

亮暗衬线法校正邻近效应及其实验研究*

杜惊雷 栗敬钦 姚 军 张怡霄 高福华 杨丽娟
(四川大学物理系,成都,610064)
崔 铮

(Central Microstructure Facility ,Rutherford Appleton Laboratory ,Chilton ,Didcot ,OX11 0QX ,U K)

摘要: 光学光刻中的邻近效应校正是实现亚微米光刻的必要手段。作者基于波前加工的思想,提出亚分辨亮暗衬线结合辅助线条实现邻近效应校正的方法,分析了其校正机理,采用这种新方法,在可加工 $0.7\mu\text{m}$ 光刻图形的 I 线投影曝光装置上加工出了 $0.5\mu\text{m}$ 的光刻图形,取得了较好的实验结果,并与其它邻近效应的校正方法进行了比较。

关键词: 邻近效应 光学邻近校正 亚微米光刻

Bright and dark figure method for OPC and its experimental research

Du Jinglei , Su Jingqin , Yao Jun , Zhang Yixiao , Gao Fuhua , Yang Lijuan
(Department of Physics ,Sichuan University ,Chengdu ,610064)
Cui Zheng

(Central Microstructure Facility ,Rutherford Appleton Laboratory ,Chilton ,Didcot ,OX11 0QX ,U K)

Abstract: Optical proximity correction is an effective and essential tool in submicron photolithography. In this paper ,based on the theory of wavefront engineering ,we present a new correction method to reduce proximity effects by adding bright and dark figure or feature on the mask and analyzing the mechanism for correcting proximity effect. Some $0.5\mu\text{m}$ features have been got by using the new correction method in a I line projection system which can only fabricate $0.7\mu\text{m}$ figure without OPC. The satisfied experiment results are obtained and the advantages or disadvantages are discussed by using different OPC method.

Key words : proximity effects OPC submicron photolithography

引 言

伴随大规模集成电路不断向微型化和高集成度方向发展,光刻图形的特征尺寸越来越小,对光刻图形的加工质量的要求越来越高。因此,旨在改善光刻图形质量,推进光刻分辨极限的研究受到广泛关注。

90 年代发展起来的波前工程学,是基于信息光学、微电子学、计算机图形学等多学科的基本原理而发展起来的新技术。它采用直接优化光刻图形的方法去突破常规光刻系统的极限,实现光学超分辨。目前,波前工程包括掩模优化技术(相移掩模和光学邻近校正)、照明优化技术、空间滤波、自适应光学等技术。应用这些技术在不更新现有光刻设备的情况下,即可提高光刻分辨力,因此,包括光学邻近校正(optical proximity correction,简称 OPC)在内的波前工程学研究已成为光刻领域研究的热点。

* 微细加工光学技术国家重点实验室基金、国家自然科学基金及教育部博士点基金资助。

基于波前加工的思想,我们先后提出了灰阶掩模及灰阶编码掩模的邻近效应校正方法^[1,2]。并提出一种在掩模上综合添加亚分辨亮和暗衬线及辅助线条以实现邻近效应校正的新方法,探讨了其校正策略和机理,并比较分析了各种邻近效应校正方法优缺点。最后,通过曝光实验验证了该方法的有效性,在可加工 $0.7\mu\text{m}$ 光刻图形的I线投影曝光装置上制作出了 $0.5\mu\text{m}$ 可实用的光刻图形,取得了较好的实验结果,作为对照,我们也给出了采用其它方法的校正实验结果。

1 亮暗衬线结合辅助线条法的校正机理

掩模的理想像强度频谱分布取决于掩模上的线条的特征尺寸、形状和分布规律,其中边角或细锐的线条为频谱提供较多的高频成分。但对于衍射受限的空间像,并非所有的高频成分都能通过系统到达像面对应的边角处,这将导致空间像边角附近的光强分布失配,造成其边角圆化或畸变。图1是一个方形触点的空间像、强度频谱、添加亮衬线和暗衬线及辅助线条的掩模和校正后的空间像、离焦情况的分析。从图1b~图1e中可以看出,理想像的强度频谱幅值原本沿各向有不同的分布,但由于衍射受限,实际像强度频谱的幅值沿各方向的分布已基本相同,只剩下零级光。计算分析可知,各方向零级光的能量也仅占理想像强度频谱零级光能量的48%~52%,因此,严重的能量损失导致空间像发生圆化和收缩是必然的。

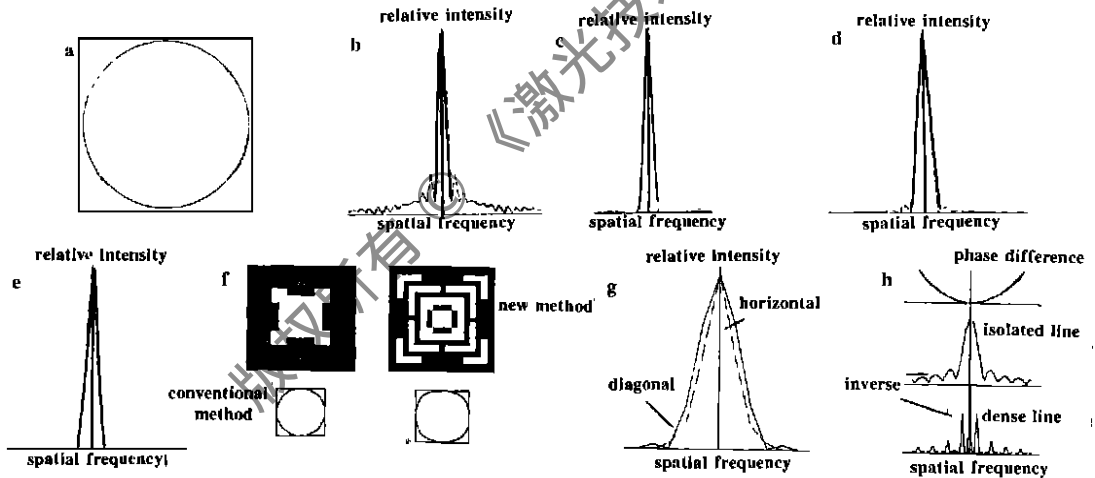


Fig. 1 a - square contact and its aerial image ,b - spectrum of ideal image on horizontal axis ,c - spectrum of aerial image on horizontal axis ,d - spectrum of ideal image on diagonal axis ,e - spectrum of aerial image on diagonal axis ,f - OPC mask and aerial image after OPC ,g - spectra of aerial image on horizontal axis and diagonal axis by using new OPC method ,h - defocus analysis (design feature size = 450nm ,NA = 0.5 , $\sigma = 0.5$, threshold = 0.3 , $\lambda = 365\text{nm}$)

通常邻近效应校正的方法主要是预畸变掩模图形。具体设计掩模图形时,一般采用线条形状偏置或添加亚分辨辅助线条的方法^[3~5],由于所添加衬线或线条的类型和形状单一,不利于像面光强分布的整体优化,较难实现邻近效应精细校正。而灰阶掩模虽然可提高邻近效应的校正精度,但加重了掩模制作的难度。灰阶编码掩模能够实现精细校正,其掩模加工也可采用电子束直写完成,有较大优点。其不足之处是掩模加工时间较长,直写过程中的电子束邻近效应对灰阶等级和精度有一定限制,此外,投影光刻时需要相对大一些的曝光剂量。为寻找改善邻近效应校正精度和减小掩模加工及投影曝光工艺困难的平衡点,我们发展了在掩模上添加亮暗衬线及辅助线条的邻近效应校正新方法,一定程度地实现了掩模加工难度和邻近效

应校正效果的平衡。分析表明,在掩模边角处添加一些亮暗相间的衬线或辅助线条能方便地调整频谱的分布情况(特别是位相分布),可使空间像边角附近的光强变化较为陡直,有助于像质的改善和邻近效应的校正精度的提高(参见图 1f、图 1g,这里添加的亮和暗衬线宽度约 50nm)。

曝光焦深的大小是影响光刻图形质量的一个重要因素。模拟表明,密集线条空间像光强曲线的斜率要比孤立线条空间像光强曲线的斜率相对大些,有助于增大曝光焦深^[6]。为了缓解像面离焦所致位相分布畸变对曝光图形的影响,我们采用添加亮衬线和暗衬线及辅助线条可有效调整像强度频谱的位相分布,以扩展曝光过程的焦深。图 1h 显示了离焦等效的位相变化对孤立线条和亮暗相间的密集线条成像的影响。从图中可以看出,离焦引起的位相偏差曲线是一条抛物线,因此,成像过程中的高频成分受到的影响较为严重。当曝光线条较窄时,通常由于系统衍射受限,一般只有零级光和与零级光位相相反的一级光能够参与成像。对于孤立线条的一级光,因离焦影响了其位相分布,在像面上它与零级光的相干相消作用减弱,线条边缘光强曲线较为平缓,边缘轮廓质量下降。而添加了亮暗辅助线条或衬线的线条(相当于密集线条),其频谱分布发生了变化,由于一级光的衍射角相对减小,离焦对它的位相影响减弱,在像面上一级光与零级光仍有相当的相干相消作用,空间像线条边缘光强曲线的斜率较大,线条边缘轮廓相对较好。可见,使用添加亮暗辅助线条或衬线的方法在改善曝光焦深方面可发挥重要作用。

经模拟分析,我们确定了使用该方法进行邻近效应校正的策略,即根据需要可同时使用亚分辨亮和暗辅助线条调整疏密线条的线宽偏差及同时使用各种类型的亮衬线和暗衬线以获得较为清晰的边角轮廓。其中衬线和辅助线条的尺寸、位置可利用计算机优化以获得最佳的空间像及抗蚀剂图样。

2 模拟校正结果

下面我们采用新方法进行光学邻近效应的模拟校正。如图 2 所示,这里设计线条的线宽为 $0.4\mu\text{m}$,曝光波长为 365nm ,物镜的数值孔径 $\text{NA} = 0.5$,曝光系统的部分相干因子 $\sigma = 0.5$ 。根据空间像的光强分布情况在图 2c 中的 1, 2, 3, 4 等位置及外边角处添加一些亮衬线或暗衬线,衬线宽度在 $50 \sim 150\text{nm}$ 之间,并在适当位置添加了辅助线条^[6]。分析表明,校正后的相对面积偏差 $E = 5.5\%$,远小于工业光刻的质量要求,其相对面积偏差比校正前小了 7 个百分点,模拟校正效果是令人满意的。

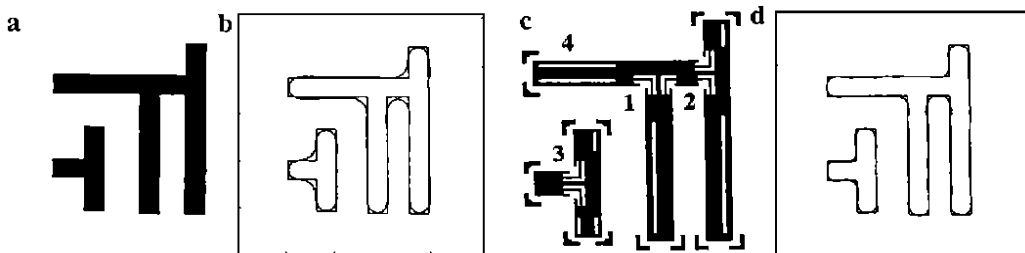


Fig. 2 a - design mask, b - correction mask, c - simulation results before OPC, d - simulation results after OPC

3 曝光实验及其结果分析

为确认该方法的有效性,我们采用这种添加亮暗衬线和辅助线条的校正方法进行了投影光刻实验。同时,我们也采用添加方形衬线的掩模和灰阶编码掩模进行了邻近效应校正实验。曝光实验使用的是中国科学院光电技术研究所研制的 I 线投影曝光装置。该装置曝光波长 365nm,数值孔径为 0.42,照明光源的部分相干因子为 0.6,投影曝光的缩小倍率为 5 倍。常规照明下,系统设计的可分辨尺寸为 0.8 μ m,最佳条件下可曝光出 0.7 μ m 的线条。其像场范围 15mm \times 15mm,调焦精度 0.1 μ m,对位精度为 0.08 μ m。实验中采用正性抗蚀剂 S9912,显影液是四甲基氢氧化铵。实验结果主要在四川大学分析测试中心由 Hitachi 公司生产的 S450 扫描电子显微镜上测量。掩模由我们采用自编的 Lithund 邻近校正软件设计,线条的设计宽度为 0.52 μ m,由英国卢瑟福国家实验室微结构中心用 50keV 的电子束直写系统加工完成。

按照添加暗亮衬线和辅助线条的校正策略,我们设计的未校正和 OPC 掩模如图 3a、图 3b 所示。模拟计算显示,邻近效应校正后,相对面积偏差可减少 7%。图 3 是设计掩模、校正掩模和实验结果的电镜照片,我们测量了校正前后的线宽偏差、线长偏差、相对面积偏差等(见图 4),测量结果见表 1。

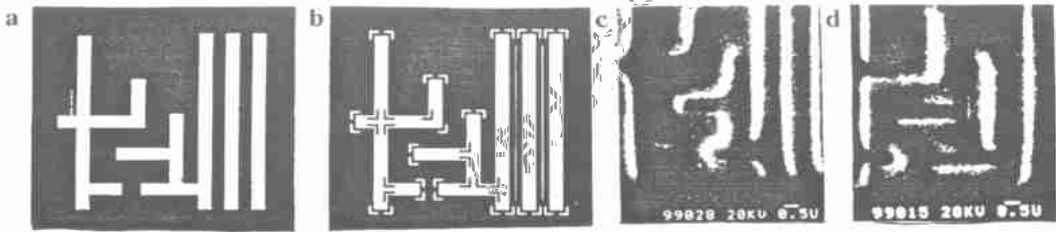


Fig. 3 a - design mask ,b - correction mask ,c - printed pattern without OPC ,d - printed pattern without OPC

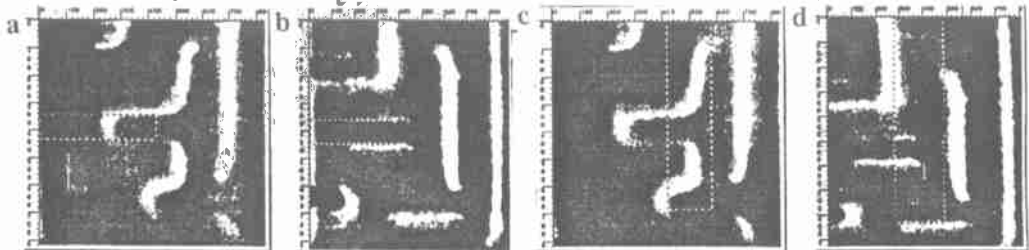


Fig. 4 a - line width measurement of printed pattern without OPC ,b - line width measurement of printed pattern after OPC ,c - line length measurement of printed pattern without OPC ,d - line length measurement of printed pattern after OPC

Table 1 Comparison of the experiment results before OPC and after OPC

measurement results	conventional mask	adding square serifs	adding bright and dark serifs with assistant features	gray tone coding mask
typical line width	550nm	580nm	530nm	513nm
average of line width deviations	57nm	57nm	15nm	22nm
maximum line width deviation	80nm	70nm	30nm	40nm
line length deviation	330nm	22nm	40nm	80nm
relative area deviation in a given rang	15.5 %	12.6 %	8.4 %	7 %

从图 2、图 3 和表 1 中可以看出,采用添加亚分辨亮暗衬线及辅助线条的方法,校正效果很好,与模拟的校正结果基本吻合。校正后相对面积偏差显著减小,其它偏差量也大幅度减小。为了与其它校正方法进行对比,我们在表 1 中也列出了在相同实验条件下,其它两种方法的邻近效应校正结果。由表 1 可知,亮暗衬线法的校正效果明显好于普通的方形衬线偏置法的校正效果。校正后的线宽偏差、相对面积偏差都比采用方形衬线偏置法的小。与采用灰阶编码的方法相比,尽管灰阶编码掩模可在特定的曝光条件下实现更高的校正精度,但通常的实验条件对于灰阶编码掩模来说显得曝光剂量不足,故表 1 显示采用亮暗衬线法并不比采用编码灰阶掩模法的校正效果差,即在相同常规曝光条件下,亮暗衬线法最为简单有效。我们在实验中还发现,亮暗衬线法和灰阶编码的方法都可有效地增大曝光焦深,在有一定离焦的情况下,校正后的光刻图形畸变仍在 10% 的偏差容许极限之内,而添加方形衬线的方法则无此效果。

总的来看,利用掩模设计图形偏置改善光刻图形质量和曝光焦深有一定局限。灰阶编码方法校正精度可以很高,更能有效地改善焦深,但掩模制作精度要求高不易控制、加工时间长,并需在曝光实验中加大曝光剂量,否则,难以取得最佳的校正效果。亮暗衬线法利用在掩模上添加亚分辨结构亮和暗衬线及辅助线条改善频谱中各种频率成分的能量和位相分布,可有效地调整像面光强分布。与那些添加的方形衬线或其它单一类型的衬线和辅助线条的邻近效应校正方法相比,这种方法可提高校正精度和曝光焦深;与灰阶掩模和灰阶编码掩模相比,其掩模加工和投影曝光实验工艺又相对简单,可平衡加工复杂性与邻近效应校正精度间的矛盾。总之,邻近效应的校正应根据对光刻图形质量及曝光焦深的不同要求,并考虑工艺加工的难易灵活选择校正方法和策略,亮暗衬线法的提出及其校正实验的成功则为这种选择提供了新的余地。

4 结 论

基于波前加工技术的思想,发展了利用空间像光强分布的优化实现邻近效应的校正策略,利用添加亮暗衬线和辅助线条的邻近效应校正方法及其它方法,进行了光学邻近效应的校正实验,在可加工 $0.7 \sim 0.8 \mu\text{m}$ 的投影光刻设备上制作出 $0.5 \mu\text{m}$ 光刻图形。这种添加亮暗衬线及辅助线条的方法的提出和应用为提高光刻图形质量,利用该曝光装置加工亚半微米光刻线条提供实验依据。

感谢中国科学院光电技术研究所四室的许多同志对本工作的支持。

参 考 文 献

- 1 杜惊雷,黄奇忠,郭永康 *et al.* 光学学报,1999;19(5):698~702
- 2 Du J L, Huang Q Z, Su J Q *et al.* Microelectronic Engineering, 1999;46:73~76
- 3 Mack C A, Kaufman P M. J Vacuum Sci & Technol, 1988;B6(6):2213~2206
- 4 Starikov A. SPIE, 1988;1088:34~46
- 5 Garofalo J, Otto O, Cirelli R *et al.* SPIE, 1995;2440:302~312
- 6 Chen J F, Laidig T, Wampler K E *et al.* SPIE, 1997;3051:790~803

作者简介:杜惊雷,男,1964年出生。副教授,博士。从事信息光学、波前工程、激光、全息防伪等方面的研究。