

北京正负电子对撞机同步辐射X射线光刻光束线的光学特性

邵 景 鸿

王 传 基

(长春光机所)

(华南师范大学)

摘要 分析了光刻光束线中影响光刻面光强均匀性及有效工作波段的主要因素,并提出了改善光刻面照明质量的方法。最后给出了相应的实验结果。

一、前 言

北京正负电子对撞机(Beijing Electron Positron Collider,以下简称BEPC)按同步辐射专用模式或(高能物理进行对撞实验时的兼用模式)工作时,沿贮存环切线方向射出的同步辐射光,经光束线进入各个实验站,进行各种科学实验和工程应用。其中,光刻束线是一条为发展我国亚微米光刻技术具有十分重要意义的软X射线波段的光束线。由于同步辐射产生的X射线光子流量较常规的电子轰击靶X射线光源高一到两个数量级,而且具有良好的准直性和稳定性,以及极小的光源尺寸等优点,所以,用同步辐射X射线进行光刻,可以很容易刻出亚微米线宽的线条。

由于同步辐射光在垂直于轨道平面内的光强是按高斯分布的,因此,如果直接将同步辐射光引到光刻实验站,势必造成光刻面曝光区域内光强极度不均匀,从而影响光刻质量。因此,设计光束线的任务,除了要将同步辐射光束正确地引至光刻实验站以外,最重要的设计原则是给出符合光刻曝光要求的均匀照明,最大限度地提高曝光区域内的光强均匀性。

其次,为了使光刻胶取得最大的曝光效率,光束线应能从同步辐射光中正确地截取光刻胶最敏感的工作波段。以上两个问题,本文将着重进行讨论,并给出相应的测试结果。

二、光刻曝光面上的光强均匀性

为了提高曝光区的光强均匀性,一个办法是尽量减小垂直方向接收角,但这受限于对总光能的要求。另一个办法就是目前国外同步辐射光刻光束线上普遍采用的借助反射镜的摆动,实现光斑上下扫描的方法,这对提高光强均匀性是非常有效的。

目前,国外采用过的扫描反射镜的形式有多种,如平面反射镜(德国柏林的BESSY)^[1]柱面反射镜(美国纽约Opton的NSLS)^[2]多个平面反射镜(美国威斯康星的ALADD-IN)^[3]等,其实这些方案在实际使用中各有利弊。平面反射镜工艺最简单,成本最低,但光强损失较大,约(20~30)%,对提高光刻效率是不利的,而多个平面反射镜的方案,可增加选择通过波段的能力,但光强损失更为严重,采用柱面反射镜,则由于在水平面内具有聚焦作用,在光刻面具有同样大小的光斑尺寸的条件下,能接收到更大的光束角,从而弥补了

由镜面吸收、散射所造成的光强损失。因此，这是目前最受欢迎的方案之一。

问题是采用柱面反射镜以后，如果反射镜只作简单的摆动，在光刻面上并不能获得满意的均匀照明。

下面，我们将具体阐述柱面反射镜在掠入射时的光学特性，并根据这一光学特性，如何进一步提高光刻面的照明均匀性。

我们知道在掠入射条件下，柱面反射镜的焦距 f 与半径 r 和掠射角 α 有以下关系，即 $f = r / (2 \cdot \sin \alpha)$ 。显然，反射镜半径 r 决定于焦距 f ，而焦距 f 又决定于物理设计时对反射光束状态的要求。常规的 X 射线光刻为了避免“半阴影”和“几何畸变”^[4]对光刻质量的影响，都要求光源有尽量小的发射角。同步辐射光尽管有较好的准直性（它的水平发射角一般为几个毫弧度到十几个毫弧度，而垂直发射角仅为零点几个毫弧度。），但毕竟不是绝对的准直光束。为了取得最优化的准直光束，扫描反射镜应工作在准直状态下，此时柱面反射镜的焦距 f 应等于同步辐射光源点到反射镜的距离 S 。这样，光刻面在水平方向可以得到准直照明。（准直反射镜光学系统示于图 1），从而可以完全消除水平发散角所造成的“半阴影”

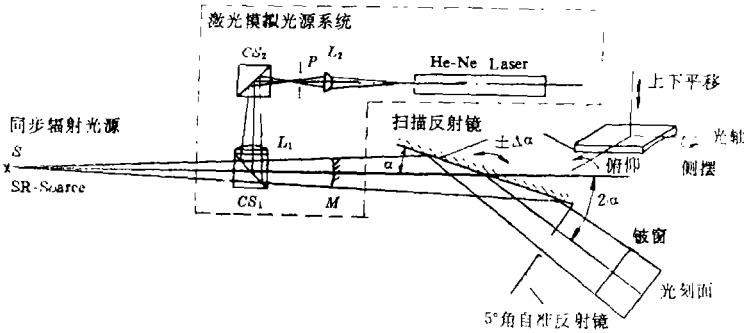


图 1 准直反射光学与激光模拟光源系统原理图

和“几何畸变”对光刻质量的影响。我们在光刻束线物理设计时，为了弥补由于反射镜远离光源点所造成的能量损失而取反射镜在聚焦状态下工作。这种设计的前提是“半阴影”对光刻质量的影响必须小到可忽略不计的量级，否则，这种有意设置的聚焦状态是得不偿失的。

聚焦状态下反射镜的焦距应根据曝光面所要求的光斑宽度 H ，仍可由高斯光学系统的焦距公式给出。这时，我们可以很容易地确定出满足聚焦要求的反射镜半径 ($r = 2 \cdot f \cdot \sin \alpha$)。当反射镜扫描时，可使光斑按一定的频率在曝光区域内作上下扫描，这样便可消除光斑光强在垂直方向由于高斯分布所造成的曝光区不均匀照明。

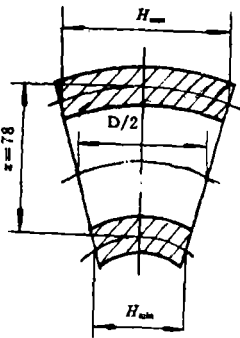


图 2 在光刻面上的光斑形状和扫描时光斑宽度 H 的变化情况

然而，由于柱面反射镜焦距 f 与掠射角 α 有 $f = r / (2 \cdot \sin \alpha)$ 的关系，当反射镜以 $\alpha \pm \Delta\alpha$ 角作扫描时，显然 $f_{(\alpha)}$ 作为 $1/\sin \alpha$ 的函数是个非线性变化。当反射镜以 $(\alpha + \Delta\alpha)$ 角扫描时，距焦 f 变短，光斑宽度变窄，则光强变强，反之，当扫描角为 $\alpha - \Delta\alpha$ 时，光强变弱。随掠射角 α 而变化的光斑形状如图 2 所示。因此，曝光区由上至下所得到的光斑照明并非是均匀的。

现设光源点至反射镜的距离为 S ，反射镜焦距为 f ，反射镜至光刻面的距离为 L ，光源像点的共轭距离为 S' ，反射镜的宽度为 D ，由图 3 得光斑宽度 $H = D \cdot [(S' - L) / S']$ ，其

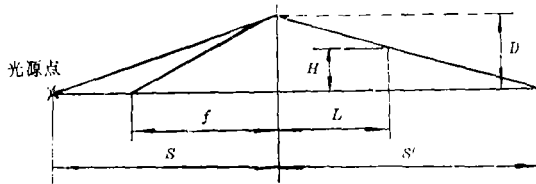


图3 光斑宽度 H 与反射光学系统参数的关系

中, $S' = S \cdot f / (S - f)$ 当已知条件:

- (1) $D = 100\text{mm}$;
- (2) $S = 13500\text{mm}$;
- (3) $f = 10028.57\text{mm}$;
- (4) $r = 525.03479\text{mm}$;
- (5) $\alpha_0 = 1.5^\circ - \Delta\alpha = 1.4427^\circ$ (扫描起始角)。 $\alpha = 1.5^\circ$ (扫描零位角)。 $\alpha_c = 1.5^\circ + \Delta\alpha = 1.5573^\circ$ (扫描终止角);
- (6) $X = 78\text{mm}$ (光斑扫描范围) 给定后, 我们求得光刻面上的最大与最小光斑宽度分别为:

$$H_o = H_{\max} = 57.426\text{mm};$$

$$H_c = H_{\min} = 42.738\text{mm}。$$

当我们按扫描起始角 α_0 和终止角 α_c 求出 H_{\max} 和 H_{\min} 后, 光斑宽度 H 表达式也可以用回归方程的形式表示为 $H = A - BX_i$, 式中常数项 $A = H_{\max}$, 回归系数 $B = (H_{\max} - H_{\min}) / X$, X_i 为扫描范围变量, B 式中的 X 为已知的光斑扫描范围。

上述计算表明: 光斑的最大与最小光强已相差25%, 这已远远超出工程指标在 $(35 \times 35)\text{mm}^2$ 的光刻区域内光强均匀性优于 $\pm 10\%$ 的要求。

为了弥补这种随 α 角变化所造成的扫描光斑光强的非线性变化, 一个有效的办法是控制扫描速度作为 $1/\sin\alpha$ 的函数, 即让光斑按上述函数关系建立起来的运动方程作非等速运动, 使光强与曝光时间的乘积为一常数。由于光强与光斑宽度成反比, 曝光时间与光斑扫描速度成反比, 因此, 如要求曝光量恒定, 则光斑宽度与扫描速度的乘积应为一常量, 即 $H \cdot \dot{X} = \text{常量}$, 式中 \dot{X} 为光斑扫描速度、现取曝光区中心点光斑扫描速度为 \dot{X}_0 , 按已知条件 $H_0 = D/2$, 当曝光量恒定时,

$H \cdot \dot{X} = D/2 \cdot \dot{X}_0$, 则 $\dot{X} = [D/2(A - BX_i)] \cdot \dot{X}_0$ 。当光斑的扫描速度满足此式要求, 光强均匀性就可以得到有效补偿。

中心点的光斑扫描速度 \dot{X}_0 的确定应考虑掩模的温升和热平衡的影响。因为同步辐射发出的强光照到掩模上, 如掩模为硅膜, 则基底吸收40%, 金膜则吸收100%, 被吸收的这些光能, 将立即转换成热能, 使掩模温度升高。如果光斑扫描速度很慢, 由于掩模不同部位不能同时受光, 这样, 掩模上温升不均匀, 造成掩模畸变而影响光刻质量。

为了降低掩模的温升和温度不均匀, 一个最有效的方法是在光刻室内充以流动的氦气。当掩模至硅片之间的距离大于氦气体原子平均自由程时, 流动氦气的导热系数几乎是一个常数。因此, 如果掩模至硅片之间的距离为 $(40 \sim 50)\mu\text{m}$ 时, 氦气压只要大于6mbar即可获得满意的冷却效果。在此情况下, 如果在 $2\mu\text{m}$ 厚的掩模上的光照功率为 $0.1\text{W}/\text{cm}^2$, 掩模温升为 0.33k 。

另一个办法是通过提高扫描频率的途径来降低温升和改善热不平衡。

由资料^[5]提供的下列曲线组(图4)说明了中心点扫描速度与掩模温升的关系。图中 \dot{X}_0 为中心点速度, X_c 为特征扫描速度 $X_c = 2a/\tau$, 式中 a 为热扩散长度, τ 为温升时间常数。对 $2\mu\text{m}$ 厚的硅膜, $X_c = 60\text{cm}/\text{s}$ 。曲线图说明光斑扫描速度必须大于特征扫描速度, 而

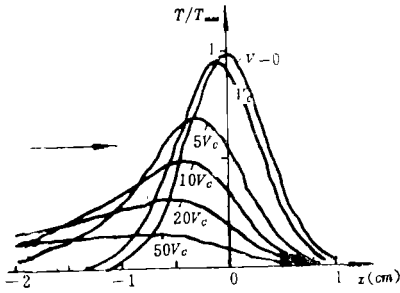


图4 光斑扫描速度与掩模温升的关系

且速度愈高愈好。在我们的设计中，由于反射镜体积为 $240 \times 110 \times 30 \text{mm}^3$ ，材料为铝合金 LD 2 的惯量较大和纯机械式的扫描方式，不可能把扫描速度提得很高，但该种扫描方式却有较高的运行可靠性。在我们的设计中， $\dot{X}_0 = 20.5 \text{cm} \cdot \text{r/s}$ ， r 为扫描凸轮的转速。当 $r = 15$ 时，光斑扫描速度为 5 倍 \dot{X}_0 。该扫描速度可使掩模热畸变小于 $0.01 \mu\text{m}$ 。该量级的热畸变对光刻质量的影响完全可以忽略不计。

曝光实验结果充分说明非等速的扫描方法对改善光刻面上的光强均匀性是非常有效的。

三、有效工作波段的获得

为了能从同步辐射光中正确地截取光刻胶最敏感的工作波段（ $4 \sim 14 \text{ \AA}$ ）必须对光束线的滤光系统进行合理的设计。

我们知道一个不同镀层材料的反射镜，在掠入射条件下对入射的同步辐射光中的 X 射线高能段具有明显的吸收边界，其边界位置决定于掠射角的大小。因此，束线的低通滤光特性，最终归结为反射镜镀层材料和掠射角的正确选择。根据散射因子⁽⁶⁾ (Scattering Factors) 所计算的反射镜金镀层的光谱反射曲线组（图 5）可以看出，随掠射角的不断加大，其截止波长位置向长波方向移动，这时相应地高能段的反射率几乎为零。根据有效工作

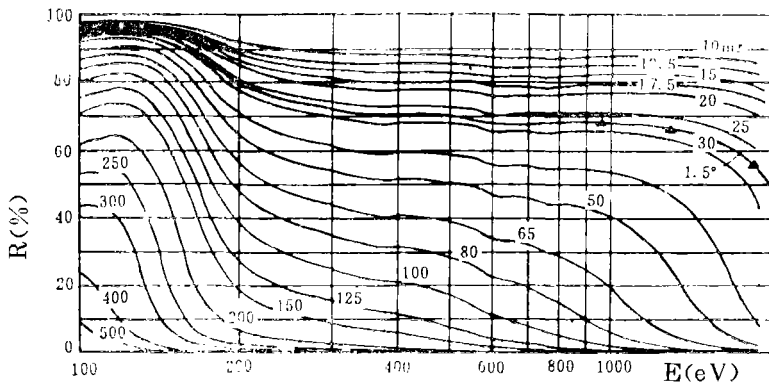


图5 不同掠射角下，金镀层的光谱反射率

波段的高能段（短波方向）吸收边界位置（截止波长），设置掠射角为 1.5° 。正确地设置掠射角是非常关键的一个调整技术。我们在物理设计中，采用了一种巧妙的光学自准方法与使反射镜可进行俯仰动作的调整机构相结合，有效而准确地设置了 1.5° 掠射角。

束线中的高通滤光器是束线末端高真空管道与光刻氦气室之间的镀膜隔离窗。但该窗的主要作用是把 X 射线光刻不需要的低能（ $< 900 \text{eV}$ ）部分滤掉。这样，镀膜在物理上就存在着一个兼容设计的问题。从光学的角度要求镀膜应尽可能的薄，反之，作为真空隔离元件则要求有一定厚度。镀膜的透射特性可由 $T = e^{-\mu h_m}$ 求得，式中 μ 为镀膜的线性吸收系数，质量厚度 $h_m = \rho \cdot h$ ，其中 ρ 为镀膜的密度， h 为镀膜的厚度， $\mu = 0.78\lambda + 0.125 + 0.226 (\text{cm}^{-1})$ 式

中 λ 以 \AA 为单位。由计算得到的不同厚度的镀膜透射曲线(图6),可以看出三个不同厚度的镀膜在长波方向的吸收边界 $<900\text{eV}$ (13.7\AA),即在此能量限以下光子能量将全部被镀膜吸收。因此,当辐射功率密度高到使镀膜发生变形时,镀膜必须采取冷却措施,以提高镀膜的

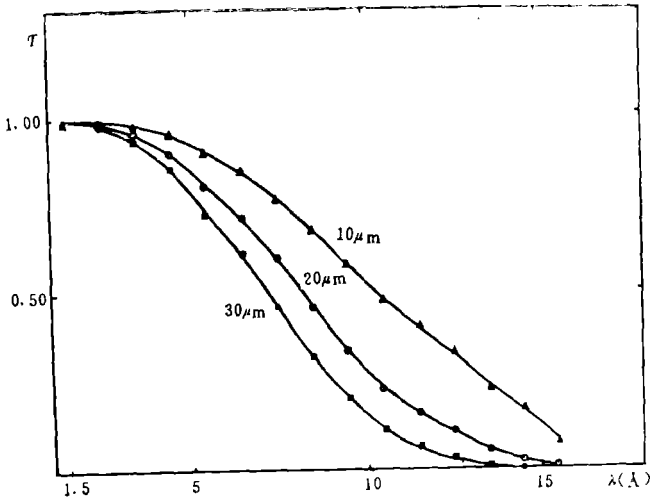


图6 X射线光子对不同厚度的镀膜的透过率

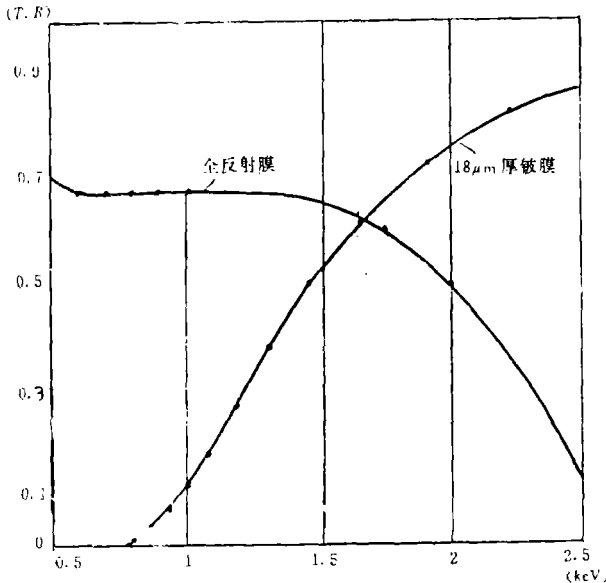


图7 束线反射镜与滤光系统的最终传输效率曲线

耐压强度。类似镀膜光学透过特性的材料还有Kapton(聚四氟乙烯)和Mylar膜(聚酯树脂膜)。这两种均属有机膜,在强辐射照射下,易老化,在一定压差下有明显的塑性变形,这种变形相当于一个厚度不均匀的薄膜而影响光强均匀性,所以,一般强辐射束线很少采用。由反射镜和镀膜构成的束线滤光系统,只要准确地设置掠射角和选择合适厚度的镀膜,就能正确地给出光刻所需的有效工作波段。当选择合适的反射镜镀层后,对提高系统的光子输出是非常有利的。BEP同步辐射光刻束线系统中,X射线光子通量的输出效率(图7)

$\eta = R_f \cdot T_{Be} \approx 0.2$, R_f 为反射镜在有效波段内的平均反射率, T_{Be} 为镀膜在有效波段内的平均透射率。

四、实 验

BEPC同步辐射光刻束线于1990年6月初完成了现场安装与调试。由于光刻束线可以在专用和兼用两种模式下工作, 因此, 在安装调试后一年多的时间里, 有非常充足的机时进行束线运行实验和光学特性测试, 如束线的能谱特性(有效工作波段), 曝光区的光强均匀性和相对辐射强度的测试, 以及贮存环在闭轨状态下, 扫描反射镜最佳工作位置的选择等实验。这些实验为光刻束线正常运行积累了必要的数据。下面将介绍与本文有关的实验结果。

1. 能谱特性的测试

能谱测试是在束线末端完成的。束线末端窗口为 $\phi 50\text{mm}$ 厚 $18\mu\text{m}$ 的Kapton膜(暂代Be膜), 后接设一个可充氦气的单次曝光装置。探测器探头安装在单次曝光装置内光刻曝光点位置(距窗口10cm)。探测与记录设备分别为薄窗式Si(Li)探测器(PGT, 能量响应范围 $1\text{keV} \sim 60\text{keV}$; $\text{FWHM} = 0.148\text{keV}$ (5.89keV) 和多道分析器(918A ORTEC)。图8(a)、8(b)、9(a)、9(b), 分别给出了充氦和大气状态下测试的透射谱和理论计算

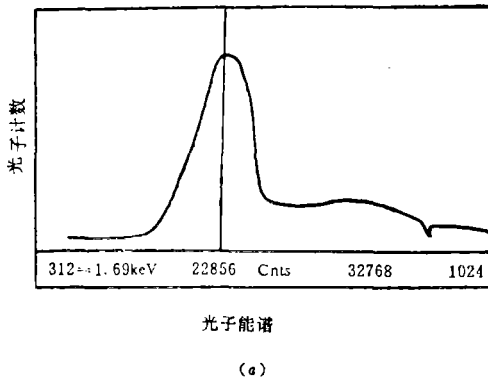


图3(a) 氦气状态下测试谱

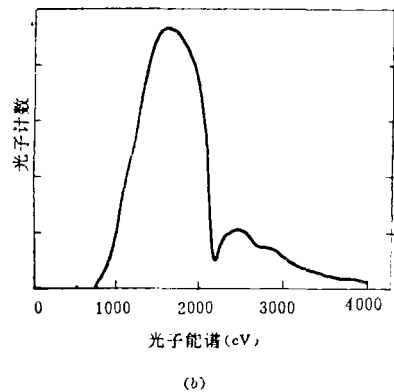


图8(b) 氦气状态下理论谱

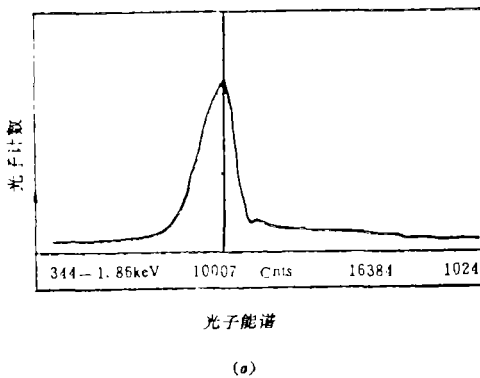


图9(a) 空气状态下测试谱

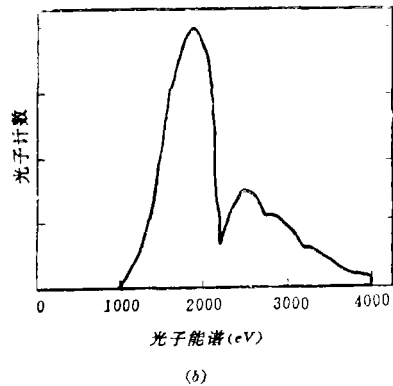


图9(b) 空气状态下理论谱

谱。测量的总计数由测量谱的面积总积分得到。图 8 (a)、9 (a) 表明测试谱与计算谱 (0.9 keV~4keV) 是一致的。

2. 光强均匀性测试

光强均匀性的测试是用两种方法完成的。第一种是在临时设置的充氦气曝光室内对涂有光刻胶的硅片进行单次曝光实验。均匀曝光的硅片经处理后,用进口的“硅片台阶仪”,在要求的曝光区域内 x 、 y 两个方向上进行逐点扫描测量由于曝光不均匀所形成的台阶度。测量的台阶度愈大,说明曝光面照明不均匀,反之,有较好的光强均匀性。实测的台阶度为 $\pm 5\%$,这个结果远小于工程指标 $\pm 10\%$ 的要求。第二种方法是在曝光区的垂直方向上用 GaAsP 光电二极管 (G1127) 作为测量探测器,进行等扫描次数的逐点光强测试。为了使探测器窗口适应于“待测的有效工作波段”,实验时,将原有的石英窗换为 Mylar 膜,其响应波段为 $1\text{nm}\sim 0.1\text{nm}$,并用充氦气电离室进行了标定。测量结果经计算机处理后的光强均匀性曲线与曝光硅片的测量结果是一致的。

3. 光刻效果

为了综合检验光刻束线的使用性能和各分系统的运行功能,在国家正式验收之前,于 1990年 6 月 8 日在束线末端真空管道内,用中国科学院微电子中心自制的掩模,成功地进行我国第一次同步辐射软 X 射线光刻实验。当时,正在进行正负电子对撞实验,电子束流流强较低 (仅为 8mA),但仍得到了反差优良,分辨率为 $1\mu\text{m}$ 的清晰线条。之后于 6 月 27 日,在专用模式下又获得了分辨率为 $0.5\mu\text{m}$ 的清晰线条。两次曝光图形示于图 10。曝光时间仅用了 5 分钟,同常规 X 射线光源相比,曝光效率提高了将近 (20~30) 倍。清晰的图形线条进一步定性地说明了光强均匀性已满足了光刻要求。成功的光刻曝光实验说明光刻束线的物理与工程设计是合理的,工程质量是优良的。

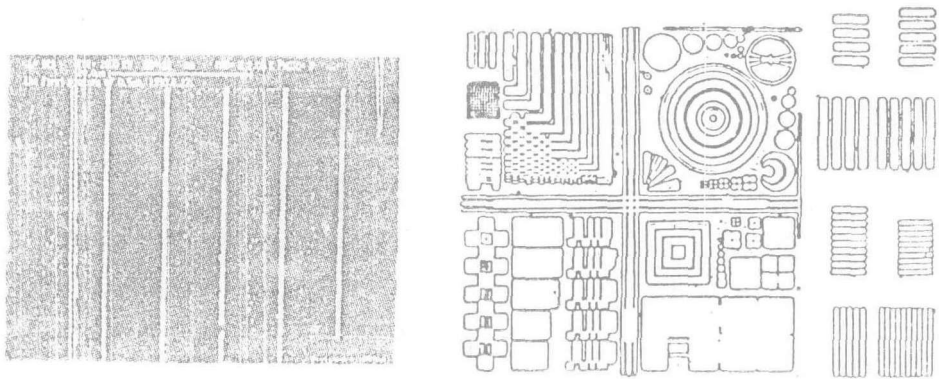


图 10 右图为 1990 年 6 月 8 日的光刻图形,线宽为 $1\mu\text{m}$,左图为 1990 年 6 月 27 日的光刻线条。图中最左边的线宽与间距为 $0.5\mu\text{m}$ 。

光刻光束线的能谱与光强均匀性的测试实验由 BEPC 同步辐射实验室光测组组长崔明启等同志完成。作者感谢他们为本文提供的实验结果。

参 考 文 献

- [1] M. Bieber, H. V. Scheunemann, et al., J. Vac. Sci. Technol., B1(4)1271(1983)
- [2] R. P. Helbich, J. P. Silverman, et al., J. Vac. Sci. Technol., B1(4)1262(1983)
- [3] F. Cerrina, H. Guckal, et al., J. Vac. Sci. Technol., B3(1)227(1985)
- [4] 中国科学院数学学部, “同步辐射光及应用” 42, (1984) .
- [5] K. Heinrich, H. Betz et al., J. Vac. Sci. Technol., B1(4)1352(1983)
- [6] J. Kirz, P. T. Attwood, et al., X-ray Data Booklet LBL. Oct., (1985)
- [7] K. H. Müller, H. Burghause, J. Vac. Sci. Technol., B3(1)241. (1985)

The Optical Characters of Synchrotron Radiation X-ray Lithography Beamline at BEPC

Shao Jinghong, Wang Chuanji

Abstract

The uniformity of the light intensity on the lithography plane and the effective spectral range for the designs of the lithography beamline are the important optical features. This paper analysed the main factor which influences the two features above, and put forwarded to improve the methods of illumination on the lithography plane, and finally presented the experimental results correspondingly.