

数字光刻系统的 IC 版图数据接口算法的研究

李 博^{1,2}, 刘俊标^{1,2}

(1 中国科学院 电工研究所, 北京 100190; 2 北京市生物电磁学重点实验室, 北京 100190)

摘 要: 针对基于数字微镜阵列(DMD)的数字无掩模光刻系统,提出了一种新型 IC 版图数据接口转化算法,建立了版图数据到曝光数据的转化接口.该接口根据数字光刻系统的需求,以 IC 版图中工艺层为单位,在保证曝光精度的前提下,可以自动将高精度的 IC 版图数据转化为与 DMD 同像素结构的灰度数据.接口兼容 GDSII 和 CIF 两种工业标准的 IC 版图数据,接口算法可以处理这两种 IC 版图数据中出现的的所有基本图素.同时,利用矢量几何计算的方法,成功地解决了自交、重叠等特殊图素或以特殊方式组合图形的转换问题.实验证明,本接口算法具有低复杂度、高精度、高效率的特点,可以作为数字无掩模光刻系统有效的 IC 版图数据处理通道,对大规模集成电路的制作具有现实意义.

关键词: IC 版图数据;接口;无掩模光刻;单次曝光精度;矢量几何计算;DMD

中图分类号: TN305.7

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2013)05-0079-05

The Study of IC layout Data Interface Algorithm for Maskless Lithography System

LI Bo^{1,2}, LIU Jun-biao^{1,2}

(1 Institute of Electrical Engineering, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

2 Beijing Key Laboratory of Bio-electromagnetism, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the maskless lithography system with DMD, a new IC layout data interface algorithm has been presented, which established the interface from layout data to exposure data. The interface can meet the needs of digital lithography system, using process layer as a unit to convert the high precision IC layout data into the gray data automatically with the same pixel structure with DMD. And the interface are compatible with the two industrial standard IC layout data of GDSII and CIF, which can easily deal with all of the basic graphic element of GDSII and CIF, meanwhile, it also can utilize the method of vector algorithm calculation to succeed in solving the difficult conversion in intersecting, overlapping or some other special composed graphic. After lots of experiment, it's proved that the interface has the capability of low complexity, high precision, and high efficiency. And it can be used as a new efficient passage to be research has practical significance to the production of the LSI.

Key words: IC layout data; interface; maskless lithography; single exposure precision; vector algorithm calculation; DMD

1 引言

众所周知,在传统的光刻技术中,常用的方法是以昂贵的掩模板为硬件媒介,将版图文件中的信息转存入光刻系统^[1].随着微电子技术的进步,大规模

以及超大规模集成电路的快速发展,低成本的无掩模光刻技术被人们广泛关注.其中,基于电寻址空间光调制器(SLM)的无掩模数字光刻技术,因为具有更高转换效率的优点,大有成为引领下一代光刻技术领头军的潜质.目前,DMD(Digital Microscope

Device)是迄今为止最先进的 SLM. 基于 DMD 的数字无掩模光刻技术成为了国内外许多公司、大学及科研机构的研究焦点^[2-4].

本文根据基于 DMD 的数字光刻系统的实际需求,建立了一种新型的 IC 版图数据接口,提出了适用于无掩模光刻系统的 IC 版图接口算法. 该接口算法利用窗口裁剪的方式,保证了矢量图到灰度图像的高精度映射,同时兼顾考虑了 GDSII 和 CIF 版图数据中所有的图素以及图素的组合情况,去除了窗口裁剪后形成的特殊图形和特殊图形组合,最后通过坐标映射和图像编码技术将矢量图形转换为灰度接口文件.

2 基于 DMD 的光刻版图数据技术

DMD 是利用微电子器件(MEMS)工艺将反射微镜阵列和 CMOS SRAM 集成在同一块芯片上,其中,一个微镜代表一个像素,带有掩模图形数据信息的控制信号被有序地写入到 CMOS 电路中,该控制信号与 DMD 中的像素形成一一对应的关系,调整不同控制信号的脉冲宽度来改变 DMD 中与该控制信号所对应的镜面的反光时间,从而在 DMD 中形成不同的灰度值^[2]. 目前 DMD 的应用系统都是采用 TI 公司的应用套件组(DDP 芯片、DAD 芯片和 DMD),它拥有 VGA(640 * 480), SVGA(800 * 600), XGA(1024 * 768), SXGA(1280 * 1024)等多种解析度规格,能够处理 8 位的颜色深度.

微电子领域工业标准的 IC 版图格式主要有以文本存储的 CIF 格式和以二进制形式存储的 GDSII 格式,它们都是中间格式数据,是设计者按照一定的规则和需要,通过版图设计软件制作的. 为了设计的方便,设计者们将单独的一个结构定义为一个 Cell,通过 Cell 相互引用形成最终的 IC 版图文件,每个 Cell 都记录了其所包含的图元的坐标信息以及图元所对应的工艺层的序号^[5]. 这些版图文件不能直接用于光刻机,各光刻机公司必须根据本厂家的光刻系统的要求,将其转换为本公司系统所适用的数据格式^[6]. 同理,数字光刻系统也需要建立相应的数据接口,对 IC 版图数据进行转换. 但是,传统光刻系统是将 IC 版图中的矢量数据转换为光刻系统可以识别的特定矢量图,例如简单矩形、梯形等^[6-7],是一种矢量图对矢量图的转换. 不同于传统光刻系统的数据转换系统,由于基于 DMD 的数字无掩模曝光系统只能识别与 DMD 同像素结构的灰度图像,需要将版图数据通过数据接口将 IC 版图中的矢量

数据转换为灰度数据. 由于 IC 版图数据具有高精度的特点,例如, GDSII 的精度就可以达到 $0.001\mu\text{m}$,直接转换为灰度数据,将丢失大量的数据细节,曝光后图形不能达到 IC 版图设计的精度. 为了解决数据精度冲突的问题,文献[8]提出了一种四叉树索引的方法,将 GDSII 中图形分割成若干等大的矩形,再将矩形按组存入灰度文件中,从而解决了精度冲突的问题. 但是该算法没有考虑 GDSII 数据过大,或者其中包含特殊图形的情况.

3 接口实现

CIF 和 GDSII 版图数据一种中间格式的数据,不能直接用于光刻系统. 根据无掩模光刻系统的要求, IC 版图接口主要需要完成三个工作:①文件读入. 根据版图语法格式解析版图数据,用以数字光刻系统曝光的层序(即工艺层)为单元文件,取代以 Cell 为单元 IC 版图结构;②版图处理. 根据数字光刻系统的曝光尺寸,确定每次可以曝光的版图尺寸,并按照这个尺寸对版图数据的工艺层进行裁剪. 同时,处理裁剪后可能出现的特殊图形或组合,保证每个窗口的数据为简单矢量图. ③实现窗口数据到接口文件(灰度图像文件)的映射,编码形成最终的接口文件.

其具体实现算法(即接口算法)如下:

步骤 1:版图文件解析. 分析 GDSII 和 CIF 文件格式,解析得到文件中的图素信息(坐标和属性),以及图素所在的层的位置信息,即层号.

步骤 2:构建“层中间文件”. 打破 GDSII 或 CIF 文件原来以 Cell 为单位的文件结构,将在同一层的图素保存在一个文件中,形成以“层”为处理单元的“层中间文件”.

步骤 3:窗口裁剪. 根据数字光刻系统的单次曝光面积,对“层中间文件”的每个处理单元依次进行切割,得到尺寸仅为单次曝光面积的单元文件数据的“子场文件”,“层中间文件”以处理单元为单位,按分割次序(位序),形成“子场文件”数据链,“子场文件”的层号与“层中间文件”一致.

步骤 4:去重叠. 按层遍历“子场文件”形成数据链,对各单元文件中的图形进行去重叠运算,消除重叠图形.

步骤 5:图形分割. 消除步骤 3 和 4 处理后,“子场文件”中的可能包含有各种不规则的图形,将其分割成计算机可以直接写入接口文件的基本图形,并重新排序.

步骤 6:校验.判断经过步骤 3,4,5 处理后的图形是否符合实际存在的规则.

步骤 7:接口文件生成.按照位序将“子场文件”中的图形映射到位图文件,并对位图文件进行编码和灰阶转换,最后生成接口文件,接口文件保存在对应的以该“子场文件”所在的工艺层的“层名”而命名的文件夹中.

4 理论分析

为了更加清楚地、框架化地给出本文 IC 版图数据接口的理论分析,根据上节提出的 IC 版图接口需要完成的三个工作将接口分为三个模块,它们分别是文件读入模块,版图处理模块和灰度文件输出模块.

4.1 理论基础

IC 版图接口的主要功能是基于数字光刻系统将 IC 版图格式文件转换为光刻系统可以识别的灰度接口文件,并保证转换精度和转换图形的完整性,其实质就是如何处理矢量图形并将其转换为灰度图像.本文旨在运用计算机的强大计算能力,与数据结构相结合,采用矢量几何运算的方法,完成 IC 版图文件到接口文件的转换过程.

矢量图形的几何运算主要有交运算,并运算,差运算.图 1 所示是两个矢量图形 A 和 B 的几何运算的示意图,图中点 O1、点 O2 是 A、B 的交点,其中点 O1 对于 A 来说是入点,对于 B 来说是出点, O2 对于 A 来说是出点,对于 B 来说是入点,通过 A、B 图形的游走则可以得到运算结果如阴影部分所示:

$A \cap B$:从 A 的第一点开始游走,当碰到入点继续沿本环游走,当碰到出点则转到 B 环,直到回到起始的交点结束;

$A \cup B$:从 A 的第一点开始游走,当碰到入点则转到 B 环,当碰到出点继续沿本环游走,直到回到起始的交点结束;

$A - B = A \cap \bar{B}$,得到的结果如图中阴影所示.

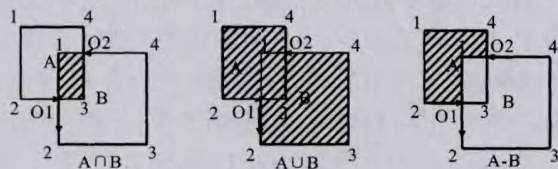


图 1 图形的几何运算

4.2 理论分析

IC 版图文件中可能出现的图元有:折线(线段是一种特殊的折线, $(x_1, y_1; x_2, y_2; \dots x_n, y_n)$),线宽

w ,线头形状);圆(圆心 (x, y) ,半径 r);矩形(左上角点 (x_1, y_1) ,右下角点 (x_2, y_2));多边形(按序排列的坐标点 $((x_1, y_1; x_2, y_2; \dots x_n, y_n), x_n = x_1; y_n = y_1)$),因此,在 IC 版图中所包含的图形关系可归纳为:线与线,线与多边形,线与圆,多边形与多边形,多边形与圆五种形式.其中有两种特殊情况:一是因为圆是非线性的,在图形学中,直接处理比较复杂,因此可以在精度允许范围内将圆形离散化成多边形进行处理,参见文献[9].二是当折线段的线宽 w 大于阈值 δ ,它与其他图形的关系将不再是线与图形的关系了,应该将折线段转化成多边形来进行运算.

通过文件读入,IC 版图接口获取了 IC 版图文件中的所有图元信息以及“层信息”.本文 IC 版图接口通过基于图形学中的矢量几何运算的版图处理算法处理上述图形关系,进而得到简单的矢量图形(包括点、线段、折线、圆、矩形、梯形、圆环、椭圆、多边形).

“层中间文件”的每个处理单元即为一个工艺层,当其尺寸 A (实际中一般是 $2\text{mm} \times 2\text{mm}$ 或 $2.5\text{mm} \times 2.5\text{mm}$) 大于数字光刻系统中单次可曝光面积 S .一般 $S = (W \times 13.8) \times (H \times 13.8) \times \beta$. 其中 $W \times H$ 为 DMD 的解析度尺寸, β 为放大倍率)时,如果直接将矢量图通过映射到灰度图,必然会造成精度的丢失.因此,需要将每个处理单元裁剪成尺寸仅为单次曝光面积的单元文件,即“子场文件”,即窗口裁剪.图 2 是窗口裁剪的原理示意图,将裁剪窗口看作成一个矩形(虚线所示),设该层中间文件中所有图形的最大包围矩形框长为 a ,宽为 b ,则:裁剪窗口的数目 $NF = (a/W) \times (b/H)$,有序的将对应窗口与层中间文件中的所有图形进行交运算,得到的结果即为一个按照切割窗口的排列次序保存的“子场文件”数据链.

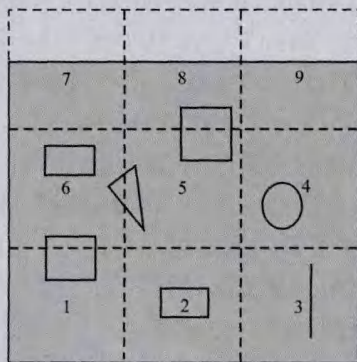


图 2 窗口裁剪原理示意图

在“子场文件”中,图形依旧为矢量图,但是因为

窗口裁剪的直接操作是图形的裁剪,因此“子场文件”可能出现新的图形以及图形组合.另外,有的子场文件中可能没有图形数据(例如图 2 中序号 7、8),在这应该丢弃.再者,子场文件中存在重叠的多边形、特殊多边形的情况,它们不能直接用于矢量坐标信息到灰度图像像素信息的映射,因此,需要对“子场文件”进行去重叠和图形分割.

去重叠原理上是“子场文件”中的图形两两进行求并运算,去重叠后的结果即为并运算后得到的矢量图形,如图 3 所示.

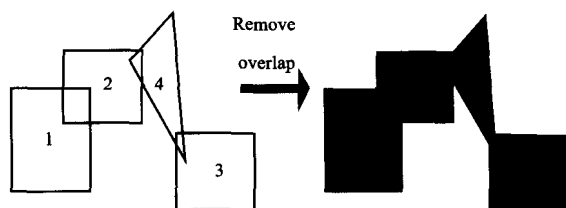


图 3 去重叠示意图

并运算后的图素替代原来的图素,成为单元文件中的新图素,这种新图素往往为复杂的多变形,甚至出现环状多变形,因此需要对新图素进行分割图形分割的原理如图 4 所示.

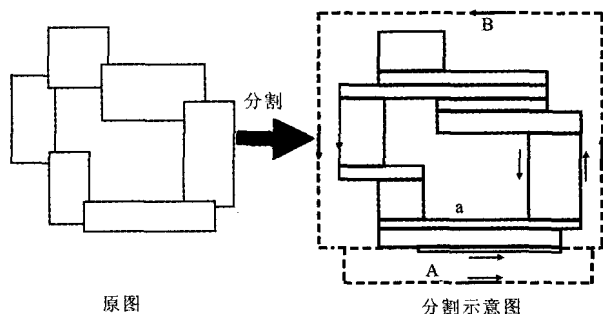


图 4 分割原理示意图

原图经过去重叠运算后,形成了一个拥有内环的多边形,多边形的外环坐标点为 $(X_1, Y_1; X_2, Y_2; \dots X_n, Y_n)$,内环的坐标点为 $(x_1, y_1; x_2, y_2; \dots x_n, y_n)$,将 $Y_1 \sim Y_n, y_1 \sim y_n$ 从小到大进行排序,依次取 $Y_{\min} < Y_i, y_i < Y_{\max}$ 的顶点做水平分割线,以第一点 $Y_{\min} \rightarrow \text{next}$ 所作的分割线为例,该分割线可以被看作虚有向图形 A 的一边,也可以看作是 B 所示的虚有向图的一边, A 和 B 分别与该多边形进行交运算,则可以将该多边形分割一个简单矢量图形和一个复杂矢量图形,用剩下的分割线递归对所得到的复杂图形进行交运算,则可以得到一系列的简单图形.在这里需要说明的是,分割中可能会出现如图中分割线 a 所分割后所得的复杂多边形所示的奇异多边形,需要对其进行去奇异处理后再进行线

切割.由于本文篇幅的限制在这不做详述.

经过版图处理后的“子场文件”中所包含的图形都为简单的矢量图形,通过图形设备接口 GDI+ 可以将图形信息写入灰度文件.但是,由于灰度图像的起始位置为左上角,而“子场文件”的起始位置为左下角,因此需要对将纵轴坐标进行映射.定义接口文件为 windows 的标准位图格式 bmp,灰阶为 8 位,灰度值为 0 或者 255,接口文件的大小为 DMD 的解析度规格尺寸 $(W * H)$.灰度文件经过文件编码后即可形成可被数字光刻系统所识别的接口文件.

5 接口测试及分析

本文利用枚举方式对新型 IC 版图文件接口进行了测试.设定待测试接口算法中光刻系统 DMD 的解析度为 $1024 * 768 \text{ pixel}$,那么,通过分析不难得出:经图形转化后,输出的接口文件为分辨率 $1024 * 768 \text{ pixel}$ 的 8 位深度的 bmp 数据.然后,需要验证 IC 版图文件经转化后有无畸变.这里,假设数字投影系统单次曝光的面积设为 $1024 * 768 * N$ (微米)(N 为整数),其中,测试数据一律取 $N=100$.验证如下:

测试 1:简单矢量图形转换验证.如图 5 所示.该测试的目的是验证接口算法可以实现所有基本图元的转换.该测试数据包含版图文件中所有的基本图素,包括具有宽度的线、折线、矩形、圆、椭圆、圆环、扇形、多边形.这些图形分布在一层上,共同组成一个 Cell,其尺寸小于曝光尺寸.转换结果说明接口算法可以实现对版图文件中所有基本图元的转换处理.



图 5 测试数据一

测试 2:综合测试.该测试的目的是验证本文接口算法,能够实现多层、多图素的版图文件到接口文件的转换.图 6 所示的版图是一个由 L-edit 绘制,具有三个工艺层,包含有 24 个场的数据.因为版面的关系,图 6 中的位图文件仅对 LAYER0 进行了展开,可以看到接口文件以所在层的序号命名,每个文件中包含了对应场的图元数据,数据无丢失和畸变.该实验结果更有力度地证明了本文提出接口算法的可行性和合理性.



图6 测试数据二

6 结束语

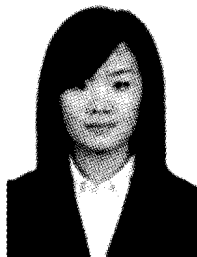
本文结合数字无掩膜光刻系统的实际需求,采用矢量几何运算的方法,设计并实现了一种新型的 IC 版图数据接口。通过理论分析与实验验证,可以得出以下结论:①接口具有普适性,该接口可以兼容微电子领域的两种工业标准的 IC 版图数据——GDSII 和 CIF,扩大了数字光刻系统的适用范围。②接口算法具有低复杂度、高精度、高效率的特点,它采用窗口裁剪的方式来解决 IC 版图文件和接口文件的精度冲突,同时,也考虑了 IC 版图中以及版图处理过程中可能出现的特殊矢量图形,以及特殊矢量图形组合而导致转换图形丢失的情况,并成功的解决之。③接口的实现对大规模集成电路的制作具有现实意义。

参考文献:

- [1] 佟军民,胡松,余国彬. 下一代光刻技术[J]. 电子工业专用设备 2005, 34(11): 27—33.

- [2] 郭小伟. SLM 无掩模光刻技术的研究[D]. 四川:四川大学. 2007.
- [3] 吴智华. 高分辨率衍射图形的 DMD 并行激光干涉直写[J]. 光子学报, 2008, 37(9): 1784—1787.
- [4] 赵立新. 数字灰度投影光刻技术[J]. 微纳电子技术, 2009, 46(3): 181—185.
- [5] Campbell S A. The science and engineering of micro-electronic fabrication[M]. Beijing: Publication House of Electronics Industry, 2003: 151—155.
- [6] 顾文琪. 电子束曝光微纳加工技术[M]. 北京: 北京工业大学出版社, 2004: 199—213.
- [7] 陈宝钦. 电子束光刻技术与图形数据处理技术[J]. 微纳电子技术, 2011, 48(6): 345—352.
- [8] 蒋兴华, 李辉, 李显杰. 一种将 GDSII 文件转换为无掩模光刻机曝光数据的方法[P]. 中国, 201010143778. X, 2010.
- [9] 魏淑华, 韩立. 电子束曝光数据格式转换中的图形离散算法研究[J]. 微电子学与计算机, 2010, 27(4): 198—201.

作者简介:



李 博 女, (1987—), 硕士. 研究方向为图形图像处理及微电子设备。

(上接第 78 页)

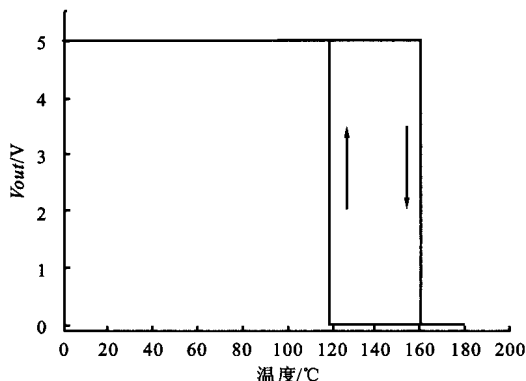


图6 过温保护电路输出电压仿真结果

收发器的过温保护电路。利用 Cadence Spectre 仿真工具进行仿真, 仿真结果表明, 该过温保护电路热关断温度为 160°C, 热开启温度为 120°C, 热滞回区间为 40°C, 符合 LIN 收发器的过温保护的性指标。

参考文献:

- [1] 王绍铨, 李建秋. 汽车电子学[M]. 北京: 清华大学出版社, 2011: 464—465.
- [2] 宫磊. CAN 总线收发器的研究与设计[D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [3] 潘飞蹊, 俞铁钢, 郭超. 一种高精度带隙基准源和过温保护电路[J]. 微电子学, 2005, 35(2): 192—195.
- [4] Gray P R, Hurst P J. 模拟集成电路的分析与设计[M]. 张晓林, 译. 北京: 高等教育出版社, 2010: 62—63.
- [5] 王进军, 王侠, 史永胜, 等. 一种应用于 LDO 的高性能过温保护电路设计[J]. 陕西科技大学学报, 2009, 27(3): 98—100.

作者简介:

秦怀斌 男, (1987—), 硕士研究生. 研究方向为 LIN 总线收发器电路、CAN/LIN 总线网关。

王忆文 男, (1966—), 教授. 研究方向为汽车电子芯片、SOC/SOPC 的设计测试。