

单色器晶体角度微振动的高精度原位检测技术

樊奕辰, 李中亮, 徐中民, 张琦, 刘运, 王

引用本文:

樊奕辰, 李中亮, 徐中民, 张琦, 刘运, 王. 单色器晶体角度微振动的高精度原位检测技术[J]. *中国光学*, 2020, 13(1): 156–164. doi: 10.3788/CO.20201301.0156

FAN Yi-chen, LI Zhong-liang, XU Zhong-min, ZHANG Qi, LIU Yun, WANG Jie. High-accuracy in-situ detection method of monochromator angular vibration[J]. *Chinese Optics*, 2020, 13(1): 156–164. doi: 10.3788/CO.20201301.0156

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/CO.20201301.0156>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

极高分辨变包含角平面光栅单色器关键技术及检测方法研究

Key technologies and the performance measuring methods in variable included angle plane grating monochromator

中国光学. 2016, 9(2): 284 <https://doi.org/10.3788/CO.20160902.0284>

点衍射干涉检测技术

Point diffraction in interference detection technology

中国光学. 2017, 10(4): 391 <https://doi.org/10.3788/CO.20171004.0391>

低阶梯多级微反射镜高度误差分析及制作研究

Error analysis and fabrication of low-stepped mirrors

中国光学. 2019, 12(4): 791 <https://doi.org/10.3788/CO.20191204.0791>

硅光子芯片外腔窄线宽半导体激光器

Narrow linewidth external cavity semiconductor laser based on silicon photonic chip

中国光学. 2019, 12(2): 229 <https://doi.org/10.3788/CO.20191202.0229>

空间调制微型傅里叶变换红外光谱仪研究

Micro spatial modulation Fourier transform infrared spectrometer

中国光学. 2015(2): 277 <https://doi.org/10.3788/CO.20150802.0277>

单色器晶体角度微振动的高精度原位检测技术

樊奕辰^{1,2,4}, 李中亮^{1,2}, 徐中民^{1,2}, 张琦³, 刘运^{1,2}, 王劫^{1,2*}

(1. 中国科学院上海应用物理研究所, 上海 201204;

2. 中国科学院上海高等研究院, 上海 201204;

3. 东南大学, 江苏南京, 211189;

4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为实现对双晶单色器角度微振动的原位测量,设计了基于双频激光干涉仪的双晶单色器晶体角度微振动测试系统,并搭建了实验平台。激光经干涉计偏振分光后射向被测晶面,对反射信号调制解调求得晶面两端的位移偏差,从而高频获取晶面的角度位移信息。通过数据预处理可以有效去除夹杂在数据中的噪声及直流分量,应用快速傅立叶变换处理得到晶体角度振动的频谱信息,准确获取对晶体稳定性产生影响的特征频率,从而分析影响晶体稳定性的主要振源。该方案可实现晶体角位移的高频采集,分辨率高达 25 nrad,并能准确分析出不同振源影响下晶体微振动的情况,为单色器结构优化提供参考。

关键词:同步辐射;双晶单色器;角度微振动;双频激光干涉仪

中图分类号:O434.1 文献标识码:A doi:10.3788/CO.20201301.0156

High-accuracy in-situ detection method of monochromator angular vibration

FAN Yi-chen^{1,2,4}, LI Zhong-liang^{1,2}, XU Zhong-min^{1,2}, ZHANG Qi³, LIU Yun^{1,2}, WANG Jie^{1,2*}

(1. *Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;*

2. *Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201204, China;*

3. *Dongnan University, Nanjing 211189, China;*

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

* *Corresponding author, E-mail:wangjie@sinap.ac.cn*

Abstract: In order to achieve in-situ measurement of Double-Crystal Monochromator (DCM) stability, an angular vibration measuring system based on dual-frequency interferometers is designed, and a measurement platform is also established. A laser is split into two beams with an interferometer and then is aimed at the crystal surface. Reflective signals from both ends of the crystal are demodulated by a data acquisition board and the crystals' angular displacement information is acquired at high frequency. Its frequency information can also be obtained by means of Fast Fourier Transform (FFT), from which the primary source of vibration that influences the stability of the monochromator can be deduced. We can achieve high-frequency acquisition of crystal angular displacement with a resolution of up to 25 nrad. With this, information on the different sources of vibration

收稿日期:2019-04-22;修订日期:2019-06-04

基金项目:国家自然科学基金项目(No. 11505279)

Supported by National Natural Science Foundation of China(No. 11505279)

can be distinguished, which can be significant in DCM structure optimization.

Key words: synchrotron radiation; double-crystal monochromator; angular vibration; dual-frequency interferometer

1 引言

基于同步辐射 X 射线的大科学研究平台为生命科学、材料科学、信息科学等众多学科提供了先进的实验技术手段,并在生物制药、石油化工、微电子等领域有广泛的应用。随着同步辐射光源性能的大幅提升,光束线的性能也必须相应地提升。现在,同步辐射光束线已经从高能量分辨发展到超高能量分辨,从微米聚焦发展到纳米聚焦。因而,光束线的稳定性已成为先进性能光束线的关键,如上海光源正在建设的硬 X 射线纳米探针线站和高性能膜蛋白线站,对样品处聚焦光斑的稳定性要求达到十几到百纳米量级。对于硬 X 射线光束线,双晶单色器的功能在于单色化入射光。其稳定性主要取决于分光晶体的角度稳定性,一般地,分光晶体的角度稳定性直接影响了聚焦光斑的位置稳定性。不考虑光束线光学系统的作用,聚焦光斑的偏移量大致可以由下式计算: $\Delta\sigma = L \cdot \Delta\theta$,其中 L 为单色器到光束线焦点的距离, $\Delta\theta$ 是分光晶体的角度偏移量。通常,上海光源的光束线 L 约为 20 m 左右,若要求 $\Delta\sigma$ 约为 100 nm,则 $\Delta\theta$ 大约为 5 nrad。再考虑到实际光学系统的具体情况,实际的高稳定单色器的角度稳定性要求为 30 ~ 50 nrad^[1],研制高稳定的双晶单色器已是当今光束线技术领域的研究热点^[2]。

要获得高稳定单色器,实际晶体角度微振动检测是关键,需要特别指出的是:晶体的原位检测提供了晶体、夹持机构、冷却系统等对外界激励(主要是地基振动)的综合响应,通过实验给出的振动频谱可以为单色器的设计及改进提供重要而直接的依据。目前晶体的原位检测技术主要包括基于直接振动测量的接触式模式和基于光学测量技术的非接触式模式。西班牙 ALBA 光源分别利用双频激光干涉仪与加速度传感器获取了双晶单色器中二晶的振动^[3],并对比了两种测量方法的优缺点,但由于设备安装限制,两种方法均无法进

行真空内测量且无法排除设备自身的干扰;美国 APS 光源结合加速度振动传感器与力锤进行敲击实验^[4],通过模态分析求得地基、大理石基座与单色器腔体的模态,但仍无法直接测得晶体的振动响应;英国 Diamond 光源应用多普勒测振仪测得了单色器一晶在真空环境下的振动信息^[5],并对比了液氮循环机组压缩频率在 20 ~ 60 Hz 内改变时单色器一晶振动频谱的变化情况,然而该方法只能测得单点的线性位移信息而无法表征角度稳定性;德国 DESY 光源利用电容传感器同时对两点进行测试^[6-7],通过将两点的线性位移换算成角度信息,成功获得了晶体角度振动信息,但是该方法对两个探头的安装精度及同步性都有极高要求,且电容传感器的测距范围十分有限。法国 SOLEI 光源通过利用 XBPM(X-ray Beam Position Monitor, X 光位置探测器)在线监测光束经双晶前后的位置变化^[8],获取了双晶振动的可靠信息,但由于同步辐射大装置需要长期稳定运行的特殊性,单色器一旦安装上线就很难再对结构进行调整及优化。如何通过离线手段准确获取双晶单色器的角度振动信息仍是同步辐射领域的难点问题。

综合对比上述单色器微振动测试方法,振动传感器作为最常用的振动测量手段,虽能有效获取振动频谱信息,但只能测得单一点的线性振动情况;光电自准直仪是较常用的测量微小角度位移的设备,可用于长时间监测角度稳定性,但由于采样频率较低、时间分辨率不高,无法有效获取频域信息;激光干涉仪分辨率可达纳米量级,常用于高精度线性及角度测量,且采样频率可达 10^5 Hz 甚至更高,满足测量双晶稳定性的需求,然而传统的激光干涉仪测试光路较复杂,且测试镜组本身体积和质量都偏大,较难应用于对双晶的检测。

本文研究了一种基于双频激光干涉仪的单色器双晶原位角度稳定检测方法,在理论上分析了影响系统测量分辨率的主要因素,搭建了初步的

测试平台,并验证了该方法的技术可行性。相较国际上采用的原位检测技术,本文提出的测量方法无需安装反射棱镜,即可非接触地测量分光晶体的角度微振动,而且由于没有附加的测量部件,因此不改变晶体的振动频谱。此外,利用高频采集系统,可以获得较大频谱范围内双晶角度的微振动信息。

2 测量系统的设计与测量不确定度

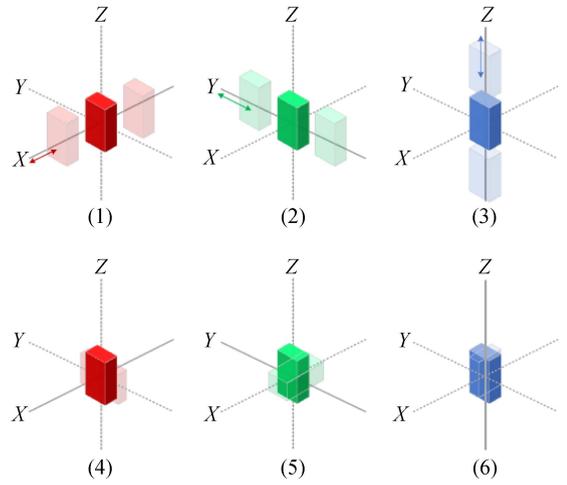
2.1 非接触式角度测量

理论上,任意一个微振动都可以分解为6种基本振动模式——3个方向的平移振动和3个方向的角度振动(图1(a))。对于最常见的双平晶单色器,第二晶体的振动对出射光稳定性的影响更大,所以主要关注第二晶体的6个基本振动模式对出射光的影响(图1(b))。对于双平晶结构, Z 方向的平移振动改变了晶体的距离,使得出射光产生平移,而 X 和 Y 方向的振动则无任何影响(尽管考虑热变形后, Y 方向的平移振动也将有一定的影响,但可忽略);绕 X 轴的角度振动导致晶体的投角(pitch)方向发生改变,从而使得出射光的方向发生改变;绕 Z 轴的振动,对于最常见的Si(111)衍射面基本没有影响;绕 Y 轴的振动会导致出射光的滚角(roll)变化,但由于Bragg角较小,对光斑在垂直方向的稳定性的影响较小,基本可以忽略不计。每一种振动模式对光束稳定性的影响都不同,对于双晶单色器而言,平移振动对于光束的影响主要是导致光束的等比率平移,而对于角振动,由于距离因素,其影响通常比平移振动严重得多,也是本文研究的主要内容。

当一个刚体作微小转动时,假设转动中心位于刚体内部,考察刚体上任意过转动中心的直线上的两个点 A 和 B ,当发生微小转动时,有 $r_A d\theta(t) = v_A(t) dt$ 和 $r_B d\theta(t) = -v_B(t) dt$,相加并积分有:

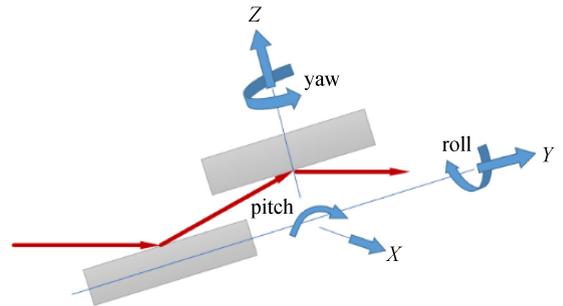
$$\Theta(t, T) = \theta(t + T) - \theta(t) = \frac{1}{L} \left[\int_t^{t+T} dt \cdot v_A(t) + \int_t^{t+T} dt \cdot v_B(t) \right], \quad (1)$$

式中 L 是点 A 和点 B 间的距离。式(1)表明,若能够测量出过转动中心的直线上的两点一段时间内位移的差值,就可以求得一段时间内刚体的转动角度。



(a) 微振动的基本振动模式

(a) Basic vibration modes of micro vibration



(b) 双晶单色器晶体坐标系

(b) Coordinate system of double-crystal monochromator

图1 晶体微振动示意图

Fig. 1 Schematic of DCM micro vibration

基于上述分析,本文设计了非接触式单色器分光晶体角振动测量系统,基本光路形式如图2所示^[9-10]。双频激光器发出右旋圆偏振光 f_1 和左旋圆偏振光 f_2 ,经干涉计中的偏振分光镜正交分离后,分别投射到被测镜面两端点 A 和点 B 上,反射光的多普勒频移为:

$$\begin{cases} f_{dA}(t) = \frac{2f_1}{c} v_A(t) \\ f_{dB}(t) = -\frac{2f_2}{c} v_B(t) \end{cases} \quad (2)$$

设双频激光的频差为 $\Delta f = f_1 - f_2$,则:

$$\int_t^{t+T} v_A(t) dt + \int_t^{t+T} v_B(t) dt = \frac{c}{2f_1} \int_t^{t+T} f_{dA}(t) dt - \frac{c}{2(f_1 - \Delta f)} \int_t^{t+T} f_{dB}(t) dt. \quad (3)$$

考虑到 $\Delta f \ll f_1$, 可得:

$$\Theta(t, T) \cong \frac{\lambda}{2L} \int_t^{t+T} f_d(t) dt, \quad (4)$$

其中 $f_d(t) = f_{dA}(t) - f_{dB}(t)$ 为运算板卡接收到的

两个点的多普勒频移之差, 反射光与参考光混频的脉冲经过 O/E 转换及解调, 即可检测出 $f_d(t)$ 的信息。

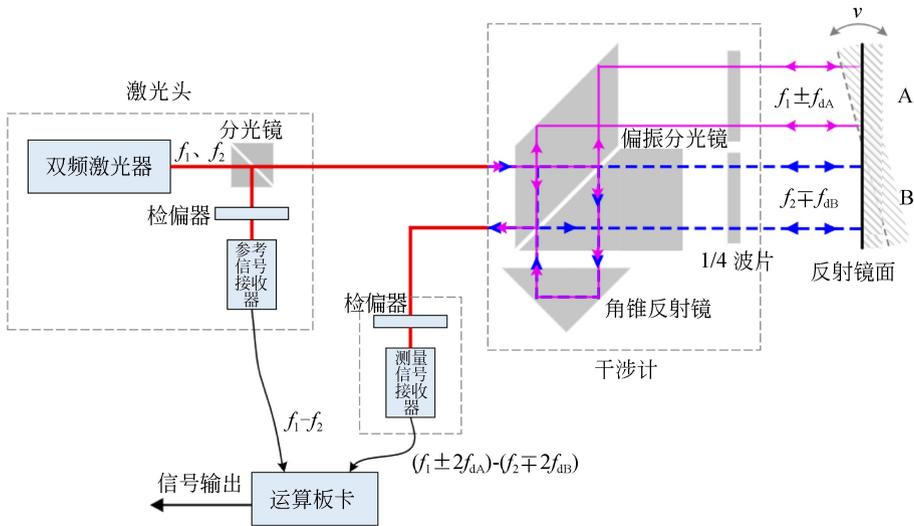


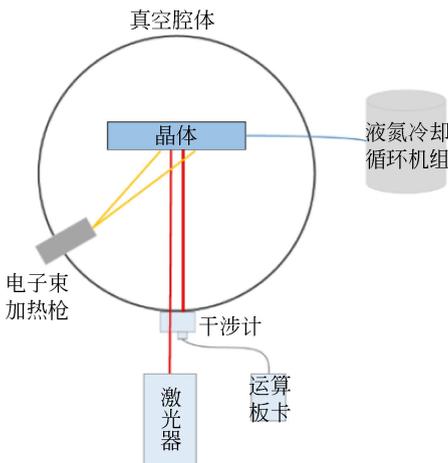
图 2 双频激光干涉仪双晶角度稳定性测试原理图

Fig. 2 Schematic diagram of angular vibration measuring principle of DCM by dual-frequency interferometer

2.2 原位测量系统的实验装置

为了验证测试方案的可行性, 设计了模拟单色器平台, 开展实验测试(图 3(a))。在实际工作过程中单色器的振源复杂, 真空泵、液氮循环

机组、晶体受热导致冷却管路里液氮气化而引起的湍流等, 都是造成晶体不稳定的因素。针对光束线晶体单色器, 加工了一台模拟真空腔体(图 3(b))。



(a) 液氮冷却单色器稳定性测试平台示意图

(a) Schematic of liquid nitrogen-cooled DCM stability test platform



(b) 单色器晶体角度稳定性测试图

(b) Picture of DCM angular stability measurement

图 3 单色器角度稳定性测试实验图

Fig. 3 DCM angular stability measurement

真空室的直径约为 480 mm, 高度为 400 mm,

配备分子泵机组, 工作状态下真空度可维持在

10^{-5} Pa。实测发现,将真空泵关闭后,在实验测量的时间段内真空度基本不变(当加入液氮时,真空度略有变好)。为导入测量光束和方便观察,真空室带有一个 CF150 的观察窗。观察窗的玻璃选用石英玻璃,以尽可能降低真空时由于玻璃内应力变化可能导致的双折射。对于本文提出的稳定性测量方法,由于抽真空会导致观察窗应力改变,对晶面投角绝对值的测量有潜在的影响,但测量的是单位时间内角度的相对改变量,所以只要在测量过程中保证观察窗的内应力场不变即可,对于角度相对值的测量影响基本可以忽略。考虑到测量的积分时长较短(采样频率为 500 Hz,连续采集 2 min),在此期间,可以认为观察窗的内外力变化不大,故在后期的数据处理中忽略观察窗内应力变化对稳定性测量的影响。玻璃的两个表面不是平行的,有一个微小的夹角。被测晶体安装在夹持机构上,整个晶体可以旋转,使得晶体的衍射面与观察窗面平行。夹持机构与上海光源使用的晶体单色器的夹持机构类似,采用了液氮侧冷方式。另外,为了将来模拟晶体受到 X 射线照射时的加热作用,在晶体的侧方安装有电子束枪,用于加热晶体,模拟 X 射线照射的热效应。

在测量过程中为避免周围可见光的干扰,用黑布等遮盖光路。但实际测量中发现,杂散可见光对测量并没有可观察到的干扰,这与测量系统的偏振光检测以及只测量多普勒信号的差值有关。

整个单色器模拟装置及测量系统固定在同一光学平台上,以减小由于支撑结构不同而可能引入的振动。实际测量时,激光器发出的激光通过观察窗口照射到晶体上然后返回,采集系统能以较高频率捕捉到晶体投角的微小位移信号。上述测试方案具有如下优点:可以实现对反射镜面的非接触测量,简化了传统双频激光干涉仪的测量光路;由于无需馈入反射棱镜,可实现高真空环境下的测量;不同于传统方法只能测量单点的线性位移,该方案能够直接高频获取晶体投角的微振动信息。

2.3 测量不确定度估算

测量系统的随机误差源可以分为 3 个部分,一是双频激光器本身的稳定性,二是干涉计引入

的随机误差,三是环境因素的扰动等^[10-11]。测量系统的系统误差主要是阿贝误差、余弦误差、死程误差等。对于单色器稳定性测量,主要在晶体稳态时测量其投角微振动,晶体两端的振幅一般在百纳米以内^[12-13],故分析时认为测量行程为 100 nm。

2.3.1 误差源引入的测量误差的估计

(1) 激光波长

实验时采用 Agilent5519A 激光器,提供波长为 632.99 nm 的稳定激光光源,激光器波长标称精度为 ± 0.1 ppm (Parts per million, 百万分之一),标称波长稳定性为 ± 0.002 ppm。

则激光波长精度误差为: $100 \text{ nm} \times (\pm 0.1 \text{ ppm}) = \pm 10^{-5} \text{ nm}$ 。

激光波长稳定性误差为:

$$100 \text{ nm} \times (\pm 0.002 \text{ ppm}) = \pm 2 \times 10^{-7} \text{ nm}。$$

(2) 干涉计

干涉计采用 Agilent10719A-C02 型差分干涉计,其引入的测量误差主要有两个:一是热漂移,根据仪器参数,热漂移系数是 $50 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,对于液氮冷却单色器,在热平衡状态下,温度波动可控制在 $\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}/10 \text{ min}$,故系统的光学热漂移误差为: $50 \text{ nm} \times (\pm 0.01 \text{ }^\circ\text{C}) = \pm 0.5 \text{ nm}/10 \text{ min}$;第二个是干涉计的最小可分辨位移,在 1735A 运算板卡下该差分干涉计的分辨率为 0.5 nm (平面镜)^[9]。因此可认为干涉计引入的误差不超过 $1 \text{ nm}/\text{min}$ 。

(3) 系统误差

由于系统是直接测量反射镜面角度稳定性的,测量基线位于晶面上,满足阿贝原则,阿贝臂为零,因此阿贝误差为零。

通过合理准直光路可以有效减小余弦误差,余弦误差系数为 0.1 ppm ,则测量余弦误差为: $100 \text{ nm} \times 0.1 \text{ ppm} = 10^{-5} \text{ nm}$,远小于测量分辨率,可忽略。

根据设计方案,该光路设计的死程为零,因此该测量系统的死程误差为零。

对于双频激光干涉仪,其光学非线性为一固定正弦形式的周期误差,标定可知系统的非线性误差为 2.2 nm ^[9]。

综合上述分析,测量系统的总系统误差为

$\sigma_{\text{system}} \cong \sigma_{\text{nonlinear}} = 2.2 \text{ nm}$ 。

2.3.2 测量系统的总误差估计

根据误差的传递原理^[14-15], 对公式(4) 偏微分, 可得本测量系统各随机误差对测量系统的综合影响, 系统的误差估计为:

$$d\theta = \frac{1}{2L} \left[\int_t^{t+T} f_d(t) dt \right] dL + \frac{\lambda}{2L^2} \left[\int_t^{t+T} f_d(t) dt \right] dL + \frac{\lambda}{2L^2} \left[\int_t^{t+T} \frac{\partial f_d(t)}{\partial x} dt \right] dx, \quad (5)$$

式中, x 表示对于采样时间 T 内, 导致 f_d 不稳定的所有因素, 如电子学噪声、激光束方向稳定性等。其中第一项中 dL 约为 10^{-5} nm , 该项可忽略; 考虑到测量有效时间较短, 在误差估计中, 可以认为测量期间 f_d 信号是稳定的, 上式中的第三项可忽略不计。因此,

$$d\theta \cong \frac{\lambda}{2L^2} \left[\int_t^{t+T} f_d(t) dt \right] dL = \left[\frac{\lambda}{2L} \int_t^{t+T} f_d(t) dt \right] \times \frac{dL}{L} < \frac{\lambda}{2L} \int_t^{t+T} f_d(t) dt. \quad (6)$$

即系统单位时间内的总随机误差小于系统的分辨能力, 综合考虑干涉计引入的误差, 可以认为稳定性测试系统的随机误差 $\sigma_{\text{random}} < 1 \text{ nm}$, 根据误差合成原则^[15]有:

$$\sigma_{\theta} = \sqrt{\sigma_{\text{system}}^2 + \sigma_{\text{random}}^2} = 2.42 \text{ nm}. \quad (7)$$

由式(7)可得系统的不确定度为 2.42 nm , 即测角不确定度为 63 nrad 。

3 结果与讨论

为验证方案的可行性, 在上海光源实验大厅开展了实验测试, 如图 3(b) 所示。实验采用 Agilent 公司的 5519A 型双频激光器提供稳定光源, 配合 Agilent 10719A-C02 差分干涉计实现测量光路, 信号采集选用 1735A 运算板卡, 可实现 25 nrad 测量分辨率及高达 100 kHz 的动态采样率。根据工程需要, 线站工作人员往往更关心单色器晶体在 $1 \sim 100 \text{ Hz}$ 频域内的振动情况, 故实验设置采样频率为 500 Hz , 积分时长为 120 s 。

3.1 时域信息

利用所搭建的系统成功采集到了晶体表面投角位移随时间变化的情况, 同时为了验证所获取

信息的可靠性, 分别测量了单色器在真空泵机组开启时以及真空泵关闭后达到真空稳态状态下晶体表面的振动情况, 如图 4 所示, 其中图 4(b) 截取了 1 s 内的振动谱图以查看信号细节。可以看出, 角度随时间成近似三角函数关系, 但谱线并不完全平滑, 且正弦波随时间有小幅度的漂移, 说明所测得的时域信息是晶体表面在不同振源影响下所产生的不同振幅及周期的振动的叠加。对比不同工作状态下的测得结果发现, 在真空泵关闭后晶体表面的振动幅值显著减小, 且主要振动周期略有缩短, 可见真空泵关闭后对晶体起主要影响的振源频率右移。图 4 中的数据表明搭建的测量系统能够有效测得不同工作环境对晶体投角振动幅度及周期的影响, 有力地证明了方案的可行性。

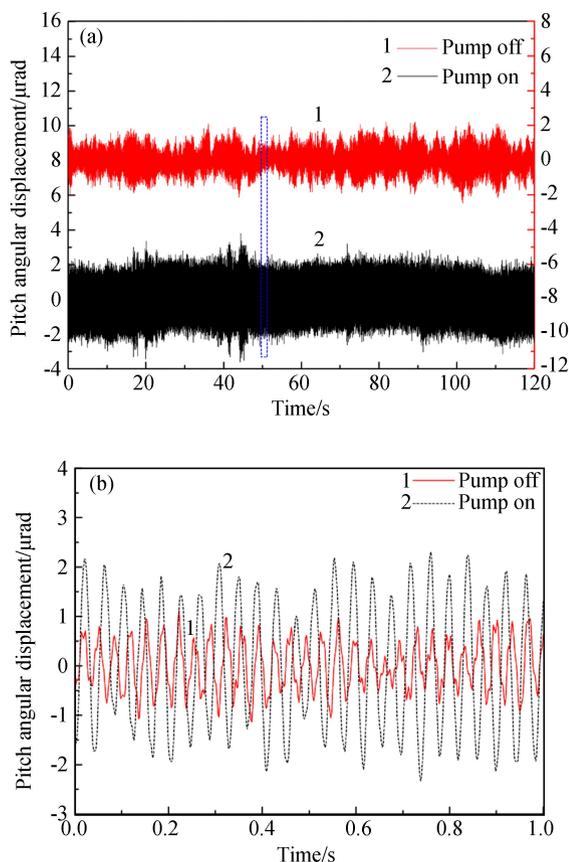
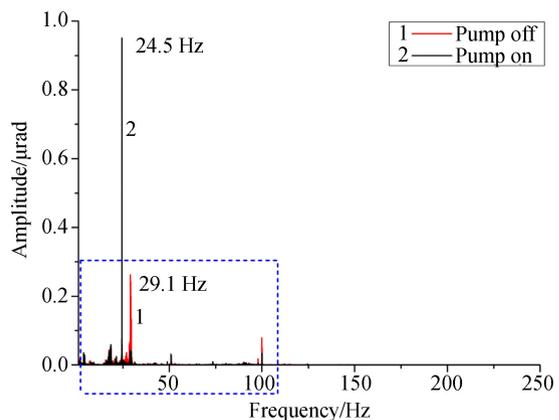


图 4 不同工作状态下的晶体投角位移时域图(a)及其局部放大图(b)

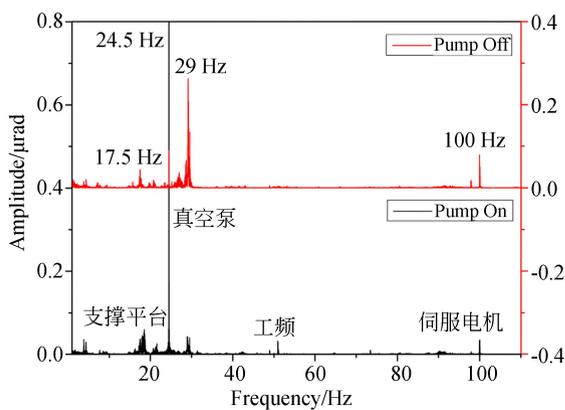
Fig. 4 (a) Time domain diagram of pitch angular displacement under different working conditions and (b) its local enlarged view

3.2 频域信息

通过所搭建的系统能够有效测得晶体表面角度振动的时域信息,然而在实际工程中,为了避免发生共振,往往更关心某些特定频率对晶体的影响,通过分析晶体振动频谱确定其模态,优化结构以避开工作环境中各振源的频率。因此,将获取的时域信号进行快速傅立叶变换(Fast Fourier Transformation, FFT),得到晶体角度振动的频谱信息,如图 5 所示。



(a) 投角振动频谱
(a) Frequency spectrum of pitch angular vibration



(b) 1~100 Hz 频域内振动分析
(b) Detail of potential vibration sources from 1 to 100 Hz

图 5 投角振动频谱分析

Fig. 5 Analysis of frequency spectrum for pitch angular vibration

从图 5(a)中不难看出,真空机组开启状态下,对晶体稳定性起主要影响的振源频率在 24.5 Hz 附近,而真空泵关闭后达到真空稳态时晶体振动的主要频率右移至 29.1 Hz 附近。根据以往的工程经验^[16],24 Hz 附近的主要振源为机械

泵组,与实验测得的结果吻合,而 29.1 Hz 则是表征晶体及其夹持机构本身的固有频率。图 5(a)中 1~100 Hz 频域内的谱图局部放大后如图 5(b)所示。可以很明显地看出,所测得的时域信号在经过 FFT 变换后,能够准确地捕捉到对晶体稳定性产生影响的特征频率。其中,4 Hz 附近的振动主要是由于外部悬挂式固定的液氮管路在工作过程中会产生轻微晃动而产生的;17.5 Hz 附近的振动来源于大理石支撑平台;50 Hz 表征的是工频噪声的影响;100 Hz 振动的来源为伺服电机。图 5 中获取的频谱信息对振源具有明确的指向性,且测得的结果与国际许多相关光源的测试结果相匹配,从而验证了测试方案的可行性及优越性,本文结果能够对单色器设计及结构优化提供参考。

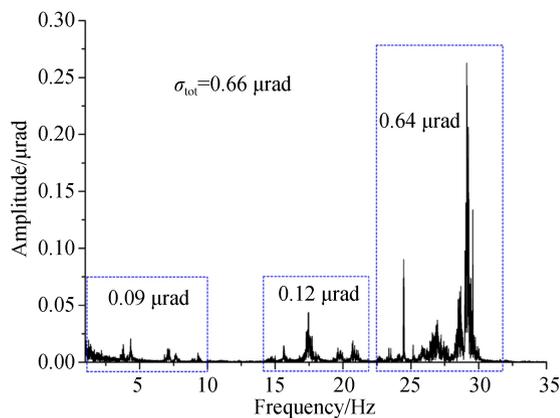


图 6 晶体投角振幅分析

Fig. 6 Amplitude analysis of pitch vibration

3.3 晶体投角方向振动分析

实际工作中,最关心的是晶体在投角方向的角度稳定性,图 6 给出了单色器系统在达到真空稳态下一晶 Pitch 角振动的 RMS 值,通过带通滤波算法分别求得几个特征区间内晶体角位移的 RMS 值。其中 1~10 Hz 频域内的低频振源大概会引起晶体 Pitch 方向 150 nrad 的动态变化,考虑到常规 Si(111) 晶体在 50 keV 能级的达尔文带宽约为 5 μrad, Si(311) 晶体在 103 keV 的达尔文带宽约为 1 μrad,故这部分低频影响可以忽略。15~20 Hz 范围内主要表征了大理石支撑结构对环境扰动的响应,从图 5 及图 6 中可以看出该频段对工作环境中的强振源不敏感,且对晶体角度

稳定性影响也较小,说明支撑结构具有良好的减振效果。在所搭建的单色器系统中,21~32 Hz频段内的振源对晶体稳定性影响最显著,工程上在单色器设计时应首先考虑优化晶体夹持结构,使其本征频率对周围环境的响应最小。

4 结 论

本文介绍了一种应用双频激光干涉仪测量单色器晶体角度稳定性的方法,并搭建了包括单色器模拟装置在内的测试平台,实验采集了不同工作状态下晶体的角位移信息,验证了方案的可行

性。该测试方法可实现25 nrad的分辨率,系统测角不确定度约为63 nrad。该方案能够对高真空环境下的晶体进行非接触测量,测试光路简便;通过对采集的数据进行FFT处理得到频谱信息,能够准确获取对晶体稳定性产生影响的特征频率,从而有效地分析出某些特定振源对晶体稳定性的影响,为结构优化提供参考。本文为离线检测双晶单色器的角度稳定性提供了一种新思路,后续将进一步优化光路及实验环境以减小系统的测量不确定度;通过采用更高速、更高细分的运算板卡^[17],该方案可最终可实现20 MHz的采样率及高达4 nrad的测角分辨力。

参考文献:

- [1] 上海光源线站工程(二期)初步设计报告[R]. 2017: 4.
Preliminary design report of SSRF beamline project (Phase II)[R]. 2017: 4.
- [2] CALIARI R M, BAGNATO O R, DE SOUZA JR L, *et al.*. Studies on flow-induced vibrations for the new high-dynamics DCM for sirius[C]. *Proceedings of the 9th Edition of the Mechanical Engineering Design of Synchrotron Radiation Equipment and Instrumentation Conference, ALBA*, 2016.
- [3] JOSEP N, JUAN C M, JRODI J, *et al.*. Characterization of the dynamic performance of DCMs at Alba[C]. *Proceedings of ESRF DCM Workshop*, 2014.
- [4] PREISSNER C, LAI B, KASTENGREN A, *et al.*. Monochromator vibration considerations[C]. *Proceedings of ESRF DCM Workshop, ESRF*, 2014.
- [5] ALCOCK S. Off-line characterization & optimization of monochromators[C]. *Proceedings of ESRF DCM Workshop, ESRF*, 2014.
- [6] SERGEEV I, DOEHRMANN R, PETRA III D. Vibrations in the DCM and their effect on the beam stability and source broadening[C]. *Proceedings of ESRF DCM Workshop, ESRF*, 2014.
- [7] KRISTIANSEN P, HORBACH J, DÖHRMANN R, *et al.*. Vibration measurements of high-heat-load monochromators for DESY PETRA III extension[J]. *Journal of Synchrotron Radiation*, 2015, 22(4): 879-885.
- [8] CIATTO G, MORENO T, AUBERT N, *et al.*. First test experiments with FMB-Oxford direct drive DCM at the Sirius beamline of Synchrotron SOLEIL[C]. *Proceedings of ESRF DCM Workshop, ESRF*, 2014.
- [9] *Agilent Laser and Optics, User's Manual, Volume II*[M]. 5th ed. Santa Clara: Agilent Technologies, 2007.
- [10] 于海利. 基于双频激光干涉测量的大行程纳米定位技术及其应用研究[D]. 长春: 中国科学院长春光学精密机械与物理研究所, 2011.
YU H L. Research on large stroke nano-positioning technology and application based on dual-frequency laser interferometer[D]. Changchun: Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, 2011. (in Chinese)
- [11] 陈科位, 于宏柱, 张善文, 等. 大型衍射光栅刻划机刀架系统的设计[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2900-2905.
CHEN K W, YU H ZH, ZHANG SH W, *et al.*. Design of diamond carriage system for large diffraction grating ruling engine[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(11): 2900-2905. (in Chinese)
- [12] 陈家华, 邹鹰, 卢启鹏, 等. 梦之线光栅单色器温度起伏对能量漂移的影响[J]. *光学精密工程*, 2018, 26(9): 2312-2318.
CHEN J H, ZOU Y, LU Q P, *et al.*. Effect on energy drift from temperature fluctuation at the dreamline monochromator

- [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9): 2312-2318. (in Chinese)
- [13] 吴坤, 薛松, 卢启鹏, 等. SX-700 单色器光栅正弦机构转角重复精度的模拟分析与测量[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(1): 45-51.
- WU K, XUE S, LU Q P, *et al.*. Simulation analysis and measurement of rotation angle repeatability for grating sine mechanism of SX-700 monochromator[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(1): 45-51. (in Chinese)
- [14] 韩雅菲, 唐恩凌, 贺丽萍, 等. 高速碰撞诱发闪光辐射温度的测量及误差分析[J]. *发光学报*, 2018, 39(5): 653-660.
- HAN Y F, TANG E L, HE L P, *et al.*. Measurement and error analysis of flash radiant temperature induced by high-velocity impact[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2018, 39(5): 653-660. (in Chinese)
- [15] 马宏, 王金波. *仪器精度理论*[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2009.
- MA H, WANG J B. *Instrument Precision Theory*[M]. Beijing: Beihang University Press, 2009. (in Chinese)
- [16] KELLY J, ALCOCK S G. Measurement & minimization of mount induced strain on double crystal monochromator crystals [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2013, 425(5): 052024.
- [17] Agilent N1230A PCI Three-Axis Position Monitor Board, User's Guide[Z]. Agilent Technologies, USA, 2013.

作者简介:



樊奕辰(1988—),女,江苏连云港人,博士研究生,助理研究员,2013年于中国科学院大学获得硕士学位,主要从事同步辐射光学与技术的研究。E-mail: fanychen@sinap.ac.cn



王 劼(1963—),男,安徽合肥人,博士研究生,研究员,博士生导师,1995年于中国科学院上海光学精密机械研究所获得博士学位,主要从事同步辐射应用和光束线技术。E-mail: wangjie@sinap.ac.cn