

文章编号: 0253-2239(2006)08-1231-5

KBA 显微镜成像系统的成像模拟及 X 光成像实验的研究*

董建军¹ 刘忠礼¹ 缪文勇¹ 于燕宁¹ 曹磊峰¹ 郑志坚¹ 胡家升² 高清峰³ 刘伯祥³

1 中国工程物理研究院激光聚变研究中心, 绵阳 621900
2 大连理工大学, 大连 116023
3 长春光学机械研究所, 长春 130033

摘要: KBA 显微镜是一种非轴对称、非共轴的掠入射成像系统。其结构复杂, 调节精度要求很高, 在实际成像实验操作中难以掌握其成像特性。利用光学设计软件模拟其成像, 对系统的调节和成像分析提供有益的参考。利用光学设计软件 ZEMAX 模拟了 KBA 显微镜对点源的成像过程, 给出了 KBA 显微镜成像系统的焦深约为 1 mm, 景深为 50 mm 左右。并且由模拟可知, 掠入射角对成像的影响很大。对像素尺寸约 10 μm 的探测设备, 模拟得出 KBA 成像系统的空间分辨力上限为 3 μm 左右。基于星光 II 装置对周期为 20 μm 的网格靶成像, 获得了 KBA 显微镜较为清晰的 X 光图像。该项工作为进一步开展掠入射成像系统的研究奠定了基础。

关键词: 仪器; KBA 显微镜; 掠入射; 光学设计; ZEMAX

中图分类号: TH742.63 文献标识码: A

Imaging Simulation of KBA Microscope System and X-Ray Imaging Experiment

Dong Jianjun¹ Liu Zhongli¹ Miao Wenyong¹ Yu Yanning¹ Cao Leifeng¹
Zheng Zhijian¹ Hu Jiasheng² Gao Qingfeng³ Liu Boxiang³

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

2 Dalian University of Science and Technology, Dalian 116023

3 Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, The Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033

Abstract: KBA microscope is a type of non-symmetrical and non-coaxial grazing incidence imaging system. Its configuration is complex, the adjustment precision is high, so that in practical experiment the imaging performance of KBA microscope is not easy to master. Imaging simulation by using optical design software ZEMAX is made to provide valuable reference for adjustment and imaging analysis. The imaging process of KBA microscope for point source is simulated by using ZEMAX. The depth of focus and depth of field of KBA microscope are about 1 mm and 50 mm respectively. The grazing angle affects the imaging greatly according to the simulation. The upper limit of the spatial resolution of KBA microscope is 3 μm for the detector whose pixel is about 10 μm by simulation. The clear X-ray image of KBA microscope is obtained for the grid target whose period is 20 μm based on XINGGUANG II facility, which establishes the base for advanced study of developing grazing imaging system.

Key words: instrumentation; KBA microscope; grazing incidence; optical design; ZEMAX

1 引 言

1948 年 Kirkpatrick 和 Baez^[1] 基于 X 射线的掠入射发展出一种实用化的 X 射线成像系统。该系

统由两块正交放置的二次曲面反射镜构成, 可以使像散大为降低。后来称这类系统为 KB 结构。这类掠入射系统由于其曲面加工精度和表面光洁度(表

* 国家 863-804(2003AA843080)资助课题。

作者简介: 董建军(1977~), 男, 山东人, 中国工程物理研究院激光聚变研究中心硕士研究生, 主要从事惯性约束聚变方面的研究。E-mail: d_dragonfly@163.com

收稿日期: 2005-08-23; 收到修改稿日期: 2005-12-19

面粗糙度均方根值要控制在 1 nm 以内) 很高, 所以仍在发展之中。

KB 显微镜成像系统适用于中等分辨或较弱光源成像, 可对惯性约束聚变(ICF)内爆芯子进行诊断。而且 KB 可以做成多通道^[2]系统, 可对不同波长的 X 光成像。KBA 是 KB 的改进型。由于 KBA 是非对称非共轴成像系统, 其调节相对困难。利用光学软件 ZEMAX 对其成像进行了模拟, 得出了一些有意义的结果, 对 KBA 显微镜实际成像分析提供了有益的帮助。

2 KBA 显微镜成像的原理

KB 显微镜成像系统发展至今, 已有很多类型。其核心元件是由两组相互垂直的曲面镜(有柱面镜, 球面镜, 椭球面镜, 双曲面镜等)组成, 如图 1 所示。入射到第一块曲面镜 L_1 上的子午光线经反射成为入射到第二块镜 L_2 的弧矢光线, 同理入射到 L_1 的弧矢光线相对于 L_2 是子午光线, 球面镜对子午光线强聚焦, 对弧矢光线弱聚焦, 通过这样的配置就可校正单个球面镜产生的像差, 极大地改善成像的质量。

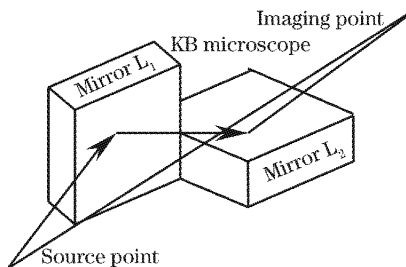


图 1 KB 显微镜结构示意图

Fig. 1 Schematic drawing of KB microscope structure

不过单用两块镜子会产生严重的像场倾斜, 为此人们改进了原始 KB 显微镜的结构, 采用四块镜子分为两组相互垂直放置, 如如图 2 所示, 文献[3]对此进行了详述。而且采用这种结构, 在较大视场内, 仍可保持有较高的分辨力^[4]。此外和 Wolter 显微镜一样, KBA 显微镜曲面镀膜的光洁度要求非常高, 通常

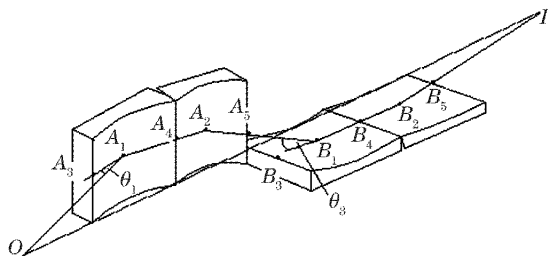


图 2 KBA 显微镜结构示意图

Fig. 2 Schematic drawing of KBA microscope structure

在 10^{-1} nm 量级, 这对镀膜工艺的要求很苛刻。

3 用光学软件对 KBA 显微镜成像的光学模拟

3.1 ZEMAX 模拟 KBA 显微镜的参量

图 2 是国内自主研发的第一台 KBA 显微镜镜头的示意图, 主镜技术参量为: 半径 $R=28790$ mm, 物距 $L=220$ mm, 像距 $L'=1786.7$ mm, 第一组镜子的掠入射角 $\theta_1=\theta_2=1.6^\circ$, 第二组镜子的掠入射角 $\theta_3=\theta_4=1.9318^\circ$, 物方集光立体角为 5×10^{-6} sr, 即平面角为 0.14456° 。从图 2 可以看出, KBA 显微镜是一种非共轴的、非对称的掠入射成像系统, 与传统共轴对称的光学系统完全不同, 因此很难套用传统的光学设计来分析其成像特性。利用美国焦点公司开发的光学设计分析软件 ZEMAX, 采用非序列模型对其成像过程进行模拟。这里仅考虑 KBA 显微镜光学系统几何成像的问题, 对镜头镀膜反射率及其它问题暂不考虑在内。根据图 2 给出的有关参量利用 ZEMAX 模拟了 KBA 显微镜成像系统, 如图 3 所示, KBA 的第一组镜子用两个椭圆表示, 与之正交的第二组镜子用两个圆表示。

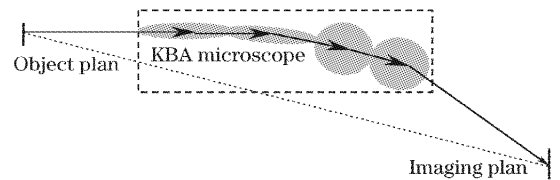


图 3 ZEMAX 模拟 KBA 显微镜的光路示意图

Fig. 3 Schematic drawing of light path for KBA microscope simulated by ZEMAX

3.2 沿入射方向改变像距点源所成的像

让像面偏离理想像面一定距离, 保持物距不变, 考察点源所成的像, 如图 4 所示。由图 4 可看出 KBA 显微镜的景深在 100 mm 左右。既说明像距正负 50 mm 的范围内变化, 仍可成较清晰的像。探测器在这个范围之外, 点光源所成的像成为一个很大的弥散的斑。

3.3 沿入射方向改变物距点源所成的像

让点光源沿如图 3 所示的方向, 偏离物点一定距离, 即改变物距保持像距不变, 点源所成的像如图 5 所示。从图 5 中可看出, KBA 显微镜成像系统的焦深在 1 mm 左右, 这说明物距在 ± 0.5 mm 变化不会对成像造成较大影响, 即物距在此范围内, 改变点源仍可成清晰的像。

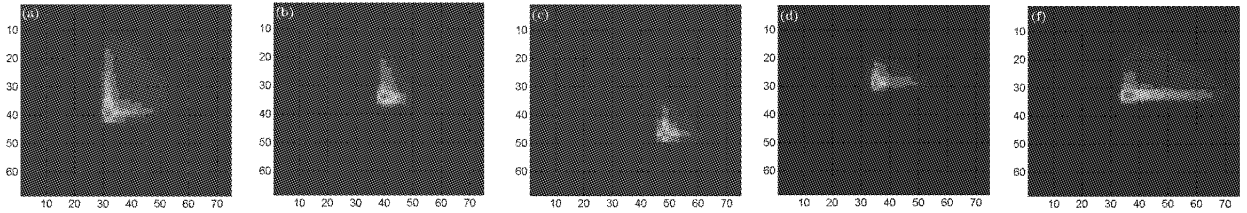


图 4 点源在不同像距所成的像,像面相对理想像面的偏移量分别为(a) -152 mm , (b) -50 mm , (c) 0 mm , (d) 50 mm , (e) 152 mm (放大倍数 $8\times$; 像素尺寸 $1\ \mu\text{m}$)

Fig. 4 Images of point source at different imaging distances, the offset distance from the ideal imaging plane is: (a) -152 mm , (b) -50 mm , (c) 0 mm , (d) 50 mm , (e) 152 mm (the magnification: $8\times$; the size of pixel: $1\ \mu\text{m}$)

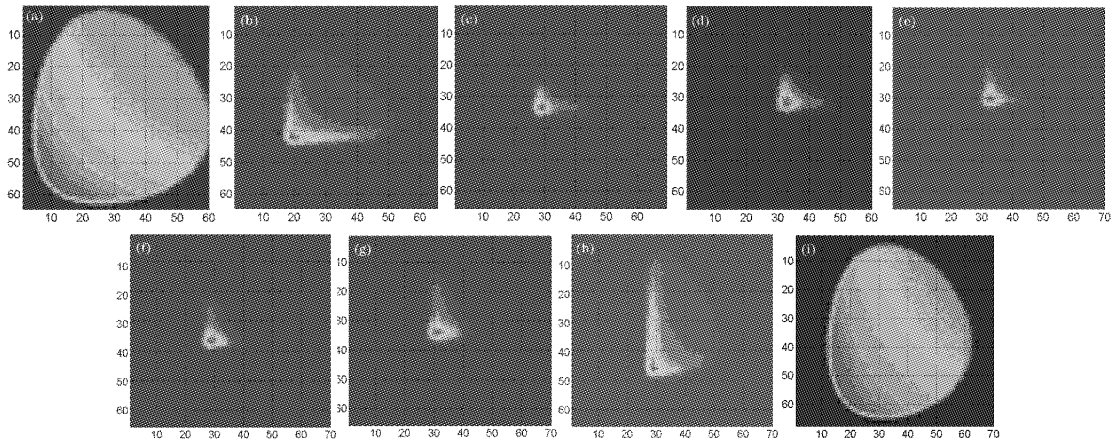


图 5 沿入射方向改变物距点光源所成的像,物距改变量分别为(a) -15 mm , (b) -5 mm , (c) -1 mm , (d) -0.5 mm , (e) 0 mm , (f) 0.5 mm , (g) 1 mm , (h) 5 mm , (i) 15 mm (放大倍数 $8\times$; 像素尺寸 $1\ \mu\text{m}$)

Fig. 5 Images of point source by changing the object distance along incident direction, the offset of object distance is: (a) -15 mm , (b) -5 mm , (c) -1 mm , (d) -0.5 mm , (e) 0 mm , (f) 0.5 mm , (g) 1 mm , (h) 5 mm , (i) 15 mm (the magnification: $8\times$; the size of pixel: $1\ \mu\text{m}$)

3.4 点光源沿垂直入射方向偏移的成像分析

前文已提到 KBA 显微镜是非共轴非对称的成像系统,在 ZEMAX 中不易利用其虚轴定方位,所以直接采用 ZEMAX 中的全局坐标定好各个反射镜的位置,点源沿入射方向的偏移反映了掠入射角的变化,在调节 KBA 显微镜时会出现这种情况,所

以这里以入射方向为基准,让点源沿垂直该方向偏移,但保持物距 220 mm 不变,像距也不变的情况下所成像的结果如图 6 所示。掠入射角改变量的符号规定:正号表示掠入射角增大,负号表示掠入射角减小。可以看出掠入射角的变化对成像的影响很大。由此可以断定,掠入射角的精确度是调节 KBA 显

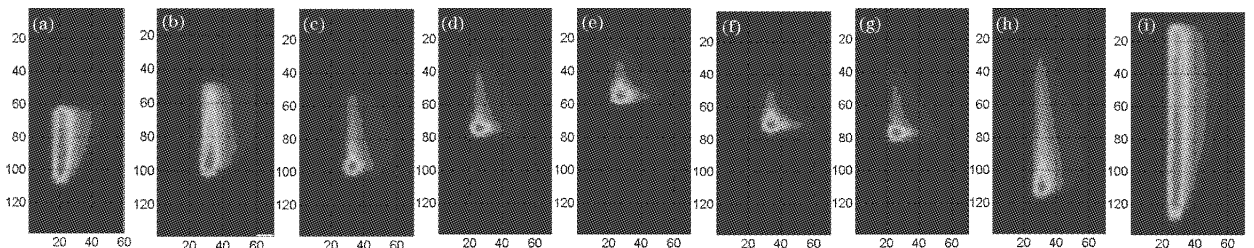


图 6 点光源沿垂直入射方向偏移所成的像,对应的掠入射角的改变量分别为(a) -0.078° , (b) -0.05° , (c) -0.026° , (d) -0.013° , (e) -0.0026° , (f) 0° , (g) 0.026° , (h) 0.05° , (i) 0.13° (放大倍数 $8\times$; 像素尺寸 $1\ \mu\text{m}$)

Fig. 6 Images of point source by changing the offset of source point along the direction perpendicular to the incidence direction, corresponding grazing angle is: (a) -0.078° , (b) -0.05° , (c) -0.026° , (d) -0.013° , (e) -0.0026° , (f) 0° , (g) 0.026° , (h) 0.05° , (i) 0.13° (the magnification: $8\times$; the size of pixel: $1\ \mu\text{m}$)

显微镜中关键的因素。在设计 KBA 显微镜时,掠入射角如何精确确定的问题是实际调节中的难点所在,设计了复杂的光路瞄准系统来确定这个角度。

3.5 不同视场点 KBA 成像系统物面分辨力的模拟

ZEMAX 光路设置中,在第一块镜子(顺序是从左至右)的子午和弧矢面内建立如图 7 所示的坐标系。Z 轴与第一块镜子的夹角即掠入射角为 1.6° 。视场点沿 y 轴和 x 轴分布。ZEMAX 采用的光线追迹算法是蒙特卡罗算法,我们在 y 轴(x 轴)上选两个间隔一定距离的点光源作为物面上的两个发光点,发光锥角均为 0.08° ,光线条数各为一百万条,模拟的结果如图 8 所示。这里选取的视场点分别为 $-500 \mu\text{m}$, $-400 \mu\text{m}$, $-300 \mu\text{m}$, $-250 \mu\text{m}$, $-150 \mu\text{m}$, $-50 \mu\text{m}$, $-25 \mu\text{m}$, $-10 \mu\text{m}$, $0 \mu\text{m}$, $10 \mu\text{m}$, $25 \mu\text{m}$, $50 \mu\text{m}$, $150 \mu\text{m}$, $250 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ 。负值代表负 y 轴(x 轴)方向的点。探测器设置为 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm}$,像素个数

512×512 。从图 8 中可看出沿 y 轴(x 轴)正向和负向视场的分辨力不对称。如图 8(a)所示,沿掠入射角减小的方向即正 y 轴向视场点分辨力要高些。这与文献[5]得出的结论是一致的。在探测器像素尺寸约为 $10 \mu\text{m}$ ($5 \mu\text{m}/512 = 0.009765625 \mu\text{m}$)和系统的放大倍数为 8 的条件下,可得出在理想情况下 KBA 系统的分辨力最高可达 $3 \mu\text{m}$ (视场为 $50 \mu\text{m}$)。

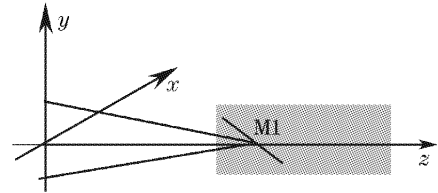


图 7 模拟 KBA 成像系统物面分辨力示意图

Fig. 7 Sketch of object plane resolution of KBA imaging system by simulation

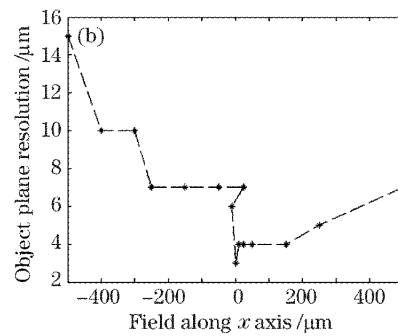
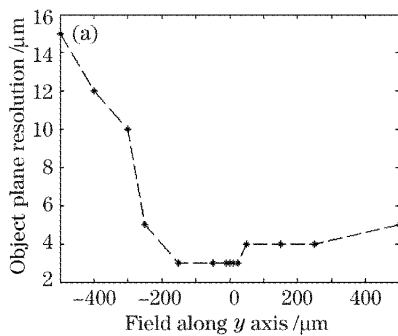


图 8 KBA 显微镜物面分辨力随线视场变化的曲线。(a) 视场沿 y 轴分布, (b) 视场沿 x 轴分布

Fig. 8 Curve of the object plane resolution of KBA microscope with the variation of line view field. (a) Field along y axis, (b) field along x axis

4 KBA 显微镜 X 光成像实验

4.1 实验装置

在星光 II 装置上,将 KBA 显微镜主体和基准

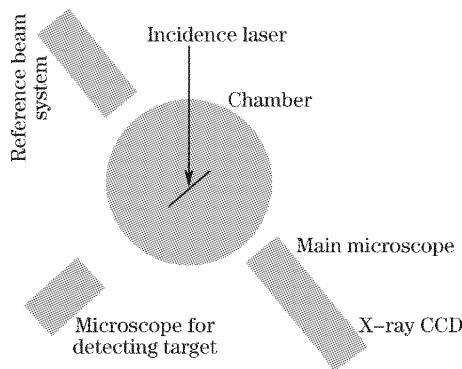


图 9 KBA 显微镜 X 光成像实验布局

Fig. 9 Layout of the X-ray imaging experiment of KBA microscope

光学系统分别安装在对心法兰上,与其中心轴线垂直的方向放置监测靶位的显微镜(柯视达显微镜)如图 9 所示。靶位显微镜的作用是监测靶面是否调节到位。实验中采用的靶为周期为 $20 \mu\text{m}$ 的网格靶。激光斜 45° 入射到靶面,在靶面背向法线方向产生的 X 光通过系统成像,记录系统为像素为 $9 \mu\text{m}$ 的 X 光 CCD。

4.2 实验结果

激光以 45° 角斜入射聚焦到靶面,能量为 23 J ,是基频光。图 10 是周期为 $20 \mu\text{m}$ 的 Ni 网格靶所成的 X 光图像。可以看出 KBA 显微镜所成的 X 光图像的网格结构很清晰,中间的光斑是由于激光入射到网格上烧蚀的等离子体膨胀所致。

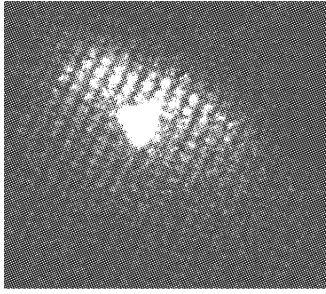


图 10 KBA 显微镜所成的周期为 $20\ \mu\text{m}$ 的 Ni 网格像
Fig. 10 Image of Ni-grid whose period is $20\ \mu\text{m}$ by
KBA microscope

5 结 论

利用 ZEMAX 光学设计软件模拟了 KBA 显微镜的成像过程,发现掠入射角对 KBA 显微镜成像的质量影响较大,这是调节 KBA 显微镜的关键因素。探测器像素尺寸和系统的放大倍数确定后,可通过模拟得到系统的分辨力随视场变化的关系。通过在星光 II 装置上的打靶实验,初步获得了 KBA 显微镜的 X 光图像。在调节过程中,掠入射角的确定要求精度很高(由模拟也可看出),所以成像质量

与掠入射角的调节密不可分;此外,影响成像质量的另一个重要的因素就是镜头制作的精度,包括表面光洁度、面形误差以及各块镜子间相对位置的装配误差等。镜子表面镀膜的反射率也是制约成像质量的一个因素。综合这些因素,才能全面考察 KBA 掠射成像系统的成像性能,这是进一步要做的工作。

致谢 感谢星光 II 运行组人员的大力配合和制靶人员的帮助。

参 考 文 献

- 1 P. Kirkpatrick, A. V. Baez. Formation of optical images by X-ray [J]. *J. Opt. Soc. Am.*, 1948, **38**(9): 766~774
- 2 F. Seward, J. Dent, M. Boyle. Calibrated "four-color" X-ray microscope for laser plasma diagnostics[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1976, **47**(4): 464~470
- 3 Richard Sauneuf, Jean-Michel Daimasso, Thierry Jalinaud. Large-field high-resolution X-ray microscope for studying laser plasmas [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1997, **68**(9): 3412~3420
- 4 F. Bridou, R. Mercier, A. Raynal *et al.*. Large field double Kirkpatrick-Baez microscope with nonperiodic multilayers for laser plasmas imaging[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2002, **73**(11): 3789~3795
- 5 Hu Jiasheng, Zhao Lingling, Li Xiang. Imaging quality analysis of KBA X-ray microscope working at grazing incidence[C]. *Proc. SPIE*, 2005, **5638**:955~960