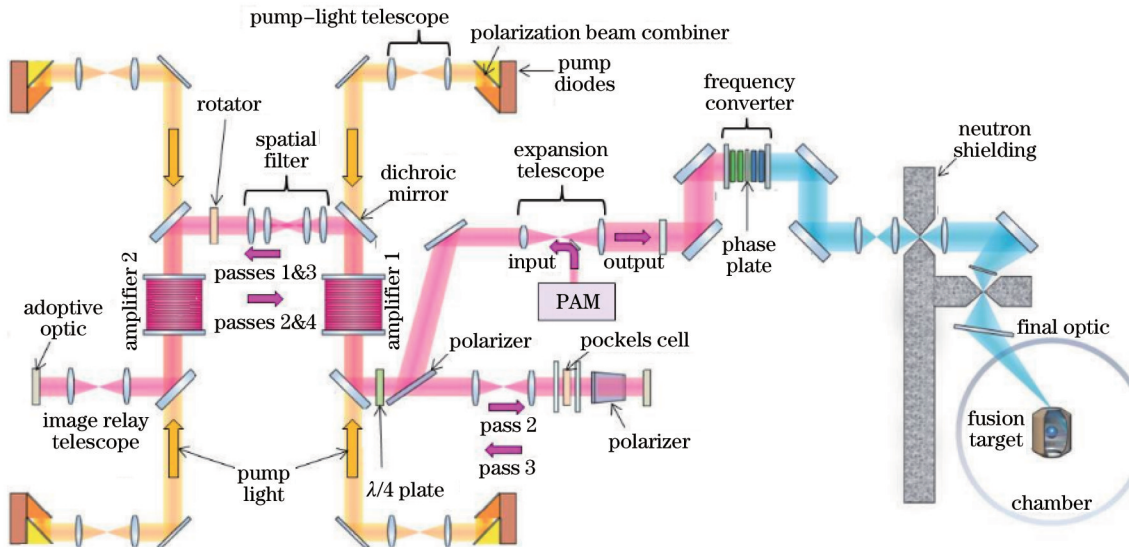


图 2 LIFE 激光系统光束结构设计示意图<sup>[20]</sup>

Fig.2 LIFE laser beam box architecture

### 3.2 放大器结构

LIFE激光系统的放大器设计以Mercury放大器为原型,采用梯度掺杂的薄片增益介质和气冷热管理方式,如图3所示<sup>[21]</sup>。放大器由20片1 cm厚的Nd:APG-1玻璃片组成。激光片被高强度、高填充因子平顶分布的抽运模块从两端抽运。光束的入射角和片的口径也从NIF的 $56^\circ$ 减小到 $0^\circ$ ,从 $40\text{ cm}\times 80\text{ cm}$ 减小到 $25\text{ cm}\times 25\text{ cm}$ 。20片1 cm的激光片既能确保合适的平均增益系数,降低放大自发辐射(ASE)损耗,又能限制非线性相移小于 $2\text{ rad}$ ;另外,足够薄的激光片还确保片表面的张应力小于屈服应力的25%。2 mm厚的冷却管道将片分开,以便流通的氦气移除废热。激光片的最外侧被两块7 cm厚的熔石英窗口与外界隔开,以便承受冷却氦气与外界大气之间的气压差。5 atm( $1\text{ atm}=1.01325\times 10^5\text{ Pa}$ )、0.1 Mach的氦气将气体温升限制在10 K内。每片激光介质的边缘使用一种低模数的透明材料固定,以便将片中的ASE传输到液冷包边内。所有光学元件表面的减反膜透射率为99.95%。

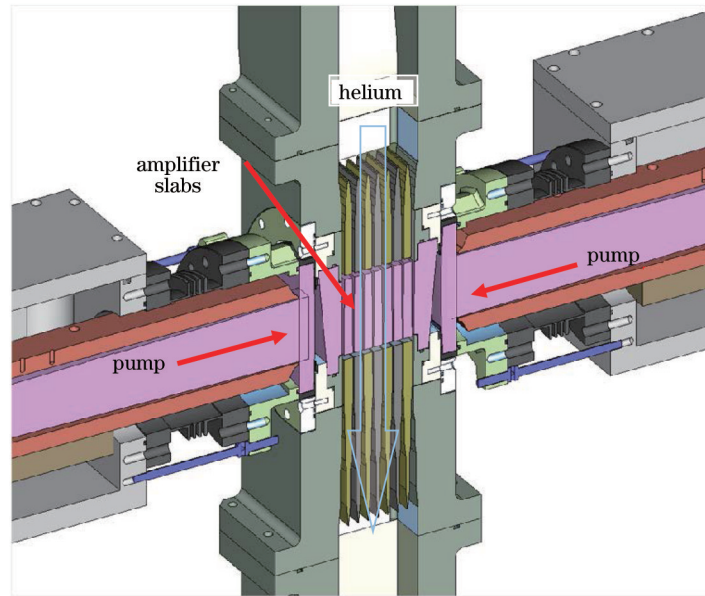
图3 气冷放大器头<sup>[21]</sup>

Fig.3 Gas cooled amplifier head

### 3.3 增益介质和系统效率

由于储能寿命、饱和通量、抗热冲击性和可用性满足效率和高平均功率运行的需求,目前LIFE激光系统的基准设计仍采用NIF使用的Nd:APG-1玻璃作为增益介质。但它的热传导性较差,可能会影响热管理,不利于重复频率运行。LLNL实验室也考虑了两种其他的候选材料作为LIFE放大器的增益介质,一种是Yb:YAG,另一种是Yb:S-FAP。相比Nd<sup>3+</sup>粒子,Yb<sup>3+</sup>粒子不存在激发态吸收、浓度淬灭和上转换。YAG也比

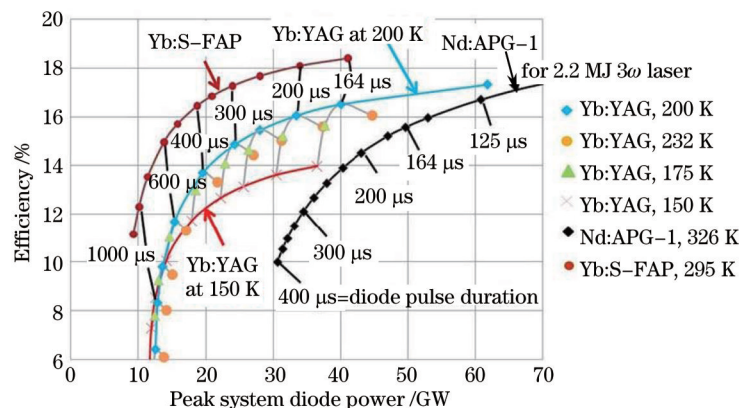
图4 Nd:APG-1、Yb:YAG和Yb:S-FAP激光片,总效率随二极管峰值功率的变化趋势<sup>[20]</sup>

Fig.4 Efficiency versus peak system diode power for beamlines using Nd:APG-1, Yb:YAG and Yb:S-FAP laser slabs

磷酸玻璃具有更好的热传导率和抗热冲击性。然而, Yb:YAG 必须冷却到低温时才能获得合适的受激发射截面。Yb:S-FAP 比 Yb:YAG 具有更好的特性, 甚至能在常温下有效运行, 只是不能生长出大尺寸的晶体。采用图 2 所示的光束结构, LLNL 实验室验证并比较了三 3 种增益介质下的光束性能, 如图 4 所示<sup>[20]</sup>。

考虑到二极管的成本及系统需求, LIFE 光束的最佳设计点并不是系统效率的最高点, 而是二极管成本和电站产能的平衡点。因此, 对于 Nd:APG-1 玻璃介质, LIFE 激光系统的基准设计采用 164  $\mu\text{s}$  的抽运脉宽, 50 GW 的二极管峰值功率获得 15.6% 的总效率。为了达到相同的效率, 在 200 K 运行的 Yb:YAG 所需的二极管将比 Nd:APG-1 少 45%, 而 Yb:S-FAP 将少 68%, 这主要是因为 Yb:YAG 和 Yb:S-FAP 比 Nd:APG-1 有更长的辐射寿命 (995  $\mu\text{s}$  versus 361  $\mu\text{s}$ ; 1100  $\mu\text{s}$  versus 361  $\mu\text{s}$ )。Yb:S-FAP 比 Yb:YAG 需要更少的二极管, 主要原因是在常温下运行, 减少了冷却从而极大地提高了效率。

### 3.4 二极管抽运源

由于 LIFE 激光器效率和重复频率 (大于 12%, 16 Hz) 比 NIF (大约 1%,  $10^{-4}$  Hz) 要求更高, 因而必须使用二极管代替闪光灯抽运, 氦气冷却的主动冷却方式代替被动冷却。二极管阵列是聚变电站的一个重要组成部分, 它大概占系统成本的 30%~50%。因此, 对二极管抽运源的效率、价格和产量提出了很高的要求。LIFE 二极管抽运源的主要技术指标如表 2 所示<sup>[16, 22]</sup>。LLNL 实验室也从技术指标, 设备的寿命、产能、价格, 市场需求以及封装技术等方面详细地分析了满足技术指标的制造方法<sup>[22]</sup>。针对 LIFE 的需求, 美国 Northrop Grumman Cutting Edge Optronics 公司还提出了一种无透镜阵列工艺, 可制造巴条间隔为 150  $\mu\text{m}$  的高密度堆 (HDS) 二极管阵列<sup>[23]</sup>。

表 2 LIFE 二极管抽运源的主要技术指标<sup>[16, 22, 23]</sup>

Table 2 Preliminary diode specifications for the LIFE project

Item	Value	Comment
Power (bar)	850 W	A 340 $\mu\text{m}$ bar-to-bar pitch
	500 W	A 200 $\mu\text{m}$ bar-to-bar pitch
Intensity/stack	25 kW/cm <sup>2</sup>	A stack = 50 bars
Intensity/array	20 kW/cm <sup>2</sup>	A array = 770 stacks
Array irradiance with polarization multiplexing	40 kW/cm <sup>2</sup>	
Array size	53 cm $\times$ 27 cm	
Array peak power	33 MW	850 W power/bar (vertically stacked, 1 cm wide, edge-emitting diode bars)
Diode efficiency	(72 $\pm$ 3)%	QCW, into preferred polarization
Diode wavelength range	(872 $\pm$ 6.6) nm	
Pulse width	175 $\mu\text{s}$	Baseline value, may increase with laser optimization
Repetition rate	15 Hz	Laser optimization may increase to 20 Hz
Duty cycle	<0.5%	
Fast axis divergence	3 $^\circ$ FW 1/e <sup>2</sup>	
Slow axis divergence	7 $^\circ$ FWHM	
MTTF	$\sim 14 \times 10^9$	Wearout to 20% power drop
Average junction temperature	22 $^\circ\text{C}$	
QCW temperature excursion	<6 $^\circ\text{C}$	CuW backplane
Coolant inlet temperature	2 $^\circ\text{C}$	
Coolant mini-channel dimension	0.5 mm	

为了获得非常高的功率辐照密度, LIFE 采用了偏振复用技术, 如图 5 所示<sup>[16]</sup>。二极管阵列被分成相同的两部分后再偏振合束。一部分抽运光经半波片后变为 p 偏振, 再经过一个宽带偏振片与反射镜反射的另一部分 s 偏振光结合后共线传输。最后放大器表面的辐照密度大约为原来的两倍。偏振复用方法的另一个好处是两偏振光传输不同的距离可以模糊二极管堆栈之间的间隔效应。

## 4 关键单元技术

### 4.1 热致双折射和退偏振补偿

为了减少热致双折射对光束质量的影响, LLNL 实验室通过数值模拟的方法比较了增益介质相对提取

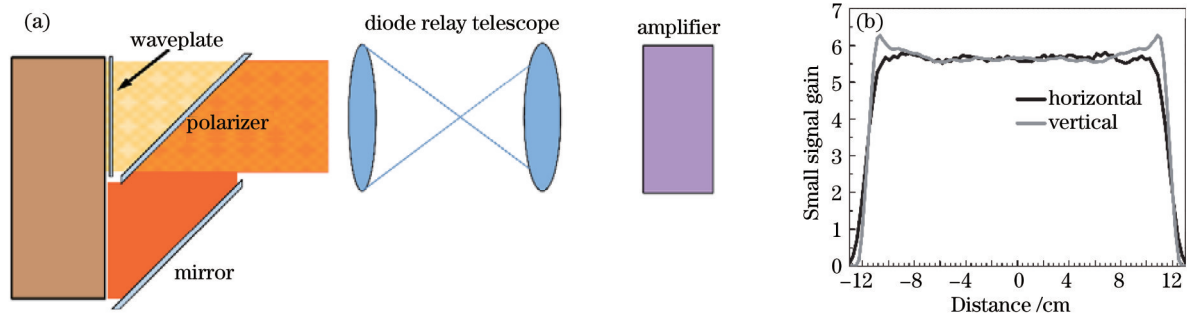


图5 (a)偏振复用的抽运传输方法原理图;(b)放大器中均匀的抽运形貌分布<sup>[16]</sup>

Fig.5 (a) Schematic of pump delivery method showing polarization combination; (b) output ray-trace showing homogeneous pump profile

光束垂直安装(LIFE)和布儒斯特角安装(NIF)时放大器中的热致双折射和热致退偏振对光束质量的影响<sup>[24]</sup>。从图6可以看出半宽20 cm, 20阶的超高斯抽运光束垂直入射在一个42 cm×42 cm×1 cm的布儒斯特角激光片上引起光束54.3%的最大退偏振;p偏振光透过这样的激光片越多退偏振损耗越严重;双程通过一个44片的放大器(88次通过布儒斯特角激光片), 遭受176个反射面后, 在片角处的退偏振光消失了;最后形成了一个铁叉形的光束形貌而不是期待的平顶光束分布。

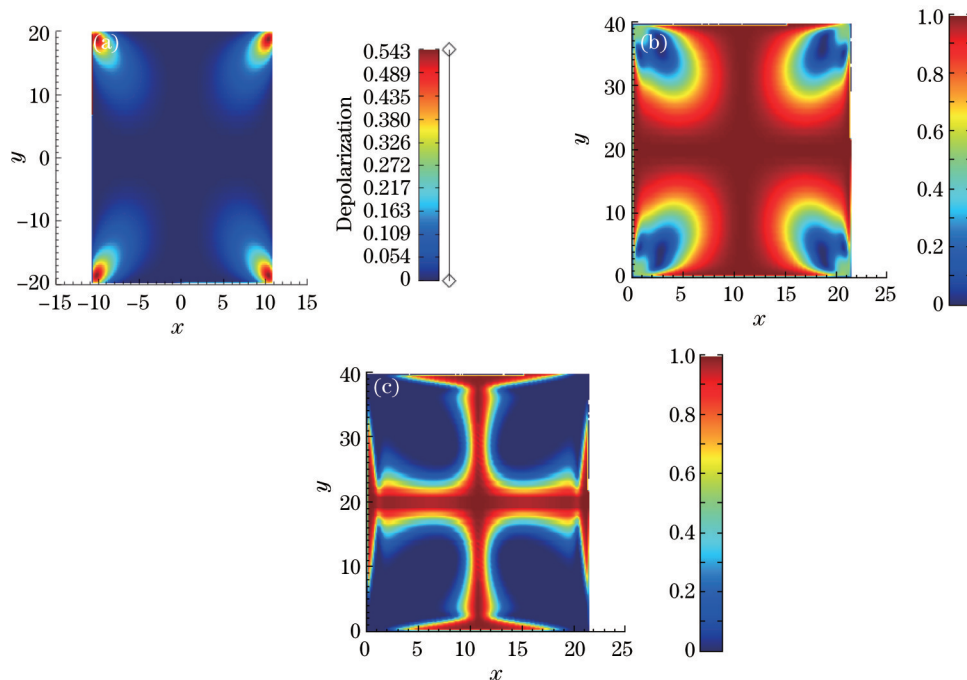


图6 (a)一块布儒斯特角激光片的退偏振图;(b)穿过4块布儒斯特角激光片后透射的p偏振光;(c)双程通过一个44片的放大器后的透射光束<sup>[24]</sup>

Fig.6 (a) Map of depolarization of a Brewster's angle slab; (b) transmitted p-polarized light after traversing four Brewster's angle slabs; (c) transmitted beam after double-passing a 44-slab amplifier

因此,LIFE采用正入射的片状放大器,并在两个相同的放大器间放置一个90°的转子来补偿热致双折射,如图7所示。石英转子旋转光束的偏振方向90°,以致任何退偏振光在第二个放大器中经历相等的反向相位延迟,从而消除退偏振。图8显示了半宽11.5 cm, 20阶的超高斯抽运光束垂直入射在一个26 cm×26 cm×1 cm的正入射激光片上的退偏振图案。p偏振光穿过一个放大器后将出现周期变化的花纹。这是因为当相位延迟达到 $2\pi$ 时,发生了相位模糊。与布儒斯特角相比,正入射时p和s偏振光都经历相同的反射损耗,因而可以双折射补偿。经过补偿后,从两放大器中透射的偏振光为平顶光束,如图8(c)所示。

偏振补偿对两放大器的热负载、相对位置和光束放大率的平衡性要求很高。在满足系统设计容差的情况下,正入射激光片放大器对于高功率激光系统是一种更好的方案。

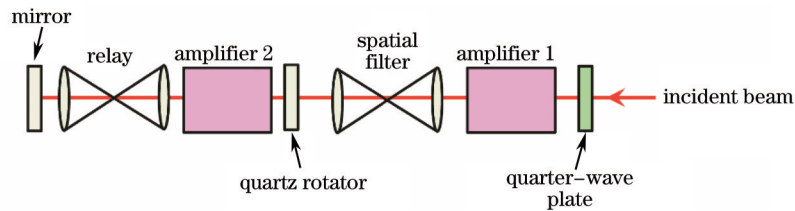
图7 双折射补偿图<sup>[24]</sup>

Fig.7 Birefringence compensation scheme

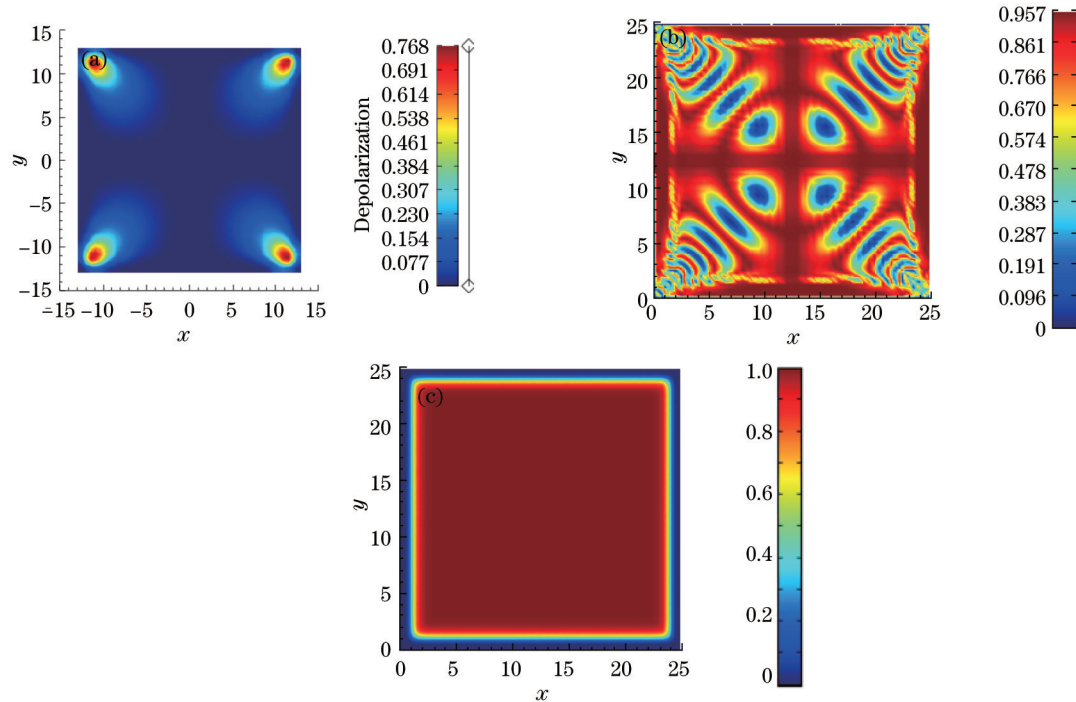
图8 (a)一块正入射激光片的退偏振图;(b)单程穿过一个22片正入射激光片放大器后透射的p偏振光;(c)偏振补偿后单程穿过两个放大器后的偏振透射光<sup>[21,24]</sup>

Fig.8 (a) Depolarization for a normally incident slab; (b) p-polarized transmission after a single-pass of a 22-slab amplifier; (c) transmitted beam images for a single pass of two compensated amplifiers

在偏振补偿中,90°石英转子对激光系统的设计提出了新的挑战。当前的石英晶体都非常小(15 cm×15 cm),无法满足如此大口径(27 cm×27 cm)的要求,因此,只能将许多小口径的石英光学键合成非常大的晶体。目前,利用精密光学公司PPC发展的化学活化直接键合(CADB<sup>®</sup>)工艺,4块小口径(20 mm×20 mm×14 mm)的石英转子已被用来键合成大组件<sup>[25]</sup>。透射波前和旋转测试、光栅扫描损伤测试、初始点损伤阈值测试以及寿命测试等实验验证表明键合成的石英转子满足激光器的需求,非常适合于LIFE高平均功率激光系统的应用。

#### 4.2 圆柱形空间滤波器

在高平均功率运行时,光束通量将远超过空间滤波器针孔材料(钢、钨、或金刚石)的损伤阈值,以致针孔会有等离子体放气现象。为了减轻这个问题,LIFE将使用一对纵向偏移正交的圆柱形传递望远镜,如图9所示<sup>[16]</sup>。传递望远镜中的纵向位移不会影响轴上的物点或传递的像点,但将分开每个轴上的焦点,使之成为强度小于100倍的线焦点。在通量低于缝的材料损伤阈值时,用缝代替针孔也可完成滤波。利用高损伤阈值(475 GW/cm<sup>2</sup>)的熔石英作为缝的材料,将会避免缝烧蚀和损伤。基于标准模型的衍射光束模拟证实如图10所示<sup>[21]</sup>。LIFE激光系统的近场输入10(a)被第一个圆柱透镜聚焦成一条线焦点,如图10(b)。图10(c)为圆柱形空滤滤波器的远场强度形貌。在200 μrad的空间滤波角处,通量仅为10~100 J/cm<sup>2</sup>,远低于熔石英的损伤阈值。

为了验证这一概念,LLNL实验室已经建造了一个完整的1/3概念设计规模的望远镜,并通过激光损伤和寿命测试实验证实1:1的圆柱空间滤波可在高通量下运行。

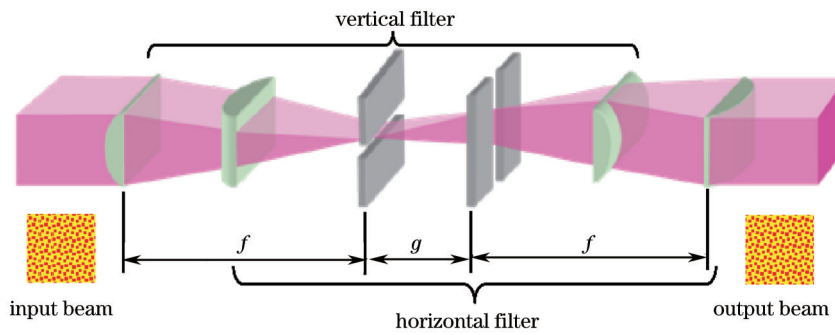
图9 圆柱形空间滤波器概念<sup>[16]</sup>

Fig.9 Cylindrical spatial filter concept

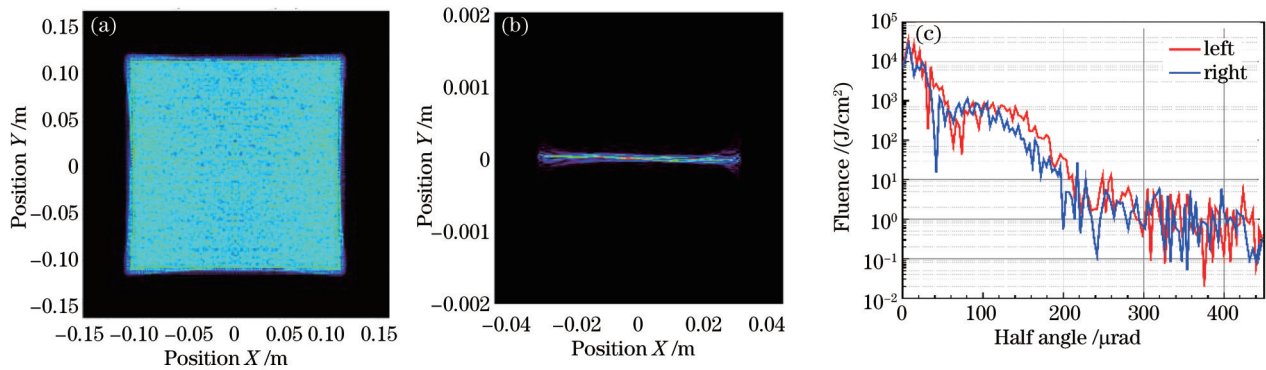
图10 (a)光束进入空间滤波器后模拟的近场形貌;(b)在一个轴上光束的远场形貌;(c)正交于远场的线性形貌<sup>[21]</sup>

Fig.10 (a) Simulated near field profile of a beam entering the cavity spatial filter; (b) far field profile (in one axis) of the beam; (c) line profile orthogonal to the far field

此外,在设计 LIFE 激光系统中,LLNL 实验室还发展了一些新的技术,如:验证光学元件和二极管性能指标的激光技术测试装置(LTF)<sup>[26]</sup>、紧凑高效低廉的二极管脉冲发生器<sup>[27]</sup>等。

## 5 结 论

为了实现商用 LIFE 聚变电站,美国已制定了详细的发展计划,主要分为 3 个设计点:LIFE.1, LIFE.2, LIFE.3<sup>[17]</sup>。在 NIF 点火成功后 10~15 年间,LIFE.1 将利用现有的材料和技术,设计产生 400 MW 的聚变能量,同时为商用电站运行单元提供测试平台。在 2030 年中期,LIFE.2 将成为第一个 1 GW, NRC 许可的商用聚变电站。它与 LIFE.1 使用相同的激光技术,但应用了更先进的耐辐射结构材料(氧化物弥散强化钢)使高温高功率密度运行成为可能。LIFE.3 是 LIFE.2 的扩展,通过改进靶的效率、降低聚变靶的成本并提高运行温度产生更多的电能输出。LIFE.3 将作为成熟的聚变电站被大规模推广应用。

根据 LIFE 激光驱动器的概念设计,结合当前我国高功率激光装置的相关技术,考虑到未来 IFE 的应用,为了实现这样的激光驱动器将主要面临以下 4 个方面的技术挑战:

1) 高平均功率激光技术,主要是抽运过程中 ASE 的抑制和增益介质的热管理。在大尺寸、高增益介质中 ASE 将严重影响增益与储能性能,降低系统的效率;重复频率运行时增益介质中也将存在大量的热沉积,严重影响光束的质量。因而,对于 IFE 激光系统,这将是一个关键点。

2) 重复频率条件下,光学元件的负载能力,尤其是光学元件的寿命。在高功率激光装置中有许多不同类型的光学元件,如:放大器片、透镜、反射镜、窗口、普克尔盒和频率转换晶体等。在 IFE 激光驱动器中,这些光学元件将经受几百亿次的激光脉冲。因此,为了增加耐久性,现有光学元件表面的抛光、镀膜以及制造过程可能需要改进以满足其寿命测试的要求。

3) 新型激光材料的需求。LIFE 的基准设计和我国的激光装置均主要采用一种掺钕的磷酸玻璃作为放大器的增益介质。但这种介质的热性能很差,不利于重复频率运行。Yb:YAG 晶体和陶瓷非常适合于重复频率下高能量激光器的发展。目前,英国的 DiPOLE 装置<sup>[28]</sup>、法国的 Lucia 装置<sup>[29]</sup>、捷克的 HiLASE 装置<sup>[30]</sup>以



及日本的 GENBU 计划<sup>[31]</sup>都采用低温条件下 Yb:YAG 作为增益介质。因而,高质量、大尺寸 Yb:YAG 晶体或陶瓷的批量生产也将是一个亟待解决的关键问题。

4) 高功率二极管抽运源。为了获得所需的效率和寿命,IFE 激光驱动器将采用二极管作为抽运源。在 LIFE 的设计中,峰值功率 40~80 GW 的高功率二极管将是驱动器成本的主要部分。目前,二极管巴条的功率已基本满足系统指标,但其价格和产能与系统的要求相差甚大<sup>[23]</sup>。因此,进一步提高二极管功率,增大产能并降低价格将是未来 IFE 发展面临的最大挑战。

### 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]. *Phys Plasmas*, 2013, 20(7): 070501.
- 2 J L Miquel, C Lion, P Vivini. The LMJ program: overview and status of LMJ & PETAL Projects [C]. *CLEO*, 2013.
- 3 Gangyao Xiao, Dianyuan Fan, Shiji Wang, *et al.*. SG-II solid-state laser ICF system [C]. *SPIE*, 1999, 3492: 890-895.
- 4 Wanguo Zheng, Xiaomin Zhang, Xiaofeng Wei, *et al.*. Status of the SG-III solid-state laser facility [J]. *J Physics: Conference Series*, 2008, 112(3): 032009.
- 5 Yanqi Gao, Weixin Ma, Baoqiang Zhu, *et al.*. Status of the SG-II-UP laser facility [C]. *IEEE Photonics Conference (IPS)*, 2013: 73-74.
- 6 E I Moses, the NIC Collaborators. The national ignition campaign: status and progress [J]. *Nuclear Fusion*, 2013, 53(10): 104020.
- 7 E Moses, T D Rubia, E Storm, *et al.*. A Sustainable Nuclear Fuel Cycle Based on Laser Inertial Fusion Energy [R]. 2009, LLNL-CONF-413798.
- 8 M Dunne. A high-power laser fusion facility for Europe [J]. *Nat Phys*, 2006, 2(1): 2-5.
- 9 Y Kozaki. Power plant concepts and chamber issues for fast ignition direct-drive targets [J]. *Fusion Science and Technology*, 2006, 49(3): 542-552.
- 10 E I Moses. Ignition on the national ignition facility: a path towards inertial fusion energy [J]. *Nuclear Fusion*, 2009, 49(10): 104022.
- 11 W F Krupke. Solid-state laser driver for an ICF reactor [J]. *Fusion Technology*, 1989, 15(2): 377-382.
- 12 C D Orth, R J Beach, C M Bibeau, *et al.*. Design modeling of the 100-J diode-pumped solid state laser for project Mercury [C]. *SPIE*, 1998, 3265: 114-129.
- 13 A Bayramian, P Armstrong, E Ault, *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.
- 14 Yu Haiwu, Xu Meijian, Duan Wentao, *et al.*. Research progress of laser drivers for inertial fusion energy [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2006, 43(9): 55-62.  
於海武, 徐美健, 段文涛, 等. 惯性聚变能源激光驱动器研究进展 [J]. *激光与光电子学进展*, 2006, 43(9): 55-62.
- 15 Wang Mingzhe, Ding Lei, Luo Yiming, *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.
- 16 A Bayramian, S Aceves, T Anklam, *et al.*. Compact, efficient laser systems required for laser inertial fusion energy [J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 60(1): 28-48.
- 17 T M Anklam, M Dunne, W R. Meier, *et al.*. Life: the case for early commercialization of fusion energy [J]. *Fusion Science and Technology*, 2011, 60(1): 66-71.
- 18 M Dunne, E I Moses, P Amendt, *et al.*. Timely delivery of laser inertial fusion energy (life) [J]. *Fusion Sci Technol*, 2011, 60(1): 19-27.
- 19 A Bayramian, S Aceves, T Anklam, *et al.*. A compact line replaceable unit laser driver for laser inertial fusion energy [C]. *CLEO*, 2012: 1-2.
- 20 A C Erlandson, S M Aceves, A J Bayramian, *et al.*. Comparison of Nd:phosphate glass, Yb:YAG and Yb:S-FAP laser beamlines for laser inertial fusion energy (LIFE) [J]. *Opt Mater Express*, 2011, 1(7): 1341-1352.
- 21 A Bayramian. Progress towards a compact laser driver for laser inertial fusion energy [R]. 7th International Workshop HEC-DPSSL, CA, 2012.

- 22 R Deri, J Geske, M Kanskar, *et al.*. Semiconductor Laser Diode Pumps for Inertial Fusion Energy Lasers [R]. 2011, LLNL-TR-465931.
- 23 R Feeler, J Junghans, E Stephens. Low-cost diode arrays for the LIFE project [C]. SPIE, 2011, 7916: 791608.
- 24 A L Bullington, S B Sutton, A J Bayramian, *et al.*. Thermal birefringence and depolarization compensation in glass-based high-average-power laser systems [C]. SPIE, 2011, 7916: 79160V.
- 25 N Traggis, N Claussen, A Bayramian, *et al.*. Improved characterization of transmitted wavefront error on CADB (R) epoxy-free bonded solid state laser materials [C]. SPIE, 2011, 7912: 79121K.
- 26 A J Bayramian, R W Campbell, C A Ebberts, *et al.*. A laser technology test facility for laser inertial fusion energy (LIFE) [C]. The Sixth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications, 2010: 244.
- 27 A Bayramian, B Deri, S Fulkerson, *et al.*. Compact, efficient, low-cost diode power conditioning for laser inertial fusion energy [C]. SPIE, 2011, 7916: 79160B.
- 28 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.
- 29 T Goncalves-Novo, D Albach, B Vincent, *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.
- 30 A Lucianetti, M Divoky, M Sawicka, *et al.*. HiLASE cryogenically-cooled diode-pumped laser prototype for inertial fusion energy [C]. SPIE, 2013, 8602: 860208.
- 31 J Kawanaka, N Miyanaga, T Kawashima, *et al.*. New concept for laser fusion energy driver by using cryogenically-cooled Yb:YAG ceramic [C]. 5th International Conference on IFSA, 2008, 112: 032058.

栏目编辑: 张 雁