文章编号:1674-2974(2022)10-0183-09

DOI:10.16339/j.cnki.hdxbzkb.2022239

电子束光刻"自主可控"EDA软件HNU-EBL

姚文泽¹,徐宏成¹,赵浩杰¹,刘薇¹,侯程阳¹,陈艺勤²,段辉高²,刘杰^{1†}
(1. 湖南大学电气与信息工程学院,湖南长沙 410082;
2. 湖南大学机械与运载工程学院,湖南长沙 410082)

摘要:为模拟和优化电子束光刻(Electron Beam Lithography,EBL)工艺过程,提高电子束 光刻版图加工质量,依托湖南大学(Hunan University,HNU)开发了一套电子束光刻的"自主可 控"国产电子设计自动化(Electronic Design Automation,EDA)软件HNU-EBL.该软件实现了以 下主要功能:1)基于 Monte Carlo方法计算电子束在光刻版和衬底中的散射过程与运动轨迹; 2)基于多高斯加指数函数模型计算拟合出电子束散射的点扩散函数;3)基于GDSII光刻版图 文件矩阵化,进行邻近效应、雾效应等校正计算,优化电子束曝光剂量;4)基于卷积计算,计算 出给定曝光剂量下的能量沉积密度,并计算出边缘放置误差等光刻加工质量关键指标.基于 该软件,通过异或门(Exclusive OR,XOR)集成电路的光刻版图算例,计算在聚甲基丙烯酸甲酯 (Polymethyl Methacrylate,PMMA)光刻胶和硅衬底中10 kV电子束的光刻工艺过程.通过对比 电子束邻近效应校正前后的显影版图,验证了该软件的有效性.在完全相同的计算硬件和算 例条件下,与主流同类进口EDA软件进行了对比,证实了在同等精度下,本软件具有更高的计 算效率.已建立http://www.ebeam.com.cn网站,将HNU-EBL软件免费授权给EBL用户使用. 关键词:电子束光刻;计算光刻;Monte Carlo方法;邻近效应校正;EDA软件 中图分类号:TP319

An "Autonomously Controlled" Electronic Design Automation Software HNU–EBL for Electron Beam Lithography

YAO Wenze¹, XU Hongcheng¹, ZHAO Haojie¹, LIU Wei¹, HOU Chengyang¹, CHEN Yiqin², DUAN Huigao², LIU Jie^{1†}

(1. College of Electrical and Information Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China;

2. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Hunan University, Changsha 410082, China)

Abstract: In order to simulate and optimize the Electron Beam Lithography (EBL) process, and to improve the manufacturing quality of EBL layout, our team in Hunan University (HNU) developed a set of Electronic Design Automation (EDA) software toolkit named "HNU-EBL". In this software, the following functionalities have been implemented: 1) Calculation of the scattering process and trajectory of the electron beam in the resist and substrate based on Monte Carlo method; 2) Calculation and fitting of the point spread function of electron beam scattering based on the multi-Gaussian plus exponential function models; 3) Correction of the proximity and fogging effects and optimiza-

 ^{*} 收稿日期:2021-11-16
 基金项目:国家自然科学基金资助项目(61804049), National Natural Science Foundation of China(61804049)
 作者简介:姚文泽(1995—),男,湖北襄阳人,湖南大学博士研究生
 * 通信联系人,E-mail: jie_liu@hnu.edu.cn

tion of the incident electron dose distribution based on the GDSII lithography layout; 4) Calculation of the energy deposition density under a given incident electron dose distribution based on convolution, and evaluation of the key lithography pattern fidelity metrics such as edge placement error. Using an Exclusive OR(XOR) integrated circuit layout as the lithography target pattern, the EBL process of a 10 kV electron beam in Polymethyl Methacrylate(PMMA) resist and silicon substrate layers is calculated. The functionalities and validity of the HNU-EBL is demonstrated by comparing the developed layout patterns with and without the proximity effect correction. Using exactly the same computing hardware and calculation settings, it is shown that the proposed HNU-EBL EDA software's efficiency is better than some of the imported mainstream EBL EDA software. The website http://www.ebeam.com.cn has been established, and the HNU-EBL software is licensed to EBL users for free.

Key words: electron beam lithography; computational lithography; Monte Carlo method; proximity effect correction; EDA software

电子束光刻(Electron Beam Lithography, EBL) 相关的电子设计自动化(Electronic Design Automation, EDA)软件是生产深紫外(Deep Ultraviolet, DUV)/极紫外(Extreme Ultraviolet, EUV)光刻掩模 版、实现亚10 nm尺度极限精度加工的关键技术^[1-5], 被《瓦森纳协议》第3.D.1-3款、美国出口管制法规第 3D003款列入对华禁运清单^[6-7].目前,我国芯片生 产、科学研究所需的EBL EDA软件高度依赖进口. 因此,有必要自主研发,实现EBL、EDA技术"自主 可控".

EBL仿真的基本物理模型是通过模拟电子束在 固体中的散射效应. Chang^[8]通过实验得出电子束在 固体中的散射能量沉积密度分布符合双高斯模型. 随着电子束曝光精度的提升,电子束在光刻胶中的 背散射效应使得非曝光区域出现过量的能量沉积密 度,从而严重影响曝光版图的分辨率,该现象被称为 "邻近效应". 随后 Adesida 等人^[9]通过 Monte Carlo 方 法模拟了电子束的能量散射过程,通过拟合多高斯 函数得到最终的能量沉积密度分布,该函数被称为 "点扩散函数".曝光后的版图能量沉积密度是将曝 光版图剂量矩阵与点扩散函数进行二维离散卷积, 曝光完成后通过显影模型计算得到最终版图的显影 轮廓^[10].EBL版图优化过程,是通过迭代修正的方法 更新曝光剂量矩阵,使得曝光的能量沉积更均匀,显 影后的版图轮廓更加接近于理想曝光轮廓,从而提 升EBL的分辨率.

本文介绍了一款由湖南大学团队自主研发的 EBL EDA 软件(简称"HNU-EBL").本EDA 软件含5 大模块:1)Monte Carlo方法模拟电子束在光刻胶和 衬底中的散射过程与运动轨迹;2)基于 Monte Carlo 散射计算结果的多高斯点扩散函数拟合;3)电子束 邻近效应校正(Proximity Effect Correction, PEC)计 算;4)能量沉积密度模拟与边缘放置误差计算;5) GDSII版图文件计算机图形可视化.本文通过异或门 (Exclusive OR, XOR)集成电路的GDSII版图算例,验 证了电子束邻近效应校正优化的有效性;并与Raith 公司开发的NanoPECS软件进行了计算效率的比较.

1 物理模型与数值算法

1.1 物理模型

电子束在光刻胶与衬底中的散射现象分为前散 射和背散射,如图1所示.电子束的能量集中于前散 射部分,散射范围较小,可以控制在亚10 nm级别; 背散射部分能量相对较低,但是其散射范围可达到 10 μm^[11].





通过 Monte Carlo 方法能够计算模拟电子束的散射过程,并且得到能量沉积密度随曝光点距离的离

散值^[12],该能量分布取决于两个方面:1)电子束的能量与电子束的直径;2)光刻胶和衬底的化学元素组成中不同元素种类与密度.模拟的电子个数越多,能量分布的离散值越精确.Chang发现电子束曝光的能量分布可以使用双高斯函数(Double-Gaussian, 2G)拟合得到点扩散函数,即:

$$P(r) = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) \right]$$
(1)

式中:r为场点与源点距离,单位为nm;α为前散射系数,单位为nm;β为背散射系数,单位为nm;β为背散射系数,单位为nm;η为前散射部分的能量沉积密度比例,无量纲.

为了进一步提高点扩散函数的拟合精确度,科研人员发现通过双高斯函数加指数函数(Double-Gaussian plus exponential, 2G+exp)、三高斯函数(Three-Gaussian, 3G)和三高斯加指数函数(Three-Gaussian plus exponential, 3G+exp)进行拟合能够更好地拟合点扩散函数的模型^[13-15],即

$$P(r) = \frac{1}{\pi \left(1 + \eta + \eta^{''}\right)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta^{''}}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) + \frac{\eta^{''}}{2\gamma_2^2} \exp\left(-\frac{r}{\gamma_2}\right) \right]$$
(2)

$$P(r) = \frac{1}{\pi \left(1 + \eta + \eta'\right)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) + \frac{\eta'}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\gamma^2}\right) \right]$$
(3)

$$P(r) = \frac{1}{\pi \left(1 + \eta + \eta' + \eta''\right)} \left[\frac{1}{\alpha^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\alpha^2}\right) + \frac{\eta}{\beta^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\beta^2}\right) + \frac{\eta'}{\gamma^2} \exp\left(-\frac{r^2}{\gamma^2}\right) + \frac{\eta''}{2\gamma_2^2} \exp\left(-\frac{r}{\gamma_2}\right) \right]$$
(4)

式中: $r \ \alpha \ \beta \ \pi \ \eta$ 与式(1)含义相同; γ 为中程散射 系数,单位为nm; η' 为前散射与中程散射部分的能 量沉积密度比例,无量纲; γ_2 为指数函数散射系数, 单位为nm; η'' 为前散射部分与指数部分的能量沉积 密度比例,无量纲.

1.2 能量沉积密度计算方法

入射电子的能量沉积密度对显影过程中的光刻 胶溶解速率有着直接的影响,从而导致在正光刻胶, 如聚甲基丙烯酸甲酯(Polymethyl Methacrylate, PMMA)曝光区域的显影溶解率远高于非曝光区域, 或导致负光刻胶,氢倍半硅氧烷(Hydrogen Silsequioxane,HSQ)曝光区域的显影溶解率远低于非曝光 区域.

如图2(a)所示,能量沉积密度分布的计算方法 是将版图的曝光剂量与点扩散函数进行直接离散卷 积^[16],即

$$E(\mathbf{r}_i) = \sum_{j=1}^{N} P(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) d(\mathbf{r}_j)$$
(5)

式中: $E(\mathbf{r}_i)$ 为像素 \mathbf{r}_i 位置的能量沉积密度,单位为 eV/nm²; $P(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j)$ 为点扩散函数P(r)的一种向量表示 形式, $\mathbf{r}=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$; $d(\mathbf{r}_j)$ 为像素 \mathbf{r}_j 位置的曝光剂量,单位 μ C/cm²; N为曝光像素点的总个数.此处,我们采用 均匀网格剖分,即每个曝光像素的大小相同.

邻近效应校正计算中最耗时的部分是卷积计算,其计算复杂度为O(N²),当版图像素点(N)进一步扩大,将严重影响计算效率.本软件使用二维快速 傅里叶变换执行离散卷积计算,将计算复杂度降低 为O(NlogN)^[17],能够极大提升计算效率,且能够通 过并行算法(Open Multiprocessing, OpenMP)进一步 提升并行效率^[18],即

 $E(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \Big[\mathcal{F} \Big[P(x, y) \Big] \mathcal{F} \Big[d(x, y) \Big] \Big]$ (6) 式中:E(x, y)为E(r)的二维矩阵形式,r=(x, y); $\mathcal{F} [$] 与 $\mathcal{F}^{-1} [$]分别为二维离散快速傅里叶变换及其逆 变换.





曝光完成后的显影过程使用阈值模型来模拟^[10],如图2(b)所示,显影后的版图表示为:

$$\varphi(\mathbf{r}) = \begin{cases} 0, \ E(r) < \tau \\ 1, \ E(r) \ge \tau \end{cases}$$
(7)

式中: τ 为显影阈值; $\varphi(r)$ 为在r位置的显影轮廓函

数.在实际光刻中,正、负光刻胶显影后的轮廊示意 图如图3所示.对于正光刻胶,当曝光点的能量沉积 大于显影阈值,则视为完全显影,当曝光点的能量沉 积密度小于显影阈值,则视为不显影;对于负光刻 胶,显影情况与正光刻胶相反.由于显影阈值r仅与 曝光能量沉积E(r),显影后的结果轮廓只有完全显 影和不显影两种情况,在可视化结果中,仅需要区分 这两种情况的边界处,达到观察其对应轮廓形状的 目的.因此,HNU-EBL软件计算显影后的轮廓不需 要针对正、负光刻胶进行区分.





在模拟显影过程中,阈值选择过高或过低可能 导致曝光不足或曝光过度的失真.如图4所示,在本 软件默认的显影阈值,我们在实验中选择了一个中 间的τ,它是最大曝光能量的50%.







1.3 邻近效应校正

电子束邻近效应主要由电子束在固体中的背散 射效应所致,随着版图最小尺寸降低至纳米级,其对 版图分辨率的影响不能忽视.因此,邻近效应校正是 高精度EBL工艺流程中关键性环节.

电子束邻近效应校正算法主要分为两大类别: 1)剂量校正算法^[19-20];2)形状校正算法^[21].值得一提 的是,光学光刻(例如深紫外、极紫外光刻)是依赖于 掩模的光刻技术,其光学邻近效应校正算法仅能够 通过优化掩膜的透光图形以降低由光学衍射导致的 邻近效应.然而,由于EBL是无掩模直写式的光刻技 术,并且能够设定不同曝光区域的曝光剂量,电子束 邻近效应校正算法不仅可以通过修正版图形状的方 法实现,更常用的方法则是使用剂量校正算法.

Parikh^[22]提出了一种自恰剂量校正算法,将所有版图曝光区域分割为N个像素区域,可以通过求解下列的线性方程组得到每个像素区域的校正剂量,即

$$\begin{cases} P_{11}d_{1} + P_{12}d_{2} + \dots + P_{1N}d_{N} = E_{0} \\ P_{21}d_{1} + P_{22}d_{2} + \dots + P_{2N}d_{N} = E_{0} \\ \dots \\ P_{N1}d_{1} + P_{N2}d_{2} + \dots + P_{NN}d_{N} = E_{0} \end{cases}$$
(8)

式中: P_{ij} 为点扩散函数 $P(r_i, r_j); d_j$ 为曝光剂量 $d(r_j); E_0$ 为目标能量沉积密度;N为曝光像素点个数,且每个曝光像素的尺寸相同.

从理论上讲,式(8)表示的方程组的唯一解是校 正后的曝光剂量,但是当版图尺寸进一步增大或像 素值代表的实际物理尺寸进一步减小,解N元一次 方程组相当困难.并且该自恰方程组中,还未考虑非 曝光区域的能量均衡,如果将非曝光像素区域的因 素考虑进去,计算量将更大,因此,这种自恰剂量校 正算法不适用于工程计算.

从工程应用角度讲,合理的近似求解剂量校正 是极其必要的.目前主流的邻近效应剂量校正算法 是通过迭代近似的方法实现的^[23],第*n*+1次迭代的 校正剂量核心方法为:

$$d_{n+1}(\mathbf{r}_j) = \frac{D_0 d_n(\mathbf{r}_j)}{\sum_{j=1}^{N} P(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j) d_n(\mathbf{r}_j)}$$
(9)

式中: D_0 为均匀剂量系数; $d_{n+1}(\mathbf{r}_j)$ 为第n+1次迭代 得到的修正剂量.

设定一个电子束曝光的误差空间率*e*_m,判定校 正迭代的能量误差是否达到预设收敛标准,其计算 方法为:

$$e_{\rm m} = \iint |\varphi(\mathbf{r}) - G(\mathbf{r})| \mathrm{d}^2 \mathbf{r} / \iint G(\mathbf{r}) \mathrm{d}^2 \mathbf{r}$$
(10)

式中:G(r)为原始版图的形状函数,如图5所示,当 G(r)等于1时,表示像素r位置在版图区域内,当 G(r)等于0时,表示像素r位置在版图区域外. 当误差空间率 e_m大于预设值时,继续执行迭代 式(9)计算,直至 e_m小于等于预设值.当迭代过程结 束后,得到邻近效应校正后的剂量 d(**r**).



Fig.5 Spatial error model of electron beam exposure

2 软件架构与计算流程

图 6 为 EBL 模拟和优化 EDA 软件架构,该架构 主要包含 5 大模块:

(1)Monte Carlo方法模拟电子散射过程与轨迹;

(2)多高斯点扩散函数拟合;

(3)邻近效应校正计算;

(4)能量沉积密度模拟与边缘放置误差建模;

(5)GDSH版图计算机图形可视化.

其特点在于该软件模拟了EBL工艺整体流程,

它不仅实现了基于 Monte Carlo方法模拟电子束在固体中的散射过程,还能够拟合点扩散函数的多高斯函数以优化电子束曝光剂量.并且集成了能量沉积模拟与可视化,边缘放置误差分析,以及版图图形可视化,能够为使用者提供"流水线"式的 EBL模拟与优化.

该软件通过 C++和 python 编程语言编写,用户 图形化界面通过 PyQt5进行计算机可视化编程,总代 码量达到 5 万行.其中使用的第三方软件库包括: C++并行多线程计算库 OpenMP、用户图形界面库 PyQt5、线性算术 C++模板库 Eigen、傅里叶变换库 (Fastest Fourier transform in the west,FFTW)等.

用户需要准备的数据主要包括光刻胶与基底参数(如化学式与分子密度等)、工艺参数(如电子束直径、加速电压等)和待校正的版图文件(GDSII文件格式).该软件免费提供给科研人员使用,具体使用方法详见http://www.ebeam.com.cn.

3 功能展示与性能验证

3.1 算例

以一个 XOR 电路版图为例,使用 HNU-EBL计 算 EBL模拟与优化过程.按照 EBL工艺流程,首先要 通过 Monte Carlo模拟计算电子束在固体中的碰撞过 程.对需要多层不同的光刻材料的实验条件,可以多 次添加层以满足实验条件.如图7所示, Monte Carlo



图6 EBL模拟和优化EDA软件架构

Fig.6 E-beam lithography simulation and optimization of EDA software architecture

模拟的实验条件:1)100 nm PMMA 光刻胶;2)衬底 Si;3)电子束电压10 kV;4)电子束直径5 nm;5)模拟 电子个数100万个.值得注意的是,模拟电子个数越 多,能量沉积的离散值计算越精确,经过大量测试, 我们推荐电子个数在100万个即能满足 PSF 拟合 精度.

						-	×
File Help	New Simulation			7	×		
New Simulation PE					~		
roject:XOR.hnu	Simulation						
PMMA_100_Si_10000	Stack Description						
	Type Mat		ial Tickness[nm]				
	Layer1	PMMA ·	*	100			
	Substrate	Si	*	100000			
	Inserst Row	Delet Rov	v	Edit Material			
	Parameters						
	Beam Energy[kV] Beam Diameter[nm]			0			
	Number of Electrons[ke-]			00			
	Calculate Stop Calculate Cancel						

图 7 在 HNU-EBL 中设置 Monte Carlo 模拟计算条件 Fig.7 Set Monte Carlo simulation calculation conditions in HNU-EBL

由于不同厂家光刻胶的细节参数存在差异,可 以自定义 Monte Carlo 模拟的材料, 如图 8 所示. 在 添加物质的时候需要查阅光刻胶密度和化学式, 如正光刻胶PMMA,化学式为C₄H₈O₂,其密度为 1.19 g/cm³;衬底Si的化学式为Si,其密度为2.33 g/cm³. Monte Carlo模拟计算完成后,电子束在固体中的散 射轨迹的切面图如图9所示.电子束从X/Z坐标系的 (0,0)点沿Z轴正方向入射,Z轴方向上的0~100 nm 厚度区间为PMMA光刻胶,超过100 nm范围的区间 为Si衬底.电子的运动范围主要集中在前散射区域, 该区域也是能量沉积密度的集中区域;电子束的背 散射会使电子在距离曝光点较远的区域出现,曝光 电压越大,背散射范围越广.同时, Monte Carlo模拟 主要得到了点扩散函数,该函数描述了电子束在光 刻胶上的能量沉积密度随电子束曝光点为中心的半 径变化的规律.

如图 10 所示, HNU-EBL 软件使用式(1)~式(4) 这 4 种点扩散函数形式, 对电子束能量沉积密度进 行拟合.在该算例中, 10 kV 电子束在 100 nm PMMA 光刻胶和 Si 衬底上的 4 种点扩散函数系数如表 1 所 示.目的是为了让用户在对不同的模拟条件下,选择 拟合程度最好的点扩散函数.在该算例中, 3G+exp 模型最符合 Monte Carlo模拟的能量沉积离散值.



图 8 自定义 Monte Carlo 模拟的材料

Fig.8 Customize materials for Monte Carlo simulation







图 10 4种点扩散函数模型拟合 Monte Carlo 离散值 Fig.10 Four point spread function models fit Monte Carlo discrete values

表1 10 kV 电子束在100 nm PMMA 光刻胶和 Si 衬底上的4种点扩散函数系数

Tab.1 Four point spread function coefficients of 10 kV electron beam on 100 nm

PMMA photoresist and Si substrate

函数 类型	$lpha/\mathrm{nm}$	β /nm	η	$\gamma/{ m nm}$	η'	γ_2/nm	$\eta^{''}$
2G	11.194	472.462	1.156	_	_	_	—
2G+exp	5.849	484.728	1.473	_	_	20.116	0.376
3G	5.562	479.502	1.852	30.608	0.375	—	_
3G+exp	4.961	487.339	1.464	12.974	0.288	33.265	0.301

3.2 版图优化有效性验证

电子束邻近效应校正优化是通过优化GDSII版 图的曝光剂量,其建模过程包括以下4个部分:1)读 取待校正的GDSII版图;2)版图矩阵像素化;3)电子 束邻近效应剂量校正;4)存入校正后的GDSII版图 文件.将计算收敛的误差空间率e_m设置为10⁻⁴,显影 阈值 *c*设置为最大曝光能量的50%,对该XOR电路 版图算例进行电子束邻近效应校正,设置网格划分 尺寸为5 nm,使用HNU-EBL分别可视化邻近效应 校正前后的修正剂量.

由图11(a)和图11(b)可知,使用邻近效应校正 优化后的版图边缘曝光剂量高于版图中心的剂量. 由图11(c)和图11(d)可知,通过计算能量沉积密度 可以得到校正前后的能量对比,从中可以看出,未经 过邻近效应校正直接模拟电子束能量沉积密度会使 得计算版图边缘能量沉积密度小于版图中心能量沉 积密度,经过邻近效应校正后的能量沉积密度在整 个版图区域内更加均匀.如图11(e)和图11(f)所 示,计算阈值显影模型后,能提高在显影过程中结果 轮廓的分辨率.

为了量化电子束邻近效应校正结果的有效性, 在HNU-EBL中将校正前后的版图分别进行边缘放 置误差计算.边缘放置误差是用来衡量电子束邻近 校正质量的指标,边缘放置误差小意味着曝光后的 图形和设计图形接近.HNU-EBL软件通过计算机图 形学方法,计算曝光后版图轮廓与理想图形之间的 差异,计算误差的最大长度.通过仿真实验对比得 出:未经过邻近效应校正的版图边缘放置误差为 23.8 nm,而经过邻近效应校正的版图边缘放置误差 为1.6 nm.因此,HNU-EBL电子束邻近效应校正优 化有效地降低了版图显影结果的误差.



(a)未经过邻近效应剂量校正的曝光剂量版图



(b)经过邻近效应剂量校正的曝光计量版图









(e) 未经过邻近效应剂量校正后的显影轮廓



(1) 经过邻近效应剂重校正后的亚影轮廓
 图 11 HNU-EBL软件仿真计算图
 Fig.11 HNU-EBL software simulation calculation diagram

3.3 计算效率对比

由于 PEC 优化部分是整个 HNU-EBL 模拟计算 的关键耗时部分,因此其计算效率是该软件的关键 性能指标.将 HNU-EBL与 Raith 公司开发的商用电 子束邻近效应校正软件 NanoPECS 进行 PEC 优化计 算效率对比,计算机配置均为 Intel(R) Core (TM) i5 CPU (2.40 GHz),运行内存 16 GB. 如图 12 (a)所示, 在 100 nm PMMA 光刻胶与 Si 衬底的仿真条件下,对 比版图使用等间距的栅型结构,栅型结构的长度 L 为1 μm,宽度与间距 h 均为 50 nm,根数为 M 个.

如图 12 (b)所示, 栅型结构的根数随计算时间的变化规律,该计算效率变化均在 NanoPECS 软件和 HNU-EBL 软件的计算精度(边缘放置误差)相当的前提下进行对比, 如图 12 (c)所示. 然而, HNU-EBL 的计算效率远高于 NanoPECS, 且随着版图的根数增至 300根, NanoPECS 的计算耗时是 HNU-EBL 软件的 22.3倍. 当栅型结构根数进一步增加, HNU-EBL 的计算优势会进一步拉大.





performance comparison chart

由此可以看出,软件HNU-EBL在电子束邻近效 应校正优化计算上的计算效率有着明显的优势,当 版图曝光网格数进一步增大至10⁸数量级时,校正计 算的HNU-EBL高计算效率的优势能够得到进一步 体现.

4 结 论

为了降低电子束邻近效应对光刻版图的负面影 响,帮助科研人员实验进行仿真指导,提出了一套高 性能计算的EBL EDA软件,并且开发了免费的应用 软件.本文针对该软件所采取算法的精度和效率展 开对比,得出以下结论:

1)将电子束邻近效应校正前后的版图结果进行

对比,可以验证该软件的剂量优化功能可以明显提 高电子束曝光精度.

2)在相同的计算环境和参数条件下,HNU-EBL 比商用软件NanoPECS的计算速度快一个数量级,大 大提高了计算效率.

参考文献

- [1] ZHENG J P, ZHOU J, ZENG P, et al. 30 GHz surface acoustic wave transducers with extremely high mass sensitivity[J]. Applied Physics Letters, 2020, 116(12): 123502.
- [2] ALIKHANI A, FATHOLLAHZADEH M, HAJIHOSSEINI H, et al. An interesting route using electron-beam lithography and photolithography to pattern submicron interdigitated electrodes array for sensing applications[J]. Journal of the Iranian Chemical Society, 2020,17(1):187-194.
- [3] SAMÀ J, DOMÈNECH-GIL G, GRÀCIA I, et al. Electron beam lithography for contacting single nanowires on non-flat suspended substrates [J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019, 286: 616-623.
- [4] HIRBOODVASH Z, KHODAMI M, FONG N R, et al. Grating couplers fabricated by e-beam lithography for long-range surface plasmon waveguides embedded in a fluoropolymer [J]. Applied Optics, 2019, 58(11): 2994-3002.
- [5] XIN Y, PANDRAUD G, ZHANG Y M, et al. Single-mode tapered vertical SU-8 waveguide fabricated by E-beam lithography for analyte sensing[J]. Sensors (Basel, Switzerland), 2019, 19(15): 3383.
- [6] Bureau of Industry and Security. Implementation of certain new controls on emerging technologies agreed at wassenaar arrangement 2019 plenary [EB/OL]. https://www.govinfo.gov/content/pkg/ FR-2020-10-05/pdf/2020-18334.pdf, 2020-10-05/2021-11-16.
- [7] Wassenaar Arrangement Secretariat. Wassenaar arrangement on export controls for conventional arms and dual-use goods and technologies [EB/OL]. https://www.wassenaar.org/app/uploads/2021/12/Public-Docs-Vol-II-2021-List-of-DU-Goodsand-Technologies-and-Munitions-List-Dec-2021.pdf, 2020-12-22/2021-11-16.
- [8] CHANG T. Proximity effect in electron-beam lithography[J]. Journal of vacuum science and technology. 1975, 12(6), 1271–1275.
- [9] ADESIDA I, SHIMIZU R, EVERHART T E. A study of electron penetration in solids using a direct Monte Carlo approach [J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(11): 5962-5969.
- [10] LEE S Y, COOK B D. PYRAMID-a hierarchical, rule-based approach toward proximity effect correction. I. Exposure estimation
 [J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 1998, 11(1):108-116.

- [11] MURATA K. Spatial distribution of backscattered electrons in the scanning electron microscope and electron microprobe [J]. Journal of Applied Physics, 1974, 45(9): 4110–4117.
- [12] IVIN V V, SILAKOV M V, VOROTNIKOVA N V, et al. Efficient and robust algorithms for Monte Carlo and e-beam lithography simulation [J]. Microelectronic Engineering, 2001, 57/58: 355-360.
- [13] WIND S. J, ROSENFIELD M. G, PEPPER G, et al. Proximity correction for electron beam lithography using a three Gaussian model of the electron energy distribution [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1989, 7(6), 1507-1512.
- [14] LIU C H, NG H T, TSAI K Y. New parametric point spread function calibration methodology for improving the accuracy of patterning prediction in electron-beam lithography [J]. Journal of Micro/ Nanolithography, MEMS, and MOEMS, 2012, 11:013009.
- [15] LIU C H, NG H T, NG P C W, et al. A novel curve-fitting procedure for determining proximity effect parameters in electron beam lithography[C]//Lithography Asia. Taipei: SPIE, 2008, 7140: 367-376.
- [16] RAU R, MCCLELLAN J. H, DRABIK T. J. Proximity effect correction for nanolithography [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1996, 14(4):2445-2455.
- [17] HASLAM M. E, MCDONALD J. F, KING D. C, et al. Twodimensional Haar thinning for data base compaction in Fourier proximity correction for electron beam lithography [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics Processing and Phenomena. 1985, 3(1):165-173.
- [18] FRIGO M, JOHNSON S G. The design and implementation of FFTW3[J]. Proceedings of the IEEE, 2005, 93(2):216-231.
- [19] GROVES T. R. Efficiency of electron-beam proximity effect correction [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures Processing, Measurement, and Phenomena. 1993, 11(6):2746-2753.
- [20] PAVKOVICH J. Proximity effect correction calculations by the integral equation approximate solution method [J]. Journal of Vacuum Science & Technology B, 1986, 4:159–163.
- [21] ERIKSEN E H, NAZIR A, BALLING P, et al. Dose regularization via filtering and projection: an open-source code for optimizationbased proximity-effect-correction for nanoscale lithography [J]. Microelectronic Engineering, 2018, 199:52–57.
- [22] PARIKH M. Self-consistent proximity effect correction technique for resist exposure (SPECTRE) [J]. Journal of Vacuum Science and Technology, 1978, 15:931-933.
- [23] ZARATE J J, PASTORIZA H. Correction algorithm for the proximity effect in e-beam lithography[C]//2008 Argentine School of Micro-Nanoelectronics, Technology and Applications. Buenos Aires, Argentina: IEEE, 2008:38-42.