



·惯性约束聚变物理与技术·

激光惯性约束聚变研究中高时空诊断技术研究进展

王 峰, 张 兴, 理玉龙, 陈伯伦, 陈忠靖, 徐 涛, 刘欣城,
赵 航, 任 宽, 杨家敏, 江少恩, 张保汉

(中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

摘 要: 对国内激光惯性约束聚变(ICF)领域高时空分辨技术的最新进展进行了比较全面的介绍。针对热斑诊断时间分辨优于 10 ps、空间分辨优于 10 μm 、能区 10~30 keV 的需求,从光学、X 射线、核诊断和计算成像几个角度,比较系统地介绍了最新的进展。光学领域主要介绍基于泵浦探测技术的全光扫描和全光分幅技术。全光扫描技术的时间分辨可以达到 200 fs,全光分幅的时间分辨可以达到 5 ps,空间分辨可以达到 5 μm 。该系统的主要部件为光学器件,在 ICF 未来的强电磁、强电离环境下有很好的应用前景。X 射线系统主要介绍最近几年发展的高分辨 KB 显微镜,其采用 STTS 构型,可将空间分辨提高到 3 μm ,满足当前高分辨的需求。漂移管技术的时间分辨可以达到 10 ps,作为一种正在发展的技术,对此进行了较为全面的分析。中子成像系统主要介绍了高空间分辨的记录系统以及对应的瞄准技术的进展,其空间分辨可以达到 20~25 μm 。计算成像作为一个全新的分支,最近引起了 ICF 领域的广泛关注。着重介绍了三维光场技术和在高时空分辨领域有很好应用前景的压缩感知超快成像(CUP)技术,对其可能在 ICF 领域中的应用提出了设想。

关键词: 惯性约束聚变; 高时空分辨; 诊断; 全光分幅技术; X 射线诊断; 电子成像技术

中图分类号: TN249

文献标志码: A

doi: 10.11884/HPLPB202032.200136

Progress in high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion

Wang Feng, Zhang Xing, Li Yulong, Chen Bolun, Chen Zhongjing, Xu Tao, Liu Xincheng,
Zhao Hang, Ren Kuan, Yang Jiamin, Jiang Shaoen, Zhang Baohan

(Laser Fusion Research Center, CAEP, P. O. Box 919-988, Mianyang 621900, China)

Abstract: This article reviews the latest developments of high time- and space-resolving diagnostic technique for laser-driven inertial confinement fusion (ICF) in China. Focusing on the needs of hot spot diagnosis with temporal resolution better than 10 ps, spatial resolution better than 10 μm , and energy range of 10–30 keV, we introduce recent progress in optical, X-ray, and nuclear diagnostics, as well as computational imaging. In optical section, we introduce two diagnostics based on the pump detection technique: all-optical scanning, with temporal resolution up to 200 fs, and all-optical framing, with temporal and spatial resolution up to 5 ps and 5 μm respectively. Since the main components are optical, these systems have great potentials to be applied in the strong electromagnetic, ionizing environment of future ICF research. In X-ray section, we introduce a recently developed high-resolution kirkpatrick-Baez (KB) microscope, which adopts the STTS (S and T represent sagittal and tangential directions respectively) configuration and improves the spatial resolution to 3 μm , meeting the current requirements. Besides, we also discuss a developing technology—the drift tube technology, with temporal resolution up to 10 ps. In nuclear section, we mainly introduce the high-resolution recording system of the neutron imaging, with spatial resolution up to 20–25 μm , as well as the progress in the corresponding aiming technique. In addition, we introduce computational imaging, which is a brand new branch attracting growing attention in ICF field. We also emphasize the three dimensional light field imaging technique and compressed ultrafast photography (CUP) technique, and propose their possible applications in ICF field.

Key words: inertial confinement fusion; high time- and space-resolution; diagnostic; all-optical framing; X-ray diagnostic; electronic imaging technology

* 收稿日期:2020-05-19; 修订日期:2020-07-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0403300);国家自然科学基金项目(11805184, 11805178, 11805185);中国工程物理研究院院长基金项目(YZJLX2019011);科学挑战专题项目(TZ2016001);中物院激光聚变研究中心青年人才基金项目(RCFPD4-2020-1)

作者简介:王 峰(1975—),男,博士,研究员,从事激光聚变诊断研究;lfrc_wangfeng@163.com.

激光驱动惯性约束聚变(ICF)研究是当前国际前沿科学中具有挑战性的研究领域,美国、法国、俄罗斯和英国等科技强国纷纷将其纳入国家科技战略研究层面。当前激光驱动 ICF 研究陷入困境,用 1.8 MJ 的激光能量只观测到 10^{16} 中子产额,仅仅是观察到了 α 粒子自加热。这与点火所需的 10^{18} 中子产额还有很大差距^[1-3]。

要破解这个激光惯性约束聚变的难题,主要从两个方向开展攻关:一个是进一步完善物理模型;另一个是发展极端瞬态条件下的诊断技术。完善物理模型,就是将各种低阶和高阶的过程都考虑进去,从而将模拟程序从一维、二维上升到全三维,然后将各阶段的程序与各阶段的实验数据进行比较从而修正,而后得到较高置信度的三维程序,以“预测”各种影响以及三维条件下的“点火悬崖”。美国劳伦斯利弗莫尔(LLNL)实验室研究内爆的 Clark 团队^[4]将相关工作在 APS 报告里做了详细分析。发展极端瞬态条件下的诊断技术,用更加先进的诊断技术去研究以前没有涉足的压力、温度、时间、空间尺度,为更精细地研究物理问题提供强有力的技术支撑,推动物理认识的进步。到目前为止,国际上都是按照这两个方向进行攻关的。

目前国际上 ICF 领域以及相关超高时空分辨领域已有的高时间、高空间分辨的典型诊断设备主要是条纹相机(Streak Camera)、分幅相机(Multi-MCP)、压缩感知超快成像(CUP)^[5]技术、DIXI(Dilation X-ray Imager)^[6-9]技术以及 STAMP(Sequentially Timed All Optical Mapping Photography)^[10]等。表 1 对目前国际上主要的高时空分辨诊断技术及其特点进行了比较。分幅相机技术(Multi-MCP)是比较典型的也是 ICF 领域应用最广泛的高时间、高空间分辨技术。其使用高时间分辨的选通脉冲和高性能 MCP 实现高时空特性。然而其时间分辨只能达到 50~80 ps,典型值为 70 ps,空间分辨约为 30 lp/mm,幅数 16 幅左右。受限于选通脉冲的宽度,其时间分辨很难有更大的提升空间。DIXI 技术是 2017 年左右发展的新型时域放大技术,其主要变化是在 MCP 之前配接一个磁场约束的漂移管,通过电子脉冲的时间漂移放大技术实现 10 ps 量级的时间分辨。其空间分辨 100 μm ,幅数 16 幅左右。但是,漂移管带来空间电荷效应增强,分辨率很低。同时高能电子直接轰击 MCP 导致大量次生电子,使信号的噪声变强,信噪比很差^[9]。条纹相机具有一维空间分辨、一维时间分辨能力。目前最好的时间分辨已经达到了 500 fs,空间分辨为 20 lp/mm。但是条纹相机不具有二维诊断能力,限制了它的应用。单通道 CUP 技术是最近几年最新发展的技术,其利用压缩感知技术,把条纹相机当作分幅相机使用,得到很高的时间分辨,文献报道已有 2 ps 的数据。由于 CUP 技术采用取样技术的特点,空间分辨比较差,约为 100 μm ,幅数可达 30 幅或更多,不满足要求。STAMP 是一个时间分辨非常高的技术,可以达到约 100 fs,空间分辨 10 μm ,幅数 6 幅或更多。但是其使用主动探针的啁啾技术,在 ICF 实验以及很多比较复杂辐射场的环境下,反射信号容易被调制和干扰,造成失真。而且该技术对设备要求与调试要求很高,使用方式很复杂,不适合 ICF 的大型激光装置比较恶劣的环境。

表 1 国际上常见的高时间分辨的几个技术状态比较

Table 1 Common techniques for high temporal resolution purposes

diagnostic equipment	radiation	temporal resolution/ps	1D/2D	frame
Multi-MCP	optical/X-ray	50~80	2D, 33 μm	~16
DIXI	X-ray	10	2D, 100 μm	~16
Streak Camera ¹⁾	optical/X-ray	0.5	1D, 50 μm	—
CUP	optical/X-ray	2	2D, 100 μm	20~30 or more
STAMP ²⁾	optical	~0.1	2D, 10 μm	>6

Note: 1) The product introduction currently available for fs streak camera comes from Hamamatsu Photonics. As the product needs to be triggered by fs pulses, it has not been applied in ICF researches internationally and domestically. ; 2) The Sequentially Timed All Optical Mapping Photography (STAMP) technology, as a quite new idea, can help and learn from the overall technical system of ICF. However, it is oriented to basic and laboratory research, not fit for large ICF facilities.

本文对目前国内 ICF 领域正在发展的部分高时空分辨诊断技术进行总体性的介绍,以期达到对该领域的工作者提供思路,激发灵感的目的。按照目前 ICF 诊断系统的技术框架,从光学、X 射线、核诊断以及计算成像几个方向介绍了该领域的进展。

1 基于泵浦探测技术的抗干扰型高时间分辨全光诊断技术

1.1 需求和应用背景

利用大型激光器开展惯性约束聚变(ICF)研究,既能为极端条件高能量密度物理研究提供平台,也能为最终实

现点火、掌握可控核聚变确定关键技术途径。激光聚变的约束过程一般为数 ns 时间,期间包含着多个复杂的物理过程。通过对这些过程中产生的包括光学信号、X 射线信号的诊断或测量,能够揭示此类过程中蕴含的物理效应。但 ICF 通常的物理过程持续时间很短,部分关键过程如内爆热斑,仅持续 100~200 ps,要求诊断系统具备 1~10 ps 的高时间分辨能力。而极高的聚变中子产额及极强的电磁辐射环境则要求诊断系统具备强大的抗干扰能力。现有的含时诊断技术包括条纹扫描技术、分幅成像技术和电子漂移管技术,通常依赖电子学方法实现高时空分辨记录。但依据此类技术所形成的电子学诊断系统结构较为复杂,易受电磁、电离辐射强干扰影响,造成测量失真、失准甚至部件损坏。因此,通常要设计抗干扰结构来保护诊断系统;然而随着激光器输出能量的增加,这类结构的复杂程度会明显增加但防护效果又不能完全保证,成为限制 ICF 诊断技术进一步发展的主要瓶颈。

1.2 泵浦探测技术简介

泵浦探测技术是一种传统的超快时间分辨测量技术,常用来探测物质内部物理、化学变化的瞬态过程,特别是对物质激发态载流子动力学过程的研究。它利用一束短脉冲光(泵浦光)在待测材料中引发瞬态物理过程,再用另一束时间关联的短脉冲光(探针光)入射并穿过材料,从探针光的相位、强度等变化上测量材料的瞬态物化过程。如果将传统泵浦探测技术中的泵浦光替换成 ICF 物理过程中的光学或 X 射线,并使用已知或可标定响应性质的非线性超快响应转换材料,那么从探针光的相位、强度等变化就可以反映泵浦信号的含时信息;进一步地,通过设计合理的全光学诊断光路结构,就能通过简单的探测设备如 CCD 相机等,以高时空分辨能力记录 ICF 实验中超快物理过程。由于诊断结构中的核心结构为全光学光路,信号转换和传输不受电磁电离辐射的干扰,而使用的记录和探测设备简单易于屏蔽,因此这种全光诊断系统抗干扰能力强,有望破除电子学系统带来的瓶颈问题,为

ICF 诊断提供一条崭新且可靠的新途径。

1.3 基于泵浦探测技术的抗干扰型高时间分辨全光诊断技术

1.3.1 测量单点脉冲行为的高时间分辨全光诊断技术

ICF 研究中单点脉冲行为测量的全光诊断技术以传统的 Z 扫描测量方法为基础,以高精度光束分割技术为核心技术,如图 1 所示。

诊断技术的具体光路工作流程为:探针激光通过准直扩束入射至一个核心环形台阶反射镜上;通过精心设计加工,台阶反射镜的高度差可小至 10 μm ,单镜面宽度为 100 μm ;当脉冲宽度为数百 fs 的探针光经若干台阶反射镜后,就产生了不同延时时间的反射脉冲光序列,各序列光束间的时间延迟为 67 fs。各光束经过由 L1 和 L2 组成的 4f 系统,先经过 L1 会聚至 X 射线转换材料的单点区域;与此同时,与探针激光具备同步时间关系的打靶激光打靶产生 X 射线经过针孔或其他会聚器件达到样品区域,使样品对探针光产生折射率或吸收率的变化。探针光经过样品区域后经过 L2 准直后被 CCD 等进行记录,产生环形光斑测量结果,如图 2 所示,其中的吸收率发生变化的台阶区域宽度对应的就是 X 射线作用过程,理论上可达到的最佳时间分辨率应为序列脉冲的时间延迟量,但应指出的是,这个指标也受探针光脉冲宽度的影响,探针光脉冲宽度和序列光束的间隔时间需要较好的匹配;用于超短激光打靶测量时,可将超短激光分光,分别作为泵浦光和探针光,方便保持同步关系。

1.3.2 具备一维空间分辨的高时间分辨全光扫描诊断技术

一维扫描全光诊断技术以平面波导为探针光载体、以金属掩膜产生波导内微型偏转棱镜、以高动态范围面阵相机为记录器件,其基本光路结构如图 3 所示。其基本原理是泵浦激光在非线性光学材料制作的平面光波导中产生了载流子使得折射率发生改变,通过金属掩膜的作用使得波导不同区域产生了不同浓度的折射率区域,形成了微型棱镜光学结构。当待测信号光经由成像系统和柱透镜会聚并耦合进入平面光波导时,调节泵浦光与信号光的作用时间,使得不同时刻进入的探针光经过的微透镜阵列有所差异,最终使其偏转角度不同,从而将时间维度上的信息转换为一维空间维度的信息。由于光波导本身传光的性质,该诊断技术适合于可见光波段的超快过程测量。

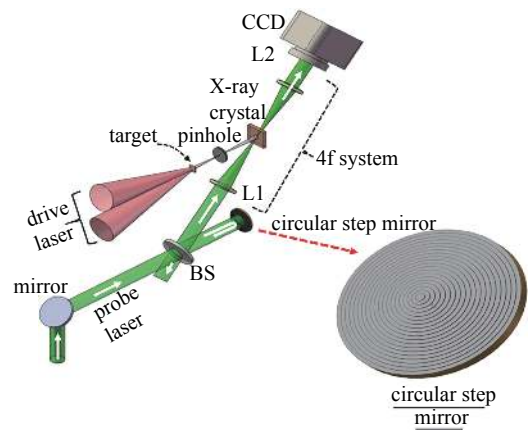


Fig. 1 Schematic diagram of all-optical diagnostic technology for single point pulse behavior measurement

图 1 单点脉冲行为全光诊断技术示意图

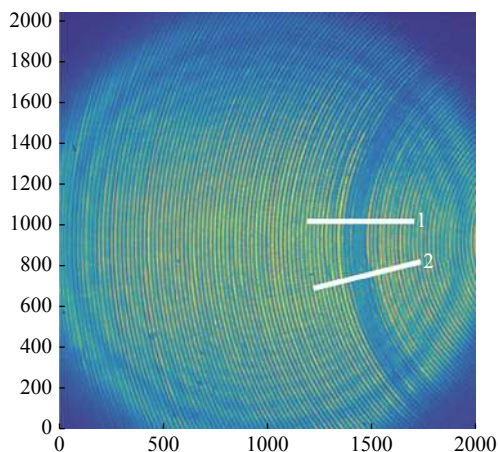
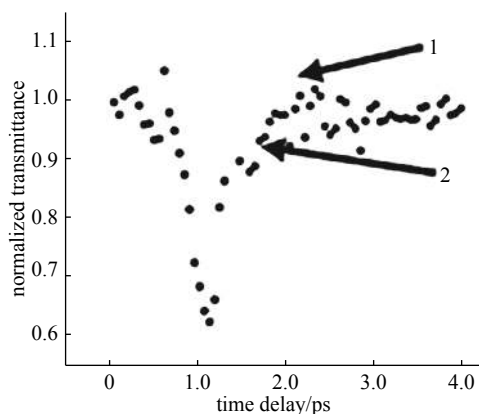


Fig. 2 Typical measurement results of single pulse transient behavior

图 2 单脉冲瞬态行为的典型测量结果



1.3.3 具备二维空间分辨的高时间分辨全光分幅成像诊断技术

全光分幅成像诊断技术以多台阶微型反射镜光束分割、以成像方式耦合泵浦及探针信号于 X 射线转换材料、并利用大动态范围面阵相机为记录器件,其基本光路结构如图 4 所示。具体工作流程为:短脉冲泵浦光经扩束准直后经台阶反射镜反射,经过微透镜阵列成像后将反射镜镜面成像至 X 光转换材料;与此同时,打靶产生的 X 射线信号经过 X 射线成像系统(弯晶、针孔、KB 镜等)成像至 X 光转换材料的特定区域并改变该区域对泵浦光的吸收率,并使镜面像与 X 射线斑图重合。由于台阶反射镜具备有光束分割及延迟能力,因此实际产生了多个具有不同曝光时段的泵浦光信号,经过对称的微透镜阵列及台阶反射镜后,不同镜面反射的光束携带了 X 射线斑图信息,经过成像镜组二次成像后使得重合区域为 CCD 记录,形成阵列式的泵浦光图像,均为不同时刻的 X 射线阴影区图像,从而具有了二维空间分辨。在光学系统方面,由于台阶反射镜对光束的分割和延时取决于间隔台阶厚度的差异,当泵浦光脉冲足够短时,可认为其时间分辨受限于台阶反射镜的光程差,这个最佳分辨目前能做到百 fs 级;在技术的整体方面,时间分辨还受限于材料的响应速度,目前快响应转换体的时间响应能好于 5 ps(近期试制的某组分 CdSe 材料转换体的时间响应曲线 FWHM 为 1 ps 左右,如图 5 所示),所以全光分幅成像诊断的时间分辨预计至少会好于 5 ps。参

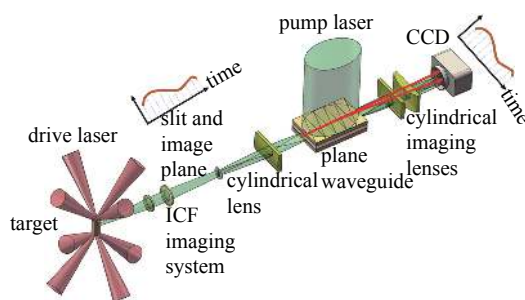


Fig. 3 Optical path diagram of high time-resolving all optical scanning diagnostic technology based on photorefractive effect

图 3 基于光折变效应的高时间分辨全光扫描诊断技术

考美国 NIF 上 DIXI 的设计思路,用大放大倍数的 X 射线成像系统将热斑图像成像到转换体上,可以将物方空间分辨提高到 $5 \mu\text{m}$ 水平。这个数据对大多数热斑高精度诊断来说,都是够用的。

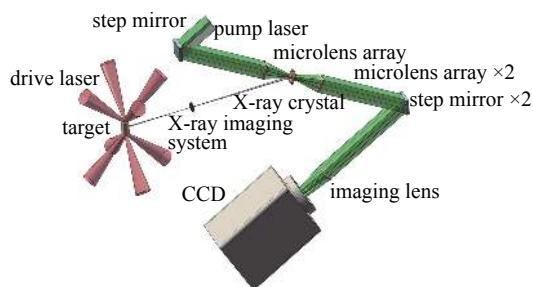


Fig. 4 Schematic diagram of all-optical framing imaging diagnostic technique

图 4 全光分幅成像诊断技术示意图

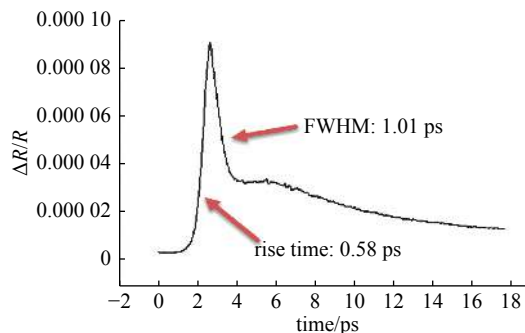


Fig. 5 Time response data of all-optical frame imaging diagnostic converter

图 5 全光分幅成像诊断转换体时间响应数据

考美国 NIF 上 DIXI 的设计思路,用大放大倍数的 X 射线成像系统将热斑图像成像到转换体上,可以将物方空间分辨提高到 $5 \mu\text{m}$ 水平。这个数据对大多数热斑高精度诊断来说,都是够用的。

2 KB 显微成像诊断技术简述

在激光驱动惯性约束聚变(ICF)中,通过接近一维内爆方式形成高品质热斑是在有限激光驱动能量下实现聚变点火的关键过程。但实际实验中,由于驱动不对称性、靶丸表面缺陷等因素,热斑的不对称性和壳层物质混入热斑的混合效应仍是目前制约 ICF 内爆产额进一步提升的重要因素。考虑到热斑的空间尺度仅约 $50\ \mu\text{m}$, 发展具有高空间分辨能力的热斑 X 射线成像诊断技术,对分析热斑形状不对称性和开展热斑对称性调控物理设计至关重要;进一步,当热斑成像高分辨诊断技术具有一定能量分辨能力时,还可以进一步根据不同能量的热斑图像分析热斑混合效应。传统的 X 射线针孔成像诊断技术通常空间分辨仅为约 $10\ \mu\text{m}$ 水平,集光立体角约 10^{-9}sr ,对于 $50\ \mu\text{m}$ 尺度的 ICF 热斑成像在空间分辨和中高能 $10\sim 30\ \text{keV}$ X 射线能区的集光效率均显不足。近年来包括美国 NIF、OMEGA 和法国 LMJ 在内的各大激光聚变装置,都建立了基于 X 射线掠入射高分辨成像技术的先进 X 射线显微成像诊断系统^[1-14],其中 KB 显微成像是广泛采用的一种技术。我国神光装置上,近几年也围绕热斑高分辨成像诊断需求,发展了多种 KB 显微成像系统,并在 $100\ \text{kJ}$ 级激光驱动内爆实验中实现了热斑的高分辨 X 射线成像测量,为热斑对称性调控物理设计提供指导数据。与同济大学合作建立了全反射式宽能带 KB 显微成像诊断系统和多层膜准单能响应 KB 显微成像系统,并正在发展大视场 KBA 显微成像技术和 STTS 型四镜结构 AKB 显微成像技术等多镜结构先进 KB 显微成像系统,并正在根据内爆热斑状态特征发展多种新型 KB 显微成像技术。

2.1 全反射式宽能带 KB 显微成像系统

全反射式宽能带 KB 显微成像系统的每一个成像通道由两块正交排布的超光滑柱面镜形成,采用水平和竖直的两组对向放置反射镜形成四通道成像结构,成像光路和光学参数如图 6 及表 2 所示,镜框中心分别放置高面型精度 H 型锥芯来控制反射镜姿态^[15]。该系统采用 X 射线全反射镜结构设计,反射镜采用超光滑 Si 基柱面镜,表面蒸镀数十 nm 厚度的 Pt 反射膜,反射镜的曲率半径设计为 $50\ \text{m}$,曲率半径加工误差小于 2% ,表面粗糙度小于 $0.3\ \text{nm}$ 。前后两块反射镜的中心成像光路 X 射线掠入射角分别为 0.4375° 和 0.4625° ,全反射 X 射线的截止能量约 $11\ \text{keV}$,通过配合使用 Fe、Ni 和 Al 等滤片,可以实现多个不同能带的 X 射线成像,如图 7(a) 所示。对于 $4\sim 9\ \text{keV}$ 能区 X 射线,掠入射角远离全反射截止角度,有利于在成像视场内不同空间位置的 X 射线反射率差异调控。 $6\ \text{keV}$ 的 X 射线反射率分布如图 7(b) 所示,在 $400\ \mu\text{m}$ 视场范围内反射率差异小于 10% 。全反射式 KB 成像系统具有宽能带响应、空间平响应等特征,有利于提高多个通道测量图像的形状一致性,并降低成像系统瞄准精度要求。如图 8 所示,全反射

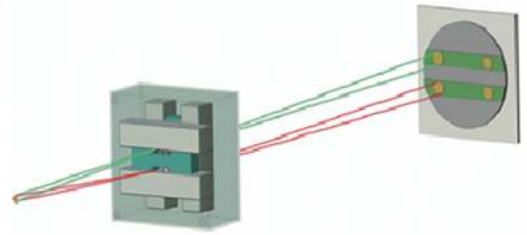


Fig. 6 Optic design of the reflective KB microscope

图 6 全反射式宽能带 KB 显微成像系统光路结构

表 2 反射式宽能带 KB 显微成像系统光学参数

Table 2 Parameters of the reflective KB microscope

reflector	curvature radius/m	magnification	grazing incidence angle/ $^\circ$	mirror length/mm	object distance/mm	image distance/mm
horizontal	50	21	0.437 5	12	200	4200
vertical	50	19.8	0.452 5	12	212	4188

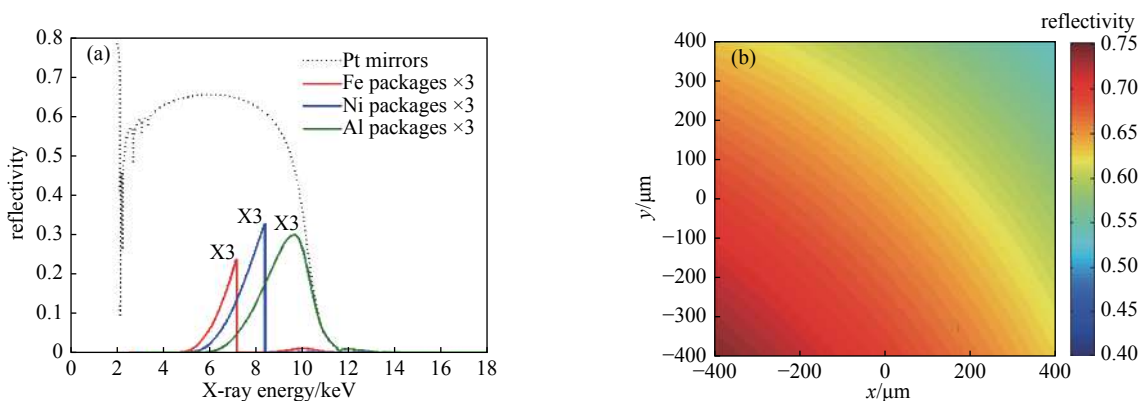


Fig. 7 (a) Energy responses of the KB microscope and (b) the reflectivity spatial distribution of $6\ \text{keV}$ X-ray

图 7 (a) 成像系统能量响应曲线和 (b) $6\ \text{keV}$ X 射线反射率空间分布

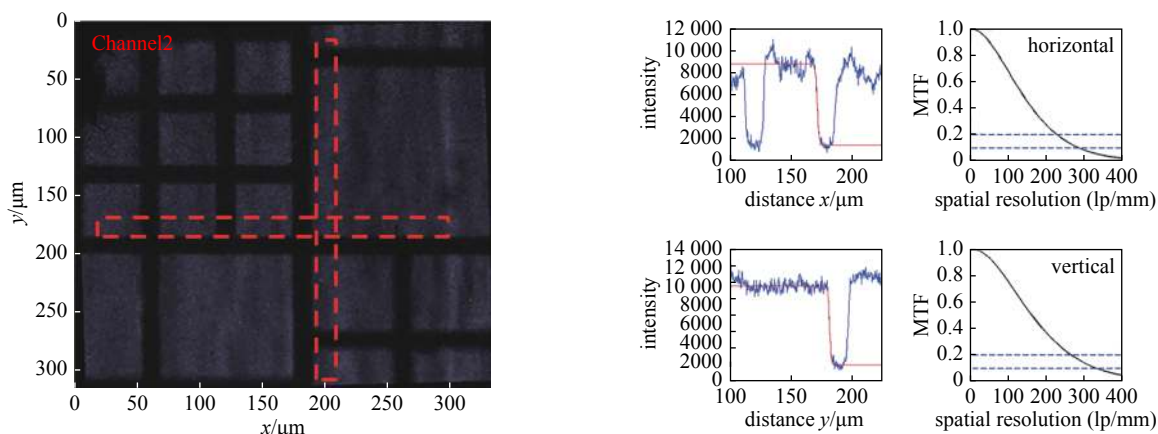


Fig. 8 Backlit image of the four-phase mesh and the analysis of the spatial resolution of full reflection KB imaging system

图 8 全反射式 KB 成像系统的四象限网格成像图和空间分辨分析

式 KB 成像系统利用 Fe 靶 6.4 keV 特征线 X 射线面光源进行了四象限 Au 网格背光成像测试, 网格四个周期分别为 60.6, 80, 120.8 和 159.6 μm , 根据网格肋线阴影图像 MTF 分析, 成像视场中心区空间分辨约 4 μm 。

全反射式 KB 成像系统已广泛应用于神光装置 100 kJ 激光驱动内爆热斑形状诊断, 主要使用 Fe 滤片组 (20 μm Fe、50 μm Be 和 25 μm Al) 测量 6~7 keV 能区的热斑图像。图 9(a) 是 40 kJ 激光驱动玻璃壳爆推靶 (540 μm 直径、D₂ 燃料) 的某一通道热斑图像, 四个成像通道热斑图像形状一致性优于 96%。热斑图像可清晰分辨热斑界面, 推算得到爆推靶收缩比仅为 4 倍。图 9(b) 和图 9(c) 是 80 kJ 激光间接驱动 CH 壳靶丸内爆热斑图像, 白色轮廓线为

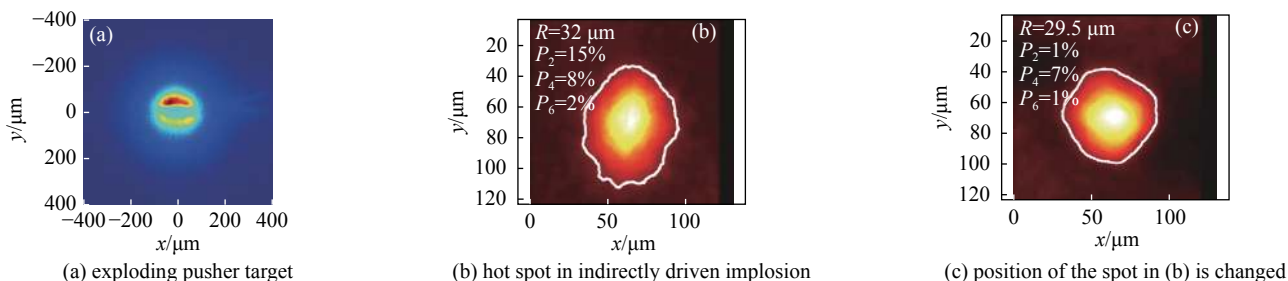


Fig. 9 Measured hot spot images in the exploding pusher target and the indirectly driven implosions

图 9 全反射式 KB 成像系统测量的直接驱动爆推靶热斑和间接驱动内爆热斑

热斑强度 25% 等高线, 全反射式 KB 成像系统较清晰地分辨直径 60 μm 的热斑中的结构分布, 通过对轮廓线的勒让德多项式拟合可获得热斑 P₂ 和 P₄ 不对称性分量, 并观察到移动激光光斑位置对调控热斑对称性的改善效应。

2.2 多层膜准单能响应 KB 显微成像系统

多层膜准单能响应 KB 显微成像系统的每一个成像通道采用一组正交放置的球面超光滑反射镜, 每块反射镜表面蒸镀由 nm 级厚度 W 和 C 材料层交替组成的人造多层膜结构, 在保持 KB 显微成像技术的高空间分辨和高集光效率的同时, 实现成像图像的能量分辨能力。神光装置采用串联反射镜结构, 研制了一套 8 通道多层膜 KB 显微成像系统^[16], 用于

(8 \pm 0.4) keV 能区的热斑 X 射线成像诊断, 成像光路和光学参数如图 10 和表 3 所示, 每一级反射镜之间仍采用高面型精度 H 型锥芯来控制反射镜姿态, 通过 P1-P2 和 P2-P3 组合分别形成两组四通道成像, 得到 8 个成像通道。反射镜 P1、P2、P3 表面的 W-C 多层膜周期厚度与中心光路 X 射线入射角度相匹配, 多层膜反射 X 射线的角度带宽约 0.11°。根据反射镜实际膜系参数计算得到的各通道 X 射线反射率能量响应曲线如图 11(a) 所示, 成像系统在 8 keV 附近具有准单能响应特征, 能带宽度约 0.78 keV。该系统测量的 1000 目 Ni 网格背光成像图如图 11(b) 所示, 背光源为 2 kJ、1 ns、 ϕ 500 μm 激光束驱动 Cu 靶的类 He 线发射 X 射线, 该系统视场中心的空间分辨率优于 5 μm 。

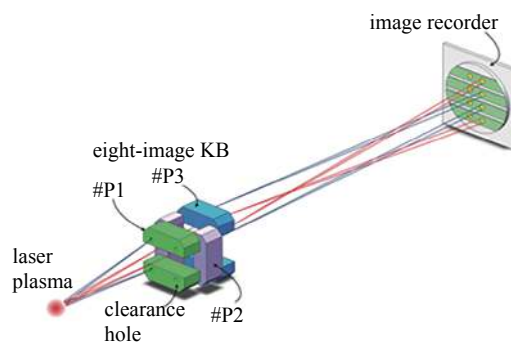


Fig. 10 Optics design of the multi-layer coated quasi-monenergetic response KB microscope

图 10 多层膜准单能响应 KB 显微成像系统光学结构

表 3 多层膜单能响应 KB 显微成像系统光学参数

Table 3 Parameters of the multi-layer coated quasi-monenergetic response KB microscope

reflector	curvature radius/m	magnification	grazing incidence angle/(°)	mirror length/mm	object distance/mm	image distance/mm
P1	19.5	20	1.175 4	10	210	4200
P2	21.0	19.045	1.140 7	10	220	4190
P3	19.5	18.174	1.281 2	10	230	41801

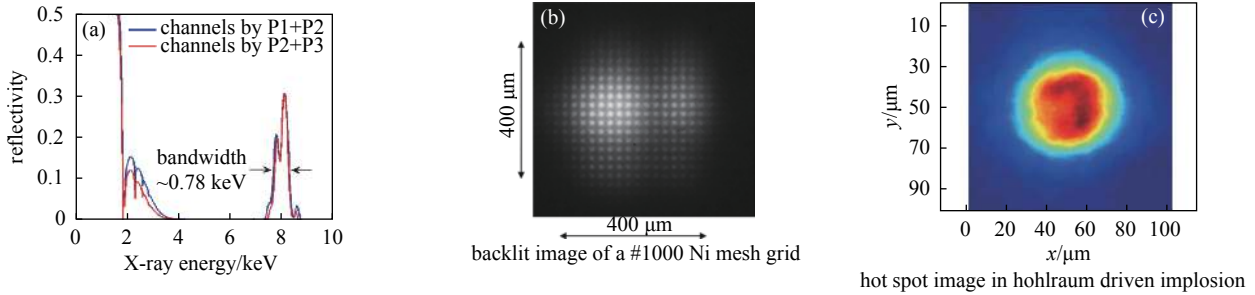


Fig. 11 Throughout response of the multi-layer coated KB microscope (a) and the backlit image of an 1000# Ni mesh (b) and the hot spot image in the hohlraum driven implosion (c)

图 11 (a)多层膜准单能响应 KB 显微成像各通道反射率特征(b)2 kJ/1 ns 激光驱动背光的 1000 目 Ni 网格成像(c)两端黑腔驱动内爆热斑成像由于多层膜反射镜角度带宽的限制,该系统的有效视场范围相对较窄,在热斑成像实验中需要实现较高的瞄准精度。图 11(c)是方波激光驱动两端黑腔的内爆热斑图像。

2.3 多镜结构先进 KB 显微成像系统

传统 KB 显微成像系统的空间分辨和有效视场范围主要受到单球面镜或柱面镜的成像光轴上像差和轴外像差的限制。为进一步提升 X 射线显微成像的空间分辨和高分辨视场范围,目前正在发展基于多镜结构的先进 KB 显微成像系统,包括大视场 KBA 显微成像系统和 STTS 型四镜结构 AKB 显微成像系统。

KBA 显微成像系统主要用于扩大高分辨成像视场范围,其成像原理是在每一个成像维度均放置两块球面反射镜,第一块为场镜,第二块为光阑镜,通过双镜成像对离轴物点的像差进行修正,如图 12 所示。KBA 显微成像系统的反射率随着反射镜数量增加而有所下降,但高分辨成像视场有效范围可扩展至 1 mm 以上,对流体力学不稳定性背光成像和内爆靶丸缺陷扰动流体增长成像等物理实验具有较好的应用前景。我国神光装置上研制了一套 KBA-KB 混合编组成像系统对 KBA 成像技术进行验证^[17],即在子午成像方向采用双镜 KBA 成像结构,在弧矢方向仍保留单镜 KB 成像结构,如图 13(a)所示,子午镜物距为 225 mm、像距 4.5 m、曲率半径 62 m、场镜镜长 30 mm、光阑镜镜长 15 mm,弧矢镜物距为 252 mm、镜长 15 mm、曲率半

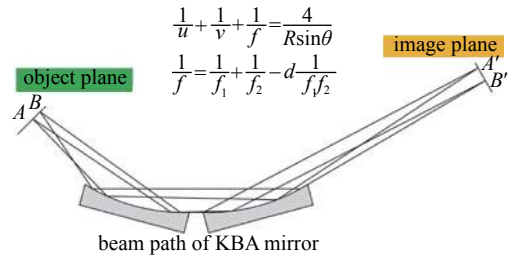


Fig. 12 Schematic diagram of imaging principle for each imaging dimension of KBA micro imaging system

图 12 KBA 显微成像系统每一成像维度的成像原理示意图

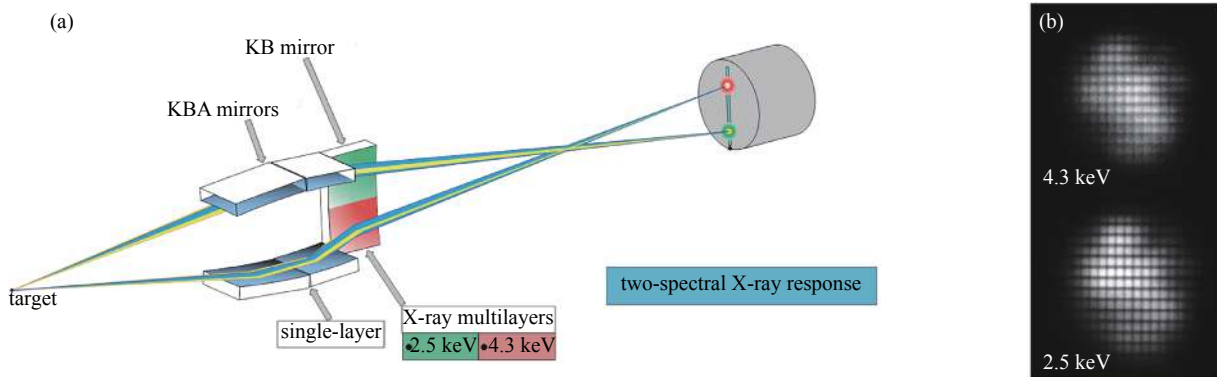


Fig. 13 (a) structural diagram of dual channel KBA-KB imaging system; (b) the backlit image of a 600# Au mesh

图 13 (a)双通道 KBA-KB 成像系统结构示意图(b)600 目 Au 网格背光成像

径 22 m。为实现成像能点的选择, 弧矢镜采用分区镀膜技术, 上半区采用 Cr/C 多层膜对 2.5 keV 附近能区成像, 下半区采用 W/B₄C 多层膜对 4.4 keV 附近能区成像。图 13(b) 是 KBA-KB 两个成像通道对激光驱动 Mo 和 Sc 背光的 600 目 Au 网格成像, 子午 KBA 镜成像视场比弧矢 KB 镜视场显著增加, 子午成像视场在整个激光光斑发光区 (~600 μm) 均能清晰成像, 预期当背光源面积增加后仍能在 1 mm 范围内实现较高成像质量。根据网格图像, KBA-KB 显微成像视场中心区间分辨优于 5 μm, 初步验证了 KBA 显微成像应用于大视场高分辨背光成像诊断的可行性。

AKB 显微成像系统预期可实现中高能 X 射线显微成像空间分辨的显著提升, 如图 14 所示, 两个成像维度 (S 方向和 T 方向) 分别采用双曲面镜和椭圆面镜组合的成像结构实现对轴上像差抑制和轴外像差降低。目前正在发展的 AKB 成像系统采用两块双曲面镜和椭圆面镜串联组合结构, 即下图的 STTS 结构 (S 方向双曲面镜、T 方向双曲面镜、T 方向椭圆面镜和 S 方向椭圆面镜), 实现两个成像维度的等效物像距、放大倍率和空间分辨比较接近的光学设计。S 方向物距设计为 195 mm、放大倍率 23.9, T 方向物距设计为 210 mm、放大倍率 25。前三块反射

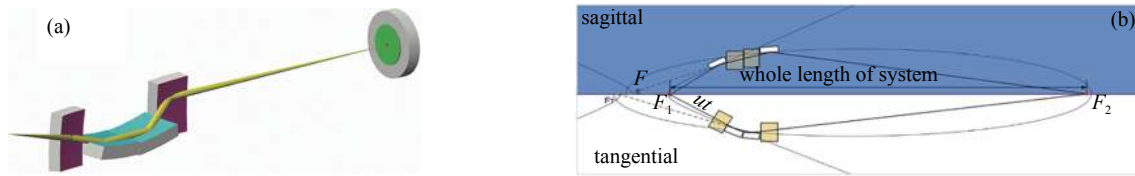


Fig. 14 (a) Structural diagram of the AKB imaging system; (b) optics diagram of the AKB imaging in sagittal and tangential directions

图 14 (a) AKB 成像系统结构示意图 (b) 弧矢方向和子午方向的 AKB 成像光路示意图

镜采用全反射单层 Pt 膜以提高 X 射线反射率, 掠入射角为 0.45°, 最后一块反射镜采用 W/Si 周期多层膜实现 8 keV 附近能区的准单能成像, 掠入射角为 1.04°。目前该系统即将完成研制, 根据反射镜实际参数的成像模拟结果, 预期可实现 400 μm 视场范围内空间分辨优于 3 μm。

高空间分辨 KB 显微成像诊断技术已经逐渐成为神光装置聚变物理实验中的重要诊断技术途径, 在 ICF 内爆热斑状态诊断和流体力学不稳定性增长诊断展示出了显著技术优势。随着 ICF 内爆物理研究对热斑界面细节空间结构关注度的提升, 热斑 X 射线发射能谱空间分布的诊断需求, 靶丸密度升高对高能 X 射线成像的需求以及热斑三维不对称性诊断等新的诊断需求逐渐凸显。神光装置上发展的 KB 显微成像诊断技术目前正在朝着更高空间分辨能力、多能点 X 射线显微成像能力、高能区 X 射线显微成像技术和基于多视角测量的热斑三维重建方法等方面不断努力。

3 球面弯晶单能成像技术

晶体具有固定的晶格排列, 能够对满足 Bragg 条件的 X 射线进行衍射, 因此晶体是天然的 X 射线单色器, 广泛应用于同步辐射等 X 射线源的单色器设计和高能量密度物理实验中光谱诊断测量。常用的石英、硅等单晶薄片, 具有一定的延展性, 通过特定的工艺, 能够形成不同曲面面型的弯曲晶体, 其中球面面型的弯晶能够实现 X 射线的二维聚焦功能, 不仅可以用于高效率光谱测量, 而且能够用于单能的高分辨、大视场成像测量。

球面面型的弯曲晶体是单能成像技术的核心元件。与用于光谱测量的弯曲晶体不同, 用于成像的球面弯晶对整体面型精度的要求更高。成像型球面弯晶面型精度控制包括大尺度曲率半径的一致性和小尺度面型畸变控制。大尺度曲率半径的一致性会影响不同区域 X 射线聚焦的实际位置, 从而影响成像设计, 引入更大的一级像差; 小尺度面型畸变会影响局域区域的成像质量, 基于球面弯晶的单色成像系统通常采用微点光源大收光角设计, 在这种排布设计下, 样品的不同位置利用球面弯晶的不同区域进行衍射成像, 晶面微小的形变会导致图像对应区域的畸变。高精度成像型球面弯晶的制备关键在于均匀面型的压弯控制和形貌保持技术。目前, 神光系列装置上的球面弯晶单色成像诊断系统, 已采用自研的成像型球面弯晶作为成像元件。中物院自研球面弯晶及激光成像测试结果如图 15 所示。

球面弯晶单能成像技术采用球面镜成像原理。通过成像排布的设计, 能够实现不同的成像方式, 进行一维、二维背光和自发光成像应用。在 ENEA 研究所 Hercules 激光装置^[18]、NRL (Naval Research Laboratory) 实验室的 Nike KrF 激光装置等小型激光装置上^[19], 演示了基于球面弯晶的不同成像排布和成像原理。受限于激光和靶室排布, 球面弯晶单能成像技术应用于大型激光装置, 在背光源距离、成像角度选择上存在很强的约束, 同时需要考虑打靶碎片等对晶体的损伤等因素。基于背光成像的原理, 我们推导出背光排布下球面弯晶成像系统的空间分辨与

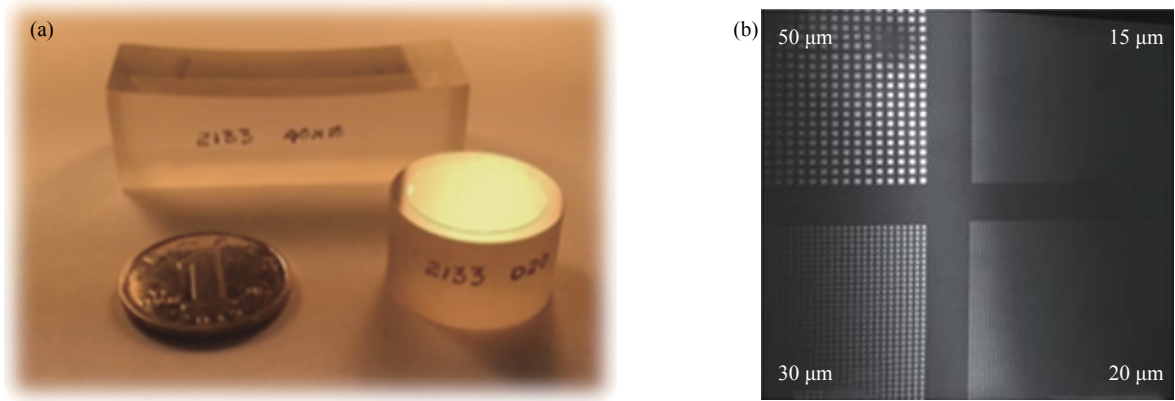


Fig. 15 (a) Spherically bent crystal samples fabricated by LFRC and (b) the test result at laser facility

图 15 (a) 中物院激光聚变研究中心自研球面弯晶及 (b) 激光装置成像测试结果

背光源尺寸、背光源距离以及成像排布的解析关系^[20], 用于成像系统在不同实验应用场景下的优化设计^[21]

$$\sigma_m = \left| \frac{aR \sin \theta - 2ab + bR \sin \theta}{2pb - (p+b)R \sin \theta} \right|$$

$$\sigma_m = \left| \frac{aR - 2ab \sin \theta + bR}{2pb \sin \theta - (p+b)R} \right| \times \frac{d_s}{2} \quad (2)$$

其中, p 是背光源距离, d_s 是光源直径, a 是物距, b 是探测器

位置, θ 为 Bragg 角, R 是晶体曲率半径。常规实验设计下, 成像能点和球面弯晶曲率半径是确定的, 激光装置打靶约束下, $p-a$ 通常设置为 20 mm, 利用优化关系, 可以通过对光源大小、探测器位置和物距设置, 实现测量所需的放大率、空间分辨的优化^[22]。

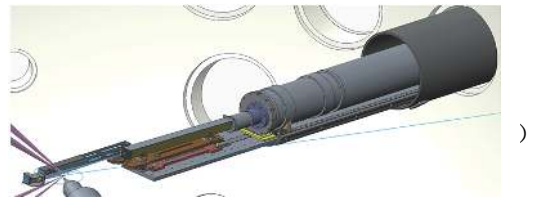


Fig. 16 Diagram of the monochromatic imaging system with spherical crystal installed on the DIM

图 16 诊断平台搭载球面弯晶单能成像系统结构示意图

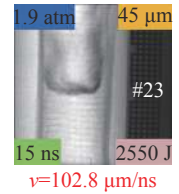
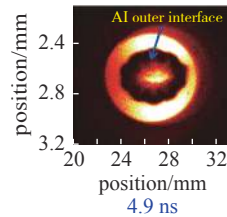
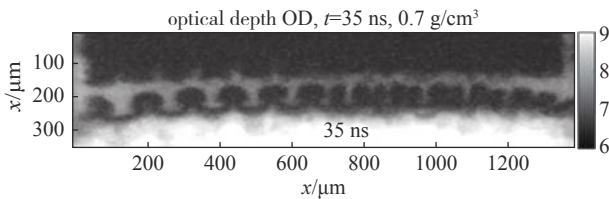


Fig. 17 2D radiography applications of the monochromatic imaging system with spherical crystal

图 17 球面弯晶单能成像系统应用于二维背光成像测量结果

如图 16 所示球面弯晶单能成像系统作为 X 射线显微成像系统, 利用高的放大倍数, 实现对样品区域复杂等离子体环境的高分辨成像测量, 获得精细的结构和分布信息, 如图 17 所示。高精度的系统瞄准以及稳定的姿态控制保障了成像结果的精度和质量。通过模块化设计、一体化组装以及高精度复位设计, 球面弯晶单能成像系统可以搭载在诊断平台上, 实现稳定、可靠的成像测量。

球面弯晶单能成像系统应用于二维背光成像测量, 能够获得约 1 mm 视场, 5 μm 均匀空间分辨的二维准单能图像。通过成像能点优化, 能够提升微小扰动界面、冲击波波阵面透视成像的衬度, 并且给出高精度的密度反演结果。现阶段已经广泛应用于神光系列装置流体学不稳定性实验研究中, 成为常规诊断设备, 开展平面扰动样品、柱几何收缩几何扰动增长以及辐射冲击波轨迹等实验测量。

球面弯晶单能成像系统应用于一维背光成像测量, 通过探测器位置优化, 能够在空间维度获得比二维成像更

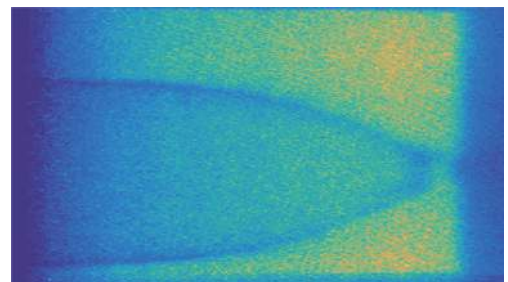


Fig. 18 Implosion trajectory measurement image by the monochromatic imaging system with spherical crystal

图 18 球面弯晶单能成像系统应用于内爆压缩流场测量结果

高的空间分辨。与条纹相机配合,可以实现运动轨迹的测量。2012年,在神光II激光装置上,首次应用于惯性约束聚变内爆压缩流线的测量,获得单能内爆压缩流线图像^[23],如图18所示。通过对系统的不断优化,降低了背光光谱分布影响,图像信噪比提升至优于5:1,单能成像系统测量内爆速度不确定度优于5%。

4 电子漂移技术

X射线分幅记录技术是激光惯性约束聚变(ICF)研究中重要的诊断技术之一。在物理实验中,配接简单的针孔成像^[24],即可实现对X射线二维分幅成像能力,用于研究黑腔内等离子体运动以及内爆压缩过程等;配接具有高空间分辨成像能力的KB显微成像^[11]或弯晶成像^[20],即可实现对研究对象的二维高空间分辨分幅照相功能,可用于内爆过程中的热斑形貌演化诊断等。传统的X射线分幅照相技术,通过光阴极将X射线转化为光电子信号,然后依靠行波脉冲对MCP依次选通实现X射线的二维分幅成像功能^[24],该技术空间分辨约为30 μm ,时间分辨为60 ps。然而,随着美国NIC点火攻关计划的失败,需要对之前预估过低的不稳定性过程,尤其是内爆阻滞后期混合状态及热斑形貌等短时间尺度的物理过程(~ 100 ps)开展深入研究。为了对此类物理过程进行精细诊断及分析,亟需发展时间分辨能力更优的X射线时空诊断能力。

受限于当前电子学器件的技术发展现状,依靠传统方式无法有效地提高分幅照相的时间分辨能力。2010年Hilsabeck等人利用时变电场对光电子进行加速,然后在漂移区对电脉冲进行20倍展宽,实现了门控时间优于10 ps、半宽达到20 ps的X射线分幅照相^[25],为X射线分幅照相向更高时间分辨发展提供了全新的技术手段。基于该技术,Nagel等人在NIF装置中研制了X射线漂移成像系统(DIXI),对其技术指标进行了系统的测试和分析^[26],为热斑形貌演化、燃料运动状态、热斑混合程度等深入研究提供了时间分辨高达20 ps的高时空分辨诊断能力^[8]。

如图19所示,电子漂移技术主要由加速区和漂移区组成。X射线通过成像系统(针孔、曲面晶体、KB等)成

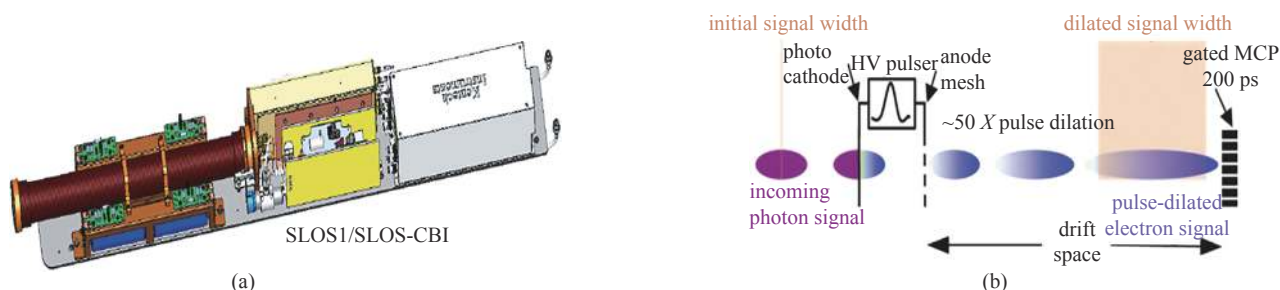


Fig. 19 (a) Single line-of-sight (SLOS) X-ray imager and (b) schematic diagram of photoelectron expanding principle

图 19 (a) SLOS 结构图和 (b) 光电子展宽原理示意图

像至光阴极并产生光电子。在加速区,通过在阴极和栅网之间引入动态电场,使不同时间产生的光电子因受到不同强度电场的加速作用,而具有不同的动能,从而实现对电子群的“速度色散”。然后电子脉冲进入内有均匀磁场的漂移区,在磁场的作用下,不同动能的光电子加速度不同,从而在时间方向上产生线性漂移,最终实现光电子脉冲的时间放大展宽,形成对X射线的高时间分辨诊断能力。

目前国内关于该技术主要有中国科学院西安光学精密机械研究所、深圳大学和中国工程物理研究院激光聚变研究中心在进行相关的研究。但是采用的技术路线有所不同。深圳大学采用的短磁聚焦的方式,这种方式借鉴的多磁聚焦透镜的概念,采用多透镜耦合调节空间分辨的方式,其空间分辨率比较高,目前动态空间分辨已经可以达到10 lp/mm,视场达到4 mm左右。中国科学院西安光学精密机械研究所和国工程物理研究院激光聚变研究中心在采用的都是长磁聚焦的技术。该技术较简单易行,但是由于空间电荷效应影响严重,空间分辨难以提高。目前静态空间分辨只能达到8 lp/mm左右。国内深圳大学做的短磁聚焦系统,目前的时间分辨已经可以达到10 ps,基本达到了美国的时间分辨的水平。

该技术国内的积累还不够,主要关键技术包括:(1)长磁或短磁系统的精密装配问题,(2)斜波电压加载的均匀性问题,(3)记录系统的噪声和电场耦合问题。该系统的装配与光学元件的装配原理是相同的,偏离中心设计值的机械偏差,都会影响后续的分辨率的提高。斜波电压加载是另一个问题,由于在图20的阴极上斜波电压的传输需要时间,从而会导致不同位置的电场强度、到达时间均有差别,最终会影响空间分辨的均匀性。目前美国GA公司采用的方法是四点馈入法,从四个方向导入斜波波形,让他们在阴极里面合成为一个最终的斜波电压^[27]。目前最

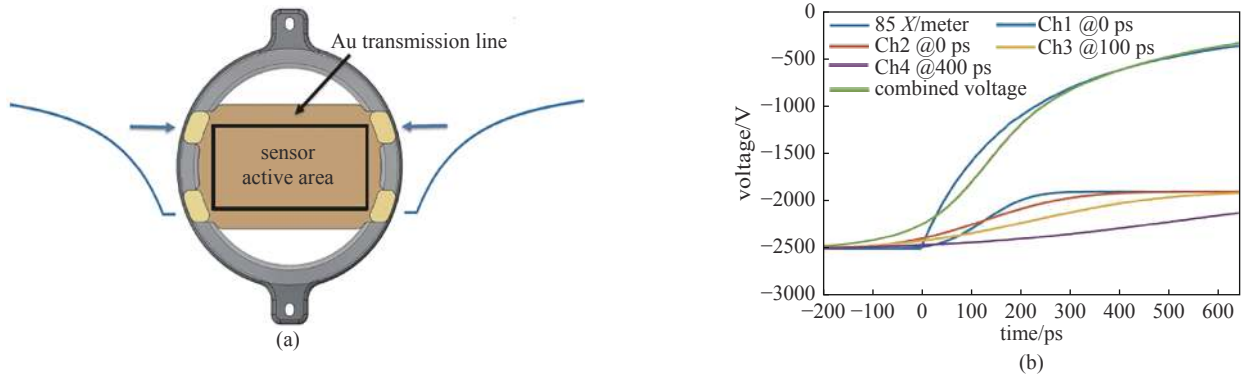


Fig. 20 (a) Schematic diagram of four end fed cathode structure and (b) four channel composite waveforms

图 20 (a) 四端馈入阴极结构示意图和 (b) 四通道合成波形

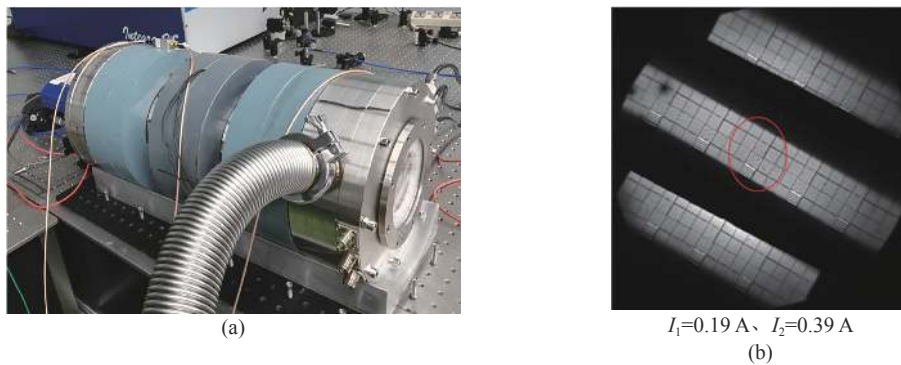


Fig. 21 (a) Photo of drift tube of double lens short magnetic focusing lens and (b) image of adjusting the current of two magnetic lenses to obtain 10 lp/mm resolution

图 21 (a) 双镜头短磁聚焦透镜漂移管照片, (b) 调节两个磁透镜的电流, 可以获得 10 lp/mm 的分辨

好的时空分辨技术 SLOS 的记录系统是多分幅的 hCMOS。这是一种固体分幅器件, 可以实现门宽 1 ns, 4 分幅的效果。但是国内相关技术的积累比较薄弱, 无法完全照搬该技术。与此对应的技术, 就是用分幅相机来记录漂移管的信号。由于经过漂移管以后, 高能电子直接照射记录 MCP 系统, 会导致噪声增加, 降低信号的对比度, 所以该技术的优化还需要花费国内研究人员较多的精力。图 21 为国内深圳大学已经完成的双磁聚焦透镜漂移管的工程样机的部分照片和实验结果。可以看到, 短磁聚焦透镜的体积较大, 其小型化将是该技术实用化的一个重要内容。另外, 其空间分辨可以采用调节两个磁聚焦透镜电流的方式进行调整。图 21 中画红圈的部分, 其空间分辨已经达到 10 lp/mm。

5 100 kJ 激光装置中子成像系统研发进展

中子成像系统 (NIS) 能够同时用于内爆压缩靶丸热核聚变反应区和冷燃料区的尺寸和形状测量, 为内爆性能评估提供重要的物理信息, 包括内爆对称性、壳层密度均匀性和热核聚变反应体积等。由于热核聚变反应发生在阻滞时刻附近, 热核反应区域半径仅约 30 μm , 中子成像系统必须具备高空间分辨能力, 即空间分辨率优于 10 μm 。

中子成像系统用于 ICF 内爆物理研究始于 1988 年, D. Ress 等人^[28]利用半影成像原理, 在 NOVA 装置上成功测量到直接驱动充 DT 气体玻璃球靶内爆中子发射图像, 其空间分辨率为 80 μm ; 随后, 在 OMEGA 装置上利用一系列不断优化设计的中子成像系统^[29-32], 对内爆中子发射图像进行了测量, 主要优化部件包括成像孔 (双圆锥孔、双方锥孔、环形孔和三角锥孔阵列) 和探测器灵敏单元尺寸 (从 1.5 mm \times 1.5 mm 方形闪烁光纤到 ϕ 65 μm 灌装液体闪烁体毛细管阵列), 2012 年系统空间分辨率达到 15 μm ^[33]; 结合 NOVA 与 OMEGA 装置中子成像系统的研发经验与性能参数, 2010 年 NIF 完成了由 20 个三角锥孔和 3 个半影孔组成的编码孔设计^[34-36], 并在图像重建算法、编码孔位置表征、NIS 瞄准精度表征和内爆物理实验研究等方面开展了一系列研究工作。随后, 利用十年时间完成了

另外两套中子成像系统的建设^[37-38]。NIF 上三套中子成像系统的视线相互垂直,从而具备了三维中子发射区图像重建能力。

决定 NIS 性能的主要因素包括编码孔形状、瞄准技术、图像重建技术、中子图像探测系统性能和准直屏蔽。应用于激光驱动聚变中子发射区测量的中子成像系统采用两种成像技术,即适用于低产额($>1 \times 10^{13}$)的半影成像诊断技术和适用于高产额($>1 \times 10^{15}$)的针孔成像诊断技术,且成像组件从单半影孔结构演化到多类型多孔阵列结构。

只有当中子产额达到 1×10^{15} 以上,且采用多针孔阵列,才能保证信噪比达到 10 以上。就信噪比改善效果而言,20 个针孔等效于总中子产额增加一个量级。R. A. Lerche 等人细致分析了半影成像技术测量图像中有效信号和干扰信号的来源,并推导出信噪比的表达式^[39]为

$$R_{SN} = \sqrt{\varepsilon \frac{(1-\tau)^2 R_2 (\delta R)^5 Y_n}{1+\tau 4L_o^2 D_s^4}} \quad (3)$$

其中, $\tau = e^{-l/\lambda_p}$, 为中子在特定厚度材料中的透过率; R_2 为半影孔中心半径; D_s 为中子源直径; δR 为成像系统空间分辨率,其取决于编码孔几何分辨率 δ_{bic} 、探测器单元尺寸 δ_{pix} 、反冲核平均自由程 δ_{rec} 和系统放大倍数 G ,可表示为

$$\delta R = \sqrt{\delta_{bic}^2 + (2\delta_{pix}/G)^2 + (\delta_{rec}/G)^2} \quad (4)$$

由于 δ_{pix} 小于 0.5 mm,且对于普通塑料闪烁体或液体闪烁体, δ_{rec} 约为 0.5 mm,仅当放大倍数达到 50 以上时, δ_{pix} 和 δ_{rec} 的贡献小于 20 μm ,成像系统空间分辨率才可能优于 20 μm 。同时,为了保证信噪比优于 10,在半影孔尺寸为 mm 量级时,则要求中子产额达到 1×10^{13} 。对于单半影孔结构而言,其视场范围通常为 250 μm ,考虑到激光驱动聚变中子源尺寸为 50~100 μm ,则要求瞄准精度优 50 μm 。

随着 100 kJ 激光装置投入运行,国内 ICF 内爆中子产额达到 1×10^{13} ,初步具备了中子半影成像技术应用条件。我国应用于 ICF 的中子半影成像技术研究起步于 21 世纪初,经过十余年的发展^[40-43],现已建立了基于关键元器件研制和关

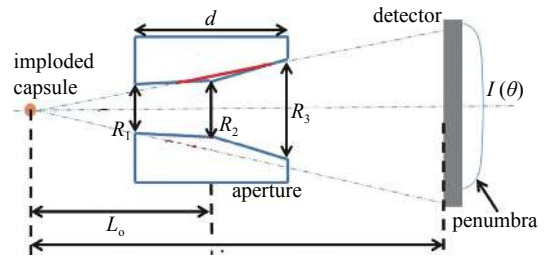


Fig. 22 Geometric model for neutron penumbral imaging

图 22 中子半影成像几何模型

键技术研究的中子半影成像技术研究体系。

为了研究半影孔尺寸与中子成像系统性能的关系,基于几何模型(见图 22)建立了快速参数扫描分析程序。用寻求最优的点扩散函数的方法在确定 R_1 的前提下,扫描其他参数,获得最优参数集。通过选定编码孔长度 d 、前后端面编码孔半径 R_1 和 R_3 ,扫描编码孔中心半径 R_2 和物距 L_o 可以得到编码孔几何分辨率、FOV 与 R_2 、 L_o 的依赖关系。选取 FOV,且几何分辨率最小,则可唯一确定 R_2 和 L_o 。对 R_3 进行扫描,获得一系列最优 R_2 和 L_o ,从而确定几何分辨率,如图 23 所示。几何分辨率随 R_3 的减小而减小,但对对应最优物距不断增加,这要求像距也不断增加以保证足够大的放大倍

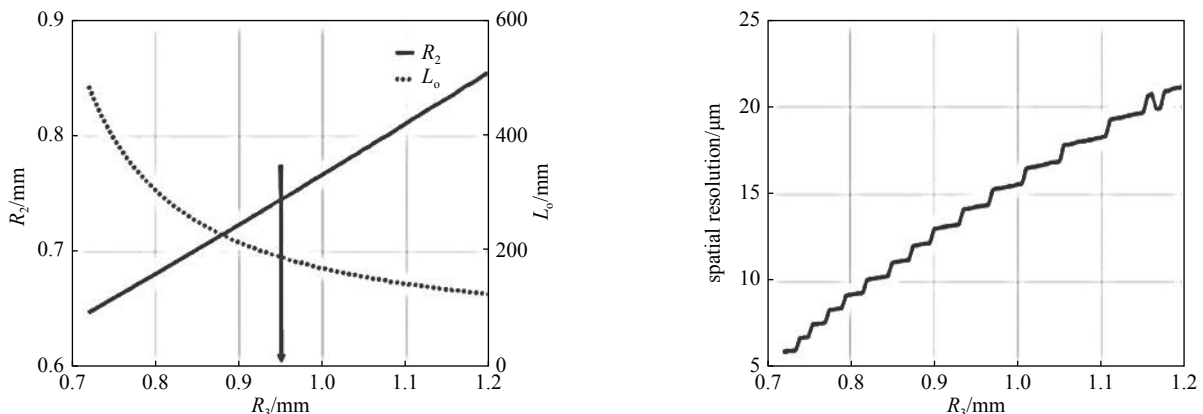


Fig. 23 Designed biconic-shaped geometric aperture parameters and the spatial resolution contributed by the aperture

图 23 编码孔几何尺寸设计及对应几何分辨率

数。像距通常是受装置外围可用空间尺寸限制的,因此不能盲目选用较小 R_3 以提高几何分辨率。

编码孔长度决定了暗区本底信号强度,非零中子透过率将降低测量图像的信噪比。为了控制暗区本底信号强度至中心亮区的0.1以下,考虑到W材料中14 MeV中子平均自由程约为3 cm,选择编码孔厚度为9 cm,此时暗区本底信号强度为中心亮区的0.05。为了获得较高空间分辨的高信噪比图像,可参考OMEGA所用编码孔尺寸,适当扩大孔径。这里选择将 R_1 从0.3 mm扩大到0.6 mm,且FOV为250 μm ,则可以根据几何模型计算最优 R_2 、 R_3 和 L_0 组合。考虑到100 kJ装置靶场区域最大可用距离约为10 m,选取 $L_0=190$ mm,可保证放大倍数达到50倍,对应 R_2 和 R_3 分别为0.74 mm和0.95 mm,空间分辨率为20~25 μm 。当中子产额达到 1×10^{13} 时,信噪比约为10,满足图像测量要求。基于上述设计参数,现已完成了半影孔的加工,其中,半影孔圆度最大偏差为7.3 μm ,满足中子半影成像需求。

中子图像探测器是中子成像系统的核心组件,空间分辨率和探测效率是中子图像探测器的关键技术指标。100 kJ激光装置中子成像系统采用灌装液体闪烁体的毛细管阵列作为中子梯形探测器,有效直径达到150 mm,厚度为100 mm,毛细管内径约为100 μm ,在毛细管之间的空隙中插入黑丝,以减小光的串扰。利用加速器中子源照射钨块端面,中子图像探测器位于钨块后端,记录中子图像,可获得钨边图像。沿钨边对图像进行积分,得到信号强度分布,从而获得中子图像探测器的线扩展函数,如图24所示。实验结果表明,中子图像探测器空间分辨率优于1.1 mm。

100 kJ激光装置中子成像系统将于近期应用于内爆物理实验研究。考虑到中子产额仍有一定的提升空间,将尝试采用更小的半影孔设计和三角锥孔设计,将中子成像系统空间分辨率提升至约15 μm 。另外,通过增加放大倍数和提升中子图像探测系统空间分辨率,有望进一步提升中子成像系统性能。

6 CUP与光场三维成像

计算成像是近年来逐渐兴起的一个新的方向。当硬件系统的参数指标由于工业水平的限制只能达到某一状态。例如现有的条纹相机与分幅相机技术由于技术框架的限制,很难将二者融合。还有,现有的成像技术基本限于二维测量,无法进行三维诊断等。而通过计算成像技术,在一定程度上可以完成条纹分幅技术的融合,二维-三维技术的过渡。从而为ICF诊断技术开辟新的研究方向。在ICF物理实验诊断中,如果能捕获目标的三维图像,将大大提高现有系统的诊断性能和诊断效率,对ICF研究具有重要的意义。ICF领域的二维程序向三维程序过渡的过程中,需要三维技术提供的数据作支撑。上面提到的三维中子成像技术与这里的光场成像技术都将为后续三维成像技术提供支撑。压缩感知超快成像(CUP)技术作为一个新的技术方向,将会在冲击波二维诊断技术领域发挥独特的作用。在传统线VISAR基础上耦合新型的超快压缩成像探测技术,能够对冲击波二维速度场实现时间分辨优于2ps,空间分辨优于10微米,成像帧数大于50幅的诊断。该技术目前还在研发之中,后续会详细报道。

光场成像是一种新兴的计算成像方法,目前在可见光领域比较成熟,但是在X射线领域,还需要从成像系统构成、算法反演等几个方面作“本土化”的工作。可以同时记录场景中所有光线的二维方向信息和二维位置信息,根据光场理论可以计算得到目标的深度信息,其在三维成像上具有结构简单、分辨率高等优点。目前中国工程物理研究院激光聚变研究中心已经在该方向做了初步的探索,为后续建立该技术做了一定的准备工作。

光场三维成像的关键在于利用光场相机记录的四维光场数据计算得到目标的深度信息,目前主要有视差法、聚焦堆栈法等。基于微透镜阵列的光场相机的成像原理如图25所示^[44], A_1 为空间中一点A经过主透镜所成的像点,微透镜阵列位于主镜的一倍焦距处,成像传感器位于微透镜阵列的一倍焦距处。

视差法是通过获取同一物体在两幅或者多幅视图下的视差信息,利用几何光学原理来计算目标深度信息的方法,关键在于建立两幅图像中对应像点之间的相关性描述,相关性越大,这两个像点对应于空间中同一物点的可能性越高。一般选择位于光场相机子孔径图像阵列中心处的图像作为参考图像,其余子孔径图像作为待匹配图像,不同子孔径图像所蕴含的视差信息不同,待匹配图像中任意一点与参考图像中像素点之间的相关性可以通过距离

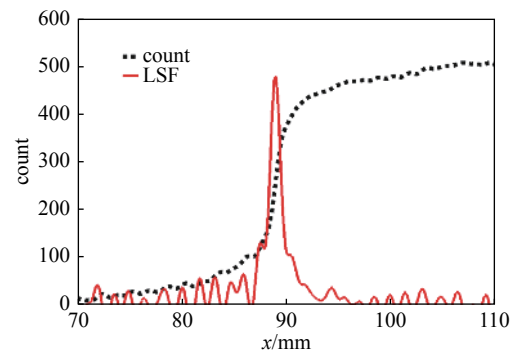


Fig. 24 Measured line-spread function of the neutron image detector
图 24 中子图像探测器线扩展函数实验测量结果

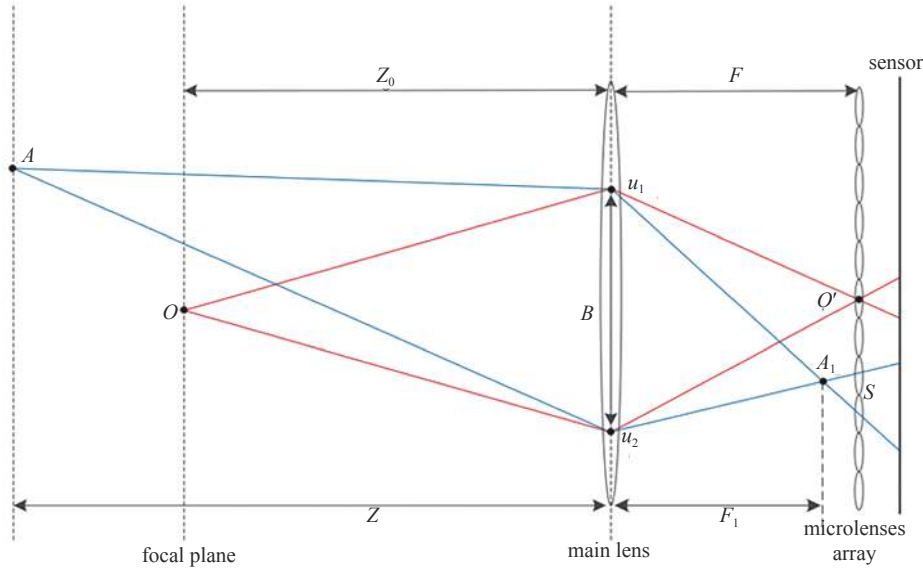


Fig. 25 Principle of the light field camera

图 25 基于微透镜阵列的光场相机成像原理图

测度函数来度量^[45]。设 s 为以像素为单位的视差, 像素单元之间的距离为 d , 则有

$$\frac{s}{B} = \frac{F}{dZ} - \frac{F}{dZ_0} \quad (5)$$

式中, B 为相邻视点 u_1 和 u_2 之间的距离, Z 为物点 A 到主透镜平面的距离, Z_0 为聚焦面到主透镜平面的距离, F 为微透镜阵列与主透镜之间的距离。根据式(5)可以计算得到像点所对应的空间物点的深度信息。

聚焦堆栈法是目前常用的深度估计方法, 光场成像与传统成像相比, 优势之一就是可以通过数字重聚焦算法认为的指定焦面的位置, 实现“先拍照”, “后对焦”, 应用场景更加灵活。聚焦堆栈法就是基于数字重聚焦算法进行深度估计, 通过重聚焦算法计算得到一系列聚焦在不同深度的二维图像^[44], 使用清晰度评价函数来确定图像的清晰程度^[46], 像点的深度为其最清晰时所在的图像聚焦深度。基于光线追迹的数字重聚焦算法的公式为

$$E_{(\alpha,F)}(x',y') = \frac{1}{\alpha^2 F^2} \iint L_F \left[\frac{x'}{\alpha} + u \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right), \frac{y'}{\alpha} + v \left(1 - \frac{1}{\alpha} \right), u, v \right] \cos^4 \theta du dv \quad (6)$$

其中, $E_{(\alpha,F)}(x',y')$ 为目标通过成像探测系统在光场探测相机上面的光强分布, F 为像与主镜之间的距离, F' 为重聚焦像面与主镜之间的距离, $\alpha = F'/F$, $L_F^{(u,v)}$ 对应主镜 (u,v) 处子孔径图像的光亮度。经过重聚焦、清晰度评价得到物体的深度信息即可完成对目标的三维重构。

利用光场相机捕获的四维光场信息, 可以反演得到物体的深度信息, 进而对物体进行三维重构, 若能应用于 ICF 物理实验诊断, 如内爆实验中的热斑成像等, 将对 ICF 诊断产生巨大的推动作用。

7 结 论

随着激光驱动 ICF 研究的深入, 其诊断技术的需求已经向高时间、高空间、高能谱、高效率、抗辐射、高可靠性方向转变。时间分辨技术要求达到 10 ps, 空间分辨要求达到 3 μm 以下, 能谱分辨达到 2000~5000, 效率提升要求 1~2 个数量级。同时大部分的用于光学和 X 射线诊断的诊断设备要在 10^{14} ~ 10^{17} 中子产额状态下正常工作, 这就对抗辐射加固提出了新的要求。甚至为了满足抗辐射加固的要求, 对应的诊断系统技术方案也需要做调整, 甚至要牺牲部分特别极端的指标。同时, 为了减小未来诊断人员的工作量, 需要在模块化、可靠性方面做新的设计, 以实现未来设备远程、自动化要求。因此, 未来的高时空诊断技术将是更高需求背景下的技术指标和工程可靠性的综合体。目前, 我们的诊断系统设计已经在朝这个方向努力。计算成像将是超快诊断技术的一个新的技术增长点。本文提到的 CUP 和三维成像技术只是目前的一些初步的结果, 后续将会有更加详细的进展介绍。相信经过诊断团队人员的扎实工作, 一定会在高时空诊断技术领域做出中国人独特的贡献。

参考文献:

- [1] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Inertially confined fusion plasmas dominated by alpha-particle self-heating[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 800-806.
- [2] Meezan N B, Edwards M J, Hurricane O A, et al. Indirect drive ignition at the National Ignition Facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2017, 59: 014021.
- [3] Kline J L, Batha S H, Benedetti L R, et al. Progress of indirect drive inertial confinement fusion in the United States[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 112018.
- [4] Clark D S, Weber C R, Milovich J L, et al. Three-dimensional simulations of low foot and high foot implosion experiments on the National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 056302.
- [5] Gao Liang, Liang Jinyang, Li Chiye, et al. Single-shot compressed ultrafast photography at one hundred billion frames per second[J]. *Nature*, 2014, 516: 74-77.
- [6] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J, et al. Sub-nanosecond single line-of-sight (SLOS) X-ray imagers (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 10G123.
- [7] Theobald W, Sorce C, Bedzyk M, et al. The single-line-of-sight, time-resolved X-ray imager diagnostic on OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 10G117.
- [8] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11E504.
- [9] Hilsabeck T J, Nagel A R, Hares J D, et al. Picosecond imaging of inertial confinement fusion plasmas using electron pulse-dilation[C]// Proc of SPIE.2017: 1032805.
- [10] Nakagawa K, Iwasaki A, Oishi Y, et al. Sequentially timed all-optical mapping photography (STAMP)[J]. *Nature Photonics*, 2014, 8(9): 695-700.
- [11] Pickworth L A, McCarville T, Decker T, et al. A Kirkpatrick-Baez microscope for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11D611.
- [12] Pickworth L A, Ayers J, Bell P, et al. The National Ignition Facility modular Kirkpatrick-Baez microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 11E316.
- [13] Marshall F J, Bahr R E, Goncharov V N, et al. A framed, 16-image Kirkpatrick-Baez X-ray microscope[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88: 093702.
- [14] Rosch R, Trosseille C, Caillaud T, et al. First set of gated X-ray imaging diagnostics for the Laser Megajoule facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87: 033706.
- [15] Zhang X, Chen Z, Li Y, et al. A four-channels reflective Kirkpatrick-Baez microscope for the hot spot diagnostic in the 100 kJ laser driven inertial confinement fusion in China[J]. *J Instrum*, 2019, 14: C11010.
- [16] Yaran, L i, Baozhong, et al. Development of an X-ray eight-image Kirkpatrick-Baez diagnostic system for China's laser fusion facility[J]. *Applied Optics*, 2017, 56: 3311-3318.
- [17] Xie Q, Mu B, Li Y, et al. Development of high resolution dual-energy KBA microscope with large field of view for RT-instability diagnostics at SG-III facility[J]. *Optics Express*, 2017, 25(3): 2608-2617.
- [18] Pikuz T A, Faenov A Y, Skobelev I Y, et al. Highly efficient X-ray imaging and backlighting schemes based on spherically bent crystals[C]// Proc of SPIE. 2004: 5196: 362-374.
- [19] Aglitskiy Y, Lehecka T, Obenschain S, et al. High-resolution monochromatic X-ray imaging system based on spherically bent crystals[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(22): 5253-5261.
- [20] 陈伯伦, 韦敏习, 杨正华, 等. 球面弯晶的背光成像特性[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(3): 641-645. (Chen Bolun, Wei Minxi, Yang Zhenghua, et al. Character of backlight imaging based on spherically bent crystal[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(3): 641-645)
- [21] 陈伯伦, 杨正华, 韦敏习, 等. 神光II激光装置X射线高分辨单色成像技术[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(12): 3119-3122. (Chen Bolun, Yang Zhenghua, Wei Minxi, et al. High-resolution monochromatic X-ray imaging techniques applied to Shenguang II laser facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(12): 3119-3122)
- [22] 杨正华, 陈伯伦, 韦敏习, 等. 高分辨球面弯晶单色成像系统研制与应用[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(9): 2267-2269. (Yang Zhenghua, Chen Bolun, Wei Minxi, et al. , Development and application of high-resolution spherically bent crystal monochromatic imaging system[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(9): 2267-2269)
- [23] Chen Bolun, Yang Zhenghua, Wei Minxi, et al. Implosion dynamics measurements by monochromatic X-ray radiography in inertial confinement fusion[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 122705.
- [24] Bradley D K, Bell P M, Landen O L, et al. Development and characterization of a pair of 30-40 ps X-ray framing cameras[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1995, 66: 1.
- [25] Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited)[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81: 10E317.
- [26] Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Dilation X-ray imager a new/faster gated X-ray imager for the NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10E116.
- [27] Engelhorn K, Hilsabeck T J, Kilkenny J D, et al. Single Line-Of-Sight (SLOS) X-ray imagers[C]// High Temperature Plasma Diagnostic Conference. 2018.
- [28] Röss D, Lerche R A, Ellis R J, et al. Neutron imaging of laser fusion targets[J]. *Science*, 1988, 241(4868): 956-958.
- [29] Disdier L, Rouyer A, Wilson D C, et al. High-resolution neutron imaging of laser imploded DT targets[J]. *Nuclear Instruments & Methods in Physics Research*,

- 2002, 489: 496-502.
- [30] Christensen C R, Barnes C W, Morgan G L, et al. First results of pinhole neutron imaging for inertial confinement fusion[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(5): 2690-2694.
- [31] Disdier L, Rouyer A, Lantuejoul I, et al. Inertial confinement fusion neutron images[J]. *Physics of Plasmas*, 2006, 13: 056317.
- [32] Grim G P, Bradley P A, Day R D, et al. Neutron imaging development for megajoule scale inertial confinement fusion experiments[C]//Journal of Physics Conference Series. 2008, 112: 032078.
- [33] Caillaud T, Landoas O, Briat M, et al. Development of the large neutron imaging system for inertial confinement fusion experiments[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 033502.
- [34] Merrill F E, Bower D, Buckles R, et al. The neutron imaging diagnostic at NIF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10D317.
- [35] Volegov P L, Danley C R, Fittinghoff D N, et al. Neutron source reconstruction from pinhole imaging at National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 023508.
- [36] Volegov P L, Danley C R, Fittinghoff D N, et al. Self characterization of a coded aperture array for neutron source imaging[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 123506.
- [37] Fatherley V E, Barker D A, Fittinghoff D N, et al. Design of the aperture array for neutron imaging from the north pole of the National Ignition Facility[C]//Proc of SPIE. 2016: 99660B.
- [38] Fatherley V E, Fittinghoff D N, Hibbard R L, et al. Aperture design for the third neutron and first gamma-ray imaging systems for the National Ignition Facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 10I127.
- [39] Lerche R A, Ress D, Ellis R J, et al. Neutron penumbral imaging of laser-fusion targets[J]. *Laser & Particle Beams*, 1991, 9(1): 99-118.
- [40] 赵宗清, 丁永坤, 刘东剑, 等. 中子半影成像的数值模拟[J]. *强激光与粒子束*, 2006, 18(7): 1203-1207. (Zhao Zongqing, Ding Yongkun, Liu Dongjian, et al. Numerical simulation of neutron penumbral imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(7): 1203-1207)
- [41] 郝轶聃, 缪文勇, 赵宗清, 等. 中子半影成像中椭圆度误差的解析计算[J]. *强激光与粒子束*, 2007, 19(3): 507-510. (Hao Yidan, Miao Wenyong, Zhao Zongqing, et al. Analytic calculation of ellipticity error effect in neutron penumbral imaging[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2007, 19(3): 507-510)
- [42] 余波, 苏明, 黄天珩, 等. 基于100kJ激光装置的中子半影锥成像系统设计[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(10): 2604-2610. (Yu Bo, Su Ming, Huang Tianxuan, et al. Designing of diagnostic system for neutron penumbral imaging based on Shenguang-III facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(10): 2604-2610)
- [43] Chen Z, Zhang X, Wang F, et al. Design of neutron imaging aperture for inertial confinement fusion in laser fusion research center[J]. *Journal of Instrumentation*, 2019, 14: C11007.
- [44] Ng R. Digital light field photography[M]. Palo Alto: Stanford University, 2006.
- [45] 陈佃文. 基于4D光场数据的深度信息获取[D]. 北京: 北京信息科技大学, 2016. (Chen Dianwen. Depth information acquisition based on 4D light field data[D]. Beijing: Beijing Information Science & Technology University, 2016.)
- [46] Mousnier A, Vural E, Guillemot C, et al. Partial light field tomographic reconstruction from a fixed-camera focal stack[J]. *Computer Science*, arxiv: 1503.01P03, 2015: 1-10.