

惯性约束聚变(ICF)的驱动源技术

周丕璋

(核物理与化学研究所 成都 610003)

摘要 本文在评述作为 ICF 驱动源的高能固体机构器的现状、关键技术和发展方向的基础上,介绍了我院在这一技术领域的重要进展和近期所开展的工作。

关键词 惯性约束聚变(ICF), 高能钽玻璃激光器, 双脉冲固态激光器(DPL), 啁啾脉冲放大(CPA)技术。

1 引言

为了有效地实现惯性约束聚变,而且用于能源和某些军事应用,必须利用驱动源提供的极高能量脉冲压缩,加热热核材料(D, T)靶丸;如果靶加热、压缩具有足够快的速度,则在靶解体之前将发生点火、燃烧、释放聚变能量和辐射。

显然,先进的驱动技术和靶场物理是实现 ICF 的关键所在。目前,ICF 的首选驱动器是钽玻璃激光器^[1]。在许多方面,激光器是此项研究较理想的驱动源,因为它们能产生很高能量(功率)的短脉冲并能用光学反射镜和透镜聚焦在靶上。

2 驱动器的现状和近期目标

ICF 有两种不同的驱动方式:直接驱动和间接驱动(辐射驱动)。

在过去十五年中,利弗莫尔国家实验室(LLNL)已经建造了一系列钽玻璃激光器,并不断地提高能量和功率。Nova 装置是这个系列的最大系统,于 1985 年建成。从此,它就是世界上最大的 ICF 驱动器(10 束,每束输出~4kJ,1ns,0.35 μ m)。主要用于间接驱动。

目前,国外 ICF 计划的目标是确定压缩、加热靶丸使其产生聚变、大量释放能量的科学可行性。而论证点火和中等增益是建立 ICF 科学可行性的最后一步。为实现这一步,美国正准备建立更大激光系统,即国家点火装置(NIF)。主要用于能源和武器模拟研究。

作为直接驱动装置,美国 Rochester 大学

和日本大阪大学分别建立了 OMEGA 和 Gekko-XI 装置,并不断精密、升级这些装置。

国内在 ICF 驱动器方面,除 1986 年在上海建成“神光 I”激光装置外,1985 年星光装置(70J,1.06 μ m,0.2~0.8ns)在中物院核化所投入运行,进行 ICF 靶物理的基础和分解实验。在每年约一千发的打靶运行中不断完善,改进该系统,并在国内首次开展了紫外(3 倍频)激光打靶。1993 年完成了“星光”装置升级(星光 I),输出能量提高了 4 倍,目前正用 3 倍频激光进行黑洞靶的预备实验。

然而,从我国 ICF 物理的需求出发,无论是星光 I 还是神光 I 及其升级系统(神光 II)都是远远不够的。必须不失时机地研制能量更高,路数更多的大型激光装置。

3 中物院驱动源技术的进展

3.1 “星光”装置升级

1985 年星光装置已在中物院投入运行,输出的能量最高达 70J,而且只能输出基频光(1.054 μ m)、脉宽为 0.2~0.8ns。随着物理工作的需求,多年来在不断改进、完善激光器件性能的基础上,于 1993 年完成了“星光”装置的升级(星光 II)。“星光 II”有三个输出通道和两个靶室,可输出三种波长,最高能量可达 300J(1.054 μ m)。其主要参数见表 1。系统光路如图 1 所示。

3.2 单元技术进展

1) 频率转换技术

由于短波长激光能有效提高束靶耦合效

表 1 星光 I 主要技术参数

	通道 1	通道 2	通道 3
输出口径	Φ40mm	Φ70mm	Φ200mm
激光波长	1.054μm	1.054 μ m 0.53μm 0.35μm	1.054μm 0.53μm 0.35μm
脉冲宽度	0.2~0.8ns 1.0~5.0ns	0.2~0.8ns 1.0~5.0ns 1.0~10ps	0.2~0.8ns 1.0~5.0ns
输出能量 ω	10J	40J/1ns	260J/1ns
2ω		≥25J/1ns	≥200J/1ns
3ω		≥20J/1ns	≥130J/1ns
光束质量	≤10DL	≤10DL	≤10DL
对比度	≥10 ⁶	≥10 ⁶	≥10 ⁶

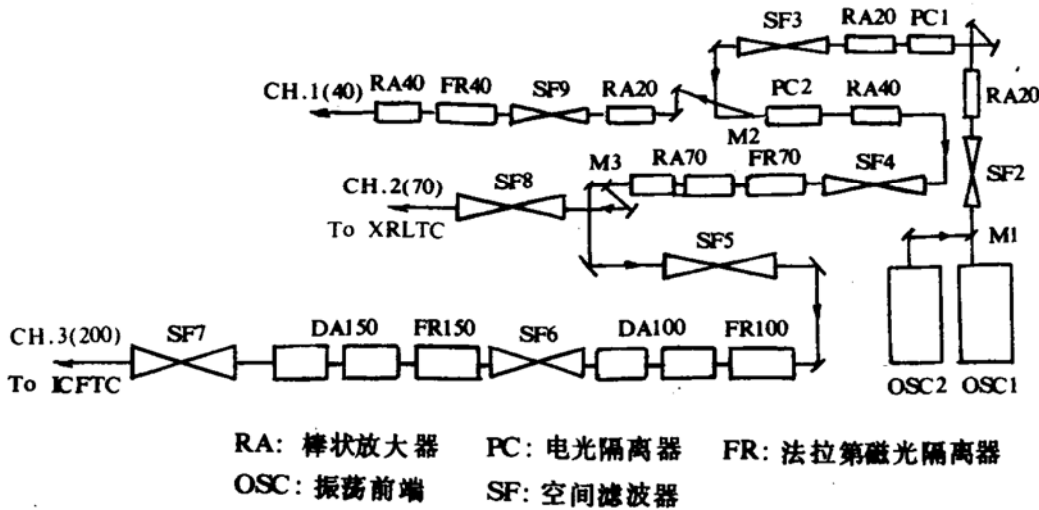


图 1 “星光 I”光路图

率,抑制超热电子对靶丸的预热,在进行“星光”装置升级的同时,开展了大口径 2、3 倍频的工作。

在“星光 I”上利用两块 type I /type I Φ180×14mm 的 KDP 晶体,采用偏振失配的方法,开展了 2~3 次谐波转换实验研究⁽²⁾。

在输入基频光强度为 1~2GW/cm² 时,获得 2ω 外部能量转换效率 ≥70%,3ω 外部能量转换效率为 65%(图 2)。

此倍频器的特点是:结构简单、调整方便、集 2、3 倍频于一体和便于互换。

2) 多功能自准直三维靶定位传感仪

靶的均匀照明技术是设计下一代大型激

光系统必须考虑的关键技术之一。多年来,我们一直在分解这一技术,并开展了若干单元技术研究。限于条件,作为实现均匀照明的第一步,正从事精密“星光 I”的工作,目的在于使激光器的主要参数精确可控,稳定可靠。

为提高靶的瞄准和调焦精度,研制了一台多功能自准直三维靶定位传感仪⁽³⁾,其定位精度为:横向 ΔX、ΔY < ±10μm;纵向调焦精度 ΔZ ≤ ±10μm。

3) 高能激光器结构研究

用于 ICF 驱动器的高能激光器大体有三种可能的工作方式:单通、双通和多通。Nova 和早期的器件大多是单通的 MOPA 结构。而

NIF, 只采用一种尺寸(40cm×40cm)的片状放大器. 由前置级注入的激光脉冲多次(4次)通过这个放大器, 反复提取能量, 故总增益大、效率高和造价低. 多通、多组件结构是下一代激光器必须采用的方案⁽⁴⁾.

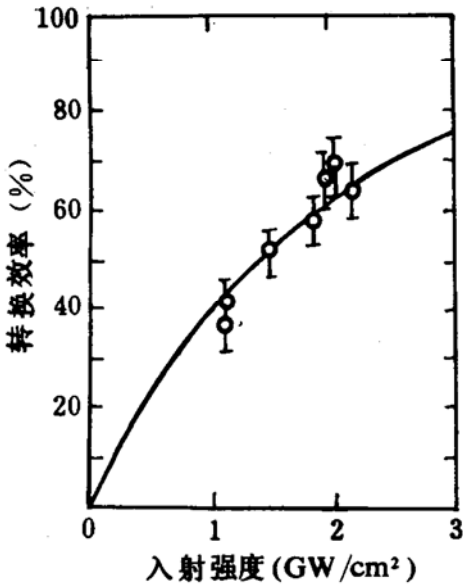


图 2 3次谐波转换效率与入射基频光强度的关系

从目前的技术方案来看, 激光脉冲经四通放大之后, 必须借助大口径纵向电光开关和大口径偏振器从腔中输出, 注入到光传输单元. 这增加了难度和设备.

为在我国下一代激光器中充分利用多通

多组件的优点, 同时又避免采用大口径电光开关带来的技术困难, 中物院核化所正从事阵列式三通放大器构想和设计, 并围绕这一原型构想开展了总体软科学和若干单元的技术研究.

此外, 为跟踪国外若干先进单元技术, 还开展了以下研究工作, 并取得不同程度的进展, 它们是: (1)~100mm 口径分别以导电膜和等离子体为电极的纵向(电场)电光开关的研究; (2)为提高材料和膜层的抗光伤阈值, 开展了 SiO₂ 多孔增透膜技术和光学膜层激光预处理研究; (3)在 DPL(激光二极管泵浦的固体激光器)方面, 除做了一些起步性的工作, 开展了单纵模、高稳定度振荡器和全固化振荡器预放前置级的研究外, 还开展了 DPL 作为 ICF 驱动源的总体软科学研究; (4)在以往研究受激布里渊散射(SBS)相位共轭, 压缩脉宽的基础上, 开展了具有一定工程规模(100J 级)的 SBS 工作.

3.3 超短脉冲高亮度源及线聚焦系统

高亮度超短脉冲一直是高功率激光技术发展中最活跃的领域之一. 由于它在强场物理超高次谐波的产生及作为 X 射线激光(XRL)激励源等多方面有着重要的应用而倍受重视.

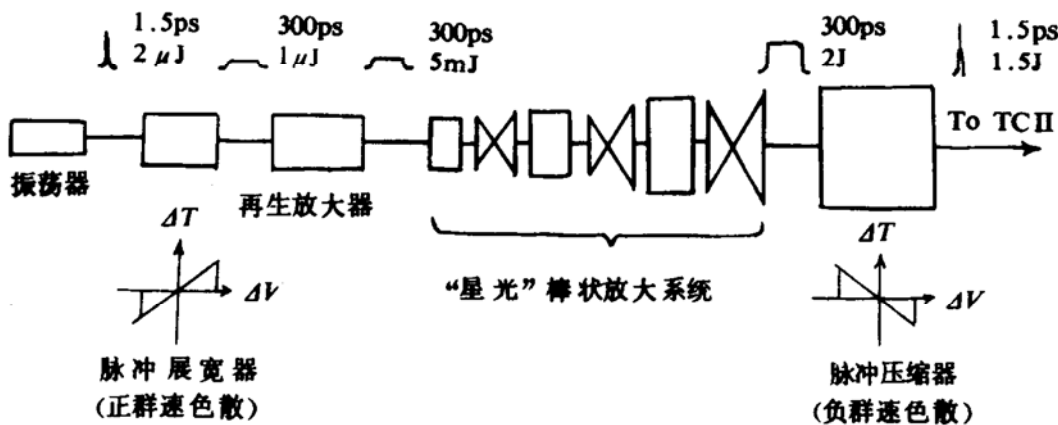


图 3 超短脉冲激光系统原理图

我所除用环形腔碰撞锁模(CPM)原理研制了一台飞秒(30~700fs)染料激光器及掺钛

蓝宝石(Ti:Al₂O₃)自锁模飞秒(100~200fs)激光振荡器外, 在国内首次成功地研制了一

台基于反馈可控被动锁模(FCM)和啁啾脉冲放大(CPA)技术的皮秒钕玻璃超短脉冲激光系统(图 3). 其主要指标为:激光脉冲宽度 ~ 1.5 ps,单脉冲能量 ~ 1.5 J,激光脉冲功率 ≥ 1 TW. 此外,目前还在研制结构更为紧凑的超高强度飞秒激光系统.

为了适应 XRL 的实验研究,我们研制了透-反射镜组合的线聚焦系统,线长为 3cm(可调),线宽为 60 μ m.

为实现皮秒激光脉冲的线聚焦,正建立反-反射镜组合的线聚焦系统,预期可得到高的纵横比和功率密度分布均匀的线聚焦.

4 结束语

作为 ICF 驱动源的高能固体激光器集激光、光学、机电于一体,涉及各种单元技术;而且,随着激光能量提高,路数增多,工程规模

愈来愈大,精密化的要求也越来越高. 对于这类大型装置如何大幅度降低造价是至关重要的. 今后将进一步在大型激光系统的主放大器结构、精密化、光束质量、多路激光系统对靶的均匀照明技术、靶场光学排布以及包括材料膜层在内的各种关键技术方面开展工作. 为在我国建造高性能价格比的大型激光系统做出应有的贡献.

参 考 文 献

- 1 National Research Council, National Academy of Sciences, Second Review of the Department of Energy's Inertial Confinement Fusion Program, Final Report (National Academy Press, Washington, D. C., 1990)
- 2 Lowdermilk W H, et al. 1992 LLNL Livermore, CA. 94550

Driver Technology of Inertial Confinement Fusion (ICE)

Zhou Pizhang

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract This paper briefly describes high power laser technology for ICF drivers and estimates its present status, key technology and developing trend. In particular, a description of the laser driver key technical progress and near future program in CAEP are also presented herewith.

Key Words ICF, high power Nd: glass laser, diode pumped solid-state laser (DPL), chirped pulse amplification (CPA).

(上接82页)

20 years in INPC are briefly introduced, which include the monitoring and treatment of radioactive effluents, environmental monitoring and dose assesment.

Key Words radioactive effluent, radiation environmental protection, environmental monitoring.