

中国高功率固体激光技术发展中的两次突破

魏晓峰 郑万国 张小民[†]

(中国工程物理研究院激光聚变研究中心 绵阳 621900)

2017-06-02收到

[†] email: zhangxiaomin@caep.cn

DOI: 10.7693/wl20180202

Two breakthroughs in the development of high power solid-state laser technology in China

WEI Xiao-Feng ZHENG Wan-Guo ZHANG Xiao-Min[†]

(Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China)

摘要 高功率固体激光是激光聚变、高能量密度物理与前沿基础科学研究必需的实验手段。上世纪六七十年代,老一辈科学家王淦昌、王大珩、邓锡铭、于敏等人以敏锐的科学洞察力与超前的战略眼光,开创了我国激光聚变研究的宏伟工程,为我国高功率固体激光技术的长远发展注入了强劲的东风。中国工程物理研究院(简称中物院)作为激光聚变研究的总体单位,联合中国科学院等国内优势单位,在国家强有力的支持下,推动与组织了我国高功率固体激光技术与装置研制的快速发展。中物院激光聚变研究中心作为高功率固体激光技术研发的总体单位之一,敢于担当、勇于创新,团结协作,坚持三十余载,实现了我国高功率固体激光技术研发历程中的两次“突破”,即突破新一代高功率钕玻璃激光技术,相继研制成功了亚洲规模最大、技术先进的神光-III原型装置和神光-III激光装置;突破百太瓦超短超强激光关键技术,建成了国内首台输出能力高达200 TW的SILEX-I超短超强脉冲激光装置。两次“突破”,不但有力地支撑了我国激光聚变与相关基础科学研究的高速发展,同时实现了我国高功率固体激光技术发展由“望尘莫及”到“望其项背”的跨越,奠定了由“望其项背”到与美、法先进国家“三足鼎立”的坚实基础。

关键词 激光聚变, 高功率激光, 超短超强激光

Abstract High power solid-state lasers are vital for laser fusion, high energy density physics and frontier basic science research. In the 1960s and 1970s, the older generation of scientists Wang Ganchang, Wang Daheng, Deng Ximing, Yu Min and others, with keen insight and strategic vision, conceived a grand program for China's laser fusion research, which gave a tremendous boost to the country's long-term development of high power solid-state laser technology. With strong national support, the Chinese Academy of Engineering Physics (CAEP), as the flagship for laser fusion research, united with the Chinese Academy of Sciences and other leading institutions to promote and organize several major high power laser facilities in China. The Laser Fusion Research Center (LFRC) of CAEP, through courage, innovation, cooperation, and more than 30 years of persistence, has achieved two breakthroughs in high power solid-state laser technology for China. The first concerns the new generation of high power Nd:glass lasers, implemented in the successful development of the SG-III prototype and host laser facility, which is the largest in Asia. The other breakthrough is the realization of ultra-short ultra-intense pulsed laser light in the SILEX-I laser facility, the first domestic system capable of producing powers up to 200 TW. These two breakthroughs have bolstered the further development of China's laser fusion research, as well as bringing China's high power solid-state technology from a state of “catching up” to “closing in” compared with developed countries such as the USA or France.

Keywords laser fusion, high power laser, ultra-short ultra-intense laser

1 引言

1960年激光问世不久,前苏联巴索夫院士^[1]、美国Nuckolls^[2]与我国王淦昌教授^[3]等著名科学家,便敏锐地意识到能够在实验室内创造极高功率密度的激光,产生高温高压条件,诱发核聚变,并在各自所在国独立地推动了早期的激光聚变研究。今天,激光驱动惯性约束聚变(inertial confinement fusion, ICF)研究已成为重大前沿科技领域,是实验室内研究ICF和高能密度物理(high energy density science, HEDs)无可替代的主要技术途径,更是未来人类创造可持续发展能源的主要技术途径之一。

ICF实现聚变点火的基本物理特点为采用高功率密度的能源来加热燃烧靶丸,使其高度压缩实现燃料的自持燃烧,从而达到热核点火的条件,即所谓的“劳逊判据”^[4]。高功率激光作为ICF驱动条件具备精密可控的显著优势,但在实验室毫米空域、纳秒时域尺度内实现劳逊判据所要求的精确条件并非易事。首先,要求驱动激光脉冲有足够高的能量和功率,同时还要求具有高光束品质,包括激光波长、高光束质量、高的打靶精度、精准的脉冲波形和同步精度等^[5-7]。这些技术要求既为高功率激光技术研究和指明了方向,也对高功率固体激光装置研制提出了巨大的挑战。

上世纪70年代,中国工程物理研究院于敏教授便提出,激光惯性约束聚变是一项非常复杂的大科学工程,涉及理论、实验、诊断、制靶和激光驱动器等5个方面的研究内容和彼此之间的协调发展,即“五位一体”的发展思想^[8]。目前,ICF研究与巨型激光驱动器总体水平已经成为一个国家综合国力的反映,代表一个国家在聚变科学与高能密度科学研究领域的总体水平。

目前,高功率激光技术研究已走过了辉煌的发展历程,一代技术已成为历史,二代技术已成为发展主流,三代技术崭露头角,预示着高功率固体激光技术发展旺盛的生命力。

上世纪70年代起,美、中、英、法、日、俄

等国相继建造了多台纳秒脉冲宽度的钕玻璃激光装置,能量从百焦耳级至数十千焦耳级^[9-11]。进入90年代,各发达国家纷纷着手建造更大规模的装置,高功率激光技术发展跨入了新的历史时期。90年代中期,美国利弗莫尔实验室(LLNL)在全面发展新一代固体激光光学材料、单元技术和先进总体设计技术的基础上,率先启动总投资数十亿美元、为期十年的大科学工程,建造国家点火装置(NIF)^[12]。法国原子能委员会(CEA)随即开始建造与NIF类似规模的兆焦耳激光装置(LMJ)^[13],俄罗斯也计划于2017年底启动世界上最强大的激光系统UFL-2M^[14],将用于高能量密度物理和能源领域的研究。

超高超强短脉冲激光是高功率固体激光技术的另一个重要的方向。80年代中期发展起来的啁啾脉冲放大(CPA)技术是激光技术的新里程碑^[15],超强超短脉冲激光技术在聚变快点火和许多交叉前沿学科以及国防应用的牵引下迅速成为各科技强国关注的热点^[16, 17],多台皮秒和飞秒脉宽的拍瓦级超强激光装置已经建成或正在研制中,中物院实时开展了该技术路线下的超短超强脉冲激光装置的研制。

2 高功率固体激光装置的发展历程

时任中物院副院长的王淦昌教授于1964年提出了“利用大能量大功率激光射器产生中子的建议”^[3],得到中国科学院上海光学精密机械研究所(简称上海光机所)从事高功率激光技术研究的邓锡铭等科学家的积极响应,以及中国科学院领导张劲夫的支持,从而初步酝酿和逐步形成了这一具有深远影响的研究领域^[8]。自此,我国高功率激光技术有了明确的发展方向,上海光机所是最早的研究基地,在该所的大力支持下,中物院也逐步成为了一个高功率激光技术的研究基地。

中美两国均在上世纪60年代开始了应用于ICF的高功率激光驱动器的研究,如图1所示^[9],在1973年,两国都已研制成功可用于ICF技术研究的激光驱动器。不幸的是,国际上在激光技术

和等离子体物理诸方面不断取得创新成果和重大突破的10余年间，多方面的原因使我国的这项研究工作失去了重要发展期^[8]，美国在70年代后期建成了Argus装置，1978年建造了规模更大的Shiva装置，1982年开始建造更大功率的Nova装置^[18]，中国在80年代初才开始大型激光装置的预研工作。此时我国高功率激光技术已经落后了美国很多^[11]。

尽管发展过程中面临巨大困难，但在老一辈科学家的指引下，上海光机所和中物院两支研发团队精诚协作，先后为我国研制了多台固体激光装置，主要包含星光系列和神光系列激光装置。两类装置在ICF研究中定位不同，因而在国内形成了配套互补的ICF研究格局，促进了中国ICF研究的健康发展。星光系列激光装置主要用于基础实验，在开展分解实验和物理诊断设备考核标定的同时，发展了多项激光新技术的预先研究，如三倍频技术等；神光系列激光装置主要用于较综合的实验，以上海光机所为主建设的神光-I和神光-II装置对我国ICF的技术发展起到了重要的推动作用^[19-21]。

于1986年建成的神光-I装置^[19]，其规模和性能与美国的Argus装置相当，标志着我国基本上掌握了第一代高功率激光驱动器的关键技术，成为我国第一台服务于ICF基础实验研究的高功率激光装置。为更加有效地发挥该装置的作用和两个单位的优势，中物院与中科院在1986年决定建立“高功率激光物理联合实验室”。为此，中物院派驻科研人员到上海嘉定，成立了激光实验室，即现在的中物院上海激光等离子体研究所。中物院在该装置上开展了一系列物理实验，取得了可喜的成果，同时也锻炼和成长了我国从事激光聚变研究的队伍。1994年，神光-I激光装置退役。神光-I装置连续运行8年，在ICF和X射线激光等前沿领域取得了一系列有国际水平的物理成果。

2001年由中物院、中国科学院共同投资研制的神光-II激光装置^[19, 22]投入运行。该装置功率较之神光-I提高了约4倍，8束激光输出，具有三倍频打靶能力。神光-II激光装置自完成建造以后，开展了大量高水平、高能密度物理领域的分解物理实验研究，得到了一批具有高精度和重复性好的高水平物理实验结果。以神光-II激光装置建成为标志的实验条件改善，使ICF实验研究进入了一个新的时期，标志着我国在这方面的研究从以基础研究与能力发展为主要目标转变到以应用基础研究为主要目标，并牵引能力发展^[20, 21]。至今该装置仍然在极高能密度物理、能源和天体物理领域发挥着重要作用。

3 中国高功率固体激光技术研发历程中两次“突破”

中物院也先后研制了多台激光装置，如图2所示。以激光技术的特点区分，这些装置可分为以星光-I、星光-II、神光-III原型和神光-III激光装置为代表的高功率激光技术和以SILEX-I和星光-III激光装置为代表的超短超强激光技术，多台装置的研制实现了中国高功率固体激光技术研发历程中两次重要“突破”。



图1 国内外主要的高功率固体激光装置的发展历程



图2 中物院高功率固体激光装置研制的发展历程

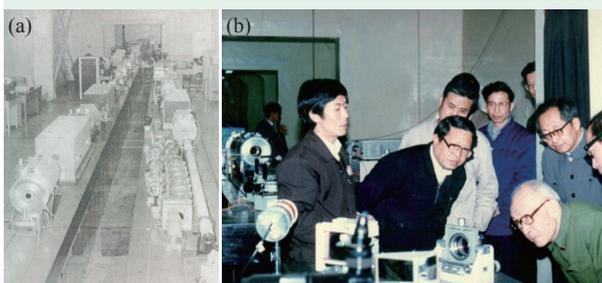


图3 星光-I激光装置 (a)星光-I激光装置激光大厅；(b)王淦昌教授视察星光-I激光装置

3.1 新一代高功率钕玻璃激光技术的突破

为进一步提升ICF基础实验研究效率,以及为高功率激光技术未来发展培养技术团队,在上海光机所的帮助下,中物院在八十年代后期研制成功规模稍小的星光系列装置。90年代中物院审时度势,实时启动了以多程放大为基本技术特征的新一代高功率激光装置(即神光-III激光装置)概念研究和先期关键技术预研。

3.1.1 星光-I激光装置

1977年底,王淦昌教授率领中物院有关领导和技术人员到上海光机所商谈合作事宜,初步拟定双方投资在上海光机所研制一台 10^{12} W(2×800 J)的激光装置LF-12(后称神光-I激光装置)。为了尽快开展物理实验研究和培养中物院自己的激光队伍,同时确定由上海光机所为中物院研制一台输出功率为 10^{11} W的单路激光装置LF-11(后称星光-I激光装置^[9, 23])。中物院于1983年派出数名技术人

员到上海光机所学习,形成了星光-I激光装置运行维护和改进提高的核心力量,诞生了中物院从事高功率激光技术工作的年轻科技队伍。

星光-I激光装置安装在位于深山的中物院核物理与化学研究所旧址,于1985年建成并验收。星光-I激光装置输出光束口径 $\Phi 70$ mm,最高输出能量70 J。王淦昌教授曾亲临星光-I激光装置实验室视察,见图3。

星光-I激光装置在物理需求的牵引下,完成了多项国内的首创工作,主要包含:

(1)为了满足间接驱动物理实验要求,研制了我国第一台腔靶小孔瞄准定位系统(1986年),解决了激光束精确引导和调焦的技术难题,实现了高精度、高效率激光束穿孔的目标,奠定了我国ICF间接驱动物理实验激光打靶的基础。

(2)为满足我国ICF物理实验发展要求,研制了国内第一台实用的高功率钕玻璃激光高效率大口径KDP晶体($\Phi 70$ mm)二倍频系统(1987年),二倍频效率达到70%,接近当时国际的先进水平,填补了国内大口径高效率二倍频应用的空白^[24]。大口径高效率谐波转换技术的突破,奠定了我国后续大型激光装置高效率谐波转换的基础。

(3)大纵横比激光线聚焦是实现激光泵浦的X射线激光出光的关键技术之一,为解决这一技术难题,设计了非球面组合线聚焦光学系统,实现了大纵横比线聚焦($30 \text{ mm} \times 50 \mu\text{m}$)(1988年),使我国成为继美国两个月后在国际上第二个实现激光泵浦X射线激光(108.9 nm)出光的国家,奠定了我国X射线激光实验线聚焦技术的基础。

(4)利用主激光束分光与空间光路延迟,采用受激布里渊散射技术产生零抖动同步精度的探针激光,在国内首次获得了不同时刻黑腔靶解体过程的图像(1987年),初步验证了黑腔靶实验的科学可行性,见图4。

3.1.2 星光-II激光装置

90年代初,中物院迁址绵阳。同时,根据ICF物理实验的新要求,于1995年将星光-I激光装置升级为星光-II激光装置^[9]。由于星光-II激光装置需具备用于ICF、X射线激光(XRL)和原子参

数等基础实验与分解实验,以及高功率激光技术研究的能力,因此在设计、研制星光-II激光装置的过程中,并没有单纯地追求装置的激光能量指标,而是以提高装置的综合性能指标和运行效率为目的。同时以国内成熟的激光单元技术为基础,采用部分先进技术,在保证装置可靠、稳定运行的前提下追求装置的先进性。星光-II激光装置主要技术特点包含:

(1)装置采用主动锁模-调Q技术、负反馈控制单纵模技术,在亚纳秒—纳秒范围内实现了装置输出脉冲宽度的分段可调。

(2)采用偏振失配(Type II/Type II)三倍频方案和倍频、混频晶体封装于同一倍频盒内的结构,实现了二、三倍频激光的高效转换,三倍频的最大外转换效率为65%,三倍频技术水平达到了国际先进水平^[25];并成功解决了三波长分离、靶瞄准和定位等技术问题,在国内首次完成了三倍频激光打靶物理实验。

(3)靶场采用双靶室结构,有效地提高了全装置的运行效率。其中1号靶室建立了新的靶瞄准定位系统,实现了用一种准直光源对不同波长激光打靶的瞄准定位,打靶精度达到 $\pm 25\ \mu\text{m}$ 。

星光-II激光装置主要技术指标为:末级输出口径 $\Phi 180\ \text{mm}$,装置可输出三种波长,即 $1.053\ \mu\text{m}$ (基频)、 $0.527\ \mu\text{m}$ (二倍频)和 $0.351\ \mu\text{m}$ (三倍频),脉冲宽度 $0.2\text{--}0.9\ \text{ns}$ 和 $1.5\text{--}5\ \text{ns}$,最高输出能量 $260\ \text{J}/1.053\ \mu\text{m}$ 和 $130\ \text{J}/0.351\ \mu\text{m}$,光束可聚焦到7—10倍衍射极限。它是当时我国唯一一台适于激光聚变等离子体实验研究的高功率紫外光(激光波长为 $0.351\ \mu\text{m}$)激光装置。图5为星光-II激光装置的总体概貌示意图。

星光-II激光装置在国内首次进行了三倍频激光与平面靶、黑腔靶相互作用实验,获得了靶吸收效率、X光转换效率和源区干净性的实验数据^[26];在国内第一次完成了单线类氪钛X射线激光增益实验和类氪锌出光实验^[27],开辟了中小型

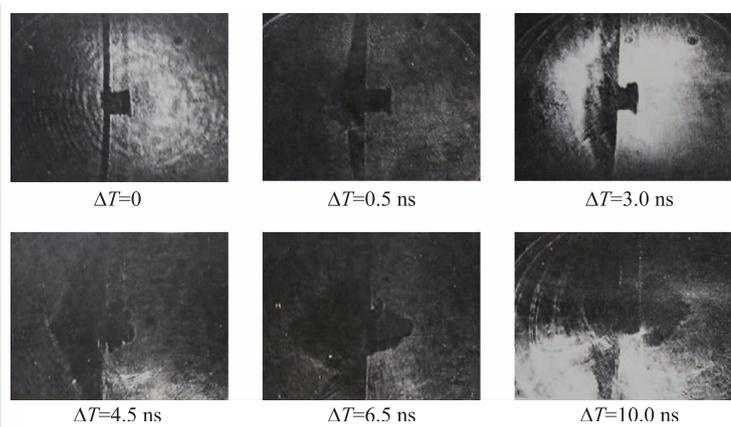


图4 不同时刻柱形靶的解体照片(ΔT 为主激光脉冲和探针光脉冲的延迟时间)



图5 星光-II激光装置的总体概貌示意图

高功率固体激光装置开展X射线激光实验研究的先例。

3.1.3 神光-II原型装置

上世纪九十年代初,国家批准激光驱动惯性约束聚变(ICF)成为国家高技术发展计划的有机组成部分,ICF研究正式上升到国家层面,得到稳定长期的国家支持,中国ICF进入了快速发展的阶段。同时,美法两国为了尽快实现实验室内聚变点火这一人类梦寐以求的科学目标,以及积极应对禁核试验后核武器物理研究的困难局面,加快了巨型激光装置的研发步伐。

中物院作为ICF高技术发展计划的依托单位,及时启动了神光-III激光装置的概念研究和先期关键技术研究,神光-III原型装置研制工作随之展开。先后发展了一系列新一代单元关键技术,研制出了大尺寸高性能的钼玻璃、脉冲氙灯、KDP晶体等高功率光学元(器)件,特别是大口径精密光学加工、镀膜、洁净控制、检测、装校技术和工程能力等有了大幅度提高。

神光-III原型装置工程研制于2000年正式启

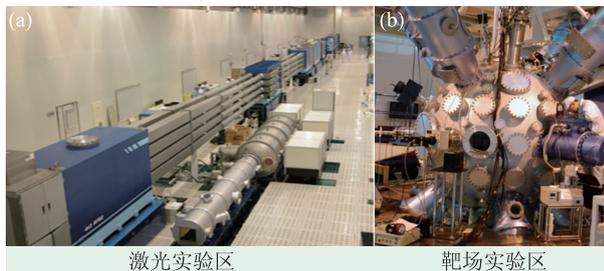


图6 神光-III原型装置总体概貌示意图

动。中物院激光聚变研究中心作为工程实施责任主体，边设计，边攻关，边实施，联合全国优势单位，于2003年实现了首束出光，2005年首束达标，2007年全面建成并通过国家验收，实现了中国新一代高功率激光装置研发的突破^[9, 28]。神光-III原型装置总体概貌如图6所示。

神光-III原型装置采用“四程放大”以及“方形光束、组合口径、阵列结构”为主要特征的总体技术路线，并根据我国具体情况有所发展和创新，总体设计融合了相关领域或行业的先进技术和成功经验，实现了从一代技术到二代技术的跨越。其主要性能参数为8束口径为29 cm×29 cm激光，三倍频波长和脉宽为1 ns—3 ns脉宽时，每束可输出能量1.2 kJ—1.8 kJ^[29]。

神光-III原型装置研制过程中，独立自主地解决了一系列科学技术问题，创造了多个国内“首次”，主要表现在以下几个方面：

(1)采用非对称变口径光束传输、光束角旋转隔离和光束旋转补偿等关键技术，通过系统优化组合，研制成功具有一定特色和较好增益特性的四程放大系统^[30]，使我国成为国际上少数几个系统掌握多程放大技术的国家。

(2)采用理论与基准实验相结合的研究方法，较好地解决了多程放大系统的关键理论问题，准确地给出了系统设计的关键判据——B积分判据^[31]。

(3)采用“连续相位板整形与光谱色散匀滑”的技术路线，实现了靶面光强的精密控制，装置束匀滑输出性能达到了国际先进水平^[32]。

(4)采用“单脉冲与并联驱动”技术，研制成功高性能、多单元的等离子体电极电光开关系统，使我国成为世界上第二个掌握这一核心技术

的国家^[33]。

(5)基于“高速电子学实现脉冲时间整形技术”研制成功的全固化、全光纤前端系统，为装置提供了稳定可靠的激光种子光源，同时解决了甚多束激光柔性分光，精密同步以及光路灵活布局等难题，使我国成为世界上第二个系统掌握这一关键技术的国家^[34]。

(6)在国际上首次成功地采用基于“液晶光阀调制原理的光束空间整形”技术，实现了装置输出光束近场分布的主动控制^[35]。

(7)采用“预电离+电容接地”技术路线，研制成功了电磁兼容性好、储能密度较高、自动控制程度高的新型模块化能源组件，组件总体技术水平和性能接近国际先进水平^[36]。

(8)研制成功集高效率三次谐波转换、高精密聚焦、高精度衍射取样测量等多功能为一体的终端光学组件，为进一步提高装置总体负载能力提供了极为宝贵的经验^[37]。

(9)在国内首次采用“多光束时空编码并行引导+靶面共轭式直接诊断”技术，实现了靶场系统多束激光快速精确引导和基准物理实验靶的精密定位^[38]。

(10)在国内首次实现了高功率激光驱动器全装置、全流程的集中指挥控制和管理^[39]。

(11)实现了300 mm方形口径KDP晶体材料的生产、加工、镀膜等全流程工艺，300 mm方形口径KDP晶体基本满足了原型装置电光开关与终端光学组件等关键单元工程研制的基本要求，其主要性能指标接近国际先进水平^[40, 41]。

(12)在国内首次研制成功了以“成像曝光+离子刻蚀”为主工艺的300 mm方形口径光束取样元件(BSG)，实现了高能量三倍频激光脉冲能量测量的精密取样^[42]。

作为我国ICF研究“十一五”和“十二五”期间的主力驱动器，神光-III原型装置开展了一系列物理实验。截止到2015年底，神光-III原型装置已经累计提供了有效打靶发次2000多发，打靶成功率超过90%；各类基于高功率固体激光装置开展的物理实验取得了长足的进展^[20, 21, 43, 44]。

神光-III原型装置研制成功,集中体现了我国十几年来在高功率激光驱动器方面的研究成果,达到了装置研制的科学和任务目标,使我国具备了从事高能量密度科学等领域基础研究的平台和必要的技术手段,并推动了物理诊断和制靶技术的发展。同时实现了我国高功率激光驱动器科学技术与工程研究由“跟踪模仿”到“局部创新”的转变,实现了我国高功率激光驱动器总体建设水平“升级换代、迈上台阶”的跨越。另外,装置的建设也促进了我国高功率激光驱动器研制体系的建设,培养和锻炼了科学技术研究、工程实施和管理方面的队伍,形成新一代高功率激光驱动器的综合设计、建造能力。

3.1.4 神光-III激光装置

神光-III激光装置是开展聚变点火前重要物理过程研究的重要设施,可为更大规模驱动器研制奠定基础,重点解决更大能量激光驱动器建设的工程化、规模化问题^[45]。

神光-III激光装置实验室于2007年2月4日在中物院激光聚变研究中心破土奠基。神光-III激光装置通光口径增大到40 cm×40 cm,由48束激光组成,脉宽3—5 ns,三倍频波长,可以输出约180 kJ的能量。这是国际上继美国NIF、法国LMJ装置之后在建的第三大激光装置,也是我国有史以来最大的光学工程。

神光-III激光装置于2011年底实现了首束组出光,2013年出光束数达到了32束,装置进入了边集成、边提供物理实验的阶段。2015年9月,神光-III激光装置建成,装置首次实现了48束180 kJ/3 ns、峰值功率60 TW的测试输出,装置由此正式全面投入使用,具备全束组打靶能力^[46]。该装置规模和输出能力是目前世界第二、亚洲第一,性能指标先进的高功率固体激光装置,是中国光学工程领域发展历程中的标志性设施。神光-III装置总体概貌如图7所示。

2013—2015年,神光-III激光装置圆满完成了数轮物理实验,共计打靶465发。各类综合性的实验方面已取得了重要进展^[47]。装置目前已形成日均打靶2发的运行能力,并随着装置整体磨

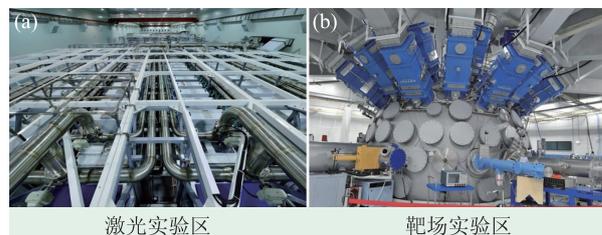


图7 神光-III激光装置总体概貌示意图

合不断深入,运行效率已呈快速上升之势。

神光-III激光装置成功运行不但大幅提升了我国高能量密度物理的研究能力,也集中体现了我国高功率固体激光技术与工程的“五大进步”:

(1)系统掌握了以“三大物理基础(泵浦与放大动力学、传输动力学和损伤动力学)、三个设计阶段(可行性研究、初步设计和工程设计)、四大设计基线(输出能力、光束质量、精密调控和三性管控)、六类设计要素(光、机、电、控、测、装)”为主要特征的巨型高功率固体激光装置的总体设计方法与技术,实现了总体设计与验证的系统化、规范化。

(2)系统掌握了以“三大阶段(加工制造、安装集成和联机调试)、三类基线(安装精度线、环境洁净线和集成效率线)、三性验证(工程设计符合性、加工制造匹配性和工程实施保障性)、三类评估(集成评估、性能评估、运行评估)”为主要特征的巨型高功率固体激光装置的总体集成方法与技术,基本实现了批量安装集成的流程化、规范化。

(3)采用成组技术实现了巨型高功率固体激光装置基本结构的“元件标准化、单元模块化、系统阵列化、装置一体化”,构建了涵盖总体、系统、组(部件)、单元/模块、光学元(器)件五个层次的“模块化”结构框架和性能指标体系。

(4)系统掌握了巨型高功率固体激光装置三大主体结构(激光大厅束组、靶区编组站和真空靶室)的设计、验证、制造、安装和调试等关键技术与工艺,以直径6 m的真空靶室为代表,实现了洁净控制和“高塔”式稳定支撑结构。

(5)突破或掌握一批关键技术(高精度“种子光源”、高品质激光束的预放大、精密同步、辐射定

标损伤检测、全光路精密波前校正、甚多束光路自动准直、自动化靶瞄准定位、计算机集中控制、高效谐波转换、靶面光强精密控制、“一摞准”精密安装、超精密光学加工等), 并成功应用于神光-III激光装置, 功能基本实现, 性能显著提高。

神光-III激光装置的研制, 凝集了我国在激光技术、光学工程、脉冲功率、精密机械、快电子学、自动控制、化学清洗、先进光学制造等多个学科领域的顶尖技术成就, 标志着我国在巨型激光驱动器方面的总体设计、总体集成、关键技术、加工制造、光学检测、洁净清洗、精密装校、支撑保障等核心能力方面实现了体系化发展, 面向更大规模的ICF激光驱动器研制的光学工程体系已基本形成。在未来相当长的一段时间内, 神光-III激光装置将成为我国ICF物理实验研究的核心平台。

3.2 超强超短脉冲激光技术的突破

自激光发明以来, 高峰值功率就是高功率激光技术发展追求的科学目标之一。上世纪八十年代中后期, 啁啾脉冲放大(CPA)技术的发明促进了超强超短脉冲激光技术跨越式发展。

高功率超短脉冲激光技术发展从技术特点



图8 SILEX-I钛宝石激光装置

和应用背景上看, 出现了两条技术途径, 即以钽玻璃做放大介质的皮秒大能量型和以钛宝石做放大介质的飞秒高功率型, 能够输出数百太瓦至拍瓦的激光脉冲, 聚焦功率密度达到 10^{21} — 10^{22} W/cm², 可在实验室中产生类似星体内部和爆炸时的极端物态条件, 为诸多前沿学科、国防科研、国计民生一些重要领域提供前所未有的研究平台和技术手段。国际上各发达国家在近10年来纷纷投入力量, 相继建造了多台超强超短脉冲激光装置^[48-53]。为了提高科研创新能力和核心竞争能力, 中物院也适时开展了超短超强激光技术的研究。

3.2.1 SILEX-I激光装置

中物院激光聚变研究中心经过3年的努力, 于2004年初建成了我国第一台300 TW/30 fs钛宝石激光装置SILEX-I^[54, 55], 其综合技术指标和性能达到当时的国际领先水平。建成后一直为高能量密度物理研究提供运行打靶, 是当时世界上为数不多能够稳定运行的飞秒激光装置, 吸引了数十位国内外同行前来合作开展实验研究, 取得了多项具有较高学术价值的研究成果。SILEX-I激光装置如图8所示。

3.2.2 星光-III激光装置

在突破百焦耳级高能皮秒激光总体及关键技术, 并完成综合验证的基础上, 基于星光-II装置和SILEX-I装置的基础, 开展了星光装置的升级^[56]。即基于SILEX-I超短脉冲激光装置获得拍瓦级飞秒激光束, 基于 2×1 组合口径多程放大集成实验平台获得拍瓦级皮秒激光束和千焦级纳秒激光束。2013年, 采用独创的“零抖动”技术, 建成了国际上首台“零抖动”同步输出纳秒、皮秒和飞秒三种脉冲宽度, 527 nm、1053 nm和800 nm三种波长激光, 且具备多组合、多角度灵活打靶能力的多功能强辐射源激光装置——星光-III激光装置^[57]。星光-III激光装置的总体概貌如图9所示。

星光-III激光装置同时输出的三束激光可互为驱动源和探针光, 具备相互正交及多角度、多组合打靶的特点。中物院在装置建设过程中突破并解决了多项技术难题, 在短脉冲焦斑控制技术

术、光栅拼接压缩技术等方面达到国际先进水平^[58-60]，聚焦功率密度等关键技术指标与国际在役装置相当。

星光-III激光装置现已投入高能密度物理实验运行，并将向国内外开放。目前星光-III激光装置已经为20余类物理实验研究提了数百发次运行，获得了

1.45 GeV单能电子束输出，激光质子加速能量达到了20 MeV并用于质子照相，激光中子源实现了 5×10^8 单发输出等等。这些处于国内领先、国际先进水平的研究成果，有力地支撑了相关高能密度物理研究。该装置的建设完成显著提升了我国在超高功率超短脉冲激光技术研究领域的水平与地位，并将为世界高能密度物理研究创造良好的实验平台。

4 高功率固体激光技术的发展趋势

纵观高功率固体激光装置研制与发展数十年以来的成果与未来需求的牵引，一代高功率固体激光技术已成为历史；二代高功率激光技术欣欣向荣，成为主流技术途径；三代高功率激光技术已崭露头角，显示出强大的生命力。

(1)第一代高功率固体激光技术：以ICF基础研究为主要牵引目标，激光装置最基本的技术特征是采用“主振荡器+功率放大”(MOPA)技术路线，具有圆光束、单口径和分离式等基本特征，能量转换效率较低。第一代技术以美国LLNL于1984年建成的Nova装置为代表。

(2)第二代高功率固体激光技术：以实现实验室条件下的激光聚变点火为主要牵引目标，激光装置输出能量达到数百万焦耳、功率达到数百太瓦，其主要技术特征是在第一代MOPA的基础上采用大口径方形光束、多程放大技术和集成阵列结构，二代装置具有较高的能量转换效率和性价比。第二代技术以美国LLNL的NIF为代表。

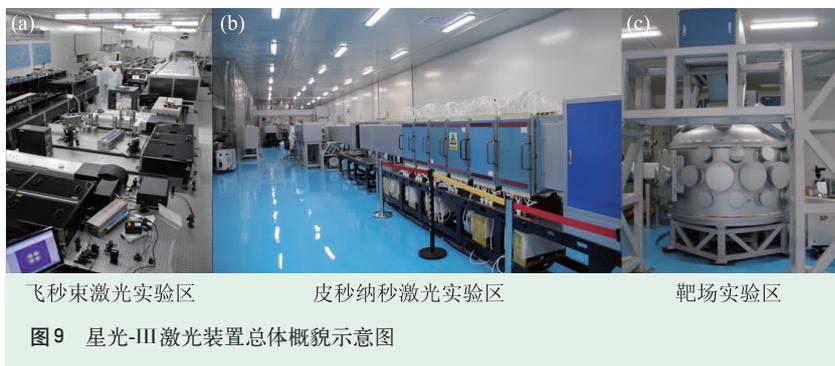


图9 星光-III激光装置总体概貌示意图

(3)第三代高功率固体激光技术：重点针对“点火后”的需求，代表着更长远的高功率固体激光装置的发展方向，主要包含高能密度科学(HEDs)研究和激光聚变能源(LIFE)开发。面向HEDs的激光装置是基于啁啾脉冲放大技术或参量放大技术，将激光脉冲峰值功率由目前数百拍瓦量级推向艾瓦量级(10^{18} W)。面向LIFE的激光装置要实现高效率(装置总体能量转换效率由目前不到1%提升到10%以上)、高重频(发射周期由目前的数小时提升至亚秒量级)、高光束质量(发展若干新技术实现光束空域、时域、频域、偏振的全面控制)和高可靠性。

5 结束语

数十年来，中物院的激光聚变研究取得了令人欣慰的长足进步，在国际上已占有重要地位。中物院高功率固体激光技术与装置的研发队伍成为我国百万焦耳级激光装置的中坚力量，实现与国际先进水平“并驾齐驱”的能力，同时带动了国内高功率激光材料、光学加工、脉冲功率技术和精密机械加工等产业的发展。

今天，中物院迎来了激光聚变事业发展新的历史机遇，ICF研究已形成美、中、欧三足鼎立之势，成为显示我国综合国力和核心竞争力的重要标志之一。

以史为鉴，既要向前看，也要学习总结过去，即在ICF和HEDs需求牵引下，充分吸取以往装置研制的成功经验和教训，以现役装置为载体，通过继承、创新，不断考核与验证装置输出

能力、光束质量、控制能力和装置“三性”(可靠性、可用性和维护性),同时提升巨型激光装置安装集成精度和效率,夯实我国百万焦耳级激光装置技术与工程基础。

致谢 在文章编写和修改中,中物院激光聚变研究中心相关科研人员提出了许多中肯建议,并给予了协助,他们是李明中、景峰、隋展、袁晓东、朱启华、李平、王文义、李富全、粟敬钦、胡东霞等,在此一并致谢。

参考文献

- [1] Basov N G, Krohkin O H. The conditions of plasma heating by optical generation of radiation. In: Proceeding of the 3rd International Congress on Quantum Electronics, Paris, 1963. New York: Columbia University Press, 1964. 1373
- [2] Nuckolls J H, Wood L, Thiessen A *et al.* Nature, 1972, 239: 139
- [3] 王淦昌. 中国激光, 1987, 14(11): 641
- [4] 马腾才. 等离子体物理原理. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1988
- [5] Lindl J D, Amendt P, Berger R L *et al.* Plasmas, 2004, 11: 339
- [6] Lindl J D. Phys. Plasmas, 1995, 2: 3933
- [7] 张杰. 物理, 1999, 28(3): 142
- [8] 胡仁宇. 物理, 2007, 35(9): 346
- [9] 范滇元, 张小民. 物理, 2010, 39(9): 589
- [10] 范滇元, 贺贤土. 大自然探索, 1999, 18(1): 31
- [11] 陈崇斌, 王乐天. 物理, 2010, 39(7): 495
- [12] Moses E *et al.* Science and Technology, 2003, 43: 420
- [13] Andre M L. Fusion Engineering and Design, 1999, 44: 43
- [14] Belkov S A. Numerical Modeling of the Optical System of UFL-2M Laser Facility, 16th International Conference Laser Optics. 2014
- [15] Strickland D, Mourou G. Opt. Commun., 1985, 56: 219
- [16] 李玉同. 激光与光电子学进展, 2010, 47: 093202
- [17] 李儒新, 冷雨欣, 徐至展. 物理, 2015, 44(8): 509
- [18] Moses E I, Lindl J D, Spaeth M L *et al.* Fusion Science and Technology, 2016, 69: 1
- [19] 林尊琪. 中国激光, 2010, 37(9): 2202
- [20] 江少恩, 丁永坤, 缪文勇 等. 中国科学, 2009, 39(11): 1571
- [21] 江少恩, 丁永坤, 刘慎业 等. 物理, 2010, 39(8): 531
- [22] 朱健强. 自然杂志, 2006, (5): 271
- [23] 魏晓峰, 张小民, 叶金祥. 中国激光, 1989, (11): 675
- [24] 魏晓峰, 张小民, 袁晓东 等. 强激光与粒子束, 1991, 3(1): 85
- [25] 郑万国, 魏晓峰, 张小民 等. 强激光与粒子束, 1995, 7(3): 417
- [26] Zhang J, Gu Y Q, Li J *et al.* IEEE Journal of Selected Topic in Quantum Electronic, 1999, 5(6): 1469
- [27] 谷渝秋, 黄文忠, 尤永禄 等. 第六届全国激光科学技术青年学术交流会, 2001-10, 中国贵阳, 55-58
- [28] 彭翰生, 张小民, 范滇元 等. 中国工程科学, 2001, 3(3): 1
- [29] Zheng W G, Zhang X M, Wei X F *et al.* J. Phys. IV France, 2006, 133: 607
- [30] Jing F, Zhang X M, Zhu Q H *et al.* Proc. of SPIE, 1999, 3683: 164
- [31] 景峰, 张小民, 朱启华 等. 强激光与粒子束, 2000 12(5): 551
- [32] 张锐, 李平, 粟敬钦 等. 物理学报, 2012, 61(5): 054204
- [33] Zhou X J, Guo W Q, Zhang X J *et al.* Optics Express, 2004, 14(7): 2880
- [34] 林宏奂, 王建军, 隋展 等. 物理学报, 2008, 57(3): 1771
- [35] 陈怀新, 隋展, 陈祯培 等. 光学学报, 2001, 21(9): 1108
- [36] 力一崢, 周丕璋, 薛锡刚 等. 强激光与粒子束, 2000, 12(2): 178
- [37] 李富全, 韩伟, 王芳 等. 激光与光电子学进展, 2013, 50: 060002
- [38] 刘国栋, 浦昭邦, 张琢. 光学技术, 2004, 30(2): 232
- [39] 姚导箭, 刘金, 骠仲平等. 网络与信息技术, 2007, 26(4): 58
- [40] 王圣来, 丁建旭. 人工晶体学报, 2012, 41(8): 179
- [41] 许乔, 王健, 马平等. 强激光与粒子束, 2013, 25(12): 3098
- [42] Liu Q, Wu J H, Li C M. Design of Beam Sampling Grating and Study on Its Diffraction Action. In: Proc. of SPIE, 2005, 6027, 60273C
- [43] 杨冬, 李三伟, 李志超 等. 强激光与粒子束, 2015, 27(3): 032014
- [44] 蒲昱东, 康润国, 黄天暄 等. 物理学报, 2014, 63(12): 125211
- [45] Zheng W G, Zhang X M, Wei X F *et al.* Status of the SG-III Solid-state Laser Facility, The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007), In: Journal of Physics: Conference Series, 2008, 112: 032009
- [46] 郑万国, 魏晓峰, 朱启华 等. 强激光与粒子束, 2016, 28(1): 019901
- [47] 余波, 黄天暄, 李三伟 等. 强激光与粒子束, 2015, 27(9): 092008
- [48] Yanovsky V, Chvykov V, Kalinchenko G *et al.* Opt. Express, 2008, 16(3): 2109
- [49] Kiriya H, Mori M, Nakai Y *et al.* Opt. Commun., 2009, 282: 625
- [50] Hopps N, Danson C, Duffield S *et al.* Appl. Opt., 2013, 52(15): 3597
- [51] Crane J K, Tietbohl G, Arnold P *et al.* J. Phys.: Conference Series, 2010, 244: 032003
- [52] Hernandez G C, Blake S P, Chekhlov O *et al.* J. Phys.: Conference Series, 2010, 244: 032006

- [53] Maywar D N, Kelly J H, Waxer L J *et al.* J. Phys.: Conference Series, 2008, 112:032007
- [54] Peng H S, Huang X J, Zhu Q H *et al.* Laser Physics, 2006, 16 (2):244
- [55] Wei X F, Huang X J, Peng H S *et al.* SILEX-I 330-TW, 30-fs Ti: Sapphire Laser System. In: The fifth International Conference on Inertial Fusion Sciences and Applications (IFSA2007), 2008, 1-4
- [56] Zhu Q H, Huang X J, Wang X *et al.*, Design and construction of a PW Ultrashort Laser Facility With ns, ps and fs Outputting Pulses. 2007 International Conference on Lasers, Applications, and Technologies, 2007. In: Proc. of SPIE 2007, 6735:673500
- [57] Su J Q, Zhu Q H, Xie N *et al.* Progress on the XG-III high-intensity laser facility with three synchronized beams. In: 2014 International Symposium on High-Power Laser Systems and Applications. Proc. of SPIE, 2014, 9255:925511
- [58] Xie N, Huang W Q, Wang X D *et al.* Optik, 2012, 123:565
- [59] Zuo Y L, Wei X F, Wang X *et al.* Opt. Lett., 2007, 32(3):280
- [60] Li Z L, Wang X, Mu J *et al.* Laser Physics, 2015, 25(1): 1

大数据时代信息的高效获取与分析 ——评《稀疏感知导论》

新世纪大数据时代开创了科学研究的新范式——数据密集型科学发现，信息科学遇到了前所未有的挑战和发展机遇。如何才能高效地获取大数据中的信息？这亟需突破经典信号信息理论的桎梏，发展信息表征、获取及复原的新理论与新方法。“稀疏感知”为解决这些问题提供了一个途径，推动了信息科学及其工程应用的发展。

《稀疏感知导论》一书较全面系统地介绍了大数据信息获取与分析的新理论和新方法，为读者学习、并进一步应用和研究提供引导。稀疏感知理论涉及大量基础数学、概

率统计、最优化等学科的理论和方法，对于一些读者，推导、明瞭其中所有的数学问题及其结论不是件容易的事。在这本著作里，李廉林博士和李芳博士从实际应用的角度深入浅出地介绍了稀疏感知的理论和方法，并给出一些必要的数学推理与分析。目前介绍大数据处理的教科书和著作大多缺乏数学原理的阐述，《稀疏感知导论》正好填补这方面的空白，让读者在从事大数据分析时“知其然亦知其所以然”，从而可以在应用中有新的开拓。

这本书集中讨论了稀疏感知领域的两个重要问题：(1)如何有效地获取数据；(2)如何有效地复原信息，从理论和方法两个方面展开研究，重点关注与实际应用问题密切相关的理论要点问题和算法核心技术，这些内容是作者十余年来研究工作的积累。同时作者还参考了国外的有关教材、专著，介绍近年一些新的研究成果。本书对相关领域研究者有重要参考价值，尤其对初入该领域的研究生，可以帮助他们

以比较容易理解的方式进入，并消化、吸收、应用这项新的信息感知的理论和技术。

我赞赏此书，首先是内容编排循序渐进，易于读者理解、掌握。同时，不失科学的严格性，注重在基础理论和算法技术两方面引导读者打下扎实的基础。另外，此书基于讲义，在各章节的讲述中穿插有思考与练习，令人读时感到亲切，有助于对问题的深入理解。

此外，本书从“李政道图书馆”得到授权使用诺贝尔物理奖获得者、著名物理学家李政道先生与吴冠中大师合作，名为《流光》的抽象画作为书的封面图。该画关于“复杂性”与“简单性”的深刻内涵与本书理义相通。大师们的深邃思想和高超艺术也使书香增色。

祝贺新书在科学出版社出版。本人初读之后有所裨益，同时也因信息科学近年的新进展深受鼓舞。我相信，在大数据时代，稀疏感知将会给有志在科学和工程领域发展、创新的朋友带来新的机会。

刘盛纲 (电子科技大学)

