

灰阶掩模实现光学邻近校正及计算模拟研究*

杜惊雷 黄奇忠 姚 军 粟敬钦 郭永康
(四川大学物理系, 成都 610064)

崔 铮
(英国卢瑟福国家实验室)

沈 锋
(中国科学院光电技术研究所, 成都 610209)

摘 要 从光学邻近效应产生机理出发, 提出用带灰阶衬线的灰阶掩模实现光学邻近效应精细校正的新方法, 并指出掩模图形振幅信息的优化, 即合理分布掩模图形的空间频谱, 可以改善空间像的光强分布并获得高质量的光刻图样。计算表明, 校正后的成像图样与理想像的偏差小于 0.9%。

关键词 光学邻近效应校正, 灰阶掩模, 灰阶衬线。

1 引 言

光学邻近效应是实现亚微米光刻的严重障碍, 为了提高光学光刻的分辨力, 近两三年来, 光学邻近效应校正(OPC)方法的研究受到了极大关注^[1~3]。

光学邻近校正是波前工程学的一个重要内容^[4], 在亚微米及亚半微米光刻中, 为减少光刻图样的邻近畸变, 通常采用在原设计掩模图形上添加适当的亮或暗衬线的校正方法^[3, 5]。然而, 按光学信息处理的观点, 优化物面的复振幅分布能更有效地减少衍射受限所致的高频信息丢失。基于此, 本文提出了在亚微米光刻掩模制作中使用一种带灰阶衬线的灰阶掩模的光学邻近效应校正新方法。这种方法为邻近效应校正增加了一个新自由度, 它不仅合理地增强像的边角高频信息相对含量, 使校正更精细, 从而获得更细的实用光刻线条, 而且能够加快掩模设计的优化计算速度。文中分析了灰阶掩模和灰阶衬线的特点, 并设计了一个掩模样例, 实现了光学邻近效应精细校正。模拟分析表明, 新方法有效地调整了像面上的光强分布, 使像轮廓的相对面积偏差小于 0.9%。

2 原 理

光学邻近效应是指光刻过程中由于相邻线条的影响而造成的光刻图形的形状和尺寸相对

* 国家自然科学基金和教育部博士点基金及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资助课题。

收稿日期: 1998-02-09; 收到修改稿日期: 1998-04-02

于原设计图形发生畸变的现象。在光刻过程中, 照明方式、物镜质量、掩模复振幅透过率、抗蚀剂特性及处理过程、以及刻蚀过程中的图形传递等诸多因素都直接影响光刻图形质量。然而对于理想投影曝光系统而言, 其空间像的邻近畸变则主要是由于设计图形在成像过程中的高频信息丢失而引起的。为了补偿这种信息的丢失, 目前普遍采用的是在掩模图形边角添加衬线的校正方法。不过, 由于影响空间成像的因素较多, 若只考虑在掩模图形的边缘上增减图形的尺寸来进行光学邻近校正, 其效果往往是有限的而且容易引发新的畸变。所以通过分析掩模的空间像的光强分布, 实现掩模多参量优化设计可获得更为精细的光学邻近效应校正。

在投影光刻中, 空间像的光强分布对传递到基片上的光刻图形的质量有决定性影响, 而像面的光强分布依赖于成像系统的数值孔径、曝光波长和照明光的相干性、掩模的复振幅透过率及其它系统参数。即^[6]

$$I_{\text{image}}(x_i, y_i) = f[\lambda, \text{NA}, \sigma, t_{\text{object}}(x_0, y_0), H(x_s - f_x, y_s - f_y), I_{\text{eff}}(x_s, y_s)] = \iint I_{\text{eff}}(x_s, y_s) | \iint U(f_x, f_y) H(x_s - f_x, y_s - f_y) \times \exp[j2\pi(f_x x_i + f_y y_i)] df_x df_y |^2 dx_s dy_s \quad (1)$$

式中 λ 为曝光波长, NA 为系统的数值孔径, σ 为曝光系统的部分相干因子, $t_{\text{object}}(x_0, y_0)$ 为设计掩模的复振幅透过率函数, $I_{\text{eff}}(x_s, y_s)$ 代表有效照明光源的光强分布(即照明函数), $H(x_s - f_x, y_s - f_y)$ 为光瞳函数, $U(f_x, f_y)$ 为复振幅透过率函数 $t_{\text{object}}(x_0, y_0)$ 的频谱。这里由于衍射受限, 实际像的光强分布 $I_{\text{image}}(x_i, y_i)$ 相对理想的像面光强分布已经产生了一定的畸变。因此, 要获得接近理想的像面光强分布, 以提高光刻图形质量, 在不改变系统的前提下, 可以通过修改并优化物面的复振幅透过率来使像面光强分布接近理想像的分布, 即

$$I_{\text{optimum}}(x_i, y_i) = f[\lambda, \text{NA}, \sigma, t_{\text{optimum}}(x_0, y_0), H(x_s - f_x, y_s - f_y), I_{\text{eff}}(x_s, y_s)] \approx I_{\text{ideal}}(x_i, y_i) \quad (2)$$

这里 $I_{\text{ideal}}(x_i, y_i)$ 代表理想像的光强分布, $t_{\text{optimum}}(x_0, y_0)$ 为优化后掩模的复振幅透过率函数, $I_{\text{optimum}}(x_i, y_i)$ 为优化掩模的空间像光强分布。由此可知, 如果合理地调整物面的复振幅分布, 即优化掩模的空间频谱分布, 可以改善像面的光强分布, 从而提高了光刻分辨力。

通常优化物面的复振幅分布可通过改变掩模的结构或采用相移掩模来实现, 然而, 改变掩模图形的灰阶也可改变物面复振幅分布。作者在研究中发现, 带灰阶衬线的灰阶掩模能够有效地实现对空间频谱的调制, 在改善空间像光强分布方面作用独到。此外, 由于其添加的衬线的宽度一致故而掩模设计时极为方便, 提高了优化计算的速度; 又由于灰阶衬线对光强分布的影响比较和缓, 因此, 可实现光学邻近效应的精细校正; 该方法还克服了加亮暗衬线校正方法的掩模对频谱的调制作用单一的缺点, 增加了一个新的光学邻近校正自由度。因此, 带灰阶衬线的灰阶掩模在光学邻近效应校正中能起到特殊的作用, 对于浮雕轮廓偏差要求十分严格的衍射光学元件的制作更有意义。

3 灰阶掩模和灰阶衬线的作用分析

众所周知, 计算机模拟实验过程具有灵活、方便、快捷等独特优点, 而实际光刻实验的参量多、变化复杂, 且实验费用昂贵, 因此用计算机模拟光刻过程对光刻实验提出指导性的依据已成为微电子工业中研究微细加工技术的一种重要手段。

本文依据部分相干光成像理论及公式(1)，以 i 线投影曝光系统($NA=0.5, \sigma=0.5$) 为例模拟分析了 $0.4 \mu\text{m}$ 线条的边角畸变和疏、密线条间的线宽差异，所分析的掩模分别如图 1 (a)、图 1(b) 所示。在其边角加上适当的灰阶衬线，衬线宽度约为 $0.1 \mu\text{m}$ ，并通过改变线条和衬线的灰阶来分析灰阶掩模和灰阶衬线的作用。

图 2 是线宽与灰阶等级的关系曲线，其中实线代表孤立线条(Isolated line)，虚线代表半密集线条(Half-dense line)。从图中可以看出，灰阶可以有效地改变线条的线宽，当孤立线条和半密集线条的振幅透过率在 $0.1 \sim 0.3$ 范围时基本上消除了线宽偏差，此时密集线条的线宽未发生变化。

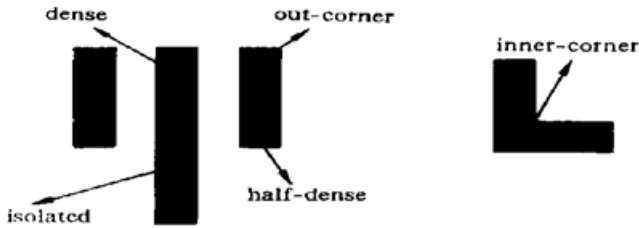


Fig. 1 (a) Isolated and dense lines, (b) Folded line

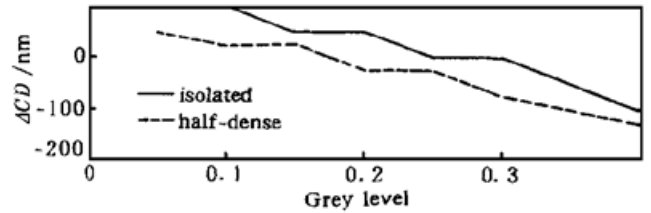


Fig. 2 Relationship curve of isolated and half-dense lines with grey level

图 3 是线条边缘的相对斜率与灰阶等级的关系曲线，可以看出，如果振幅透过率不大，线条边缘的相对斜率变化很小，这对保持各类线条的斜率的一致性是很有利的，当成像系统略有离焦时不会发生新的线宽偏差。

图 4 是外边角最大面积偏差与所加灰阶衬线的灰阶等级的关系曲线，从图中可以看出灰阶衬线的振幅透过率在 $0.25 \sim 0.65$ 范围时最大面积偏差最小。

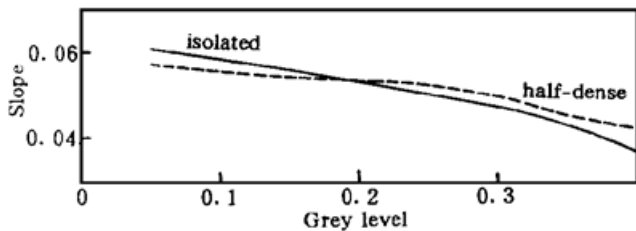


Fig. 3 Relative slope curve at the edge of isolated and dense feature

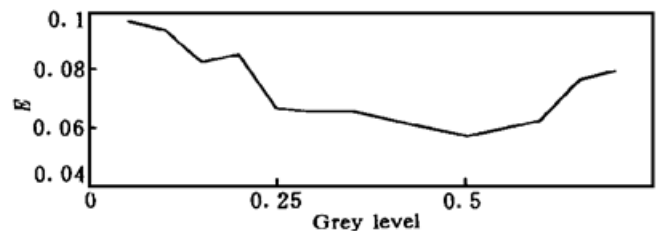


Fig. 4 Maximal area deviation of the out-corner on the line end

图5是内边角最大面积偏差与所加灰阶衬线的灰阶等级的关系曲线，显然内边角所加的灰阶衬线的振幅透过率要大于 0.6 才更有效。

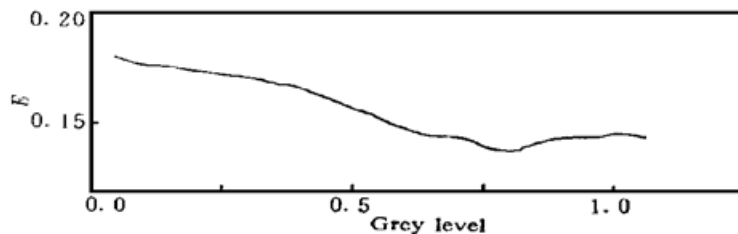


Fig. 5 Maximal area deviation of the inner-corner on the folded line

以上的分析表明，灰阶线条和灰阶衬线对改善线宽、边角的圆化和线条的缩短十分有效，这充分说明了灰阶掩模和灰阶衬线确能起到对频谱的双重调制作用。当然，由于光刻成像是一个非线性成像过程，

设计掩模时可适当调整上述相关的掩模参量，根据掩模的具体情况选择适当的灰阶线条和灰阶衬线便可实现光学邻近效应的精细校正。

4 模拟的校正结果及分析

依据上述校正原理和分析结果, 本文设计了掩模图形(图 6)和带灰阶衬线的灰阶掩模[图 7(a)], 图 7(b)是用于对比的普通二元光学邻近效应校正掩模。



Fig. 6 Design mask

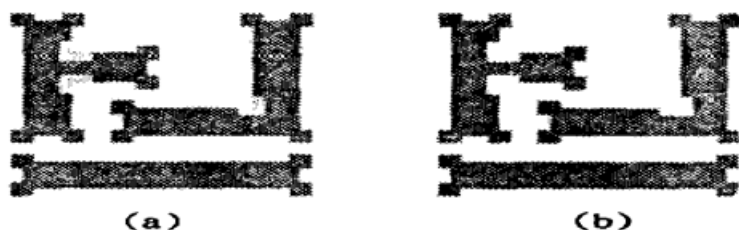


Fig. 7 Grey level mask with grey level bias and convenient OPC mask

经计算机模拟, 给出了其校正前的像轮廓(图 8)和校正后的像轮廓(图 9)。这里所用的光刻系统和掩模的设计参数为: 曝光波长 $\lambda = 365 \text{ nm}$, 部分相干因子 $\sigma = 0.6$, 数值孔径 $\text{NA} = 0.5$, 线宽 $w = 0.4 \mu\text{m}$, 衬线宽度在 $0.1 \mu\text{m}$ 左右, 强度阈值为 0.5 。线条的振幅透过率分别为 0.10 、 0.15 、 0.20 , 灰阶衬线的振幅透过率分别为 0 、 0.1 、 0.3 、 0.9 。从图中可以看出校正前后的像轮廓有明显改变, 校正后的像轮廓与理想像轮廓更为相近, 边角圆化、线长缩短及线宽的偏差已基本消失, 达到了预期的校正结果。

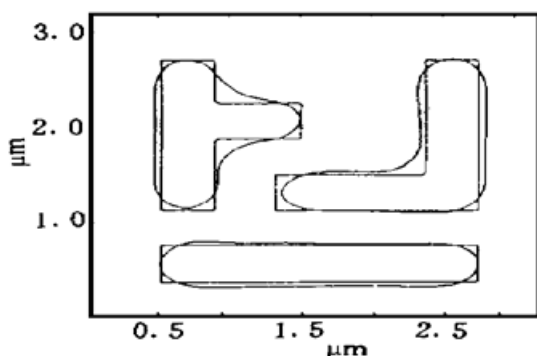


Fig. 8 Aerial image contour of design mask

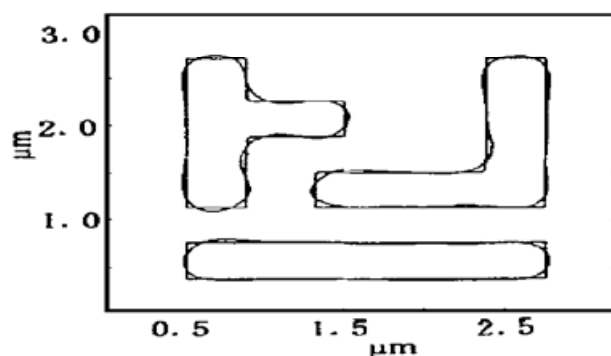


Fig. 9 Aerial image contour of grey level mask

为评价校正的效果, 本文使用畸变面积的相对偏差作为判据, 其定义为

$$E = \text{畸变面积} / \text{理想像轮廓面积}$$

由计算机模拟得知, 校正前 $E = 0.103$ 。使用同等尺寸的带亮暗衬线的掩模(在最佳光强阈值 $= 0.43$ 时)进行校正后得到 $E = 0.034$ 。使用带灰阶衬线的灰阶掩模校正后得到 $E = 0.009$ 。一般来说实际掩模制作往往有一定误差, 不过, 从前面的分析中可知, 灰阶等级对光刻图样的影响比较和缓, 而衬线的尺寸设计可相对较大以减小制作误差, 因此可以预料实际的校正效果与上述模拟结果相比不会产生很大偏差, 校正掩模的制作误差影响较小正是该方法的另一优点。

结论 通过光学邻近效应产生机理的分析, 提出了用带灰阶衬线的灰阶掩模实现光学邻近效应精细校正的方法, 分析了灰阶和灰阶衬线对线宽和边角的影响, 给出了一个光学邻近效应校正样例良好的模拟结果。从理论分析和模拟的结果看, 带灰阶衬线的灰阶掩模对于掩模的精细校正效果明显优于其它的校正方法, 它还具有优化速度较快、设计方便等优点。尽管这种灰阶掩模比一般二元掩模的制作过程略复杂些, 但掩模加工精度要求却相对有所降低,

因此, 对于需要精细校正或极细线条的掩模优化, 很有意义。

参 考 文 献

- [1] Otto O W, Garofalo J G, Yuan C M *et al.*. Automated optical proximity correction: A rule-based approach. *Proc. SPIE*, 1994, **2197** : 278~ 293
- [2] Inoue S. Automatic optical proximity correction with optimization of stepper condition. *Proc. SPIE*, 1995, **2440** : 240~ 251
- [3] Chen J F. Practical method for full-chip optical proximity correction. *Proc. SPIE*, 1997, **3051** : 790~ 803
- [4] Levenson M D. Extending the lifetime of optical lithography technologies with wavefront engineering. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1994, **33**(12B) : 6765~ 6773
- [5] 杜惊雷, 黄奇忠, 黄晓阳等. 光学邻近校正的新方法. *应用激光*, 1996, **17**(6) : 244~ 246
- [6] 玻恩 M, 沃耳夫 E. 光学原理. 下册, 北京: 科学出版社, 1981. 648~ 732

OPC with Grey Level Mask and Its Computer Simulation Study

Du Jinglei Huang Qizhong Yao Jun Su Jingqin Guo Yongkang
(Physics Departments, Sichuan University, Chengdu 610064)

Cui Zheng

(Rutherford Appleton Laboratory, U.K.)

Shen Feng

(Institute of Optics and Electronics, The Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610209)

(Received 9 February 1998; revised 2 April 1998)

Abstract Based on analysis of physical mechanism on optical proximity effect, a new method for fine correction of optical proximity effect is presented. The optimum of amplitude distribution on mask can improve distribution of spatial frequency spectrum. So printed image of high fidelity can be obtained. The simulation shows that the deviation between the contour of image after OPC and the contour of ideal image is less than 0.9%.

Key words optical proximity correction(OPC), grey level mask, grey level serif.