

整体 X 光透镜及其在 X 射线衍射技术中的应用*

颜一鸣 赫业军 陈宝振 李玉德 丁训良 王大椿
刘安东 魏富忠 陈俊 罗萍

(北京师范大学低能核物理所, 北京市辐射中心 北京 100875)

摘要 概述了整体 X 光透镜的物理性能及其在 X 射线衍射技术中的应用研究,介绍了所研制的新型衍射装置及其测量结果.

关键词 X 光导管 X 光透镜 X 射线衍射

分类号 O434.14

1 引言

90 年代以来,导管 X 光学和以它为基础的 X 光聚束系统的研究成了 X 光学的新热点^[1].本所 X 光学实验室在对导管内 X 光传输规律进行系统研究的基础上,发展了整体 X 光透镜技术^[2],并对其在 X 射线衍射分析等领域的应用进行了研究.

2 整体 X 光透镜

导管 X 光学的基本原理是 X 光以小于全反射临界角的掠射角射入内表面非常光滑的空心细管,经过多次反射高效率地从导管进口端传播到出口端.保持 X 光在导管内的全反射条件并弯曲 X 光导管,可以改变 X 光的传播方向.设一次反射的反射系数为 0.97,则经过 40 次反射之后,X 光强度仍可达到原有强度的 30%,在距 X 光源较远的地方,它的功率密度大大高于没有导管时直接出射 X 光束在该处的功率密度,即导管的使用可以提高 X 光束功率密度.全反射临界角的大小与 X 光子能量成反比,能量越高,全反射角越小.另一方面,X 光能量越低,导管内壁对 X 光的吸收越强.由此,人们选择适当的 X 光导管几何参量,还可以将导管用作 X 光带通滤波器.

在导管 X 光学的基础上,俄国科学家库

马霍夫发明了 X 光聚束系统(或称 X 光透镜).最早的 X 光透镜由大量的单根 X 光导管通过手工装配而成.这种透镜实用性较差,所以从 1991 年开始,进行了整体 X 光透镜的研究性试制.整体透镜的导管互相紧密粘接、管壁很薄,从而大大增加了 X 光的传输效率以提高出射 X 光的功率密度.其特点是,透镜小巧、机械性能好、便于安装.因此不但可以据此设计新一代 X 光仪器设备,而且可以将透镜加到旧有的 X 光仪器设备上,以增强和扩大旧仪器设备的功能.

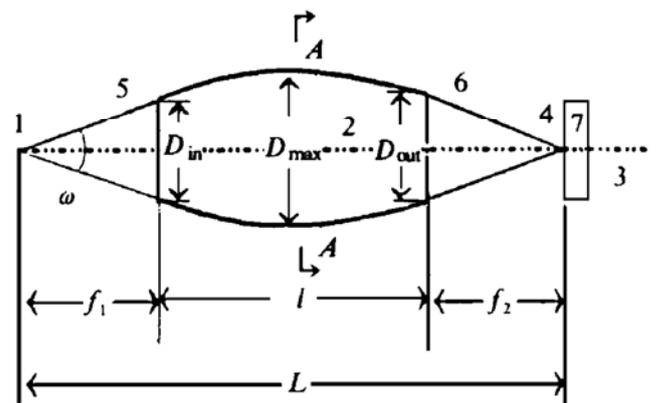


图 1 会聚透镜的主体结构

1 X 光源 2 透镜 3 透镜光轴 4 焦斑 5 被捕获的 X 射线 6 聚束 X 射线 7 X 光传感器

整体 X 光透镜分会聚透镜和平行束透镜两种类型.会聚透镜将发散的 X 光会聚成很小的束斑,以大大增强局部区域的 X 光强度.图 1 表示会聚透镜的主体结构,其中 ω 为 X

* 国家自然科学基金和北京市自然科学基金资助课题,课题编号 69138010 和 19010010.

射线捕获角, D_{in} 、 D_{max} 、 D_{out} 为透镜的进口最大和出口处的尺寸, f_1 、 f_2 为进口焦距和出口焦距, L 为透镜长度. 会聚透镜的物理特性可以用 X 光强度传输效率、焦斑大小、功率密度增益因子、等效距离及透镜占空比等参量表示.

平行束 X 光透镜可以将发散的 X 光束转化为平行 X 光束, 或将平行 X 光会聚成很小

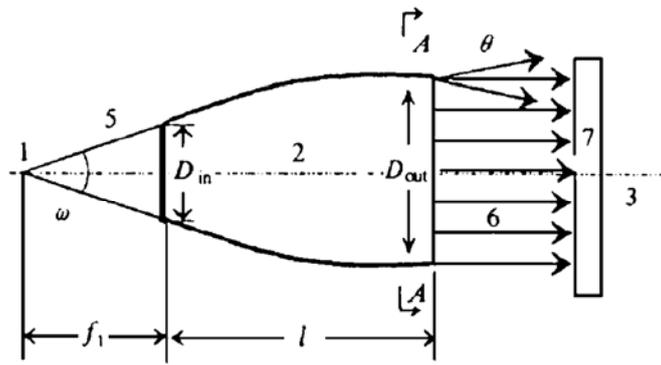


图 2 准平行束 X 光透镜主体结构

1 X 光源 2 透镜 3 透镜光轴 5 入射到透镜的 X 光 6 自透镜出射的 X 光 7 X 光传感器

的束斑. 图 2 表示准平行束 X 透镜的主体结

构. 其中 f_1 为焦距, l 为透镜长度, ω 为 X 光捕获角, D_{in} 、 D_{out} 为透镜进口和出口尺寸, θ_{max} 为准平行 X 光束的最大发散角. 它和会聚透镜的区别在于透镜后半部的 X 光通道是相互平行且平行于 X 光轴的, 从而出射的 X 光形成准平行束. 准平行束 X 光透镜可以用 X 光强度传输效率、照野面积、照野均匀度、角散以及功率密度增益因子等物理参量表征.

X 光透镜有广阔的应用领域. 不同应用领域对 X 光透镜的要求不同. 微束 X 射线荧光分析 (μ -XRF) 中要求高 X 光功率密度和小束斑, 而在 X 射线衍射分析 (XRD) 和 X 射线光刻 (XRL) 实验中要求得到平行束, 并希望透镜给出大的照野和均匀的密度分布. 没有一个万能透镜能满足所有的应用要求, 所以人们只能设计制造出不同型号的 X 光透镜来满足不同的应用场合. 表 1 和表 2 列出了北京师范大学低能核物理所 X 光学实验室已研制成功的四个系列 X 光透镜的几何参量和物理性能 (实验测量结果).

表 1 几种 X 光透镜的主要几何参量

类 型	应用 领域	X 光子 能量 E/keV	入口端 焦距 f_1/mm	出口端 焦距 f_2/mm	透镜 长度 l/mm	X 光源到 样品距离 L/mm	透镜最 大尺寸 D_{max}/mm
FA-1	XRD、XRF	8~25	30~100	25~100	40~80	95~250	15
FB-1	XRD、XRF	0.6~2	30~100	25~100	40~80	95~250	15
PA-1	XRD	8~25	30~150		40~150		8
PB-1	XRL	0.6~2.5	30~150		40~150		20

表 2 几种 X 光透镜的主要物理特性

类 型	X 光捕 获角 (10^{-3}rad)	束斑 大小 FWHM/ μm	传输 效率 $\eta(\%)$	功率密度 增益因子 K	等效 距离 L_{eq}/mm	照野 尺寸 (mm)	出射 X 光角散 $\theta/10^{-3}\text{rad}$
FA-1	30~200	50~150	3~15	100~1 800	<10		
FB-1	30~200	500~1 000	3~20	10~300	<30		
PA-1	10~100		10~40			< Φ 8	<3
PB-1	10~150		10~25			< Φ 20	<10

3 整体平行束 X 光透镜在 X 射线衍射技术中的应用

X 射线衍射作为一种重要的分析测试方法，对物质结构的基础研究及其他学科的发展起着重要的作用。常规 X 射线衍射仪如图 3 所示，它的平行 X 光是靠两组索拉狭缝、发

会比常规 X 射线衍射仪高得多；其次，由于常规衍射仪的平行 X 光是靠光阑限制形成，因此当狭缝变大时，灵敏度提高，而 X 光平行度变差，分辨率则下降，新型衍射装置是在保持高灵敏度前提下，随整体 X 光透镜研制水平的提高，X 光平行度会越来越好，因而分辨率会更高。初步实验结果证实了这些分析。

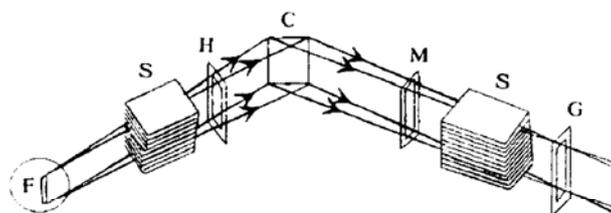


图 3 常规衍射仪狭缝系统
F 线焦 S 索拉狭缝 H 发散狭缝
M 防散射狭缝 G 接收狭缝

散狭缝、防散射狭缝、接收狭缝等光阑系统对 X 光发散部分的限制而产生。绝大部分 X 光功率被浪费。忽略两组索拉狭缝的影响，探测器接收到的是线 X 光，即常规衍射仪应用的是一维 X 光。如果用整体平行束 X 光透镜代替其中的狭缝 X 光源，可以大大提高 X 射线衍射分析仪的性能。图 4 表示这种新型的 X 光透镜衍射仪的原理。

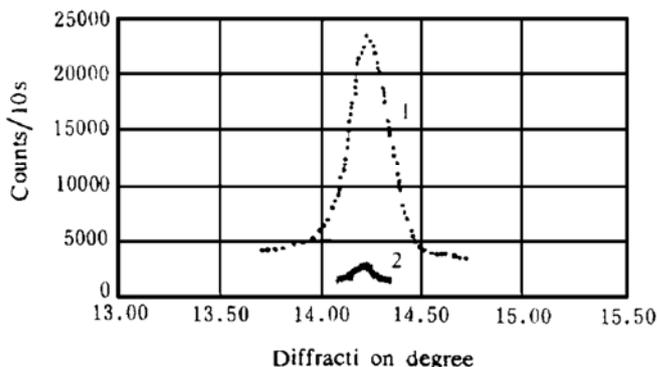


图 5 衍射实验曲线

本课题组用北京师范大学低能核物理所 X 光学室研制的整体平行束 X 光透镜在新型衍射装置上作了初步实验。透镜焦距 $f = 73$ mm，长度 $l = 48$ mm，角散 $\theta_{\max} = 0.23^\circ$ 。透镜出口加 $\Phi 3$ mm 光阑。X 光机为俄罗斯点束斑 ($\Phi 100$ μm) X 光机 REIS-I，最大输出功率 5 W。实验用 Cu 靶的 $K\alpha$ 辐射，管电压/管电流 = 32 kV/80 μA 。测角仪为日本理学 SG-9DR。探测器为 NaI(Tl) 晶体。试样为 (111) Si 单晶。透镜出口到试样的距离为 119 mm，试样至探测器 180 mm。实验采用手动调节，取样间隔 $\Delta\theta = 0.025^\circ$ ，探测器记录时间为 10 s。实验结果见图 5(曲线 1)，衍射峰 FWHM = 0.22° 。在管电压/管电流 = 32 kV/80 μA 同样条件下，当发散狭缝 DS = 1° 防散射狭缝 SS = 1° 时，常规衍射实验结果为图 5(曲线 2)，衍射峰 FWHM = 0.1° 。实验结果表明：在相同 X 光功率下，新型衍射装置测得的衍射曲线峰值强度是常规测量的 14 倍。衍射峰 FWHM = 0.22° ，和透镜角散 $\theta_{\max} = 0.23^\circ$ 相符合。由此可见，随着整体 X 光透镜研制水平的提高，

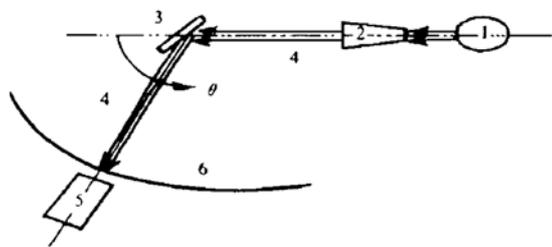


图 4 整体 X 光透镜衍射装置工作原理图
1 X 光管 2 平行束透镜 3 试样
4 X 射线束 5 探测器 6 测角仪

从原理上分析，与普通的 X 射线衍射仪相比，整体 X 光透镜衍射仪至少有下列两大优点：首先，由于整体平行束 X 光透镜对发散光的会聚作用，在相同功率的 X 光管下 X 光透镜衍射仪有效功率密度要比利用普通 X 光源的衍射仪的功率密度大，因此它的灵敏度

新型衍射装置的优势会更明显.

4 结 论

整体 X 光透镜的研制和生产是一项难度很大又有良好市场前景的高新技术. 整体 X 光透镜在基础科学研究(物理、化学、天文学、生命科学、地球科学、环境科学及材料科学等)和有关的国民经济诸领域(医疗器械、微电子学、微机械制造、工业探伤、冶金、地质及纺织业等)有很好的应用前景. 整体 X 光透镜

生产的产业化必将带来巨大的经济效益和社会效益.

参 考 文 献

- 1 Kumakhov K M, Komarov F F. Multiple Reflection from Surface X-ray Optics. *Phys Rep*, 1991, 191(5): 289~350
- 2 颜一鸣, 刘安东. 导管 X 光学和 X 光聚束系统. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 1995, 31(增刊): 1~14

Monolithic Capillary X-ray Lens and Their Application in X-ray Diffraction Technology

YAN Yiming HE Yejun CHEN Baozhen LI Yude DING Xunliang WANG Dachun
LIU Andong WEI Fuzhong CHEN Jun LUO Ping

(*Institute of Low Energy Nuclear Physics, Beijing Normal University,
Beijing Radiation Center, Beijing 100875*)

Abstract The basic physical properties and applications in X-ray diffraction technology for the monolithic capillary lens are described. The new designed diffraction facility and its measurement results are also introduced.

Key Words X-ray capillary X-ray lens X-ray diffraction

(上接第 147 页)

of experiment and data analysis made at a pulsed neutron generator in Beijing Normal University during recent years is introduced.

Key Words combination buncher fast neutron reaction γ radiation energy spectrum and cross section Doppler effect