

我国激光核聚变实验研究概述

丁耀南

(核物理与化学研究所 成都·610003)

摘要 本文简要介绍用于激光等离子体诊断的技术设备及激光直接驱动和间接驱动氘氚热核聚变等若干方面的物理研究成果。

关键词 激光核聚变, 激光等离子体诊断, 中子产额。

1 引言

随着激光器的问世,前苏联科学家 Basov 和我国科学家王淦昌分别于 1963 年和 1964 年独立提出了强激光引发核聚变的可能性。随后,利用强激光束在极短时间($\sim ns$)内和惯性约束状态下引发热核聚变的理论和实验研究在世界上很快地发展起来,从而激光惯性约束聚变(ICF)的研究迅速发展成为当代物理学的重要前沿领域之一。1986年, Basov 首先报导以强激光辐照氘化锂观察到少量中子。美国 Nuckolls 于 1972 年提出了强激光直接辐照靶丸产生球形聚爆的理论,又于 1982 年公开了间接驱动的概念。在各国广泛实验与理论研究的基础上美国 E. Storm 于 1988 年宣称利用地下核试验所做的高增益靶丸实验展示了 ICF 的科学可行性。科学家预言大约在 2000 年实现点火, 2025 年演示聚变电站初样。

中科院上海光机所在 70 年代曾以强激光辐照含氘固态平面靶和 CD_2 实心球靶。据称,实验观察到少量中子。

我们自 1977 年起致力于 ICF 研究,建立和发展了适合于激光等离子体诊断的各种诊断技术与设备,先后利用上海光机所六路高功率激光装置($10^{11}W$)、我所星光($10^{11}W$)和上海联合实验室神光($10^{12}W$)高功率钕玻璃激光装置逐步深入研究了强激光束靶相互作用,于 1986 年和 1990 年分别实现了直接驱动和间接驱动氘氚热核聚变。进一步深化物理

研究,又取得了新的进展。

2 激光等离子体实验诊断技术与设备

激光等离子体物理现象丰富、复杂。其特点表现在时间过程短($ns \sim ps$),空间尺度小(分辨要求 μm);既发射粒子(电子、离子、中子和 α 粒子等)又发射波段分布很宽的光子(从硬 X 光、软 X 光、真空紫外和可见光至红外光波段);非平衡及其弛豫过程。此外,激光打靶瞬间还可产生电磁辐射干扰、地电位起伏等,故诊断装置还必须具有强的抗干扰能力。针对这些特点建立的各种诊断技术设备^[1]见表 1。为了对各种仪器设备进行标定,建立和使用的实验室标定源有加速器质子荧光源、同步辐射源、加速器氘氘和氘氚中子源、脉冲中子管、小型激光器、脉冲光源、标准光源(Na 灯、Hg 灯等)以及 X、 γ 、 α 、 β 、中子天然放射源等。各种诊断设备都经过高功率激光打靶抗干扰试验。

3 物理实验研究若干结果

直接驱动和间接驱动是实现激光核聚变的两种驱动方式。如图 1 所示,直接驱动由强激光直接辐照靶丸驱动内爆;间接驱动则把激光束注入特定黑体腔内转换为 X 光辐射,由 X 光烧蚀靶丸驱动内爆。高增益直接驱动内爆对于激光束辐照均匀性要求很高。间接驱动对于激光束辐照均匀性要求较低,但引入了腔激光注入、吸收、X 光转换、运输、辐射

表 1 诊断技术设备

	名 称	主 要 指 标	
X 光 诊 断	X 光条纹相机	1~10keV, 30ps	
	软 X 光条纹相机	0.1~10keV, 34ps	
	软 X 光变象管分幅相机	0.1~10keV, 150ps 3 幅	
	门控 MCP 多分幅相机	0.1~10keV, 200ps 12 幅	
	长狭缝 X 光条纹相机	在建	
	时间分辨晶体谱仪	在建	
	软 X 光时空分辨谱仪	拟建	
	滤片 X 射线二极管亚千能谱仪	0.1~1.5keV, 0.5ns	
	软 X 光透射光栅谱仪	$\Delta\lambda\sim 0.1\text{nm}$	
	软 X 光针孔透射光栅谱仪	$\Delta\lambda\sim 0.1\text{nm}$	
	晶体谱仪	0.1~1nm, $\lambda/\Delta\lambda\sim 10^3$	
	滤波荧光硬 X 光谱仪	3~200keV, $E/\Delta E$ 约 2~5	
	X 光针孔相机	15 μm	
	X 光窄缝相机	12 μm	
	X 光显微镜	<10 μm , $\times 15$	
	平响应 X 射线二极管	0.1~1.5keV, 0.1ns	
	金刚石光导探测器	<0.1ns	
	砷化镓硬 X 光探测器	<0.1ns, (7~150)keV	
	光 学 诊 断	可见光条纹相机	(400~800)nm, 10Ps
		宽谱响应光学条纹相机	(160~800)nm, 5Ps
可见光谱仪		(0.3~1.1) μm , $\Delta\lambda$ 约 0.5nm	
红外光谱仪		(0.3~30) μm , $\Delta\lambda$ 约 9nm	
硅光二极管		(0.4~1.1) μm	
热释电探测器			
光学能量卡计			
4 π 能量卡计			
光学探针		630nm, 100ps	
紫外探针全息干涉仪		在建	
粒 子 诊 断	法拉弟杯		
	等离子体能量卡计		
	BF ₃ 阵列中子探测器	抗强 X 光干扰	
	塑料闪烁中子探测器		
	液体闪烁中子探测器		
	静电分析离子谱仪	M/Z 分辨~5%	
	90°聚焦快中子谱仪	10keV~1MeV	

烧蚀等重要物理过程. 下面把基础研究、直接 和间接驱动的若干结果略作介绍.

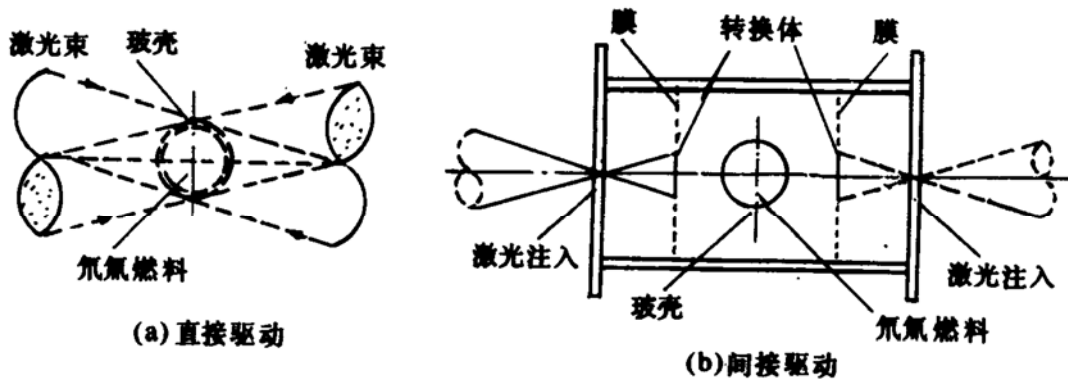


图1 激光聚变实验驱动方式

3.1 基础研究若干结果

3.1.1 激光能量吸收

作为基准,我们研究了金盘靶吸收效率随入射激光功率密度和入射角的变化关系.为抑制反常吸收和超热电子,适合于激光聚变的激光功率密度为 $(3\sim 5)\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$.实验得到在 $5\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 和多路间接驱动感兴趣的 45° 入射条件下,金盘靶对于钹玻璃基频和二倍频激光的吸收率分别为23%和75%.腔靶能量吸收率高于平面靶且随靶腔体积增大而提高.

3.1.2 等离子体堵口效应

为把激光能量有效地注入腔靶和对腔内辐射场特性作出准确诊断,我们分别研究了激光注入孔和腔靶诊断孔边缘等离子体运动造成的堵口效应.

以平面孔靶模拟腔靶激光注入孔,在波长为 $1.05\mu\text{m}$ 的强激光注入金材孔靶和小孔边缘激光功率密度 I 为 $(8.8\times 10^{12}\sim 4.8\times 10^{13})\text{W}/\text{cm}^2$ 条件下,得到堵口速度 V_T 的定标律为 $V_T=10I^{0.3}$, I 和 V_T 分别以 $10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ 和 $10^6\text{cm}/\text{s}$ 为单位^[6].

用软X光三分幅相机(每幅曝光75ps,幅间隔150ps)和门控微通道板12分幅X光相机(每幅曝光200ps,幅间隔66ps)分别观察到特定腔靶激光注入孔等离子体膨胀的时空

过程.

以波长为 $1.05\mu\text{m}$ 的双束激光注入特定腔靶,观察到了诊断孔边缘受腔内X光烧蚀引起的诊断孔缩孔时空分辨图像.辐射温度是表征腔内辐射场特性的关键物理量.在腔X光辐射功率密度约为 $1\times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ 条件下,根据缩孔图像估算,在300ps至等离子体聚心时刻,诊断孔堵口效应对腔内辐射温度测量的影响约为5%至23%.离子聚心后,探测到强的自发发射现象.

3.1.3 辐射场

在装有靶丸的黑腔内建立高温和干净辐射场是实现间接驱动的关键之一.为建立高温辐射场,首先要把激光能量转换为X光能量.实验表明,与平面靶相比,腔靶X光辐射明显增强.这是由于腔壁对散射激光的约束,对离子飞散动能的抑制以及X光再发射等有利于X光辐射增强.

间接驱动靠X光辐射,而辐射热传导对温度 T_R 十分敏感:X光流 $F=\frac{l_R C}{3}\nabla a T_R^4$,其中 C 是光速, a 是黑体辐射常数, l_R 是辐射自由程.由此可见, T_R 是关键物理量.在间接驱动研究中,人们往往把腔内X光辐射场近似看作平衡辐射场,即近似认为辐射场的能谱分布符合普朗克分布,从而可用辐射温度这一物理量唯一地描述辐射场特征.用滤片X

射线二极管阵列亚千能谱仪测 X 光能谱, 进而把它近似看作平衡谱推算辐射温度^[3]. 实验表明, 利用我国神光钽玻璃基频高功率激光装置在黑腔靶内创造了 1.5×10^8 度的辐射环境.

非平衡是激光等离子体基本特征之一. X 光能谱的深入研究揭示和证实了它的非平衡特征. 我们用透射光栅能谱、时、空诊断技术明确地观察到了金靶 X 光辐射能谱具有 O 带、N 带等金元素非平衡特征带谱结构^[4]. 比较了平面靶, 间接驱动靶激光注入口、转换区和内爆区的 X 光能谱. 实验定性证实, 激光直接加热形成的高温低密度冕区以线发射为主, 激光和 X 光混合加热区及准 X 光辐射加热区的非平衡特征线发射形成的带谱依次减弱, 准 X 光辐射加热区趋于温度辐射的物理图像与理论认识. 实验也证实了腔靶对 X 光谱的软化、改造作用, 还初步观察到了能谱随时间的演变过程.

3.1.4 超热电子和非线性过程

强激光与等离子体相互作用通过受激 Raman 散射、共振吸收和双等离子体衰变等过程激发电子等离子体波. 它将经过朗道阻尼过程加速等离子体中速度与波的相速度相同的电子, 从而产生超热电子. 我们测量超热电子产生的韧致辐射—硬 X 光来研究超热电子^[5]; 测量 Raman 散射光等研究非线性过程^[6]. 用 2048 道光学分析仪测得 $1.053 \mu\text{m}$ 激光等离子体非线性相互作用的全光谱, 复盖

了除 SRS 下散射以外的所有非线性过程发射的特征光谱.

研究表明, 共振吸收是平面靶产生超热电子的主要机制. 受激 Raman 散射是腔靶产生超热电子的主要机制. 与平面靶相比, 腔靶超热电子明显增强, 温度增高. 与基频光相比, 二倍频光打靶超热电子能量和温度明显降低. 特定实验研究表明, 腔靶超热电子主要沿轴向运动^[7].

3.1.5 离子运动

离子尤其是快离子耗散能量且破坏靶丸内爆对称性. 观测离子飞行时间谱和研究快慢离子及其抑制技术^[8]. 实验表明, 有机膜对快离子能起抑制作用. 与基频激光相比, 二倍频激光条件下, 快离子“消失”. 高温等离子体的运动伴随着 X 光发射. 探测 X 光时空分辨过程, 观察到了等离子体运动的宏观图像.

3.1.6 辐射烧蚀

以铝膜为样品的辐射烧蚀实验把双束 $1.06 \mu\text{m}$ 强激光束注入特定腔靶, 由腔内强 X 光烧蚀置于腔壁诊断口的铝膜. 我们观测到具有时延和能谱变软特征的铝膜外侧辐射热波. 在 X 光功率密度为 $1 \times 10^{13} \text{W}/\text{cm}^2$ 条件下得到铝介质的质量烧蚀率为 $4.8 \text{g}/\text{cm}^2 \cdot \text{s}$. 又以腔 X 光烧蚀台阶铝膜, 观察冲击波发光信号, 得到了相应的冲击波压力.

3.2 直接驱动

直接驱动靶有爆推和烧蚀两类. 我们采用爆推靶曾于 1986 年实现了氘氟玻壳微球内

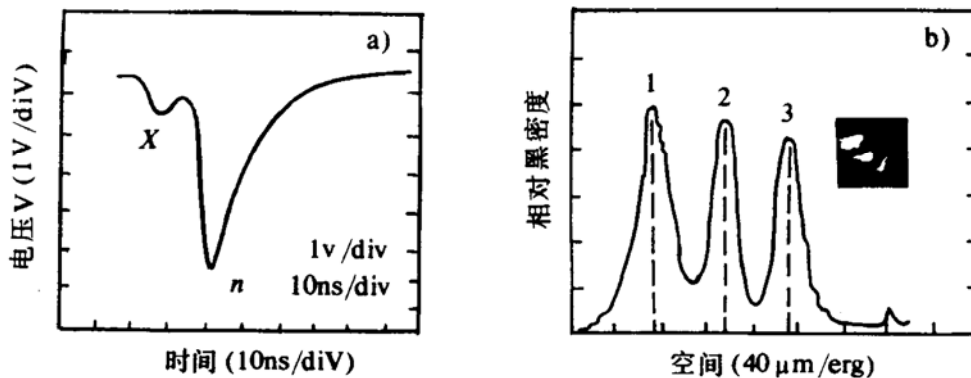


图 2 直接驱动内爆中子波形(a)和压缩图像(b)

爆^[9]. 如图 1(a) 所示实验用双束波长为 $1.06\mu\text{m}$ 的强激光, 双向对称辐照充气氙玻壳微球. 每束激光能量约 100J , 脉宽 $60\sim 100\text{ps}$. 靶丸直径 $80\sim 100\mu\text{m}$, 壁厚约 $0.5\mu\text{m}$. 氙气气压 $(1\sim 15)\times 10^5\text{pa}$, 氙氟比为 $2:1$.

用塑料闪烁探测器测得的典型中子波形和针孔相机测得的靶丸压缩内爆 X 光空间分布分别如图 2(a) 和 (b) 所示. 靶丸体压缩比为 80. 又用针孔 X 光条纹相机观测靶丸 X 光发射时空过程, 得到平均内爆速度为 $3.3\times 10^7\text{cm/s}$. 最高中子产额为 5×10^6 .

3.3 间接驱动

用三种类型、十种不同结构参数的间接

驱动靶, 以能量为 600J/束 , 脉宽约 800ps 的双束钕玻璃基频激光打靶, 于 1990 年和 1991 年稳定重复地实现了间接驱动内爆^[10]. 一类基本靶型如图 1(b) 所示. 各类靶型中子产额相对稳定. 最高中子产额为 3×10^5 . 用 BF_3 阵列和大塑料闪烁探测器测得的典型中子波形如图 3 所示. 在现有条件下, 间接驱动中子产额低, 腔靶强的硬 X 光本底造成了中子测量的困难. 采用电子学门控技术和铅屏蔽措施避免和减小了强脉冲 X 光的干扰并取阵列探测器提高总体灵敏度, 从而实现了间接驱动低产额中子诊断. 上述研究进一步深化了氙氟热核聚变的物理研究.

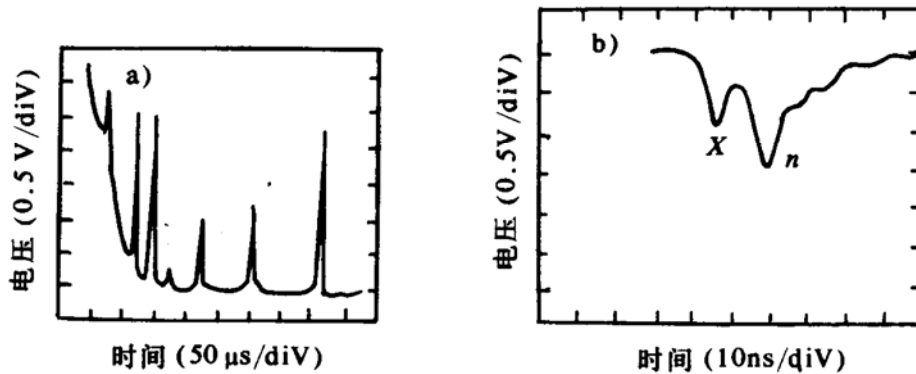


图 3 间接驱动内爆典型中子波形

4 展 望

我们在 ICF 实验研究领域开展了相当规模有自己特色的研究工作. 利用 600J/束 的双束钕玻璃基频激光实现间接驱动在国际上尚无先例.

采用短波长激光打靶有利于能量耦合. 现已开始在我国目前唯一的星光 II 三倍频钕玻璃激光装置上开展物理研究. 我国神光 I 8 束激光装置将于 1997 年建成使用. 与目前国际上大型激光装置相当的 10^{13}W 装置预计 2004 年建成. 我们将进一步发展能谱时空综合型诊断技术和本着加强基础、突出物理本

质; 分解研究、总体检验的原测, 按照物理研究精密化的要求, 有自己特色地反我国激光惯性约束聚变研究引向深入.

我们的研究工作是在王淦昌、于敏、胡仁宇院士的倡导和精心指导下, 在我院、所专家胡思德、陶祖、杜祥琬、彭翰生、付依备、贺贤士、王世绩、华欣生、陈涵德、江文勉、杨建国、赵永宽、温树槐等指导和参与下, 在郑志坚、丁耀南、唐道源、孙可煦、祁兰英、刘忠礼、梅启庸、成金秀、冯杰、丁永坤、何海恩等很多科技人员和工人长努力下完成的. 感谢我所靶工艺研究室和在神光、星光高功率激光装置

上为我们的研究工作付出智慧和辛勤劳动的全体科技人员和工人。

参 考 文 献

1 郑志坚,胡仁宇. 强激光与粒子束 1990,2(1): 1
 2 丁耀南等. 强激光与粒子束,1989,1(3): 248

3 孙可煦等. 强激光与粒子束,1992,4(3): 401
 4 丁耀南等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 147
 5 祁兰英等. 强激光与粒子束,1993,5(3): 415
 6 梅启庸等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 5
 7 李三伟等. 强激光与粒子束,1994,6(3): 400
 8 丁永坤等. 强激光与粒子束,1994,6(1): 85
 9 郑志坚等. 强激光与粒子束,1989,1(2): 139
 10 陈晓峰等. 强激光与粒子束,1992,4(2): 291

Current State of Experimental Study of Laser Fusion in China

Ding Yaonan

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract The diagnostic instruments and some physical results about laser fusion experiments in our laboratory are briefly described. The achievements in direct and indirect driven impulsion performed in China are also given here.

Key Words laser fusion, diagnostic instrument, neutron yield.

(上接 43 页)

又不会使 X 辐射谱形过度变硬;而晶体分光法分光能区宽、对 X 辐射谱形适应性强。

核物理与化学研究所脉冲辐射诊断研究室的同行们都先后参加了本工作。

Physical diagnosis of Characteristics of Transient Pulse Nuclear Radiations

Liu Qingzhao

(Institute of Nuclear Physics and Chemistry, Chengdu 610003)

Abstract For more than 30 years physical diagnostic techniques of transient pulse nuclear radiations have been made in CAEP. In this paper the physical diagnostic techniques and their progress in characteristics of time, energy spectrum and time-energy spectrum of transient pulse neutrons, γ and X-rays are summarized.

Key Words transient pulse nuclear radiations, physical diagnostic techniques, detective systems, pulse neutron, pulse γ radiation, pulse X radiation.