神光装置上X射线时空诊断技术概况与展望

曹柱荣^{1*}, 袁铮¹, 陈韬¹, 邓博¹, 王强强¹, 邓克立¹, 杨志文¹, 李晋¹, 缪文勇¹, 蒋炜¹,
袁永腾¹, 黎宇坤¹, 胡昕¹, 张继彦¹, 董建军¹, 丁永坤², 穆宝忠³, 王峰¹, 刘慎业¹,
杨家敏¹, 江少恩¹, 张保汉¹

1. 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900;

2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100094;

3. 同济大学先进微结构材料教育部重点实验室, 上海 200092

* 联系人, E-mail: cao33jin@aliyun.com

收稿日期: 2017-12-26; 接受日期: 2018-02-26; 网络出版日期: 2018-04-09

国家自然科学基金(编号: 11675157)和中国工程物理研究院科学技术发展基金(编号: 2015B0102016)资助项目

摘要 在激光惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)实验研究中, 对X射线的产生和演化过程的诊断和对物理实验参量调控以及模拟程序的校验起着至关重要的作用. 针对激光聚变产生的X射线在时间、空间和能谱方面的特点, 结合当前物理实验对诊断技术的特殊要求, 分别研发了以时间分辨、空间分辨和谱分辨为优势的X射线成像诊断设备. 随着我国ICF实验研究的不断深入, 国内X射线成像诊断设备的诊断能力得到了大幅度提升, 某些自主提出的新概念诊断设备的技术性能甚至优于国外同类型诊断设备.

关键词 惯性约束聚变, X射线条纹相机, X射线分幅相机, Kirkpatrick-Baez显微镜, X光透射带通

PACS: 52.70.-m, 07.85.-m, 52.57.Fg, 52.35.Py, 47.20.Ft

激光技术发明以来, 激光聚变作为干净能源一直是科学家们孜孜追求的理想. 激光聚变是以激光作为驱动源的惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF), 是实现可控热核反应、造福人类的途径之一. 由于大功率激光技术的迅猛发展, 激光聚变能作为21世纪用之不竭的新清洁能源具有十分光明的前景. 在间接驱动激光聚变ICF实验中, 激光照射到黑腔的内壁上, 大部分激光能量转化为X射线, 转换效率和转换品质是聚变点火研究最关心的物理问题之一^[1-3]. 转换

的效率决定了有多少激光能量被吸收并转换为靶丸内爆的驱动源, 转换的品质决定于X射线的能谱结构. 通过对原子动力学过程中产生的X射线辐射的测量, 可与理论模拟结果进行对比, 以促进对靶等离子体状态及其随时间和空间的演化过程的物理认识, 同时可用于物理实验过程中实时进行参量调控, 以期更快地实现聚变点火^[4-7].

因此, 在ICF实验研究中, 对X射线的产生和发展过程的诊断研究起着至关重要的作用. 针对激光聚变

引用格式: 曹柱荣, 袁铮, 陈韬, 等. 神光装置上X射线时空诊断技术概况与展望. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2018, 48: 065206

Cao Z R, Yuan Z, Chen T, et al. Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of Shenguang facilities (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2018, 48: 065206, doi: 10.1360/SSPMA2017-00366

产生的X射线在时间、空间和能谱方面的特点, 分别开发了具有高时间分辨、高空间分辨和高谱分辨性能的成像诊断设备. 随着神光III主机等大型激光装置的建成和应用, 我国ICF实验研究不断深入, X射线成像诊断设备的诊断能力得到了大幅度提升, 某些自主提出的新概念诊断设备的技术性能甚至优于国外同类型诊断设备.

1 高时间分辨成像诊断技术

激光惯性约束聚变研究(ICF)中, 超快时间信息是许多物理研究的关键物理量. 通过X光高时空分辨的诊断方法可以很好地研究内爆物理、辐射输运和流体物理等研究项目的相关信息, 如内爆过程的内爆流线、内爆速度、烧蚀速率等参数测量, 流体力学不稳定性中的RT增长率、样品轨迹测量, 辐射输运实验中输运轨迹测量等, 都需要高时间分辨的诊断技术.

激光等离子体和激光聚变产生的X射线的超高速时空演化特性是ICF物理实验研究的主要难点, 皮秒级甚至飞秒级的时间分辨诊断是该领域所需要的时间分辨尺度, 相关时间分辨诊断技术也伴随着激光装置的发展而不断发展.

1.1 气室型X射线条纹相机

X射线条纹相机是ICF领域中具有较高时间分辨和一维空间分辨能力的重要诊断设备. 但传统的实用化的X光条纹相机, 其性能指标并不高, 其动态范围只有30左右, 空间分辨只有5–10 lp/mm, 最高时间分辨只能达到10 ps左右^[8,9].

随着神光III主机装置的建成, 在激光聚变点火攻关的道路上, 伴随着高功率激光能量的提高和靶室结构的升级, 传统的X光条纹相机已无法满足实验要求, 因此专门诞生了一种气室型结构的高性能X光条纹相机^[9–11]. 中国工程物理研究院(简称中物院)的科研团队在2014年成功研制适用于神光III主机装置的气室型X射线条纹相机, 其较以往的条纹相机有以下4项技术突破^[9,11]: (1) 采用高压高场强和双聚焦的电子光学方法设计了全新的高性能扫描变像管, 获得了动态范围大于500, 有效光阴极长度优于30 mm, 空间分辨率20 lp/mm, 极限时间分辨小于5 ps的技术性能指标; (2) 研发了一种“开放式扫描管”制造技术, 实现了对扫描

变像管的精密封装, 解决了传统真空光电扫描管制造技术存在的装配精度低、成本高、电磁屏蔽差等问题; (3) 采用聚碳酸酯作为光阴极有机薄膜衬底的技术方法, 将衬底薄膜厚度降低到300 nm以下, 将扫描管光阴极在软X射线能区的量子效率提高了一个数量级; (4) 设计了太空舱式的气室型条纹相机工程结构, 解决了条纹相机整体在高真空中运行的难题. 基于这些突破性技术创新研制的气室型高性能X光条纹相机与美国的高性能条纹相机技术指标对比如表1所示^[9,11–13].

在2015年的神光III主机内爆实验中, 采用该气室型高性能X光条纹相机配合狭缝扫描成像在国际上首次观察到了清晰的双壳层内爆靶丸压缩流线图像, 美国国家点火装置(National Ignition Facility, NIF)目前为止只有清晰的单壳层内爆流线实验图像报道. 图1为神光III主机内爆流线实验排布示意图. 实验结果可以用于推断内爆速度, 以及内外壳层在内爆过程中的相互影响, 并根据实验的影响因素给出速度的不确定度.

该气室型高性能X光条纹相机的成功研制及应用, 展示了我国高性能诊断设备的研究能力, 同时标志着我国诊断水平已有超越国际先进水平的态势, 预示着我国优先获取聚变点火关键信息的可能性.

1.2 气室型高灵敏X射线分幅相机

X射线分幅相机是激光驱动惯性约束聚变实验的核心诊断工具, 具有较高时间分辨和二维空间分辨能力. 随着ICF物理实验的不断深入, 高能点辐射的高时空分辨测量需要X射线分幅相机具备足够的探测灵敏度才能获得有效信号, 超精细物理样品需要系统的超高动态范围才能精确分析物理数据. 同时, 随着神光III主机装置的建成, 诊断设备需要搭载公共诊断搭载平台(Diagnostic Instrument Manipulator, DIM)才能达到有效测试距离^[9,14], 要求诊断设备在真空状态下工作, 传统的X射线分幅相机无法满足新形势下的诊断要求.

在这样的研究背景下, 中物院的曹柱荣团队研制了用于神光III主机物理实验的气室型高灵敏分幅相机, 是神光III主机物理实验精密诊断能力建设的重要组成部分. 高灵敏门控X光探测器由针孔成像机构、X光分幅变像管和气室三部分组成, 其中气室内集成了微通道板(Micro-Channel Plate, MCP)电控模块、电荷耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)及读出系

表 1 中国工程物理研究院研制的气室型X光条纹相机与美国的高性能条纹相机技术对比

Table 1 Comparison of the technical indicators of the gas-chamber X-ray streak camera developed by the China Academy of Engineering Physics with the X-ray streak camera of the United States

技术指标	美国利弗莫尔实验室 ^[12,13]	中国工程物理研究院 ^[9,11]	比较结果
动态范围	200	500	中物院占优
时间分辨率	~5 ps	~5 ps	基本相同
空间分辨	中心13.3 lp/mm	中心20 lp/mm	中物院占优
光阴极长度	31.2 mm	30 mm	基本相同
扫描非线性	2%	3%	美国占优
避硬X广直穿能力	无, 需要针对性采取措施	有, 狭小的空间实现倾斜式设计	中物院占优
时标系统	反射式	透射式	美国占优
电控系统	体积小集成度高	集成度有待提高	美国占优
相机气室体积和重量	方型1500 mm×165 mm×165 mm, 重约70 kg	圆柱形1600 mm× ϕ 234 mm, 重约50 kg	各有优势

图 1 (网络版彩图)神光III主机内爆流线测量实验排布示意图
Figure 1 (Color online) Schematic diagram of the implosion stream-line measurement for the Shen'guang III facility.

统、控制模块。X光分幅变像管和MCP电控模块均采用最新技术,是系统核心组成部分。气室型高灵敏X射线分幅相机系统原理图如图2(a)所示。X光针孔成像机构实现对物理靶球进行X光小孔阵列成像,通过变换不同长度的锥筒实现成像放大倍率的变换。控制模块采用基于PC104的计算机系统构架,实现对高压电控箱、气室环境以及CCD图像采集卡等的测量与控制。DIM气室系统实现高真空隔离,在高真空靶室中为分幅相机电控系统提供一个密封的大气工作环境,也是系统各部件的安装箱体。首创专利“抽屉式”设计的气室模块可适应神光III公共诊断搭载平台的搭载功能,可实现制冷调节,同时具有法拉第罩功能,可屏蔽靶场的瞬时电磁干扰,实现了系统的高可靠性、便捷、短小轻便等功能。气室型X光分幅相机整机结构如图2(b)所示。

气室型高灵敏X射线分幅相机的技术指标相较于传统X射线分幅相机的对比见表2^[15,16]。由表2可知,采

图 2 (网络版彩图)气室型高灵敏X光分幅相机的系统原理及整机结构图。(a) 气室型高灵敏X射线分幅相机系统原理图;(b) 气室型高灵敏X光分幅相机整机结构

Figure 2 (Color online) System principle diagram and machine structure of the gas-chamber high sensitive X-ray framing camera. (a) Schematic diagram of the camera system; (b) machine structure of the camera.

用了超灵敏门控探测技术的气室型高灵敏X射线分幅相机的灵敏度比传统X射线分幅相机高出50~70倍,优势明显。

在间接驱动ICF实验中,激光入射到黑腔中产生X射线,X射线压缩填充D-D或D-T燃料的靶丸,产生内

表 2 气室型高灵敏分幅相机与传统分幅相机的技术指标对比

Table 2 Comparison of the technical indicators of the gas-chamber high sensitive X-ray framing camera with the traditional X-ray framing camera

技术指标	气室型高灵敏分幅相机	传统分幅相机 ^[15,16]
气室外形尺寸	200 mm×200 mm×1200 mm	—
通道数目	4	4
工作能区	1–10 keV	1–10 keV
动态空间分辨	优于25 lp/mm	20 lp/mm
时间分辨	70–100 ps	100 ps
记录面	微带宽度6.6 mm, 微带间隙4.0 mm, 微带长度30.0 mm	微带宽度6.0 mm, 微带间隙4.0 mm, 微带长度30.0 mm

爆, 内爆对称性将直接影响聚变效率. 利用气室型高灵敏X射线分幅相机测量的内爆靶丸芯部自发射图像, 可以用来判断内爆对称性. 在神光III主机装置上进行了该项实验. 神光III主机激光装置包含32束外层激光束(单边16束)和16束内层激光束(单边8束), 外层和内层激光束分别以不同角度入射到黑腔, 在黑腔壁上形成不同的反射点. 外层和内层激光束之间的能量平衡对内爆对称性有重要影响.

实验中, 气室型高灵敏X射线分幅相机搭载DIM伸入神光III主机靶室中, 通过Au柱腔侧面的方形诊断孔对内爆压缩靶丸成像. 该实验中每发次的激光总能量均为70 kJ, 除内外层激光能量配置不同, 其他实验设置基本一致. 在内层激光和外层激光的不同能量平衡状态下, 不同发次可获得的典型内爆热斑图像如图3所示, 据此可设计内层激光和外层激光的能量比例使内爆对称性达到最佳值.

1.3 新型展宽型分幅相机

传统的既具有时间分辨又具有二维空间分辨的诊断设备主要是X射线分幅相机, 由微带阴极微通道板、选通脉冲、荧光屏及记录图像的CCD相机构成. 微通道板中二次电子的动态倍增过程及由此产生的渡越时间及其弥散程度决定了门控脉冲信号的最小时间宽度, 进而决定了相机的曝光时间, 即时间分辨能力. 使用薄的微通道板(250 μm)可将分幅相机曝光时间减小到30 ps, 但由于电子无法得到有效的倍增, 从而不能获得需要的增益. 当前, 国内外相关研究单位所报道的微通道选通型X光分幅相机时间分辨能力的成熟水平为60–80 ps^[17,18].

在内爆压缩过程中, 内爆芯部自发光和热斑非均

图 3 (网络版彩图)在SGIII主机物理实验中测到的典型内爆热斑图像. (a) Shot058, $t=2.22$ ns; (b) Shot053, $t=2.18$ ns; (c) Shot059, $t=2.18$ ns; (d) Shot061, $t=2.18$ ns

Figure 3 (Color online) The implosion hot spot images by gas-chamber high sensitive X-ray framing camera on the SGIII facility. (a) Shot058, $t=2.22$ ns; (b) Shot053, $t=2.18$ ns; (c) Shot059, $t=2.18$ ns; (d) Shot061, $t=2.18$ ns.

匀性的观测时间仅200 ps, 这就要求对内爆靶丸进行二维成像诊断设备的时间分辨率达到10 ps以内. 传统结构的分幅相机, 由于工作原理和制作工艺的限制, 显然达不到如此高的时间分辨. 因此, 需要发展皮秒级时间分辨的新型分幅相机.

美国San Diego实验室^[19]于2010年首次提出一种电子脉冲展宽技术, 可将其应用于分幅成像诊断技术. 电子脉冲展宽技术的原理如图4所示^[20], 光脉冲经光阴极转化为二次电子脉冲, 在时变的电场加速下, 不同时刻出射的电子分别获得不同速度, 再进入无加速的漂

图 4 电子脉冲展宽原理^[20]

Figure 4 The principle of the pulse-dilation technology [20].

移区进行轴向匀速漂移, 从而在电子接收端将信号的初始脉宽展宽, 再采用传统分幅相机选通接收展宽的电子脉冲, 从而实现超高时间分辨.

2012年, 美国利弗摩尔实验室成功研制基于电子脉冲展宽技术, 以四组励磁线圈约束电子漂移的时间分辨优于10 ps的展宽型分幅相机(Dilation X-ray Imager, DIXI)^[21], 并于2013年开始应用于NIF装置进行诊断实验^[22,23]. 该相机虽然时间分辨可达10 ps, 但由于电子在磁场中运动轨迹的限制, 其空间分辨为300 μm 左右, 这显然限制了对物理信息的细致观测. 近年来, 美国科研工作者以展宽型分幅相机为原型, 变换出更优秀的诊断设备.

利用像素阵列512×512、帧率2 ns、空间分辨25 μm 、动态范围1000:1的hCMOS作为DIXI的记录设备, 可以实现Single-Line of Sight (SLOS)的多分幅成像. 其前端的成像单元可以是针孔, 也可以是空间分辨率更高的Kirkpatrick-Baez (KB)显微镜或者Wolter显微镜. 目前美国已经实现了DIXI配针孔的SLOS-1和配KB显微镜的SLOS-2, 并预计2019年完成DIXI配Wol-

ter显微镜的SLOS-3的研发及应用.

国内科研工作者也紧随其后, 深圳大学的Bai课题组^[24,25]利用短磁透镜聚焦约束电子, 研制了口径50 mm的无缩像展宽型聚焦变像管. 中物院的研究者也基于四级螺线管变径励磁线圈研制了缩像型的磁聚焦变像管^[20]. 图5(a)为深圳大学研制的展宽型聚焦变像管, (b)为中物院研制的磁聚焦变像管. 目前这两种基于脉冲展宽技术的聚焦变像管还属于样机研制阶段, 未来将用在神光III主机装置上与KB显微镜等诊断设备进行配合, 用于测量内爆靶丸芯部自发射的时空演化过程.

2 高空间分辨成像诊断技术

2.1 KB显微镜

KB显微镜是基于掠入射反射式成像原理发展的一种高分辨X射线诊断设备. 它由两块正交放置的掠入射球面或柱面反射镜构成, 分别在子午和弧矢方向上实现聚焦, 校正了单块球面反射镜在掠入射情况下的严重像散^[26]. KB显微镜可以实现3–5 μm 的空间分辨以及 10^{-7} sr量级的集光效率, 通过选择合适的膜系结构, 还可以实现一定的能谱分辨^[27–30]. 同时, 以KB显微镜为代表的反射式显微成像可以有效避免直穿光和碎片问题. 因此KB显微镜是目前激光ICF最有前途的X射线成像诊断设备. “单通道KB+条纹相机”和“四通道KB+分幅相机”已经成为国际上OMEGA和LMJ等强激光ICF装置的关键X射线成像诊断设备, 获得了丰富的表征等离子体温度和面密度定量化诊断信息, 并成功

图 5 (网络版彩图)国内研制的展宽型聚焦变像管样机. (a) 深圳大学研制的展宽型聚焦变像; (b) 中物院研制的磁聚焦变像管

Figure 5 (Color online) The pulse-dilation imaging tube prototypes developed by domestic researchers. (a) Pulse-dilation framing camera of Shenzhen University; (b) pulse-dilation imaging tube of China Academy of Engineering Physics.

应用于美国国家点火装置(NIF)^[31-33].

目前国内在KB单元技术和“多色KB”方面的技术也在飞速发展. 为了实现窄能带X射线诊断, KB显微镜的表面镀有X射线多层膜以增强特定能点的X射线反射率. 中物院的曹柱荣等人^[34]对制备完成的多层膜KB显微镜进行X射线成像实验并将其与单层Ir膜KB显微镜进行对比, 对比结果见表3. 通过对比可知, 多层膜的KB显微镜有较大的掠入射角度, 可以显著提高KB显微镜的成像质量, 并可实现较高的能量分辨. 其中心视场分辨率相当, 但边缘视场的分辨率明显变好, 在250 μm 视场内可达到3–5 μm 的分辨水平.

ICF内爆物理研究内容包括内爆压缩流线与速度、压缩对称性、中子产额以及分解的内爆流体不稳定性等. 围绕影响美国点火成败的烧蚀层与燃料的混合度、内爆速度、热斑压缩形状问题, 在原物理实验方法基础上, 中物院的曹柱荣课题组^[34]提出并建立了

多色KB诊断系统. 根据ICF物理实验对KB系统工作掠入射角、空间分辨率和放大倍数等参数的实际诊断需求, 确定软X射线工作能点多层膜的设计要求: 能同时测量两个中心能点(2.5和8 keV)的双能点多层膜的“多色”KB显微镜.

以“双周期多层膜”KB显微镜元件研制和系统装调技术为研究重点, 中物院的曹柱荣等人^[34]在2008年首次实现了实验室内的KB显微镜装配及X射线成像实验. 这是我国首次实现高性能的KB显微成像, 与美国OMEGA强激光装置上正在运行的KB系统性能相当. 2008年12月, 首次应用于神光II装置的静态网格测试实验, 得到了优于5 μm 空间分辨的成像结果. 之后在研发多色KB系统中, 通过不断优化匹配, 空间分辨率在中心视场内达到了好于3 μm 的成像结果, 典型结果如图6所示, 图中分别列出8 keV能点和2.5 keV能点的静态照相结果, 并给出了最佳视场内空间分辨的读取

表 3 不同膜系KB显微镜的成像性质比较

Table 3 Comparison of the imaging properties of KB microscopes with different films

系统指标	单层膜KB	周期膜KB	非周期膜KB
掠入射角	0.425°	1.133°	1.133°
角度带宽	0.56°	0.06°	0.3°
中心视场分辨率	2 μm	2 μm	2 μm
5 μm 分辨率视场	$\pm 50 \mu\text{m}$	$\pm 100 \mu\text{m}$	$\pm 200 \mu\text{m}$
有效集光立体角	9×10^{-7}	8×10^{-7}	1×10^{-7}
能量分辨	很弱	16	3.4
成像均匀性	80%–100%	65%–100%	90%–100%

图 6 (网络版彩图)多能带响应的多层膜KB成像和空间分辨典型结果^[34]

Figure 6 (Color online) Multi-band multilayer film KB microscopy imaging and its spatial resolution measurement ^[34].

结果. 这些结果标志着我国具备了X射线的3 μm 级多色显微成像诊断能力.

为了从实验上更好地理解 and 把握激光惯性约束聚变内爆过程中靶丸壳层的运动过程, 基于多色KB诊断系统提出了双流线的概念, 即在诊断内爆壳层内界面运动轨迹的同时, 利用KB显微镜另一能点建立内爆壳层烧蚀界面的运动轨迹. 由此双流线, 可以同时获得壳层在烧蚀压力驱动下的压缩和烧蚀飞散, 准确测量剩余壳层物质的质量, 更好优化靶设计和优化流体程序.

在神光III原型激光装置上进行了内爆双流线诊断测量^[34], 典型的实验排布如图7(a)所示, 图7(b)展示了双通道KB显微镜与条纹相机耦合后, 获得的双能点内爆过程和流线图像, 左边的流线显示了1.2 keV能点的内爆过程, 右边则是3.5 keV能点的内爆过程, 可以观测到两者有着很明显的区别. 通过数据处理可获得内爆过程中烧蚀界面和推进界面的时间演化图像, 并精确计算内爆过程中壳层密度分布随时间的变化, 获得壳层的面密度和剩余质量, 对内爆模拟程序进行校验.

2.2 其他高空间分辨成像诊断技术

2.2.1 Wolter显微镜

Wolter显微镜是另外一种类型的掠射反射X射线显微镜. Wolter显微镜是由两个共轴曲面紧密连接构成. 其成像原理如图8所示. 共轴的双曲面和椭球面左焦点重合, 物点置于双曲面的右焦点, 则由物点发出的光经双曲面和椭球面两次反射后在椭球面的右焦点汇聚即为像点. Wolter显微镜的镜头是两个轴对称的二次曲面同轴拼接在一起构成. 主要用于R-T流体力学不稳定性的研究等高分辨X射线成像实验研究.

2.2.2 弯晶

弯晶单能成像技术也是流线测量的一种方法, 球面弯晶成像原理和单球面镜成像原理类似, 其优点是可以实现靶球的单色成像, 简化数据处理中不透明度的处理, 但弯晶的物像关系配置较复杂, 在系统的瞄准和靶的设计方面需特殊考虑.

在国外, 利用球面弯晶对背光图像进行成像, 在0.8 mm $\times$ 0.8 mm视场内获得平均分辨2–3 μm 的Si背光网格图像, 并进行了RT背光照相. 国内, 重庆大学研制了石英球面弯晶, 在背光实验中获得了分辨为83.3 μm 的图像. 由于神光装置上用的靶尺度为百微米级, 要获得高分辨图像, 必须研制分辨优于10 μm 的X光成像系统, 才能获得靶物理过程的细节. 为此, 陈伯伦等人^[35]自主研制了球面弯晶单色成像系统, 并在神光II激光装置上开展内爆靶丸投影成像实验研究. 首先采用石英球面晶体($2d=0.8512\text{ nm}$), 利用Mg波长0.8419 nm (1.472 keV)的类H共振线作为背光源对壳层厚度3 μm 的靶丸进行单能成像. 靶丸内径260 μm , 壳层为聚苯乙烯塑料. 实验结果如图9所示.

利用单色成像技术进行背光成像, 可以消除背光源发射光谱的影响, 降低数据处理的复杂度和不确定度. 配合时间分辨的记录设备, 这种单色成像系统在内爆压缩过程和流体力学不稳定性实验诊断中将有更重要的应用.

3 能谱分辨成像诊断技术

3.1 传统的谱诊断技术

在激光聚变辐射体诊断中, 首先需要完成对X光

图7 (网络版彩图)双能点成像测量内爆双流线技术示意图^[34]. (a) 内爆双流线诊断实验排布; (b) 双通道KB显微镜测量的双能点内爆图像

Figure 7 (Color online) Measurement of the double implosion stream line based on the double-energy points imaging technology ^[34]. (a) Diagnostic arrangement for implosion double stream line; (b) double energy point implosion images taken by dual-channel KB microscopy.

图 8 (网络版彩图)Wolter显微镜成像原理示意图

Figure 8 (Color online) Schematic diagram of Wolter microscopy.

图 9 3 μm壳厚靶丸单能背光图像^[35]

Figure 9 The single energy backlit image of the target with 3 μm spherical shell [35].

的能量或波长选择, 选择方法包括单色方法、带通方法以及平响应全光谱测量等^[36–38]. 单色方法比如各种类型的光栅、晶体以及波带片等, 应用中需要考虑辐射体的强度和谱特性等因素. 平响应全光谱测量主要为一般性的强度诊断或者已知谱情况下的辐射流诊断. 带通方法主要为各种类型的平面镜和滤片组合, 应用相对普遍, 它是辐射体诊断中单色与全光谱测量方法之间的一种折中, 被广泛用于绝对计量. 比如用于惯性约束聚变研究的软X光功率谱仪, 可以获得黑腔辐射体X光辐射通量、辐射温度、X射线返照率以及转换效率等信息的绝对计量^[39,40].

基于平面镜和滤片的这种传统X光带通方式是一种掠入射反射式结构, 虽然结构比较简单, 但是在精密实验应用中仍然存在很多不足. 比如在辐射流特性诊断中的多通道软X光功率谱仪, 需要多通道的掠入射平面镜组合. 镜子的结构与装配会引入较多的不确定性, 镜子的角度敏感性对标定和应用提出很高的精度要求. 尤其是多通道结构下, 整个谱仪的视角接近 8° , 对于动态辐射体而言, 通道视角因子的差异几乎不可能修正. 另外在辐射体成像型带通诊断中, 比如多组平面镜配合针孔成像诊断辐射体等离子体运动研究, 系统瞄准和图像固有倾角成为系统设计和实际应用的难点.

3.2 新型能谱分辨成像诊断技术

传统的黑腔辐射谱诊断方式是采用多个不同能带的掠入射平面镜并联(即Dante谱仪)诊断, 这种方式不但测量不确定度大, 还无法成像, 不能直观地观察辐射发展过程. 为了解决掠入射平面镜成像带来的“斜视”问题, 中物院的Cao等人^[41,42]首创性地提出了一种基于微通道板X射线光学的透射带通技术. 通过比较三种通道结构的MCP-X光传输特性, 给出了最优的方孔MCP带通设计方法. 图10为方孔MCP的基本原理. 在以一定角度平行光入射情况下, 从入射口不同位置入射, 其反射次数不同. 入射点深度越深, 反射次数越少, 反之反射次数加大. 显然, 反射次数与通道长度、通道孔径、入射角度以及入射点位置等参数有关.

该团队还利用北京同步辐射装置开展了方孔MCP和滤片标定如图11所示, 标定结果表明, MCP透射谱具有宽能带选择范围和高效率的特点, 并且在1 keV以下可以在多个多能点实现100 eV带宽的带通设计. 基于图11(a)所示的MCP带通片透射谱, 结合滤片标定结果, 可以给出多种窄能带结构的能量选择器. 图11(b)为4种滤片标定数据与图11(a)透射谱标定数据组合后的数据结果. 这4种滤片为神光II装置DANTE谱仪用的常规滤片, 透过率为同条件下的标定数据. 由图可见, MCP带通效果具有明显于平面镜的窄能带特点, 并且, 在一个角度下的MCP即可实现多个能点的选择.

基于MCP透射带通技术, 成功研制了一套透射分频分幅相机, 并应用于神光III主机装置的物理实验中, 表现出了高可靠性和稳定性. 透射分频分幅相机系统

图 10 (网络版彩图)方孔MCP反射几何原理^[42]

Figure 10 (Color online) Reflection geometry principle of the square hole MCP [42].

图 11 (网络版彩图)方孔MCP透射谱标定及配滤片的带通效果^[42]. (a) MCP透射谱标定结果与理论对比; (b) MCP配滤片的带通数据结果

Figure 11 (Color online) The transmission spectrum calibration of the square hole MCP and the band pass effect of it with different filters ^[42]. (a) Comparison of the transmission spectrum of MCP with the theory; (b) the band pass data of MCP with different filters.

的成功研制和应用标志着我国ICF精密诊断技术迈上了新台阶. 以MCP透射带通技术为启发, 袁铮等人^[43]发展了一种基于纳米级掠入射微柱面反射镜阵列的可用于微米级成像的X射线平响应低通滤波技术. 这种新型平响应滤波技术为平响应谱诊断提供了新思路, 将利于黑腔辐射谱的平响应成像诊断.

4 结论

随着神光系列激光装置的不断发展和驱动能力的

提高, 对应物理实验对X射线时空诊断的要求也不断提高, 国内的诊断技术研究人员不断开拓新思想, 创造新思路, 以期研发出诊断能力更强、诊断精度更高、诊断范围更广、诊断准确度更好的、多样化的X射线时空诊断设备, 为激光聚变物理实验提供更高、精、尖的诊断数据, 为成功实现点火助力. 随着我国在ICF研究领域的不断深入, 国内的科研工作者们在追求聚变点火, 开发清洁能源的道路上越走越远, 已经不再是跟随国际尖端科技的脚步前进, 而是通过不懈努力使自己逐步站上了国际领先的舞台.

参考文献

- Wen S H, Ding Y K. Laser inertial Confinement Fusion Diagnostics (in Chinese). Beijing: National Defense Industry Press, 2012 [温树槐, 丁永坤. 激光惯性约束聚变诊断学. 北京: 国防工业出版社, 2012]
- Chang T Q, Zhang J, Zhang J T, et al. Laser-target Plasma Interacting and Laser Fusion (in Chinese). Changsha: Hunan Science and Technology Publishing Company, 1990. 403–426 [常铁强, 张钧, 张家泰, 等. 激光等离子体相互作用与激光聚变. 长沙: 湖南科学技术出版社, 1990. 403–426]
- Moses E, Lindl J D. The national ignition campaign: Status and progress. In: International Atomic Energy Agency Fusion Energy Conference, San Diego, 2012
- Landen N. NIF Diagnostic Damage and Design Issues. Technical Report, Lawrence Livermore National Lab, 1999
- Kilkenny J D. The role of experimental science in ICF—Examples from X-ray diagnostics and targets. *Eur Phys J D*, 2007, 44: 289–292
- Haan S W, Huang H, Johnson M A, et al. Instability growth seeded by oxygen in CH shells on the national ignition facility. *Phys Plasm*, 2015, 22: 032708
- Regan S P, Epstein R, Hammel B A, et al. Hot-spot mix in ignition-scale inertial confinement fusion targets. *Phys Rev Lett*, 2013, 111: 045001
- Niu L H, Yang Q L, Niu H B, et al. A wide dynamic range X-ray streak camera system. *Rev Sci Instrum*, 2008, 79: 023103
- Hu X, Liu S Y, Ding Y K, et al. Design of SG-III X-ray streak camera (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2009, 29: 2871–2875 [胡昕, 刘慎业, 丁永坤, 等. 神光III主机X射线条纹相机设计. 光学学报, 2009, 29: 2871–2875]
- Kimbrough J R, Bell P M, Christianson G B, et al. National Ignition Facility core X-ray streak camera. *Rev Sci Instrum*, 2001, 72: 748–750
- Li J, Hu X, Fan L, et al. Fabrication and absolute calibration of X-ray streak camera cathode (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015,

- 27: 082003 [李晋, 胡昕, 樊龙, 等. X射线条纹相机阴极制备及其绝对标定. 强激光与粒子束, 2015, 27: 082003]
- 12 Oertel J A, Aragonéz R, Archuleta T, et al. Gated X-ray detector for the National Ignition Facility. *Rev Sci Instrum*, 2006, 77: 10E308
- 13 Kimbrough J R, Bell P M, Bradley D K, et al. Standard design for national ignition facility X-ray streak and framing cameras. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 10E530
- 14 Yang Z H, Liu S Y, Cao Z R, et al. Development of Shenguang III facility general diagnostic instrument manipulator (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2011, 23: 115–120 [杨正华, 刘慎业, 曹柱荣, 等. 神光III主机通用诊断搭载平台的研制. 强激光与粒子束, 2011, 23: 115–120]
- 15 Cao Z R, Liu S Y, Zhang H Y, et al. Shen-guang III core X-ray framing cameras (in Chinese). *Acta Photon Sin*, 2009, 38: 1881–1885 [曹柱荣, 刘慎业, 张海鹰, 等. 神光III核心X射线分幅相机. 光子学报, 2009, 38: 1881–1885]
- 16 Yang W Z, Bai Y L, Qin J J, et al. Gain narrowing effect of soft X-ray picoseconds framing camera (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2009, 21: 755–760 [杨文正, 白永林, 秦君军, 等. 软X射线皮秒分幅相机的增益压窄效应. 强激光与粒子束, 2009, 21: 755–760]
- 17 McCarville T, Fulkerson S, Booth R, et al. Gated X-ray intensifier for large format simultaneous imaging. *Rev Sci Instrum*, 2005, 76: 103501
- 18 Yang W, Bai Y, Liu B, et al. Temporal resolution technology of a soft X-ray picosecond framing camera based on Chevron micro-channel plates gated in cascade. *Nucl Instruments Methods Phys Res Sect A*, 2009, 608: 291–296
- 19 Hilsabeck T J, Hares J D, Kilkenny J D, et al. Pulse-dilation enhanced gated optical imager with 5 ps resolution (invited). *Rev Sci Instruments*, 2010, 81: 10E317
- 20 Yuan Z, Yang Z W, Li J, et al. Ultrafast time resolution 2D imaging technology based on photoelectron pulse quasis-linearly dilation (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2014, 26: 052007 [袁铮, 杨志文, 李晋, 等. 基于光电子脉冲展宽的高时间分辨成像技术. 强激光与粒子束, 2014, 26: 052007]
- 21 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. *Rev Sci Instrum*, 2012, 83: 10E116
- 22 Nagel S R, Ayers M J, Felker B, et al. Performance measurements of the DIXI (dilation X-ray imager) photocathode using a laser produced X-ray source. In: *Proceedings of Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion*. San Diego: SPIE, 2013
- 23 Nagel S R, Hilsabeck T J, Bell P M, et al. Investigating high speed phenomena in laser plasma interactions using dilation X-ray imager (invited). *Rev Sci Instrum*, 2014, 85: 11E504
- 24 Bai Y, Long J, Liu J, et al. Demonstration of 11-ps exposure time of a framing camera using pulse-dilation technology and a magnetic lens. *Opt Eng*, 2015, 54: 124103
- 25 Cai H, Fu W, Bai Y, et al. Simulation of a dilation X-ray framing camera. *J Electron Imag*, 2017, 26: 043003
- 26 Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays. *J Opt Soc Am*, 1948, 38: 766–774
- 27 Yi S Z, Mu B Z, Jiang L, et al. Imaging characteristics of 2.5 keV multilayer Kirkpatrick-Baez microscope (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2012, 24: 1170–1174 [伊圣振, 穆宝忠, 蒋励, 等. 2.5 keV能点多层膜KB显微镜成像性能. 强激光与粒子束, 2012, 24: 1170–1174]
- 28 Marshall F J, DeHaas T, Glebov V Y. Charge-injection-device performance in the high-energy-neutron environment of laser-fusion experiments. *Rev Sci Instrum*, 2010, 81: 10E503
- 29 Craxton R S. Polar direct drive-proof-of-principle experiments on OMEGA and prospects for ignition on the NIF. In: *Proceedings of 46th Annual Meeting of the American Physical Society Division of Plasma Physics*. Savannah, 2004
- 30 Marshall F J, McKenty P W, Delettrez J A, et al. Plasma-density determination from X-ray radiography of laser-driven spherical implosions. *Phys Rev Lett*, 2009, 102: 185004
- 31 Marshall F J. Direct-drive, high-convergence-ratio implosion studies on the OMEGA laser system. In: *Proceedings of 41st Annual Meeting of the American Physical Society*. Seattle, 1999
- 32 Koch J A, Landen O L, Barbee T W Jr, et al. High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the national ignition facility. *Appl Opt*, 1998, 37: 1784–1795
- 33 Turner R E. FY'03 OMEGA Summary for LLE Annual Report. Technical Report, Lawrence Livermore National Lab, 2003
- 34 Cao Z R, Ding Y K, Dong J J, et al. Researches and applications of X-ray high-spatial-resolution multi-color microscope system (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2015, 27: 032013 [曹柱荣, 丁永坤, 董建军, 等. X射线高空间分辨多色显微成像系统研制及应用. 强激光与粒子束, 2015, 27: 032013]
- 35 Chen B L, Yang Z H, Wei M X, et al. High-resolution monochromatic X-ray imaging techniques applied to Shenguang II laser facility (in Chinese). *High Power Laser Part Beams*, 2013, 25: 3119–3122 [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. 强

激光与粒子束, 2013, 25: 3119–3122]

- 36 Lindl J D, Amendt P, Berger R L, et al. The physics basis for ignition using indirect-drive targets on the national ignition facility. *Phys Plasmas*, 2004, 11: 339–491
- 37 Campbell E M, Hogan W J. The national ignition facility-applications for inertial fusion energy and high-energy-density science. *Plasma Phys Control Fusion*, 1999, 41: B39–B56
- 38 Lindl J. Development of the indirect-drive approach to inertial confinement fusion and the target physics basis for ignition and gain. *Phys Plasm*, 1995, 2: 3933–4024
- 39 Sun K X, Huang T X, Ding Y K, et al. Experimental research on radiation temperature for hohlraums (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2002, 51: 1750–1754 [孙可煦, 黄天暄, 丁永坤, 等. 黑腔靶辐射温度实验研究. *物理学报*, 2002, 51: 1750–1754]
- 40 Cao Z R, Li S W, Jiang S E, et al. Plasma convergence time of radiation hohlraum with single-end drive on SG-III prototype laser facility (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2010, 59: 7170 [曹柱荣, 李三伟, 江少恩, 等. 神光III原型单端驱动黑腔等离子体聚心时间研究. *物理学报*, 2010, 59: 7170]
- 41 Cao Z, Jin F, Dong J, et al. Soft X-ray low-pass filter with a square-pore microchannel plate. *Opt Lett*, 2013, 38: 1509–1511
- 42 Cao Z R, Dong J J, Yang Z H, et al. A new method of soft X-ray transmission band-pass (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2013, 62: 045205 [曹柱荣, 董建军, 杨正华, 等. 一种透射式软X光带通方法研究. *物理学报*, 2013, 62: 045205]
- 43 Yuan Z, Cao Z R, Zhu X L, et al. A technology of X-ray imaging flat-response low-pass filter (in Chinese). *Acta Opt Sin*, 2013, 62: 045205 [袁铮, 曹柱荣, 朱效立, 等. 一种X射线成像型平响应低通滤波技术. *光学学报*, 2013, 62: 045205]

Progress and plans of X-ray temporal and spatial diagnosis technology of Shenguang facilities

CAO ZhuRong^{1*}, YUAN Zheng¹, CHEN Tao¹, DENG Bo¹, WANG QiangQiang¹,
DENG KeLi¹, YANG ZhiWen¹, LI Jin¹, MIAO WenYong¹, JIANG Wei¹,
YUAN YongTeng¹, LI YuKun¹, HU Xin¹, ZHANG JiYan¹,
DONG JianJun¹, DING YongKun², MU BaoZhong³, WANG Feng¹, LIU ShenYe¹,
YANG JiaMin¹, JIANG ShaoEn¹ & ZHANG BaoHan¹

¹ Research Center of Laser Fusion, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, China;

² Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100094, China;

³ Key Laboratory of Advanced Micro-structure Materials of Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China

In the field of indirect-drive inertial confinement fusion, temporal and spatial diagnosis of X-ray is very important to the imploded process researches and the simulate procedure verification. According to the temporal, spatial and spectral characteristics of X-ray radiation, many X-ray imaging diagnosis devices were successfully developed. Along with the development of ICF research, especially the Shenguang III facility establishment, our X-ray imaging diagnosis capability has been increasingly powerful. Some of the novel diagnosis equipment even have more excellent characteristics than that kind of diagnosis equipment abroad.

inertial confinement fusion, X-ray streak camera, X-ray framing camera, Kirkpatrick-Baez microscope, X-ray transmissive bandpass

PACS: 52.70.-m, 07.85.-m, 52.57.Fg, 52.35.Py, 47.20.Ft

doi: [10.1360/SSPMA2017-00366](https://doi.org/10.1360/SSPMA2017-00366)