

文章编号: 1005-5630(2020)05-0050-07

DOI: 10.3969/j.issn.1005-5630.2020.05.008

基于非球面反射镜的高分辨 KB 显微成像系统设计

雷婧艺, 徐捷, 陈亮, 徐欣业, 李文杰, 穆宝忠

(同济大学物理科学与工程学院, 上海 200092)

摘要: 为了突破球面反射镜面形对传统 Kirkpatrick-Baez (KB) 显微镜空间分辨率的限制, 建立了一种非球面 KB 显微成像系统的光学设计方法。利用椭圆柱面反射镜代替球面镜, 通过几何关系计算出反射镜参数的数学表达式, 结合主要光学结构参数对空间分辨率影响的定量分析, 提出了一组适用我国现阶段强激光装置的非球面 KB 显微镜的结构参数, 并在实验室内开展背光成像实验。实验结果表明, 在中心视场, 其空间分辨率优于 $2\ \mu\text{m}$, 在 $200\ \mu\text{m}$ 的视场范围内, 空间分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$, 集光立体角可达 $1.3 \times 10^{-6}\ \text{sr}$ 。非球面 KB 显微镜有效提高了 KB 显微镜中心视场分辨率, 符合内爆靶减速阶段的高分辨诊断需求。

关键词: 激光惯性约束核聚变; X 射线显微成像; KB 显微镜; 非球面反射镜; 空间分辨率
中图分类号: O 434.1 **文献标志码:** A

Design of high resolution KB microscopy system based on aspherical mirror

LEI Jingyi, XU Jie, CHEN Liang, XU Xinye, LI Wenjie, MU Baozhong
(School of Physics Science and Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China)

Abstract: In order to break the limitation of the spherical mirror's surface shape on the spatial resolution of the traditional Kirkpatrick-Baez (KB) microscope, an optical design method for the aspherical KB microscopy imaging system was established. Elliptical cylindrical mirrors were used instead of spherical mirrors, and the mathematical expressions of the mirror parameters were calculated through geometric relationships. Combining the quantitative analysis of the influence of main optical structure parameters on spatial resolution, a set of optical structure parameters of aspherical KB microscopes suitable for current high-power laser devices in China were proposed, and the imaging experiment was carried out in the lab. The experiment shows that in the central field of view, the spatial resolution is better than $2\ \mu\text{m}$, and in the field of view of $200\ \mu\text{m}$, the spatial resolution is better than $5\ \mu\text{m}$, and the geometrical solid angle can reach $1.3 \times 10^{-6}\ \text{sr}$.

收稿日期: 2019-12-10

基金项目: 国家重点研发计划项目(YFA0403304)

作者简介: 雷婧艺(1993—), 女, 硕士研究生, 研究方向为 X 射线显微成像技术。

E-mail: 1633371@tongji.edu.cn

通信作者: 穆宝忠(1975—), 男, 教授, 研究方向为 X 射线光学。E-mail: mubz@tongji.edu.cn

Aspherical KB microscope effectively improves the resolution of the central field of view of the KB microscope, which meets the needs of high-resolution diagnosis during the deceleration stage of implosion targets.

Keywords: inertial confinement fusion; X-ray microscopy; KB microscope; aspherical mirror; spatial resolution

引 言

在激光惯性约束聚变实验中, 随着激光装置的驱动能量大幅提升, 内爆减速阶段靶丸内界面的流体力学稳定性急剧增长, 热斑形状快速演化, 内爆减速阶段的持续时间仅数百皮秒, 靶丸尺寸约 $100\ \mu\text{m}$, 高分辨的 X 射线 Kirkpatrick-Baez (KB) 显微成像系统主要用于内爆减速阶段的靶丸内界面形貌和热斑中高阶不对称性诊断^[1-3]。在我国神光系列强激光装置中, 急需开展高分辨 X 射线 KB 显微镜的研究, 实现 $200\ \mu\text{m}$ 视场范围内空间分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$, 中心视场空间分辨率突破 $2\ \mu\text{m}$ 。

传统的球面 KB 显微成像系统具有优良的空间分辨率、较高的集光效率以及大物距等优点, 在 ICF 实验装置中得到了广泛的应用^[4-6]。21 世纪初, 在美国的 OMEGA 装置上, KB 显微镜被用于诊断实验, 可实现 $200\ \mu\text{m}$ 视场范围内 $5\ \mu\text{m}$ 的空间分辨率^[7]。2016 年, 在美国的 NIF 装置上首次利用 KB 显微镜获得了内爆靶的成像结果, 在 $300\ \mu\text{m}$ 的视场范围内其空间分辨率优于 $8\ \mu\text{m}$ ^[8]。我国的神光系列主机装置上同样利用 KB 显微成像系统对内爆热斑成像进行研究, 2017 年, 我国为神光 III 主机装置研制了八通道 KB 显微镜系统, 该系统网格静态成像标定实验中有有效视场 $300\ \mu\text{m}$, 全场成像分辨率可达 $6\ \mu\text{m}$, 中心视场空间分辨率为 $2\sim 3\ \mu\text{m}$ ^[9]。传统的 KB 显微镜受球面镜面形影响, 其轴上点球差无法消除, 成为影响中心视场分辨率的重要因素。为扩大传统 KB 显微镜的视场范围并且提其高空间分辨率, 在 20 世纪 90 年代, 日本的 Kodama 等提出的基于非球面镜的 AKB 构型, 采用四块非球面反射镜, 在子午和弧矢两个方向上均采用双曲面和椭圆柱面组合的双镜结构, 有效矫正了传

统球面 KB 显微镜的球差和场曲等缺陷, 该系统被应用于 GEKKO-XII 激光装置上, 并针对 ICF 内爆实验的靶形态成像, 在 $800\ \mu\text{m}$ 的视场范围内空间分辨率可达 $3\ \mu\text{m}$, 但由于在 AKB 构型中, X 射线经过四次反射后反射效率大幅降低, 严重影响 X 射线探测器信号接收质量。除此之外, AKB 构型中四块非球面反射镜的加工以及装调难度极大, 这些缺点使得 AKB 显微成像系统并未在后续的大型激光装置中得到广泛应用。

综上, 结合传统 KB 显微镜与 AKB 显微镜的优点, 本文提出了一种基于非球面反射镜的 KB 显微成像系统, 利用椭圆柱面镜代替传统 KB 显微镜中圆柱面镜消除轴上点球差, 提高中心视场空间分辨率, 同时能够保证该系统的 X 射线反射率以及装调的便捷性。并给出了非球面 KB 显微镜的垂轴像差公式, 分析了各光学结构参数对空间分辨率的影响, 提出了一组适用于我国强激光装置的非球面 KB 显微镜光学结构参数, 并开展成像实验。

1 非球面 KB 显微镜光学设计

1.1 非球面 KB 显微镜光学结构

传统 KB 显微系统是在 1948 年由 Kirkpatrick 和 Baez 两位科学家提出的, 它采用如图 1 所示的两块球面(或圆柱面)反射镜正交放置的结构, 该结构可实现对 X 射线的二维聚焦成像, 通过连续反射, 消除了单块球面反射镜成像存在的严重像散^[10]。

基于传统 KB 显微镜的构型, 非球面 KB 显微镜是指利用二次曲面代替球面对 X 射线进行聚焦成像, 例如椭圆柱面、双曲柱面、抛物面等。利用椭圆柱面反射镜代替圆柱面反射镜对 X 射线成像, 可形成一个完善的像斑。如图 2 所

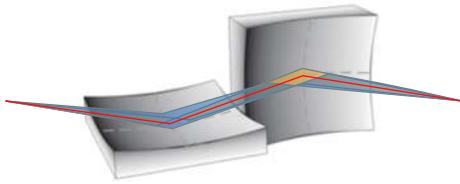


图 1 KB 显微系统光路结构

Fig. 1 Schematic of KB microscopy system optical assembly

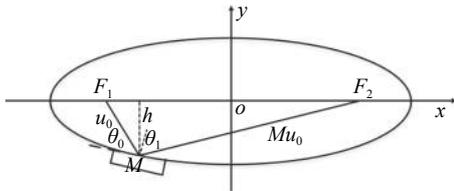


图 2 非球面 KB 显微镜光路图

Fig. 2 Optical path of aspherical KB microscope

示，物像点分别位于椭圆的左右两个焦点 F_1 和 F_2 ，中心光线经过镜面中点 M ，根据费马原理，忽略衍射的影响，在中心视场可以形成消球差的理想成像，因此在 F_1 周围的一部分视场区域可获得超高分辨率。

与球面不同的是，在同一椭圆面上，不同的位置会划分出不同的镜面形状，因此定义镜面中心到 x 轴的距离为 h ，则在椭圆方程和 h 确定的情况下，可以确定反射镜唯一的曲面。

椭圆的方程为 $\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1$ ，其中 a 为半长轴， b 为半短轴。在 $\triangle F_1MF_2$ 中 $|F_1M| = u_0$ ， $|F_2M| = Mu_0$ ， $|F_1F_2| = 2c$ ，其中 u_0 是物距， Mu_0 是像距， c 是椭圆焦距。根据椭圆几何性质， $|F_1M| + |F_2M| = 2a$ ，则根据物像关系计算出椭圆的半长轴为

$$a = \frac{u_0}{2}(1 + M) \quad (1)$$

根据余弦定理

$$\cos \theta_1 = \frac{|F_1M|^2 + |F_2M|^2 - |F_1F_2|^2}{2|F_1M||F_2M|} \quad (2)$$

其中 $\theta_1 = 180^\circ - 2\theta_0$ ， θ_0 为掠入射角，代入式(2)化简得

$$c = \frac{u_0}{2} \sqrt{M^2 + 2M \cos 2\theta_0 + 1} \quad (3)$$

在椭圆中 $a^2 + b^2 = c^2$ ，代入式(1)和式(3)得椭圆半短轴

$$b = \frac{u_0}{2} \sqrt{2(1 - \cos 2\theta_0)M} \quad (4)$$

根据三角形面积公式 $\frac{1}{2}|F_1F_2|h = \frac{1}{2}|F_1M||F_2M|$ ，计算出

$$h = \frac{Mu_0 \sin 2\theta_0}{\sqrt{M^2 + 2M \cos 2\theta_0 + 1}} \quad (5)$$

以上计算过程中可分析出，在物距、放大倍数、掠入射角以及有效镜长确定的情况下可以确定唯一的反射镜面形参数。在光学设计过程中，需考虑上述参数对空间分辨率的影响，进一步确定非球面 KB 显微镜的光学结构。

1.2 非球面 KB 显微镜光学结构参数设计

针对我国强激光装置实验需求，通过光线追迹的方式模拟了物距、掠入射角、有效镜长和放大倍率四个光学结构参数的变化对空间分辨率的影响，得到的结果如图 3 所示。其中三个光学结构参数与系统的集光立体角有关。集光立体角公式为

$$S = d^2 \left(\frac{\sin \theta_0}{u_0} \right)^2 \quad (6)$$

如图 3(a) 所示，当物距在 150~300 mm 范围内变化时，增大物距有利于提高空间分辨率，同时可以减小打靶溅射物对成像系统的损伤，但是增大物距会使集光立体角大幅减小。如图 3(b) 所示，当掠入射角在 $0.6^\circ \sim 1.5^\circ$ 范围内变化时，掠入射角越大空间分辨率越高，同时集光立体角也越大，但是掠入射角增大使得后续反射镜薄膜设计难度增大，导致系统 X 射线反射率降低。如图 3(c) 所示，当反射镜有效镜长在 5~15 mm 范围内变化时，镜长越小，空间分辨率越高，但是镜长越小，集光立体角越小。如图 3(d) 所示，放大倍数对成像质量影响不大。可见空间分辨率与集光立体角在一定程度上是相互制约的关系。

综合考虑上述因素，优化得到一组与我国强激光装置相配套的非球面 KB 显微镜光学结构参数，如表 1 所示，系统的几何集光立体角为 1.3×10^{-6} sr。

2 垂轴像差分析

为研究非球面 KB 显微成像系统的空间分辨

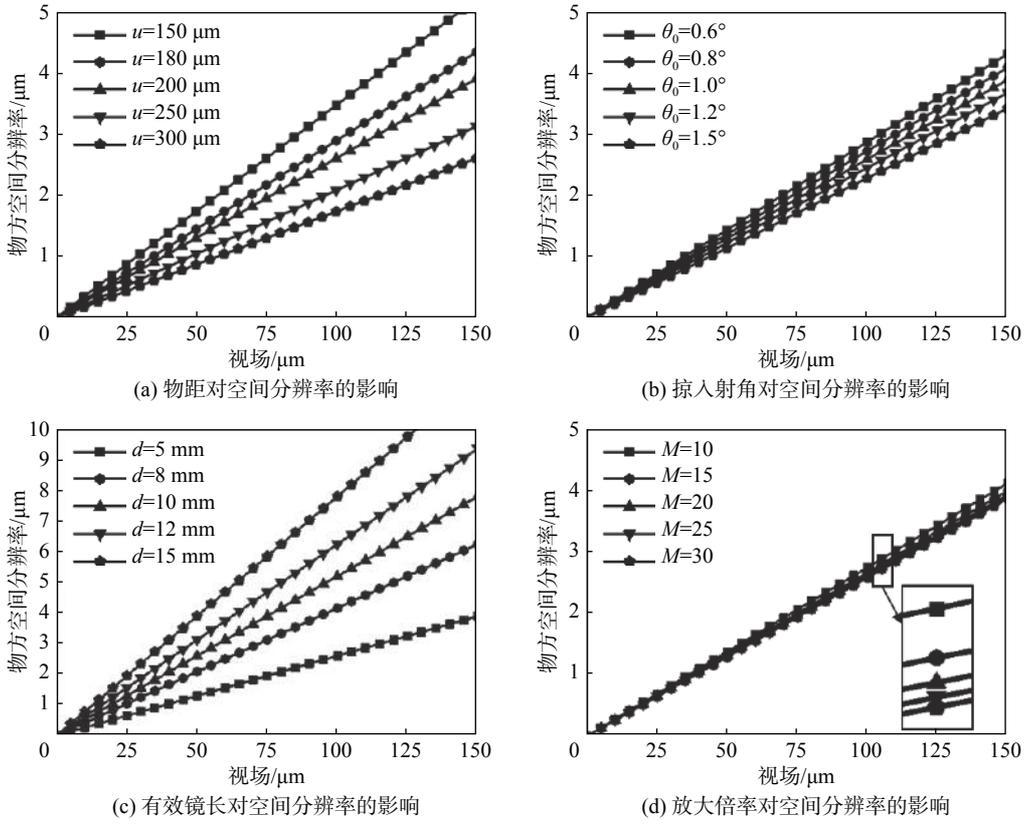


图 3 光学结构参数对非球面 KB 显微镜空间分辨率的影响

Fig. 3 Influence of optical parameters on spatial resolution of aspherical KB microscope

表 1 非球面 X 射线 KB 显微镜的光学结构参数

Tab. 1 Optical parameters of aspherical X-ray KB microscope

方向	u_0/mm	M	$\theta_0/()$	d/mm	a/mm	b/mm	h/mm
子午方向	177.86	8	1.28	10	800	11.29	7.09
弧矢方向	202.86	6.89	1.21	10	800	11.29	7.51

率, 理论上, 我们需计算该系统的垂轴像差。与传统 KB 显微镜相同, 非球面 KB 显微镜在计算垂轴像差时, 可近似计算单个较大光焦度反射镜方向^[11]。

如图 4 所示, 椭圆左焦点 F_1 发出的中心光线经过镜面中心最终成像在像面 I_0 , 轴外任意一点 Q 的视场角为 σ , 物距 $u' = u_0 / \cos \sigma$, 经过 Q 点的主光线和边缘光线相交于像平面 I' 的 P 点上 $|PM| = v'$ 。 P 点对应的轴向像差

$$\Delta v = v' - v \quad (7)$$

式中: v' 为 Q 点的理想像距; v 为沿主光线到像面 I_0 的距离, 其表达式为

$$v = \frac{Mu_0}{\cos \sigma} \quad (8)$$

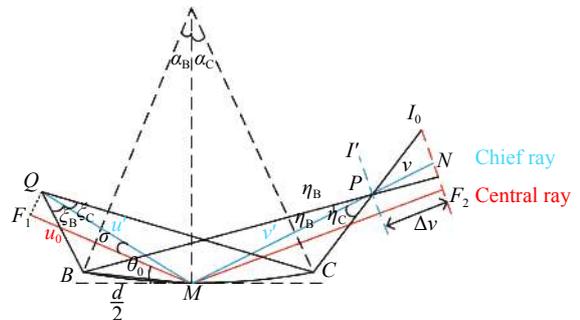


图 4 非球面镜的掠入射式聚焦

Fig. 4 Grazing incidence focusing of the aspheric mirror

垂轴像差 Y 为 Δv 在像平面上的投影, 即

$$Y = (v' - v)(\eta_B + \eta_C) \quad (9)$$

式中 η_B 和 η_C 为像方集光角。为了方便计算, 将镜面分成 BM 和 CM 两部分进行讨论。

在 ΔQBM 和 ΔPBM 中, 根据正弦定理, 满足

$$\begin{cases} u' \xi_B = \frac{d}{2}(\theta_0 + \sigma + \xi_B) \\ v' \eta_B = \frac{d}{2}(\theta_0 + \sigma - \eta_B) \end{cases} \quad (10)$$

式中: d 反射镜有效镜长; ξ_B 和 ξ_C 为半孔径角。再根据反射定律, 孔径角 ξ_B 和集光角 η_B 满足关系

$$\xi_B + \eta_B = 2\alpha_B \quad (11)$$

式中 α_B 为曲面 BM 的法向矢量夹角, 联立式 (10)、(11) 得

$$\begin{cases} v' = d(u'\theta_0 + u'\sigma - 2u'\alpha_B + d\alpha_B) / \\ (4u'\alpha_B - 2d\alpha_B - d\theta_0 - d\sigma) \\ \eta_B = (4u'\alpha_B - 2d\alpha_B - d\theta_0 - d\sigma) / (2u' - d) \\ \alpha_B = d(M+1)(\theta_0 + \sigma) / (4Mu_0 + d(1-M)) \end{cases} \quad (12)$$

B 点对应的垂轴像差 $Y_1 = \Delta v \eta_B$, 将式 (7)、(8)、(12) 代入得

$$Y_1 = \frac{u_0 d}{2u_0 - d \cos \sigma} \left[-\frac{4Mu_0 \alpha_B}{d \cos \sigma} + (2M-2)\alpha_B + (M+1)(\theta_0 + \sigma) + \frac{d\alpha_B}{u'} \right] \quad (13)$$

因为 $u_0 \gg d$, $M \gg 1$, $\cos \sigma \approx 1$, 式 (13) $\frac{d\alpha_B}{u'}$ 可以省略, 化简得

$$Y_1 = \frac{d}{2} \left[-\frac{4Mu_0 \alpha_B}{d} + (2M-2)\alpha_B + (M+1)(\theta_0 + \sigma) \right] \quad (14)$$

同理, 可以计算出曲面 CM 对应的垂轴像差

$$Y_2 = \frac{d}{2} \left[-\frac{4Mu_0 \alpha_C}{d} - (2M-2)\alpha_C + (M+1)(\theta_0 + \sigma) \right] \quad (15)$$

将式 (14) 与式 (15) 相加得非球面 KB 显微镜的垂轴像差 Y 为

$$Y = d \left[-\frac{2Mu_0}{d}(\alpha_B + \alpha_C) + (M-1)(\alpha_B - \alpha_C) + (M+1)(\theta_0 + \sigma) \right] \quad (16)$$

非球面 KB 显微镜的物方空间分辨率为

$$\delta_{\text{geo}} = \frac{Y}{M} = \frac{d}{M} \left[-\frac{2Mu_0}{d}(\alpha_B + \alpha_C) + (M-1)(\alpha_B - \alpha_C) + (M+1)(\theta_0 + \sigma) \right] \quad (17)$$

在上式中, 光学结构确定的情况下, α_B 和 α_C 均为常数, 将 1.2 中光学结构参数代入式 (17), 计算结果如图 5 所示, 理论上该非球面 KB 显微成像系统轴上点的像差为零, 达到消球差的效果, 在 $\pm 25 \mu\text{m}$ 中心视场小范围内可以得到优于 $1 \mu\text{m}$ 的空间分辨率, 随着视场的增大, 轴外点像差成线性增大, $200 \mu\text{m}$ 视场范围内空间分辨率优于 $5 \mu\text{m}$ 。将理论计算与光线追迹结果对比, 两种方法得到的空间分辨率曲线一致性良好, 可以验证非球面 KB 显微系统的垂轴像差分析的正确性。

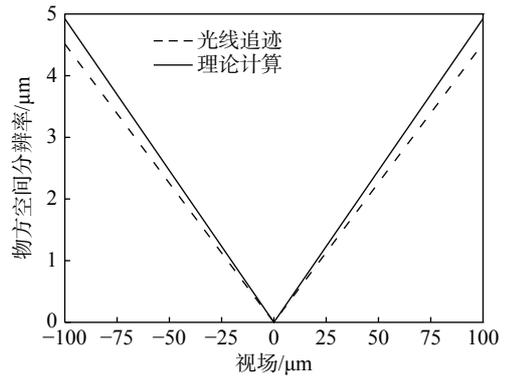


图 5 非球面 KB 显微镜的空间分辨率理论计算与光线追迹模拟结果

Fig. 5 Theoretical calculation of vertical axis aberration of aspherical KB microscope and simulation result of ray tracing

3 非球面 KB 显微镜成像实验

在实验室内开展了非球面 KB 显微镜的网格背光成像实验, 采用 Fe 靶 X 射线管(能量 6.4 keV)作为背光源。为了在 6.4 keV 能点下 X 射线经过反射镜有较高的反射率, 我们采用磁控溅射法在反射镜表面镀制 W/Si 周期多层膜, 周期厚度为 4.8 nm, 反射率曲线如图 6 所示, 中心角度带宽约为 0.08° , 系统反射率可达 31%。

实验中我们对 2000 目金网格进行背光成像, 网格中心距 $12.5 \mu\text{m}$, 肋宽 $6 \mu\text{m}$ 。我们通过

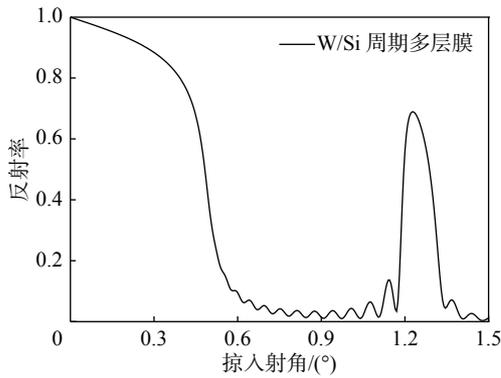


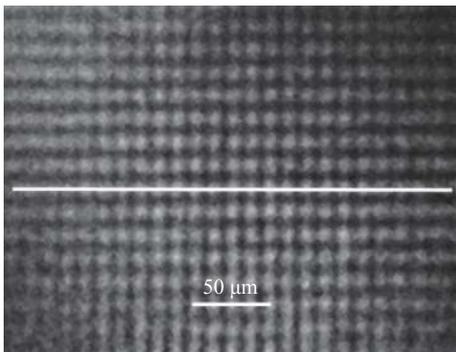
图 6 6.4 keV 能点 W/Si 周期多层膜的反射率曲线

Fig. 6 Reflectivity of W/Si multilayer at 6.4 keV

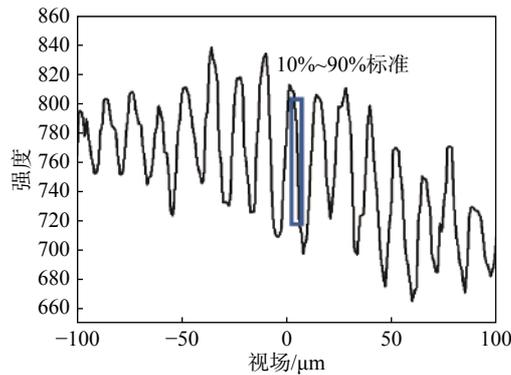
一个 X-Y-Z 三维电控位移台控制网格的移动和定位, 重复定位精度优于 1 μm。同时将 KB 显微镜

装配体安装在一个紧凑型的六维电控调节台上, 实现对空间全自由度的精密调控, 位移精度为 5 μm, 角度控制精度在 0.001°, 后端用于图像采集的是一台高分辨率的 X 射线闪烁体 CCD 相机 (Photonic Science XDI-50, 像素尺寸约为 6.45 μm)。

通过反复试验寻找最佳物点, 图 7(a)所示为 2000 目金网格在 30 kV 工作电压和 18 mA 工作电流下, 曝光 45 min 得到的图像。图中可见网格中心附近成像较为清晰, 随视场偏离而逐渐模糊。显示照明区域大小被镀制的多层膜角度带宽限制, 该系统仅针对 200 μm 左右的视场范围内清晰成像, 超出该视场范围内的像面接收到的 X 射线能量迅速下降。



(a) 非球面 KB 显微镜 2000 目金网格曝光图像



(b) 图 7(a) 水平方向光强分布

图 7 非球面 KB 显微镜成像实验结果

Fig. 7 Result of aspherical KB microscope imaging test

在图像处理软件 ImagePro 中, 读取图 7(a) 一条沿水平方向光强分布曲线如图 7(b)所示, 横坐标表示物方视场大小。由于网格周期为 12.5 μm, 所以 200 μm 视场范围内可以得到 16 个亮暗变化的周期, 选取一个周期的一侧强度变化函数按照 “10%~90%” 标准计算空间分辨率, 即统计出光强分布从 10% 变化到 90% 所对应的物方距离就是物方空间分辨率标准。计算结果如图 8 所示, ±25 μm 中心视场范围内的空间分辨率优于 2 μm, ±100 μm 视场范围内空间分辨率优于 5 μm, 实测空间分辨率走势与光线追迹模拟结果一致。基于目前系统的放大倍率, 成像分辨率受 CCD 像素大小的限制, 基于目前的方法无法评价优于 1 μm 的物方分辨率。后续实验

中可以采用更小像素的高精度 CCD 探测器, 或者改进空间分辨率的评价方式, 来进一步提升分辨率评价的准确度。

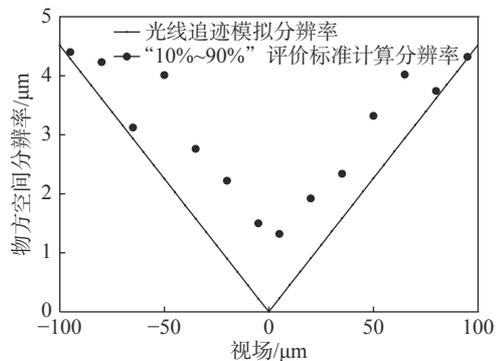


图 8 非球面 KB 显微镜空间分辨率

Fig. 8 Spatial resolution of aspherical KB microscope

4 结 论

非球面 KB 显微镜与传统球面 KB 显微镜相比可以消除球差,理论上,轴上点可以完善成像,在中心视场得到接近衍射极限的空间分辨率。本文从光学结构设计和成像实验两方面对非球面 KB 显微镜成像性能进行了研究,在 $50\ \mu\text{m}$ 左右中心视场范围内,其空间分辨率优于 $2\ \mu\text{m}$,实现了超高分辨,在 $200\ \mu\text{m}$ 的视场范围内,空间分辨率优于 $5\ \mu\text{m}$,集光立体角为 $1.3 \times 10^{-6}\ \text{sr}$,符合我国强激光装置的需求。随着我国惯性约束聚变研究的不断深入,非球面 KB 显微镜有望在实际装置应用中表现出其特有的优势。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] KOCH J A, LANDEN O L, BARBEE T W, et al. High-energy X-ray microscopy techniques for laser-fusion plasma research at the national ignition facility[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(10): 1784 – 1795.
- [3] LINDL J, LANDEN O, EDWARDS J, et al. Review of the national ignition campaign 2009-2012[J]. *Physics of Plasmas*, 2014, 21(2): 020501.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] GOTCHEV O V, HAYES L J, JAANIMAGI P A, et al. Large-grazing-angle, multi-image Kirkpatrick-Baez microscope as the front end to a high-resolution streak camera for OMEGA[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2003, 74(12): 5065 – 5069.
- [8] 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.
- [9] XIE Q, MU B Z, LI Y R, 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.
- [10] 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.
- [11] 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.

(编辑:张 磊)