

基于光刻模型的动态自适应切分 OPC

杨祎巍[†] 史 峥 严晓浪 陈 晔

(浙江大学超大规模集成电路研究所, 杭州 310027)

摘要: 光学邻近校正(OPC)技术已经成为纳米级半导体工艺技术中的一个关键. 目前在 OPC 中多边形的切分算法均基于配方(recipe), 但随着特征线宽减小及版图越来越复杂, 用于切分的配方难以覆盖所有的情况; 不完备的配方引发或加剧了芯片上的纹波、断线和桥连等现象. 论文提出了一种新的基于光刻模型的动态自适应切分算法, 根据不同的光刻模型和几何环境可以给出不同的切分, 并且可在校正循环中动态改变切分方式和采样点的放置位置. 通过 90nm 工艺下版图设计的验证, 这种切分不仅减少了被切分出的小线段(segment)数量的 10%~15%, 节省了调试切分规则的时间, 而且提高了 OPC 的质量, 使 PRV(post RET verification)错误率降低了 35%.

关键词: 光学邻近校正; 可制造型设计; 动态切分; 光刻模型
EEACC: 2550G

中图分类号: TN305.7 文献标识码: A 文章编号: 0253-4177(2008)07-1422-06

1 引言

光学邻近校正(OPC)技术已经成为纳米级半导体工艺技术中的一个关键. IBM 最新的研究报告表明, 采用 193nm 波长光源的浸入式光刻可以满足直到 22nm 工艺的要求^[1]. OPC 作为该技术路线的重要保证有着广泛的发展应用空间. 随着特征线宽的不断减小, OPC 面临着更多的挑战, 其中, 多边形切分即为亟需改进的地方之一^[2]. 目前主流的 OPC 方法是稀疏采样模型驱动的 MBOPC(model based-OPC), 其工作流程是: 在切分配方(recipe)的指导下, 切分程序将多边形的边切分为有限长度的小线段(segment), 在每个小线段中选取一个采样点, 以该点的光强代表整个小线段的光强. 其次进入校正循环, 根据光刻模型和采样点周围的几何环境计算出采样点处光强达到成像阈值时, 采样点所在小线段需要沿其法相方向移动的距离. 该校正循环进行, 直到整个版图达到一个较优的结果或者循环被终止, OPC 过程结束. MBOPC 的结果不仅仅和光刻模型有关, 也和如何切分多边形的边及如何放置采样点有关, 切分不当不仅增加运算数据量和版图复杂度, 而且导致 OPC 结果更容易出现错误. 纹波现象即为基于配方切分的 OPC 容易引发的不良现象之一, 特别在 AttPSM 或者强 OAI 的情况下^[3,4]. 严重的纹波会导致片上 CD(critical dimension)一致性的控制变得更难, 断线和桥连、拐角圆滑、线端缩进等现象更加容易出现. 切分算法已经成为影响 OPC 质量的一个瓶颈^[5~7].

2 制约 OPC 精度的几个原因

制约纳米级 OPC 精度的根本因素包括光刻模型的精确度、多边形切分、采样点放置的合理性, 以及校正算

法的有效性. 图 1 是 90nm 工艺下某设计局部的经过切分校正的实例, 从中可以看出多边形的基本切分情况.

2.1 理想的 OPC

如果将版图按细网格切分, 可以通过版图上每个细网格点控制 OPC 校正过程, 由于控制的自由度变大, OPC 的结果无疑会好得多. 这也是所谓 Pixel-OPC 的指导思想. 同样, 把多边形的边切成所允许范围内的最短的小线段是一个提高 OPC 质量的好方法. 但是, 由此带来的缺点是会产生极大的数据量, 造成 OPC 计算所需的时间很难满足业界生产的要求, 版图变得极为复杂, 甚至无法制版. 因此, 一个“聪明”的切分多边形边的算法就显得十分必要, 它应该在关键的区域切出较小的线段且线段满足版图制造的最小尺寸的要求, 而在不需要切分较细的地方保留长线段.

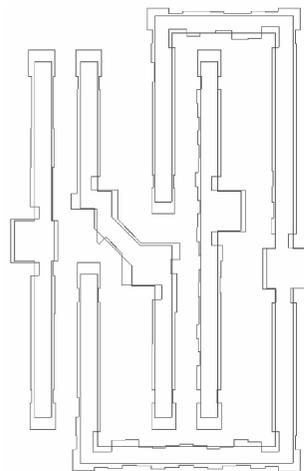


图 1 90nm 工艺下一个切分和校正示例

Fig. 1 One example of dissection and correction on 90nm technology node

[†] 通信作者. Email: yangyw@vlsi.zju.edu.cn

2007-11-09 收到, 2007-12-31 定稿

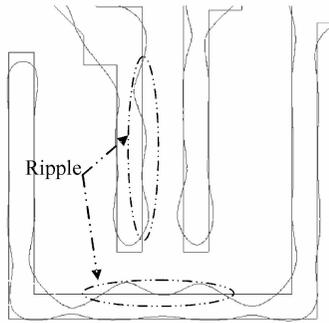


图 2 90nm 工艺中出现了较为明显的纹波现象
Fig.2 Ripple on 90nm node

2.2 纹波抑制

造成纹波现象的原因普遍认为是由相邻垂直图形的“旁瓣”效应引起的^[3,4]。比如“L”型的图形，垂直图形的纹波是由水平图形的“旁瓣”引起的。在 OAI(离轴照明)条件下，纹波现象会更加剧烈。此时，不当的切分会加剧纹波现象，因此要特别注意。在图 2 中可以看到所谓的纹波现象，严重的纹波会引起断线、桥连等现象。

硅片上光强(intensity)的分布是光通过掩模时光干涉衍射形成的结果，这些通过掩模的光含有掩模的频率信息，光强分布体现了掩模的频率。在掩模越来越复杂，线宽越来越小的情况下，光强的分布中会出现比较高的频率成分。切分多边形的边时如能在那些出现较高频率的地方切出符合频率“节拍”的小线段，则能够通过抑制波峰波谷来有效地抑制纹波现象的出现。以图 3 为例，AB 是切分出来的小线段，C 是采样点，由于 C 点的光强十分接近阈值，因此 AB 几乎不发生移动，同时，实际光强分布要求 AC 段向下移动，BC 段向上移动来抑制纹波。这样的切分是无法满足要求的。如果将小线段 AB 从 C 点切成两段，AC、BC 就可以分别很好地满足光强校正的要求。

每一个小线段的移动均会影响周围的光强，纹波也会随着小线段的移动而发生移动，因此对纹波的监测也是必须的。

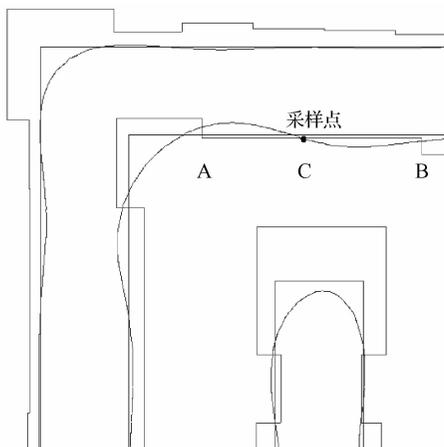


图 3 不当的切分
Fig.3 Improper dissection results

2.3 多点采样

校正循环中，计算每个小线段的偏移量是以该小线段上的某一采样点为基准。但在特征尺寸日益缩小的条件下，这种算法带来的误差已经不能够满足要求^[4,8]，采样点放置位置的一点偏移都可能给结果带来很大的不同。较优的采样点应放置在小线段上对应峰值的点附近，但是当该峰值对应点是小线段的端点时应选取光强最接近阈值的点。在光强分布出现高频以至于小线段中存在不止一个波峰或波谷时，采样点可以视情况放置多于一个^[2,4]，这样可以有效减少采样点的敏感性，减小一个采样点所带来的误差，提高 OPC 的结果。

3 动态切分算法

OPC 中移动小线段的原则是使采样点处的光强尽可能地接近成像阈值。可以将 OPC 描述成一个优化问题：

$$C = \sum_{i=1}^n [(I(r_i) - I_0)^2] \quad (1)$$

其中 C 为代价函数； $I(r_i)$ 是基于光刻模型计算出来的采样点 r_i 处的光强； I_0 为成像阈值； n 是采样点的数目。优化目标是使得 C 最小。该优化问题是一系列子优化问题的集合，是在这个子优化问题的集合中选择一个较优的子优化的结果。每一个子优化问题描述如下，在给定切分好的小线段及采样点的条件下，每个小线段的偏移为自变量，优化的目标是 C 最小，约束条件为每个小线段的偏移量不应该大于某一给定的值。切分优化是寻找一个较优的切分方案和采样点的放置，然后在此基础上选择每个小线段的较优的偏移量。考察子优化问题， $(I(r_i) - I_0)^2$ 在定义域内是凸函数，故 C 也是凸函数，其约束条件也可以写成凸函数，因此 C 是一个凸规划，凸规划的局部最优解都是全局最优解。

采用梯度法，考察 $(\partial C / \partial \vec{n}_i)^{-1}$ ， \vec{n}_i 为采样点 r_i 所在线段的法线方向，设向外为正，则 $(\partial C / \partial \vec{n}_i)^{-1}$ 的方向代表了为得到更小的 C ， r_i 所在的小线段需要移动的方向； $(\partial C / \partial \vec{n}_i)^{-1}$ 的大小代表了 r_i 所在小线段需要移动距离的大小。选取 $\partial C / \partial \vec{n}_i = 0$ 的零点为小线段的切分点，如图 4 中的 A、B、C、D、M、N 点。由前面分析可知，这些采样点表示不需要移动即已满足光强等于阈值的要求，相邻零点之间的偏移一定是同方向的，如 AB 线段中每一处的 $(\partial C / \partial \vec{n}_i)^{-1}$ 值的符号都一致。这样就不会出现移动时线段的一部分需要向内，另一部分需要向外的矛盾情况，十分有利于 OPC 质量的提高。对于关键区域和频率较高的地方，若无法切分出更小的线段，则应选择线段中的峰值为采样点，如图 4 中的 MN 线段，其上有两个峰值 P1、P2，则 MN 线段上有两个采样点 P1、P2。同时，对于其他切出的小线段，也要调整采样点的位置，使之靠近峰值的位置。相邻小线段移动相互影响，会造成纹波的移动，因此每次循环切分前均要

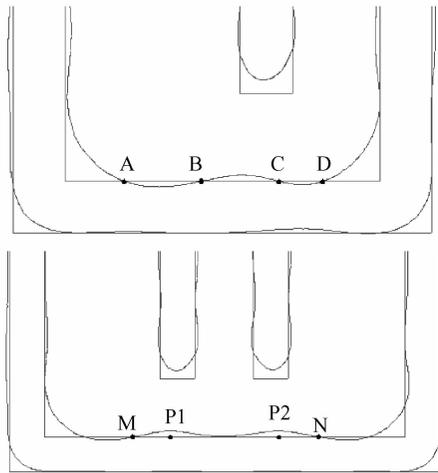


图 4 动态切分示意图

Fig. 4 Illustration of dynamic dissection

更新采样点的 $-(\partial C/\partial \vec{n}_i)^{-1}$ 值. 通过对纹波移动的跟踪, 可以有效地抑制纹波现象.

子优化的物理含义是使得各个采样点 r_i 的光强尽可能地靠近成像阈值, 但是这并不意味着光刻得到的轮廓(contour)就是最好的, 有可能仅仅是各个采样点的光强靠近阈值而整体结果并不理想. 这是因为采样点放置位置不好, 并未很好地表征整个版图的情况. 切分优化问题就是优化切分方案和采样点的放置, 使得通过控制采样点可以有效控制整体光刻的效果, 在此基础上, 如上所述, C 的最小值是可以达到的.

具体的算法如下:

(1) 将未切分的多边形的边整体校正移动一次, 先校正长边, 后校正短边, 以使 $\partial C/\partial \vec{n}_i > 0$ 和 $\partial C/\partial \vec{n}_i < 0$ 的点均可以在采样点中出现, 从而进行有效的切分.

(2) 选择一个合适的初始采样频率.

(3) 计算采样点的 $-(\partial C/\partial \vec{n}_i)^{-1}$ 值, 使用插值法得到 $\partial C/\partial \vec{n}_i = 0$ 的点及波峰波谷所在的位置.

(4) 切分并调整采样点, 使得采样点靠近波峰或波谷位置, 对于非关键区域, 减少采样点以减少运算量.

(5) 根据采样点处的光强值计算该段的偏移量.

(6) 重复 3~5 步, 直到满足要求.

对于拐角, 采样点则固定在以拐角为端点的小线段上的另一端点上, 这样可以通过控制小线段的长度来控制拐角处的光刻结果的曲度, 使得拐角处的纹波现象得以控制.

4 实验结果及分析

实验所用的光刻模型如下:

Mask: Clear Field Lambda: 193nm
 NA: 0.65 Defocus: 0.14
 Sigma: 0.73 Inner-sigma: 0.43
 Ambit: 1.071 Kernel Num.: 10
 Mag. Factor: 4

实验用的两种版图均为 90nm 线宽, 尺寸分别为

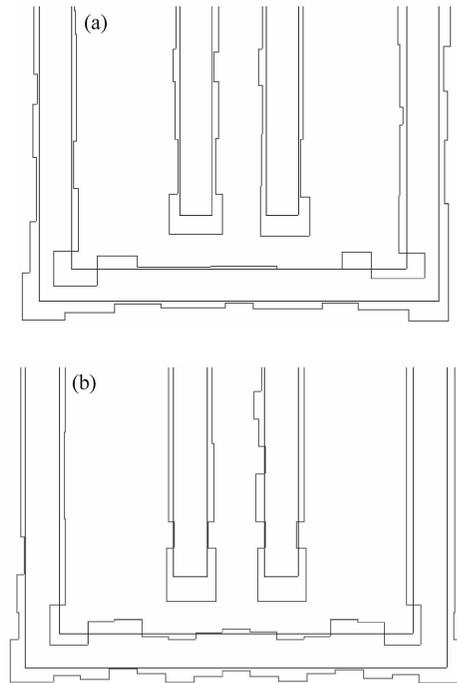


图 5 (a) 采用动态自适应切分的结果; (b) 采用传统的基于规则的切分结果

Fig. 5 (a) Results by traditional rule-based dissection; (b) Results by new methods dissection

$8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 和 $100\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$.

现选取一些典型的细节分析, 最后给出整体的比较结果. 先讨论 $100\mu\text{m} \times 70\mu\text{m}$ 的版图. 图 5 是基于优化后等长切分配方切分的结果与采用动态自适应切分结果的比较. 图 6 是图 5 中两种情况的仿真结果. 从图 6 的仿真结果即可看出, 采用了等长切分配方案的切分校

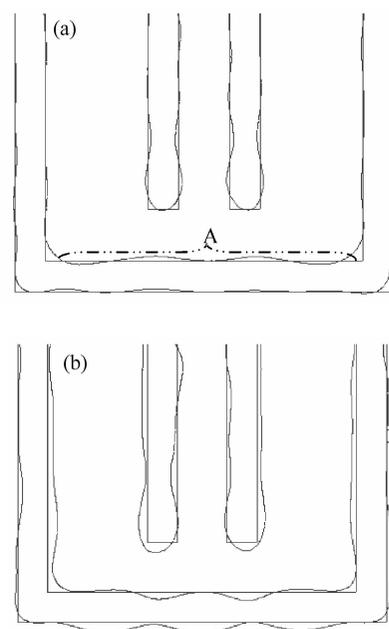


图 6 (a) 采用动态自适应切分的仿真结果; (b) 采用传统的基于规则切分的仿真结果

Fig. 6 (a) Simulation results by the new methods dissection; (b) Simulation results by the traditional rule-based dissection

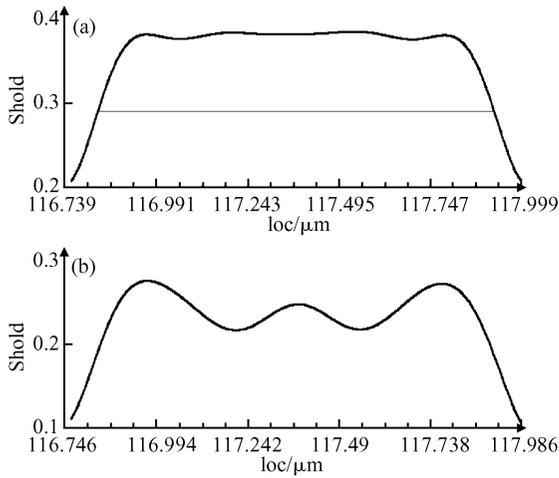


图 7 (a)图 6 版图 A 处初始位置时光强的分布;(b)整边移动后 A 处光强的分布

Fig.7 (a) Intensity distribution of spot A in the original layout;(b) Intensity distribution of spot A after the whole edge movement

正结果增加了版图的复杂度,而且仿真结果不够理想.原因是太小的小线段会非常不稳定,周围环境的微小变化容易引发小线段较大的偏移.图 7 是图 6 中 A 处水平线段的光强分布,图 7(a)是校正前 A 线段光强的分布,图 7(b)是整边移动后光强的分布.可以看出在整边移动前,从光强分布几乎无法得到任何的切分信息,在整边移动后光强分布在阈值附近波动,这时切分信息就比较明晰,便于减少校正中的循环.这是本算法中第一步的意义所在.

图 8 是在使用本算法进行版图切分时在校正过程不同循环中的切分结果,这些结果都是中间结果.图 9 是这些切分所对应的仿真结果.从图 8、图 9 中可以看出,在校正循环中切分一直随着光强分布变化,而且保持与纹波“合拍”,切分越来越细致,仿真结果也随之变优.

图 10、图 11、图 12 是另一种 $8\mu\text{m} \times 8\mu\text{m}$ 版图的实验结果.可以看出,在十字形版图中,本文的算法同样可以有效地改善 OPC 结果.图 12 是图 10 中切割线 A 处的光强分布,从图 10 可以看出切割线 A 处有两个点处

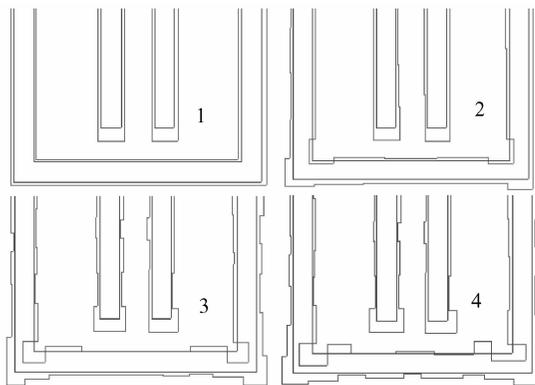


图 8 版图在本算法指导下在 1,2,3,4 不同的校正循环中的切分结果
Fig.8 Dynamically changing the dissection results during the correction loops

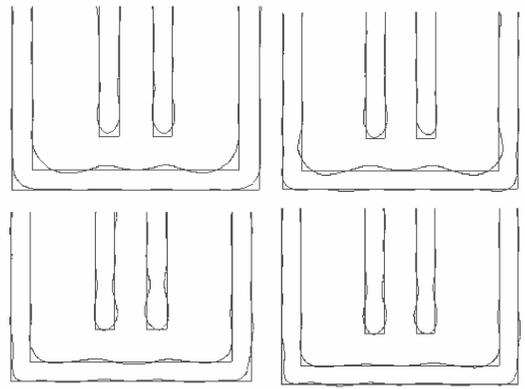


图 9 图 6 中每种切分对应的仿真结果
Fig.9 Simulation results of Fig 6

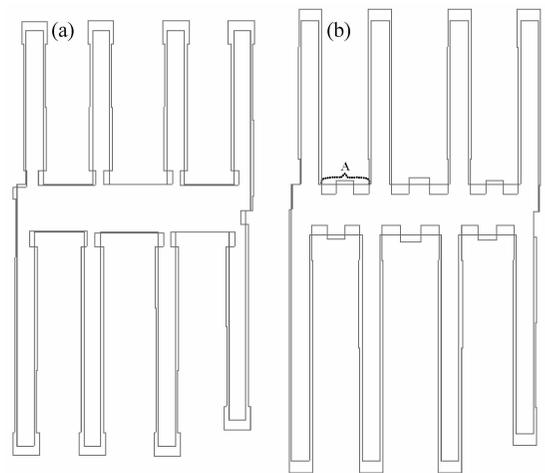


图 10 (a)传统的基于规则的切分结果;(b)采用动态自适应切分的结果
Fig.10 (a) Traditional rule-based dissection results; (b) New methods dissection results

的光强等于阈值,应切分成三个小线段,与本算法的切分结果(图 10(b))相符,且明显改善了 OPC 的结果,如图 11 所示.

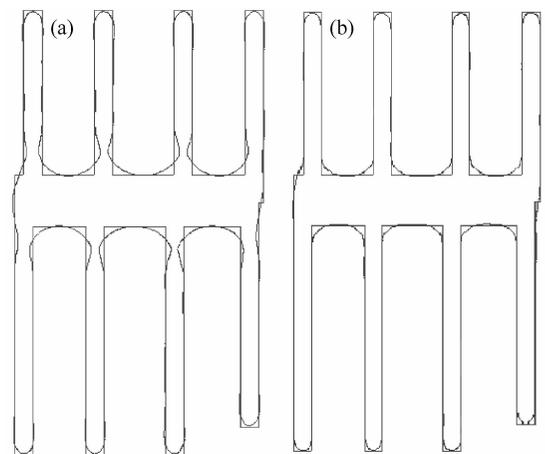


图 11 (a)传统的基于规则切分的仿真结果;(b)采用动态自适应切分的仿真结果
Fig.11 (a) Simulation results of the traditional rule-based dissection results; (b) Simulation results of the new methods dissection results

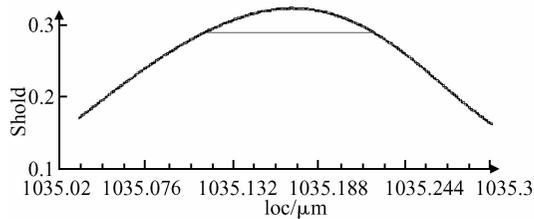


图 12 图 10 中 A 处水平线段光强分布图

Fig. 12 Intensity distribution of horizontal line in area A of Fig. 10

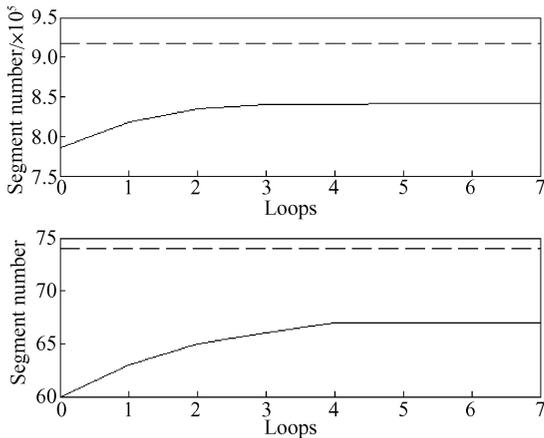


图 13 不同切分算法实验结果的比较

Fig. 13 Comparison of dissection results using different dissection methods

图 13 是两张版图分别采用基于配方的切分和采用本文提出的算法所得到的切分数量的比较,横坐标表示循环次数,纵坐标表示所切分出来的线段的数量.实线表示采用本文算法时每个循环的线段数量,虚线表示采用基于配方的切分时每个循环的线段数量.可以看出使用本文算法切分出来的线段数量小于使用基于配方切分得到的线段的数量,不同的循环中线段的数量减少 10%~15%不等.基于配方的切分在循环开始前已经切分完毕,循环中不再改变,而本文提出的算法切分结果在循环中根据需要动态改变.

图 14 是 PRV(post RET verification)的结果,在同样的 PRV 检查条件下,采用本文算法的 OPC 结果的易出错点比基于配方切分的 OPC 结果的易出错点数量下降了 35%.减少的易出错点主要集中在断线和桥联这两个方面,占减少总数的 80%以上.

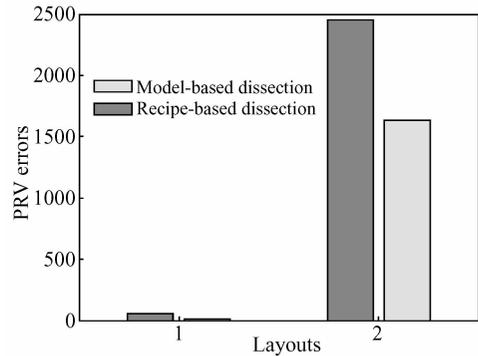


图 14 两种不同 OPC 后的版图的 PRV 检查结果

Fig. 14 PRV results of two different OPCed layouts

5 结论

本文提出了基于光学模型的动态自适应切分算法.本算法基于光刻模型和几何环境自动判断光强分布出现高频的地方,并进行精细的切分,优化采样点的数量和位置,减少了 10%~15%的切分出的小线段的数量.动态地进行切分并且跟踪波峰波谷的移动,有效地抑制纹波现象,提高了 OPC 的质量,使 PRV 错误率降低 35%.

参考文献

- [1] LaPedus M. Industry socked by next-gen litho woes. EE Times news, 2007, 03:05
- [2] Word J, Cobb N B. Enhanced model based OPC for 65nm and blow. SPIE, 2004, 5567:1305
- [3] Bahnas M, Al-Imam M, Seoud A, et al. Implementation of adaptive site optimization in model-based OPC for minimizing ripples. SPIE, 2006, 6156:615615
- [4] Lai C M, Ho J S, Lai C W, et al. Phenomena and OPC solution of ripple patterns for 65nm node. SPIE, 2004, 5377:1165
- [5] Cobb N. Flexible sparse and dense OPC algorithms. SPIE, 2005, 5853:693
- [6] Word J, Torres A, LaCour P. Advanced layout fragmentation and simulation schemes for model based OPCC. SPIE, 2005, 5754:1159
- [7] Kang J H, Lee S U, Kim J, et al. Application of enhanced dynamic fragmentation to minimize false error from post OPC verification. SPIE, 2007, 6521:65210U
- [8] Melvin III L S, Rieger M L. A model-based methodology for reducing OPC output pattern complexity. SPIE, 2003, 5256:238

Model-Based Dynamic Dissection in OPC

Yang Yiwei[†], Shi Zheng, Yan Xiaolang, and Chen Ye

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

Abstract: optical proximity correction (OPC) is a key step in nanometer scale lithography technology. Currently, dissection in OPC is recipe-based. However, as the critical features shrink and the layout becomes more complicated, it is hard to debug and handle all possible cases in the layout. Incomplete recipe-based dissection will introduce or worsen the effects of ripple, breaking, bridging, and line-end shortening. This paper presents a new dissection method, which is lithographic model-based and can dynamically change the dissection and sampling point positions during OPC correction loops. According to experiments on 90nm designs, the new dissection method can reduce 10%~15% of segments, save considerable time during recipe debugging, improve OPC quality, and reduce hot spot errors rates by 35%.

Key words: OPC; DFM; Dissection; lithography modeling

EEACC: 2550G

Article ID: 0253-4177(2008)07-1422-06

[†] Corresponding author. Email: yangyw@vlsi.zju.edu.cn

Received 9 November 2007, revised manuscript received 31 December 2007