

同步辐射实验配置对晶体摇摆曲线的影响

李中亮, 杨俊亮, 朱晔, 薛莲, 宋丽

引用本文:

李中亮, 杨俊亮, 朱晔, 等. 同步辐射实验配置对晶体摇摆曲线的影响[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(9): 1950–1957.

LI Zhong-liang, YANG Jun-liang, ZHU Ye, et al. Effect of the synchrotron radiation experiment configuration on the rocking curve of crystal[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(9): 1950–1957.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/OPE.20202809.1950>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

三晶体多轴联动同步辐射X射线荧光光谱仪

Synchrotron radiation X-ray fluorescence spectrometer based on three crystals and multi-axis linkage
光学精密工程. 2017, 25(11): 2878–2888 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172511.2878>

椭圆石英弯晶的积分衍射效率标定

Calibration of integrated x-ray diffraction efficiency for elliptically curved quartz crystal
光学精密工程. 2017, 25(6): 1472–1476 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172506.1472>

激光等离子体X射线能谱诊断

X-ray spectral diagnosis for laser plasma
光学精密工程. 2017, 25(5): 1192–1196 <https://doi.org/10.3788/OPE.20172505.1192>

高分辨率4f传像系统分辨率的影响因素分析

Analysis of influence factors of resolution in high-resolution 4f imaging system
光学精密工程. 2016, 24(7): 1573–1581 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162407.1573>

拼接干涉技术在同步辐射领域的发展现状及趋势

Current status and trends of stitching interferometry in synchrotron radiation field
光学精密工程. 2016, 34(10): 2357–2369 <https://doi.org/10.3788/OPE.20162410.2357>

文章编号 1004-924X(2020)09-1950-08

同步辐射实验配置对晶体摇摆曲线的影响

李中亮^{1*}, 杨俊亮^{2,3}, 朱 晔^{2,3}, 薛 莲¹, 宋 丽¹

(1. 中国科学院 上海高等研究院 上海同步辐射装置, 上海 201204;

2. 中国科学院 北京高能物理研究所 北京同步辐射装置, 北京 100049;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了精确测量加工、夹持、装调等工艺引起的晶体摇摆曲线的微小变化,建立了高分辨的在线检测系统。研究了同步辐射实验配置对晶体摇摆曲线的影响。首先利用 DuMond 图解法定性分析了不同实验配置中光束带宽和角发散的影响,根据 DuMond 图解结果和 X 射线晶体动力学衍射理论,推导出晶体摇摆曲线宽度的经验公式。然后研究了同步辐射在线检测系统提升角分辨率的方法,利用高指数面的 Si(333)切槽晶体、Si(775)定能量分析晶体抑制光束的带宽和角发散,调制出高分辨的检测光束。最后在上海光源 X 光学测试线搭建了检测系统,测量了 Si(111)晶体摇摆曲线并验证了经验公式。实验结果表明, Si(111)晶体摇摆曲线半高宽的测量值 $4.79'' @ 12.763 \text{ keV}$,与动力学衍射的理论值 $4.70''$ 差值在 2% 以内,可满足晶体摇摆曲线微小变化的检测需求。

关键词:同步辐射;高分辨实验配置;摇摆曲线;色散和消色散;DuMond 作图法

中图分类号: O434.12; O721 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/OPE.20202809.1950

Effect of the synchrotron radiation experiment configuration on the rocking curve of crystal

LI Zhong-liang^{1*}, YANG Jun-liang^{2,3}, ZHU Ye^{2,3}, XUE Lian¹, SONG Li¹

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

2. *Beijing Synchrotron Radiation Facility, Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*

3. *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)*

* *Corresponding author, E-mail: lizhongliang@zjlab.org.cn*

Abstract: A high-resolution detection system was established on a beamline to accurately measure the slight broadening of crystal rocking curves, caused by cutting, clamping, adjustment, and other processes. Further, the effect of the configuration of the synchrotron radiation experiment on the rocking curve of a crystal was studied. First, the effects of different experimental configurations on the beam bandwidth and angular divergence were analyzed by producing DuMond diagrams. Using the DuMond diagram results and X-ray crystal dynamics diffraction theory, an empirical formula for the rocking curve width was derived. Moreover, a method to improve the angular resolution of the

收稿日期: 2020-03-10; 修订日期: 2020-04-08.

基金项目: 国家自然科学基金青年基金资助项目 (No. 11505279, No. 11605279)

synchrotron radiation detection system was studied. A high-index surface Si (333) channel-cut crystal and a Si (775) monolithic double-crystal monochromator are used to suppress the bandwidth and angular divergence of the beam and modulate a high-resolution detection beam. Finally, a detection system was built on the X-ray test beamline at the Shanghai Synchrotron Radiation Facility. The rocking curve of the Si (111) crystal was measured by the system, and the measured result verified the empirical formula. The experimental results show that the measured value of the full width at half-maximum for the rocking curve of the Si (111) crystal is $4.79''$ at 12.763 keV. This measured value is within 2% of the theoretical value of $4.70''$ for dynamical diffraction, allowing small changes in the rocking curves of crystals to be detected.

Key words: synchrotron radiation; high energy resolution experiment configuration; rocking curve; parallel and antiparallel arrangements; DuMond diagram

1 引言

同步辐射光束线通常选用完美的单晶硅作为单色器的分光元件^[1],在 4~30 keV 能量范围内提供能量分辨率约为 10^{-4} 的单色光,满足各种科学实验的需求^[2-3]。晶体的性能直接影响出射光束的带宽、通量及波前特性等,因此需要对晶体的粗糙度、面形误差、形貌、反射率和摇摆曲线等多项性能做出评价。晶体粗糙度和面形误差的评价使用白光干涉仪和面形干涉仪来完成;晶体的形貌、反射率及摇摆曲线的检测,则利用 X 射线的双晶衍射成像、衍射/反射实验方法来实现。其中,比较简单的定量评价晶体衍射性能的方法是测量晶体的摇摆曲线^[4]。

在形式上,晶体衍射的摇摆曲线反映的是某个晶体面衍射的反射率和角分布。晶体的缺陷或加工/夹持的应力都会造成摇摆曲线的展宽^[5],但是一般情况下这种变化量很小,远低于完美晶体理论的达尔文带宽(约几秒),因此,为检测晶体摇摆曲线的微小变化,需要建立高精度的检测方法。晶体摇摆曲线的表征方法是测量衍射强度随衍射角 θ 变化的曲线,通常是转动晶体的衍射角,用 X 射线探测器测量晶体对入射光束的衍射强度。

表面上看,晶体摇摆曲线的测量精度取决于检测系统的角分辨能力,但由于 X 射线晶体衍射中存在波长(能量)与角度的耦合现象,能散会体现在摇摆曲线中,使用同步辐射光测量晶体的摇摆曲线,能散则主要体现在光束带宽和光源角发散两个方面。目前,上海光源一期线站中的 X 射

线衍射线站的角分辨为 $3.6''$ ^[6-7],可满足粉末类晶体样品的测试需求,但是无法检测晶体摇摆曲线的微小变化,需要建立更高分辨的检测系统。

同步辐射高分辨检测系统,通常利用高指数面晶体对光束的带宽及角发散进行抑制,如欧洲同步辐射光源的专用高分辨光束线(ID18)用高指数面晶体的组合,调制出分辨率达 3×10^{-8} 的光束^[5],但是整个系统中光学元件繁多、运动机构复杂,“移植”到常规光束线上的困难极大。因此,需要在通用光束线站上,利用高指数面分析晶体调制出高分辨的光束,用于晶体摇摆曲线的高精度表征。

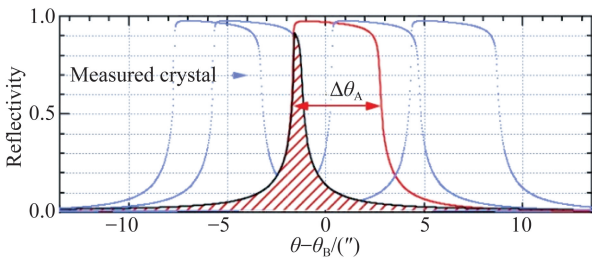
本文利用 DuMond 作图法^[8]对不同实验配置下晶体摇摆曲线的含义进行解析,并结合 X 射线晶体动力学衍射理论推导出经验公式。在上海光源 X 光学测试线^[9],利用定能量分析晶体(Monolithic Double Crystal Monochromator, MDCM)^[10]搭建了一套高分辨的检测系统。该系统测量的 Si(111)晶体摇摆曲线的半高宽与理论值基本一致,实现了晶体摇摆曲线微小变化的高精度表征。

2 晶体摇摆曲线的表征

利用同步辐射 X 射线检测晶体的摇摆曲线,主要影响因素是入射光束的带宽和角发散。它们对测量结果的影响可用 DuMond 图解法进行定性分析,分析结果表明 Si(775)的 MDCM 可以将光束的带宽和角发散压缩两个量级,提供高分辨的检测光束。

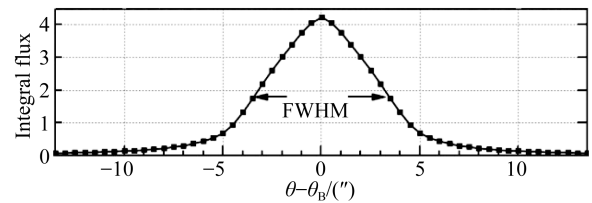
2.1 晶体摇摆曲线测量原理

同步辐射晶体摇摆曲线的检测,常用 θ 角扫描法。实验过程是转动晶体的衍射角 θ ,用X射线探测器测量晶体对入射单色光的衍射强度,该过程用晶体的反射率曲线的描述如图1所示(彩图见期刊电子版),图中横轴为被测晶体衍射角与布拉格角 θ_B 的差值。图1(a)中的纵轴是反射率,蓝色虚线为被测晶体的反射率曲线,红色实线为检测光束反射率曲线;图1(b)中的纵轴是被测晶体与检测光束角发散曲线重叠部分的积分值,曲线就是晶体的摇摆曲线。以Si(111)晶体为例,测量时被测晶体由低角向高角转动,即图1(a)中蓝线的横向移动,同时监测出射光束的通量,得到图1(b)所示的通量与角度的关系曲线,利用高斯函数拟合计算得到晶体摇摆曲线的半高宽。图1中检测到的带宽 $\Delta\theta_A$ 中包含了光束的带宽和发散角,这是晶体摇摆曲线测量的主要误差源,此外影响测量精度的因素还包括晶体转动精度和探测器接收光束的角发散。



(a) 被测晶体角度转动的扫描过程

(a) Angle rotation scanning process of the measured crystal



(b) 检测光束与晶体角发散曲线重叠部分积分值的曲线

(b) Integral value curve of the angel divergence curve overlapping part of the test beam and the crystal

图1 晶体摇摆曲线测量结果

Fig. 1 Measurement result of crystal rocking curves

2.2 高分辨的检测光束

高分辨光束是指窄带宽、低角发散度的X射线束,由于X射线晶体衍射中存在角度与能量的

耦合,需要同时抑制光束的带宽和角发散来提升检测光束的品位。同步辐射上通常用高指数面晶体来调制光束的带宽和发散角,高指数面晶体与被测晶体组合成一个多晶衍射系统。在多晶衍射系统中,两块晶体满足X射线衍射的位置关系有消色散和色散两种,当两晶体表面的法线位于第一晶体衍射线或第二晶体入射线的两侧时为消色散配置;当两晶体表面的法线位于第一晶体衍射线或第二晶体的入射线的同侧时为色散配置。晶体色散和消色散的配置分别用(+,-)和(+,+)来表示,两块完全相同品位的晶体用(m,m)表示,两块不同品位的晶体用(m,n)表示。

根据检测光束分辨率的不同,本文尝试了4种不同的实验配置,检测光束的指标如表1所示:实验(1)和(2)分别是单色器的基波和三次谐波;实验(3)是单色器三次谐波与Si(333)切槽晶体色散配置组合获得的出射光;实验(4)是单色器基波与Si(775)的MDCM组合获得的出射光。上述实验配置中的MDCM仅能允许特定能量的X射线出射,因此选择Si(775)指数面工作的12.763 keV进行在线测试和理论计算。

表1 四种实验配置中检测光束的达尔文宽和能量带宽@12.763 keV

Tab. 1 Darwin and energy bandwidth of detection beam in four experimental configurations @12.763 keV

实验	单色器晶体	调制晶体		$\Delta\theta_A / (^\circ)$	$\theta_A / (^\circ)$	$\Delta E / \text{eV}$
		指数	配置关系			
1	Si(111)	—	—	4.70	8.91	1.85
2	Si(333)	—	—	1.08	27.69	0.13
3	Si(333)	Si(333)	(+, +)	1.08	27.69	0.13
4	Si(111)	Si(775)	(+, +)	1.48	82.72	0.01

上述4种实验配置调制的检测光束用能量带宽进行表述,根据布拉格衍射公式的微分式进行计算,即有^[11]:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{\Delta\theta_A}{\tan\theta_A}, \quad (1)$$

其中: ΔE 为检测光束的能量带宽, E 为检测光束的光子能量, $\Delta\theta_A$ 为检测光束的带宽, θ_A 为调制检测光束晶体的布拉格角。检测光束的能量带宽

计算结果如表 1 所示,由表可以看出理论能量带宽随着指数面的增加而降低。MDCM 的高角度布拉格衍射,将检测光束带宽降低至 Si(111) 带宽的百分之一,同时 MDCM 中双切槽晶体的色散配置的结构,将发散角抑制在 Si(775) 达尔文带宽以内,因此, MDCM 可调制出极高分辨的检测光束^[12]。

2.3 晶体摇摆曲线及 DuMond 图解

DuMond 图解法是基于布拉格衍射方程中衍射角度与波长的关系,用来解释晶体衍射光束线宽与角宽的关系。这里用 DuMond 图解法对 4 种实验配置下 Si(111) 晶体摇摆曲线的测量进行分析。

2.3.1 检测光束角发散的影响

同步辐射检测光束的角发散由两个因素决定:一是光源的发散角,上海光源(SSRF)X 光学测试线光源垂直方向的分散角约为 13.8";二是光束线的接收孔径,X 光学测试线距离光源 18.2 m 的白光狭缝 1 mm 的垂直开口的接收角为 11.3"。二者耦合后,光束的角发散为 11.3"(图 2)。

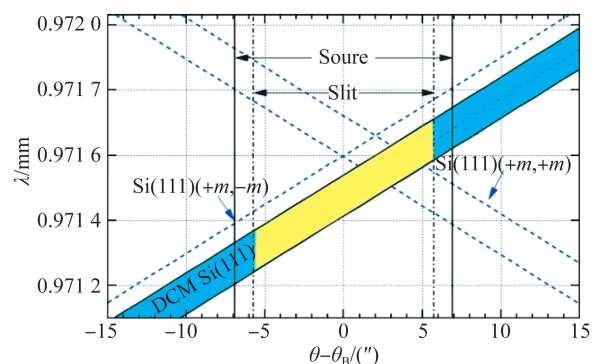


图 2 单色器 Si(111) 出射光束检测的 DuMond 图

Fig. 2 DuMond diagram measured by beams from Si(111) of monochromator

单色器 Si(111) 晶体与被测晶体有消色散 (+m, -m) 和色散 (+m, +m) 两种配置,其 DuMond 图如图 2 所示(彩图见期刊电子版),浅蓝色表示单色器双晶的接收角和带宽,黄色部分为狭缝定义的出射光束的角度和带宽窗口,蓝色虚线为被测晶体的扫描示意图。在图 2 中,消色散的配置下被测晶体的窗口与单色器出射光束的窗口平行,被测晶体转动角相对于出射光束窗口

的长边横向移动。消色散配置下晶体摇摆曲线为被测晶体的窗口与检测光束窗口的卷积,其角宽度为:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_A^2 + \omega_D^2}, \quad (2)$$

其中 $\Delta\theta$ 为被测晶体摇摆曲线的宽度。

$$\Delta\theta_A = \omega_D / \sqrt{2}, \quad (3)$$

其中: $\Delta\theta_A$ 为单色器双晶出射光束的理论带宽^[11], ω_D 为晶体的达尔文带宽。

晶体色散配置的 DuMond 图中,被测晶体与检测光束有大于 90° 的夹角,被测晶体的窗口沿检测光束窗口长边横向带宽的角发散移动,能量带宽也被投影到了转角中,其角宽度为:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_A^2 + \omega_D^2 + (\alpha \times \theta_{\text{slit}})^2 + (\alpha \times \Delta\theta_A)^2}, \quad (4)$$

其中: $\Delta\theta_{\text{slit}}$ 是检测光束的角发散, α 是发散角的展宽因子。第一项和第二项为检测光束和被测晶体接收角的影响;第三项和第四项为狭缝和单色器晶体角发散的影响。由于色散配置的被测晶体与单色器晶体均是 Si(111),二者 X 射线衍射的布拉格角相同,因此扩展因子 $\alpha = 2$ 。

由图 2 可知,被测晶体消色散配置的扫描方式中,影响因素仅包含检测光束带宽;色散配置则卷积了狭缝和双晶的发散角、及检测光束带宽,消色散配置的测量结果更接近被测晶体摇摆曲线的真值。因此,无法调制出高分辨光束的光束线站,需要采用消色散配置测量晶体的摇摆曲线。

如表 1 所示,使用高指数面晶体可降低光束的带宽和角发散, Si(333) 将光束的角发散降低至四分之一、带宽降低一个量级。用单色器的三次谐波作为检测光束,单色器晶体与被测晶体消色散配置的 DuMond 图如图 3 所示。由于被测晶体与单色器晶体的指数面不匹配,检测光束的发散角引入到晶体摇摆曲线的测量结果中,式(2)中发散角的影响变为:

$$\theta_{\text{slit}} = \arcsin \frac{\sin \theta_{\text{slit}}}{3} \approx \frac{2\theta_{\text{slit}}}{3}. \quad (4)$$

双晶带宽的影响变为:

$$\Delta\theta_A = \arcsin \frac{\sin \Delta\theta_A}{3} \approx \frac{2\Delta\theta_A}{3}. \quad (5)$$

所以用单色器的 Si(333) 出射光束检测时,晶体的摇摆曲线为:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_A^2 + \omega_D^2 + \left(\frac{2}{3} \times \theta_{\text{slit}}\right)^2 + \left(\frac{2}{3} \times \Delta\theta_A\right)^2}. \quad (6)$$

根据 DuMond 图解的结果,仅利用单色器双晶的出射光束,无法满足晶体摇摆曲线微小变化的检测需求,需要配置高指数面的分析晶体来抑制光束的角发散和带宽。

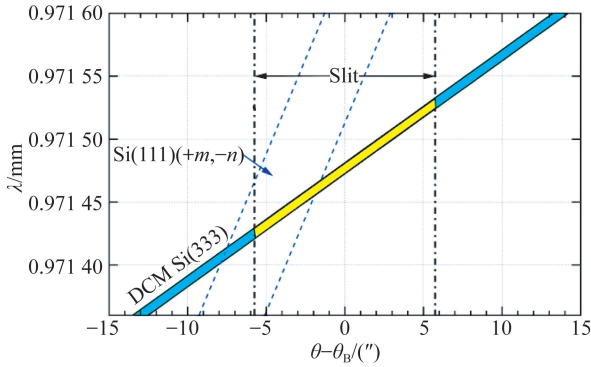


图 3 单色器 Si(333) 出射光束检测的 DuMond 图

Fig. 3 DuMond diagram measured by beams from Si(333) of monochromator

2.3.2 能量带宽的影响

在实验站上配置 Si(333) 的切槽晶体,与单色器的 Si(333) 晶体色散配置的 DuMond 图解如图 4 所示。单色器的晶体可作为狭缝限制光束的角发散,将 Si(333) 带宽和 $\Delta\theta_{DCM}$ 分别替换公式(7)中的 $\Delta\theta_{Slit}$ 和 θ_{Slit} ,得到该配置的晶体摇摆曲线的表达式:

$$\Delta\theta = \sqrt{\Delta\theta_A^2 + \omega_D^2 + \left(\frac{2}{3} \times \Delta\theta_{DCM}\right)^2 + \left(\frac{2}{3} \times \Delta\theta_A\right)^2} \quad (8)$$

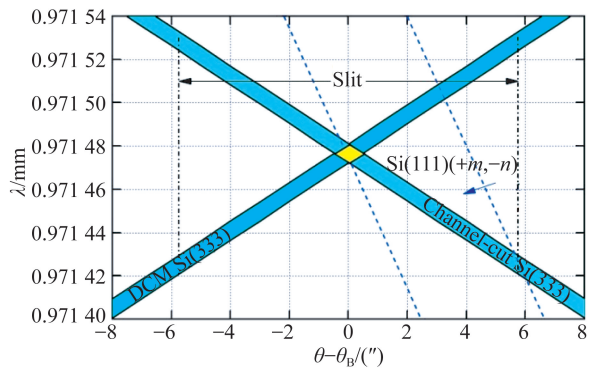


图 4 Si(333) 切槽晶体出射光束检测的 DuMond 图

Fig. 4 DuMond diagram measured by beams from Si(333) channel cut crystal

MDCM 由一块晶体整体切割而成,结构如图 5 所示,两个色散配置的切槽晶体将光束的带

宽和发散角控制在晶体的本征带宽内。MDCM 用于晶体摇摆曲线检测的 DuMond 图解如图 6 所示,参考上述色散配置切槽晶体的表达式(8),用 $\Delta\theta_A$ 替换 $\Delta\theta_{DCM}$ 即为 MDCM 出射光测量的晶体摇摆曲线的表达式。由于 $\Delta\theta_A$ 的值小于被测晶体的达尔文带宽的百分之一,可以忽略,公式中仅有晶体的本征带宽项,因此该配置测量的晶体摇摆曲线最接近理论值。

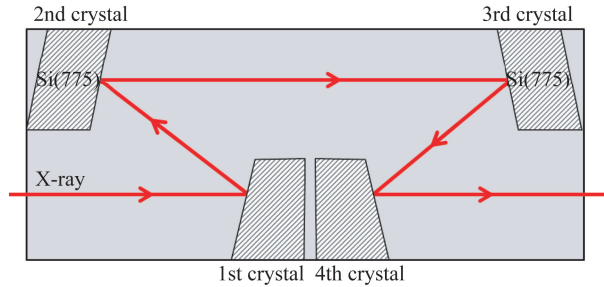


图 5 定能量分析晶体结构示意图

Fig. 5 Schematic diagram of MDCM

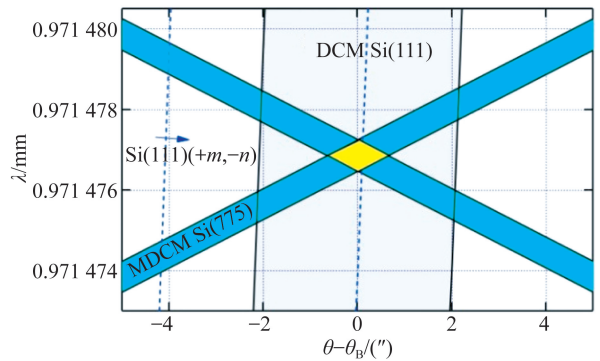


图 6 Si(775) 的定能量分析晶体出射光束检测的 DuMond 图

Fig. 6 DuMond diagram measured by beams from Si(775) MDCM

3 实验及结果分析

上海光源 X 光学测试线(BL09B)是专用于光束线设备及光学元件的检测平台。利用 X 光学测试线的单色器双晶及分析晶体,调制出 4 种带宽的检测光束,测试了 Si(111) 晶体的摇摆曲线。实验中,转动精度为 0.025" 的高精度转台(KOHZU KTG-16W)用于转动被测晶体,密封于腔体内的光电二极管用于出射光强度的探测,吉时利 6485 电流表用来采集衍射光束的光电流信号,用 LabView 软件编写了运动控制及采集程序。

3.1 实验布局及测试结果

检测实验的光学布局如图 7(a)所示。在测试中,首先将单色器的工作能量调至 12.763 keV;然后调整消色散配置的被测晶体投角,使它满足 X 射线布拉格衍射条件,最后测量衍射光强随投角的变化,对应的曲线即晶体的摇摆曲线。色散配置的模式则将被测晶体旋转 180°后,按照上述过程进行测量。两种实验配置的测量结果如图 8 所示,消色散和色散配置摇摆曲线的半高宽分别为 5.78"和 24.39"。

在光束中插入铝箔时(图 7(a)),可通过铝材料对不同能量 X 射线的吸收差异将基波过滤掉,用单色器三次谐波作为检测光束。当配置铝箔厚 100 μm 时,4.254 keV 的基波通量可被抑制 4 个量级(透射率为 3.5×10^{-4}),光电流约为 3 nA,三次谐波 12.763 keV 的光子通量降低值为 72%,即检测光束中 12.763 keV 的光子数比 4.254 keV 的光子数高两量级。测量结果如图 9 中蓝线所示(彩图见期刊电子版),光子通量的峰值为 120 nA,晶体摇摆曲线的半高宽为 8.57"。

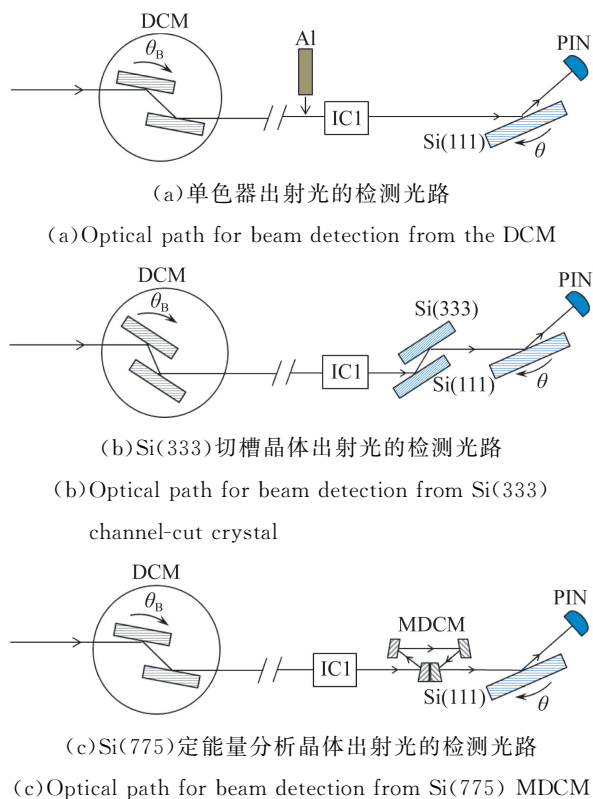


图 7 Si(111)晶体摇摆曲线的检测光路

Fig. 7 Optical path for Si(111) rocking curve measurement

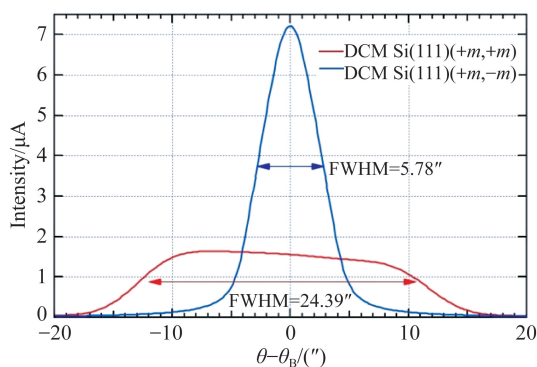


图 8 单色器出射光测量的 Si(111)摇摆曲线

Fig. 8 Rocking curves of Si(111) measured by beams from DCM

Si(333)切槽晶体与单色器 Si(333)晶体的色散配置的光学布局如图 7(b)所示。首先将单色器的工作能量调整至 4.254 keV,并用 100 μm 厚的铝箔消除光束中的基波;然后,调整 Si(333)切槽晶体满足衍射条件,并将衍射光调整到最大;最后将被测晶体移进光路并调整晶体满足衍射条件,转动被测晶体的投角测得晶体的摇摆曲线,结果如图 9 中红线所示。

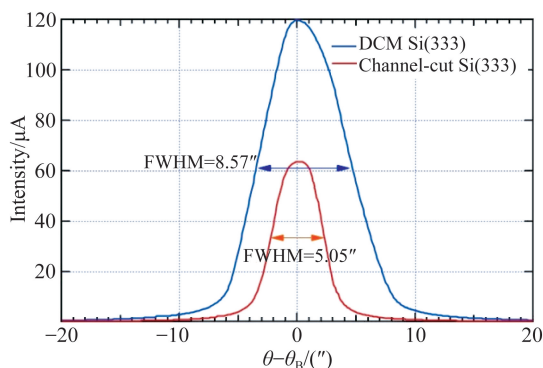


图 9 单色器 Si(333)和 Si(333)切槽晶体出射光测量的 Si(111)摇摆曲线

Fig. 9 Rocking curves of Si(111) measured by beams from Si(333) of DCM and Si(333) channel-cut crystal

MDCM 调制的高品位检测光束,首先是将单色器的工作能量调整至 12.763 keV,然后 MDCM 调整至满足 4 块晶体的衍射条件(图 7(c)),最后将被测晶体移进光路并测量其摇摆曲线(见图 10)。

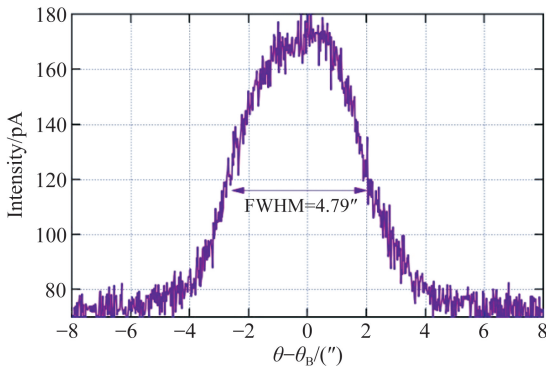


图 10 Si(775)定能量分析晶体出射光测量的 Si(111)摇摆曲线

Fig. 10 Rocking curve of Si(111) measured by beam of Si(775) MDCM

3.2 结果分析及讨论

单色器的基波作为检测光束的测量结果如图 8 所示,消色散配置的晶体摇摆曲线的半高宽为 $5.78''$,色散配置的结果为 $24.39''$ 。色散配置的峰值通量低于消色散配置的值,但是二者摇摆曲线的积分值一致,原因是被测晶体调制了衍射光束的光子通量。色散配置的结果中低角到高角的通量值逐渐降低,反映了晶体的动力学衍射特性。

Si(111)晶体在 12.763 keV 能量的达尔文带宽为 $4.70''$,代入公式(3)中得到消色散配置的结果为 $5.76''$;将狭缝定义的发散角 $11.3''$ 、Si(111)带宽 $4.70''$ 及展宽因子 2,代入公式(4)中,计算得到的色散配置结果为 $24.25''$,两个计算结果均与测量值一致。实验结果也验证了消色散配置可消除检测光束角发散的影响,色散配置结果中角发散的误差比重较大。

单色器的三次谐波作为检测光束的测量结果为 $8.57''$,与理论结果 $8.93''$ 存在一定的差异,单色器高指数面晶体虽然可以将光束的带宽降低一个量级,但由于两晶体的布拉格角不匹配,在实验结果中引入了光束角发散误差。光束线上色散配置 Si(333)切槽晶体,在将光束带宽和角发散的影响抑制到其达尔文带宽内,实验结果 $5.05''$ 与理论值 $4.83''$ 的差值在 5%以内,可满足 Si(111)晶体摇摆曲线的变化大于 $1''$ 的检测需求。

Si(775)在 12.763 keV 的能量带宽为 0.01 eV ,

与被测晶体的达尔文带宽相比可以忽略,用 MDCM 调制的光束测量得到晶体摇摆曲线为 $4.79''$,与动力学衍射理论值 $4.70''$ 的差小于 2%,可满足晶体摇摆曲线微小变化的检测需求。调整 MDCM 满足衍射条件的实验难度较大,且出射光束的通量较低(峰值 180 pA),仅适用于晶体动态压弯过程中摇摆曲线变化的检测。

实验结果表明,晶体摇摆曲线的测量结果与经验公式的计算结果基本吻合,经验公式可为晶体摇摆曲线的定量评价提供依据。高指数面的 Si(333)晶体需要色散配置才能同时抑制光束的带宽和角发散,调制出高分辨的检测光束。MDCM 仅能调制出特定能量的高分辨光束满足晶体检测的需求,而高指数面切槽晶体的色散配置可满足晶体在一定能量范围的检测需求。

4 结 论

本文利用 DuMond 图解法,对 4 种实验配置调制出的检测光束用于 Si(111)晶体的测量进行了定性解析,该方法直观地解释了晶体摇摆曲线的物理意义,并且分析了光束角发散、带宽对晶体摇摆曲线测量的影响。根据 DuMond 图解及 X 射线晶体动力学衍射理论,推导出各种实验配置条件下 Si(111)晶体摇摆曲线的经验公式,为定量评价晶体的摇摆曲线提供理论依据。在上海光源 X 光学测试线搭建了检测系统并测试了晶体的摇摆曲线,结果表明:相同指数面的晶体色散配置时光束的角发散影响较大;高指数的晶体可以降低光束带宽的影响,但是晶体布拉格角的匹配问题引入了发散角误差;高指数面晶体需要色散配置才能调制出高分辨的检测光束,满足一定能量范围内晶体摇摆曲线的测量;MDCM 出射的高分辨光束,在特定能量 12.763 keV 下测得晶体摇摆曲线的值为 $4.79''$,与 X 射线晶体动力学衍射的理论值 $4.70''$ 的差在 2%以内。总之,在同步辐射光束线上,通过高指数面晶体的色散配置可以调制出高分辨的检测光束,从而满足加工、夹持、装调等工艺引起晶体摇摆曲线微小变化的检测需求。

参考文献:

- [1] 宋丽,樊奕辰,金利民,等. 一种同步辐射水冷晶体机械密封结构的设计 [J]. 核技术,2019,42(5):050103.
SONG L, FAN Y CH, JIN L M, *et al.*. Design of a mechanical sealing structure for the synchrotron radiation water-cooled crystal [J]. *Nuclear Techniques*, 2019,42(5):050103. (in Chinese)
- [2] 隋国荣,朱泽玮,王颖,等. 三晶体多轴联动同步辐射 X 射线荧光光谱仪 [J]. 光学精密工程,2017,25(11):2878-2888.
SUI G R, ZHU Z W, WANG Y, *et al.*. Synchrotron radiation X-ray fluorescence spectrometer based on three crystals and multi-axis linkage [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(11):2878-2888. (in Chinese)
- [3] 李华鹏,郑伟宁,赵屹东,等. 同步辐射硬 X 射线光子通量的绝对测量 [J]. 光学精密工程,2017,25(11):2845-2851.
LI H P, ZHENG W N, ZHAO Y D, *et al.*. Absolute measurement of photon flux for synchrotron radiation hard X-ray [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2017,25(11):2845-2851. (in Chinese)
- [4] ZHANG L, DEL RIO M S, MONACO G, *et al.*. Thermal deformation of cryogenically cooled silicon crystals under intense X-ray beams: measurement and finite-element predictions of the surface shape [J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2013,20(4):567-580.
- [5] MASIELLD F, CEMBALI G, CHUMAKOV A, *et al.*. Rocking curve measurements revisited [J].

Journal of Applied Crystallography,2014,47(4):1304-1314.

- [6] 何健,徐中民,宋丽,等. 沟槽型 X 射线两次衍射单色器研究 [J]. 原子能科学技术,2017,51(11):2085-2091.
HE J, XU ZH M, SONG L, *et al.*. Study on channel-cut type X-ray monochromator with two times diffraction [J]. *Atomic Energy Science and Technology*, 2017,51(11):2085-2091. (in Chinese)
- [7] YANG T Y, WEN W, YIN G Z, *et al.*. Introduction of the X-ray diffraction beamline of SSRF [J]. *Nuclear Science and Techniques*, 2015,26:020101.
- [8] DUMOND J W M. Theory of the use of more than two successive X-ray crystal reflections to obtain increased resolving power [J]. *Physical Review*, 1937,52(8):872-883.
- [9] LI Z L, FAN Y C, XUE L, *et al.*. The design of the test beamline at SSRF [J]. *AIP Conference Proceedings*, 2019,2054(1):060040.
- [10] ZHANG X W, FUJIMOTO H. Characterization of wavelength stability of dispersive monolithic double channel-cut monochromator in order of 10^{-9} [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2006,45(10):7933-7937.
- [11] SANCHEZ DEL RIO M, MATHON O. A simple formula to calculate the X-ray flux after a double-crystal monochromator [J]. *SPIE*, 5536, 2004:157-164.
- [12] YURI SHVYD'KO. X-ray optics high energy resolution applications [J]. *Springer*, 2004.

作者简介:



李中亮(1982—),男,山东阳谷人,副研究员,2011年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事同步辐射 X 射线光学元件及光束线设备工作波长检测方法的研究。E-mail: lizhongliang@zjlab.org.cn



杨俊亮(1993—),男,河北邯郸人,博士研究生,2015年于河北师范大学获得学士学位,主要从事同步辐射光束线建设与应用方面的研究。E-mail: yangjl@ihep.ac.cn