

文章编号 1004-924X(2018)09-2312-07

梦之线光栅单色器温度起伏对能量漂移的影响

陈家华^{1,3}, 邹 鹰^{1*}, 卢启鹏², 王 勇¹, 薛 松¹

- (1. 中国科学院 上海应用物理研究所, 上海 201800;
2. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 应用光学国家重点实验室, 吉林 长春 130033;
3. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要:为了确保光栅单色器温度起伏引起的能量漂移不影响光束线的表观能量分辨率,建立了单色器高精度的恒温环境。结合上海光源梦之线设计,根据光栅衍射方程推导出单色器温差与能量漂移之间的关系;据此设计了沿光束方向温度起伏较小的单色器恒温环境,测试了温度控制系统不同条件下的长期温度稳定性,并通过长时间多次测量氮气 K 边吸收谱的方法,得到了相应的能量漂移。结果显示:温度控制系统未启动的情况下,棚屋内最大温度变化约为 0.62 K,测得的能量漂移约为 49 meV;温度控制系统使用独立冷水机时,最大温度变化约为 0.20 K,相应的能量漂移约为 17 meV。实验表明,建立的单色器恒温环境满足设计要求,使得单色器温差引起的能量漂移对梦之线表观能量分辨率的影响得到有效控制。

关键词:光栅单色器;温度起伏;能量漂移;气体吸收谱;能量分辨率

中图分类号:TL99;TH122 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20182609.2312

Effect on energy drift from temperature fluctuation at the Dreamline monochromator

CHEN Jia-hua¹, ZOU Ying^{1*}, LU Qi-peng², WANG Yong¹, XUE Song¹

- (1. Shanghai Institute of Applied Physics,
Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China;
 2. State Key Laboratory of Applied Optics,
Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics,
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China;
 3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
- * Corresponding author, E-mail: zouying@sinap.ac.cn

Abstract: In order to ensure that energy drift from temperature fluctuation of the grating monochromator does not affect apparent energy resolution of the beamline, a high-accuracy constant temperature environment (CTE) was built for the monochromator. Combined with the design of Dreamline beamline at Shanghai Synchrotron Radiation Facility, the relationship between the temperature difference at the monochromator and the energy drift was established by the grating equation. Based on that, the CTE of the monochromator was designed with tiny temperature

收稿日期:2018-04-17;修订日期:2018-05-24.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 11475251)

fluctuations along the beam direction, and long-time temperature stability was tested under different conditions of temperature-controlled system (TCS); then, the corresponding energy drift was obtained through measuring K-edge absorption spectra of nitrogen several times over a long time. The results show that the maximum temperature fluctuation was 0.62 K and the corresponding energy drift was about 49 meV when the TCS was off; in contrast, when it was working with a stand-alone chiller, the maximum temperature fluctuation became 0.20 K and the corresponding energy drift reduced to around 17 meV. The results demonstrated that the built CTE of the monochromator meets the design requirement, and the energy drift from the temperature difference of the monochromator has little effect on the apparent energy resolution of the Dreamline beamline.

Key words: grating monochromator; temperature fluctuation; energy drift; gas absorption spectra; energy resolution

1 引言

在同步辐射软 X 射线光束线中,平面光栅单色器(Plane Grating Monochromator, PGM)是同步光单色化的核心设备^[1]。随着现代光栅刻制技术的进步,变线距(Varied-line Spacing, VLS)光栅逐步得到推广,变线距光栅单色器(VLS-PGM)在束线设计中被大量采用。这种单色器利用变线距光栅垂直方向色散的同时还能聚焦的特点,不仅节省了后置聚焦镜,提高了通量,而且简化了束线的结构设计,提升了精密出射狭缝(出缝)处光斑的稳定性,是决定束线本征能量分辨率($\Delta E/E$)_{in}(ΔE 是最小可分辨的能量)的关键因素。当单色器和出缝垂直开口确定后,束线的本征能量分辨率基本保持不变^[2-3]。

实践中,束线环境温度的起伏会产生能量漂移,主要体现在光栅单色器和出缝这两个起决定性作用的色散性部件上。温度的起伏使单色器支架沿束线方向产生相对高度差,引起整个单色器的旋转,使得光路变化引起出射到实验站的单色光能量的改变;也会使出缝在垂直方向出现高度变化,使得截取到的能量发生变化。由于温度起伏较为缓慢,因此只会引起能量的漂移,并不会对瞬时的能量分辨率(即本征能量分辨率)造成影响,但是用户实验时采集一套完整的样品数据的时间往往比较长,数据的统计平均会将能量的漂移最终反映在表观能量分辨率($\Delta E/E$)_{ap}上。若温度起伏得不到有效地控制,那么由能量漂移造成的表观能量分辨率会大于本征能量分辨率,从而降低束线的实际性能,进而严重影响用户收集

的数据质量。因此,在超高能量分辨光束线的设计过程中,必须考虑环境温度的影响,对相应的设备提出严格要求,以确保其性能。尤其是第三代同步辐射光源,很多软 X 射线光束线的能量分辨本领 $E/\Delta E$ 都高于 10 000^[4-5]。另外,地面振动也会引起单色器转动和出缝在垂直方向高度的变化,由于上海光源(SSRF)实验大厅地面振动的垂直方向分量约为 0.2 μm (RMS)^[6],因此可以忽略。

本文结合上海光源梦之线(Dreamline, 20~2 000 eV)的具体设计,主要分析单色器温度起伏引起的能量漂移,得出其环境温度稳定性需求,设计温度控制系统(TCS)实现需要的恒温环境(CTE),通过长时间多次重复测量氮气 K 边吸收谱,得到相应的能量漂移。

2 能量漂移分析

单色器附近的环境温度差异(尤其是沿光束方向)造成其前后部分不同的线性热膨胀量,导致单色器的旋转,若是单色器离线时,可以用高精度转角测量的方法来直接检测^[7-8];当单色器安装上线之后,其旋转造成的实际能量漂移,须通过原位电离室测量气体吸收谱中特征峰能量位置的方法进行测定^[9]。为此,需建立单色器温差与能量漂移之间的理论联系,更好地分析温度起伏对能量漂移的影响。

梦之线光栅单色器的光路示意如图 1 所示,入射光高度 $Y_H=1.3\text{ m}$,支架简化为沿光束方向两根柱子支撑,柱子之间的距离 $X_L=1\text{ m}$,平面光栅 PG 到出缝 S 的距离 r_x 为 18 m,通过平面镜

PM 的离轴转动和平面光栅绕表面中心转动, 使得出射光束固定且与入射光平行。

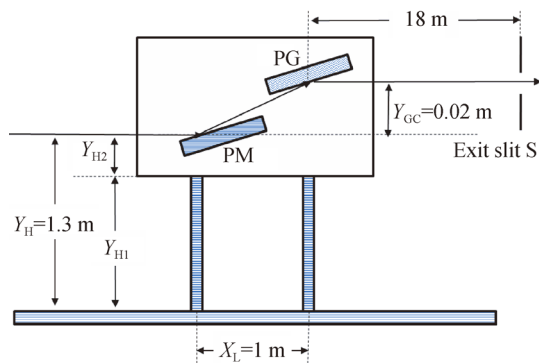


图 1 光栅单色器光路示意图
Fig. 1 Optical layout of PGM

假定前后柱子的温差为 ΔT 时, 单色器绕平面镜的光斑中心旋转 δ , 光路变化如图 2 所示, 那么:

$$\delta = \sum_{i=1}^2 \frac{\mu_i Y_{Hi} \Delta T}{X_L}, \quad (1)$$

其中: μ_i 是线性热膨胀系数 (如表 1)^[10], Y_{H1} 是支架的高度, Y_{H2} 是支架以上到入射光轴的高度 (包括真空腔体及真空内调节部件等)。

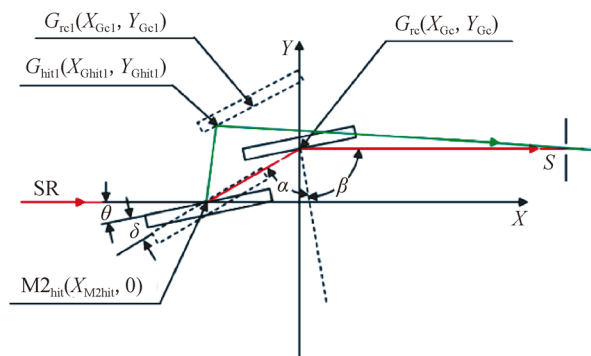


图 2 光路变化示意图 (虚线为旋转后光学元件)
Fig. 2 Optical scheme showing path changed

表 1 材料的线性热膨胀系数

Tab. 1 Linear thermal expansion coefficient of applied materials

| 材料名称 | 不锈钢 | 花岗岩 | 因瓦合金 | 硬铝 |
|-------------------------|------|-----|------|------|
| 线性热膨胀系数 ($10^{-6}/K$) | 16.5 | 3.0 | 1.5 | 23.5 |

根据光栅衍射方程:

$$d_0 (\sin \alpha + \sin \beta) = m\lambda, \quad (2)$$

其中: d_0 是光栅常数 (变线距光栅取光栅中心线间距), α, β 分别是光栅的入射角和衍射角, m 是衍射级次, λ 是波长。定义光学放大倍数 C_{ff} 为:

$$C_{ff} = \frac{\cos \beta}{\cos \alpha}. \quad (3)$$

可知, 在光栅常数、衍射级次和光学放大倍数确定的情况下, 每个波长都对应了唯一的光栅入射角和衍射角, 定义 θ 是平面镜的入射角, 则:

$$\theta = \frac{\alpha - \beta}{2}. \quad (4)$$

X 光打在平面镜上的位置 $M2_{hit}(X_{M2hit}, 0)$ 是:

$$X_{M2hit} = X_{Gc} - \frac{Y_{Gc}}{\tan 2\theta}, \quad (5)$$

其中: $G_{re}(X_{Gc}, Y_{Gc})$ 是光栅表面转动中心的坐标, 光栅转动中心位于 Y 轴上, 即 $X_{Gc} = 0$, 而出入射光的高差保持不变, 即取 $Y_{Gc} = 0.02$ m。

温差导致单色器绕平面镜光斑中心旋转 δ 后, 光栅新的转动中心 $G_{rel}(X_{Gel}, Y_{Gcl})$ 为:

$$X_{Gel} = X_{M2hit} + \sqrt{Y_{Gc}^2 + X_{M2hit}^2} \cdot \cos(2\theta + \delta), \quad (6)$$

$$Y_{Gcl} = \sqrt{Y_{Gc}^2 + X_{M2hit}^2} \cdot \sin(2\theta + \delta). \quad (7)$$

光栅表面在 XY 平面内的投影线的方程为:

$$y - Y_{Gcl} = \frac{(x - X_{Gel})}{\tan(\beta + \delta)}. \quad (8)$$

平面镜反射光的方程为:

$$y = (x - X_{M2hit}) \tan(2\theta + 2\delta). \quad (9)$$

两条直线方程联立, 可以得出光栅上光斑新的位置 $G_{hitl}(X_{Ghitl}, Y_{Ghitl})$ 为:

$$X_{Ghitl} = \frac{-X_{Gel} + \tan(\beta + \delta) \tan(2\theta + 2\delta) X_{M2hit} + Y_{Gcl} \tan(\beta + \delta)}{-1 + \tan(\beta + \delta) \tan(2\theta + 2\delta)}, \quad (10)$$

$$Y_{Ghitl} = \frac{\tan(2\theta + 2\delta) (-X_{Gel} + Y_{Gcl} \tan(\beta + \delta) + X_{M2hit})}{-1 + \tan(\beta + \delta) \tan(2\theta + 2\delta)}. \quad (11)$$

根据光栅光斑新的位置, 可以得出新的等效光栅入射角 α_1 和衍射角 β_1 :

$$\beta_1 = \beta + \delta - \arctan \left(\frac{Y_S - Y_{Ghitl}}{X_S - X_{Ghitl}} \right), \quad (12)$$

$$\alpha_1 = \pi - 2(\theta + \delta) + \beta_1, \quad (13)$$

其中: $S(X_S, Y_S)$ 是出射狭缝的位置, 梦之线确定为 $(18 \text{ m}, 0.02 \text{ m})$ 。

光栅上新的光斑中心与光栅转动中心之间的距离 x' 为:

$$x' = \sqrt{(X_{Gc1} - X_{Ght1})^2 + (Y_{Gc1} - Y_{Ght1})^2}. \quad (14)$$

结合光栅线密度函数:

$$d(x) = d_0(1 + b_2 x + b_3 x^2 + b_4 x^3 + \dots). \quad (15)$$

可以得出新的光斑中心处的光栅刻线间距 d'_0 为:

$$d'_0 = d_0(1 + b_2 x' + b_3 (x')^2). \quad (16)$$

式中 b_4 及之后的系数均取 0。

取衍射级次 $m=1$, 则对应的波长 λ' 为:

$$\lambda' = d'_0(\sin \alpha_1 + \sin \beta_1). \quad (17)$$

能量 E 与波长的关系为:

$$E = hc / \lambda, \quad (18)$$

其中: h 为普朗克常量, c 为光速。

综上所述, 由于单色器温差 ΔT 造成的能量漂移 ΔE_T 为:

$$\Delta E_T = hc \left[\frac{1}{\lambda'} - \frac{1}{\lambda} \right]. \quad (19)$$

等效的光栅转角误差 $\Delta\beta_T$ 和出缝处光斑的垂直漂移量 ΔH_T 分别为^[3]:

$$\Delta\beta_T = \frac{\sin \alpha + \sin \beta}{\sqrt{2} d_0 (\cos \alpha + \cos \beta)} \cdot \frac{\Delta E_T}{E}, \quad (20)$$

$$\Delta H_T \approx r_{ex} \cdot \Delta\beta_T. \quad (21)$$

出缝一般由狭缝主体、平移滑台及支架组成, 设出缝的最大温差为 ΔT_{S2} , 则由线性热膨胀引起高度变化 ΔH_{S2T} (等效垂直漂移) 为:

$$\Delta H_{S2T} = \sum_{i=1}^3 \mu_i \cdot H_i \cdot \Delta T_{S2}, \quad (22)$$

式中: μ_i 为线性热膨胀系数, H_i 为各组成部分高度。

3 恒温环境建立

根据梦之线的光路实际布局, 取 $Y_{H1} = 0.7 \text{ m}$, $Y_{H2} = 0.6 \text{ m}$, 在能量为 400 eV , $d_0 = 1/1200 \text{ L/mm}$, $C_{it} = 2.2$, $m=1$, 光栅和平面镜子午面形误差分别为 $0.1 \mu\text{rad}$ 和 $0.2 \mu\text{rad}$, 光源垂直尺寸为 $69 \mu\text{m}$, 光栅距离光源为 27 m , 出缝垂直开口取 $20 \mu\text{m}$ 等条件下, 束线最小可分辨的能量约为 17 meV 。

能量漂移随单色器温差变化的关系如图 3 所示, 其中支架选用花岗岩, 支架以上均为不锈钢。为了有效控制能量漂移对表观能量分辨率的影响, 要求能量漂移不超过最小可分辨的能量(图 3 中虚线), 对应允许的最大温差约为 0.24 K 。

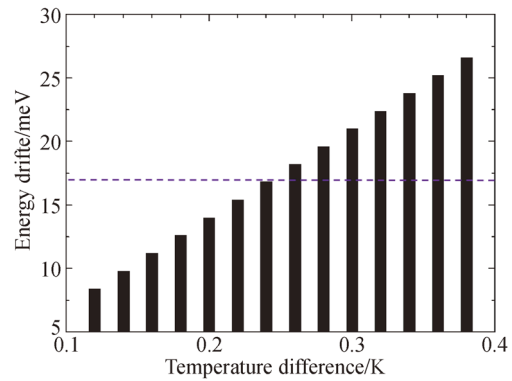


图 3 能量漂移随温差变化的关系

Fig. 3 Energy drifting with the temperature difference changed

3.1 恒温环境设计

上海光源实验大厅的温度稳定性为 $\pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$, 无法满足能量漂移的要求。为了降低温度起伏对能量漂移的影响, 在单色器棚屋内专门设计一套温度控制系统 (TCS), 使得环境温度稳定性达到 $\pm 0.1 \text{ }^\circ\text{C}$, 其采用高精度环境系统一体化控制, 具有智能控制、性能可靠、高能效和高精度的特性。为保证棚屋内环境指标的相对稳定, 防止棚屋内能量、湿气的非正常外泄, 对棚屋内进行必要的密闭处理和保温隔热, 保证棚屋内环境的温湿度精度。

温度控制系统采用风管送风、吊顶微孔板下送风、墙板侧回风的气流组织形式 (如图 4), 通过控制气流流速和将横向气流压低至地面层等措施, 保证了单色器沿光束方向温度起伏较小。

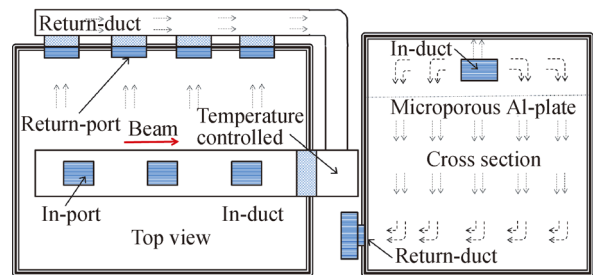


图 4 温度控制系统气流组织图

Fig. 4 Flow distribution in the TCS

棚屋内热负荷主要来自光束线设备的产热, 热量通过温度控制系统的冷却水带走。冷却水起着给恒温控制系统提供冷阱的作用, 要求其水温稳定且流速保持恒定, 从而维持恒定的冷量输出。

上海光源实验大厅自身备有工艺冷却水,温度稳定,但是由于连接设备的日益增多,致使水压波动幅度较大,影响冷量输出的稳定性。因此,设计了独立冷水机方案,其制冷量为 5 kW,温度起伏不超过 ± 0.2 K,流量波动范围小于 ± 0.1 L/min。

3.2 温度稳定性测试

恒温环境的关键指标是其长时间(>24 h)的最大温度变化 ΔT_{\max} ,选择棚屋内中心位置作为测试点并测试其长时间的最大温度变化。

图 5 展示了在温度控制系统未启动状态下,棚屋内的温度随时间的变化,其中大于 2 K 的剧烈起伏是开关棚屋门所致。可见,棚屋门打开前的最大温度变化为 0.62 K,已超出设计要求,并且棚屋门重新关闭后温度无法恢复。

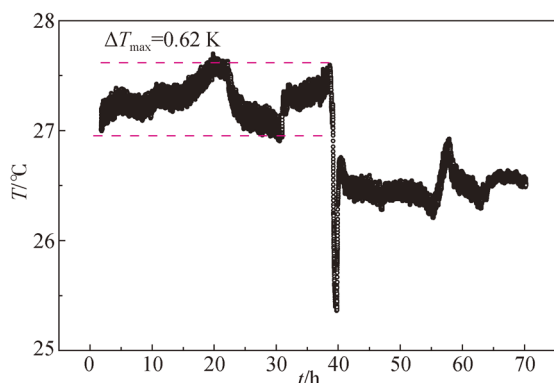


图 5 未启动温度控制系统,棚屋内温度随时间的变化
Fig. 5 Temperature fluctuation with TCS not served

若温度控制系统使用工艺冷却水,棚屋内的最大温度变化达到 0.37 K,如图 6 所示,仍超出设计要求,但是棚屋门开关前后温度范围基本一致。

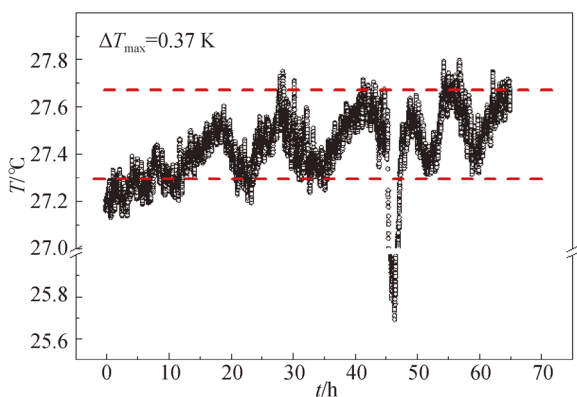


图 6 温度控制系统使用工艺冷却水的温度随时间的变化
Fig. 6 Temperature fluctuation with TCS served by the utility water circuit

当温度控制系统使用独立冷水机时,在长达 3 d 的时间内,最大温度变化始终控制在 0.20 K 左右,如图 7 所示,满足设计要求。取单色器温差 $\Delta T = 0.2$ K,由式(19)可得能量漂移 ΔE_T 约为 14 meV@400 eV,根据式(21),对应出缝处光斑的等效垂直漂移量 ΔH_T 约为 7.1 μm 。

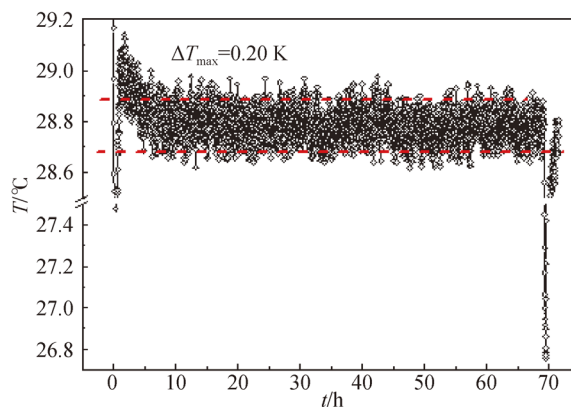


图 7 温度控制系统使用独立冷水机的温度随时间的变化
Fig. 7 Temperature fluctuation with TCS served by a stand-alone chiller

为了减小出缝温度变化带来的能量漂移,给出缝配备独立的有机玻璃棚屋,棚屋内的温度变化如图 8 所示,稳定后的最大温度变化约为 0.4 K。取出缝的最大温差 ΔT_{S2} 为 0.4 K,由式(22)可得出缝等效垂直漂移 ΔH_{S2T} 约为 2.5 μm ,由于和单色器温差引起的等效垂直漂移相互独立,取矢量和得到总的等效垂直漂移约为 7.5 μm ,可得出缝温度变化带来的等效垂直漂移不超过单色器温差的 6%,对于能量漂移的影响很小。

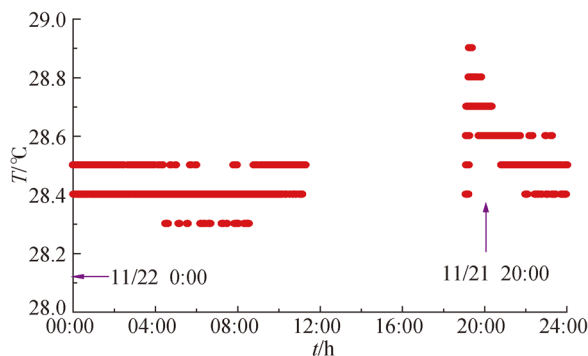


图 8 出缝棚屋内的长时间温度变化
Fig. 8 Temperature variation inside the hutch of the exit slit

4 能量漂移测试

通过基于微通道板的原位气体电离室^[9]测量高纯气体的特征吸收谱线的峰位漂移,可以得到长时间温度变化引起的能量漂移。电离室作为一个独立腔室置于出缝后,可以在线使用,从而方便更换使用气体的品种以测试不同能量下的分辨率。在研究单色器温差引起能量漂移的过程中,选取氮气作为电离室的工作气体,氮气在 K 边的吸收峰伴有辨识度很好的振转能级,其峰位随时间的变化可以很好地用来标识能量漂移,同时光束线的分辨率越高,分辨出来的振转子峰数目越多,峰形更锋锐^[4-5, 11]。

温度控制系统未启动状态下,测量了氮气 K 边吸收谱,如图 9 所示,其展示了一天当中重复测量吸收谱曲线中的 4 条,单独看每条谱线的分辨率都很好,氮气 K 边振转峰可以一直分辨到第 6 个峰。然而,很明显可以看到所选取的 4 条谱线无法重合,将第一个峰放大(图 9 插图),发现谱线之间约有 49 meV@400 eV 的能量漂移,不符合设计要求。

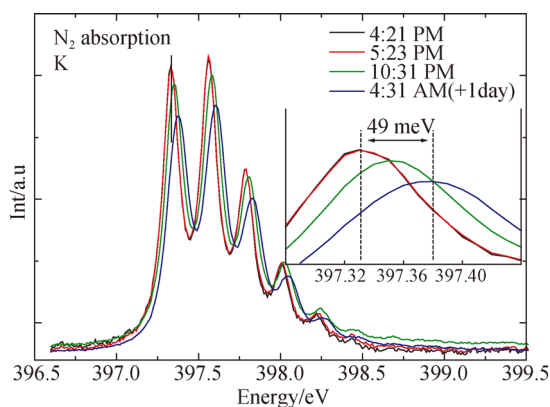


图 9 未启动温度控制系统测得的氮气 K 边吸收谱中特征峰长时间的能量漂移,插图显示第一个峰的局部放大

Fig. 9 Energy drift with the TCS not served, demonstrated by sequential measured K-shell nitrogen absorption spectra. The inset shows the energy shift of first peak

当温度控制系统使用独立冷水机时,测量了氮气 K 边吸收谱,如图 10 所示,其展示了一天当中重复测量吸收谱曲线中的 4 条,可以看到四条谱线之间的偏离明显变小。将第 1 个峰放大(图 10 插图),发现谱线之间约有 17 meV@400 eV 的能量漂移,结果满足设计要求,与理论分析结果相符,误差来源包括单色器恒温环境温度温差超过 0.2 K(如图 7 部分时间段),出缝热胀冷缩和光栅转角误差等。

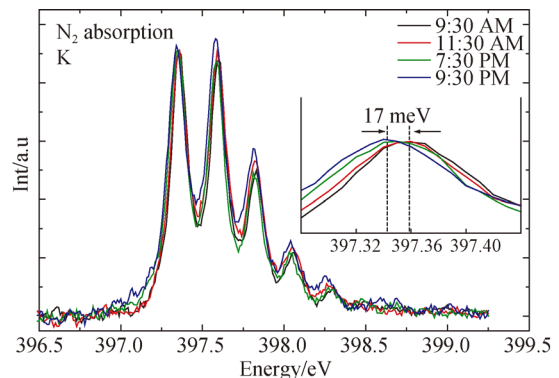


图 10 温度控制系统使用独立冷水机测得的氮气 K 边吸收谱中特征峰长时间的能量漂移,插图显示第一个峰的局部放大

Fig. 10 Energy drift with the TCS served by a stand-alone chiller, demonstrated by sequential measured K-shell nitrogen absorption spectra. The inset shows the energy shift of first peak

5 结 论

本文从光栅衍射方程出发,建立了光栅单色器温差与其引起的能量漂移之间的关系。基于此设计了沿光束方向温度起伏较小的单色器恒温环境,测试了温度控制系统不同条件下的长期温度稳定性,并通过氮气 K 边气体吸收谱测得相应的能量漂移,结果表明:温度控制系统使用独立冷水机时,棚屋内最大温度变化约为 0.20 K,测得的能量漂移约为 17 meV,满足设计要求,与理论分析相符。高精度恒温环境的设计与应用,使得单色器温差引起的能量漂移对梦之线表观能量分辨率的影响得到有效控制。

参考文献:

- [1] PEATMAN W B. Gratings, mirrors and slits[M]. Berlin:Gordon & Breach Sci. Pub.,1997.
- [2] XUE L, REININGER R, WU Y Q, *et al.*. Design of an ultrahigh-energy-resolution and wide-energy-range soft X-ray beamline [J]. *J. Synchrotron Rad.*,2014,21(1):273-279.
- [3] 卢启鹏, 宋源, 龚学鹏, 等. 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[J]. *中国光学*, 2016, 9(2):284-297.
LU Q P, SONG Y, GONG X P, *et al.*. Key technologies and the performance measuring methods in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(2):284-297. (in Chinese)
- [4] HU Y F, ZUIN L, WRIGHT G, *et al.*. Commissioning and performance of the variable line spacing plane grating monochromator beamline at the Canadian Light Source [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 2007, 78: 083109.
- [5] STROCOV VN, SCHMITT T, FLECHSIG U, *et al.*. High-resolution soft X-ray beamline ADDRESS at the Swiss Light Source for resonant inelastic X-ray scattering and angle-resolved photoelectron spectroscopies[J]. *J. Synchrotron Rad.*, 2010, 17: 631-643.
- [6] 宋丽, 李中亮, 薛莲, 等. 上海光源实验大厅地基振动规律及相干性分析[J]. *噪声与振动控制*, 2016, 36(5):108-111.
SONG L, LI ZH L, XUE L, *et al.*. Analysis of Ground Vibration Law and Coherence of the Experimental Hall of Shanghai Synchrotron Radiation Facility [J]. *Noise and Vibration Control*, 2016, 36(5):108-111.
- [7] 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)
- [8] 卢启鹏, 马磊, 彭忠琦. 变包含角平面光栅单色器扫描转角精度的检测 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(7):1548-1553.
LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism invariable included angle plane grating monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1548-1553. (in Chinese)
- [9] 李俊琴, 邹鹰, 陈振华, 等. 基于微通道板的电离室及其在同步辐射中的应用 [J]. *核技术*, 2016, 39(5):1-5.
LI J Q, ZOU Y, CHEN ZH H, *et al.*. Ionization chamber based on multichannel plate and its application on synchrotron radiation [J]. *Nuclear Techniques*, 2016, 39(5):1-5. (in Chinese)
- [10] HAYNES W M, LIDE D R, BRUNO T J. *CRC handbook of chemistry and physics: A ready-reference book of chemical and physical data* [M]. London:Taylor & Francis, 2012.
- [11] DOMKE M, MANDEL T, PUSCHMANN A, *et al.*. Performance of the high resolution SX700/II monochromator [J]. *Rev. Sci. Inst.*, 1992, 63: 80-89.

作者简介:



陈家华(1982—),男,浙江嘉兴人,博士研究生,高级工程师,2005年于中国科学技术大学获得学士学位,主要从事同步辐射光学与技术的研究。E-mail: chenjihua@sinap.ac.cn

导师简介:



薛松(1962—),男,吉林长春人,研究员,博士生导师,1984年于东北大学获学士学位,主要从事同步辐射光束线工程的研究。E-mail: xuesong@sinap.ac.cn

通讯作者:



邹鹰(1969—),男,湖南邵阳人,博士,副研究员,2004年于德国维尔茨堡大学获得博士学位,主要从事同步辐射束线方法学研究及其应用的研究。E-mail: zouying@sinap.ac.cn