

文章编号:1004-4213(2010)12-2158-5

# KB 镜成像模拟以及与菲涅耳波带板成像的比较\*

王晶宇,陈鑫功,王晓方<sup>†</sup>

(中国科学技术大学 近代物理系;中国科学院基础等离子体物理重点实验室,合肥 230026)

**摘要:**采用坐标变换方法自编光线追迹程序模拟了 Kirkpatrick-Baez 镜在 X 射线波段的掠入射成像,获得了视场、分辨率等结果.比较了给定参量条件下 Kirkpatrick-Baez 镜与菲涅耳波带板两种高分辨 X 射线成像的特性,给出两者各自适用范围. Kirkpatrick-Baez 镜成像有比较高的系统效率,在视场中心的空间分辨能力可达  $0.71 \mu\text{m}$ ,但偏离视场中心  $\pm 200 \mu\text{m}$ ,空间分辨能力显著下降至  $6 \mu\text{m}$ ,适用于较小视场的成像.菲涅耳波带板成像不仅在视场中心可以实现  $0.39 \mu\text{m}$  的空间分辨能力,偏离视场中心达  $\pm 13 \text{mm}$ ,空间分辨能力也几乎不变,可实现大视场高分辨成像.

**关键词:**X 射线成像;Kirkpatrick-Baez 镜;菲涅耳波带板;空间分辨率;视场

**中图分类号:**O434.1

**文献标识码:**A

**doi:**10.3788/gzxb20103912.2158

## 0 引言

激光驱动惯性约束聚变(Inertial Confinement Fusion, ICF)研究中,通过对内爆压缩的靶丸等离子体进行高空间分辨 X 射线成像诊断,可以获得有关靶丸压缩的对称性、等离子体流体力学不稳定性等许多重要的物理信息.

常用的 X 射线空间成像诊断系统有 X 射线针孔相机<sup>[1]</sup>, Kirkpatrick-Baez(KB)镜. X 射线针孔相机由于结构简单,使用方便,成本低等特点,在 ICF 实验研究中得到了广泛的应用.但由于几何效应限制,空间分辨率与针孔的直径相当,最高在  $5 \mu\text{m}$  左右,且收集立体角较小.

KB 镜是 1948 年由 Kirkpatrick 和 Baez 首创的<sup>[2]</sup>,是采用掠入射方式实现 keV 能段 X 射线成像的一种典型成像系统.与 X 射线针孔相机相比,KB 镜有较大的收集立体角,且容易实现多道成像,已成为 ICF 研究中重要的空间成像诊断工具.例如在 Nova 装置上对状态方程的测量<sup>[3]</sup>,以及在 OMEGA 装置上对直接驱动平面靶流体力学不稳定性的研究等等<sup>[4-5]</sup>,获得了  $2\sim 3 \mu\text{m}$  的高空间分辨<sup>[6-7]</sup>.但是,受掠入射像差等影响,空间分辨能力和视场相应受到限制.

在 X 射线高分辨成像方法中,菲涅耳波带板(Fresnel Zone Plate, FZP)成像采用正入射方式,通过衍射原理实现高空间分辨成像,在 X 射线显微术

中获得了广泛应用<sup>[8]</sup>.近年来日本、法国开展了将 FZP 应用于 ICF 研究中 X 射线成像诊断的初步实验.日本大阪大学激光工程研究所在研究瑞利-泰勒不稳定性实验中,对 FZP 的分辨能力进行了测试,获得了高空间分辨的 X 射线像,分辨能力接近  $2 \mu\text{m}$ <sup>[9]</sup>.作者对 FZP 的成像进行了理论分析<sup>[10]</sup>,由于 FZP 克服了像差,在大视场范围的空间分辨能力接近衍射极限.

对于 KB 镜与 FZP 这两种高空间分辨 X 射线成像技术,成像原理以及限制空间分辨能力的原因各不同,因此成像特性也有区别.本文采用坐标变换方法自编程序模拟了 KB 镜在 X 射线波段的掠入射成像,获得了视场、分辨率等结果.并通过与具有相同收集立体角的 FZP 成像特性进行比较,给出两者各自特点及适用条件.

## 1 KB 镜的成像原理

如图 1 所示,KB 镜由两块正交的球面镜组成.对于单个球面反射镜,例如图 1 中第一块球面镜,在近轴条件下,子午面(图 1 中  $xz$  面)和弧矢面( $xy$  面)内的成像分别满足<sup>[2]</sup>

$$1/t' + 1/u = 2/rsin\theta \quad (1)$$

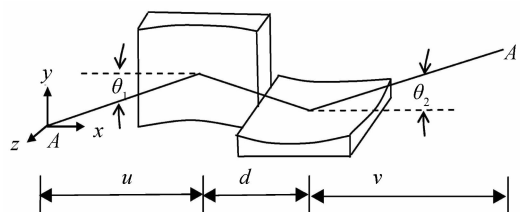


图 1 KB 镜成像示意图

Fig. 1 Schematic diagram of KB mirror imaging

\* 国家高技术研究发展计划(2008AA8041206)和中国科学院知识创新工程(KJ9X2-YW-N28、KJ9X2-YW-N36)资助

<sup>†</sup> Tel:0551-3600787

Email:wang1@ustc.edu.cn

收稿日期:2010-05-10

修回日期:2010-09-02

$$1/s' + 1/u = (2\sin\theta)/r \quad (2)$$

式中  $u$  为物距,  $t'$ 、 $s'$  分别为子午面和弧矢面内的像距,  $r$  为球面镜曲率半径,  $\theta$  为掠入射角. 单个球面镜的子午焦距和弧矢焦距分别为  $(r\sin\theta)/2$ 、 $r/2\sin\theta$ , 它们的比值为  $\sin^2\theta$ . 在掠入射情况下, 两者差别非常大, 由此可以看出单个球面镜在掠入射的情况下存在严重像散, 只能在一个方向聚焦.

图 1 中, 如果在单个球面镜后方, 与之垂直放置第二块球面镜, 可以校正单个球面镜在掠入射情况下存在的严重像散. 组成的 KB 镜系统能够对 X 射线实现二维成像. 这种情况下, 系统在子午面和弧矢面的成像关系满足

$$1/u + 1/(v+d) = 2/R\sin\theta_1 \quad (3)$$

$$1/(u+d) + 1/v = 2/R\sin\theta_2 \quad (4)$$

式中  $v$  为像距,  $d$  为球面反射镜沿  $x$  轴方向长度,  $R$  为反射镜曲率半径,  $\theta_1$ 、 $\theta_2$  分别为第一块反射镜子午方向和第二块反射镜子午方向的掠入射角. 通过选择合适的掠入射角  $\theta_1$  和  $\theta_2$ , 可以使系统的子午像面与弧矢像面重合, 从而消除像散.

KB 镜虽然校正了像散, 但球差等像差依然存在. 其中, 轴上点光源在子午面内像的球差由式 (5) 给出<sup>[2]</sup>

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

式中  $M$  为放大率, 若取  $M=8$ ,  $d=1$  cm,  $R=20$  m, 则  $S=15$   $\mu\text{m}$ . 而对于波长为 0.275 nm (注: Ti 的  $K_\alpha$  线波长) 的 X 射线, 衍射限制的分辨极限约 0.3  $\mu\text{m}$ . 因此, 系统的球差要大得多. 对于像差超过衍射极限几倍或几倍以上的成像系统, 可用光线追迹方法来模拟分析成像以及评价像质.

## 2 光线追迹计算方法

从点光源发出的光线照射到反射镜上, 这些光线经过反射镜反射后与成像面相交成一系列点, 形成一个弥散斑的像. 由于每条光线代表相同的光能

量, 弥散斑中点密度就代表像的光能量集中度. 类似文献[11], 本文定义系统的空间分辨率为包含 68% 能量的弥散斑直径.

以单个球面反射镜为例, 介绍本文所采用的光线追迹计算方法. 如图 2 所示, 以球面反射镜的中心

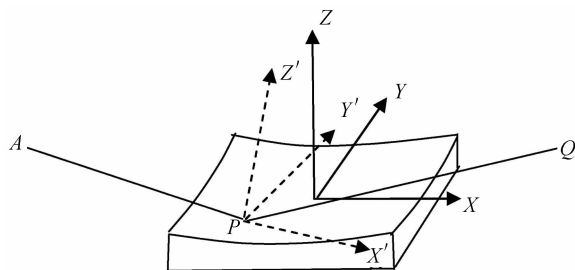


图 2 球面反射镜成像及坐标

Fig. 2 Schematic diagram of a spherical mirror imaging and the coordinates

作为坐标原点, 球面在原点处的切面法线为  $Z$  轴,  $Y$  轴垂直于纸面指向纸内, 建立坐标系  $V$ . 从点光源  $A$  点发出的光线入射到球面镜表面任意一点  $P(c, w, l)$ . 以反射镜在  $P$  点的切面法线作为  $Z'$  轴, 建立坐标系  $V'$ . 两坐标系的关系为:  $X'$  轴与  $X, Y, Z$  轴的夹角分别为  $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ ,  $Y'$  轴与  $X, Y, Z$  轴的夹角分别为  $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ ,  $Z'$  轴与  $X, Y, Z$  轴的夹角分别为  $\alpha_3, \beta_3, \gamma_3$ . 首先, 求出入射光线  $AP$  在坐标系  $V$  中的方向余弦  $\cos\alpha, \cos\beta, \cos\gamma$ ,  $AP$  的直线方程为

$$(x-c)/\cos\alpha = (y-w)/\cos\beta = (z-l)/\cos\gamma \quad (6)$$

将  $AP$  变换到  $V'$  坐标系, 得出  $AP$  在  $V'$  坐标系的方向余弦  $\cos\alpha^*, \cos\beta^*, \cos\gamma^*$

$$\begin{cases} \cos\alpha^* = \cos\alpha_1 \cos\alpha + \cos\beta_1 \cos\beta + \cos\gamma_1 \cos\gamma \\ \cos\beta^* = \cos\alpha_2 \cos\alpha + \cos\beta_2 \cos\beta + \cos\gamma_2 \cos\gamma \\ \cos\gamma^* = \cos\alpha_3 \cos\alpha + \cos\beta_3 \cos\beta + \cos\gamma_3 \cos\gamma \end{cases} \quad (7)$$

在  $V'$  坐标系中,  $AP$  的反射光线  $PQ$  的方向余弦为:  $\cos\alpha'' = -\cos\alpha^*, \cos\beta'' = -\cos\beta^*, \cos\gamma'' = -\cos\gamma^*$ . 然后将  $PQ$  变换到  $V$  坐标系, 得到  $PQ$  在  $V$  坐标系的方向余弦  $\cos\alpha', \cos\beta', \cos\gamma'$

$$\begin{cases} \cos\alpha' = (2\cos^2\alpha_3 - 1)\cos\alpha + 2\cos\alpha_3 \cos\beta_3 \cos\beta + 2\cos\alpha_3 \cos\gamma_3 \cos\gamma \\ \cos\beta' = 2\cos\alpha_3 \cos\beta_3 \cos\alpha + (2\cos^2\beta_3 - 1)\cos\beta + 2\cos\beta_3 \cos\gamma_3 \cos\gamma \\ \cos\gamma' = 2\cos\alpha_3 \cos\gamma_3 \cos\alpha + 2\cos\beta_3 \cos\gamma_3 \cos\beta + (2\cos^2\gamma_3 - 1)\cos\gamma \end{cases} \quad (8)$$

反射光线  $PQ$  在  $V$  坐标系中的直线方程为

$$(x-c)/\cos\alpha' = (y-w)/\cos\beta' = (z-l)/\cos\gamma' \quad (9)$$

通过式 (9) 可计算出反射光线  $PQ$  与成像面的交点坐标, 单条光线的追迹计算完成.

对于 KB 镜, 在计算光线经过第一块球面镜反射后与第二块球面镜的交点, 再按照同样方法计算该光线经第二块反射镜反射后与成像面的交点, 单

条光线的追迹计算才完成.

## 3 结果与讨论

### 3.1 KB 镜成像的空间分辨率与视场

在 X 射线波段, 材料的折射率小于 1, 因此当 X 射线以比较小的掠入射角从真空入射到材料表面时会发生全反射. 全反射的临界角为<sup>[2]</sup>

$$\theta_c = (eh/E) \sqrt{NZ/\epsilon_0 m_e} \quad (10)$$

式中  $m_e$  和  $e$  分别为电子的质量和电荷,  $N$  为材料的原子数密度,  $Z$  为核电荷数,  $E$  为光子能量,  $\epsilon_0$  为真空介电常数,  $\hbar = h/2\pi$ ,  $h$  为普朗克常量. 对于膜材料为 Au 的反射镜, 波长为 0.275 nm 的 X 射线对应的全反射临界角为  $1.018^\circ$ . 本文选取 KB 镜工作的掠入射角为  $\theta_1 = 0.800^\circ$ ,  $\theta_2 = 0.833^\circ$ . KB 镜由两块曲率半径相同, 几何尺寸同样大小的球面反射镜组成, 参量设置如表 1. 其中,  $\Omega$  为 KB 镜的实际收集立体角.

表 1 KB 镜参量

Table 1 Parameters of the KB mirror

$R/m$	$d/cm$	$\theta_1/(^\circ)$	$\theta_2/(^\circ)$	$u/mm$	$M$	$\Omega/Sr$
20	0.7	0.800	0.833	154	10	$4 \times 10^{-7}$

图 3 给出了 KB 镜的分辨率随 Y 方向和 Z 方向视场的变化曲线. KB 镜在视场中心处的空间分辨率为  $0.71 \mu m$ . 在 Z 方向  $\pm 200 \mu m$  视场内分辨率好于  $6.3 \mu m$ , 在 Y 方向  $\pm 200 \mu m$  视场内分辨率好于  $5.6 \mu m$ . 这些结果与相近 KB 镜参量条件下的实验结果<sup>[5]</sup>相比较, 两者接近. KB 镜的像差随着光源偏离视场中心的距离增大而增大<sup>[7]</sup>, 使得 KB 镜的分辨能力随视场的增大近似线性地降低, 限制了其有效视场. 从图 3 可见, 这样的 KB 镜较适合于几百  $\mu m$  视场范围的成像.

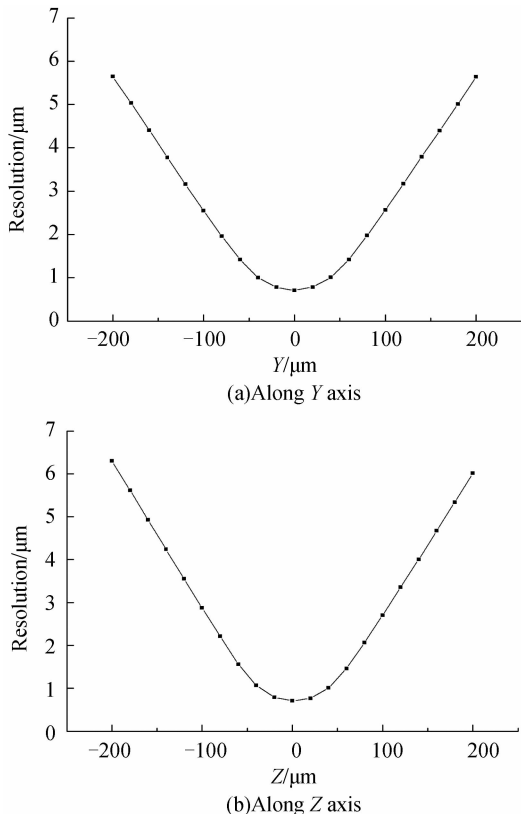


图 3 KB 镜的分辨率随物方位置的变化  
Fig. 3 Spatial resolution of the KB mirror with the object position

### 3.2 KB 镜与 FZP 成像的比较

有关 FZP 成像原理以及模拟方法, 可以参考文献<sup>[10]</sup>, 在这里不再赘述. FZP 的参量列于表 2 中. 其中, 制作 FZP 的材料 MA 为金, 厚度为  $H$ , FZP 的总环数为  $N$ , 最外环直径为  $D$ , 最外环宽度为  $\Delta r$ .  $u$  为物距,  $M$  为放大率,  $\Omega$  为收集立体角.  $\lambda$  为入射 X 射线波长,  $f$  为 FZP 对于该波长的主焦距.

表 2 FZP 参量

Table 2 Parameters of the FZP

MA	$D/\mu m$	$H/nm$	$\Delta r/\mu m$	$N$	$u/mm$	$M$	$\Omega/Sr$	$\lambda/nm$	$f/mm$
Au	140	900	0.35	100	196	10	$4 \times 10^{-7}$	0.275	178

图 4 给出 FZP 的成像示意图.  $A'$  为点光源  $A$  经过 FZP 成的像. 图中 X 轴即 FZP 的光轴, Y、Z 轴均垂直于 X 轴, 并互相垂直. 由于 FZP 半波带环的对称结构, 只需考虑点光源在物面上沿一个方向, 例如 Y 轴正方向移动时分辨率(半高全宽度)的变化. 图 5 给出放大倍数  $M=10$  的情况下, FZP 的分辨率随视场变化的曲线. 从图 5 中可以得到, FZP 在视场中心(光轴或 X 轴上)的分辨率为  $0.39 \mu m$ , 在偏离光轴小于 13 mm 的视场范围内, 分辨率仍好于  $0.43 \mu m$ .

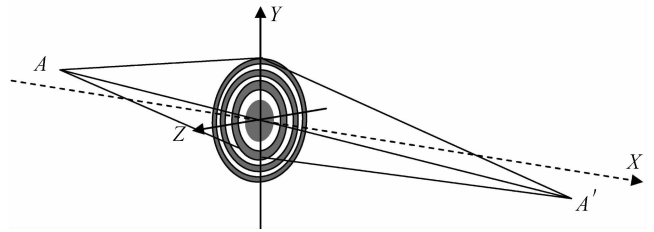


图 4 FZP 成像示意图  
Fig. 4 Schematic diagram of the FZP imaging

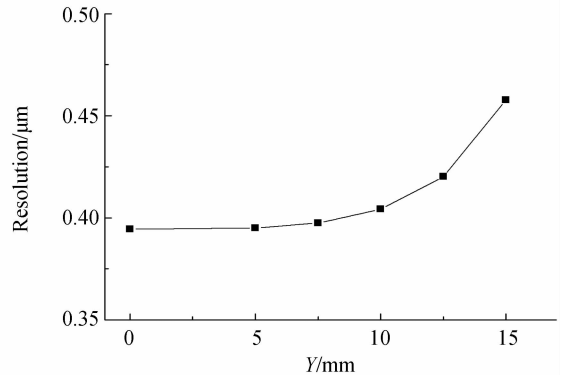


图 5 FZP 的分辨率随物方位置的变化曲线  
Fig. 5 Spatial resolution of the FZP with the object position

比较 KB 镜和 FZP 成像结果得到, FZP 的空间分辨率明显高于 KB 镜. 这是因为 KB 镜成像的分辨能力受球差等几何像差的限制; 而 FZP 由于采用正入射, 避免了像差, 成像的分辨率可以接近衍射分辨极限. 此外, KB 镜的分辨率随着视场范围增大到几百微米而迅速降低, 而 FZP 在  $\pm 13 \text{ mm}$  视场范围

内分辨率几乎不变. 这表明 KB 镜适合较小视场的成像, 而 FZP 可应用于较大视场成像, 例如 10 mm 尺度聚变点火靶的高空间分辨成像<sup>[10]</sup>. 因此, 在要求更高空间分辨、更大视场的 X 射线成像研究中, FZP 将具有独特的作用.

对于表面镀 Au 反射层的单球面反射镜, 当掠入射角为  $\theta_1$  或者  $\theta_2$  时, 0.275 nm 波长 X 射线的反射率约为 50%<sup>[12]</sup>, KB 镜的系统总反射率即 25%. 若将反射层材料换为 Ir, 则单球面镜反射率可提高到 60%, 系统总反射率达到 36%. 而对于同一 X 射线波长, 模拟计算得到 FZP 成像的效率约为 18%. 在具有相同收集立体角的情况下, 镀 Ir 反射层的 KB 镜系统效率约为 FZP 的二倍. 若将镀 Ir 反射层的 KB 镜掠入射角调整到  $0.4^\circ$  左右, 则单球面镜反射率可增加至 80%, 系统效率可达 64%, 是 FZP 的三倍多. 这表明 KB 镜也更适合于较弱光源的成像诊断.

#### 4 结论

本文利用自编程序模拟了 KB 镜在 X 射线波段掠入射成像的特性, 获得了视场、分辨率等结果. 对于本文的有关 KB 镜参量, 中心视场区的空间分辨率约  $0.71 \mu\text{m}$ . 随着偏离视场中心的增加, 分辨率显著下降. 在  $400 \mu\text{m}$  视场内分辨率好于  $6.3 \mu\text{m}$ . KB 镜成像具有较高效率. 因此, 较适合于较小视场和弱光源的高分辨 X 射线成像. 与之相比较, FZP 成像效率相对较低, 但是在 26 mm 较大视场范围都可获得好于  $0.43 \mu\text{m}$  的高分辨成像. 因此, 较适合大视场范围或更高分辨要求的 X 射线成像.

#### 参考文献

- [1] 项志遒, 俞昌旋. 高温等离子体诊断技术(下册)[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1982: 206-207.
- [2] KIRKPATRICK P, BAEZ A V. Formation of optical images by X-rays[J]. *JOSA*, 1948, **38**(9): 766-774.
- [3] COLLINS G W, Da SILVA L B, CELLIERS P, *et al.* Measurements of the equation of state of deuterium at the fluid insulator-metal transition[J]. *Science*, 1998, **281**(5380): 1178-1181.
- [4] GOTCHEV O V, JAANIMAGI P A, KNAUER J P, *et al.* High-throughput, high-resolution Kirkpatrick-Baez microscope for advanced streaked imaging of ICF experiments on OMEGA[J]. *Rev Sci Instrum*, 2003, **74**(3): 2178-2181.
- [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]. *Phys Plasmas*, 1998, **5**(4): 1118-1124.
- [6] MARSHALL F J, BENNETT G R. A high-energy x-ray microscope for inertial confinement fusion [J]. *Rev Sci Instrum*, 1999, **70**(1): 617-619.
- [7] MU Bao-zhong, WANG Zhan-shan, YI Sheng-zhen, *et al.* Study of X-ray Kirkpatrick-Baez imaging with single layer [J]. *Chinese Optics Letters*, 2009, **7**(5): 452-454.
- [8] 阿特伍德 D. 软 X 射线与极紫外辐射的原理和应用[M]. 张杰, 译. 北京: 科学出版社, 2003: 363-369.
- [9] AZECHI H, TAMARI Y, SHIRAGA H. Fresnel phase zone plate for Rayleigh-Taylor instability and implosion diagnostics [R]. Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2003: 100-103.
- [10] WANG Xiao-fang, WANG Jing-yu. Analysis of high-resolution X-ray imaging of an ICF target by using a Fresnel zone plate[J]. *Acta Physica Sinica*, (accepted). 王晓方, 王晶宇. 非涅耳波带板应用于聚变靶的高分辨 X 射线成像分析[J]. 物理学报, (已录用).
- [11] ZHAO Ling-ling, SUN De-lin, HU Jia-sheng. Installation and adjustment of KBA X-ray microscope[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2009, **21**(3): 369-372. 赵玲玲, 孙德林, 胡家升. KBA X 射线显微镜装调方法研究[J]. 强激光与粒子束, 2009, **21**(3): 369-372.
- [12] HENKE B L, GULLIKSON E M, DAVIS J C. X-ray interactions: photoabsorption, scattering, transmission, and reflection at E=50-30000 eV, Z=1-92[J]. *Atomic Data and Nuclear Data Tables*, 1993, **54**(2): 181-342.

## Kirkpatrick-Baez Mirror Imaging Simulation and Comparison with Fresnel Zone Plate Imaging

WANG Jing-yu, CHEN Xin-gong, WANG Xiao-fang

(*Department of Modern Physics; CAS Key Laboratory of Basic Plasma Physics,  
University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

**Abstract:** The imaging characteristics of a Kirkpatrick-Baez (KB) mirror were studied using a home-developed code. The numerical recipe of the code was based on coordinate transformation of ray tracing. The spatial resolution and the field of view were obtained. For given parameters, the properties of the KB mirror imaging were compared to that of a Fresnel zone plate (FZP), and the application range of the two imaging techniques was given. The KB mirror has a relatively high efficiency. Its spatial resolution is  $0.71 \mu\text{m}$  in the centre of the field of view, but decreases to  $6 \mu\text{m}$  as the object position deviates from the field-of-view center by  $\pm 200 \mu\text{m}$ , thus it is suitable for small field-of-view imaging. The FZP can realize a higher spatial resolution up to  $0.39 \mu\text{m}$  and the resolution almost unchanges within  $\pm 13 \text{ mm}$  field of view, which can be applied to large field-of-view, high-resolution X-ray imaging.

**Key words:** X-ray imaging; Kirkpatrick-Baez (KB) mirror; Fresnel Zone Plate (FZP); Spatial resolution; Field of view



**WANG Jing-yu** was born in 1983. Now he is pursuing the M. S. degree in plasma physics at Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, and his research interests focus on high resolution X-ray imaging.



**WANG Xiao-fang** was born in 1967, and received his Ph. D. from Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences in 1993. Now he is a professor at University of Science and Technology of China, and his research interests focus on plasma physics and related diagnostics.