

光学邻近效应矫正(OPC)技术及其应用

蔡懿慈* 周 强 洪先龙 石 蕊 王 旻

(清华大学计算机科学与技术系, 北京 100084)

摘要 随着集成电路设计和制造进入超深亚微米(VDSM)阶段, 特征尺寸已经接近甚至小于光刻工艺中所使用的光波波长, 因此光刻过程中, 由于光的衍射和干涉现象, 实际硅片上得到的光刻图形与掩膜版图形之间存在一定的变形和偏差, 光刻中的这种误差直接影响电路性能和生产成品率. 为尽量消除这种误差, 一种有效的方法是光学邻近效应矫正(OPC)方法. 目前由于 OPC 矫正处理时间过长, 产生的文件大小呈指数级增长, 使掩膜版的制造成本成倍地增加. 文中首先针对 OPC 矫正技术进行了深入研究, 提出了具有图形分类预处理功能的自适应 OPC 矫正技术, 将芯片图形按其性能的影响分为关键图形与一般图形, 对两类图形采用不同的容差, 提高了 OPC 处理效率. 其次, 提出并实现了图形分段分类的基于模型的 OPC 矫正算法, 在保证矫正精度的同时提高了矫正的效率. 提出了具有通用性、简洁性和全面性的 OPC 矫正规则, 在此基础上实现了规则库的自动建立和规则库的查找与应用, 实现了效率高、扩展性强的基于规则的掩膜版矫正算法. 算法对规则数据进行有效地描述、存储和处理, 提高了光刻矫正技术实际应用效率. 第三, 设计实现了高效、高精度的光学邻近效应矫正系统 MR-OPC, 系统综合应用了基于规则的 OPC 矫正技术和基于模型的 OPC 矫正技术, 很好地解决了矫正精度和矫正效率之间的矛盾, 取得了最佳的矫正优化结果.

关键词 光学邻近效应矫正 基于规则 基于模型 版图 集成电路

1 引言

在芯片制造工艺流程中, 产品的成品率由大量的工艺过程参数所控制, 例如: 掺杂浓度、沟道长度、衬底形状和寄生效应、光学邻近效应以及层与层之间的绝缘层厚度等等. 要获得一个合理的设计结果, 在设计过程中必须考虑这些工艺参数, 同时在制造过程中必须控制这些工艺参数的稳定性并和设计过程保持一致. 但是由于问题规模的扩大, 尤其是特征尺寸和线宽的减小, 使得保持制造工艺参数的稳定性和与设计过程一致性越来越困难.

光刻是集成电路制造的主要工艺,光刻工艺的任务是实现掩膜版上的图形向硅表面各层材料上的转移.投影光通过掩膜图形后传播到硅片上,掩膜图形对光波来说,相当于传播路线上的障碍,从而在硅片上得到与掩膜图形相关的光刻图形.根据光波衍射和干涉原理,光波通过掩膜版时将发生衍射,掩膜版不同位置之间的光波还会发生干涉,因此,实际投射到硅片上的光强分布是这些衍射光波的叠加结果,它与掩膜图形并不是完全相同的.

根据光波衍射原理,当障碍的尺寸远大于光波波长时,由衍射产生的图形偏差可以忽略不计.也就是说,当掩膜版图形尺寸(集成电路的特征尺寸)远大于光波波长时,硅片上光刻图形与掩膜版图形基本相同.但在超深亚微米工艺下,集成电路特征尺寸在 $0.13\ \mu\text{m}$ 甚至 $0.09\ \mu\text{m}$ 以下,已经接近甚至小于光波波长的情形下,光的衍射效果将非常明显,硅片上光刻图形与掩膜版图形之间的偏差不可以忽略.随着集成电路特征尺寸不断地减小,这种光刻图形的变形与偏差变得越来越严重,成为影响芯片性能和成品率的重要因素^{[1,2]1)}.

特别是在图形相互邻近的部位,由于光波干涉和衍射作用明显,图形偏差会相对较大,例如,在线段顶端和图形拐角处偏差就比较明显.而这些图形部位往往是对电路的电学性能和电路功能起关键作用的地方,从而影响了整个芯片的性能,甚至导致电路失效.这种由于光波衍射、干涉而使光刻图形与掩膜图形产生偏差的现象称为光学邻近效应(OPE: optical proximity effect)^[3,4].在光刻工艺中,光学邻近效应是不可避免的,因此必须采取相应的措施尽可能地减小掩膜图形到硅片图形的变形与偏差,以保证芯片的性能和成品率.

目前工业界普遍采用的方法是在传统的物理设计与掩膜版制造间加入成品率驱动的掩膜版矫正,在这一步骤中,通过改变掩膜版上图形的形状或者图形透光的相位来弥补光刻工艺中产生的光刻图形的变形,使得硅片上光刻得到的图形与预期的图形基本符合.这种掩膜版图形的补偿机制称为光刻增强技术(RET: reticle enhancement technology)^[3,4].常用的两种方法是光学邻近效应矫正方法(optical proximity correction, OPC)和相位转移掩膜(phase shift mask, PSM)^[5-8],其中OPC是一种有效的光刻增强技术.目前的标准做法是在整个芯片层上应用相同容差的OPC,出带时一般将这个容差设置为最小值,以便创建最接近精确的硅片图像.事实上,并不是指定层上的每个形状都要求做这种全面精确的矫正.例如,宽线的印刷效果就要比临界的MOSFET好得多.通常,OPC工具不具备区别这些特性的知识,结果引起OPC处理时间过长,产生的文件大小呈指数级增长,使掩膜版的制造成本成倍地增加,影响了集成电路的上市时间(time to market)和成本的降低.

本文针对光学邻近效应矫正方法中存在的上述问题进行了研究,提出了具有图形分类预处理功能的自适应OPC矫正技术,首先对输入的版图进行自动识别,找出影响集成电路性能的关键图形,并对关键图形和一般需要矫正的图形采用不同的容差,分别进行OPC处理,提高了OPC处理效率.本文还提出了图形分段分类的基于模型的OPC矫正算法,在保证矫正精度的同时提高了矫正的效率.提出了具有通用性、简洁性和全面性的OPC矫正规则,在此基础上实现了规则库的自动建立和规则库的查找与应用,实现了效率高、扩展性强的基于规则的掩膜版矫正算法.算法对规则数据进行有效地描述、存储和处理,提高了光刻矫正技术实际应用效率.在此基础上我们设计并实现了一个高效、高精度的OPC矫正系统MR-OPC,系统集成规则矫正技术和模型矫正技术,并综合利用基于规则^[9,10](rules-based technology)的技术(图形处理速

1) The International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). <http://public.itrs.net/>, 2004 update

度较快,但矫正精度不够高)和基于模型^[11-13](model-based technology)的技术(图形矫正精度很高,但处理速度较慢)分别处理关键图形和一般需要矫正的图形,很好地解决了矫正精度和矫正效率之间的矛盾,取得了最佳的矫正优化结果。

2 光学邻近效应矫正问题的描述

通过对大量实际光刻结果的研究分析表明,光学邻近效应的表现形式有所不同,可以将光学邻近效应中图形的变形归纳为典型的 3 种类型:线条宽度的变化、线条顶端的变化和图形拐角的变化,如图 1 所示。

光学邻近效应矫正主要是通过改变原芯片掩膜版图形的形状来减小光刻图形的偏差。针对不同的图形变形情形,通常会采用不同的形状改变策略。如对线条宽度变化的情形可以改变掩膜版上的线宽,对线端变短的情形可以加入锤头(hammerhead),对拐角变圆的情形可以加入衬线(serif)等。光刻矫正技术的应用将改变原芯片掩膜版,因此需要对矫正后的图形再进行设计规则检查(DRC),而且需要新的有针对性的验证工具,以保证新生成版图的正确性和可制造性。DRC 不作为本文研究的重点内容,论文后面将不涉及该方面的内容。

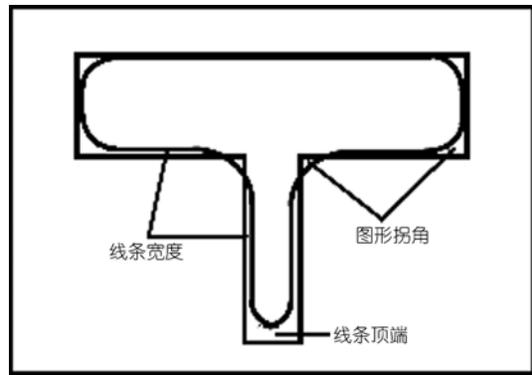


图 1 光学邻近效应中图形变形情况

光学邻近效应矫正技术 OPC 通常分为两大类:基于规则的技术和基于模型的技术。基于规则的方法需要事先建立矫正规则数据库,实际处理中只需通过查找数据库便可以得到矫正数据,实现对掩膜版图形的矫正,因此这种方法在处理大规模集成电路版图时速度快,功能强。基于模型的方法需要事先选择适当的光学模型,实际处理中利用光学模型模拟光刻成像的过程,实现对掩膜版图形的矫正,因此这种方法需要消耗较多的时间和空间,但是矫正结果的精确度较高。

3 基于模型的 OPC 矫正算法描述

基于模型的掩膜版矫正技术利用光学模型对掩膜版图形进行光刻模拟成像,迭代优化图形形状,获得矫正方案。显然,该方法具有较高的矫正精度,适用于要求精度的版图或版图中的部分图形,但是由于需要模拟所有掩膜版图形的成像情形,因此不可避免地要付出一定的时间和空间代价。“光刻过程的光学模拟”和“掩膜版图形的优化”是影响系统效率的关键部分。

光学模拟对实际光刻中诸多因素的近似处理方法和生成光刻成像图形的速度将会直接影响版图优化的精度和速度。本文中选择的 Kernel 组合的光学模型^[14],能够快速获得成像图形,并通过工艺实验调整模型中的某些参数,确保了模拟具有较高的精度。矫正处理的核心是基于模型的掩膜版图形优化模块,系统在实际矫正过程中将调用该模块,直接对目标图形进行优化处理,获得矫正方案。为了保证系统处理的质量和效率,本文提出了基于分段分类的快速高效的优化算法。

3.1 光学模拟技术

光学模拟的输入是光刻工艺的参数和其他相关参数, 如光刻光波波长、光波相干度、数值孔径、聚焦深度和光学邻近效应影响范围等. 光学模拟的输出是在硅片光刻胶上的光强分布情形, 光学模拟的过程主要是模拟光学系统对光波的转换.

在分析光刻过程时, 我们采用了系统的分析方法, 光刻投影的光学系统可以认为是一个线性不变系统, 其数学表达式为

$$\Gamma\{f(x-x_0)\} = g(x-x_0), \quad (1)$$

其中, $f(x)$ 表示输入的信号, $g(x)$ 表示输出函数.

3.1.1 输入光波的表示方法

我们采用二值函数法表示输入的光波. 如图 2 所示意的投影过程中, 可以假设光波是光轴传播的平面波, 因而同一波面的振幅和相位均相同, 于是在当前一个区域里只有透光和不透光的区别, 所以可以用一个二值函数表示为

$$f(x, y) = \begin{cases} 1, & \text{透光区,} \\ 0, & \text{否则.} \end{cases} \quad (2)$$

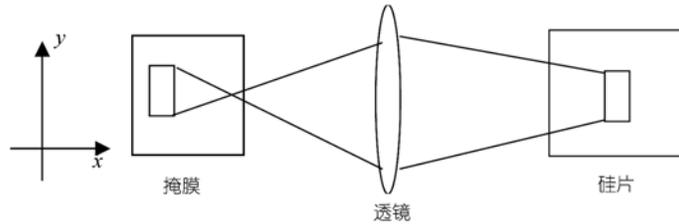


图 2 投影光路示意图

考虑到输入光波的域范围实际上与要设计的掩膜形状是相联系的, 为了便于计算机处理, 可以把掩膜划分成“像素”小格, 用 α_{ij} 表示该小格是否透明, 从而可得(3)式.

$$f(x, y) = \sum a_{ij} \text{rect}\left(x - id + \frac{d}{2}, y - jd + \frac{d}{2}\right), \quad (3)$$

其中 d 为像素小格的边长, $\text{rect}(x, y)$ 为矩形信号函数.

如果假设函数 $g_r(x, y)$ 为光学系统对矩形信号函数 $\text{rect}(x, y)$ 的响应, 则根据线性系统的性质有

$$g(x, y) = \sum a_{ij} g_r\left(x - id + \frac{d}{2}, y - jd + \frac{d}{2}\right), \quad (4)$$

因此, 对整个光学系统的行为的描述关键在于用适当的方法来求得 $g_r(x, y)$.

3.1.2 光学系统的转换效应

光刻光源属于部分相干光源, 具体的分析过程参见Hopkins的著作^[15], 这里只给出几个重要的结论.

根据 Hopkins 公式, 冲激函数 $\delta(x, y)$ 经过这种光学系统后(称为 Hopkins 转换)频谱函数为

$$G(f, g) = \iint TCC \cdot \delta \cdot \delta^* df' dg' \tag{5}$$

其中 TCC 为传递函数.

如果我们认为光学系统的输入光强是冲激函数之和, 即

$$f(x, y) = \sum \sum a_{ij} \delta_{ij}(x, y),$$

则最后的输出光强为

$$I(x, y) = \sum \sum a_{ij} g_r(x - id, y - jd), \tag{6}$$

其中 g_r 是 $G(f, g)$ 的 Fourier 逆变换.

从以上分析可以知道: 首先, 成像处任一点的光强是掩膜上所有点发出的光波的叠加结果, 这正是光波衍射和干涉原理的具体体现; 其次, (6)式给出的光强结果是经过归一化处理的, 表示的是相对的光强分布, 这对于我们要处理的问题来说是合适的; 最后, (6)式中的变量 α_{ij} 是二值的, 它直接代表了对应的像素格是否透光, 因而 α_{ij} 的最后取值就代表了掩膜图形进行光学邻近效应矫正后的形状、大小和位置等几何特征.

3.1.3 输出光强的判别方法

通过模拟输入光波透过光学系统的过程, 可以得到转换后的输出光强分布. 在基于模型的掩膜版矫正中, 关键是获得硅片上成像图形与预期图形间的差异, 因此需要进一步处理输出光强分布, 获得差异信息.

(a)根据物理意义判别成像图形.

在硅片上输出光强数值大于或等于光刻胶曝光阈值 I_{th} 的区域将被曝光, 形成成像图形, 而且在成像图形边界两侧输出光强的变化梯度最大, 从而可以根据输出光强得到成像图形形状和位置, 与预期图形相比较获得差异信息(如图 3 所示). 由于判别标准是不等式, 不方便计算机处理; 但由于需要考虑的目标点比较少, 所以可以减少光学模拟计算的次数, 提高处理效率.

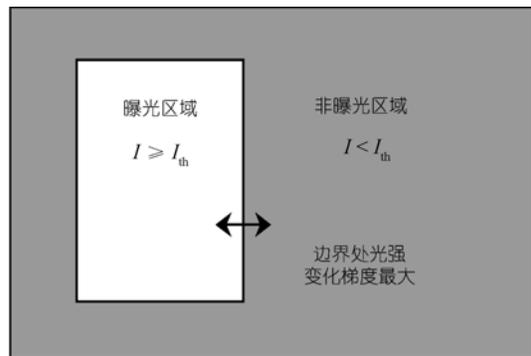


图 3 硅片成像示意图

(b)根据数学意义判别成像图形.

根据数学意义构造目标函数主要可以用 MSE 评判规则(mean square error criterion), 通过要求的掩膜形状估计所求的光强分布 $I_r(x, y)$, 然后由(7)式得到错误评判量, 最小化这个错误评判量即可求得 α_{ij} .

$$e(a_{ij} : i, j = 1, \dots, N_s) = \int [I(x, y) - I_r(x, y)]^2 dx dy. \tag{7}$$

这种构造函数的方法简便可行, 便于计算机处理, 但需要的目标点数据过多, 容易引起计算时间代价过大等问题. 在实际处理计算结果时, 本文采取上面两种方法的结合.

3.2 掩膜图形的优化算法

掩膜版图形优化的输入包括待矫正的目标图形(correction target)和环境图形(environment features)序列. 待矫正的目标图形是优化算法矫正的目标, 它是一个完整的多边形(凸多边形或

凹多边形均可). 环境图形是对矫正目标图形产生光学邻近效应的周围图形. 定义变量 **AMBIT** 表示需要考虑的光学邻近效应影响范围, 则环境图形序列就是将矫正目标图形轮廓线向外扩展 **AMBIT** 的距离后包含或者相交的图形序列. **AMBIT** 的数值与光刻工艺参数以及矫正精度要求相关. 图 4 是输入的矫正目标图形及其环境图形的示意图. 矫正处理中我们假设硅片上从图形外部到图形内部光强变化的总体趋势是单调的, 即将光强变化中小于曝光阈值和大于曝光阈值的转折点作为图形的边界, 默认边界内部完全曝光. 由此矫正操作实施的对象、矫正目标关注的对象将集中在掩膜版图形的边界处, 本文提出了基于分段分类的矫正算法.

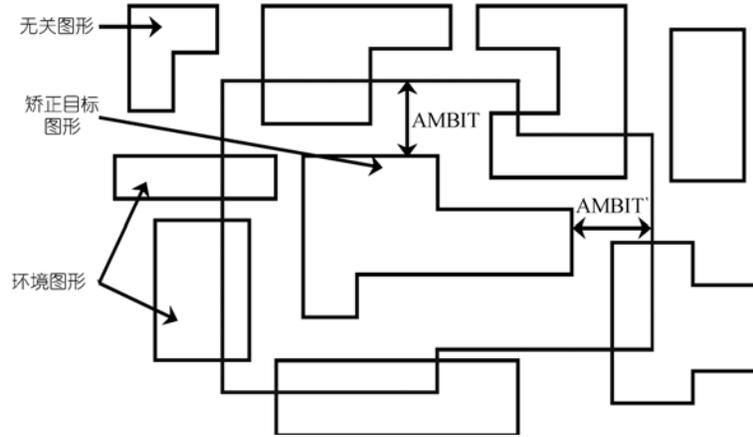


图 4 矫正目标图形及其环境图形的示意图

预处理中将矫正目标图形的边界切割为小线段, 每条线段根据其位置的不同标记为不同的类型. 矫正过程将以小线段作为处理的基本单位, 对不同类型的线段采用不同的矫正策略和矫正目标. 切割处理使矫正的对象更加明确、单一, 避免了对目标图形进行整体优化时情形过于复杂的问题.

对目标图形的矫正策略主要是相应线段的移动. 根据线段类型的不同和成像图形的特点选择不同的移动方向循环步进. 由于制造掩膜版过程的限制, 掩膜版图形需要位于网格线上, 因此线段的移动量应为最小网格尺寸的整数倍.

图形矫正的目标函数是对优化结果的评判标准, 它说明了对图形进行矫正的效果. 由于光学邻近效应矫正的目标是尽量减小硅片上光刻成像图形与预期图形之间的偏差与变形, 因此矫正的目标函数应该可以代表图形的差异程度. 实际应用中并不需要耗费大量的时间使成像图形与预期图形完全重合, 而且从光刻过程的物理数学原理出发, 这种完全重合是不可能实现的. 本文根据集成电路的实际性能要求和精度要求, 适当地选择图形矫正的目标函数及其迭代优化的终止条件.

在选取目标评价函数时, 我们采用 **MSE** 评判规则, 但与一般的 **MSE** 不同的是, 不对图形所有像素点进行光强误差计算, 而是选择与图形形状和大小关系密切的抽样点进行加权计算, 如

$$e = \sum_{i \in S} w_i (I_i - I'_i)^2, \quad (8)$$

这里 S 为抽样点的集合, I_i 和 I'_i 分别为每个抽样点的计算光强和阈值光强(一般根据经验取

0.3), w_i 为各个抽样点的权重, 因此优化过程的目标是最小化评价函数 e .

如前所述, 抽样点的数量不能太多, 这样可以避免大量的计算, 提高运行的速度. 另外, 抽样点的位置和权重的分配应该能够反映图形的形状和大小要求, 尤其要反映矫正部位的几何要求. 如图 5 所示, 对于一个正方形, 抽样点取在四周边上, 但根据矫正部位的不同, 权重的分配是不同的: (a) 是对边的矫正, 因此该边上的抽样点取权重为 2, 其他抽样点的权重为 1; (b) 是对角的矫正, 因此角的两边上抽样点权重为 2, 其他抽样点的权重为 1.

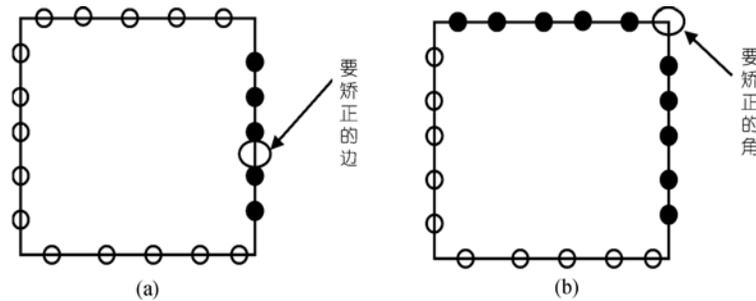


图 5 抽样点选取和权重分配

● $w=2$, ○ $w=1$

4 基于规则的 OPC 矫正算法描述

基于规则的掩膜版矫正技术, 事先利用光学模拟和掩膜版图形优化建立规则库, 对实际掩膜版矫正的主要操作是规则库的匹配和查找. 显然, 该系统操作简便, 在矫正大规模集成电路时具有快捷的优势. 虽然规则库力图涵盖掩膜版图形的所有情形, 但是毕竟规则库的数据量是有限的, 而且数据数值是近似的, 所以该系统矫正的精度是有局限性的.

4.1 规则库

规则库是整个系统的基础, 直接影响着系统的适用范围和处理效率, 因此, 需要通过大量的实验总结归纳规则库中的数据内容. 本文规则库的建立过程是调用前面描述的“光刻模拟”和“掩膜版图形优化”两部分, 通过构造规则、提取数据和归纳整理, 最终建立规则库. 本文规则库的建立具有 3 个特点: 通用性、全面性和简洁性.

通用性. 光学邻近效应矫正主要修正芯片光刻工艺过程中的成像图形偏差, 在不同的光刻工艺参数条件下, 对掩膜版图形矫正的结果也会不同, 因此, 对应不同的光刻工艺参数, 如光波波长 λ 、数值孔径 NA 、光波相干度 σ 和聚焦深度 $defocus$ 等, 规则库的内容会不相同. 规则的类型应该可以适用于所有光刻工艺条件下的所有掩膜版, 光刻参数的变化只影响规则库内数值内容的变化. 本文在给定光刻工艺参数的条件下, 可以根据通用的规则类型, 自动生成规则库内容, 供矫正系统调用.

全面性. 随着集成电路工艺的发展, 一个集成电路芯片通常包含多层掩膜版, 各层掩膜版图形具有各自的特点, 每层掩膜版的图形也变化多端. 本文的规则能够尽可能地描述所有掩膜版图形的形状和位置关系, 保证对实际掩膜版进行矫正时, 均可以找到匹配的规则, 得到矫正结果.

简洁性. 规则类型的数量、每种规则图形的复杂程度将直接影响到规则库建立过程和调用

规则库校正过程的时间、空间复杂度. 本文通过合理地控制规则类型的数量和每种规则图形的复杂度, 有效地减小处理过程的时间、空间代价, 从而提高整个基于规则的掩模版校正系统的效率.

我们归纳了线宽、线端、拐角和通孔 4 种类型的校正规则. 对每种规则, 选择若干参数描述规则中校正目标图形及其环境图形. 图 6 是 4 种校正规则图形和参数的示意图.

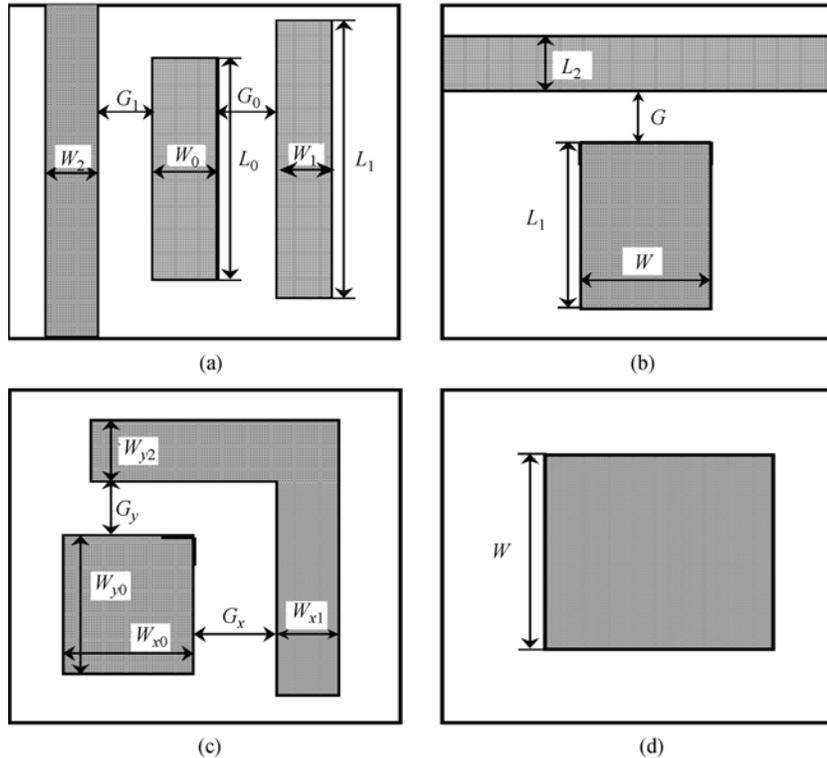


图 6 校正规则图形和参数描述

(a) 线宽规则; (b) 线端规则; (c) 拐角规则; (d) 通孔规则

规则库建立过程中依次处理线宽、线端、拐角和通孔 4 种规则, 每种规则对应一个数据表格. 在规则库的建立过程中, 可以将规则输入参数变化的范围控制在光学邻近效应较强的有限范围之内, 使得规则库中的数据量得以控制. 由于预先设定规则输入参数的变化步长和变化范围, 所以在规则库的描述文件中记录规则的类型、输入参数与输出参数的数目、输入参数变化的步长和范围, 而在规则数据表格中只顺序存储规则的输出参数数值, 不再存储输入参数变化的具体数值, 这样处理可以大大降低存储规则库的空间代价.

我们已经在工作站上用 C 语言实现了规则库建立的算法, 在输入特定的光刻工艺条件后可以自动生成规则库描述文件和规则数据表格. 下列表格是建立所得规则库中的部分实验数据. 光刻工艺的参数条件是光刻光波波长 248 nm, 数值孔径 0.5, 聚焦深度 0.0, 光波部分相干度 0.7, 芯片的最小线宽 0.18 μm . 图 7 是规则库描述文件记录的内容, 包括光刻工艺的参数、几种类型规则的数据文件路径、各规则输入参数与输出参数的数目、输入参数变化的步长和范围等等. 表 1~3 分别是线宽、线端和拐角规则数据表格的部分数据.

```

[COMMON]
wavelength = 0.248000
NA = 0.500000
defocus = 0.000000
sigma = 0.700000
lineWidth = 0.180000

[EDGE]
file = ../res/a.edge
numOfPara = 3
numOfCorrect = 1
rangeOfPara = (180,180,5) (180,180,5) (900,180,7)

[OUTCORNER]
file = ../res/a.outcorner
numOfPara = 3
numOfCorrect = 2
rangeOfPara = (450,180,2) (180,180,5) (180,180,3)

[INCORNER]
file = ../res/a.incorner
numOfPara = 3
numOfCorrect = 2
rangeOfPara = (180,180,5) (180,180,5) (180,180,3)

[LINEEND]
file = ../res/a.lineend
numOfPara = 3
numOfCorrect = 3
rangeOfPara = (180,180,3) (180,180,5) (180,180,3)

```

图 7 规则库存描述文件

表 1 线宽规则数据表格部分数据

$W/\mu\text{m}$	$G/\mu\text{m}$	$L/\mu\text{m}$	移动量/ μm
0.18	0.18	0.90	0.000
0.36	0.36	0.90	0.001
0.18	0.54	0.90	0.006
0.54	0.72	0.90	0.012
0.18	0.18	1.08	0.012
0.18	0.36	1.08	0.007
0.36	0.54	1.08	-0.012
0.54	0.72	1.08	-0.004

表 2 线端规则数据表格部分数据

$W_0/\mu\text{m}$	$G/\mu\text{m}$	$W_1/\mu\text{m}$	锤头宽度/ μm	高度/ μm	重合距离/ μm
0.18	0.18	0.18	0.305	0.100	0.05
0.36	0.18	0.18	0.292	0.100	0.05
0.18	0.36	0.18	0.354	0.100	0.05
0.36	0.54	0.18	0.392	0.100	0.05
0.18	0.18	0.36	0.560	0.050	0.05
0.36	0.36	0.36	0.569	0.056	0.05
0.18	0.18	0.54	0.740	0.050	0.05
0.54	0.18	0.54	0.542	0.050	0.05

表 3 拐角规则数据表格部分数据

$W_0/\mu\text{m}$	$G/\mu\text{m}$	$W_1/\mu\text{m}$	衬线长度/ μm	重合距离/ μm
0.54	0.18	0.18	0.155	0.003
0.72	0.18	0.18	0.148	0.001
0.54	0.54	0.18	0.174	0.018
0.72	0.54	0.36	0.245	0.003
0.72	0.90	0.36	0.137	0.025
0.54	0.18	0.54	0.278	0.009
0.54	0.54	0.54	0.168	0.021
0.72	0.90	0.54	0.237	0.006

4.2 应用规则矫正

应用规则矫正是系统中对实际掩膜版图形的具体操作处理. 在该模块中, 首先需要根据规则类型和特点对掩膜版图形的数据进行预处理, 然后掩膜版矫正的过程实际上是确定待矫正目标图形所属的规则类别, 提取图形的几何参数, 确定光刻工艺中的特殊参数, 通过查找规则库以及一些简单的数学处理得到矫正结果数据. 由于已经建立好规则库, 处理过程相对简单.

下式描述了规则的应用:

$$C_1 = f(L, I, P_1), \quad (9)$$

其中 C_1 表示 I 规则的输出矫正结果参数集合, $C_1 = \{C_{11}, C_{12}, \dots, C_{1n}\}$; L 表示光刻工艺的参数集合, $L = \{\lambda, NA, \sigma, CD, \text{defocus}, \dots\}$, 其中 λ 是光刻光波波长, NA 是光刻设备数值孔径, σ 是光刻光波相干度, defocus 是光刻的聚焦深度; I 表示所选用规则的类别, $I \in \{\text{边}, \text{角}, \dots\}$; P_1 表示 I 规则的输入图形参数集合, $P_1 = \{P_{11}, P_{12}, \dots, P_{1m}\}$.

基于规则的方法通过判别矫正目标的类型、提取参数、查找规则库, 可以得到矫正结果, 对掩膜版图形进行相应处理, 最终获得矫正后的掩膜版图形. 在查找规则库时, 如果掩膜版的实际图形参数与规则库中某项输入参数完全一致, 则可以直接得到矫正结果; 如果掩膜版的实际图形参数不能与规则库中任何数据项完全吻合, 那么通过线性插值的近似可以得到矫正结果.

5 MR-OPC 系统描述

图 8 为本文所实现的 MR-OPC 系统示意图, MR-OPC 系统的输入是传统设计流程得到的芯片掩膜版图形(uncorrected mask), 输出是经过 OPC 修正后的芯片掩膜版图形(corrected mask). 系统的优化目标是减小硅片上的光刻图形与期望图形之间的变形和偏差满足不同容差要求, 提高图形处理效率. 与目前单独针对关键区域进行矫正的技术^[16-18]和基于规则技术不同的是, 本文将基于模型的矫正技术和基于规则的矫正技术相结合, 并集成在一个系统工具中, 充分结合两种矫正技术的优势, 很好地解决了矫正精度和矫正效率之间的矛盾, 获得更好的矫正效果.

系统首先输入待矫正的掩膜图形, 光刻机、光刻胶等工艺参数以及图形的矫正精度要求, 数据分类和处理模块根据各类图形对芯片性能的影响将图形进行分类处理, 分成关键图形和一般需要矫正的图形, 并赋予不同的矫正精度要求. 然后分别调用基于模型的矫正算法模块

和基于规则的矫正算法模块进行 OPC 矫正. 基于规则的矫正, 图形处理速度较快, 但精度不够高, 适宜应用在处理数据量很大、精度要求相对较低的全局掩膜版矫正中; 基于模型的矫正, 图形矫正的精度很高, 但处理速度较慢, 适合应用于要求矫正精度很高的局部关键掩膜版矫正中, 如晶体管的多晶硅栅极图形、接触孔图形等. 矫正过程中通过交互控制模块进行两者之间的协调, 在满足矫正精度要求的前提下, 提高矫正效率. 最后输出矫正后的掩膜版图形数据.

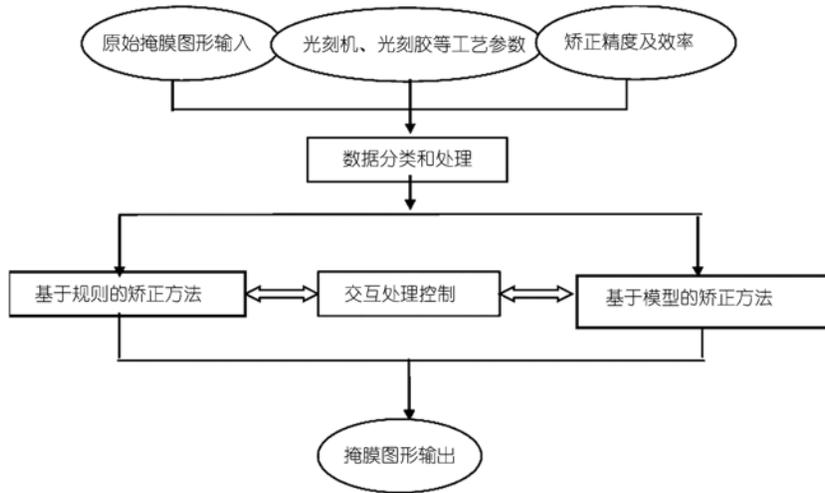


图 8 OPC 矫正系统

6 实验结果

我们已经将 MR-OPC 系统在工作站上用 C 语言实现, 输入掩膜版图形即可以得到矫正后的相应图形, 利用光学模拟可以获得硅片上成像图形的轮廓, 从而判别矫正的效果, 如图 9 所示.

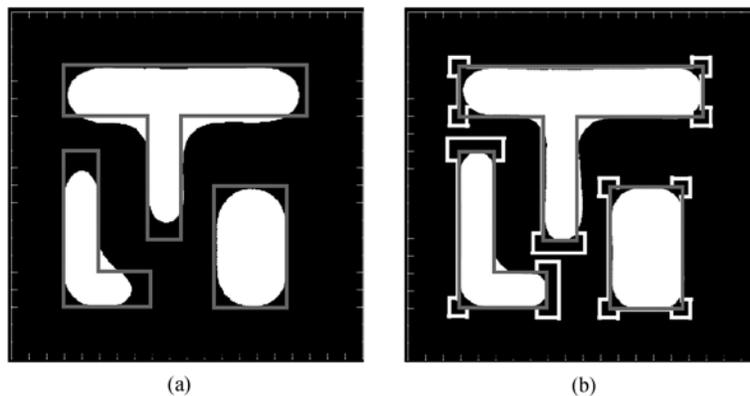


图 9 MR-OPC 矫正掩膜版图形示意图

(a) 矫正前; (b) 矫正后

图 10 列举了一些矫正的结果, 光刻工艺的参数条件是光刻光波波长 248 nm, 数值孔径

0.5, 聚焦深度 0.0, 光波部分相干度 0.7, 芯片的最小线宽 $0.18 \mu\text{m}$.

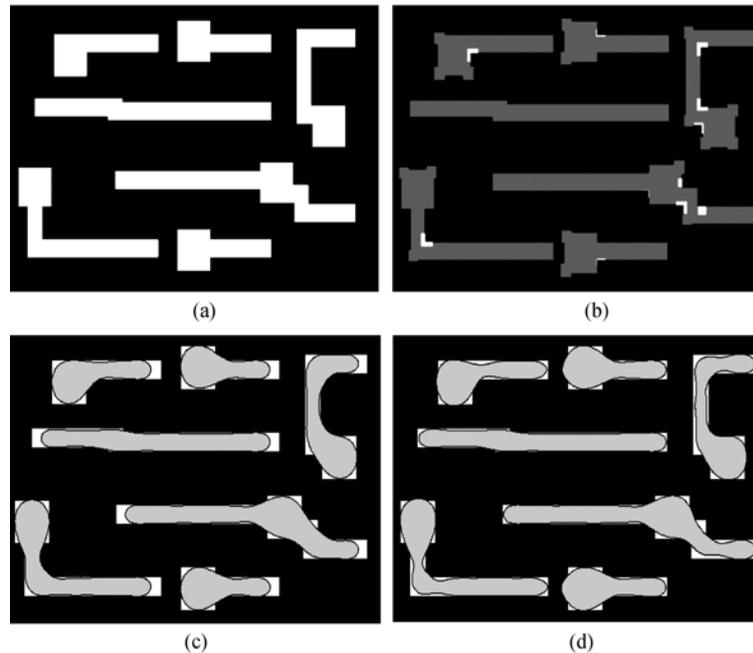


图 10 某单元多晶硅层部分图形矫正实验结果示意图
(a) 矫正目标图形; (b) 矫正后图形; (c) 矫正前成像图形; (d) 矫正后成像图形

7 结论

本文针对芯片制造过程中的光学邻近效应, 深入研究了光学邻近效应的本质, 主要注重基于规则的光学邻近效应矫正和基于模型的光学邻近效应矫正两种方法的结合, 设计并实现了自适应的 MR-OPC 矫正系统, 较好地解决了 OPC 矫正中的精度和效率问题. 在基于模型的光学邻近效应矫正方法中, 研究了光刻过程的物理数学原理, 提出并实现了具有较高精确度、较强灵活性的、以分段分类思想为基础的掩膜版优化算法. 在基于规则的光学邻近效应矫正方法中, 通过分析和实验, 归纳总结出线宽、线端、拐角和通孔 4 种类型的矫正规则, 并且在此基础之上实现了规则库的自动建立和规则库的查找与应用, 提出并实现了具有效率高、扩展性强的基于规则的掩膜版矫正算法. 实例测试结果表明, 该系统是有效的, 其中的核心算法模块已经用于某 EDA 公司的软件产品中.

参 考 文 献

- 1 Kahng A B, Pati Y C. Sub-wavelength optical lithography: Challenges and impact on physical design. In: Proceedings of the International Symposium on Physical Design. New York: ACM Press, 1999. 112—119
- 2 Cong J. Challenges and opportunities for design innovations in nanometer technologies. SRC Design Sciences Concept Paper. 1997. <http://cadlab.cs.ucla.edu/~cong/>
- 3 Chen J F, Laidig T L, Wampler K E, et al. Practical method for full-chip optical proximity correction. SPIE, 1997, 3051: 790—803 [\[DOI\]](#)
- 4 Dolainsky D, Maurer W. Application of a simple resist model to fast optical proximity correction. SPIE, 1997, 3051: 774—780 [\[DOI\]](#)
- 5 Berman P, Kahng A B, Vidhani D, et al. Optimal phase conflict removal for layout of dark field alternating phase shifting masks. IEEE Trans Computer-aided Des Integr Circuits Syst, 2000, 19(2): 175—187 [\[DOI\]](#)

- 6 Liu Y, Zakhor A. Binary and phase shifting mask design for optical lithography. *IEEE Trans Semicond Manuf*, 1992, 5(2): 138—152 [\[DOI\]](#)
- 7 Liu Y, Zakhor A, Zuniga M A. Computer-aided phase shift mask design with reduced complexity. *IEEE Trans Semicond Manuf*, 1996, 9(2): 170—181 [\[DOI\]](#)
- 8 Moniwa A, Terasawa T, Nakajo K, et al. Heuristic method for phase-conflict minimization in automatic phase-shift mask design. *Jpn J Appl Phys*, 1995, 34: 6584—6589 [\[DOI\]](#)
- 9 Otto O W, Garofalo J G, Low K K. Automated optical proximity correction—a rules-based approach. *SPIE*, 1994, 2197: 278—294 [\[DOI\]](#)
- 10 Shi R, Cai Y C, Hong X L, et al. Important works about rules in rules-based optical proximity Correction. *Chin J Semicond*, 2002, 23(7): 701—706
- 11 Shioiri S, Tanabe H. Fast optical proximity correction: Analytical method. *SPIE*, 2440: 261—268
- 12 Yang C Q, Hong X L, Wu W M, et al. An object-based approach to optical proximity correction. In: *Proceedings of the 4th International Conference On ASIC*. New York: Wiley-IEEE Press, 2001. 206—209.
- 13 Wang Y, Cai Y C, Hong X L, et al. Algorithms for yield driven correction of layout. In: *Proceedings of the International Symposium on Circuits and Systems*, 2004. 241—244
- 14 Yan X L, Shi Z, Chen Y, et al. Full-IC manufacturability check based on dense silicon imaging. *Sci China Ser F-Inf Sci*, 2005, 48(4): 127—138
- 15 Hopkins H H. The concept of partial coherence in optics. In: *Proceedings of the Royal Society*. London, 1951, A208: 263—277
- 16 Yan X L, Chen Y, Shi Z, et al. A new dissection method for model based frugal OPC. In: *Asia South Pacific Design Automation Conference*. New York: Wiley-IEEE Press, 2005. 83—86
- 17 Yang J, Cohen E, Tabery C. An up-stream design auto-fix flow for manufacturability enhancement. *Design Automation Conference*. New York: Wiley-IEEE Press, 2006. 73—76
- 18 Yu P, Shi S X, Pan D Z. Process variation aware OPC with variational lithography modeling. *Design Automation Conference*. New York: Wiley-IEEE Press, 2006. 785—790