

# 用灰阶编码掩模实现邻近效应 精细校正的研究\*

杜惊雷<sup>1)</sup> 栗敬钦<sup>1)</sup> 罗克俭<sup>2)</sup> 张怡霄<sup>1)</sup> 郭永康<sup>1)</sup> 崔 铮<sup>3)</sup> 周崇喜<sup>4)</sup>

1), 四川大学物理系, 成都 610064

2), 内江教育学院, 内江 641002

3), Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Laboratory,  
Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK

4), 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** 提出了用灰阶编码的二元掩模代替灰阶掩模实现邻近效应精细校正的新方法, 并阐述了新方法的特点。讨论了灰阶编码掩模与灰阶掩模的等效关系, 给出了灰阶编码掩模实现光学邻近效应校正的模拟结果, 校正后的综合面积偏差比校正前减少了 10%。

**关键词** 光学邻近校正, 灰阶编码掩模, 光刻。

## 1 引 言

近几年来, 伴随着光刻线条的特征尺寸进入深亚微米范围, 影响光刻图样质量的邻近效应问题显得越来越引人注目, 大量关于光学邻近效应校正的研究被先后报道<sup>[1-6]</sup>。光学邻近校正等波前加工技术之所以受到光学界的重视, 其原因是亚半微米光刻中光学光刻技术尚有潜力可以挖掘。因此, 通过波前加工的方法(相移掩模、空间滤波、优化照明、光学邻近校正等)改善光学光刻图形质量有重要的现实意义。

在邻近效应校正的研究中, 掩模形状预畸变的校正方法被经常采用, 为了使掩模的优化更灵活, 更方便, 在文献[7]中, 已提出了利用带灰阶衬线的灰阶掩模实现光学邻近效应校正的方法。这种方法的优点在于:

- 1) 为光学邻近效应的校正增加了一个新自由度;
- 2) 可以合理地增强像的边角高频信息相对含量, 使校正更精细;
- 3) 加快了掩模设计的速度;
- 4) 提高了模拟计算的精度。

但是, 在掩模上增加一个灰阶, 将增加掩模的复杂性和制作成本。因此, 本文提出了一

\* 国家自然科学基金(69907003)、教育部博士点基金和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: 1998-11-09

种用灰阶编码的二元掩模替代灰阶掩模实现光学邻近校正的新方法。该方法不仅在掩模设计上体现了灰阶掩模的特点和优势,而且可采用电子束直写一次完成掩模的制作,无须使用镀膜或高能电子束敏化玻璃等其它技术<sup>[8]</sup>,只需使用掩模制作设备就能解决灰阶掩模加工的困难。文中利用标量衍射理论分析了这种灰阶编码的二元掩模在成像过程中与灰阶掩模的等效关系,给出了利用这种灰阶编码掩模实现光学邻近效应校正的模拟结果。

## 2 用灰阶掩模实现光学邻近效应校正的原理

目前,在亚深微米光刻过程的模拟中,矢量衍射理论正逐步发展。不过,在光学邻近效应校正的掩模设计优化中,尽管校正掩模上的许多微细结构已进入亚分辨范围,但模拟中仍广泛使用标量衍射理论,因为这样可提高模拟计算和掩模优化的速度,且未发现造成大的光刻线宽偏差。基于此,本文亦以标量衍射理论为依据对灰阶及其编码掩模的光刻成像过程进行模拟和分析。

在投影光刻中,掩模经曝光系统所成的空间像的光强分布对传递到基片上的图形质量有决定性影响,因此,空间像的模拟分析成为了光学邻近效应校正研究的重点。按标量衍射理论,部分相干成像的像面的光强分布为<sup>[9]</sup>

$$I(x_i, y_i) = \iiint U(f, g) U^*(f', g') T(f, g, f', g') \times \exp \{ 2\pi i [(f - f')x_i + (g - g')y_i] \} df dg df' dg', \quad (1)$$

或

$$I(x_i, y_i) = \iiint G(u, v) \exp [ 2\pi i (ux_i + vy_i) ] dudv, \quad (2)$$

其中

$$G(u, v) = \iint U(f, g) U^*(f - u, g - v) T(f, g; u, v) df dg,$$

为像面光强的频谱,

$$T(f, g; u, v) = \iint I_{\text{eff}}(x, y) K(x + f, y + g) K^*(x + f - u, y + g - v) dx dy,$$

为部分相干成像系统的交叉透射系数,  $f$ 、 $g$ 、 $u$ 、 $v$  为归一化空频,  $U(f, g)$  表示物振幅频谱,  $K(x + f, y + g)$  为成像系统的光瞳函数,  $I_{\text{eff}}(x, y)$  为有效照明源光强分布。上式表明,合理地调整物面的复振幅分布,即改变掩模图形的形状、灰阶或相位,将起到优化掩模图形的空间频谱分布及像面光强的空间频谱的作用,进而改善像面的光强分布,提高光刻成像的质量。带灰阶衬线的灰阶掩模即是利用掩模图形形状和灰度的变化实现光学邻近效应校正的。

## 3 灰阶编码掩模设计规则及分析

灰阶编码是用许多小的透光和不透光单元组成的图形替代理想灰阶图形的一种方法。通过控制透光单元面积的大小影响灰阶编码掩模的能量透过率,获得期望的灰阶[见图 8(a),一种对称开孔的灰阶编码掩模],产生类似于用黑白打印机输出的那种灰阶编码图像,以二元编码掩模来代替灰阶掩模,在光刻过程中起到灰阶掩模的效果。

下面介绍一下灰阶编码掩模的设计规则:

1) 灰阶编码部分的透光面积与该编码部分总面积之比应与此处设计的灰阶值有确定的

对应关系;

2) 每个透光单元的尺寸都要远小于成像系统的可分辨尺寸;

3) 通过透光孔的位置、形状、密集程度对其空间频谱的调节(特别是位相频谱部分)影响光刻成像图形的质量。

这里,规则 1) 是量化灰阶等级的基本规则,它保证了灰阶编码掩模与灰阶掩模有相同的能量透过率,即使编码灰阶掩模与灰阶掩模的起始输出总体相同。规则 2) 是为了确保灰阶编码掩模的空间像强度分布与灰阶掩模空间像强度分布相比偏差较小,即使编码灰阶掩模与灰阶掩模的最终实现的总体效果是相似的。而规则 3) 则需根据掩模的结构布局灵活设计编码方法,以获得最佳的邻近效应校正效果。下面以一维的灰阶线条和灰阶编码的线条为例对上述规则予以分析。

图 1(a) 是线宽为  $0.5 \mu\text{m}$  的灰阶和编码灰阶孤立线条的相干光照明物振幅频谱,图题中的  $d$  表示灰阶编码掩模上的相邻透光孔中心的间距。由于设计的灰阶线条的线宽和灰阶编码线条的线宽是相同的,因此两个频谱的低频部分基本相同[如图 1(a) 所示,两频谱的低频部分已重合,无法区分];又由于灰阶编码的线条内尚有许多微细结构,其高频成份较多,因此,两个频谱在高频部分差别十分明显。不过,由于成像系统有确定的数值孔径,它在成像过程中将起到一定的滤波作用,使两个频谱中的那些高频成分都不能通过系统[如图 1(b) 所示,有差异的高频部分已被滤掉],因此这些高频信息不会对空间像产生影响。

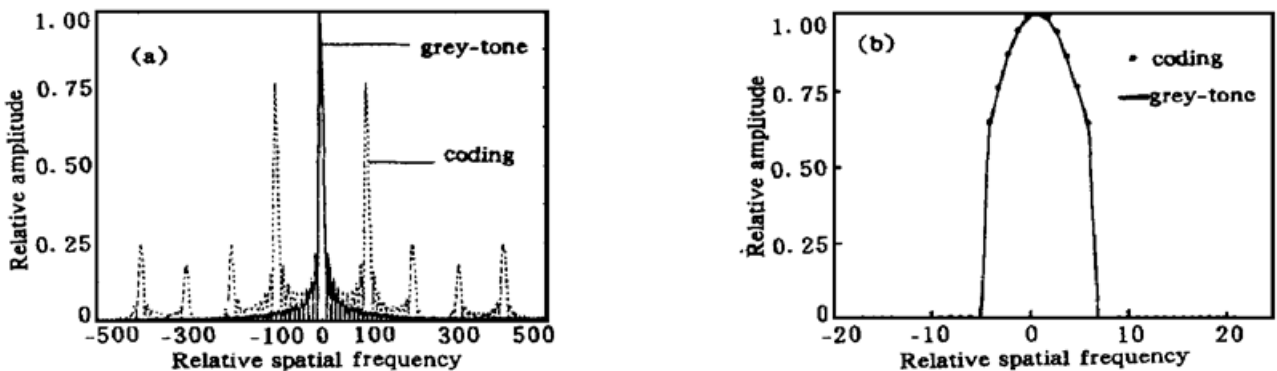


Fig. 1 Spectrum of object amplitude illuminated by coherent light source:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $0.5 \mu\text{m}$ , gray level is 40%,  $d = 50 \text{ nm}$ . (a) Spectrum before pupil filter, (b) Spectrum after pupil filter

光刻成像系统通常采用部分相干光源照明,依公式(1)和(2)分析了部分相干成像过程中灰阶编码与灰阶掩模的等效关系。图 2 是  $d = 50 \text{ nm}$  和  $d = 150 \text{ nm}$  的  $0.5 \mu\text{m}$  孤立线条的像

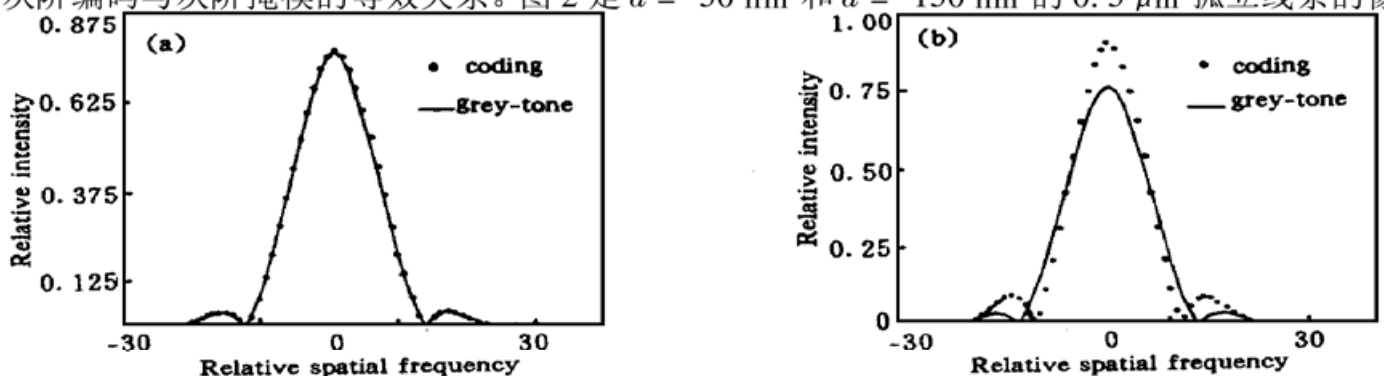


Fig. 2 Spectrum after pupil filter of image intensity illuminated by partial coherent light source:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $0.5 \mu\text{m}$ , gray level is 40%, (a)  $d = 50 \text{ nm}$ , (b)  $d = 150 \text{ nm}$

面光强频谱, 图 3 是其对应的空间像的光强分布; 图 4 则是  $d = 50 \text{ nm}$  和  $d = 150 \text{ nm}$  的  $1 \mu\text{m}$  孤立线条的像面光强的频谱。从图中可以看出, 当  $d$  远小于系统的可分辨尺寸时, 其灰阶编码掩模的像面光强频谱和灰阶掩模的像面光强频谱完全重合[图 2(a)、图 4(a)], 因此对应的空间像光强分布也相同[图 3(a)]。而当  $d$  逐渐接近系统的可分辨最小尺寸时, 其灰阶编码掩模的像面光强频谱和灰阶掩模的像面光强频谱便有了一定差异[图 2(b)、图 4(b)], 因此空间像的强度分布也有所不同[图 3(b)]。这一结果表明, 对于部分相干成像的光刻系统而言, 只要灰阶编码掩模的  $d$  远小于系统的可分辨尺寸, 灰阶编码掩模和灰阶掩模的成像效果能够保证一致; 而采用不同的编码方法生成的灰阶编码掩模会同时影响频谱中的相位分布和振幅分布, 因而对空间像的调节作用与灰阶掩模相比则可能有少许差异, 这一特点在邻近效应的精细校正和利用灰阶编码掩模制作微光学元件中可能有一定应用。

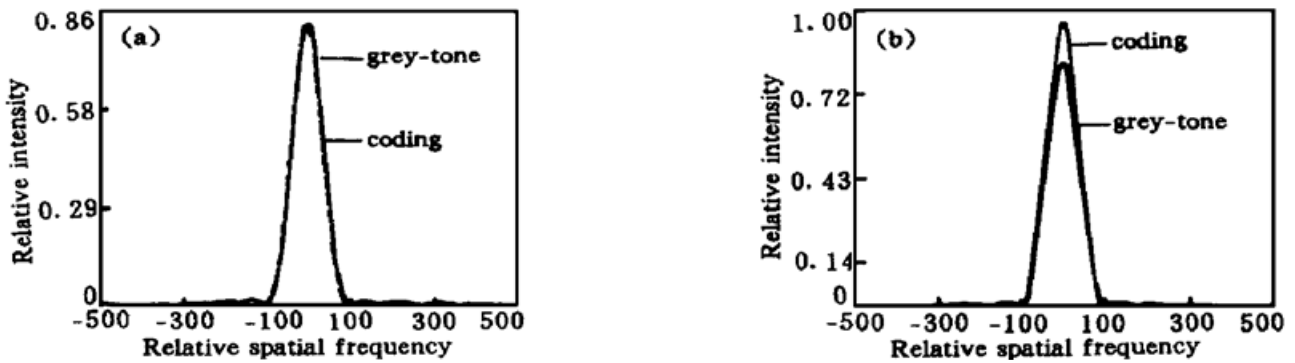


Fig. 3 Image intensity illuminated by partial coherent light source:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $0.5 \mu\text{m}$ , gray level is 40%, (a)  $d = 50 \text{ nm}$  and (b)  $d = 150 \text{ nm}$

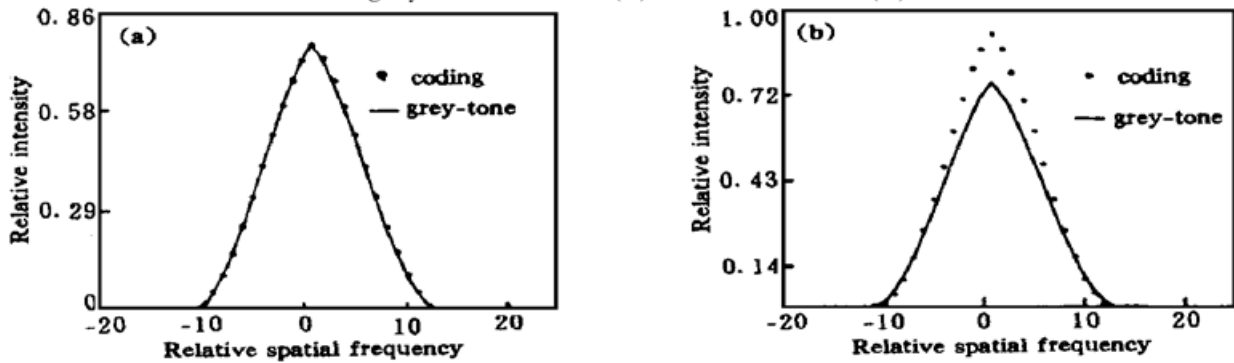


Fig. 4 Spectrum of image intensity illuminated by partial coherent light source:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $1.0 \mu\text{m}$ , gray level is 40%, (a)  $d = 50 \text{ nm}$  and (b)  $d = 150 \text{ nm}$

对于灰阶编码掩模中的相邻透光孔中心间距  $d$  远小于系统的分辨尺寸的情况, 本文比较

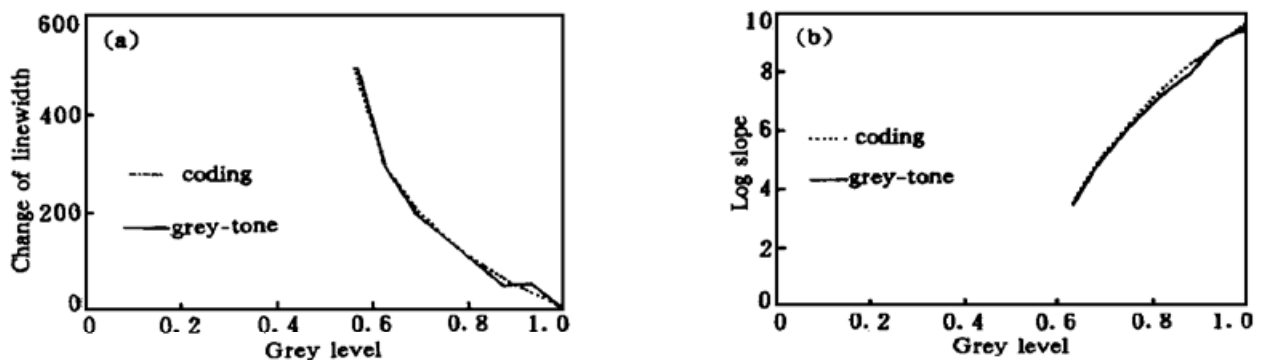


Fig. 5 Comparison of spatial image between gray-tone feature and coding feature:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $0.5 \mu\text{m}$ ,  $d = 25 \text{ nm}$ . (a) Change of linewidth, (b) Log slope

了灰阶编码掩模与灰阶掩模对线条的线宽、对数斜率和最大光强的调制作用。图 5(a) 是给定阈值的  $0.5 \mu\text{m}$  灰阶编码的孤立线条及灰阶孤立线条的线宽变化与灰阶等级的关系, 图 5(b) 是给定阈值的  $0.5 \mu\text{m}$  灰阶编码的孤立线条的对数斜率及灰阶孤立线条的对数斜率与灰阶等级的关系, 图 6 是给定阈值的  $0.5 \mu\text{m}$  灰阶编码的孤立线条及灰阶孤立线条的像面最大光强与灰阶等级的关系。图中表明, 编码灰阶和灰阶对像的调制作用基本相同。

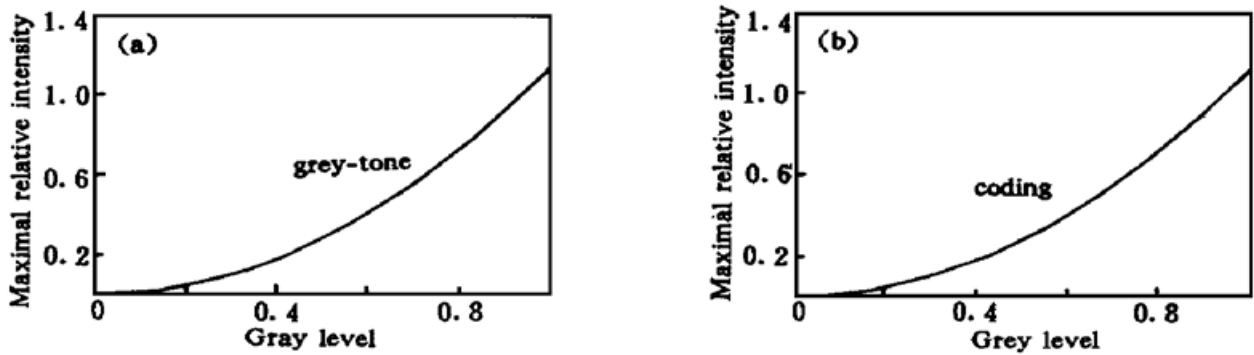


Fig. 6 Comparison of maximum intensity of spatial image between gray-tone feature and coding feature:  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\sigma = 0.5$ ,  $\text{NA} = 0.5$ , linewidth =  $1 \mu\text{m}$ , grey level is 40%,  $d = 25 \text{ nm}$

#### 4 用灰阶编码掩模进行邻近效应校正的模拟

为了检验用灰阶编码掩模实现光学邻近效应校正的有效性, 图 7(a) 给出了一个设计的不透明掩模, 图 7(b) 是其空间像的轮廓。从图 7(b) 可以看出, 其空间像的畸变十分明显, 计算可得其相对综合面积偏差  $E = \frac{\Delta A_i + \Delta A_r}{A_d} = 17.7\%$ 。式中, 正如图 7(b) 所示的,  $\Delta A_i$  表示由于邻近效应致使的应曝光部分而未能曝光的面积,  $\Delta A_r$  为额外曝光部分的面积,  $A_d$  表示理想像的面积。

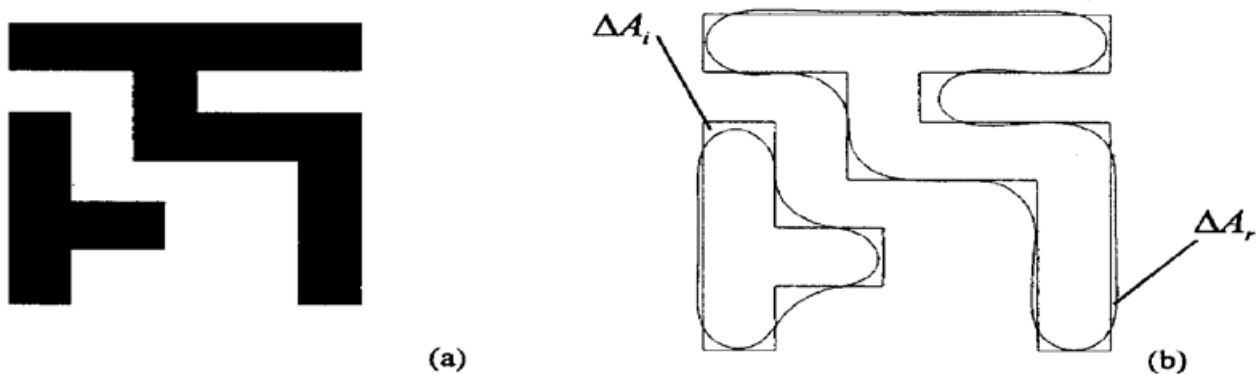


Fig. 7 (a) design mask and (b) its spatial image contour (linewidth =  $0.4 \mu\text{m}$ ,  $\lambda = 365 \text{ nm}$ ,  $\text{NA} = 0.5$ ,  $s = 0.5$ )

依据上节对灰阶编码掩模的讨论结果, 通过对图 7(a) 所示掩模进行灰阶和形状的模拟优化, 设计了一个实现光学邻近效应校正的灰阶编码掩模。其中图 8(a) 是该灰阶编码掩模, 图 8(b) 是灰阶编码掩模的一部分, 图 9(a) 是校正后的空间像的轮廓, 图 9(b) 是曝光显影后的抗蚀剂图样的一部分。

从空间像轮廓图中可以看出, 校正后的空间像的像质有很大提高, 通过计算可知其综合面积偏差  $E = 6.8\%$ , 比校正前减小了 10% 以上。这一模拟结果表明, 灰阶编码掩模在光学邻近效应校正方面有相当的潜力。

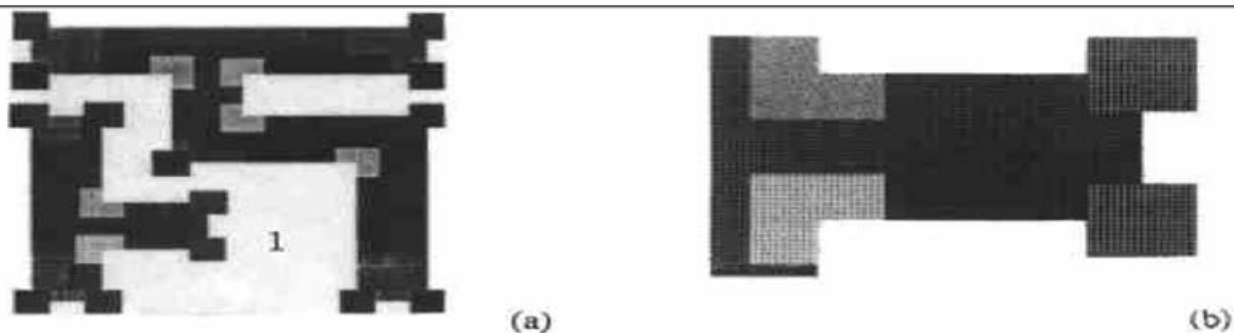


Fig. 8 (a) A coding mask, and (b) the part 1 of the Fig. 8(a), which has been zoomed

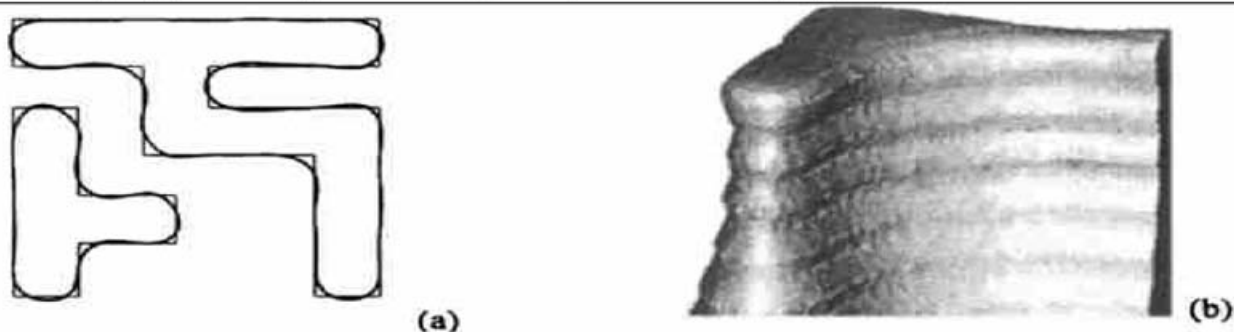


Fig. 9 (a) Contour after OPC using coding mask and (b) 3-D relief profile of resist related to the part 2 of the Fig. 8(a) (photoresist is JSR-IX500)

## 5 灰阶编码掩模的特点分析

通过对灰阶编码掩模在光学邻近效应校正中的作用分析,发现在光刻中应用灰阶编码掩模具有以下一些特点:

1) 由于灰阶编码掩模产生的第一步是灰阶掩模的设计,因此它保持了灰阶掩模优化灵活、方便的特点;把传统光学邻近效应校正方法对掩模的形状的优化推广到对物面的复振幅的优化,为邻近效应校正增加了一个新自由度,因而可在计算上适当地减少抽样点数而不影响校正的结果,提高了掩模的设计速度。

2) 提高了模拟计算的精度:对于光刻成像的模拟计算,掩模被量化后,模拟计算的线宽精度与线条上的抽样点数有关。而由于掩模的灰阶值理论上可连续变化,因此在不增加抽样点的前提下,通过灰阶值的优化可提高计算精度,并获得比传统的光学邻近效应校正掩模更高的校正精度。

3) 利用编码规则的优化可以合理地增强像的边角高频信息相对含量:通过控制透光孔的位置、形状、面积的大小(密集程度),灰阶编码掩模能比灰阶掩模更有效改变物频谱的相位及振幅信息,这将影响像面光强的分布,因此设计合理的编码掩模能使校正更精细。

4) 灰阶编码掩模的加工比传统的光学邻近效应校正掩模要复杂些:尽管与灰阶掩模的加工相比,灰阶编码掩模有很大优势,可利用微细加工技术一次制作灰阶编码掩模,但与传统的光学邻近效应校正掩模相比它却延长了掩模制作的时间。不过由于灰阶编码掩模在精细邻近效应校正中存在一定的优势,可弥补掩模加工时间长的不足。

**结 论** 讨论了灰阶掩模及其编码掩模实现光学邻近效应校正的机理,分析了灰阶编码掩模与灰阶掩模的等效关系,给出了一个灰阶编码掩模样例模拟进行邻近效应校正的结果,校正后的综合面积偏差比校正前减少了 10%。

目前, 由于加工的线条越来越细, 光刻加工过程中其它因素的影响已不能忽视, 包含邻近效应的精细校正显得越来越重要。在这种条件下, 寻找能够实现精细校正的一种简单有效的快速校正方法十分必要。灰阶编码掩模在某种程度上, 增加了邻近效应校正的自由度, 缩短了模拟计算的时间, 提高了邻近效应校正的精度, 有利于对邻近效应及其校正机理的分析, 与相移掩模和灰阶掩模相比其掩模加工相对简单, 有一定的应用前景, 本文作者将进一步对这种掩模进行邻近效应校正的实验研究。

### 参 考 文 献

- [1] Otto O W, Garofalo J G, Low K K *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] Cobb N, Zakhor A. Fast sparse aerial image calculation for OPC. *Proc. SPIE*, 1995, **2621**: 534~ 545
- [4] Garofalo J, Demarco J, Bailey J *et al.*. Reduction of ASIC gate-level line-end shortening by mask compensation. *Proc. SPIE*, 1995, **2440**: 171~ 183
- [5] Chen J F, Laidig T, Wampler K E *et al.*. Practical method for full-chip optical proximity correction. *Proc. SPIE*, 1997, **3051**: 790~ 803
- [6] Li J, Bernard D, Rey J C *et al.*. Model based optical proximity correction including effects of photoresist processes. *Proc. SPIE*, 1997, **3051**: 643~ 651
- [7] 杜惊雷, 黄奇忠, 姚 军等. 灰阶掩模实现光学邻近校正及计算模拟研究. *光学学报*, 1999, **19**(5): 698~ 702
- [8] Daschner W, Stein R, Long P. One-step lithography for mass production of multilevel diffractive optical elements using high energy beam sensitive (HEBS) gray-level mask. *Proc. SPIE*, 1996, **2689**: 153~ 155
- [9] Hopkins H H. On the diffraction theory of optical images. *Proc. Roy. Soc. Lond. Ser. (A)*, 1953, **217**: 408~ 432

## Fine Correction of Optical Proximity Effect by Using Gray-Tone Coding Mask

Du Jinglei<sup>1)</sup>    Su Jingqin<sup>1)</sup>    Luo Kejian<sup>2)</sup>

Zhang Yixiao<sup>1)</sup>    Guo Yongkang<sup>1)</sup>    Cui Zheng<sup>3)</sup>    Zhou Chongxi<sup>4)</sup>

1), Department of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064

2), Neijiang Education Institute, Neijiang 641002

3), Central Microstructure Facility, Rutherford Appleton Laboratory,  
Chilton, Didcot, OX11 0QX, UK

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

(Received 9 November 1998)

**Abstract** A new method has been proposed to realize fine optical proximity correction (OPC) with gray-tone coding mask instead of gray-tone mask. The advantages of the new method are analyzed. The coding rules of the gray-tone coding mask and the relationships between the gray-tone coding mask and gray-tone mask have been discussed. OPC simulation results are given with the gray-tone coding mask and the synthesis area deviation of aerial image drops 10% after OPC.

**Key words** OPC, gray-tone coding mask, photolithography.