

# 利用复眼柱面透镜的非接触光刻系统

郝 沛 明

(中国科学院光电技术研究所)

## 提 要

本文从衍射理论出发,对降低衍射效应的非接触光刻理论进行了系统地分析,并求解出降低衍射效应的光学系统的结构参数。给出各种不同的线宽和分离量之间的关系,并通过大量的工艺实验得到证实。这种新型光学系统已在圆刻机中得到应用,已提供了大量优质光栅。它对光刻各种类型的光栅也是有益的。

1974年 Houston 开始研究非接触光刻技术<sup>[1]</sup>,首先在半导体工业中得到应用,目的是为了减少掩模板和硅片在接触光刻时的擦伤和压坏。光栅在接触光刻时也存在上述的问题,1979年我们将非接触光刻技术移植到圆光栅的光刻中,但二者的光刻是有差别的,前者是一次面光刻,采用复眼球面透镜降低衍射效应;而后者的刻划区为狭窄的环形带,一次光刻区域为狭长的扇形模板覆盖区,要制作出一块圆光栅需光刻上百次才能完成,模板上的刻线与光栅中心构成的刻划角 $\alpha$ 仅 $1^\circ$ 左右,这样可认为采用复眼柱面透镜降低在一个方向的衍射效应即可。

## 一、非接触光刻的理论及其分析

### 1. 数学分析

如图1所示,如果一束平行光照明扇形模板时,模板上的一点 $P(\xi, \eta)$ 的扰动可用波函数 $\psi(\xi, \eta)$ 表示,距模板为 $z$ 的圆光栅上一点 $Q(x, y)$ 的扰动可用波函数 $\psi(x, y)$ 表示为<sup>[2]</sup>:

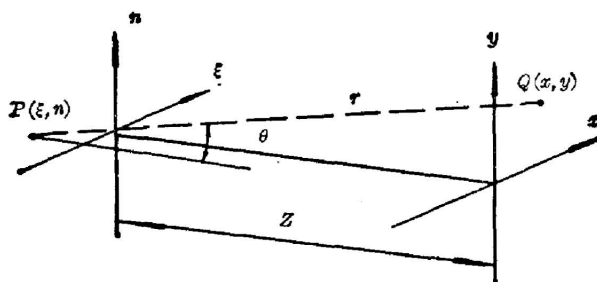


图1 菲涅尔衍射的坐标系

Fig. 1 Coordinate system of Fresnel diffraction

$$\psi(x, y) = K_1 \iint \psi(\xi, \eta) e^{\frac{-iK(x-\xi)^2}{2z}} e^{\frac{-iK(y-\eta)^2}{2z}} d\xi d\eta, \quad (1)$$

其中  $K_1 = (-i/2\lambda)(e^{iKz}/z)$ ,  $\lambda$  为波长,  $K = 2\pi/\lambda$ 。对于一维的情况,

$$\psi(x) = K_1 \int \psi(\xi) e^{\frac{-iK(x-\xi)^2}{2z}} d\xi. \quad (2)$$

现仅分析扇形模板上的双缝,如图 2 所示,假定照明的光强分布是均匀的,即

$$\psi(\xi) = \begin{cases} 1, & \text{当 } -3a < \xi < -a \text{ 或 } a < \xi < 3a \text{ 时,} \\ 0, & \text{其它。} \end{cases}$$

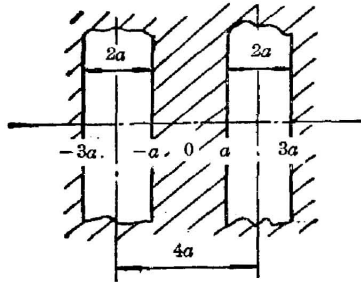


图 2 扇形模板上的双缝  
Fig. 2 Double slits on the fan-shaped mask

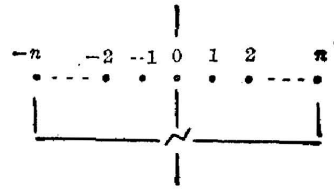


图 3 多线光源的布局  
Fig. 3 Distribution of multiline light sources

以复眼柱面透镜生成的多线光源表示如图 3 所示,一个点代表一个线光源,是以光轴左右对的,总的线光源数,即构成复眼柱面透镜的柱面透镜的总数,

$$N = 2n + 1, \quad (n = 0, 1, 2, 3, \dots). \quad (3)$$

多线光源发出的光通过柱面物镜与光轴成不同角度的多束平行光照明扇形模板双缝,如图 4 所示,对于两个相邻线光源在圆光栅上形成的位错为  $\delta$ , 这样一排线光源的总包含半角为  $\tan \theta = n\delta/z$ 。根据上述,利用多线光源照明扇形模板的双缝,从(2)式就可推导出在待刻圆光栅上接收到的规化强度分布:

$$I(x) = \frac{1}{2N} \{ [C(A_2) - C(A_1)]^2 + [S(A_2) - S(A_1)]^2 + [C(A_4) - C(A_3)]^2 + [S(A_4) - S(A_3)]^2 \}, \quad (4)$$

其中,  $A_1 = (x + n\delta - 3a)\sqrt{2/\lambda z}$ ,  $A_2 = (x + n\delta - a)\sqrt{2/\lambda z}$ ,

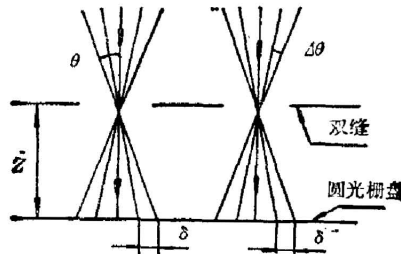


图 4 多线光源照明模板双缝  
Fig. 4 Double slits illuminated by multiline light sources

$$A_3 = (x + n\delta + a)\sqrt{2/\lambda z}, \quad A_4 = (x + n\delta + 3a)\sqrt{2/\lambda z},$$

$$C(A) = \int_0^A \cos(\pi A^2/2) dA, \quad S(A) = \int_0^A \sin(\pi A^2/2) dA.$$

如果  $n=0$ , 即一个线光源的情况, 令  $2a=3\mu$ ,  $\lambda=0.4\mu$ ,  $z$  分别为  $5\mu$ ,  $10\mu$ ,  $15\mu$ , 利用(4)式进行计算, 其结果如图 5 所示。从图 5 可以看出, 利用一个线光源进行非接触光刻是不能降低衍射效应的。

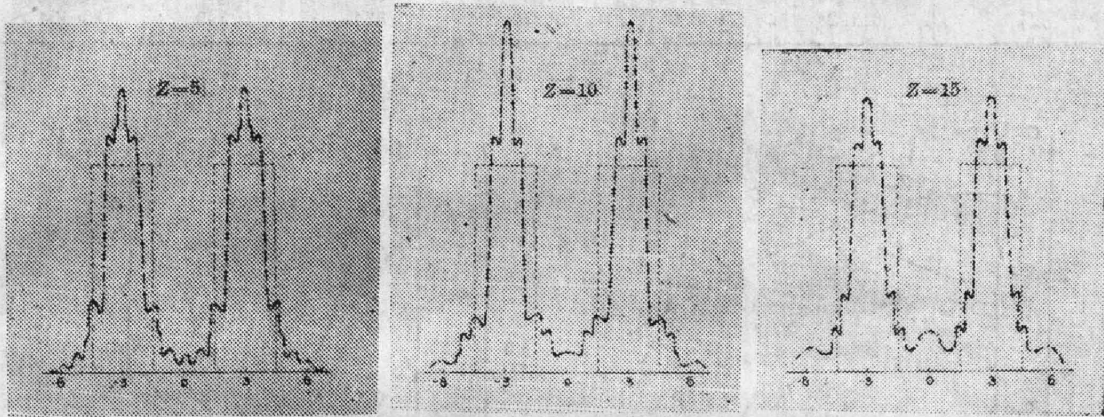


图 5 一个线光源照明双缝衍射的计算像

Fig. 5 Calculated diffraction images of double slits illuminated by a single line light source

## 2. 最大分离量 $z_0$ 和降低衍射效应最佳角度 $\theta_0$ 的选择

最大分离量  $z_0$  可表示为

$$z_0 = 8a^2/3\lambda_0. \quad (5)$$

当  $n \neq 0$  时, 设  $\lambda=0.4\mu$ ,  $2a=3\mu$ ,  $\delta=0.2625\mu$ , 则  $z_0=15\mu$ , 利用(4)式进行计算, 其结果如图 6 所示。现将计算的有关数据, 光强极大值  $I_M$ , 当  $x=0$  时的光强值  $I_0$ , 对比  $c$  等于

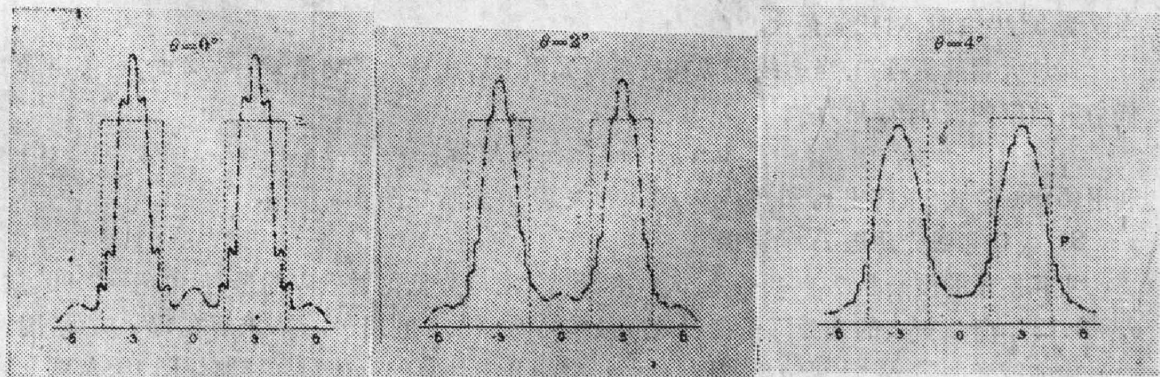


图 6 不同  $\theta$  角的多线光源照明双缝的计算衍射像

Fig. 6 Calculated diffraction images of double slits illuminated by multiline sources for different angles

表 1

$n$	0	1	2	3	4	5
$\theta$	$0^\circ$	$1^\circ$	$2^\circ$	$3^\circ$	$4^\circ$	$5^\circ$
$I_M$	1.326	1.280	1.197	1.088	0.967	0.849
$I_0$	0.192	0.182	0.165	0.146	0.133	0.131
$C$	6.906	7.033	7.254	7.448	7.271	6.383
$I_P$	0.192	0.220	0.270	0.334	0.399	0.454

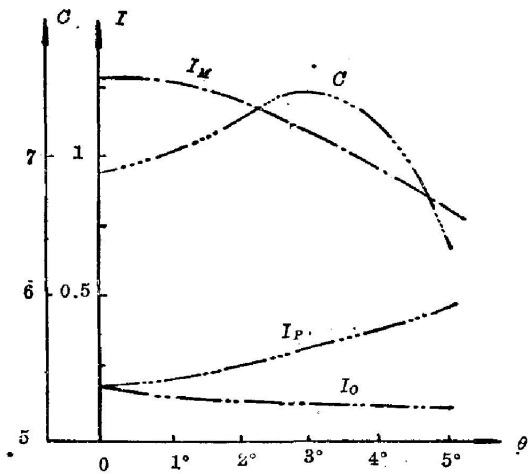


图7  $I_M, I_0, C, I_P$  和  $\theta$  的关系  
Fig. 7 Relation curves among  $I_M, I_0, C, I_P$ , and  $\theta$

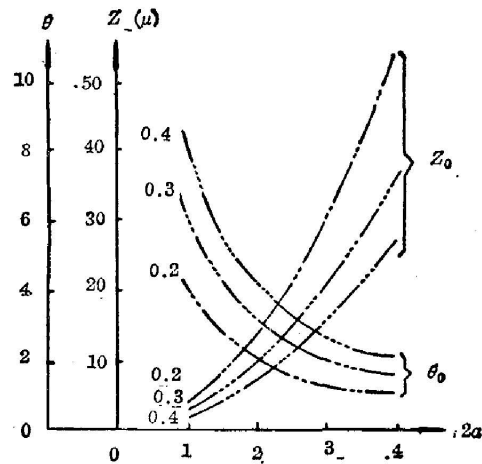


图8  $\lambda, \theta_0, z_0$  和  $2a$  的关系曲线  
Fig. 8 Relation curves among  $\lambda, \theta_0, z_0$ , and  $2a$

$I_M/I_0, z_0=0$  和  $z_0=15\mu$  的光强分布曲线交点  $P$  的光强值  $I_P$ , 列入表 1, 并画出曲线图 7。从图 6 和图 7 不难看出: 随着  $\theta$  角的增大, 降低衍射效应越好, 但光刻线条变宽, 即  $I_P$  值增大; 当  $\theta$  为  $3^\circ$  左右时, 对比  $c$  最大。

通过大量计算可知, 当多线光源在待刻圆光栅上形成最大错动量  $n\delta = a/2$  时, 可解出降低衍射效应的最佳  $\theta_0$  角为

$$\tan \theta_0 = n\delta/z_0 = 3\lambda/16a_0 \quad (6)$$

利用(5)和(6)式, 求解出  $z_0$  和  $\theta_0$  与  $\lambda$  和  $a$  的关系, 并表示在图 8。

### 3. 最佳多线光源数 $N$ 的选择

实际使用的波长是  $\lambda_h = 4047 \text{ \AA}$ ,  $\lambda_g = 4358 \text{ \AA}$ , 对应降低衍射效应的最佳角  $\theta_h = 2.90^\circ$ ,  $\theta_g = 3.12^\circ$ , 所以折衷的选择降低衍射效应最佳角  $\theta = 3^\circ$ 。利用(4)式, 求解在  $2\theta = 6^\circ$  范围内最佳多线光源数  $N$ , 计算结果如图 9 所示, 将图 9 中计算的有关数据作曲线图 10, 从图 9 和图 10 可以看出: 随着  $N$  的增加, 没有出现明显的次峰;  $I_M$  和  $I_0$  都增加,  $I_P$  减少, 但  $I_M$  增加的快; 对比  $c$  变化不大。这就是说  $N$  越多越好, 但  $N$  增多, 加工量加大, 所以采用折衷的办法取  $N=7$  为好。



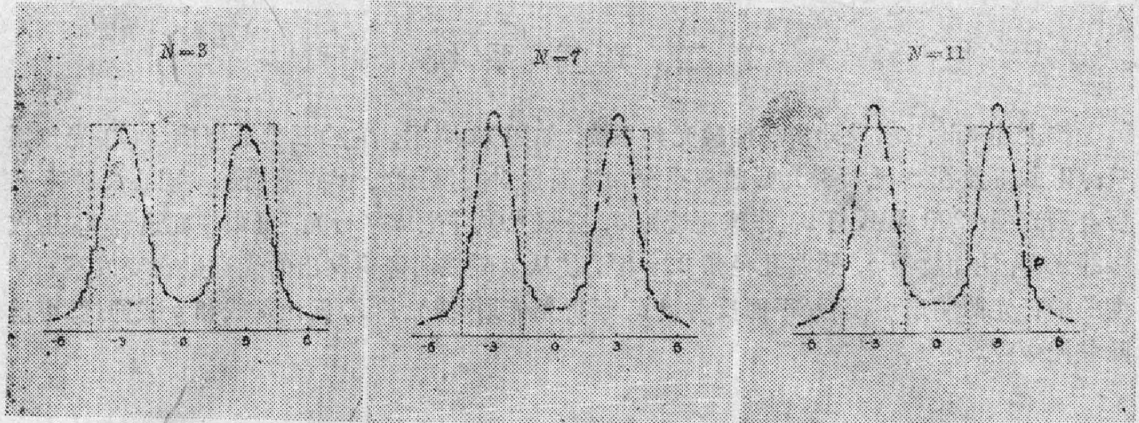


图 9 不同  $N$  的多线光源照明双缝的计算衍射象

Fig. 9 Calculated diffraction images of double slits illuminated by multiline light sources for different number  $N$

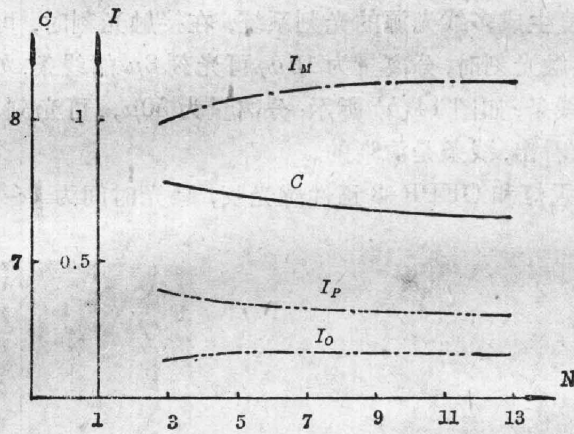


图 10  $I_M, I_O, C, I_P$  和  $N$  的关系曲线

Fig. 10 Relation curves among  $I_M, I_O, C, I_P$  and  $N$

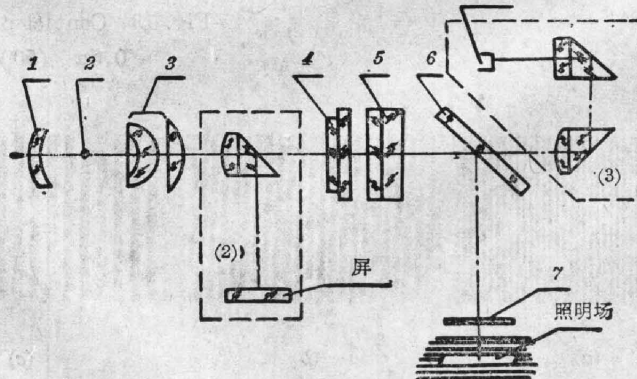


图 11 光学系统

Fig. 11 Optical system

## 二、光学系统

按上述理论分析设计出非接触光刻系统,如图 11 所示,它由三部分组成:(1)光刻系统;(2)汞灯监视系统;(3)光强监视系统。下面仅对第(1)部分作如下描述:同心反射镜 1,可会聚光强;200 W 汞灯 2;非球面透镜 3,会聚光强并生成平行光;复眼柱面透镜 4,生成多线光源;柱面物镜 5,照明孔径角  $2\theta=6^\circ$ ,使从复眼柱面透镜发出的光通过它变成不同角度的平行光照明扇形模板;平面反射镜 6,起折光作用;滤光片 7,仅让  $h$  线和  $g$  线通过,可消除驻波效应。

## 三、实验结果

利用一个线光源或一个点光源的光刻系统,当扇形模板与待刻件分离  $15\mu$  时,光刻线条如图 12 所示,由于衍射效应的影响,线条是不清晰的。

利用复眼柱面透镜生成多线光源的光刻系统,在接触光刻时,可光刻出  $0.5\mu$  的线条,如图 13 所示。在非接触光刻时,分离量为  $15\mu$ ,可光刻  $3\mu$  的线条,如图 14(a)所示;分离量为  $25\mu$ ,可光刻  $4\mu$  的线条,如图 14(b)所示;分离量为  $50\mu$ ,可光刻  $6\mu$  的线条,如图 14(c)所示,从上述照片可以看出,线条是清晰的。

我们使用 200 W 汞灯和 OFPR-3 正性感光胶,曝光时间为 1~2 秒,已光刻出大量的

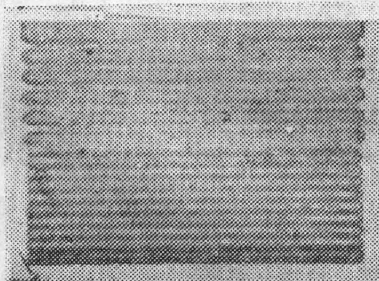


图 12

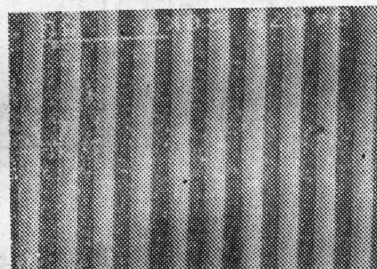
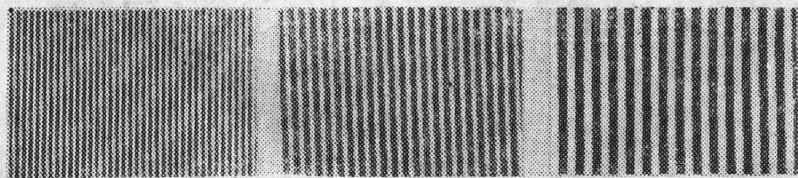


图 13 接触光刻  $0.5\mu$  的照片 (5000 $\times$ )

Fig. 13 Contact photolithograph  
 $0.5\mu$  (5000 $\times$ )



(a)

(b)

(c)

图 14 非接触光刻 (200 $\times$ )

Fig. 14 Non-contact photolithographs (200 $\times$ )

优质光栅盘,对5块光栅盘进行了详细地测试,其最大直径间隙误差为0.35~0.70秒,均匀性为0.4~0.6秒,对比度为3:1左右,刻线质量与接触光刻线质量相比,看不出差别。

## 四、结 论

按降低衍射效应的理论分析,研制成非接触光刻系统,通过工艺实验和生产实践可得出如下结论:

理论分析和实践结果相一致。利用复眼柱面透镜生产的多线光源可降低一个方向的衍射效应,可实现非接触光刻,提高了成品率;并可实现复印刀架不动的情况下,转动待刻圆光栅,进行连续光刻,消除了复印刀架的复位误差,提高了刻划精度。

总之,经过多年实践,认为利用复眼柱面透镜生成多线光源的光刻系统,进行非接触光刻光栅的方案是成功的,它不仅可刻制圆光栅,也可刻制各种类型的光栅,这种新型非接触光刻系统首次在我国得到应用,为刻制计量光栅开创了一条新途径。

## 参 考 文 献

- [1] J. K. Houston; *British Patent*, 1974, 1353739.
- [2] G. B. Parrent, B. J. Thompson; *«Physical Optics Notebook»*, (Redondo Beach, Calif., Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 1969), 29.

## A non-contact photolithographic system with fly's eye cylindrical lens

HAO PEIMING

(*Institute of Optics and Electronics, Academia Sinica, Chengdu*)

(Received 19 November 1984; revised 1 March 1985)

## Abstract

The principle of non-contact photolithography for reducing the diffraction effect is analyzed systematically in terms of the diffraction theory, and solutions to constructional parameters of optical system for reducing the diffraction effect have been obtained. The relationship among different widths of lines as well as clearances is presented, and it has been proved by a lot of experiments. The new type of optical system has been used in a circular dividing machine, which is useful in obtaining high-quality gratings.