

111-115

第4卷第5期  
1996年10月光学 精密工程  
OPTICS AND PRECISION ENGINEERINGVol. 4, No. 5  
October, 1996接近式光刻中刻划间隙  
对刻线质量的影响分析

付永启 朱应时

TN305.7

(中国科学院长春光学精密机械研究所,应用光学国家重点实验室,长春 130022)

**A** 摘要 用近场菲涅耳理论,分析了接近式曝光法刻制光栅及码盘时,刻划间隙与刻线质量之间的关系;并利用刻线相对对比度的概念给出了确定刻划间隙时应遵循的规律。为实际光刻时的选择最佳刻划间隙提供了一条可靠的依据。

关键词: 接近式光刻; 刻划间隙; 刻线质量

## 1 引言

接近式光刻法是目前常用的光刻方法之一,该方法由于效率高、不损伤坯件感光胶面等优点被广泛采用,但该方法也有一缺点长期困扰着人们,这就是由光刻间隙(即掩模板与被刻坯件胶面间距离)带来的衍射效应,此效应直接影响到刻线的质量,造成线条变“毛”边缘发虚甚至变形。国外克服衍射效应的方法是采用复眼柱面透镜,将球型汞灯的光源变为许多呈线性排列的线光源,利用每一个这样的线光源产生的衍射在投影面的迭加使衍射效应平滑化<sup>[1]</sup>,从而在一定程度上降低了衍射效应的影响;但此方法只局限于要求狭缝光源的场合,对于类似10 mm×10 mm这种面光源的场合却难适用;而且由于复眼柱面透镜的制造成本十分昂贵,从经济上也限制了该方法的广泛应用。长期以来,人们在实际光刻时还是用普通的平行光投影镜头,凭经验设置光刻间隙,然后用眼睛观察显影后的线条,觉得差不多即认为所设间隙可以,使实际刻划操作带有很大的盲目性。本文从近场菲涅耳衍射入手,给出了定量分析刻线质量的方法,进而导出了最佳刻划间隙与衡量显影后线条质量的指标——对比度之间的关系式,用此关系式确定的刻划间隙在实际刻划中取得了良好的效果,从而证明了该方法的正确性和实用性,为实际光刻时选择最佳刻划间隙提供了一条可靠依据,也为今后进一步探讨光学刻划中衍射问题起到抛砖引玉的作用。

## 2 接近式光刻的衍射场及其光强度分布

接近式光刻使用的掩模板中的线条可看作周期为 $d$ 的光栅 $G$ (如图1所示),设其透射函数为

收稿日期:1996年8月5日

$$g = \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{i2\pi \frac{n}{d} x} \quad (1)$$

式中

$d$  —— 光栅周期,  $\mu m$

当用平行光照明掩模板时, 相当于用平面波照明光栅  $G$ , 在  $G$  之后的光场分布为

$$E(x, 0) = e^{i\lambda z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{i2\pi \frac{n}{d} x} \quad (2)$$

由近场菲涅耳衍射及傅立叶变换, 可得在距离光栅为  $Z$  的平面上光场分布为

$$E(x, Z) = e^{i\lambda Z} \sum_{n=-\infty}^{\infty} A_n e^{-i\pi \lambda Z \frac{n^2}{d^2}} \quad (3)$$

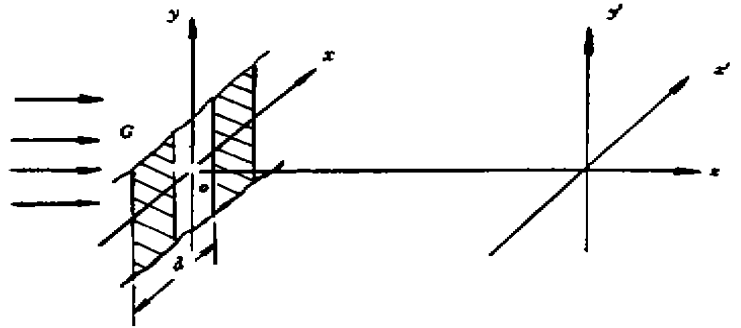


图 1 菲涅耳衍射坐标图

Fig. 1 Fresnel Diffraction coordinate

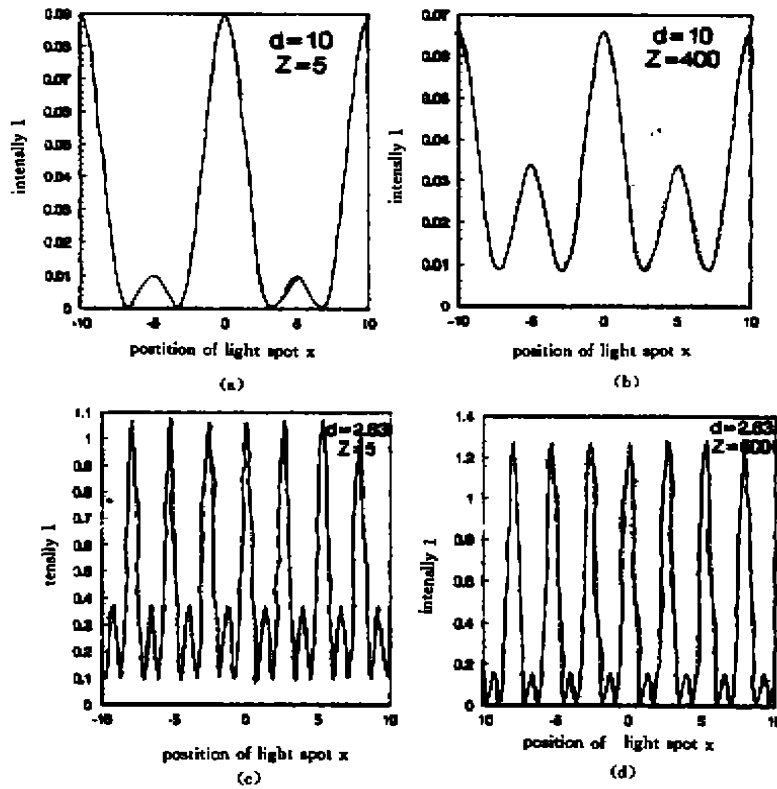


图 2 接近式光刻光强分布

Fig. 2 Intensity distribution in proximity lithography

上式中取  $n = 0, \pm 1$ , 即只考虑空间频率  $0, \pm \frac{1}{d}$  的三个平面波的迭加, 则得:

$$E(x, Z) = e^{i\lambda Z} \left( A_0 + 2A_1 e^{-i\pi \lambda \frac{Z}{d^2} \cos 2\pi \frac{x}{d}} \right) \quad (4)$$

由式(4)得光强度分布为

$$I(x, Z) = |E(x, Z)|^2 = A_0^2 + 4A_0 A_1 \cos 2\pi \frac{x}{d} \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} + 4A_1^2 \cos^2 2\pi \frac{x}{d} \quad (5)$$

式(5)即为接近式光刻掩模板在平行光照明被刻坯件感光胶面上的衍射光强度分布,式中的  $Z$  即为刻划间隙。透射函数  $g$  为梳状函数,其幅值  $A_0 = \frac{1}{d}$ ,故式(5)改写为

$$I(x, Z) = \frac{1}{d^2} \left( 1 + 4 \cos 2\pi \frac{x}{d} \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} + 4 \cos^2 2\pi \frac{x}{d} \right) \quad (6)$$

图 2 为不同刻划间隙  $Z$  和不同线密度  $d$  时的衍射光强度分布。由图 2 可看出,当线密度小于 100 lp/mm, ( $d > 10 \mu\text{m}$ ) 时,刻划间隙的变化对光强度分布影响很小;但在线密度为 380 lp/mm, ( $d = 2.63 \mu\text{m}$ ) 时,刻划间隙的变化对光强度分布的影响较前者要显著很多。因而,掩模板线密度越高,在近场衍射下,光强度分布对刻划间隙的变化就越敏感。

### 3 刻线质量的定量分析

上文中推导了刻划间隙与衍射光强度之间的关系,此时人们自然会想到刻划间隙与刻线质量间的关系又是如何,即刻划间隙  $Z$  取多大才能获得质量较好的刻线。从单纯的理论角度来讲,由泰伯自成像理论可知,在第一菲涅耳焦面上即可得到周期和光强度分布与  $G$  相同的像。但在实际中,除了用激光作光源较易得到理想的自成像外,用常见的氙灯、汞灯等作光源,由于光学系统残余象差的影响,产生的是非理想平行光,很难在第一菲涅耳焦面上得到象质较好的自成像,因而显影之后的刻线质量也就很不理想。所以,必须从其它途径寻找  $Z$  与刻线质量间的关系。

由于接近式光刻中菲涅耳衍射的存在,使刻线边缘或多或少地发虚,只是在什么样的间隙下能使刻线变“毛”或边缘发虚的程度降至最低,此时,可以认为刻线质量合格。因此,首先要确立衡量刻质量的依据。

过去都是定性地凭眼睛观察来断定刻线是否合格,本文在此引用一种定量分析刻线质量的指标——对比度  $K_n$ ,可表示如下:

$$K_n = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \quad (7)$$

由式(5)可知,当  $x = \frac{1}{2} md$  ( $m=0, 1, 2, \dots$ ) 时,

$$I_{\max} = A_0^2 + 4A_1^2 + 4A_0A_1 \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} \quad (8)$$

当  $x = \frac{1}{2} md$  时,

$$I_{\min} = A_0^2 + 4A_1^2 - 4A_0A_1 \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} \quad (9)$$

将式(8)、(9)代入式(7)得

$$K_n = \frac{4A_0A_1}{A_0^2 + A_1^2} \cdot \cos \frac{\pi \lambda Z}{d^2} \quad (10)$$

令

$$K_0 = \frac{4A_0A_1}{A_0^2 + A_1^2} \quad (11)$$

则有

$$Z = \frac{d^2}{\pi \lambda} \cos^{-1} \left( \frac{K_n}{K_0} \right) \quad (12)$$

间隙  $Z$  与相对对比度  $k_n/k_0$  间相互关系可由图 3 直观看出。对于线密度为 50 lp/mm ( $d = 20 \mu\text{m}$ ) 的掩模板, 曲线变化平缓,  $Z$  的变化对刻线相对对比度的影响较小; 对于 100 lp/mm ( $d = 10 \mu\text{m}$ ) 的掩模板, 曲线幅度变化较前者大, 说明  $Z$  的变化对刻线相对对比度的影响较大; 对 380 lp/mm ( $d = 2.63 \mu\text{m}$ ) 的掩模板, 曲线斜率较大, 说明  $Z$  的变化对刻线相对对比度的影响已非常敏感。故对 380 lp/mm 这类高线密度掩模板的接近式光刻, 即使间隙  $Z$  在亚微米的量级内变化都将使刻线质量明显改变。而对低于 50 lp/mm 线密度的掩模板, 即使  $Z$  以  $10 \mu\text{m}$  量级变化, 对刻线质量的影响都不如前者敏感。

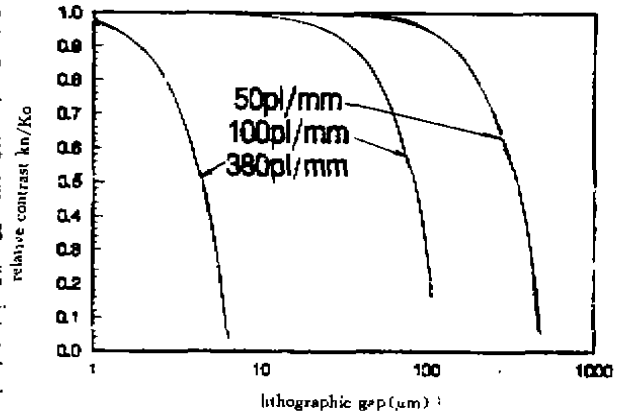


图 3 相对对比度与刻划间隙  $Z$  的关系

Fig. 3 Relative contrast versus lithographic gap  $Z$

通常情况下, 要求  $K_n$  不小于  $0.9K_0$ , 即  $K_n/K_0 \geq 0.9$ , 此时  $Z$  应在如下范围取值:

$$Z \leq 0.14 \frac{d^2}{\lambda} \quad (13)$$

令

$$Z_T = 0.14 \frac{d^2}{\lambda} \quad (14)$$

实际刻划时总是希望在保证刻线质量的前提下尽量用大间隙, 所以实际设置刻划间隙时取  $Z$  接近  $Z_T$  即可。

#### 4 实验验证及结论

早在 1972 年, 英国 Rank 精密工业公司对接近式光刻的实用划间隙进行过多次试验, 采用  $i$  线 ( $\lambda = 365 \text{ nm}$ ) 曝光, 光栅常数  $d = 4 \mu\text{m}$ , 得出结论为  $Z \leq 1/2 \mu\text{m}^{1/2}$ , 与使用式(14)算出的  $Z_T = 13.8 \mu\text{m}$  极相近。

为进一步验证式(14)的可靠性, 在 TKF500 型  $0.2^\circ$  圆刻机上用国产 Bp-201 型正性光刻胶, 125 W 高压汞灯 (峰值波长  $4075 \text{ \AA}$ ), 在光照条件曝光时间不变的情况下, 改变刻划间隙  $Z$ , 得到的刻划边缘质量分别如图 4 所示。

按式(14)可算出, 当掩模板上线密度分别为 50 lp/mm、100 lp/mm、380 lp/mm 时, 对应的刻划间隙  $Z_T$  分别为  $139.3 \mu\text{m}$ 、

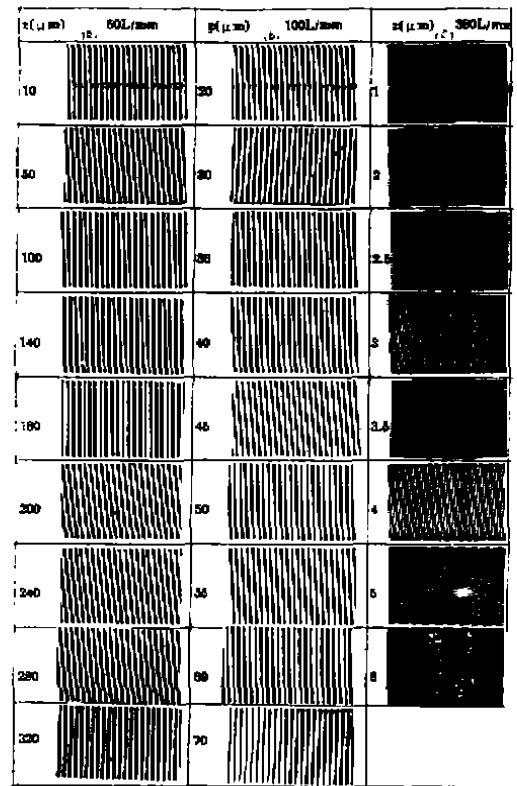


图 4 显影腐蚀后的刻线 (a) 200 倍显微观察 (b)、(c) 400 倍显微镜观察

Fig. 4 Fine line after development and erosion, (a) under  $200\times$  microscope, (b) and (c) under  $400\times$  microscope.

34.57  $\mu\text{m}$ 、2.38  $\mu\text{m}$  区域呈现出良好的

1:1 黑白比的线条,大于 200  $\mu\text{m}$  以后的间隙对应的线条黑白比开始明显改变,对比度也明显下降;对 100 lp/mm 模板,在 36  $\mu\text{m}$  左右的区域线条较理想,大于 45  $\mu\text{m}$  以后的间隙对应的线条黑线变窄白线变宽,条纹对比度也明显下降;对于 380 lp/mm 的掩模板,由于线密度太大,对平行光的要求严格,实验使用的简易平行光投影镜头已很难满足其要求,故经光刻显影腐蚀后的线条总的来看已明显不如前两组好,但也可大致看出,在 3  $\mu\text{m}$  附近线条质量优于别处。

通过以上分析及实验,可得出结论如下:

式(14)的反映的刻划间隙与实际情况是相符的,尤其当线密度低于 100 lp/mm 时用普通平等光镜即可在由式(14)算出的较大间隙附近得到比较理想的线条。对于象 380 lp/mm 源,方可在较大间隙下获得满意的刻线。

#### 参 考 文 献

- [1] 严瑛白、余官正、泰伯效应与光束准直性测量. 仪器仪表学报,1982,3(2)  
 [2] D. F. Horne. Photomasks, Scales and Gratings. Published by Adam Hilger Ltd. 1983, 95-103

### Effect Analysing of Lithographic gap on Ruling Quality in proximity Photolithography

Fu Yongqi, Zhu Yingshi

(Changchun Institute of Optics and Fine Mechanics,  
Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022)

#### Abstract

The method of proximity photolithography is a practical and available way in the manufacture of grating and radial encode. The distance from mask to surface of photoresist coated on ruled blank is very important. The size of it effects on the ruling quality directly, such as causing edge scattering. As it is very difficult to produce the exact parallel light in usual optical systems, the actual image we get is't an ideal self-image. Therefore, a better position of the mask should be found in order to ensure the ruling quality. The relationship between image contrast and lithographic gap is deduced in the view of image contrast in this paper. A reliable basis is provided for selecting the best gap in actual photolithography.

**Key words:** Lithographic gap, Proximity photolithography, Near-field Fresnel diffraction.

付永启 男,生于 1967 年 5 月,1988 年 7 月毕业于吉林工业大学,1996 年 4 月在长春光机所通过博士学位论文答辩,主要从事微细加工技术研究。