

利用整体毛细管 X 光透镜会聚同步辐射

孙天希¹ 谢亚宁² 刘志国¹ 刘涛² 胡天斗² 杨君¹ 初学莲¹ 丁训良^{1;1)}

1 (北京师范大学射线束技术与材料改性教育部重点实验室,
北京师范大学低能核物理研究所, 北京市辐射中心 北京 100875)
2 (中国科学院高能物理研究所同步辐射室 北京 100049)

摘要 利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚了同步辐射. 在 8keV 能量点, 利用超环面镜, 将面积为 $2.3 \times 26 \text{mm}^2$ 、竖直发散度和水平发散度分别近似为零和 1.1mrad 的光束会聚为面积为 $0.9 \times 0.3 \text{mm}^2$ 、水平和竖直发散度分别为 1.4mrad 和 0.1mrad 的束斑, 然后利用整体毛细管 X 光透镜将上述束斑会聚为直径为 $21.4 \mu\text{m}$ 的焦斑, 焦斑处单位面积上的强度(功率密度)增益为 59, 焦距为 13.3mm , 该整体毛细管 X 光透镜在 8keV 能量点, 对上述束斑的传输效率为 7.9%.

关键词 整体毛细管 X 光透镜 超环面镜 同步辐射

1 引言

随着整体毛细管 X 光透镜研制技术的进一步提高^[1, 2], 它在 X 射线分析技术领域的应用也越来越广泛^[3-5]. 国际上利用毛细管 X 光透镜会聚同步辐射的应用研究已经进行了一些探索^[6-13], 其中大部分是利用单毛细管或者是组装毛细管 X 光透镜会聚同步辐射^[6, 7, 9, 10, 12, 13], 而利用整体毛细管 X 光透镜来会聚同步辐射时, 由于受到整体毛细管 X 光透镜入口直径尺寸的限制, 都是在双晶单色器和整体毛细管 X 光透镜入口之间安装“cross slit”以限制入射到整体毛细管 X 光透镜入口平面上的同步辐射, 由于“cross slit”的存在, 会浪费一部分同步辐射. 鉴于现在许多同步辐射装置上安装着超环面镜来会聚来自双晶单色器的单色同步辐射, 并且经超环面镜会聚的同步辐射的焦斑大小是可调节的, 我们设计了利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚同步辐射的实验方案.

本文报道了利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚同步辐射的实验结果.

2 整体毛细管 X 光透镜的性能

整体毛细管 X 光透镜是利用 X 光全反射的原理设计成的. 它可以将发散或者平行(准平行) X 光会聚为

$10 \mu\text{m}$ 量级的微焦斑, 焦斑位置处的功率密度增益在 10^2-10^3 量级. 因为 X 光发生全反射的临界角是能量的函数, 所以, 整体毛细管 X 光透镜的传输效率和焦斑大小都与能量有关^[1]. 一般说来, 一台整体毛细管 X 光透镜是由 20—30 万根内径为 3— $15 \mu\text{m}$ 单毛细管构成.

本实验采用的整体毛细管 X 光透镜的几何参量见表 1.

表 1 整体毛细管 X 光透镜的几何参量

入口直径/mm	5.3
出口直径/mm	3.1
长度/mm	40.2
单毛细管的数量	27 万根(约)

3 实验与结果

本实验在中国科学院高能物理研究所同步辐射实验室 1W1B-XAFS 束线上完成. 如图 1 所示, 先利用超环面镜将(来自双晶单色器的单色同步辐射)面积为 $2.3 \times 26 \text{mm}^2$ 、垂直发散度和水平发散度近似为零和 1.1mrad 的光斑会聚为面积为 $0.9 \times 0.3 \text{mm}^2$ 、水平和竖直发散度分别为 1.4mrad 和 0.1mrad 的焦斑, 然后利用整体毛细管 X 光透镜会聚上述焦斑. 整体毛细

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

管 X 光透镜入口端放在超环面镜的焦斑附近, 聚焦调节后, 利用刀口扫描法^[2]进行了整体毛细管 X 光透镜焦斑位置与大小的测量. 图 2 是用刀口扫描焦斑直径的积分和微分曲线图, 图 3 是整体毛细管 X 光透镜焦斑的照片. 测量结果如下: 该整体毛细管 X 光透镜在 8keV 能量点, 对上述束斑的传输效率为 7.9%, 会聚的焦斑直径(图 2 中微分曲线的半峰全宽)为 21.4 μm , 焦距为 13.3mm, 在焦斑位置处单位面积上的强度增益为 59.

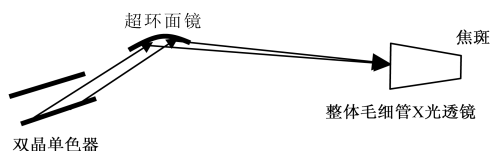


图 1 实验原理示意图

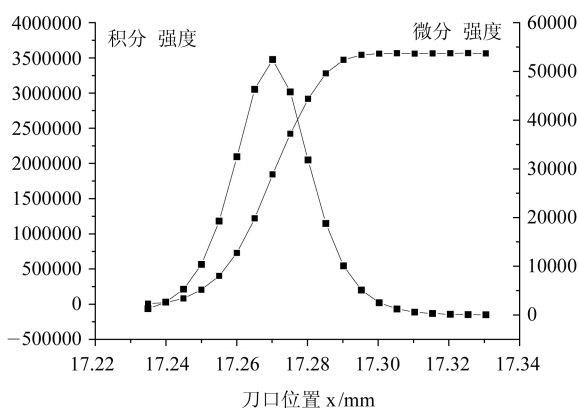


图 2 对应于刀口扫描的积分曲线和微分曲线



图 3 整体毛细管 X 光透镜焦斑

4 讨论

利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚同步辐射, 由于会聚后的焦斑直径在 10 μm 量级, 所以可利用该微焦斑进行微区荧光、微区 XAFS 分析以及其它微区 X 射线分析.

整体毛细管 X 光透镜是一种非线性光学器件, 其中心部分毛细管的曲率半径比边缘部分毛细管的曲率半径大, 具有大曲率半径的毛细管有利于 X 光的传输,

即透镜中间部分毛细管的传输效率比边缘部分毛细管的传输效率高. 所以, 在利用它聚焦大面积的同步辐射时, 先利用超环面镜高效率地将大面积的同步辐射会聚, 然后再利用整体毛细管 X 光透镜会聚该会聚光束, 这可大大提高同步辐射的利用效率. 并且可以通过调节超环面镜的焦斑直径大小, 使整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合达到最优化, 以进一步提高整体毛细管 X 光透镜焦斑位置处 X 光的功率密度.

利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚同步辐射, 会聚后的焦斑直径随着整体毛细管 X 光透镜焦距的减小而减小, 随着构成整体毛细管 X 光透镜单毛细管直径的减小而减小, 所以, 根据需要可研制焦斑直径进一步减小的整体毛细管 X 光透镜. 同时可以专门设计针对某能量范围的整体毛细管 X 光透镜, 从而进一步提高整体毛细管 X 光透镜在该能量范围内的传输效率.

本实验中, 该整体毛细管 X 光透镜传输效率的测量值比理论估计值(在 8keV 能量点, 该透镜传输效率的理论估计值为 33%) 偏低, 这是由于对整体毛细管 X 光透镜聚焦调节不充分造成的. 如图 4 所示, 由于玻璃毛细管 X 光透镜被同步辐射长时间照射后, 会变为褐色(这并不影响毛细管传输 X 光的性能^[7]). 实验完毕, 根据此现象判断同步辐射入射光斑和出射光斑都不在该整体毛细管 X 光透镜入口截面和出口截面的中心. 如前所述, 整体毛细管 X 光透镜中心部分毛细管的弯曲度小, 便于 X 光在其内部传输, 所以, 聚焦调节后的理想情况是: 入射斑点和出射斑点分别在整体毛细管 X 光透镜入口和出口的中心, 此时, 整体毛细管 X 光透镜传输效率最高.

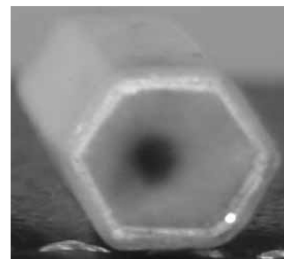


图 4 整体毛细管 X 光透镜入口截面

5 结论

利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜的组合会聚同步辐射时, 可以根据具体要求拉制合适的整体毛细管 X 光透镜, 在此基础上, 通过调节超环面镜的焦斑大小, 使两者的结合达到最优化, 此时将进一步提高

该组合的传输效率, 从而进一步提高整体毛细管 X 光透镜焦斑位置处的功率密度.

利用整体毛细管 X 光透镜和超环面镜组合会聚的微焦斑同步辐射, 可以对样品进行微区 X 射线分析.

参考文献(References)

- 1 SUN Tian-Xi, DING Xun-Liang. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**: 124904(-1)—124904(-7)
- 2 SUN Tian-Xi, DING Xun-Liang. *Nucl. Instrum. Methods*, 2004, **B226**: 651—658
- 3 Bjeoumikhov A, Bjeoumikhova S, Langhoff N et al. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**: 144102—144102(-3)
- 4 DING Xun-Liang, LIU Zhi-Guo, YAN Yi-Ming et al. *X-Ray Spectrom.*, 2004, **33**: 67—73
- 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 Bartoll J, Rfhrs S, Erko A et al. *Spectrochimica Acta Part*, 2004, **B59**: 1587—1592
- 7 Hofmann F A, Freinberg-Trufas C A, Owens S M et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 1997, **B133**: 145—150
- 8 Kühbacher M, Weseloh G, Thomzig A et al. *X-Ray Spectrom.*, to be published
- 9 Sirenko A A, Kazimirov A, Huang R et al. *J. Appl. Phys.*, 2005, **97**: 063512—063512(-7)
- 10 Vincze L, Somogyi A, Osan J et al. *Anal. Chem.*, 2002, **74**: 1128—1135
- 11 Proost K, Vincze L, Janssens K et al. *X-Ray Spectrom.*, 2003, **32**: 215—222
- 12 Rindby A, Per Engstrom, Janssens K et al. *Nucl. Instrum. Methods*, 1997, **B124**: 591—604
- 13 Vincze L, Janssens K, Adams F et al. *Rev. Sci. Instrum.*, 1998, **69**(10): 3494—3503

Application of Monolithic Polycapillary X-Ray Lens in Focusing of Synchrotron Radiation

SUN Tian-Xi¹ XIE Ya-Ning² LIU Zhi-Guo¹ LIU Tao² HU Tian-Dou²
YANG Jun¹ CHU Xue-Lian¹ DING Xun-Liang^{1;1)}

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

2 (Synchrotron Radiation Laboratory, Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100049, China)

Abstract The synchrotron radiation is focused by using a combined system of a monolithic polycapillary X-ray lens and a toroidal mirror. The synchrotron radiation beam with a $2.3 \times 26 \text{ mm}^2$ area, whose vertical divergence and transverse divergence are appropriately zero and 1.1 mrad respectively, is first focused into a beam spot with a $0.9 \times 0.3 \text{ mm}^2$ area, a 0.1 mrad vertical divergence and a 1.4 mrad transverse divergence by the toroidal mirror. The focused beam spot is then focused by the monolithic polycapillary X-ray lens into a focal spot with a 21.4 μm diameter. The gain of power flux density in the focal spot of the polycapillary X-ray lens is 59. At 8.0 keV, the transmission efficiency and focal distance of the monolithic polycapillary X-ray lens are 7.9% and 13.3 mm, respectively.

Key words monolithic polycapillary X-ray lens, toroidal mirror, synchrotron radiation

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