

基于非周期多层膜的 X 射线成像研究*

顾春时 王占山** 穆宝忠 王风丽 张 众 秦树基 陈玲燕

(同济大学精密光学工程技术研究所物理系, 上海 200092)

摘 要 本文设计了惯性约束聚变(ICF)诊断实验用 X 射线 Kirkpatrick-Baez(KB)显微镜, 给出了系统的结构参量. 使用 ZEMAX 光学软件对 KB 型显微镜进行了性能模拟, 结果表明: 在 8 keV 能点, 放大率为 8 倍时, 轴上点的最佳空间分辨率小于 $2\mu\text{m}$, 200 微米视场的空间分辨率优于 $10\mu\text{m}$. 采用磁控溅射方法制备了 W/B₄C 非周期多层膜, 经 X 射线衍射仪(XRD, 工作能量 8 keV)测量, 其反射率为 20%, 带宽为 0.3° , 达到了 KB 型显微镜成像系统的要求. 使用 Cu 靶 X 射线管进行了成像实验, 得到了放大倍数分别为 1 倍和 2 倍的一维 X 射线像.

关键词 KB 型显微镜; X 射线非周期多层膜; X 射线成像; 空间分辨率

中图分类号 O434.1 **文献标识码** A

0 引言

ICF 研究是解决未来能源问题的候选途径之一, 其中间结果也可应用于国防军事领域^[1,2]. 世界上主要的大型 ICF 装置大都采用多路激光同时入射靶室, 照射靶丸产生内爆的方案^[3], 对内爆压缩区域成像可以给出辐射驱动源的对称性、均匀性以及内爆压缩等离子体流体力学不稳定性增长等重要物理信息^[4,5], X 射线成像手段是内爆压缩区域成像的最好选择^[6,7]. 考虑激光等离子体小空间尺度的特点, 需建立微米尺度分辨水平的 X 射线成像系统.

目前, 在 ICF 研究中常用的 X 射线成像系统有针孔成像装置和掠入射成像系统. 由于针孔成像的小孔(直径一般为 $10\sim 20\mu\text{m}$)限制了集光立体角(通常在 $10^{-7}\sim 10^{-8}$ 量级), 其聚光面积小, 信噪比低, 对内爆压缩区域内低通量 X 射线辐射成像受到一定的限制^[8]. X 射线掠入射成像系统有 Wolter 型显微镜和 KB 型显微镜^[9], Wolter 型显微镜可提高集光效率, 获得较好的分辨率^[10]. 但由于它采用非球面光学元件, 制作成本高, 技术复杂, 特别是在高能 X 射线波段, 对非球面元件的面形和表面粗糙度有非常高的要求^[11], 因此难以实现. KB 型显微镜由两片正交放置的球面镜组成, 在掠入射反射成像方式下获得 X 射线像, 也可以提高集光立体角, 获得高分辨、高信噪比的 X 射线图像. 由于球面镜加工难度比非球面镜小, 容易获得高精度面形和极低表面粗糙度的光学元件, 因此 KB 型显微镜常用于较高能量的 X 射线成像.

各种材料在 X 射线波段的折射率小于 1, 且与 1 的差别在 $10^{-5}\sim 10^{-6}$ 量级, 因此, 在 X 射线由空气入射到反射镜表面时会发生全外反射, 其全反射掠入射角非常小. 在 KB 型显微镜掠入射成像系统中, 增加 X 射线入射的掠入射角可增加系统的集光立体角和成像分辨率. 为了保证 KB 型显微镜在较大的掠入射角时有足够的反射率, 一般需要在 KB 型显微镜的球面镜上镀重金属薄膜, 如金膜. 但 KB 型显微镜在较高能量下工作时, 较小全反射角的单层膜不能满足设计要求, 需要镀制多层膜提高反射镜的反射角度. 周期多层膜的带宽有限, 不能满足 KB 型显微镜成像系统对入射掠入射角度宽度的要求, 所以本文选用了非周期结构的多层膜反射镜. 用磁控溅射方法在球面镜上镀制了非周期多层膜, 测试表明其性能达到了 KB 型显微镜成像系统的要求. 使用 Cu 靶 X 射线管($E=8\text{ keV}$)进行了成像实验, 得到了放大倍数分别为 1 倍和 2 倍的一维 X 射线像.

1 X 射线 KB 型显微镜的光学设计

单个凹球面镜可以对 X 射线起聚焦作用, 但是掠入射反射的成像方式会产生严重的像散, 如图 1. 通过简单的几何关系可以得到: 点光源经过单个凹球面镜反射后将在空间不同位置会聚成两条直线, 分别是子午焦线和弧矢焦线. 其中子午面内的焦距

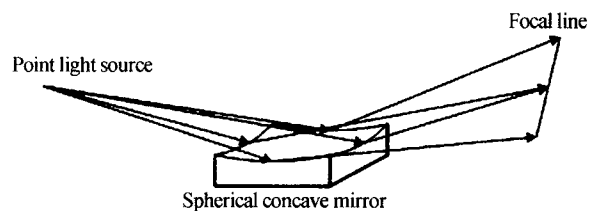


图 1 X 射线以掠入射方式被球面镜反射后在一维方向上聚焦
Fig. 1 X-rays focused by a concave mirror in one dimension

* 国家 863-804-3 项目(2004AA843081)和上海市博士后研究基金(05R214140)资助项目

** Tel: 021-65984652 Email: wangzs@mail.tongji.edu.cn

收稿日期: 2006-02-20

为 $f_m = R \sin(\theta) / 2$; 弧矢面内的焦距为 $f_s = R / 2 \sin(\theta)$, θ 是掠入射角. 非正入射成像是像散产生的原因. 在一般掠入射成像的 1° 掠入射角情况下, f_m 和 f_s 之比为 $1/\sin^2(\theta)^{[9]}$ 将超过 3000 倍.

因此, 在通常情况下可以认为单个凹球面镜只在一维(子午面)上对 X 射线起聚焦作用, 而忽略另一维(弧矢面)上的聚焦. Kirkpatrick 和 Baez 提出用两个正交放置的柱(球)面镜组成成像系统, 同时实现子午和弧矢面的成像. 通过调整入射的掠入射角和球面镜的曲率半径实现了 X 射线点到点的成像. 通过实验, 他们证实了上述方法, 开创了 X 射线掠入射 KB 型显微镜.

KB 型显微镜, 如图 2. 满足物像关系

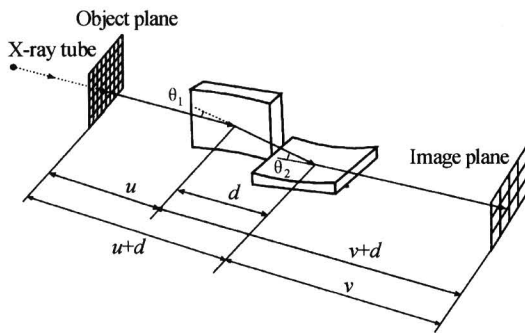


图 2 KB 型显微镜的物像关系

Fig. 2 Schematic diagram of KB microscope

$$1/u + 1/(v+d) = 1/f_1 \quad (1)$$

$$1/(u+d) + 1/v = 1/f_2 \quad (2)$$

式中 u 为物距, v 为像距, d 为 KB 镜沿光轴方向的长度, f_1 为子午面的焦距, f_2 为弧矢面的焦距. 根据掠入射球面镜成像的焦距公式 $f = R \sin(\theta) / 2$, 分别计算出子午面和弧矢面的掠入射工作角度分别为

$$\theta_1 = \arcsin(2f_1/R) \quad (3)$$

$$\theta_2 = \arcsin(2f_2/R) \quad (4)$$

为了加工方便, KB 型显微镜选用相同曲率半径 R 的球面镜.

综合考虑 ICF 成像实验的工作距离和成像尺寸的要求, 本文设计的 KB 型显微镜结构参量为: 物距 $u = 100$ mm, 放大率 $M = 8$, 工作能点 8 keV, 球面镜曲率半径 $R = 9700$, 两反射镜沿光轴方向的距离 $d = 10$ mm, 两块反射镜的掠入射角分别为 $\theta_1 = 1.052^\circ$, $\theta_2 = 1.143^\circ$.

KB 型显微镜作为倾斜非对称光学系统包含多种像差^[12], 主要有球差和像场倾斜. 其中球差对成像质量影响最为明显, KB 型显微镜的球差满足^[9]

$$S/M = 3d^2/8R \quad (5)$$

式中 S 为球差; d 为 KB 镜沿光轴方向的距离; M 为放大倍数. 由式(5)可见, KB 型显微镜的球差 S 与放大倍数 M 和反射镜长度的平方成正比, 与反射镜

曲率半径成反比. 为了获得较好分辨率的成像结果, 在 KB 型显微镜中通常使用较大曲率半径和较短的球面镜以减小球差, 设计 KB 型显微镜系统的球差最大值为 $S_m = 30 \mu\text{m}$.

根据设计参量, 采用光学追迹软件 ZEMAX 对 KB 型显微镜进行了性能模拟, 计算了不同视场的点列图, 见图 3 和调制传递函数, 见图 4.

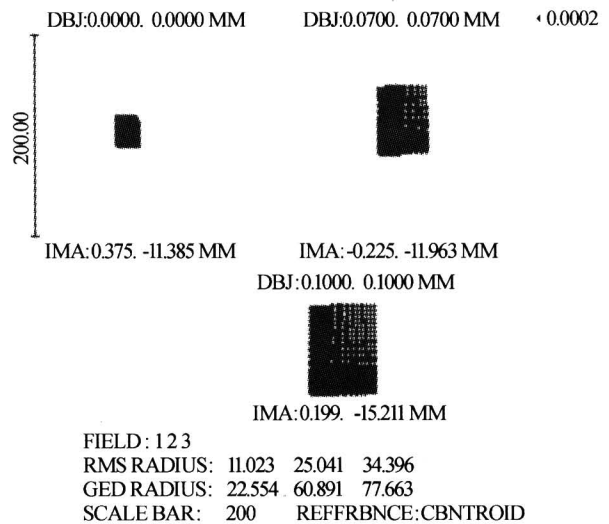


图 3 不同视场点列图

Fig. 3 Spot diagram of different fields of view

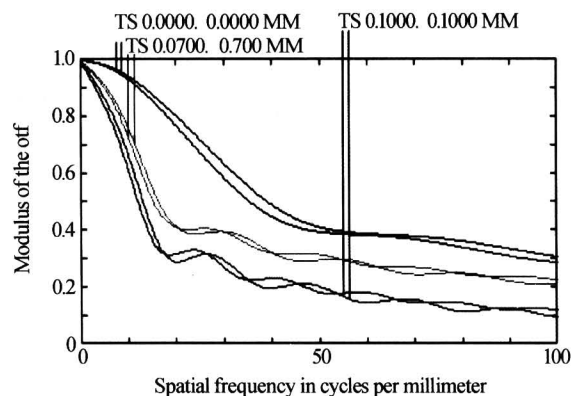


图 4 不同视场调制传递函数

Fig. 4 MTF of different fields of view

由图 3 和图 4 可知, 本文设计的 KB 型显微镜的中心视场可以达到小于 $2 \mu\text{m}$ 的空间分辨率, 在 $200 \mu\text{m} (\pm 100 \mu\text{m})$ 的视场范围内, 其空间分辨率优于 $10 \mu\text{m}$.

2 X 射线反射元件选择与制备

在 X 射线波段, 单层膜镀膜材料一般为金属, 如: 金、铱、镍等. 对 8 keV 的 X 射线, 单层膜反射镜的全反射角小于 0.7° , 不能满足本文设计的 KB 型显微镜的要求. 因此, 需采用 X 射线多层膜技术提高在较大掠入射角情况下反射镜的反射率. X 射线周期多层膜是在基片上交替镀制对 X 射线折射率不同的两种材料构成的. 根据布喇格公式 $\lambda =$

$2d\sin(\theta)$, 其中 λ 为 X 射线波长, d 为沉积多层膜的周期, θ 为掠入射角度, 周期多层膜可在以 θ 为中心角的一定角度范围内获得较高反射率. 在保持掠入射角不变的情况下, 随着 X 射线能量的增加, 周期多层膜的带宽逐渐减小. 当 X 射线能量增加到一定时, 周期多层膜的带宽很小, 无法满足 KB 型显微镜对多层膜带宽的要求. 非周期多层膜可以增加带宽, 已应用在一些 X 射线光学系统中^[13]. 通过特殊设计获得的非周期多层膜结构^[14], 可以使不同掠入射角的 X 射线在多层膜结构的不同位置得到反射, 从而拓展反射镜的反射带宽. 在多层膜设计和制备过程中, 镀膜材料的选取不仅要考虑在工作波段内不同材料的光学性能, 还要考虑多层膜的制备工艺和实验条件等因素. Yamamoto 等人^[15] 提出了一种选择镀膜材料的方法. 在 8 keV 能点处, W/B₄C 和 W/C 是经常采用的 X 射线多层膜的高低折射率材料对. 选取 W/B₄C 作为制备 KB 型显微镜 X 射线多层膜的材料对. 图 5 为在 8 keV 能点处设计的 40 层 W/B₄C 周期多层膜和非周期多层膜在 1.052° 和 1.143° 角度附近反射率计算结果.

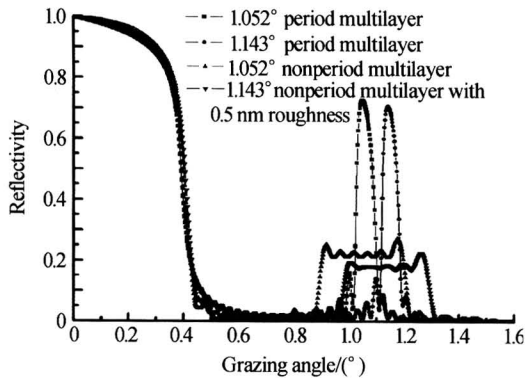


图 5 40 层 W/B₄C 周期多层膜和 X 射线非周期多层膜在 1.052° 和 1.143° 反射率比较
Fig. 5 Reflectivity comparison of 40 layers period and nonperiod W/B₄C multilayer at grazing incident angles 1.052° and 1.143°

由图 5 可知, X 射线非周期多层膜的反射带宽为 0.3°, 而周期多层膜反射带宽为 0.06°. 根据 KB 型显微镜的成像以及装调公差要求, 每个球面镜上需要有 0.2° 的反射带宽^[16], 因此, 采用周期多层膜无法达到, 只有采用非周期多层膜才能满足 X 射线 KB 型显微镜对反射带宽的要求. 在 Si 基片上, 采用磁控溅射镀膜方法, 制备了设计中心角度为 1.052° 和 1.143° 的 X 射线非周期多层膜. 制备实验完成后, 用 XRD 测量了非周期多层膜在 8 keV 能量下反射率随掠入射角度的变化关系(如图 6). 由图可以看出: X 射线非周期多层膜反射带宽为 0.3°, 在带宽范围内平均反射率超过 20%.

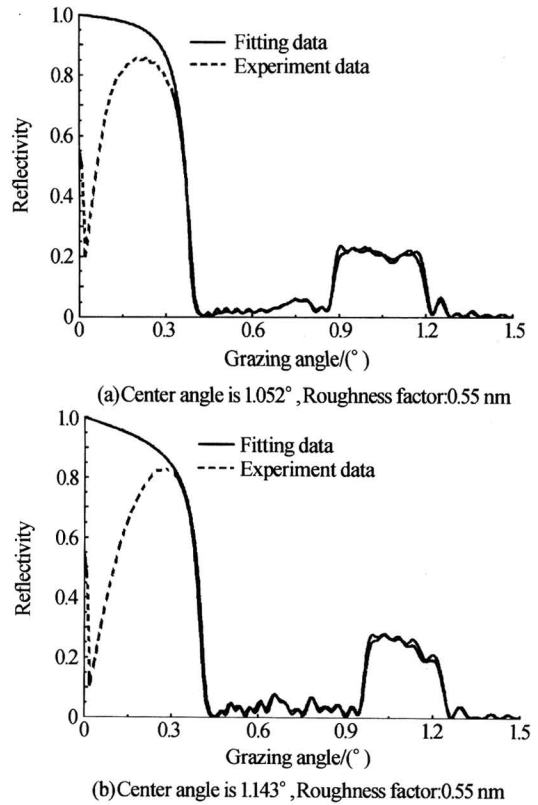


图 6 不同设计中心角度的 X 射线非周期多层膜反射率测量和拟合结果
Fig. 6 Measured and fitting reflectivity of nonperiod multilayer with different center angle

3 X 射线成像实验

在 KB 型显微镜的球面镜上完成非周期多层膜制作后, 进行了相应的 X 射线成像实验. 实验中采用了 Cu 靶 X 射线管, 对 100 μm 的 Cu 网格成像, 探测器为普通 X 射线胶片. 由于胶片灵敏度较低, 为了避免曝光时间过长和实验方便, 只使用了一个球面镜进行一维成像实验, 并且放大倍数较小, 相应的实验布局如图 7.

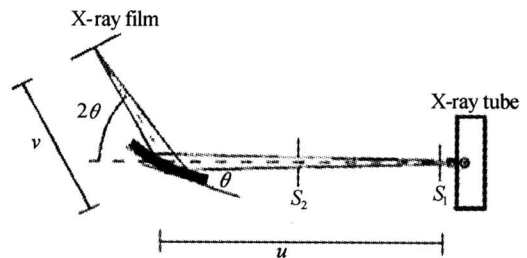


图 7 一维 X 射线成像实验
Fig. 7 Configuration of one dimension X-ray imaging system

在进行成像实验过程中, 球面镜的掠入射角为 1.052°. 根据焦距公式 $f = R\sin(\theta)/2$, 可得焦距为 89.05 mm, 当放大率 $M=1, u=v=178.09$ mm; $M=2, u=133.57$ mm, $v=267.13$ mm. 图 8 示出了相应的成像结果. 由图可以看出, 胶片上左边的单个曝光像是 X 射线没有经过球面镜反射直接打到胶片上

使胶片曝光产生的像,右边的像是 $100\ \mu\text{m}$ Cu 网格经球面镜反射成像的结果. 实验中,使用了狭缝光阑限制了入射 X 射线的宽度,因此在成像结果中只能看到两个栅条. 实验证明制作的非周期多层膜完全可以在 KB 型显微镜上使用.

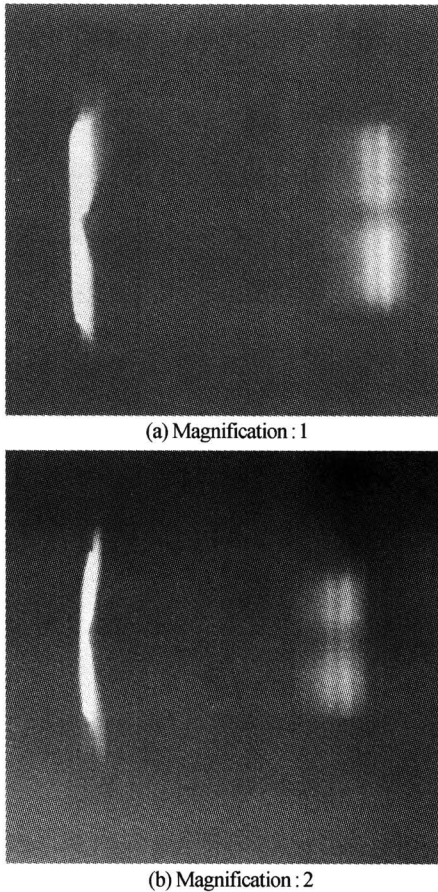


图 8 用球面镜进行成像实验获得的一维 X 射线像 ($100\ \mu\text{m}$ 网格)

Fig. 8 X-ray images of 100 microns grid with spherical mirror

4 结论

本文设计了 ICF 实验用 KB 型显微镜,其工作能点为 $8\ \text{keV}$. 采用 ZEMAX 光学软件进行该显微镜的性能模拟,结果表明,系统对轴上点的空间分辨率小于 $2\ \mu\text{m}$; $200\ \mu\text{m}$ 微米视场范围内的空间分辨率优于 $10\ \mu\text{m}$. 根据系统设计的要求,只有两个球面镜的中心工作角度分别为 1.052° 和 1.143° , 带宽 0.2° , 才能满足显微镜的成像要求,使用磁控溅射方法在两个球面镜上分别制备了平均反射率大于 20% , 带宽 0.3° 的 X 射线非周期多层膜. 用 X 射线管进行了一维 X 射线成像实验,得到放大倍数分别为 1 倍和 2 倍的一维 X 射线像,为今后采用两块反射镜的 X 射线 KB 型显微镜成像实验奠定了基础.

参考文献

- 王淦昌. 激光惯性约束核聚变(ICF)研究最新进展简述. 核科学与工程, 1997, **17**(3): 266~269
Wang G C. *Chinese Journal of Nuclear Science and Engineering*, 1997, **17**(3): 266~269
- 张家泰. 激光黑腔靶等离子体相互作用研究现状和发展趋势. 激光与光电子学进展, 2001, **(38)**(2): 1~11
Zhang J T. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2001, **38**(2): 1~11
- 王聪瑜, 刘志刚, 庞向阳, 等. ICF 靶场中光束口径与阵列间隔的研究. 光子学报, 2005, **34**(12): 1766~1768
Wang C Y, Liu Z G, Pang X Y, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(12): 1766~1768
- Haan S W. Onset of nonlinear saturation for Rayleigh-Taylor growth in the presence of a full spectrum of mode. *Phys Rev A*, 1989, **39**(11): 5812~5825
- 熊先才, 钟先信, 肖沙里, 等. 用于 X 射线时空分辨测量的弯晶谱仪. 光子学报, 2005, **34**(5): 722~725
Xiong X C, Zhong X X, Xiao S L, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2005, **34**(5): 722~725
- 丁耀南. 我国激光核聚变实验研究概述. 核物理动态, 1995, **12**(4): 21~26
Ding Y N. *Trends in Nuclear Physics*, 1995, **12**(4): 21~26
- 曹磊峰, 郑志坚, 丁永坤, 等. X 光环孔编码成像技术研究. 强激光与粒子束, 2003, **15**(8): 764~768
Cao L F, Zheng Z J, Ding Y K, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(8): 764~768
- Ress D, Lerche R A. Demonstration of an x-ray ring-aperture microscope for inertial-confinement fusion experiments. *Appl Phys Lett*, 1992, **60**(4): 410~412
- Kirkpatrick P, Baez A V. Formation of optical images by X-rays. *J Opt Soc Am*, 1948, **38**(9): 766~774
- Ellis R J, Trebes J E. Four-frame gated wolter X-ray microscope. *Rev Sci Instrum*, 1990, **61**(10): 2759~2761
- 江少恩, 刘忠礼, 郑志坚, 等. 惯性约束聚变实验中编码成像的反投影解码. 强激光与粒子束, 1999, **11**(2): 210~214
Jiang S E, Liu Z L, Zheng Z J, et al. *High Power Laser and Particle Beams*, 1999, **11**(2): 210~214
- 樊学武, 陈荣利, 马臻, 等. 偏心 and 倾斜光学系统初级象差理论的研究. 光子学报, 2004, **33**(4): 494~496
Fan X W, Chen L R, Ma Z, et al. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(4): 494~496
- Bridou F, Mercier R, Raynal A, et al. Large field double kirkpatrick - baez microscope with nonperiodic multilayers for laser plasma imaging. *Rev Sci Instrum*, 2002, **73**(11): 3789~3795

- 14 张众,王占山,秦树基,等. 宽角度 X 射线超反射镜的设计. 光子学报,2003,32(2):31~34
Zhang Z, Wang Z S, Qin S J, *et al.* *Acta Photonica Sinica*,2003,32(2):31~34
- 15 Yamamoto M, Namioka T. Layer-by layer design method for soft-X-ray multilayers. *Appl Opt*, 1992, 31 (10):1622~1630
- 16 Gu C S, Wang Z S, Wang F L, *et al.* Analyzing tolerance of grazing angle for hard X-ray kirkpatrick-baez microscopes. *Proc of SPIE*, 2006, 6024: 60242M-1 ~ 60242M-6

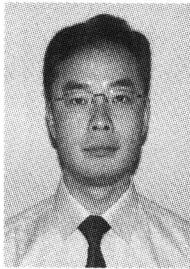
Imaging Research with Non-periodic Multilayers

Gu Chunshi, Wang Zhanshan** , Mu Baozhong, Wang Fengli, Zhang Zhong, Qin Shuji, Chen Lingyan
Institute of Precision Optical Engineering, Department of Physics, Tongji University, Shanghai 200092

Received date:2006-02-20

Abstract A grazing KB microscope was designed for hard X-ray (8 keV; Cu Ka radiation) imaging in ICF diagnostic experiments. Ray tracing software (ZEMAX) is used to simulate optical system performance. The best theoretical resolution of KB microscope is about 2 micron and better than 10 micron in 200 micron field of view. W/B₄C supermirror was deposited on the Si wafer substrate and the reflectivity was measured by X-ray diffraction instrument (XRD). The reflectivity of supermirror is about 20% in 0.3° bandwidth. 8keV Cu target X-ray tube source was used in x-ray imaging experiments and the magnification of 1× and 2× X-ray images are obtained.

Keywords KB microscope; X-ray non-periodic multilayer; X-ray imaging; Spatial resolution



Gu Chunshi was born in 1976. He received his BS degree from Tongji University in 1998, MS degree from Tongji University in 2003. Now he is a PhD student in Tongji University in physics department, institute of precision optic engineering. He is working in the field of x-ray optical system design and fabrication.