

变包含角平面光栅单色器光斑横移分析

吴 坤^{1,2} 薛 松¹ 卢启鹏³ 彭忠琦³ 陈家华¹ 邵仁忠¹

1 (中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

2 (中国科学院研究生院 北京 100049)

3 (中国科学院长春光学精密机械与物理研究所 长春 130000)

摘要 介绍了变包含角平面光栅单色器的光路布局及结构组成,分析了影响单色器光斑横移的因素,对受力变形引起光斑横移的因素,运用有限元软件 Ansys 进行了数值模拟;根据模拟结果(0.33")对单色器的相关部件加工精度进行误差分配;按照分配误差要求完成单色器结构设计、加工、组装,对单色器出射光斑横向角漂移重复精度进行了测试,结果为 0.7"。

关键词 变包含角平面光栅单色器, 光斑漂移, Ansys, 数值模拟

中图分类号 TH744.1, TB24

上海光源(SSRF)软 X 射线谱学显微光束线站采用 EPU(Elliptically Polarized Undulator)作为光源,提供不同极化状态的软 X 射线。软 X 波段光子能量范围大,因此采用变包含角平面光栅单色器(VAPGM)作为该条光束线的分光设备。VAPGM 性能优良^[1-5],广泛应用于同步辐射光束线中^[6-9]。SSRF 软 X 射线谱学显微光束线的设计目标,是在保证实现 250–2000 eV 光子能量范围内的高通量输出前提下,能量分辨率本领($E/\Delta E$)优于 6000@250 eV。该束线专用于 X 射线显微谱学,其主要聚焦元件波带片的角接受度有限,因此,须严格控制光斑尺寸,根据计算要求单色器出射光斑到达出射狭缝的横向角漂移重复精度优于 1"。

因此,单色器设计时应分析单色器出射光斑横移的影响因素。本文从单色器机构误差的角度分析了单色器出射光斑横移的影响因素,用有限元分析软件 Ansys 对因结构受力变形而影响光斑横移的因素进行了数值模拟和分析,对单色器相关部件加工精度提出了要求,为单色器的总体设计提供了理论依据。

1 VAPGM 光学组成

SSRF 的 VAPGM 类似于 Petersen^[10]SX-700 单色器,基本光学元件为前置平面镜和平面光栅,两者的旋转轴平行并保持一定距离。该单色器距离光源 32 m,工作在平行光模式下,无入射狭缝,出射

狭缝固定,光学放大倍数调节范围 1.8–2.5,通过改变包含角选择波长,工作范围 250–2000 eV。

1.1 软 X 射线谱学显微光束线

由图 1,从 EPU(Elliptically Polarized Undulator)出来的同步辐射光经四刀光阑(4-blade aperture, 0.16 mrad×0.08 mrad)到达第一块柱面镜,使同步辐射光水平方向偏转 3.44°,并准直弧矢面上的入射光,在垂直方向以平行光打在前置平面镜上,经反射到达平面光栅,从光栅出射的同步辐射光,以 1.5°的掠入射角打在超环面镜上,超环面镜聚焦同步辐射光在出射狭缝上。从出射狭缝出来的光将直接到达聚焦元件波带片,虽然出射狭缝可调节光斑的发散度,但对于波带片的角接受度有限。因此,须严格控制从单色器出射的光斑尺寸,要求光斑有高的横移重复精度。

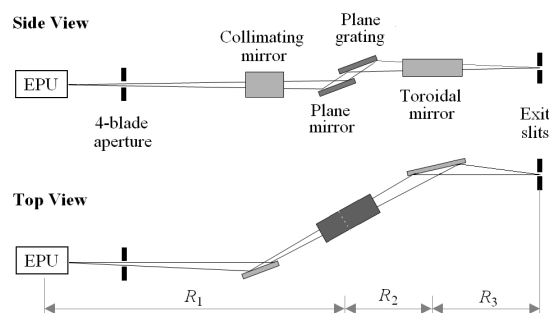


图 1 SSRF 软 X 射线谱学显微光束线光路图
Fig.1 Optics of the SSRF soft X-ray microscopy beamline.

第一作者: 吴 坤, 1982 年出生, 2005 年毕业于合肥工业大学, 现为上海应用物理研究所博士研究生, 核技术及应用专业

通讯作者: 薛 松

收稿日期: 2009-12-31, 修回日期: 2010-02-02

1.2 VAPGM 平面镜离轴转动原理

VAPGM 的波长扫描机构类似于 SX-700 单色器, 在能量扫描过程中, 平面光栅绕其表面中心旋转, 为使光栅轴向尺寸最小及出射光轴固定, 要求平面镜反射的同步辐射光通过光栅的中心 O , 则平面镜除了转动外还需平行移动。为此, 由 SX-700 单色器的平面镜离轴运动来实现其转动和平行移动的复合运动(图 2)。可根据光栅在整个光谱范围内的转角, 择优选取三个平面镜的角度, 依照图 2 几何关系, 并使 $OG=0$ 来确定平面镜的转轴位置 $M(M_x, M_y)$ 和旋转半径 MC 。

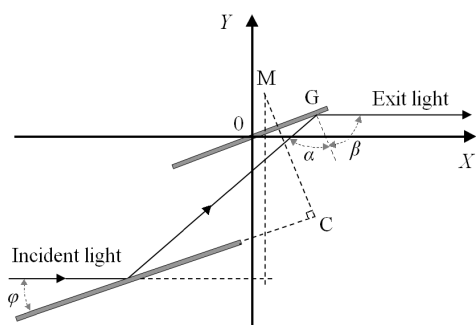


图 2 VAPGM 平面镜离轴转动原理图
Fig.2 Schematic diagram for plane mirror's off-axis rotation of VAPGM.

1.3 VAPGM 出射光斑横移因素分析

由图 3, 准直后的同步辐射光以角度 ϕ 掠入射到前置平面镜上, 两直线驱动机构通过柔性波纹管密封将外部直线运动传递到真空室内, 进而驱动各自扫描机构, 通过平面镜的离轴转动和光栅的绕轴转动来改变包含角, 进而选择能量。光栅方程为:

$$d(\sin\alpha - \sin\beta) = m\lambda \quad (1)$$

式中, d 为光栅刻线间距, λ 为波长, α , β 为光栅入射角和衍射角, m 为衍射级次, 定义 $C_{\text{ff}} = \cos\beta/\cos\alpha$ 为平面光栅光学放大倍数, 调节范围 1.8~2.5。

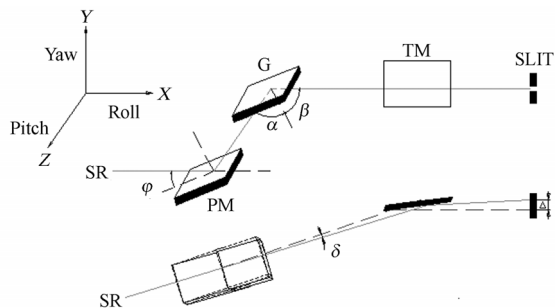


图 3 VAPGM 光斑横移的示意图
Fig.3 Schematic diagram of VAPGM.

以主光轴为例, 在能量扫描过程中, 一切影响单色器 Roll、Yaw 方向的误差都会造成单色器出射

主光轴有 η 角度的偏转, 从而使出射光斑在横向存在 Δ 漂移; 单色器出射光斑横移的原因主要是由于前置平面镜与前置平面镜转轴不平行(δ_1)、光栅镜面与光栅转轴不平行(δ_2)、前置平面镜转轴与光栅转轴不平行(表现为 Yaw 方向误差 δ_3 和 Roll 方向误差 δ_4)、镜箱的 Yaw 方向误差(δ_5)、光栅工作区域切换机构的 Yaw 方向误差(δ_6 、Sin-bar 轴的轴承径向跳动误差(表现为平面镜 Yaw 方向误差 δ_7 和光栅 Yaw 方向误差 δ_8)等。

单色器的机械精度误差产生原因不仅包括加工误差; 还包括单色器结构受力变形产生的误差。因此, 在单色器设计时, 需对结构受力形变引起光斑横向漂移进行分析和研究, 在此基础上再进行合理的加工误差分配, 这是保证设计达到要求的可靠技术路线。单色器结构受力引起的相关变形分析, 目前最有效的是通过有限元技术模拟仿真获得。

2 VAPGM 结构受力变形有限元模拟

2.1 VAPGM 有限元模型建立及求解

单色器主要由前置平面镜 Sin-bar 扫描机构、前置平面镜直线驱动机构、光栅 Sin-bar 扫描机构、光栅直线驱动机构、箱体支撑机构^[1]、箱体调节机构、光栅工作区域切换机构、真空系统和冷却水循环系统等组成, 其中波长扫描机构包括直线位移机构和正弦扫描机构。由于单色器结构复杂, 若整体模拟, 不但增加求解难度还会引入其他误差, 使模拟真实程度降低; 因此, 建模时忽略单色器中对结构刚度影响甚小的轻小零部件(如: 螺钉、挡光板、冷却回路等), 对增加求解收敛难度的 4 根拉簧作了简化处理, 用等效力替代。单色器结构受力变形的模拟分析是建立在单色器理想状态下, 即无任何误差(如: 尺寸误差、形位误差)的结构有限元计算(图 4)。

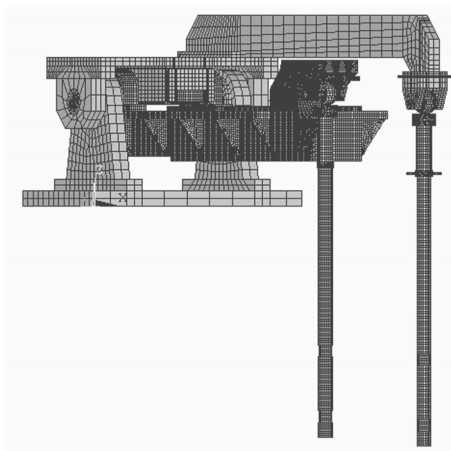


图 4 VAPGM 有限元模型
Fig.4 Finite element model of the VAPGM.

单色器能量扫描时的相关运动基本是处于匀速和低速状态, 因此单色器的结构形变可视为只受重力作用的静力形变。考虑到单色器实际工作时存在的真空负压, 大气通过波纹管施加在单色器扫描推杆上的向上推力为 16 kg。根据单色器的实际运行及测试情况, 施加边界条件和载荷如图 5 所示。全约束偏心机构支撑底板, 全约束驱动杆与驱动滑块连接处, 平面镜扫描顶点机构拉簧螺栓上施加 8 kg 向上真空负压等同力, 光栅扫描顶点机构与其对应的驱动杆上拉簧螺栓分别施加 1 对等效于弹簧拉力的空间矢量力, 平面镜扫描顶点与其驱动平台设置为接触, 光栅扫描顶点与其驱动平台设置为接触, 平面镜与镜框压板间设置为接触, 光栅镜与镜框压板间设置为接触, 平面镜轴承座与偏心轴间设置为接触, 光栅镜轴承座与偏心轴间设置为接触, 施加重力场于所有的实体模型上, 然后把实体载荷转换到

有限元模型上。分别模拟了光栅扫描机构和平面镜扫描机构处于 0°、2°、4°、6°、8° 时的变形情况。相关零部件所用的材料见表 1。

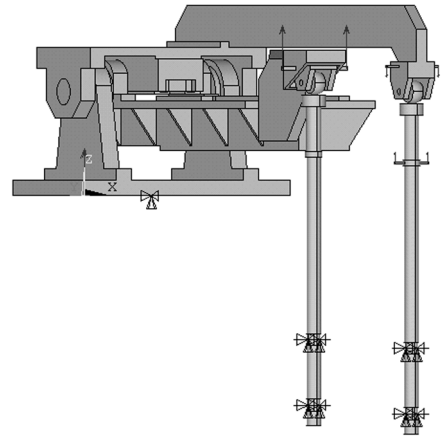


图 5 VAPGM 实体模型边界条件和载荷图
Fig.5 Loads and boundary conditions on the solid-model of the VAPGM.

表 1 VAPGM 中相关零部件所用材料
Table 1 The material used for VAPGM

材料 Materials	弹性模量 EX /GPa	泊松比 NUXY	密度 $\rho / \times 10^{-6} \text{ kg} \cdot \text{mm}^{-3}$
不锈钢 Stainless steel (4Cr13)	206	0.3	7.9
无氧铜 Oxygen-free copper	93	0.38	8.6
单晶硅 Si	162.7	0.3	2.33

2.2 有限元模拟结果及误差分析

理想状态下的结构受力对前置平面镜镜面与前置平面镜转轴不平行(δ_1')和光栅镜面与光栅转轴不平行(δ_2')影响计算结果如表 2 所示。图 6 为扫描位置 0° 时单色器及其光学元件的变形云图。

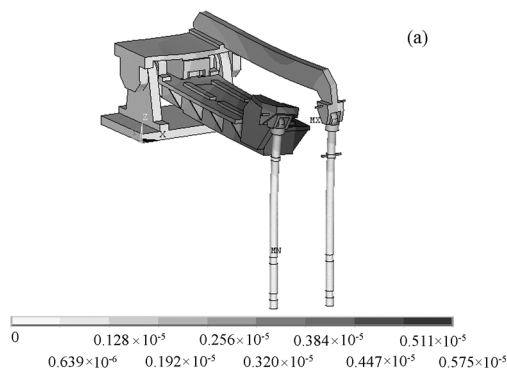


表 2 结构形变对 δ_1 和 δ_2 影响
Table 2 The structure deformation-caused effects on δ_1 and δ_2

	0°	2°	4°	6°	8°
δ_1'	3.7904"	3.7895"	3.7891	3.7887"	3.7885"
δ_2'	1.2967"	1.2963"	1.2960"	1.2956"	1.2952"

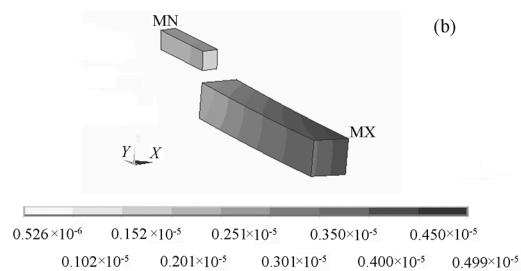


图 6 0° 时 VAPGM 波长扫描机构(a)与光学元件(b)的变形云图
Fig.6 Deformation contour of the VAPGM energy scanning mechanism (a) and optical elements at 0°.

由几何光学和 VAPGM 的光学元件布局, 推出前 2 项机械精度误差对光斑横向漂移量的影响遵循式(2)和(3):

$$\Delta_1 = R_3 \left(1 - \frac{2r_2}{R \sin \theta} \right) \sin \delta_1 \sin 2\varphi \quad (2)$$

$$\Delta_2 = R_3 \left(1 - \frac{2d}{R \sin \theta} \right) \sin \delta_2 \sin 2(90 - \beta) \quad (3)$$

其中, R 为超环面镜的子午曲率半径(494.801 mm); r_2 为平面镜到超环面镜的距离(2.3 m); θ 为超环面镜的掠入射角 1.5° ; d 为光栅到超环面镜的距离(2m); $R_3=8$ m。分别计算 φ 上限和下限两个能量点, 取其差值即为光斑横移重复精度; 其中 $E=2000$ eV, $C_{\text{ff}}=1.8$ 时 $\varphi=2.0671^\circ$ 最小, $\alpha=88.52372^\circ$, $\beta=87.3420^\circ$; $E=275$ eV, $C_{\text{ff}}=1.8$ 时 $\varphi=5.5717^\circ$ 最大, $\alpha=86.0248^\circ$, $\beta=82.8317^\circ$; 根据表 2 取 $\delta_1'=3.8''$ 和 $\delta_2'=1.3''$, 则由式(2)、(3)得 Δ_1' (理想结构变形引起的前置平面镜与前置平面镜转轴不平行, 导致出射光斑水平横移量) 为 $11.53 \mu\text{m}$ 和 Δ_2' (理想结构变形引起的光栅镜面与光栅转轴不平行, 导致出射光斑水平横移量) 为 $5.40 \mu\text{m}$ 。由于两项误差相互独立, 它们对光斑横移的影响应取矢量和, 则理想结构变形引起光斑横移重复误差 Δ_{DSUM} 为:

$$\Delta_{\text{Dsum}} = \sqrt{(\Delta_1')^2 + (\Delta_2')^2} = 12.73 \quad (\mu\text{m}) \quad (4)$$

则理想状态下的 VAPGM 结构受力形变引起出射光斑横向角漂移为:

$$\zeta_{\text{Dsum}} = \arctan\left(\frac{\Delta_{\text{Dsum}}}{R_3}\right) = 0.33'' \quad (5)$$

3 误差分配

VAPGM 设计要求出射光斑的横向角漂移重复精度优于 $1''$ 。有限元模拟结果显示: 无任何加工误差的理想单色器组装后, 结构受力变形引起的出射光斑横向角漂移重复精度误差为 $0.33''$ 。由于结构受力变形和加工误差对光斑横移的影响相互独立, 因此要求加工误差引起的光斑横向角漂移重复精度 ζ_{Msum} 要优于:

$$\zeta_{\text{Msum}} = \sqrt{1^2 - \zeta_{\text{Dsum}}^2} = 0.90''$$

即要求加工误差引起的光斑横向漂移重复精度为:

$$\Delta_{\text{Msum}} = R_3 \cdot \tan \zeta_{\text{Msum}} = 34.91 \mu\text{m}$$

把 $34.91 \mu\text{m}$ 的光斑横移重复误差分配到上面所述的 8 项机械精度误差, 推出式(2)、(3)后, 同理推出后面 6 项机械精度误差对光斑横向漂移量的影响遵循以下公式:

$$\Delta_3 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin 2\beta \tan 2\varphi}{\sin 2\beta \tan 2\varphi - \cos 2\beta} \sin \delta_3 \quad (6)$$

$$\Delta_4 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{\cos 2\varphi \sin 2\beta - 2 \sin 2\varphi \sin^2 \beta}{-\cos 2\varphi \cos 2\beta + \sin 2\varphi \sin 2\beta} \sin \delta_4 \quad (7)$$

$$\Delta_5 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{-[\sin^2 \varphi + \cos \alpha \cos(\alpha + 2\varphi)]}{\cos 2\varphi - 2 \cos \alpha \cos(\alpha + 2\varphi)} \sin 2\delta_5 \quad (8)$$

$$\Delta_6 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{-[\sin^2 \varphi + \cos \alpha \cos(\alpha + 2\varphi)]}{\cos 2\varphi - 2 \cos \alpha \cos(\alpha + 2\varphi)} \sin 2\delta_6 \quad (9)$$

$$\Delta_7 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin 2\beta \tan 2\varphi}{\sin 2\beta \tan 2\varphi - \cos 2\beta} \cdot \frac{\sqrt{2} \delta_7}{L_p} \quad (10)$$

$$\Delta_8 = \frac{R_1 R_3}{R_1 + R_2} \cdot \frac{2 \cos^2 \beta - \sin 2\beta \tan 2\varphi}{\sin 2\beta \tan 2\varphi - \cos 2\beta} \cdot \frac{\sqrt{2} \delta_8}{L_G} \quad (11)$$

式中, $L_p=162$ mm, $L_G=314$ mm 为平面镜旋转轴轴承座之间距离; $R_1=32$ m, $R_2=2$ m。根据国内加工技术水平和式(2)、(3)、(6)–(11), 合理分配光斑横移重复误差到上述 8 项机械精度, 分别计算 φ 上限和下限两个能量点, 联立求解, 可得满足光斑横向角漂移重复精度的加工精度分配误差(δ_1'' 、 δ_2'' 、 δ_3'' 、 δ_4'' 、 δ_5'' 、 δ_6'' 、 δ_7'' 、 δ_8''); 由加工精度误差引起的光斑横移量 Δ_i'' 见表 3。

表 3 VAPGM 的机械精度技术指标要求
Table 3 The required technologic index for the mechanical precision errors of the VAPGM

	δ_1''	δ_2''	δ_3''	δ_4''	δ_5''	δ_6''	δ_7''	δ_8''
分配误差 Dispensatory error	6''	6''	5''	5''	10''	10''	0.5 μm	0.5 μm
光斑横移量 $\Delta_i''/\mu\text{m}$ Radiation transfer	18.18	24.93	2.71	15.75	0.50	0.50	0.50	0.30

由于上述各项分配误差相互独立, 它们对光斑横移的影响应取矢量和, 则满足上述分配的加工误差引起光斑横移重复误差为:

$$\Delta_{\text{Dsum}} = \sqrt{\sum_{i=1}^8 (\Delta_i'')^2} = 34.76 \mu\text{m} < 34.91 \mu\text{m} \quad (12)$$

4 光斑横向角漂移重复精度测试

按照上述误差分配, 对单色器进行结构设计、

加工、检验、组装。在 VAPGM 投入运行前须对其进行离线调试^[12], 若能进一步减小光斑漂移量和提高转角精度, 对整个光束线性提升将有很意义。单色器出射光斑横向漂移重复精度测试方案为: 调节自准仪发出的光到光栅中心, 再衍射到平面镜上, 经平面镜到达反射镜, 经反射镜反射回平面镜, 然后到达光栅, 最后经光栅衍射回自准直仪。测试过程中需调节光栅包含角至 168° – 176° (步长 1°), 使光栅和平面镜在 2° 、 3° 、 4° 、 5° 、 6° 附近小幅度

同时对扫; 根据有限元分析模拟的结构变形趋势反复调节光栅和平面镜姿态, 同时参考自准直仪的显示读数, 单色器光斑横向漂移重复性测试结果分别为: $-0.4''$ 、 $-0.7''$ 、 $-0.6''$ 、 $-0.4''$ 和 $0''$, 单色器的联动横向角漂移重复精度为 $0.7''$, 均小于 $1''$, 完全满足设计指标。

5 结论

(1) 单色器组装后由受力变形引起的光斑横移不可忽视; (2) 加工误差满足误差分配要求, 误差分配正确; (3) 根据有限元模拟结果, 依据光学元件的变形趋势, 可指导单色器调试, 有效降低结构受力变形带来的影响; (4) 模拟计算可靠, 单色器设计合理。

致谢 感谢上海光源吴衍青和王勇副研究员在误差分析方面给予的帮助。

参考文献

- Petersen H. BESSY technical report T1329(R). Berlin Germany, BESSY, 1980
- Petersen H. Opt Commum, 1982, **40**(6): 402–406
- Petersen H. Nucl Instrum Methods, 1986, **246**(1–3): 260–263
- Pimpale A V, Deshpande S K, Bhide V G. Appl Opt, 1991, **30**(13): 1591–1594
- Riemer F, Torge R. Nucl Instrum Methods, 1983, **208**(1–3): 313–314
- Jark W. Rev Sci Instrum, 1992, **63**: 1241
- Follath R, Senf F. Nucl Instr Meth, 1997, **A 390**: 388
- Flechsigt U, Patthey L, Schmidt T. AIP Conf Proc, 2003, **705**: 316
- 薛 松, 邵景鸿, 卢启鹏, 等. 核技术, 2005, **28**(10): 737–741
XUE Song, SHAO Jinghong, LU Qipeng, *et al.* Nucl Tech, 2005, **28**(10): 737–741
- Warwick T, Andresen N, Comins J, *et al.* AIP Conf Proc, 2004, **705**: 458
- 李勇军, 卢启鹏, 彭忠琦, 等. 核技术, 2008, **31**(7): 485–488
LI Yongjun, LU Qipeng, PENG Zhongqi, *et al.* Nucl Tech, 2008, **31**(7): 485–488
- 吴 坤, 薛 松, 卢启鹏, 等. 光学精密工程, 2010, **18**(1): 45–51
WU Kun, XUE Song, LU Qipeng, *et al.* Opt Precision Eng, 2010, **18**(1): 45–51

Analysis of light spot transversal transfer for the variable included angle plane grating monochromator at SSRF

WU Kun^{1,2} XUE Song¹ LU Qipeng³ PENG Zhongqi³ CHEN Jiahua¹ TAI Renzhong¹

¹ (Shanghai Institute of Applied Physics, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China)

² (Graduated School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

³ (Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics, and Physics, CAS, Changchun 130000, China)

Abstract In this paper, optical layout and structure of the variable included angle plane grating monochromator (VAPGM) at Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF) is introduced, and the factors that result in light spot transversal transfer are analyzed. Numerical simulation for the deformation under loads is done by using the Ansys code, and the dispensatory errors for relevant parts of the monochromator are decided based on the simulation results. The monochromator structure has been designed according to the dispensatory errors. After installation, the monochromator was tested, and the transversal angle transfer repeatability was $0.7''$.

Key words Variable included angle plane grating monochromator, Light spot transfer, Ansys, Numerical simulation
CLC TH744.1, TB24