

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胶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

文献标志码:A

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 optima-

* 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 $10 \mu\text{m}$ ^[11]。

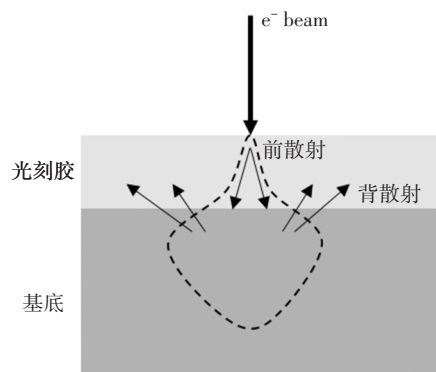


图1 电子束散射示意图

Fig.1 Schematic diagram of electron beam scattering

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:

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

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; η 为前散射部分与后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

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

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

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

式中: r 、 α 、 β 和 η 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

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

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, $r=|\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j|$; $d(\mathbf{r}_j)$ 为像素 \mathbf{r}_j 位置的曝光剂量,单位 μC/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 $O(N^2)$,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 $O(M \log N)$ ^[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

$$E(x, y) = \mathcal{F}^{-1} \left[\mathcal{F} [P(x, y)] \mathcal{F} [d(x, y)] \right] \quad (6)$$

式中: $E(x, y)$ 为 $E(\mathbf{r})$ 的二维矩阵形式, $\mathbf{r}=(x, y)$; $\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.

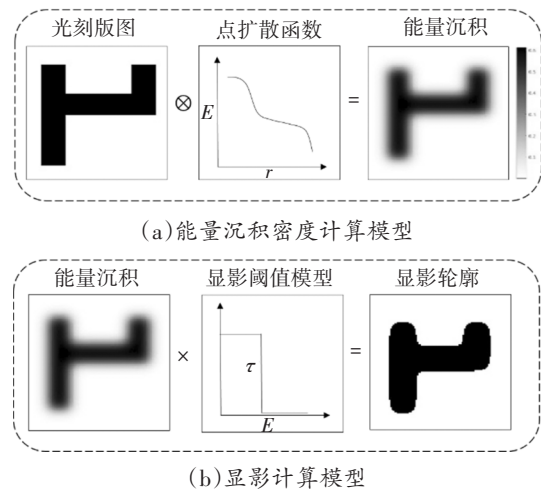


图 2 光刻工艺模拟示意图

Fig.2 Schematic diagram of lithography process simulation

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:

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

式中: τ 为显影阈值; $\varphi(\mathbf{r})$ 为在 \mathbf{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廓示意图如图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 τ 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.

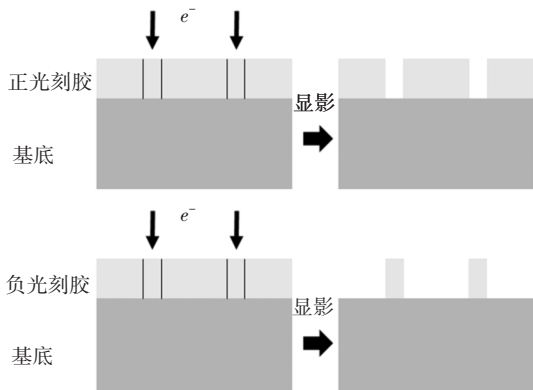


图3 正、负光刻胶显影后的轮廓示意图

Fig.3 Schematic diagram of the contours of the positive and negative photoresists after development

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%.

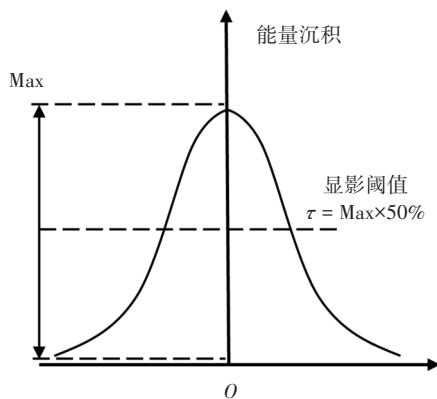


图4 显影模型的阈值选取示意图

Fig.4 Schematic diagram of developing threshold selection

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: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模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

$$\begin{cases} P_{11}d_1 + P_{12}d_2 + \dots + P_{1N}d_N = E_0 \\ P_{21}d_1 + P_{22}d_2 + \dots + P_{2N}d_N = E_0 \\ \dots \\ P_{N1}d_1 + P_{N2}d_2 + \dots + P_{NN}d_N = E_0 \end{cases} \quad (8)$$

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:

$$d_{n+1}(r_j) = \frac{D_0 d_n(r_j)}{\sum_{j=1}^N P(r_i, r_j) d_n(r_j)} \quad (9)$$

式中: D_0 为均匀剂量系数; $d_{n+1}(r_j)$ 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:

$$e_m = \iint |\varphi(r) - G(r)| d^2r / \iint G(r) d^2r \quad (10)$$

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 $d(r)$.

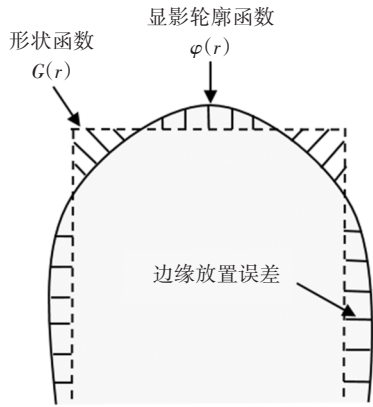


图 5 电子束光刻边缘放置误差示意图
Fig.5 Spatial error model of electron beam exposure

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

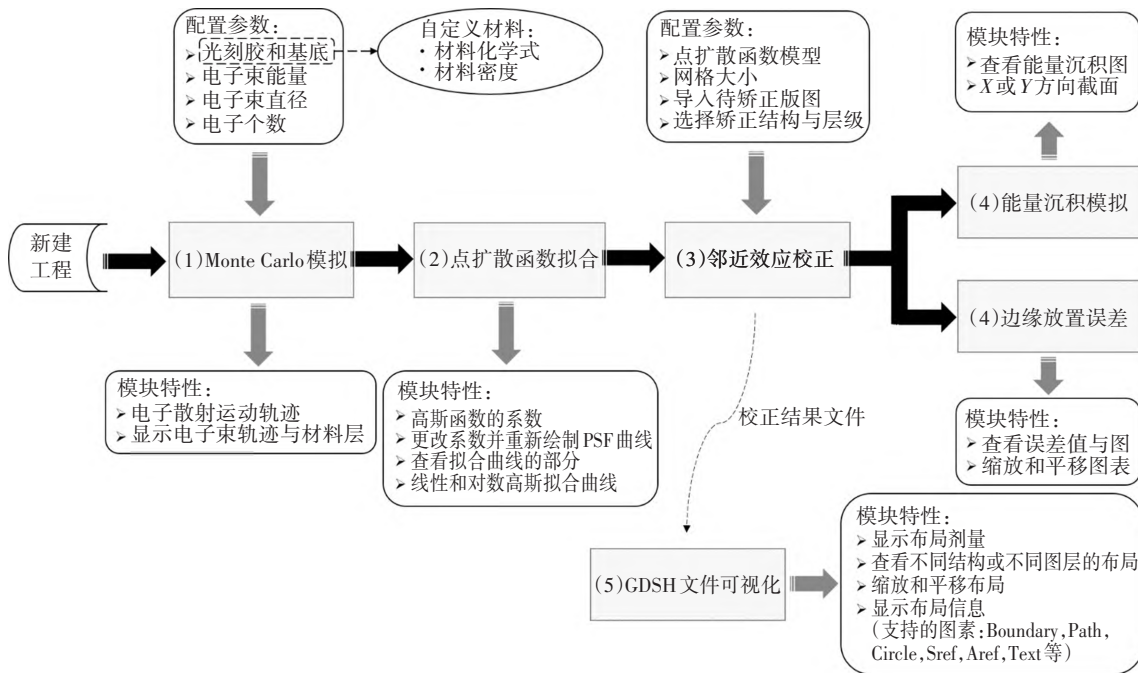


图 6 EBL 模拟和优化 EDA 软件架构
Fig.6 E-beam lithography simulation and optimization of EDA software architecture

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.

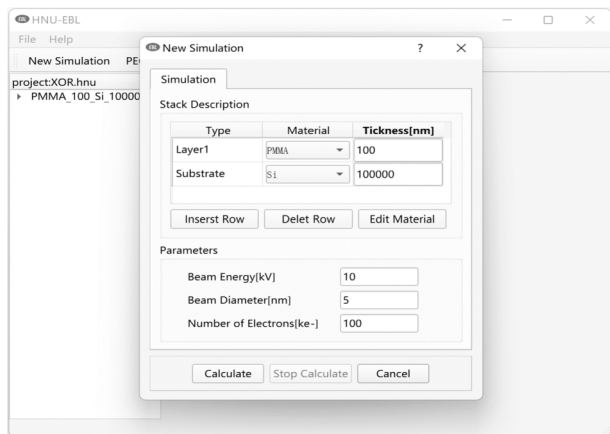


图7 在HNU-EBL中设置 Monte Carlo 模拟计算条件

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 $C_5H_8O_2$,其密度为 1.19 g/cm^3 ;衬底 Si 的化学式为 Si,其密度为 2.33 g/cm^3 . 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.

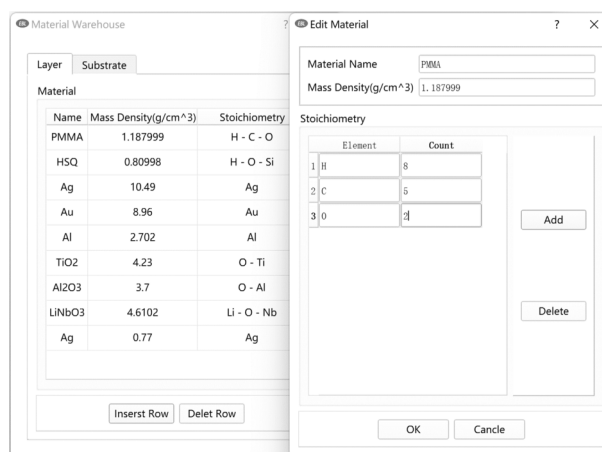


图8 自定义 Monte Carlo 模拟的材料

Fig.8 Customize materials for Monte Carlo simulation

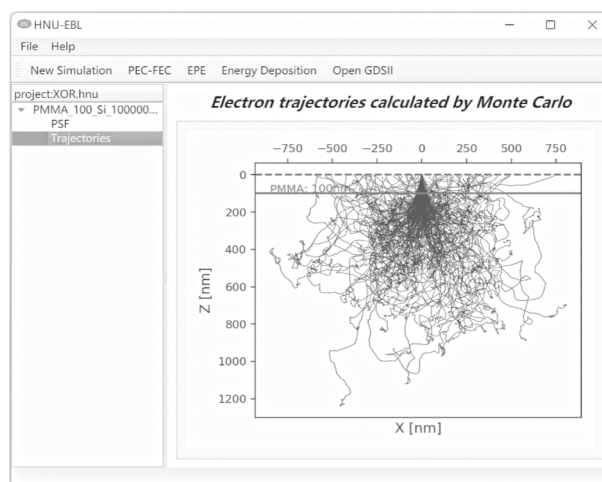


图9 电子束在固体中散射轨迹的切面图

Fig.9 Sectional view of the scattering path of the electron beam in the solid

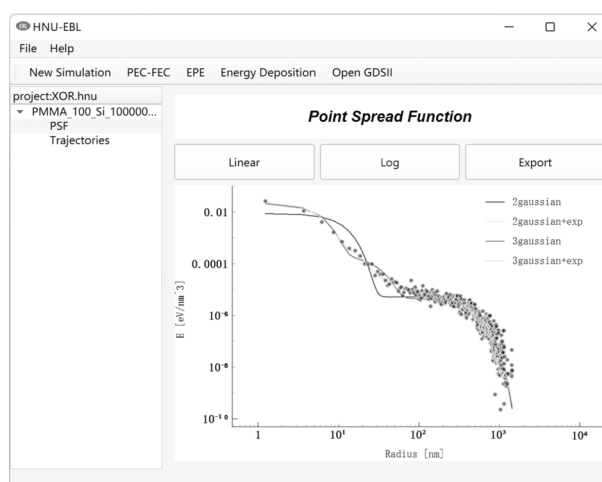


图10 4种点扩散函数模型拟合 Monte Carlo 离散值

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

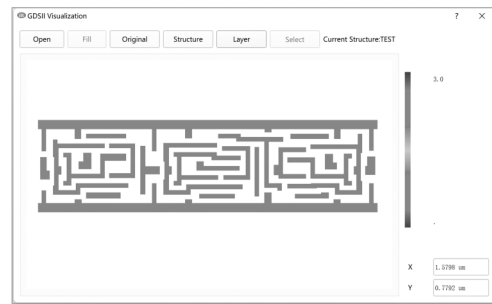
| 函数类型 | α/nm | β/nm | η | γ/nm | η' | γ_2/nm | η'' |
|--------|--------------------|-------------------|--------|--------------------|---------|----------------------|----------|
| 2G | 11.194 | 472.462 | 1.156 | — | — | — | — |
| 2G+exp | 5.849 | 484.728 | 1.473 | — | — | 20.116 | 0.376 |
| 3G | 5.562 | 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 τ 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.

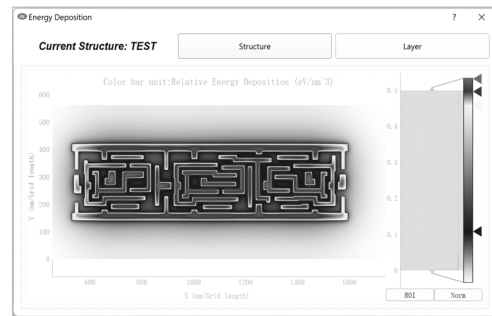
为了量化电子束邻近效应校正结果的有效性,在 HNU-EBL 中将校正前后的版图分别进行边缘放置误差计算.边缘放置误差是用来衡量电子束邻近校正质量的指标,边缘放置误差小意味着曝光后的图形和设计图形接近.HNU-EBL 软件通过计算机图形学方法,计算曝光后版图轮廓与理想图形之间的差异,计算误差的最大长度.通过仿真实验对比得出:未经过邻近效应校正的版图边缘放置误差为 23.8 nm,而经过邻近效应校正的版图边缘放置误差为 1.6 nm.因此,HNU-EBL 电子束邻近效应校正优化有效地降低了版图显影结果的误差.



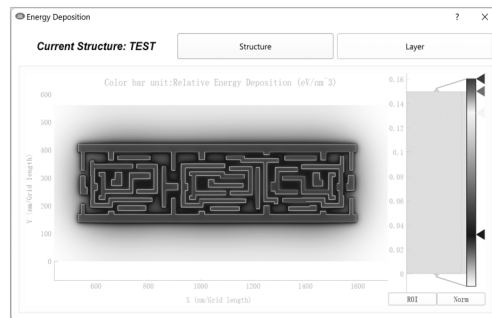
(a) 未经过邻近效应剂量校正的曝光剂量版图



(b) 经过邻近效应剂量校正的曝光剂量版图



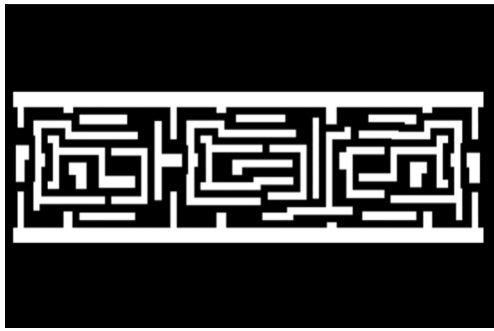
(c) 未经过邻近效应剂量校正后的电子束光刻能量沉积密度



(d) 经过邻近效应剂量校正后的电子束光刻能量沉积密度



(e) 未经过邻近效应剂量校正后的显影轮廓



(f) 经过邻近效应剂量校正后的显影轮廓

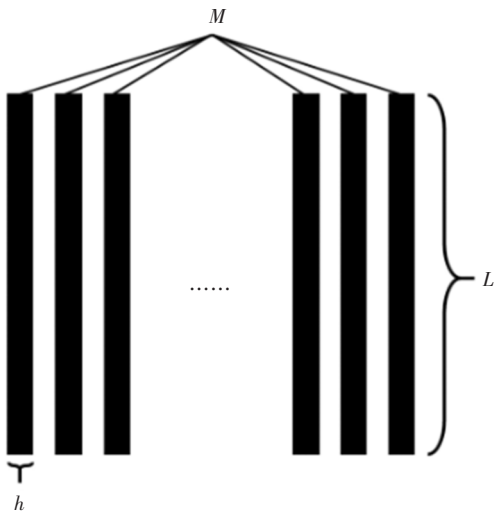
图 11 HNU-EBL 软件仿真计算图

Fig.11 HNU-EBL software simulation calculation diagram

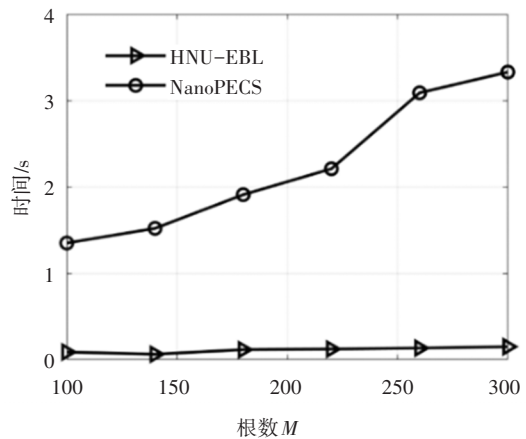
3.3 计算效率对比

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 $1\ \mu\text{m}$,宽度与间距 h 均为 50 nm,根数为 M 个.

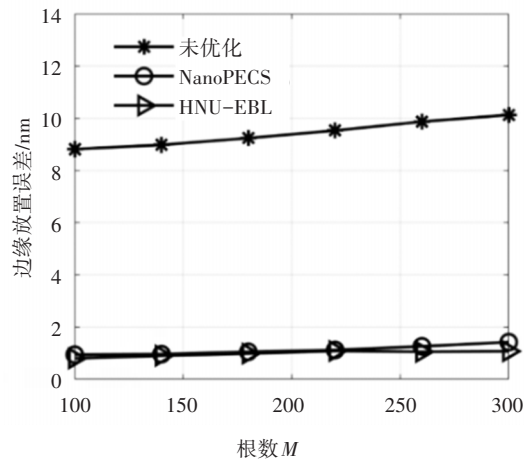
如图 12 (b)所示,栅型结构的根数随计算时间的变化规律,该计算效率变化均在 NanoPECS 软件和 HNU-EBL 软件的计算精度(边缘放置误差)相当的前提下进行对比,如图 12 (c)所示.然而,HNU-EBL 的计算效率远高于 NanoPECS,且随着版图的根数增至 300 根,NanoPECS 的计算耗时是 HNU-EBL 软件的 22.3 倍.当栅型结构根数进一步增加,HNU-EBL 的计算优势会进一步拉大.



(a) 栅型结构示意图



(b) HNU-EBL 与 NanoPECS 软件计算电子束邻近效应校正优化效率对比图



(c) HNU-EBL 与 NanoPECS 软件计算电子束邻近效应校正优化精度对比图

图 12 HNU-EBL 仿真计算性能对比图

Fig.12 HNU-EBL simulation calculation 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 10^8 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, HAJIHOSEINI 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-Goods-and-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, ROSENFELD 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.* Two - dimensional 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 optimization-based 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.