



·惯性约束聚变物理与技术·

X 射线掠入射显微成像诊断技术研究进展*

徐 捷^{1,2}, 穆宝忠^{1,2}, 陈 亮^{1,2}, 李文杰^{1,2}, 徐欣业^{1,2}, 王 新^{1,2},
王占山^{1,2}, 张 兴³, 丁永坤⁴

(1. 同济大学 教育部先进微结构材料重点实验室, 上海 200092; 2. 同济大学 物理科学与工程学院, 上海 200092; 3. 中国工程物理研究院
激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900; 4. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

摘 要: 高精度的 X 射线成像诊断是深入理解内爆过程, 揭示点火尺度下未知物理问题的关键。基于掠入射反射的 X 射线显微镜, 结合亚纳米级的超光滑球面或非球面反射镜, 能够实现空间分辨优于 5 μm 的高分辨成像。介绍了国际惯性约束聚变领域的 X 射线显微成像技术发展及应用, 重点展示了我国在高分辨 X 射线 (KB) 显微镜、多通道 X 射线 KB 显微镜以及大视场 X 射线 KBA 显微镜方向的进展, 分析了下一阶段超高分辨 X 射线显微成像的研究计划。通过不断的技术创新, 我国的 X 射线显微成像诊断能力已经达到国际先进水平。

关键词: 惯性约束聚变; 等离子体诊断; X 射线光学; KB 显微镜; Wolter 显微镜
中图分类号: O434.1 **文献标志码:** A **doi:** 10.11884/HPLPB202032.200133

Progress of grazing incidence X-ray micro-imaging diagnosis technology

Xu Jie^{1,2}, Mu Baozhong^{1,2}, Chen Liang^{1,2}, Li Wenjie^{1,2}, Xu Xinye^{1,2}, Wang Xin^{1,2},
Wang Zhanshan^{1,2}, Zhang Xing³, Ding Yongkun⁴

(1. Key Laboratory of Advanced Micro-structured Materials, Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 200092, China;
2. School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;
3. Laser Fusion Research Center, CAEP, Mianyang 621900, China;
4. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China)

Abstract: High-precision X-ray imaging diagnosis is the key to understanding the implosion process and revealing unknown physical problems at the ignition scale. X-ray microscope based on grazing incidence reflection, combined with sub-nanometer ultra-smooth spherical or aspherical mirror, can achieve high-resolution imaging with spatial resolution better than 5 μm . This paper introduces the development and application of foreign X-ray microscopic imaging technology in the field of ICF research, highlights the progress of China's high-resolution X-ray Kirkpatrick-Baez (KB) microscope, multi-channel X-ray KB microscope and large-field X-ray KBA microscope. The research plan for the next stage of ultra-high resolution X-ray microscopic imaging is analyzed. Through continuous technological innovation, China's X-ray microscopic imaging diagnostic capabilities have reached the internationally advanced level.

Key words: inertial confinement fusion; plasma diagnosis; X-ray optics; Kirkpatrick-Baez microscope; Wolter microscope

激光惯性约束聚变(ICF)是发展受控核聚变的有效途径之一,对能源可持续发展、高能量密度物理研究和军事国防等具有重大的意义^[1-3]。依托大规模、高能量输出的激光装置,通过兆焦耳纳秒脉冲激光驱动,实现对氘氚(DT)燃料靶丸的聚爆压缩,达到极端的高能量密度物质状态,是实现ICF聚变点火的基本技术途径之一。目前世界上仍然没有任何一个国家实现聚变点火,究其原因,在于对激光辐照均匀性、内爆压缩对称性、内爆靶丸内界面流体力学不稳定性及燃料混合等复杂物理问题的认识尚存不足^[4-6]。激光ICF研究通常是对燃料靶丸进行球形内

* 收稿日期:2020-05-19; 修订日期:2020-07-01

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFA0403300)

作者简介:徐 捷(1990—),男,博士后,主要从事X射线光学研究;1310581@tongji.edu.cn。

通信作者:穆宝忠(1975—),男,教授,主要从事X射线光学研究;mubz@tongji.edu.cn。

爆压缩并实现中心点火^[3],如图1(a)所示。然而实际的燃料压缩状态却如图1(b)所示,由于驱动激光以及靶丸夹持膜等带来的驱动不对称性,导致燃料整体发生变形,造成驱动能量利用率显著下降;靶丸表面缺陷形成等离子体的流体不稳定性发展,引起烧蚀压力不均,导致热斑温度、体积的下降。驱动不对称性以及靶丸内界面的流体力学不稳定性,将严重影响压缩密度并加剧热斑混合效应,显著降低综合内爆性能,是国际公认的制约点火目标实现的两大关键科学难题^[7-9]。

2012年,美国国家点火装置(NIF)所承担的国家点火攻关计划(NIC)项目受挫,NIF在总结经验教训时指出,“急需优先发展革命性的诊断设备,包括与空间、光谱和时间相关的成像和光谱诊断设备,用来观察低、中和高收敛性条件下的停滞现象”。美国从该阶段开始,研究思路从实现点火转变为深入理解物理过程,全面提升实验诊断能力。X射线是等离子体的主要辐射产物,包含丰富的高温等离子体的时空演化和能谱信息。X射线成像是ICF诊断研究技术最重要的一个环节,尤其精细化的X射线成像是揭示极端条件下物质状态的关键。间接驱动ICF实验的内爆热斑尺寸约 $60\ \mu\text{m}$,持续时间 $100\sim 200\ \text{ps}$ 。基于针孔成像的热斑表征技术,空间分辨通常被限制在 $10\ \mu\text{m}$ 以上,时间分辨在 $100\ \text{ps}$ 左右。而基于X射线显微镜的成像诊断技术,空间分辨可达 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,进一步提升了对内爆过程的观测能力,是获取内爆信息、加深极端条件下物理认知以及突破点火瓶颈的关键诊断技术之一。目前,X射线精密成像诊断主要应用于内爆加速阶段和减速阶段的研究,包括内爆对称性^[11-12]、芯部发光、二维界面形貌以及燃料混合^[13-14]等问题的研究,以及Rayleigh-Taylor(RT)^[15-16]不稳定性等分解实验。

1 ICF领域X射线成像方式

ICF领域的X射线成像按照成像方式,主要包含孔径、反射、折射以及衍射四大类。针孔成像基于小孔成像原理,结构简单,使用灵活,但空间分辨率受针孔孔径和衍射效应的影响^[17],存在空间分辨率和集光效率不足的缺陷,通常空间分辨率为 $15\sim 40\ \mu\text{m}$ 。过去三十年间,针孔成像在我国强激光装置和国外各大装置上得到了广泛的应用,例如基于针孔阵列与高时间分辨探测器的内爆靶压缩形态演化系列实验^[18]。编码成像组件^[19]是一种忽略衍射效应的二维空间分辨成像技术,能够显著改善针孔相机集光角小、图像信噪比低等问题,应用于低通量的高能辐射,如 α 粒子、中子、质子、 γ 射线和高能X射线等。但是,获取的图像不能直接反映被观测物的空间形貌,需要借助后期的解码程序进行图像重建。自20世纪80年代末我国的ICF诊断开始使用编码成像技术,例如2002年建立 α 粒子菲涅尔波带片编码成像系统,成功获得了聚变反应区图像。

X射线显微成像是基于曲面反射镜的掠入射反射式聚焦成像,根据光学构型的不同可以细分为Kirkpatrick-Baez(KB)型^[20]、Wolter型^[21]以及超环面型^[22]等。由于采用了光学聚焦方式,X射线显微成像的光学性能远优于针孔成像,通常空间分辨率可达 $3\sim 5\ \mu\text{m}$,集光立体角在 10^{-7}sr 量级甚至更大。尤其在成像的最核心指标——空间分辨上,X射线显微成像是目前ICF领域各种成像方式中最优的。X射线显微成像的制造难度、成本和应用难度明显高于针孔成像,历经多年发展,直到进入20世纪90年代中后期才在国外ICF领域真正实用。随着ICF诊断精细化发展,X射线显微成像也成为解决点火困局最重要的诊断技术之一。弯晶成像具备高能谱分辨率、大数值孔径的优势,适用于极端条件下的流体运动规律如界面不稳定性、缺陷导致的射流、物质内流场分布等研究。以美国罗切斯特大学为代表,在OMEGA装置上开展了系列弯晶成像等离子体诊断实验^[23-24]。国内弯晶成像也取得长足发展,陈伯伦、杨正华等分别利用石英球面弯晶和云母球面弯晶进行了背光成像,得到了内爆靶丸的单色图像^[25]。

此外,复合折射透镜(CRL)和波带片等其他成像方式也在ICF领域进行了探索。复合折射透镜是一种多透镜组合的折射透镜,对X射线波段具有折射聚焦的作用,2016年,LMJ装置的门控X射线成像器第二套系统(GXI-II)中有4个通道利用CRL进行大视场成像,视场范围达到 $15\ \text{mm}$ ^[26]。但复合折射透镜适合于 $20\ \text{keV}$ 以上的高能段,色差严重,分辨率较差,主要用于同步辐射的束线聚焦,在ICF领域不具备很好的应用前景。基于惠更斯-菲涅尔衍射原理^[27]的波带片在ICF领域长期作为光谱元件使用;2017年,法国CEA实验室将菲涅尔相位波带片(FPZPs)作为成像元件结合多层膜反射镜构成菲涅尔超高分辨成像器(FUHRI)应用于ICF诊断实验中,完成了单色X射线内爆积分成像^[28],小视场($50\ \mu\text{m}$)下成像性能接近X射线显微成像。

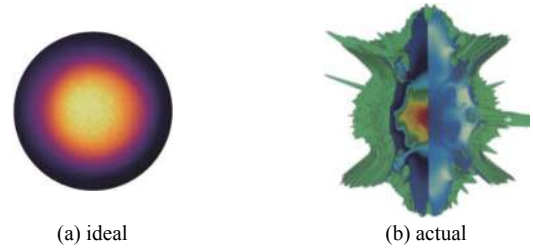


Fig. 1 Ideal and actual implosion fuel compression

图1 内爆燃料压缩状态的理想与现实^[10]

2 国际 X 射线显微成像发展

在 X 射线波段,材料的折射率小于且非常接近于 1,任何材料对 X 射线的偏折能力都很弱,这也导致 X 射线很难通过一般的折射、反射实现聚焦成像。当 X 射线以小于全反射临界角度入射到两种材料界面上时,将发生全反射。根据这一性质,X 射线在掠入射条件可以获得较高的反射率,掠入射反射式光学系统由此产生。掠入射系统可分为 KB 型系统、Wolter 型系统和超环面型系统,空间分辨率可达 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 甚至更优,但显微镜空间分辨率受反射镜面形精度制约。而在亚纳米级超光滑反射镜的加工与检测、光学系统的精密装调等方面,是 X 射线掠入射显微成像技术的难点。

2.1 KB 型显微镜

1948 年,斯坦福大学的 Kirkpatrick 和 Baez 最早提出 Kirkpatrick-Baez(KB)构型^[20],采用两块前后正交放置的球面镜(或柱面镜),通过两次反射来校正掠入射条件下单块球面镜存在的严重像散,光学构型如图 2 所示。

相较于在 ICF 成像诊断中较为常见的针孔相机,KB 显微镜的主要优势有:空间分辨率提升到 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 水平;集光立体角提高到 10^{-7}sr 量级;物镜可以放置在距离靶点较远的位置(大于 $150\ \text{mm}$),有效避免打靶碎片等对物镜的破坏;通过在反射镜表面镀制对能点响应的 X 射线多层膜^[29],可以实现一定的能谱分辨能力。

多通道 KB 系统更多地与时间分辨探测器相结合,例如联合条纹相机完成一维多能点成像,配合分幅相机完成二维高分辨成像。自 20 世纪 90 年代开始,美国 OMEGA 装置所配置的四通道 KB 显微镜^[30],设计模拟可实现中心视场分辨率 $3\ \mu\text{m}$,工作能点 $8\ \text{keV}$,放大倍率 18。该显微镜与单色晶体以及条纹相机结合构成门控单色 X 射线成像器(GMXI)^[31],成功用于诊断 ICF 内爆靶丸压缩形态和对称性信息。随着 NIF 装置投入实验运行,为之配套的 KB 显微镜研制工作同步展开。2014 年,LLNL 实验室开始研制应用于 NIF 装置的四通道 KB 显微镜^[32],设计工作能点为 $10\ \text{keV}$,针对内爆靶热斑形态成像和内爆前期背光实验成像而提出两套不同的设计指标。与 OMEGA 装置上的四通道系统在结构上不同的是,该系统的通道相互独立且可拆卸,各通道的两个物镜在线下单独调试后被组装固定,再进行通道间的组合^[33],如图 3 所示。2013 年,该系统首次在 NIF 完成了内爆成像实验验证^[34],2016 年,在 NIF 正式展开实验应用,该套系统在中心视场分辨率可达 $4\ \mu\text{m}$,在 $300\ \mu\text{m}$ 的有效视场内分辨率可以达到优于 $8\ \mu\text{m}$ ^[35],测试结果如图 4 所示。

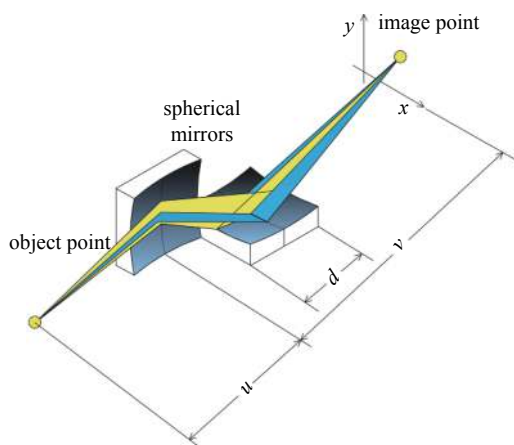


Fig. 2 Optical structure of KB microscope
图 2 KB 显微镜的光学结构

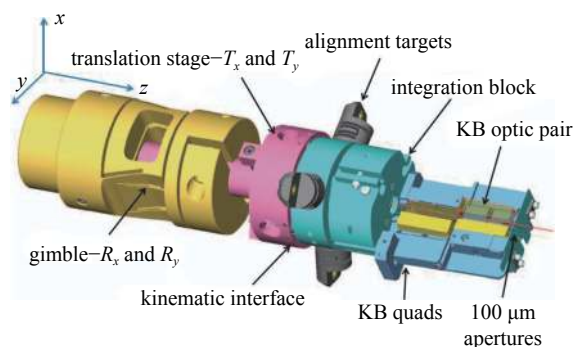


Fig. 3 Structural design drawing of four-channel KB microscope deployed in NIF
图 3 用于 NIF 装置的四通道 KB 显微镜结构设计图^[33]

2004 年,Marshall 等人提出了一种结构新颖的 16 通道 KB 显微镜的设计^[36-38],在此后的十几年间,通过不断完善光学设计最终应用于 OMEGA 装置。该设计打破了原有四通道构型的设定,采用两组每组 16 块呈圆周排布的异形反射镜。单块反射镜如图 5(a)所示,呈顶角为 22.5° 的楔形尖劈,尖劈的顶端为一个倾斜的球面工作面,相当于削去尖劈的顶端形成斜面,并在该斜面上进行抛光加工形成曲率半径为 $30\ \text{m}$ 的超光滑球面反射镜。2017 年,基于该构型研制的分幅诊断系统 KBFRAMED 在 OMEGA 装置上开展实验应用。系统有效视场约 $400\ \mu\text{m}$,分幅成像的空间分辨率在约 $6\ \mu\text{m}$,时间分辨约 $60\ \text{ps}$,最优可达 $15\ \text{ps}$ 。开展了 DT 冷冻靶停滞区(热斑)的成像实验,结果如图 5(c)所示,冷冻靶的初始直径为 $960\ \mu\text{m}$,激光注入能量为 $29\ \text{kJ}$,脉宽为 $1.5\ \text{ns}$ 。测量得的热斑尺寸约 $60\ \mu\text{m}$,持续时间约 $100\ \text{ps}$ 。

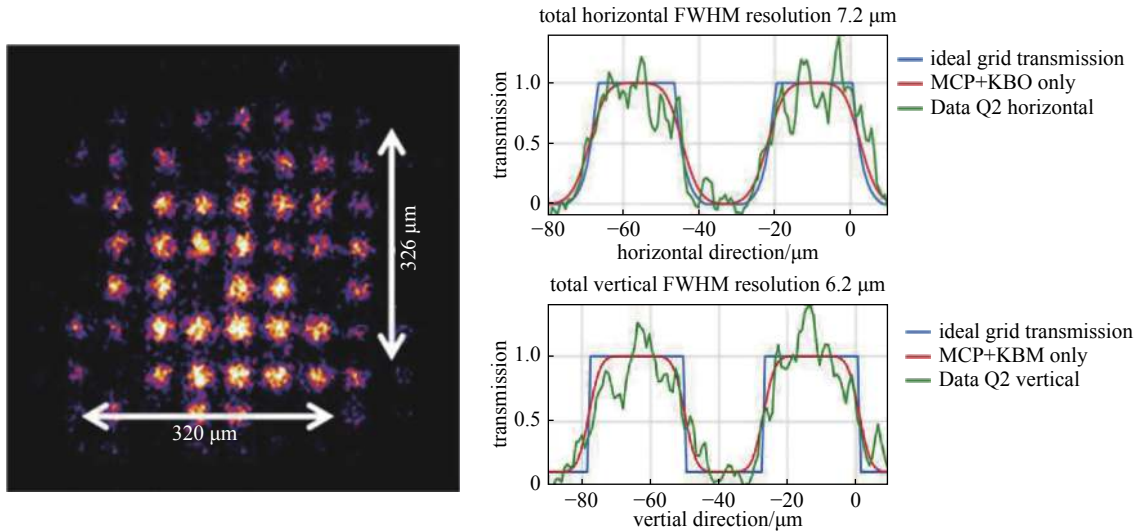


Fig. 4 Experimental results of imaging calibration of Ni grid with four-channel KB microscope

图 4 四通道 KB 显微镜对 Ni 网格的成像标定实验结果^[34]

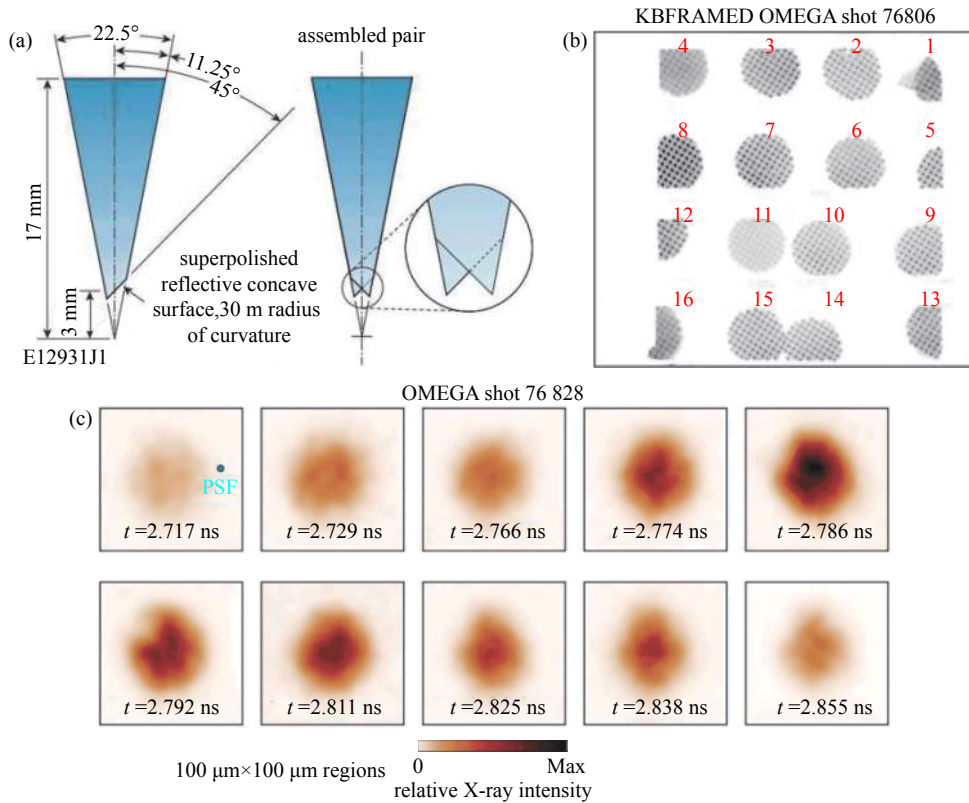


Fig. 5 (a)The special-shaped mirror used in the 16-channel KB microscope; (b)Example framed images obtained with KBFramed of a backlit Cu grid; (c)KBFramed images of hot-spot X-ray emission from a cryogenic target implosion.

图 5 (a)16 通道 KB 显微镜采用的异形反射镜; (b)铜网背光成像结果; (c)DT 冷冻靶内爆热斑的时间演化图像^[38]

2.2 Wolter 型显微镜

Wolter 型系统是 1952 年由德国科学家 Hans Wolter 提出^[21], 采用同轴共焦的旋转二次曲面, 实现光线在两个曲面上反射后成像。系统满足阿贝正弦条件, 具有高空间分辨的特性, 由于使用旋转二次曲面, 集光立体角被有效增大, 集光效率比 KB 系统高约 2 个量级, 像面的信噪比有效提高, 在天文观测领域有着重要应用。然而, 因 ICF 诊断条件限制了 Wolter 结构的口径, 通常仅为 20~50 mm, 因工作面需要达到 nm 量级的面形精度, 小口径的超光滑光学内表面目前在加工与检测上都极其困难。

美国早期利用电镀镍复制技术来制作 Wolter 系统的反射镜。在一个铝质棒状基底表面进行精细地切削与抛光, 再对基底表层镀膜和电镀 Ni/Co 金属壳, 最后通过水冷的方式脱模, 形成工作面在金属壳内部的桶形反射镜,

反射镜实物如图6所示。棒状基底的表面面形和粗糙度将决定物镜工作面的品质^[39]。2013年,美国利用单层旋转曲面的Wolter物镜对能量高于15 keV的K- α 线辐射以及中子散射探测^[40],该系统应用于Z-pinch装置上,具有 10^{-3} sr集光效率,在 ± 12 mm视场内将达到 $100 \mu\text{m}$ 空间分辨率^[41]。

美国国家航空航天局(NASA)基于嵌套Wolter构型的天文望远镜Nustar成功应用,促使NIF与NASA联合开展了ICF诊断用三层嵌套式Wolter显微镜的研制,如图7所示。围绕点火条件热斑诊断需求,为了降低热斑外冷燃料区X射线吸收的影响,设计成像能点 > 20 keV(20, 25, 30 keV), $\pm 150 \mu\text{m}$ 视场范围内空间分辨达到约 $10 \mu\text{m}$,时间分辨约10 ps,能谱分辨约1 keV。然而在镜头元件的研制上并不顺利,NASA为NIF所研制的Wolter显微镜在空间分辨率上难以达到设计指标。



Fig. 6 Picture of Wolter microscope objective applied to Z-pinch device

图6 应用于Z-pinch装置的Wolter显微镜物镜实物图^[41]

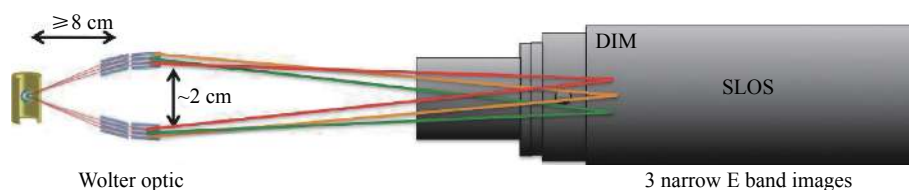


Fig. 7 Optical path diagram of Wolter micro-imaging system developed by NIF

图7 NIF研制的Wolter显微成像系统光路图^[42]

2.3 超环面型显微镜

超环面型显微镜,采用单块超环面反射镜进行二维聚焦成像。反射镜在正交方向具有两种曲率半径,能够矫正单块球面反射镜严重的像散问题。2016年,法国原子能委员会(CEA)为LMJ装置研制的多通道超环面^[26]X射线显微镜,具备工作距离远、通道数多、集光效率高和结构紧凑等特点。同样研制了软/硬X射线线多通道超环面显微镜各一套。以硬线版本(GXI-1)为例,光学结构如图8(a)所示,对 $0.5 \sim 10$ keV响应,采用 4×2 块超环面镜,物距为610 mm,放大倍数4.4,超环面在子午和弧矢方向的曲率半径分别为84.5 m和12.1 mm。在约3 mm视场范围内空间分辨率约为 $35 \mu\text{m}$ 。同时配备有4个针孔相机通道。对网的背光成像结果如图8(b)所示,线宽为 $40 \mu\text{m}$,周期为 $340 \mu\text{m}$ 。诊断系统如图8(c)所示。显然,超环面具有较高的效率,但难以满足内爆成像的高分辨性能要求。

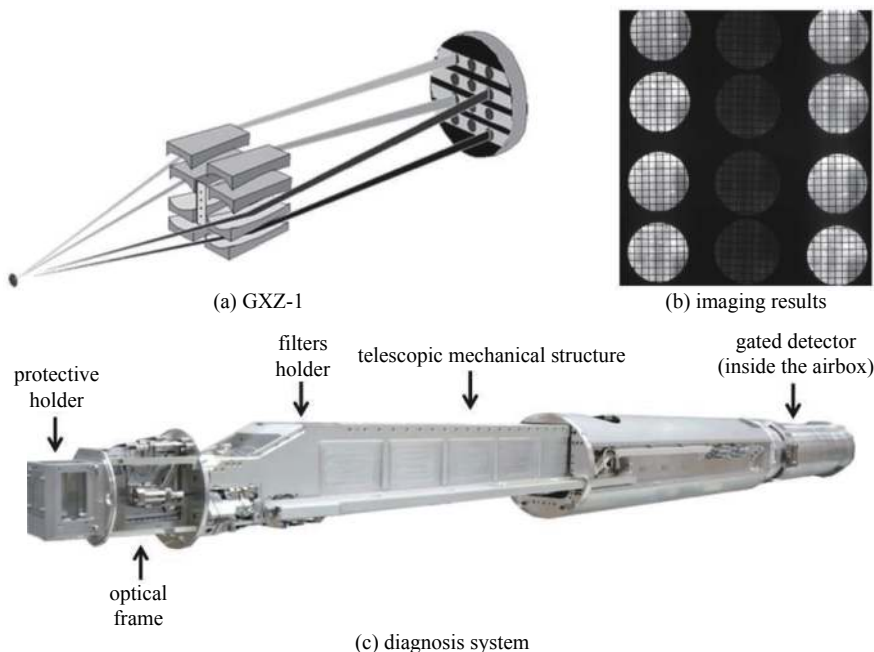


Fig. 8 Multi-channel toroidal mirror X-ray microscope GXI-1 and grid backlight imaging results

图8 多通道超环面镜X射线显微镜及网格背光成像结果^[26]

3 我国 ICF 领域的 X 射线显微镜研究进展

进入 21 世纪以来,我国在高分辨 X 射线显微镜的研制上实现了“从零到一”的突破。围绕我国 ICF 诊断的迫切需求,攻克了一系列关键核心技术,如 X 射线薄膜技术、高精密装调技术、瞄准技术等,实现了高分辨 X 射线显微镜的研制。

3.1 高分辨 X 射线 KB 显微镜

3.1.1 不同薄膜类型的显微成像探索

KB 显微镜是典型的掠入射反射系统,其空间分辨率主要由几何像差决定。KB 显微镜的轴外像差与掠入射角度成反比,增大掠入射角是提高 KB 显微镜像质的有效途径,因此 X 射线薄膜是决定 KB 显微镜光学性能的重要因素。单层金属膜,通过在光学基底上镀制单层高原子序数金属膜,基于全外反射原理,掠入射角度受掠入射全反射临界角的限制。X 射线多层膜基于干涉原理,是一种周期、厚度可调的一维人工微结构,可以针对特定能点和掠入射角度进行设计,结构上又可细分为周期多层膜和非周期多层膜。三种不同类型薄膜的结构如图 9 所示。对于周期多层膜,相邻两层高、低原子序数材料构成一个周期,周期厚度恒定不变,对特定能点的 X 射线干涉相长;对于非周期多层膜,周期厚度从光学基底向上逐渐增大,能够对较宽能谱范围的 X 射线实现干涉相长。图 10 所示的是针对 8 keV 能点设计的 Ir 膜、W/B₄C 周期多层膜以及 W/B₄C 非周期多层膜的反射率随能谱变化曲线。其中, Ir 膜反射率最高,能量带宽范围大,响应效率变化平稳,但工作角度较小,且不具备能谱分辨能力; W/B₄C 周期多层膜的工作角度可以达到单层膜的 2~3 倍,峰值反射率接近单层膜,通过调整周期数可实现几到几十的能谱响应; W/B₄C 非周期多层膜可以获得较宽的能谱(角度)带宽,但反射率较低,通常在 10%~30% 间。

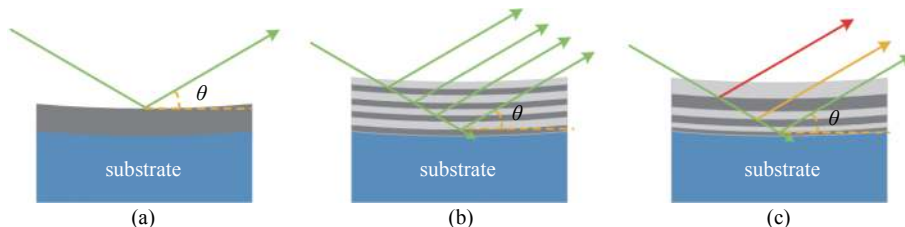


Fig. 9 Schematic diagram of three different types of films

图 9 三种不同类型薄膜的结构示意图

分别采用 Ir 单层膜、W/B₄C 周期多层膜以及 W/B₄C 非周期多层膜反射镜进行 8 keV 能点的 X 射线成像实验,通过实验揭示了不同膜系对系统空间分辨率、视场、像场均匀性、光效率等关键指标的影响,成像结果如图 11 和表 1 所示。

实验结果表明:单层金属膜系统具有较高的反射效率,由于掠入射角受限,成像分辨率受到限制,没有能谱分辨能力;采用周期多层膜可以增大掠入射角度,从而具有较好的空间分辨率,且具有能谱分辨能力,但像场均匀性不佳;非周期多层膜元件可以拓宽 KB 系统的视场,像场分布均匀,但反射效率低。

3.1.2 双周期多层膜装调技术

X 射线显微镜的精密装调需要在实验室内离线完成,然而低能点 X 射线在大气环境下的衰减十分严重。通过双周期多层膜方式,实现了用 8 keV 辅助装调工作于低能点的 X 射线显微镜。双周期多层膜的原理如图 12 所示。辅助 X 射线在实验中操作较为方便,可以通过反复的 X 射线实验获得最佳物象关系。同时,由于装调膜系和工作膜系的中心角度相同,且角度带宽更窄,因此辅助 X 射线足以保障成像系统的精度。

3.1.3 从模拟物像关系到双目瞄准技术

KB 显微镜成像基于掠入射反射原理,成像的空间分辨率对掠入射角的变化非常敏感,对物像位置的要求也很严格,因此高精度的瞄准成为 KB 显微镜应用必须解决的关键问题^[43]。美国 OMEGA 装置上采用定位模拟球的方式解决 KB 显微镜的姿态调整,这种方法必须借助于非常复杂的 TIM 搭载平台以及靶监测设备^[44]。法国的 LIL 装

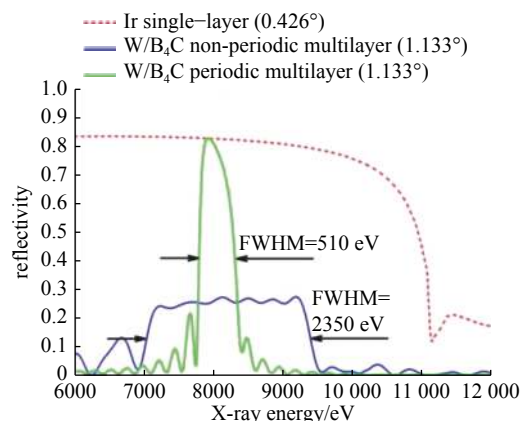


Fig. 10 Reflectance curves of Ir single-layer film, W/B₄C periodic multilayer film and non-periodic multilayer film

图 10 Ir 膜、W/B₄C 周期多层膜以及非周期多层膜的反射率曲线示意图

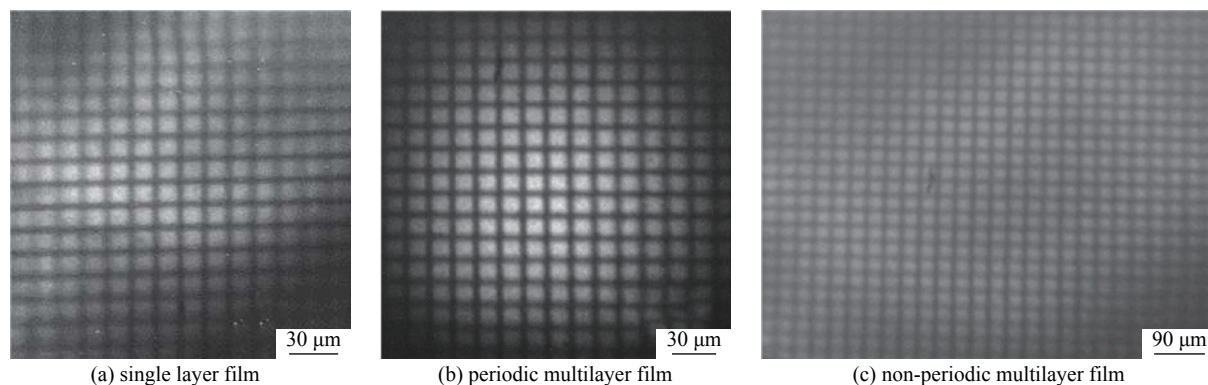


Fig. 11 Difference of X-ray imaging with single layer, period multilayer and non-period multilayer films

图 11 不同薄膜类型的 X 射线显微成像异同

表 1 不同膜系的 KB 显微镜性能比较

Table 1 Comparison of KB microscope performance with different films

	grazing angle/(°)	field of view/μm	resolution/μm	reflectivity/%	image field uniformity	energy resolution
ir single layer	0.425	160	6	60	high	non
W/B ₄ C periodic multilayer	1.133	200	4	50	low	~30
W/B ₄ C non-periodic multilayer	1.133	350	5	10	high	<10

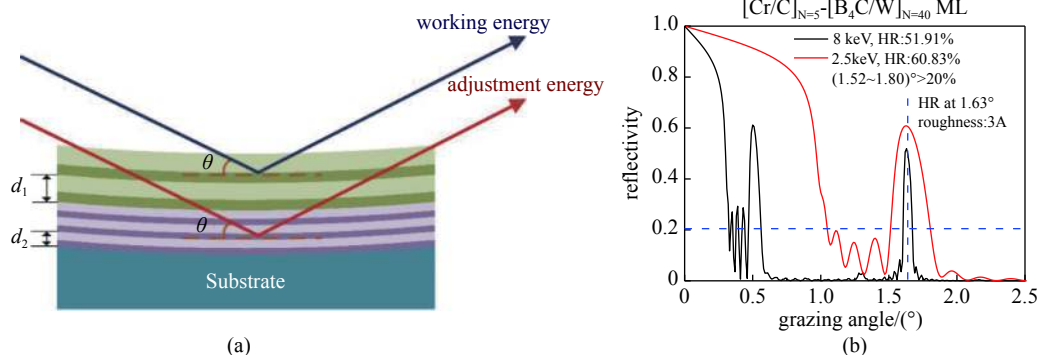


Fig. 12 Schematic diagram of double-period multilayer film used for system assembly

图 12 用于系统装调的双周期多层膜示意图

置上采用了双路激光瞄准器的方式解决 X 射线掠入射系统的定位,其调节精度不高,且景深控制非常困难^[45]。我国在早期的应用中采用模拟杆和像面指示激光确定靶点和像面位置,然而随着神光 III 主机实验的开展,传统方法在真空靶腔内的局限性逐渐显现。以 KB 显微镜为例,空间分辨率满足 5 μm 时,视场范围在 ±200 μm,系统景深为 mm 量级。为此采用双目瞄准技术并借助诊断搭载平台(DIM),能够在真空环境下实现对靶点的初步搜寻和精确瞄准,横向定位精度能够达到 ~26 μm,轴向定位精度达到 ~50 μm,满足了目前诊断设备的瞄准需要。如图 13 所示,双目瞄准技术基于两台长焦距、高放大倍数的精瞄 CCD 相机安装在显微镜的诊断包上,两台 CCD 相机的光轴保持 10°~20°的夹角,物平面相互重叠,构成双目可视系统。在离线条件下,完成 KB 显微镜与双光路显微镜与双目瞄准节的耦合,两者作为一个共同体置入 DIM 内部进行在线瞄准。

在同济大学和工程物理研究院激光聚变研究中心的共同努力下,于 2010 年突破了高分辨 X 射线显微镜的研制。近年来,通过不断的技术创新,成像性能持续提高。图 14 是 2019 年神光 III 主机装置上正在使用的高分辨 X 射线显微镜的分辨率测试结果,图 14(a)是四象限网格的扫描电镜图像,网格线宽 15 μm,图 14(b)、(c)是背光成像实验测试结果,显微镜中心视场分辨率优于 4 μm,高分辨视场范围达到 400 μm,在 1 mm 视场范围内仍能保持优于 20 μm 的空间分辨。我国 X 射线显微镜的成像性能,目前已经达到甚至超越国际先进水平。例如应用于 NIF 装置的四通道诊断系统 KBM 设计工作能点为 10.2 keV,经测试在 200 μm 视场范围内,空间分辨率优于 7 μm。

高分辨 X 射线显微镜自 2012 年开始,在神光 II、神光 III 原型、神光 III 主机装置上的多个实验中成功应用。例如,在 RT 不稳定性增长实验中,国际首次将 RT 实验观测波长推进到 10 μm,如图 15(a)所示。基于高分辨 KB 显微镜,建立了模耦合诊断条件,获得了清晰的拍频和拍频的倍频诊断数据,如图 15(b)所示。基于双周期多层膜的

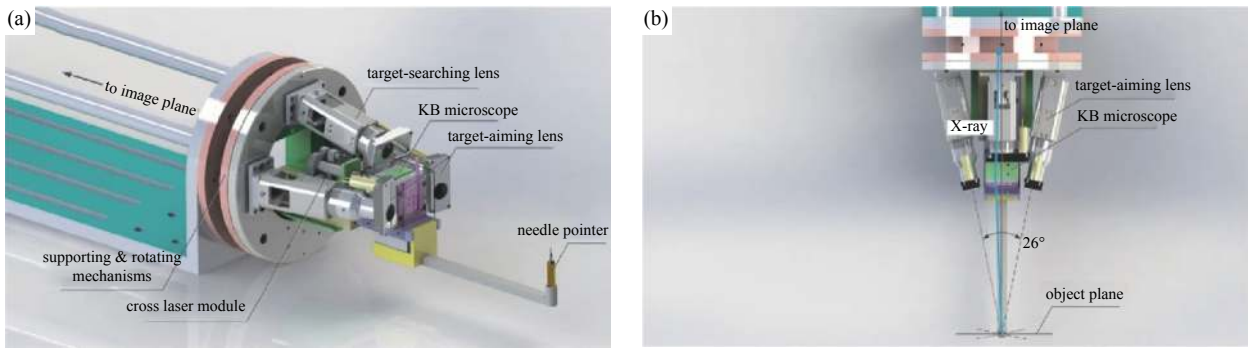


Fig. 13 (a) Schematic of the optical binocular system (OBS) and (b) its connection with the KB module

图 13 (a) 双目瞄准节和 (b) KB 显微镜的耦合示意图^[46]

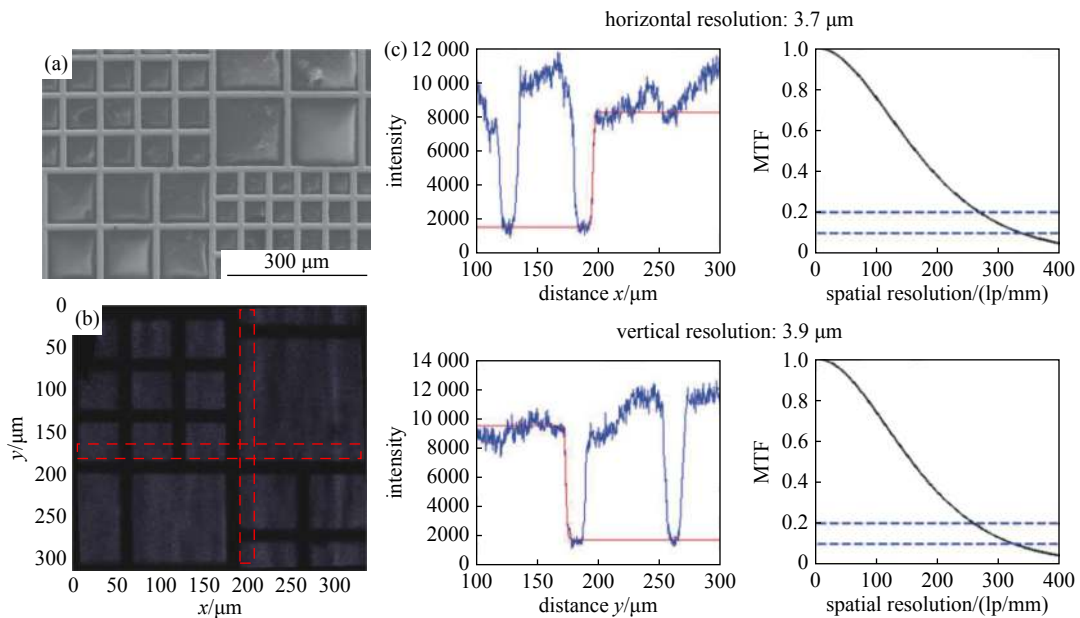


Fig. 14 (a) SEM calibration results of four-quadrant grid; (b) Backlight imaging experiment results of four-quadrant grid; (c) Resolution calibration results

图 14 (a) 网格电镜标定结果; (b) 网格背光成像实验结果; (c) 分辨率标定结果

多能谱响应特性, 成功获得了 3.5 keV 和 1.2 keV 的内爆双流线结果, 如图 15(c) 所示。同样, 基于双能点系统, 获得了不同能点的芯部自发光清晰图像, 如图 15(d) 所示。

3.2 多通道 X 射线 KB 显微镜

3.2.1 基于支撑锥芯的多通道设计与集成

X 射线时空诊断是激光 ICF 研究的重要内容, 需要 X 射线成像系统具有多通道成像能力。多通道 KB 显微镜的关键在于如何在使多个通道高精度集成在一起, 并保障各个通道成像的一致性。我们发展了一种参考锥芯的方式, 实现了多通道的空间排布和高精度集成。如图 16 所示, 以四通道 X 射线 KB 显微镜为例, 四块反射镜在子午和弧矢方向两两相对, 按照前后顺序依次排列, 空间位置关系通过物镜中心处的高精度支撑锥芯保证。

3.2.2 掠入射 X 射线显微镜的强度定量化标定

为了改善多层膜 X 射线显微镜客观存在的响应效率分布不均一、像面光强失真等难题, 开展了针对多层膜光学和系统的强度定量化标定方法研究。围绕着 ICF 中的强度定量化成像诊断, 建立了一套基于“扫描针孔 + Si-PIN 谱探测器”的实验室标定技术^[48], 原理如图 17 所示, 通过对比系统的入射和出射光强度可以得出系统响应效率随视场的变化关系。利用该方法, 可以给出 X 射线 KB 显微镜的实测响应函数。将该函数应用于诊断实验, 可以消除显微镜对实验数据的影响。

3.2.3 多通道 KB 显微镜研制及重要应用

近十年来, 我国在多通道 X 射线 KB 显微镜研制方面不断取得突破。同济大学与中国工程物理研究院激光聚

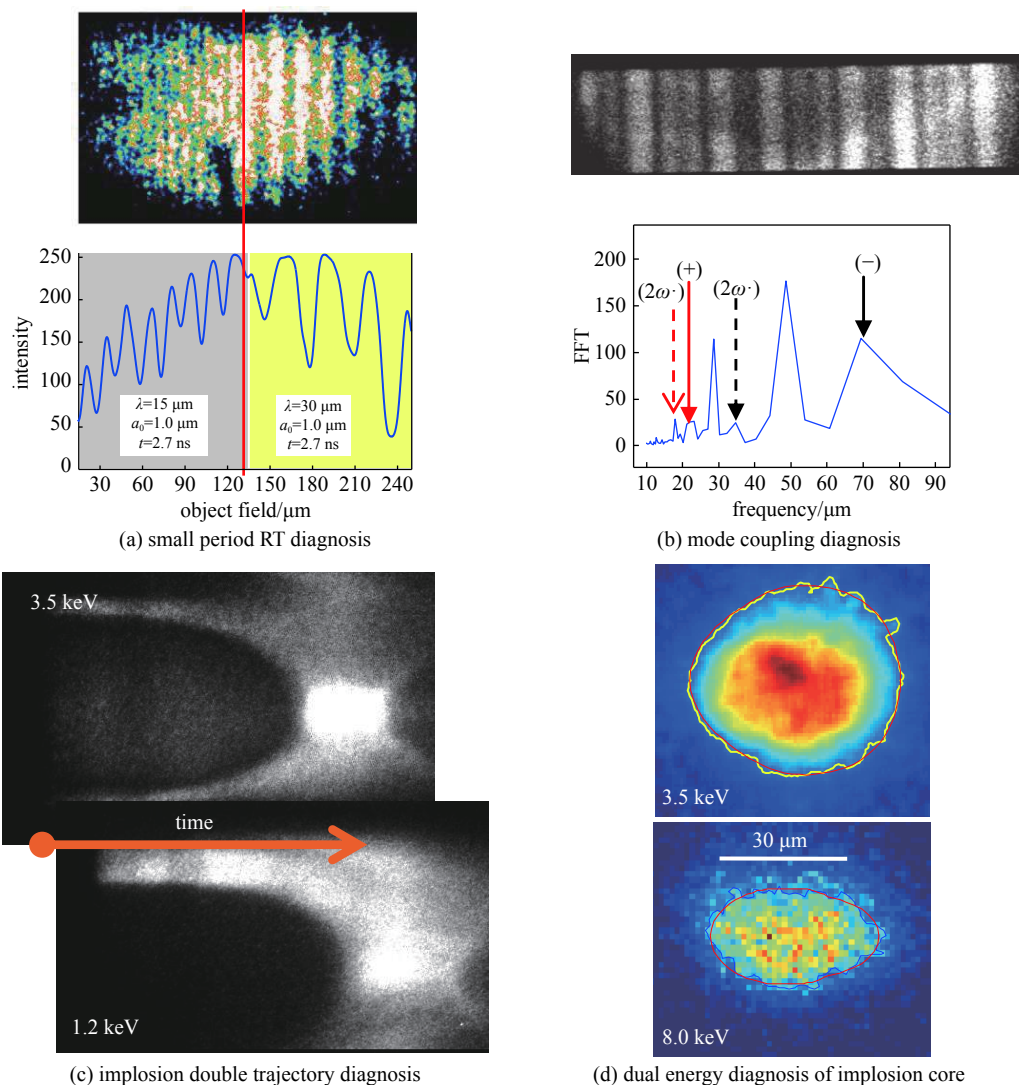


Fig. 15 Diagnostic experiments of X-ray KB microscope at Shenguang laser facility

图 15 高分辨 X 射线 KB 显微镜在我国强激光装置上的应用

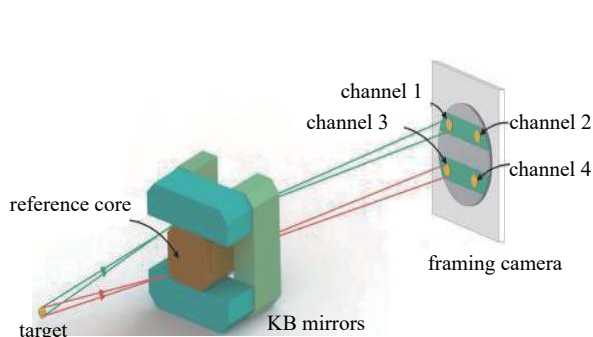


Fig. 16 Optical structure for the time-gated four-channel KB microscope

图 16 时空分辨四通道 KB 显微镜结构图^[47]

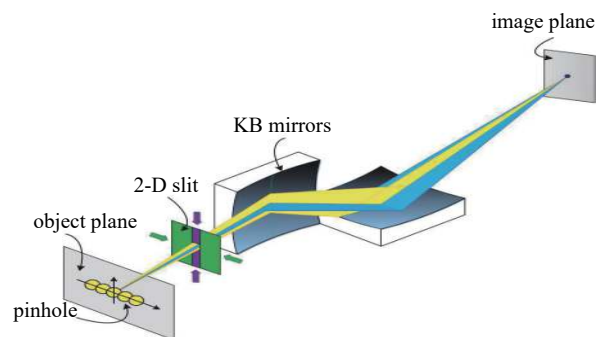


Fig. 17 X-ray microscope intensity calibration method based on "scanning pinhole+Si-PIN spectrum detector"

图 17 基于“扫描针孔+Si-PIN 谱探测器”的 X 射线显微镜标定方法^[48]

变研究中心、上海激光等离子体研究所合作，为神光 II、神光 III 原型和主机装置研制了针对不同实验目标的 X 射线显微镜。2013 年，研制成功了四通道 X 射线 KB 显微镜，工作能点 4.75 keV，四幅像的排布为 20 mm×20 mm，空间分辨率约为 8 μm，但四幅图像的一致性相对较差^[49]。利用该系统，开展了双扰动振幅 CH 调制靶分幅成像实验，结果如图 18 所示，这也是多通道 X 射线显微镜在我国强激光装置上的首次应用。

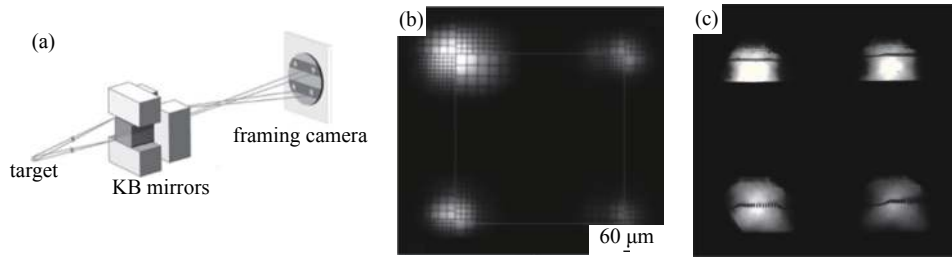


Fig. 18 (a)Schematic of four-channel KB microscope; (b)4.75 keV four-channel KB imaging results of four-quadrant Cu grids at Shenguang II laser facility; (c)Diagnostic experiment of double turbulent amplitudes

图 18 (a)四通道 KB 显微镜示意图; (b)神光 II 装置 4.75 keV 能点下四象限 Cu 网格成像^[49]; (c)双扰动振幅 CH 调制靶分幅成像实验

为了解决现有多层膜 X 射线显微镜客观存在的视场范围受限、响应效率分布不均以及像面强度分布不均等问题,在像面获得可以直接真实反映靶丸发光状态的 X 射线图像,平响应 X 射线显微镜的设计概念被提出。通过平响应光学元件构建出大视场和宽能谱响应的光学系统,从而降低 X 射线显微镜在标定过程中的难度和标定不确定度。就“平响应”的定义来说,在一定视场范围内,光学系统要满足系统响应效率差异不能过大。2018 年研制的平响应 Pt 膜四通道 KB 显微镜,在 6 keV 能点下,中心视场空间分辨优于 $4\ \mu\text{m}$,在 $\pm 200\ \mu\text{m}$ 视场内,响应效率不均匀性小于 8.4%,分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$,在 $\pm 400\ \mu\text{m}$ 视场内,响应效率不均匀性小于 17.9%,分辨率优于 $8\ \mu\text{m}$,如图 19 所示。系统目前应用于神光 III 厚型装置的多项实验研究,并获得丰富的实验结果。如图 20 所示,在聚变燃料掺杂微量 Ar 的热斑诊断中,通过前发次实验结果调控激光驱动对称性后,四通道成像一致性优于 98%,轮廓线几乎重合,空间分辨和多通道一致性与美国的四通道系统性能相当甚至更优。该系统已在多次打靶实验中引用,稳定可靠性得到了充分验证。

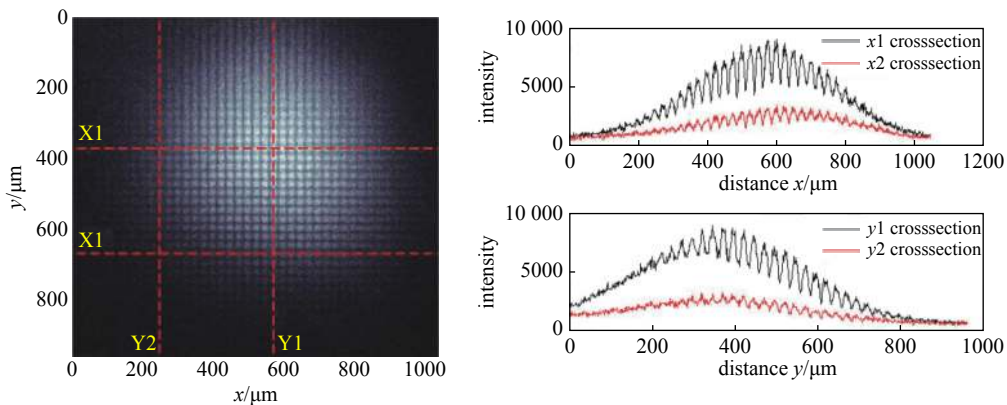


Fig. 19 Center field of view resolution of four-channel KB microscope

图 19 四通道 KB 显微镜中心视场分辨率

2017 年,同济大学研制了八通道 KB 显微镜的研制^[50],通过光学结构的创新设计,进一步提升了 KB 构型的系统集成度和应用价值。在神光 III 主机上完成了网格背光成像标定,如图 21 所示, $\pm 150\ \mu\text{m}$ 视场范围内分辨率为 $6\ \mu\text{m}$,中心视场最佳分辨率达到了 $3.8\ \mu\text{m}$,系统有效集光立体角为 $\sim 2.33 \times 10^{-7}\text{sr}$ 。在同一发次的激光打靶实验中,可获得八幅高分辨率的 X 射线图像。

ICF 诊断设备通常都是部署在强激光装置的赤道区,并在间接驱动柱腔靶开设诊断窗口。而极区成像诊断的技术优势在于,有效利用激光注入孔这一天然诊断窗口;有利于对环内激光驱动对称性的监测;有利于开展更多维度(三个维度以上)的内爆热斑成像诊断,重建出热斑区的 3D 精细结构。基于极区成像诊断的物理需求,我国首次将高空间分辨和多能点诊断的 X 射线显微镜应用于极区诊断,研制了对 1.2, 3.5 和 8 keV 能点响应的四通道 KB 显微镜^[49]。将八通道 KB 显微镜部署于赤道区,四通道 KB 显微镜部署于极区,开展从正交方向上的协同诊断实验,成功应用于我国首次开展的 DT 冷冻靶综合内爆实验,实验结果如图 22 所示。

3.3 大视场 X 射线显微镜

为了拓展成像视场,需要通过增加反射镜数量来校正轴外像差,从而拓展高分辨成像的范围。2013 年,研制

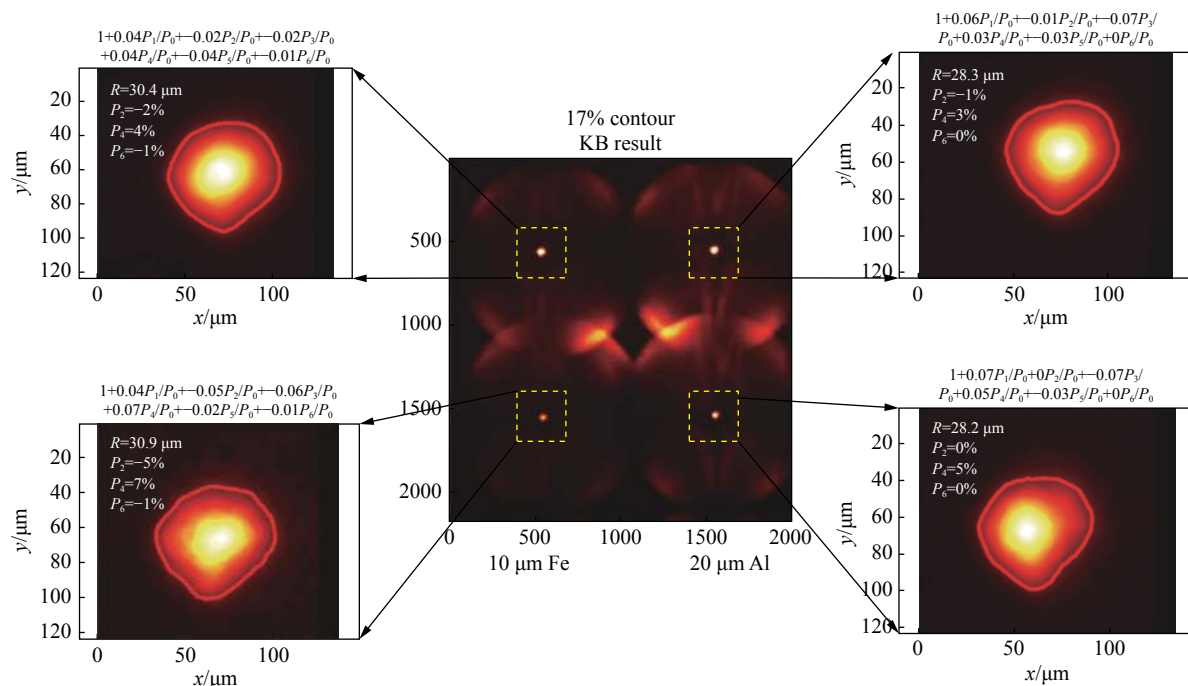


Fig. 20 Results of hot-spot measurement with four-channel KB microscope

图 20 四通道 KB 显微镜热斑测量结果

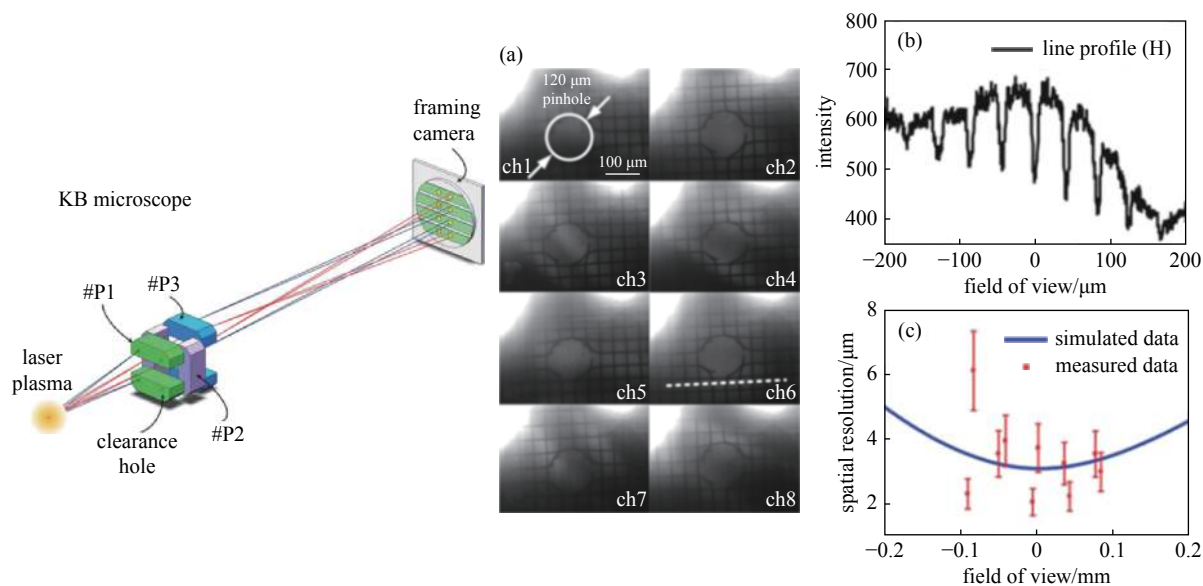


Fig. 21 Optical structure of eight-channel KB microscope and grid backlight imaging results

图 21 八通道 KB 显微镜的光学结构与网格背光成像结果^[50]

成功了一维大视场 KB amélioré (KBA) 显微镜, 工作能点为 4.75 keV 和 8 keV, 由两块球面镜构成 KBA 结构^[51], 在神光 III 原型装置完成背光网格标定实验, 600 μm 视场内的分辨率可达到 4 μm。随着对正弦调制靶背光 RT 不稳定性研究的不断深入, 2017 年, 进一步研制了工作能点在 2.5 keV 和 4.3 keV 的双通道 KBA-KB 显微镜系统^[16], 系统结构如图 23 所示。该结构在子午方向由两套 KBA 系统构成, 并具有双通道共视场的性能。在弧矢方向上, 由单块球面镜结合分区镀膜技术将两个通道的弧矢镜集合在同一块镜面上, 使整个系统的结构更为紧凑, 镜面的两个区域镀制两种周期多层膜, 分别对 2.5 keV 和 4.3 keV 的 X 射线产生准单色响应, 能量带宽为 0.5 keV。该系统具备大视场、双能点、高空间分辨的光学特性, 用以配合高时间分辨条纹相机诊断一维方向的正弦条纹演化过程。2016 年在神光 III 主机装置上的背光静态成像实验中, 该套显微镜系统实现了有效视场超过 600 μm, 空间分辨 5 μm 的成像结果, 实验结果如图 24 所示。大视场 X 射线成像系统主要应用于背光成像实验, 也是目前法国 LMJ 和美国 NIF 的重点发展技术之一。

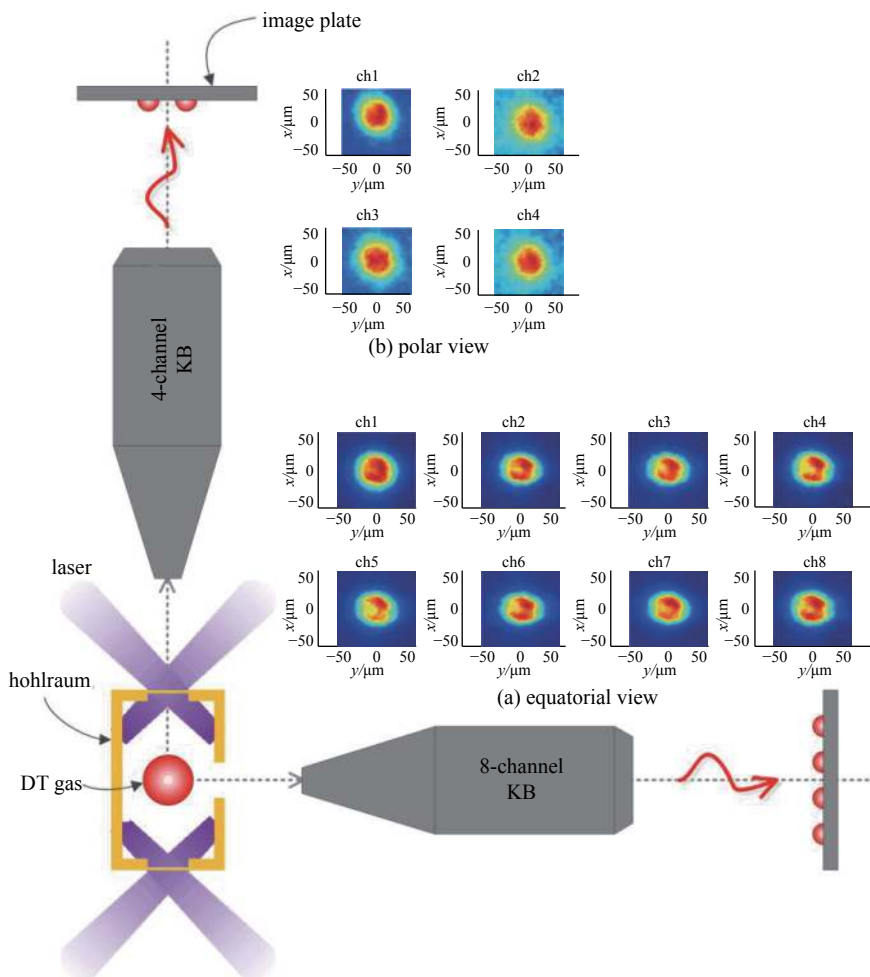


Fig. 22 Experimental configuration for collaborative X-ray imaging diagnostics at Shenguang III laser facility

图 22 神光 III 装置开展的两台 KB 显微镜的协同诊断^[46]

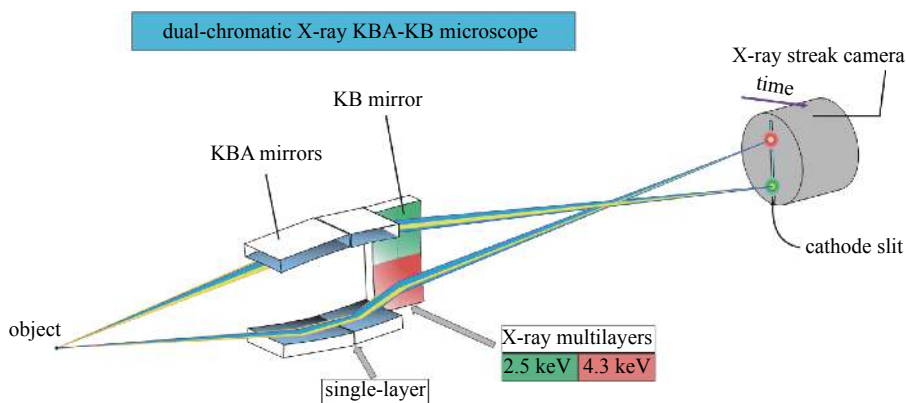


Fig. 23 Dual-channel microscope system sketch.

图 23 KBA-KB 系统结构草图^[46]

4 未来几年的 X 射线显微成像发展

内爆减速阶段靶丸内界面的流体力学不稳定性以及内爆阻滞阶段热斑形状的不对称性,将严重影响压缩密度并加剧热斑混合效应,显著降低综合内爆性能。目前主流的 X 射线诊断技术空间分辨率大都处于 $5\ \mu\text{m}$ 水平,现有诊断技术光学构型达到技术发展的瓶颈,空间分辨难以突破,内爆压缩、阻滞阶段相关物理实验的诊断精度难以进一步提升,成为目前内爆物理诊断“卡脖子”的难题之一。

为了实现内爆减速阶段壳层的精细结构和阻滞阶段热斑高阶不对称性的有效诊断,通过非球面反射镜与 KBA 构型的结合,提出大视场、超高分辨的 X 射线显微镜新构型,如图 25 所示。如图 26 所示,仿真结果表明,新

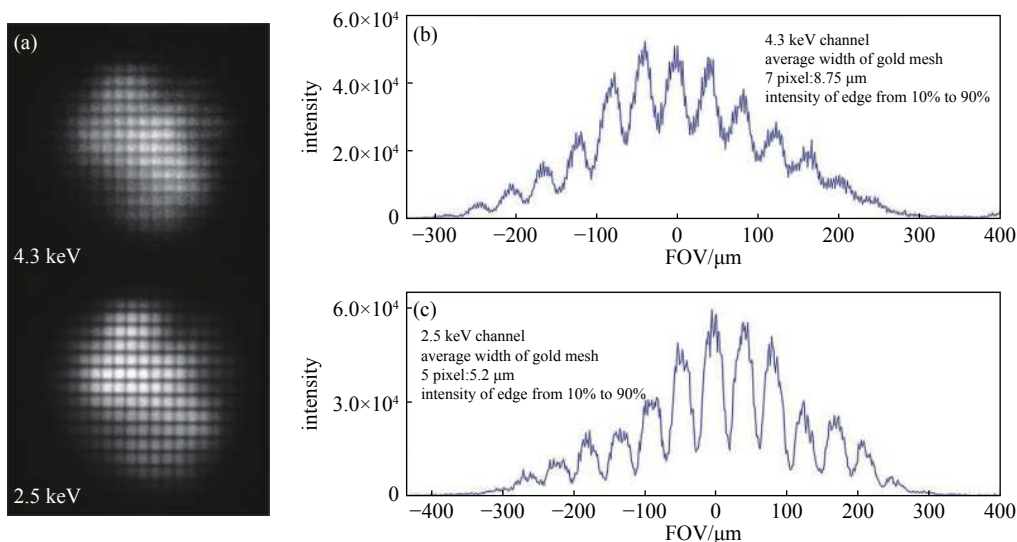


Fig. 24 Static image of gold mesh target at 2.5 keV and 4.3 keV in implosion experiments

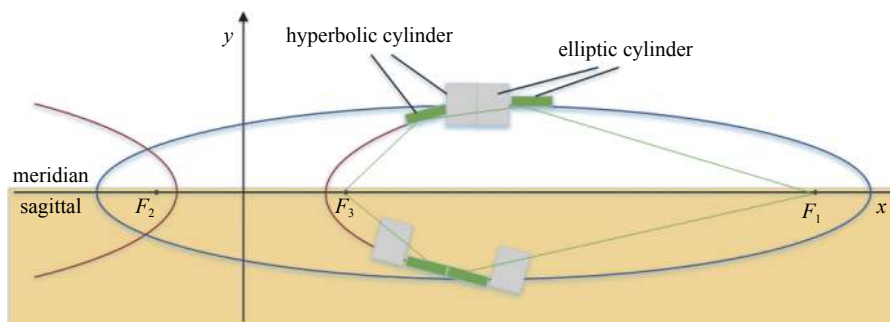
图 24 2.5 keV 与 4.3 keV 金网格靶内爆静态成像实验^[16]

Fig. 25 Optical path diagram of STTS configuration aspherical KBA microscope

图 25 STTS 构型非球面 KBA 显微镜光路图

结构突破了当前诊断系统的几何像差限制,能够将 $\pm 200 \mu\text{m}$ 视场内的空间分辨推进到 $0.5 \mu\text{m}$ 以下,即使考虑实际装调误差和加工误差因素,也有望实现 $\pm 200 \mu\text{m}$ 视场内优于 $2 \mu\text{m}$ 的空间分辨能力。

5 结 论

高精度的 X 射线显微成像是 ICF 研究中最关键的诊断技术之一,对有效理解黑腔物理过程和内爆物理过程意义重大。近十年来,我国的高分辨 X 射线显微成像诊断技术取得了长足进展,建立了适合我国激光装置特色技术方案,独立自主研制了高分辨多通道 X 射线显微镜,关键成像指标与美法激光装置上的系统基本相当,使我国 ICF 研究具备开展精密 X 射线成像诊断实验的能力。

随着激光装置的驱动能量大幅提升,内爆阻滞阶段等物理过程对 X 射线显微成像诊断技术提出了新的挑战, $1 \mu\text{m}$ 级的超高空间分辨能力是该领域最迫切需要解决的难题。此外,高效率的高能成像,也是 ICF 领域 X 射线成像发展的重点。

参考文献:

- [1] Betti R, Hurricane O A. Inertial-confinement fusion with lasers[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 435-448.
- [2] Hurricane O A, Callahan D A, Casey D T, et al. Fuel gain exceeding unity in an inertially confined fusion implosion[J]. *Nature*, 2014, 506(7488): 343-348.

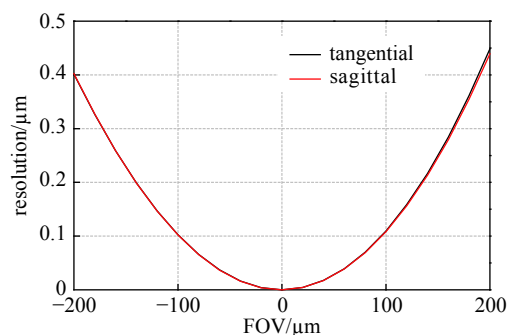


Fig. 26 Simulation of optical performance of ultra-high resolution KB microscope

图 26 超高分辨 KB 显微镜光学性能仿真

- [3] 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.
- [4] Pu Y, Huang T, Ge F, et al. First integrated implosion experiments on the SG-III laser facility[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2018, 60: 101864.
- [5] Yan J, Zhang X, Li J, et al. Preliminary experiments of the hohlraum-driven double-shell implosion on Shenguang-III laser facility[J]. *Nuclear Fusion*, 2018, 58: 076020.
- [6] Jiang Shaoen, Wang Feng, Ding Yongkun, et al. Experimental progress of inertial confinement fusion based at the Shenguang-III laser facility in China[J]. *Nuclear Fusion*, 2019, 59: 032006.
- [7] Hurricane O A, Callahan D, Casey D, et al. Inertially confined fusion plasmas dominated by alpha-particle self-heating[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 800-806.
- [8] Smalyuk V A, Robey H F, Alday C L, et al. Hydro-instability growth of perturbation seeds from alternate capsule-support strategies in indirect-drive implosions on National Ignition Facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2017, 24: 102707.
- [9] Haines B M, Olson R E, Sweet W, et al. Robustness to hydrodynamic instabilities in indirectly driven layered capsule implosions[J]. *Physics of Plasmas*, 2019, 26: 012707.
- [10] 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: 041006.
- [11] 董建军, 邓克立, 王强强, 等. 基于多通道Kirkpatrick-Baez显微镜的内爆热斑不对称性实验研究[J]. *核聚变与等离子体物理*, 2018, 38: 125-129. (Dong Jianjun, Deng Keli, Wang Qiangqiang, et al. Experimental study on the asymmetry of implosion hot spot based on multi-channel Kirkpatrick-Baez microscope[J]. *Nuclear Fusion and Plasma Physics*, 2018, 38: 125-129)
- [12] 黎航, 蒲昱东, 景龙飞, 等. 间接驱动的内爆不对称性随腔长和时间变化的研究[J]. *物理学报*, 2013(22): 317-322. (Li Hang, Pu Yudong, Jing Longfei, et al. Variations of implosion asymmetry with hohlraum length and time in indirect-drive inertial confinement fusion[J]. *Acta Physica Sinica*, 2013(22): 317-322)
- [13] Pu Y, Huang T, Wei M, et al. Spectroscopic studies of shell mix in directly driven implosion on SG-III prototype laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 122707.
- [14] He S, Ding Y, Miao W, et al. Diagnostic for determining the mix in inertial confinement fusion capsule hotspot[J]. *Physics of Plasmas*, 2016, 23: 072708.
- [15] Wu J F, Miao W Y, Wang L F, et al. Indirect-drive ablative Rayleigh-Taylor growth experiments on the Shenguang-II laser facility[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21: 042707.
- [16] Xie Qing, Mu Baozhong, Li Yaran, 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.
- [17] 温树槐, 丁永坤. 激光惯性约束聚变诊断学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012. (Wen Shuhuai, Ding Yongkun. *Laser inertial confinement fusion diagnostics*. Beijing: National Defense Industry Press, 2012)
- [18] Wen S, Cheng J, Yang C, et al. Application of an X-ray framing camera in ICF diagnostic[C]//Proc of SPIE. 2001, 4424: 188.
- [19] 曹磊峰, 郑志坚, 丁永坤, 等. X光环孔编码成像技术研究[J]. *强激光与粒子束*, 2003, 15(8): 764-768. (Cao Leifeng, Zheng Zhijian, Ding Yongkun, et al. Investigation of X-ray ring aperture coded imaging technique[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, 15(8): 764-768)
- [20] Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of focal images by X-rays[J]. *Journal of the Optical Society of America*, 1948, 38(9): 766.
- [21] Wolter V H. Spiegelsysteme streifenden Einfalls als abbildende Optiken für Röntgenstrahlen[J]. *Annalen der Physik*, 1952, 6(10): 94-114.
- [22] Aoki S, Sakayanagi Y. X-ray imaging with toroidal mirror[J]. *Applied Optics*, 1978, 17(4): 601-603.
- [23] Stoeckl C, Bedzyk M, Brent G, et al. Soft X-ray backlighting of cryogenic implosions using a narrowband crystal imaging system[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85: 11E501.
- [24] Koch J A, Lee J J, Haugh M J. High miller-index germanium crystals for high-energy X-ray imaging applications[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(34): 10227-10231.
- [25] 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)
- [26] 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.
- [27] Ceglio N M, Attwood D T, George E V. Zone-plate coded imaging of laser-produced plasmas[J]. *Journal of Applied Physics*, 1977, 48(4): 1566-1569.
- [28] Do A, Troussel P, Baton S D, et al. High-resolution quasi-monochromatic X-ray imaging using a Fresnel phase zone plate and a multilayer mirror[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2017, 88: 013701.
- [29] Christensen F E. X-ray multilayers in diffractometers, monochromators, and spectrometers[M]. Bellingham: SPIE press, 1988.
- [30] Marshall F J, Allen M M, Knauer J P, et al. A high-resolution X-ray microscope for laser-driven planar-foil experiments[J]. *Physics of Plasmas*, 1998, 5(4): 1118-1124.
- [31] Marshall F J, Oertel J A. A framed monochromatic X-ray microscope for ICF[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1997, 68(1): 735-739.
- [32] 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[C]//Target Diagnostics Physics and Engineering for Inertial Confinement Fusion II. 2013: 8850.
- [33] 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.

- [34] Pickworth L A, Bradley D, Pardini T, et al. A Kirkpatrick-Baez microscope for core implosion imaging at NIF[C]//APS Meeting Abstracts. 2013.
- [35] 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.
- [36] 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.
- [37] Marshall F J. Compact Kirkpatrick-Baez microscope mirrors for imaging laser-plasma X-ray emission[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2012, 83: 10E578.
- [38] 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.
- [39] Ramsey B D. Replicated nickel optics for the hard-X-ray region[J]. *Experimental Astronomy*, 2005, 20(1/3): 85-92.
- [40] Liu D, Khaykovich B, Gubarev M V, et al. Demonstration of a novel focusing small-angle neutron scattering instrument equipped with axisymmetric mirrors[J]. *Nature Communications*, 2013, 4: 2556.
- [41] Bourdon C J, Vogel J, Wu M. Wolter imaging on Z[R]. (SNL-NM), Albuquerque: Sandia National Laboratories, 2015.
- [42] Vogel J. National ICF Diagnostics Working Group meeting[R]. NDWG, 2015.
- [43] 穆宝忠, 伊圣振, 黄圣铃, 等. ICF用Kirkpatrick Baez型显微镜光学设计[J]. *强激光与粒子束*, 2008, 20(3): 409-412. (Mu Baozhong, Yi Shengzhen, Huang Shengling, et al. Optical design of Kirkpatrick-Baez microscope for ICF[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2008, 20(3): 409-412)
- [44] Bennett G R. Advanced one-dimensional X-ray microscope for the OMEGA laser facility[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1999, 70(1): 608-612.
- [45] Le Breton J P, Aloyz E, Boutin J Y, et al. Laser integration line target diagnostics first result[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2006, 77: 10F530.
- [46] Li Y, Dong 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.
- [47] Yi S, Mu B, Wang X, et al. A four-channel multilayer KB microscope for high-resolution 8-keV X-ray imaging in laser-plasma diagnostics[J]. *Chinese Optics Letters*, 2014, 12: 013401.
- [48] Li Y, Xie Q, Chen Z, et al. Direct intensity calibration of X-ray grazing-incidence microscopes with home-lab source[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2018, 89: 013704.
- [49] 穆宝忠, 吴雯靓, 伊圣振, 等. 4.75 keV能点四通道Kirkpatrick-Baez显微镜[J]. *强激光与粒子束*, 2013, 25(4): 903-907. (Mu Baozhong, Wu Wenliang, Yi Shengzhen, et al. 4.75 keV four-channel Kirkpatrick-Baez microscope[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2013, 25(4): 903-907)
- [50] Li Yaran, Mu Baozhong, Xie Qing, 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.
- [51] 伊圣振, 穆宝忠, 王新, 等. 用于平面靶 X射线诊断的1维KBA显微镜[J]. *强激光与粒子束*, 2012, 24(5): 1076-1080. (Yi Shengzhen, Mu Baozhong, Wang Xin, et al. One-dimensional KBA microscope for planar target diagnosis[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2012, 24(5): 1076-1080)