

掠入射 X 射线显微镜系统光线追迹程序

赵玲玲*, 孙德林, 王丽丽, 王刚

鲁东大学信息与电气工程学院山东省高校信息物理融合与智能控制重点实验室, 山东 烟台 204625

摘要 将掠入射改进的 Kirkpatrick-Baez (KBA)型 X 射线显微镜用于研究激光等离子体惯性约束聚变,它由两对正交的反射镜构成。研究了针对掠入射反射系统的光线追迹程序,利用该程序设计了 KBA 反射镜,得出对于这种双反射镜结构,孔径光阑放在第二块反射镜上结构更紧凑的结论。研究了 KBA 显微镜的场曲以及俯仰角对成像质量的影响,找出了最优的离焦距离,制定了系统的俯仰角误差。

关键词 激光光学; 掠入射; Kirkpatrick-Baez X 射线显微镜; 光线追迹

中图分类号 O434.1

文献标志码 A

doi: 10.3788/CJL202047.0401002

Ray-Tracing Program for Grazing Incident X-Ray Microscope System

Zhao Lingling*, Sun Delin, Wang Lili, Wang Gang

Key Laboratory of Cyber-Physical System and Intelligent Control in Universities of Shandong, School of Information and Electrical Engineering, Ludong University, Yantai, Shandong 204625, China

Abstract In this study, a Kirkpatrick-Baez (KBA) X-ray microscope is developed to diagnose laser-produced plasmas and research the inertial confinement fusion. The microscope comprises two sets of bimirrors. Herein, the ray-tracing program for grazing incident reflectors is studied. The KBA reflector is designed by using this program. It is found that the bimirror would be compact if the aperture stop is placed on the second mirror. Furthermore, the influences of field curvature and pitch angle of KBA microscope on the image quality are studied, and the optimal defocusing distance and the pitch angle error of the system are determined.

Key words laser optics; grazing incidence; Kirkpatrick-Baez X-ray microscope; ray-tracing

OCIS codes 140.3460; 140.7240; 040.7480

1 引 言

X 射线具有穿透性和被吸收的特点,而且它还能够掠入射状态下,在光滑的表面发生反射。目前,已经研究出了很多 X 射线光学设备^[1-4],包括 X 射线反射镜^[5]、菲涅耳波带板(FZP)^[6]、X 射线折射透镜等。

X 射线反射镜主要包括 Kirkpatrick-Baez (KB)型、改进的 Kirkpatrick-Baez (KBA)型、先进 Kirkpatrick-Baez (AKB)型、Wolter 型等结构的反射镜。相对于其他面型的反射镜,X 射线球面反射镜由于机械结构及面型加工更简单,被广泛用于等离子体惯性约束聚变(ICF)实验中^[7-11]。KBA 型显微镜在子午面和弧矢面均采用两个互相平行的球面反射镜,两组反射镜的夹角为 η ,则入射光线和反射

光线之间的夹角为 2η ,且这个角度不随掠入射角的变化而变化。KBA 型显微镜的这种结构基本上校正了视场倾斜,扩大了有效视场。

KBA 型显微镜工作在掠入射反射情况下,通常的光线追迹软件难以适应这种结构。目前,适用于掠入射的光线追迹程序主要分为两种,一种是依据几何光学原理,另一种是依据波动光学原理,本文的光线追迹程序属于第一种类型。光线追迹程序 SHADOW 等软件在同步辐射领域中得到了广泛的应用。本文程序可以根据要求对掠入射 X 射线光学系统进行优化设计,可用于研究系统的像差,例如像散及视场倾斜等,也可用于研究一个或多个参数的误差^[12]等。与 SHADOW 等软件比较,本文程序更加灵活高效,可以随时根据实际要求编写程序,进行光线追迹。

收稿日期: 2019-10-08; 修回日期: 2019-11-11; 录用日期: 2019-12-26

* E-mail: zll765200@163.com

KBA 显微镜系统对成像质量要求很高,且装调复杂。因此本文针对掠入射反射成像的特点,研究了光线追迹程序,对反射镜轴上及轴外点的成像情况进行模拟,设计和优化反射镜,以便于装调和提高成像质量。

2 光线追迹

通常的光学系统是共轴折射系统,可以用一般的光线追迹向量公式进行光线追迹^[13]。KBA 显微镜系统是非共轴掠入射反射系统,不能直接用一般光学系统的光线追迹向量公式来对 KBA 显微镜系统进行光线追迹。下面利用光线追迹公式分别对 KBA 显微镜的轴外细光束和空间光线进行追迹。

2.1 轴外细光束光线追迹

邻近光轴的光束可用近轴光线的追迹公式进行光线追迹。通过对近轴光线进行追迹,可以求出像距和系统的像散等。KBA 显微镜是非共轴掠入射系统,它由 M_1 、 M_2 、 M_3 和 M_4 四块反射镜组成,光轴 $OO_1O_2O_3O_4O'$ 是伪光轴,如图 1 所示。分析 KBA 型 X 射线显微镜成像质量时,首先要对近伪轴光线进行光线追迹。本文对反射镜系统进行光线追迹,系统具体参数如下:物距 $L=220$ mm,反射镜半径 $R=28800$ mm;掠入射角 $\theta_1=\theta_2=1.6^\circ$, $\theta_3=\theta_4=1.8^\circ$;反射镜之间的间隔 $d_1=27$ mm, $d_2=25$ mm, $d_3=26$ mm;工作波段为 $0.2\sim 3.0$ keV。

杨氏公式为

$$\frac{n' \cos^2 I'_p}{t'} - \frac{n \cos^2 I_p}{t} = \frac{n' \cos I'_p - n \cos I_p}{r}, \quad (1)$$

$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n' \cos I'_p - n \cos I_p}{r}, \quad (2)$$

式中: I_p 、 I'_p 分别为光线的入射角和出射角; r 为反射镜的曲率半径; t 、 t' 分别为子午面内的物距和像距; n 、 n' 分别为入射和出射介质的折射率; s' 、 s 分别为弧矢面内的物距和像距。

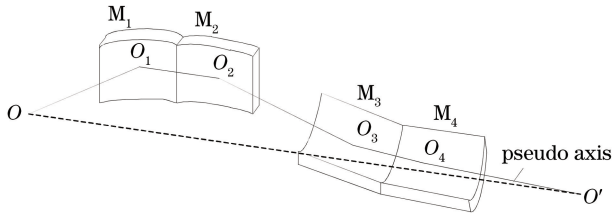


图 1 KBA 显微镜

Fig. 1 KBA microscope

对于反射镜系统,有 $n'=-n=-1$, $I'_p=-I_p$, 则(1)式和(2)式可变为

$$\frac{1}{t'} + \frac{1}{t} = \frac{1}{f'_t} = \frac{2}{r \sin \theta}, \quad (3)$$

$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{1}{f'_s} = \frac{2 \sin \theta}{r}, \quad (4)$$

式中: f'_t 、 f'_s 分别为子午面和弧矢面内反射镜的焦距; θ 为掠入射角。

由于 KBA 系统的两组反射镜是正交放置的,所以前一组反射镜子午面内的光线处于后一组反射镜的弧矢面内。因此,由(3)式可知,前一组反射镜 M_1 和 M_2 的子午面焦距 $f'_{t1} = f'_{t2} = \frac{r \sin \theta}{2} = \frac{29000 \sin(1.6)}{2}$;

由(4)式可知,后一组反射镜 M_3 和 M_4 的弧矢面焦距 $f'_{s3} = f'_{s4} = \frac{r}{2 \sin \theta} = \frac{29000}{2 \times \sin(1.8)}^\circ$ 。

物距 u 、像距 v 和透镜焦距 f 满足高斯公式:

$$\frac{1}{u} + \frac{1}{v} = \frac{1}{f}. \quad (5)$$

根据(5)式可以计算得出系统的像距为 1796 mm。

2.2 空间光线追迹

空间光线追迹原理如图 2 所示,光线追迹中的参数采用直角坐标系表示,坐标原点和反射面顶点重合, OO_1O_2O' 是 KBA 显微镜的伪光轴,从源点 $A(x_0, y_0, z_0)$ 发出的光线在反射镜 M_1 的 $J(x, y, z)$ 点反射,然后在反射镜 M_2 的 $K(x_k, y_k, z_k)$ 点反射, A' 为 A 的像点。

首先以坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 为全局坐标系,追迹反射镜 M_1 的光线。 A 、 K 两点间的光程函数 G_0 为

$$G_0 = AJ + JK, \quad (6)$$

式中: AJ 和 JK 分别为 J 点与 A 、 K 点的距离。

根据费马原理,可以得到

$$\frac{\partial G}{\partial y} = L \frac{\partial x}{\partial y} + M - L' \frac{\partial x}{\partial y} - M', \quad (7)$$

$$\frac{\partial G}{\partial z} = L \frac{\partial x}{\partial z} + N - L' \frac{\partial x}{\partial z} - N', \quad (8)$$

式中: (L, M, N) 和 (L', M', N') 分别为入射光线 AJ 和反射光线 JK 的三个方向余弦。它们的表达式为

$$L = \frac{x - x_0}{AJ}, M = \frac{y - y_0}{AJ}, N = \frac{z - z_0}{AJ}, \quad (9)$$

$$L' = \frac{x_k - x}{JK}, M' = \frac{y_k - y}{JK}, N' = \frac{z_k - z}{JK}. \quad (10)$$

由(9)式和(10)式可以得到

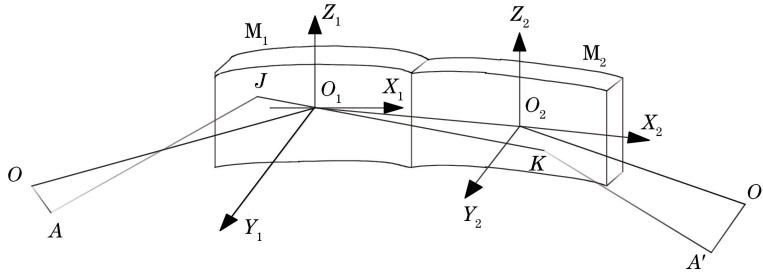


图2 空间光线追迹原理

Fig. 2 Space ray tracing principle

$$L' - L = (M - M') \frac{\partial y}{\partial x} = (N - N') \frac{\partial z}{\partial x} = T, \quad (11)$$

$$L'^2 + M'^2 + N'^2 = 1, \quad (12)$$

式中: T 表示常数。

由(11)式和(12)式可以得出

$$\left[1 + \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)^2 \right] T^2 + 2 \left(L - M \frac{\partial x}{\partial y} - N \frac{\partial x}{\partial z} \right) T = 0. \quad (13)$$

则通过(13)式,可解得

$$T = \frac{2 \left(M \frac{\partial x}{\partial y} + N \frac{\partial x}{\partial z} - L \right)}{1 + \left(\frac{\partial x}{\partial y} \right)^2 + \left(\frac{\partial x}{\partial z} \right)^2}. \quad (14)$$

因此,(10)式可以表示为

$$y_k = \frac{M'(x_k - x)}{L'} + y, \quad (15)$$

$$z_k = \frac{N'(x_k - x)}{L'} + z. \quad (16)$$

由(11)式、(15)式和(16)式得出

$$y_k = \frac{\left(M - \frac{\partial x}{\partial y} T \right) (x_k - x)}{L + T} + y, \quad (17)$$

$$z_k = \frac{\left(N - \frac{\partial x}{\partial z} T \right) (x_k - x)}{L + T} + z, \quad (18)$$

式中: $\frac{\partial x}{\partial y}$ 和 $\frac{\partial x}{\partial z}$ 可通过 $(x - x_{o1})^2 + (y - y_{o1})^2 + (z - z_{o1})^2 = R^2$ 确定; x_k, y_k 和 z_k 满足 $(x_k - x_{o2})^2 + (y_k - y_{o2})^2 + (z_k - z_{o2})^2 = R^2$; (x_{o1}, y_{o1}, z_{o1}) 为坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 的坐标原点; (x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}) 为坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的坐标原点。

由于反射镜 M_2 与反射镜 M_1 不在同一个光轴上,因此追迹 M_2 的光线时,需要引入新的坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 。此时, x_k, y_k 和 z_k 也应该转换成坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 中的新坐标。坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$

相对于坐标系 $O_1-X_1Y_1Z_1$ 发生了平移和偏转,因此, x_k, y_k 和 z_k 的新坐标 x_{k2}, y_{k2} 和 z_{k2} 可表示为

$$\begin{cases} x_{k2} = k_{x2}(x_k - x_{o2}) + m_{x2}(y_k - y_{o2}) + n_{x2}(z_k - z_{o2}) \\ y_{k2} = k_{y2}(x_k - x_{o2}) + m_{y2}(y_k - y_{o2}) + n_{y2}(z_k - z_{o2}) \\ z_{k2} = k_{z2}(x_k - x_{o2}) + m_{z2}(y_k - y_{o2}) + n_{z2}(z_k - z_{o2}) \end{cases}, \quad (19)$$

式中: (x_{o2}, y_{o2}, z_{o2}) 是新坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的原点坐标; $k_{x2}, m_{x2}, n_{x2}, k_{y2}, m_{y2}, n_{y2}, k_{z2}, m_{z2}, n_{z2}$ 分别是新坐标系 $O_2-X_2Y_2Z_2$ 的 X 轴、 Y 轴和 Z 轴的方向余弦。

反射镜 M_1 和反射镜 M_2 的尺寸已知,根据光线追迹得到的 J 点和 K 点的坐标可以判断出这两个点是否在反射镜上。

3 光阑对系统分辨率及结构的影响

光学系统中限制轴上物点成像光束大小的光阑为孔径光阑,该光阑实际上限制的是成像光束立体角的大小。将安置在物平面或像平面上用以限制成像范围的光阑称为视场光阑。设计双反射镜时,子午面孔径光阑可以放在第一块反射镜上,也可以放在第二块反射镜上。以第一组反射镜为例,分析光阑位置对系统分辨率和结构尺寸的影响。

为了分析光阑对分辨率的影响,下面分别对物方 $-2, -1, 1, 2$ mm 处的视场进行光线追迹,图 3 是光阑在第一块反射镜上时对应视场的点列图,图 4 是光阑在第二块反射镜上时对应视场的点列图,可以看出点列图在水平方向 X 和垂直方向 Y 上的大小。当视场为 $-1, 1, 2$ mm 时,光阑在第一块反射镜上时的点列图要小于在第二块反射镜上的;而当视场为 -2 mm 时的,光阑在第一块反射镜上时的点列图要比在第二块反射镜上的大很多。

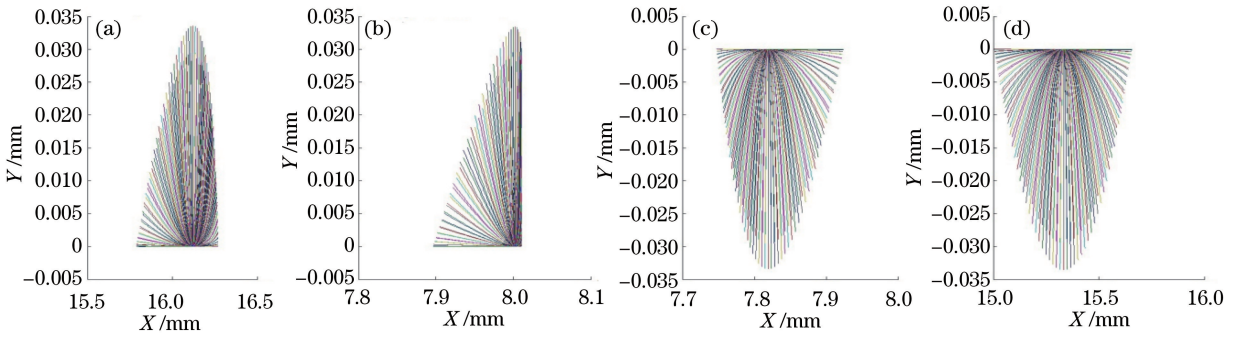


图 3 不同目标场处,孔径光阑在第一块反射镜上的点列图。(a) -2 mm; (b) -1 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

Fig. 3 Spot diagrams with the aperture stop placed on the first mirror at different object fields.

(a) -2 mm; (b) -1 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

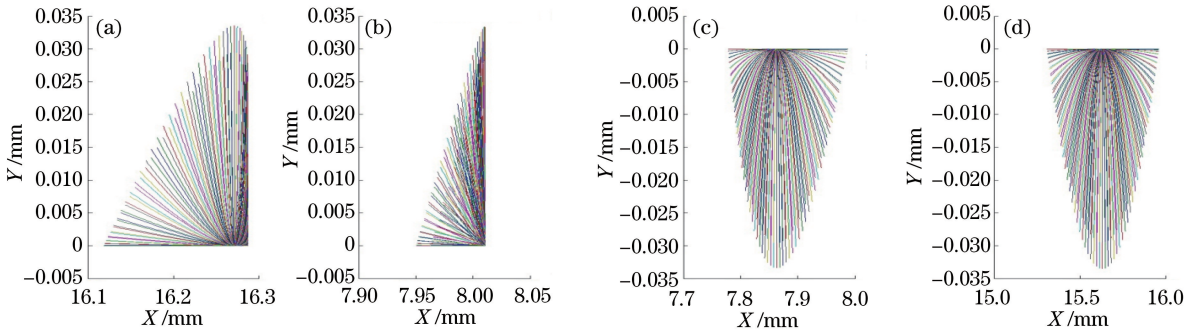


图 4 不同目标场处,孔径光阑在第二块反射镜上的点列图。(a) -2 mm; (b) -1 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

Fig. 4 Spot diagrams with the aperture stop placed on the second mirror at different object fields.

(a) -2 mm; (b) -1 mm; (c) 1 mm; (d) 2 mm

在满足视场以及立体角的前提下,为了分析光阑位置对结构的影响,下面分别对伪光轴上的物点 A、视场为 ± 2 mm 处的物点 B 和 C 进行光线追迹。当孔径光阑放在第一块反射镜上,视场光阑放在第二块反射镜上时,根据掠入射角为 1.6° ,物方立体角 ω 为 4×10^{-6} sr,第二块反射镜像距 $l'_2 = 1850$ mm,以及视场为 ± 2 mm 的要求,可以得出第一块反射镜的最大通光孔径应为 26.4 mm,利用光线追迹,得出第二块反射镜最大通光孔径应为 42.4 mm,如表 1 所示。当孔径光阑放在第二块反射镜上,视场光阑放在第一块反射镜上时,根据孔径角与视场的要求,利用光线追迹可以得出第一块反射镜的最大通光孔径应为 39.8 mm,第二块反射镜最大通光孔径应为 27.1 mm,如表 2 所示。通过比较表 1 和表 2 可以得出,为了使系统的结构更紧凑,设计时应该使孔径光阑放在第二个反射镜上。同样,弧矢面的孔径光阑应放在第四块反射镜上。设计时首先需要确定第四块反射镜的尺寸。根据掠入射角为 1.8° ,物方立体角 ω 为 4×10^{-6} sr,第四块反射镜像距 $l'_4 = 1796$ mm,以及视场为 ± 2 mm 的要求,可以得出反射镜的最大通光孔径应为 24.2 mm。第四块反射镜

尺寸确定下来后,就可以利用光线追迹确定第三块反射镜的尺寸。根据第三块反射镜物距为 268 mm,以及孔径角与视场的要求,可以得出第三块反射镜的尺寸为 31.2 mm。

表 1 孔径光阑在第一块反射镜上,视场光阑在第二块反射镜上时,两反射镜的通光孔径

Table 1 Aperture of two mirrors with aperture stop on the first mirror and field stop on the second mirror

Object point	Aperture of the first mirror /mm	Aperture of the second mirror /mm
A	17.7	18.7
B	13.4	42.4
C	26.4	13.7

表 2 孔径光阑在第二块反射镜上,视场光阑在第一块反射镜上时,两反射镜的通光孔径

Table 2 Aperture of two mirrors with aperture stop on the second mirror and field stop on the first mirror

Object point	Aperture of the first mirror /mm	Aperture of the second mirror /mm
A	17.7	18.7
B	14.4	27.1
C	39.4	14.3

4 双反射镜对成像结果的影响

对成像质量有影响的重要因素不仅包括反射镜的加工精度,还包括反射镜的装调精度。KBA 显微镜有两个相似的基座,一个用于安装水平反射镜,一个用于安装垂直反射镜。系统前两个和后两个反射镜分别并排放置在基座上。安装前先分别对这两组反射镜进行自准直校准。如果两块反射镜之间夹角正确,那么电动转台转动一定角度后,第二块反射镜也能达到自准,同时俯仰角也达到理想值。否则需调整第二块反射镜,使其水平和俯仰方向的自准直仪的读数一致。然后它们被安装在可以调节精度的基座上,通过旋转和移动使反射镜达到会聚光线的

理想状态。由于采用了预对准的方法,在安装过程中只需要微调很小的角度,简化了调整的过程。为了便于装调,本文采用光线追迹分析了反射镜角度对成像质量的影响。

以前一组反射镜为例,分析俯仰角对弥散斑的影响。图 5 为俯仰角变化引起的点列图的变化,可以看出点列图在水平方向 X 和垂直方向 Y 的大小,随着俯仰角的增大,点列图发生偏转,从而使点列图半径增大。图 6 所示为俯仰角与点列图有效半径之间的关系,俯仰角与点列图有效半径近似成线性关系。当俯仰角误差小于 $4.5'$ 时,引起的点列图的变化在允许的范围内,因此在装调过程中应该使反射镜的俯仰角误差控制在 $4.5'$ 内。

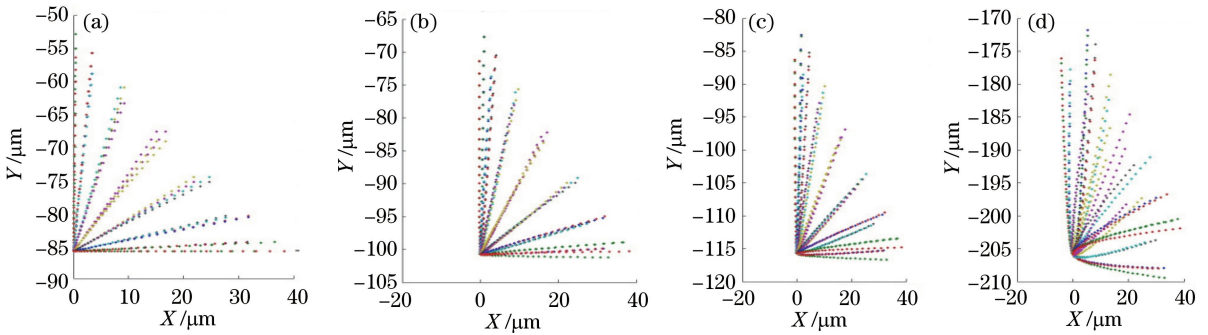


图 5 俯仰角对点列图的影响。(a) $0.0005'$; (b) $0.01'$; (c) $0.02'$; (d) $0.08'$

Fig. 5 Effect of pitch angle on spot diagram. (a) $0.0005'$; (b) $0.01'$; (c) $0.02'$; (d) $0.08'$

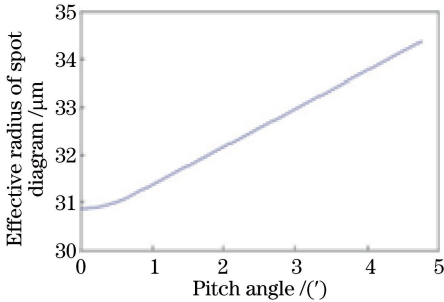


图 6 俯仰角对点列图有效半径的影响

Fig. 6 Effect of pitch angle on effective radius of spot diagram

5 场曲对成像质量的影响

对于垂直于光轴的一个平面物体,只有其在傍轴区域内,才能近似成像于一个平面。对于视场较大的物平面,经反射镜后所成的清晰的像面不是平面而是一个抛物面。一般掠入射显微镜研究的是轴上点的成像情况,轴上点的成像质量是评价显微镜分辨率的重要标准。但是对于大视场的显微镜,尽管场曲没有球差、彗差等像差大,但它仍是主要像差,轴外点的场曲是影响成像质量的重要因素。利

用光线追迹可以得出视场角与焦平面的关系。图 7 是视场角为 $-0.27'$ 时,离焦量 d_z 对点列图的影响,可以看出, $d_z > 0$ 比 $d_z < 0$ 对点列图的影响大,图中 d_z 表示相对焦平面的偏移量。由图 8 可知: $d_z > 0$ 时,增大视场角会使负视场点列图的有效半径减少,但会使正视场的点列图的有效半径增加; $d_z < 0$ 时,增大视场角会使负视场点列图的有效半径增加,但会使正视场的点列图的有效半径减少。当视场角小于 $10'$ 时,视场角与点列图的有效半径近似成二次函数关系;当视场角大于 $10'$ 时,视场角与点列图的有效半径近似成线性关系。从图 8 中也可以看出不同视场角与离焦量的关系,从而找出最优的离焦距离。可以通过在像方适当位置添加孔径光阑,以消除场曲对像质的影响。

图 9 是视场角为 $1.56'$ 时,离焦量与点列图有效半径的关系图,可以看出,当 d_z 为 -60 mm 时,点列图有效半径取最小值。

6 结 论

本文基于 ICF 实验的空间分辨率的需求,根据

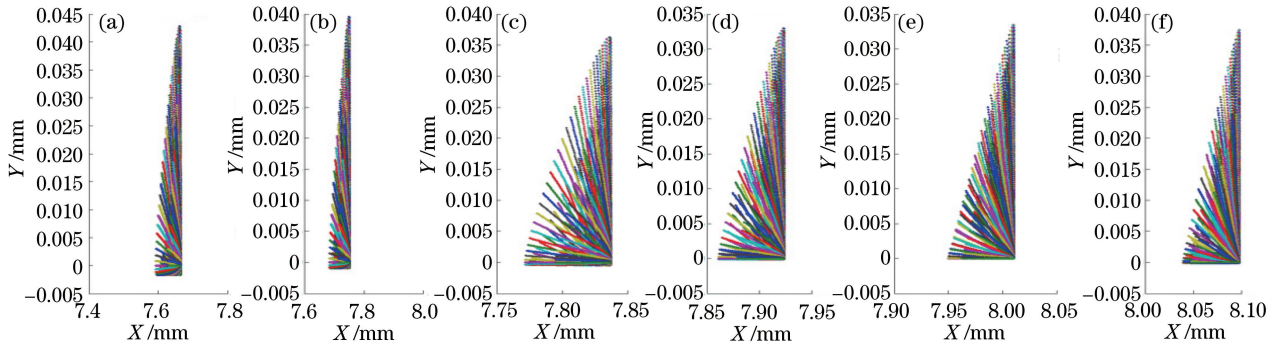


图7 视场角为 $-0.27'$ 时,不同离焦量下的点列图。

(a) -80 mm; (b) -60 mm; (c) -40 mm; (d) -20 mm; (e) 0 mm; (f) 20 mm

Fig. 7 Spot diagrams with $-0.27'$ field angle under different focal shifts.

(a) -80 mm; (b) -60 mm; (c) -40 mm; (d) -20 mm; (e) 0 mm; (f) 20 mm

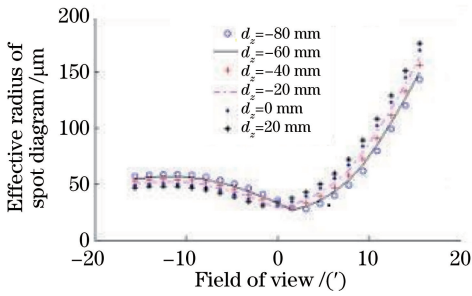


图8 不同离焦量下,视场角对点列图有效半径的影响

Fig. 8 Effect of field angle on effective radius of spot diagram under different focal shifts

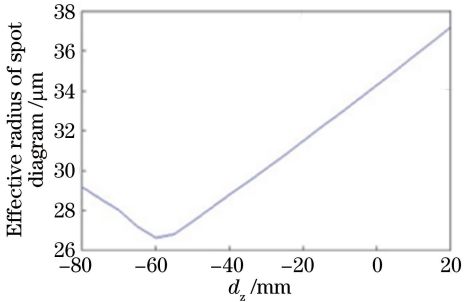


图9 点列图有效半径与离焦量的关系曲线

Fig. 9 Curve of effective radius of spot diagram with focal shift

掠入射显微镜非共轴全反射的特点,编写了光线追迹程序。比较了两种双反射镜,发现将孔径光阑放在第二个反射镜上可使系统结构更紧凑,解决了双反射镜的设计问题。分析了大视场KBA显微镜场曲的特点,在不同离焦量下,得出点列图有限半径与视场角的关系。根据这个关系找出了不同视场角下的最优离焦量,以提高系统的成像质量,满足了使用的要求。

参 考 文 献

[1] Siewert F, Buchheim J, Zeschke T, et al. On the

characterization of ultra-precise X-ray optical components: advances and challenges in *ex situ* metrology [J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2014, 21(5): 968-975.

[2] Yamauchi K, Yabashi M, Ohashi H, et al. Nanofocusing of X-ray free-electron lasers by grazing-incidence reflective optics[J]. Journal of Synchrotron Radiation, 2015, 22(3): 592-598.

[3] Chkhalo N I, Gaikovich P K, Salashchenko N N, et al. Grazing incidence mirrors with enhanced reflectance in the soft X-ray region[J]. Thin Solid Films, 2016, 598: 156-160.

[4] Grigoriev M, Fakhrtudinov R, Irzhak D, et al. Two-dimensional X-ray focusing by off-axis grazing incidence phase Fresnel zone plate on the laboratory X-ray source [J]. Optics Communications, 2017, 385: 15-18.

[5] Li Z, Li B. Design of novel keV-range grating spectrometer with ultra-high resolving power [J]. Acta Optica Sinica, 2019, 39(8): 0822001.

李卓, 李宾. 一种新型 keV 波段超高分辨光栅光谱仪设计[J]. 光学学报, 2019, 39(8): 0822001.

[6] Li L, Qiang P F, Sheng L Z, et al. Development and testing of glass substrate Wolter-1 X-ray focusing mirror[J]. Acta Physica Sinica, 2018, 67(20): 200701.

李林森, 强鹏飞, 盛立志, 等. 玻璃基底 Wolter-1 型 X 射线聚焦镜研制及测试[J]. 物理学报, 2018, 67(20): 200701.

[7] Gong X P, Lu Q P, Song Y. Mechanical design and performance evaluation of KB mirror system for the ARPES beamline at SSRF [J]. Precision Engineering, 2016, 46: 166-176.

[8] Yi S Z, Mu B Z, Wang X, et al. One-dimensional KBA microscope for planar target diagnosis[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2012, 24(5): 1076-

1080.

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.

- [9] Mu B Z, Wu W L, Yi S Z, et al. 4.75 keV four-channel Kirkpatrick-Baez microscope[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2013, 25(4): 903-907.

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.

- [10] Zhang Y Z, Mu B Z, Yi S Z, et al. Design of mixed KB-KBA microscope for multi-keV dynamic imaging diagnostics [J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014, 26(5): 052002.

章逸舟, 穆宝忠, 伊圣振, 等. 用于几 keV 能点动态成像诊断的 KB-KBA 混合型光学系统设计[J]. 强激

光与粒子束, 2014, 26(5): 052002.

- [11] Liu C A, Ice G E, Liu W, et al. Fabrication of nested elliptical KB mirrors using profile coating for synchrotron radiation X-ray focusing [J]. Applied Surface Science, 2012, 258(6): 2182-2186.

- [12] Zhao L L, Hu J S, Sun D L. Programming design and simulation of KBA microscope imaging system [J]. Chinese Journal of Lasers, 2009, 36(1): 110-114.

赵玲玲, 胡家升, 孙德林. KBA 显微成像系统程序设计与模拟[J]. 中国激光, 2009, 36(1): 110-114.

- [13] Yuan X C. Optical design [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988: 11-18.

袁旭沧. 光学设计[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988: 11-18.