

高功率固体激光装置的发展与工程科学问题

彭翰生¹, 张小民¹, 范滇元², 朱健强²

(1. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900;

2. 中国科学院上海光学精密机械研究所 高功率激光物理国家实验室, 上海 201800)

[摘要] 在激光聚变需求牵引下, 高功率固体激光技术走过了30多年的发展历程。在世界范围内, 美、日、法、中、英、俄等国先后建造了20多台大型装置, 输出能量初期仅百焦耳级, 后来增大到数万焦耳, 固体激光技术得到长足发展。近几年来, 几个大国都在建造巨型激光装置, 如美国和法国正分别建造国家点火装置 NIF 和兆焦耳激光器 LMJ, 我国在研制神光-III 激光装置, 俄国也在计划建造 Iskra-6 激光装置。这一代激光装置的研制不但在科学技术上提出了许多新需求, 从而把激光科学技术发展推向新的历史阶段, 而且就其规模、投入、周期和风险而言, 是前所未有的大光学科学工程。从工程科学的角度去研究如何才能建造出性能优良和效费比高的巨型激光装置是需要回答的具有挑战性的新课题。

[关键词] 激光聚变; 高功率固体激光; 发展趋势; 工程科学; 创新

1 前言

激光问世后不久, 科学家们便萌发了利用强激光产生核聚变的念头。1963年, 列别捷夫物理所(LPI) N.G. Basov 和 O.N. Krokhin 首先发表了激光核聚变概念^[1], 从而在国际上引发了早期的激光聚变热。一年以后, 在中国工程物理研究院工作的王淦昌教授也独立提出利用高功率激光打靶产生中子的建议^[2]。20世纪60年代, 等离子体物理和激光技术的发展使激光聚变成为一个独立的新兴科学领域。然而, 直到70年代初, 在激光聚变物理概念上才出现了重大突破。E. Teller 和他在美国利佛莫尔实验室(LLNL)的同事 J.H. Nuckolls 等人于50年代末就着手研究微型内爆聚变的概念, 当1960年激光出现时, 他们立刻意识到激光用于惯性约束聚变的可能性^[3]。1972年, 他们把利用强激光束对装有氢同位素热核材料的微球靶进行内爆压缩, 从而实现有效热核燃烧的概念公之于世^[4],

从理论上证明利用这一概念实现聚变所需激光能量可以降低数个量级。理论上的突破推进了实验研究, 从而拉开了研制高功率激光器的序幕。从那时起, 高功率激光技术走过了辉煌的发展历程。在数种激光技术途径探索和比较中, 钕玻璃激光技术脱颖而出。俄、美、日、法、中、英等国相继建造了多台装置。进入90年代, 美国率先开始建造巨型固体激光器国家点火装置 NIF (National Ignition Facility)^[5], 法国随即着手建造同样规模的装置 LMJ^[6]。这些激光器的输出功率高达全世界发电总功率的数十倍, 是有史以来最大的光学工程。我国适时启动了神光-III 激光装置建设项目。高功率固体激光技术发展步入新的历史时期。这些项目不仅需要集以往固体激光科学与技术之大成, 还有赖于科学与技术大跨度持续发展的支撑。然而, 对于这样的规模、投入、周期和风险的课题极具挑战性, 是研究如何才能建造出性能优良和效费比高的巨型装置所面临的工程科学问题。

[收稿日期] 2000-11-16; **修回日期** 2000-12-14

[基金项目] “八六三”高技术计划资助项目(863-416)

[作者简介] 彭翰生(1937-), 男, 山东济南市人, 中国工程物理研究院研究员, 博士生导师

2 激光聚变及其对激光装置的基本技术性能要求

2.1 激光聚变基本概念

高功率激光是惯性约束聚变 ICF (Inertial Confinement Fusion) 驱动源技术之一, 较之其他途径如粒子束和脉冲功率技术更加成熟。激光聚变基本原理是利用激光束直接加热或者利用激光束照射高 Z 材料转换成的亚千电子伏的 X 光间接加热装有聚变燃料的微球靶丸表面, 形成等离子体高速外喷, 如火箭原理一样, 反作用力使靶物质以数百公里每秒的速度向内会聚, 把热核燃料压缩。预计燃料压缩到铅密度的 20 倍, 温度达到 10^8 K 就能够实现热核材料点火和燃烧, 释放出聚变能。用激光束加热称作直接驱动, 而用 X 光加热则称作间接驱动, 这是两种基本驱动方式, 见封 3 图 1。所用聚变靶一般是用低 Z 材料如玻璃, 最好是低密度高分子材料或金属铍做成微球壳, 微球直径仅数百微米至数毫米; 内充 DT 混合气体, 如果要实现点火和高增益, 需将靶置于液氦环境使之形成 DT 冰层; 对于间接驱动靶, 需把微球悬在高 Z 材料如金做成的微型腔体内。高功率激光和激光聚变能够在实验室内产生出极端物理条件, 如数百万开至上千万开的辐射温度, 太帕至拍帕的压力。这种高能量密度极端物态条件类似星体内部与核爆炸时的状态, 具有明显的应用价值; 也为许多科学领域的研究创造了前所未有的条件, 带来了新的历史机遇; 从长远目标看, 科学家们希望 21 世纪中期能够提供清洁、经济和用之不竭的聚变能源。

2.2 对激光装置的基本技术性能要求

由于有直接驱动和间接驱动方式之分, 具体要求存在差异, 然而, 基本方面是类似的。主要包括激光脉冲的能量和功率, 脉冲宽度和形状, 波长和带宽, 束数, 各束间的能量或功率平衡, 聚焦斑点大小和空间分布, 打靶焦斑弹着点精度, 打靶最小时间间隔等。数十年来的研究表明, 铍玻璃激光器输出的 $1.053 \mu\text{m}$ 的基频光波长太长, 需 3 倍频成 $0.35 \mu\text{m}$ 的光才能与等离子体有更好的耦合; 为了实现热核点火, 脉冲能量约需 1~2 MJ; 主脉冲宽度约数纳秒并具有幅度较低、持续十数纳秒的脉冲前沿; 靶球表面辐照不均匀度需 $< 1\%$; 激光束数一般不应少于数十束, 各束间不平衡要控制在百分之几以内; 焦斑直径多为一百至数百微米并满足

空间分布要求; 打靶焦斑弹着点精度应优于数十微米。由于放大器光学元件热恢复时间较长, 打靶间隔一般要数小时。不同国家激光技术发展阶段不同, 所研究的物理问题和追求的目标也很不一样, 因此已建和在建装置的技术指标会有较大差异。

3 高功率固体激光技术发展趋势

ICF 驱动源技术途径在过去 30 多年里经历了两种竞争和选择。一是激光与其他技术途径的竞争, 二是不同激光技术间的竞争。60 年代中期脉冲功率技术问世以来从未停止利用此种装置驱动聚变的探索, 先后研究过相对论电子束和轻离子束途径, 由于电子束预热靶燃料和轻离子束难以聚焦等物理和技术问题无法解决, 在 90 年代后期回到 Z-Pinch 途径。Z-Pinch 靶物理实验有了相当大进展, 显示了发展潜力, 但要走的路还很长。此外, 重离子束聚变驱动源技术也在低支持强度下研究。就激光技术而言, 也经历了 60 年代末以来多种激光技术的竞争和选择, 发展过二氧化碳激光技术 ($10.6 \mu\text{m}$), 氟化氢激光技术 ($2.7 \mu\text{m}$), 原子碘激光技术 ($1.315 \mu\text{m}$) 等。短波长激光对激光与等离子体耦合至关重要, 因而铍玻璃激光技术 ($1.053 \mu\text{m}$) 在世界范围内成为最受青睐的驱动源技术, 从而得到长足发展。后来虽然更短波长的氟化氦准分子激光技术 ($0.248 \mu\text{m}$) 也有所发展, 但用于激光聚变研究的装置规模还较小。

前苏联在早期处于固体激光技术发展的先导地位, 但后来选择了碘激光技术。70 年代前期, 美国取而代之, 一直代表了高功率固体激光技术发展主流, 从小到大先后建成了 10 多台装置。具有代表性的是 LLNL 实验室于 1984 年建成的 Nova 激光装置^[7]和罗彻斯特大学激光能实验室 (LLE) 于 1995 年建成的升级后的 Omega 激光装置^[8]。Nova 激光装置服役至 1999 年, 对激光技术和激光等离子体物理都作出了历史性贡献。通过系统的理论和实验研究, 给出了实现聚变点火所需参数和条件的科学预测。日本大阪大学激光工程所 (ILE) 于 1983 年建成了当时世界最大的铍玻璃激光装置, 并于 1987 年把塑料薄壳微球靶内物爆压缩至 600 倍液氘密度 ($\approx 120 \text{ g/cm}^3$)^[9]。法国 Limeil 实验室于 1986 年开始运行 Phebus 激光装置^[10], 该装置是从美国购买的 Nova 装置两条束线的复制品。此外, 英国卢瑟福实验室 (RAL) 等也建有一些较小

的激光装置。中国工程物理研究院与中国科学院上海光机所合作, 在自力更生发展激光技术和关键光学元器件的基础上, 于1984年和1985年先后建成星光-I装置和神光-I装置, 前者在1994年升级

为星光-II, 而后者于2000年升级为神光-II (见封3图2)。表1给出了国际上较大的固体激光装置和我国的几台装置。

表1 用于ICF研究的主要固体激光装置

Table 1 Glass laser facilities for ICF

国家	实验室	装置	能量/kJ	脉宽/ns	束数	运行时间
美国	LLNL	Nova	45 (3ω)	0.1~3	10	1984—1999
	LLNL	Beamlet	6.4 (3ω)	3	1	1994—1999
	LLE	Omega	40 (3ω)	0.1~1	60	1995—
日本	ILE	Gekko XII	15 (3ω)	0.1~1	12	1983—
法国	Limeil	Phebus	8 (3ω)	0.1~3	2	1986—
中国	高功率激光物理国家实验室	神光-I	1.6 (1ω)	0.1~1	2	1985—1994
		神光-II	6 (1ω)	0.1~1	8	2000—
	中国工程物理研究院	星光-II	0.15 (3ω)	0.1~1	1	1994—
英国	RAL	Vulcan	2 (2ω)	0.1~1	8	

90年代, 美国在全面发展新一代固体激光材料、单元技术和先进总体设计技术的基础上, 率先启动总投资约40亿美元、为期10年的大科学工程, 建造国家点火装置NIF, 见封3图3。该装置宽约100 m, 长约150 m, 其规模和难度都是史无前例的, 计划在2010年前后实现实验室热核聚变点火和增益。如果实现这一目标, 将是科学技术发展史上划时代的事件。法国随即开始建造与NIF类似规模的LMJ激光装置, 而且两国在激光技术上全面合作。俄罗斯也计划建造大型固体激光装置Iskra-6^[11], 但因高功率固体激光技术基础不足,

经济困难, 目前尚处于预研和准备阶段。我国在关键光学元器件和激光技术不断取得进展的基础上, 启动了建造神光-III装置的项目, 首先研制其原型装置。在建和计划建造的新一代巨型固体激光装置见表2。这些装置的建造和相关技术的发展标志着高功率固体激光技术的发展进入了新的历史时期。这些装置数十倍于已有装置的规模, 耗资巨大, 周期很长, 风险度高, 需要不断发展的先进技术来支撑, 更面临着工程科学方面的许多课题, 回答这些问题需要艰苦的劳动和不断的创新。

表2 建造中的新一代ICF固体激光装置

Table 2 Glass laser facilities under construction for ICF

国家	实验室	装置	能量/kJ	脉宽/ns	束数	完成时间
美国	LLNL	NIF	1800 (3ω)	15 (整形脉冲)	192	2008年
法国	CEA-DAM	LMJ	2400 (3ω)	15 (整形脉冲)	240	2010年
中国	中国工程物理研究院	神光-III	60 (3ω)	1	64	2010年
俄国	VNIIEF	Iskra-6	300 (3ω)	1~3	128	

4 建造新一代巨型固体激光装置面临的工程科学问题及对策

搞好任何一项大的工程都从性能、可靠性、费用和时间等方面来综合考虑。这一普遍性原则同

样适用于巨型激光装置的建造。然而为了满足普遍性原则所需要研究和解决的问题在这里却是非常个性化的。如前所述, 在以往的30年中, 高功率固体激光技术已发展到很高水平。然而, 几个大国正在建造的巨型装置所涉及的许多部分已接近科技

术的极限,也超出了已有材料和加工工艺所能达到的水平。前所未有的投资、规模和科学技术风险是全世界大科学工程中罕见的,是各国工程科技界共同面临的挑战。高功率固体激光装置是相对成熟的聚变驱动源技术,但有其固有的弱点如:插头效率低($<1\%$);光学元件在强光作用下易损坏,工作寿命较短;光路中使用许多大口径光学元件,为得到好的光束质量,对元件的材料和加工要求十分苛刻等。这些先天性弱点与好的性能、高可靠性、低费用和短建造周期构成尖锐矛盾。解决这些问题需要从总体方案、技术途径、工程设计、科学管理等诸方面综合创新。

4.1 总体概念优化设计

一台巨型固体激光装置总体概念的优化设计是一项复杂的系统工程,包括科学地确定未来装置的总体规模和要实现的物理目标,合理地确定为实现这些目标激光装置应具有的技术指标,以及选择达到预定指标的最佳技术途径等。

4.1.1 总体规模和物理目标 不同国家建造新一代巨型固体激光装置的需求牵引是类似的,但激光技术发展阶段有很大差异,这种差异给物理目标的确定带来制约因素。这里的任务是进行激光技术可行性研究,为装置总体规模和物理目标确定提供依据。美国 LLNL 实验室利用 Nova 激光装置靶物理实验得到大量数据,结合数值模拟,理论上论证了实现聚变点火的科学可行性。而数十年激光技术的进展和建造数代高功率激光装置的经验则为实现这一目标提供了技术基础。美法建造 NIF 和 LMJ 的首要目标确定为实现聚变点火和一定的能量增益,同时用于开展与国防有关的科学研究。此外,装置的建造也必然为相关科学领域和能源基础科学技术的发展创造条件。从国情出发,考虑到我国高功率固体激光技术发展水平和工业基础,计划建造的神光-III 装置的规模虽超过美国最大的激光器 Nova 装置,但离聚变点火要求有量级之差,重点是研究清楚聚变点火前的靶物理基本规律。

4.1.2 技术指标优化 技术指标设计包含两个层次的问题,一是确定装置总体技术指标的裕度,二是优化装置技术性能。首先,物理目标确定时虽然进行了科学的和严谨的研究与分析,但毕竟是外推,带有一定的不确定性。为减少风险,NIF 和 LMJ 装置所选取的实现点火的技术指标具有两倍的裕度。由于物理需求的多样性,激光装置将输出

不同的参数,使装置工作在非常不同的状态。有多种因素限制高功率固体激光装置的输出能力。当脉冲宽度为数纳秒或更长时,输出能力受装置的增益能力限制,装置属于能量受限型;而脉冲宽度为纳秒或更短时,光学介质非线性效应将引起自聚焦成丝造成破坏,装置属于功率受限型。这两种类型给激光装置设计带来很大差异和不同的优化重点。NIF 和 LMJ 两台装置首要目标是实现聚变点火,需要主脉冲为数纳秒的整形脉冲,因而按能量受限型优化,波长为 $0.35\ \mu\text{m}$ 时,额定输出能量 1.8 MJ。同时兼顾短脉冲需要。但从设计角度看,无法使装置在两种脉宽时都处于优化工作状态。上述两台装置用于高温等离子体物理研究时,需要在 1.0 ns 脉冲高峰功率状态运行,这时只能输出 0.73 MJ 的能量。我国神光-III 装置主要工作在 1.0 ns,因而须按功率受限型优化设计;若需要整形长脉冲工作时,输出能量会超过表 2 中给出的 60 kJ。

4.1.3 技术途径创新 NIF 和 LMJ 装置的规模是 Nova 装置的 60 倍,不应该也不可能照搬传统技术做简单工程放大,创新是成功的关键。创新的核心是寻求克服高功率固体激光装置固有弱点或减少其影响和进一步发扬其固有优点的技术途径和措施。重点是如何大幅度提高光学元件的负载强度与全系统的能量效率和如何控制好光束质量以降低费用和满足性能要求。决定装置规模和费用的关键因素之一是激光装置的总通光面积,因此提高光学元件负载强度是非常重要的和有效的措施。为此,须不断提高铍玻璃、光学玻璃、熔石英、晶体等光学材料和膜层的抗破坏性能;改善光束空间分布均匀性和口径填充系数;减少光束本身和光学加工引入的噪声以控制非线性效应;全光路管道化,保持 100 级洁净度,消除引起破坏的环境因素等。提高系统效率的环节包括:放大器采用大口径方光束阵列排布以提高氙灯泵浦效率;改进放大器能源系统以提高能量传输和转换效率;放大级采用多程放大取代传统的单通 MOPA 放大以提高能量抽取效率,并研制了大口径等离子体电极 Pockels 开关;控制光学材料本身和加工、镀膜工艺,减少吸收和散射以提高光路传输效率等。

搞好光束质量控制是建造激光器的中心环节,主要指对光束空间分布、时间波形、能量以及谱宽和偏振态等进行主动控制,重点改善光束近场和远

场分布与波前分布。主要措施和创新点包括将光学元件的材料和加工引入的波面误差按空间频率展开,研究不同频率波面误差对于光束沿光路传输和靶面聚焦的影响,从而规范和完善材料性能及加工工艺要求;采用主动冷却技术消除放大器铍玻璃片热畸变和气体热梯度对波面的影响;配置自适应光学系统,补偿低空间频率波面误差;优化光路设计,消除或减少引入的波面误差,特别要控制好放大器空间滤波器间的 ΔB ;利用衍射光学元件如相位板(PP)或相息板(KPP)及谱色散匀滑(SSD)等技术手段控制焦斑宏观形态和微观均匀性等。

将波长 $1.053\ \mu\text{m}$ 的基频光转换成 $0.35\ \mu\text{m}$ 的光由KDP晶体倍频器完成。它是整个光学链上最易损坏的部件,又是影响能量效率和光束质量的重要环节。大口径晶体的生长和加工技术以及高性能倍频技术受到格外重视,并取得突破性进展。

此外,新一代装置光束数很多,运行时须调整、控制、监测的环节量很大,非人工可为。因此,须由计算机对自动光路准直、运行程序操作、数据获取和处理等进行集成控制,这也是区别于原有激光装置的又一重大技术进步。当然,也有许多新课题需要解决,如计算机弱电系统与脉冲功率强电系统的兼容问题,执行元件的精度和可靠性问题等都待研究,并需在实践中积累经验加以完善。

上述技术创新是全世界高功率固体激光界共同面临的挑战。其中许多要求达到了现阶段科学技术极限,而且是互相关联和制约的,局部的问题可能带来全局的困难和风险。已有的技术途径和能力远远不能满足要求,技术创新的任务是非常艰巨的。

4.2 工程可靠性理论在激光工程中的应用

大型激光装置是复杂的强光光学系统,自身十分脆弱。所以,长期以来人们自然地按科研成果的标准去衡量和要求它们,甚至习惯于故障不断的工作状态。然而,从建造的目的出发,大型激光装置应该是用户装置,要有好的可用性,应能常年为物理实验提供可靠稳定的运行。因此把工程可靠性理论应用于大型激光工程是非常必要的。在这里可靠性系统的任务是研究激光装置故障发生和发展的规律,维修、保障、预防甚至消灭故障的措施和手段。所涉及的内容应贯穿设计、加工制造和运行使用全过程的技术活动和管理活动。

对于新一代巨型装置,要从工程设计本身给它

们注入高可用性,要研究故障的模式和发生概率,建立合理的可靠性模型,定量地给出可靠性指标的设计要求,并建立起相应的质量控制体系以保证目标的实现。此外,给这种装置赋予好的可维修性是至关重要的,因为使用大量光学元件、强电元件和电子学元件,一味追求高可靠性是不科学的,可维修性是可靠性的重要补充。结构设计的模块化和插件化是赋予装置这一特征的关键措施。因为光路是封闭的,设计同时考虑配置必要诊断设备,使装置具有可测试性,以便及时发现问题进行维修。激光装置自身具有了高可靠性和好的维修性后,要达到高的可用性还必须具有保障性。例如,这种装置对洁净度、温度和湿度要求很高,环境工程设计和运行都要满足要求;还要有适量的备品备件、维修程序和计划以及应急措施等。

4.3 工程设计创新概念

工程设计在这里主要指结构设计,如何在传统设计的基础上创新设计理念,从结构设计上体现出建成性能好、可靠性高、费用低的装置的指导思想。正在建造的巨型装置都是庞然大物,如NIF和LMJ分别有192束和240束组成,我国的神光-III也有60多束;各束都是相同的,每一束中又有许多类似的元部件;易损件特别是高负载光学元件需要快速更换。鉴于新一代巨型激光器的这些特点,必须借鉴工业界特别是微电子行业的成功经验形成新的结构设计思想。元件标准化、单元模块化、模块插件化、系统组合化、环境洁净化是神光-III装置结构设计必须遵循的基本原则之一。

4.3.1 标准化 尽量减少元器件和大型结构构件的种类和规格,将其设计成标准件,进行批量生产,有利于降低成本和质量控制,并且增加互换性,减少备件总量。

4.3.2 模块化 把激光装置各分系统的部件设计成模块^[12],在超净装校间里(100级)进行光、机、电等元件组装和检测。激光装置现场只进行模块的总装集成,如同生产计算机一样,在生产线上只是完成各种功能集成块的总装。需要维修时现场仅仅是更换上备用模块,从而大大减少停机时间。已损模块可以回到装校间超净环境里从容离线维修和检测,并作为备件储存待用。此外,激光光路密封在100级洁净度的管道中,而大厅环境洁净等级较低,模块化操作能够减少光学元件暴露在大厅环境中的时间和机会,有助于降低光学元件的损坏概

率。

4.3.3 插件化 单元模块化的根本优点是可实现装置安装和维修的插件化。在每束光路中有数以百计的光学元件，它们都要精确准直和定位。实现模块快速更换的关键是解决模块整体精确定位技术。新换模块应能在规定的误差范围内被安装到原模块的位置，而不需要重新进行光路安装准直调整。这里所用到的主要是六维定位机构，具有一搁就准的功能。这当然要求模块几何尺寸的一致性和定位机构的精确性。由于环境和结构诸因素影响，设计必须赋予光路在打靶前自动微调准直的功能，以保证聚焦斑点的位置精度。所以，只要插件化的定位误差在自动准直可调范围内，就不需要再进行安装准直调整。这样，可以把激光器结构规范成两种类型：一是基础结构，包括支撑桁架，子系统密封箱体，光路管道，模块安装基座和固定其上的定位机构，以及真空、水、电、气等有关结构，这一部分在装置集成安装时进行全系统的一次性安装定位和调整；二是把元器件特别是光学元件组装成模块结构，并在模块上配有定位机构的另外一半，与基础结构间形成快速精确插入式联结。

4.3.4 组合化 借助于成组技术，实现系统的组合化。主要系统的组合化可大幅度地减小整个装置的体积和所需实验室空间。这不但会有效地降低造价，也有助于降低运行费用。特别是片状放大器的组合化，除有效地简化系统结构外，还大大提高了放大器的能量效率。

4.3.5 洁净化 灰尘、水汽和霉菌等是造成光学元件表面破坏、阈值降低的重要因素。新一代激光装置需要工作在每平方厘米数焦耳至十数焦耳通量，要求光学元件处于100级洁净环境中。激光装置大厅如体育馆大小，若实现全空间100级洁净，从建造和运行两方面看都不可取。合理的途径是将光路封闭，局部保持100级洁净，大厅则可降低洁净等级。然而，光学模块在100级装校间里完成装校后，如何在洁净等级较低的大厅中进行安装、调整以及如何维修、更换等给结构设计提出了许多新课题。设计者需综合分析各光学模块的共性和个性，制订出保持洁净的工作流程，由此确定合理的结构和相应的专用设备及工具。管道化还可消除大厅空调气流对光束的影响。此外，传输光路管道内充以惰性气体可免除氮气分子对强光的受激喇曼散射。

标准化、模块化、插件化、组合化和洁净化等构成了新一代巨型固体激光装置结构设计的全新概念。

4.4 建立光学加工流程线并实行光学元件全寿命管理

好的光学元件是建成巨型激光装置的决定性因素，也是工程所面临的最大挑战。其难点是：

1) 方口径和大尺寸 主光路光学元件全部是方口径；NIF和LMJ的净口径是400 mm × 400 mm，神光-Ⅲ是300 mm × 300 mm。

2) 数量多 光学元件数以千计。

3) 精度高 设计要求面型精度达到 $\lambda/6$ ，粗糙度达到1.0 nm水平。

4) 耐强光 能耐纳秒级脉冲、3倍频光，设计负载 $>5 \text{ J/cm}^2$ 。

5) 材料新 多是研究性产品，主要材料有钽玻璃、KDP和KD*P晶体、熔石英、光学玻璃等。前两类不是工业产品，需要专门研究和开发。后两类虽是工业产品，但必须进一步改进性能，如改善均匀性和减少吸收，才能满足要求。

即使在美国生产光学元件，也超出了工业界和科技界已具备的能力。因此，必须组织优势单位，建立包括材料、加工、检测、清洗、包装、运输、储存、装校等主要环节的流程线，从根本上扭转大口径光学元件单件生产的传统方式。建立这些流程线，包括科学技术的研究和开发、设备配置、工艺创新、标准制订、人员培训等，以及实现产品全程的质量控制。我国基础薄弱，更需格外重视；在多方支持下，正在逐步建立起钽玻璃，大口径平面镜，大口径非球面镜和KDP晶体四条生产流程线。这不仅是神光-Ⅲ工程需要，也将全面提升我国的光学加工水平，增强参与国际光学加工产业竞争的实力。

4.5 工程项目的科学管理

各国建造新一代巨型激光装置的工程周期大致都是10年，费用很高，技术风险很大，涉及多种学科和技术，情况十分复杂和特殊，欲实行科学管理还须首先研究管理科学，管理需要创新。就我国情况而言，下面两方面的管理问题尤其值得在实践中不断探索与研究。

4.5.1 矩阵式管理 建造巨型激光装置是大科学工程，包括：关键材料、元器件和技术预研与开发，技术途径与方案选择和设计，装置分系统集

成, 原型装置研制和总体技术集成, 激光装置工程设计和建造, 基建和支撑技术建设等。与工业和民用项目根本不同点在于它需要一个研究、试(实)验、改进多次反复进行的发展过程, 各方面间又多是互相交叉和互为因果的, 整个工程是在各方面不断发展、交互作用中向前推进的。很显然, 串行工作模式必须代之以并行工作模式。其核心是研究诸方面的依存和制约关系, 合理地划分阶段, 明确关键节点, 特别重要的是要找到适合于这种工作状态的技术、工程和组织管理等方面的具体途径与措施。这样就需要把一维线性关系变成二维面阵结构。而面阵上各方面的平衡关系是暂时的、相对的, 随着时间推移又需要研究新的平衡关系。把时间因素加进去后, 要考虑的实际上是一个三维时空矩阵。管理者的责任是用科学的理念研究三维矩阵的内在规律, 从时间、费用、风险等诸因素综合分析找出最优路径, 实现高效管理。

4.5.2 开放与联合 能否形成一支高水平队伍和相关配套力量是成败的关键。实施这样的工程需要大量激光技术和光学工程方面的专家, 还必须有精密机械、结构力学、计算机和自动控制、脉冲功率技术、真空技术、测量诊断技术和超净技术等方面的专家参与, 任何一个单位都不独立具备这样的综合工程技术力量。美、法、英三国已组成联合体, 发挥各自优势, 并与工业界广泛合作, 借鉴和吸收其它行业特别是微电子行业的先进技术为己所用。我国的实际情况则更要求项目承担单位实行一种开放政策, 特别要对国内有关行业 and 单位开放, 由最合适的人和最合适的单位去完成其最擅长的工作, 使有能力的人和单位都有作贡献的机会, 形成新形势下大力协同的局面和机制。市场经济的逐步建立已为实现这样一种构想和创意提供了有利条件, 规范化的建设项目也不乏借鉴。对于此类大科学工程而言, 传统观念的更新和政策上的导向是首要的, 同时项目承担单位要花大气力, 在充分调查研究的基础上通过竞争构筑协作网络, 并从技术上做好导入工作, 使各专业、行业间互相理解互相渗透, 在巨型固体激光装置建造中达到最佳结合, 形成我国配套的高水平专业队伍。项目承担单位的主要业务工作是抓好总体设计和总体集成。此外, 充分利用国门开放的有利环境吸收和借鉴国外先进的技术和

经验也是十分重要的, 效果也是非常显著的。然而, 自力更生, 自主创新仍然是我国的基点。在国际范围内, 高功率固体激光技术已面临新的发展历史机遇。可以预料, 中国在这一前沿科技领域中自立于世界民族之林前列的日子已为期不远了。

参考文献

- [1] Basov N G. Comments on the history and prospects for inertial confinement fusion [A]. *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* [C], 1991. 10: 25~28
- [2] 王淦昌. 利用大能量大功率的光激光器产生中子的建议 [J], *中国激光*, 1987, 14 (11): 641~645
- [3] Nuckolls J H. Edward teller medal: acceptance remarks [A]. *Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* [C], 1991. 10: 23~24
- [4] Nuckolls J H, Wood L, Thiessen A, et al. Laser compression of matter to super-high densities: thermonuclear (CTR) application [J]. *Nature*, Sept 1972, 239: 139~142
- [5] Paisner J A, Boyes J D, Kumpan S A, et al. Conceptual design of the national ignition facility [A]. *Solid-state Lasers for Application to ICF* [C], June 1995. 2~12
- [6] Andre M L. Status of the LMJ project [A]. *Solid-state Lasers for Application to ICF* [C], Oct 1996. 38~42
- [7] Heller A, Walter K, Wilt G. Leading the best and the brightest [J]. *Science & Technology Review*, 1999, (Jan/Feb): 4~11
- [8] Heller A. Collaboration ignites laser advances [J]. *Science & Technology Review*, 1999, (June): 19~21
- [9] Yamanaka C. Introduction to laser fusion [M]. Switzerland, Harwood Academic Publisher, 1990
- [10] Coutant J, Decroisette M. A laser facility to burn DT in laboratory [J]. *Chocs*, 1995, (13): 7~10
- [11] Kirillov G A. Development of a high-power 300 kJ neodymium laser [A]. *Solid-state Lasers for Application to ICF* [C], Oct 1996. 43~47
- [12] Grasz E, Silva D, McDaniel M, et al. Transport and handling [R]. UCRL - LR - 105821 - 97 - 3, USA: LLNL, 1997
- [13] Heller A. Target chamber's dedication marks a giant milestone [J]. *Science & Technology Review*, 1999, (Sept): 16~19

Status of High-power Solid-state Lasers and Engineering Science

Peng Hansheng¹, Zhang Xiaomin¹, Fan Dianyuan², Zhu Jianqiang²

(1. *Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China*; 2. *Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Shanghai 201800, China*)

[**Abstract**] High-power solid-state laser technology development has been conducted so far for more than thirty years for application to inertial confinement fusion. Over twenty laser facilities have been built with the output energy of about a hundred Joules at the beginning up to severa tens of thousands Joules later in USA, Japan, France, China, Bratain, Russia and so on. In recent years, a few powers have been working very hard to build huge facilities, such as the NIF in USA, the LMJ in France, the SG - III in China and the Iskra - 6 in Russia. Numerous advanced technologies have to be developed to support the construction of the facilities. However, the most challenging task is to study, from the point of view of engineering science, how to build such huge facilities featured with high cost, high technical risk, and a long time period, in a cost-effective manner.

[**Key words**] laser fusion; high-power solid-state laser; status; engineering science; innovation

21 世纪重有色金属冶金高新技术及新材料国际会议征文启事

为了进一步推进我国有色金属工业的发展,提高我国重有色金属冶金和新材料开发的技术水平,增加我国重有色金属企业的经济效益,中国有色金属学会决定于 2001 年 10 月在昆明召开“21 世纪重有色金属冶金高新技术及新材料国际会议”。会议将邀请世界各国的重有色金属行业的高层次专家、学者,企业经营管理人员,著名厂商到会进行交流及高新技术和新材料、新产品展示。会议由中国有色金属学会主办,重有色金属冶金学术委员会和昆明理工大学承办。会议论文用英文书写,其要求如下:

征稿内容

重有色金属冶金新工艺、新方法和新装备

先进材料及其工艺制备

重有色金属冶炼中的环保问题

高附加值产品及市场与营销

征稿规则

论文均用 Word 95, Word 97, Word 98e 和 word 2000 中任何一个版本软件打印;

每篇论文用 A4 纸打印,篇幅控制在 4 页以内(含图表和参考文献);

页面设置按 Word 软件的标准规格,上下页边距均为 2.54 cm,左右页边距均为 3.17 cm;

正文字体一律用 times new roman 形式,字号用 10 号和 11 号,标题用 14 号,请勿使用 9 号以下和 12 号以上字体,节和项的标题字号与正文相同,但需用黑体或加粗,;署名与地址用 10 号字体,字形用非 times new ronan 字体,图表可用 9、10、11、12 号字体,参考文献用 10 号字体;

提交论文时,请附 3.5 英寸磁盘。论文请用清晰的打印设备打印,希望于 2001 年 6 月 30 日以前寄到大会秘书处(邮编 650093,昆明一二·一大街文昌巷昆明理工大学材冶学院冶金系朱祖泽教授)。