

文章编号: 1001-3806(2014)04-0494-10

欧洲大型激光项目 HiPER 的现状分析

程 功¹, 李志民², 黄桂学³(1. 中国工程物理研究院 科技信息中心, 绵阳 621900; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 绵阳 621900;
3. 国家高技术研究发展计划 804 办公室, 北京 100088)

摘要: 高功率激光能源研究 (HiPER) 项目由英国科研委员中心实验室理事会组织发起, 是欧盟致力于以高能量激光驱动惯性约束聚变为基础, 发展清洁聚变能源技术为目标的大型研究项目。其设计意图是发展激光驱动的惯性聚变技术, 使欧洲在惯性聚变能的研究领域占据领先地位, 同时借助 HiPER 激光装置所提供的极端实验条件, 使其在极端物态科学研究领域具备其它国家没有的能力。目前它已由初期的泛欧项目发展成为一个全球聚变能科研合作的典范, 其中有许多值得借鉴之处。作者从 HiPER 的研制背景、项目规划与管理、技术进展、对外合作等诸多方面进行了系统梳理, 力图全面地反映出 HiPER 项目的整体进展情况。最后对 HiPER 项目进行了总结, 这对从事激光装置及聚变能开发的科研人员可起到参考和借鉴作用。

关键词: 激光技术; 高功率激光能源研究; 研究背景; 项目规划; 设计现状; 国际合作

中图分类号: TN24

文献标志码: A

doi: 10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2014.04.013

Situation analysis of European large-scale laser project HiPER

CHENG Gong¹, LI Zhimin², HUANG Guixue³

(1. Science & Technology Information Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 2. Laser Fusion Research Center, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China; 3. Office 804, National High Technology Research and Development Program, Beijing 100088, China)

Abstract: The high power laser energy research (HiPER) project is initiated by the Council for the Central Laboratory of the Research Councils in United Kingdom and dedicated to the development of carbon-free thermonuclear energy source on base of high power laser driven inertial confinement fusion. The design purpose of HiPER is not only to develop laser-driven inertial confinement fusion technology and make Europe a leading position in the research field of inertial fusion energy, but also to achieve an internationally unique capability in the field of extreme physical state scientific research by means of the extreme experimental conditions provided by HiPER laser device. HiPER, starting from a Pan-European project, has now been becoming an example of global fusion energy research cooperation, which offers us many references. An overall description of current HiPER development status in various aspects such as research background, project planning & management, technical progress, external cooperation is presented. A conclusion is made in the end with expectation for providing useful information to the researchers in large laser facilities and fusion energy development.

Key words: laser technique; high power laser energy research (HiPER); research background; project planning; design status; international cooperation

引言

高功率激光能源研究 (high power laser energy research, HiPER) 项目由英国科研委员中心实验室

理事会 (Council for the Central Laboratory of the Research Councils, CCLRC) 组织发起, 是欧盟致力于以高能量激光驱动惯性约束聚变 (inertial confinement fusion, ICF) 为基础的, 发展清洁聚变能源技术为目标的大型研究项目^[1]。HiPER 项目将以 HiPER 大型激光装置的系统设计、工程建设和科学实验为研究重点, 通过整合欧洲现有的资源和技术, 集中力量在科学基础和技术创新上取得研究突破, 从而满足整个激光装置设计、建造和运行中面临的所有技术

作者简介: 程 功 (1974-), 男, 工程师, 主要从事激光装置及相关技术的研究。

E-mail: chenggong_email@163.com

收稿日期: 2013-08-17; 收到修改稿日期: 2013-09-10

需求,逐步实现从激光聚变原理的科学验证到建立演示聚变电厂的转变;同时,在整个项目的实施过程中,不断地带动相关研究领域和技术产业的进步,使欧洲在惯性聚变能(inertial fusion energy, IFE)领域占据领先地位,并在极端环境下的基础物理研究中具备其它国家没有的科研能力^[2]。HiPER 是除美国国家点火装置(national ignition facility, NIF)、法国兆焦耳激光器(laser mégajoule, LMJ)之外又一个致力于激光聚变能源研究的点火级大型科学装置,它的设计和建造将借鉴 NIF, LMJ 的经验和教训,并采用更先进的技术路线和更广泛的国际合作。毫无疑问,HiPER 项目是一个非常好的聚变科学研究与工程开发实例,跟踪和剖析它的项目规划、项目管理、科研模式、技术路线等方面内容,对于我国的大型激光聚变装置及聚变技术发展的战略规划、管理决策、技术方案选优等方面均有较强的参考与借鉴作用,因此,有必要对其进行充分地跟踪整理与分析消化,并为我所用。

1 HiPER 项目简介

HiPER 项目的核心任务是建造一台高重复率、聚变反应堆类型的大型激光装置(如图 1 所示),并使其最终成为一个灵活、反应迅速、能够适应多种科学研究的设施,最大限度满足聚变能研究与技术开发,以及诸如极端条件物理、实验室天体物理、核物理、强场物理等基础科学研究的需求^[2]。HiPER 激光装置主要由高功率激光驱动器、聚变靶室、靶丸注入与跟踪系统、集成计算机控制系统、电厂等几部分构成。

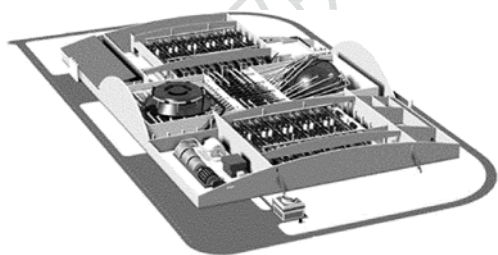


图 1 HiPER 装置假想图

在 HiPER 的概念设计中,激光驱动器拟采用二极管抽运固体激光技术,单个子束输出功率达到千焦级,工作频率约为 10Hz。聚变反应室是激光烧蚀燃料靶丸引发聚变反应的区域,它能在高能量辐射环境下持续可靠地运行,并通过增殖包层进行热能收集和氦提取。HiPER 拥有 2 个以上的靶室,用于聚变能源开发和基础物理研究等不同学科领域的研

究。靶丸注入与跟踪系统负责向反应室的中心高速发射靶丸,并精确跟踪靶丸飞行轨迹和预测靶丸位置,以确保激光束在恰当时刻准确地汇聚在燃料靶丸上。集成计算机控制系统能执行控制员的指令,监视和记录系统各部分的运行状态,控制整个系统安全有序地运行。电厂将聚变产生的热能转换为电能向电网输出。HiPER 的设计将重点关注全球范围内两处同等规模的大型激光系统——美国 NIF 和法国 LMJ 装置的现状与技术进展,参考借鉴上述系统的资料和设计经验^[1-2]。

在实现聚变点火的技术方案上,HiPER 项目采用冲击波点火作为首选方案,这有别于中心热斑点火和快点火方案。冲击波点火是 BETTI 等人在 2007 年提出的一种新型惯性聚变点火方案^[3,4]。该方案将压缩与点火分开,主要分为 2 个物理过程(如图 2 所示):首先,聚变燃料在内爆速率较低(200km/s ~ 300km/s,而中心点火为 350km/s ~ 400km/s^[4],需要更高的驱动能量)的条件下,由长脉冲压缩靶丸;然后,在压缩的最后阶段,将一个强脉冲耦合到压缩脉冲的后沿,形成强的冲击波,与靶中心区返回的冲击波在内壳层附件对碰,碰撞将极大提高内壳层附近的燃料密度,碰撞产生的强冲击波继续向中心传播,提高中心区的温度和压强,进而达到点火条件,实现燃料的聚变点火与燃烧。相比中心热斑点火,冲击点火不仅具有快点火的低点火能量阈值、更高的增益和较好的流体力学稳定性等优点^[3],还具有中心点火结构简单的特点^[4-8]。由于激光能量与发电费用有较为直接的联系,上述特点也可以大大降低 IFE 发电厂的费用投入,有利于发电厂的商业运营和成本回收^[2]。然而冲击点火概念比较新颖,物理过程复杂,还需要物理学家进行

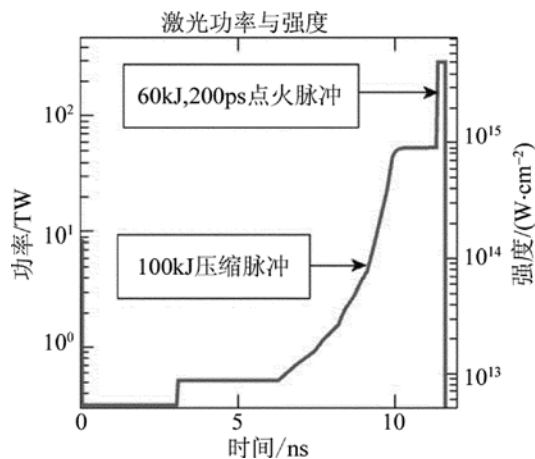


图 2 冲击点火典型激光脉冲波形

深入的理论分析和实验研究。图 2 是典型的冲击点火激光脉冲波形图^[3]。

HiPER 项目作为欧盟大型战略研究工程,其技术复杂性和工程难度是空前的,为实现从欧盟现有的学术激光系统(如 Vulcan、LULI-2000、PETAL 等)到 HiPER 激光装置的技术跨越,必须要在科学基础、研究手段和技术成熟度上取得极大进步。为此,HiPER 项目不可避免地要依靠欧盟各国或地区的实验室、学术团体、工业界和政府机构的力量,取得他们广泛的支持与参与,借鉴他们在相关领域的先进技术与管理经验,吸纳他们的资金,从而降低项目的技术风险和建设成本,确保项目顺利高效地实施。目前,该项目已有 7 个欧洲国家或国家级资助机构、2 个地区政府以及超过 20 个科研机构正式签署协议,并与工业部门直接展开合作。实际上,该项目的参与方已经超出了欧盟范围,项目还得到中国、日本、韩国、加拿大、俄罗斯和美国的协作^[1-2]。

2 HiPER 项目进展与未来规划

HiPER 项目由英国 CCLRC 发起并推动实施,项目总部设在 CCLRC 所属的卢瑟福·阿普尔顿实验室内。从 2005 年开始,来自英、法、德、意等 12 个国家的 50 余名资深科学家对其进行了概念设计。2006-10-19,欧洲研究基础设施战略论坛发布未来欧洲科学机遇路线图,将 HiPER 项目列为未来 20 年发展的主要科学基础设施之一,肯定了 HiPER 项目潜在的巨大学术与商业价值。2007 年,经过 2 年的努力之后,概念设计趋于成熟,CCLRC 向欧洲委员会提交了正式提案,以便对项目进行建设准备^[1]。

经过详细审查,欧洲委员会于 2008-09-19 启动了 HiPER 项目筹备期工作(项目阶段 1),其主要任务是^[9]:(1)定义恰当的法律、管理和财务框架;(2)进行激光装置的详细设计;(3)发展项目技术基础和提高项目科学成熟度。

此外,项目筹备期还将进行成本效益分析,确立透明的长期资金筹备体制和来源,构建清晰的资金统计和偿付框架,规划可实现的采购战略,明确项目选址,并确保各参与方之间的协同运作。鉴于项目规模比较大,项目筹备阶段还需要完成项目论证,以验证项目投资与实施的可行性。为顺利地实现筹备期任务目标,欧洲委员会按任务分解结构(work breakdown structure, WBS)框架将筹备期工作分解

细化为 15 个工作包,以便于项目的组织、实施和管理,资源的优化配置和落实,并增加项目风险的可控性,确保筹备期结束后能够迅速向下一阶段过渡。15 个工作包涵盖了 HiPER 项目的管理、财务、法律、战略和技术层面(如表 1 所示)^[1]。按照项目的时间进度表(如图 3 所示),HiPER 项目现在处于筹备后期。

表 1 HiPER 项目筹备期工作包一览表

代号	工作包名称
WP1	项目准备阶段管理
WP2	HiPER 会议
WP3	HiPER 法律和管理框架
WP4	国际、工业和学术合作方战略
WP5	财务规划和场地问题
WP6	HiPER 未来选择的影响分析
WP7	公共关系与交流
WP8	安全与环境分析和聚变技术
WP9	聚变计划的需求分析
WP10	聚变实验计划
WP11	聚变靶制造与交付
WP12	基础科学计划
WP13	激光装置设计——单次
WP14	激光装置设计——重复频率
WP15	重复频率靶区设计

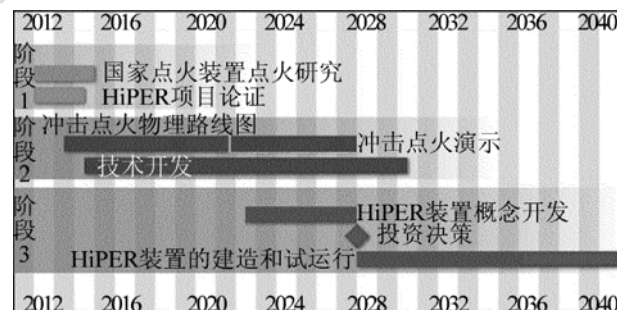


图 3 HiPER 项目最新时间进度表

如果筹备期工作进展顺利,从 2013 年中期开始,HiPER 项目进入 HiPER 技术开发期(阶段 2),该阶段的主要工作任务是物理方案验证和相关技术开发^[1]。物理方案验证包括冲击波点火物理研究和实验演示。

2010 年 10 月,HiPER 执行委员会决定,HiPER 项目将冲击波点火作为首选技术方案。在开始建造 HiPER 装置之前,为提高点火方案的技术成熟度,降低其技术风险,必须在现有的大型激光装置(如法国的 LMJ 装置)上,进行冲击波点火方案的全尺度实验验证。

在 2016 年 LMJ 装置建成前,将依托一些中等

规模的激光装置,如 PALS(捷克)、PETAL(法国)、Vulcan(英国)和 Omega(美国),进行所有的实验和数值建模。2016 年后,一旦理论建模和实验验证足够成熟,兆焦耳激光装置上将启动点火攻关。随后,进行增益优化实验,提高激光聚变能的商业可行性。

技术开发包括以下 3 个主要技术领域的研究活动:(1)激光器:发展二极管抽运固体激光技术,促进激光聚变能的商业开发,其中包括下一代激光器构架原型,这种激光器具备较高的工作频率、峰值功率和能源效率,可满足激光聚变能的商业开发;(2)燃料靶丸:开发燃料靶丸的低成本的大批量制造技术,燃料靶丸能在反应室高温环境下点火并实现高增益聚变,而且容易大规模制造和贮存;(3)聚变靶室:进行可耐受高频率聚变反应环境的靶室的概念开发,其中包括靶室各类材料的研发和测试、氦燃料管理、增殖方案和能量收集系统。

2020 年,项目进入 HiPER 的设计与建造期(最后阶段),该阶段将依次进行电厂概念设计,投资评估,HiPER 装置的工程建造,以及演示 HiPER 装置作为激光聚变能电厂的系统集成性和运行能力。2028 年将是进行项目情况评估以决定是否进行建设投资的关键节点。

3 HiPER 项目管理系统现状

HiPER 项目组总部设在英国卢瑟福·阿普尔顿实验室,其管理配置上采用传统结构,同时遵循了最佳的行业惯例,并依据项目需要进行了适度调整。HiPER 项目的管理结构细节如图 4 所示^[1]。系统各部门之间已经建立了良好的沟通机制,并形成了一个稳固的工作基础。项目组内部定期举行不同级别的管理会议,它们是项目工作的重要组成部分。

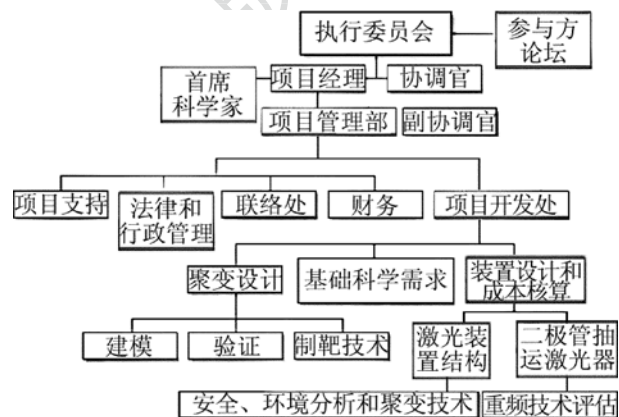


图 4 HiPER 项目管理系统

HiPER 项目组由项目执行委员会牵头管理,执行委员会由 12 名技术专家和管理专家组成,他们来自不同国家或地区的合作方(政府、大学、实验室等)。执行委员会负责整个项目的战略管理。为了满足日常管理需求,执行委员会建立了一个项目管理部负责日常事务管理,并委派正副两名协调官协助项目经理的管理工作。项目经理负责实施和控制整个项目运作,对项目实行质量、安全、进度、成本管理,并全面提高项目管理水平;协调官的主要任务是创造 HiPER 项目良好的运作环境,充当项目管理团队的组织者和项目的倡导者,并敦促欧洲政府高级决策者(部长、投资方等)的积极响应和参与。此外,协调官还是所有推进项目向前发展的政策与技术的维护者,加强 HiPER 项目与欧洲委员会、与科研项目投资方交流沟通的联络人,从而确保项目合作方以一种统一、内聚的方式参与到项目任务的组织与实施中去。项目管理经理下辖项目管理部,项目管理部由项目支持、法律与行政管理、联络、财务和项目开发等部门构成(见图 4)。

4 HiPER 装置设计进展

HiPER 项目现处于筹备期,已公布了其概念设计报告(2007 年)。报告基于现有的激光聚变技术基础,并借鉴了同规模激光装置 NIF 和 LMJ 设计与建造中的科研经验与研究成果,提出了 HiPER 装置自己的设计原则和性能指标。但报告仍处于理论设计层面,还需要对关键技术展开深入的理论分析、详细的技术开发和大量的实验论证,预计最终的设计方案将在项目阶段 2 以后出炉。表 2 中列出了 HiPER 装置的主要指标,同时给出了与其同规模的两大装置的对应指标,供参考比较^[2,10]。下面将简要介

表 2 NIF,LMJ 和 HiPER 装置的主要特征

	NIF (建成)	LMJ (在建)	HiPER (规划中)
光束	192 束	240 束	48 束
激光大厅	2 个	4 个	2 个
靶区	1 个	1 个	≥2 个
长	183m	300m	≈200m
宽	122m	100m	≈75m
高	26m	35m	≈30m
光学装置 装配间	25000 ft ²		
成本	2.6 亿美元	3 亿欧元(估计)	1.5 亿欧元(估计)
靶室直径	10m	10m	5m
辐射屏蔽	1.8m 混凝土	2m 混凝土	约 3m 混凝土(分层)

绍一下 HiPER 装置的最新设计进展。

4.1 激光驱动器

HiPER 项目最具挑战的技术难点之一就是激光驱动器。激光驱动器设计必须满足未来 HiPER 装置运行的所有要求。比如,为实现装置的经济性运行并具备商业竞争力,聚变靶的能量增益 G 满足 $G > 10/\eta$, 其中 η 是激光驱动器能量效率。如果 $\eta = 0.1$, 那么 $G > 100^{[10]}$ 。为达到如此高的能量增益,HiPER 项目拟采用激光驱动快点火方案或冲击点火方案,尽可能在较少的激光总能量下,实现聚变点火和高能量增益。这两种方案均通过压缩和点火两个步骤来实现靶丸聚变燃烧。虽然两种点火方案采用相同压缩脉冲,但点火脉冲有显著不同。表 3 中列出了两种点火方式对 HiPER 驱动器提出的输出要求^[11-12]。

表 3 两种点火方式对 HiPER 激光驱动器的要求

		快点火	冲击点火
压缩 光束	总输出能量	250kJ ~ 300kJ	
	峰值功率	50TW ~ 60TW	
	脉宽	10ns	
	光束	48 束	
	波长	0.35μm(三倍频)	
点火 光束	总输出能量	100kJ	60kJ ~ 100kJ
	峰值功率	7000TW	200TW
	时间	15ps	300ps ~ 400ps
	光束	单束	48 束
	波长	0.53μm(或 0.35μm)	0.35μm(三倍频)

在 HiPER 的概念设计中,每束激光光束由若干的激光束线(也称为子束)构成,具体数量与放大器的设计相关。束线尺寸则由能承受高平均功率的光学元件(如二极管抽运放大器、频率转换晶体等)的尺寸决定。一定数量的束线在进入靶室之前耦合形成单个光束。所有光束通过终端光学组件(final optics assembly, FOA)最终汇聚到 5m 靶室中心的毫米级燃料靶丸上,驱动靶丸内爆点火和聚变燃烧。这种束组设计有利于焦斑调节、光学变焦和脉冲整形。但概念设计中没有对子束加以详细讨论。

2011 年,欧洲物理学家 GARREC(法国原子能委员会)、NOVARO(英国卢瑟福·阿普尔顿实验室)、TYLDESLEY(西班牙核聚变研究所)、RUS(捷克物理研究所)等人在对 HiPER 激光系统进行了深入的研究与计算之后,给出了 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量,如表 4 所示^[11]。表 4 中的结果基于以下的工程

表 4 用于内爆压缩和点火的子束数量

类型	总能量 /kJ	单个子束 能量范围/J	子束数量	每束光的 子束数量
压缩光束	250	830 ~ 925	540 ~ 600	11 ~ 13
冲击点火	60	260 ~ 360	335 ~ 456	7 ~ 10
冲击点火(CPA)	60	588 ~ 800	150 ~ 204	3 ~ 5
快点火(CPA)	100	588 ~ 800	125 ~ 170	—

假设:(1)子束口径为 12cm × 12cm 或 14cm × 14cm 方型;(2)一倍频时最大激光损伤通量不超过 10J/cm²;(3)近场调制深度接近 2;(4)三次谐波产生效率为 50% ;(5)啁啾脉冲放大(chirped pulse amplification, CPA)技术用于 15ps 的快点火或 400ps 的冲击点火。

HiPER 激光驱动器还必须具备高重复工作频率(约 10Hz)和高的电光转换效率(约 15% ~ 20%)。NIF 或 LMJ“单发”技术不能满足这种高频率的要求^[13]。现有的基于闪光灯的高重复率激光技术也达不到 HiPER 所需的效率水平。HiPER 项目将采用二极管抽运固体激光器(diode pump solid-state laser, DPSSL)技术,但目前这种技术仍不成熟,而且按现今的价格而言,应用到 HiPER 装置上将导致成本非常之高。此外,用于高平均功率的大口径光学器件的有效性、运行与性能及其相关技术尚不明晰,能满足 HiPER 技术需求的工业技术成熟度也不具备。这些都需要在技术开发阶段确定下来。

4.2 主放大器

HiPER 的主放大器是实现驱动器高重复频率、高平均功率激光输出的关键部件。实现高重复率、高平均功率意味着主放大器的激光介质要承受很高的热载荷和具备长工作寿命。对于工作频率 10Hz 的千焦耳级的放大器来说,其平均功率达到 10kW。若取典型的 15% ± 5% 抽运效率,放大至 1kJ 需要 5kJ ~ 10kJ 的抽运能量。假设激光二极管板条峰值功率 500W(1ms 脉宽),则每个千焦级放大器需要 10000 到 20000 个激光二极管板条。若抽运时间为 1ms,10Hz 重复率意味着激光二极管板条工作占空比为 1%。这表明主放大器的增益介质工作寿命和热管理技术将成为关键研究内容。目前,有多种 HiPER 主放大器结构设计处在研究阶段,但最终方案尚无定论^[10,14-16]。

HiPER 装置有可能采用类似于 NIF 或 LMJ 的多通双放大器结构。其工作原理如图 5 所示,低能光脉冲从右侧进入后,将在两个放大器间来回折返

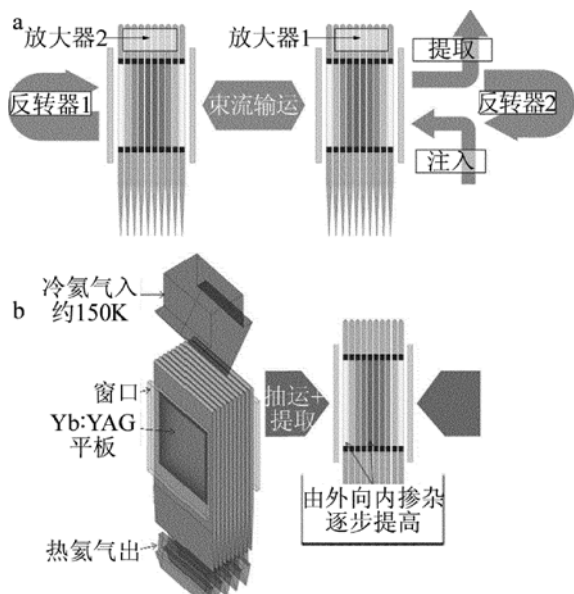


图 5 多通双抽运放大器结构设计

a—工作原理示意图 b—放大器结构图(图中的增益介质为 Yb:YAG, 冷却气体是氦气, 温度 150K)

通过, 其能量将逐渐被放大, 最后成为高能光脉冲向外输出。为了改善激光介质热管理, 保持增益介质有较高的抽运效率, 增益介质 (Yb:YAG 或 Yb:Ca) 加工成薄板形态并堆叠在一起, 冷却气体 (低温氦气) 从薄板间缝隙流过, 从而带走大量的热。

另一种设计方案被称为有源反射镜。法国的应用光学实验室正在开展这方面的研究。其原理如图 6 所示, 低能光脉冲从右侧呈斜角进入增益介质, 再以相同斜角从增益介质背面反射出来, 因而被两次放大。抽运光从增益介质法线射入增益介质^[15]。

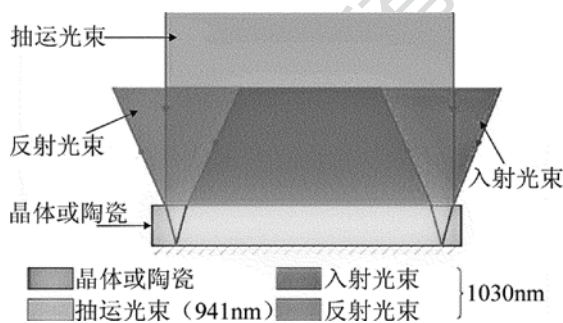


图 6 低能脉冲两次(入射和反射)通过增益介质

图 7 是由 6 个放大模块组成的 Z 字形放大器组。激光光束从进入链路到被可变形镜 (见图左侧) 反射回来, 光束通过链路 2 次, 被每个放大器模块放大 4 次。

此外, 法国应用光学实验室的专家 MOUROU 还提出了基于大量光纤激光叠加从而产生高能光束的设计方案^[17] (见图 8)。法国原子能委员会目前正

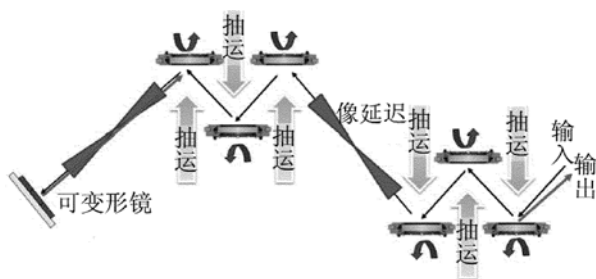


图 7 放大器链路布局

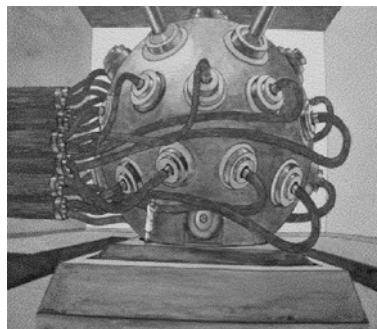


图 8 光纤驱动聚变装置假想图

在开展这方面的研究。该设计的最大优点在于激光的安全性和系统运行维护。放大系统将基于二极管抽运光纤激光器, 但由于每根光纤输出能量有限, 若满足 HiPER 装置的输出要求, 整个放大系统需要海量的光纤 (数以百万计)。目前, 单光纤的激光能量、光纤总数量和热管理规模等问题是研究的重点内容。

4.3 聚变靶室 (或反应堆)

NIF 装置和 LMJ 装置各拥有一个直径 10m 的铝制靶室。靶室上下 2 个半球球面不同方位角开有大量激光入射口, 以确保激光光束能均匀辐照靶丸表面, 而球型靶室中部的环形区域开有诊断口, 预留给各类实验诊断设备。相较而言, HiPER 靶室的设计将与前两者有所不同, 这主要是因为^[11]: (1) HiPER 装置是一个高重复率工作的系统 (约 10Hz), 而 NIF 和 LMJ 每天仅几发次的打靶^[10,13], 不同的辐射水平对靶室的设计有很大影响, 无论 HiPER 装置未来是用来演示系统高重复频率运行的能力, 还是作为电站持续稳定地运行, 都需要详细研究与论证; (2) HiPER 靶室设计需要考虑打靶碎片的处理和靶室真空性的保持, 避免入射的激光光束受到散射和衰减; (3) 点火方式不同, 则光束数量和入射角度也不同, 这对靶室结构设计有很大影响; (4) 燃料靶丸注入机制和靶丸的跟踪/锁定流程对靶室设计有影响; (5) 诊断装置的类型、大小和位置也对靶室结构设计有影响。

HiPER 靶室设计的关键问题是靶室腔壁(第一壁)的辐射防护。由于第一壁直接面对核反应产物的轰击,承受爆炸产生的脉冲式辐射和脉冲式应力(周期约 0.1s)的作用,必须加以防护保证其使用寿命。目前,聚变反应堆第一壁的设计方案有干壁、湿壁两种,如美国的激光聚变能(laser inertial fusion energy, LIFE)概念设计采用干壁,而日本的快点火激光聚变反应堆 KOYO-F 则采用湿壁。出于对靶室内靶丸生存(辐射环境影响)和激光入射(散射或衰减影响)的考虑,便于实现两个激光脉冲间的工况复原,允许有较高的脉冲重复率,HiPER 装置考虑采用干壁方案。这就需要为第一壁开发新型材料。该材料应能够承受强辐射和高热载荷,导热快,不易产生空位聚集,利于氦气的释放。

表 5 中给出了 HiPER 靶室的主要设计指标。由于运行方式的不同,HiPER 靶室存在两种设计(A 型/B 型),它们在技术细节上有许多不同之处,其中包括第一壁材料、光学元件(位置)、运行维护以及事故处置方面^[18]。

表 5 HiPER 靶室的设计指标

	HiPER A 型靶室 (工程演示)	HiPER B 型靶室 (原型电站)
类型	实验装置	演示型反应堆
运行方式	100 次	持续运行(24h/7d)
产额/MJ	<20	>20(100)
重复频率/Hz	1~10	10~20
功率/GW	—	0.3(1~3)
氟循环	否	是
包层	否	是

注:括号内数字是指远期达到的指标。

图 9 是 HiPER A 型靶室的总体结构设计,由于它仅进行高重复频率打靶的技术验证,因而并不包含包层结构。在靶区中间的是球型靶室,它的外面有 3 个辐射屏蔽层,即靶室屏蔽层、终端光学组件屏蔽层和生物屏蔽层。这 3 个屏蔽层将整个靶区空间由里向外分为 3 个区:区域一(靶室屏蔽层与终端光学组件屏蔽层之间)、区域二(终端光学组件屏蔽层与生物屏蔽层之间)和区域三(生物屏蔽层以外)。区域一内建有维修轨道,区域二设有终端光学组件。在系统运行时,这两个区域是禁区。区域三是永久非隔离区,与外界相通。

图 10 中给出了 A 型靶室的设计细节。靶室内壁是 10cm 的 SS304 合金钢,外面包裹 40cm 厚的硼

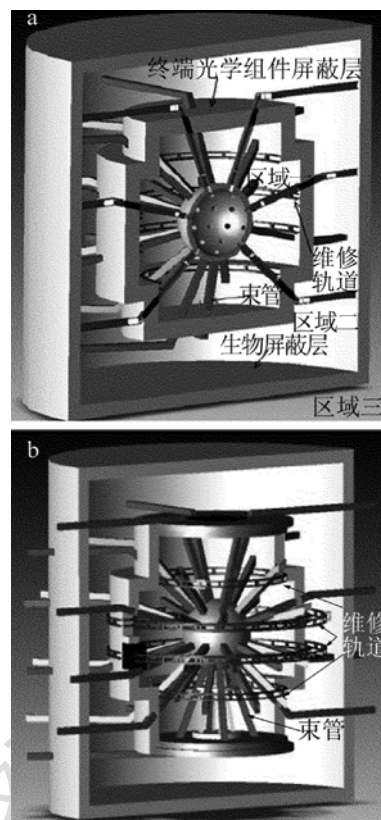


图 9 HiPER 装置 A 型靶室结构图

a—球型靶室(剖面)和圆柱型辐射屏蔽层 b—束管和维修轨道

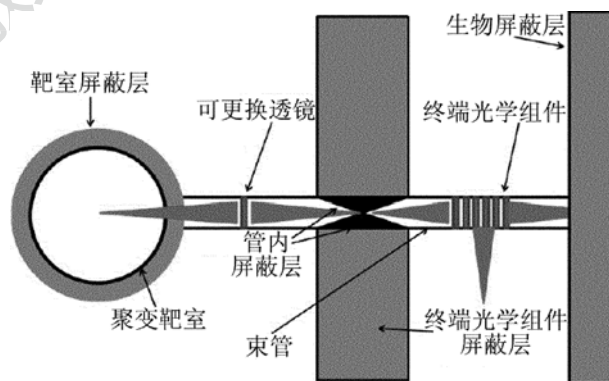


图 10 HiPER A 型靶室结构图

酸水泥屏蔽层。束管是激光光束进入靶室的通道,它由壁厚 1cm 的 SS304 合金钢管构成,内部安装有各种光学部件,如可更换透镜、FOA 等。终端光学组件的作用是:频率转换、波长分离和聚焦光束到靶室中心。为了尽可能减少聚变辐射和爆炸碎片对终端光学组件的损伤,采用可更换透镜、管内屏蔽层、FOA 屏蔽层等设计措施,同时将 FOA 置于尽可能远离靶室中心的位置($d=19\text{m}$)。表 6 中是 A 型靶室的主要设计参量。

图 11 是 B 型靶室的总体结构,与 A 型靶室大体类似,含 1 个靶室和 3 个防护区。B 型靶室含有

表 6 HiPER A 型靶室的主要设计参量

	外形结构	尺寸	材料	位置(距靶室中心的距离)
靶室(不含第一壁)	球型	直径 5m, 壁厚 10cm	SS304 合金钢	—
束管	圆柱型	直径 1m	SS304 合金钢	—
可更换透镜	扁柱型	口径 1m	熔石英	$d = 8\text{m}$
管内屏蔽层	圆柱型, 向内开有锥孔	直径 1m, 壁厚 2.5m	混凝土	$d = 16\text{m}$
靶室屏蔽层	球型	直径 5m, 壁厚 40cm	硼酸水泥	$d = 5\text{m}$
终端光学组件屏蔽层	圆柱型	直径 16m, 壁厚 2m	混凝土	$d = 16\text{m}$
生物屏蔽层	圆柱型	直径 25m, 壁厚 0.5m	混凝土	$d = 25\text{m}$

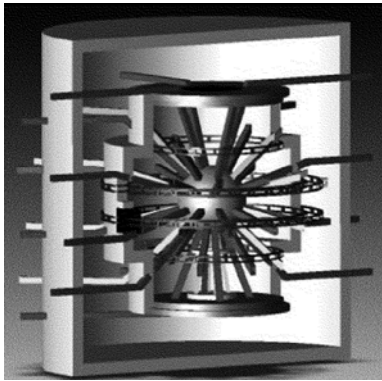


图 11 HiPER B 型靶室结构图

包层结构,它不仅能利用 14MeV 中子去增殖氚,以维持氘-氚反应中氚的消耗,而且将聚变反应产生的热量以及氚增殖产生的热量,通过冷却剂热循环带出靶室,加热水变为蒸汽推动涡轮机发电。目前,提出了 LiPb 单冷却剂系统或者 LiPb/He 双冷却剂系统。包层的设计正处在实验研究中。关于第一壁结构材料,正在探索以下几种,相关实验在罗森多夫离子物理研究所和鲁文大学进行:(1) 纳晶钨和纳米金刚石;(2) 碳和钨基泡沫;(3) 基于碳纤维、碳纳米管的锥型结构。

5 HiPER 项目的国际合作

开展广泛的国际技术合作对 HiPER 项目的成功至关重要。通过努力,HiPER 项目吸引了众多国家或地区的实验室、学术团体、工业界和政府机构参与其中,其正式或非正式合作方已遍布欧洲、亚洲和北美洲^[1-2],其中包括欧盟委员会、英、法、德、俄、西等 12 个国家和组织。

约有半数正式合作方参与资金和行政管理,几

乎所有的正式合作方都提供资金以推动 HiPER 项目发展。HiPER 项目管理将有效权衡合作方之间的行政管理与学术研究活动,在确保重要决策顺利实施的同时,成功解决各类技术难题。在项目筹备期间已形成了各方实力均衡的项目管理体系。下面介绍 HiPER 项目几个主要欧洲合作伙伴的大致情况^[2]。

5.1 欧盟委员会

欧盟委员会曾为 HiPER 准备期项目的缔约方。然而,由于准备期项目进展期间不断扩展的合作伙伴关系,HiPER 项目与欧盟委员会之间已不再是传统的客户-供应商关系,而是形成地位平等、积极参与的合作体制。欧盟委员会为 HiPER 项目任务在行政和战略方面提出众多建设性意见,并为此项目与其它欧洲机构开展合作打下良好的基础。

5.2 英国

英国科学技术设施委员会 (Science and Technology Facilities Council, STFC) 为 HiPER 项目做出了重大贡献。作为项目投资方,科技设施委员会主要负责英国重要科技设施的全面战略投资管理。科学技术设施委员会拥有多处大型基础设施,包括世界一流的激光装置——中心激光装置。STFC 已正式批准 HiPER 项目使用中心激光装置进行相关科学研究。

5.3 法国

法国在 HiPER 项目中的地位至关重要。法国两大供资机构,即原子能委员会和国家科研中心均为项目正式合作伙伴,并全面参与高层次交往协作。它们不仅积极参与 HiPER 项目的技术和行政管理,还将为项目开发提供人力、信息、技术、资金等关键

支持。过去十几年间,法国原子能委员会研制激光集成线并耗资数十亿欧元开发 LMJ 激光装置。这两大装置维持了法国在 HiPER 项目中的专业领先地位。HiPER 项目将广泛借鉴这两大装置的技术和经验。另外,原子能委员会正在建造 PETAL 激光装置,它将作为 HiPER 项目的一台中等规模的技术验证装置,成为 HiPER 项目的战略发展道路上不可或缺的一环。法国应用光学实验室有全球最先进的激光-等离子体物理实验室设备,获得该实验室设备和专业技术的支持对于降低 HiPER 项目技术风险同样也至关重要。

5.4 俄罗斯

俄罗斯科学院下属的应用物理研究所(Institute of Applied Physics, IAP)和列别捷夫物理研究所(Lebedev Physical Institute, LPI)量子放射物理学部是 HiPER 项目的正式合作伙伴。HiPER 项目可通过两大研究所获取俄罗斯科学院的丰富科研资源,尤其是先进的大口径激光技术(IAP 负责)以及靶丸设计和制造技术(LPI 负责)。

此外,HiPER 项目还与美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室、美国通用原子公司、中国科技大学、中国上海交通大学、中国上海光学精密机械研究所、韩国原子能研究所、日本大阪大学激光工程研究所、加拿大艾伯塔大学外国科研机构保持着良好的交流和联系。

6 结 论

HiPER 项目是一个泛欧合作的大型激光基础研究项目,其设计意图是发展激光驱动的惯性聚变能源,使欧洲在惯性聚变能的研究领域占据领先地位,同时借助 HiPER 激光装置所提供的极端物态条件,使其在极端状态科学研究具备其它国家没有的能力。HiPER 项目研发周期长、技术复杂度高、实施难度大,是名符其实的大科学、大工程,具有很强的前沿性、探索性和风险性。通过上述对 HiPER 项目多角度的描述,可以得出以下一些结论:

(1) HiPER 项目规划与管理十分有效,整个项目系统地、分阶段地组织实施。

(2) 技术路线比较明确,采用了二极管激光抽运、长寿命增益介质、主动热管理技术。

(3) 设计预案多样化,往往有多种方案同时展开预研。

(4) 对关键技术积极进行探索和验证,如放大

器结构、增益介质的选择。

(5) 技术风险管理意识强,分摊项目技术开发成本,充分借鉴成熟技术和经验教训,并进行关键技术验证,努力控制技术风险。

(6) 成功地运用国际协作模式,形成了大范围、深层次的国际合作网络。

毫无疑问,HiPER 项目的这些特点,对促进整个项目的顺利实施起到了关键作用。本文中对 HiPER 的研制背景、项目规划、项目管理、技术进展、对外合作等多个方面进行了系统梳理,力图全面地反映出整个 HiPER 项目的总体情况,对从事大型激光装置及聚变能的工程研发人员与项目管理人员有一定的参考借鉴作用。

参 考 文 献

- [1] TAYLOR J T. About the HiPER project [EB/OL]. (2012-06) [2013-05-18]. [http://www.hiper-laser.org/30about thehyper.html](http://www.hiper-laser.org/30about%20the%20hyper.html).
- [2] DUNNE M, ALEXANDER N, AMIRANOFF F, *et al.* HiPER: technical background and conceptual design [R]. Oxfordshire, UK: Rutherford Appleton Laboratory, 2007:7-56.
- [3] BETTI R, ZHOU C D, ANDERSON K S, *et al.* Shock ignition of thermonuclear fuel with high areal density [J]. *Physics Reviews Letters*, 2007, 98(15):155001.
- [4] YUAN Q, HU D X, ZHANG J P, *et al.* Performance of shock ignition with varying ignitor [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(4):045207 (in Chinese).
- [5] YUAN Q, HU D X, ZHANG X, *et al.* Study on the mechanism of shock ignition in laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2011, 60(1):015202 (in Chinese).
- [6] THEOBALD W, BETTI R, STOECKL C, *et al.* Initial experiments on the shock ignition inertial confinement fusion concept [J]. *Physics of Plasmas*, 2008, 15(5):056306.
- [7] ZHANG J T, HE B, HE X T, *et al.* Study on the mechanism of the fast ignition in laser fusion [J]. *Acta Physica Sinica*, 2005, 50(5):921-925 (in Chinese).
- [8] RIBEYRE X, SCHURTZ G, LAFON M, *et al.* Shock ignition: an alternative scheme for HiPER [J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2009, 51(1):015013.
- [9] MYERS W. Clean fusion energy: HiPER is on the roadmap [EB/OL]. (2006-10-20) [2013-05-18]. <http://phys.org/news80557199.html>.
- [10] GARREC B L, ATZENI S, BATANI D, *et al.* HiPER laser: from capsule design to the laser reference design [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 7916:79160F.
- [11] GARREC B L, NOVARO M, TYLDESLEY M, *et al.* Hiper laser reference design [J]. *Proceedings of the SPIE*, 2011, 8080:80801V.
- [12] GARREC B J L, HERNANDEZ-GOMEZ C, WINSTONE T, *et al.* HiPER laser architecture principles [C]// *Inertial Fusion Sciences and Applications'09*. London, UK: Institute of Physics, 2010:032020.

- [13] AZEVEDO S, BEELER R, BETTENHAUSEN R, *et al.* Management of experiments and data at the national ignition facility [C]// Accelerator and Large Experimental Physics Control Systems. Grenoble, France; American Physics Society, 2011; 1124-1127.
- [14] MOUROU G A, LABAUNE C, HULIN D, *et al.* New amplifying laser concept for inertial fusion driver [C]// Inertial Fusion Sciences and Applications'07. London, UK; Institute of Physics, 2008; 032052.
- [15] CHANTELOUP J C, ALBACH D, LUCIANETTI A. Multi kJ laser concepts for HiPER facility [C]// Inertial Fusion Sciences and Applications'09. London, UK; Institute of Physics, 2010; 012010.
- [16] CHANTELOUP J C, LUCIANETTI A, ALBACH D. Overview of the LULI diode-pumped laser chain proposal for HiPER kJ beam-lines [J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 8080: 80801W.
- [17] ERTEL K, BANERJEE S, MASON P D, *et al.* HiPER and ELI: Kilojoule-class dpssls for laser fusion and ultra high intensity research [C]// High Power Diode Lasers and System. New York, USA; IEEE, 2009; 1-2.
- [18] PERLADO J M, SANZ J, ALVAREZ J, *et al.* IFE plant technology overview and contribution to HiPER proposal [J]. Proceedings of the SPIE, 2011, 8080: 80801Z.