

弯曲导管束在“水窗”及附近软 X 光的响应测量*

陈俊 丁训良¹⁾ 赫业军 颜一鸣 罗萍 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所,北京市辐射中心 100875 北京)

崔明启 朱佩平 赵屹东 朱杰 郑雷

(中国科学院高能物理研究所 100039 北京)

摘要 测量了弯曲导管对“水窗”波段及其附近的 X 光响应,圆弧弯曲导管束对 X 光在“水窗”段有较大传输效率,而对“水窗”之外的高能 X 光响应较小. 研究表明, X 光在“水窗”段的响应,可以是在“水窗”之外的高能 X 光的响应的 5 倍,这种弯导管有可能用于同步辐射中,“过滤”掉白光高能部分,而直接输出较强的“水窗”段 X 光.

关键词 水窗 软 X 光 导管 X 光

1 引言

90 年代以来,导管 X 光聚束技术进展迅速,从早期的约 0.5m 长、0.1m 粗的组装式装置发展为约 0.1m 长、0.01m 粗的小巧易用的整体式元件,导管 X 光聚束的应用得以快速发展,如应用于 X 光光刻^[1], X 光衍射分析^[2]和 X 光荧光分析^[3].

导管 X 光聚束技术原理是外全反射,即 X 光以小于全反射临界掠射角入射平滑的物质表面时,能以极高的反射率(近于 1)反射 X 光. 利用此原理, X 光入射内部表面光滑的空心毛细导管内壁以小于全反射临界掠射角多次全反射可以实现 X 光的高效率传输,导管的弯曲可改变 X 光原来的前进方向,从而可以按人们的需要实现 X 光的聚束,做成会聚透镜和平行束透镜. 导管 X 光技术还可以做成一种新型的元件,这种元件有望用于抑制高能 X 光而让低能 X 光有效传输. 其原理利用了不同能量的 X 光有不同的全反射临界掠射角的特点,低能 X 光有大的临界角,高能 X 光有小的临界角,所以适当地弯曲导管可以加大 X 光与导管管壁的掠射角,可以抑制较高能量的 X 光,而让较低能量的 X 光通过导管. 一般而言,物质对 X 光有吸收,吸收随 X 光能量

的增加而减少,抑制低能量 X 光可加吸收片解决,而能量高的 X 光具有更高的透过率,因此抑制高能 X 光一直无好办法. 弯曲导管有望建立一种限制较高能量的 X 光,对 X 光能量做选择的手段.

在“水窗”段(2.3—4.4nm);由于生物研究中的重要物质如蛋白质等的线性吸收系数比水的线性吸收系数高 1 个量级,所以,在“水窗”段活生物的 X 光显微成像以及合适的“水窗”段照射样品光源的研究具有重要意义. 本文研究了弯曲导管对“水窗”波段及其附近的 X 光的响应.

2 圆弧弯导管简单理论

本文研究的是圆弧弯曲导管(见图 1),导管内表面方程可表示为

$$(\sqrt{x^2 + y^2} - R)^2 + z^2 = r^2, \quad (1)$$

其中 R 为圆弧弯管的曲率半径, r 为导管的半径. X 光平行导管中轴入射时,入射至 B 点的 X 光射线,

$$\sin\theta_{\max} = 2\sqrt{rR}/(R + r), \quad (2)$$

在 $r/R \ll 1$, $\theta_c \ll 1$ (θ_c 是外全反射临界角)条件下, $\theta_{\max} \approx 2\sqrt{r/R}$. 如果 $\theta_{\max} \leq \theta_c$, 则进入导管的 X 光全

2002-11-22 收稿, 2003-03-28 收修改稿

* 国家自然科学基金(19775009), 中国科学院高能物理研究所国家同步辐射实验室资助

1) 北京师范大学低能核物理所, 100875; E-mail: xld@ht.rol.cn.net

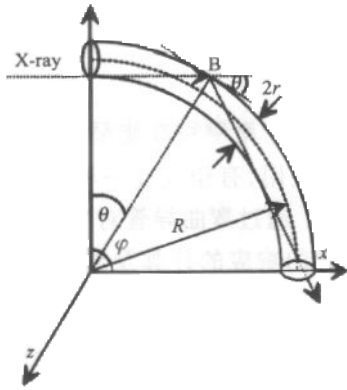


图 1 X 光平行入射圆弯曲导管示意图

能顺利通过导管,即

$$\gamma = R\theta_c^2/4r \geq 1, \tag{3}$$

否则会出现进入导管的 X 光不能全部顺利通过导管,即会出现进入导管的部分 X 光,由于掠射角 $\theta > \theta_c$,而不被顺利地反射. 式(3)表明一定的弯曲曲率半径和一定粗细的弯导管,波长长的 X 光 θ_c 大,容易满足(3)式,软 X 光可以通过导管,而波长短的 X 光不能满足(3)式,则难以通过导管. 对应 $\gamma = 1$ 的曲率半径为临界曲率半径 $R_c = 4r/\theta_c^2$,长度为 L 的导管的临界弯角 $\varphi = L/R_c = L\theta_c^2/4r$.

3 实验条件

实验采用的弯曲导管束由许多弯曲成同样曲率半径、同样内径大小和同样的导管束长度的圆弧弯曲导管组成(见图 2),导管束截面呈正六角形. 弯曲导管束制作是将直圆导管束以一定的曲率加热弯曲而成,成型后各个导管的曲率相同. 实验中采用的导管束截面边对边距离约 4mm,导管束中的导管内径、弯导管曲率半径和导管束长度 70—110mm 不等. 弯曲导管对“水窗”波段及附近 X 光响应的测量在中科院高能物理所同步辐射实验室完成. 实验要求测量有无导管束时某一能量的强度,然后以有导管束时的强度与无导管束时的强度之比作为此能量下的导管束的效率,一系列能量下的导管束的效率

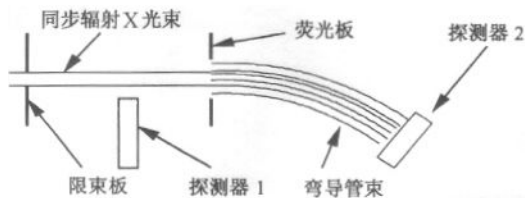


图 2 实验原理图

即为该导管束的响应曲线. 选择入射导管束的单一能量采用光栅单色器,能量范围取 50—1300eV. 由于同步辐射光束截面尺寸约 3mm × 10mm,超出导管束截面的大小,为了有可比性,对入射导管束的 X 光用狭缝进行了限制,在特定的空间位置使入射导管束的 X 光束截面约 1mm × 1.3mm 小于导管截面.

4 测量结果与分析

测量了不同弯曲曲率、不同管径和不同导管长度的弯导管束的响应曲线. 图 3 是导管半径和长度相同,而曲率半径不同的弯曲导管束的响应曲线. 从图 3 可以看出,曲率半径大的导管束, X 光的传输效率在所测量能量段内比曲率半径小的导管束要高,曲率半径为 500mm 时,“水窗”的 X 光传输效率高,高于 30%. 图 4 是直导管束的响应曲线. 直导管束可以直接通过直射光,也就是不与导管壁相遇的 X 光直接通过导管. 由于直射光的存在,高于“水窗”能量的 X 光其传输效率也未降低. 图 5 比较了曲率半径和长度相同,而导管内径分别为 r_1 和 r_2 ($r_1 > r_2$) 的 2 种弯曲导管束的响应曲线. 管径大的对软 X 光的响应要大. 图 6 的结果表明,曲率半径和导管管径相同时,导管长度的增加,传输效率会由于 X 光的反射次数增加而降低,但选择响应加强,“水窗”与高于“水窗”的 X 光的传输效率比值会加大. 如图 5 所示,实验结果表明曲率半径为 280mm,导管管径为 r_1 ,长度为 110mm 时,“水窗”波段 X 光的传输效

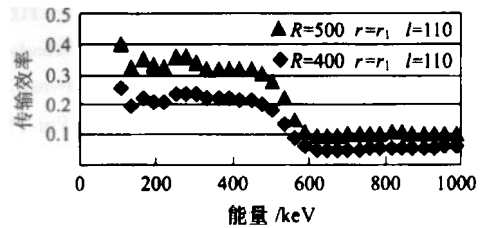


图 3 不同曲率半径的导管的响应

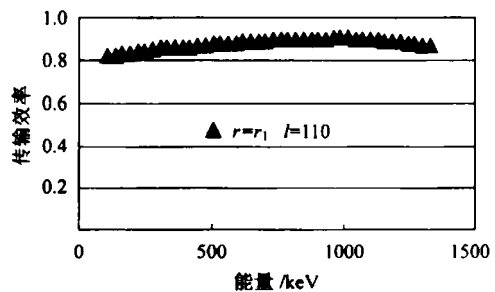


图 4 直导管束的响应

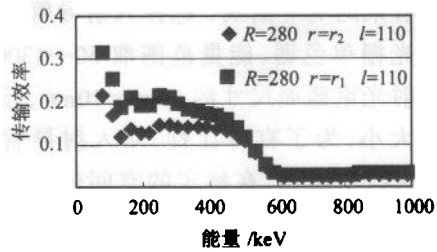


图 5 不同管径的弯曲导管的响应

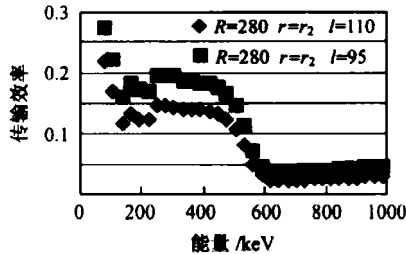


图 6 不同长度的弯曲束导管的响应

率约为高于“水窗”能量的 X 光的 5 倍以上。

5 结论

利用弯曲导管限制较高能量的 X 光,是 X 光学中的一个新的应用,有望建立一种对 X 光能量有选择性的新手段. 通过弯曲导管对“水窗”波段及高能端附近的 X 光的响应的计算及测量,表明选择合适的导管参数,能够使圆弧弯曲导管束对 X 光在“水窗”段有较大传输响应,而对“水窗”之外的高能 X 光响应较小. 两种同步辐射设备上的实验表明, X 光在“水窗”段的响应,可以是对“水窗”之外的高能 X 光响应的 4—5 倍. 进一步研究,弯导管有可能用于同步辐射,它可限制同步辐射白光高能部分,而直接输出较强的“水窗”段 X 光.

作者感谢中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室软 X 光站和中国科学技术大学国家同步辐射实验室软 X 光站对本工作的大力支持.

参考文献 (References)

- 1 YAN Yi-Ming et al. Journal of Beijing Normal University (Natural Science) 1995, 31(Sup.):20(in Chinese)
(颜一鸣等. 北京师范大学学报(自然科学版), 1995, 31(增刊): 20)
- 2 HE Ye-Jun et al. Journal of X-ray Science and Technology, 1998, 8: 145
- 3 DING Xun-Liang, et al. Advance in X-ray Analysis, 1999, 42:243
- 4 Kumakhov K M, Komarov F F. Phys. Rep. 1990, 191(5):289

Response of Bending Capillaries to Soft X-Ray with Energy around “Water Windows” *

CHEN Jun DING Xun-Liang¹⁾ HE Ye-Jun YAN Yi-Ming LUO Ping WANG Da-Chun

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

CUI Ming-Qi ZHU Pei-Ping ZHAO Yi-Dong ZHU Jie ZHENG Lei

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract The method of bending capillaries to limit higher energy X-ray is a possible way to select X-ray energy. Calculation and measurement using synchrotron radiation source indicated that the transmission efficiency of X-ray in “water window” through capillaries can be higher by a factor of 5 than that of X-ray with energy higher than “water window”.

Key words water window, soft X-ray, monolithic capillaries X-ray optics

Received 22 November 2002, Revised 28 March 2003

* Supported by NSFC(19775009), Institute of High Energy Physics, CAS

1) Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University, Beijing 100875; E-mail: xld@ht.rol.cn.net