

# 投影光学系统方角图形传递特性

邹海兴

(中国科学院上海光学精密机械研究所)

## 提 要

本文得到二维衍射的积分公式,并数字计算了线条的两维光强分布。提出了简化的方角图形传递模型。经投影光学系统的方角图形的圆角半径计算值与实测结果一致。

## 一、引 言

投影光刻技术是当前微电子加工中最为重要的光刻技术。它以光学投影的非接触来代替接触式光刻,大大减少器件的缺陷密度,可以提高大规模集成电路的成品率,并减少了掩模的消耗。从而使大规模集成电路真正成为当今世界一大产业。

投影光刻是将掩模图形,经投影光学系统成像转移到硅片上去,实现非接触高精度图形传递。这种图形传递特性,已由不少研究者作了较为系统的研究<sup>[2~4]</sup>。他们的研究重点集中在在线图形边缘轮廓的再现,即投影图形边缘过渡区特性研究,而对线条两端头方角传递则很少研究。线条端头方角传递特性是光刻工艺中极为重要的特性。本文主要研究线条方角的传递特性。为集成电路设计者提供一些有别于接触光刻的、投影光刻工艺的新型设计原则。

本文从衍射积分出发,求得二维衍射图像积分公式,数值计算一条阴板线条的光强分布二维图形。并从瑞利判据出发,提出简化角图形传递模型,求得线条方角变圆角的基本公式,从而建立起投影光学系统参数与圆角半径之间的定量关系。其结果与数值计算结果和实测投影光刻的圆角特性很吻合。

## 二、二维图形的光衍射积分计算<sup>[1]</sup>

设光学系统为准单色光照明,物点坐标为 $(x_0, y_0)$ ,光强为 $I_0(x_0, y_0)$ ,从物点元处到达像点 $(x_i, y_i)$ 的光能为 $I_0(x_0, y_0) |K(x_0, y_0; x_i, y_i)|^2 dx_0 dy_0$ ,其中, $K$ 为光学系统的传输函数。考虑不同物点的贡献,则像面 $(x_i, y_i)$ 光强分布为

$$I_1(x_i, y_i) = \iint I_0(x_0, y_0) |K(x_0, y_0; x_i, y_i)|^2 dx_0 dy_0, \quad (1)$$

$$I_0(x_0, y_0) = B_0(x_0, y_0) F(x_0, y_0) F^*(x_0, y_0), \quad (2)$$

式中 $B_0(x_0, y_0)$ 为照明系统所决定的光照明分布, $F(x_0, y_0)$ 为物体(掩模)透过特征函数。当

研究物点附近的光强效应时, (1) 式可改写为

$$I_1(x_i, y_i) = \iint B_0(x_0, y_0) F(x_0, y_0) F^*(x_0, y_0) K(x_i - x_0, y_i - y_0) \times K^*(x_i - x_0, y_i - y_0) dx_0 dy_0. \quad (3)$$

对于相干照明, 传输函数  $K$  可改写为

$$K(x_i - x_0, y_i - y_0) = \left(\frac{i}{\lambda^2}\right) \iint G \frac{\exp[ik(s-r)]}{sr} d\xi d\eta. \quad (4)$$

坐标关系如图 1 所示。其中,  $k = (2\pi/\lambda)$ ,  $\lambda$  为波长,  $r$  和  $s$  分别为物点  $(x_0, y_0, 0)$  和像点  $(x_i, y_i, z_i)$  到光瞳  $(\xi, \eta, f)$  之间的距离。  $G$  为光瞳处的波像差函数, 无像差时,  $G=1$ , 离焦影响包含在  $s$  之内。对  $\xi, \eta$  的傍轴近似可求得:

$$K(x_i - x_0, y_i - y_0) = (n \sin \theta / 2 \pi \lambda^2) \exp[iv / (n \sin \theta)^2] \times \int_0^1 J_0(v, \rho) \exp(-0.5 iv \rho^2) \rho d\rho, \quad (5)$$

$$u = (2 \pi / \lambda) n \sin \theta [(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2]^{1/2}, \quad (6)$$

$$v = (2 \pi / \lambda) (n \sin \theta)^2 z, \quad (7)$$

式中  $J_0(u, \rho)$  为零级 Bessel 函数,  $n \sin \theta$  为投影光学系统数值孔径,  $u, v$  为  $x$  和  $y$  的无量纲坐标。

在相干照明情况下,  $B_0(x_0, y_0)$  近似取为 1, 则 (3) 式可改写为

$$I_{\text{coh}}(x_i, y_i) = \left| \iint F(x_0, y_0) \cdot K(x_i - x_0, y_i - y_0) dx_0 dy_0 \right|^2. \quad (8)$$

在非相干照明情况下,  $B_0(x_0, y_0)$  为  $\delta$  函数, 则 (3) 式可改写为

$$I_{\text{incoh}}(x_i, y_i) = 0.5 \iint |F(x_0, y_0) \cdot K(x_i - x_0, y_i - y_0)|^2 dx_0 dy_0. \quad (9)$$

在一般投影光刻机中, 为部分相干照明, 其光强分布有别于相干与非相干照明两种极端情况, 但在讨论方角图形传递特性时, 为了简化问题, 我们只讨论非相干照明情况, 但其传递特性已可反映一般情况, 由 (9) 式, 数值计算下列典型图形 (图 2)。为一条阴板线条, 线宽  $d = 1.25 \mu\text{m}$ , 线长  $l \gg d$ , 非相干照明, 投影物镜数值孔径  $NA = 0.32$ ,  $\lambda = 0.4047 \mu\text{m}$ 。光强从最亮到最暗分为 10 级, 以点密度形式打印。其强度分布如图 3 所示。从图 3 计算结果可见, 由于衍射, 在物体无光照处已有光渗入, 并使方角变为圆角。其圆角半径  $R$  为  $0.9 \mu\text{m}$  左右。渗入长度几乎为圆角半径之半。

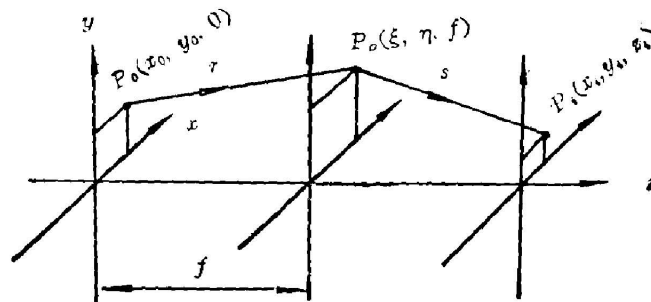


Fig. 1 Reference frame for calculation of the transmission function

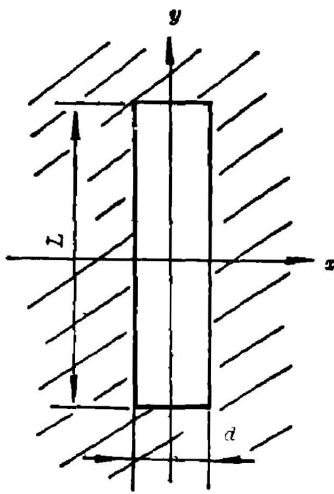


Fig. 2 A typical pattern for calculation ( $l \gg d$ )

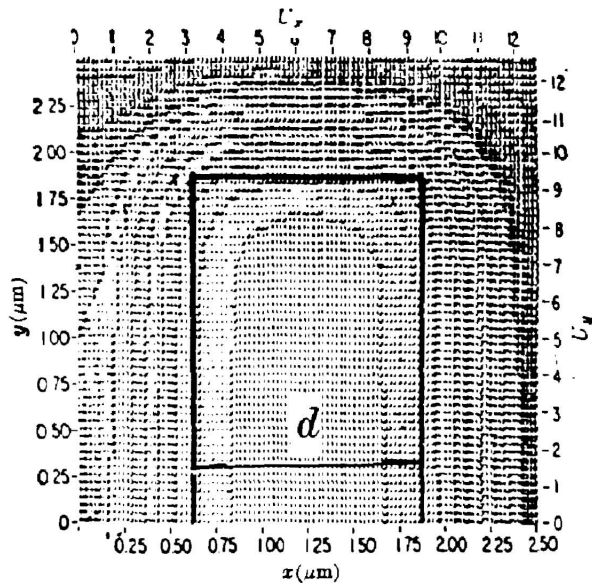


Fig. 3 Diffraction distribution of the bar pattern ( $NA=0.32, d=1.25 \mu m$ )

### 三、二维图形方角传递简化模型

由图 3 可见，方角图形经光学系统后，变成圆角。其原因是光学系统为一低通滤波器，而方角由高频空间频谱组成。其线形如图 4 所示。当图形趋向角顶点 A，则所需空间频率越高。设图形为单色照明，非相干，在圆角 D 点，为方角变圆的拐点，此处点距 EF 刚好相当于非相干光瑞利衍射极限长度。则圆角半径 R 可由下式求出

$$\overline{EF} = 0.61(\lambda / NA) \quad (10)$$

由图 4 可见

$$\begin{aligned} \overline{EF} &= 2\overline{AD} = 2(\overline{AO} - R) = 2(\sqrt{2}R - R) \\ &= 2R(\sqrt{2} - 1) \end{aligned}$$

$$\therefore R = [\overline{EF} / 2(\sqrt{2} - 1)] \approx 0.7(\lambda / NA) \quad (11)$$

由(11)式可见，方角图形经投影光学系统后，变为圆角，其半径大小为  $0.7(\lambda / NA)$ 。 (OD is radius R, d is line width)

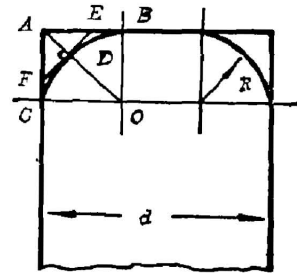


Fig. 4 Simplified model (OD is radius R, d is line width)

我们测量了 1:1 扫描投影光刻机(数值孔径=0.11)的光刻图形角传递特性。成像光束为汞灯紫外多谱线。光刻胶为正胶 AZ1350J，胶厚  $0.5 \sim 1.8 \mu m$ ，前烘温度  $85 \sim 90^\circ C$ ，前烘时间  $20 \sim 30 \text{ min}$ ，显影温度为  $22^\circ C$ 。采用 UNIUM 专用显微镜测量，物镜为  $100\times$ ，测得圆角半径为  $2.5 \mu m$  左右。此圆角半径值与线条宽度、曝光量大小和胶层厚度等诸光刻因素无关<sup>[5]</sup>。由简化模型得圆角半径 R 为  $2.55 \mu m$ ，实验与计算极为符合，见图 5。

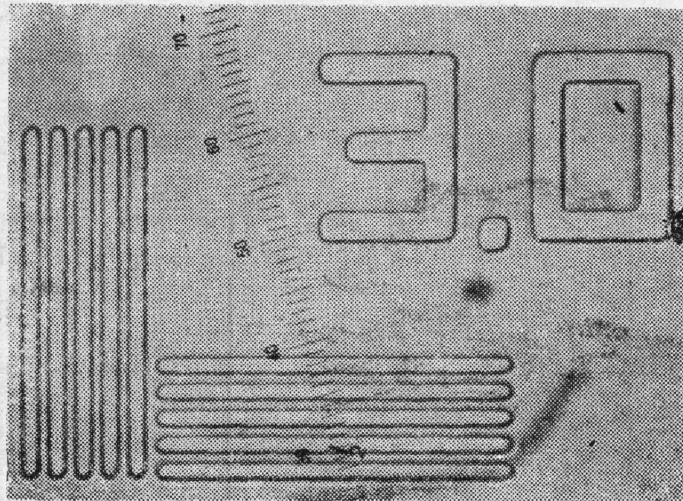


Fig. 5 Lithographic pattern of the  $3\mu\text{m}$  bar (Scanner parameter  $NA=0.11$ )

#### 四、结 论

由上述衍射积分数值计算结果, 实测扫描投影光刻线条所得圆角值与简化模型计算值示于表 1 中。实测或数值计算结果与简化模型计算结果极为相似。因此, 投影光学系统传递线条均带圆角, 圆角半径为 1.4 倍的极限分辨率。在使用投影光刻工艺 (如采用 1:1 扫描投影光刻机或分步重复光刻机), 设计集成电路时, 应考虑方形端头线条变圆的效应, 以避免搭接时的颈缩现象。在需搭接处, 应使线条增长一些, 其间隔应放宽些, 以免在后道工序中发生线路断路或短路现象。

Table 1 Round characteristics of the bar pattern

No	$NA$	wavelength ( $\text{\AA}$ )	Radius of the measurement or number calculation ( $\mu\text{m}$ )	calculated value of the simp lifed model ( $\mu\text{m}$ )
1	0.32	4047	0.9	0.89
2	0.11	3650~4358	2.5	2.58

#### 参 考 文 献

- [1] M. Born, E. Wolf; *«Principle of Optics»*, (Pergamon press, Oxford, 1965), 480.
- [2] A. Offner; SPIE 31 st Ann Conf. 1978, Washington D. C.
- [3] M. C. King, D.H. Berry; *Appl. Opt.*, 1972, 11, No. 11 (Nov), 2455.
- [4] A. Offner, J. Meiron; *Appl. Opt.*, 1969, 8, No. 1 (Jan), 183.
- [5] 私人通讯。

## **Transmission characteristics of corner pattern through a projective optical system**

ZOU HAIKING

*(Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics, Academia Sinica)*

(Received 17 February 1986; revised 16 May 1986)

### **Abstract**

In this paper, the integral equation of two-dimensional diffraction is introduced. The intensity distribution of the two-dimensional diffraction of a corner pattern through a projective optical system is computed numerically. A simplified transmission model of the corner pattern is suggested. The calculated value of the round radius of the corner pattern through the projective optical system is in agreement with the measured value.