

用于 $0.35 \mu\text{m}$ 接触孔图形相移掩模研究

周崇喜 冯伯儒 侯德胜 张 锦 陈 芬 孙 方

(中国科学院光电技术研究所微细加工光学技术国家重点实验室, 成都 610209)

摘 要 基于霍普金斯(Hopkins)理论, 通过计算 $0.35 \mu\text{m}$ 方孔的传统透射掩模、边缘相移掩模、部分边缘相移掩模、辅助相移掩模以及衰减相移掩模在硅片表面空间像的光强分布, 找出了适合于各种相移掩模的最佳参数。其中衰减相移掩模对提高光刻分辨率和增加焦深最为明显, 尤其在相干因子(σ)较小时更是如此。

关键词 相移掩模, 光刻分辨率, 焦深。

1 引 言

在大规模集成电路光刻中, 提高投影曝光物镜的数值孔径(NA), 缩短曝光波长(λ), 提高工件台的定位精度, 已使光刻技术推进到亚半微米阶段。但是由于微电子工艺的高精度特性, 仅仅依靠增大数值孔径和缩短曝光波长, 一方面导致镜头的设计、制作更加困难; 另一方面将使系统的焦深进一步缩小乃至不能实用。目前世界上很多国家开发的离轴照明、相移掩模、光学邻近效应校正、光瞳滤波等波前工程技术, 都是为了在亚半微米光刻机上实现深亚微米的光刻图形^[1]。因此光刻专家认为, 上述方法的结合是实现深亚微米的必由之路。其中相移掩模是不需要改变现有光刻机的任何参数而只需优化掩模本身就能提高光刻分辨率和增加焦深, 因而得到了特有的重视。本文主要讨论相移掩模技术。其基本原理是在传统的二元铬透射掩模的适当透光区内增加一相移层, 使透过该相移区和无相移区的光在相位上相差 180° , 从而改变掩模图形的傅里叶谱分布, 使衍射波中的某些级次之间产生相消干涉, 减弱暗区的光强度, 从而提高光强对比度或增大图形光强分布的斜率^[2]。如利文森(Levenson)交替型相移掩模的频谱面只有掩模基频一半的正一级和负一级, 而不象透射掩模那样存在着衍射0级和很多高频衍射级而使光强对比度下降, 如图1所示。从图中可以明显地看出, 相移掩模主要针对空频较

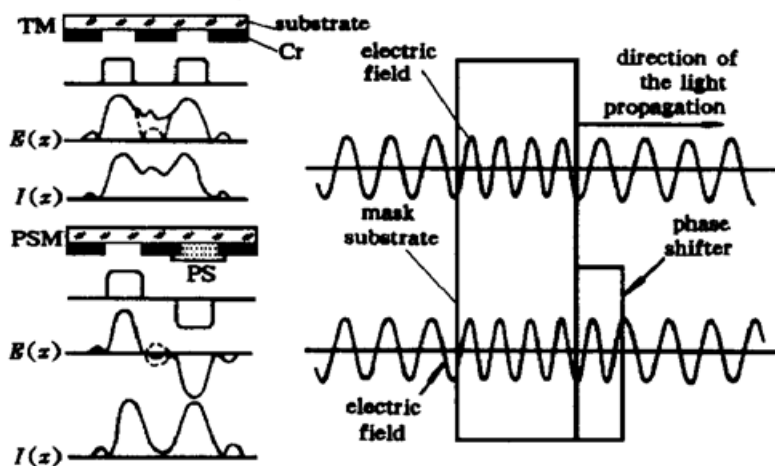


Fig. 1 Principle of the phase shifting mask

高(衍射极限附近)的微细线条才有意义。

2 基本理论

光刻曝光是一个部分相干成像过程。根据霍普金斯理论,像面上的光强分布可表示为^[3]

$$I'(u', v') = \iint \mathcal{Y}(x_0, y_0) |\Phi(x_0, y_0; u', v')|^2 dx_0 dy_0, \quad (1)$$

$\mathcal{Y}(x_0, y_0)$ 是聚光镜的照明参数, $\Phi(x_0, y_0; u', v')$ 为点光源 (x_0, y_0) 在像面上所形成的复振幅分布, 它可进一步表示为

$$\Phi(x_0, y_0; u', v') = \frac{1}{2\pi} \iint f(x, y) \alpha(x - x_0, y - y_0) \exp [i(u'x + v'y)] dx dy, \quad (2)$$

$f(x, y)$ 为瞳函数, $\alpha(x - x_0, y - y_0)$ 为成像系统入瞳处的复振幅分布, 可表示为

$$\alpha(x - x_0, y - y_0) = \frac{1}{2\pi} \iint A(u, v) \exp [-iu(x - x_0) + v(y - y_0)] dudv, \quad (3)$$

$A(u, v)$ 为物体的复透射函数, 它可写成振幅和相位的函数 $A(u, v) = \tau(u, v) \exp [i\mathcal{Q}(u, v)]$, $\tau(u, v)$ 为振幅透过率, $\mathcal{Q}(u, v)$ 为相位透过率。对于传统的透射掩模, $\tau(u, v) = 1.0$, $\mathcal{Q}(u, v) = 0$, 掩模透光区的复透射函数 $A(u, v) = 1$; 对于相移掩模, $\tau(u, v) = 1.0$, $\mathcal{Q}(u, v) = \pi$, 这样使得掩模透光区的复透射函数 $A(u, v) = -1$; 对于衰减型相移掩模, $0.0 \leq \tau(u, v) \leq 1.0$, $\mathcal{Q}(u, v) = \pi$, 因而 $-1.0 \leq A(u, v) < 0$ 。三种掩模结合在一起从而改变像平面的光强分布。

3 几种相移掩模计算模拟结果

比较典型的相移掩模有利文森交替型相移掩模、无铬相移掩模、边缘相移掩模、部分边缘相移掩模、辅助相移掩模、连续色调相移掩模和衰减相移掩模^[4]。

针对 $0.35 \mu\text{m}$ 特征线宽, 本文作者计算模拟了 $0.35 \mu\text{m}$ 方孔在不同相移掩模情况下像面上的光强分布, 其镜头参数为: 数值孔径 $\text{NA} = 0.63$, 曝光波长 $\lambda = 0.365 \mu\text{m}$, 部分相干因子 $\sigma = 0.6$ 。图2(a) 为边缘相移掩模(RIM), 图2(b) 为相移层长度 l 分别为 0.02 、 0.04 、 0.06 、 0.08 、 0.10 、 $0.375 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴方向的光强分布, 图中双峰曲线为无铬相移掩模, 图中相移层长度 l 的顺序相应于图中中央峰值光强从高到低对应的曲线(以下同)。最佳相移层宽度为 $0.04 \sim 0.05 \mu\text{m}$ 。图3(a) 为部分边缘相移掩模, 图3(b) 为相移层宽度 (w) 为 $0.03 \mu\text{m}$, 长度 l 分别为 0.06 、 0.12 、 0.18 、 0.24 、 0.30 、 $0.35 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴方向的光强分布; 图3(c) 为

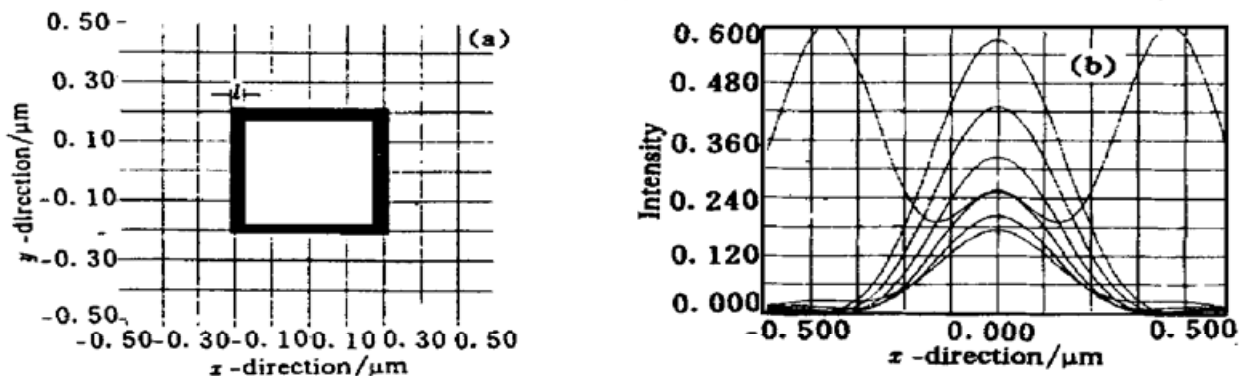


Fig. 2 Rim phase shifting mask (a) and the image intensity along x -axis (b)

相移层宽度 w 为 $0.05 \mu\text{m}$, 长度 l 分别为 0.06 、 0.12 、 0.18 、 0.24 、 0.30 、 $0.35 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴 方向的光强分布; 图3(d) 为相移层分别位于四个角, 其边长 l 分别为 0.03 、 0.04 、 0.05 、 0.06 、 $0.07 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴 方向的光强分布。图3(b)、(c)、(d) 中, 最上方的一条曲线对

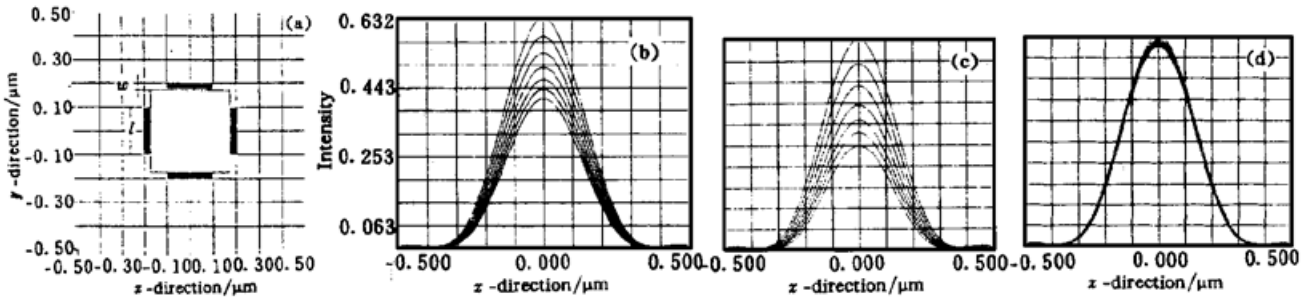


Fig. 3 Partial rim phase shifting mask (a) and the image intensity along x -axis. (b) $l = 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.35 \mu\text{m}$, (c) $l = 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.35 \mu\text{m}$, (d) $l = 0.03, 0.04, 0.05, 0.06, 0.07 \mu\text{m}$

应于透射掩膜, 下面6条曲线对应于6个不同的 l 。最佳相移层宽度 w 为 $0.03 \sim 0.05 \mu\text{m}$, 最佳长度 l 为 $1/2$ 方孔边长。图4(a) 为辅助相移掩模, 图4(b) 为相移层离方孔间距 s 为 $0.02 \mu\text{m}$, 宽度 w 分别为 0.02 、 0.04 、 0.06 、 0.08 、 $0.10 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴 方向的光强分布; 图4(c) 为相移层离方孔间距 s 为 $0.04 \mu\text{m}$, 宽度 w 分别为 0.02 、 0.04 、 0.06 、 0.08 、 $0.10 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -

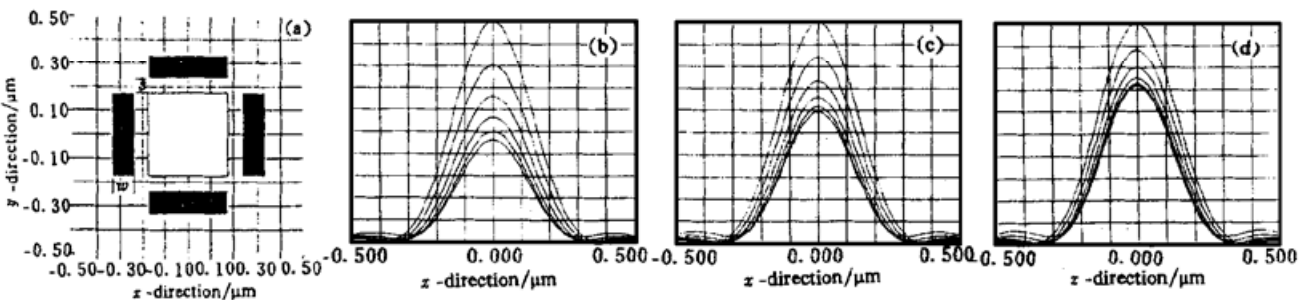


Fig. 4 Auxiliary phase shifting mask (a) and the image intensity along x -axis. (b) $l = 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.35 \mu\text{m}$, (c) $l = 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.35 \mu\text{m}$, (d) $l = 0.06, 0.12, 0.18, 0.24, 0.30, 0.35 \mu\text{m}$

轴 方向的光强分布, 图4(d) 为相移层离方孔间距 s 为 $0.06 \mu\text{m}$, 宽度 w 分别为 0.02 、 0.04 、 0.06 、 0.08 、 $0.10 \mu\text{m}$ 时像面沿 x -轴 方向的光强分布, 相移层距方孔边缘最佳距离 s 为 $0.02 \sim 0.03 \mu\text{m}$, 最佳宽度为 $1/2$ 方孔边长(即 $0.18 \mu\text{m}$)。图5(a) 为衰减相移掩模, 图5(b) 为透过率在 5% 、 8% 、 10% 和 15% 等情况下像面沿 x -轴 方向的光强分布, 最佳透过率为 $8\% \sim 10\%$ 左右。

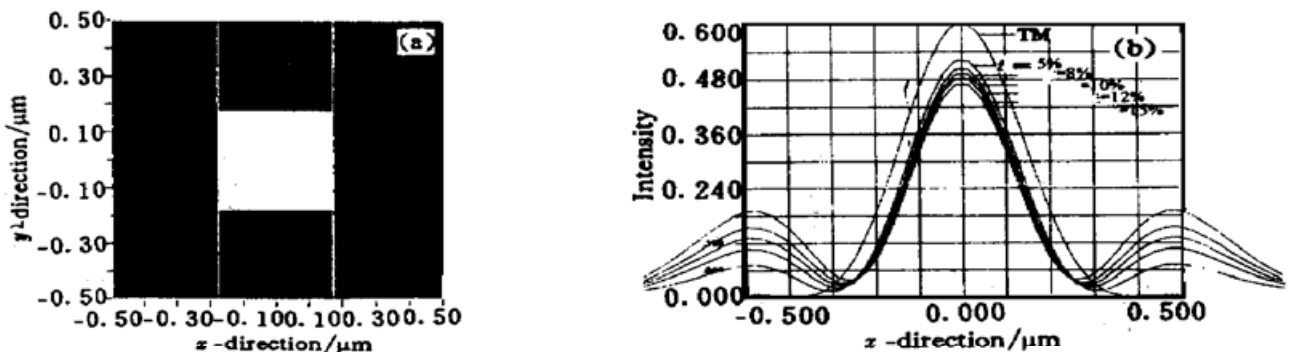


Fig. 5 Attenuated phase shifting mask (a) and the image intensity along x -axis (b)
通过对 $0.35 \mu\text{m}$ 方孔在不同情况下的相移掩模的计算模拟表明: 衰减相移掩模对提高光

刻分辨率的效果最为明显。

4 相移掩模对焦深的影响

相移掩模除了提高光强分布的边缘斜率外,还能增加光刻物镜的焦深。本文作者分别研究了部分相干系数 σ 分别为0.3、0.45和0.6,离焦量 δ 分别为0、0.5和1.0 μm 时传统透射掩模、边缘相移掩模(相移层宽度 w 为0.04 μm)和衰减相移掩模(透过率为10%)情况下像面上的光强分布情况。图6是部分相干因子为0.3,传统透射掩模、边缘相移掩模和衰减相移掩模(相应的曲线自上而下顺序见曲线下方的括号内,下同)在离焦量分别为0、0.5、1.0 μm 时的空间像强度的分布。图7为部分相干因子为0.45,传统透射掩模、边缘相移掩模和衰减相移掩模在离焦量分别为0、0.5、1.0 μm 时的空间像强度的分布。图8为部分相干因子为0.6,传统透射掩模(TM)、边缘相移掩模(RIM)和衰减相移掩模(A-PSM)在离焦量分别为0、0.5、1.0 μm 时的空间像强度的分布。从图中可以看出,相移掩模在部分相干因子较小(约0.35左右)时不仅可以提高光强分辨率,还可大大增加焦深。

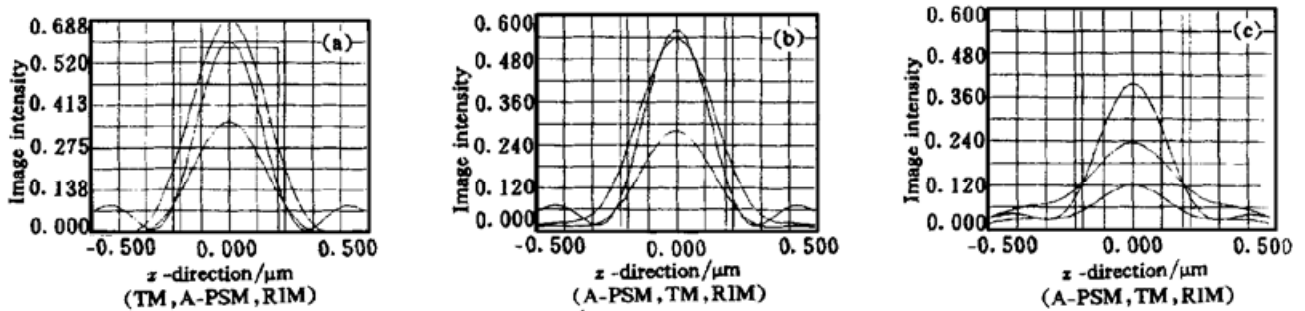


Fig. 6 Image intensity at different δ ($\alpha = 0.3$). (a) $\delta = 0.0 \mu\text{m}$, (b) $\delta = 0.5 \mu\text{m}$, (c) $\delta = 1.0 \mu\text{m}$

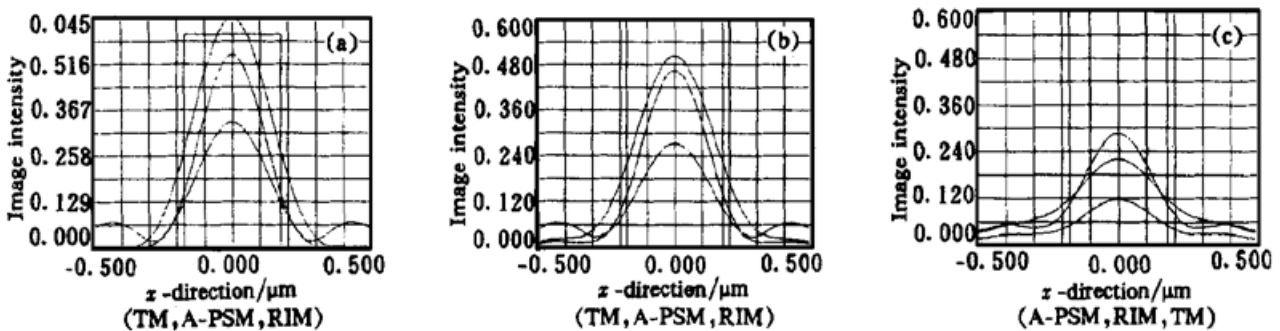


Fig. 7 Image intensity at different δ ($\sigma = 0.45$). (a) $\delta = 0$, (b) $\delta = 0.5 \mu\text{m}$, (c) $\delta = 1.0 \mu\text{m}$

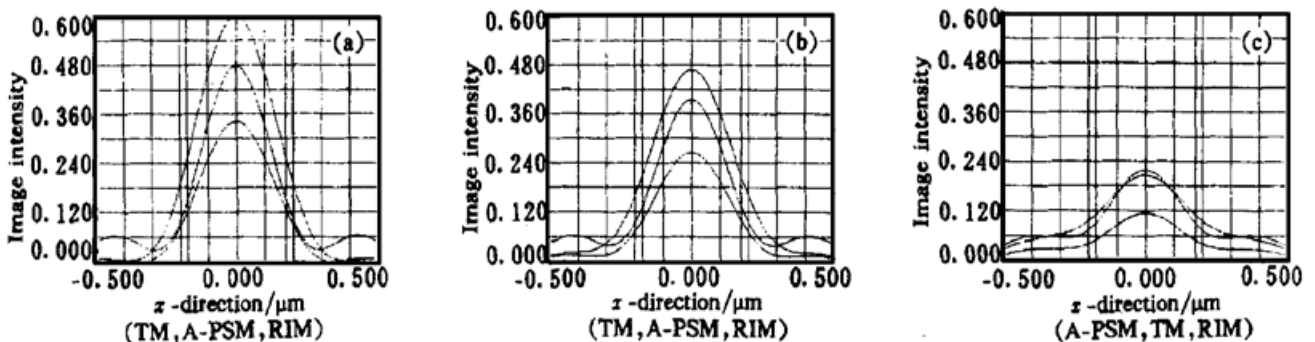


Fig. 8 Image intensity at different δ ($\sigma = 0.6$). (a) $\delta = 0$, (b) $\delta = 0.5 \mu\text{m}$, (c) $\delta = 1.0 \mu\text{m}$

结 论 大数值孔径情况下, 在各种相移掩模中除了利文森掩模外, 提高光刻分辨率主要靠提高像面空间像光强的边缘斜率来实现。0.35 μm 方孔(孤立图形)的所有相移掩模中, 衰减相移掩模对光刻分辨率的提高最为明显。同时相移掩模还增加了光学系统的焦深, 尤其在相干因子较小时较为明显。

参 考 文 献

- [1] Rai-Choudhury P. *Handbook of Lithography*. Bellingham: SPIE Optical Engineering Press, 1997.
- [2] Levenson M D, Viswanathan N S, Simpson R A. Improving resolution in photolithography with a phase shifting mask. *IEEE Transaction on Electron Devices*, 1982, **ED-29**(12) :1828~ 1836
- [3] Hopkins. On the diffraction theory of optical images. *Proc. Roy. Soc.*, 1953, **A217**(2) :408~ 420
- [4] 冯伯儒, 陈宝钦. 边缘相移掩模技术. *光电工程*, 1997, **24**(增刊) :12~ 17

Phase Shifting Mask for 0.35 μm Contact Holes

Zhou Chongxi Feng Boru Hou Desheng Zhang Jin
Chen Fen Sun Fang

(State Key Laboratory of Optical Technologies for Microfabrication, Institute of Optics and Electronics,
The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 19 October 1998; revised 20 January 1999)

Abstract Aerial image distribution of a 0.35 μm contact hole with traditional mask, rim phase shifting mask (PSM), partial rim PSM, attenuating PSM are calculated based on Hopkins model, and the optimum parameters of different PSM are obtained. Attenuated PSM in enhancing resolution and improving the depth of focus in photolithography is of the most effective among them, especially when partial coherent factor (σ) is small.

Key words phase shifting mask, resolution in photolithography, depth of focus.