

HNU-EBL

用户手册

HNU-EBL 用户手册

电子束光刻仿真计算 EDA 软件

湖南大学开发



联系人: 刘杰 , jie_liu@hnu.edu.cn , 微信: liujieww

目录

1 概述	3
1.1 应用背景.....	3
1.2 运行环境.....	5
1.3 知识产权.....	5
1.4 身份验证.....	5
2 光刻过程模拟.....	6
2.1 新建工程.....	6
2.2 输入仿真参数.....	6
2.3 Monte Carlo 模拟计算	9
2.4 点扩散函数拟合.....	13
2.5 电子束轨迹可视化.....	15
3 光刻版图优化与测量.....	16
3.1 邻近效应矫正.....	16
3.2 显影.....	20
3.3 能量沉积.....	26

1 概述

1.1 应用背景

电子束光刻（EBL）是微纳加工制备高分辨率纳米级别光刻版图的一项重要技术，具有广泛的应用前景。然而，电子束光刻中的邻近效应会降低版图质量，未经过邻近效应校正直接进行曝光会对分辨率造成毁灭性影响。自从上世纪 70 年代，国际光刻组织已经开始研制对电子束光刻的邻近效应，由于技术难度高，国内尚无可直接应用于大规模工程制版的算法软件，便自主研发了电子束光刻邻近效应校正软件（HnuEBL V2.0）。

电子束光刻（EBL）是一种高分辨率无掩模直接写入光刻技术。由于电子束光斑尺寸非常小（例如 1-2nm），EBL 能够制作特征尺寸小于 10nm 的高级版图。然而，当暴露小目标区域（下图中的蓝色区域）时，电子束被光致抗蚀剂/基底散射和反射，导致大区域（橙色和绿色区域）的不期望曝光。这就是所谓的邻近效应（如图 1.1.1）。

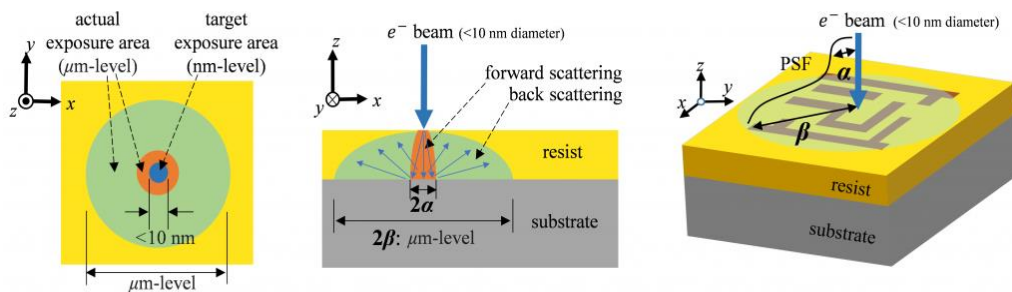


图 1.1.1 邻近效应

在 EBL 制作过程中，邻近效应/雾化效应/加载效应会影响版图的保真度。如果不进行纠正，制造的版图（下图中的第二行）将与目标版图（下图中的第一行）截然不同。使用我们在湖南大学（HNU）开发的 HNU-EBL 软件工具包，可以自动校正电子束剂量分布，从而使制作的版图（下图中的第三行）与目标版图完全匹配（如图 1.1.2）。

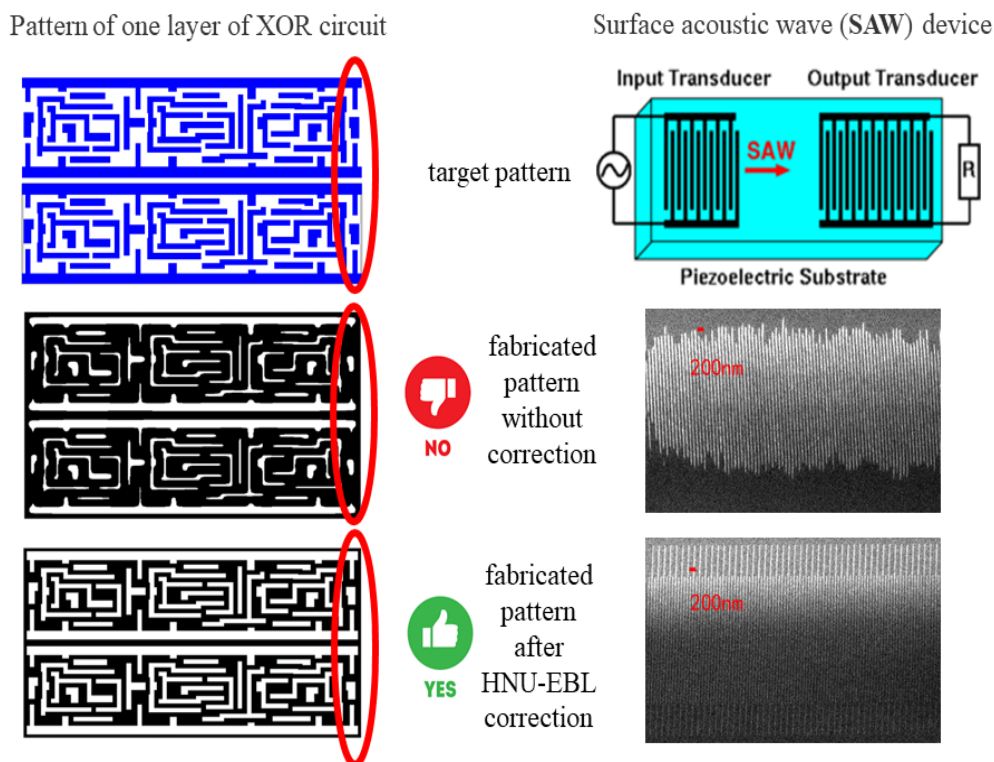


图 1.1.2 版图优化

面向 EBL 的 EDA 软件工具对于设计和制造 EUV/DUV 掩模或小于 10nm 的原型器件是必不可少的。一些国际条约（如《瓦森纳协议》第 3.D.1-3 条[1]）和国家法律（如美国出口管制法第 3D003 条[2]）对向中国、俄罗斯等某些国家出口面向 EBL 的 EDA 软件工具实施了管制。

我们正在尝试自己从头开始开发这些 EBL EDA 工具。我们免费向任何人授权 HNU-EBL EDA 软件。

截至目前，已经发表了四篇文章：电子束光刻“自主可控”EDA 软件 HNU-EBL[3], Efficient Proximity Effect Correction Using Fast Multipole Method with Unequally Spaced Grid for Electron Beam Lithography [4], HNU-EBL: A Software Toolkit for Electron Beam Lithography Simulation and Optimization. [5], Ultrafast and Accurate Proximity Effect Correction of Large-Scale Electron Beam Lithography based on FMM and SaaS. [6]。六篇专利：一种基于神经网络的电子束邻近效应矫正方法[7]，大规模电子束曝光版图的高精度邻近效应快速矫正方法[8]，一种基于二维快速傅里叶变换的电子束曝光的邻近效应矫正方法[9]，一种电子束光刻邻近效应矫正版图压缩方法[10]，一种基于快速多极子方法的电子束光刻邻近效应矫正版图能量沉积计算方法[11]，一种基于边缘迭代的电子束光刻剂量形状校正方

法[12]. 四篇软著：基于 SaaS 模式的电子束曝光仿真与修正软件[13]，电子束光刻邻近效应矫正软件[14]，GDSII 文件可视化软件[15]，电子束光刻仿真计算 EDA 软件[16].

1.2 运行环境

- 操作系统：Windows7 及以上操作系统
- 硬件环境：CPU 1.7GHz，4 核，内存 2GB，显存 2000M，硬盘 500M

1.3 身份验证

双击软件运行，弹出身份验证框，导入开发者发送给用户的 license 地址后，点击 OK 即可运行（如图 1.3）。（license 的获取请与开发者联系，详细信息可以登录 www.ebeam.com.cn 查看）。

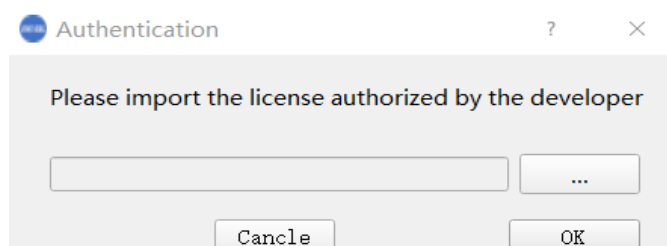


图 1.3 身份验证界面

1.4 系统框架

该软件主要包括四个功能模块（如图 1.4）：

- 蒙特卡洛仿真模块
- 邻近效应校正模块
- 显影模块
- 能量沉积模块

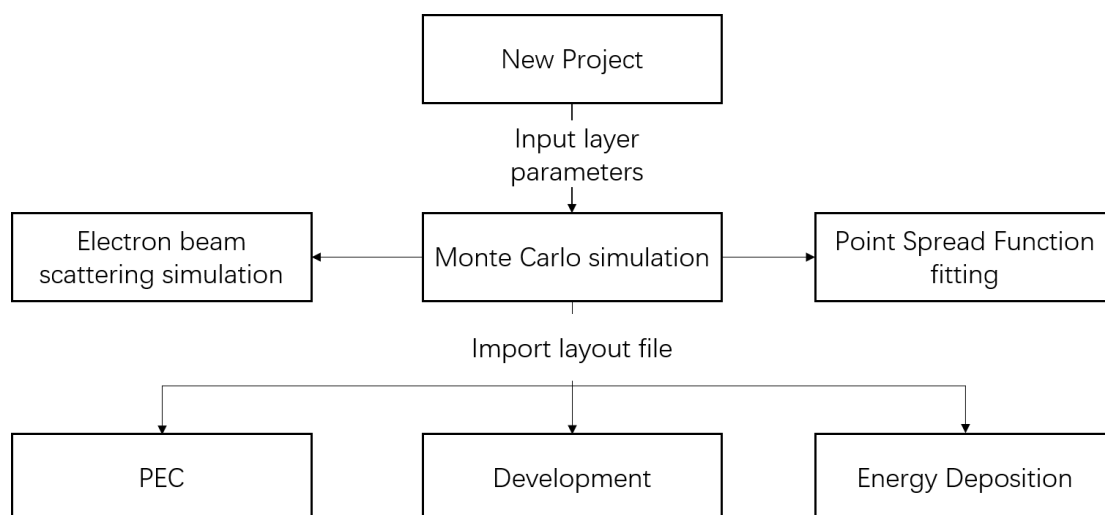


图 1.4 软件功能流程图

2 光刻过程模拟

2.1 新建工程

(1) 打开软件，顶部工具栏“File”下有“New Project”、“Open Project”、“Save Project”、“Close Project”，点击“New Project”新建工程（如图 2.1.1），并填写工程名和工程保存位置（如图 2.1.2）。也可以点击“Open Project”打开已有的“.hnu”工程。（注意：路径只能含有英文字母和符号，不能含有中文）

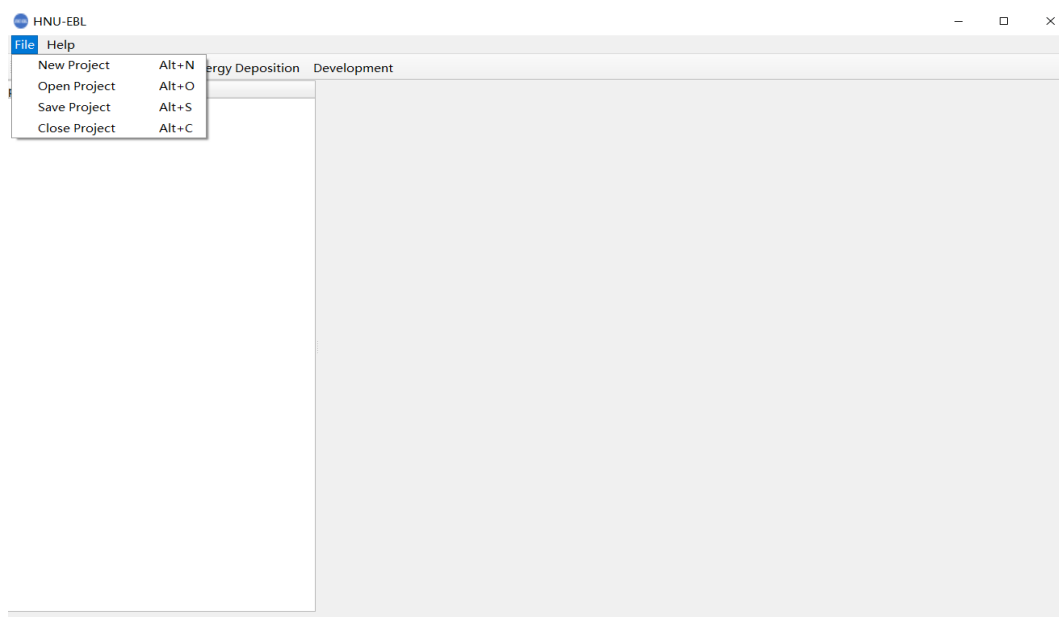


图 2.1.1 软件主界面

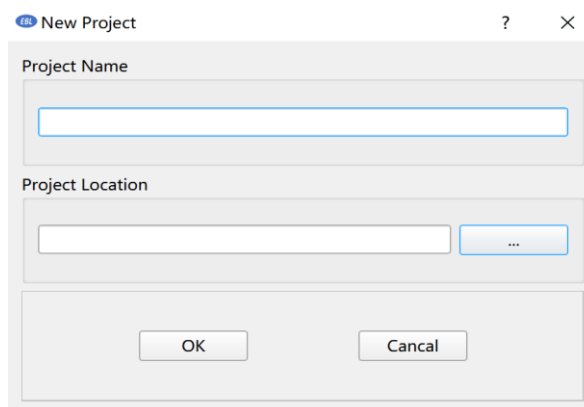


图 2.1.2 新建工程界面

2.2 输入仿真参数

(1)点击软件主界面左上方“New Simulation”，弹出对话框如图 2.2.1 所示。完成相关参数的输入即可进行 Monte Carlo 模拟计算。

(2)在“Material”中输入层名（如图 2.2.1），“如 PMMA，Si”（在下拉菜单选择），并在“Thickness”中对应输入层厚度。“Layer n”层厚度应为 10nm 至 5000nm，“Substrate”层厚度应为 1000nm 至 5mm。如果下拉菜单中没有该选项，则需要点击“Edit Material”另加（如图 2.2.2），如图 2.2.3，是新添加的 SiC 及相关参数。

(3)点击“Insert Row”在选择位置添加层，点击“Delete Row”删除选中层，层顺序如表格所示，从上至下 Layer 1，Layer 2，...，layer n，Substrate。（注意：总层数不少于两层且 Substrate 层不可被删除。）

(4)点击“PSF Depth”中的“Insert Row”增加不同深度的 PSF 值，点击“Delete Row”删除指最后添加的深度。注意输入的 PSF 深度需要小于光刻胶的最大厚度，且不同深度之间的最小间距为 5nm。

(5)加入完所有层后，输入模拟的电子束光刻相关参数，如“Beam Energy，Beam Diameter，Number of Electrons”，完成参数输入设置。若输入参数不完整软件将提示用户完善参数输入。

New Simulation

Simulation

Stack Description

Type	Material	Thickness[nm]
Layer1	PMMA	
Substrate	Si	

Insert Row

Delet Row

Edit material

PSF Depth

Type	Depth[nm]
Depth1	

Insert Row

Delet Row

Parameters

Beam Energy[kV]

5

Beam Diameter[nm]

10

Number of Electrons[ke-]

100

Calculate

Stop Calculate

Cancel

图 2.2.1 参数输入界面

Material Warehouse

Layer

Substrate

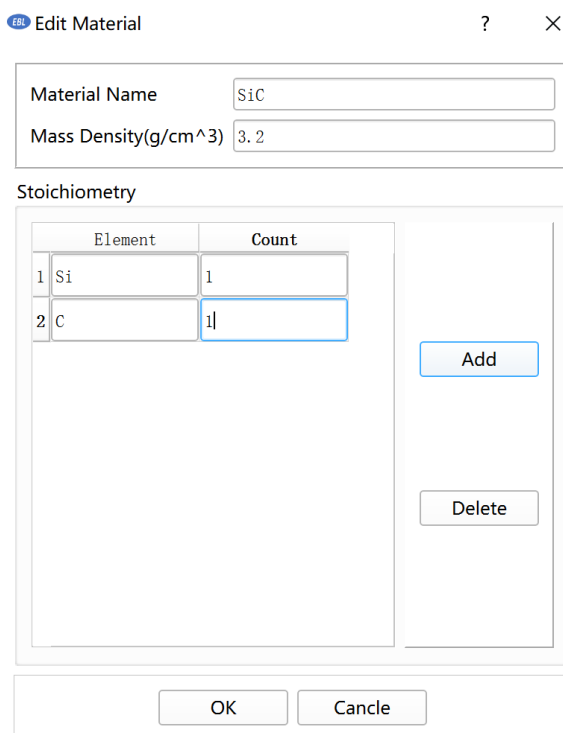
Material

Name	Mass Density(g/cm^3)	stoichiometry
PMMA	1.187999	H - C - O
HSQ	0.80998	H - O - Si
Ag	10.49	Ag
Au	8.96	Au
Al	2.702	Al
TiO2	4.23	O - Ti
Al2O3	3.7	O - Al
LiNbO3	4.6102	Li - O - Nb

Insert Row

Delet Row

图 2.2.2 编辑材料参数界面



Material Name: SiC

Mass Density(g/cm³): 3.2

Stoichiometry

	Element	Count
1	Si	1
2	C	1

Add

Delete

OK Cancel

图 2.2.3 添加 SiC 材料参数界面

2.3 Monte Carlo 模拟计算

(1)点击“Calculate”，进行 Monte Carlo 模拟计算，计算完成以后弹出对话框显示计算时间，点击“Done”完成 Monte Carlo 计算（如图 2.3.1）。

(2)当程序运行时，可点击“Stop Calculate”终止（如图 2.3.2），重新输入参数后再次点击“Calculate”，可开始 Monte Carlo 计算。

(3)Monte Carlo 模拟计算完成以后，点击软件主界面最上方“File”中的“Save Project”保存计算结果（如图 2.3.3）。（注意：请及时点击“Save Project”按钮保存工程）

(4)右键单击左侧 Monte Carlo 模拟计算结果，左键单击“delete”可以删除该条 Monte Carlo 模拟计算结果（如图 2.3.4）。

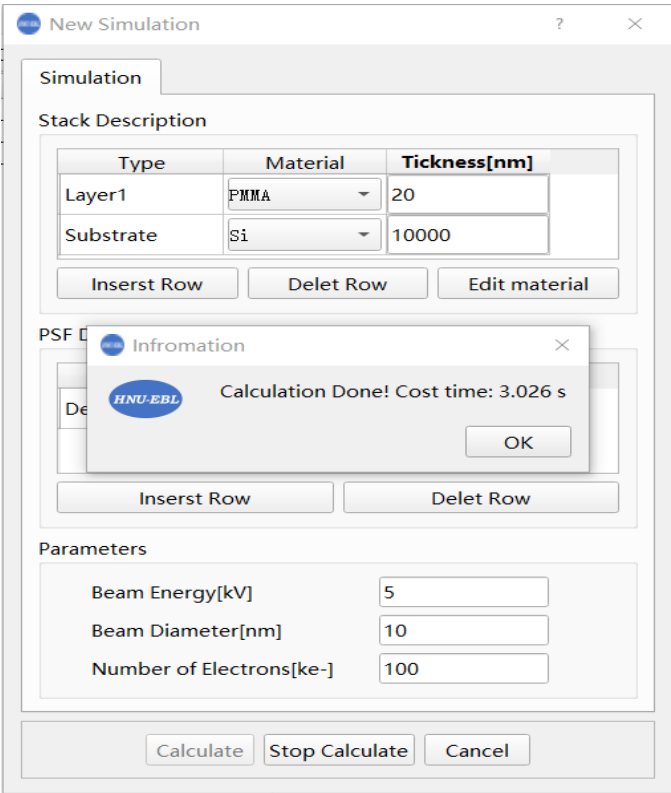


图 2.3.1 Monte Carlo 计算界面

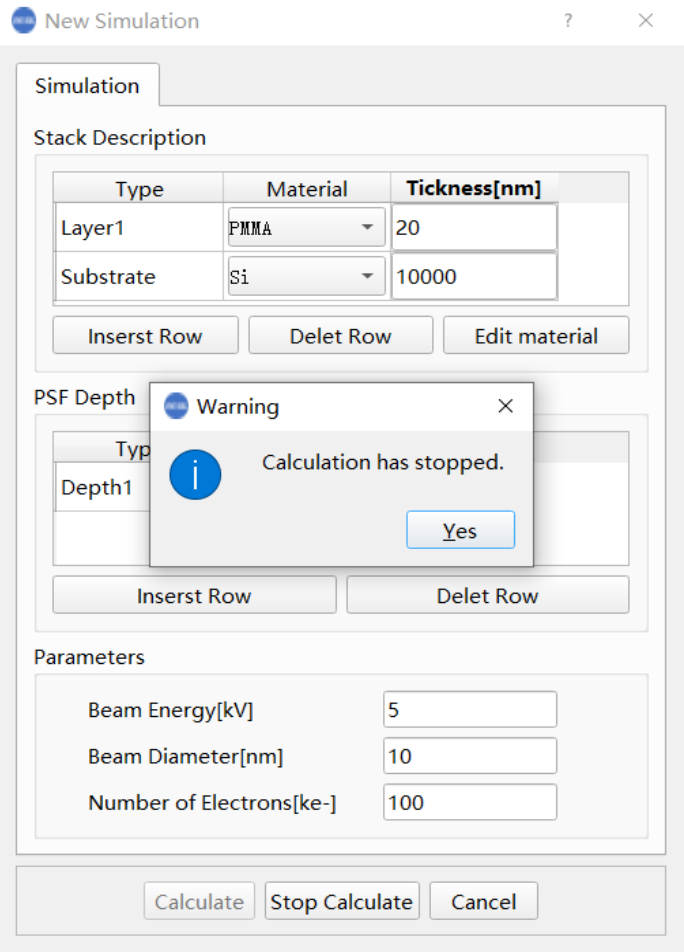


图 2.3.2 终止 Monte Carlo 计算界面

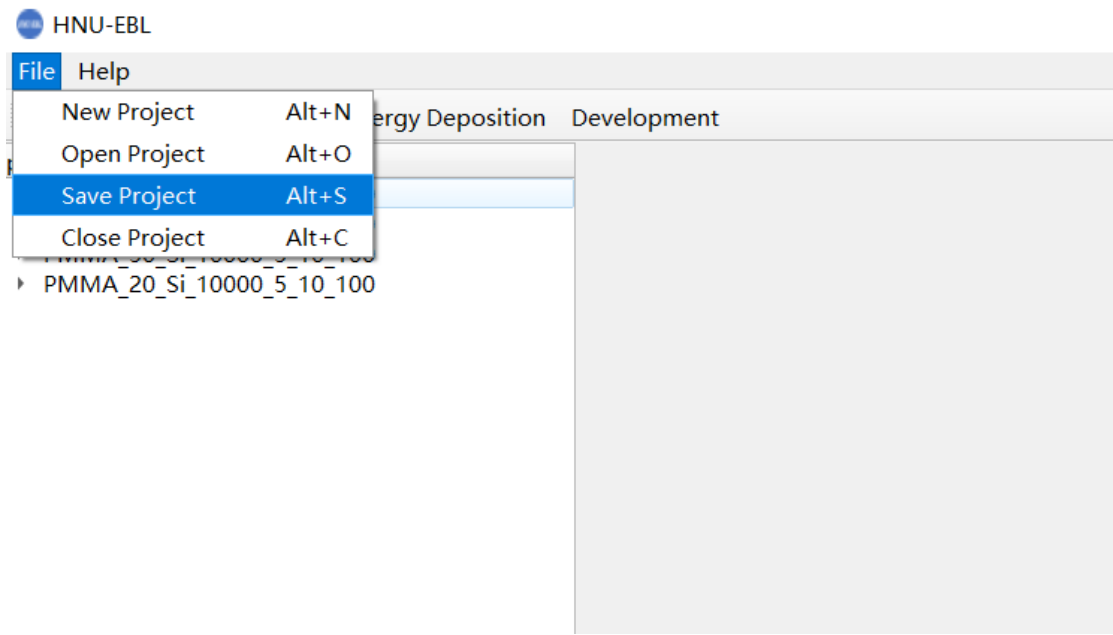


图 2.3.3 保存 Monte Carlo 计算结果界面

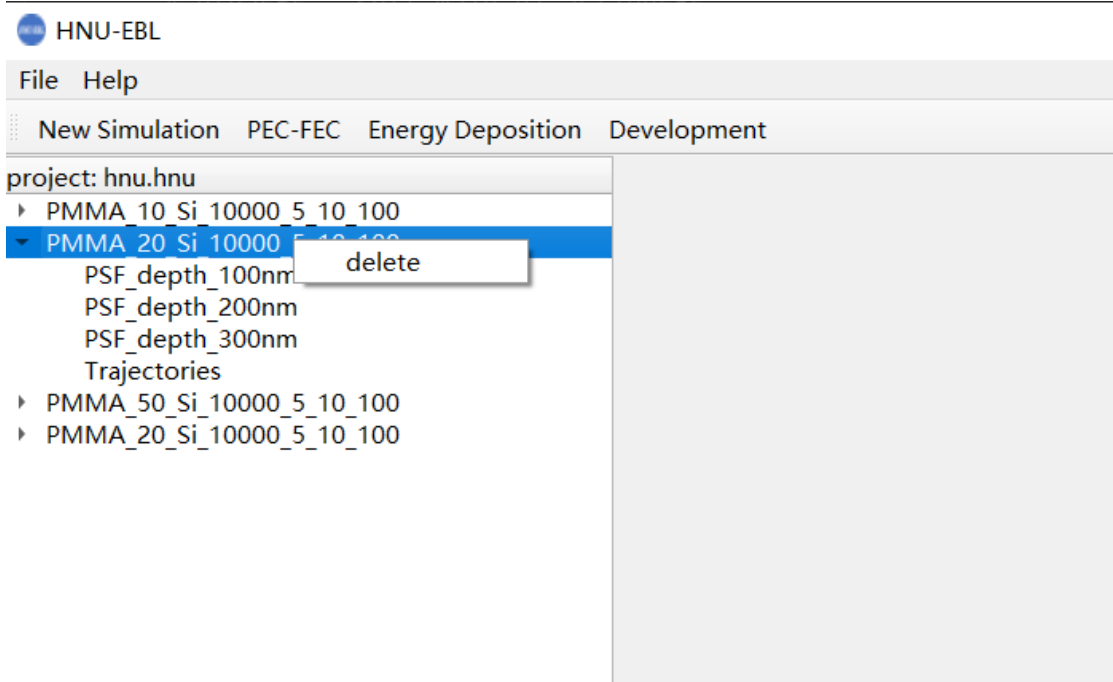


图 2.3.4 删除 Monte Carlo 计算结果界面

2.4 点扩散函数拟合

- (1)点击相应 Monte Carlo 计算结果左侧三角符号，可以显示 Monte Carlo 计算结果（如图 2.4.1）。
- (2)点击不同深度的“PSF” 显示四种（双高斯，双高斯+指数，三高斯，三高斯+指数（如图 2.4.2））点散函数拟合结果，为便于观察，对 X、Y 坐标取

对数显示。

(3)点击右侧“Linear”，可显示 X 坐标为线性时的拟合结果；点击右侧“Log”，可显示对 X 坐标取对数时的拟合结果。

(4)鼠标滑轮滚动或者鼠标左键拖动可以放大缩小平移。

(5)点击“Export”（如图 2.4.1），可导出散点坐标文件。

(6)若需要查看相应 Monte Carlo 模拟结果的拟合系数，左键点击左侧 PSF_depth_x 相应 Monte Carlo 模拟结果，右键单击“detail”即可查看（如图 2.4.3）。

(7)在查看相应 Monte Carlo 模拟结果的拟合系数界面（如图 2.4.4），可以选定一个公式并更改系数，点击“Redraw”可以查看更改系数后的点散函数拟合结果。（注意：系数输入值不能为空）

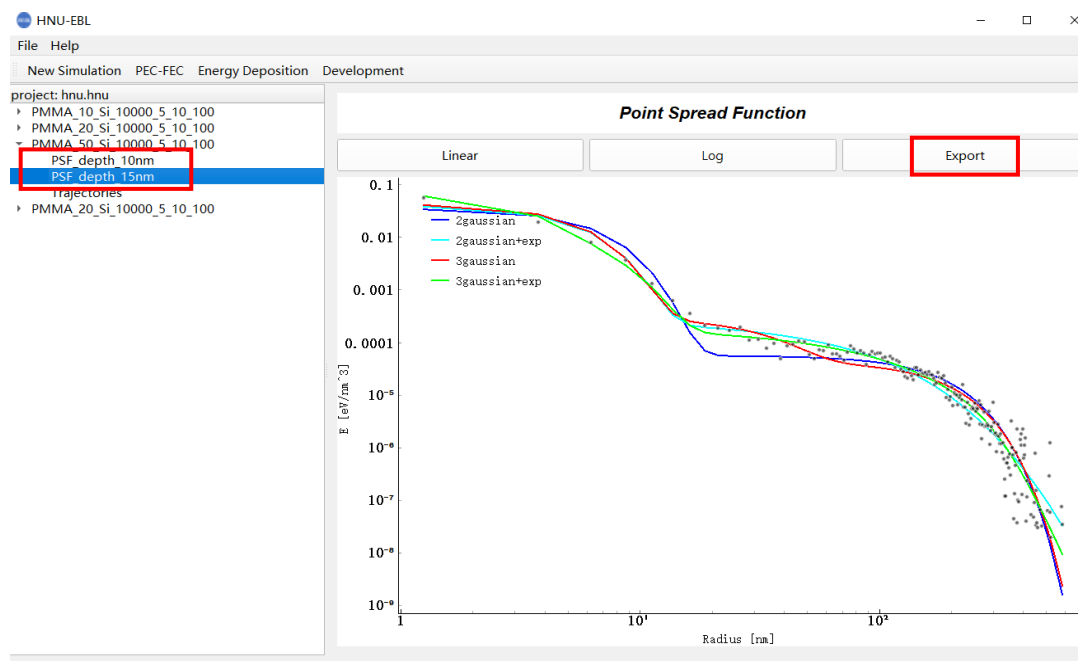


图 2.4.1 点散函数拟合界面

$$f = \frac{1}{\pi(1+\eta)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{x^2}{\beta^2}} \right) \quad (1)$$

$$f = \frac{1}{\pi(1+\eta+v_2)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{x^2}{\beta^2}} + \frac{v_2}{2\gamma_2^2} e^{-\frac{x}{\gamma_2}} \right) \quad (2)$$

$$f = \frac{1}{\pi(1+\eta+v)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{x^2}{\beta^2}} + \frac{v}{\gamma^2} e^{-\frac{x^2}{\gamma^2}} \right) \quad (3)$$

$$f = \frac{1}{\pi(1+\eta+v+v_2)} \left(\frac{1}{\alpha^2} e^{-\frac{x^2}{\alpha^2}} + \frac{\eta}{\beta^2} e^{-\frac{x^2}{\beta^2}} + \frac{v}{\gamma^2} e^{-\frac{x^2}{\gamma^2}} + \frac{v_2}{2\gamma_2^2} e^{-\frac{x}{\gamma_2}} \right) \quad (4)$$

图 2.4.2 拟合公式

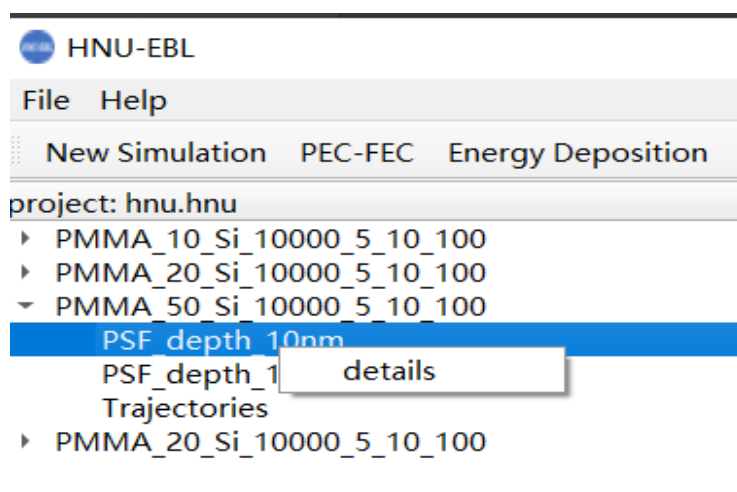


图 2.4.3 查看 Monte Carlo 模拟结果的拟合系数界面

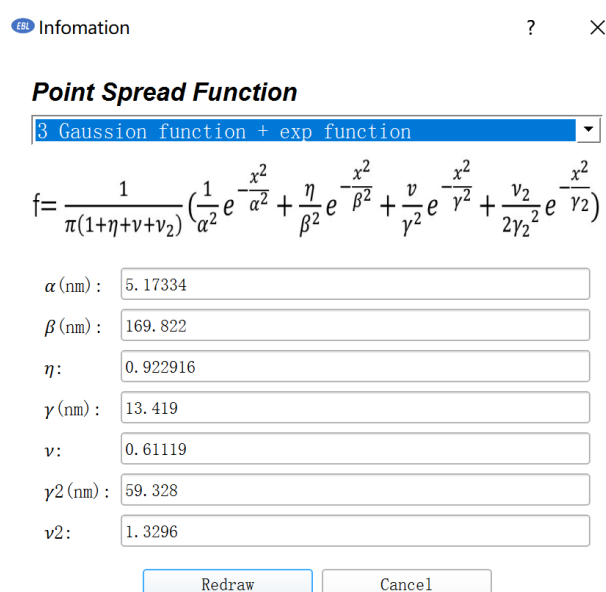


图 2.4.4 更改拟合系数并重绘界面

2.5 电子束散迹可视化

(1)点击相应蒙特卡洛计算结果左侧三角符号，可以显示 Monte Carlo 计算结果。

(2)点击“Trajectories”显示电子束散射拟合结果（如图 2.5.1），为便于观察，红色标志线为相应 Monte Carlo 仿真中除基底外其他各层的层名和层厚。

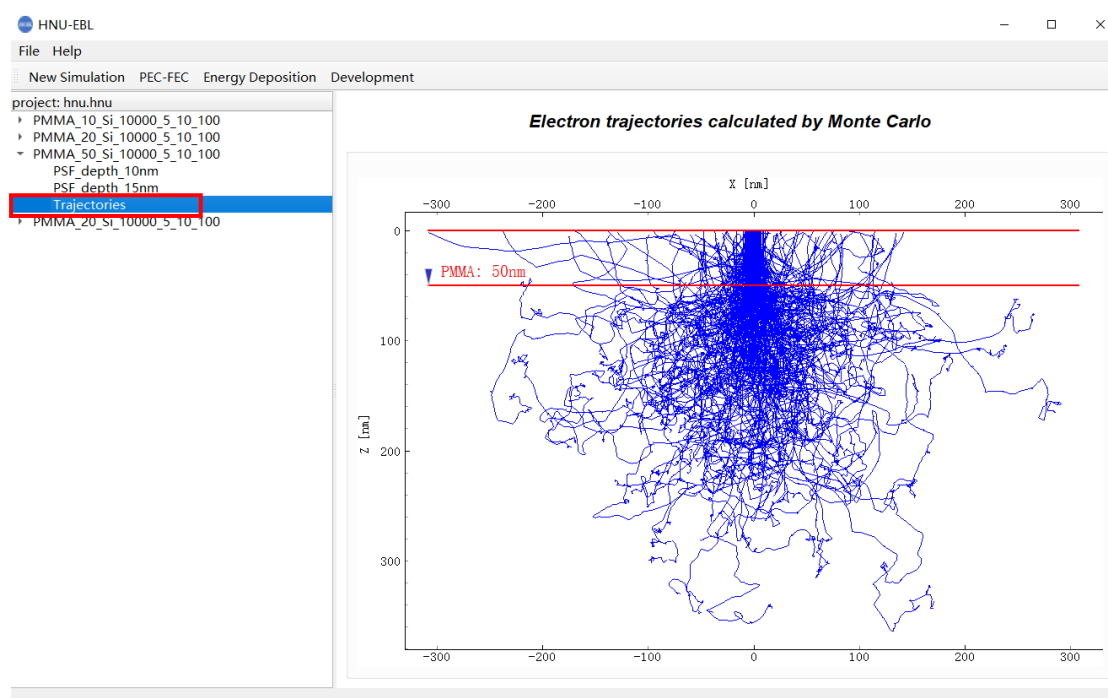


图 2.5.1 电子束散射拟合界面

3 光刻版图优化与测量

3.1 邻近效应矫正

(1)点击主界面顶部工具栏的“PEC-FEC”（如图 3.1.1）开始进行邻近效应矫正相关的设置。

(2)设置“PSF Results set”，选定一组做邻近效应矫正的 Monte Carlo 计算结果。

(3)在（2）的基础上，选择一个深度的“PSF Depth”值。

(4)在（3）的基础上选择需要拟合的公式“PSF Parameters”，下图选定三高斯公式进行邻近效应矫正。

(5)如果需要考虑雾化效应，勾选“Fogging Effect”然后填写参数。如果不需要考虑雾化效应，直接忽略。

(6)选择 PEC 功能“PEC Method”，点击下拉框会出现三个功能：dose correction, shape correction, dose_shape correction，第一个方法精度高，但是要求光刻机具有改变光束能量的能力，且对分辨率有很高的要求。第二个方法精度较低，但只需要单一强度的能量进行曝光，适合不能改变剂量的光刻机。第三个方法精度较高，所需的内存较少。将鼠标移动到“？”会显示提示信息。

(7)“Matrix set” 设置矫正划分的曝光单元最小尺寸(nm)，下图选定 5nm。
(注意：若版图较大，则曝光单元最小尺寸不宜太小。若尺寸太小且计算机内存不足则会给出提示)

(8)“GDSII File”打开待矫正的.gds 格式版图。(注意：路径只能含有英文字母和符号，不能含有中文。)

(9)“Result Folder”设置做邻近效应矫正计算后的输出文件路径(注意：路径只能含有英文字母和符号，不能含有中文。)

The screenshot displays the PEC-FEC software interface with the following settings:

- PSF Results:** PMMA 50 Si 10000 5 10 100
- PSF Depth:** 15
- PSF Parameters:** 3 gaussian
- Matrix Set:** Grid size on EBL pattern(nm): 5
- GDSii File:** C:/Users/30264/Desktop/xor.gds
- Result Folder:** C:/Users/30264/Desktop
- Structure Set:** Choose Structures: TEST, Choose layers: Layer61
- Fogging Effect:** Unchecked
- Parameters:** α : 5.5937, β : 186.26, η : 1.14677, γ : 33.6574, ν : 0.211865
- Buttons:** Calculate, Stop Calculate, Done

图 3.1.1 设置 PEC 界面

(10)一个 GDSII 文件可以包含多个结构 (structure)，一个结构可以包含多个层 (layer)。若用户只想对文件中的部分版图进行 PEC 计算，可以点击页面下方的“structure set”进一步设置待矫正的版图，“Structure”至少选择一个，“Layer”至少选择一个（如图 3.1.2（上）），若“Structure”已选择多个，则不可再选“Layer”（如图 3.1.2（下））。

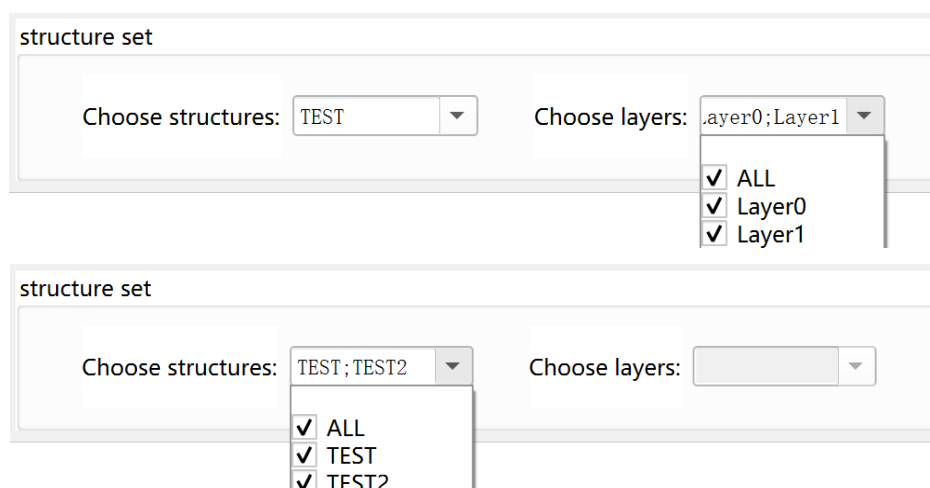


图 3.1.2 设置待矫正版图

(11)点击“Calculation”（如图 3.1.3），进行 PEC 矫正计算，若输入参数不完整则不能开始计算。计算完成显示计算时间（如图 3.1.4）。计算完成后点击“Done”关闭当前窗口，输出文件保存至指定文件夹下

(12)点击“Stop Calculation”可中止当前计算（如图 3.1.5）。

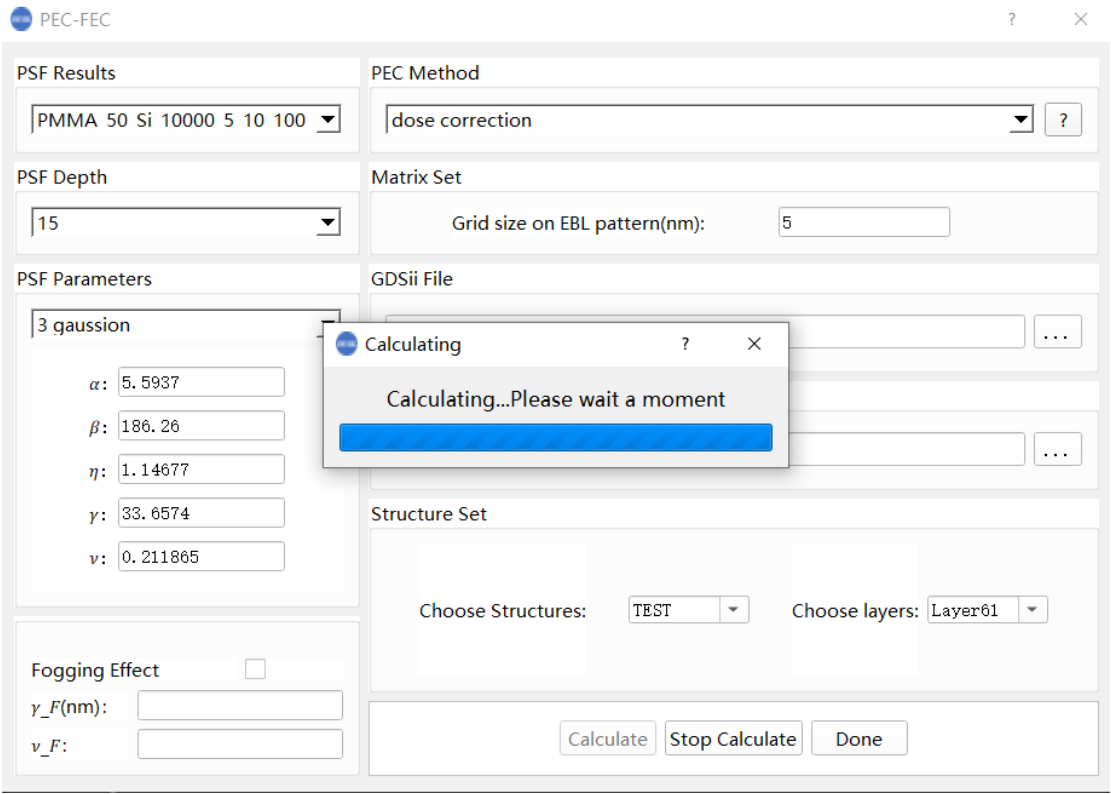


图 3.1.3 邻近效应校正计算界面

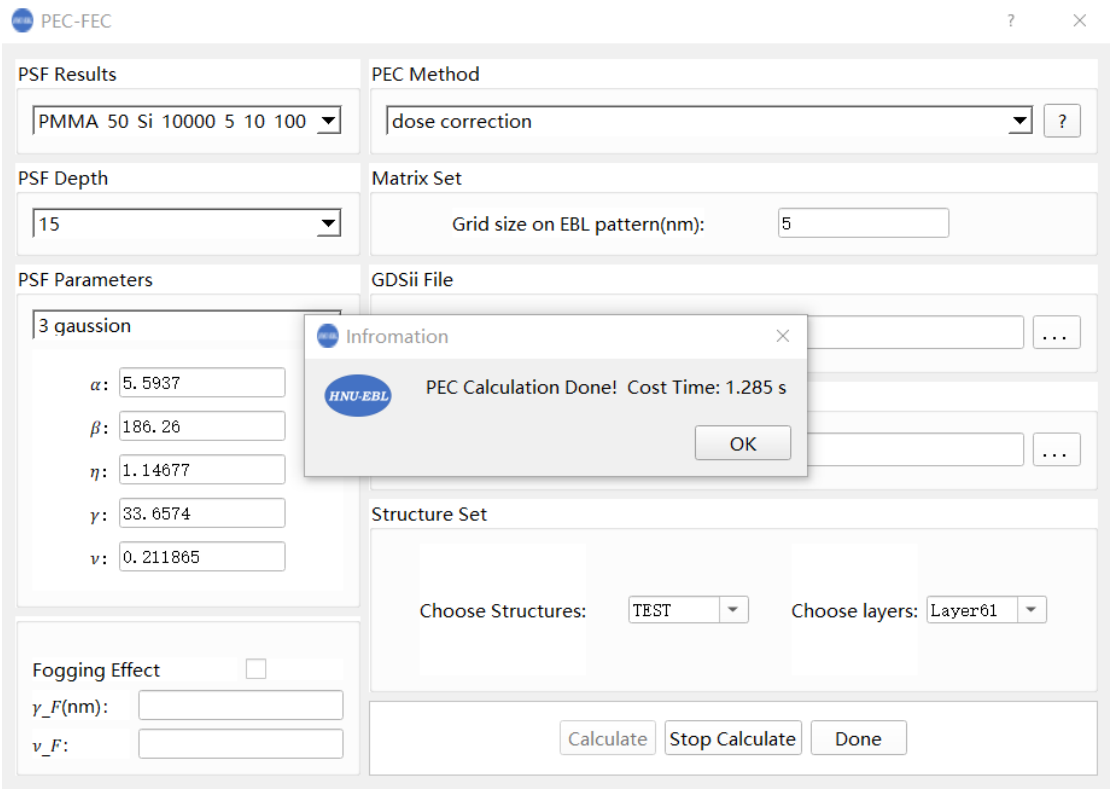


图 3.1.4 邻近效应校正计算完成界面

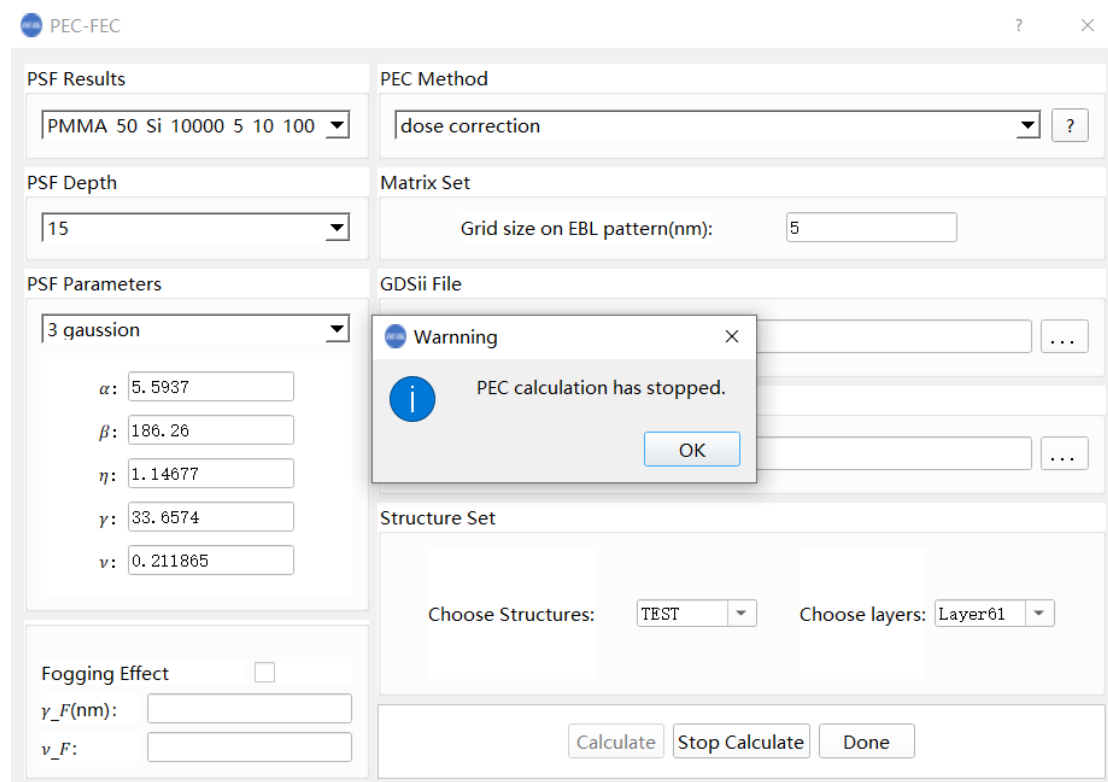


图 3.1.5 终止邻近效应校正计算界面

3.2 显影

- (1) 点击主界面顶部工具栏的“Development”开始进行显影计算(如图 3.2.1)。
- (2) 在“PSF Result”中选择一个计算过的某种参数下的 PSF 值。
- (3) 在(2)的基础上选择某一深度的 PSF 值。
- (4) 在(3)的基础上选择一组模型进行拟合, 进行显影计算, 下面选择的是三高斯模型进行演示。
- (5) 如果需要考虑雾化效应, 勾选“Fogging Effect”后填写参数, 如果不需要考虑雾化效应, 直接忽略。
- (6) “Matrix set” 设置矫正划分的曝光单元最小尺寸 (nm), 下图选定 5nm。
(注意: 若版图较大, 则曝光单元最小尺寸不宜太小。若尺寸太小且计算机内存不足则会给出提示)
- (7) “Resist Model”选择显影模型, 有 Threshold, Mack, Notch 三种模型(如图 3.2.2)。Threshold 模型: 设置一个阈值范围 0 到 1, 曝光后的版图归一化的值大于阈值的位置显示 1, 反之为 0。Mack 模型[17]: “Resist Type”表示选择正抗

蚀剂还是负抗蚀剂。“Rmax, Rmin”表示最大和最小显影速率。“Mth”标配是抗蚀剂的阈值浓度。“n”为溶解选择性参数。“Dill_C”表示曝光速率常数。Notch 模型 [18]: “n_norch”表示突陷点的强度,“Mth_norch”表示出现突陷时抗蚀剂的浓度。关于后两种显影模型具体细节公式见参考文献。

(8)“GDSII File”打开计算的版图 .gds 格式。(注意: 路径只能含有英文字母和符号, 不能含有中文。)

(9)点击“Calculation”(如图 3.2.2), 进行边缘位置误差计算, 若输入参数不完整则不能开始计算。计算完成有提示框(如图 3.2.3)。计算完成后点击“Done”关闭当前窗口。

(10)点击“Stop Calculation”可中止当前计算(如图 3.2.4)。

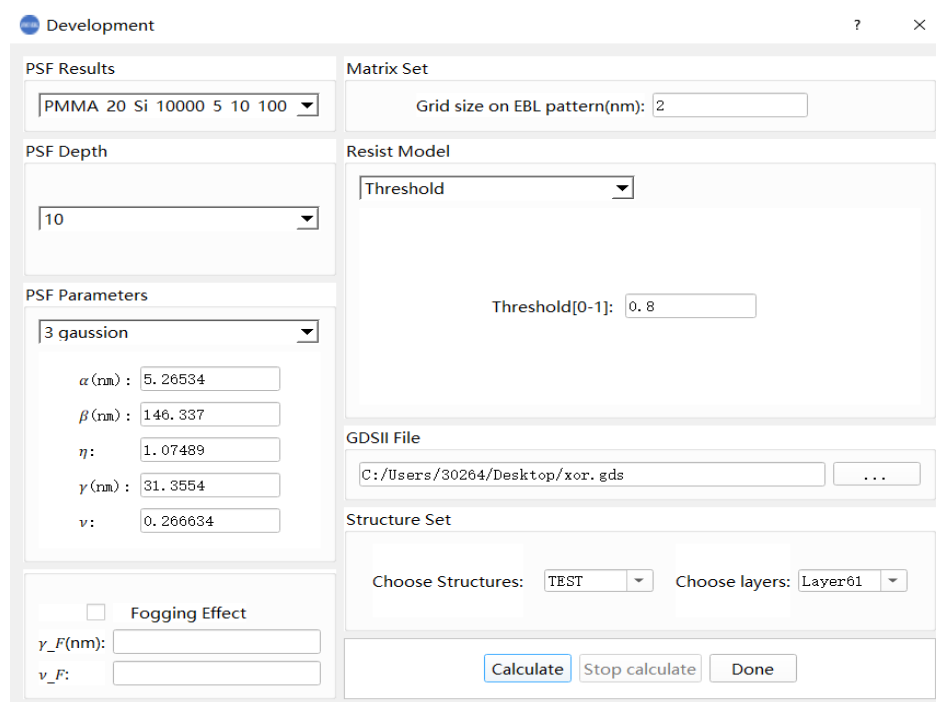


图 3.2.1 显影操作界面



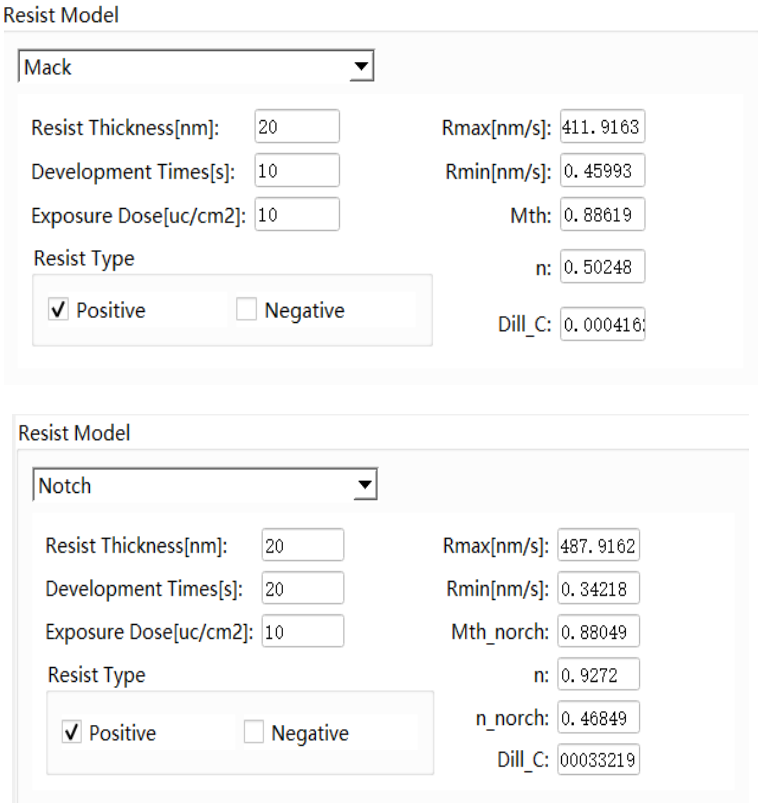


图 3.2.2 三种 显影模型

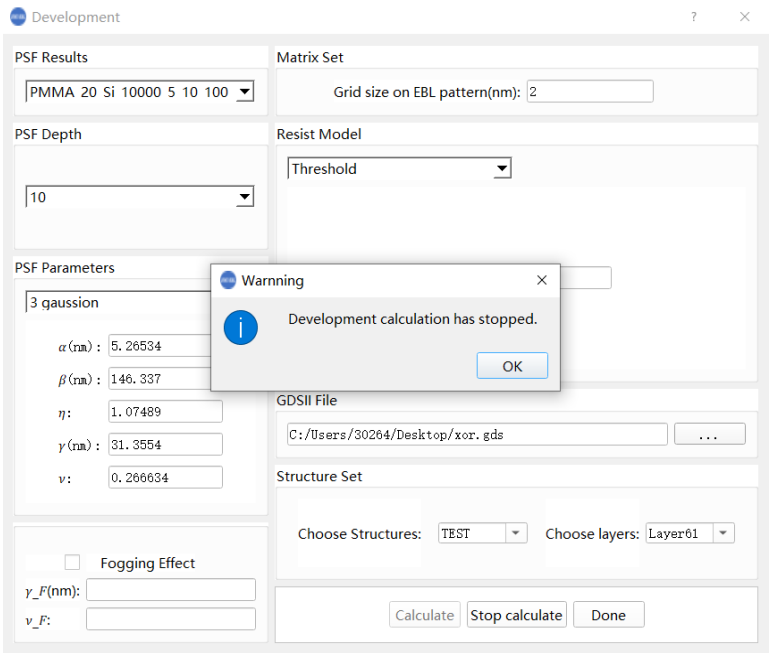


图 3.2.3 终止计算边缘位置误差界面

(11)边缘位置误差计算完成以后，点击图 3.2.3 对话框中的“OK”，可自动弹出显示版图边缘位置误差计算结果的对话框（如图 3.2.4）（注意：只含有 TEXT 图素的版图不能进行边缘位置误差计算计算）

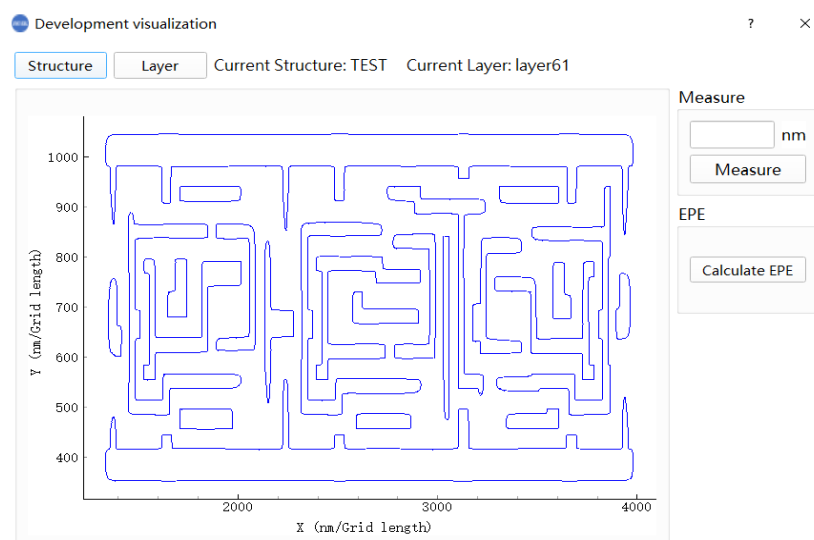


图 3.2.4 边缘位置误差界面

(12)点击上方“Structure”可选择任一结构的边缘位置误差（如图 3.2.5），默认显示第一个结构。不可选择多个结构进行显示。

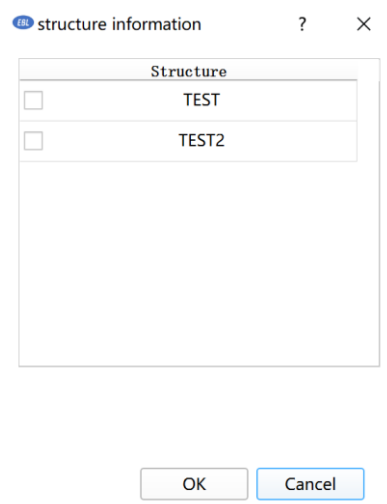


图 3.2.5 选择结构界面

(13)点击上方“Layer”可选择任一层的边缘位置误差（如图 3.2.6）。默认显示第一层。注意只能选择一层。

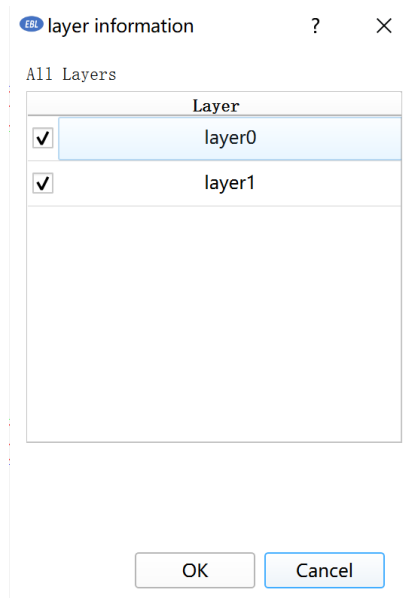


图 3.2.6 选择层界面

(14)点击“Measure”会在界面左边中心出现两个点，移动这两个点后再点击“Measure”就会显示两点间的间距。每次移动后点击“Measure”就会显示两点间的差距（如图 3.2.7）

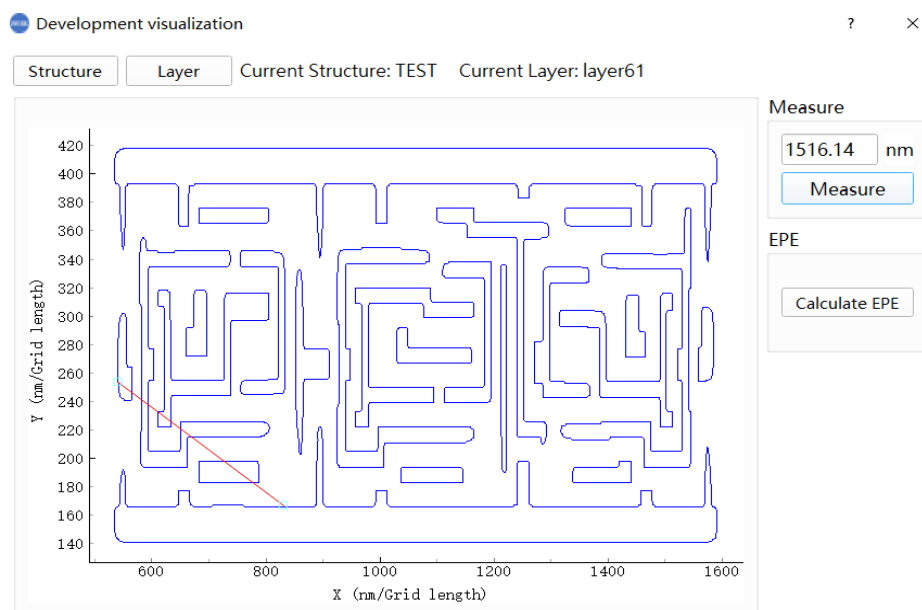


图 3.2.7 测量两点间的距离

(15)点击“Calculate EPE”可以计算当前版图的 EPE 结果，并支持拖动和放大（如图 3.2.8）点击“EPE value”可以显示当前 EPE 的信息（如图 3.2.9）。点击“Original”可以返回最原始的位置。

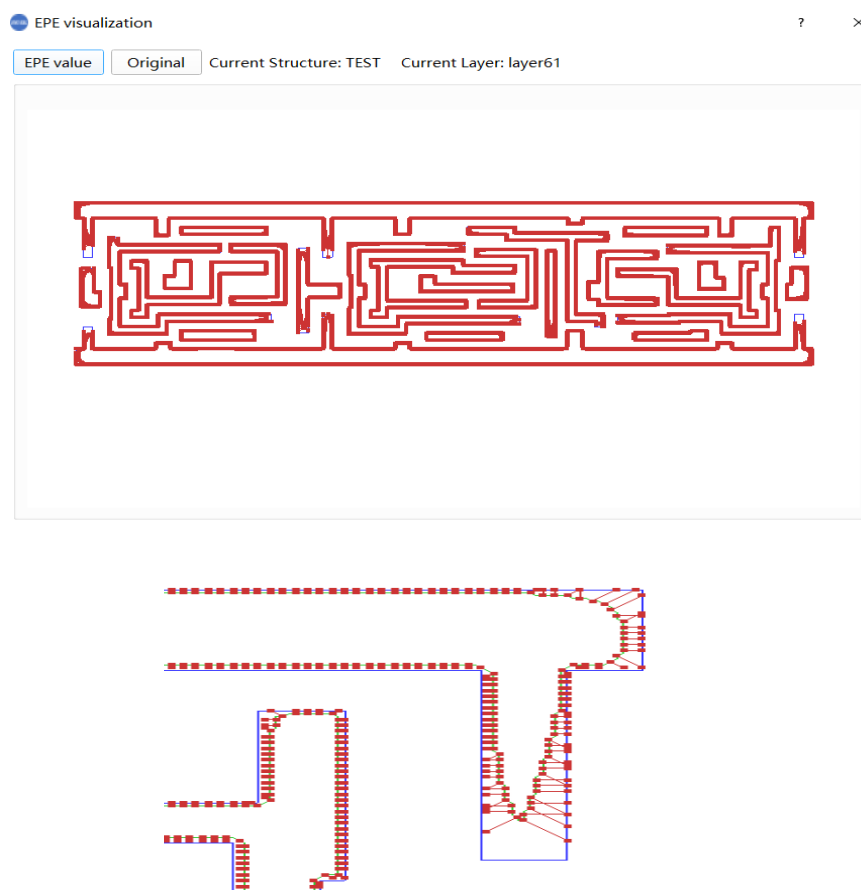


图 3.2.8 EPE 效果图

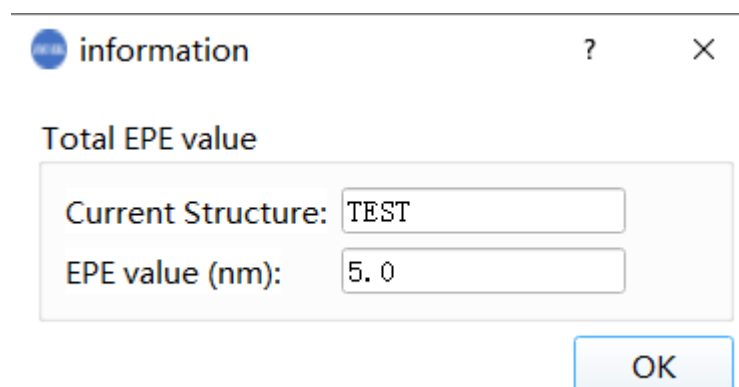


图 3.2.9 EPE 基本信息

3.3 能量沉积

(1)点击主界面顶部工具栏的“Energy Deposition”开始进行计算能量沉积相关的设置（如图 3.3.1）。

(2)在“PSF Result”中选择计算后不同参数的结果。

(3)在（2）选择完后，在“PSF Depth”选择需要查看的 PSF 深度值。

(4)在（3）选择完后，选择需要拟合的公式，下图选定三高斯公式进行能量沉积计算。

(5)如果需要考虑雾化效应，勾选“Fogging Effect”后输入参数既可，如果不需要考虑雾化效应无需勾选，直接忽略即可。

(6)“Matrix set” 设置计算划分的曝光单元最小尺寸（nm），下图选定 5nm。

（注意：若版图较大，则曝光单元最小尺寸不宜太小。若尺寸太小且计算机内存不足则会给出提示）

(7)“GDSII File”打开计算的.gds 格式版图。（注意：路径只能含有英文字母和符号，不能含有中文。）

(8)点击“Calculation”（如图 3.3.1），进行能量沉积计算，若输入参数不完整则不能开始计算。计算完成有提示框（如图 3.3.2）。计算完成后点击“Done”关闭当前窗口。

(9)点击“Stop Calculation”可中止当前计算（如图 3.3.3）。

The screenshot shows the 'ENERGY' software interface for calculating energy deposition. The window is titled 'ENERGY' and contains several panels for parameter configuration:

- PSF Results:** A dropdown menu showing 'PMMA 50 Si 10000 5 10 100'.
- PSF Depth:** A dropdown menu showing '15'.
- PSF Parameters:** A dropdown menu showing '3 gaussian'. Below it are input fields for:
 - α (nm): 5.5937
 - β (nm): 186.26
 - η : 1.14677
 - γ (nm): 33.6574
 - ν : 0.211865
- Fogging Effect:** A checkbox that is currently unchecked. Below it are input fields for:
 - γ_F (nm):
 - ν_F :
- Matrix Set:** A section with a label 'Grid size on EBL pattern(nm):' and an input field containing '5'.
- GDSii File:** A text input field containing 'C:/Users/30264/Desktop/xor.gds' and a button with three dots '...'.
- Structure Set:** A section with two dropdown menus: 'Choose Structures:' (showing 'TEST') and 'Choose layers:' (showing 'Layer61').
- Buttons:** At the bottom right, there are three buttons: 'Calculate', 'Stop Calculate', and 'Done'.

图 3.3.1 计算能量沉积界面

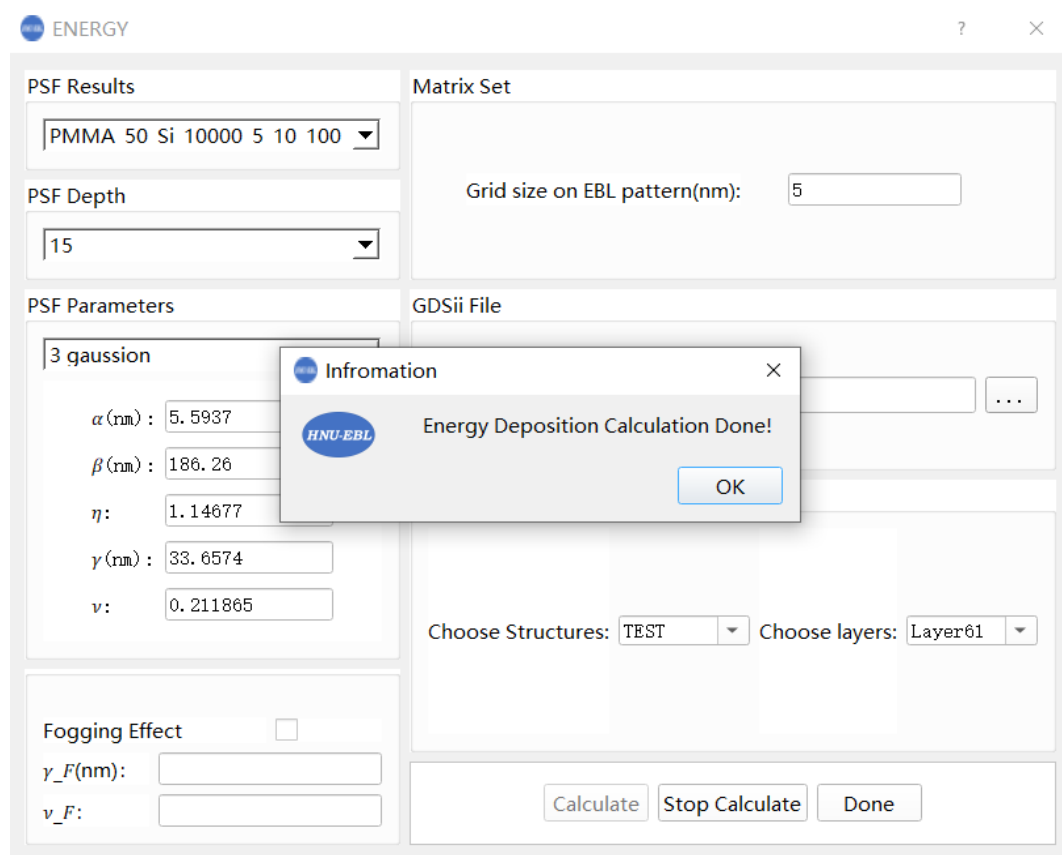


图 3.3.2 计算能量沉积完成界面

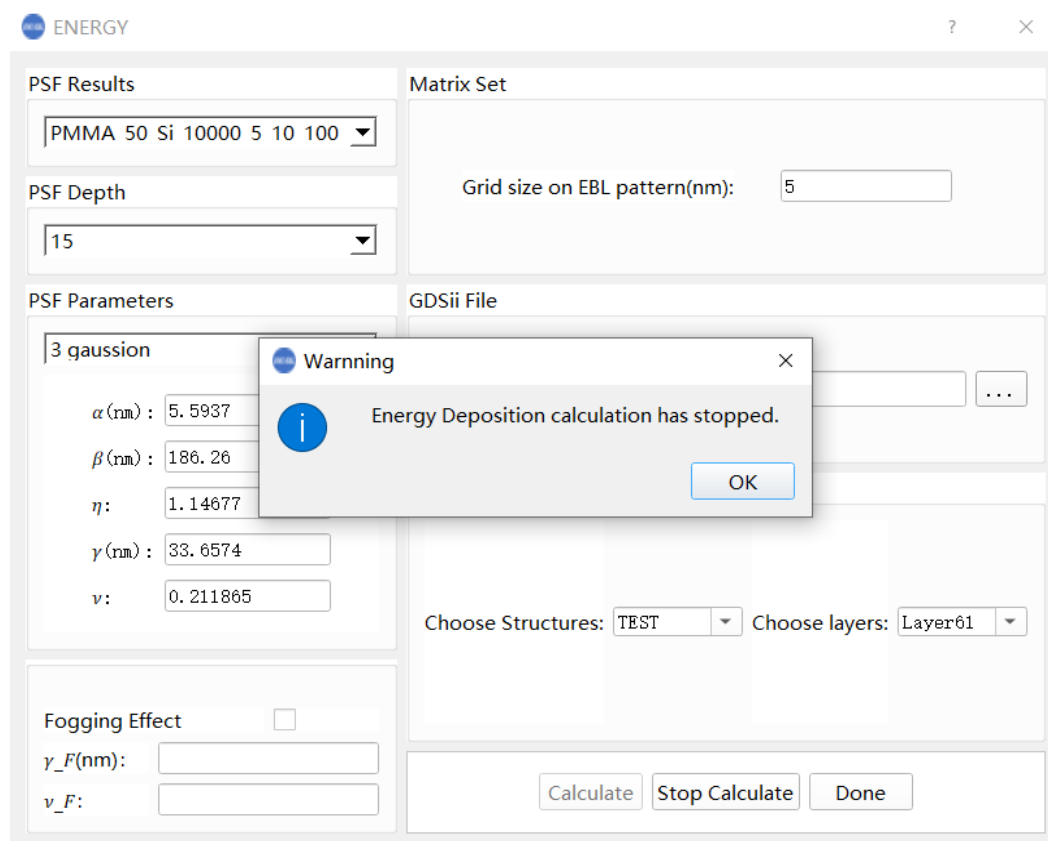


图 3.3.3 终止计算能量沉积界面

(10)能量沉积计算完成以后，点击图 3.3.3 对话框中的“OK”，可自动弹出显示版图能量沉积计算结果的对话框（如图 3.3.4）（注意：只含有 TEXT 图素的版图不能进行能量沉积计算；图形所对应剂量全为 0 时无法显示计算结果）

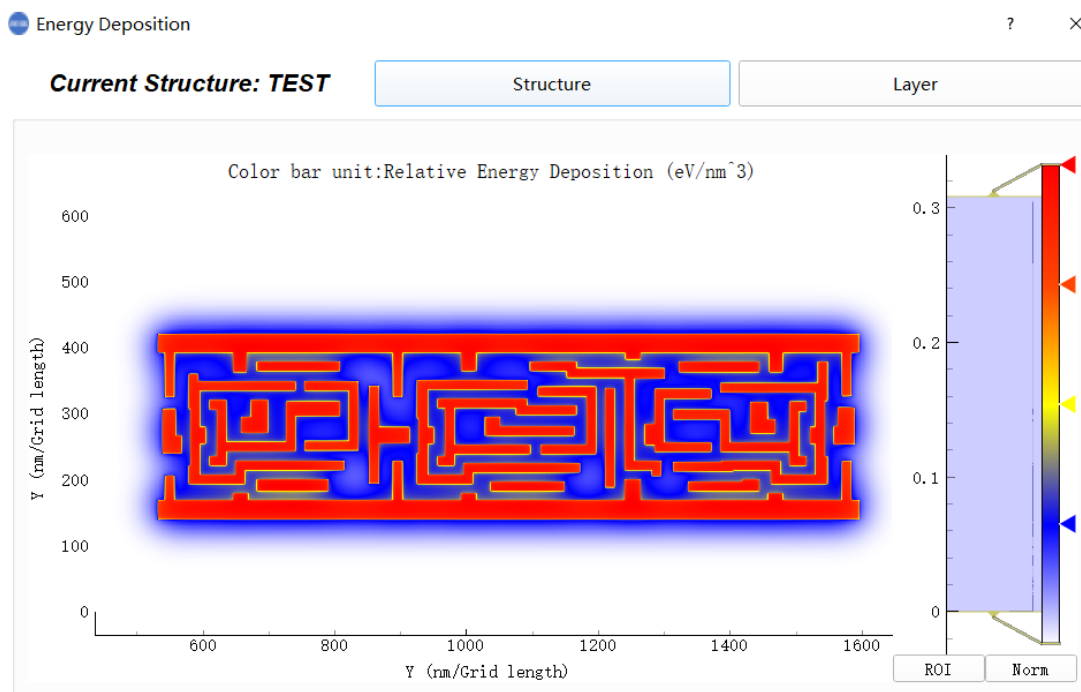


图 3.3.4 能量沉积计算结果界面

(11)点击右上方“Structure”可选择显示某一个结构的能量沉积（如图 3.3.5），默认显示第一个结构。不可选择多个结构。

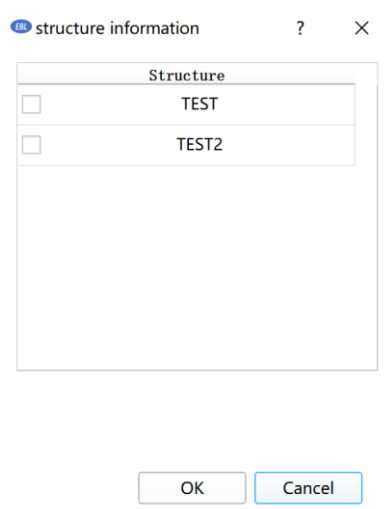


图 3.3.5 选择结构界面

(12)点击右上方“Layer”可选择任一层的能量沉积（如图 3.3.6）。默认显示全部层。可选择多个层进行显示。

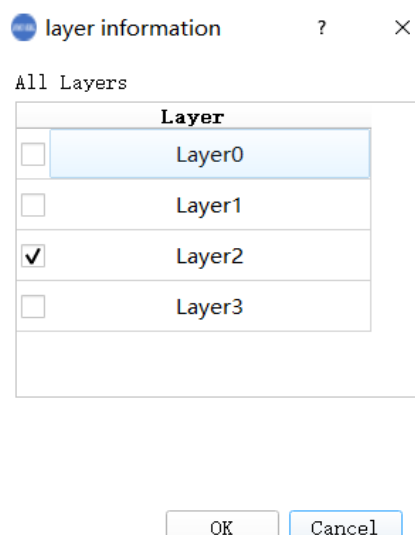


图 3.3.6 选择层界面

引用

[1] <https://www.wassenaar.org/control-lists>

[2] <https://www.govinfo.gov/content/pkg/FR-2020-10-05/pdf/2020-18334.pdf>

[3] 姚文泽, 徐宏成, 赵浩杰, 刘薇, 侯程阳, 陈艺勤, 段辉高, 刘杰. “电子束光刻“自主可控”EDA 软件 HNU-EBL.”湖南大学学报(自然科学版).

[4] Yao, W., Zhao, H., Hou, C., Liu, W., Xu, H., Zhang X., Xiao, J., & Liu, Jie. “Efficient Proximity Effect Correction Using Fast Multipole Method with Unequally Spaced Grid for Electron Beam Lithography.” *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*, 2022.

[5] Liu, W., Yao, W., Hou, C., Xu, H., Zhao, H., Chen, Y., Duan, H., & Liu, Jie. “HNU-EBL: A Software Toolkit for Electron Beam Lithography Simulation and Optimization.” *IEEE 2021 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS)*, 2021.

[6] Hou, C., Yao, W., Liu, W., Chen, Y., Duan, H., & Liu, Jie. “Ultrafast and Accurate Proximity Effect Correction of Large-Scale Electron Beam Lithography based on FMM and SaaS.” *IEEE 2020 International Workshop on Advanced Patterning Solutions (IWAPS)*, 2020.

[7] 刘杰, 姚文泽, 侯程阳等. 一种基于神经网络的电子束邻近效应矫正方法

- [8] 刘杰, 姚文泽, 刘薇, 等. 大规模电子束曝光版图的高精度邻近效应快速矫正方法:, CN111965936A[P]. 2020.
- [9] 刘杰, 姚文泽, 徐宏成, 等. 一种基于二维快速傅里叶变换的电子束曝光的邻近效应矫正方法:.
- [10] 刘杰, 等. 一种电子束光刻邻近效应矫正版图压缩方法 专利号 202111316982.1 (实质审查)
- [11] 刘杰, 等. 一种基于快速多极子方法的电子束光刻邻近效应校正版图能量沉积计算方法 专利号 202210044985.2 (实质审查)
- [12] 刘杰, 等. 一种基于边缘迭代的电子束光刻剂量形状校正方法 专利号 202210381947.6 (实质审查)
- [13] 湖南大学. “基于 SaaS 模式的电子束曝光仿真与修正软件” 登记号 2020SR1221118
- [14] 湖南大学. “电子束光刻邻近效应矫正软件” 登记号 2020SR0592524
- [15] 湖南大学. “GDSII 文件可视化软件” 登记号 2021SR1092499
- [16] 湖南大学. “电子束光刻仿真计算 EDA 软件” 登记号 2021SR1203213
- [17] Deok, Jung, Kim W G, et al. Development of positive photoresist[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1984, 31.
- [18] Arthur G, Mack C A. A New Development Model For Lithography Simulation.