

文章编号: 0253-2239(2010)02-0542-04

一种新型单毛细管 X 光学器件

滕玥鹏 孙天希 刘志国 罗萍 潘秋丽 丁训良

(北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室, 北京师范大学核科学与技术学院, 北京 100875)

摘要 利用高精度光纤拉丝塔制作了高品质的锥管, 并且对锥管的束斑大小、传输效率和增益因子进行了测量。测量结果表明, 锥管的束斑大小可以达到 $20\ \mu\text{m}$ 以下, 在 $8.04\ \text{keV}$ 处, 锥管的传输效率为 13.86% , 距离锥管出口端 $2.5\ \text{mm}$ 处, 增益因子为 85。同时, 还利用光线追迹软件 shadow 对锥管的束斑大小、传输效率和增益因子进行了理论模拟, 理论模拟结果与实验中测量的结果符合得较好。测试结果表明, 利用锥管会聚 X 射线, 可以得到比目前经常使用的 X 光透镜更小的束斑。

关键词 X 射线光学; 锥形单毛细管; 束斑尺寸; 传输效率; 增益因子

中图分类号 O434.1 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS20103002.0542

New Type Monocapillary X-Ray Optical Device

Teng Yuepeng Sun Tianxi Liu Zhiguo Luo Ping Pan Qiuli Ding Xunliang

(The Key Laboratory of Beam Technology and Material Modification of Ministry of Education, College of Nuclear Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract A high quality tapered monocapillary (TP) using a high-precision fiber optic tower is designed, and the beam size, the transmission efficiency and the gain factor of the TP are measured. The experimental results showed that the beam size of the tapered capillary is below 20 microns. At $8.04\ \text{keV}$, the transmission efficiency of the TP is 13.86% , and at $2.5\ \text{mm}$ to the exit of the TP, the gain factor of the TP is 85. At the same time, shadow software developed for beam tracing is used to simulate the beam size, the transmission efficiency and the gain factor of the TP, the simulation results matched well with the experimental results. The beam size of X-ray beam focused by using the TP was smaller than that of X-ray beam focused by using an X-ray lens.

Key words X-ray optics; tapered monocapillary; beam size; transmission efficiency; gain factor

1 引 言

锥形单毛细管(锥管)是一种可以形成微束 X 射线的光学器件,它是利用 X 射线在玻璃管内壁发生全反射来会聚 X 射线的。使用锥管来会聚 X 射线,具有束斑小、没有管壁造成的背底等优点。由于具有这些优点,所以锥管在 X 射线微区分析和 X 射线成像等方面都有着较好的应用前景。

国外在锥管的研制方面起步较早,国外的高品

质锥管的束斑大小在 $1\sim 10\ \mu\text{m}$, 增益因子为 $10\sim 1000$ ^[1], 另外国外已经将锥管应用到会聚离子束^[2]、质子激发 X 射线荧光分析、X 射线荧光分析以及 X 射线衍射分析等方面^[1,3-8]。国内在这方面的研究起步比较晚,目前还没有高品质锥管的报道。

本文利用实验室的锥管测量系统对拉制成的锥管的束斑大小、传输效率和增益因子进行了测量,同时还对锥管的束斑大小与束斑离锥管出口端的距离

收稿日期: 2009-03-30; 收到修改稿日期: 2009-06-18

基金项目: 教育部科学技术研究重点项目基金(108125), 应用光学北京市重点实验室建设项目基金(JD100270543), 北京市自然科学基金(1092013)和高等学校博士学科点专项科研基金(200800271021)资助课题。

作者简介: 滕玥鹏(1985—), 男, 硕士研究生, 主要从事 X 光学器件的研制和 X 射线荧光分析等方面的研究。

E-mail: tengyuepeng@163.com

导师简介: 刘志国(1968—), 男, 博士, 高级工程师, 主要从事 X 射线光学器件研发和应用、核电子学与自动控制等方面的研究。E-mail: liuzgbeijing@163.com(通信联系人)

之间的关系进行了研究,另外,还采用了光线追迹软件 shadow 对锥管的束斑大小、传输效率和增益因子进行了理论模拟。

2 理论模拟

在对锥管进行测量之前,利用光线追迹软件 shadow 对经过锥管会聚之后的 X 射线分布情况进行了模拟,模拟时选用了 20 万根能量为 8.04 keV 的 X 射线,为了使模拟条件与实验条件尽量一致,选择了高斯分布的光源(实验中所使用的 X 光管所发出的 X 射线呈高斯分布),模拟中锥管的几何参数与实验中测量的锥管的几何参数保持一致。图 1 为锥管出口端处 X 射线分布的模拟结果,可见在锥管出口端 X 射线被会聚成 $5 \mu\text{m}$ 的束斑。

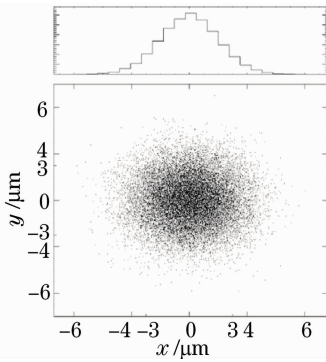


图 1 锥管出口端 X 射线分布

Fig. 1 X-ray distribution at the exit of tapered monocapillary

3 实验

3.1 实验仪器

实验所采用的光源是德国 RTW 公司生产的微聚焦光源(MCBM50-0,6B),它的 Cu 靶($50 \mu\text{m} \times 50 \mu\text{m}$)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 。探测器采用的是正比计数管。光源和正比计数管都放置在五维调试架上,实验中所采用的五维调试架最小步长为 3 μm 。图 2 为实验装置示意图。

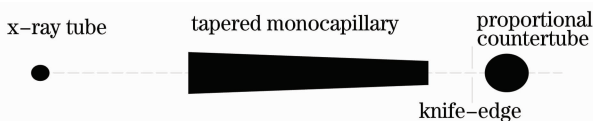


图 2 锥管测试装置示意图

Fig. 2 Scheme of equipment for measuring tapered monocapillary

3.2 实验方法

3.2.1 X 射线经锥管会聚后不同位置处束斑大小的研究

从 X 光源发出的 X 射线被锥管会聚,会聚后的 X 射线在传播过程中发散,在管轴上沿着远离锥管出口端方向取多个点,在每个点采用刀口扫描法^[9-15]得出该点束斑计数的积分分布曲线,再进行微分,该曲线大致为高斯(Gaussian)分布曲线,其半峰全宽即为该位置处 X 射线束斑的大小。对所测出的结果进行拟合,根据拟合所得到的曲线可以推断出沿锥管轴线方向上其他位置处 X 射线束斑大小,并将测量结果与理论模拟结果进行比较。

3.2.2 传输效率的测量

锥管的传输效率是指从锥管射出的 X 光强度和进入锥管的 X 光强度的比值。在测量过程中,首先将锥管的计数调节到最大值,记下计数值,然后取下锥管,在距光源一定距离处,放上针孔,测量从针孔射出的 X 光计数,然后算出在该能量点处锥管的传输效率

$$\eta = \frac{N_{\text{opt}}}{N_{\text{pin}}} \times \frac{S_{\text{pin}}}{S_{\text{opt}}} \times \left[\frac{D_{\text{opt}}}{D_{\text{pin}}} \right]^2, \quad (1)$$

其中 N_{opt} 和 N_{pin} 分别为用锥管和针孔时的 X 射线计数, S_{pin} 和 S_{opt} 分别是针孔和锥管入口的面积, D_{opt} 和 D_{pin} 分别是锥管入口端和针孔离光源焦斑的距离。

测量过程中正比计数管到光源焦斑的距离保持不变,保证了在测量两个计数时空气的吸收近似不变。

3.2.3 增益因子的测量

增益因子指的是锥管功率密度放大倍数,也就是使用锥管后由锥管出射到束斑的功率密度与不使用锥管时由 X 光源直接发射到束斑上的 X 光束功率密度的比值。测量增益因子所使用的方法与测量传输效率所使用的方法是相同的,然后根据算出增益因子为

$$G = \frac{N_{\text{opt}}}{N_{\text{pin}}} \times \frac{S_{\text{pin}}}{S_{\text{beam}}} \times \left[\frac{D_{\text{beam}}}{D_{\text{pin}}} \right]^2, \quad (2)$$

其中 S_{beam} 是锥管会聚的 X 光束斑的面积, D_{beam} 和 D_{pin} 分别是锥管会聚的 X 光束斑和针孔离光源斑的距离。

4 实验结果与分析

对编号为 08-12-18-01 的锥管进行了测试。该锥管的入口端外径为 2.1 mm,入口端内径为 60 μm ,出

口端外径为 1.1 mm, 出口端内径为 $30\ \mu\text{m}$, 锥管长度为 12 cm, 锥度为 0.83%。在距离锥形毛细管出口端 2.5 mm 处开始测量束斑大小, 然后在远离锥管出口端方向每隔 $500\ \mu\text{m}$ 测量一次束斑大小, 观察其束斑变化情况, 并与利用 shadow 模拟所得到的结果进行比较。

在实验过程中, X 光管的电压为 20 kV, 电流为 $3\ \mu\text{A}$, 图 3 给出了距离锥管出口端不同位置处束斑大小的实验值和理论模拟值。

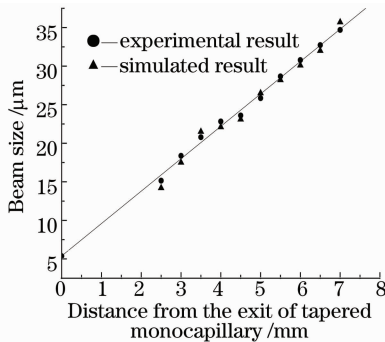


图 3 不同位置处锥管束斑大小

Fig. 3 Beam size of tapered monocapillary in different locations

从图 3 中可以看出距离锥管出口端越远, 锥管的束斑越大, 在距离出口端 2.5 mm 处束斑大小的测量值为 $15.15\ \mu\text{m}$, 实验值与利用 shadow 模拟所得到的值之间的误差都在 $1\ \mu\text{m}$ 之内, 可见实验值与理论模拟值符合得较好。由于实验中所使用的刀口有一定的厚度, 所以正比计数管不能靠近到锥管的出口端, 为了得到锥管出口端处的束斑大小, 可以对所测量的不同位置处的束斑大小进行拟合。根据拟合的曲线算出锥管出口端的 X 射线束斑大小, 然后再与图 1 中理论模拟的结果进行比较。对实验值进行拟合(图 3 中直线是对实验测量值拟合的结果), 得到的拟合曲线为直线, 直线方程为 $y=4.2x+5.38$, 根据该方程可以算出在锥管的出口端处(即 $x=0$), 锥管的束斑大小为 $5.38\ \mu\text{m}$ 。与图 1 的模拟结果进行对比, 利用实验值拟合曲线所算出的锥管出口端束斑大小和理论模拟值的相对误差为 7.6%。

利用锥管会聚 X 射线时, 锥管具有一个焦平面, 在焦平面处锥管的束斑最小, 这根锥管是根据特殊要求设计的, 根据理论模拟结果, 该锥管的焦平面在锥管出口端内侧 1 mm 处。

锥管测试完毕后, 换上直径为 $50\ \mu\text{m}$ 的准直孔, 保持 X 光管的电压和电流值不变, 测量距离准

直孔 2.5 mm 处 X 射线的计数值, 然后将该计数值和距离锥管出口端 2.5 mm 处的计数值分别代入 (1), (2) 式, 就可以得到锥管的传输效率和距离出口端 2.5 mm 处该锥管的增益因子。经过计算, 在 X 射线能量为 8.04 keV (Cu 的 $K\alpha$ 线) 时, 该锥管的传输效率为 13.86%, 在距离锥管出口端 2.5 mm 处增益因子为 85。同时对锥管的传输效率和距离锥管出口端 2.5 mm 处的功率密度增益进行了理论模拟, 传输效率的模拟结果为 12.58%, 增益因子的模拟结果为 82, 可见理论模拟结果与测量结果符合得较好。

根据实验测量结果, 锥管的束斑大小可以达到 $20\ \mu\text{m}$ 以下。根据拟合曲线和理论模拟结果推断, 在锥管出口端处束斑可达到 $10\ \mu\text{m}$ 以下。与目前经常使用的 X 光透镜相比, 利用锥管会聚 X 射线可以得到更小的束斑。束斑越小, 在进行 X 射线微区分析时就可以得到越高的空间分辨率。

5 结 论

对制作的高品质锥管的束斑大小、传输效率、增益因子等技术参数进行了测量, 并且利用 Shadow 软件对锥管的束斑大小、传输效率、增益因子进行了模拟, 实验值与理论模拟值符合较好。测试结果表明, 锥管可以得到比 X 光透镜更小的束斑, 并且锥管的传输效率和增益因子等技术指标也较好, 因此锥管在 X 射线微区分析等方面有着广阔的应用前景。

参 考 文 献

- 1 I. C. Noyan, P. C. Wang, S. K. Kaldor *et al.*. Divergence effects in monochromatic x-ray microdiffraction using tapered capillary optics [J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 2000, **71** (5): 1991~2000
- 2 D. Sekiba, H. Yonemura, T. Nebiki *et al.*. Development of micro-beam NRA for 3D-mapping of hydrogen distribution in solids; Application of tapered glass capillary to 6 MeV ^{15}N ion [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B*, 2008, **266**(18): 4027~4036
- 3 Takuya Nebiki, M. Hasnat Kabir, Tadashi Narusawa. In-air PIXE analysis by means of glass capillary optics [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B*, 2006, **249**(1-2): 226~229
- 4 Jun Hasegawa, Shigeki Shiba, Hitoshi Fukuda *et al.*. A compact micro-beam system using a tapered glass capillary for proton-induced X-ray radiography [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B*, 2008, **266**(10): 2125~2129
- 5 S. V. Kukhlevsky, G. Nyitray. Propagation of X-ray femtosecond pulses through tapered nanometer-scale capillary waveguides [J]. *Physics Letters A*, 2001, **291**(6): 459~464
- 6 Rong Huang, Donald H. Bilderback. Single-bounce monocapillaries for focusing synchrotron radiation: modeling,

- measurements and theoretical limits[J]. *J. Synchrotron Rad.*, 2006, **13**(1): 74~84
- 7 L. Vincze, C. Riekel. Status and perspectives of capillary optics at a third-generation synchrotron radiation source[J]. *X-Ray Spectrometry*, 2003, **32**: 208~214
- 8 A. Bjeoumikhov, M. Erko, S. Bjeoumikhova *et al.*. Capillary μ Focus X-ray lenses with parabolic and elliptic profile [J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research A*, 2008, **587**(2): 458~463
- 9 Sun Tianxi, Ding Xunliang, Liu Zhiguo *et al.*. Experimental investigation of properties of polycapillary X-Ray lens[J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(10): 1436~1440
孙天希,丁训良,刘志国等.整体 X 光透镜性能实验研究[J].光学学报, 2005, **25**(10): 1436~1440
- 10 Sun Tianxi, Xie Yaning, Liu Zhiguo *et al.*. Application of monolithic polycapillary half focusing X-Ray lens in focusing the synchrotron radiation [J]. *Chinese J. Lasers*, 2006, **33**(4): 456~460
孙天希,谢亚宁,刘志国等.利用整体毛细管 X 光半会聚透镜会聚同步辐射[J].中国激光, 2006, **33**(4): 456~460
- 11 Sun Tianxi, Xu Guangyu, Liu Zhiguo *et al.*. Application of monolithic capillary X-Ray lens in analysis of single aerosol particles[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(9): 1833~1836
孙天希,徐光瑜,刘志国等.整体毛细管 X 光透镜在大气颗粒物单颗粒分析中的应用[J].光学学报, 2008, **28**(9): 1833~1836
- 12 Sun Tianxi, Liu Zhiguo, Wang Yan *et al.*. Measurements of polycapillary X-ray optics using the knife-edge made of polymethyl methacrylate as a scatterer[J]. *Nuclear Techniques*, 2006, **29**(5): 339~343
孙天希,刘志国,汪燕等.利用背散射方法测量整体 X 光透镜的性能[J].核技术, 2006, **29**(5): 339~343
- 13 Sun Tianxi, Liu Zhiguo, Wei Shiqiang. Application of monolithic capillary half focusing X-ray lens in micro-EXAFS analytical technology[J]. *High Energy Physics And Nuclear Physics*, 2007, **31**(10): 967~971
孙天希,刘志国,韦世强等.整体毛细管 X 射线半会聚透镜在微区 EXAFS 分析技术中的应用[J].高能物理与核物理, 2007, **31**(10): 967~971
- 14 Sun Tianxi, Ding Xunliang, Liu Zhiguo *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
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
- 15 Tianxi Sun, Zhiguo Liu, Guanghua Zhu *et al.*. Identification of origin of single aerosol particles using polycapillary X-ray lens[J]. *Nuclear Instrument and Methods in Physics Research B*, 2009, **267**(1): 171~174