

集成电路科学与工程系列教材

微电子工艺实验教程

主 编 王 珏
副主编 姚 健 刘 立 杨 旻

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书是根据微电子工艺实验的基本教学要求编写的,秉持“理论与实践并重”的理念,在内容安排上注重对学生实验技能的培养。全书精心设计了12个实验,包括1个工艺仿真基础实验、6个单步工艺实验和5个成套工艺实验。每个实验均配有详细的操作指导,还安排了启发性思考题和拓展实验内容,便于开展分层教学,各校可根据自己的需求选做。

本书可作为高等院校微电子科学与工程、集成电路设计与集成系统、电子信息工程等专业的实验教材,也可作为集成电路制造工艺领域工程技术人员的参考用书。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

微电子工艺实验教程 / 王珏主编. — 北京: 电子工业出版社, 2025. 7. — ISBN 978-7-121-50690-1
I. ① TN4-33
中国国家版本馆 CIP 数据核字第 2025SG1731 号

责任编辑: 凌 毅

印 刷: 中国电影出版社印刷厂

装 订: 中国电影出版社印刷厂

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1 092 1/16 印张: 10.75 字数: 275 千字

版 次: 2025 年 7 月第 1 版

印 次: 2025 年 7 月第 1 次印刷

定 价: 45.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010) 88254888, 88258888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:(010) 88254528, lingyi@phei.com.cn。

前言

半导体技术的发展是电子产品行业发展的基础，其制造工艺和材料的发展促进了电路集成度的提高，特别是在微型芯片的关键元件制造方面，许多新技术不断涌现，将低功耗、新型半导体材料、新的制造技术以及更薄的绝缘衬底等技术融合在一起，从而使芯片运行速度更高、面积更小、成本更低。

本教材是微电子工艺实验的配套教材。传统的微电子制造工艺实验需要有超净间和各种半导体工艺设备，在投入巨大的同时，实验效果并不理想，因此，普通高校一般不开设微电子工艺实验课程。学生对于微电子工艺只限于理论知识，没有相应的实践训练，教学效果不理想。为了摆脱学校提供给学生微电子工艺实践的硬件环境有限、学生的实践能力与产业岗位的需求脱节的困境，教材采用“虚实联动”的实验设计思路，采用虚拟仿真的手段，结合产线的真实数据，培养学生的实验技能和创新思维能力。

本教材针对现代集成电路工艺的主流步骤，提供各类典型工艺的仿真数据和模型结果，通过直观的模型对比、数据对比、色阶图等内容的分析，让学生更好地理解微电子工艺流程，了解相关参数对工艺特性的影响。本教材设计了 12 个实验。实验 1 从工艺仿真的基本知识和技能入手，介绍工艺仿真的实验基础。实验 2 到实验 7 为微电子单步工艺实验，涵盖了光刻与刻蚀、氧化、离子注入、扩散和退火、薄膜淀积和外延生长以及金属化后道工艺，让学生进行单步工艺的设计和仿真，以验证性实验和研究设计实验的形式，掌握各单步工艺的特点、应用场景和各工艺参数的设置与作用。实验 8 到实验 12 让学生以开放性设计实验的形式，完成几个半导体器件的成套工艺设计，包括电阻、二极管、JFET 和 MESFET、BJT 以及 MOSFET，并验证其特性。本教材通过分梯度设计实验内容和循序渐进的教学模式，锻炼学生的自主实验设计能力和创新思维。

本教材由王珏担任主编，负责内容组织及统稿工作。姚健设计实验环节并提供各个实验的数据，刘立编写微电子单步工艺实验，王珏编写半导体器件成套工艺实验，杨旻审核全书并进行了认真的修改工作，研究生屠云凡、叶磊进行了部分图片的绘制工作。本教材用到的实验设备由紫光教育科技有限公司提供，在此表示感谢。

由于编者水平有限，书中难免存在疏漏与不妥之处，在此恳请使用本教材的老师和同学不吝批评指正，并提出宝贵的改进建议。

王 珏
2025 年 6 月于杭州

电子工业出版社有限公司
版权所有

目 录

绪论	1
实验 1 工艺仿真实验基础及衬底特性分析	4
1.1 实验目的	4
1.2 工艺仿真的原理	4
1.3 实验内容	4
1.3.1 对二维结构进行网格划分和稠密度设置	4
1.3.2 对衬底进行设置	5
1.3.3 分工艺类型进行仿真	5
1.3.4 调用工艺仿真器完成仿真并查看结果	5
1.4 主要仪器设备	5
1.5 操作方法与实验步骤	5
1.5.1 基础准备工作	5
1.5.2 晶圆衬底准备	7
1.5.3 完成单步工艺	13
1.6 思考题	24
1.7 拓展实验	24
实验 2 光刻与刻蚀工艺分析与应用	25
2.1 实验目的	25
2.2 实验原理	25
2.2.1 工艺定义	25
2.2.2 工艺原理	25
2.2.3 光刻工艺形成方法及设备	27
2.2.4 刻蚀工艺形成方法及设备	31
2.3 实验内容	35
2.4 主要仪器设备	35
2.5 操作方法与实验步骤	35
2.5.1 基础准备工作	35
2.5.2 实验过程及提示	35
2.6 实验结果分析	40
2.7 思考题	40
2.8 拓展实验	40
实验 3 氧化工艺分析与应用	41
3.1 实验目的	41
3.2 实验原理	41

3.2.1	工艺定义	41
3.2.2	工艺原理	41
3.2.3	工艺设备及影响因素	42
3.2.4	具体实践案例	43
3.3	实验内容	44
3.4	主要仪器设备	44
3.5	操作方法与实验步骤	44
3.5.1	基础准备工作	44
3.5.2	实验过程及提示	44
3.6	实验结果分析	50
3.7	思考题	50
3.8	拓展实验	50
实验 4	离子注入工艺分析与应用	51
4.1	实验目的	51
4.2	实验原理	51
4.2.1	工艺定义	51
4.2.2	工艺原理	51
4.2.3	工艺设备及影响因素	53
4.2.4	具体实践案例	55
4.3	实验内容	55
4.4	主要仪器设备	56
4.5	操作方法与实验步骤	56
4.5.1	基础准备工作	56
4.5.2	实验过程及提示	56
4.6	实验结果分析	61
4.7	思考题	61
4.8	拓展实验	61
实验 5	扩散和退火工艺分析与应用	62
5.1	实验目的	62
5.2	实验原理	62
5.2.1	工艺定义	62
5.2.2	工艺原理	62
5.2.3	工艺设备及影响因素	63
5.2.4	具体实践案例	66
5.3	实验内容	67
5.4	主要仪器设备	67
5.5	操作方法与实验步骤	67
5.5.1	基础准备工作	67

5.5.2 实验过程及提示	68
5.6 实验结果分析	79
5.7 思考题	79
5.8 拓展实验	79
实验 6 薄膜淀积和外延工艺分析与应用	80
6.1 实验目的	80
6.2 实验原理	80
6.2.1 工艺定义	80
6.2.2 工艺原理	80
6.2.3 工艺形成方法及影响因素	81
6.2.4 具体实践案例	84
6.3 实验内容	85
6.4 主要仪器设备	86
6.5 操作方法与实验步骤	86
6.5.1 基础准备工作	86
6.5.2 实验过程及提示	86
6.6 实验结果分析	91
6.7 思考题	91
6.8 拓展实验	91
实验 7 金属化后道工艺分析与应用	92
7.1 实验目的	92
7.2 实验原理	92
7.2.1 工艺定义	92
7.2.2 工艺原理	92
7.2.3 工艺形成方法及影响因素	94
7.2.4 具体实践案例	96
7.3 实验内容	97
7.4 主要仪器设备	97
7.5 操作方法与实验步骤	98
7.5.1 基础准备工作	98
7.5.2 实验过程及提示	98
7.6 实验结果分析	101
7.7 思考题	101
7.8 拓展实验	101
实验 8 电阻成套工艺分析与应用	102
8.1 实验目的	102
8.2 实验原理——集成电路中电阻的类型和结构	102
8.3 实验内容	103

8.4	主要仪器设备	103
8.5	操作方法与实验步骤	103
8.5.1	基础准备工作	103
8.5.2	实验过程及提示	104
8.6	实验结果分析	109
8.7	思考题	110
8.8	拓展实验	110
实验 9	二极管成套工艺分析与应用	111
9.1	实验目的	111
9.2	实验原理	111
9.2.1	二极管的工作机理	111
9.2.2	欧姆接触	113
9.3	实验内容	114
9.4	主要仪器设备	115
9.5	操作方法与实验步骤	115
9.5.1	基础准备工作	115
9.5.2	实验过程及提示	115
9.6	实验结果分析	118
9.7	思考题	119
9.8	拓展实验	119
实验 10	JFET 和 MESFET 成套工艺分析与应用	120
10.1	实验目的	120
10.2	实验原理	120
10.2.1	JFET 工作原理	120
10.2.2	MESFET 工作原理	123
10.3	实验内容	124
10.3.1	JFET 制作工艺流程	124
10.3.2	MESFET 制作工艺流程	125
10.4	主要仪器设备	126
10.5	操作方法与实验步骤	126
10.5.1	基础准备工作	126
10.5.2	实验过程及提示	126
10.6	实验结果分析	133
10.7	思考题	133
10.8	拓展实验	134
实验 11	BJT 成套工艺分析与应用	135
11.1	实验目的	135
11.2	实验原理——BJT 工作原理	135

11.3	实验内容	140
11.4	主要仪器设备	141
11.5	操作方法与实验步骤	141
11.5.1	基础准备工作	141
11.5.2	实验过程及提示	141
11.6	实验结果分析	145
11.7	思考题	145
11.8	拓展实验	145
实验 12	MOSFET 成套工艺分析与应用	146
12.1	实验目的	146
12.2	实验原理——MOSFET 工作原理	146
12.3	实验内容	153
12.4	主要仪器设备	155
12.5	操作方法与实验步骤	155
12.5.1	基础准备工作	155
12.5.2	实验过程及提示	155
12.6	实验结果分析	159
12.7	思考题	159
12.8	拓展实验	160
参考文献		161

电子工业出版社有限公司
版权所有

实验 1 工艺仿真实验基础及衬底特性分析

1.1 实验目的

通过本实验，掌握工艺仿真网格划分和网格稠密度原理与设置方法；掌握集成电路晶圆衬底的参数和设置方法；掌握单步工艺流程和设置方法；掌握工艺仿真常用功能的使用方法；理解不同衬底晶圆的晶向对生成氧化层厚度的影响。

1.2 工艺仿真的原理

工艺仿真软件依托一系列物理模型和方程，为集成电路制造工艺的开发与优化提供了强有力的支持。此类软件能够实现对所有关键制造步骤，包括离子注入、扩散、刻蚀、淀积、光刻及氧化等环节的快速且精确的模拟。在此基础上，还能够精确预测器件结构中的几何参数、掺杂剂量分布及应力状态等关键指标，进而优化设计参数，力求在器件开关速度、击穿电压、泄漏电流及可靠性之间达到最优的平衡点。采用仿真模拟，替代了传统的耗资巨大的硅片实验，从而大幅缩短了工艺开发的周期，并显著提升了成品的良率。

仿真的精确度取决于所选取的物理模型，因此通常要求解一套描述复杂的物理现象和过程的偏微分方程组。然而，在大多数情况下，这些偏微分方程组很难甚至无法通过解析方法得到精确解，这时就需要借助数值计算方法来求解。数值计算首先将连续性问题离散化，把偏微分方程组转化为一组线性方程，然后通过迭代等方法求解这些线性方程，从而得到近似数值解。

工艺仿真软件通常使用有限元法来求解，将半导体仿真区域划分成网格，在网格点处假设一个简单的函数形式，然后通过变分原理或加权余量法将偏微分方程组转化为一组线性方程。网格划分与计算的精确性、计算速度和收敛性直接相关，对仿真至关重要。精细的网格能得到较精确的结果，但相应地会增加计算时间，也可能导致不收敛。数值计算必须综合考虑精确性、计算速度和收敛性。精确性与网格密度、计算步长的疏密、算法和物理模型的选择等有关。计算速度由网格密度、计算步长的疏密及算法等决定。收敛性和计算步长的疏密、初始值及算法有关。仿真计算时，参数设置上需要在精确性、计算速度和收敛性之间折中。

1.3 实验内容

本实验是后续实验的基础，需要仔细学习和掌握。工艺仿真的作用是分析工艺参数（如氧化温度、氧化时间等氧化参数）对工艺输出特性（如掺杂浓度、电势分布）的影响，具体可以分为以下步骤。

1.3.1 对二维结构进行网格划分和稠密度设置

工艺仿真首先需要对待分析晶圆进行网格划分，然后工艺仿真器会根据网格划分的结果进行有限元分析。网格划分直接决定仿真结果的好坏。网格越密，则分析精度越高，

但分析速度就会越慢。相反，如果网格过于稀疏，虽然分析速度会变快，但分析精度就会变低，甚至会出现无法求解的情况。

1.3.2 对衬底进行设置

通常，微电子工艺都是从一块清洗好的衬底开始进行的。所以，对衬底进行设置也是所有微电子工艺实验的基础操作。设置的衬底参数一般包括衬底材料、衬底初始掺杂杂质、衬底初始掺杂浓度、衬底晶向等。

1.3.3 分工艺类型进行仿真

衬底设置好后，工艺仿真的基础准备工作就完成了。接下来，所有的仿真分析都是以工艺类型进行的。在本实验中，可供分析的工艺类型包括氧化、淀积、光刻、刻蚀、离子注入、退火、扩散、外延。

对于每一种工艺类型，都有针对这一类型的输入参数需要设置，比如针对氧化类型，需要设置氧化条件、氧化时间和氧化温度等。

1.3.4 调用工艺仿真器完成仿真并查看结果

当某一单步工艺的输入参数设置好后，就可以调用工艺仿真器了。工艺仿真器根据网格划分情况以及当前晶圆情况和单步工艺的输入情况，通过有限元分析完成仿真，并将结果以二维色阶图的形式展示。

1.4 主要仪器设备

- 多功能实验基础平台（AIICETI-0304A）
- 实验用半导体参数分析仪（0112B-SCS）
- 基础数据通信板卡（LMS-1110）
- RF 射频连接线（RFL-1140）
- 源测试单元（SMU）板卡（SMU-2110）
- 半导体工艺仿真板卡（SSP-1220）
- HSLab 软件

1.5 操作方法与实验步骤

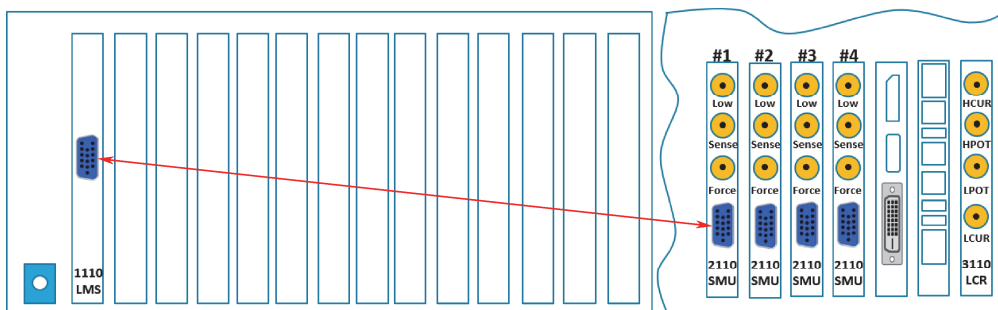
1.5.1 基础准备工作

（1）将多功能实验基础平台上的基础数据通信板卡和实验用半导体参数分析仪上的#1 源测试单元（SMU）板卡进行连接，如图 1.1 所示。

（2）启动多功能实验基础平台和实验用半导体参数分析仪。

（3）在实验用半导体参数分析仪上，打开 HSLab 软件，如图 1.2 所示。

（4）在多功能实验基础平台上，选择本实验课程：微电子工艺实验，如图 1.3 所示。



多功能实验基础平台（AIICETI-0304A）

实验用半导体参数分析仪（0112B-SCS）

图 1.1 实验设备背面连接图

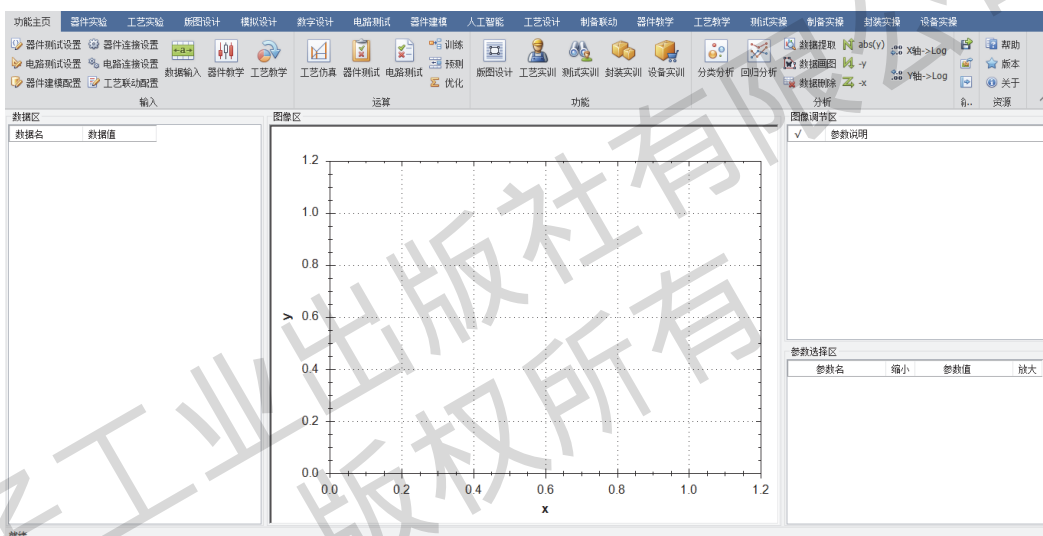


图 1.2 HSLab 软件界面



图 1.3 多功能实验基础平台界面

提示：单击 HSLab 软件中的“工艺实验”菜单，并单击入门视频，可对整体实验课程有一个基本的了解。

1.5.2 晶圆衬底准备

1. 按照提示完成晶圆衬底准备

(1) 在多功能实验基础平台上对工艺仿真网格的 X 轴进行设置。如图 1.4 所示， x_1 、 x_2 、 $\dots$ 、 x_n 和 y_1 、 y_2 、 $\dots$ 、 y_n 代表 X 轴和 Y 轴要切割的网格坐标点值；step1、step2、 $\dots$ 、stepn 代表每个网格坐标点的切割步长。单击红色的“请输入”提示词，然后输入具体数值，设置好后，单击“完成设置”按钮。

请进行工艺仿真网格划分(X轴)

	$x_1=0$	$x_2=1.0$	$x_3=$ 请输入	$x_4=$ 请输入	$x_5=$ 请输入	$x_6=$ 请输入	$x_7=$ 请输入	$x_8=$ 请输入
$y_1=0$	step1=0.1		step3= 请输入	step4= 请输入	step5= 请输入	step6= 请输入	step7= 请输入	step8= 请输入
$y_2=0.1$								
$y_3=$ 请输入								
$y_4=$ 请输入								
$y_5=$ 请输入								
$y_6=$ 请输入								
$y_7=$ 请输入								
$y_8=$ 请输入								

完成设置

图 1.4 X 轴方向的网格设置

(2) 对工艺仿真网格的 Y 轴进行设置，如图 1.5 所示。

请进行工艺仿真网格划分(Y轴)

	$x_1=0$	$x_2=0.1$	$x_3=$ 请输入	$x_4=$ 请输入	$x_5=$ 请输入	$x_6=$ 请输入	$x_7=$ 请输入	$x_8=$ 请输入
$y_1=0$	step1=0.1		step3= 请输入	step4= 请输入	step5= 请输入	step6= 请输入	step7= 请输入	step8= 请输入
$y_2=5.0$								
$y_3=$ 请输入								
$y_4=$ 请输入								
$y_5=$ 请输入								
$y_6=$ 请输入								
$y_7=$ 请输入								
$y_8=$ 请输入								

完成设置

图 1.5 Y 轴方向的网格设置

注意事项：

- ① X 轴和 Y 轴各自均需至少填两个点的值。
- ② 点的值必须从小到大递增排列。
- ③ 步长 (step) 可不填，系统会根据临近 step 或网格坐标点值自适应补充。
- ④ 由于有限元仿真算法的需要，step 会自适应进行平滑处理，使得临近网格坐标点间距

的比值不大于 1.5。

(3) 对工艺仿真网格的稠密度进行设置，单击“5 度”稠密度，就可以完成设置，如图 1.6 所示。

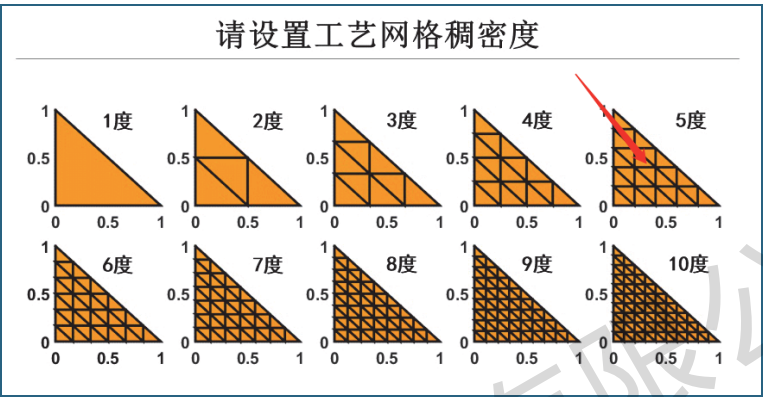


图 1.6 设置工艺网格稠密度

(4) 选择衬底材料，此处单击“硅”即可完成选择，如图 1.7 所示。

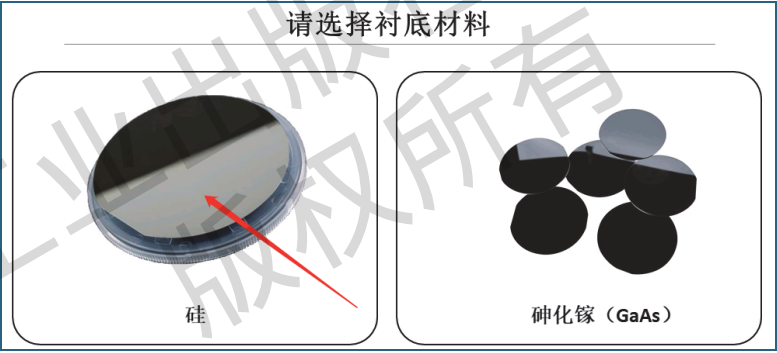


图 1.7 设置衬底材料

(5) 选择衬底初始掺杂杂质，此处选择的杂质类型为“硼”，如图 1.8 所示。

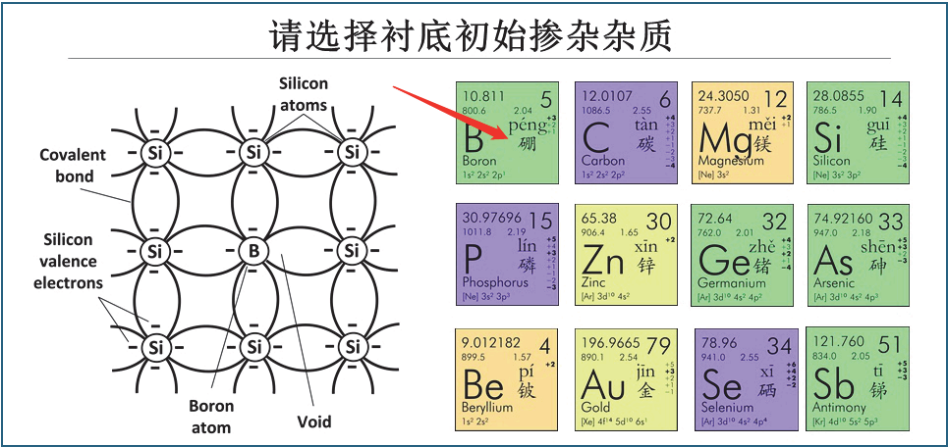


图 1.8 设置衬底初始掺杂杂质

(6) 设置衬底初始掺杂浓度，设置为 $1 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ，然后单击“完成设置”按钮，如图 1.9 所示。

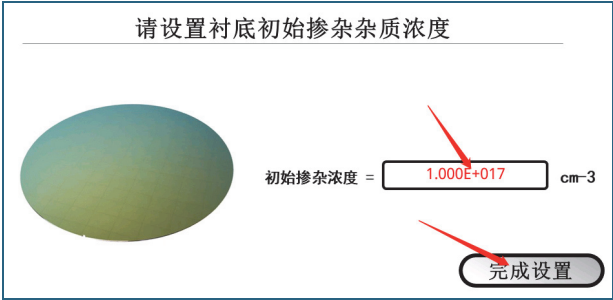


图 1.9 设置衬底初始掺杂浓度

(7) 设置衬底晶向，选择<100>晶向，如图 1.10 所示。

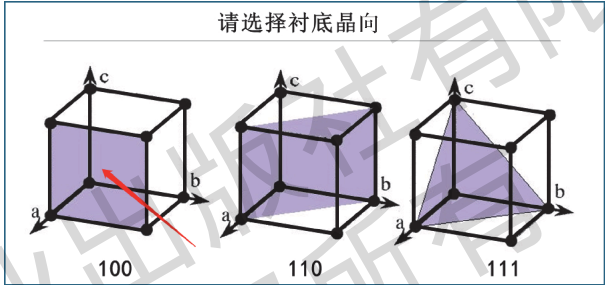


图 1.10 设置衬底晶向

2. 查看衬底准备结果

按照上面的提示完成衬底准备后，可以看到 HSLab 软件中出现了初始衬底图像，如图 1.11 所示，在右侧图像调节区会提示该衬底为硅，与上面的设置一致。

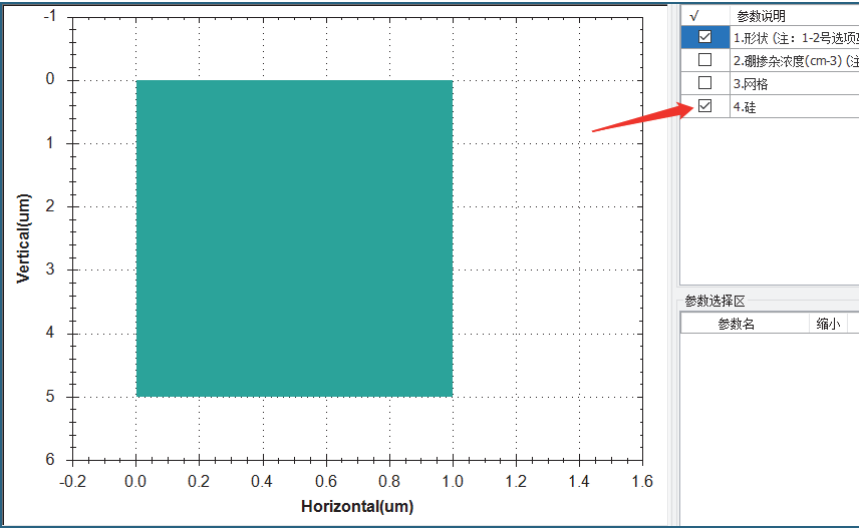


图 1.11 HSLab 软件中的初始衬底图像

(1) 单击右侧图像调节区，勾选“硼掺杂浓度”，如图 1.12 所示，可以看到，硅的初始衬底掺杂为硼，掺杂浓度为 $1 \times 10^{17} \text{cm}^{-3}$ ，与上面的设置一致。

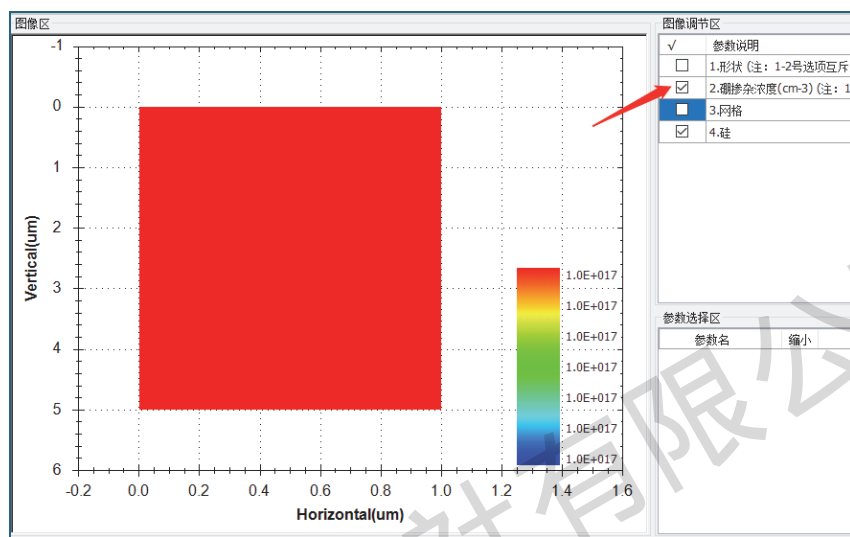


图 1.12 初始衬底的硼掺杂浓度分布图

(2) 对该衬底的网格设置和网格稠密度设置进行检查，单击右侧图像调节区，勾选“网格”选项，得到如图 1.13 所示的网格划分结果。

提示：由于有些位置网格较密，当看不清楚时，可滑动鼠标滚轮放大，或者单击鼠标左键对一定的区域进行放大。

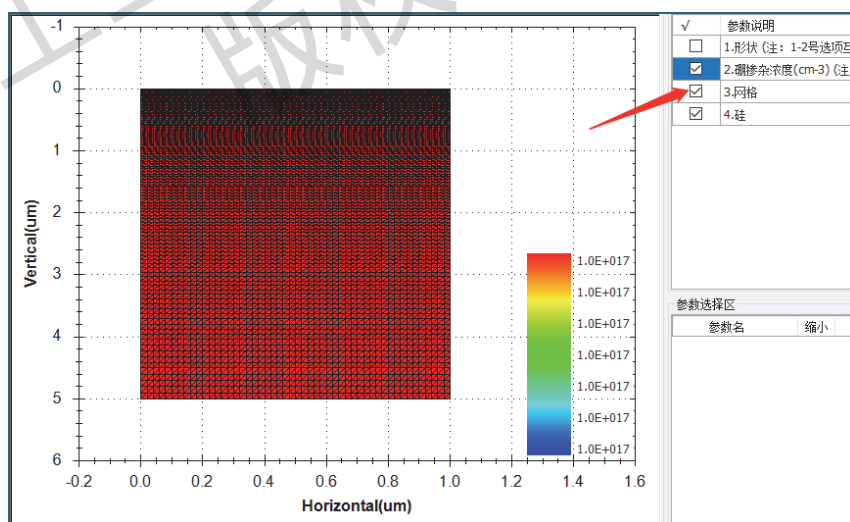


图 1.13 初始衬底的网格划分

① 网格划分的设置直接影响衬底的网格划分情况，并间接影响其他区域的网格划分（其他区域会自适应地进行变化），所有网格均为三角形。

② 网格划分的原则如下：网格划分得越细，仿真精度越高，但仿真速度会变慢；相反，网格划分得粗，仿真精度会降低，但仿真速度会加快。所以，应该在需要提高仿真精度的地

方增加网格数量，而在其他区域减少网格数量，从而在保证精度的同时，提高仿真速度。

③ 不同度数的网格稠密度会影响最终的显示效果，这类似于屏幕的分辨率。网格稠密度越高，分辨率越高，显示效果越好，但同样会增加计算量，导致显示速度降低。

提示：为了平衡显示效果和显示速度，在没有特殊显示要求的情况下，通常选择 5 度即可。

④ 在图 1.4 中沿 X 轴（也就是图 1.13 中的 Horizontal 方向）所进行的网格划分为： $x1=0$ ， $step1=0.1$ ， $x2=1.0$ ， $step2=0.1$ ，同时，网格稠密度为 5 度。那么，对应的网格划分含义是：最左侧 x 值为 $0\mu\text{m}$ ，最右侧 x 值为 $1\mu\text{m}$ ，网格会以 $0.1\mu\text{m}/5$ （稠密度）= $0.02\mu\text{m}$ 的网格步长进行显示，放大后的效果如图 1.14 所示，需仔细观察网格是否满足该条件。

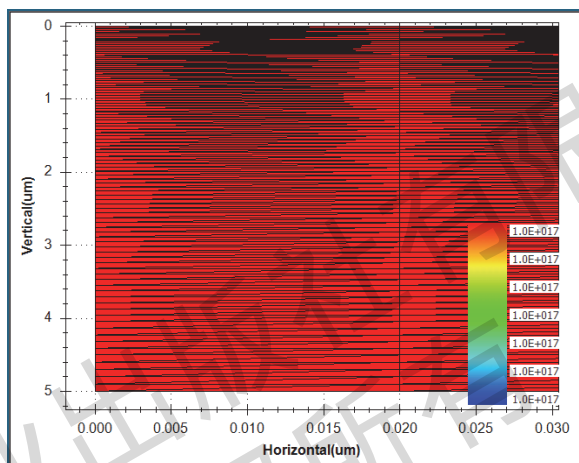


图 1.14 沿 X 轴方向放大网格

⑤ 在图 1.5 中沿 Y 轴（也就是图 1.13 中的 Vertical 方向）所进行的网格划分为： $y1=0$ ， $step1=0.1$ ， $y2=5.0$ ， $step2=0.5$ ，同时，网格稠密度为 5 度。那么，对应的网格划分含义是：最上侧 y 值为 $0\mu\text{m}$ ，最下侧 y 值为 $5\mu\text{m}$ ，在 $y=0\mu\text{m}$ 的点，网格会以 $0.1\mu\text{m}/5$ （稠密度）= $0.02\mu\text{m}$ 的网格步长进行显示，并且步长逐渐放大，在 $y=5\mu\text{m}$ 的点，网格的显示步长为 $0.5\mu\text{m}/5=0.1\mu\text{m}$ ，放大后的效果如图 1.15 所示，需仔细观察网格是否满足该条件。

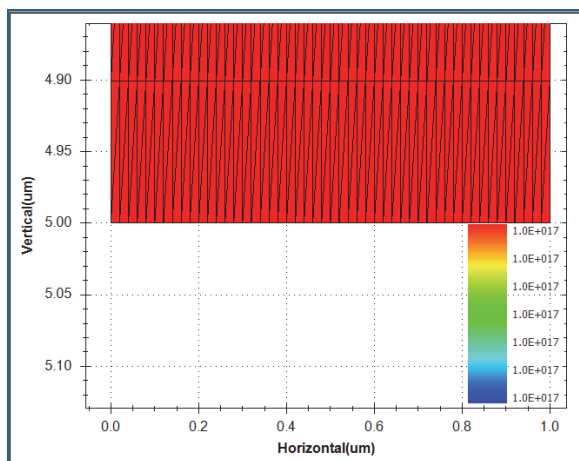


图 1.15 沿 Y 轴方向放大网格

3. 网格设置练习

完成上面的设置后，下面做一个网格设置的练习。首先，单击多功能实验基础平台的“退出”按钮，如图 1.16 所示，并单击“重新开始实验”按钮。

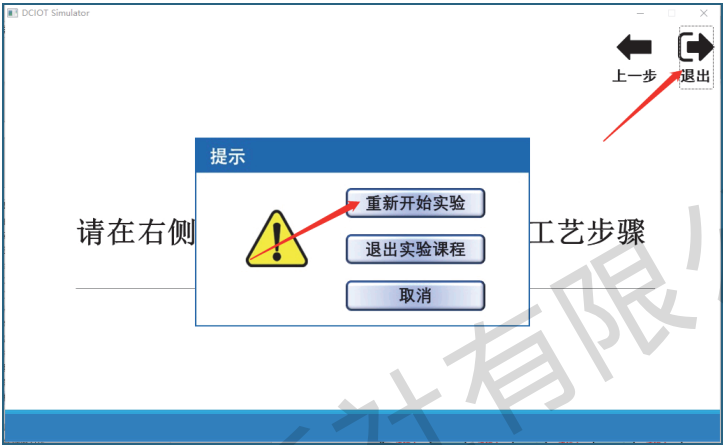


图 1.16 退出多功能实验基础平台并重新开始实验

之后，多功能实验基础平台会恢复到初始状态，然后按如图 1.17 和图 1.18 所示的网格进行划分，并将工艺网格稠密度设置为 1 度，然后重复上述实验过程，将结果填入实验报告中，分析网格划分结果如何反应网格设置的参数大小。

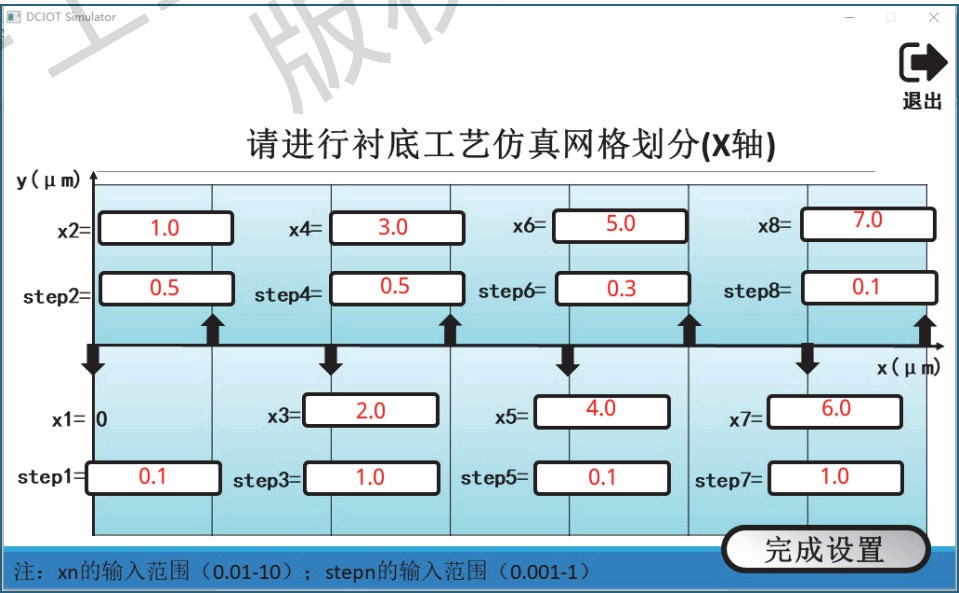


图 1.17 重新进行 X 轴方向的网格划分

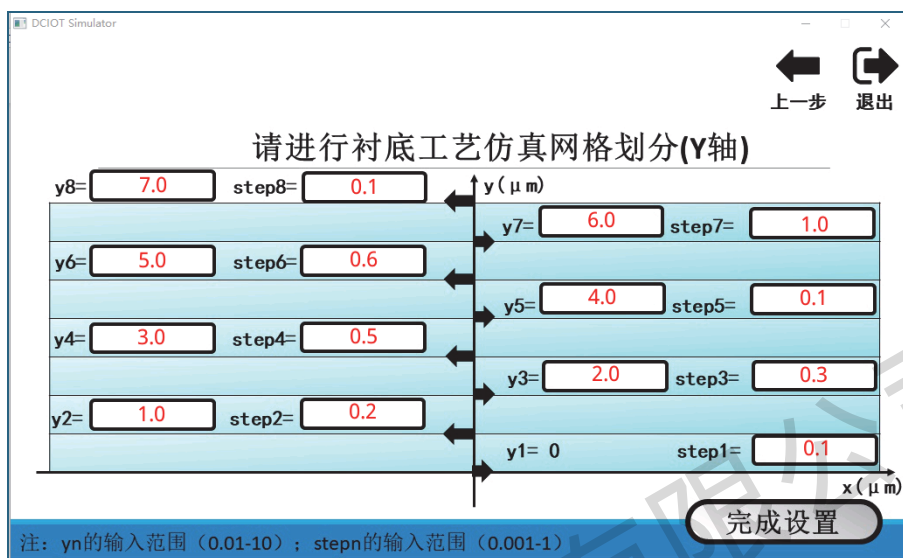


图 1.18 重新进行 Y 轴方向的网格划分

1.5.3 完成单步工艺

在 1.5.2 节，已经学习了晶圆衬底准备的相关知识和操作方法，本节以氧化为例完成一个单步工艺流程。

1. 按照提示完成氧化单步工艺

(1) 重复 1.5.2 节的实验过程，形成一个初始衬底。然后在点亮的红色按钮中单击“Oxide”（氧化）按钮，多功能实验基础平台会显示如图 1.19 所示的设置，选择“湿法氧化”。

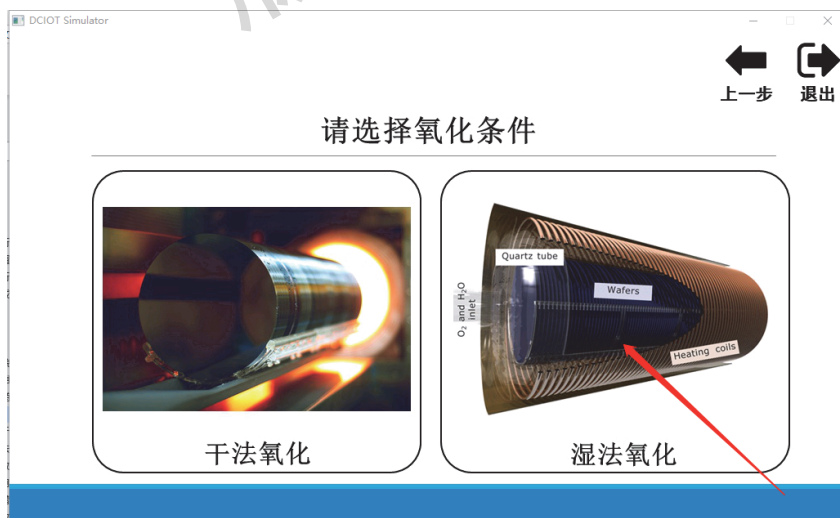


图 1.19 选择氧化条件

(2) 设置湿法氧化的相关参数：氧化时间为 30 分钟，氧化温度为 900℃，设置好后，单击“完成设置”按钮，如图 1.20 所示。



图 1.20 设置湿法氧化参数

(3) 按照多功能实验平台上的提示，将多功能实验基础平台的 SSP-1220 板卡与实验用半导体参数分析仪的 SMU-2110 的#2 板卡进行连接，如图 1.21 所示。

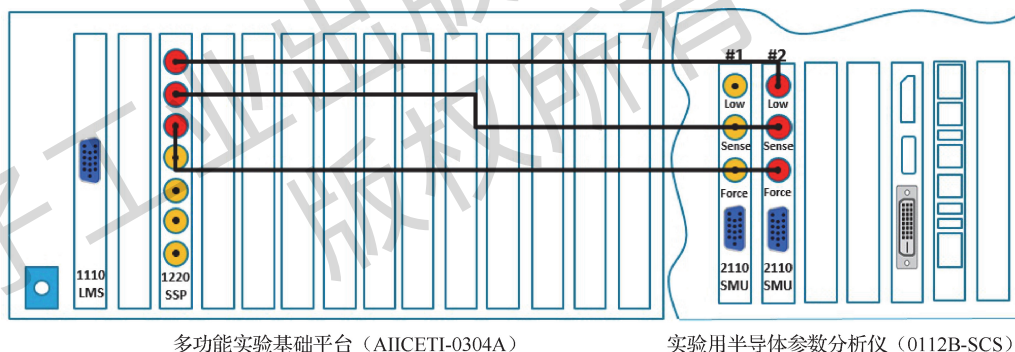


图 1.21 实验设备背面连接图

(4) 连接好后，单击 HSLab 软件中的“工艺仿真”按钮，如图 1.22 所示。

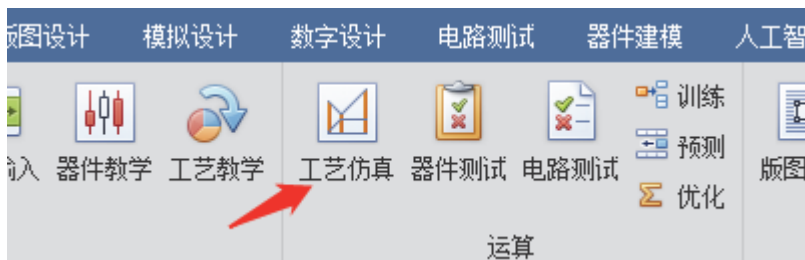


图 1.22 工艺仿真操作示意图

如果一切操作正确，将生成如图 1.23 所示的结果。可以看到，在硅衬底的上层，氧化生成了一层氧化层。

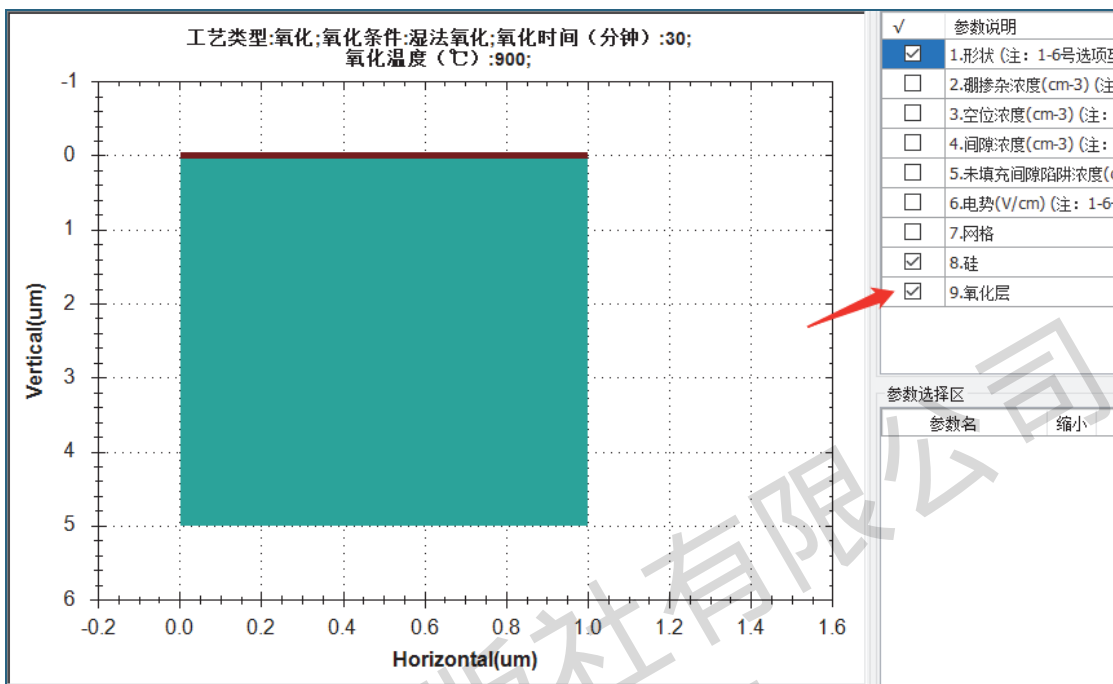


图 1.23 湿法氧化仿真结果

(5) 勾选“硼掺杂浓度”，可以看到对应的硼掺杂浓度二维分布图，如图 1.24 所示。

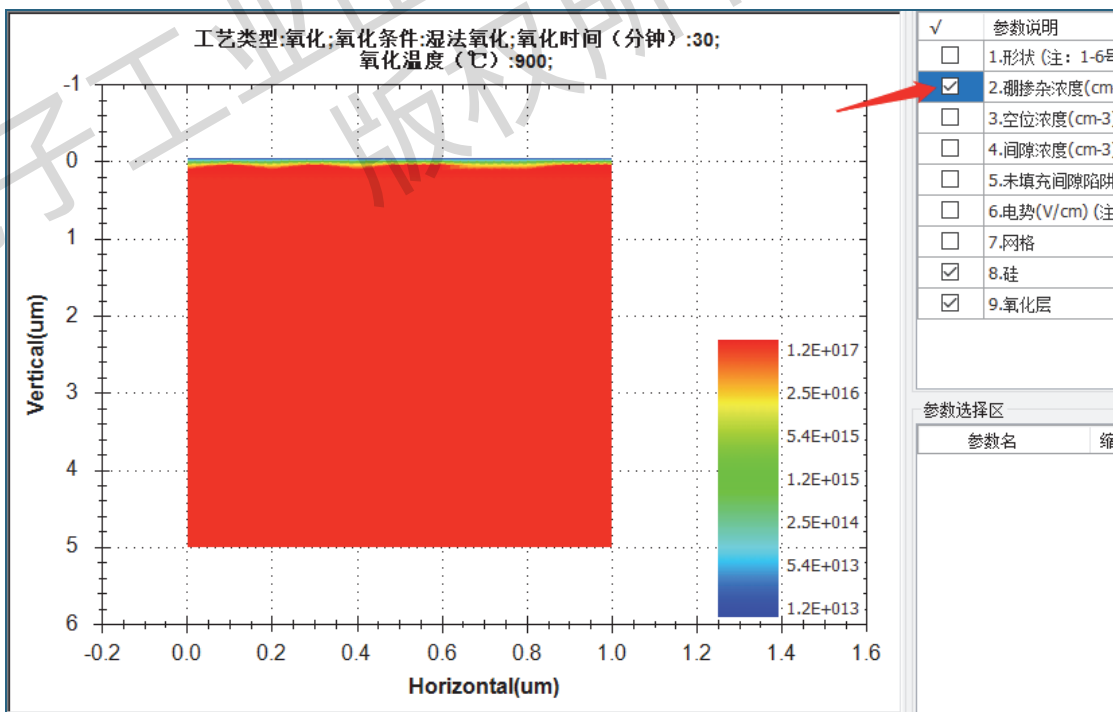


图 1.24 湿法氧化仿真后硼掺杂浓度分布图

2. 使用数据提取功能查看二维分布并获取氧化层厚度

在完成上面的实验后会发现，从图中读取具体数据比较困难，比如氧化层的厚度，需要放大图像进行估算，结果也不是很准确。为了解决这个问题，可以使用菜单栏中的“数据提取”按钮，如图 1.25 所示。



图 1.25 数据提取功能示意图

在图 1.23 中，勾选某个需要提取的数据，比如“空位浓度”，如图 1.26 所示（提示：形状不能提取，其他二维参数均可提取）。选择后，单击“数据提取”按钮。

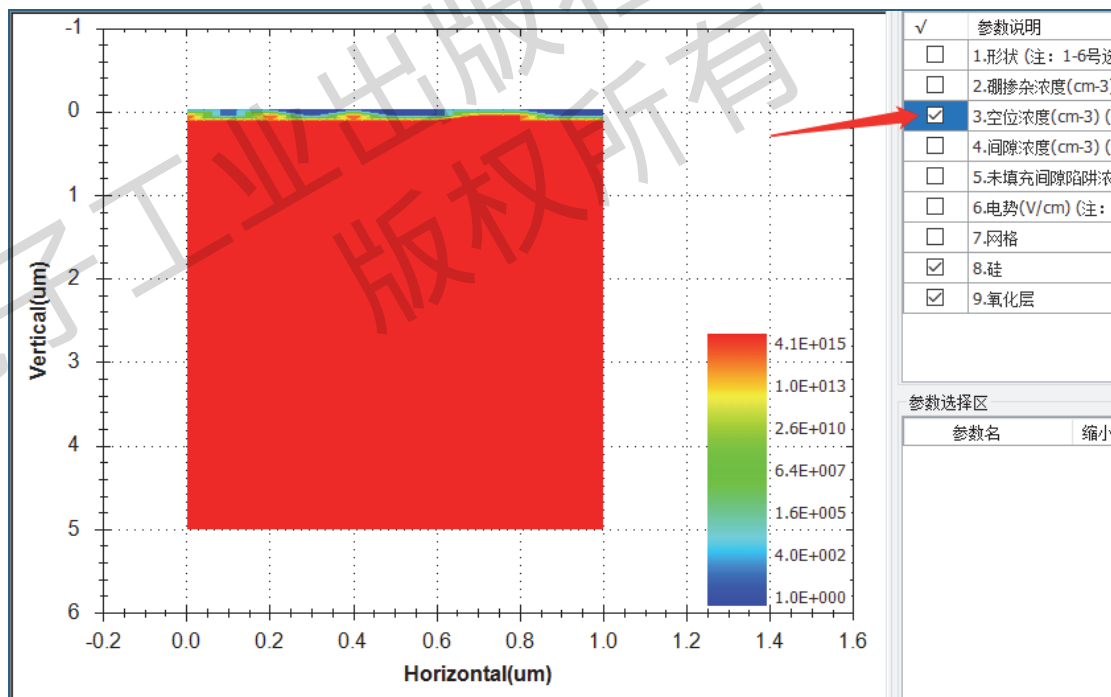


图 1.26 提取空位浓度数据操作示意图

此时弹出如图 1.27 所示的界面。首先选择二维分布图是沿着 X 轴方向提取还是沿着 Y 轴方向提取，然后选择提取的坐标值，最后选择结果的呈现方式。

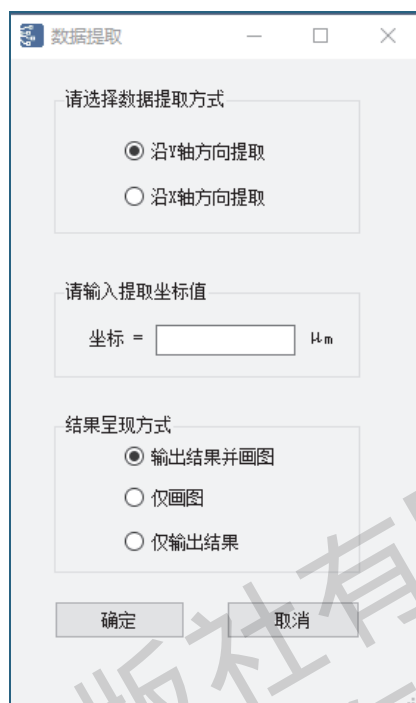


图 1.27 数据提取界面

下面给出两个示例供参考。

示例 1：图 1.28 和图 1.29 为沿着 Y 轴方向提取坐标值为 $0.8\mu\text{m}$ 的示意图和提取结果。

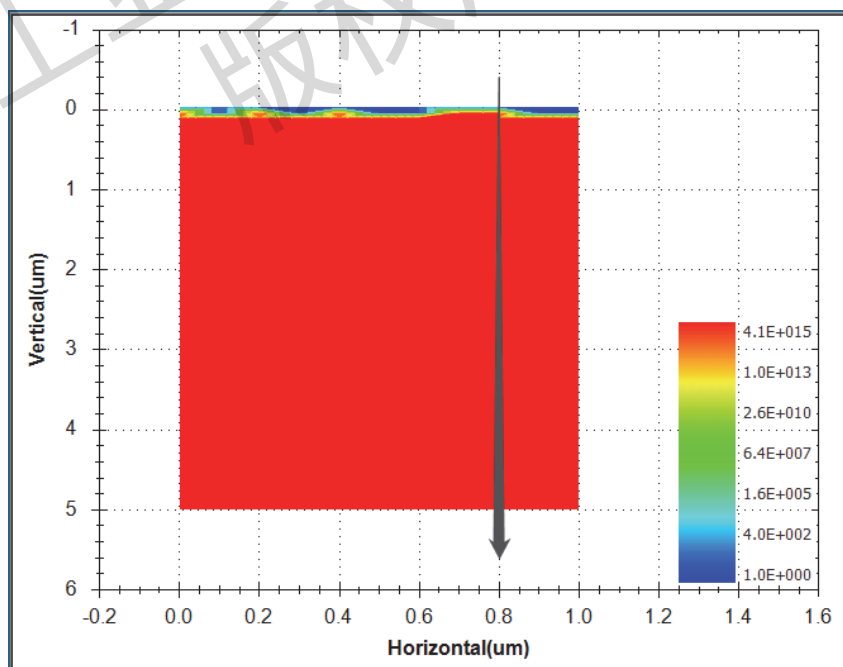


图 1.28 沿 Y 轴方向数据提取示意图

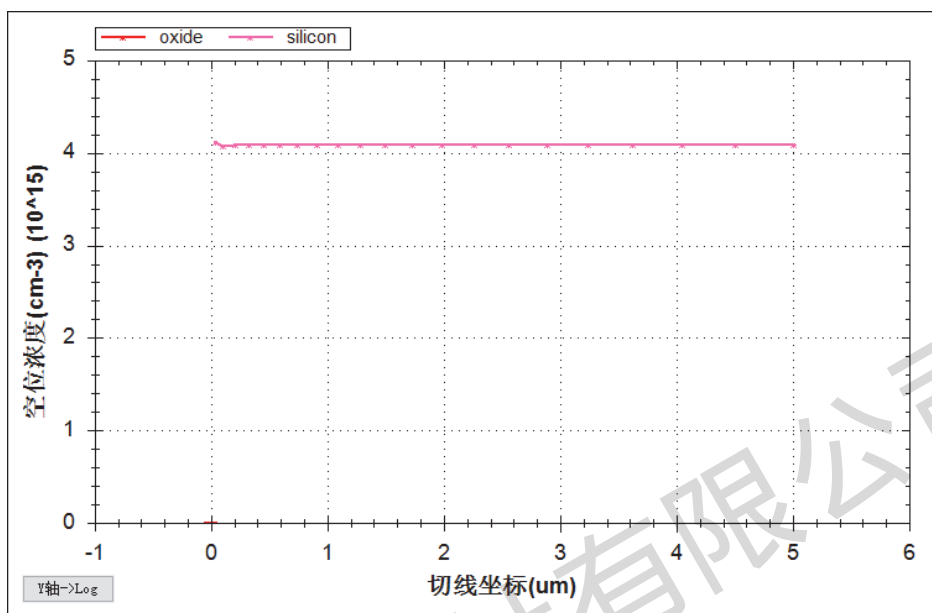


图 1.29 沿 Y 轴方向的数据提取结果

示例 2：图 1.30 和图 1.31 为沿着 X 轴方向提取坐标值为 1 μm 的示意图和提取结果。

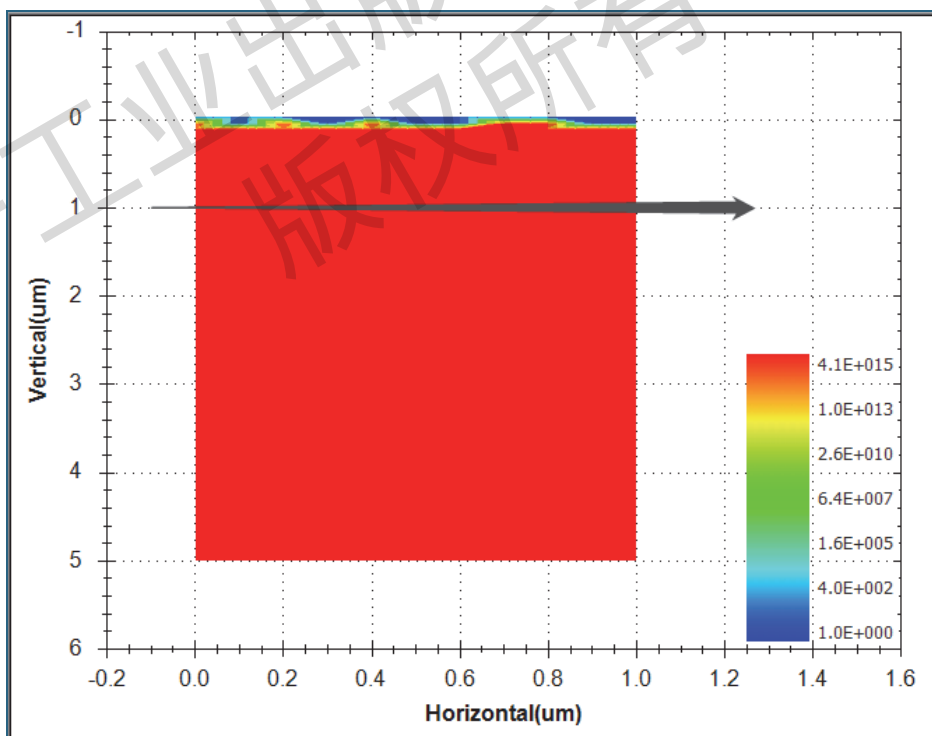


图 1.30 沿 X 轴方向数据提取示意图

提取后的图像可以在 Y 轴的 Log 坐标或 Lin（线性）坐标下进行切换，如图 1.32 所示。

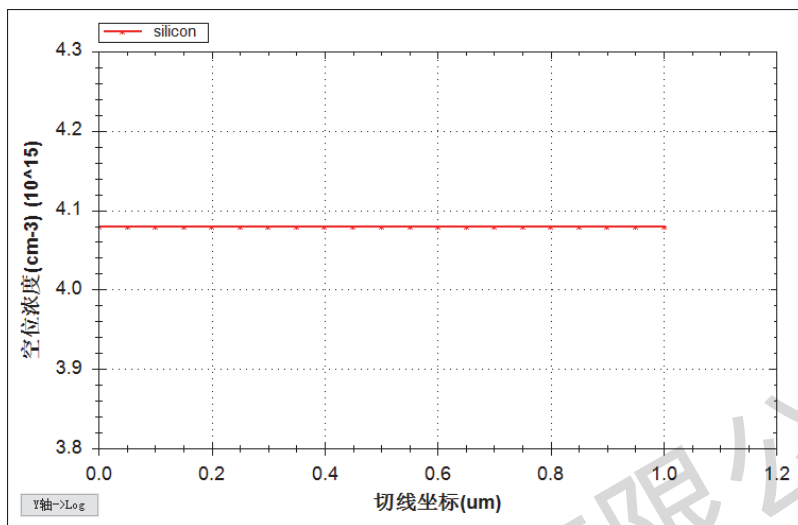


图 1.31 沿 X 轴方向的数据提取结果

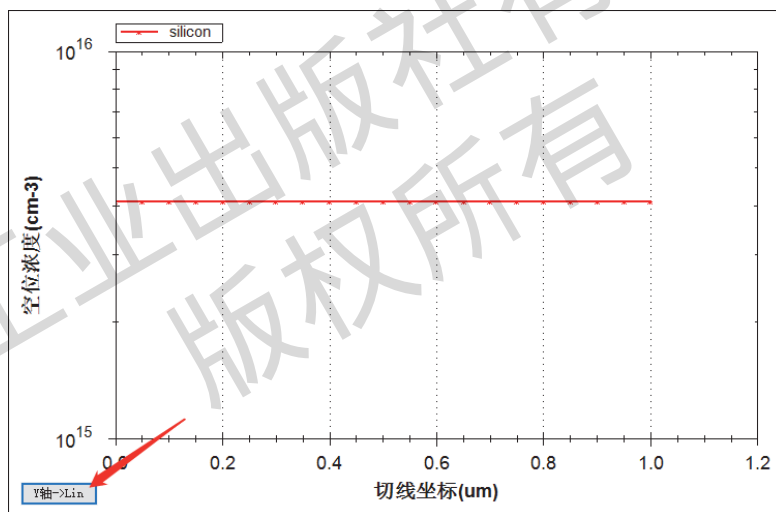


图 1.32 沿 Y 轴方向数据提取切线坐标系结果图

提取后的数据保存在数据区，如图 1.33 所示。可以将数据导出或者用于后期的特性对比，数据导出功能和对对比分析功能将在下面介绍。

切线坐标(um)_oxide_1	-0.0433417,0.0352848
空位浓度(cm-3)_oxide_1	1,1
切线坐标(um)_silicon_1	0.0352848,0.0995031,0.207802
空位浓度(cm-3)_silicon_1	4.10398e+15,4.07379e+15,4.07379e+15
切线坐标(um)_silicon_2	0,0.0505574,0.1,0.150557,0.2,0.25
空位浓度(cm-3)_silicon_2	4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15

图 1.33 提取后的数据显示图

如图 1.33 所示，可以发现在沿着 Y 轴方向提取后的数据中后缀有“oxide”的字样，这个数据为氧化层的切线数据。可以根据这个数据的切线坐标来计算氧化层的厚度，即切线坐标

3. 保存数据及导入使用

有两种需要保存的数据：实验中提取的数据和工艺仿真的配置输出。

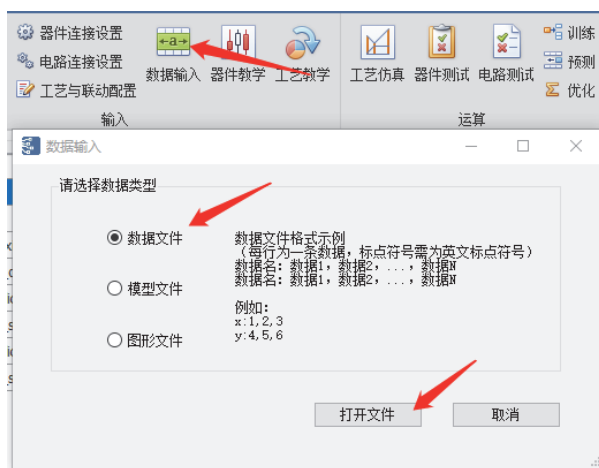
保存后的数据文件如图 1.35 所示。

```

1 切线坐标(um) oxide_1:-0.0433417,0.0352848
2 空位浓度(cm-3) oxide_1:1,1
3 切线坐标(um) silicon_1:0.0352848,0.0995031,0.207802,0.325675,0.453967,0.
4 25,2.86499,3.23952,3.62539,4.04538,4.50248,5
5 空位浓度(cm-3) silicon_1:4.10398e+15,4.07379e+15,4.07907e+15,4.07911e+15
6 .07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15
7 切线坐标(um) silicon_2:0.0505574,0.1,0.150557,0.2,0.250557,0.3,0.35055
8 50557,1
9 空位浓度(cm-3) silicon_2:4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15
10 .07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.07911e+15,4.

```

如果要导入已经保存的数据，只需要单击菜单栏中的“数据输入”按钮，如图 1.36 所示，就可以导入已经保存的数据。读者可自行操作导入上述保存好的数据。



• 20 •

提示：也可以将自行准备的数据，或者自行测试的数据按照数据文件的格式进行编写并导入。数据文件中每行为一条数据，标点符号应为英文标点符号。

格式示例：

x:1,2,3
y:4,5,6

另外，也可以将数据修改后导入。

(2) 保存当前工艺仿真状态和配置，下一次可以继续根据工艺仿真的状态和配置完成其他的工艺步骤，从而实现整个工艺步骤的器件制造仿真。如果要保存当前工艺仿真的状态和配置，仅需单击菜单栏中的“配置输出”按钮，如图 1.37 所示，即可保存当前工艺仿真的状态和配置。读者可自行操作保存当前的实验状态。



图 1.37 保存当前工艺仿真的状态和配置

如果要导入已经保存的状态和配置，只需要单击菜单栏中的“工艺与联动配置”按钮，如图 1.38 所示，就可以导入已经保存的各项参数。读者可自行操作导入上述保存的状态和配置。

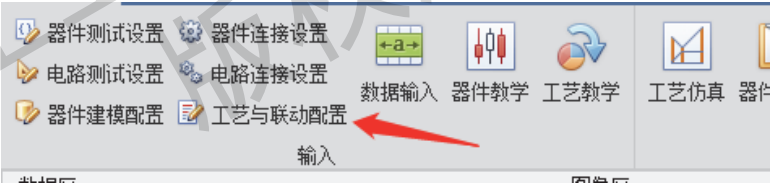


图 1.38 导入保存的工艺仿真状态和配置

提示：工艺仿真状态和配置保存主要用于一次实验课没有完成的实验，需要下次实验课调入该实验内容的应用场景。

4. 数据回溯功能

在实验过程中，如果对仿真得到的工艺结果不满意（比如上述实验中，对得到的氧化层厚度不满意），或者仿真设置错误（比如上述实验中，使用的氧化时间或者氧化温度有误），在不改变衬底设置的情况下，无须重新开始实验，仅需单击菜单栏中的“数据回溯”按钮，如图 1.39 所示，就能恢复到上一步的情况。读者可自行操作尝试该功能。

提示：该功能在后续需要成套工艺的多步实验中非常有用，可避免完成若干步骤后，由于设置错误或者仿真结果不满意，需要退回重新开始实验的麻烦。

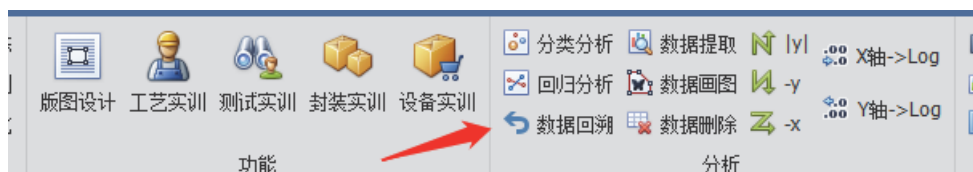


图 1.39 数据回溯功能操作示意图

5. 分析不同衬底晶向对氧化层厚度的影响及使用数据对比分析功能

在上述实验过程中，已经计算了<100>晶向所生成的氧化层厚度约为 78.6nm。

(1) 重复 1.5.1 节的实验，在重复过程中，分别使用<100>、<110>和<111>的衬底晶向完成实验（提示：由于该实验需要改变衬底，故无法使用数据回溯功能，需要重新开始实验进行不同衬底晶向的实验过程）。完成每个实验后，提取和保存沿着 Y 轴方向坐标=0.5 μm 的一维数据，供后续分析使用。

如果操作正确，将得到如图 1.40 所示的结果。

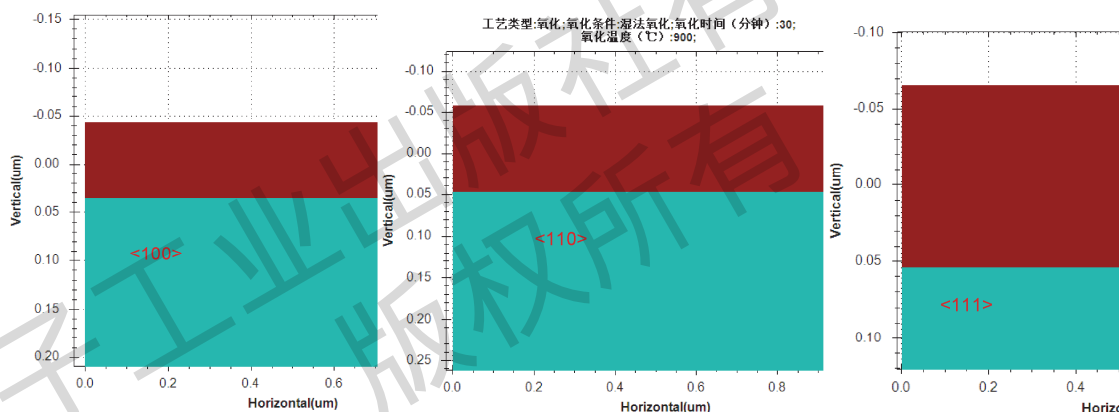


图 1.40 晶向对氧化的影响仿真结果

将上述 3 种提取的数据导入数据区，如图 1.41 所示。

提示：为了显示清晰，将数据名进行了修改，读者也可以自行在已经导出的数据文件中更改数据名。

111_切线坐标(um)_oxide_1	-0.0659325,0.034806,0.0541104
111_空位浓度(cm-3)_oxide_1	1,1,1
110_切线坐标(um)_oxide_1	-0.0574749,0.0470624
110_空位浓度(cm-3)_oxide_1	1,1
100_切线坐标(um)_oxide_1	-0.0433417,0.0352848
100_空位浓度(cm-3)_oxide_1	1,1

图 1.41 晶向对氧化的影响仿真数据提取结果

(2) 使用数据画图功能来进行对比分析。单击菜单栏中的“数据画图”按钮，将需要对比的曲线的 X 轴和 Y 轴依次添加到待画图数据区中，如图 1.42 所示。

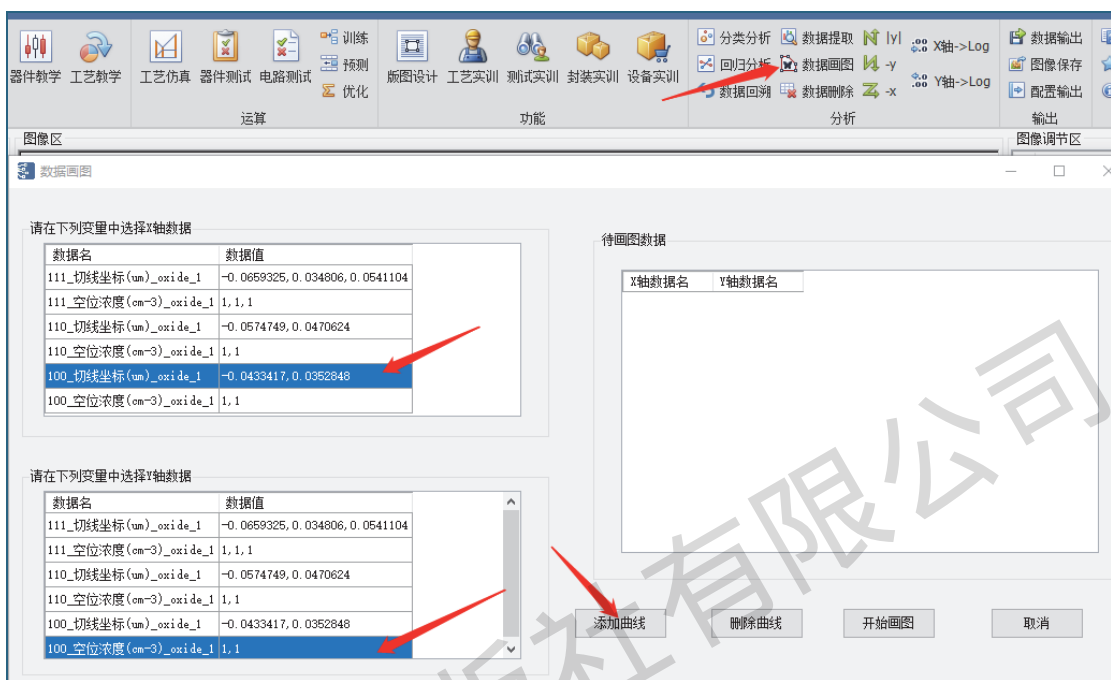


图 1.42 数据画图功能 X 轴和 Y 轴设置操作示意图

(3) 全部添加好后，单击“开始画图”按钮，如图 1.43 所示。

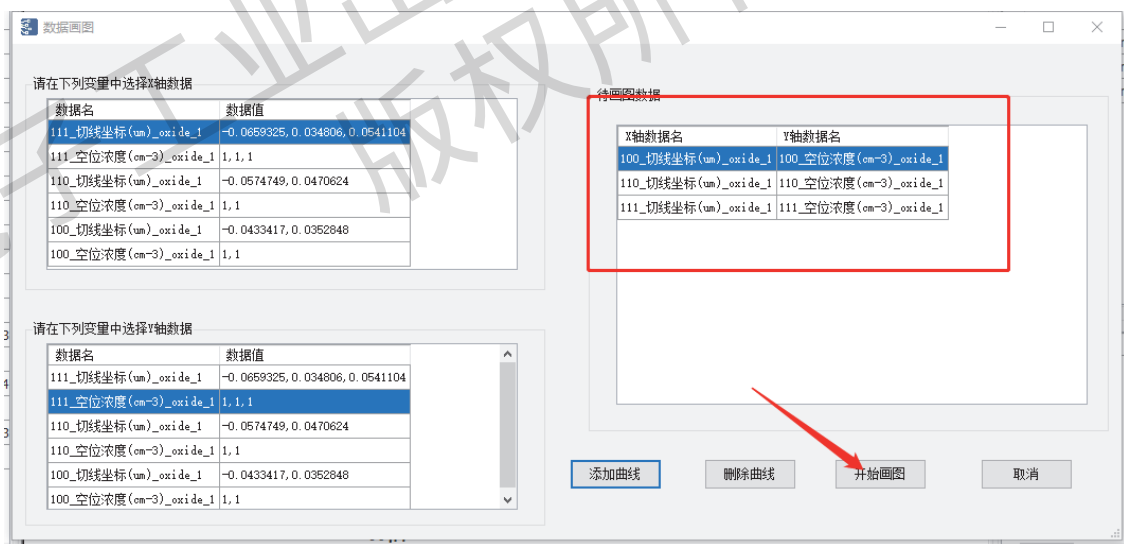


图 1.43 数据画图功能操作示意图

这时，绘图区就会呈现如图 1.44 所示的对比结果。可以看到，在其他条件完全相同的情况下，<100>晶向生成的氧化层厚度最薄，<110>晶向居中，<111>晶向最厚，这与理论分析的结果一致。

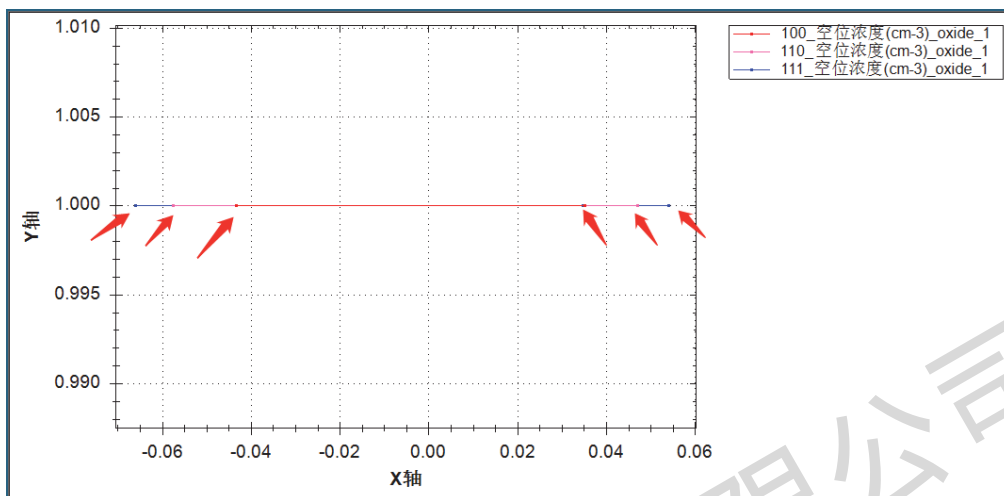


图 1.44 不同晶向下空位浓度氧化层厚度的对比

提示：“数据画图”按钮完成的对比分析功能在后续实验中非常有用，请读者掌握，建议选择的曲线数量最多不超过 10 条，否则曲线过多将难以提取有用数据。

1.6 思考题

- (1) 总结进行单步工艺实验操作的方法和步骤。
- (2) 总结网格的稠密度和准确度、计算时间之间的关系。
- (3) 总结计算氧化层厚度的操作方法。

1.7 拓展实验

在不同网格设置和稠密度设置条件下，计算氧化层的厚度，比较网格设置对结果的影响。