

## 用 632.8nm 可见光评价北京正负电子对撞机同步辐射实验区 X 光聚焦镜像质的实验研究\*

刘吾民 舒德明 先鼎昌

(中国科学院高能物理研究所, 100039)

**提要:** 本文叙述了对 X 光聚焦柱面镜在不同压弯状态下的聚焦像点扩散函数的测量, 并与理论模型进行了比较。获得最佳像点的光斑尺寸, 并给出不同光阑尺寸下的像点光强分布,

**关键词:** X 光聚焦镜, 像点函数

### Experimental study for evaluating image quality of X-ray focusing mirror used in beamline-3 at BEPC using 632.8 nm visible light

*Liu Wumin, Shu Deming, Xian Dingchang*

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing)

**Abstract:** Measurements of point spread function (PSF) of the focusing X-ray cylindrical mirror on different bending status is described and comparison of the calculated model with the tested results is made and the light intensity distribution of image point at different diaphragm dimensions a given.

**Key words:** X-ray focusing mirror, point spread function

在同步辐射仪器中, 通常有必要用可见光来检验和调整 X 光波段使用的聚焦反射镜并评价镜子的成像质量<sup>[1]</sup>, 因为光束线在实际超高真空运行中光学系统的调整是无法进行的。

设计在硬 X 波段的聚焦镜为获得高能光子的反射大都在掠入射下使用, 因此光学系统具有水平方向较长和垂直方向很窄的通光孔径, 用输出 632.8 nm 红光的激光器对这种孔径的光学系统进行调整和估价像质时主要的困难在于衍射限制, 因为在同样的通光孔径下, 可见光比 X 光波长长许多, 由于衍射结果, 像点将被展宽, 问题是怎样用可见光下的成像质量来评价 X 光波长系统的性能。这主要在于不单观察像点中央的极大值而要利用成像质量的全部信息。成像质量的全部信息包含在通过长方形孔径后所获得的全部衍射图样中, 也就是说不只在中央极大峰值中, 而且包含在副极大和更高级次的衍射峰中, 因此用一个窄缝扫描点光源所成的像, 测量点扩散函数, 然后与计算衍射积分相比较, 就可以近似地知道像质的情况。

## 一、北京正负电子对撞机同步辐射实验区 BL-3 硬 X 光束线的概述

BL-3 光束线是从对撞机贮存环 4 区 B9 弯转磁铁引出的同步辐射光<sup>[2]</sup>, 经压弯柱面镜和 T 机构单色器为衍射实验站和小角散射实验站提供方向位置不变的聚焦硬 X 光束线<sup>[8]</sup>。其束线总体光学布局见图 1。

聚焦反射镜  $M$  在距光源 15 m 处, 同步辐射光以不大于  $0.5^\circ$  的掠入射角入射, 在距光源 30 m 处以 1:1 的像源比将光源聚焦在样品上, 水平聚焦由柱面曲率半径保证, 纵向聚焦由弯镜机构压弯柱面镜保证。聚焦镜的主要参数为: 外形尺寸:  $700 \times 100 \times 32 \text{mm}^3$ ; 有效面积:  $700 \times 80$

$\text{mm}^2$ ; 基底材料: 铝; 镀层材料: 镍; 表面粗糙度:  $< 1 \text{nm}$ ; 柱面曲率半径 130.9 mm; 设计压弯半径 1718.89 m; 掠入射角  $< 0.5^\circ$ ; 水平接收角  $0.36 \text{mrad}$ 。

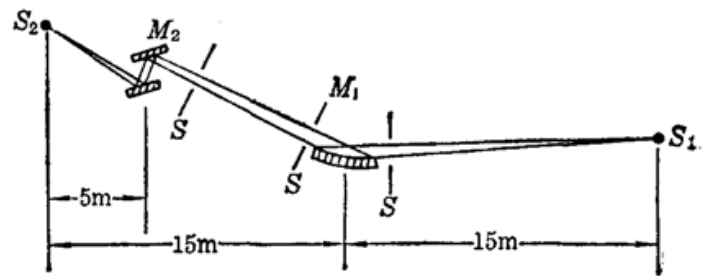


图 1 北京正负电子对撞机同步辐射实验区 BL-3 光束线光学原理图。图中  $S_1$  为同步辐射光源点;  $M_1$  为聚焦 X 光柱面镜,  $M_2$  为晶体单色器;  $S_2$  为实验样品;  $S$  为狭缝

## 二、BL-3 光束线中聚焦镜的实验研究

从聚焦镜的参数可以看出 BL-3 聚焦光束线中使用的 X 光聚焦镜是一块长 700 mm 宽 100 mm 表面镀镍的超高光滑的柱面镜, 实验中首先使用带楔角的单板剪切干涉仪观察了表面<sup>[9]</sup>, 并在非接触式数字光学断面显微镜上测量了其平均表面光洁度(结果见另文)。本文主要叙述在压弯机构上对其聚焦镜成像质量的实验研究。

实验光路如图 2 所示。整个光路全长 30 m, 在光路中加入三块反射镜  $R_1$ 、 $R_2$  和  $R_3$ , 从而使光路缩短为 10 m。

单模氦-氖激光器输出的 632.8 nm 可见红光经扩束后变为球面波用以模拟同步辐射光源。经反射镜  $R_1$  以  $0.5^\circ$  的掠入射角投向置于离光源 15 m 处的 X 光聚焦镜, 从聚焦镜反射后再经反射镜  $R_2$  和  $R_3$  后聚焦到仍离聚焦镜 15 m 处的带狭缝的探测器上, 狭缝宽度为  $50 \mu\text{m}$ , 缝长 15 mm, 探测器为对红光灵敏的高灵敏光电倍增管。狭缝由计算机控制下的步进马达驱动, 以每步  $1 \mu\text{m}$  的精度沿光斑垂直方向做一维扫描并取样。

长 700 mm 宽 100 mm 的铝合金表面镀镍的 X 光聚焦镜置于特制的压弯装置中, 通过弯镜装置将柱面镜在纵向压成不同的弯曲状态以获得设计所需的纵向曲率, 从而克服掠入射下的像散, 在纵向获得最佳聚焦。

实验首先对光阑在水平方向上完全张开的情况下测量了镜子的像点, 此时水平方向通光孔径的宽度为聚焦镜的有效宽度 80 mm, 用带狭缝的探测器扫描后获得的不同压弯状态下的聚焦像点照片示于图 3。图 3(a) 是当柱面镜放于压弯装置中完全放松而无压弯的情况下, 在纵向未聚焦下获得的照片, 此时由于入射光在很小的掠入射角下入射, 所以反射像点的光斑在纵向有严重的像散, 从照片中可以看到为两个对顶的扇形。图 3(b) 是当压弯装置使柱面镜获

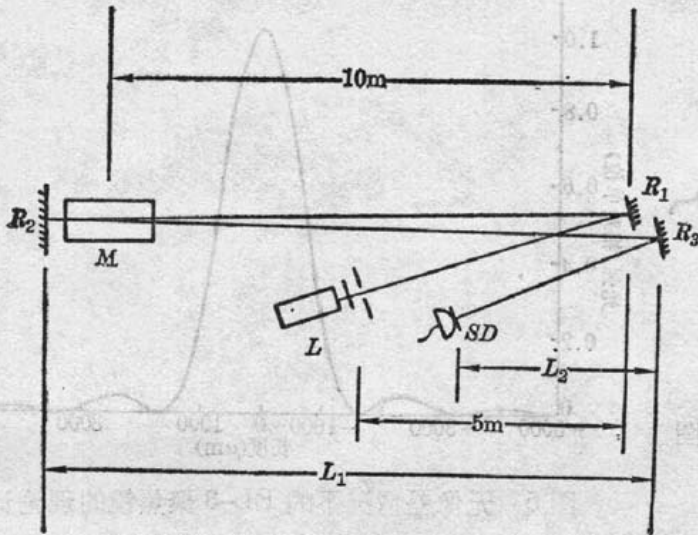


图 2 BL-3 聚焦柱面镜测试原理图

$R_1, R_2, R_3$  分别为平面反射镜;  $L$  为氦-氖收光器;  
 $M$  为被测柱面镜;  $SD$  带扫描狭缝的探测器; 图中  
 $L_1 + L_2$  全长 15m。

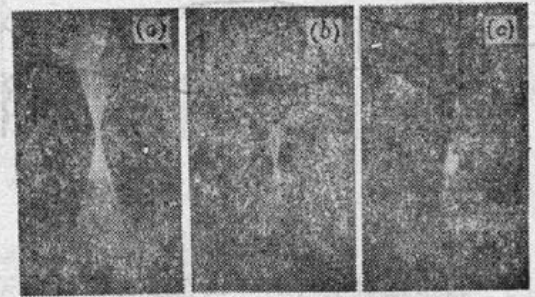


图 3

得最佳压弯, 纵向获得最佳聚焦时的光斑像, 此时光斑中心强度最高, 边缘有弱的衍射斑点, 图 3(c) 是当压弯装置将柱面镜压得过弯从而在纵向又重新散焦时的像点照片。

### 三、实验结果与理论模型比较

本实验光路的物理图像可用图 4 来描述<sup>[4]</sup>。由于掠入射下的同步辐射光学系统具有垂直方向很窄水平方向较宽的长方形孔径, 而实验中所用的探测器是个带窄缝沿垂直方向扫描测量相对光强的系统, 因此系统可以简化用一维的非涅耳-基尔霍夫积分来描述。通过光学系统后在观察面上所成像点的振幅分布为

$$u(\xi_j) = \int_{-\frac{W}{2}}^{\frac{W}{2}} u(\eta_i) \cdot e^{ik[\omega_0^2 + (\xi_j - \eta_i)^2]^{1/2}} d\eta_i \quad (1)$$

这里  $u(\eta_i)$  函数称为孔径函数, 描述通光孔径中波前的振幅和位相, 即

$$u(\eta_i) = A \cdot e^{i[\phi_F(\eta_i) + \phi_{ab}(\eta_i)]} \quad (2)$$

式中  $A$  为表示振幅的常数, 由于只关心相对光强, 故可忽略不计;  $\phi_F(\eta_i)$  表示聚焦项, 通常有

$$\phi_F(\eta_i) = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{\eta_i^2}{2F} \quad (3)$$

式中  $F$  为聚焦镜到像点的距离,  $\lambda$  为所用光的波长;  $\phi_{ab}(\eta_i)$  为有相差情况下的位相变化, 称为像差函数, 在多数情况下像差函数表示为单周期的正弦函数, 它的一个周期刚好为孔径宽度, 其形式为

$$\phi_{ab}(\eta_i) = a \cdot \sin\left(\frac{2\pi\eta_i}{W} + \phi_0\right) \quad (4)$$

式中  $a$  为单周正弦的振幅,  $\phi_0$  为初相位,  $W$  为通光孔径宽度。

这样, 将式(3)和(4)代入(1)即可得到振幅分布, 而振幅分布的平方即为光强的分布。

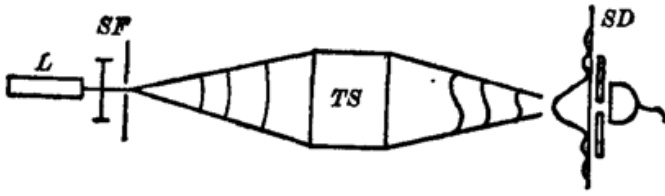


图4 同步辐射掠入射光学系统成像过程示意图  
L—氦-氟激光器；SF—扩束镜和空间滤  
波器；TS—被测光学系统；SD—带扫  
描狭缝的探测器

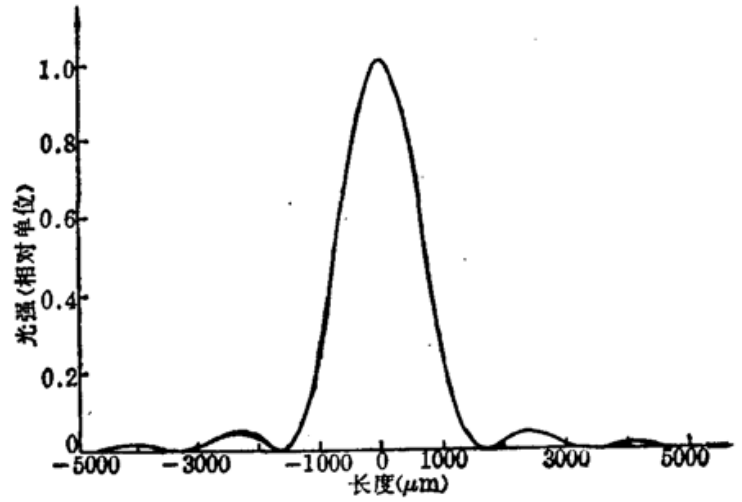


图5 无像差情况下的BL-3聚焦镜的理论计算  
的像点光强分布曲线

本实验所用的积分是在HP 9836型计算机上运行的BASiO程序，将数值积分所需的参数代入后即可计算出理想情况即无像差情况下所获得的理想像点的光强分布曲线，见图5。此时设像差函数中的振幅 $\alpha=0$ 。从图5的计算曲线可以看出在北京正负电子对撞机的BL-3光束线中输出的聚焦光斑尺寸应为2mm，这与束线追迹结果相一致。图6为理想计算曲线与最佳聚焦下测量曲线的比较。从实验曲线可以看出底部光强的增加和副瓣衍射的增加是由于实际光学系统中某些像差造成的。当将菲涅耳-基尔霍夫的衍射积分中的像差函数 $\phi_{ab}(\eta_i)$ 的振幅 $\alpha$ 取为 $\alpha=0.06\lambda$ 时，初相位 $\phi=0$ 时，再进行计算后与实验曲线相比较可以发现此时两曲线很接近，见图7，由此可见实际光学系统总有一小的像差。

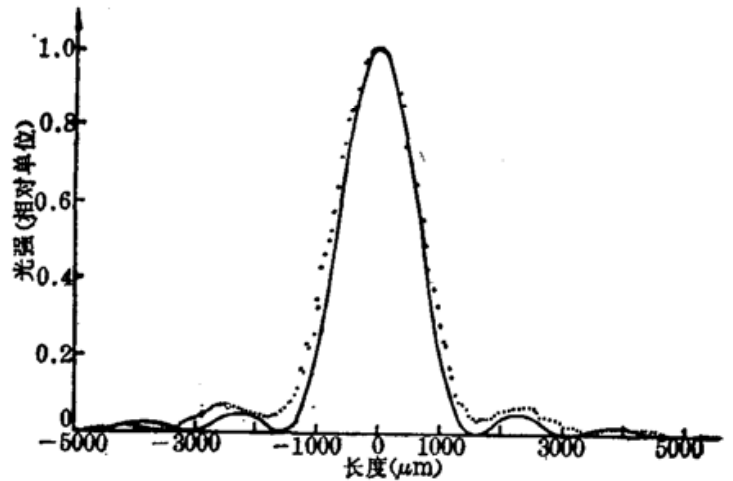


图6 聚焦镜的实验曲线与理论计算的理想像点的  
光强分布曲线的比较。图中点线为实验曲线，实线  
为计算曲线

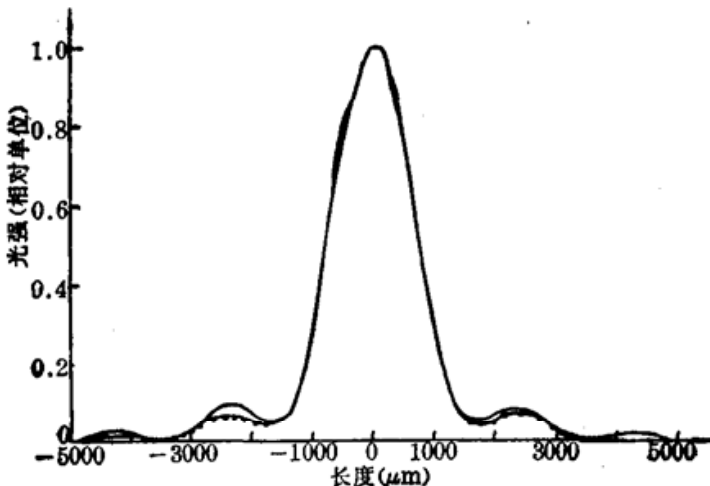


图7 实验曲线与考虑像差情况下的计算曲线的比较  
点线为实验曲线；实线为计算曲线

本实验还对不同通光孔径下镜面聚焦性能做了研究。当改变光阑的横向宽度时，在观察面上用带有狭缝的探测器对聚焦像点进行扫描时获得图8。比较这些图形可以看出，当镜子的水平接收角改变时像点质量没有根本的改变，而只是聚焦光强下降，这与设计也相附合。

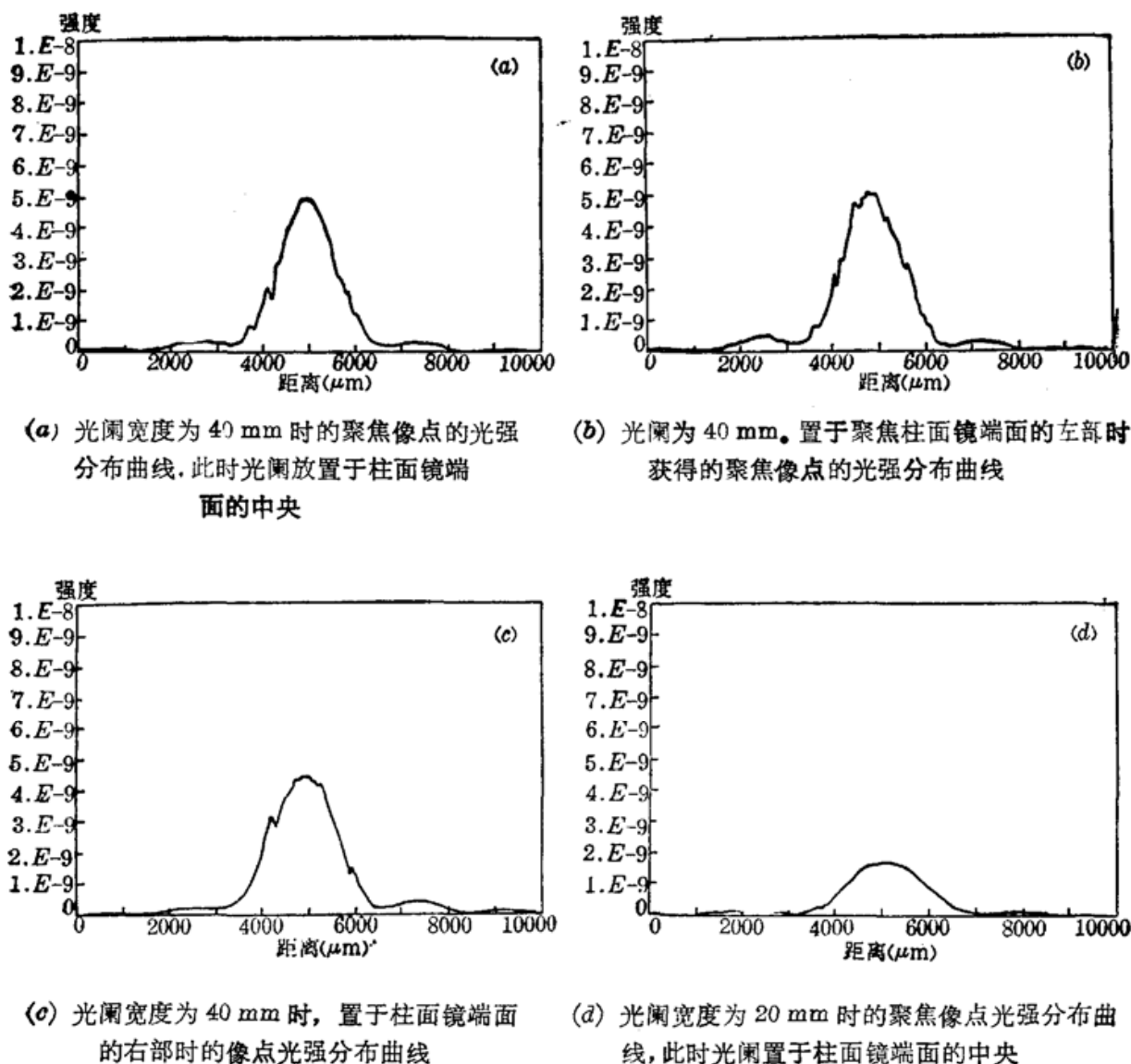


图 8

### 四、结 论

文中给出的实验结果表明, 利用分析点扩散函数的办法来分析同步辐射束线中的掠入射光学系统的聚焦镜成像质量是个很有用的方法。同步辐射的掠入射下光学系统是个狭长的矩形通光孔径这一事实大大简化了费涅耳积分的计算, 通过费涅耳衍射积分的计算可以估算实际光学系统中的各种像差。在可见光条件下实验装置很容易布置。但由于衍射副瓣的光强和底部光强对分析像质很重要, 因此测量中要注意抗干扰和提高探测器的信噪比。

本文作者之一刘吾民感谢美国布鲁克海文国立研究所 P. Z. Takacs (彼得·特克斯) 博士为本实验提供的方便和给予的有益讨论。

### 参 考 文 献

- 1 P. Z. Takacs, *Nucl. Instr. and Meth.*, A246 (1986)
- 2 D. Shu et al., *Nucl. Instr. and Meth.*, A246 (1986)
- 3 D. Xian, *Nucl. Instr. and Meth.*, A266 (1988)