

文章编号 1004-924X(2012)07-1415-06

V型耦合式刀片低能束流位置探测器及其性能检测

程显超,赵飞云,田扬超,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:基于合肥国家同步辐射实验室(NSRL)低能量真空紫外光源的特点,研制了耦合式刀片低能束流位置探测器,用于在线监测波荡器辐射出的低能量真空紫外光源的稳定性。探测器采用V型耦合式刀片作为探针,基于错位安装、倾斜嵌入被测光束边缘和直流偏压捕集自由电子等技术有效增强光电效应,提高探针的响应灵敏度和探测器监测精度。介绍了耦合式刀片低能束流位置探测器的结构特点、探测原理和性能测试,在线监测了NSRL波荡器光源的稳定性,获得了一系列有价值的试验数据。结果表明:该探测器能完成NSRL-0.8GeV低能储存环上插入件光源的在线监测,满足对改造后的新光源各插入件辐射光束位置稳定监测的要求。

关键词:耦合式刀片束流位置探测器;波荡器;在线监测;真空紫外光源;稳定性

中图分类号:TL544;TH744.1 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20122007.1415

V-coupling-blade beam position monitor: test and performance

CHENG Xian-chao, ZHAO Fei-yun, TIAN Yang-chao, 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: On the basis of characteristics of the VUV light source at National Synchrotron Radiation Laboratory(NSRL), a V-coupling-blade Beam Position Monitor (V-BPM) is developed to detect the stability of the low energy beam radiated from an undulator. The monitor is composed of two pairs of V-coupling-blades made of molybdenum. To increase the photoemission currents and improve the response sensitivity of the probe, both V-coupling-blades are inserted in the beam edges at an angle of 10° in horizontal and offset each other along the beam direction, and the bias of ~ 300 V is adapted to collect the photon-electronics more effectively. It describes the principles and structure features of the V-BPM and discusses the results of performance tests. A V-BPM is mounted on the undulator beam-line at the NSRL to monitor the stability of the light source and a series of data on the tests are obtained. The results show that the V-BPM can test the radiation beam position from the new undulator in the improved NSRL in real time and obtained data meet the requirements of monitoring photon-beam stability.

Key words: coupling-blade beam position monitor; undulator; monitoring in real time; VUV light source; stability

收稿日期:2011-11-21;修订日期:2012-02-15.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 10575098)

1 引言

同步辐射束流位置探测器 (Beam Position Monitor, BPM) 已广泛用于同步辐射光学中, 主要用于测量与标定同步辐射光轴坐标, 在线监测束流位置稳定性, 为束线上光学元件安装建立准直标靶和为储存环电子束团动态轨道矫正提供反馈信息^[1]。合肥国家同步辐射实验室 (National Synchrotron Radiation Laboratory, NSRL) 在电子储存环的直线节安装了一台周期数为 29、周期长度为 92 mm、磁极间距在 36~96 mm 可调的平面型永久磁铁波荡器, 通过调节磁极间距来改变峰值磁场强度和同步辐射光束能量^[8]。储存环电子能量为 0.8 GeV, 通过波荡器相干辐射可提供基波波长在 21~162 nm 的高准直、小腰截面、高密度的真空紫外光束, 使照射实验样品的光子密度较弯铁辐射提高 3 个数量级。本文基于低能储存环上真空紫外波荡器的辐射特点, 研制了耦合式刀片低能束流位置探测器。探测器选用真空紫外波段光电响应灵敏度高的钼作为探针材料, 上下刀片采取 V 型耦合, 左右两组 V 型耦合错位安装, 各刀片以 10° 倾角嵌入光束边缘, 面对 300 V 直流偏电压收集极。其目的是提高光电效应; 扩大光击面积, 增强激发电流; 吸收自由电子, 净化空间环境; 避免相互干扰, 提高测量精度。该探测器已安装在 NSRL 波荡器光束线中, 经准直标定后, 在光束的腰截面内分别做水平和垂直两方向扫描, 得到相应的监测曲线。在不影响光束线终端实验的情况下, 在线监测光束腰截面中心坐标和束流位置的变化, 获得反映 NSRL 波荡器光源稳定性的试验数据。

同步辐射束流位置探测器需要针对光源特点进行设计, 所以目前并没有成熟的可直接应用的束流位置探测器。束流位置探测器应用光电效应原理, 而 NSRL 光源能量低、光子通量密度小、发射度大, 使光电效率较低, 需要相应的选材和结构设计来弥补, 否则采集到的信号信噪比差, 无法完成光斑位置探测的任务。本文介绍的 V 型耦合式刀片低能束流位置探测器探测的灵敏度和分辨率较高, 完全能满足 NSRL 改造后的新光源各插入件辐射光束位置监测要求, 可以给其他束线和同步辐射实验室的束流位置探测器设计提供参考。

2 结构特点与监测原理

根据 NSRL 光源特性, 选择真空紫外波段光电效应高的钼作为刀片材料, 刀片厚度为 1 mm, 上下刀片呈 V 型耦合, 与光轴方向成 10° 的倾角垂直嵌入光束边缘, 以拓宽监测函数的线性变化范围, 加大刀片的受光面积, 增强探针上的光电流强度。光束掠入射撞击刀片, 在拓宽刀片受光面积的同时, 稀释了沉积在刀片上的功率密度, 以便逸出刀片表面的自由电子被对面放置的 +100~300 V 直流电压收集极及时捕获, 从而净化环境, 提高响应灵敏性和测量精度。两组 V 型刀片按图 1 所示沿光轴方向错位对称地安插在光束的两侧边缘, 防止光束受刀片照射产生少数杂散光相互干扰, 影响数据采集的准确性。在不影响束线下游实验采光孔径的情况下, 两组刀片的横向间距尽量保持在光源相尺度的 (2~3) Σ 附近^[2]。每组刀片固定在带有水冷管道的 U 型无氧铜座顶端, 管道里的冷却水流会及时带走刀片受光面上的热载, 降低探针温度, 保证检测信号的稳定性和重复性。

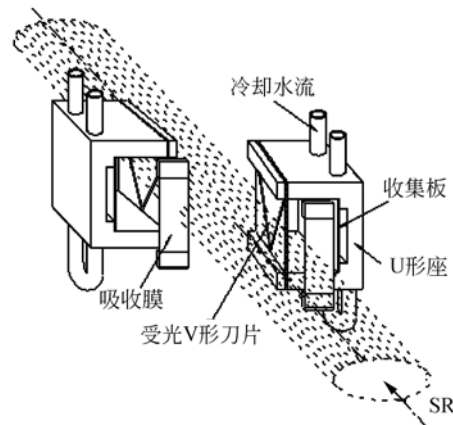


图 1 探测器束流位置监测原理图
Fig. 1 Outline of V-BPM monitoring

两组 V 型耦合刀片构成的探针组件定位于真空室内, 安插在同步辐射光束传输路径上, 通过波纹管与真空室外面的垂直滑台相连。真空室坐落在精密水平滑台上, 真空室两端法兰用波纹管连接到光束传输的管道中, 如图 2 所示。探测器初次装入光束线中, 必须先进行准直调整, 使各刀片上激发的光电流呈对称分布, 再标定被测光束的中心坐标。然后驱动步进马达, 分别沿垂直和

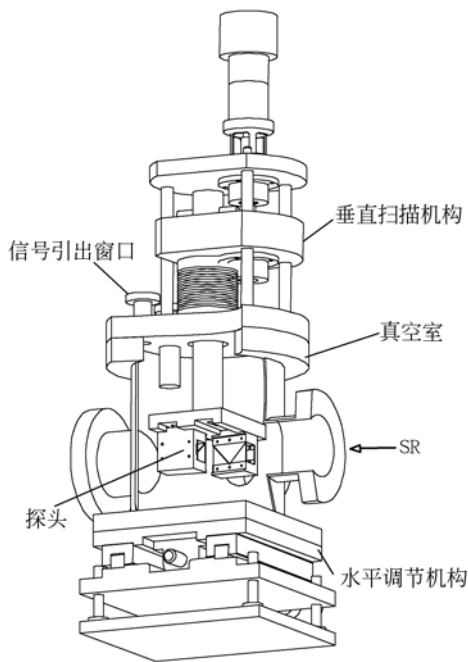


图 2 探测器结构简图
Fig. 2 Schematic diagram of V-BPM

水平两个方向扫描光束腰截面,从各刀片采集的光电流信号,经放大输出和归一化处理分别标示为 I_1 (左上)、 I_2 (左下)、 I_3 (右上) 和 I_4 (右下),得到探针坐标相对于被测光束位置的监测函数^[3]:

$$y = K_v P_v = K_v \frac{(I_1 + I_3) - (I_2 - I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4} \quad (1)$$

$$x = K_h P_h = K_h \frac{(I_1 + I_2) - (I_3 + I_4)}{I_1 + I_2 + I_3 + I_4}$$

式中: x, y 为光斑中心的位置坐标; P_v, P_h 为监测函数; K_v, K_h 为监测函数的响应系数,受探针材料、结构排布和光源参数等诸多因素的影响,其值由探测器安装原位测量确定。例如:垂直扫描光束腰截面时得到两组光电流随 y 轴变化的曲线,经拟合得到一段呈线性变化的区间,表示为

$$I_i = A_i \pm B_i z. \quad (2)$$

式中 $i = 1, 2, 3, 4$ 表示 4 个刀片,分别代入公式(1)得到 P_v 随坐标 y 变化的函数,微分这一函数得到监测函数的响应系数 K_v 。然后水平扫描光束腰截面时得到两组光电流随 x 轴变化的曲线,同理计算出 K_h ,以此确定了被测光束位置的变化与监测函数之间的关系:

$$\begin{cases} \Delta y = K_v \Delta P_v \\ \Delta x = K_h \Delta P_h \end{cases} \quad (3)$$

显然,将探测器安插在同步辐射光束传输路径上,若波荡器辐射光束位置发生变化,改变各刀片上的光电流,据此定量分析被监测光束位置的稳定性。

3 性能试验与在线监测

为评价耦合式刀片低能束流位置探测器的性能,将其安装在 NSRL 波荡器辐射的光束线上,该波荡器是周期数为 29、周期长度为 92 mm、磁极间距在 36~96 mm 可调的平面型波荡器,通过调节磁极间距改变峰值磁场强度,提供基波波长为 21~162 nm 的真空紫外光源。探测器安装在距光源点 13.77 m 处的束腰截面上, Σ 基波能量 (16.6 eV) 的光子通量密度分布如图 3 所示。两组 V 形耦合式刀片水平间距 5 mm,对应该处光束相尺寸的 2.5Σ 。调整组合刀片中心对准光轴后,各刀片上显示的响应光电流为 0.25 mA,分别在垂直方向和水平方向扫描光束腰截面,得到了各探针上的光电流 (I_i) 相对组合刀片中心位置坐标 (y 或 x) 变化的曲线,如图 4 所示,各刀片上光激发电流强度对位置移动的变化约为 27.3 nA/ μm 。

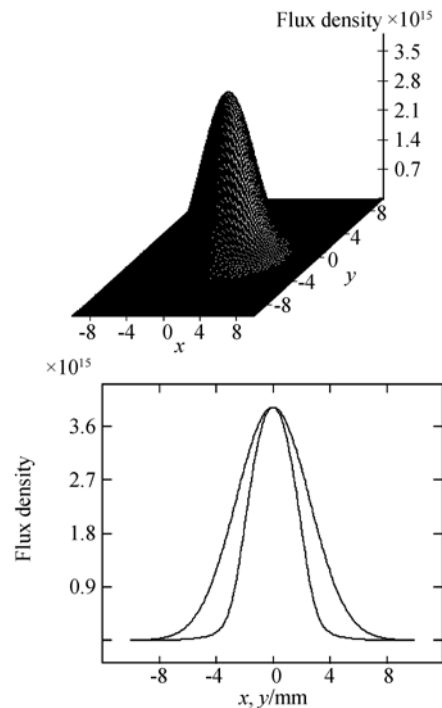


图 3 16.6 eV 同步辐射光子通量密度空间分布及在垂直(y)和水平方向(x)的分布

Fig. 3 Space distribution of flux density for synchrotron radiation and flux density curves along x, y directions at 16.6 eV

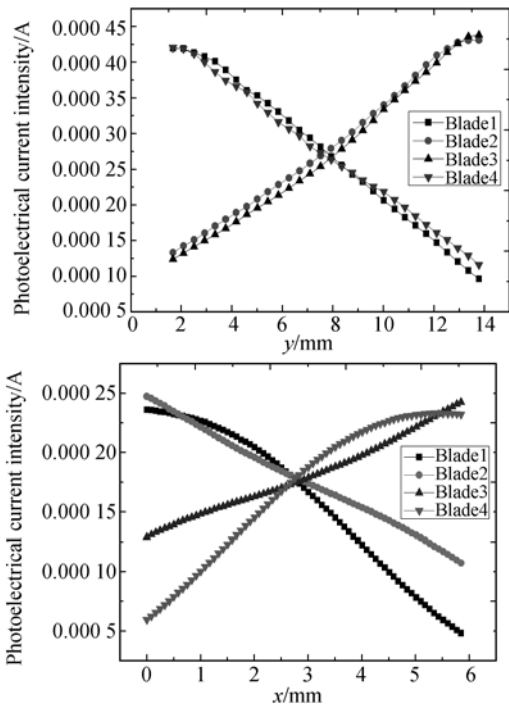


图 4 两组刀片上的光电流在垂直和水平方向上随位置的变化曲线

Fig. 4 Photocurrents of blades change with vertical and horizontal positions

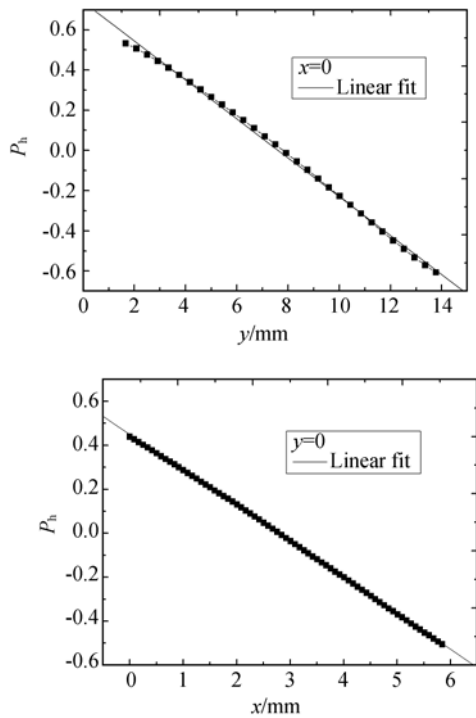


图 5 探测器监测垂直和水平方向的函数曲线

Fig. 5 Monitor function curves along vertical and horizontal directions

利用公式(1)、(2)、(3),计算出探测器在垂直和水平两方向的监测函数曲线,对各条监测曲线做线性拟合得到响应系数: $K_v = 9.853$; $K_h = 6.133$ 。图 5 是探测器测量得到的 NSRL 波荡器辐射光束在垂直和水平两方向的监测函数曲线。

利用该耦合式刀片束流位置探测器对运行在 NSRL 的波荡器光源实施在线监测,间隔 1 s 采集数据,得到 4 刀片上在 1 s 内的积分电流,连续采集 60 个点,由公式(3)求出 $\Delta x(\text{rms}) = 2.83 \mu\text{m}$, $\Delta y(\text{rms}) = 4.02 \mu\text{m}$,即水平方向监测分辨率 $< 3 \mu\text{m}$,垂直方向监测分辨率 $< 4 \mu\text{m}$ 。图 6 给出了一次注入运行中光束垂直位置随束流衰减的变化曲线,表明最初 60 min 内,光束位置跳动较大,约 $150 \mu\text{m}$,随后相对稳定,但随电子束流缓慢漂移,从 198 mA 降低到 116 mA,耗时约 600 min,光束位置的变化约 $200 \mu\text{m}$,这与先前用十字斜扫描双丝探测器在 Wiggler 光源上测量的结果相吻合。

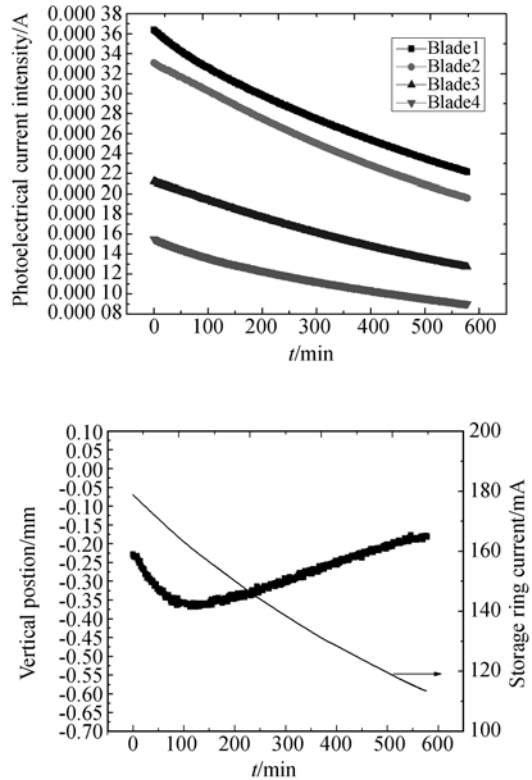


图 6 在线监测结果:各刀片光电流随电子束流衰减的变化及光斑中心位置

Fig. 6 Photocurrents of blades and detected beam position change with storage ring current

图7显示波荡器磁隙从36 mm 拉开到96 mm,能量在7.6~58.3 eV时,光束中心位置漂移量最大约为1 mm。

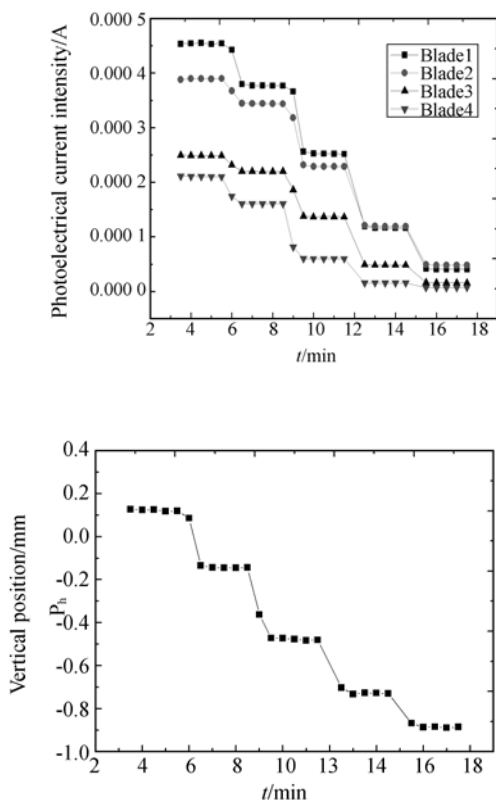


图7 4组刀片上的光电流随波荡器磁隙的变化及对应的光斑中心位置

Fig.7 Photocurrents of blades and detected beam position change with different gap sizes

4 结 论

本文选择金属钨板制成两组V型耦合式刀片作为低能光束束流位置探测器的探针,用于在线监测由波荡器辐射出的低能量真空紫外相干光束的稳定性。该探测器安装在由NSRL波荡器辐射引出的光束线上,调整波荡器磁铁间距至辐射基波波长16.6 eV的低能区域,各刀片上在对称光轴分布时记录的光电流是0.25 mA,扫描光束腰截面得到探测器的线性监测函数,响应系数为:垂直方向在12 mm范围内 $K_v=9.853$;水平方向在6 mm范围内 $K_h=6.133$ 。垂直方向监测分辨率 $<4 \mu\text{m}$,水平方向监测分辨率 $<3 \mu\text{m}$ 。在线监测波荡器辐射光束的垂直位置随电子流强衰减的变化曲线:最初60 min内光束位置的跳动约 $150 \mu\text{m}$,随后相对稳定,但随电子束流衰减缓慢漂移,从198 mA降低到116 mA,耗时约600 min,光束位置变化约 $200 \mu\text{m}$,与用十字斜扫描双丝探测器测量Wiggler光源得到的结果非常吻合。与此同时,将波荡器磁隙从36 mm调到96 mm过程中,对应的能量改变为7.6~58.3 eV,光束位置最大漂移量约为1 mm。显然,这些数据为储存环的电子轨道矫正和辐射束线上光学元件的准直调整提供了量化依据,并足以表明该探测器完全能满足NSRL改造后的新光源各插入件辐射光束位置的监测要求。

参考文献:

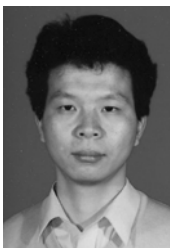
- [1] SMITH S, SHU D, BERGSTROM J, *et al.*. Front end x-ray beam position monitors at the CLS [J]. *Synchrotron Radiation Instrument: Ninth International Conference*, 2007,879: 1002-1005.
- [2] GIL K H, LEE H C, KIM G H, *et al.*. Combination PBPM and slits at the pohang light source[J]. *Synchrotron Radiation Instrument: Ninth International Conference*, 2007,879: 1113-1116.
- [3] MITSUHASHI T, UEDA A, KATSURA T. High-flux photon beam position monitor[J]. *Rev. Sci. Instrum.*, 1992,63(1):534-537.
- [4] BERGONZO P, BRAMBILLA A, TROMSON D, *et al.*. Diamond-based semi-transparent beam-position monitor for synchrotron radiation applications [J]. *J. Synchrotron Rad.*, 1999, 6:1-5.
- [5] 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. HUANG ZH G, DONG X H, GAO F, *et al.*. Slope error and aberration analysis for XRD beam-line toroidal focusing mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2004,12(1): 26-30. (in Chinese)
- [6] 凤良杰,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. 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)
- [7] 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.
- 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)
- [8] 程显超, 李中亮, 赵飞云, 等. 螺旋型波荡器辐射特性及光束线前置镜热载分布[J]. *光学精密工程*, 2011, 11(9): 1930-1935.
- CHENG X CH, LI ZH L, ZHAO F Y, *et al.*. Characteristics of synchrotron radiation of the helical undulator and thermal distribution for the premirror of its beamline[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 11(9): 1930-1935. (in Chinese)
- [9] 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 in variable included angle plane grating monochromater [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18 (7): 1548-1553. (in Chinese)
- [10] 陶世兴, 牛晶, 陈鸣之, 等. 利用晶体多重衍射进行同步辐射光子能量标定[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(5): 977-982.
- TAO SH X, NIU J, CHEN M ZH, *et al.*. Calibration of synchrotron radiation photon energy using crystal multiple diffraction [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(5): 977-982. (in Chinese)
- [11] 陆镭, 康乐, 李中亮, 等. NSRL-Wiggler 光源的稳定性监测[J]. *核技术*, 2009, 32(6): 405-408.
- LU L, KANG L, LI ZH L, *et al.*. Stability monitoring for Wiggler radiation beam at NSRL[J]. *Nuclear Technology*, 2009, 32: (6): 405-408. (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, 主要研究方向为真空技术及设备。E-mail: zhaofy@ustc.edu.cn



田扬超(1963—), 男, 安徽金寨人, 教授, 博士生导师, 1992 年于中国科学技术大学获得博士学位, 主要从事高空间分辨 X 射线成像及微细加工技术的研究。E-mail: ychtian@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