

# 集成电路工艺虚拟仿真实验教学设计与实践

## ——以“GaAs 器件制造测试”为例

孙辉 高秀英 刘利芹

成都信息工程大学光电工程学院

DOI:10.12238/mef.v8i5.11508

**[摘要]** 集成电路产业链中的晶圆制造环节最容易出现工业界与高校教育脱节,也是当前集成电路人才缺口的重灾区。本文以“GaAs器件制造测试”为例,系统探讨了集成电路工艺虚拟仿真实验教学内容、目标要求、效果评估等环节的设计与实践,让学生在虚拟环境中开展器件制造、设备操作、参数调整、器件测试、结果分析等实验操作,体验晶圆制造和测试的工业级仿真场景,将理论知识和实验操作有机结合起来,实现集成电路制造实际操作与课堂理论知识融合,兼顾了学生的动手能力和思维能力的培养,加深对理论知识的理解,并为后期的工业实践打下基础。

**[关键词]** 集成电路工艺; 虚拟仿真; 教学设计; GaAs器件

**中图分类号:** G648.2 **文献标识码:** A

### Design and Practice of Virtual Simulation Experiment Teaching for Integrated Circuit Process

#### ——Taking "GaAs Device Fabrication and Measurement" as an Example

Hui Sun Xiuying Gao Liqin Liu

College of Optoelectronic Engineering, Chengdu University of Information Technology

**[Abstract]** Integrated Circuit Process is the most prone to disconnect between industry and higher education in the wafer manufacturing process. This article takes "GaAs device fabrication and measurement" as an example to explore the design and practice of virtual simulation experiment teaching content, target requirements, effect evaluation and other aspects of integrated circuit technology. It allows students to carry out experimental operations such as device manufacturing, equipment operation, parameter adjustment, device testing, and result analysis in a virtual environment, experience industrial level simulation scenarios of wafer manufacturing and testing, organically combine theoretical knowledge and experimental operations, achieve the integration of practical operation of integrated circuit manufacturing with classroom theoretical knowledge, strengthen the cultivation of students' hands-on ability and thinking ability, and lay a foundation for later industrial practice.

**[Key words]** Integrated circuit technology; Virtual simulation; Instructional design; GaAs devices

### 引言

集成电路是现代通信、智能装备、互联网、物联网、人工智能等信息产业的基石。集成电路产业链分为芯片设计、晶圆制造、封装测试三大环节。其中,晶圆制造是将芯片设计转变为芯片实体的核心关键环节,所需的设备精度高、系统复杂、价格昂贵,对制造环境和技术人员知识和技能的要求极高,成为当前集成电路人才缺口的“重灾区”。2020年12月30日国务院学位委员会、教育部正式下达文件(学位2020[30]号),将集成电路设立为一级学科,充分体现了国家层面对于集成电路人才培养的重视。而高校开设集成电路工艺相关课程教学主要聚焦理论讲授,

缺少实践机会,与产业界集成电路人才的需求脱节。其主要原因有:集成电路领域技术发展迅速,先进技术层出不穷;集成电路制造测试设备昂贵,基础设施环境要求高,能够满足实物实训的设备数量有限,很难组织学生进行真正意义的实践操作。因此,集成电路工艺实验教学课程采用虚拟仿真技术,以“理论—虚拟—实验”一体化的教学方式,构建虚拟现实软件及虚拟仿真网站,向学生提供虚拟现实的实验条件并开展实验,可以弥补实际实验实训中的不足之处,提高实训效果。

“GaAs器件制造测试”虚拟仿真实验项目针对GaAs金属肖特基场效应晶体管器件,开展器件制造与器件电学测试两部分

实验教学。通过虚拟仿真实验，让学生直观体验到先进晶圆制造和测试的工业级仿真场景，加深对课本理论知识的理解，为后期的工业实践打下基础。

### 1 教学目标与要求

实验教学中采用集成电路工艺虚拟仿真方式，完成GaAs器件的制备、测试的全流程虚拟仿真实验。使学生能够熟悉GaAs工艺制造设备特性及其基本操作，掌握关键工艺原理及参数设计，熟悉器件测试流程和建模方法。强化学生掌握半导体工艺、设备、器件物理等相关课程基础知识，紧跟集成电路产业的发展，激发学生的学习兴趣 and 潜能，为学生将来投身集成电路产业领域打下基础。

GaAs器件制造环节：以GaAs器件制造虚拟仿真实验为基础，掌握器件的基本组成结构和工作原理，熟悉器件制造中所用半导体设备的操作；通过完成GaAs器件制造虚拟仿真实验，理解器件的制造工艺流程，熟悉器件制造中涉及的关键工艺参数。

GaAs器件测试环节：以GaAs器件测试虚拟仿真实验为基础，掌握器件的测试原理和基本电学特性，熟悉GaAs器件测试中所用探针台的操作；通过完成GaAs器件测试虚拟仿真实验，理解GaAs器件的测试流程。

### 2 实验教学内容设计

#### 2.1 虚拟仿真实验平台介绍

实验项目依托集成电路制造工艺实验教学虚拟仿真平台，再现14nm晶圆制造生产线，真实还原集成电路生产设备的流程、基本操作和动态效果，如图1所示。平台核心基于真实工业级仿真器，进行真实器件特性和工艺特性的数值模拟，实验过程中可以任意调整和设置参数，每个设定的工艺参数都依据相应的物理模型进行数值计算，获得精确的计算结果，避免传统仿真仅仅是示意性的问题。该平台包含17种虚拟设备，包括：深紫外（DUV）光刻机、离子注入机、氧化炉、金属刻蚀机、槽式清洗机、物理气相沉积（PVD）、激光退火设备、金属有机化学气相沉积系统（MOCVD）、硅外延设备、原子层沉积（ALD）、退火炉、扩散炉、低压化学气相沉积设备（LPCVD）、硅刻蚀机、介质刻蚀机、光刻胶刻蚀机、化合物刻蚀机、自动化天车系统。系统提供了设备原理介绍、设备结构、设备内部运转过程、设备面板操作、设备动态效果动画等必要环节流程。



图1 14nm集成电路制造工艺实验教学虚拟仿真平台场景

#### 2.2 核心知识点设计

虚拟仿真实验项目包括GaAs金属肖特基场效应晶体管器件的工作原理、制备工艺流程、核心制造设备运行原理、测试流程和探针台操作等工业级仿真场景，共有16个核心知识点。具体包含：GaAs器件工作原理，GaAs器件制造工艺流程，GaAs器件清洗工艺原理与操作，MOCVD工艺原理与操作，离子注入工艺原理与操作，激光退火工艺原理与操作，LPCVD工艺原理与操作，DUV光刻机工艺原理与操作，介质刻蚀工艺原理与操作，光刻胶刻蚀工艺原理与操作，PVD工艺原理与操作，金属刻蚀工艺原理与操作，器件测试原理，工业级12英寸探针台操作流程，GaAs器件电学特性与分析。整个知识点内容设计包括理论教学和实验教学，学生在学习理论知识的基础上，从实践层面掌握器件工艺设备和测试设备的基本操作。

#### 2.3 实验内容设计

实验内容与实施过程共分为4个环节，其中第2环节是虚拟仿真实验操作，共10个步骤，实验教学总学时数为2学时。

第1环节：项目讲解与自主学习。授课老师开展GaAs器件工艺制备相关理论教学，学生提前通过虚拟仿真网站进行理论知识预习。

第2环节：实验操作。学生通过仿真平台了解实验目的、理解实验原理、设备操作方式、设置工艺参数，进入真实实验状态。基于虚拟仿真实验平台提供的实验环境、实验任务、真实实验设备等，以第一视角对集成电路晶圆制备相关流程进行体验和分

析，完成实验预设项目。

第3环节：实验考核。学生在操作虚拟实验项目时，实验平台对学生的理论知识进行线上考核，学生在平台进行答题、提交后，系统自动进行评价，给出正确答案和分数。教师在系统内查看学生的考核成绩。

第4环节：实验报告。针对实验操作中的问题，结合GaAs器件制备的流程和技术要点，总结实验项目的重要知识点，编写实验报告。教师通过虚拟仿真网站查看学生虚拟实验实训表现及各步骤的操作情况，并对学生输出的实验报告进行批改。

#### 2.4 实验步骤设计

在虚拟仿真实验操作环节，共有10个关键步骤。每个步骤均有完成时间限制，授课教师根据学生实际操作情况打分，如表1所示。

表1 GaAs器件制造测试关键交互步骤设计

序号	步骤目标要求	步骤合理用时	目标达成度赋分模型	步骤满分	成绩类型
1	理论考核	10分钟	正确数量×每题分数	10	实操
2	MOCVD设备操作	10分钟	合理用时内完成MOCVD设备操作	15	
3	输入MOCVD工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	10	实验报告
4	输入离子注入工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	10	
5	输入低压化学气相沉积工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	5	预习
6	输入激光退火工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	5	
7	输入物理气相沉积工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	10	习成绩
8	输入介质刻蚀工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	5	
9	输入DUV光刻机工艺参数	5分钟	合理用时内正确输入工艺参数	10	评价报告
10	探针台操作	15分钟	合理用时内完成探针台操作，输出正确测量曲线	20	

## 2.5 实验结果与讨论设计

在实验过程中,分析研究在不同实验条件和操作下可能产生的实验结果与结论,并在实验报告中有条理阐述。主要包括以下6个核心要点。①离子注入剂量。器件制造过程中,涉及离子注入工艺步骤,改变离子注入剂量,观察器件制造结果的掺杂浓度数值变化。②离子注入能量。器件制造过程中,涉及离子注入工艺步骤,改变离子注入能量,观察器件制造结果的掺杂峰值浓度位置变化。③化学气相沉积厚度。器件制造过程中,涉及化学气相沉积的工艺步骤,改变沉积材料厚度,观察器件制造结果的介质材料厚度变化。④物理气相沉积厚度。器件制造过程中,涉及物理气相沉积的工艺步骤,改变沉积金属材料厚度,观察器件制造结果的金属材料厚度变化。⑤操作工业级晶圆探针台。手动调整显微镜放大倍数,移动晶圆找到被测器件位置并扎探针。⑥器件电学参数测试分析。设置不同的测试信号,测试器件的电容—电压曲线,转移特性曲线,输出特性曲线,根据输出曲线分析器件的电学特性。

## 3 教学效果评估

虚拟仿真实验教学内容的实施,扩展和充实了实验教学内容。通过虚拟仿真实验教学内容的实施,使学生掌握了GaAs器件工艺制备的关键技术能力,从而将理论知识和实验操作有机结合起来,达到集成电路实际操作与课堂知识的融合,同时也兼顾了学生的动手能力和思维能力的培养。实验教学成绩的综合评定,提高学生的学习积极性。利用虚拟仿真实验教学平台进行实验教学的在线成绩测试,不仅能够体现实验的操作性,还能激发学生实践的积极性。这种成绩评定方式借助虚拟教学平台的成绩统计功能,可提高教师的工作效率,成绩客观准确,学生的学习积极性明显提高,教学效果得到改善。

## 4 结束语

针对当前高校集成电路工艺实验教学与产业脱节的现象,基于集成电路晶圆制造工业背景,在课程教学中提出使用虚拟仿真技术,以“理、虚、实”一体化的教学方式,以“GaAs器件制造测试”实验项目为例,构建虚拟现实软件及虚拟仿真网站,向学生提供虚拟现实的实验条件,让学生在虚拟环境中开展器

件制造、设备操作、参数调整、器件测试、结果分析等实验操作,弥补实际实验实训中无操作实物对象的不足之处,以真实先进工业场景和真实先进工业数据为基础,通过工业级仿真器使得这些数据 and 场景变为学生能够实操的核心技术门槛。

## [基金项目]

教育部2024年全国师生信息素养提升实践活动典型作品(GJZX202401DX084);教育部2024年产学研合作协同育人项目“电子科学与技术专业(微电子技术方向)”实践设施建设(231007567172942);四川省一流本科课程建设项目“GaAs器件制造测试一体化虚拟仿真实验”(2023YLKC45);成都信息工程大学应用型示范课程建设项目《集成电路工艺原理》课程建设(JYJG2023023)。

## [参考文献]

- [1] 骆军委,李树深.加强半导体基础能力建设点亮半导体自立自强发展的“灯塔”[J].中国科学院院刊,2023,38(2):187-192.
- [2] 王保平,罗乐.芯片制造设备的价值评估:环境、挑战与推进策略——以光刻机为例[J].国有资产管理,2023,(10):56-61.
- [3] 尹西明,张贝贝.我国集成电路现代化产业体系构建的战略与路径思考[J].中国科学院院刊,2024,39(7):1191-1204.
- [4] 商世广,刘有耀,金蕾,等.基于虚实结合的半导体制造工艺实验教学平台应用[J].集成电路应用,2024,41(01):68-71.
- [5] 汪家奇,刘勤,申人升,等.“集成电路工艺”虚拟实践平台建设与实践[J].实验室科学,2023,26(01):111-114.
- [6] 陈卉,张华斌,陈李胜,等.集成电路虚拟仿真创新实践平台建设[J].电气电子教学学报,2022,44(05):139-142.
- [7] 王保柱,武瑞红,张明.集成电路制造工艺实验流程仿真实验研究[J].科技风,2020,(20):101.
- [8] 李严.基于CDIO的集成电路工艺课程的理论与实践教学一体化研究[J].中国现代教育装备,2023,(23):135-137+140.

## 作者简介:

孙辉(1986—),男,汉族,四川绵阳人,副教授,博士,研究方向:新型光电磁功能材料与器件。