

皮秒短脉冲 X 射线背光诊断快点火靶丸压缩面密度*

毕 碧¹, 周维民¹, 单连强¹, 魏 来¹, 刘东晓¹, 张 锋¹, 田 超¹, 邓志刚¹,
袁宗强¹, 王为武¹, 卢 峰¹, 吴俊峰², 蔡洪波², 任国利², 吴凤娟³, 李 晋¹,
陈 韬¹, 杨轶濛¹, 张发强¹, 杨 雷¹, 曹磊峰¹, 谷渝秋¹

(1. 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; 2. 北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088; 3. 西南科技大学 极端条件物质特性联合实验室, 四川 绵阳 621010)

摘 要: 为了给快点火集成耦合效率的计算提供关键参数, 并为后期高密度压缩奠定高能背光的诊断基础, 在神光-II 升级装置上利用皮秒短脉冲激光驱动产生了 X 射线背光源, 测量了成像分辨率、光通量, 获得了短脉冲背光源的辐射特性, 进一步成功演示了基于这种短脉冲背光照相技术的间接驱动快点火预压缩密度诊断。实验所得图像与模拟图像结构一致, 实测压缩过程中的面密度达到 50 mg/cm²。实验还发现了压缩不对称引起的流体不稳定性特征, 为后续实验提供了改进方向。

关键词: 快点火; 预压缩; 短脉冲背光成像; 密度诊断

中图分类号: O536

文献标志码: A doi: 10.11884/HPLPB202032.200050

Density diagnosis based on ps-duration-pulse X-ray backlighting for fast ignition compression

Bi Bi¹, Zhou Weimin¹, Shan Lianqiang¹, Wei Lai¹, Liu Dongxiao¹, Zhang Feng¹, Tian Chao¹, Deng Zhigang¹,
Yuan zongqiang¹, Wang Weiwu¹, Lu Feng¹, Wu Junfeng², Cai Hongbo², Ren Guoli², Wu Fengjuan³, Li jin¹,
Chen Tao¹, Yang Yimeng¹, Zhang Faqiang¹, Yang Lei¹, Cao Leifeng¹, Gu Yuqiu¹

(1. *Science and Technology on Plasma Physics Laboratory, Research Center of Laser Fusion, CAEP, Mianyang 621900, China;*

2. Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China;

3. Joint Laboratory for Extreme Conditions Matter Properties, Southwest University of Science and Technology, Mianyang 621010, China)

Abstract: To provide significant parameters for fast ignition coupling efficiency and density diagnosis for higher compression, a ps-duration X-ray backlighter has been produced with ps-duration laser on Shenguang-II updated facility. The radiation properties such as backlighting image resolution and the photons arriving at the image plate have been successfully measured. Based on the conformed conditions, density diagnosis of an indirectly-driven fast ignition target using ps-duration backlighting has been carried out. The obtained short-pulse backlighting radiography shows that the imploded shell shape agrees well with that of simulation and the areal density exceeds 50 mg/cm². The short-pulse backlighting radiography also shows the hydrodynamic instability which might be caused by the asymmetric compression. Further investigations and attempts to improve implosion performance to a higher density are in progress.

Key words: fast ignition; pre-compression; short-pulse backlighting; density diagnostics

惯性约束聚变(ICF)使用高功率高能量外部能源驱动燃料靶丸内爆,压缩燃料到高温高密度极端状态,促使聚变快速发生发展直至燃烧,在惯性约束时间内放出聚变能,为人类提供干净新型能源。1994年,Tabak等人提出了惯性约束的快点火方案^[1],其核心思想是将压缩和点火分开:先用多束激光将燃料压缩到高密度状态;在最大压缩时刻用另一束超短超强激光产生高能粒子束,在高密度燃料边缘附近沉积能量,产生热斑点火。在增益系数基本相同的条件下,快点火所需驱动能量低于中心点火,允许点燃非球形结构的燃料,这些优势使得快点火成为探索惯

* 收稿日期:2020-01-19; 修订日期:2020-03-11

基金项目:国家自然科学基金项目(11875048, 11775202); 科学挑战专题项目(TZ2018005)

作者简介:毕 碧(1985—),女,博士,助研,从事快点火物理研究; angela-023@163.com。

通信作者:周维民(1978—),男,博士,研究员,从事高能量密度物理研究; zhouwm@caep.cn;

谷渝秋(1968—),男,研究员,从事高能量密度物理研究; yqgu@caep.cn。

性约束聚变点火的一种途径^[2-5]。

评估快点火科学可行性的一个重要参数是超短超强激光到燃料的能量耦合效率。能量耦合效率的估计依赖于燃料密度、体积和温度变化量。其中,燃料压缩密度或面密度一般通过背光 X 射线吸收率或者质子能损方法测量^[6-13]。但在目前的间接驱动快点火中,因为质子和中子的产额较低,质子能损方法并不适用。背光 X 射线吸收率方法通过 ns 级激光照射金属靶产生背光 X 射线,利用分幅相机测量 X 射线被压缩靶丸吸收后的光谱图像,通过透过率和吸收系数反推靶丸密度。这种方法不仅可以从直观清晰的压缩靶丸图像中测量压缩半径,还可以给出时间分辨达 50 ps 的压缩靶丸密度演化^[11]。但 ns 级长脉冲产生的类 He 线背光源往往能段较低,适用于数十 mg/cm² 的燃料诊断,而对约 300 mg/cm² 的高面密度燃料穿透力不足。利用 ps 级短脉冲 PW 激光可以激发高能 K α 背光源,诊断高密度的物质,而且短脉冲背光源发光时间极短,大大提高了成像的时间分辨。美国 Omega-EP 装置利用 10 ps PW 激光产生 8.048 keV 的背光源,诊断获得了直接驱动快点火预压缩燃料的密度^[14]。我国神光-II 升级装置拥有八路 ns 级的压缩激光和第九路 ps 级的 PW 激光,为间接驱动预压缩密度诊断提供了短脉冲背光实验平台。相较于纳秒级长脉冲激光驱动的 X 射线源,短脉冲皮秒 PW 激光打靶能够产生更高能的 X 射线,但同时也会伴生超热电子和 γ 光子给探测设备带来非常强的电磁干扰。此外,间接驱动的复杂黑腔环境和未经束匀滑处理的不均匀高能 X 射线焦斑也显著增加了对内爆靶丸实验诊断的难度。这些都是发展短脉冲超强激光 X 射线背光预压缩密度诊断技术所必须克服的困难。

本工作基于神光-II 升级装置开展了 ps 短脉冲 X 射线背光成像技术研究。实验成功测量了背光光谱、背光分辨率,获得间接驱动快点火预压缩靶丸的背光图像,实测图像与模拟图像一致,面密度超过 50 mg/cm²。实验还发现,壁厚不均匀和压缩不对称导致压缩燃料出现流体不稳定性的尖刺结构,这为后续提高压缩密度提供了改进方向。

1 实验排布

实验排布如图 1(a) 所示,第九路皮秒激光脉宽 10 ps,能量 300 J,功率密度高于 9×10^{16} W/cm²,斜入射在 30 μ m 厚的 Ti 平面靶上,产生 4.5 keV 的 K α 源。我们利用了 KB 显微镜配置成像板来测量背光图像,背光靶的光谱由单光子 CCD 监测。快点火间接驱动预压缩实验中,腔壳靶主体部分由 CD 球壳、导引锥、黑腔构成,具体结构见图 1(b) 所示。空心 CD 壳层的内半径为 220 μ m,壳层厚度为 50 μ m,外涂 10 μ m CH;导引金锥,张角 40°。金黑腔尺寸为长 2 400 μ m,直径 1 400 μ m,注入孔直径 850 μ m,腔壁厚 25 μ m,腰部开有 500 μ m \times 500 μ m 的对穿诊断孔,黑腔内充有 0.07 MPa 的戊烷,动态实验中,Ti 靶距离靶丸中心 3.1 mm。八束纳秒激光注入黑腔驱动内爆压缩,黑腔的辐射温度由位于黑腔上方的 XRD 探测器测量。

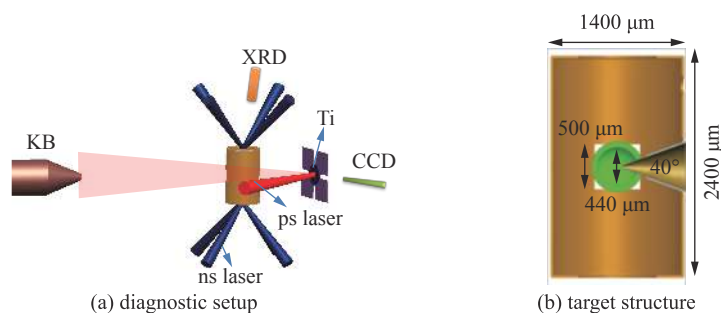


Fig. 1 Experimental setup

图 1 实验排布

KB 显微镜由两块光轴正交放置的球面镜构成,通过光线的反射避免 γ 的干扰,通过对反射膜的选择控制背光的单色性^[15]。实验中 KB 显微镜距离靶心 19 cm,放大 10 倍,在 4.5~4.75 keV 能段反射率 \sim 60%,KB 显微镜立体角为 1×10^{-6} 。为滤除低能 X 射线和屏蔽干扰粒子,在 KB 显微镜前放置 20 μ m Be 滤片,在成像板前放置了 20 μ m Ti 滤片,组合滤片在 4.5~4.75 keV 能段的透过率为 40%。在激光能量 280 J、脉宽 10 ps 的情况下,与靶面法线夹角 45°的单光子 CCD 测得光子产额为 1.73×10^{13} 个/sr,转换效率为 5×10^{-4} 。综上,成像板上的光通量为 2.49×10^6 个,成像板上单位像素元的光通量为 4.31×10^4 个。

2 短脉冲 X 射线静态背光成像

首先在不放置黑腔的情况下,用 KB 显微镜测试第九路激光照射背光靶产生的 X 光源的亮度分布。KB 测量

的焦斑图像如图 2 所示。10% 峰值亮度的边缘线由图中白色曲线勾勒, 该区域大小为 $225\ \mu\text{m} \times 188\ \mu\text{m}$; 50% 峰值亮度的边缘线由图中黑色曲线勾勒, 焦斑的半高全宽为 $45\ \mu\text{m} \times 48\ \mu\text{m}$ 。

在放置黑腔靶但不注入纳秒激光的情况下, 我们以锥顶模拟刀边测量成像分辨率。靶丸壳层的初始密度仅 $1\ \text{g}/\text{cm}^3$, 导引锥的锥顶宽度为 $32\ \mu\text{m}$, 张角为 40° 。在没有压缩激光注入黑腔时, $4.5\ \text{keV}$ 的 X 射线完全透射壳层, 但会被高密度的导引锥吸收, 因此背光图像中仅有导引锥的阴影。在激光条件和诊断参数设置相同的条件下, KB 镜测量得到的静态背光图像如图 3(a) 所示, 右侧阴影部分为导引锥, 与虚线所勾勒的导引锥设计尺寸相符。图 3(a) 和图 2 的光斑分布相似, 因此我们以图 2 的焦斑为参考, 去除图 3(a) 中的焦斑不均匀性影响。以最高亮斑为特征点, 将图 2 和图 3(a) 配准, 然后在图 3(a) 中扣除背光影响, 改善后的图像见图 3(b)。

受上述简单算法的影响, 处理后的图像有光斑的部分伪影, 但强度已经明显降低, 可用于后续分析。取图像中一行数据, 见图 3(b) 中黑色虚线, 绘制出归一化的强度分布 I_x , 见图 3(c) 中蓝点所示。对该数据进行拟合, 拟合公式为 $f(I_x) = -0.402[\tanh(0.286I_x) - 1] + 0.11$, 拟合误差 RMS 为 0.056, 拟合结果见图 3(c) 中绿色实线所示。对拟合曲线求导得到类高斯分布曲线, 放大 8 倍后见图 3(c) 红色虚线。该分布的半高全宽就是成像分辨率, 为 $12.5\ \mu\text{m}$ 。KB 显微镜的分辨率为 $10\ \mu\text{m}$, 因此背光源不均匀和图像处理过程对分辨率的影响约为 $(12.5^2 - 10^2)^{1/2} = 7.5\ \mu\text{m}$ 。

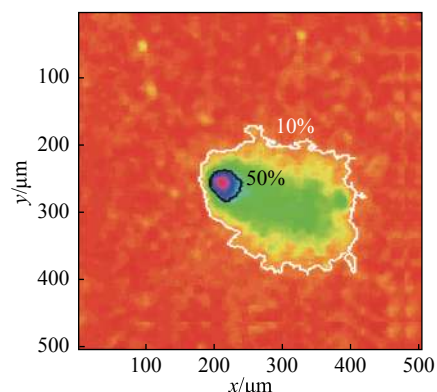


Fig. 2 Measured laser spot of ps laser at SG-II-updated facility, 10%(white line) and 50%(black line) level contour of peak intensity

图 2 神光-II 升级皮秒激光实测焦斑, 10%(白线) 50%(黑线) 峰值强度等高线

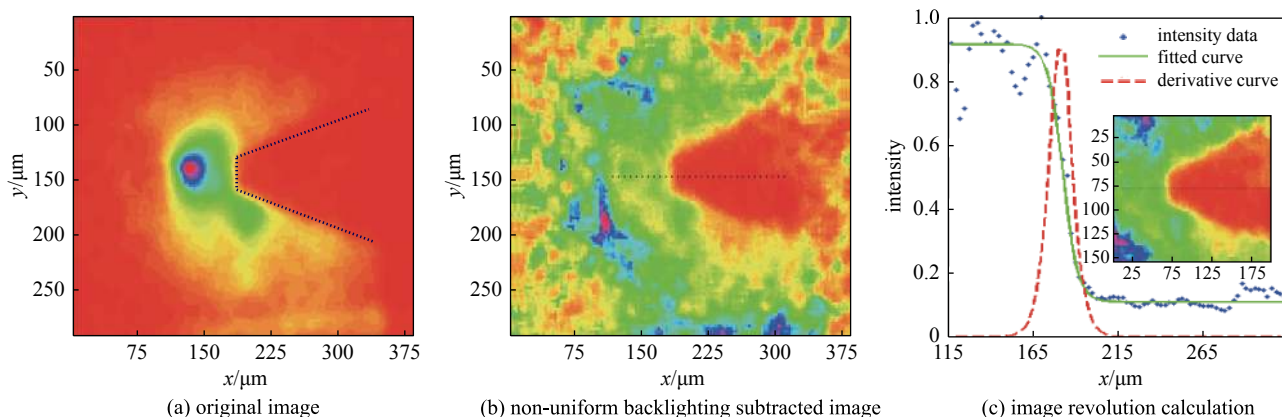


Fig. 3 Static backlight image, improved image and calculation result

图 3 静态背光图像和成像分辨率

3 预压缩密度诊断

快点火间接驱动预压缩实验中, 8 束方波脉冲的压缩能量共计 $12.2\ \text{kJ}$, 平均脉宽 $2\ 448\ \text{ps}$, 实测波形见图 4(a) 黑色实线, 由 XRD 测得的辐射温度见图 4(a) 红色实线。图 4(b) 是该时刻背光图像经过背光不均匀性去除和图像增强处理后的结果, 图像左侧暗区域为压缩靶丸壳层, 右侧暗区为导引锥。图 4(c) 是模拟得到的最大压缩时刻密度图, 图 4(d) 是根据公式 $\rho R_{x,y} = \ln(I_0/I)/2\mu$ 计算得出的面密度图, 其中 $\rho R(x,y)$ 是燃料点 (x,y) 处的面密度, I_0 是背光强度, I 是衰减后的强度, μ 是冷物质的质量吸收系数, 由于冷物质质量吸收系数比热物质的质量吸收系数高, 所以该公式计算得到的面密度会比实际面密度低。对比图 4(c) 和图 4(d) 可以发现, 实验测量得到的压缩壳层结构和模拟结果非常接近, 在导引锥的影响下, 压缩壳层呈现月牙状, 高密度区域并不集中在球心, 而是在远离锥顶的球环上。于该测量时刻壳层还没有完全聚心, 在距离锥顶 $\sim 100\ \mu\text{m}$ 处面密度大约 $51\ \text{mg}/\text{cm}^2$ 。此时, 壳层顶端(最左侧)已经出现了流体不稳定性引起的尖刺结构, 锥体前端结构也已经开始变形。该结果说明目前的靶设计, 可能会导致压缩后期靶丸破裂, 应该从靶丸壁厚均匀性和辐照均匀性上做进一步改进^[4,8], 以提高压缩对称性, 进一步提高压缩密度。

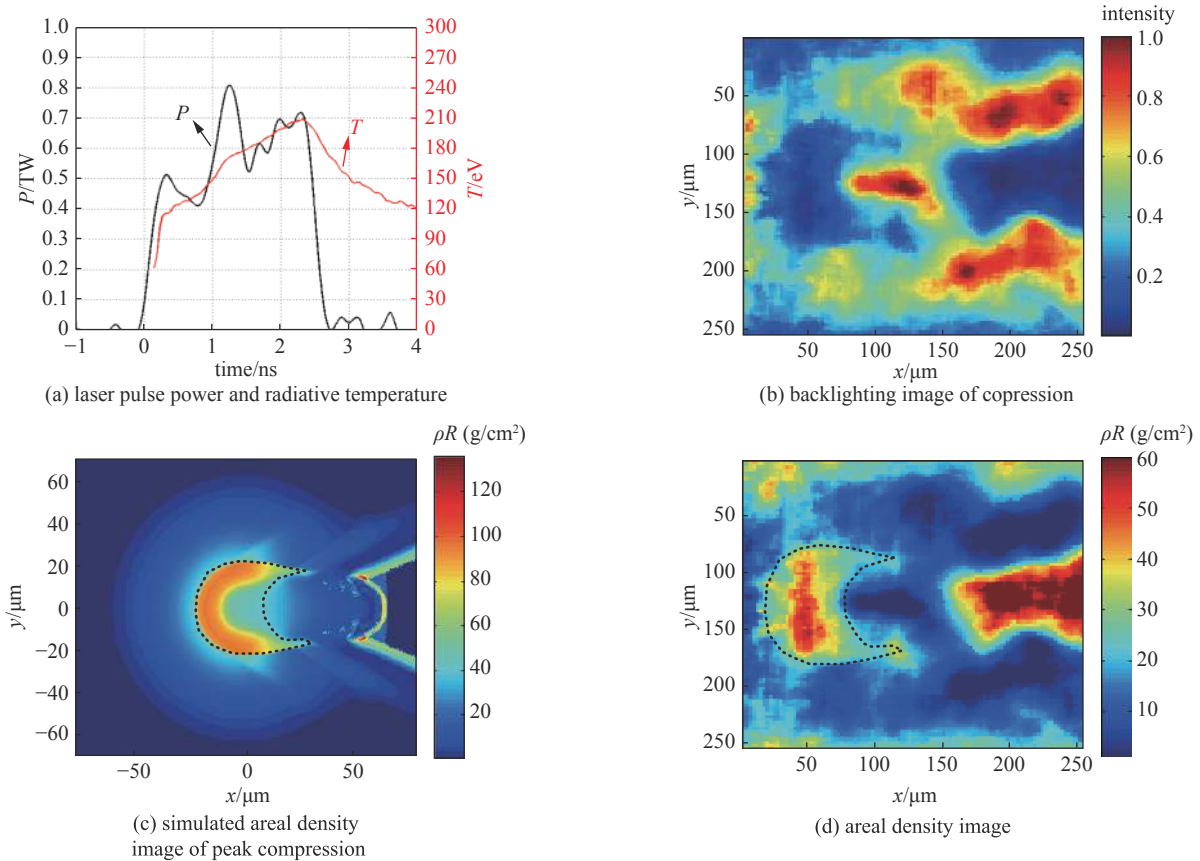


Fig. 4 Implosion compression results

图4 内爆压缩结果

比较图4(b)和图3(b), 可以看到金锥区域出现一定程度的变形, 这来主要自两方面因素, 一方面是黑腔中的硬X射线穿透靶壳直接辐射烧蚀锥体表面引起的膨胀变形, 另一方面是由于聚芯等离子体的非对称撞击。我们知道在燃料的最大压缩时刻, 超短超强相对论皮秒激光要从空心锥内沿着锥轴注入锥顶, 产生强流电子束进而加热燃料。因此, 在最大压缩时刻需要保持激光通道的通畅。从目前的照相结果看, 锥的变形并未影响到我们关心的锥轴线附近区域。在更高驱动能量下, 锥体可能会受到严重的变形, 锥体张角、锥芯距离等参数都是后续实验需要优化的因素。基于KB显微镜的背光成像技术在中心点火中也有广泛应用, 使用匀滑纳秒强激光驱动的X射线源可以实现强度分布更均匀的背光照相, 当然使用相对论皮秒激光可以产生能量更高的X射线源。

4 结论

基于神光-II升级装置, 测量了短脉冲皮秒激光驱动的X射线源的辐射特性, 获得了背光强度、背光分布等实验数据, 并成功利用KB显微镜演示了间接驱动快点火锥壳靶预压缩密度诊断, 获得了预压缩锥壳靶的密度分布。实测图像与模拟图像结构一致, 预估面密度超过50 mg/cm²。实验同时发现了压缩过程中由于壁厚不均匀和压缩不对称导致的流体不稳定性的尖刺结构。下一步工作将通过改善靶丸壁厚不均匀性、改进腔靶结构、改变脉冲形状来进一步提高压缩密度和面密度。

参考文献:

- [1] Tabak M, Hammer J, Glinsky M E, et al. Ignition and high gain with ultrapowerful lasers[J]. *Phys Plasmas*, 1994, 1(5): 1626-1634.
- [2] Kodama R, Norreys P A, Mima K, et al. Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition[J]. *Nature*, 2001, 412(6849): 798-802.
- [3] 谷渝秋, 张锋, 单连强, 等. 神光II升级装置锥壳靶间接驱动快点火集成实验[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 110101. (Gu Yuqiu, Zhang Feng, Shan Lianqiang, et al. Initial indirect cone-in-shell fast ignition integrated experiment on Shenguang II-updated facility[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 110101)
- [4] Jarrott L C, Wei M S, McGuffey C, et al. Visualizing fast electron energy transport into laser-compressed high density fast ignition targets[J]. *Nature Physics*, 2016, 12: 499-504.
- [5] Theobald W, Solodov A A, Stoeckl C, et al. Initial cone-in-shell fast ignition experiments on OMEGA[J]. *Phys Plasmas*, 2011, 18: 056305.

- [6] Stephens R B, Hatchett S P, Turner R E, et al. Implosion of indirectly driven reentrant-cone shell target[J]. *Phys Rev Lett*, 2003, 91(18): 185001.
- [7] Tanaka K A, Kodama R, Mima K, et al. Basic and integrated studies for fast ignition[J]. *Phys Plasmas*, 2003, 10(5): 1925-1930.
- [8] Stephens R B, Hatchett S P, Tabak M, et al. Implosion hydrodynamics of fast ignition targets[J]. *Phys Plasmas*, 2005, 12(5): 056312.
- [9] Betti R, Zhou C. High-density and high- ρR fuel assembly for fast-ignition inertial confinement fusion[J]. *Phys Plasmas*, 2005, 12(11): 110702.
- [10] Zhou C D, Theobald W, Betti R, et al. High- ρR implosions for fast-ignition fuel assembly[J]. *Phys Rev Lett*, 2007, 98(2): 025004.
- [11] 周维民, 单连强, 吴俊峰, 等. 间接驱动快点火锥壳靶锥体材料燃料混合问题研究[J]. *强激光与粒子束*, 2015, 27: 032017. (Zhou Weimin, Shan Lianqiang, Wu Junfeng, et al. Material mixing of cone-in-shell targets for indirect-drive fast ignition[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27: 032017)
- [12] He X T, Cai H B, Wu S Z, et al. Physical studies of fast ignition in China[J]. *Plasma Physics and Controlled Fusion*, 2015, 57: 064003.
- [13] 毕碧, 单连强, 周维民, 等. 快点火锥壳靶内爆自发光图像数据处理[J]. *强激光与粒子束*, 2014, 26: 092002. (Bi Bi, Shan Lianqiang, Zhou Weimin, et al. Implosion emission image processing for cone-shell target of fast ignition[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2014, 26: 092002)
- [14] Theobald W, Solodov A A, Stoeckl C, et al. Time-resolved compression of a capsule with a cone to high density for fast-ignition laser fusion[J]. *Nature Communications*, 2014, 5: 5785.
- [15] 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: 103501.