

一种快速光刻模拟中二维成像轮廓提取的新方法*

陈志锦¹ 史 峰¹ 王国雄² 付 萍³ 严晓浪¹

(1 浙江大学超大规模集成电路设计研究所, 杭州 310027)

(2 鞍山钢铁学院电子与信息工程学院, 鞍山 114002)

(3 华东地质学院信息工程系, 临川 344000)

摘要: 在一种新颖的快速光刻模拟算法的基础上, 提出了一种新的基于稀疏空间点光强计算的二维成像轮廓提取算法。该算法能够根据版图特点合理选择采样线的位置, 有效地确定轮廓线存在的范围, 并根据在采样线上光强单调分布的特性来快速地搜寻轮廓点。实验表明, 这是一种快速高效的轮廓提取方案, 能够适应光学邻近校正中巨大的运算量。

关键词: 光学邻近校正(OPC); 光刻模拟; 二维轮廓提取

EEACC: 2550G

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 0253-4177(2002)07-0766-06

1 引言

集成电路的最小线宽和最小间距变得越来越小, 当曝光线条的特征尺寸接近曝光系统的理论分辨极限时, 硅圆片表面成像将产生明显的畸变, 即产生所谓的光学邻近效应(OPE, optical proximity effect)^[1], 从而导致光刻图形质量严重下降。任何掩模图形和硅圆片表面实际印刷图形之间的不一致, 即 IC 版图图形转移的失真, 都会影响最后产品的性能参数, 并降低集成电路的生产成品率。为了使光刻的结果能最好地符合版图的原始设计, 工业界提出了对掩模作预失真处理或在掩模上加一层相位转移模(PSM, phase shifting mask)^[2,3]等掩模补偿方法^[4]。目前世界上所有重要的集成电路生产厂家的 0.18μm 栅工艺都使用了以上提到的技术。在 0.15μm 以下的工艺中, 掩模补偿技术更是不可缺少, 而且会被使用到每块芯片的多个版图层上。

光学邻近效应校正(OPC, optical proximity correction)^[5]是掩模补偿技术中最重要的组成部分, 是目

前超深亚微米集成电路设计和生产中最重要、最常用的掩模补偿方法, 它的基本原理是预先改变掩模上图形的形状来补偿由于光学衍射和工艺的非线性所引起的失真。在相同的生产条件下使用这种技术后, 能用现有的光刻设备制造出具有更小特征尺寸线条的集成电路。为了在亚波长光刻的条件下正确地估计出硅片上的成像并指导 OPC 技术的使用, 光刻成像模拟在现代集成电路生产中是不可缺少的。随着集成电路的规模接近千兆级, 往往一层版图的数据量就会达到千兆字节, 这种情况要求实用型的光刻成像模拟系统必须是快速高效的。以 UC Berkeley 的 SPLAT 的基本算法框架为出发点, 我们成功地开发了功能更强的光刻成像模拟软件 CSPLAT。CSPLAT 在 SPLAT 的基本功能上增加了快速光强模拟、运算核分解生成、矩阵快速变换、后成像参数优化等全新的功能。提取硅片上成形区域的二维轮廓是集成电路光刻快速模拟过程中的最后一个环节, 本文提出了一种使用 CSPLAT 的稀疏空间点成像模拟进行了二维成像轮廓快速提取的新算法, 该算法的实现也是 CSPLAT 的一个重要组成部分。

* 国家自然科学基金资助项目(批准号: 60176015)

陈志锦 男, 1979 年出生, 硕士研究生, 从事集成电路 CAD 的研究。

史 峰 男, 1967 年出生, 副教授, 从事集成电路 CAD 领域的研究工作。

2001-10-17 收到, 2002-01-08 定稿

©2002 中国电子学会

2 光刻成像的基本原理

图1是用国际上较为常用的波长为248nm的DUV光源光刻机来作180nm宽的线条,可以看到光刻结果和原始版图有很大的畸变。图2显示了某孤立线条经OPC后的模拟结果。

图1和图2中的光学参数为:数值孔径0.5,相干系数0.5,波长248nm。图1中线宽和最小线距均为180nm;图2中原线条长宽为180nm×800nm,经过预失真后,在线条两端分别加上了锤头状辅助图形。

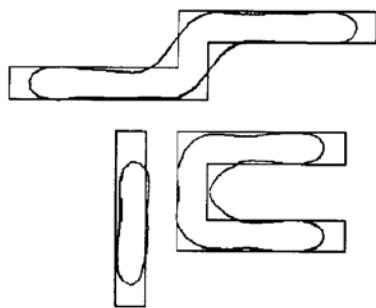


图1 未经 OPC 的版图与其模拟结果

Fig. 1 Some patterns and the pre-OPC simulation result



图2 经 OPC 的版图与其模拟结果

Fig. 2 An isolated line and its post-OPC simulation result

光刻成像模拟问题很大程度上可以表达为部分相干光在带像差的孔径系统中的投射成像问题。为了获得在给定光学系统条件下掩模的二维光学成像结果,我们可以借助统计光学中的Hopkins公式进行计算^[6,7]:

$$I(f, g) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} T(f' + f, g' + g, f', g') \times F(f' + f, g' + g) F^*(f', g') df' dg' \quad (1)$$

$$I(x, y) = F^{-1}\{I(f, g)\} \quad (2)$$

其中 $I(f, g)$ 是输出光强 $I(x, y)$ 的二维傅里叶变换; $F(f, g)$ 是掩模透射函数 $F(x, y)$ 的二维傅里叶变换; $T(f', g', f'', g'')$ 是光学系统的透射交叉系数

(TCC, transmission cross coefficient), 它是一个与掩模形状完全无关的四维函数,描述了从光源到像平面中包括照明系统和成像系统在内的整个光学系统的作用,其表达式为:

$$T(f', g', f'', g'') = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} J(f, g) K(f + f', g + g') \times K^*(f + f'', g + g'') df dg \quad (3)$$

其中 $J(f, g)$ 是光源的互强度函数; $K(f, g)$ 是成像系统的频率响应函数。

Hopkins公式显示了光刻机系统是一种双线性系统,其本质上是非线性的,另外更由于光强的分布是二维模拟量,在整个成像处理过程中会有较大的运算量。

UC Berkeley 的光学模拟软件 SPLAT 是著名的光刻成像模拟工具,它可以模拟指定的一个矩形区域内或是一条直线上采样点的光强分布。但是在 OPC 等应用中,为了寻找合适的掩模补偿图形,必须迭代计算大量的空间稀疏分布的试探点成像^[8],用 SPLAT 来处理这种稀疏空间点并不合适。其原因是, SPLAT 必须将整个掩模作二维 Fourier 变换处理后转换成频域信号,进行 Hopkins 积分,再作 Fourier 逆变换回到空间域从而获得指定矩形区内或一条直线上的一批等间距采样点光强值,而在这一批同时计算得到的采样点中,往往大部分点上的光强值是我们所不关心的。

近年来,国际学术界和工业界正在利用各种数学方法对 Hopkins 公式进行不同的变换,做不同程度的近似,以求实现快速高效的光刻模拟。目前比较主流的做法是将双线性光学系统分解成为一组空间域卷积核,再通过对版图的空间域卷积来简化单点光强的模拟过程^[8]。在这方面我们也进行了深入的理论研究,并以自己的基于有限范围空间运算核的快速模拟理论为扩展基础,以 UC Berkeley 的 SPLAT 的基本算法框架为出发点,成功地开发了功能更强的光刻成像模拟软件 CSPLAT,全部程序以 C 语言编程完成,现已投入实际应用。

3 等高线提取方法及其改进

3.1 等高线提取方法

在光刻模拟过程中,提取光强等高线的通常做法是在得到一个平面上一组密集采样点的光强分布

后,对整个面进行搜索得到符合某一光强值的所有点的位置,进而将搜索到的各点连接成一条连续的封闭曲线或一组封闭曲线组.该方法也是 SPLAT 等一些光刻模拟软件提取等高线的工作方式,整个模拟过程如图 3 所示.

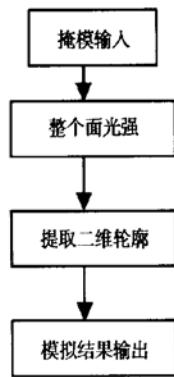


图 3 SPLAT 光强轮廓提取过程流程图

Fig. 3 SPLAT contour simulation flow

快速光强模拟算法的出现给光强等高线的提取带来了新的方法.使用 CSPLAT 的以运算核为基础的模拟算法,在理论上可以很快地计算出某一特定点的光强,本文提出的二维轮廓提取方法就是利用该模拟算法,只计算和等高线位置密切相关点的光强值,而不必如原先的提取方法那样先计算整个平面上所有等间距密集采样点上的光强,因而能大幅度提高轮廓提取的效率. CSPLAT 中的轮廓提取流程如图 4 所示.

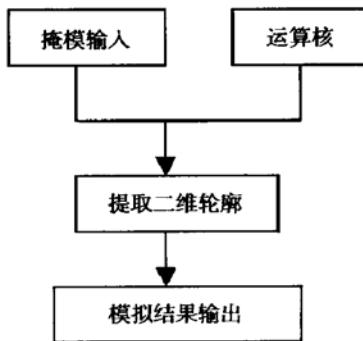


图 4 CSPLAT 光强轮廓提取过程流程图

Fig. 4 CSPLAT contour simulation flow

使用该流程,在对光学系统进行分析得到运算核组后,只要使用掩模的图形信息就可以通过快速地计算得到成像轮廓,因而能够很好地适应在 OPC 过程中由于不断修改掩模引起的在同一光刻条件下

要多次提取二维轮廓的情况.

3.2 快速等高线提取算法的设计考虑

图 5 是使用 SPLAT 模拟孤立细长线的结果,采用的光学系统主要参数为,波长 248nm, 数值孔径 0.5, 线条尺寸 4000nm × 180nm, 相干系数 0.5, 离焦 0.



图 5 光刻后线端回缩现象

Fig. 5 Pull-backs on line ends

从图 5 可以看出,在经过亚波长光刻后,线条两端的变形比线条中间严重.从理论研究和大量实验数据中可以发现,刻蚀线条的两端及转角等处畸变最严重,是版图设计经光刻后最被关心的部位,因此在新的等高线提取算法中应该特别关注这些重点区域.另外,在准确反映光刻模拟结果的基础上,速度和效率也是我们在等高线提取中高度注意的问题.

根据版图设计上的不同区域位置安排采样线,并使用空间稀疏点光强快速模拟方法计算轮廓相关点的光强,这两点设计考虑的目的都是为了实现本算法的设计目标,即快速准确地提取硅片上的区域轮廓.

3.3 基于空间稀疏点光强快速模拟的光强等高线提取方案

鉴于经过光刻模拟后,线段的两端比线段的中部变形明显的特点,对采样线(通过采样点与图形边缘垂直的线段)的选放和轮廓点的录取规则作以下安排:

A. 采样线选放规则:沿着给定图形的边缘,两端密、中间疏地放置采样线.

CSPLAT 的快速光学模拟原理近似地认为版图上一点的光强只和以该点为中心的一定范围内的图形有关系,其具体计算公式的离散化表达式为:

$$\text{Intensity} = \sum_{i=0}^I \left[\sum_{j=0}^J \sum_{k=0}^K (\text{Csplat}_{i,j,k} \odot \text{Mask}_{j,k}) \right]^2 \quad (4)$$

其中 Intensity 是该点光强值; $\text{Csplat}_{i,j,k}$ 是 CSPLAT 的运算核; $\text{Mask}_{j,k}$ 是掩模覆盖函数,该函数定义如下:

$$\text{Mask}_{j,k} = \begin{cases} 0 & \text{当掩模的第 } j, k \text{ 单元块没有图形覆盖} \\ 1 & \text{当掩模的第 } j, k \text{ 单元块有图形覆盖} \end{cases} \quad (5)$$

从(4)、(5)式可以看出,对于孤立图形,由于线条两端上的点的位置变化所引起的运算核覆盖图形面积的变化量很大,因而在该位置附近等高线也会有比较严重的变形,具体表现在图5所反映的光刻模拟结果中,就是线条两端有特别明显的变形。为此,本文给出一种把采样重点放在线条两端的采样线选放方法:

从线条边缘两端向线条中部放置采样线,第n条采样线到第($n+1$)条采样线之间的间隔为 $\Delta \times 2^{n-1}$,按此规则放置直到遇到该线条的中点为止。式中 Δ 为可调值,其大小主要由运算核有效面积的大小来确定。

这种方法能把主要的采样线集中地放置在版图线条的两端和转角,实现了合理的采样线选放目的。

B. 轮廓点的录取规则:在采样线上,沿光强值减小(增大)方向,第一个光强值小于(大于)给定阈值的点,和前一个点之间的线性内插点,可取为轮廓点。

图6为图5中长线条的光强剖面分布曲线,该曲线显示了在图形边缘附近,光强曲线的斜率很大。图中采样线上没有光强值在0.3(经验上的固定光刻阈值) ± 0.2 范围内的采样点。因此,提取等高线时应该采用本文提出的轮廓点录取规则,来确定经过光刻模拟后的成形区域边界位置。

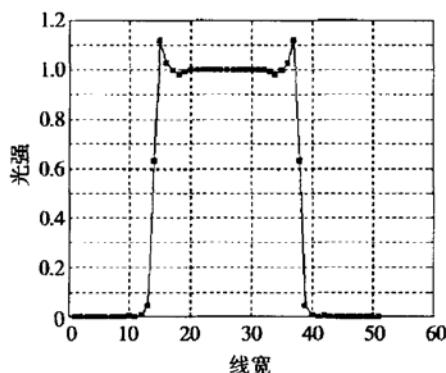


图6 采样线上的光强值分布曲线

Fig. 6 Intensity curve on the sample line

4 实验结果

图7是某实际加法器电路单元中多晶硅栅层的部分掩模版图,图中最小线宽是 $0.18\mu\text{m}$,最小线距也是 $0.18\mu\text{m}$ 。图8和图9是该版图在同一光学参数、同一机器上用两种不同方法进行光刻模拟后的

轮廓提取图。在图8中我们使用了CSPLAT进行光学成像模拟并使用本文中提出的方法完成二维轮廓提取,耗时约3s。在图9中我们使用了SPLAT进行光强模拟并使用等高点搜索法提取轮廓,得到这个结果大约需要42s。所使用的计算机系统是Sun公司的Ultra Sparc60,其含2个CPU,2G内存。图8和图9中所使用的主要光学参数为波长248nm,数值孔径0.5,离焦0,相干系数0.5。



图7 原始版图

Fig. 7 Original design



图8 CSPLAT 模拟结果

Fig. 8 Simulation result by CSPLAT



图9 SPLAT 模拟结果

Fig. 9 Simulation result by SPLAT

5 结论

自集成电路工艺进入超深亚微米时代,使得光学邻近效应的问题被引起重视以来,国际学术界提出了多种用于指导光学校正技术的光刻模拟方法。虽然UC Berkeley的SPLAT软件在对小范围内整个掩模的成像模拟上有其优势,但在提取大范围轮廓线上却存在很大缺点。应用CSPLAT的快速光学模拟算法,并使用本文中提出的规则提取成像轮廓,可以避免SPLAT中空域/频域变换和使用等高线提取软件提取轮廓的复杂过程。本文提出的算法规则建立在有限范围空间运算核的理论基础上,利用给出的掩模信息直接搜索可能出现在等高线上的点的位

置,因而在大面积掩模成像的轮廓提取上有明显的时间优势,能够大大加快整个光刻模拟的速度。

在 OPC 应用中,本文提出的二维轮廓提取方法的优势就更为明显。在对掩模版图进行 OPC 处理时,要不断微调版图上图形的形状以使最后的光刻模拟结果最好地符合原始设计要求。当掩模上的图形作调整时,采用本文提出的提取方法,只需对调整过的部分和该次调整可能影响到的区域重新作一次采样模拟并提取变化处的轮廓即可迅速得到最后结果,因而能使基于模型的 OPC 迭代过程更加快速和有效。

本文使用的光刻模型,均假设为理想的固定光强阈值模型。变阈值模型的光刻模拟要求以掩模上某点周围的图形环境来确定在该点处成像的光强阈值。在增加了一个计算采样线上光强阈值的推导过程后,本文提出的二维轮廓提取算法也可同样适用于变阈值模型的光刻模拟,该过程在 CSPLAT 中已经实现。实验表明,将本算法用于变阈值模型的模拟结果和仅使用固定阈值模型的模拟结果相比,前者能够更好地符合集成电路生产厂家提供的实际硅片

成像图形。

参考文献

- [1] Inoue S, Asano M, Hosaka K. Level-specific strategy of KrF microlithography for 130nm DRAMs. Electron devices meeting. IEDM Technical Digest International, 1999: 809
- [2] Terasawa T. Subwavelength lithography (PSM, OPC). Design Automation Conference, 2000: 295
- [3] Liu Yong, Zakhor A, Zuniga M A. Computer-aided phase shift mask design with reduced complexity. IEEE Trans Semicond Manuf, 1996, 9(2) : 170
- [4] Shi Ruiying, Guo Yongkang. Optical proximity correction for improving pattern quality in submicron photolithography. Semiconductors Technology, 2001, 26(3) : 20 (in Chinese) [石瑞英, 郭永康. 光学邻近校正改善亚微米光刻图形质量. 半导体技术, 2001, 26(3) : 20]
- [5] Kahng A B, Pati Y C. Subwavelength optical lithography: challenges and impact on physical design. Proc ACM Intl Symp Physical Design, 1999: 112
- [6] Liu Yong, Zakhor A. Binary and phase shifting mask design for optical lithography. IEEE Trans Semicond Manuf, 1992, 5(2) : 138
- [7] Goodman J. Statistical optics. New York: John Wiley, 1985
- [8] Cobb N, Zakhor A. Fast sparse aerial image calculation for OPC. SPIE, 1996, 2621: 534

A New Method of 2D Contour Extraction For Fast Simulation of Photolithographic Process^{*}

Chen Zhijin¹, Shi Zheng¹, Wang Guoxiong², Fu Ping³ and Yan Xiaolang¹

(1 Institute of VLSI Design, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

(2 College of Electronics and Information Engineering, Anshan Institute of Iron & Steel Technology, Anshan 114002, China)

(3 Department of Information Engineering, East China Geological Institute, Linchuan 344000, China)

Abstract: A new fast algorithm used for simulating optical intensity profile on silicon wafer is introduced, and a new algorithm for 2D contour extraction of shaped silicon areas based on intensity simulation of sparse aerial points is presented. This algorithm gives out groups of sampling lines according to the mask layout, thus effectively delimits the searching area for contours on wafer. A searching scheme to locate contour point on a sampling line having monotonous intensity distribution is presented and discussed in detail. It indicates that it is a fast, efficient and practical way to calculate area contours on silicon, and a fitable algorithm for the huge number of calculating of the optical proximity correction.

Key words: optical proximity correction; photolithographic process simulation; 2D contour extraction

EEACC: 2550G

Article ID: 0253-4177(2002)07-0766-06

* Project supported by National Natural Science Foundation of China(No. 60176015)

Chen Zhijin male, was born in 1979. He engaged in the research on IC-CAD.

Shi Zheng male, was born in 1967, associate professor. He is engaged in the research on IC-CAD.

Received 17 October 2001, revised manuscript received 8 January 2002

©2002 The Chinese Institute of Electronics