

一维版图的快速光刻仿真

谢春蕾 史 峥 林 斌

(浙江大学超大规模集成电路设计研究所, 浙江 杭州 310027)

摘要 充分利用光刻系统中光源的部分相干特性和一维图形的特性,提出了针对一维版图的快速平面光刻仿真算法。该方法由一维基元图形查表法、最小查找表及其边缘延伸和无切割的大面积版图仿真组成。仿真结果表明,在保证极高准确性的基础上,相比于传统的快速仿真方法,该方法将查找表的建立时间缩短了 95% 以上、基本图形的仿真速度提高了 48% 左右、大面积版图的仿真速度提高了 70% 以上。

关键词 成像系统;光刻;光刻仿真;一维版图

中图分类号 TN305.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS201333.1111001

Fast Lithography Simulation for One-Dimensional Layout

Xie Chunlei Shi Zheng Lin Bin

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

Abstract One fast lithography simulation methodology is proposed for one-dimensional layout, taking advantage from the characteristics of partial coherent system and one-dimensional pattern. The new methodology consists of look-up table based on one-dimensional basis pattern, the minimum look-up table and its boundary extension, and simulation of large scale layout without division. Simulation and experiment results show that comparing the new algorithm with conventional method, the building time of look-up table is reduced by more than 95%, the simulation speed for basic pattern improves by about 48% and the simulation speed for large scale layout improves by more than 70% based on high accuracy.

Key words imaging systems; lithography; lithography simulation; one-dimensional layout

OCIS codes 110.5220; 110.4980; 110.3960

1 引 言

随着集成电路尺寸的不断缩小,光刻成为目前集成电路生产中最关键的技术。光刻仿真则成为集成电路生产的重要手段之一,用来预测、解释或者证明光刻过程中光刻胶表面的光强分布。光刻仿真不仅被广泛应用于光学临近校正(OPC)、移相掩模(PSM)和可制造性设计(DFM)等集成电路版图设计和优化技术中^[1-5],而且在光学系统(光刻机的数值孔径、光瞳、照射角度等)的设计和优化上也有重要应用^[6-8]。

当前集成电路生产已进入“深亚波长光刻”技术

阶段,即电路的特征尺寸远小于光刻所用的光源波长。人们一直期待能够将波长更短的新光源(极紫外线,EUV)应用到集成电路生产的光刻工艺中。但是由于可靠性、缺陷控制等方面的问题,在未来很长一段时间,193 nm 波长的 ArF 光源仍然是唯一可用的激光光源,被应用在 32 nm/22 nm 工艺节点下的大规模集成电路生产中^[9]。事实上,以目前的光刻分辨率增强技术(RET),复杂的二维版图很难在 32 nm 工艺下印刷成功。因此,Lavin 等^[10-11]提出了一种更加规则的版图设计规则,即一维版图设计规则。此后的大量研究工作证明了这种设计规则

收稿日期: 2013-04-02; **收到修改稿日期**: 2013-06-16

作者简介: 谢春蕾(1983—),男,博士研究生,主要从事集成电路光学临近校正和可制造性设计方面的研究。

E-mail: xiecl@vlsi.zju.edu.cn

导师简介: 史 峥(1967—),男,博士,副教授,主要从事集成电路设计自动化方面的研究。

E-mail: shiz@vlsi.zju.edu.cn

的可行性和有效性^[12-14]。传统二维版图和一维版图在设计上有一定区别。在一维版图设计中,同一层上的图形均为等宽等间隔的栅状平行线条,并通过在线条的不同位置插入间隙或者通孔来实现所需的电路功能。一维版图避免了二维版图中需要的更高空间分辨率的转角图形,从而大幅提高了版图的光刻质量^[15]。得益于一维版图设计规则,一个采用一维版图设计规则的 45 nm 工艺 CPU 版图甚至被按比例缩小到了 16 nm 工艺节点^[16]。

根据光刻系统中的部分相干性和集成电路版图中曼哈顿图形的特性,Cobb 等^[1,17-18]最早提出了针对集成电路版图的快速光刻仿真。此后,人们对快速光刻仿真进行了大量的研究工作。Liu 等^[19]提出通过利用卷积计算的平移特性来减少仿真中用到的查找表的个数,Gong 等^[20]提出通过降解传输交叉系数矩阵来加快仿真速度,曹宇婷等^[21]提出了针对新型光刻光源——极紫外光的快速仿真算法。

本文利用一维版图的特性和光刻系统中光学相干半径的概念,对一维版图的仿真速度和查找表尺寸进行改进。利用一维版图的图形特性,提出了一维基元图形查表法,将一维版图仿真过程中的查表次数和矩阵运算的次数减少了一半。考虑到光学相干半径,剔除了查找表中的冗余信息,将查找表的尺寸缩减到了最小,并提出了将查找表边缘复制延伸的方法,以得到任意尺寸的查找表。在此基础上,提出了大面积版图的快速仿真方法,避免了传统的切割方法带来的冗余计算,进一步缩短了版图的仿真时间。

2 理论推导

2.1 光刻系统模型

2.1.1 光刻成像系统

在集成电路生产中,光刻过程所用的光学成像系统是部分相干系统,如图 1 所示,该系统由照明系统、掩模板和投影系统三部分组成。

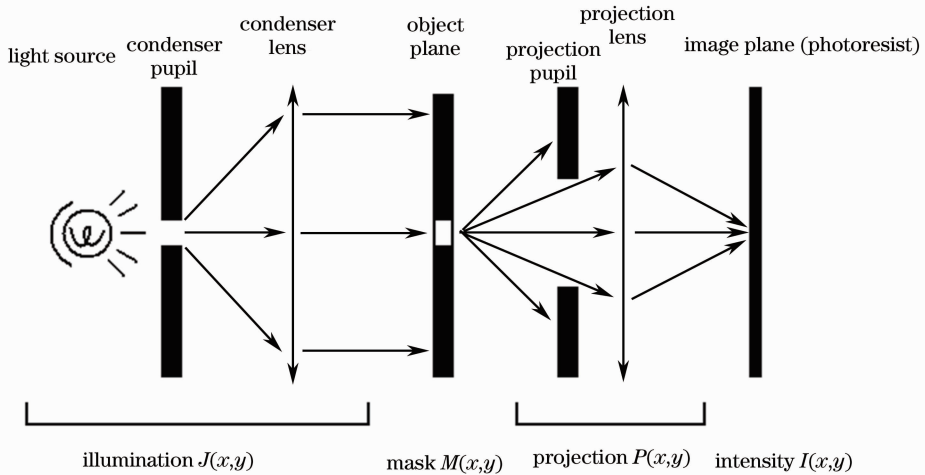


图 1 光刻过程中的光学成像系统

Fig. 1 Optical image system in lithography process

图 1 中部分相干光源和会聚透镜组组成了照明系统。照明系统一般采用科勒照明的组成方式,即将光源置于会聚透镜组的前焦平面上,光源各点发出的光线经过会聚透镜组后都成为平行光波,从而确保掩模板上照度的一致性。各束平行光波经过掩模板后,其场强和相位带上了掩模板的调制信息,经过投射透镜组,成像于光刻胶表面。

2.1.2 部分相干光成像模型

根据霍普金斯利(Hopkins)公式,成像平面上的光强分布 $I(x, y)$ 可以由(1)式得到:

$$I(x, y) = \int_{R^4} \mathbf{M}(x_1, y_1) \mathbf{M}^*(x_2, y_2) \mathbf{f}_{TCC}(x - x_1, y - y_1; x - x_2, y - y_2) dx_1 dx_2 dy_1 dy_2, \quad (1)$$

其中 $\mathbf{M}(x, y)$ 是掩模板上需要成像的图形, $\mathbf{M}^*(x, y)$ 是其复共轭矩阵, \mathbf{f}_{TCC} 是空间域的传输交叉系数, \mathbf{f}_{TCC} 反映了整个光刻系统的特性,其定义为:

$$\mathbf{f}_{TCC}(x_1, x_2; y_1, y_2) = \mathbf{P}(x_1, y_1) \mathbf{J}(x_1 - x_2, y_1 - y_2) \mathbf{P}^*(x_2, y_2). \quad (2)$$

式中 $\mathbf{J}(x_1 - x_2, y_1 - y_2)$ 是互强度函数,反映了照明系统的特性, $\mathbf{P}(x, y)$ 和 $\mathbf{P}^*(x, y)$ 是相干点扩散函数及其复共轭,反映了投影透镜系统的特性,也被称为光瞳函数。

2.1.3 基于卷积核的快速点光强计算

利用 Hopkins 公式计算成像平面的光强,需要的运算量过大。当需要对大面积版图进行光刻仿真的时候,对计算机的储存空间和运算时间都造成了

巨大的压力。因此,目前的光刻仿真软件都使用了基于卷积核的快速光强计算方法^[1,19],该方法如下:

对 f_{TCC} 做特征值分解,可得

$$f_{TCC}(x_1, x_2; y_1, y_2) = \sum_n \lambda_n \boldsymbol{\varphi}_n(x_1, y_1) \boldsymbol{\varphi}_n^*(x_1, y_1), \quad (3)$$

式中 λ_n 是第 n 个特征向量 $\boldsymbol{\varphi}_n(x_1, y_1)$ 所对应的特征值。由于 f_{TCC} 矩阵是正定的厄密矩阵,所以所有的特征值均大于零。

将(3)式代入(1)式中,得到光强的计算公式:

$$I(x, y) = \sum_n \lambda_n |\varphi_n(x, y) \otimes M(x, y)|^2, \quad (4)$$

式中 \otimes 代表二维卷积, φ_n 通常被称为卷积核或者主波, λ_n 表示第 n 个主波 φ_n 在整个部分相干系统中所占的权重。将所有的 λ_i 按照降序排列,会发现 λ_i 的绝对值大小迅速衰减。取序列的前若干项重建的相干

系统可以作为原系统的最佳近似,在保持足够精度的情况下,大大减少运算量。选取更多的卷积核意味着更高的精度、更多的运算存储量和更长的运算时间。

图 2 显示了某典型的光学模型中特征值最大的 6 个卷积核实例。如图 2 所示,卷积核是定义在整个二维平面上的函数,但是在远离中心的区域其取值趋近于零,中心区域到零之间的范围称为光学相干半径,其计算公式如下^[22]:

$$R_{opt} = \frac{1.12}{\sigma} \times \frac{\lambda}{NA}, \quad (5)$$

式中 σ 为光源的相干度, σ 越小,光源的相干度越高, $\sigma = 0$ 代表光源完全相干; λ 为光源的波长; NA 为数值孔径。

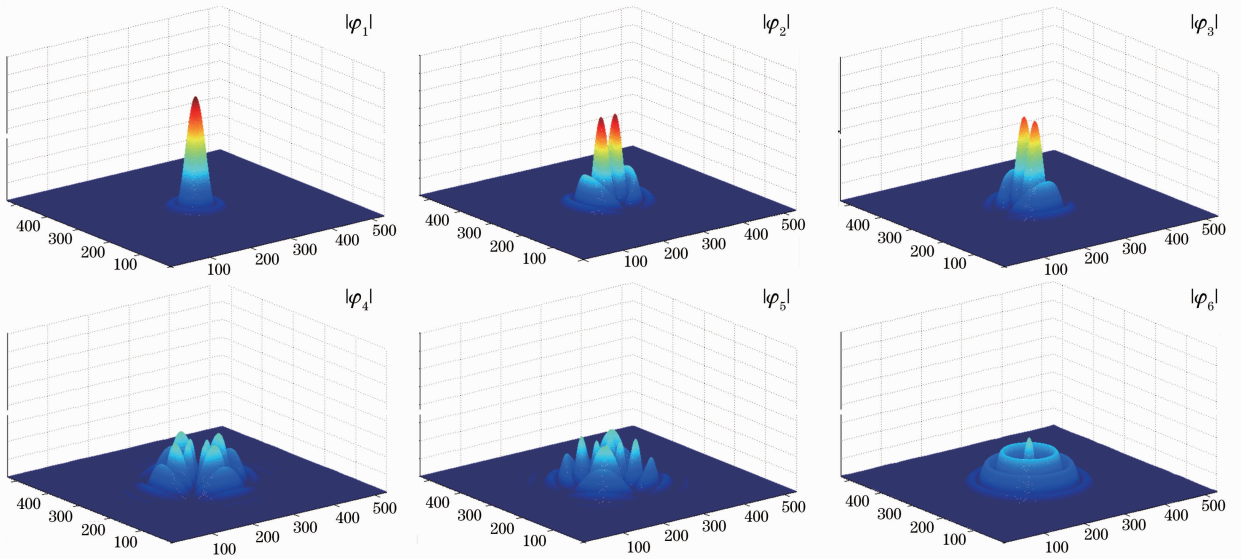


图 2 一组典型的光刻模型卷积核实例

Fig. 2 A set of kernels for one typical lithography model

2.2 集成电路版图

虽然(4)式已经大幅简化了部分相干光系统光刻仿真的计算量,但是二维卷积运算仍然需要花费很长时间。为了进一步加快仿真速度,查表法被广泛应用在目前的光刻仿真软件中^[1,19],查表法的建立过程为

$$U_0(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \text{ and } y \geq 0 \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (6)$$

(6)式定义了一个二维阶跃函数作为单位基元图形。该函数可以被看作左下角在坐标原点,分别向 X 轴正方向和 Y 轴正方向无限延伸的一个无限大的矩形。通过平移该阶跃函数,可以得到基元图形的定

义函数,

$$U_n(x, y) = U_0(x - x_n, y - y_n) = \begin{cases} 1, & x \geq x_n \text{ and } y \geq y_n \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (7)$$

对于集成电路版图中的曼哈顿图形,均可以用有限个(7)式中所定义的基元图形组合而成,且参与组合的基元图形的数目与曼哈顿图形的顶点数相同。

$$M(x, y) = \sum_n \mu_n U_n(x, y), \quad (8)$$

式中 $U_n(x, y)$ 代表一个左下角位于坐标 (x_n, y_n) 的无限大矩形。 μ_n 为基元图形 U_n 的权重,其取值为 1 或者 -1,如图 3 所示。

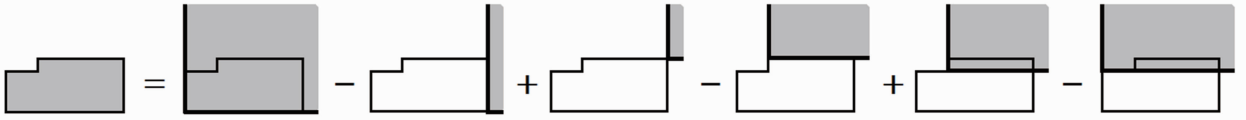


图 3 曼哈顿图形分解为二维基元图形的组合

Fig. 3 Decomposition of Manhattan pattern into sum of 2D basis patterns

将(8)式代入(4)式,并利用卷积的分配率,得到基于查表法的光强计算公式:

$$I(x, y) = \sum_n \lambda_n \left| \varphi_n(x, y) \times \sum_n \mu_n U_n(x, y) \right|^2 = \sum_n \lambda_n \left| \sum_n \mu_n [\varphi_n(x, y) \times U_n(x, y)] \right|^2 = \sum_n \lambda_n \left| \sum_n \mu_n [(\varphi_n \times U_0)(x - x_n, y - y_n)] \right|^2. \quad (9)$$

由(9)式可知,如果将单位基元图形 U_0 与各个卷积核的卷积结果预先计算好并建表储存起来,就可以通过平移得到所有基元函数与卷积核的卷积结果。然后通过叠加、平方、加权求和得到任意曼哈顿图形经过光刻后的平面光强。

定义了宽度为 w 的单位一维阶跃函数。其对应于左下角在 origin, 宽度为 w , 向 X 轴正方向无限延伸的矩形。

$$L_{w0}(x, y) = \begin{cases} 1, & x \geq 0 \text{ and } 0 \leq y \leq w \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (10)$$

相应地, 平移单位一维阶跃函数 $L_{w0}(x, y)$ 可以得到一组基于一维基元图形的 $L_{wn}(x, y)$ 、曼哈顿图形组合公式和查表法光强计算公式, 分别可以表示为

3 一维版图的快速平面光学仿真

3.1 一维基元函数

不同于(6)式所定义的二维阶跃函数, (10)式定

$$L_{wn}(x, y) = L_{w0}(x - x_n, y - y_n) = \begin{cases} 1, & x \geq x_n \text{ and } y_n \leq y \leq y_n + w \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (11)$$

$$M(x, y) = \sum_n \mu_n L_{wn}(x, y), \quad (12)$$

$$I(x, y) = \sum_n \lambda_n \left| \sum_n \mu_n [(\varphi_n \otimes L_0)(x - x_n, y - y_n)] \right|^2. \quad (13)$$

组成一个曼哈顿图形的一维基元图形数目与图形中竖直边的数目相同, 为图形中顶点数目的一半。所以, 当对同一个曼哈顿图形进行光学仿真时, 查表的次数为传统基于二维基元图形计算方法的一半, 即仿真速度比传统方法提高一倍。如果组成曼哈顿图形的一维基元图形有 n 种宽度(如图 4 中的图形由 3 种宽度的一维基元图形组成), 则需要建立 n 张查找表, 所需要的储存空间为传统方法的 n 倍。当需要仿真的版图为一维版图时, 版图中均为等宽的矩形, 所以, 只需要一种宽度的基元图形, 所需的储存空间和传统方法相同。

3.2 查找表的建立

查找表由单位阶跃函数同各个卷积核卷积得到。由于光学相干半径的存在, 卷积核的大小为 $2R_{opt} \times 2R_{opt}$ 。而单位阶跃函数则是定义在整个二维平面上, 范围无限大的图形。所以, 由卷积得到的查找表也是范围无限大的。

为了便于储存和计算, 只需截取查找表的一部分即可。传统的仿真方法中, 查找表的大小取 $(2R_{opt} + W) \times (2R_{opt} + H)$, 其中 W 和 H 为被仿真版图的宽和高, 一般取值远大于 R_{opt} ^[19]。

根据光学相干半径的定义可知, 平面上一个点

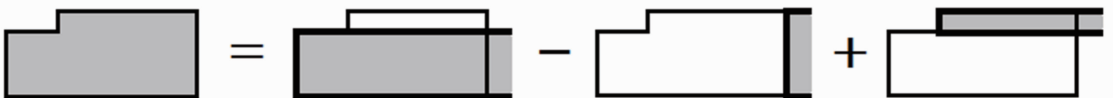


图 4 基于一维基元图形的曼哈顿图形分解

Fig. 4 Decomposition of Manhattan pattern into sum of 1D basis patterns

的光强只由光学相干半径内的图形决定。所以查找表只需记录阶跃函数对光学相干半径内的光强影响,光学相干半径外的数据均为冗余信息,可以由光

学半径内的数据复制得到。二维基元函数和一维基元函数对应的查找表延伸公式分别可表示为:

$$\varphi_n \otimes U_0(x, y) = \begin{cases} \varphi_n \otimes U_0(x, y), & -R_{\text{opt}} \leq x \leq R_{\text{opt}}, -R_{\text{opt}} \leq y \leq R_{\text{opt}} \\ \varphi_n \otimes U_0(R_{\text{opt}}, y), & x > R_{\text{opt}}, -R_{\text{opt}} \leq y \leq R_{\text{opt}} \\ \varphi_n \otimes U_0(x, R_{\text{opt}}), & -R_{\text{opt}} \leq x \leq R_{\text{opt}}, y > R_{\text{opt}} \\ \varphi_n \otimes U_0(R_{\text{opt}}, R_{\text{opt}}), & x > R_{\text{opt}}, y > R_{\text{opt}} \\ 0, & \text{else} \end{cases}, \quad (14)$$

$$\varphi_n \otimes L_0(x, y) = \begin{cases} \varphi_n \otimes L_0(x, y), & -R_{\text{opt}} \leq x \leq R_{\text{opt}}, -R_{\text{opt}} \leq y \leq R_{\text{opt}} + \omega \\ \varphi_n \otimes L_0(R_{\text{opt}}, y), & x > R_{\text{opt}}, -R_{\text{opt}} \leq y \leq R_{\text{opt}} + \omega \\ 0, & \text{else} \end{cases}. \quad (15)$$

如图 5 所示,最小尺寸的二维阶跃函数的查找表大小为 $2R_{\text{opt}} \times 2R_{\text{opt}}$,一维阶跃函数的查找表大小为 $(2R_{\text{opt}} + \omega) \times 2R_{\text{opt}}$,其中 ω 为一维阶跃函数中矩形的宽度,一般远小于 R_{opt} 。当需要其他尺寸的查

找表时,可以通过将表格边缘的数据复制延伸得到。相比传统方法,该方法可以大幅减少查找表的储存空间。

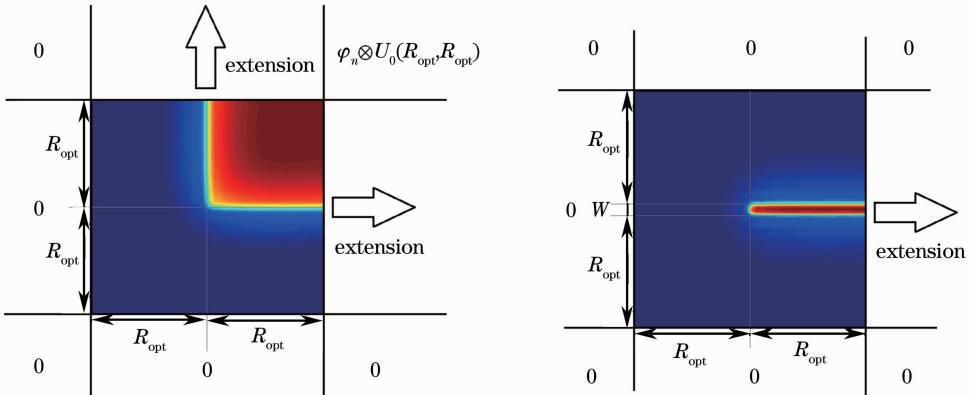


图 5 两种阶跃函数对应的查找表及其复制延伸方式

Fig. 5 Look-up tables for two kinds of step functions and their extension methods

由于仿真的版图均由 0 和 1 构成,所以建表过程中的卷积计算也就是将阶跃图形中非 0 部分对应的卷积核元素相加求和的过程。范围为 $[-R_{\text{opt}}, R_{\text{opt}}] \times [-R_{\text{opt}}, R_{\text{opt}}]$ 的单位二维阶跃图形中的非 0 部分大小为 R_{opt}^2 ,而范围为 $[-R_{\text{opt}}, R_{\text{opt}} + \omega] \times [-R_{\text{opt}}, R_{\text{opt}}]$ 的单位一维阶跃图形中的非 0 部分大小为 ωR_{opt} 。所以,用来建立一维阶跃函数查找表的时间远小于二维阶跃函数,并且随着光学相干半径的增加,两者之间的差距会急剧增大。

3.3 大面积版图的光学仿真

为了提高仿真速度和减少查找表的储存空间,传统的仿真方法会将大面积的版图切割为大小相当的方格^[19]。首先对各个方格进行独立的仿真,再将每个方格的仿真结果拼接成整个版图的最终仿真结

果。如图 6 所示,当对单个方格进行光学仿真时,需要将仿真范围扩大 R_{opt} ,将光学相干半径内的图形考虑进来,才能得到方格范围内的准确光强分布。由于扩大的范围内的光强分布没有考虑其对应光学相干半径内的所有图形,所以是不准确的,将会被舍弃。

传统的仿真过程中,更小的分割方块意味着更小的查找表和更多的冗余计算。然而,基于 3.2 节中提出的查找表延伸方法,则可以由固定大小的查找表得到任意范围内 $(\varphi_n \otimes U_0)$ 的计算结果。因此,分割方块大小可以放大到最大,即直接进行全版图仿真,不做切割,从而将冗余计算降低为零。

如图 7 所示,无需切割的大面积版图仿真方法以每一个独立的图形为对象进行仿真。将该图形的边缘向外扩张 R_{opt} ,即为光强受到该图形影响的区

域,区域外的光强受到该图形的影响为零。只需将查找表延伸为该区域的大小,便可以得到各个特征向量所对应的查找表结果。在处理完所有的图形

后,则可以通过查表法光强计算公式得到整个平面的光强分布。

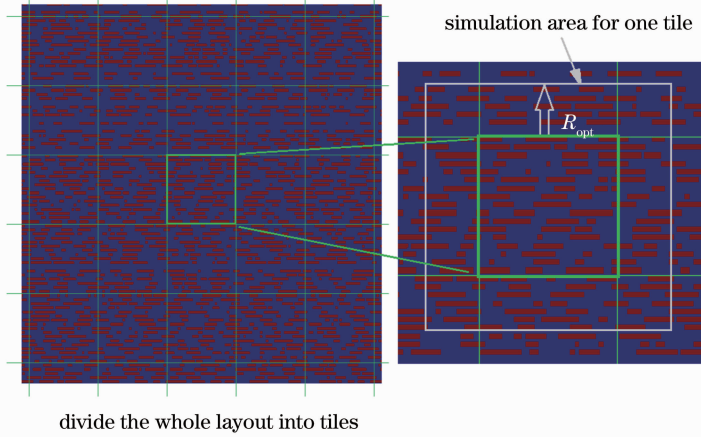


图 6 大面积版图的分块切割仿真

Fig. 6 Division of large scale layout into tiles for simulation

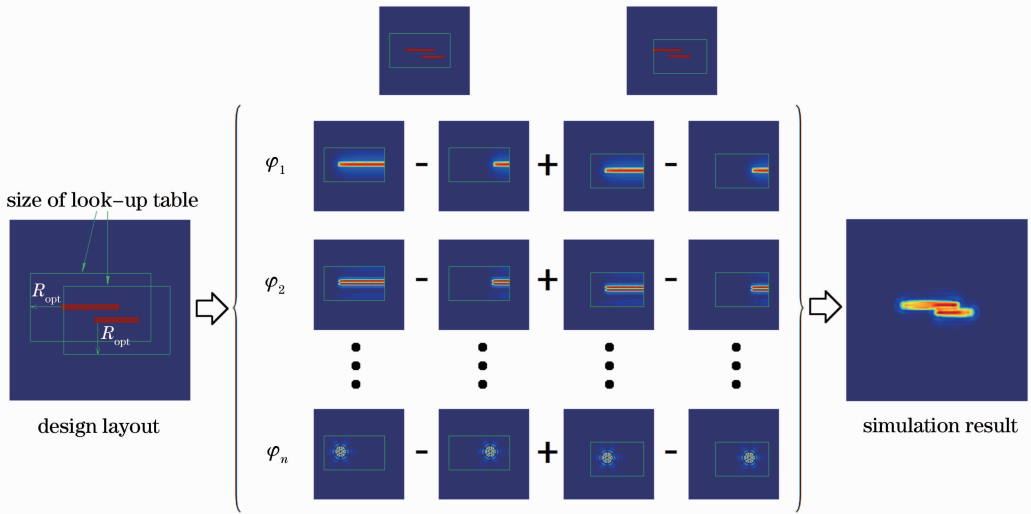


图 7 大面积版图的无切割仿真

Fig. 7 Simulation of large scale layout without division

4 实验结果

在前面的研究基础上,本节进行了大量的仿真实验来验证快速仿真方法的准确性和有效性。

4.1 查找表建立时间

为比较基于一维基元图形和二维基元图形的查找表建立时间,分别在三种模式下建立了 8 种尺寸的查找表,如表 1 所示。三种建表模式为:

- mode 1: 基于二维基元图形的查找表;
- mode 2: 基于一维基元图形的查找表,并保持图形物理宽度不变;
- mode 3: 基于一维基元图形的查找表,并保持

图形格点宽度不变。

为了避免光学模型中的数值对建表时间的影响,保持光学模型的参数不变,通过改变光学模型的格点间距来改变查找表的尺寸。建表所使用的光学系统参数为:环形照明,光源外径为 0.95,光源内径为 0.8,光源波长为 193 nm,NA 为 1.35,光学模型半径为 1411 nm。选取 f_{TCC} 矩阵最大的 7 个特征值所对应的特征向量作为卷积核代表整个光学系统。表 1 的实验结果显示,基于一维基元图形的查找表建立时间不到传统方法的 5%。

表 1 查找表建立时间比较

Table 1 Comparison of building time for look-up table

Grid size /nm	Size of kernels	Building time for mode 1 /s	Building time for mode 2* /s	Improvement (mode 1 vs mode 2) /%	Building time for mode 3** /s	Improvement (mode 1 vs mode 3) /%
5.6	505×505	31.26	1.44	95.39	1.44	95.39
5.2	543×543	38.12	1.71	95.51	1.55	95.59
4.8	589×589	52.33	2.26	95.68	1.94	96.29
4.4	643×643	72.80	3.13	95.70	2.46	96.62
4.0	707×707	107.49	4.45	95.86	3.26	96.97
3.6	785×785	162.55	6.92	95.74	4.44	97.27
3.2	883×883	288.13	11.72	95.93	6.64	97.70
2.8	1009×1009	524.91	21.09	95.98	10.55	97.99

* :line width (nm) = 56 nm

** : line width(grid) = 10 grids

4.2 基本图形仿真比较

为了衡量仿真结果之间的差异,定义归一化均方差为

$$E(\mathbf{A}, \mathbf{B}) = \frac{\sum_i \sum_j |a_{ij} - b_{ij}|^2}{\sum_i \sum_j |a_{ij}|^2}, \quad (16)$$

式中 \mathbf{A} 和 \mathbf{B} 为同一图形通过两种仿真方法得到的平面光强矩阵, a_{ij} 和 b_{ij} 为矩阵中的元素。







表 2 记录了三种仿真方法对 6 种基本一维图形的仿真时间,和仿真结果间的归一化均方差。三种仿真方法分别为:基于光学系统卷积核的卷积式仿真(CK),基于二维基元图形的查表法仿真(2D)和基于一维图形的查表法仿真(1D)。对比传统的基于二维图形查表法仿真时间,计算了基于一维图形

查表法仿真时间的改进(RI)。以传统的卷积式仿真结果为标准,分别计算了基于二维图形和基于一维图形的仿真结果的归一化均方差(E_{2D}/E_{1D})。计算中所使用的查找表为 4.1 节中建立的尺寸为 505×505 的查找表。

仿真结果在表 2 中给出。表中的数据表明,新方法的仿真时间比传统方法减少了 48% 以上,归一化均方差也只有传统方法的 1% 左右。由于归一化均方差的数量级仅为 10^{-28} ,说明两种方法的准确性在理论上基本一致,误差主要来源于计算过程。另外从表中的数据可以发现,卷积式仿真算法的计算时间主要和图形中非零元素的个数有关,而查表法仿真的计算时间主要和图形中矩形的个数有关。

表 2 基本图形的仿真时间和准确度对比

Table 2 Comparison of simulation time and accuracy for basic patterns

Test pattern						
CK/s	7.23	4.32	5.65	6.27	6.32	5.98
2D/s	1.21	1.20	1.20	2.36	2.14	2.60
1D/s	0.62	0.62	0.62	1.21	1.09	1.32
RI /%	48.76	48.33	48.33	48.73	49.07	49.23
$E_{2D}/10^{-28}$	46.2	41.8	42.6	43.6	43.4	44.0
$E_{1D}/10^{-28}$	0.524	0.277	0.392	0.397	0.460	0.454

4.3 大面积版图仿真比较

为了反映传统的切割分块仿真方法所造成的冗余计算对仿真时间的影响,对一个格点尺寸为 4040×4040 的一维版图进行了仿真。版图的格点间距为 5.6 nm,含有 5821 个随即生成的宽度相等的矩形。计算中所使用的查找表同样为 4.1 节中所建立的尺

寸为 505×505 的查找表。图 8 为仿真用的一维版图及其仿真结果。表 3 记录了不同的分割方格尺寸下,基于二维基元图形和基于一维基元图形的仿真时间。表中的数据显示,对比切割方块最小的切割方式,无切割的仿真方式将仿真时间缩短了 70% 以上。

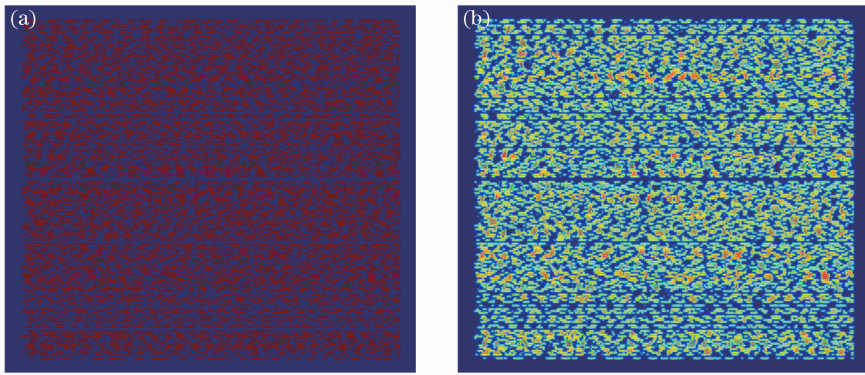


图 8 (a)一维版图及(b)其光刻仿真的结果

Fig. 8 (a) 1D layout and (b) lithography simulation results

表 3 大面积版图仿真时间

Table 3 Simulation time for large scale layout

Tiles' size	505×505	808×808	1010×1010	2020×2020	4040×4040
Tiles' number	64	25	16	4	1
2D /s	3358.57	3049.37	2877.16	2179.23	982.10
1D /s	1918.34	1663.15	1588.24	1171.42	518.78
Improvement /%	42.88	45.46	44.80	46.25	47.18

5 结 论

针对一维版图的快速光刻仿真,提出了基于一维基元图形的查表法仿真,查找表的边缘延伸方法,以减小查找表的尺寸,进而实现大面积版图的非切割式仿真。实验结果表明,在保证极高准确性的基础上,相比于传统的快速仿真方法,该方法大幅度缩短了查找表的建立时间,提高了基本图形和大规模版图的仿真速度。该方法对于后续集成电路版图优化和光学系统优化有着重要的意义。

参 考 文 献

- 1 N B Cobb, A Zakhor. Fast sparse aerial-image calculation for OPC [C]. SPIE, 1995, 2621: 534—545.
- 2 Taichi Yamazaki, Ryohei Gorai, Yosuke Kojima, *et al.*. Attenuated phase-shift mask with high tolerance for 193 nm radiation damage [C]. SPIE, 2011, 8166: 81663V.
- 3 P Gupta, A B Kahng, S Nakagawa, *et al.*. Lithography simulation-based full-chip design analyses [C]. SPIE, 2006, 6156: 61560T.
- 4 B Charlotte, M Cement, B G Fabrice, *et al.*. Fully integrated litho aware PnR design solution [C]. SPIE, 2012, 8327: 83270A.
- 5 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang, *et al.*. Analysis of mask shadowing effects in extreme-ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(8): 0805001.
曹宇婷, 王向朝, 步 扬, 等. 极紫外投影光刻掩模阴影效应分析[J]. 光学学报, 2012, 32(8): 0805001.
- 6 D G Flagello, R J Socha, X Shi, *et al.*. Optimizing and enhancing optical systems to meet the low k_1 challenge [C]. SPIE, 2003, 5040: 139—150.
- 7 Guo Liping, Wang Xiangzhao, Huang Huijie. Impact of

illumination pupil filling unbalance on imaging performance of lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(6): 885—890.

郭立萍, 王向朝, 黄惠杰. 照明光瞳非对称性对光刻成像质量的影响[J]. 光学学报, 2006, 26(6): 885—890.

- 8 Wang Jun, Jin Chunshui, Wang Liping, *et al.*. Study on the off-axis illumination for extreme ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(12): 1211003.

王 君, 金春水, 王丽萍, 等. 极紫外光刻离轴照明技术研究 [J]. 光学学报, 2012, 32(12): 1211003.

- 9 ITRS, 2012 Update Overview of International Technology Roadmap for Semiconductors [Z]. 2012, 14.

- 10 M Lavin, F L Heng, G Northrop. Backend CAD flows for “restrictive design rules” [J]. Proceedings of the 2004 IEEE/ACM International Conference on Computer-Aided Design, 2004, 739—746.

- 11 V Kheterpal, V Rovner, T G Hersan, *et al.*. Design methodology for IC manufacturability based on regular logic-bricks [J]. Proceedings of the 42nd Annual Design Automation Conference, 2005, 353—358.

- 12 L Liebmann, L Pileggi, J Hibbeler, *et al.*. Simplify to survive: prescriptive layouts ensure profitable scaling to 32 nm and beyond [C]. SPIE, 2009, 7275: 72750A.

- 13 R T Greenway, R Hendel, K Jeong, *et al.*. Interference assisted lithography for patterning of 1D gridded design [C]. SPIE, 2009, 7271: 72712U.

- 14 M C Smayling, V Axelrad, K Tsujita, *et al.*. Sub-20 nm logic lithography optimization with simple OPC and multiple pitch division [C]. SPIE, 2012, 8326: 832613.

- 15 M C Smayling, V Axelrad. 32 nm and below logic patterning using optimized illumination and double patterning [C]. SPIE, 2009, 7274: 72740K.

- 16 C Bencher, H X Dai, Y M Chen. Gridded design rule scaling: taking the CPU toward the 16 nm node [C]. SPIE, 2009, 7274: 72740G.

- 17 Y C Pati, T Kailath. Phase-shifting masks for microlithography: automated design and mask requirements [J]. J Opt Soc Am A, 1994, 11(9): 2438—2453.

- 18 Y C Pati, A A Ghazanfarian, R F Pease. Exploiting structure in fast aerial image computation for integrated circuit patterns [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1997, 10(1): 62-74.
- 19 Liu Shiyuan, Wu Xiaofei, Liu Wei, *et al.*. Fast aerial image simulations using one basis mask pattern for optical proximity correction [J]. J Vac Sci Technol B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2011, 29(6): 06FH03.
- 20 Gong Peng, Liu Shiyuan, Lü Wen, *et al.*. Fast aerial image simulations for partially coherent systems by transmission cross coefficient decomposition with analytical kernels [J]. J Vac Sci Technol B: Microelectronics and Nanometer Structures, 2012, 30(6): 06FG03.
- 21 Cao Yuting, Wang Xiangzhao, Bu Yang. Fast simulation method for contact hole mask in extreme-ultraviolet lithography [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(7): 0705001.
曹宇婷, 王向朝, 步扬. 极紫外投影光刻接触孔掩模的快速仿真计算[J]. 光学学报, 2012, 32(7): 0705001.
- 22 A K K Wong. Resolution Enhancement Techniques in Optical Lithography [M]. Bellingham, WA: SPIE Press, 2001. 58.

栏目编辑：李文喆