

· 特邀综述 ·

基于皮秒拍瓦激光的高分辨 X 射线背光照相研究

周维民*, 于明海, 张天奎, 田超, 单连强, 吴玉迟, 张锋, 毕碧, 储根柏, 税敏,
辛建婷, 曹磊峰, 谷渝秋, 朱少平, 景峰, 张保汉

中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室, 四川 绵阳 621900

摘要 基于皮秒拍瓦激光产生的高能 X 射线源具有强度高、脉宽短、焦点小的特点, 利用这种 X 射线源发展出来的高时空分辨率 X 射线点投影背光照相是强加载条件下材料动态响应, 以及惯性约束聚变等高能密度物理研究中亟需的重要诊断技术。目前, 研究人员主要依靠 TITAN、OMEGA-EP 和神光 II 升级等大型皮秒拍瓦激光装置, 对皮秒拍瓦激光与固体靶相互作用产生的 X 射线的能谱、转换效率、分辨率等关键参数进行了研究, 发展了点投影背光照相技术, 并开展了动态演示实验, 成功获得了惯性约束聚变内爆过程和冲击加载材料微喷过程的演示图像。

关键词 激光光学; 皮秒拍瓦激光; 高时空分辨率; X 射线; 背光照相

中图分类号 O436

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0500010

High-Resolution X-Ray Backlight Radiography Using Picosecond Petawatt Laser

Zhou Weimin*, Yu Minghai, Zhang Tiankui, Tian Chao, Shan Lianqiang,
Wu Yuchi, Zhang Feng, Bi Bi, Chu Genbai, Shui Min, Xin Jianting, Cao Leifeng,
Gu Yuqiu, Zhu Shaoping, Jing Feng, Zhang Baohan

Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Laser Fusion Research Center,

China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract X-rays produced through picosecond petawatt lasers have high flux, short pulse duration, and tiny focal spot. High spatial and temporal resolution X-ray point-projection backlight radiography developed using such high flux X-rays is an important diagnostic technique for measuring the dynamic response of materials under intense laser load, the inertial confinement fusion, and other high energy density physics. Short pulse X-rays are generated through the picosecond petawatt laser beams on TITAN and OMEGA-EP systems, as well as the upgraded SHENGUANG-II facility and other large picosecond watt laser facilities. The spectrum, conversion efficiency, and resolution of the X-ray backlights produced using the interactions between the picosecond petawatt lasers and solid targets are characterized in the experiments conducted herein. Furthermore, the technology of point projection backlighting is developed, and the dynamic demonstration experiment is performed. Images of the compressed fuel of inertial confinement fusion targets and the ejecta of shock-loaded materials are successfully obtained using backlight radiography.

Key words laser optics; picosecond petawatt laser; highly temporal and spatial resolution; X-ray; backlight radiography

OCIS codes 140.7240; 320.5390; 340.7440; 350.5400

1 引 言

随着激光技术的发展, 激光的输出能量和输出功率日益提升^[1]。在众多超高功率激光中, 皮秒

(10^{-12} s)拍瓦(10^{15} W)激光有其独特的性质。典型的皮秒拍瓦激光^[2]输出的激光脉冲能量为几百至数千焦耳, 脉冲宽度为数百飞秒至数十皮秒, 聚焦功率密度可以超过相对论强度 10^{18} W/cm²。超相对论

收稿日期: 2020-02-04; 修回日期: 2020-03-10; 录用日期: 2020-03-26

基金项目: 科学挑战专题(TZ2016005)、国家自然科学基金(11775202)、国家重点研发计划(2016YFA0401100)

* E-mail: zhouwm@caep.cn

强度激光与物质相互作用,可以产生焦斑小(数十 μm)、脉宽窄(ps量级)、能量高(keV~MeV)的X射线、电子、离子及中子等高强度粒子束流^[3-5],在高时空分辨透视照相、癌症治疗、同位素产生等方面具有广阔的应用前景。虽然皮秒拍瓦激光的聚焦峰值功率密度通常不如超高强度飞秒激光,但由于其输出能量更高,即可以产生更高通量的各类次级粒子,因而在应用领域更为实用,在国内外得到了广泛的关注和研究。

在基于超高强度激光产生的众多次级辐射源中,高能X射线因惯性约束聚变,以及强加载条件下材料动态特性研究的透视照相需求尤为引人注目。利用强激光开展材料动力学研究是一种新的定量研究手段,具有加载压力范围宽、应变率高、加载路径可控性好、样品材料耗费少等优点。而惯性约束聚变(ICF)是人类掌握可控聚变能的重要途径之一,是当前世界科学最前沿之一^[6-7]。随着超短超强激光技术的发展,基于皮秒拍瓦激光驱动能够产生品质优异的高能X射线源,高能X射线源是开展材料动力学研究,以及激光聚变研究中高面密度客体高时空分辨透视成像的理想光源。随着相关研究的不断深入,美国、欧洲和中国的强激光实验室在这一方向开展了大量的研究工作,基于皮秒拍瓦激光的高能X射线高时空分辨透视照相已经成为激光驱动的动力学研究及ICF研究中重要的诊断手段之一。

早在2000年,美国的国家实验室就开展了激光驱动X射线源的产生与应用研究。在这一阶段的研究中,受到激光装置能力发展的限制,高时空分辨X射线背光照相主要采用纳秒激光驱动的一类He线等较低能量的X射线^[8]。一方面,光子能量低,穿透能力不足,图像的信噪比差;另一方面,X射线源的脉冲宽度较大,导致照相过程中样品运动引起的动态模糊无法消除,且该X射线源无法完全满足ICF研究的需求。随着激光强度的增强,为了提高

X射线的穿透能力,在X射线背光照相中开始利用短脉冲激光驱动的K α 源等准单能X射线源作为背光源^[9]。相比于类He线,K α 光源的能量较高,具有更强的穿透能力,由于其主要来自短脉冲相对论激光,因此脉冲宽度更短(~ps量级),可实现更高的时间分辨率。

然而,随着美国国家点火装置(NIF)^[10]的建成及ICF研究的不断深入,内爆压缩比也逐渐增大,相应的等离子体密度也越来越高,继续采用K α 射线源作为背光照相的光源将不能满足ICF诊断的需求。为了解决内爆照相的诊断问题,2007年,劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)的研究人员提出了以高强度激光和高Z(原子数)固体靶相互作用作为光源的Compton照相方案^[11]。该方案采用比较高的光子能量(50~200 keV),一方面能够保证足够的穿透性,另一方面可以避免芯部自发光的能区。这种技术的二维空间分辨率约可以达到10 μm ,有利于获得重要的内爆特征信息;其时间分辨率约达到10 ps,可减小内爆运动带来的影响。从这一概念提出开始,全世界科学家开展了十多年的持续研究,在光源的产生、光源特性研究、动态集成实验及诊断技术方面都取得了极大的进展。本文综述介绍了国际上用于高能X射线背光照相的主要皮秒拍瓦激光装置,以及基于这些装置产生高能X射线的最新实验进展;并重点介绍了本团队基于神光II升级装置进行的高分辨X射线源特性研究,以及在材料动力学和ICF研究中的主要应用结果。

2 皮秒拍瓦激光装置

目前,美国、欧洲、日本、中国已建成多个皮秒拍瓦激光装置,如表1所示。其中应用于高能X射线背光照相的主要有美国的TITAN、NIF-ARC(Advance Radiography Capacity)、OMEGA-EP(Extended Performance),以及我国的神光II升级等装置。

表1 典型的皮秒拍瓦激光装置

Facility	Location	Parameter
NIF-ARC	Lawrence Livermore National Laboratory, USA	1 kJ, 10 ps
LMJ-PETAL	French Atomic Energy Commission, France	3.5 kJ, 0.5-10 ps
OMEGA-EP	University of Rochester, USA	2.6 kJ, 1 ps
TITAN	Lawrence Livermore National Laboratory, USA	400 J, 600 fs
LULI2000	École Polytechnique, France	200 J, 400 fs
LFEX	Osaka University, Japan	2.5 kJ, 1-10 ps
SG-II UP	Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, China	1 kJ, 1-10 ps

TITAN 是美国 LLNL 建立的激光平台^[12],于 2003 年开始建设,2005 年 6 月建成。该装置包含一路短脉冲高能激光束,采用啁啾脉冲放大(CPA)技术,借助 Janus Laser 中的一束激光,使这路短脉冲激光实现了高能放大,最大输出能量为 600 J,脉冲宽度为 0.4~200 ps。该平台内建立了专用的靶室,直径达到 2.5 m,可以将一路长脉冲和一路短脉冲同时导入其中。目前,该装置已运行了近 10 年,其中长脉冲和短脉冲均可以以基频(1053 nm)或二倍频(527 nm)形式输出。基于该装置开展了大量激光驱动的 X 射线源产生及辐射特性研究,其中既包括可用于快点火诊断的 $K\alpha$ 射线源,也包括面向康普顿照相的 X 射线源;并测试了光源的光谱、转换效率、空间分辨率等特性。

Rochester 大学的 OMEGA-EP^[13] 是具备 30 kJ、60 路光束的 OMEGA 装置的性能提升装置。OMEGA-EP 可同时输出 4 路长脉冲,其中的两路可以切换至短脉冲工作模式。在短脉冲(脉宽为 10~100 ps)模式下,到靶的激光能量可达到 2.6 kJ;在 1 ps 条件下,到靶的激光峰值功率可达到 PW,同时,可以获得良好的聚焦焦斑,直径 20 μm 的焦斑内集中了 80% 的能量。发展应用于高能密度物理实验及 ICF 内爆的高能 X 射线背光照相技术是 EP 装置的两个主要研究方向之一。自 2008 年建成并稳定运行以来,EP 装置一直是国际上背光照相技术研究及应用的重要平台。基于该装置,LLNL 研究人员除了开展康普顿照相光源的细致研究以外,还初步开展了康普顿照相集成实验研究。

NIF-ARC 装置^[14] 的相关工作最早是于 2002 年作为一个 LDRD(Laboratory Directed Research and Development)项目被启动的。建造 ARC 装置的主要目的之一就是为 ICF 研究提供先进的动态照相技术,ARC 装置不仅可以用于高能 X 射线康普顿透视照相,还可以应用于质子照相及高能电子照相。该装置将 NIF 上的 4 路长脉冲激光束转变成 8 路拍瓦皮秒激光束,其中的每一束激光都可以在时间及空间指向上独立地聚焦到高 Z 靶上,产生 X 射线背光源。8 路皮秒激光的脉宽为 0.7~50 ps,输出能量为 0.5~1.6 kJ,可产生脉宽与激光脉宽相当的多路具有不同时间延迟的背光源,因此利用该装置可以在 ICF 实验中获得一系列靶丸压缩过程中高密度燃料的图像,照相的时间分辨率可达皮秒量级。

中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激

光物理联合实验室于 2004 年研制成功了国内首个 ICF 综合性研究平台——神光 II 装置^[15],在激光聚变、高能密度物理、实验室天体物理等研究领域取得了丰富的研究成果。为了满足激光聚变快点火研究的需求,联合实验室于 2009 年启动了神光 II 升级装置^[16]的研制并于 2015 年投入运行。神光 II 升级装置包含 8 束纳秒激光和一束皮秒激光,单束纳秒激光可稳定运行于 3 kJ/3.3 ns/ 3ω (ω 为激光频率),皮秒激光可稳定运行于 1 kJ/1~10 ps/ ω ,靶面聚焦功率可达 10^{19} W/cm²,图像信噪比优于 10^{-8} (主脉冲前 81.75 ps 时刻)。神光 II 升级装置是我国唯一具备开展快点火集成实验和超短 X 射线背光照相集成实验能力的综合性物理实验平台。

3 基于皮秒拍瓦激光的高能 X 射线源

TITAN 装置建成后,LLNL 的科学家从 2007 年即依靠 TITAN 装置开展了光源产生效率实验研究^[11]。实验中固定激光脉冲的聚集峰值功率约为 2×10^{17} W/cm²,通过不同的诊断方法测量激光打靶产生的 X 射线光谱,采用工作于单光子计数模式的 CCD 测量 16~26 keV 范围内的 $K\alpha$ 光,采用双通道透射弯晶谱仪测量 18~120 keV 范围内的光谱,并在靶背法线 20° 方向设置了一个台阶滤片,主要测量高能部分的韧致辐射连续谱。针对不同的金属材料,其 $K\alpha$ 射线的光子能量分别为 Ag-22 keV、Sn-25 keV、Sm-40 keV、Ta-58 keV、Au-69 keV、Pb-75 keV。实验结果显示 Ag 的 $K\alpha$ 光子转换效率最高,可达到 1×10^{-4} ,但随着原子序数的增加,光子的能量转换效率大体上呈下降趋势,一般维持在 10^{-5} 量级。对比韧致辐射和 $K\alpha$ 光子的能量转换效率:偏低 Z 金属材料(Ag、Sn)的韧致辐射和 $K\alpha$ 光子的转换效率相当;高 Z 金属材料(Ta、Au、Pb)的韧致辐射的转换效率较 $K\alpha$ 光子高出 5 倍以上,可达到 10^{-4} ,其中 Ta、Au 的转换效率最高,可达到 2×10^{-4} 。从这些结果可知,随着材料 Z 值的不断增加,产生的 X 射线中韧致辐射的比例将不断提高,要获得“纯净”的 $K\alpha$ 光源越来越困难。而对于高 Z 靶产生的 75~200 keV 的 X 射线源,韧致辐射占主要份额, $K\alpha$ 光子的能量转换效率普遍较低。

在开展了不同靶材料下 X 射线转换效率研究之后,LLNL 开展了不同打靶条件下的 X 射线转换效率实验研究。激光能量固定为 150 J,通过调节脉冲宽度在 2~40 ps 范围内变化,实现了激光聚集功率密度的有效调节($5 \times 10^{17} \sim 5 \times 10^{18}$ W/cm²)。在

此实验中,75~200 keV 的韧致辐射谱主要通过台阶滤片的测量结果给出,通过对滤片和 IP(Imaging Plate)的响应进行标定可给出测量到的光子产额。在靶条件和激光能量恒定条件下,研究 X 射线能量转换效率与激光功率密度的关系,在对数坐标下,二者呈较好的线性关系,能量转换效率拟合表达式为 $R_{CE} \sim 4 \times 10^{-4} I^{1/2}$,其中 R_{CE} 为能量转换效率, I 为激光功率密度(单位为 10^{18} W/cm^2)。

随着 NIF-ARC 装置的建成,Chen 等^[17]研究了 ARC 装置产生 X 射线的实际能力,ARC 皮秒光束近场焦斑尺寸约为 $70 \mu\text{m} \times 30 \mu\text{m}$,光学脉冲宽度为 24 ps,主峰前 80 ns 内的预脉冲对比度为 $10^{-7} \sim 10^{-8}$,X 光焦斑的半峰全宽为 $80 \sim 100 \mu\text{m}$,X 光脉宽约为 30 ps。在这样的光束条件下,70~200 keV 的 X 射线的转化效率为 $4 \times 10^{-4} \sim 9 \times 10^{-4}$,这表明 ARC

装置可以满足 NIF 上 ICF 研究的成像需求。

从 2016 年开始,中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室就依托 XG III 装置^[18]及神光 II 升级装置开展了皮秒拍瓦激光产生 X 射线的实验研究。考虑到激光条件及打靶能力,在保障成像应用空间分辨率的前提下,采用微丝靶产生高能 X 射线源。这种靶通过将直径 $10 \sim 12 \mu\text{m}$ 的金属丝(包括 Au、Cu 和 Mo 等)填埋在 CH(碳氢)基底内部制成。这种靶型可以使金属丝保持平直状态,保障 X 射线成像的空间分辨率。为了保障背光照相的效果,采用一体化靶设计实现微丝靶与照相目标之间的高精度耦合。利用神光 II 装置的皮秒激光束开展了大量实验研究,实验排布如图 1 所示。激光能量为 $300 \sim 750 \text{ J}$,脉宽为 $10 \sim 15 \text{ ps}$,功率密度为 $0.7 \times 10^{18} \sim 6.0 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 。

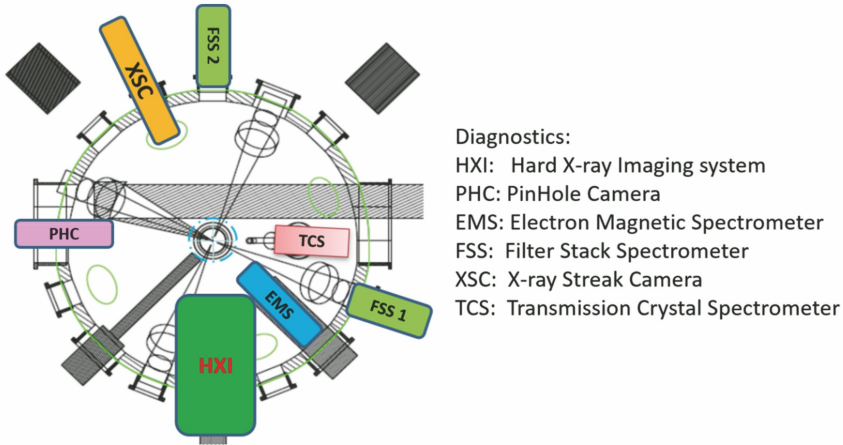


图 1 实验排布示意图

Fig. 1 Schematic of the experiment

为了测量 keV~MeV 范围内的高能 X 射线的能谱和产额,利用透射弯晶谱仪、滤片阵列谱仪和滤片堆栈谱仪等多种光谱诊断设备进行光谱联合测量,并建立了具有较高置信度的解谱方法和程序。高能 X 射线的能谱和产额是研究的重点,然而拍瓦激光打靶产生的高能 X 射线的能谱范围宽并且伴随大量的辐射干扰,这对实验诊断技术提出了很高的要求。对于 $10 \sim 100 \text{ keV}$ 能段的硬 X 射线,利用透射弯晶谱仪进行高分辨率测量,采用石英晶体对 X 射线进行色散从而得到能谱;滤片阵列谱仪基于滤片法测量 $5 \sim 100 \text{ keV}$ 的 X 射线能谱,采用扇形结构排布可以在获得能谱的同时测得 X 射线的空间分布信息;对于更高能段的 X 射线利用滤片堆栈谱仪进行测量,包含 13 层堆叠式滤片,可测量范围覆盖 $10 \text{ keV} \sim 3 \text{ MeV}$ 。滤片法的能谱测量是一种不适定问题,优良的反解算法也是获得能谱的关键

环节。通过对比多种能谱重建方法,最终采用基于最小方差法的 Greval 算法进行能谱反解,其计算速度快,全局性好,表现出较高的可靠性。为了满足实验诊断要求,开发了可视化的能谱反解程序,包括实验数据的读入、预处理、算法设置及结构后处理等功能,可直接计算激光到 X 射线的转换效率、X 射线能谱斜率等物理参数。

利用建立的高能 X 射线诊断设备和测量方法,完成了拍瓦激光与微丝靶相互作用产生的 X 射线的能谱的联合测试,典型结果如图 2 所示,获得了能量 $10 \text{ keV} \sim 1 \text{ MeV}$ 范围内的 X 射线能谱,并给出了绝对光子产额。

通过分析测量能谱,可以得到产生的 X 光的产额、能量,进而得到激光到高能 X 射线能量转换效率的变化规律。通过统计能谱中 $50 \sim 200 \text{ keV}$ 能段的高能 X 射线,得到了激光到高能 X 射线能量转换

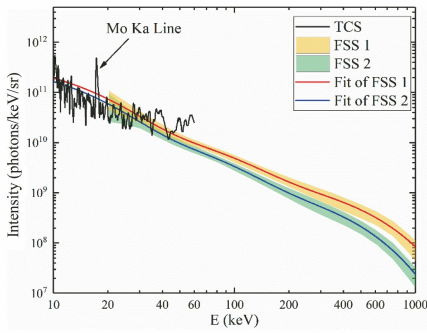


图 2 联合测量的 X 射线能谱典型结果

Fig. 2 Typical X-ray energy spectra obtained by joint measurement

效率的变化规律。10 μm 金丝靶实验结果表明:能量大于 17 keV 的 X 射线的最高产额约为 $8.8 \times 10^{11} \text{ sr}^{-1}$, 对应的能量转换率为 2.1×10^{-4} ; 50 ~ 200 keV 的产额约为 $3.5 \times 10^{11} \text{ sr}^{-1}$, 转换效率约为 1.4×10^{-4} 。测量结果表明, 不同材料微丝靶产生的 X 射线的能量转换效率均可达到 10^{-4} 。进一步对不同激光条件、不同材料微丝靶的转换效率进行比对研究, 发现按原子序数归一化后的转换效率与激光功率密度 $I^{1/2}$ 具有良好的线性关系, 如图 3 所示。

4 X 射线背光照相技术

在光源特性研究得较为清楚之后, 美国和中国的研究人员分别在 OMEGA-EP、TITAN 和神光 II 升级等激光装置上开展了一系列照相实验, 包括静态和动态实验。早期的实验研究并没有直接采用金丝靶作为背光源, 而是采用金平面靶作为背光源^[11]。后续实验的结果表明, 减小靶的尺寸是提

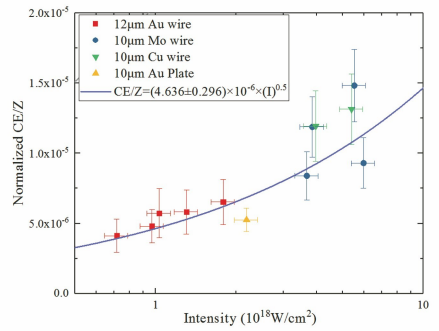


图 3 激光到 X 射线(50~200 keV)转换效率随功率密度的变化曲线

Fig. 3 Curve of the conversion efficiency from laser to X-rays (50~200 keV) with laser intensity

高背光照相空间分辨率的直接而有效的方法, 因而采用了直径为 10 μm 的 Au 微丝靶作为背光源, 使用点投影成像的方法获得了比较好的空间分辨率^[9]。典型的强激光驱动 X 射线点投影背光照相原理如图 4 所示, 采用微丝靶是一种通过减小靶截面提高空间分辨的方法, 但微丝靶的转换效率和平面靶存在较大的差别, 因此 LLNL 的科学家在不同的激光条件下, 重新研究了微丝靶在 70~200 keV 能段内的 X 射线转换效率^[19]。对于 Au 丝靶, 转换效率与激光的功率密度仍然呈线性关系: 对于基频激光, $10^{17} \sim 4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$ 功率密度对应的转换效率为 $2 \times 10^{-4} \sim 8 \times 10^{-4}$; 对于三倍频(3 ω)激光, $3 \times 10^{16} \sim 1 \times 10^{17} \text{ W/cm}^2$ 功率密度对应的转换效率为 $1 \times 10^{-5} \sim 3 \times 10^{-5}$ 。根据实验结果, 微丝靶的转换效率只有平面靶的 10%~15%, 这个比例与微丝靶的截面积和激光焦斑面积的比值相符。

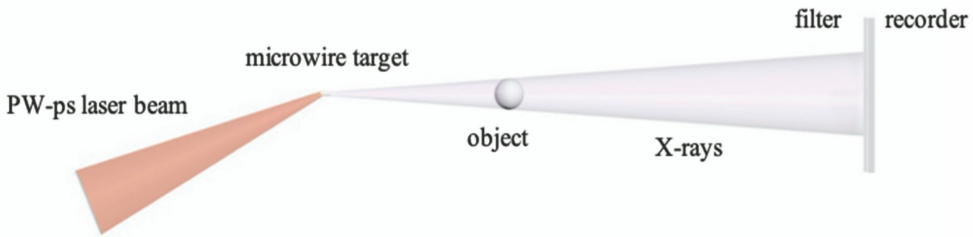


图 4 皮秒拍瓦激光驱动 X 射线点投影背光照相原理图

Fig. 4 Schematic of X-ray point-projection backlight radiography driven by picosecond petawatt laser

利用 Au 微丝靶, LLNL 的研究人员首先在 OMEGA-EP 和 TITAN 装置上对钨碳球进行了静态照相实验^[19], 采用的是基频激光, 脉宽 10 ps, 在靶上的功率密度为 $10^{17} \sim 4 \times 10^{18} \text{ W/cm}^2$, 照相目标为直径 200 μm 的钨碳球, 照相装置为康普顿成像仪, 记录装置为成像板。根据标准钨碳球的背光照相结果可以得到光源的尺寸, 利用这种方法获得的

典型光源大小为 $(11 \pm 2) \mu\text{m}$, 和 Au 丝靶的直径接近。在 NIF-ARC 装置投入试运行后, 研究人员也开展了一轮类似实验。通过对直径 200 μm 的钨碳球照相, LLNL 的研究人员建立了一种全新的光源重建技术, 并对门控探测器进行了初步考核^[20]。

等离子体物理重点实验室研究团队针对背光照相应用, 通过标准空间分辨客体对 X 射线源的成像

空间分辨能力进行了研究。空间分辨的典型实验结果如图 5 所示,其中图 5(a)和图 5(b)为分辨率板成像图像,所有分辨结构均清晰可见,表明成像分辨率

优于 $15 \mu\text{m}$ 。取图像中心镂空区域的边缘数据进行细致分析,结果如图 5(c)和图 5(d)所示,通过边缘函数分析可得到图像的分辨率为 $(12 \pm 1) \mu\text{m}$ 。

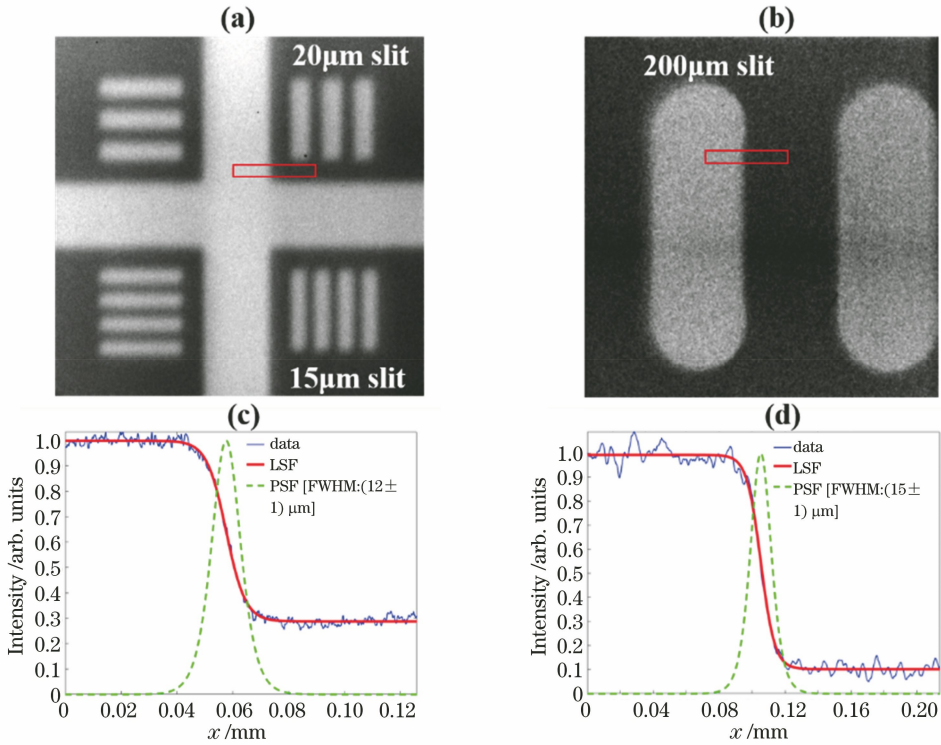


图 5 分辨率板照相图像及刀边法分析结果。(a) $20 \mu\text{m}$ 狭缝图像;(b) $200 \mu\text{m}$ 狭缝图像;
(c) $20 \mu\text{m}$ 狭缝刀边分析结果;(d) $200 \mu\text{m}$ 狭缝刀边分析结果

Fig. 5 Radiographs of resolution plates and analysis results of the knife-edge method. (a) $20 \mu\text{m}$ slit radiograph;
(b) $200 \mu\text{m}$ slit radiograph; (c) analysis result of the knife-edge method of $20 \mu\text{m}$ slit; (d) analysis result of the
knife-edge method of $200 \mu\text{m}$ slit

针对 ICF 内爆研究,对采用低 Z 材料的密度台阶样品的面密度分辨率进行了测试。透视照相典型结果如图 6 所示。台阶样品中的阶梯结构可清晰分辨,透过率误差不超过 2.5%;当面密度达到

2.5 g/cm^2 时,透过率仍然保持在 50% 以上,意味着其测量面密度上限可超过 3 g/cm^2 。这一结果表明,该光源已能够满足 ICF 内爆研究中针对 $0.1 \sim 3 \text{ g/cm}^2$ 的内爆靶丸面密度的诊断需求。

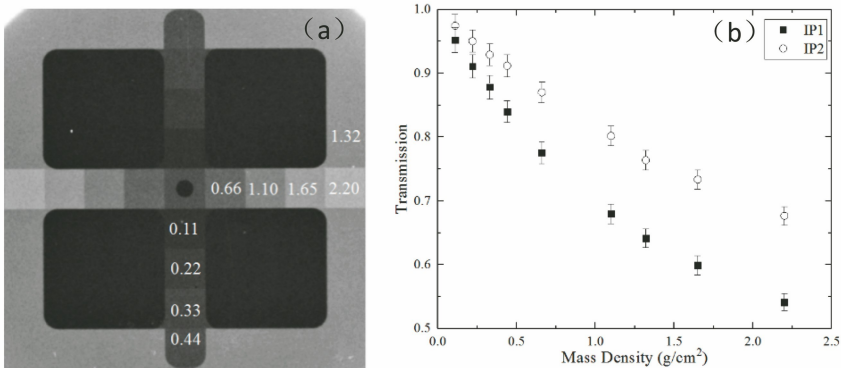


图 6 台阶样品实验结果。(a)照相图像;(b)透过率随质量密度变化曲线

Fig. 6 Experimental results of the step object. (a) Radiograph; (b) transmission versus mass density

在光源特性研究及静态照相研究较为成熟之后,LLNL 依托 OMEGA 和 OMEGA-EP 装置开展

了康普顿照相的集成演示实验。在集成演示实验研究中,首先利用 OMEGA 装置的 60 路长脉冲激光

直接驱动空心 CH 靶球,球直径为 $70\ \mu\text{m}$,壁厚 $40\ \mu\text{m}$,球内充有氙气,实验对比了 $3\ \text{atm}$ ($1\ \text{atm} = 1.01 \times 10^5\ \text{Pa}$)和 $8\ \text{atm}$ 充气压强条件下靶球的内爆压缩情况,空心靶球置于 OMEGA 靶室中心。康普顿背光源则采用 OMEGA-EP 的短脉冲激光驱动,激光脉冲宽度为 $10\ \text{ps}$,到靶能量为 $1\ \text{kJ}$,聚焦焦斑为 $100\ \mu\text{m} \times 100\ \mu\text{m}$ 的方形焦斑。背光靶采用 Au 丝靶,丝直径为 $10\ \mu\text{m}$,丝长 $300\ \mu\text{m}$,距离靶室中心 $10\ \text{mm}$ 。调节驱动束与背光束之间的时间延时以获得最大压缩时刻的背光图像,但由于两个装置上短脉冲和长脉冲的固有抖动为 $\pm 25\ \text{ps}$,高于最大压缩的维持时间,因此精确捕获最大压缩时刻的背光图像实际上是不可能的。背光照相采用了 CRS (Compton Radiography Snout,用于减少杂散 X 射线和电子的干扰)装置,其放大倍数为 38 倍。

实验获得了两种不同充气压强条件下不同时刻的背光照相结果,分别为氙气压强 $3\ \text{atm}$ 提前最大压缩时刻 (50 ± 25) ps,氙气压强 $8\ \text{atm}$ 提前最大压缩时刻 (20 ± 25) ps。结合 1D 数值模拟和背光图像的 Abel 反演,通过计算可以给出两种条件下的面密度 $\rho\Delta R$ 。相对于 1D 数值模拟,背光照相给出的面密度实验值分别偏低 62% 和 75% 。此后,计算了视场中直径 $140\ \mu\text{m}$ 内压缩燃料的剩余量,对于 $3\ \text{atm}$ 和 $8\ \text{atm}$ 的充气条件,剩余质量分别为 $(56 \pm 5)\ \mu\text{g}$ 和 $(55 \pm 5)\ \mu\text{g}$ 。尽管 $\rho\Delta R$ 值较模拟低了约 30% ,但是质量 ($\rho\Delta RR^2$) 只低了 10% ,这意味着 1D 模拟给出的内爆尺寸低了约 10% (认为这是 1D 和 3D 的差别)。为了更好地呈现背光照相的结果,LLNL 人员给出了弦积分的面密度图,由此可以直接得到二维的面密度分布图。对于 $3\ \text{atm}$ 和 $8\ \text{atm}$ 充气条件,面密度的峰值分别为 $240\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 和 $300\ \text{mg}/\text{cm}^2$, $8\ \text{atm}$ 充气条件下的内爆区域更大,且更为均匀。

从 2011 年开始,LLNL 开始设计将康普顿照相应用到 NIF 上。初期的实验设计并没有基于 ARC 平台,而是考虑利用 NIF 的 8 路紫外激光照射两个 Au 丝靶来进行康普顿照相,获得两个时刻的内爆照相结果。至 2015 年底,利用 ARC 装置完成了首轮试运行实验。在试运行实验中,使用 8 束激光中的 4 束开展了实验,每束能量最高为 $1\ \text{kJ}$,脉冲宽度为 $30\ \text{ps}$,采用平面靶及丝靶,利用各种诊断设备测量了 X 射线的能量分布、焦斑大小及脉宽。2016 年 3 月,开展了针对康普顿照相研制的成像诊断设备 (AXIS) 的测试实验。直到 2019 年的 IFSA 会议上,美国 LLNL 才报导了基于 NIF-ARC 装置的最新动态探索实验结果。实验利用 ARC 装置的激光束照射了屏蔽锥内的两个丝靶,获得了不同时刻的内爆过程图像,图像具有较好的信噪比。

等离子体物理重点实验室研究团队利用已经建立的高能 X 射线源及高分辨照相技术,在神光 II 升级装置上开展了激光微喷物理过程诊断及 ICF 内爆过程诊断的应用探索,获得了良好的效果。在激光微喷物理过程的动态诊断演示中,不仅成功获得了高空间分辨率的微喷动态图像,而且通过密度反演技术获得了全场密度分布。实验采用 ns 激光加载锡平面靶来驱动微喷过程,为了匹配锡的面密度,采用 Au 丝靶作为背光照相光源,照相放大倍率为 35 倍,照相视场达到 $3\ \text{mm}$ 。实验获得了锡材料在典型加载压强条件下在微喷动态过程中的面密度分布背光照相图像,如图 7 所示。由图 7 可知:图像空间分辨率高,微喷区内部结构清晰、背景干净;密度分布对称性较好,表明加载过程中驱动激光的一维平面性较为理想。通过密度台阶对比,给出了全场面密度分布,面密度的不确定度仅为 12% ,并进一步重建出了面密度三维分布图。

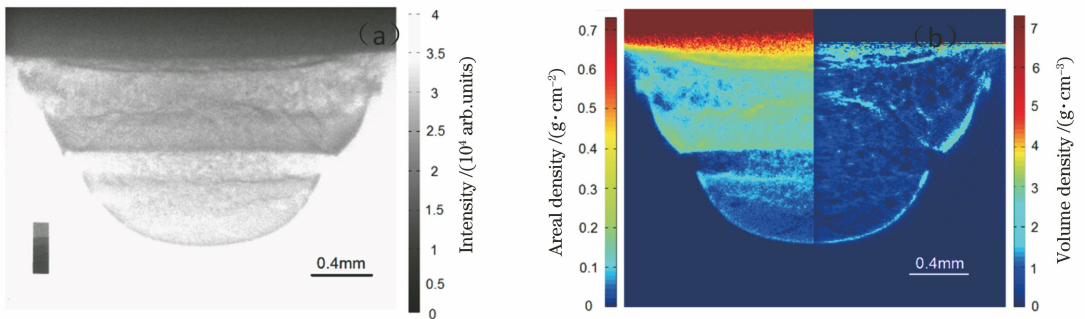


图 7 典型加载压强条件下金属微喷图像。(a)密度灰度图像;(b)面密度分布(左)及体密度分布(右)结果
 Fig. 7 Micro spray images of metal under typical loading pressure. (a) Density gray image;
 (b) areal density (left) and volume density (right) distributions

在 ICF 内爆过程动态照相演示中,实现了对高面密度内爆压缩过程的动态照相^[21]。为了在神光 II 升级装置上模拟点火尺度下的内爆靶丸状态,提高靶丸压缩面密度,设计了一种双壳层锥壳靶,该靶由内外两个壳层组成,内壳层表面包覆了数微米厚的高 Z 金属,两层之间是真空,由金属锥进行支持。在神光 II 升级装置上采用间接驱动的方式进行内爆压缩,8 路纳米激光分别从两端注入黑腔,使皮秒激光在特定的时刻照射在微丝靶上从而获取内爆过程的透视照相图像,成像系统的放大倍率达到 100 倍。内爆过程中靶丸面密度变化很大,在静态情况下面密度仅为 10 mg/cm^2 ,在压缩条件下面密度超过 100 mg/cm^2 ,因此分别采用 Mo 丝靶和 Au 丝靶对内爆过程的不同阶段进行背光照相。典型照相结果如图 8 所示,通过调节皮秒激光与纳秒主激光之间的相对延时,成功获得了内爆过程的三个典型时刻的背光照相图像,如图 8 所示,其中图 8(a)~(c) 三个子图分别对应皮秒激光延迟纳秒主激光前沿 2.7 ns、4.5 ns 和 4.9 ns。通过背光照相结果能够初

步给出靶丸压缩形貌。由图 8(a)可知,此时靶丸内壳层基本保持原来的球形,表明内球壳尚未受到外球壳作用;图 8(b)表明内球壳受到外球壳作用向内运动一定距离;图 8(c)表明内球壳进一步压缩,形成高密度芯区。根据实验参数开展了辐射流体力学模拟,模拟结果表明 2.7 ns 时,外壳层尚未与内壳层发生碰撞,4.9 ns 时,内壳层压缩至半径约 $40 \mu\text{m}$,与背光照相给出的结果吻合较好。根据背光照相结果也可初步评估靶丸面密度。由图 8(a)可知,从靶球中心到边缘,透过率逐渐降低,对应面密度逐渐升高,变化趋势与设计一致;由图 8(c)可以得到内壳层直径,结合初始时刻靶球直径,可以得到靶球收缩比,进而估算得到压缩面密度约为 369 mg/cm^2 ,需要注意的是,该面密度主要由金层贡献,换成低 Z 材料后对应的面密度会更高。原则上,可以根据背光照相图像的透过率获得面密度,但需要仔细测量皮秒背光源的能谱,以及背光源和纳秒主激光产生的背景干扰之间的比值,这部分将后续工作中进一步研究。

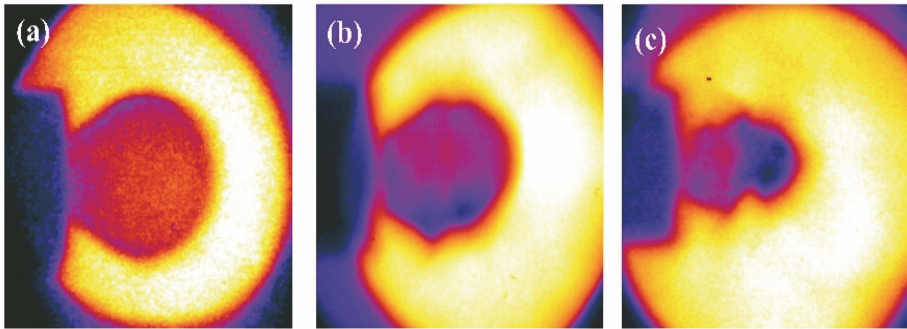


图 8 间接驱动情况下,不同时刻的靶球内球壳压缩图像。(a) $t=2.7 \text{ ns}$; (b) $t=4.5 \text{ ns}$; (c) $t=4.9 \text{ ns}$

Fig. 8 Compressed images of the inner spherical shell of the target ball at different times with indirect drive.

(a) $t=2.7 \text{ ns}$; (b) $t=4.5 \text{ ns}$; (c) $t=4.9 \text{ ns}$

5 结 论

基于皮秒拍瓦激光的高能 X 射线点投影透视照相技术具有高时空分辨率的特点,在激光驱动的动力学研究及 ICF 研究方面具有重要的应用价值,能够解决研究过程中的关键诊断问题,获得重要的物理量数据。美国 and 欧洲的国家实验室在这方面开展了长期的研究工作,在光源产生、参数诊断、照相技术等方面都具有较为深厚的积累,在应用研究中已经开始获取定量实验数据。国内主要是中国工程物理研究院激光聚变研究中心等离子体物理重点实验室针对强加载条件下材料动态响应与 ICF 研究的需求,开展了大量的理论和实验研究,初步建立了

高亮度、微焦点的高能 X 射线源,获得了良好的时空分辨率和面密度分辨率;发展了一系列 X 射线诊断技术,实现了 X 射线源特性的精确测量;建立了具有良好抗辐射屏蔽能力的点投影背光照相技术,保障了高质量背光照相图像的获取。这些研究成果使针对高面密度客体的高时空分辨透视照相的能力取得了极大的提升,在金属材料微喷动态过程诊断和 ICF 内爆靶丸状态的动态照相中取得了良好的应用结果,为后续进一步开展极端条件下物质动态特性、超快动力学、ICF 物理等研究应用奠定了坚实基础。

致谢 本团队实验工作主要基于神光 II 升级装置

开展,中国科学院上海光学精密机械研究所高功率激光物理联合实验室的全体运行人员在激光器运行方面给予了大力支持,中国工程物理研究院激光聚变研究中心制靶人员提供了优质的靶产品,在此一并表示感谢。

参 考 文 献

- [1] Danson C N, Haefner C, Bromage J, et al. Petawatt and exawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2019, 7: e54.
- [2] Danson C, Hillier D, Hopps N, et al. Petawatt class lasers worldwide[J]. High Power Laser Science and Engineering, 2015, 3: e3.
- [3] Esarey E, Schroeder C B, Leemans W P. Physics of laser-driven plasma-based electron accelerators [J]. Reviews of Modern Physics, 2009, 81(3): 1229-1285.
- [4] Macchi A, Borghesi M, Passoni M. Ion acceleration by superintense laser-plasma interaction[J]. Reviews of Modern Physics, 2013, 85(2): 751-793.
- [5] Roth M, Jung D, Falk K, et al. Bright laser-driven neutron source based on the relativistic transparency of solids [J]. Physical Review Letters, 2013, 110(4): 044802.
- [6] Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain[J]. Physics of Plasmas, 1995, 2(11): 3933-4024.
- [7] Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the National Ignition Facility [J]. Physics of Plasmas, 2004, 11(2): 339-491.
- [8] Stephens R B, Hatchett S P, Turner R E, et al. Implosion of indirectly driven reentrant-cone shell target[J]. Physical Review Letters, 2003, 91(18): 185001.
- [9] Park H S, Chambers D M, Chung H K, et al. High-energy $K\alpha$ radiography using high-intensity, short-pulse lasers[J]. Physics of Plasmas, 2006, 13(5): 056309.
- [10] Miller G H, Moses E I, Wuest C R. The National Ignition Facility: enabling fusion ignition for the 21st century[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(12): S228-S238.
- [11] Tommasini R, MacPhee A, Hey D, et al. Development of backlighting sources for a Compton radiography diagnostic of inertial confinement fusion targets [Invited] [J]. Review of Scientific Instruments, 2008, 79(10): 10E901.
- [12] Stuart B C, Bonlie J D, Britten J A, et al. The Titan laser at LLNL[C] // 2006 Conference on Lasers and Electro-Optics and 2006 Quantum Electronics and Laser Science Conference, May 21-26, 2006, Long Beach, CA, USA. New York: IEEE, 2006: 4628707.
- [13] Kelly J H, Waxer L J, Bagnoud V, et al. OMEGA EP: high-energy petawatt capability for the OMEGA laser facility[J]. Journal de Physique IV, 2006, 133: 75-80.
- [14] Barty C, Key M, Britten J, et al. An overview of LLNL high-energy short-pulse technology for advanced radiography of laser fusion experiments[J]. Nuclear Fusion, 2004, 44(12): S266-S275.
- [15] Zhu J Q, Chen S H, Zheng Y X, et al. Review on development of Shenguang-II laser facility [J]. Chinese Journal of Lasers, 2019, 46(1): 0100002. 朱健强, 陈绍和, 郑玉霞, 等. 神光 II 激光装置研制 [J]. 中国激光, 2019, 46(1): 0100002.
- [16] Zhu J Q, Zhu J, Li X C, et al. Status and development of high-power laser facilities at the NLHPLP [J]. High Power Laser Science and Engineering, 2018, 6: e55.
- [17] Chen H, Hermann M R, Kalantar D H, et al. High-energy (> 70 keV) X-ray conversion efficiency measurement on the ARC laser at the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(3): 033112.
- [18] Zhu Q H, Zhou K N, Su J Q, et al. The Xingguang-III laser facility: precise synchronization with femtosecond, picosecond and nanosecond beams[J]. Laser Physics Letters, 2018, 15(1): 015301.
- [19] Tommasini R, Hatchett S P, Hey D S, et al. Development of Compton radiography of inertial confinement fusion implosions [J]. Physics of Plasmas, 2011, 18(5): 056309.
- [20] Tommasini R, Bailey C, Bradley D K, et al. Short pulse, high resolution, backlighters for point projection high-energy radiography at the National Ignition Facility[J]. Physics of Plasmas, 2017, 24(5): 053104.
- [21] Tian C, Yu M H, Shan L Q, et al. Radiography of direct drive double shell targets with hard X-rays generated by a short pulse laser[J]. Nuclear Fusion, 2019, 59(4): 046012.