

光学学报

激光惯性约束聚变 X 射线诊断用多通道 Kirkpatrick-Baez 成像系统研究进展

伊圣振, 司昊轩, 黄秋实, 张众, 蒋励, 齐润泽, 张哲, 王占山*

同济大学物理科学与工程学院先进微结构材料教育部重点实验室, 精密光学工程技术研究所, 上海 200092

摘要 在激光惯性约束聚变(ICF)研究中,涉及 X 射线时间、空间和能谱信息的等离子体诊断能够为数值模拟提供关键的实验数据支撑,有效推进对 ICF 关键物理问题的认识。以 Kirkpatrick-Baez(KB)结构为代表的多通道掠入射系统是实现在高分辨 X 射线时空成像的重要手段,在 ICF 诊断研究中有着广泛的应用。主要介绍了高分辨多通道 KB 成像系统的发展历史,梳理和分析了 KB 系统研制的瓶颈问题,在此基础上重点展示了国内近年来在基于多层膜光学的多通道 KB 诊断系统研制方面取得的研究进展。随着精密薄膜器件和掠入射 X 射线光学集成等关键技术的突破,多通道多层膜 KB 成像系统已经在我国 ICF 诊断研究中得到广泛应用,有力保障了国内 ICF 研究单位相关物理实验的开展。

关键词 X 射线光学; 激光惯性约束聚变; 等离子体诊断; X 射线成像; Kirkpatrick-Baez 显微镜; 多通道; X 射线多层膜

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS202242.1134007

Research Progress of Multi-Channel Kirkpatrick-Baez Microscope for X-Ray Diagnostics in Laser Inertial Confinement Fusion

Yi Shengzhen, Si Haoxuan, Huang Qiushi, Zhang Zhong, Jiang Li, Qi Runze, Zhang Zhe, Wang Zhanshan*

Key Laboratory of Advanced Micro-Structured Materials, Ministry of Education, Institute of Precision Optical Engineering, School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China

Abstract In the research of laser inertial confinement fusion (ICF), plasma diagnostics involving X-ray time, space and energy spectrum provides key experimental data for numerical simulation, and effectively promotes the understanding of key physical problems of ICF. The multi-channel grazing-incidence system represented by Kirkpatrick-Baez (KB) microscope is an important means to realize high-resolution X-ray spatial-temporal imaging, which has a wide range of applications in ICF diagnostics research. This paper mainly introduces the development history of high-resolution multi-channel KB imaging system, analyzes the bottleneck problems in the development of KB systems, and focuses on the domestic research progress in the development of multi-channel KB diagnosis system based on multilayer optics in recent years. With breakthroughs in key technologies such as precision thin-film devices and grazing-incidence X-ray optical integration, multi-channel multilayer KB microscope has been widely used in domestic ICF diagnostics, which effectively guarantees the development of relevant physical experiments.

Key words X-ray optics; laser inertial confinement fusion; plasma diagnostics; X-ray imaging; Kirkpatrick-Baez microscope; multichannel; X-ray multilayer

收稿日期: 2022-03-04; 修回日期: 2022-04-27; 录用日期: 2022-05-04

基金项目: 国家自然科学基金(11875202)、国家重点研发计划项目(2019YFE03080200)

通信作者: *wangzs@tongji.edu.cn

1 引言

惯性约束聚变(ICF)是实现受控热核聚变的候选途径,对国民经济、国家安全和基础科学研究(等 离子体物理等)都有着重要且特殊的意义^[1-3]。激光 ICF 是将激光或者由激光转换成的 X 射线辐射与球形靶丸相互作用,将靶丸燃料压缩到高温高密度以达到点火燃烧条件,该过程中会辐射大量的 X 射线^[3]。通过 X 射线光学系统对内爆压缩区域中的高温高密度等离子体进行成像,并与能谱选择器件和时间分辨记录系统相结合,可以获得与内爆压缩有关的状态参数和其他重要信息,为靶结构设计、激光辐照条件和模拟程序优化等提供实验依据。ICF 物理过程的空间尺度很小,靶丸内爆的核心区域仅有几十至几百微米,因此要求 X 射线成像设备具有很高的空间分辨率。ICF 物理过程的时间尺度在纳秒量级,因此像面探测器普遍采用条纹相机或分幅相机以实现皮秒级的时间分辨。ICF 物理过程所产生的 X 射线的能谱范围为几百电子伏特到几万电子伏特,因此某些实验要求 X 射线诊断设备具有一定的能量分辨能力以对物理信号进行标定。每一种 X 射线诊断技术或设备只能在特定的时空尺度和能量范围内良好工作,为此必须研发多种基于不同成像原理和应用背景的诊断设备,以满足不同类型的物理实验需求。

目前 ICF 中所用 X 射线成像诊断技术主要基于针孔成像、弯晶成像和掠入射反射式成像原理。针孔相机是 ICF 实验中应用最为广泛的一种 X 射线诊断设备,其结构简单、成本低廉,可以与条纹相机、分幅相机、透射光栅和晶体谱仪结合,构成测量等离子体时空和能谱特性的系统。然而,针孔成像的集光立体角很小(约 10^{-9} sr 量级),对探测器的灵敏度要求极高,这给时空诊断或者时空谱诊断带来了很大困难。其次,受衍射效应影响,针孔的最小孔径只能达到约 $10\ \mu\text{m}$,这极大影响了针孔相机的分辨率。基于罗兰圆结构的球面弯晶可以在毫米级视场内实现分辨率为 $5\sim 15\ \mu\text{m}$ 的高单能背光或自发光成像,但是受晶体弯曲和 X 射线散射影响,很难实现优于 $5\ \mu\text{m}$ 的更高分辨率,且难以构成具有较多通道的排布形式。

掠入射反射式成像是基于薄膜材料对掠入射 X 射线的全反射特性或布拉格衍射特性发展起来的一种高分辨成像诊断技术^[4],其中 ICF 研究涉及较多的主要包括 Wolter I 型显微镜和 Kirkpatrick-Baez

(KB)显微镜。Wolter 结构由德国物理学家 Hans Wolter 提出,Wolter I 型显微结构是由一个旋转椭球面和一个旋转双曲面组成的同轴共焦系统,克服了单个旋转对称非球面反射镜因不满足阿贝正弦条件而引起的严重彗差,理论上可以同时获得较好的空间分辨率和较高的集光效率($10^{-5}\sim 10^{-4}$ sr)^[5-7]。早期 SHIVA 和 NOVA 装置将 Wolter 显微镜与条纹相机配合,通过自发光和背光成像实验对 ICF 流体力学不稳定性的动态演化行为进行了实验研究,工作能量约在 3 keV,放大倍数为 22,在 $300\ \mu\text{m}$ 视场内理论分辨率可达到 $0.45\ \mu\text{m}$ ^[8-9]。此外,也有法国 Phebus 激光装置应用 Wolter 显微镜对正弦调制靶烧蚀 Rayleigh-Taylor 不稳定性进行诊断研究的报道^[10]。然而,Wolter 显微镜对旋转双曲面和旋转椭球面镜的加工精度要求很高。2003—2005 年,劳伦斯利弗莫尔国家实验室(LLNL)曾研制了用于检测美国国家点火装置(NIF)靶丸装配质量的 8 keV 能点 Wolter 显微镜^[11],但是镜片的面形和粗糙度等并未达到微米级成像的加工精度要求。NIF 针对高能成像需求在研的 Wolter 显微镜同样受制于此,样机系统目前只适用于分辨率要求较低的 Z 箍缩实验成像观测,在 5 mm 视场内仅能达到 $60\ \mu\text{m}$ 分辨率^[12]。

KB 显微镜由 Kirkpatrick 和 Baez^[13]在 1948 年提出,它由两块正交放置的掠入射球面反射镜构成,分别在子午方向和弧矢方向上实现聚焦,校正了单块反射镜在掠入射情况下的严重像散,有效改善了针孔成像设备空间分辨差、集光效率低和信噪比不高的缺点^[14-16]。相比 Wolter 结构,KB 系统更容易获得高精度的面形和极低的表面粗糙度,且更容易组成多通道结构从而实现多分幅的瞬态成像。在 KB 反射镜表面镀制多层膜结构或将其与晶体分光器件相结合,还能够进一步调控成像的工作能量和能谱特性。本文主要介绍了用于激光等离子体诊断的 KB 成像系统,特别是多层膜 KB 系统的发展历史,在此基础上重点介绍了国内相关单位近年来在基于多层膜光学的多通道 KB 诊断系统研制方面取得的进展。

2 KB 成像系统的研究进展

2.1 多通道 KB 系统的发展

基于精密化 X 射线成像诊断的需求,美国等一些开展 ICF 研究的国家从 20 世纪 70 年代就开始了多通道 KB 系统的研制工作,如美国罗切斯特大学

激光能量实验室(LLE)研制了两套四通道 KB 显微镜,并将其作为激光等离子体诊断研究的标准 X 射线成像设备,工作掠入射角为 0.83° ,反射镜薄膜介质为单层 Au 膜或 Ni 膜。通过与不同的滤片配合,该设备可以对 4 个不同能段(0.8, 1.5, 2.5, 3.0 keV)的 X 射线辐射进行积分成像,空间分辨率达到 $5 \mu\text{m}$ ^[17-18]。20 世纪 90 年代开始,LLE 研究人

员基于 OMEGA 装置需求研制了多套四通道 KB 显微镜^[19]。这些四通道 KB 显微镜在流体力学不稳定性增长、烧蚀演化和等离子体压缩均匀性等物理实验的 X 射线背光或自发光成像、内爆压缩核心区的高能 X 射线成像、门控单色化 X 射线成像(GMXI)和光栅光谱成像等诊断领域中得到了成功应用,基本性能指标如表 1 所示。

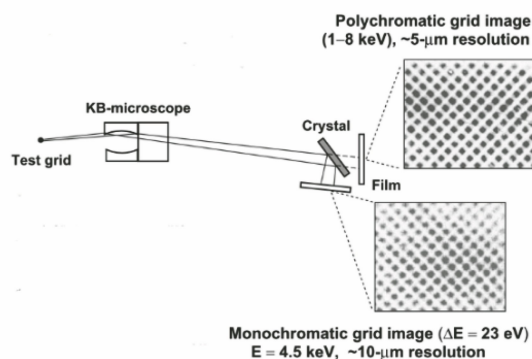
表 1 OMEGA 装置 KB 显微镜的性能参数

Table 1 Performance parameters of KB microscope on OMEGA

System location	Mirror length /mm	Material	Highest resolution / μm	Magnification	Collecting solid angle /sr	Work energy /keV
H8	9.0	Ir	5	12.9	4×10^{-7}	2.0-8.0
H9	9.0	Ir	5	13.6	4×10^{-7}	2.0-8.0
H13	4.5	Ir	3	20.3	1×10^{-7}	2.0-7.0
Non-fixed	4.5	None	3	13.6	1×10^{-7}	1.5-3.0
Non-fixed	9.0	WB ₄ C	5	13.6	4×10^{-7}	7.0-9.0

OMEGA 装置的 X 射线诊断研究通过在 ICF 内爆靶丸中掺入中等原子序数的示踪元素,并将 KB 显微镜与单色化晶体或透射光栅结合实现谱分辨,以记录示踪元素发射的特征谱线,从而诊断靶丸内的等离子体平均温度和密度。KB 显微镜配合条纹或幅相机,还可以实现时间分辨和空间分辨的等离子体诊断。如图 1 所示,KB 显微镜与单色晶体(如 LiF、HOPG 等)共同组成门控单色化 X 射线成像系统(GMXI),可以获得 ICF 内爆靶丸壳层或

压缩核心的尺寸大小、对称性和 $\langle \rho R \rangle / \langle \rho \Delta R \rangle$ 等关键信息^[20],其中 ρ 为等离子体密度, R 为靶丸半径, ΔR 为靶丸壳层厚度。如图 2 所示,KB 显微镜与透射光栅配合,可以对压缩后的高温高密度核心热斑区域和周围温度较低的 CD(或 CH)壳层部分进行能谱分辨的成像,配合理论和程序计算,最终可确定核心热斑区域等离子体温度 $\langle kT \rangle$ 和周围 CD 壳层密度 $\langle \rho R \rangle$ 等信息^[21],其中 k 为玻尔兹曼常数, T 为等离子体温度。

图 1 平晶配合 KB 显微镜组成的 GMXI 系统^[20]Fig. 1 GMXI system composed of flat crystal and KB microscope^[20]

2002 年起,Gotchev 等^[22-23]研制了与 PJX 高通量条纹相机配合的四通道 KB 显微镜,其工作反射面镀制了单层 Ir 膜,在 1.0~2.5 keV 能量范围内的工作掠入射角达到 2.1° ,集光立体角为 3×10^{-6} sr。该显微镜主要应用于 OMEGA 装置多种类型流体力学不稳定性实验中,以提高灵敏度和空间分辨率,进而获得烧蚀 RT(Rayleigh-Taylor)或 RM(Richtmyer-Meshkov)不稳定性增长的定量信

息,如图 3 所示。图 3(b)是 KB-PJX 在 $20 \mu\text{m}$ 扰动波长和 $1.75 \mu\text{m}$ 初始振幅情况下对 $60 \mu\text{m}$ 厚度 CH 正弦调制靶的成像结果^[23]。

2004 年,Marshall 等^[24]在四通道 KB 显微镜的基础上,开始研制十六通道 KB 显微镜,如图 4 所示。首先利用两块相同的尖劈状反射镜组成一个通道,然后将该通道沿中心轴旋转对称排布,即可形成十六个通道,如图 4(a)所示。该显微镜的工作能段

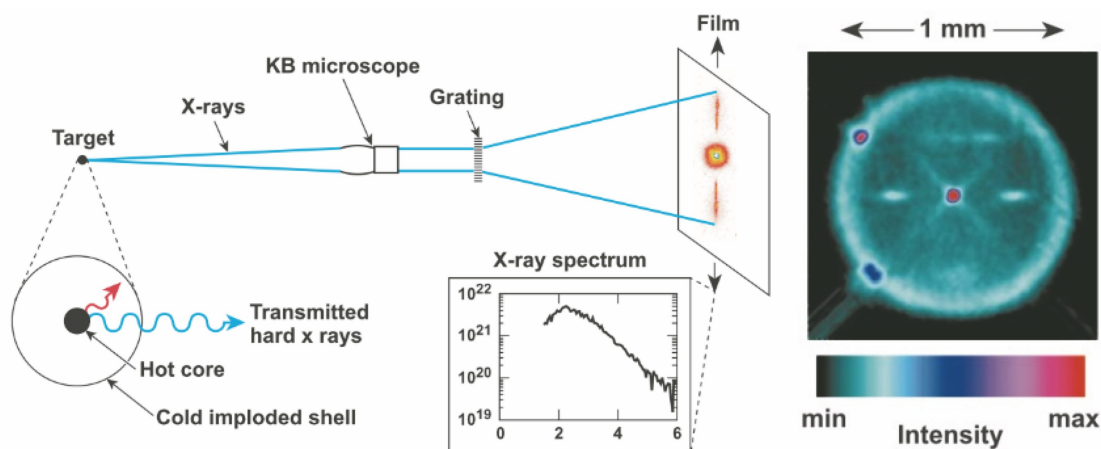


图 2 KB 显微镜与透射光栅组成的 X 射线成像谱仪及其在 OMEGA 装置上的成像结果^[21]
 Fig. 2 X-ray imaging spectrometer composed of KB microscope and transmission grating, and its imaging results on OMEGA^[21]

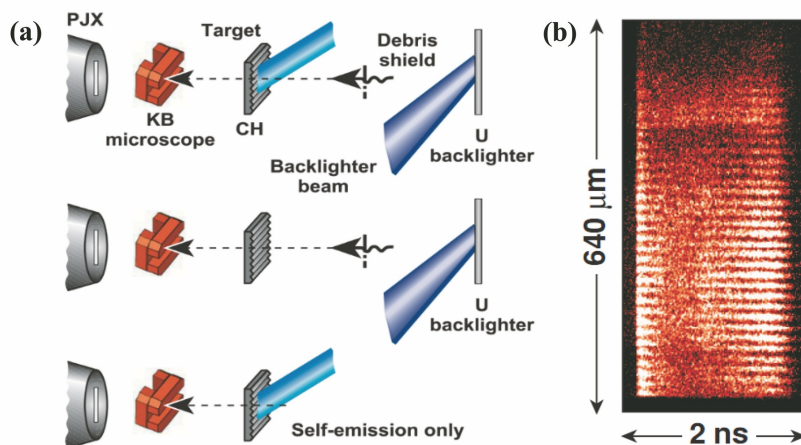


图 3 KB-PJX 的实验排布图及其在 OMEGA 装置上的成像结果^[23]。(a) KB-PJX 的实验排布图；
 (b) OMEGA 装置上的成像结果

Fig. 3 Experimental layout of KB-PJX and its imaging result on OMEGA^[23]. (a) Experimental layout of KB-PJX;
 (b) imaging result on OMEGA

为 1.5~7.0 keV, 设计的最佳分辨率达 3 μm, 400 μm 视场内分辨率优于 5 μm。然而, 这种装配结构对光学冷加工精度要求极高, 装配后的物镜组完全固定, 且装配误差无法修正消除。图 4(b) 为十六通道 KB 显微镜的 X 射线网格成像结果, 各像点排布散乱, 网格清晰程度不一, 说明各成像通道的物点瞄准存在较大误差, 难以达到最佳分辨^[25]。

2.2 多层膜 KB 系统的发展情况

在反射镜工作面镀制 X 射线多层膜可以拓展 KB 显微镜的工作能点并获得一定的能量分辨。1999 年, Marshall 和 Bennett^[26] 研制了四通道 W/B₁C 多层膜 KB 显微镜, 其工作能段为 7~9 keV, 400 μm 视场内空间分辨率优于 5 μm, 优化反射镜镜长后系统的空间分辨率可提升至 3 μm。图 5 是 OMEGA 装置快

电子加热实验中, 多层膜 KB 显微镜对 Au 锥-Cu 掺杂 CD 球壳靶的成像结果^[27]。在 TITAN 激光装置快点火实验中, 也采用 KB 显微镜研究了超热电子在稠密等离子体中的传输和输运过程^[28]。

2013 年, Pardini 等^[29] 为 NIF 研制了面向 10 keV 级 X 射线成像诊断的四通道多层膜 KB 显微镜, 工作能点设定在 10.3 keV (Ge He-α 线), 采用 Pt/C 多层膜作为反射介质, 中心掠入射角为 0.6°, 多层膜反射率设计结果如图 6(a) 所示, 通过变周期厚度的薄膜设计来拓展角度带宽, 以获得较大的具有均匀亮度的成像视场, 其在利用 8 keV 能量进行标定的情况下峰值反射率约为 50%^[30]。该套 KB 系统目前仅获得了单通道的网格成像, 进一步标定得到的空间分辨率在 100~100 μm 视场内优于 8 μm, 成像和标定结果分别

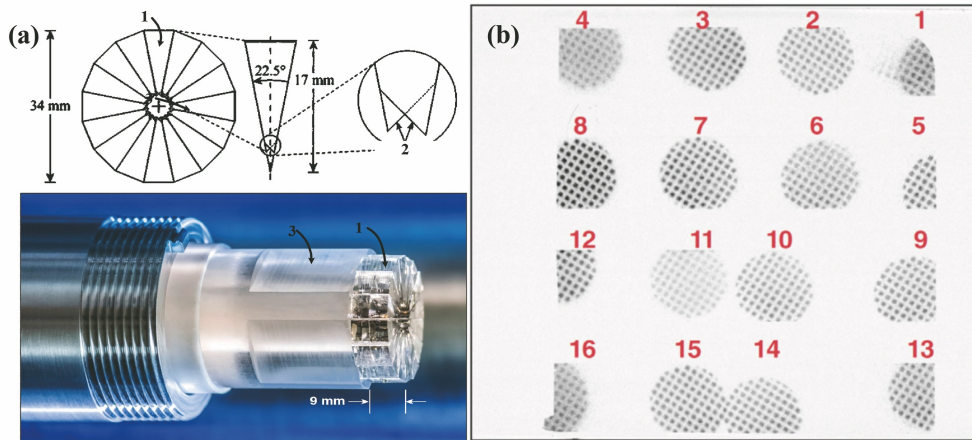


图 4 十六通道 KB 显微镜构型及其空间分辨测试结果^[24-25]。(a)十六通道 KB 显微镜构型;(b)空间分辨测试结果

Fig. 4 Configuration of sixteen-channel KB microscope and its spatial resolution test result^[24-25].

(a) Configuration of sixteen-channel KB microscope; (b) spatial resolution test result

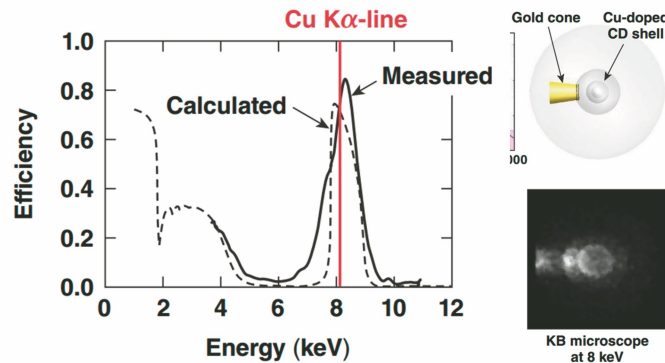


图 5 多层膜 KB 显微镜对 Au 锥-Cu 掺杂 CD 球壳靶成像结果^[27]

Fig. 5 Imaging result of Au cone-Cu doped CD spherical shell target by multilayer KB microscope^[27]

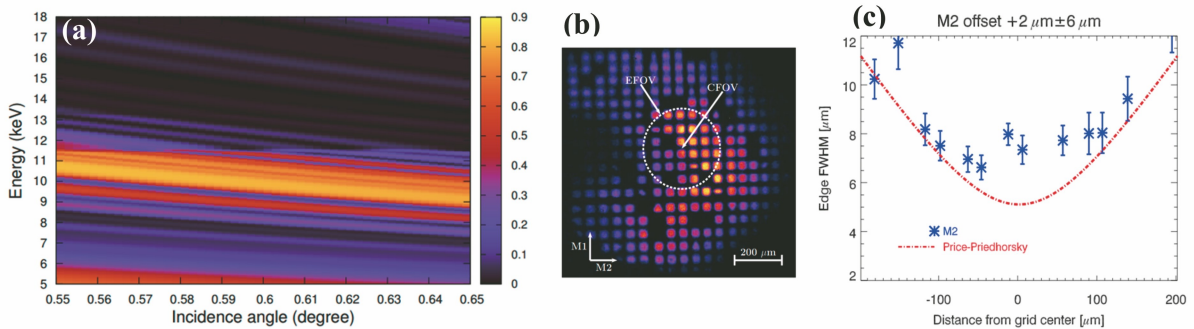


图 6 NIF 四通道多层膜 KB 显微镜的多层膜反射率曲线和单通道的网格分辨标定结果^[29-32]。(a)多层膜反射率、能量和掠入射角的关系图;(b) X 射线测试平台获得的网格图像;(c)水平方向上网格图像空间分辨率的标定结果

Fig. 6 Reflectivity curve of four-channel multilayer KB microscope on NIF and grid resolution calibration results by single channel imaging^[29-32].

(a) Relationship among multilayer reflectivity, X-ray energy and grazing angle; (b) grid image acquired on X-ray test platform; (c) calibration result of grid image spatial resolution in horizontal direction

如图 6(b)、(c)所示^[31-32]。

总结并梳理国外研究进展发现,四通道 KB 系统在 OMEGA 装置上得到了广泛应用,但相关诊断仍围绕单通道结构开展,缺乏多通道的应用场景。

OMEGA 装置上十六通道 KB 系统经过近 20 年发展,仍未取得预期的诊断效果。上述情况均说明多通道 KB 结构的装配仍存在严重的技术瓶颈,这也是 NIF 重新开展四通道 KB 系统研制的原因,但

NIF KB 系统经过多年发展,仍未能解决多通道物镜集成的问题,未见物理实验应用相关的文献报道。此外,相关研究主要仍围绕 X 射线时空成像的测量,对基于多层膜 KB 系统的相关诊断设计的研究较少,缺乏涉及等离子体谱学特性的诊断应用。

3 国内多通道 KB 系统的发展

成像光学系统的多通道化是开展激光等离子体 X 射线时空诊断的前提,也是发展具有光谱响应特性的诊断实验测量的先决条件。同济大学精密光学工程技术研究所作为我国极紫外与软 X 射线光学的重要基地之一,在相关 ICF 研究单位的支持下,围绕掠入射 X 射线多层膜器件和系统研制两个关键问题开展了技术攻关,突破了多物像精密耦合和装配的技术瓶颈,发展了多类基于多层膜光学的多通道 X 射线 KB 成像系统,并获得成功和广泛的应用,可满足激光等离子体时空谱测量的诊断需求^[33-34]。

3.1 掠入射 X 射线多层膜器件研究

对掠入射 X 射线成像光学自身成像特性的研究是开展初始机构设计的基础。只有深刻理解基于多层膜结构的掠入射 X 射线成像特性,才能设计出符合诊断需求,满足诊断实验需要的实用化诊断系统。空间分辨能力是表征 KB 显微镜成像性能的关键指标,主要由系统的几何像差和衍射效应决定。由于 X 射线波段衍射效应较小,可以忽略,因此空间分辨率 δ ^[35] 可以表示为

$$\delta = \frac{d}{R} \left(\frac{3d}{2} + \frac{2}{\theta} q \right), \quad (1)$$

式中: d 为半镜长; q 为视场; R 和 θ 分别为曲率半

径集光立体角和掠入射角。由式(1)可以发现,空间分辨率 δ 和掠入射角 θ 成反比。图 7 给出了几种不同结构薄膜的反射率随掠入射角的变化曲线^[36],此时 X 射线能量为 8 keV。单层金属膜 KB 显微镜利用了材料对掠入射 X 射线的全外反射特性,工作掠入射角必须在临界角以内,且要保证一定的反射率。通过在 KB 物镜工作反射面镀制 X 射线周期多层膜,利用多层膜对掠入射 X 射线的布拉格衍射,可以摆脱全外反射临界角的限制,增大工作掠入射角度,改善 KB 显微镜的几何成像性能,同时利用布拉格衍射的分光效率可以实现能谱分辨。周期多层膜的每个膜对都具有相同的周期厚度,因此只能对某一特定能点的 X 射线在特定掠入射角实现高反。根据布拉格衍射条件,周期多层膜在较高能量下对应的掠入射角较小,其角度带宽也较窄,不仅造成空间分辨率受限,还会造成成像亮度在不同视场位置的变化极为明显。非周期多层膜具有规律性变化的周期厚度,可以在特定能点以不同的工作掠入射角获得较高的反射率,从而扩展了多层膜的角度带宽,获得更大的有效视场和亮度更均一的成像结果。然而,周期厚度的改变使得特定掠入射角度下对反射率有贡献的膜对数减少,因此一般在一定掠入射角度下,非周期膜的反射率要比周期膜低。图 8 给出了上述三类多层膜 KB 显微镜在 8 keV 下对 1500 目金网格的成像效果对比情况^[36],虽然各图片截取的视场范围不同,但是放大倍数基本一致,均约为 10 倍。除曝光时间和背光源(X 射线光管)焦斑差异引起的图像亮度变化外,成像亮度在不同视场位置的不均匀性主要由薄膜的角度带宽决定。相比周期多层膜 KB 显微镜成像,单层膜和非周期多层膜

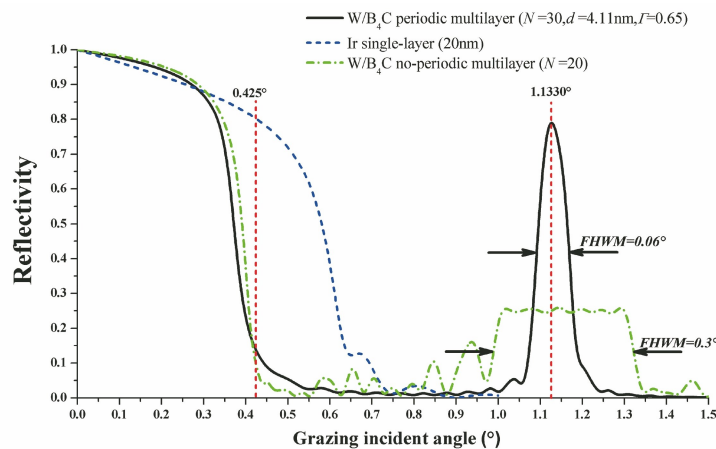


图 7 8 keV 能点多层膜和单层 Ir 反射率曲线^[36]

Fig. 7 Reflectivity curves of multilayer and single-layer Ir film under 8.0 keV X-ray^[36]

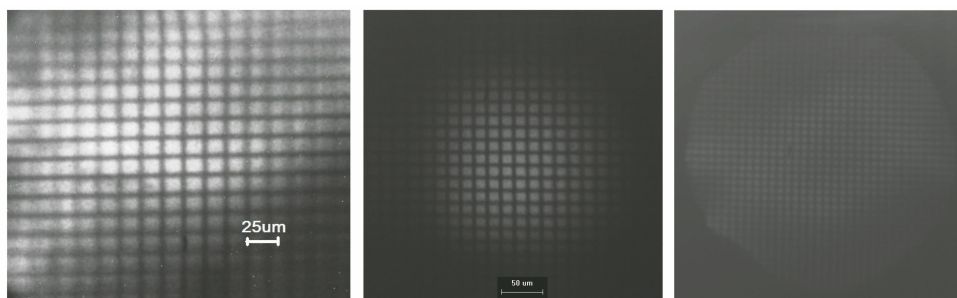


图 8 单层膜、周期多层膜和非周期多层膜 KB 显微镜对 1500 目金网的成像结果^[36]

Fig. 8 Imaging results of 1500-mesh Au grid obtained by KB microscope with single-layer film, periodic multilayer and aperiodic multilayer^[36]

KB 显微镜成像的亮度更加均匀。工作在大掠入射角的非周期多层膜 KB 显微镜相比单层膜具有更大的高分辨视场,但由于反射率更低,故成像的整体亮度会进一步降低。

3.2 多物像关系精密耦合技术研究

掠入射 X 射线成像系统具有小视场、高分辨的成像特性,考虑到靶丸大小也在这一量级,各成像通道的高分辨视场必须严格瞄准仅几十微米的物点位置。同时,像点也必须按一定的空间间隔排布,以匹配条纹相机光阴极或分幅相机的微带位置。随着通道数的增加,掠入射 X 射线系统复合视场成像参数的一致性和像间隔的精密调控变得极为复杂。多物像精密耦合的装配是多通道掠入射 X 射线成像系统应用需要首先解决的瓶颈问题,而国内外仍缺乏可供借鉴的成熟技术和方案。

为此,提出和发展了串列式多通道 X 射线显微结构,以及基于高精度支撑锥芯的多物像精密耦合装配方法,在确保各通道最佳物点位置精确复合的同时,实现了像点排布的准确调控^[37-38]。以图 9 所示的 16 个成像通道为例,首先将两两相对排列的 8 块反射镜 M1~M8 分别顶靠在 4 块高精度支撑锥芯上,其中 M1/M2 和 M5/M6 用于子午方向成像, M3/M4 和 M7/M8 与之正交,用于弧矢方向成像。支撑锥芯具有特定的厚度和锥角,常规光学冷加工即可实现 10'' 和 20 μm 的精度水平,能够有效保证两块反射镜的空间和角度关系。然后,借助 X 射线成像实验对各元件进行实时调整,最终实现对各通道最佳视场位置的一致性和像点间隔的准确控制。基于 X 射线实时成像来调整物镜的空间姿态,能够直接表征系统的成像性能,实现了各镜对之间的高精度耦合。

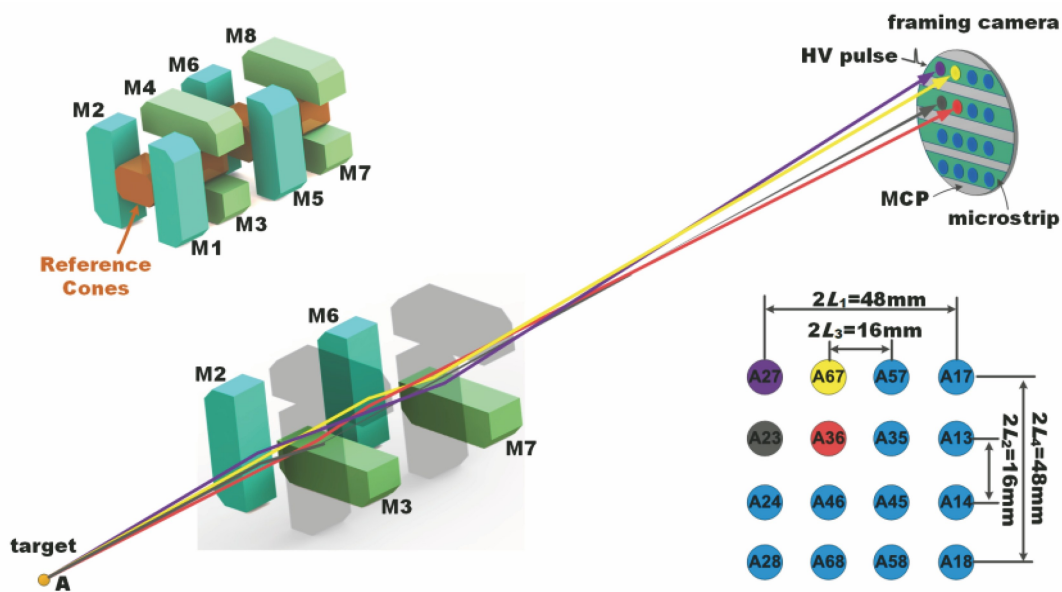


图 9 基于高精度支撑锥芯的多通道掠入射成像物镜的装配方法^[38]

Fig. 9 Assembly method of multi-channel grazing-incidence imaging objective lens based on high-precision reference cone core^[38]

3.3 诊断系统的在线高精度快速复现和瞄准技术

如何将研制的诊断系统快速部署在激光装置上是本项目需要解决的另一个关键技术问题。掠入射形式下可见光存在严重的衍射,这会导致可见光成像或准直的常规手段难以用于多通道掠入射 X 射线系统的精密装校,而国内外仍缺乏可供借鉴的成熟技术

和方案。为解决上述难点问题,发展了掠入射 X 射线诊断系统的快速在线高精度复现和瞄准技术。

针对高精度复现问题,发展了高复位精度的“物-诊断物镜-像”集成指示技术,如图 10 所示,通过将物像指示集成于诊断物镜的方式,实现了离线至在线切换前后物像关系的高精度复现。

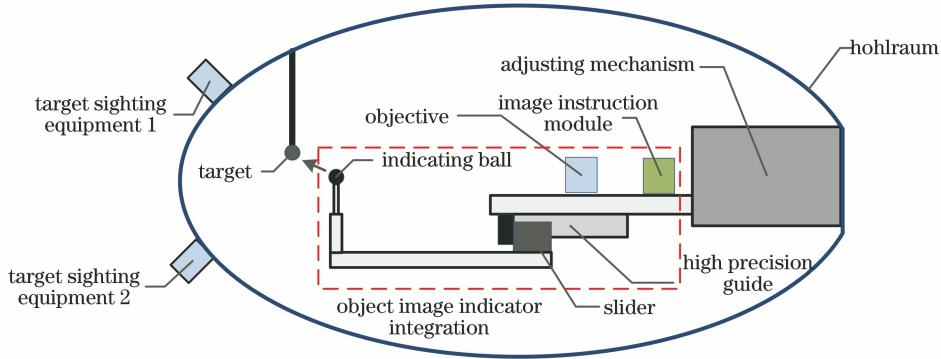


图 10 诊断系统与物像指示集成的高精度复现方法

Fig. 10 High-precision reproduction method based on integration of diagnostic system and object-image indication

在物指示方法上,针对小尺寸的背光源和诊断目标的共光路、共视场复合观测要求,本项目组提出了如图 11 所示的基于双指示球定义“背光源-诊断目标-诊断物镜”光路关系的物指示方法^[39],实现了三者观测轴线的统一,有效解决了背光源照明需求。在像指

示方法上,针对多像点位置与分幅相机微带的耦合要求,提出了像指示模组采用半导体激光模块的长距离多像点空间姿态指示方法。以激光十字叉丝交点定义多像点的中心位置,以十字叉丝定义微带角度姿态,有效实现了多像点与微带空间关系的匹配。

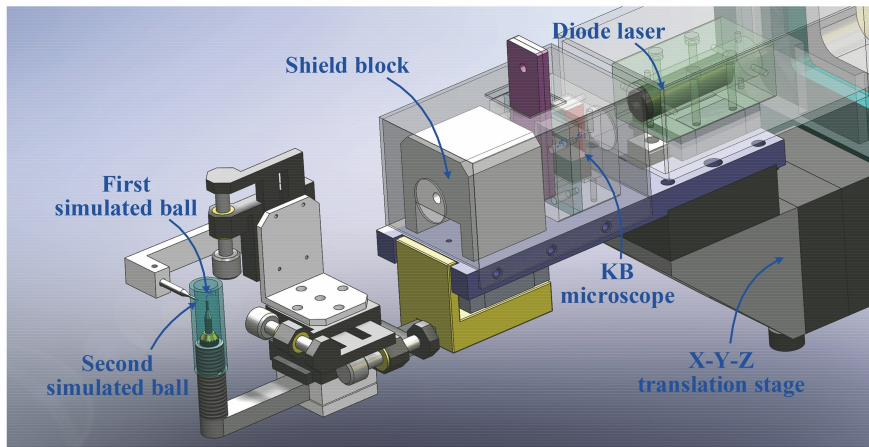


图 11 基于双指示球的背光源和诊断物共轴瞄准方法^[39]

Fig. 11 Coaxial aiming method of backlight and diagnostic object based on double indicator balls^[39]

3.4 多通道 KB 系统研究进展

3.1~3.3 节所述的研究和突破为多通道 KB 系统在我国 ICF 诊断的应用提供了必要的技术支撑,下面将着重介绍几个标志性的节点和成果。

3.4.1 高分辨十六通道多层膜 KB 系统研制

基于芯部热斑状态及其演化的高分辨测量需求,本团队与中国工程物理研究院激光聚变研究中心合作,研制了十六通道 KB 系统,光学结构如图 9

所示,整体结构参数与八通道接近,成像通道数增加至 16 个,且对多层膜结构进行优化改进,如图 12 (a) 所示,该系统进一步提高了强度响应的一致性^[38]。图 12(b)为多层膜能谱响应曲线,是实验室内 8 keV 能点下十六通道 KB 系统对 5 μm 线宽的金网格成像的结果;标记孔附近的网格成像最清晰;通道之间的成像间距控制准确,与设计相符,各标记孔均严格沿同一直线分布,能够有效实现与分幅相

机各微带位置的理想耦合。无论是从空间分辨率的视场重合度,还是从像点间隔的控制精度来看,新发展的多物像精密耦合及装配方法都超过了国外同类技术水平。从 2017 年起,十六通道 KB 系统在神光

II 升级和神光 III 原型等多个物理实验中得到了大量应用。图 12(c)是神光 III 原型对直接驱动 CD 球靶芯部自发光十六分幅动态测量的结果。

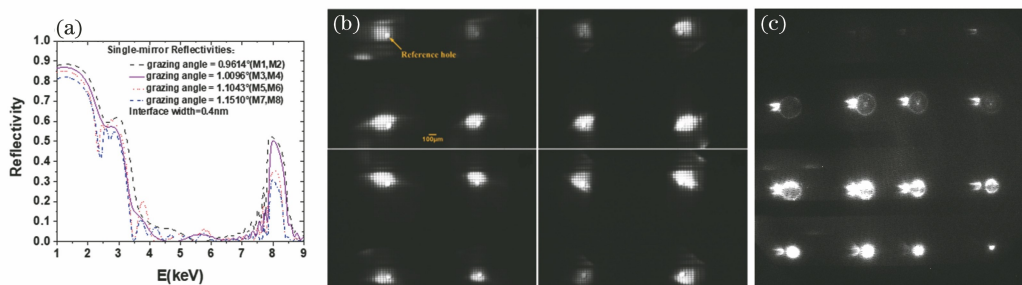


图 12 十六通道多层膜 KB 系统实验结果^[38]。(a)不同掠入射角多层膜的能谱响应曲线;(b)由 X 射线电荷耦合器件 (CCD)获得的 600 目金网的离线网格标定图像;(c)神光 III 原型装置对 CD 球靶芯部自发光的动态测量结果

Fig. 12 Experimental results of sixteen-channel multilayer KB system^[38]. (a) Spectral response curves of multilayer at different grazing angles; (b) offline grid calibration images of 600-mesh Au grid obtained by X-ray charge-coupled device (CCD); (c) dynamic measurement result of self-emission of CD shell target core on Shenguang-III prototype

3.4.2 双锥对撞点火实验用双色十六通道多层膜 KB 系统研制

基于双锥对撞点火实验对芯部自发光和背光同步测量的需求,进一步开展了双色十六通道 KB 系统的研制。如图 13(a)所示,主要通过共镜结构和多层膜分区镀膜的方式,将十六个成像通道分

别分配至高低两个工作能区,低能区用于芯部自发光测量,高能区用于较高能量的背光成像测量,多层膜的能谱响应和在线标定结果见图 13(b)、(c)。从 2020 年起,双色十六通道 KB 系统成功在神光 II 升级装置多轮双锥对撞点火 (DCI) 实验中得到应用^[40]。

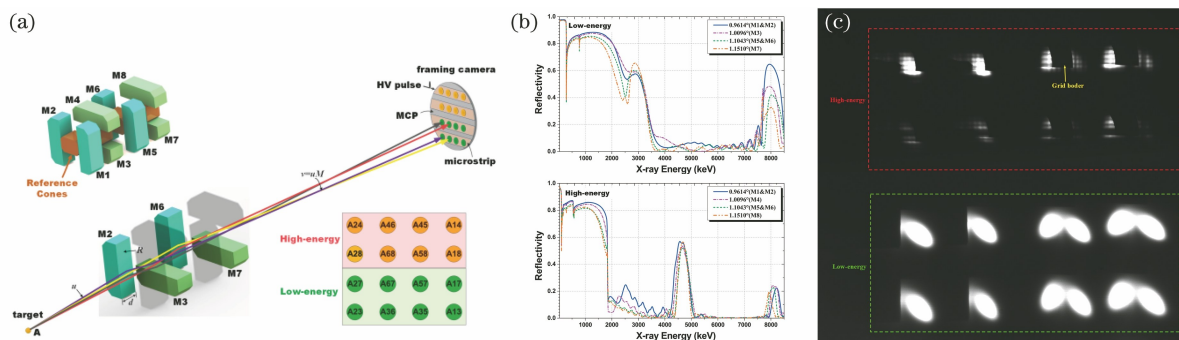


图 13 双色十六通道多层膜 KB 系统^[40]。(a)光学结构示意图;(b)低能和高能通道的多层膜能谱响应;(c)神光 II 升级装置得到的 1500 目金网格成像标定结果

Fig. 13 Two-color sixteen-channel multilayer KB system^[40]. (a) Schematic diagram of optical structure; (b) spectral respons of multilayer for low-energy and high-energy channels; (c) 1500-mesh Au grid imaging calibration results obtained by Shenguang-II upgrade device

3.4.3 流体力学不稳定性增长测量用四通道多层膜 KB 系统研制

基于流体力学不稳定性增长的高时空分辨测量需求,本团队与中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所合作,研制了 4.75 keV 四通道多层膜 KB 系统^[41],如图 14(a)所示,四像点间隔要求为 21.6 mm × 21.6 mm,反射介质仍为双周期的 W/

B₁C 多层膜。图 14(b)为神光 II 装置分幅相机记录的四象限网格成像结果,有效视场内各通道空间分辨率均在 3~5 μm 范围内,像点间隔控制精度在 -0.5~0.5 mm 范围内。于 2012 年在神光 II 装置上成功实现了对平面调制靶流体力学不稳定性增长的四分幅测量,测量结果如图 14(c)所示,这也是四通道 KB 系统在我国激光装置的首次成功应用。

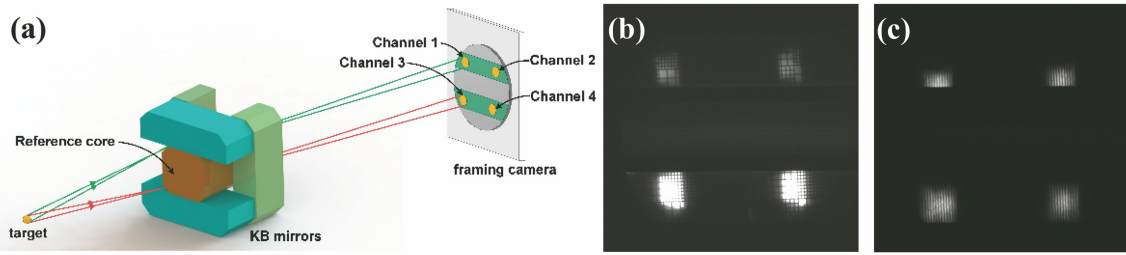


图 14 四通道多层膜 KB 系统^[41]。(a)结构示意图;(b)神光 II 装置分幅相机记录的四象限网格成像结果;
(c)神光 II 装置中对平面调制靶流体学不稳定性增长的测量结果

Fig. 14 Four-channel multilayer KB system^[41]. (a) Schematic diagram of optical structure; (b) four-quadrant grid imaging results recorded by framing camera on Shenguang-II device; (c) measurement results of hydrodynamic instability growth of planar modulated target on Shenguang-II device

3.4.4 快点火锥壳靶测量用八通道多层膜 KB 系统研制

基于快点火锥壳靶的自发光辐射演化测量的需求,本团队与中国工程物理研究院上海激光等离子体研究所合作研制了八通道多层膜 KB 系统^[37],通过特殊的多层膜设计,将工作能区拓展至约 3.5 keV,且在变掠入射角条件下确保了低能自发光响应的一致性。从 2015 年在神光 II 升级装置的

首次实验开始,八通道 KB 系统在多类诊断实验中得到了成功应用。图 15(a)展示了八通道多层膜 KB 系统的结构,使用 6 面两两相对的凹面镜互相垂直排布,配合分幅相机集成。图 15(b)显示了该八通道多层膜 KB 系统在不同掠入射角下的能谱响应曲线,可以看出,在 3.0~3.5 keV 的能量范围内,反射率均能超过 50%。图 15(c)是对快点火锥靶内爆压缩过程自发光八分幅动态测量的结果。

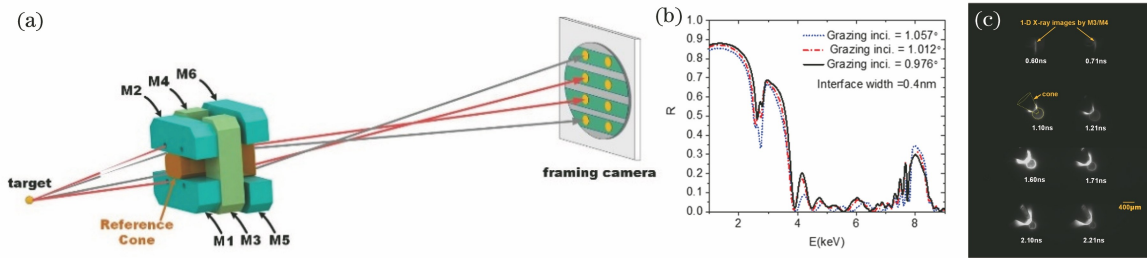


图 15 八通道多层膜 KB 系统^[37]。(a)光学结构示意图;(b)不同掠入射角多层膜的能谱响应曲线;
(c)神光 II 升级装置对内爆压缩的金锥靶自发光的动态成像结果

Fig. 15 Eight-channel multilayer KB system^[37]. (a) Schematic diagram of optical structure; (b) spectral response curves of multilayer at different grazing angles; (c) dynamic imaging result of self-emission of imploded Au-cone target obtained by Shenguang-II upgrade device

4 总 结

精密 X 射线诊断是 ICF 物理必不可少的研究手段,多通道掠入射光学系统是实现高分辨 X 射线时空诊断的基础,通道数的增加能够显著提升对小尺度和弱信号等离子体极端瞬态变化的诊断能力。多通道 KB 系统在国外激光装置中得到长期应用,但关键技术仍不成熟,难以实现工程实用化。针对我国激光 ICF 研究开展高分辨 X 射线时空诊断的需求,以精密多物像关系的实现为突破点,发展了基于支撑锥芯式串列镜组排布、辅助 X 射线成像装调的多通道 KB 结构和集成方案,完成了高一一致性 X 射线多层膜器件制备,为实用型的多通道 KB 系统

研制提供了必要的技术支撑。

在此基础上,以多通道、高分辨和高效率为目标,发展了多类与实验需求适应、与装置条件耦合的多通道 KB 系统,在我国激光装置中得到了成功和广泛的应用,有力保障了国内 ICF 研究机构相关精密物理实验的进行。针对现有串列式结构存在的通道之间放大率不一致造成的图像信号标定问题,发展新型的等放大率多通道 KB 结构。针对未来更高能量密度的等离子体诊断需求,发展更高分辨和光通量的硬 X 射线非球面 KB 结构。在此基础上形成具有时空谱测量能力的掠入射 X 射线集成成像技术是下一阶段重要的工作方向。

参 考 文 献

- [1] Patel P K, Springer P T, Weber C R, et al. Hotspot conditions achieved in inertial confinement fusion experiments on the National Ignition Facility [J]. *Physics of Plasmas*, 2020, 27(5): 050901.
- [2] Wang F, Jiang S E, Ding Y K, et al. Recent diagnostic developments at the 100 kJ-level laser facility in China [J]. *Matter and Radiation at Extremes*, 2020, 5(3): 035201.
- [3] Batani D, Antonelli L, Barbato F, et al. Progress in understanding the role of hot electrons for the shock ignition approach to inertial confinement fusion [J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59(3): 032012.
- [4] 徐捷, 穆宝忠, 陈亮, 等. X射线掠入射显微成像诊断技术研究进展 [J]. *强激光与粒子束*, 2020, 32(11): 112001.
- Xu J, Mu B Z, Chen L, et al. Progress of grazing incidence X-ray micro-imaging diagnosis technology [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2020, 32(11): 112001.
- [5] Wolter H. Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen [J]. *Annalen Der Physik*, 1952, 445(1/2): 94-114.
- [6] Voger J K, Pivovarov M J, Koziowski B, et al. Influence of fabrication errors on Wolter mirror imaging performance [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 10G113.
- [7] Chon K S, Namba Y, Kim K W, et al. Fabrication of a soft X-ray microscope mirror using an epoxy replication method [J]. *Optical Engineering*, 2008, 47(1): 013401.
- [8] Desselberger M, Willi O, Savage M, et al. Measurement of the Rayleigh-Taylor instability in targets driven by optically smoothed laser beams [J]. *Physical Review Letters*, 1990, 65(24): 2997-3000.
- [9] Remington B A, Glendinning S G, Wallace R J, et al. Wolter X-ray microscope characterization measurements on Nova [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(10): 5080-5082.
- [10] Troussel P, Meyer B, Reverdin R, et al. Wolter-like high resolution X-ray imaging microscope for Rayleigh Taylor instabilities studies [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2005, 76(6): 063707.
- [11] Nederbragt W. High-accuracy X-ray imaging of meso-scale targets: final report [R]. Livermore: Office of Scientific and Technical Information (OSTI), 2004.
- [12] Fein J R, Ampleford D J, Vogel J K, et al. A Wolter imager on the Z machine to diagnose warm X-ray sources [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(10): 10G115.
- [13] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(9): 766-774.
- [14] Marshall F J, DeHaas T, Glebov V Y. Charge-injection-device performance in the high-energy-neutron environment of laser-fusion experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2010, 81(10): 10E503.
- [15] 赵玲玲, 孙德林, 王丽丽, 等. 掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序 [J]. *中国激光*, 2020, 47(4): 0401002.
- Zhao L L, Sun D L, Wang L L, et al. Ray-tracing program for grazing incident X-ray microscope system [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2020, 47(4): 0401002.
- [16] Marshall F J, McKenty P W, Delettrez J A, et al. Plasma-density determination from X-ray radiography of laser-driven spherical implosions [J]. *Physical Review Letters*, 2009, 102(18): 185004.
- [17] Seward F, Dent J, Boyle M, et al. Calibrated "four-color" X-ray microscope for laser plasma diagnostics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1976, 47(4): 464-470.
- [18] Ahlstrom H G, Coleman L W, Rienerker F, et al. Diagnostics of Shiva Nova high-yield thermonuclear events [J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1978, 68(12): 1731-1741.
- [19] Soures J M, McCrory R L, Verdon C P, et al. Direct-drive laser-fusion experiments with the OMEGA, 60-beam, >40 kJ, ultraviolet laser system [J]. *Physics of Plasmas*, 1996, 3(5): 2108-2112.
- [20] Marshall F J, Oertel J A. A framed monochromatic X-ray microscope for ICF (invited) [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 735-739.
- [21] Marshall F, Delettrez J, Epstein R, et al. Diagnosis of laser-target implosions by space-resolved continuum absorption X-ray spectroscopy [J]. *Physical Review E*, 1994, 49(5): 4381-4390.
- [22] Gotchev O V. Experiments on dynamic overpressure stabilization of the ablative Richtmyer-Meshkov instability in ICF targets [D]. Rochester: University of Rochester, 2005.
- [23] Gotchev O V, Jaanimagi P A, Knauer J P, et al. High-throughput, high-resolution Kirkpatrick-Baez microscope for advanced streaked imaging of ICF experiments on OMEGA [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(3): 2178-2181.
- [24] Marshall F J, Oertel J A, Walsh P J. Framed, 16-image, Kirkpatrick-Baez microscope for laser-plasma X-ray emission [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2004, 75(10): 4045-4047.

- [25] 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(9): 093702.
- [26] Marshall F J, Bennett G R. A high-energy X-ray microscope for inertial confinement fusion [J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 617-619.
- [27] Theobald W. Status of integrated fast-and shock-ignition experiments on omega [C]//OMEGA Laser Facility Users' Group Workshop, April 29-May 1, 2009, Rochester, NY. [S.l.: s.n.], 2009: E17747-E17748.
- [28] Friesen H, Tiedje H F, Hey D S, et al. Kirkpatrick-Baez microscope for hard X-ray imaging of fast ignition experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2013, 84(2): 023704.
- [29] Pardini T, McCarville T J, Walton C C, et al. Optical and multilayer design for the first Kirkpatrick-Baez optics for X-ray diagnostic at NIF [J]. *Proceedings of SPIE*, 2013, 8850: 88500E.
- [30] Brejnholt N F, Ayers J J, McCarville T J, et al. Calibration results for first NIF Kirkpatrick-Baez microscope [J]. *Proceedings of SPIE*, 2015, 9591: 95910J.
- [31] 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(11): 11D611.
- [32] Pickworth L A, Ayers J, Bell P, et al. The National Ignition Facility modular Kirkpatrick-Baez microscope [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(11): 11E316.
- [33] Li Y R, Dong J J, Xie Q, et al. Development of a polar-view Kirkpatrick-Baez X-ray microscope for implosion asymmetry studies [J]. *Optics Express*, 2019, 27(6): 8348-8360.
- [34] Li Y R, Mu B Z, Xie Q, et al. Development of an X-ray eight-image Kirkpatrick-Baez diagnostic system for China's laser fusion facility [J]. *Applied Optics*, 2017, 56(12): 3311-3318.
- [35] 伊圣振, 穆宝忠, 王新, 等. 周期多层膜 Kirkpatrick-Baez 显微镜成像性质分析 [J]. *强激光与粒子束*, 2009, 21(11): 1681-1685.
- Yi S Z, Mu B Z, Wang X, et al. Imaging characteristic analysis of Kirkpatrick-Baez microscope with periodic multilayer [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, 21(11): 1681-1685.
- [36] 伊圣振. Kirkpatrick-Baez 显微镜实验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2006: 25-30.
- Yi S Z. Study on experiments of Kirkpatrick-Baez microscope [D]. Shanghai: Tongji University, 2006: 25-30.
- [37] Yi S Z, Zhang Z, Huang Q S, et al. Eight-channel Kirkpatrick-Baez microscope for multiframe X-ray imaging diagnostics in laser plasma experiments [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2016, 87(10): 103501.
- [38] Yi S Z, Zhang Z, Huang Q S, et al. Note: tandem Kirkpatrick-Baez microscope with sixteen channels for high-resolution laser-plasma diagnostics [J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89(3): 036105.
- [39] Yi S Z, Zhang F, Huang Q S, et al. High-resolution X-ray flash radiography of Ti characteristic lines with multilayer Kirkpatrick-Baez microscope at the Shenguang-II Update laser facility [J]. *High Power Laser Science and Engineering*, 2021, 9(3): e42.
- [40] Yi S Z, Si H X, Fang K, et al. High-resolution dual-energy sixteen-channel Kirkpatrick-Baez microscope for ultrafast laser plasma diagnostics [J]. *Journal of the Optical Society of America B*, 2022, 39(3): A61-A67.
- [41] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, et al. Multi-energy four-channel Kirkpatrick-Baez microscope for X-ray imaging diagnostics at the Shenguang-II laser facility [J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12(9): 93401.