

测量整体 X 光透镜性能的一种新方法^{*}

孙天希 丁训良¹⁾ 刘志国 王大椿

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

摘要 为了高效准确地确定整体 X 光透镜焦斑位置,设计了一种新方法:轴向扫描法.该方法避免了探测系统的死时间问题,可以在大能量范围内同时测量透镜在不同能量点的出口焦距,在确定透镜出口焦距时,测量结果的绝对误差范围在 $-120\mu\text{m}$ 和 $120\mu\text{m}$ 之间.实验结果表明:透镜的出口焦距随着能量的增加而增加.

关键词 整体 X 光透镜 轴向扫描法 出口焦距和能量的关系

1 引言

随着 X 光透镜的广泛应用^[1-13], X 光透镜的性能测量在透镜的设计和应用中变得越来越重要.测量整体 X 光透镜焦斑大小和出口焦距的方法很多^[2-5],最常用的方法是刀口扫描法:刀口沿垂直于光束的方向扫描,可得探测器记数的积分分布曲线,再进行微分,得到束斑的径向功率密度分布的微分分布曲线,该曲线大致为 Gaussian 分布曲线,其半高宽(FWHM: full width at half maximum)即为束斑的直径大小.具有最小直径的束斑定义为透镜的焦斑,透镜出口端和透镜焦斑位置处之间的距离定义为透镜的出口焦距.众所周知,利用现有刀口扫描法确定透镜焦斑所在位置是很费时的,因为它需要测量很多束斑的直径,通过对比它们的大小,进而确定焦斑位置.另外,如图 1 所示,当透镜会聚光束的中心线和安放刀口的水平导轨不平行时,刀口扫描的结果为线段 AB 的大小,并不是焦斑直径 CD 的大小,即测量结果比实际值要大.

透镜的出口焦距和 X 光的能量有关.当用透镜来会聚一定范围内的 X 射线的连续谱时^[5, 6],准确测量透镜出口焦距随能量的变化关系,便于确定实验方案.在大能量范围内同时测量透镜在不同能量点的出口焦距时,由于会聚透镜出口焦距随能量的变化不明显,同时由于探测系统存在死时间问题,所以,现有的测

量方法很难奏效.为了解决探测系统饱和问题, X 光透镜的研制者和利用者先后设计了吸收片法、次级靶法^[6]、小孔扫描法^[14]和散射体法^[15]来降低进入探测器的 X 射线的强度,但上述各方法很难准确测量透镜的出口焦距和能量的微弱变化关系.利用轴向扫描法,既可避免探测系统的死时间问题,又可在大能量范围内测量透镜出口焦距与能量的关系.

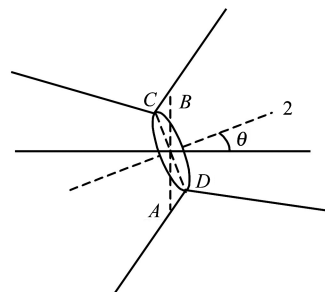


图 1 透镜会聚光束示意图
1 平行于水平导轨的直线; 2 会聚光束的中心线.

本文讨论了如何利用轴向扫描法确定透镜焦斑位置;在此基础上,研究了透镜出口焦距与能量的关系.

2 轴向扫描法

为了讨论方便,分两种情况说明如何利用轴向扫描法确定透镜焦斑位置.

2004 - 11 - 25 收稿, 2005 - 05 - 10 收修改稿

^{*} 国家自然科学基金(19827002)资助

1) E-mail: xld@ht.rol.cn.net

2.1 理想情况

透镜会聚光束的中心线与水平导轨平行时, 称透镜处在理想状态. 可用下面的方法来判断透镜是否处在理想状态.

如图 2 所示, 当刀口沿水平导轨的方向扫描时, 刀口处在离透镜出口端不同距离处, 刀口挡住的 X 光的光通量不同, 所以, 探测器探测到的 X 光的光通量也不同. 图 3 是探测器计数变化的草图. 刀口从位置 1 和位置 2 分别沿导轨方向扫描, 得到两条相应的探测器计数变化曲线图, 两条曲线图的峰点对应的横坐标如果相同, 则称透镜处在理想状态, 反之, 透镜处在非理想状态.

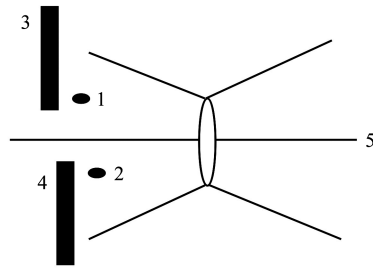


图 2 透镜会聚光束示意图
1,2 扫描起点; 3,4 刀口; 5 平行于水平导轨的直线.

当透镜处在理想状态时, 图 3 所示的峰点 A 的位置即为透镜的焦斑位置, 从而可得到透镜的出口焦距. 刀口在焦斑位置处沿垂直于光束的方向扫描, 可得到透镜焦斑直径的大小.

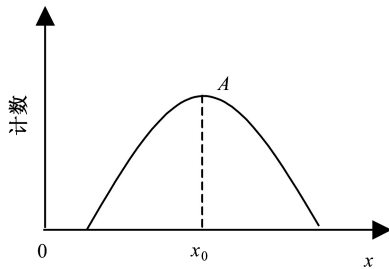


图 3 探测器计数和刀口离透镜出口端距离关系曲线

2.2 非理想情况

透镜会聚光束的中心线不与水平导轨平行时, 称透镜处在非理想状态. 在 2.1 节中已经讨论了如何判断透镜处在非理想状态的方法.

当透镜处在非理想状态时, 可用下面的方法来确定透镜的焦斑位置. 如图 4 所示, 刀口分别从位置 1 和位置 2 沿导轨方向扫描, 得到如图 5 所示的探测器计数曲线图. 在图 5 中, a 和 b 分别为曲线 1 和曲线 2 的峰点. c 为线段 ab 的中点. c 点位置即为透镜焦斑位置.

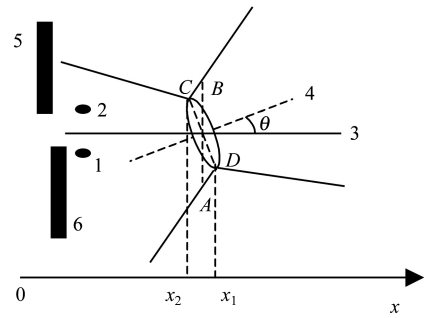


图 4 透镜会聚光束示意图
1,2 扫描起点; 3 平行于水平导轨的直线; 4 光束中心线; 5,6 刀口.

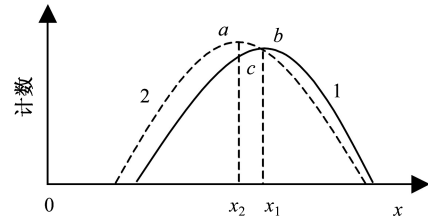


图 5 探测器计数和刀口离透镜出口端距离关系曲线
1 对应于位置 1 的曲线; 2 对应于位置 2 的曲线.

3 利用轴向扫描法的技巧

实验结果表明: 透镜聚焦调节结束后, 上述中 θ 的变化范围一般在 -1.3° 和 1.3° 之间. 所以除非有特殊要求, 可以认为聚焦调节后的透镜处在理想状态, 即忽略 θ . 忽略 θ 后, 在利用轴向扫描法确定焦斑位置时, 可利用合适的狭缝或者小孔来代替刀口进行轴向扫描. 实验表明: 与现有常用的刀口扫描法的测量结果相比, 利用狭缝或者针孔进行轴向扫描测量透镜出口焦距的绝对误差范围在 $-120\mu\text{m}$ — $120\mu\text{m}$ 之间.

4 在测定非理想状态下透镜焦斑大小时, 由于忽略 θ 而带来的误差分析

如第 3 节“利用轴向扫描法的技巧”所述, 由于 θ 通常很小, 所以近似认为透镜聚焦调节后处在理想状态(现有测量透镜性能的方法正是这样处理问题的). 下面分析在确定焦斑大小时, 由于忽略 θ 而带来的误差.

如前所述, 刀口在处于非理想状态透镜的焦斑位置沿垂直于光束的方向扫描时, 扫描结果是图 6 中 AB 的大小, 并非焦斑直径 CD 的大小.

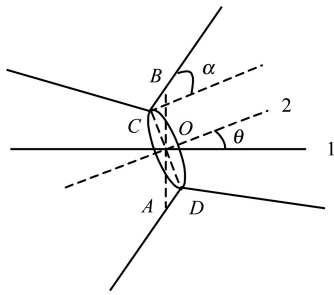


图 6 透镜会聚光束示意图

1 平行于水平导轨的直线; 2 会聚光束的中心线.

如图 6 所示, $\angle OCB$ 和 $\angle COB$ 的大小分别为 $\frac{\pi}{2} + \alpha$ 和 θ , 在 $\triangle OCB$ 中, 由正弦定理可得

$$\frac{CO}{\sin(\pi - \frac{\pi}{2} - \alpha - \theta)} = \frac{OB}{\sin(\frac{\pi}{2} + \alpha)}, \quad (1)$$

焦斑直径 CD 为

$$CD = 2 \cdot CO = \frac{AB \cdot \cos(\alpha + \theta)}{\cos \alpha}, \quad (2)$$

其中 AB 的数值可扫描得到. 如果能确定 θ 和 α 的大小, 则

$$\frac{CD}{AB} = \frac{\cos(\alpha + \theta)}{\cos \alpha}, \quad (3)$$

就可得到. 对一般的整体透镜而言, α 的范围在 $1.0^\circ - 6.0^\circ$ 之间. 所以, CD/AB 的范围在 $99.74\% - 100.00\%$ 之间, 即焦斑大小的测量误差小于 1% .

4.1 测量 θ 的方法

众所周知, 透镜会聚光束的径向功率密度分布大致为 Gaussian 分布, 在光束的中心线位置, 功率密度最高, 所以, 可利用小孔进行常规扫描测量 θ 的值. 当小孔沿垂直于光束的方向扫描, 小孔处在光束中心线位置时, 探测器的计数最高. 根据此现象, 小孔在离透镜出口端不同位置处进行扫描, 可获得不同位置处束斑中心的坐标. 图 7 中的计数曲线 4 显示了在针孔扫描过程中探测器计数的变化情况. 在计数曲线 4 中, 峰点对应的位置坐标 y_n 是第 n 次扫描对应的束斑中心在 x - 0 - y 坐标系中的纵坐标, 由于 x_n 已知, 所以该束斑中心坐标就确定了. 根据不同位置处束斑中心的坐标, 由线性拟合可得到光束中心线的斜率, 从而可得 θ 的数值.

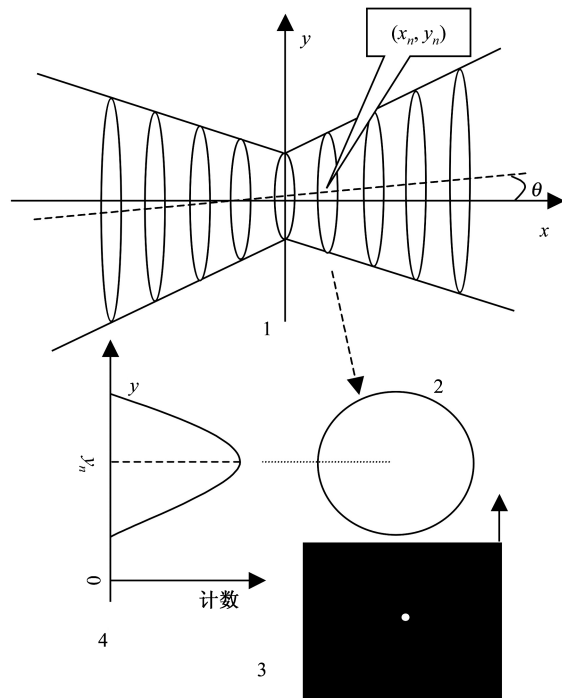


图 7 测量 θ 的示意图

1 透镜会聚光束; 2 第 n 次扫描对应的束斑的截面图; 3 针孔; 4 计数曲线.

4.2 测量 α 的方法

为了获得 α 的数值, 重新调节处在非理想状态的透镜, 直到将之调节到理想状态. 图 8 是透镜处于理想状态时的会聚光束的示意图, 图 8 中的 $\angle BAC = \alpha$, AD 和 BE 可以通过扫描得到, 而:

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{BE - AD}{2 \cdot AC} \right), \quad (4)$$

其中 AC 是已知的量, 所以, 可测得 α .

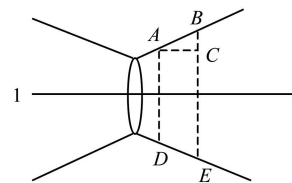


图 8 透镜会聚光束示意图

1 平行于水平导轨的光束中心线.

5 轴向扫描法的其他用途

当透镜会聚一定范围内的连续谱时, 可利用轴向扫描法同时测量透镜在不同能量点的出口焦距. 如图 9 所示, 当狭缝沿透镜光束的轴向扫描时, 大部分 X 光通量被狭缝挡住, 从而避免了探测系统的死时间问

题. 在扫描过程中, 狭缝每前进一步, 测量一个能谱, 从这些能谱中读出对应于某个能量 X 射线强度数值, 图 9 中画出了对应于某能量点的探测器计数变化曲线草图, 草图中峰点对应的位置就是透镜在该能量点的焦斑位置, 于是, 透镜在该能量点的出口焦距就确定了.

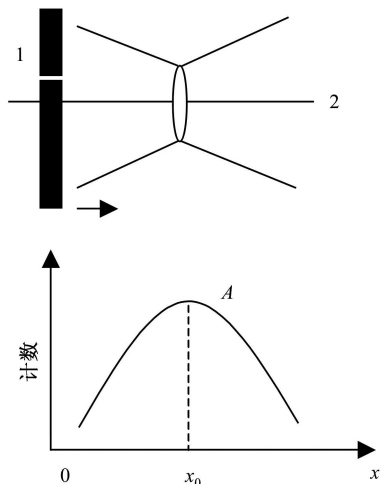


图 9 透镜会聚光束和探测器计数变化曲线图
1 狭缝; 2 会聚光束的中心线.

6 实验与结果

6.1 非理想状态

实验中采用的光源是微聚焦光源(MCBM 50-0.6B), 其钨靶的焦斑直径为 $50\mu\text{m}$. 实验用的探测器为正比计数器. 实验中用来移动刀口或者狭缝的二维调试架的空间分辨为 $1\mu\text{m}$.

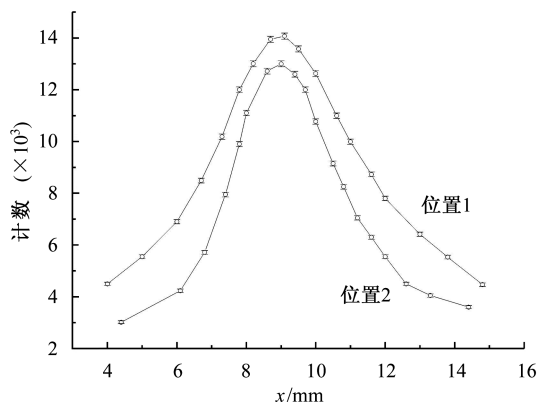


图 10 探测器计数和刀口离透镜出口端距离的关系曲线

根据 2.2 节中的描述, 利用刀口测量了编号为 03-5-19-2、出口焦距为 19.9mm 的会聚透镜处在非理想状态时的出口焦距. 两次轴向扫描的探测器计数和刀口离透镜出口端距离的关系曲线如图 10 所示, 该结果

与现有常用的刀口扫描方法获得的结果相比, 它的绝对误差为 $97\mu\text{m}$, 其相对误差为 0.49% .

根据第 3 节的描述, 利用宽度为 $50\mu\text{m}$ 的狭缝测量该透镜的出口焦距, 探测器的计数变化曲线如图 11 所示. 其测量结果的绝对误差为 $63\mu\text{m}$, 其相对误差为 0.32% .

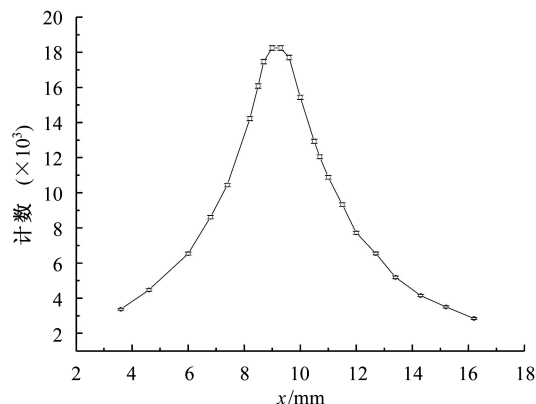


图 11 探测器计数和狭缝离透镜出口端距离的关系曲线

为了讨论由于忽略 θ 而带来的误差, 测量了 8 处不同位置的束斑中心的坐标, 其数值如图 12 所示. θ 值为 1.2° . 将处于非理想状态的 03-5-19-2 会聚透镜重新进行聚焦调节, 测得 α 值为 2.5° , 所以, 对 03-5-19-2 会聚透镜来说, $CD/AB = 99.89\%$.

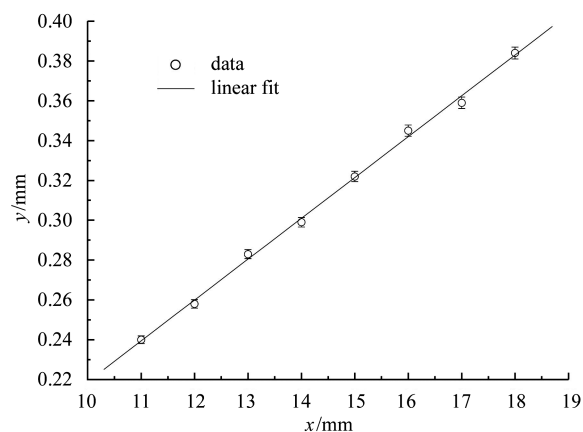


图 12 束斑中心的坐标和拟合曲线图

6.2 透镜在不同能量点的出口焦距的测量

实验中所用 X 光的光源是微聚焦光源(MCBM 50-0.6B), 其钨靶的焦斑直径为 $50\mu\text{m}$. 探测系统为 XFlash® Detector 2001 RÖNTEC 和 RÖNTEC MAX Spectrometer. 透镜聚焦调节时, 光源的工作电压是 20kV .

根据第 3 节的描述, 利用宽度为 $20\mu\text{m}$ 的狭缝测量了编号分别为 04-4-27-2 和 01-4-28-7 的两个会聚透

镜的出口焦距，探测器的计数曲线分别如图 13 和 14 所示。在 8.0keV 和 15.0keV 时，04-4-27-2 会聚透镜的出口焦距分别为 69.21mm 和 69.75mm；在 7.0keV 和 15.0keV 时，01-4-28-7 会聚透镜的出口焦距分别为 13.14mm 和 13.34mm。

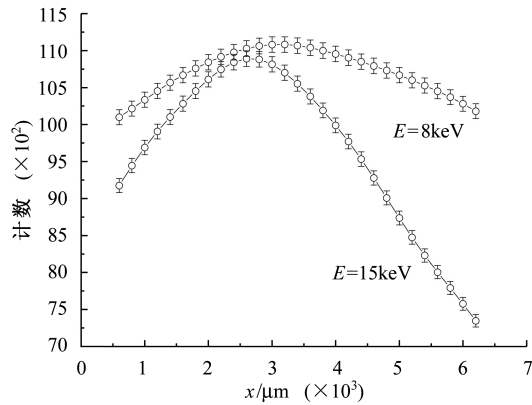


图 13 探测器计数与狭缝离透镜出口端距离的关系曲线(04-4-27-2透镜)

为了比较，图中对应于 15keV 的计数是原始数据的 7 倍。

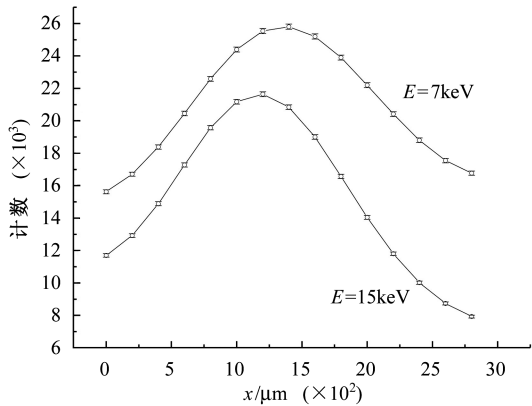


图 14 探测器计数与狭缝离透镜出口端距离的关系曲线(01-4-28-7透镜)

为了比较，图中对应于 15keV 的计数是原始数据的 7 倍。

透镜的出口焦距随着能量的升高而增加，这是由于 X 光发生全反射的临界角随着能量的升高而减小的缘故。

7 讨论

如图 15 所示，如果刀口沿图示中的虚线方向进行

扫描，则当它处在 ab 之间时，被它挡住的 X 光的光通量相同，所以探测器的计数曲线类似于图 16 中的曲线。在确定焦斑位置时，“平头峰”的出现会带来误差。所以在利用狭缝和小孔进行轴向扫描时，狭缝和小孔的尺寸应尽量小，在利用刀口进行扫描时，刀口应尽量靠近光束的中心线，但不能恰好和光束中心线重合，否则，探测器的计数曲线近似是一直线段。

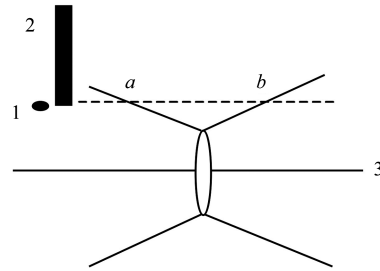


图 15 透镜会聚光束示意图

1 扫描起点；2 刀口；3 光束中心线。

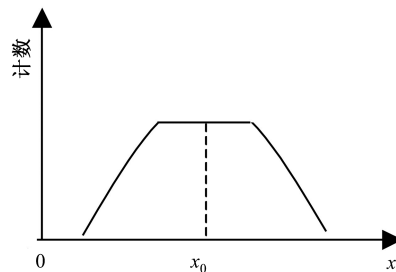


图 16 探测器计数与刀口离透镜出口端距离的关系曲线

另一方面，不同的透镜具有不同的“焦点深度”，在“焦点深度”范围内，不同位置束斑的大小变化不明显，从而导致探测器读数曲线的峰点不尖锐，这在确定焦斑位置时会带来误差。

8 结论

轴向扫描法便于实现透镜性能测量过程的完全自动化，它在测量透镜的出口焦距方面，比现有的方法省时、准确；轴向扫描法可以在大能量范围内测量透镜出口焦距随能量的变化关系；轴向扫描法也适用于其他类似的微焦斑光束性能的测量。

X 射线发生全反射的临界角随着能量的升高而减小，这导致了透镜的出口焦距随着能量的升高而增大。

参考文献(References)

- 1 DING Xun-Liang, LIU Zhi-Guo, YAN Yi-Ming et al. X-Ray Spectrom, 2004, **33**: 67—73
- 2 DING Xun-Liang, XIE Jing-Dong, HE Ye-Jun et al. Talanta, 2000, **53**: 17—22
- 3 YAN Yi-Ming, DING Xun-Liang. Nucl. Instrum. Methods, 1993, **B82**: 121—124
- 4 DING Xun-Liang, HE Ye-Jun, YAN Yi-Ming. X-Ray Spectrom, 1997, **26**: 374—379
- 5 CHEN Jun et al. HEP & NP, 2003, **27**(8): 744—746 (in Chinese)
(陈俊等. 高能物理与核物理, 2003, **27**(8): 744—746)
- 6 Vincze L, WEI F, Proost K et al. J. Anal. At. Spectrom, 2002, **17**: 177—182
- 7 Donald H B. X-Ray Spectrom, 2003, **32**: 195—207
- 8 Muradin A K. X-Ray Spectrom, 2000, **29**: 343—348
- 9 MacDonald C. A, Gibson W M. X-Ray Spectrom, 2003, **32**: 258—268
- 10 GAO N, Ponomarev I Y. X-Ray Spectrom, 2003, **32**: 186—194
- 11 Vincze L, Riekel C. X-Ray Spectrom, 2003, **32**: 208—214
- 12 Taguchi Takeyoshi, XIAO Qi-Fan, Harada Jimpei. J. Synchrotron Rad., 1999, **6**: 170—171
- 13 DING Xun-Liang, WEI Liang, YAN Yi-Ming. J. Trace and Microprobe Techniques, 1997, **15**(4): 647—652
- 14 Birgit Kanngießer, Natalia Kemf, Wolfgang Malzer. Nucl. Instrum. Methods, 2002, **B198**: 230—237
- 15 WANG Yan et al. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2005, **41**(1): 29—31 (in Chinese)
(汪燕等. 北京师范大学学报(自然科学版), 2005, **41**(1): 29—31)

New Method of Measuring the Performance of Polycapillary X-Ray Lens*

SUN Tian-Xi DING Xun-Liang¹⁾ LIU Zhi-Guo WANG Da-Chun

(The Key Laboratory of Beam Technology and Materials Modification of Ministry of Education;
Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University;
Beijing Radiation Center, Beijing 100875, China)

Abstract A new method—axial scanning method (ASM)—is devised to find the position of the focal spot of polycapillary X-ray lens. The absolute errors of the results obtained by using ASM for output focal distance of polycapillary X-ray lens range from $-120\mu\text{m}$ to $120\mu\text{m}$. The energy dependence of the output focal distance of the polycapillary X-ray lens can be obtained by using the ASM over a broad energy range at the same time. The increase of the output focal distance of the lens with higher energies results from the decrease of the critical angle of total reflection with the increasing energies.

Key words polycapillary X-ray lens, axial scanning method, energy dependence of output focal distance

Received 25 November 2004, Revised 10 May 2005

*Supported by National Natural Science Foundation of China (19827002)

1) E-mail: xld@ht.rol.cn.net