

文章编号 1004-924X(2017)11-2872-06

基于单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜表征光源参数

王亚冰^{1,2}, 朱 玉^{1,2}, 孙天希^{1,2*} 孙学鹏²,
刘志国^{1,2}, 李坊佐^{1,2}, 姜博文^{1,2}, 张晓芸^{1,2}, 张丰收^{1,2}
(1. 北京师范大学 核科学与技术学院, 北京 100875;
2. 北京市辐射中心, 北京 100875)

摘要: 为了正确表征 X 射线光源参数, 本文利用单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜, 设计了一种测量 X 射线光源焦斑尺寸和焦深的方法。该方法利用椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜具有单次全反射成像能力的特点, 对多个已知焦斑尺寸的多毛细管 X 光透镜模拟光源的焦斑成像尺寸和椭球聚焦镜的面形误差进行表征, 从而确定光源焦斑尺寸和经过椭球聚焦镜后的焦斑成像尺寸以及椭球聚焦镜的面型误差之间的通用数学关系。然后, 通过分析待测光源焦斑经过椭球聚焦镜所成像的尺寸来得到被测量光源的焦斑尺寸。利用该法也同样可以得到光源焦深的大小。为了验证设计方法的可行性, 测量了实验室微焦斑 X 射线光源的焦斑和焦深参数。测试显示: 对于焦斑直径约为 50 μm 、焦深约为 20 mm 的光源, 文中方法得到的算术平均值标准偏差分别为 1.5 μm 和 0.7 mm。结果表明: 本文设计的光源参数表征方法可以实现对微焦斑源焦斑尺寸和焦深的同时测量, 在 X 射线源的研制和应用领域具有潜在应用。

关键词: 单次全反射椭球单玻璃管; X 射线聚焦镜; X 射线光源; 焦斑尺寸; 焦深

中图分类号: O434.12 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20172511.2872

Determination of parameters of X-ray source based on single-bounce ellipsoidal monocapillary X-ray condenser

WANG Ya-bing^{1,2}, ZHU Yu^{1,2}, SUN Tian-xi^{1,2*}, SUN Xue-peng²,
LIU Zhi-guo^{1,2}, LI Fang-zuo^{1,2}, JIANG Bo-wen^{1,2}, ZHANG Xiao-yun^{1,2}, ZHANG Feng-shou^{1,2}

(1. College of Nuclear Science and Technology,
Beijing Normal University, Beijing 100875, China;
2. Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)
* Corresponding author, E-mail: stx@bnu.edu.cn

Abstract: To exactly characterize X-ray light resource parameters, a measuring method for the focal spot size and focal depth of an X-ray source was proposed by using a single-bounce ellipsoidal monocapillary X-ray condenser (SBEMXRC). The SBEMXRC was a kind of X-ray reflective imaging

收稿日期: 2017-05-23; **修订日期:** 2017-06-26.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 11675019); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目 (No. 2014KJJCA03); 北京市科学技术研究院萌芽计划资助项目 (No. 201712)

optics and characterized by its single total reflection imaging capability. The universal relationship among the focal spot size of the X-ray source, image size of focal spot of the X-ray source and the slope errors of the SBEMXRC was determined by the X-ray sources with known spot sizes simulated by a polycapillary X-ray lens. The focal spot size of the X-ray source with a unknown spot size was accordingly obtained by analyzing image size of the focal spot. The focal depth of the X-ray source could also be measured by the designed method. To verify the feasibility of the designed method, the spot size and the focal depth of a microfocus X-ray source in our lab were measured. The experimental results show that the arithmetic mean standard deviations of the measurement are $1.5 \mu\text{m}$ and 0.7 mm for the X-ray source with a spot size about $50 \mu\text{m}$ and a focal depth about 20 mm , respectively. The results demonstrate that the focal spot size and focal depth of the X-ray source could be simultaneously measured with the designed method. This method has potential applications in the field of X-ray sources.

Key words: single-bounce ellipsoidal monicapillary X-ray condenser; X-ray sources; focal spot size and focal depth of X-ray source

1 引 言

X 射线光源在促进 X 射线科学与技术发展的进程中扮演着重要的角色。如何准确高效地表征光源焦斑尺寸(光源发光区域的大小)和焦深(X 射线发射区到光源铍窗出口处的距离)等参数,对促进 X 射线科学与技术的发展至关重要^[1-3]。测量 X 射线光源焦斑尺寸的传统方法小孔成像在测量 X 射线光源尺寸时,小孔的直径应该小于光源的焦斑尺寸,否则小孔效应会影响测量结果的准确性^[4]。同时,为了提高小孔成像的空间分辨率以提高光源焦斑尺寸测量精度,小孔的直径也应该越小越好。但是,对于焦斑尺寸在微米量级或者更小的 X 射线光源而言,很难通过小孔成像的方法准确地测得其焦斑尺寸,这是因为 X 射线具有较强的穿透能力,从而导致很难制造出直径小于该类光源焦斑尺寸的小孔。对于高能量的微焦斑 X 射线源,更是如此^[5-7]。测量光源焦深的方法通常是采用小孔扫描法^[8],但该扫描方法同样要求小孔的直径应该小于 X 射线光源的焦斑尺寸,这是因为该小孔扫描方法是建立在小孔成像测量焦斑尺寸方法之上的。同时,在利用这种小孔扫描法测量焦深时,需要一个繁琐的光源和小孔之间相对位置发生变化的扫描过程。为了克服小孔成像方法在测量 X 射线光源焦斑尺寸时的弊端,有人提出了利用多毛细管准直

器或者狭缝的方法测量光源的尺寸^[5-7],因为利用多毛细管准直器或者狭缝测量光源焦斑尺寸的技术不需要小孔装置,所以,可以较方便地用于微焦斑 X 射线光源的焦斑尺寸表征。但利用多毛细管准直器或者狭缝这些技术测量光源的焦深时,均存在较大困难。

为了克服上述有关测量 X 射线源的焦斑和焦深方法的局限性,本文介绍了一种利用单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜测量光源焦斑和焦深的方法。该种椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜^[9-12]与多毛细管 X 射线聚焦镜^[13]以及多毛细管准直器^[6-7]的工作原理相同,都是基于 X 射线的全反射原理,但椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜是一次全反射光学器件,后面两种多毛细管器件一般是多次全反射光学器件。单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜的焦斑尺寸和光源的焦斑尺寸有关,所以,可以通过测量椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜的焦斑尺寸来获得 X 射线光源的大小。同时,可以通过椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜的入口焦距测定光源的焦深。在利用椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜测量光源焦深时,避免了前文提到的使用小孔测量焦深方法中的繁琐扫描过程。

2 测量原理

2.1 光源焦斑尺寸测量原理

对于理想的单次全反射椭球单玻璃管 X 射

线聚焦镜而言,其内表面光滑且严格符合椭球形状。根据 X 射线的几何光学原理^[14],以一个体长无限小的理想椭球反射面为例说明其会聚 X 射线的特点(如图 1):光源和成像位置分别位于垂直于椭球长轴且经过椭球两焦点的焦平面上,光源上一点 (x_s, y_s) 和对应成像位置的点 (x_i, y_i) 存在以下关系:

$$\begin{aligned} x_i &= -M(x_s \cos 2\varphi + y_s \sin 2\varphi), \\ y_i &= M(y_s \cos 2\varphi - x_s \sin 2\varphi), \end{aligned} \quad (1)$$

其中 $M=F_2/F_1$,其余参数见图 1。

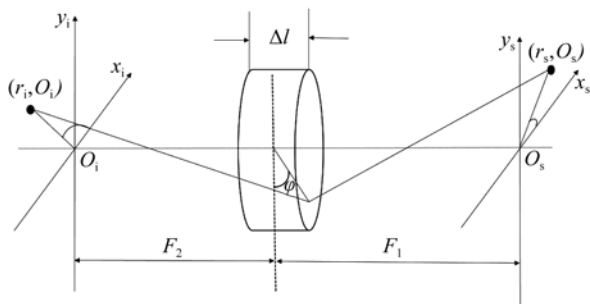


图 1 单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜会聚 X 射线的示意图

Fig. 1 Sketch of focusing X-rays by a single-bounce ellipsoidal moncapillary X-ray condenser

由于:

$$x_{s,i} = r_{s,i} \cos \theta_{s,i}, \quad (2)$$

$$y_{s,i} = r_{s,i} \sin \theta_{s,i}, \quad (3)$$

所以光源点和成像点关系可以表示为:

$$r_i = M r_s, \theta_i = \pi - (\theta_s - 2\varphi). \quad (4)$$

由公式(4)可以看出, X 射线光源的焦斑在椭球反射面的成像平面上对应的像(聚焦镜焦斑)的尺寸与缩放倍数 M (在图 2 中, M 可近似写成 $(F_0 + 0.5 \times L_c)/(L + 0.5 \times L_c)$ ^[16], L_c 是聚焦镜体长)有关; $M < 1$ 时,椭球反射面镜起到缩小作用; $M > 1$ 时,椭球反射面镜起到放大作用。对于实际研制的单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜而言,由于其内表面很难做到严格符合椭球形状,所以在实际成像过程中,还要考虑面型误差在成像过程中所带来的影响,聚焦镜的实际焦斑尺寸 φ 和光源焦斑尺寸 σ 以及椭球单玻璃管聚焦镜的相关参数的关系如下^[14-15]:

$$\varphi^2 = K F_0^2 \left\{ \frac{\sigma^2}{L^2} + \alpha^2 \right\}, \quad (5)$$

其中: α 是椭球聚焦镜的平均面型误差, K 是比例系数, F_0 是成像平面(聚焦镜的会聚焦斑)到聚焦镜出口的距离, L 是光源到聚焦镜入口的距离(如图 2)。

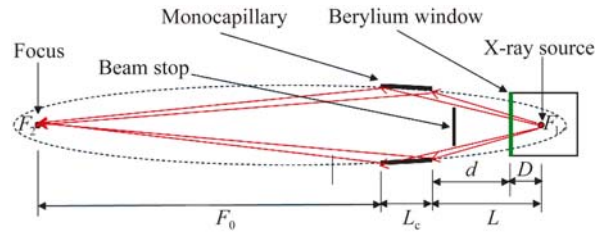


图 2 单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜会聚 X 射线的示意图

Fig. 2 Sketch of apparatus for focusing X-rays by a single-bounce ellipsoidal moncapillary X-ray condenser

由公式(5)可以得出,通过测量确定平均面型误差 α 和比例系数 K 后,即可根据椭球聚焦镜所成像(所会聚的焦斑)的尺寸推算出光源尺寸。另外,由图 2 可以看出,椭球聚焦镜是可以采用不同缩放倍数 M 进行放置,即光源焦斑与其像(单毛细管聚焦镜的焦斑)的位置是可以互换的。对于不同焦斑尺寸的光源,可以采用不同缩放倍数 M 的椭球聚焦镜进行成像测量,对于小焦斑光源,采用 $M > 1$ 的聚焦镜布局,更容易实现对成像光斑尺寸的测量。

2.2 光源焦深测量原理

如图 2 所示,光源焦深 D 对于一般的实验室 X 射线光源而言,定义为发射 X 射线的位置(譬如阳极丝等)到光源铍窗的距离。毛细管 X 射线会聚光学器件的特点之一是具有特定的入口焦距,当光源的发光点位于该类器件的入口焦距处,器件的传输效率最高。作为一种特殊的毛细管 X 射线会聚光学器件,单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜也不例外:当光源的发光点(即:光源焦斑)位于椭球聚焦镜的一个焦点 F_1 时,该聚焦镜的传输效率最高,经过其聚焦得到的 X 射线束的强度最高。从而可以根据其会聚 X 射线束的强度是否达到最高,来判定光源的发光点是否被调节到椭球聚焦镜的焦点 F_1 处,即入口焦距 L 处。当光源发光点被调节在椭球聚焦镜的

一个焦点 F_1 处时,由于椭球聚焦镜焦点 F_1 到聚焦镜入口的距离 L 是已知的,所以,可以通过测量光源铍窗到聚焦镜入口的距离 d ,算出光源发光点到铍窗的距离 D ,即光源的焦深。

3 实 验

3.1 测量比例系数 K

如图 3 所示,实验中利用多毛细管 X 射线聚焦镜的出口焦斑模拟 X 射线光源:将 Cu 靶光源 (MCBM 50-0,6B Cu) 发出的 X 射线,经多毛细管 X 射线聚焦镜会聚到该透镜焦斑处,则可以将该透镜的焦斑视为是一个 X 射线源。分别选用多个具有不同焦斑的多毛细管 X 射线聚焦镜,可以得到具有不同焦斑尺寸的 X 射线源。

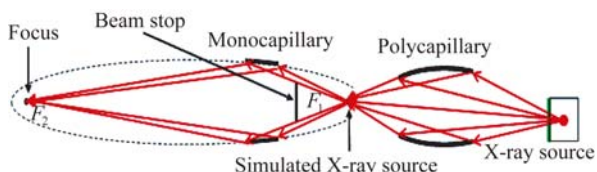


图 3 利用模拟源测量单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜特性的示意图
Fig. 3 Sketch of study on the characteristics of a single-bounce ellipsoidal monocapillary X-ray condenser

多毛细管 X 射线聚焦镜的出口焦距和出口焦斑可以通过刀口扫描法^[18]得到(如表 1)。

表 1 利用模拟光源获得的相关实验数据

Tab. 1 Experimental results based on simulated X-ray source

实验序号	$\sigma/\mu\text{m}$	σ^2	φ/mm	φ^2
1	20.6	424.4	162.9	26 536.4
2	27.3	745.3	220.5	48 620.3
3	39.1	1 528.8	315.9	99 792.8
4	47.4	2 246.8	376.3	141 601.7
5	56.4	3 181.0	453.4	205 571.6
6	64.2	4 121.6	510.8	260 916.6

本实验采用的单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜的参数如下(如图 2):镜长 L_c 为 20 mm,

成像平面经过的椭球镜焦点 F_2 到聚焦镜出口的距离 F_0 为 422 mm,光源所在的椭球镜焦点 F_1 到聚焦镜入口的距离 L 为 58 mm。椭球镜的长轴和短轴分别为 500 mm 和 1.2 mm,椭球镜的入口和出口直径分别为 0.766 mm 和 0.875 mm,利用光学方法^[12]测得其平均面型误差 $\alpha=10.43 \mu\text{rad}$ 。

将椭球单毛细管聚焦镜的焦点 F_1 放置在多毛细管 X 射线聚焦镜的出口焦斑位置(如图 3)。

打开微焦斑 Cu 靶光源 (MCBM 50-0,6B Cu),进行聚焦调节,调节到探测器(正比计数管)的计数最高(即椭球聚焦镜的传输效率最高)后,采用刀口扫描法测量椭球聚焦镜的焦斑大小(如表 1)。由公式(5),把 $F_0^2 \left[\frac{\sigma^2}{L^2} + \alpha^2 \right]$ 看作变量 x ,将表 1 中各量带入后,根据线性拟合即可得公式(5)中比例系数 $K=1.2$ (如图 4)。

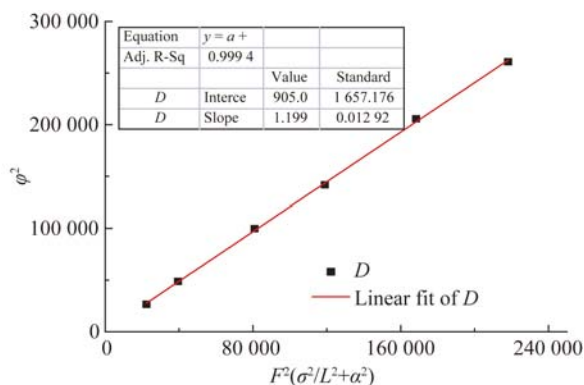


图 4 获得比例系数 K 的线性拟合图

Fig. 4 Chart for obtaining ratio coefficient K by linear fit

3.2 测量光源焦斑尺寸和焦深

将图 3 中的多毛细管聚焦镜移走,将微焦斑 Cu 靶光源(MCBM 50-0,6B Cu)的焦斑调节到椭球单毛细管聚焦镜的焦点 F_1 处,此时图 3 的布局就变成了图 2 的布局了。通过测量图 2 中 d 和椭球单毛细管聚焦镜的焦斑 \varnothing ,就可以根据前面提到的有关方法分别得到该光源的焦深和焦斑。光源的工作电压为 30 kV,工作电流为 0.45 mA,对聚焦镜分别进行 8 次优化聚焦调节,并对 8 次优化调节的聚焦镜的焦斑进行了分别测量(如表 2)。从表 2 中数据可以算出,实验测量的 X 射线光源焦斑尺寸为 $51.0 \pm 1.5 \mu\text{m}$,焦深为 $19.4 \pm 0.7 \text{ mm}$ 。厂家提供的该 Cu 靶光源的参数如下:

焦斑直径约为 $50\ \mu\text{m}$, 焦深约为 $20\ \text{mm}$ 。对于该光源而言, 焦斑和焦深测量值的算术平均值标准偏差分别为 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \text{mm}$ 。从而证明本实验对 X 射线光源焦斑尺寸和焦深的测量较为准确。

表 2 利用单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜测量得到的光源参数

Tab. 2 Experimental results for measuring the parameters of X-ray source with a single-bounce ellipsoidal monocapillary X-ray condenser

实验序号	$\varphi/\mu\text{m}$	d/mm	$\sigma/\mu\text{m}$	D/mm
1	437.4	38.7	50.1	19.3
2	500.3	35.5	57.3	22.5
3	482.8	37.1	55.3	20.9
4	420.8	40.7	48.2	17.3
5	385.0	38.4	44.1	23.1
6	415.6	37.5	47.6	20.5
7	468.9	39.7	53.7	18.3
8	441.8	40.9	50.6	18.5

产生偏差的可能原因是光学方法测量得到的面型误差有一定的误差, 同时, 测量系统的准直性也存在一定的误差。

文中椭球聚焦镜的材料是硼硅酸盐玻璃, 能

量为 E 的 X 射线在该类镜子内表面发生全反射的临界角 θ_c 可以简单表示为如下关系式^[17]:

$$\theta_c \approx \frac{30}{E}, \quad (6)$$

其中: θ_c 的单位是 mrad, E 的单位是 keV。由(6)式可知: 随着 X 射线能量的升高, X 射线在镜子中发生全反射的临界角变小; 随着 X 射线能量的降低, X 射线对应的全反射临界角变大, 但时, 随着能量的降低, 椭球镜内反射面对 X 射线的吸收系数也变大, 所以, 通常情况下, 对于能量低于 $0.5\ \text{keV}$ 的 X 射线源, 即使是在真空状态下, 该类镜子基本上就不能用了。

4 结 论

为了克服现有的表征 X 射线光源焦斑和焦深尺寸方法的缺点, 本文利用单次全反射椭球单玻璃管 X 射线聚焦镜对 X 射线源的焦斑具有成像作用这一特点, 设计了一种表征 X 射线光源焦斑尺寸和焦深的方法。实验结果表明, 对于焦斑直径约为 $50\ \mu\text{m}$ 、焦深约为 $20\ \text{mm}$ 的光源而言, 本文设计的相关表征方法的算术平均值标准偏差分别为 $1.5\ \mu\text{m}$ 和 $0.7\ \text{mm}$, 这说明此方法对光源焦斑尺寸和焦深的测量具有较高的准确性。利用本文设计的方法测量光源焦斑尺寸时, 同时可以获得光源的焦深数值, 从而提高了测量效率。

参考文献:

- [1] 侯榆青, 贾涛, 易黄建, 等. 基于改进谱投影梯度算法的 X 射线发光断层成像[J]. 光学精密工程, 2017, 25(1): 42-49.
HOU Y Q, JIA T, YI H J, *et al.*. X-ray luminescence computed tomography based on improved spectral projected gradient algorithm [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017, 25(1): 42-49. (in Chinese)
- [2] 张海波, 耿国华, 易黄建, 等. X 射线发光断层成像中笔束与锥束激发性能的对比[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 986-992.
ZHANG H B, GENG G H, YI H J, *et al.*. Comparison between pencil-beam and cone-beam in XLCT System [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5): 986-992. (in Chinese)
- [3] 高向东, 李竹曼, 游德勇, 等. 激光焊匙孔特征的近红外与 X 射线传感分析[J]. 光学精密工程,

2016, 24(10): 2400-2407.

GAO X D, LI ZH M, YOU D Y, *et al.*. Analysis of laser welding keyhole characteristics based on near-infrared high speed camera and X-ray sensing [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10): 2400-2407. (in Chinese)

- [4] 郭清江, 王大椿. 针孔成象的针孔效应[J]. 原子能科学技术, 1980, 14(4): 385-386.

GUO Q J, WANG D CH, The pinhole of pinhole imaging effect [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 1980, 14(4): 385-386. (in Chinese)

- [5] 李勤, 石金水, 禹海军, 等. 狭缝法测量 X 射线斑点大小[J]. 强激光与粒子束, 2006, 18(10): 1691-1694.

LI Q, SHI J SH, YU H J, *et al.*. Slit X-ray spot size measurement technique [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2006, 18(10): 1691-1694. (in Chinese)

- [6] 孙天希,丁训良,刘志国,等. 利用多毛细管准直器测量 X 射线光源焦斑尺寸[J]. 原子能科学技术, 2008, 42(7): 633-636.
SUN T X, DING X L, LIU ZH G, *et al.*. Measurements of focal spot size for X-ray source by using polycapillary collimator [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2008, 42(7): 633-636. (in Chinese)
- [7] ROMANOV A Y. Measurement of the parameters of the focal spot of an X-ray Tube using Kumakhov optics [J]. *Measurement Techniques*, 2004, 47(7): 670-674.
- [8] ROEMER D. *X-ray fluorescence with doubly curved crystal optics* [D]. New York, USA: University of Albany of State University of New York, 2007.
- [9] SUN X P, LIU ZH G, SUN T X, *et al.*. Combined optic system based on polycapillary X-ray optics and single-bounce moncapillary optics for focusing X-rays from a conventional laboratory X-ray source [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2015, 802: 5-9.
- [10] SUN X P, LIU ZH G, YI L T, *et al.*. Adjustable hollow-cone output X-ray beam from an ellipsoidal moncapillary with a pinhole and a beam stop [J]. *Applied Optics*, 2015, 54(35): 10326-10332.
- [11] ZENG X H, DUEWER F, FESER M, *et al.*. Ellipsoidal and parabolic glass capillaries as condensers for X-ray microscopes [J]. *Applied Optics*, 2008, 47(13): 2376-2381.
- [12] JIANG B W, LIU ZH G, SUN X P, *et al.*. Single bounce ellipsoidal glass moncapillary condenser for X-ray nano-imaging [J]. *Optics Communications*, 2017, 398: 91-94.
- [13] SUN T X, DING X L. Measurements of energy dependence of properties of polycapillary X-ray lens by using organic glass as a scatterer [J]. *Journal of Applied Physics*, 2005, 97(12): 124904.
- [14] HUANG R, BILDERBACK D H. Single-bounce moncapillaries for focusing synchrotron radiation; modeling, measurements and theoretical limits [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2006, 13(1): 74-84.
- [15] HUANG R, BILDERBACK D H. Simulation of microfocused image size from a one-bounce glass capillary [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2001, 467-468: 978-981.
- [16] SNIGIREV A, BJEUMIKHOV A, ERKO A, *et al.*. Submicrometer hard X-ray focusing using a single-bounce ellipsoidal capillary combined with a Fresnel zone plate [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2007, 14(2): 227-228.
- [17] SUN T X, DING X L. Confocal X-ray technology based on capillary X-ray optics [J]. *Reviews in Analytical Chemistry*, 2015, 34(1-2): 45-59.
- [18] SUN T X, DING X L. Study on the measurement of properties of polycapillary X-ray lens [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*, 2004, 226(4): 651-658.

作者简介:



王亚冰 (1992—), 男, 河北石家庄人, 2016 年于四川大学获得学士学位, 主要从事单椭球透镜应用和图像处理的研究。E-mail: 201621220020@mail.bnu.edu.cn

导师简介:



孙天希 (1969—), 男, 山东潍坊人, 教授。2006 年于北京师范大学获得博士学位。主要从事 X 射线科学与技术研究。作为方向负责人, 主要科研工作是负责毛细管 X 射线光学器件的设计、研制和应用开发。E-mail: stx@bnu.edu.cn