

14.4 keV 迈克耳孙 X 射线干涉仪设计及核心器件表征

司尚禹¹, 李中亮^{1*}, 薛莲¹, 杨俊亮², 罗红心¹, 李伟³, 张小威^{2**}

¹中国科学院上海高等研究院上海光源中心, 上海 201204;

²中国科学院高能物理研究所多学科中心, 北京 100049;

³中国计量科学研究院前沿计量科学中心, 北京 100029

摘要 介绍了一种全新的迈克耳孙 X 射线干涉仪设计, 可用于 ⁵⁷Fe 穆斯堡尔 14.4 keV 核共振波长超精准测量。所设计结构是由反对称的三次劳厄衍射型 (LLL) 的 X 射线干涉仪和可以匹配 14.4 keV 波长的一体型双通道切槽单色器 (MDCM) 构成。在上海同步辐射光源利用 14.4 keV 单色光对国内首个自制 LLL 干涉仪的性能和 MDCM 的工况进行了在线测量和定量表征, 得到了干涉仪条纹对比度的测量结果 (0.37~0.63) 和 MDCM 光学元件的修正参数。该研究为国内复杂构型 X 射线光学元件的研制和在线表征积累了技术经验。

关键词 X 射线光学; 穆斯堡尔波长; 迈克耳孙 X 射线干涉仪; 三次劳厄衍射型干涉仪; 一体型双通道切槽单色器

中图分类号 O434

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221290

1 引言

在穆斯堡尔效应被发现后不久, Bearden^[1]就指出 14.4 keV 穆斯堡尔光子适合用作 X 射线的波长标准。穆斯堡尔核 ⁵⁷Fe 的 14.4 keV 共振能级在常用的 X 射线波段, 其带宽只有约 5 neV, 相对带宽可达到 10^{-12} , 比元素特征 X 射线的 10^{-3} 要窄得多, 是一个极好的被观测对象。由于当时 γ 线源的亮度很低, 测量波长所需要的实验时间很长^[2-3]; 同时测量技术也没有本质性的突破, 实测精度并没有好过元素特征谱线的测量值^[3-5]。随着同步辐射光源 (SR) 技术的出现, Ruby^[6]提出使用 SR 激发穆斯堡尔共振核可实现更高亮度 γ 线源的设想。SR 不但可以为穆斯堡尔谱学提供新的技术, 也为精密测量穆斯堡尔波长解决了光源亮度的问题。

SR 装置的发展虽然使 14.4 keV 穆斯堡尔线源在亮度方面有了质的突破, 但波长测量的实验技术和方法依然是采用基于硅晶格常数的传统方式, 测量精度无法突破硅晶格的不确定度^[2-5]。要达到 14.4 keV 谱线本征带宽的相对测量精度, 需要研发新的、不依赖于硅晶格常数的波长测量方法。自从 Bonse 和 Hart^[7]在 1965 年发表实验结果以来, X 射线干涉仪以其极高的测量精度被广泛用于包括晶格常数在内的各种精密测

量^[8-10], 并且不久后就被指出这种干涉仪技术可用于不依赖 X 射线波长值的硅晶格常数精准测量^[11]。

在 20 世纪 80 年代, Gerdau 等^[12]完成了用 SR 激发穆斯堡尔共振散射的初期实验。在 20 世纪 90 年代初, Zhang 等^[13]基于硬 X 射线波荡器产生的高亮度 14.4 keV 穆斯堡尔光束开展了很多干涉实验^[14-17]。最早的 X 射线迈克耳孙干涉仪的报道来自文献^[18], 其结构是在 Bonse 和 Hart 报道的 LLL 干涉仪光路中加入一组可调整光程差的单通道衍射器件, 利用该干涉仪中一个单通道衍射器件的转动, 观察到了 Cu K 谱线的干涉条纹和带宽对干涉现象的调制。之后 Nusshardt 和 Bonse^[19]又对干涉仪进行了改进, 提高了干涉条纹衬比度、增大了扫描范围。然而, 上述干涉仪的结构均不适用于穆斯堡尔共振波长的测量: 一方面是因为其工作波长不在 14.4 keV 附近; 另一方面是因为干涉仪中的光程差是依靠光学器件转动形成, 可调节范围十分有限 (几微米), 难以实现高精度的测量。本文提出可以用来测量 14.4 keV 穆斯堡尔共振波长的迈克耳孙 X 射线干涉仪设计, 完成了三次劳厄衍射型 (LLL) 干涉仪和可以精准测量光程差的一体型双通道切槽单色器 (MDCM) 的制作, 完成了 LLL 干涉仪的条纹衬比度和 MDCM 衍射光带宽、入/出射光路的相对位移等关键参数的在线表征和测量, 为后

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-08-03; 录用日期: 2022-09-06; 网络首发日期: 2022-09-16

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (11975259)、中国科学院青年促进会项目 (2018297)

通信作者: *lizhongliang@zjlab.org.cn; **zhangxw@ihep.ac.cn

续迈克耳孙干涉仪的集成测试提供了技术积累和器件基础。

2 迈克耳孙 X 射线干涉仪设计

迈克耳孙 X 射线干涉仪设计如图 1 所示,通过在一体型 LLL 干涉仪中插入一个可通过 14.4 keV 光子的 MDCM,可将无色散的 LLL 干涉仪转变成为一台具有色散能力的迈克耳孙干涉仪。LLL 干涉仪的衍射晶面指数为 440, MDCM 的衍射晶面指数是 668 和 1060。强度探测器采用光电二极管探测器(PIN)测量衍射光和透射光摇摆曲线,成像探测器采用互补金属氧化物半导体(CMOS)探测器记录干涉条纹。特殊设计的 MDCM 有上下两个光路,每个光路包括两个切

槽的 4 次布拉格反射。在单晶硅中选择合适的晶面指数组合并结合巧妙的结构设计,使得以布拉格角(θ_B)入射的 14.4 keV 光子经过 4 次连续反射后恰好可以通过 MDCM 并保持原来的光路。通过在晶体上表面施加一定的压力,可以改变上通道的切槽间隔,进而在上下光路间引入一个可调节的光程差。同时,利用可见光干涉仪对该光程差进行精确测量,通过比较可见光与 X 射线的干涉条纹级次,可以实现不依赖晶格常数的 X 射线波长测量^[19]。决定迈克耳孙 X 射线干涉仪测量精度的一个关键因素是 X 射线的带宽,对于光子能量为 14.4 keV 的 ⁵⁷Fe 核共振能级,迈克耳孙 X 射线干涉仪的相对带宽可达到 10^{-12} ,可以实现突破晶格不确定度(10^{-8})的超精准测量。

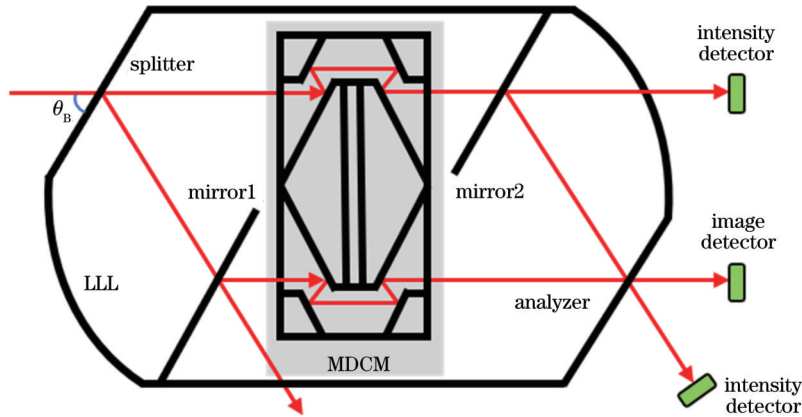


图 1 迈克耳孙 X 射线干涉仪光路图

Fig. 1 Optical path of Michelson X-ray interferometer

2.1 LLL 干涉仪

LLL 干涉仪采用一体型的反对称光路设计。一体型结构可大大提高干涉仪的稳定性,反对称的设计便于在干涉仪中放入调制光程差的 MDCM。图 2 是 LLL 干涉仪的实物照片,其由一整块 4 inch (1 inch=2.54 cm) 的硅单晶加工而成。四叶薄片中的 440 指数面分别构成了干涉仪的分束器(S)、反射镜(M1/M2)和分析器(A)。入射光经过 S 后被分为衍射和透射两

路,再分别经由 M1 和 M2 衍射重新会聚在 A 处,产生干涉场。干涉仪的性能通常采用干涉场衬比度进行表征^[20],其计算公式为

$$V = \frac{I_M - I_m}{I_M + I_m}, \quad (1)$$

式中: I_M 和 I_m 分别为干涉场光强的极大值和极小值。由式(1)可知,通过测量干涉条纹的分布可以对干涉仪的衬比度进行定量计算,这为干涉仪性能的在线表征提供理论依据。

根据 LLL 干涉仪的衍射动力学理论^[20],对于 14.4 keV 的穆斯堡尔光子,440 晶面产生的干涉场衬比度为

$$V = \frac{2p}{1+p^2} \left| \frac{\sin(0.15\Delta z)}{0.15\Delta z} \right|, \quad (2)$$

式中: p 为两干涉光的振幅比,取值范围为 0~1,是一个无量纲的值; Δz 为干涉仪的散焦距离, $\Delta z = \frac{z_{AM1} + z_{AM2} - z_{SM1} - z_{SM2}}{2}$,单位为 μm ,其中 z_{AM1} 为分析器与反射镜 M1 的间距, z_{AM2} 为分析器与反射镜 M2 的间距, z_{SM1} 为分束器与反射镜 M1 的间距, z_{SM2} 为分束器与反射镜 M2 的间距。式(2)将干涉仪性能与加工

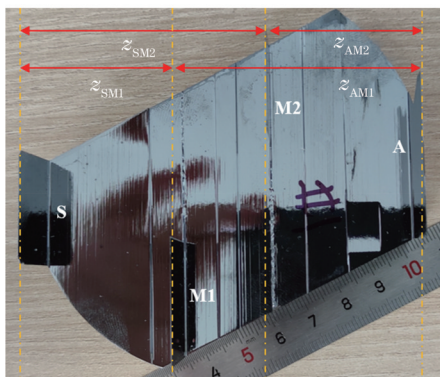


图 2 反对称型的 LLL 干涉仪实物照片

Fig. 2 Photo of LLL interferometer of antisymmetric type

制作的精度相结合,为干涉仪的设计、测量和修正提供了依据。由式(2)可知:在等振幅条件下,14.4 keV 穆斯堡尔光子通过 440 晶面产生干涉的最低要求($V > 0$)是散焦距离不超过 $21 \mu\text{m}$,这要求干涉仪四叶薄片厚度和它们之间间隔的加工精度至少达到 μm 量级。

2.2 MDCM

MDCM 是由整块硅单晶加工成型(图 3),利用 668 和 1060 晶面的 4 次连续布拉格反射构成了上、下两个通道,这两个通道对应着 LLL 干涉仪中的两个光路。指数 668 和 1060 的晶面间距相同,均为 0.0466 nm ,两个晶面的夹角约为 45.1° 。根据布拉格衍射公式, $2d \sin \theta_B = n\lambda$, 其对于中心能量为 14.4 keV 的 X 射线布拉格角为 67.45° 。因此,双通道对称切割的平行晶面配置可使入射光和出射光的方向

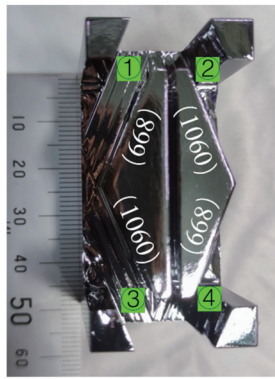


图 3 MDCM 实物照片
Fig. 3 Photo of MDCM

和位置保持不变,同时利用高指数晶面衍射的色散效应可实现 14.4 keV 能量光子的单色化。根据 X 射线衍射动力学理论^[21],MDCM 衍射光的相对带宽为

$$\epsilon = \frac{\Delta\theta}{\tan \theta_B}, \quad (3)$$

式中: θ_B 和 $\Delta\theta$ 分别为晶体的布拉格角和衍射光的角宽度。对于中心能量为 12.914 keV 的 X 射线,晶面 668 和 1060 的衍射光具有相同的带宽,其相对带宽的理论值为 0.9×10^{-6} 。

当图 3 中 MDCM 的 4 个通道宽度[分别用①、②、③、④表示]满足①=②、③=④时,光束在通过上、下通道后可保持原来光路的位置高度和方向不变;当 4 个通道宽度满足①/③=②/④时,光束在通过上、下通道后具有同向的相等位移,同样可保证插入后的干涉仪工况。

3 实验与结果分析

实验在上海光源 BL09B 光学测试线进行,其目的是对 14.4 keV 光子能量下 LLL 干涉仪的干涉条纹对比度和 MDCM 的工况进行表征,从而获得器件的修正参数。弯铁光源发出的同步辐射经束线上的双晶单色器 Si(111) 晶面衍射后得到 14.4 keV 的硬 X 射线,用单色器后的狭缝调节光斑尺寸(约 $1 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$)以匹配干涉仪的四叶薄片尺寸。

3.1 LLL 干涉仪表征

实验配置如图 4 所示,双晶单色器的 111 晶面产生 14.4 keV 的单色 X 射线,狭缝用于调节入射光尺寸。

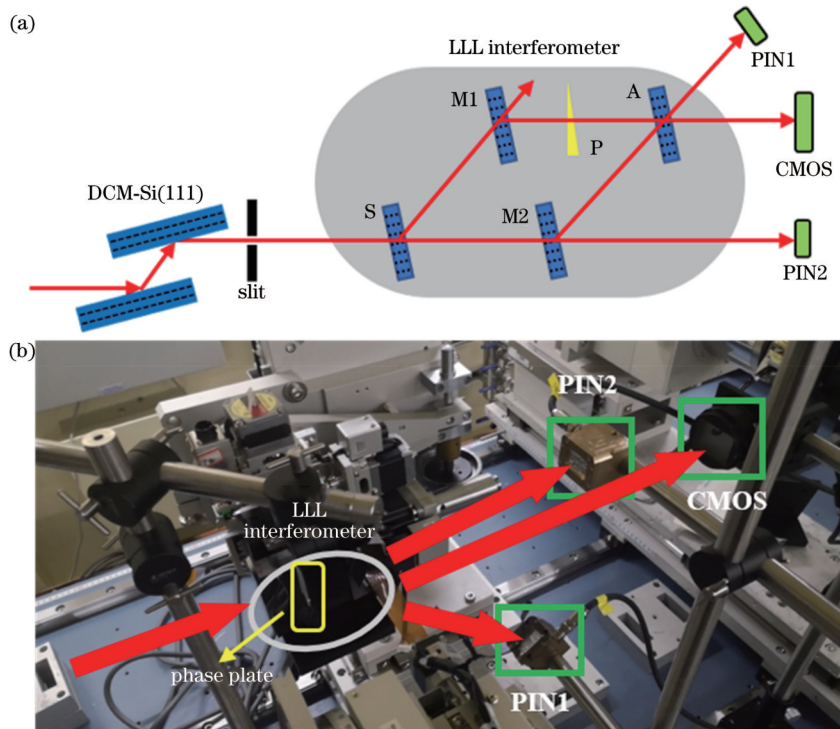


图 4 LLL 干涉仪在线测试。(a)光路图;(b)现场照片。
Fig. 4 Online test of LLL interferometer. (a) Optical path; (b) photo of scene

楔形相位板(P)置于反射镜M1后,两个光电二极管探测器(PIN1和PIN2)分别用于测量衍射光和透射光摇摆曲线,成像探测器(CMOS)用于记录干涉条纹。使用两个光电二极管探测器(Hamamatsu, S3584-08)确定干涉仪的衍射角度(图5),然后在M1后插入一块顶角为5°的PMMA楔形相位板,X射线经过相位板后沿厚度梯度方向会产生明暗相间的等厚干涉条纹,通过成像探测器(Ximea, MH160XC-KK-FA)实时记录干涉条纹(图6),根据其强度分布特征计算干涉条纹衬比度。

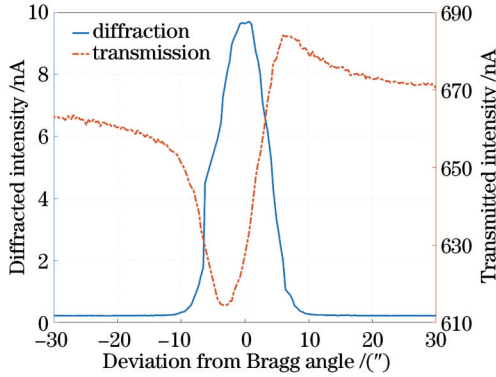


图5 LLL干涉仪摇摆曲线
Fig. 5 Rocking curves of LLL interferometer

通过转动LLL干涉仪的角度可以获得衍射光和透射光的摇摆曲线,结果如图5所示,根据摇摆曲线可以确定干涉仪的衍射角范围。通过电动转台(Kohzu,

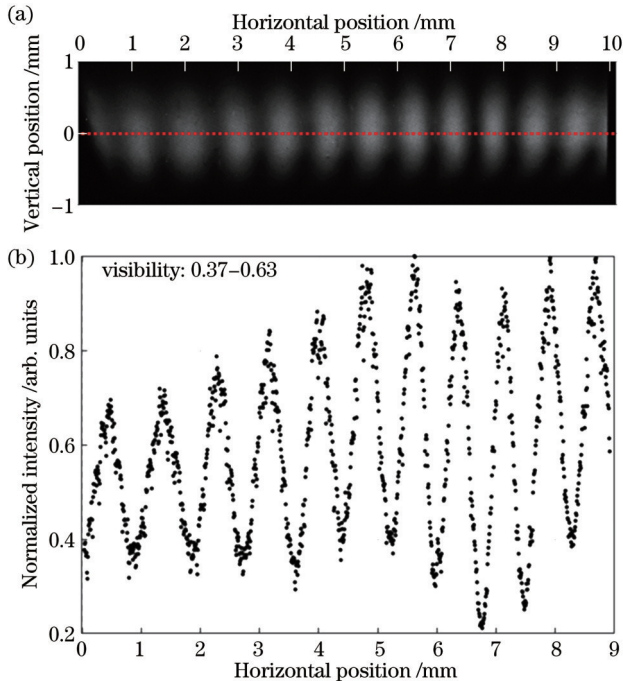


图6 LLL干涉仪的干涉条纹形状及其强度分布。(a)干涉条纹形状;(b)强度分布
Fig. 6 Interference fringe and its intensity distribution of LLL interferometer. (a) Interference fringe; (b) intensity distribution

KTG-16W)和平台(Kohzu, KHI-4SK)分别对于干涉仪角度和位置进行精确调节,精度分别为0.005"和1 μm,利用成像探测器记录最清晰的等厚干涉条纹,结果如图6(a)所示,沿中间点线位置绘制干涉条纹水平方向(厚度梯度方向)的归一化强度分布曲线,图6(b)显示在约90%的光斑范围内干涉条纹强度分布具有明显的周期性特征。根据式(1)可以计算出条纹衬比度范围为0.37~0.63,不同位置处衬比度的变化主要源于相位板吸收引起的振幅变化。根据式(2)可以计算出干涉仪的散焦距离为10.4 μm。利用氢氟酸混合液腐蚀可以对晶片间距进行修正,减小散焦距离以进一步提高干涉条纹的衬比度。

3.2 MDCM表征

实验配置如图7所示。MDCM中间狭缝处放入一个1 mm厚的铅皮,防止入射光直接进入出射光路。利用上游狭缝调整单色器出射光的纵向尺寸到约500 μm,然后利用平台调整MDCM位置,使得入射光照在其侧壁,利用PIN1和PIN2找到晶体668和1060指数的反射光角度位置,通过双通道切槽单色器(DCM)微调入射光能量使两衍射峰的位置重合,此时入射光能量为严格的14.4 keV。然后移动MDCM,让入射光照在MDCM切槽的适当位置处,让入射光通过4次反射后从MDCM出射,被PIN3探测到。最后将PIN3移出光路,用成像探测器记录上、下两通道处的衍射光形状和位置信息。

MDCM的摇摆曲线如图8所示,虚线是单次反射

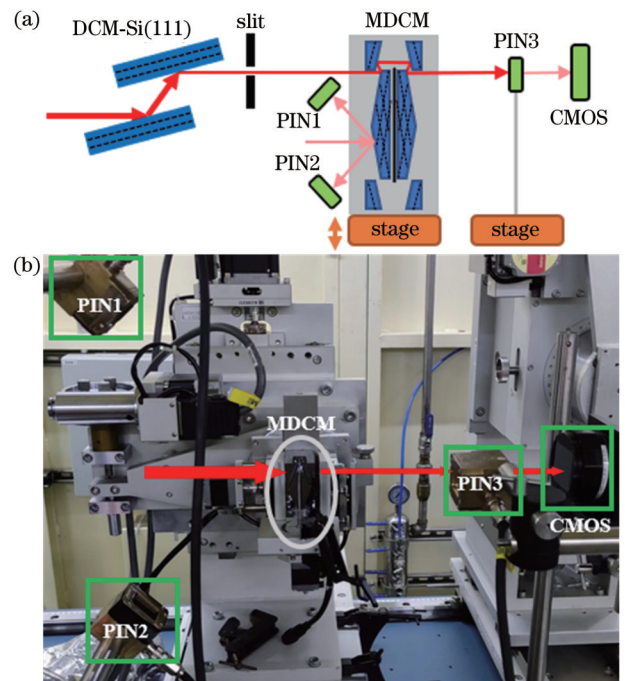


图7 MDCM在线测试光路图和现场照片。(a)光路图;(b)现场照片
Fig. 7 Optical path and photo of MDCM online measurement. (a) Optical path; (b) photo

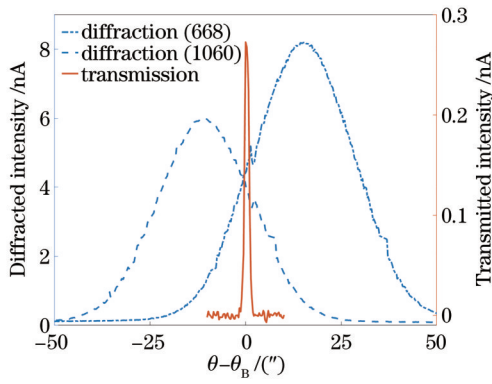


图 8 MDCM 摇摆曲线

Fig. 8 Rocking curves of MDCM

的衍射光摇摆曲线,根据曲线峰位的变化可以确认 668 和 1060 晶面衍射的布拉格角并对入射光能量进行精细调整。由于 668 和 1060 晶面的本征带宽较单色器 111 晶面窄约 1 个量级,因此通过这种方法可以大大提高入射光能量的准确度,这是 MDCM 最终能够出光的关键所在。4 次连续反射后的透射光摇摆曲线可以精确定位 MDCM 的衍射角和带宽,保证入射光经 4 次反射后能够顺利通过上、下通道。图 9(a) 是成像探测器记录的上、下两通道在同一高度的出射光斑,沿光斑中部分别绘制上、下通道出射光的纵向归一化积分强度分布曲线,结果如图 9(b) 所示。由图 9(b) 可知上通道出射光纵向宽度[半峰全宽(FWHM)]为 $130 \mu\text{m}$,

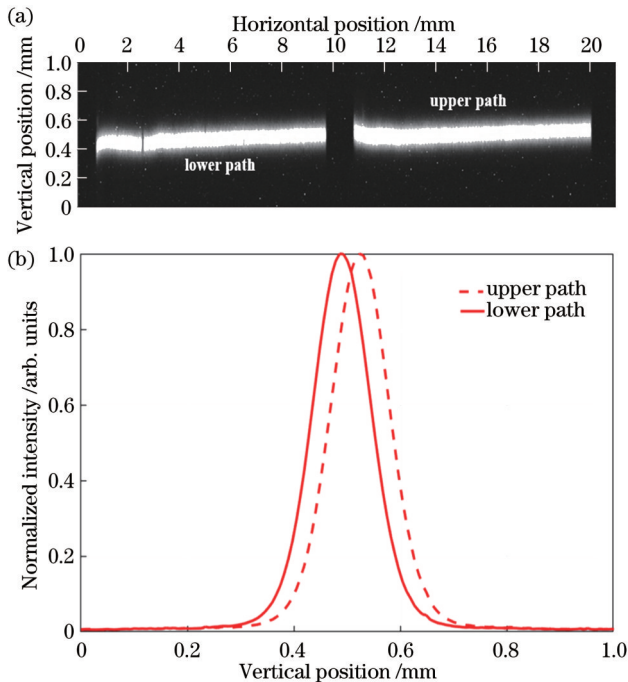


图 9 MDCM 同高度上、下光路衍射光斑图像及其纵向强度分布图。(a) 衍射光斑图像;(b) 纵向强度分布图

Fig. 9 Diffraction spot images of upper and lower light paths of MDCM at same height and its vertical intensity distribution. (a) Diffraction spot images; (b) vertical intensity distribution

下通道出射光纵向宽度(FWHM)为 $129 \mu\text{m}$ 。探测器位置距离光源点约 40 m,因而上/下通道出射光角宽度为 $3.25 \mu\text{rad}$,由式(3)可得对应的衍射光相对带宽为 1.3×10^{-6} 。图 9(b) 显示两衍射光纵向相对位移(峰值位移) $\delta y = 37 \mu\text{m}$,即上通道出射光位置较下通道高 $37 \mu\text{m}$,可以利用氢氟酸混合液腐蚀上通道第 1、4 反射面的方法进行修正,使得上、下通道出射光高度保持严格一致,腐蚀深度 $\delta d = \delta y \cos \theta_B = 14 \mu\text{m}$ 。

4 结 论

介绍了一种全新的、可用于 ^{57}Fe 穆斯堡尔 14.4 keV 核共振波长超精准测量的迈克耳孙 X 射线干涉仪设计,在上海光源光学测试线利用 14.4 keV 的同步辐射对 LLL 干涉仪的性能和 MDCM 晶体的工况进行了在线测试和定量表征。实验结果显示:LLL 干涉仪的干涉条纹最佳衬比度可以达到 0.63,散焦距离为 $10.4 \mu\text{m}$;MDCM 出射光的相对带宽为 1.3×10^{-6} ,上、下通道的出射光相对位移为 $37 \mu\text{m}$ 。测量结果表明,目前影响干涉条纹衬比度的主要因素是 LLL 干涉仪的散焦距离,而引起 MDCM 出射光位移的主要因素是上、下通道宽度的非一致性,这都是由晶体制作过程中的加工误差所引起。接下来将尝试使用化学腐蚀的方法修正 LLL 干涉仪的散焦距离和 MDCM 的通道宽度,获得干涉条纹衬比度更高的 LLL 干涉仪和一致性更好的 MDCM 晶体,用于接下来迈克耳孙干涉仪的集成测试和 14.4 keV 穆斯堡尔核共振波长的测量。

参 考 文 献

- [1] Bearden J A. X-ray wavelengths[J]. Reviews of Modern Physics, 1967, 39(1): 78-124.
- [2] Debenedetti S, Lang G, Ingalls R. Electric quadrupole splitting and the nuclear volume effect in the ions of Fe^{57} [J]. Physical Review Letters, 1961, 6(2): 60.
- [3] Kistner O C, Sunyar A W. Evidence for quadrupole interaction of Fe^{57m} , and influence of chemical binding on nuclear gamma-ray energy[J]. Physical Review Letters, 1960, 4(8): 412-415.
- [4] Bearden J A, Marzolf J G, Thomsen J S. Crystal diffraction profiles for monochromatic radiation[J]. Acta Crystallographica Section A, 1968, 24(2): 295-301.
- [5] Sansonetti J E, Martin W C. Handbook of basic atomic spectroscopic data[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2005, 34(4): 1559-2259.
- [6] Ruby S L. Mössbauer experiments without conventional sources [J]. Le Journal De Physique Colloques, 1974, 35(C6): 209-211.
- [7] Bonse U, Hart M. An X-ray interferometer[J]. Applied Physics Letters, 1965, 6(8): 155-156.
- [8] Bonse U, Uebbing H, Bartscher M, et al. X-ray and neutron interferometry and the measurement of fundamental constants[J]. Metrologia, 1994, 31(3): 195-201.
- [9] Hart M. An ångström ruler[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1968, 1(11): 1405-1408.
- [10] Hart M. Bragg reflection X ray optics[J]. Reports on Progress in Physics, 1971, 34(2): 435-490.
- [11] Bonse U, Hart M. Principles and design of Laue-case X-ray interferometers[J]. Zeitschrift für Physik, 1965, 188(2): 154-164.
- [12] Gerda E, Rüffer R, Winkler H, et al. Nuclear Bragg

- diffraction of synchrotron radiation in yttrium iron garnet[J]. *Physical Review Letters*, 1985, 54(8): 835-838.
- [13] Zhang X W, Mochizuki T, Sugiyama H, et al. Construction and performance of an X-ray undulator beamline at the TRISTAN accumulation ring[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1992, 63(1): 404-407.
- [14] Hasegawa Y, Yoda Y, Izumi K, et al. Phase transfer in time-delayed interferometry with nuclear resonant scattering[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 75(11): 2216-2219.
- [15] Izumi K, Mitsui T, Seto M, et al. Interference of nuclear Bragg scattered X-rays in X-ray interferometer with large optical path difference[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(10R): 5862-5868.
- [16] Izumi K, Yoda Y, Ishikawa T, et al. Time domain interferometry in X-ray region using nuclear resonant scattering[J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 1995, 34(8R): 4258-4263.
- [17] Zhang X W, Yoda Y, Imai Y. Precision wavelength measurement of the 14.4 keV Mössbauer photon[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2000, 7(3): 189-195.
- [18] Appel A, Bonse U. Michelson interferometer for X rays and thermal neutrons[J]. *Physical Review Letters*, 1991, 67(13): 1673-1676.
- [19] Nusshardt M, Bonse U. A Michelson interferometer for X-rays capable of high-order measurement[J]. *Journal of Applied Crystallography*, 2003, 36(2): 269-279.
- [20] Bonse U, te Kaat E. The defocussed X-ray interferometer[J]. *Zeitschrift für Physik A Hadrons and Nuclei*, 1971, 243(1): 14-45.
- [21] Authier A. *Dynamical theory of X-ray diffraction*[M]. Oxford: Oxford University Press, 2001: 446-459.

14.4 keV X-Ray Michelson Interferometer Design and Core Component Characterization

Si Shangyu¹, Li Zhongliang^{1*}, Xue Lian¹, Yang Junliang², Luo Hongxin¹, Li Wei³,
Zhang Xiaowei^{2**}

¹*Shanghai Synchrotron Radiation Facility, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;*

²*Multi-Disciplinary Research Division, Institute of High Energy Physics, China Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

³*Center for Advanced Measurement Science, National Institute of Metrology, Beijing 100029, China*

Abstract

Objective The development of synchrotron radiation (SR) technology has made a qualitative breakthrough in the luminance of Mössbauer sources. However, the traditional method based on the silicon lattice constant is still adopted in the experiment of wavelength measurement, and the measurement accuracy is affected by the uncertainty of the silicon lattice (2×10^{-8}). Since Bonse and Hart published their experimental results in 1965, the X-ray interferometer has been widely used for precision measurement of parameters, such as lattice constants, due to its extremely high accuracy. This interferometer technology can be used for accurate measurement of silicon lattice constants independent of X-ray wavelength values. The first report on the X-ray Michelson interferometer came from Appel and Bonse in 1991, who added a group of single channel-cut diffraction devices with adjustable optical paths into the space of the Laue-Laue-Laue (LLL) interferometer to form the structure of the interferometer. However, the Michelson interferometer based on this structure is not suitable for measuring the Mössbauer resonance wavelength at which its operating wavelength is not around 14.4 keV, and the adjustable range is limited (a few micrometers) as the optical path difference in the interferometer is formed by the rotation of the optical components, which can hardly achieve high-precision measurement. We design an X-ray Michelson interferometer, which can be used to measure 14.4 keV Mössbauer resonance wavelength. The LLL-interferometer and the monolithic double channel-cut monochromator (MDCM) that can accurately measure the optical path difference are fabricated. The key parameters such as the fringe contrast of the LLL-interferometer, diffraction bandwidth of MDCM, and relative displacement of the exit-beam position are measured online, which provides a technical basis and device foundation for the subsequent integration test of the Michelson interferometer.

Methods The new design of the X-ray Michelson interferometer is shown in Fig. 1. The non-dispersive LLL-interferometer can be transformed into a dispersive Michelson interferometer when an MDCM that can pass through 14.4 keV photons is inserted into the space of the monolithic LLL-interferometer. The specially designed MDCM has two optical paths, upper and lower, each consisting of four Bragg reflections in two grooves. With the crystal plane combination with an appropriate index selected from monocrystalline silicon and ingenious structure design, 14.4 keV photons incident at the Bragg angle can pass through MDCM exactly after four consecutive reflections and keep the original

direction of propagation. The application of certain pressure on the upper surface of the crystal can change the upper channel-cut width, which introduces an adjustable optical path difference between the upper and lower paths. At the same time, the optical path difference is accurately measured by the visible light interferometer, and X-ray wavelength measurement independent of lattice constants can be achieved by the comparison of the interference fringe orders between visible light and X-ray.

The core components of the X-ray Michelson interferometer require extremely high machining and fabrication accuracy, and hence, the measurement and characterization of device performance and working conditions are crucial for the final integration tests. For a working environment of the interferometer as close to the real one as possible, the fringe contrast and defocusing distance of the LLL interferometer and the exit-beam bandwidth and relative displacement of the MDCM are measured online at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF).

Results and Discussions The optimum fringe contrast of the LLL interferometer is 0.63, and the defocusing distance is 10.4 μm . The relative exit-beam bandwidth of MDCM is 1.3×10^{-6} , and the relative displacement of the exit beam from upper and lower channels is 37 μm . The measurement results show that the main factor affecting the contrast of the interference fringe is the defocusing distance of the LLL interferometer, while the main factor causing the exit-beam displacement of MDCM is the width inconsistency of the upper and lower channels, which is caused by the machining error in the crystal fabrication process. Next, we will attempt to use chemical corrosion to correct the defocusing distance of the LLL interferometer and the channel width of MDCM to obtain the LLL interferometer with better interference fringe contrast and the MDCM crystal with better consistency. They are required for the integration test of the Michelson interferometer and the measurement of the 14.4 keV Mössbauer nuclear resonance wavelength.

Conclusions This paper introduces a new X-ray Michelson interferometer design that can be used for ultra-precise measurement of ^{57}Fe 14.4 keV Mössbauer nuclear resonance wavelength. The new design consists of a monolithic anti-symmetrical LLL-interferometer and an MDCM, which can match the X-ray with a wavelength of 14.4 keV. The performance of the first homemade LLL-interferometer in China and the working conditions of MDCM are measured online and characterized quantitatively by a 14.4 keV monochromatic X-ray at SSRF. The measurement results of the fringe visibility (0.37–0.63) of the LLL-interferometer and correction parameters of MDCM are obtained, which provide experience and a technical basis for the development and online characterization of X-ray optical elements with complex configurations in China.

Key words X-ray optics; Mössbauer wavelength; X-ray Michelson interferometer; Laue-Laue-Laue interferometer; monolithic double channel cut monochromator