

文章编号: 1001-4322(2006)06-0913-04

软 X 射线光导纤维传输特性*

秦 义¹, 许泽平¹, 李正宏¹, 郭 存¹, 夏广新¹, 宁家敏¹,
赵屹东², 崔明启², 郑 磊², 朱 杰²

(1. 中国工程物理研究院 核物理与化学研究所, 四川 绵阳 621900; 2. 中国科学院 高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要: 为优化设计软 X 射线聚束透镜,使之与软 X 射线源配合能最大限度地获得高强度软 X 射线束,在北京同步辐射装置软 X 光站 3W1B 束线上,对不同能量软 X 射线(50~1 500 eV)在不同规格毛细管光导纤维中的传输特性进行研究。研究表明:玻璃毛细管对软 X 光有较高的传输效率,毛细管内径越小,曲率越小,光子能量越小,则传输效率越大;使用含硼(B)量高的 DM308 型号玻璃材料拉制成内直径为 0.45 mm、外直径为 0.6 mm 的毛细管组成的软 X 光聚束透镜有较高的传输效率,该规格毛细管可以将能量为 250 eV 的 X 射线传播方向改变 26°后,其出射能量是入射能量的 12%;使用由该规格毛细管设计的软 X 射线聚束透镜同软 X 射线点光源组合,收光角可以达到 30°,透镜焦点处的功率密度是不使用透镜时的 10⁴ 倍。

关键词: 软 X 射线聚束透镜; 全反射; X 射线毛细管; 传输效率

中图分类号: TN253;O434.19 **文献标识码:** A

自从库马霍夫成功研制出首台 X 光聚束透镜^[1]以来,导管 X 光学^[2]及其 X 光聚束系统的研究和应用进展迅速,在大角度范围内对宽频带连续谱 X 光束的调控也得以实现。X 射线的传输通过曲率半径不同的光导纤维来完成,即 X 射线在光导纤维内壁表面产生多次全反射,从光纤的一端传播到另一端,并随光纤的弯曲而改变其传播方向。X 射线光导纤维即空心毛细管,通常是由玻璃材料拉制而成的,大量 X 光毛细管的合理组合就形成了 X 射线聚束透镜,其最大特点是可以大幅度提高 X 光束的功率密度。将透镜与等离子体辐射源进行组合,可以获得干净(除去等离子体产生的电子和离子等的污染)的高强度宽能带 X 光束,X 射线强度可以达到 10⁶ W/cm²^[3],可用于高强度软 X 射线与物质相互作用机理研究,还可以作为标定源^[4]用于软 X 射线探测器件的相对标定。同时,软 X 射线聚束透镜还可以用于 Z 箍缩内爆等离子体产生的 X 光的有效运输和利用的前期研究。为了优化设计 X 光会聚透镜,使之与 X 光源配合能最大限度地获得高强度软 X 光束,对组成透镜的玻璃毛细管的运输特性进行研究,实验获得 50~1 500 eV 软 X 射线在不同规格毛细管中的传输特性。

1 软 X 射线在毛细管中的传输理论

X 射线在界面上的反射和折射可用菲涅耳公式^[5]描述,对于软 X 光而言,所有材料的折射系数均小于 1,折射系数可以表示成 $n(\omega) = 1 - \delta + i\beta$,其中 δ 和 β 都远小于 1, δ 值决定了全反射临界角 $\theta_c = \sqrt{\delta}$ 。根据波动力学相关理论及电磁场边值关系和边界条件,在小角度掠入射时,即掠入角 $\theta < \theta_c$,反射率可以近似写成^[6]

$$R(\theta) = \frac{|\theta - \sqrt{\theta^2 - 2\delta + i2\beta}|^2}{|\theta + \sqrt{\theta^2 - 2\delta + i2\beta}|^2}$$

当掠入角大于全反射临界角时,反射率为零。根据该传输理论,可以计算 X 射线在各种规格毛细管中的传输效率。如图 1 所示,X 射线垂直于毛细管端面入射,用几何光学的方法可以得到每束 X 射线所经历的反射次数 N ,以及每次反射的掠入射角 θ_i ,那么总反射率^[7-8] $R = \prod_{i=1}^N R(\theta_i)$ 。对入射到毛细管内不同位置的 X 射线束的反射率进行加权平均,就得到 X 射线在毛细管中的传输效率。

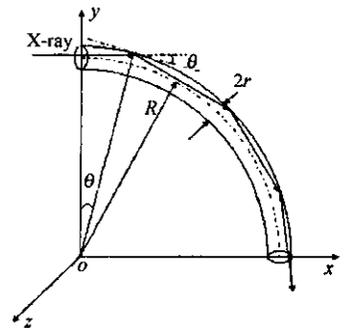


Fig. 1 X-ray transmitting through a curved capillary

图 1 X 光在弯曲毛细管中的传输

* 收稿日期:2005-10-21; 修订日期:2006-02-27

基金项目:中国工程物理研究院基金资助课题(20040208)

作者简介:秦 义(1980—),男,硕士研究生,从事 Z-pinch 诊断研究;qingyi9904@yahoo.com.cn。

2 实验设计

实验在北京同步辐射装置软 X 光站 3W1B 束线上完成。靶室结构如图 2 所示,同步辐射装置出射的软 X 射线束斑大小是 $10\text{ mm} \times 3\text{ mm}$,为了减小光斑不均匀性对测量结果的影响,将多根毛细管并成一束,测量多根毛细管的平均传输效率。在毛细管前端放置限束狭缝,狭缝大小为 $6\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,毛细管紧贴狭缝放置在毛细管槽中,毛细管槽的横截面是 $5.4\text{ mm} \times 1.8\text{ mm}$,这样就可以保证软 X 光束可以完全照射毛细管槽。狭缝中心、毛细管槽的轴心以及探测器的中心都位于靶室的轴线上。毛细管槽和探测器可以水平移动,毛细管槽设有 5 道,每道可以放置 10~20 根长 275 mm 的玻璃毛细管,每道有不同的曲率半径,从上到下分别为 $\infty, 2, 1, 0.8, 0.6\text{ m}$ 。采用美国生产的硅光电二极管标准探测器 (AXUV-100G, IRD, USA) 测量软 X 光强度,并经弱电流放大器 (6517, KEITHLEY, USA) 送入计算机。该探测器在软 X 射线能区响应范围很宽 ($10\text{ eV} \sim 6\text{ keV}$),因此光电转换的电流能很好地反映软 X 射线的强度。

调节靶室位置,使 X 射线沿靶室轴心入射到狭缝。将毛细管移开光路,使用探测器直接测量经过狭缝限束后的软 X 射线强度 I_1 。再将玻璃毛细管移动到光路上,测量经过不同规格玻璃毛细管反射后的软 X 射线强度 I 。由于同步辐射装置发出的准平行单色软 X 射线在高真空中传播 30 cm 后,其强度衰减可以忽略不计,那么根据射线强度 I_1 及毛细管的占空比,就可以计算出射到毛细管内的射线强度 I_0 ,该规格的毛细管对该能量软 X 射线的传输效率即为 $\eta = I/I_0$ 。改变入射光子能量,并将每束毛细管(相同内外半径,同种材料)依次放入不同毛细管槽中进行测量,就得到不同曲率半径下毛细管传输效率随 X 光能量的变化曲线。

3 实验结果

在实验中,系统地测量了软 X 射线 ($50 \sim 1\,500\text{ eV}$) 在不同规格(包括材料、内外半径、曲率半径)玻璃毛细管中的传输效率。实验结果表明:软 X 射线在直玻璃毛细管中有较高的传输效率,弯曲的玻璃毛细管可以将软 X 射线的传播方向改变较大的角度,玻璃毛细管的参数对传输效率有较大影响。

3.1 软 X 射线在直毛细管中的传输

在理想情况下,准平行软 X 射线束入射方向与直毛细管轴线平行,那么传输效率理论值为 100%,而在实验中不可能保证入射光束与毛细管完全平行,且毛细管不是理想直管,难免有一定的吸收。图 3 给出软 X 射线在直毛细管中传输时光子能量 E_p 与传输效率 η 的关系,软 X 射线在长为 275 mm、内直径为 0.6 mm、外直径为 0.8 mm 的直毛细管中传输效率高达 80%。

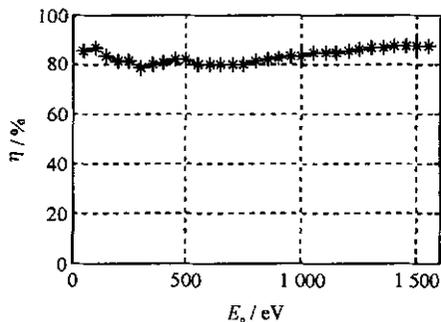


Fig. 3 Transmussion of X-ray through straight capillary

图 3 软 X 射线在直毛细管中的传输

3.2 能谱特性

图 4 是软 X 射线在弯曲毛细管中的传输效率随光子能量的响应曲线,毛细管长 265 mm,内直径为 0.6 mm,外直径为 0.8 mm,曲率半径为 800 mm,圆圈点表示实验测量到的数据,实线为按 SiO_2 介电常数计算的理论曲线,传输效率变化的基本趋势是随入射光子能量增大而减小,实验结果与理论计算相吻合。在氧的 K

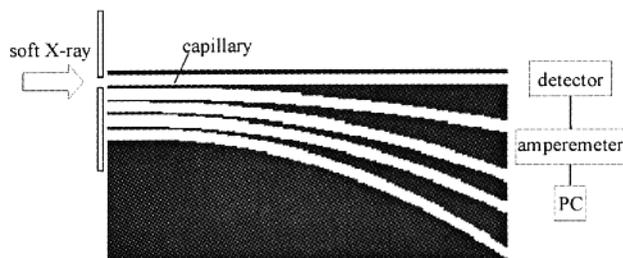


Fig. 2 Illustration of experimental setup

图 2 实验示意图

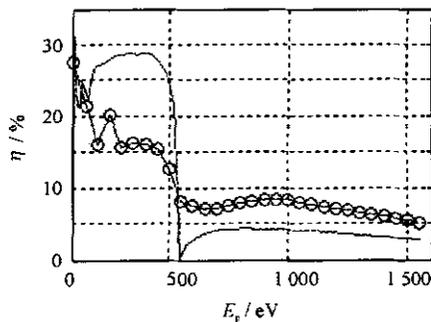


Fig. 4 Transmission efficiency vs photo energy

图 4 光子能量对传输效率的影响

吸收边处(543 eV),传输效率下降的很陡峭。这是因为毛细管由玻璃制成,玻璃中氧元素的含量最高,因此光子能量在氧的吸收边附近时,毛细管对软 X 射线的吸收强烈,导致传输效率迅速下降。

3.3 毛细管材料对传输效率的影响

软X光段,低原子序数原子对X射线的反射系数较大,因此,含硼(B)量高的DM308号玻璃对软X射线的反射率要比含硼(B)量低的BJ40号玻璃高。如图5所示,毛细管外径为0.8 mm、内径为0.6 mm时,将两种型号玻璃毛细管的传输效率进行对比,可以看出DM308号玻璃毛细管的传输效率较高,这与理论分析相符合。

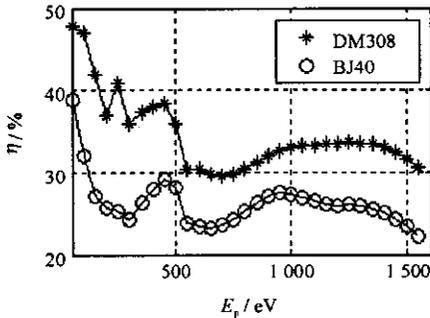


Fig. 5 Dependence of transmission efficiency on capillary material

图 5 毛细管材料对传输效率的影响

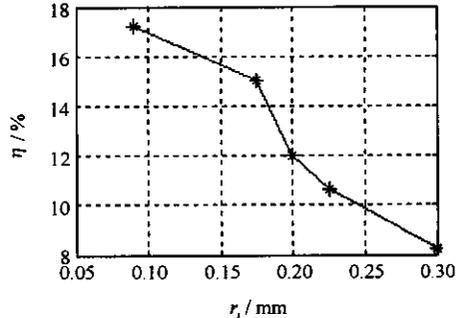


Fig. 6 Dependence of transmission efficient on inner diameter of capillary

图 6 毛细管内径对传输效率的影响

3.4 毛细管内径对传输效率的影响

光子能量为 350 eV 条件下,内径与传输效率的关系如图 6 所示,可以看出传输效率随内径的增大而减小。这是因为在相同曲率半径条件下,内径越大,入射到毛细管内的软 X 射线束在反射过程中的平均掠入角越大,反射率就越低,即传输效率越小。但一方面,由于工艺条件的限制,毛细管内径不可能无限地小;另一方面毛细管有一定的壁厚,对相同壁厚的毛细管,内径越小,其收光占空比就越小,不利于 X 射线的收集。图 7 给出了按占空比修正后的传输效率随毛细管内径的变化曲线。由此综合得出:内径为 0.45 mm、外径为 0.6 mm 的毛细管传输效率最高。

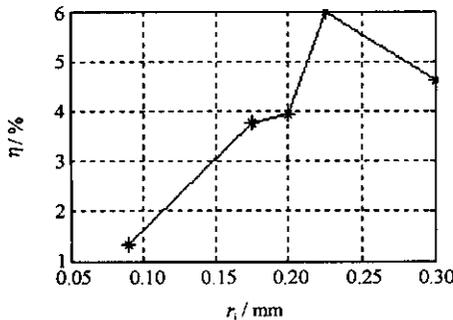


Fig. 7 Transmission efficiency modified by the ratio of inner and outer radius

图 7 按占空比修正后内径对传输效率的影响

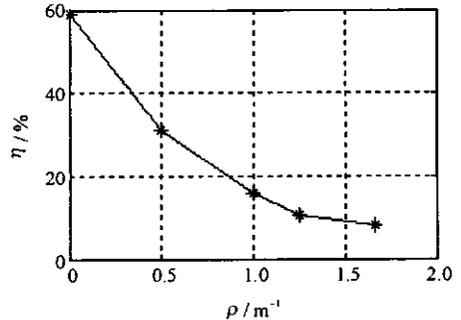


Fig. 8 Dependence of the transmission efficiency on the capillary curvature

图 8 毛细管曲率对传输效率的影响

3.5 毛细管曲率半径对传输效率的影响

图 8 示出了毛细管曲率与传输效率的关系。该图表明,传输效率随毛细管曲率的增大而减小,这是因为同样长度的毛细管,其曲率半径越小,它将软 X 射线束传播方向改变的角度就越大,软 X 射线在其中所经历的反射次数就越多,以及每次反射的掠入射角就越大,因此传输效率就越低。图 9 显示弯曲毛细管将 X 射线传播方向改变的角度 α 与传输效率的关系(光子能量为 400 eV),可以看出弯曲毛细管将 X 射线传播方向改变较大的角度后,仍有较高的传输效率。截止传输效率为 10%,弯曲毛细管将 X 射线传播方向改变的最大角度随光子能量的变化关系如图 10 所示,可以看出:弯曲毛细管可以将 X 射线的传播方向改变较大的角度,当光子能为 250 eV 时,X 射线传播方向可改变 26°。

4 结 论

对软 X 射线在玻璃毛细管中的传输特性进行理论和实验研究,研究表明:玻璃毛细管对软 X 光有较高的

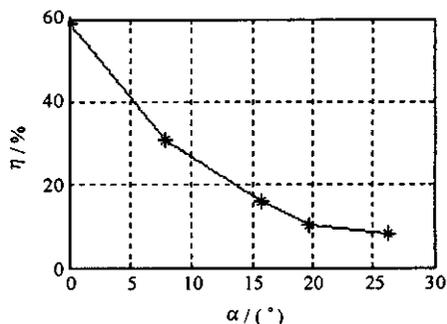


Fig. 9 Transmission efficiency vs bending angle of soft X-ray

图 9 毛细管曲率对传输效率的影响

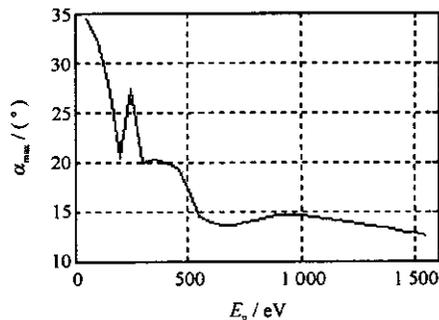


Fig. 10 Max bending angle of soft X-ray vs photo energy

图 10 X 射线传播方向改变的最大角度与光子能量的关系

传输效率,毛细管参数对传输效率有较大的影响。经过数据分析,在我们研究的九种规格毛细管中,使用含硼(B)量高的 DM308 型号玻璃材料拉制成内直径为 0.45 mm、外直径为 0.6 mm 的毛细管是组成软 X 光聚束透镜的最佳选择。该规格的毛细管将能量为 250 eV 的 X 射线传播方向改变 26°后,其出射能量是入射到毛细管内能量的 12%。我们已采用该规格毛细管设计成软 X 射线聚束透镜,收光角达到 30°,同软 X 射线点光源组合,透镜焦点处的功率密度是不使用透镜时的 10⁴ 倍。

致 谢: 感谢中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室软 X 光站对本工作的大力支持。

参考文献:

- [1] Komakhov M A, Komarov F F. Multiple reflection from surface X-ray optics[R]. *Physics Reports*, 1990, **5**:289.
- [2] 颜一鸣,丁驯良. 导管波导系统的新应用[J]. 北京师范大学学报(自然科学版),2003, **39**(3):345-352. (Yan Y M, Ding X L. New applications of capillary waveguide system. *Journal of Beijing Normal University(Natural Science Edition)*, 2003, **39**(3):345-352)
- [3] Anan'in O B, Bykovskii Yu A, Znamenskii V Yu, et al. Laser-plasma source of soft-X-Ray radiation[J]. *Laser Physics*, 1994, **4**(N3):521-531.
- [4] 孙可煦,易荣清,杨家敏,等. 同步辐射软 X 射线源用于软 X 射线探测元件定标[J]. 物理学报,1997, **46**:4. (Sun K X, Yi R Q, Yang J M, et al. Calibration of the energy response for the soft X-ray detections elements with the Beijing synchrotron radiation facility. *Acta Physica Sinica*, 1997, **46**:4)
- [5] Born M, Wolf E. Principles of optics (5th ed)[M]. New York: Pergamon Press, 1975.
- [6] Attwood D T. Soft X-rays and extreme ultraviolet radiation: principles and applications[M]. Cambridge University Press, 1999.
- [7] 牛胜利,彭玉,王建国,等. X 光导管传输特性得蒙特卡罗模拟[J]. 强激光与粒子束,2004,**16**(12):1513-1517. (Niu S L, Peng Y, Wang J G, et al. Simulation of X-ray transmission through mono-capillaries by Monte-Carlo method. *High Power Laser and Particle Beams*, 2004,**16**(12):1513-1517)
- [8] 邬鹏举,李玉德,林晓艳,等. X 射线在毛细管中传输的模拟计算[J]. 物理学报,2005, **54**(10):4478-4482. (Wu P J, Li Y D, Lin X Y. Simulation of X-ray transmission through a capillary. *Acta Physica Sinica*, 2005, **54**(10):4478-4482)

Transmission characteristics of soft X-ray through capillary

QIN Yi¹, XU Ze-ping¹, LI Zheng-hong¹, GU Cun¹, XIA Guang-xin¹, NING Jia-min¹,
ZHAO Yi-dong², CUI Ming-qi², ZHENG Lei², ZHU Jie²

(1. Institute of Nuclear Physics and Chemistry, CAEP,

P. O. Box 919-212, Mianyang 621900, China;

2. Institute of High Energy Physics, China Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract: Experimental research on X-ray guiding capillaries is the foundation of X-ray lens design. The experimental results of measuring transmission efficiency within the energy range of 50 eV~1.5 keV for a variety type of capillaries are presented, including different materials, different inner radius and different bent radius. It is shown that the transmission efficiency of curved capillary increases with the decrease of the X-ray energy, the inner diameter of capillary, and the bend radius of curved capillary. As a result, the capillary manufactured of glass DM308 with an inner diameter of 0.45 mm and an outer diameter of 0.60 mm is the best choice for the soft X-ray lens.

Key words: X-ray lens; Multiple reflections; X-ray capillary; Transmission efficiency