

文章编号: 0253-2239(2005)10-1436-5

## 整体 X 光透镜性能实验研究

孙天希<sup>1,2,3</sup> 丁训良<sup>1,2,3</sup> 刘志国<sup>1,2,3</sup> 潘秋丽<sup>1,2,3</sup> 汪燕<sup>1,2,3</sup> 李颖<sup>1,2,3</sup> 王治红<sup>1,2,3</sup>

1 北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京 100875  
2 北京师范大学低能核物理研究所, 北京 100875  
5 北京市辐射中心, 北京 100875

**摘要:** 利用高计数率探测器和低功率光源, 在大的能量范围内, 同时测量了整体 X 光透镜的传输效率和焦斑直径与能量的关系。实验结果表明: 透镜的焦斑直径随着能量的升高而减小; 对 04-5-10-5 透镜而言, 在高于 5.8 keV 的能量范围内, 透镜的传输效率随着能量的升高而降低, 在低于 5.8 keV 的能量范围内, 透镜的传输效率随着能量的升高而增加。通过测量不同能量的 X 射线在透镜会聚光束中的空间分布, 研究了短出口焦距透镜的光晕现象, 光晕会导致透镜焦斑直径增大和传输效率测量值的增加。利用轴向扫描法研究了整体 X 光透镜出口焦距和能量的关系, 实验结果表明: 会聚透镜的出口焦距随着 X 射线能量的升高而增加。

**关键词:** X 射线光学; 整体 X 光透镜; 轴向扫描法; 高计数率探测器

中图分类号: O434 文献标识码: A

## Experimental Investigation of Properties of Polycapillary X-Ray Lens

Sun Tianxi<sup>1,2,3</sup> Ding Xunliang<sup>1,2,3</sup> Liu Zhiguo<sup>1,2,3</sup> Pan Qiuli<sup>1,2,3</sup> Wang Yan<sup>1,2,3</sup>

Li Ying<sup>1,2,3</sup> Wang Zhihong<sup>1,2,3</sup>

1 The Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875  
2 Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875  
3 Beijing Radiation Center, Beijing 100875

**Abstract:** Low power X-ray source and high count rate detector system are used to measure the space distribution of X-rays with different energies in the beam focused by the monolithic polycapillary X-ray lens, and the energy dependence of the focal spot size and transmission efficiency of the lens. The "halo" phenomenon can result in the increase of focal spot size and the measured transmission efficiency with higher energies. The focal spot size decreases with the increase of the energies. The transmission efficiency of the 04-5-10-5 lens increases with higher energies below about 5.8 keV and decreases with higher energies above about 5.8 keV. The axial scanning method is devised to find the energy function of the output focal distance. The output focal distance of the lens increases with the increase of the energies.

**Key words:** X-ray optics; monolithic polycapillary X-ray lens; axial scanning method; high count rate detector

### 1 引 言

随着整体 X 光透镜在 X 射线分析技术中的广泛应用<sup>[1~13]</sup>, X 光透镜的性能测量在透镜的设计和应用中越来越重要。文献[14]研究研究了 X 光单管和复合管的传输效率和能量的关系, 但是, 由复合管构成的整体 X 光透镜的传输特性与 X 光单管以及复合管的传输特性是不同的; 除此之外, 整体 X 光透镜的焦斑大小和出口焦距也都与能量有关。所以如何准确

地测量这些性能参量与能量的关系, 一直是整体 X 光透镜使用者和设计者所关注的问题。透镜会聚的 X 射线光束的强度高, 在较大能量范围之内, 同时测量上述各性能参量在各能量点的数值时, 会受到探测系统死时间问题的困扰。为了解决这一问题, 科研人员先后设计了次级靶法<sup>[5]</sup>、小孔扫描法<sup>[15]</sup>和轴向扫描法<sup>[16]</sup>来降低进入探测器的 X 射线的强度。但次级靶法的测量结果准确度低, 小孔扫描法由于受到小孔尺

作者简介: 孙天希(1969~), 男, 北京师范大学博士研究生, 主要从事 X 射线光学研究。E-mail: stxbeijing@163.com

收稿日期: 2004-11-26; 收到修改稿日期: 2005-01-22

寸的影响,只能在较小的能量范围内同时测量透镜在各能量点的性能,轴向扫描法不能测量透镜的传输效率。上述各方法都存在各自的缺点。

本文利用高计数率探测器和低功率光源避免了探测系统的死时间问题,在大的能量范围内,同时测量了透镜在各能量点的传输效率和焦斑大小;利用轴向扫描法,研究了透镜出口焦距与能量的关系;分析了短出口焦距透镜的光晕(halo)现象。

## 2 实 验

### 2.1 实验仪器

光源是德国产的微聚焦光源(MCBM 50-0.6B),它的 Mo 靶(50 μm×50 μm)的最大工作电压、电流和功率分别为 50 kV、1000 μA 和 30 W。电压调节步幅为 0.05 kV,电流的调节步幅为 1 μA。最小工作电流为 1 μA。探测系统是德国产的 Xflash Detector 2001 RONTEC 和 RÖNTEC MAX Spectrometer,整个探测系统的最高计数率为 4×10<sup>5</sup> s<sup>-1</sup>。

### 2.2 实验方法

#### 2.2.1 传输效率的测量

整体 X 光透镜的传输效率是指从透镜出来的 X 光强度和进入透镜的 X 光强度的比值。图 1 是测量透镜传输效率的装置示意图。光源、透镜和探测器分别放在五维调试架上。将透镜聚焦调节完毕后,测量从透镜出来的 X 光的强度能量谱线。然后,将透镜取下,在距光源一定距离处,放上针孔,测量从针孔出来的 X 光强度能量谱线。从两个能谱中读出某能量对应的 X 射线强度,按照(1)式计算出透镜在该能量点的传输效率:

$$\eta = \frac{C_{\text{optic}}}{C_{\text{pinhole}}} \times \frac{S_{\text{pinhole}}}{S_{\text{optic-input}}} \times \left( \frac{D_{\text{optic-source}}}{D_{\text{pinhole-source}}} \right)^2, \quad (1)$$

其中  $C_{\text{optic}}$  和  $C_{\text{pinhole}}$  分别为用透镜和针孔时的 X 射线强度,  $S_{\text{pinhole}}$  和  $S_{\text{optic-input}}$  分别是针孔和透镜入口的面积,  $D_{\text{optic-source}}$  和  $D_{\text{pinhole-source}}$  分别是透镜入口端和针孔

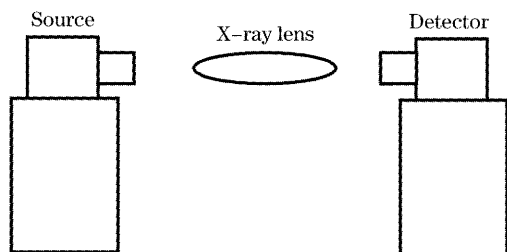


图 1 测量整体 X 光透镜传输效率装置

Fig.1 Setup for measuring transmission efficiency of polycapillary X-ray lens

离光源焦斑的距离。

测量过程中探测器到光源焦斑的距离保持不变,这就保证了在测量两个能谱时空气的吸收近似不变。

#### 2.2.2 透镜出口焦距的测量

透镜出口焦距定义为透镜出口端到透镜焦斑(最小直径的束斑)处的距离。可用下述轴向扫描法<sup>[18]</sup>测定透镜的出口焦距。

图 2 是在一定能量范围内,同时测量透镜在不同能量点的出口焦距示意图。图 3 是透镜会聚光束的示意图。

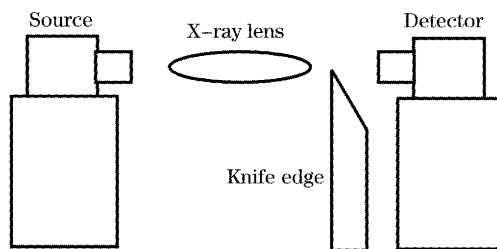


图 2 测量出口焦距示意图

Fig.2 Scheme of experimental setup for measuring the output focal distance

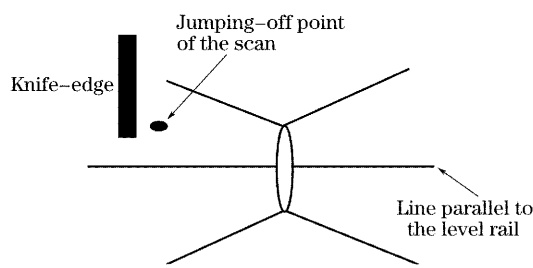


图 3 X 射线透镜会聚光束示意图

Fig.3 X-ray beam focused by X-ray lens

由图 3 可看出,刀口沿光束中心线的方向移动时,在不同位置遮挡 X 射线光通量是不同的,所以探测器的读数不同。刀口每移动一步,测量一个能谱。从得到的一系列能谱中读出某能量对应的强度,作一条类似于图 4 的强度和刀口离透镜出口端

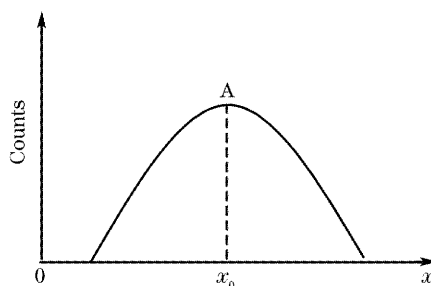


图 4 刀口在距离透镜出口端不同距离时探测器读数

Fig.4 Counts of detector when the knife edge is at different distances from the exit of lens

距离的关系曲线,在图 4 中,峰点 A 所对应的位置即为焦斑位置。焦斑位置确定后,透镜在该能量点的出口焦距就确定了。

### 2.2.3 透镜焦斑大小的测量

由 2.2.2 可知,可用轴向扫描法得到透镜在某能量点的焦斑位置。在焦斑位置处,从得到的一系列能谱中,读出该能量点对应的强度,然后,根据现有的确定透镜焦斑大小的数据处理方法<sup>[3,4]</sup>就可得到透镜在该能量点的焦斑大小。

### 2.2.4 不同能量 X 光空间分布的测量

让刀口(或者狭缝)在焦斑位置处沿垂直于透镜会聚光束中心线的方向扫描,不同位置分别测量一个能谱,从不同位置处的能谱的变化情况,就可知道在透镜会聚光束中,不同能量 X 光的空间分布情况。

## 2.3 实验结果及分析

### 2.3.1 传输效率

测量了两个 X 光透镜的传输效率。编号为 04-4-27-2 的透镜入口端直径为 4.95 mm,出口端

直径为 2.75 mm,长度为 84.16 mm,另一个透镜 04-5-10-5 的入口端直径为 3.85 mm,出口端直径为 4.35 mm,长度为 59.20 mm。它们的传输效率与能量的关系分别如图 5 所示。

由图 5(b)可看出,在能量高于 5.8 keV 时,04-5-10-5 透镜的传输效率随着能量的升高而降低。能量低于 5.8 keV 时,透镜传输效率随着能量的升高而升高。影响透镜传输效率的因素有三个方面,一是 X 射线发生全反射的临界角随 X 射线能量的升高而减小,这使高能 X 射线发生全反射而通过透镜的可能性减小;二是粗糙度的影响,对于粗糙度一定的界面,高能 X 射线的漫反射效应远远强于低能 X 射线;三是毛细管管壁和空气的吸收,它们对低能 X 射线的吸收较强。对 04-5-10-5 透镜而言,在能量高于 5.8 keV 时,一、二两方面因素起主要作用,能量低于 5.8 keV 时,第三个因素起主要作用,所以出现了上述实验现象。

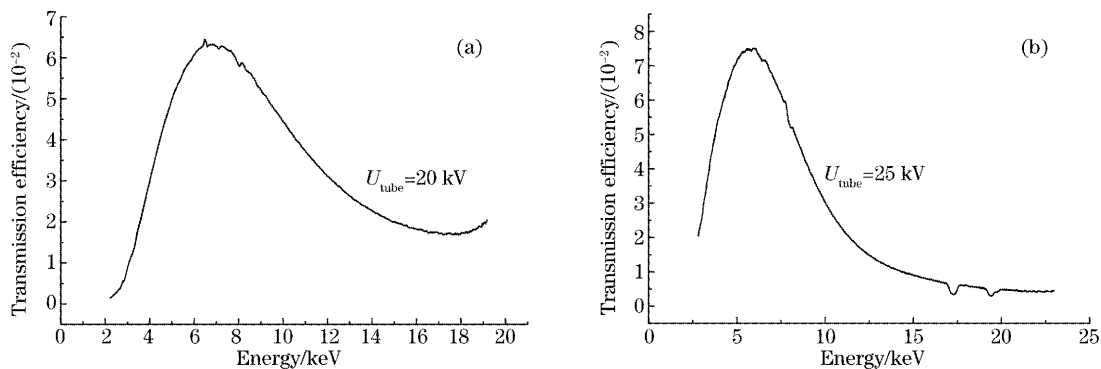


图 5 透镜的传输效率和能量关系。(a) 透镜 04-4-27-2, (b) 透镜 04-5-10-5

Fig. 5 Energy dependence of the transmission efficiency of lens 04-4-27-2 (a), lens 04-5-10-5 (b)

在图 5(a)中,能量高于 17.8 keV 时,该透镜的传输效率的测量值随着能量的升高而明显升高,这是由于光晕的影响。

在图 5 中,在某些能量点,传输效率曲线发生了较大的波动,这是由于 Mo 的特征线和其它杂质的特征线对实验结果产生的影响。由于,整体会聚透镜是以点源为基础设计的,它只接受 X 光源有限的部位(入口焦斑)发出的 X 射线;而透镜的聚焦调节是在 Mo 靶连续谱的平均值上进行的,所以,如果产生上述特征线的部位离透镜的入口焦斑较远,这些特征线透过透镜的效率会降低。

### 2.3.2 透镜出口焦距

利用图 2 所示的装置对 04-4-27-2 和 04-5-10-5 两个 X 光透镜进行了测量,扫描曲线

见图 6。为了方便比较,在图 6(a)、图 6(b)中,对应于 15.0 keV 的计数是原始测量数据的 7 倍。

透镜 04-4-27-2 在 7.0 keV 和 15.0 keV 两个能量点,出口焦距分别为 13.14 mm 和 13.34 mm。透镜 04-5-10-5 在 8.0 keV 和 15.0 keV 两个能量点,出口焦距分别为 69.21 mm 和 69.75 mm。

X 光透镜出口焦距随着能量的升高而增大,这是因为,随着能量的升高,X 光发生全反射的临界角变小。

### 2.3.3 透镜焦斑大小

编号为 04-4-27-2 和 04-5-10-5 的两个透镜焦斑大小与能量的关系曲线见图 7。

由图 7(b)可知,该透镜的焦斑直径随着能量的升高而减小。这是因为,对 X 光透镜来说,焦斑直

径可以表示成如下公式：

$$\phi = 2r + 2f_2 \tan \theta_c, \quad (2)$$

其中  $r$  为透镜出口端子导管的内半径,  $f_2$  为透镜出口焦距. X 射线的能量越高,  $f_2$  越大, 但随能量的不同而变化的幅度不大. 而临界角  $\theta_c$  (单位为 mrad)

$$\theta_c = 30/E, \quad (3)$$

其中  $E$  为 X 射线光子的能量 (单位为 keV). 由以上分析可知, 焦斑直径主要决定于临界角和能量反比关系, 所以, 透镜的焦斑直径大小随着能量的升高而减小.

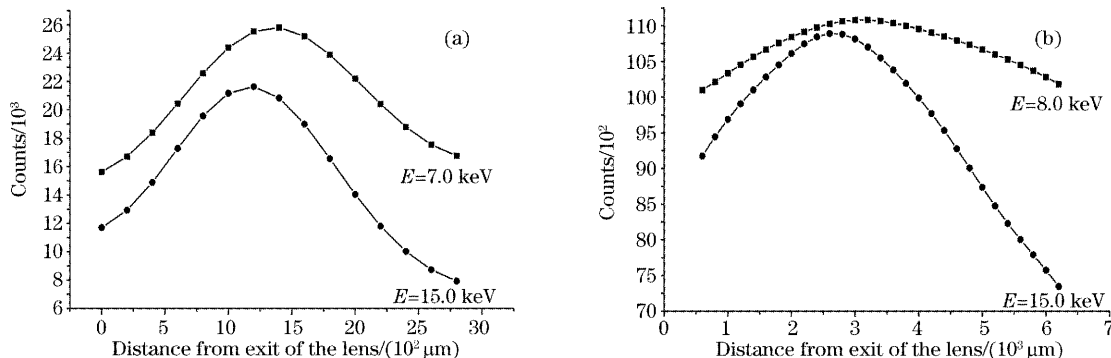


图 6 刀口在透镜出口端不同距离时探测器读数, 为了比较对应 15 keV 的读数放大了 7 倍.

(a) 04-4-27-2 透镜, (b) 04-5-10-5 透镜

Fig. 6 Counts of detector when the knife edge is at different distances from the exit of (a) 04-4-27-2 lens, (b) 04-5-10-5 lens. For comparison the counts at 15 keV are magnified by a factor 7

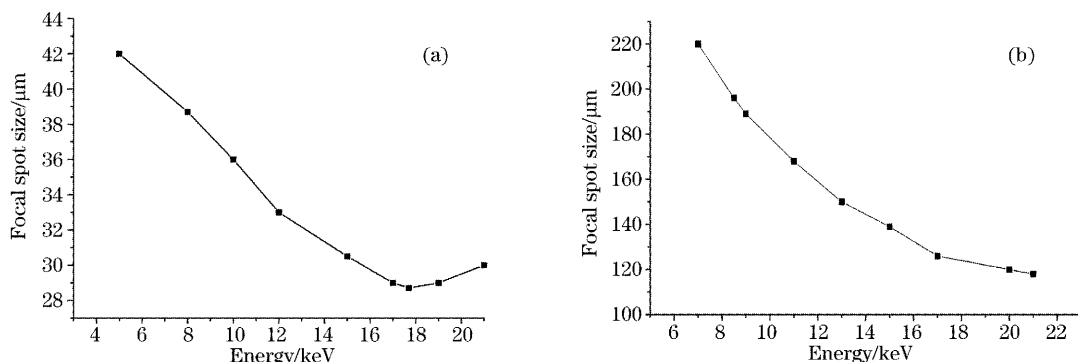


图 7 焦斑直径和能量的关系。(a) 04-4-27-2 透镜, (b) 04-5-10-5 透镜

Fig. 7 Energy function of focal spot size of the 04-4-27-2 lens (a), 04-5-10-5 lens (b)

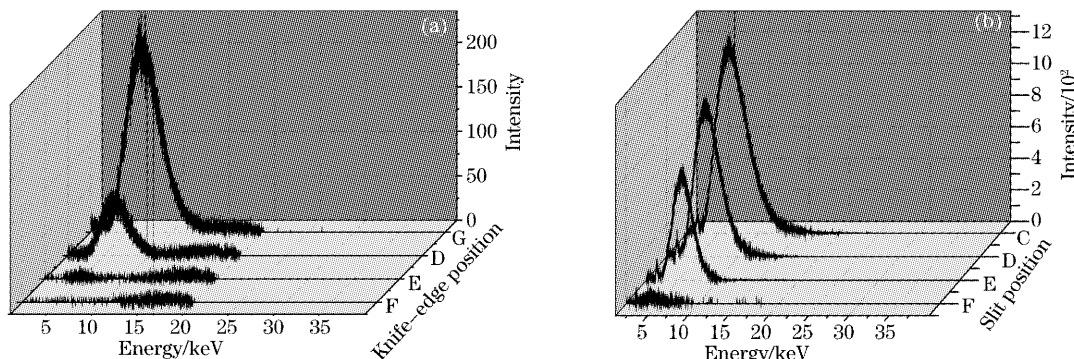


图 8 (a)刀口(b)狭缝在光束不同位置时的能谱

Fig. 8 Spectra vs (a) knife edge (b) slit position in the beam

由图 7(a)可知, 在能量高于 17.6 keV 时, 该透镜的焦斑直径随着能量的升高而明显增大, 这是由于光晕的影响.

### 2.3.4 在经透镜会聚的光束中, 不同能量 X 光的空间分布情况

在 04-4-27-2 透镜焦斑位置, 让刀口沿垂直

于会聚光束中心线的方向扫描,扫描能谱见图 8(a)。由图 8(a)中不同位置处的能谱可看出,当能量高于 13.0 keV 时,部分 X 光直接穿透了该透镜,形成了光晕,影响了该透镜在高能量点的传输效率的测量值和焦斑直径的大小。

对应于 04-5-10-5 透镜的扫描能谱见图 8(b)。为了比较,图中 D、E、F 处对应的强度分别是各自原始数据 2、5、100 倍。由图 8(b)可看出:在测量的能量范围内,该透镜几乎不存在光晕,图 5(b)和图 7(b)也证明了这一结论。

两个不同透镜,在各自焦斑位置处,沿垂直于光束中心线的方向,不同能量的 X 射线分布情况不同,这与透镜的结构有关。两透镜相比,编号为 04-4-27-2 的透镜的出口焦距短,为了得到出口焦距短的透镜,在透镜出口端附近,构成透镜的毛细管的弯曲度大,于是, X 射线在透镜出口端附近,容易直接穿透毛细管管壁,而形成光晕。

### 3 讨 论

实验中,透镜的聚焦调节是在 Mo 靶连续谱的平均值上调节的。聚焦调节一旦完成,在测量过程中,透镜相对于光源的距离就不改变了,即透镜的入口焦距保持不变。虽然,透镜的入口端焦距也与能量有关,但它主要决定于光源尺寸和透镜入口直径,而随能量的变化不明显,所以在测量透镜性能和能量的关系时,忽略了透镜入口端焦距随能量的变化。

### 4 结 论

利用高计数率探测器和低功率光源,在大的能量范围内,研究了透镜传输效率、焦斑大小和透镜出口焦距与能量的关系。分析了短出口焦距透镜的光晕对透镜性能的影响。

X 射线发生全反射的临界角随着能量的升高而减小,导致了透镜的焦斑直径和出口焦距随着能量的升高而分别减小和增大,也导致了在高能量范围内,透镜的传输效率随着能量的升高而降低。由于空气和毛细管管壁的吸收,在低能量范围内,透镜的传输效率随着能量的升高而增加。对于短出口焦距透镜而言,在高能量范围内,由于光晕的影响,传输

效率的测量值和焦斑直径随着能量的升高而增大。当设计和利用短出口焦距整体 X 光透镜时,应当考虑光晕问题。

### 参 考 文 献

- 1 Xunliang Ding, Zhiguo Liu, Yiming Yan *et al.*. High energy resolution XRF spectrometer using polycapillary X-ray lens and PSPC[J]. *X-Ray Spectrom.*, 2004, **33**: 67~73
- 2 Xunliang Ding, Jingdong Xie, Yejun He *et al.*. X-ray spectrometry using polycapillary X-ray optics and position sensitive detector[J]. *Talanta*, 2000, **53**: 17~22
- 3 Yan Yiming, Ding Xunliang. An investigation of X-ray fluorescence analysis with an X-ray focusing system (X-ray lens) [J]. *Nucl. Instr. Meth. (B)*, 1993, **82**: 121~124
- 4 Xunliang Ding, Yejun He, Yiming Yan. X-ray source for X-ray microfluorescence using a monolithic X-ray focusing lens combined with aperture optics[J]. *X-Ray Spectrom.*, 1997, **26**: 374~379
- 5 K. Proost, L. Vincze, K. Janssens *et al.*. Characterization of a polycapillary lens for use in micro-XANES experiments [J]. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 215~222
- 6 L. Vincze, F. Wei, K. Proost *et al.*. Suitability of polycapillary optics for focusing of monochromatic synchrotron radiation as used in trace level micro-XANES measurement[J]. *J. Anal. At. Spectrom.*, 2002, **17**: 177~182
- 7 Donald H. Bilderback. Review of capillary X-ray optics from the 2th international capillary optics meeting[J]. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 195~207
- 8 Muradin A. Kumakhov. Capillary optics and their use in X-ray analysis[J]. *X-Ray Spectrom.*, 2000, **29**: 343~348
- 9 C. A. MacDonald, W. M. Gibson. Application and advances in polycapillary optics[J]. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 258~268
- 10 N. Gao, I. Y. Ponomarev. Polycapillary X-ray optics: manufacturing status, characterization and the future of the technology[J]. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 186~194
- 11 L. Vincze, C. Riekkel. Status and perspectives of capillary optics at a third-generation synchrotron radiation source [J]. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 208~214
- 12 Takeyoshi Taguchi, Qi-fan Xiao, Jimpei Harada. A new approach for in-laboratory XAFS equipment[J]. *J. Synchrotron Radiation*, 1999, **6**: 170~171
- 13 Ding Xunliang, Wei Liang, Yan Yiming. X-ray lens in XRF analysis[J]. *J. Trace and Microprobe Techniques*, 1997, **15**(4): 647~652
- 14 Li Deyao, Liang Zhujian, Ding Xunliang *et al.*. Transmission characteristics of X-ray guiding tubes[J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(6): 735~738 (in Chinese)  
李德尧,梁竹健,丁训良等. X 光导管传输性能实验研究[J]. *光学学报*, 2000, **20**(6): 735~738
- 15 Birgit Kannigieser, Natalia Kemf, Wolfgang Malzer. Spectral and lateral resolved characterisation of X-ray microbeams[J]. *Nucl. Instr. Meth. (B)*, 2002, **198**: 230~237
- 16 Tianxi Sun, Xunliang Ding. Study on the measurement of properties of polycapillary X-ray lens[J]. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Research B*, 2004, **226**: 651~658