

文章编号 1004-924X(2011)11-2623-07

螺旋型波荡器辐射特性及光束线前置镜热载分布

程显超, 李中亮, 赵飞云, 徐朝银*

(中国科学技术大学 国家同步辐射实验室, 安徽 合肥 230029)

摘要:对合肥国家同步辐射实验室(NSRL)引进、装备的螺旋型电磁波荡器进行了改造和性能研究,该螺旋型电磁波荡器被插入电子储存环的直线段,来产生高通量圆偏振相干光,提供一条真空紫外光束线,用于燃烧科学研究。基于 NSRL 改造后的光源参数,分析其同步辐射偏振特性,计算了该波荡器辐射出的总功率和功率密度分布,以及受其直接辐照的光束线前置环面镜的热载、温度场和由此导致的光学镜面面形误差。研究表明,在燃烧实验要求的光子能量范围内,聚焦镜在光束照射镜面内的热变形都不超过 $2\ \mu\text{m}$,最大面形误差约为 $1\ \mu\text{rad}$,能满足实验要求。

关键词:螺旋型波荡器;前置聚焦镜;功率密度;热分析;面形误差

中图分类号:TL594 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111911.2623

Synchrotron radiation characteristics of helical undulator and thermal distribution of premirror for beamline

CHENG Xian-chao, LI Zhong-liang, ZHAO Fei-yun, XU Chao-yin*

(National Synchrotron Radiation Laboratory, University of
Science and Technology of China, Hefei 230029, China)

* Corresponding author, E-mail: xucy@ustc.edu.cn

Abstract: A helical undulator introduced by National Synchrotron Radiation Laboratory was reformed and its performance was researched. The helical undulator was installed at the linear part of a storage ring to produce coherent synchrotron radiation with high flux and circular polarization and to provide a VUV beamline. Based on improved source parameters, the polarization radiation characteristics of the helical undulator were analyzed and the power density distribution radiated by the helical undulator, thermal distortion and the slope error on the premirror surface were calculated with ANSYS. The results show that the maximal thermal distortion of the premirror is less than $2\ \mu\text{m}$ in a photon energy range desired by a burning experiment and the maximal slope error is about $1\ \mu\text{rad}$. Obtained results satisfy the requirement of SR experiment very well.

Key words: helical undulator; premirror; power density; thermal analysis; slope error

收稿日期:2011-06-03;修订日期:2011-07-08.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10575098)

1 引言

最近,国家同步辐射实验室(National Synchrotron Radiation Laboratory, NSRL)实验室引入了一台周期数为 10、周期长度为 250 mm、磁极间距为 110 mm 的螺旋型电磁波荡器^[1],将螺旋型波荡器(Helical Undulator)插入同步辐射电子储存环上可获得高通量、圆偏振相干光。振荡器通过调节电磁铁供电电流,改变峰值磁场强度和同步光子能量。储存环电子能量运行在 0.8 GeV,波荡器峰值磁场强度为 0.11 T,对应的电子束团最大偏转因子 K 为 2.57。由该波荡器产生的同步辐射提供给一条用于研究的燃烧光束线,光束线采用 C-T 型光学系统,入射光束经前置环面镜在垂直和水平两个方向上准直成平行光线照明平面光栅,由光栅衍射后再经另一环面镜将单色光束聚焦到出射狭缝上。系统在满足实验所要求的能量分辨率的前提下,省略了入射狭缝,前置环面镜直接对波荡器引出的相干光全相位接收,以实现高通量输出。本文基于 NSRL 改造后的光源参数,分析螺旋型电磁波荡器的同步辐射偏振特性,计算波荡器的辐射功率和功率密度分布、光束线前置环面镜的热载、温度场及由此产生的光学表面面形误差,为光束线工程设计提供理论依据。

2 螺旋型波荡器功率辐射特性

目前使用的波荡器大多数是平面型波荡器,周期磁铁的磁极平面都是平行排布,电子在 x 坐标方向(即轨道平面)来回偏摆,产生高的线偏振度同步辐射。而螺旋型波荡器的各周期磁铁的磁极按照某一角度沿波荡器轴线(z 坐标轴)旋转排布,磁场强度的矢量 \mathbf{B} 绕 z 轴螺旋旋变化^[2-3],

$$(B_x, B_y) = B_0 \left[-\sin \frac{2\pi z}{\lambda_u}, \cos \frac{2\pi z}{\lambda_u} \right], 0 \leq z \leq N\lambda_u. \tag{1}$$

螺旋型波荡器同步辐射的光束线光学系统配置如图 1 所示。

电子沿螺旋轨道运行,产生圆偏振同步辐射光。NSRL 光源上的螺旋型波荡器由两对相同极

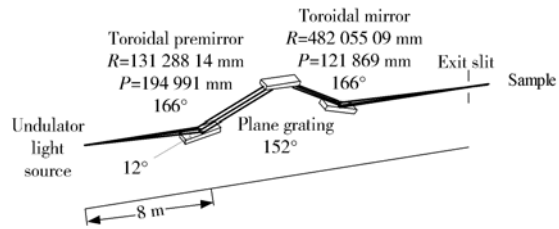


图 1 螺旋型波荡器同步辐射的光束线光学系统配置
Fig. 1 Optical system configuration of VUV beam-line with helical undulator light source

性周期排列的平面型电磁波荡器分别以水平和垂直安放,其结构如图 2 所示。电子穿过中心磁轴时,旋转前进,在轨道的各对应点上产生的相干辐

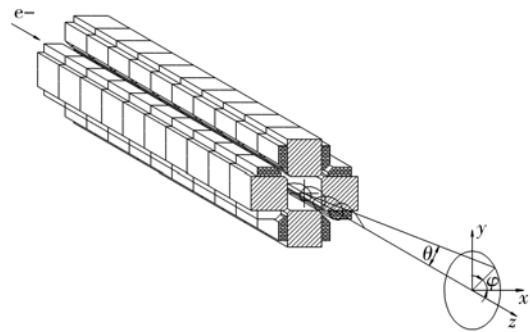


图 2 螺旋型电磁波荡器结构示意图
Fig. 2 Schematic diagram of helical undulator

射为圆偏振同步辐射。与平面型波荡器辐射相比,光轴的正前方只有基波而无高次谐波,但在偏离光轴的其他方向的辐射仍有高次谐波。电磁波荡器通过调节电磁铁供电电流,以改变峰值磁场强度、偏斜因子 K 以及相干辐射光束的能量。螺旋型波荡器辐射功率角分布表达式为

$$\frac{d^2 P}{d^2 \Phi} = \frac{d^2 P}{d^2 \Phi} \Big|_{\Phi=0} f_K(\Phi). \tag{2}$$

公式右边的第一项是光轴上的辐射功率密度,第二项是波荡器在辐射锥内的角分布函数。在光轴上($\Phi = \theta = \varphi = 0$),分布函数 $f_K(\Phi) = 1$,光轴上的辐射功率密度是

$$\frac{d^2 P}{d^2 \theta} \Big|_0 = \frac{Ne^2}{\pi \epsilon_0 c} \gamma^4 \frac{1}{e} \omega_u \frac{K^2}{(1+K^2)^3}. \tag{3}$$

显然辐射在光轴上的功率密度随 K 的增加而衰减,绝大多数辐射功率集中于光轴附近($\Phi = \sqrt{\theta^2 + \varphi^2} \neq 0$)的高次谐波中,峰值功率密度将出现在 $\Phi = K/\gamma$ 方向上,因此螺旋型波荡器辐射功率角分布表达式应改写为

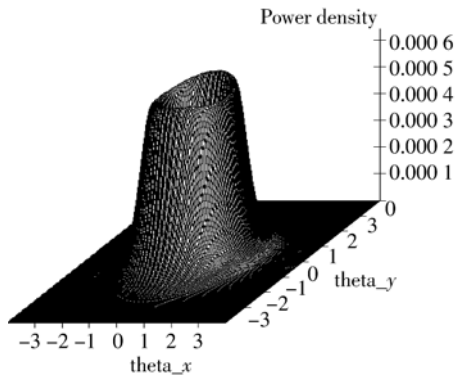
$$\frac{d^2 P}{d^2 \Phi} = \frac{d^2 P}{d^2 \Phi} \Big|_{\Phi=K/\gamma} g_K(\Phi), \quad (4)$$

峰值功率密度为

$$\frac{d^2 P}{d^2 \theta} \Big|_{\Phi=K/\gamma} = \left[\frac{7}{64\pi\epsilon_0} \gamma^4 K \omega_u \frac{1}{e} \right] NG_H(K). \quad (5)$$

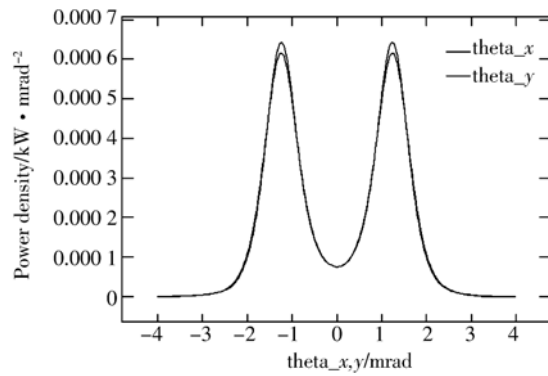
根据燃烧实验研究要求,波荡器需提供能量为 4.5~20 eV 的同步辐射光束,所对应的 K 值在 2.098~0.464 之间变化。由上面的描述清楚地表明功率密度的分布取决于 K 值,即光束的能量或波长,利用 RIKEN SPring-8 的 SPECTRA 分析软件分别计算了高、低两个能量点的功率辐射,比较在不同能量光束的照射下,镜面受热载荷的分布,结果如图 3 和图 4 所示。在低能端 4.5

eV 能量时,K 值较大,峰值功率密度位于偏离光轴的 $\Phi=K/\gamma$ 锥面上,在光束的腰截面上呈环状,双峰对称分布于 x 轴或 y 轴。而高能端 20 eV 能量时,峰值功率密度偏离甚微($\Phi=K/\gamma \rightarrow 0$),集中光轴近旁,出现以光轴为中心的圆形分布,在 x 轴或 y 轴呈现单个峰值。同时还可以看出,4.5 eV 环状功率密度分布的峰值是 0.6 W/mrad²,而 20 eV 功率密度单峰分布则是 0.28 W/mrad²,引起这一较大差异的原因之一就是上面提到的,螺旋型波荡器辐射光轴上只有基波,而无高次谐波,一旦偏离光轴,不但有 4.5 eV 的基波,而且还包含相当份额的高次谐波。



(a) 功率密度角分布

(a) Power density distribution by angle

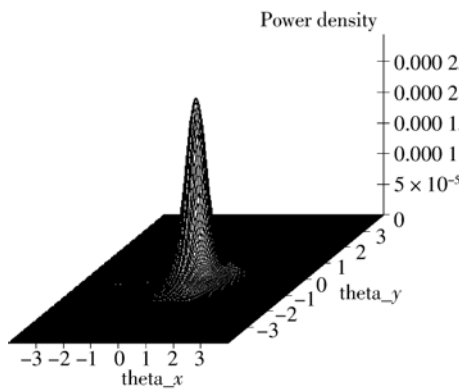


(b) 功率密度水平(x)和垂直(y)方向的分布

(b) Power density curves along x, y directions

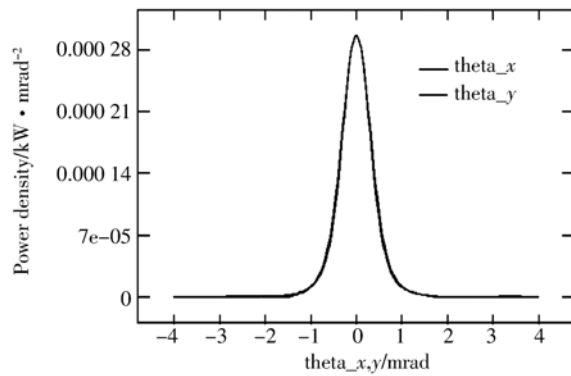
图 3 能量 4.5 eV 同步辐射功率密度分布图

Fig. 3 Power density distribution at 4.5 eV



(a) 功率密度角分布

(a) Power density distribution by angle



(b) 功率密度水平(x)和垂直(y)方向的分布

(b) Power density curves along x, y directions

图 4 能量 20 eV 同步辐射功率密度分布图

Fig. 4 Power density distributions at 20 eV

3 光束线前置聚焦镜热分析

前置聚焦镜置于光束线前部,直接面对光源,几乎要承受波荡器的全部辐射功率,在光学镜面上形成不均匀的热载分布,产生面形误差,影响成像质量。因此本文要介绍的另一个重点内容是直接接受螺旋型波荡器辐射的光束线环面聚焦镜热分析计算,并采取适当的冷却措施,缓释热载功率,把光学表面形变降低到允许接受的范围。由图 1 提供的束线光学参数,聚焦镜距光源点 8 m,光线以 12°掠入射到镜面上,镜子的几何尺寸 200 mm×50 mm×25 mm,表面镀层是 Au,衬底材料是 Si,20℃的水流过镜子两侧的无氧铜板,经镜子和铜板之间的铜片,对受热的光学表面施以有效冷却,其结构简图如图 5 所示。镜面上沉积的

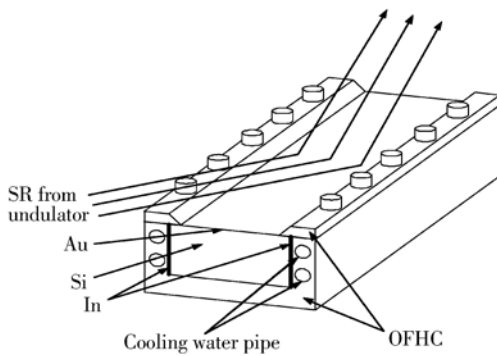


图 5 前置聚焦镜位置结构和热载分布示意图

Fig. 5 Schematic representation of pre-mirror geometry with cooling assembly

辐射功率与光源的特征能量和镜面镀层材料的截止能量有关,利用公式(6)

$$\eta_{\text{abs}} \left(\frac{\epsilon_{\text{cut}}}{\epsilon_{\text{crit}}} \right) = \frac{\int_{\text{cut}}^{\infty} G_1(y) dy}{\int_0^{\infty} G_1(y) dy}, \quad (6)$$

评估沉积在镜子表面的功率额度,结果显示,无论在高端(20 eV)还是在低能端(4.5 eV),被镜子吸收的功率占辐照总功率的百分比不超过 20%。螺旋型波荡器辐射总功率计算式为

$$P(\Phi, \epsilon) = \frac{d^2 P}{d\Phi(d\epsilon/\epsilon)} = 3.936 E_e I N G_1(y). \quad (7)$$

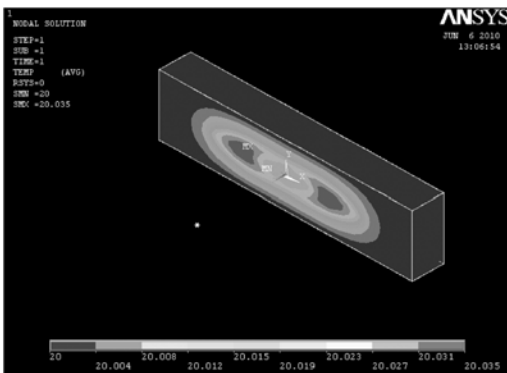
上面两式中的 $\epsilon_{\text{crit}}(\Phi)$ 为电子偏转角 Φ 时的特征能量, ϵ_{cut} 为镜面镀层反射材料的截止能量, E_e 是电子能量, I 为电子束流强度, N 为波荡器磁周期数,

$$G_1(y) = y \int_y^{\infty} K_{5/3}(y) dy, y = \epsilon/\epsilon_{\text{crit}}(\Phi).$$

这样由公式(6)和(7)可计算出沉积在镜子表面的最大辐照功率,公式(4)和(5)计算功率密度在镜面上的分布。利用 ANSYS 软件对图 5 给出几何结构建模,先由辐照功率分布得到温度场,再将温度场作为载荷施加到镜面上。以镜子底面位移约束为边界条件,分别计算出能量 4.5 eV 和 20 eV 的光束照射时,镜面上的温度、形变及面形误差分布如图 6,7 所示。

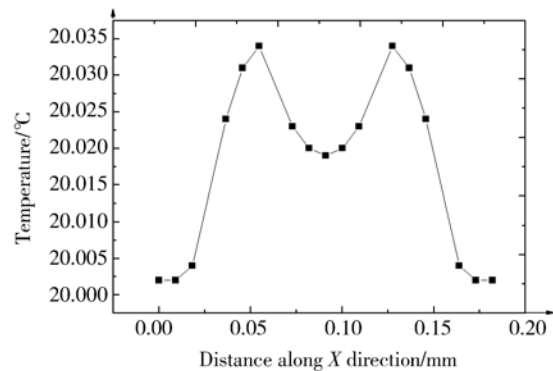
在 ANSYS 分析程序中,由于受到底面固定的约束条件,热膨胀效应使镜子边缘部分的面形误差过大,但在中心照射区域内,镜子因热载变形产生的面形误差都在 $\pm 1 \mu\text{rad}$ 以内。这一结果可以用镜子受热后沿纵轴(子午方向)的弯曲变形来验算^[5]

$$\Delta_{\text{thermal}} = \frac{C}{2\pi k} \frac{\alpha P_{\text{abs}}}{\tau w} \left[\frac{\theta_i}{h_z} x - \frac{1}{3} \left(\frac{\theta_i}{h_z} \right)^3 x^3 \right], \quad (8)$$



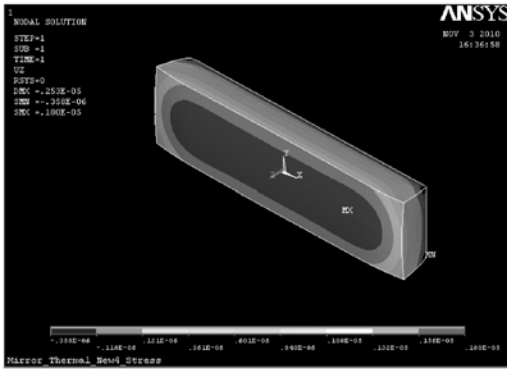
(a) 温度分布云图

(a) Temperature distribution

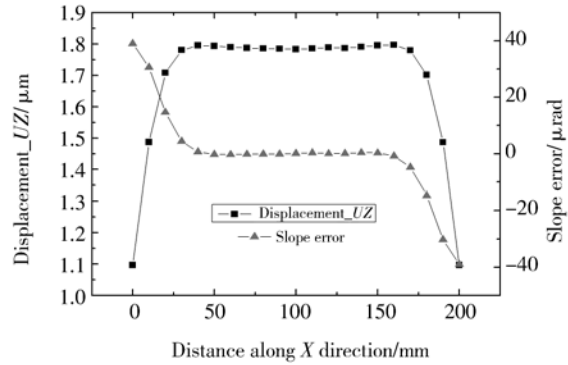


(b) 子午中心线上温度分布曲线

(b) Temperature distribution curve in meridian



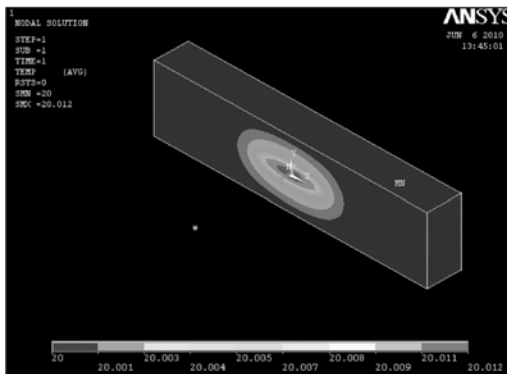
(c) 形变分布云图
(c) Deformation contours



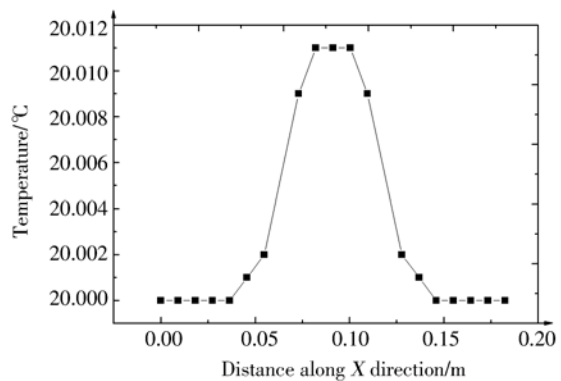
(d) 子午中心线上形变分布曲线
(d) Deformation contour curve in meridian

图 6 能量 4.5 eV 光束照射在镜面上

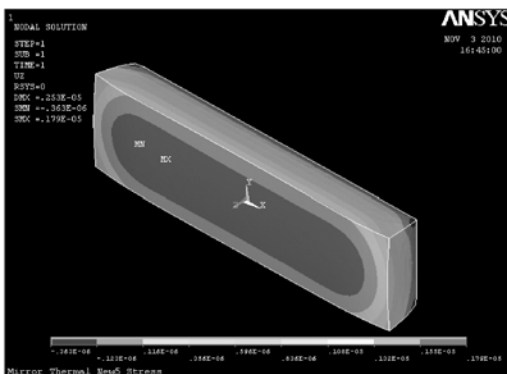
Fig. 6 4.5 eV energy irradiating on mirror



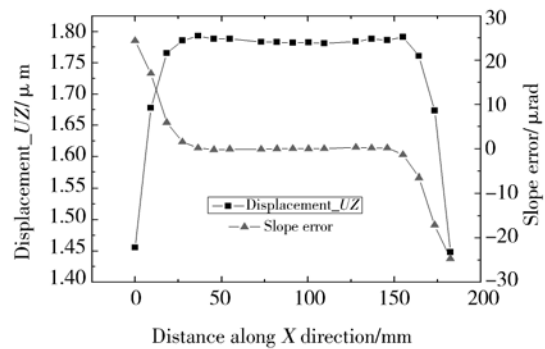
(a) 温度分布云图
(a) Temperature distribution



(b) 子午中心线上温度分布曲线
(b) Temperature contour curve in meridian



(c) 形变分布云图
(c) Deformation contours



(d) 子午中心线上形变分布曲线
(d) Deformation contour curve in meridian

图 7 能量 20 eV 光束照射在镜面上

Fig. 7 Beam with 20 eV energy irradiating the mirror

式中: $h_z = 26 \text{ mm}$ 是入射光束高度, $\theta_i = 12^\circ$ 是掠入射角, $P_{\text{abs}} = 2.765 \text{ W}$ 是镜面吸收功率, 系数 C

在冷却状态下是常数, $C = 0.5$ 为侧面冷却。镜子基底材料是单晶硅, 则热膨胀系数 $\alpha = 2.62 \times 10^{-6}$

K^{-1} 。热传导率 $\kappa=157 \text{ W/mK}$, 镜面照射宽度 $w=26 \text{ mm}$ 。在 $-0.1 \text{ m} \leq x \leq 0.1 \text{ m}$ 的镜面子午长度内, 计算得到的最大面形误差约为 $\pm 1 \mu\text{rad}$, 与 ANSYS 分析结果一致。

4 结 论

在 NSRL 同步辐射电子储存环上插入螺旋型波荡器可产生高亮度圆偏振相干光, 沿辐射光轴的正前方只有基波和无高次谐波。辐射功率的角分布取决于电子束团在磁场中的偏转因子 K 值, 其峰值功率密度出现在 $\Phi = K/\gamma$ 的辐射锥面

上, 在光束的腰截面上呈环状分布。NSRL 光源上的螺旋型电磁波荡器是通过调节电磁铁的供电电流, 来改变辐射光束的光子能量。由于磁周期结构及参数的优化, 该波荡器不仅能产生高亮度圆偏振相干光束, 而且辐射总功率和峰值功率密度低, 因而施加在光学元件上的热负荷较小。燃烧光束线的前置聚焦镜表面镀层材料是重金属元素 Au, 光束又以掠入射照射镜面, 使得镜子上的沉积功率仅 2.765 W , 因此在研究所要求的光子能量范围内, 无论是高能端还是低能端, 在光束照射镜面内, 聚焦镜的热变形都不超过 $2 \mu\text{m}$, 最大面形误差约为 $\pm 1 \mu\text{rad}$, 完全能满足实验要求。

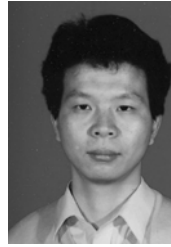
参考文献:

- [1] NABON L, CORLIER M, PEAUPARDIN P, *et al.*. A versatile electromagnetic planar/helical crossed undulator optimized for the SU5 low energy/high resolution beamline at Super-ACO [J]. *Nucl. Instrum. Methods*, 1997, 396:237-250.
- [2] SHIGERU Y, TATSURO S, SHIGEKI S, *et al.*. Construction of insertion devices for elliptically polarized synchrotron radiation [J]. *Rev. Sci. Instrum.* 1989, 60(7):1834-1837.
- [3] KWANG-JE K. Optical and power characteristics of synchrotron [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(2):342-352.
- [4] SUSINI J. Design parameters for hard X-ray mirrors: the european synchrotron radiation facility case [J]. *Optical Engineering*, 1995, 34(2):361-376.
- [5] BOLEY B A, WEINER J H. *Theory of Thermal Stresses* [M]. Malabar: R. E. Krieger. FL, 1985.
- [6] 黄志刚, 董晓浩, 高飞, 等. X 射线衍射和散射光束线环面聚焦镜的面形精度与像差分析 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(1):26-30.
- [7] 柳晖, 高雪官. 同步辐射单色器冷却压弯机构 [J]. *光学精密工程*, 2004, 12(6):611-612.
- [8] 风良杰, 董晓浩, 康乐, 等. 弧矢压弯晶体的力学性能与形位误差分析 [J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3):362-367.
- [9] 李中亮, 康乐, 赵飞云, 等. 大曲率弧矢弯曲复合晶体的研制 [J]. *光学精密工程*, 2010, 18(9):1930-1935.
- [10] 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.
- [11] LIU H, GAO X G. Monochromator cooling bender in synchrotron radiation [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004, 12(6):611-612. (in Chinese)
- [12] FENG L J, DONG X H, KANG L, *et al.*. Mechanical property of sagittal focusing crystal and effect of slope error on incidence angle [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):362-367. (in Chinese)
- [13] LI ZH L, KANG L, ZHAO F Y, *et al.*. Development of the assembly crystal for sagittal bending with a large curvature [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(9):1930-1935. (in Chinese)
- [14] LU Q P, MA L, PENG ZH Q. Rotation-angle-accuracy measurement of scanning mechanism in variable included angle plane grating monochromator [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(7):1548-1553. (in Chinese)

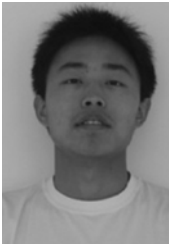
作者简介:



程显超(1987—),男,内蒙古呼伦贝尔人,博士研究生,研究方向为同步辐射光学工程。E-mail: chengxc@mail.ustc.edu.cn



赵飞云(1969—),男,湖南邵阳人,工程师,工学硕士,主要从事真空技术及设备的研究。E-mail: zhaofy@ustc.edu.cn



李中亮(1982—),男,山东聊城人,博士研究生,主要研究方向为同步辐射光束线设备研制。E-mail: zllee@mail.ustc.edu.cn



徐朝银(1946—),男,安徽马鞍山人,教授,博士生导师,1970年于哈尔滨工业大学获得学士学位,主要从事同步辐射光学与工程的研究。E-mail: xucy@ustc.edu.cn

导师简介:

● 下期预告

白天空间目标观测的恒星光电探测系统杂散光分析

王一凡¹,李零印^{1,2},伞晓刚^{1,2}

(1. 中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所,吉林 长春 130033;

2. 中国科学院 研究生院,北京 100039)

光电探测系统的杂散光会引起像质模糊和对比度下降,必须采取措施进行消除杂散光设计。本文从恒星光电探测系统杂散光光源入手,对杂散光的产生和传输特性分析,建立杂散光对恒星光电探测系统影响的评价指标,然后找出合理的杂散光抑制方案,用于指导光机系统设计。通过遮光罩、挡光环以及表面涂层处理,来削弱杂散光对光机系统的影响,利用软件对该光机系统结构进行模拟分析,对比模拟工况下消除杂散光前后 PST 曲线,光机系统探测像面 PST 下降两个数量级,达到 $10^{-8} \sim 10^{-10}$ 水平。场外星等探测得到现场数据表明,该设计方案可以有效地抑制杂散光对光电探测系统的影响,从空间背景中提取出五等星探测图,得到清晰的探测图像,达到消杂散光目的。