

虚拟仿真技术在集成电路专业实验教学中的应用研究

闫续宁¹, 吴勇²

1. 芜湖学院 电子信息学院, 安徽 芜湖 241000

2. 西安电子科技大学芜湖研究院, 安徽 芜湖 241002

DOI: 10.61369/SDME.2026050045

摘 要 : 随着时代的不断进步, 虚拟仿真技术逐渐成为了实验教学的可靠帮手。然而集成电路专业传统的实验教学环节存在实验设备昂贵、学生上手难度大以及实验安全风险等问题, 本文通过分析虚拟仿真技术在集成电路相关实验教学中的应用现状与优势, 探讨了集成电路工艺原理与应用实验课高成本、高风险、微观不可控等特点与困境, 重点阐述了虚拟仿真在该类课程中的项目化教学模式与融合策略。文章最后对未来虚拟仿真技术在地方应用型本科院校集成电路人才培养中的发展趋势进行了展望, 旨在为长三角地区集成电路行业培养高素质应用型人才提供新的思路和方法。

关 键 词 : 虚拟仿真技术; 集成电路; 实验教学; 人才培养

Research on the Application of Virtual Simulation Technology in Experimental Teaching for Integrated Circuit Majors

Yan Xuning¹, Wu Yong²

1. School of Electronic and Information Engineering, Wuhu University, Wuhu, Anhui 241000

2. Wuhu Institute of Xidian University, Wuhu, Anhui 241002

Abstract : With the continuous progress of the times, virtual simulation technology has gradually become a reliable assistant for experimental teaching. However, the traditional experimental teaching process in the field of integrated circuits has problems such as expensive experimental equipment, high difficulty for students to master, and high experimental safety risks. This article analyzes the current application status and advantages of virtual simulation technology in integrated circuit-related experimental teaching, discusses the high cost, high risk, and micro-control impossibility characteristics and dilemmas of the process design and application experiments in integrated circuit technology, and focuses on elaborating the project-based teaching mode and integration strategy of virtual simulation in this type of course. Finally, the article looks forward to the development trend of virtual simulation technology in the cultivation of integrated circuit talents in local applied-type undergraduate colleges, aiming to provide new ideas and methods for cultivating high-quality applied talents in the integrated circuit industry in the Yangtze River Delta region.

Keywords : virtual simulation technology; integrated circuits; experimental teaching; talent cultivation

引言

由于半导体产业全球竞争日趋激烈, 人工智能技术迭代又十分迅猛, 因此集成电路人才工程实践、产线实操两方面都面临更高的要求, 故而《集成电路工艺原理及应用》作为核心实践课程, 其教学质量直接关系学生今后从事晶圆制造、工艺研发工作的能力。与一般的基础理论课程不同, 该课程既要让学生掌握抽象的半导体物理知识, 又要其建立微观参数与宏观性能之间明确、合理的工程模型, 故难度较大, 必然要以丰富的实验教学予以有力支撑。

然而, 芜湖学院课程实验教学中存在着三个十分清楚、彼此关联的现实壁垒: 第一是所用设备价格昂贵、运维成本很高, 故生均实验资源极其匮乏, 第二是制造过程必然涉及高温高压及特种气体, 故操作时极易发生安全事故, 第三是传统“走马观花”式参观或验证性实验不能突破工艺不可逆、微观不可测的根本限制, 因而不利于激发学生的探究欲望。

由于虚拟仿真技术有高逼真度、强交互性、过程可逆、零损耗诸种突出优点, 故近年来发展十分迅猛, 可为实验教学改革提供有力支撑。本文对实验教学改革做了十分扎实、有层次的支撑: 先介绍了构建半导体全产业链虚拟制造工厂, 让学生在数字孪生平台反复训练以实现理论向工程的自然迁移, 继而结合芜湖学院应用型人才培养的定位, 系统、严谨地讨论了虚拟仿真技术在课程中的应用, 由此自然地引出“产教深度融合、虚实相生互动”的教学模型, 再结合项目化教学策略, 论述其提高学生实践能力、增强就业竞争力的具体作用, 最后合理、有洞见地展望其在地方院校半导体人才培养中的发展路径。

项目信息: 安徽省高等学校省级质量工程项目 (2024xjzts081)。

作者简介: 闫续宁 (1997—), 男, 硕士研究生学历, 主要从事数字集成电路设计相关工作, E-Mail: xuningyan@uwu.edu.cn

一、虚拟仿真技术在集成电路工艺原理实验教学中的应用逻辑

在我国半导体产业蓬勃发展的背景下，虚拟仿真技术在高等教育领域得到了广泛的关注，成为了应用型本科大学的重要抓手。该技术利用数字化手段搭建虚拟的半导体制造环境，覆盖芯片设计、生产、封装、测试、设备、材料等半导体全产业链。将微观尺度下的物理化学反应转化为可视化、可量化的人机交互模型，为学生提供全方位的实践路径。针对集成电路工艺原理课程，虚拟仿真的应用优势主要体现在以下几个方面：

（一）打破资源壁垒，降低实验成本

《集成电路工艺原理与应用》涉及的实验教学部分对实验设备及实验场地的要求近乎苛刻，传统的线下教学模式受制于课程时间以及昂贵的仪器设备运行成本，导致学生对实验的掌握程度较低。而虚拟仿真系统可部署在学校机房，全天候开放给学生使用。学生能够自主安排时间以及根据个体认知差异自主调节实验节奏，可实现关键实验过程的反复演练，提升学生的实践能力。从经济效能来看，芯片设计、生产、封装、测试以及材料加工等过程涉及高额的设备运行成本及耗材费用，而数字化孪生平台通过“零物耗”的运行逻辑，消除了材料的损耗成本，同时虚拟仿真实验减少了各种实验废弃物带来的环保负担，符合可持续发展理念^[3]。

（二）强化屏障效应，确保操作安全

半导体芯片的生产以及材料加工过程涉及大量极端工艺条件，包括氢气、硅烷等易燃易爆气体，以及强腐蚀性的酸碱环境。对于作为初学者的学生而言，实操过程伴随着巨大的人身安全风险。虚拟仿真平台基于计算机软件开发，将潜在的人身安全风险隔离在算法之内。虚拟仿真平台的性质给予了学生较为灵活的操作空间，允许其在极端参数设置下，例如离子注入过程中设置过高的注入能量以观察器件失效机制，从而在确保绝对安全的前提下，深化学生对工艺窗口（Process Window）广度与深度的理解。

（三）交互驱动学习，对接产业需求

传统的实验演示过程往往徒有其表，难以与学生形成共鸣，而集成电路虚拟仿真平台可以通过 VR-AR 设备模拟真实的半导体加工过程，让学生有身临其境的感觉。通过计算机编程软件将原本“看不见、摸不着”的微观物理过程通过三维渲染呈现，给学生提供了极强的交互反馈与视觉冲击力，从而激发学生的学习兴趣提升学习效能^[4]。此外，虚拟仿真平台集成了真实场景下的各项工艺参数，同时鼓励学生开展基于项目化驱动的自主设计，培养其在真实工业环境下的实践能力。这种从“操作工”向“工程师”转变的思维跨越，正是长三角集成电路产业对高素质应用型人才的核心诉求所在。

二、集成电路工艺实验课程面临的教学瓶颈

集成电路产业作为国家战略性新兴产业的核心，对人才的培养质量有着严格的要求。《集成电路工艺原理与应用》作为半导体集成电路领域重要的课程，旨在使学生掌握芯片设计、生产、封装、测试以及材料加工等过程的具体操作逻辑，并具备基础的实习实践能力。这种理论实践相结合的特点，是区别于传统半导体

理论教学课程的关键。然而，在芜湖学院等应用型本科院校的实际教学过程中，该课程面临着一系列制约集成电路领域人才培养质量提升的现实挑战。

（一）核心设备昂贵导致的人均资源匮乏

半导体芯片的生产加工过程高度依赖精密、复杂的仪器设备，如极紫外光刻机（Extreme Ultra-violet, EUV）光刻机、离子注入机、氧化炉、金属刻蚀机、槽式清洗机、物理气相沉积设备、激光退火设备、金属有机化学气相沉积设备、硅外延设备、原子层沉积设备、退火炉、扩散炉、低压化学气相沉积设备、硅刻蚀机、介质刻蚀机、光刻胶刻蚀机、化合物刻蚀机等等。这些设备集成了多学科的前沿技术，采购单价高达数百万乃至上亿万元，且其精密部件的日常维护与保养成本亦极为高昂。受限于芜湖学院民办本科院校的经费投入规模，实验室现有的设备配置难以覆盖全体学生的高频次实操需求。此外，晶圆衬底、特种化学试剂等实验耗材的使用成本同样不可忽视，这客观上压缩了学生进行参数优化与重复验证的实验空间，导致实践教学环节演变为“观摩为主、实操为辅”的被动模式。

（二）高危工艺环境下的安全管控压力

半导体工艺实验通常在特定的超净间环境下进行，且涉及多种极具危险性的物理化学条件。例如，集成电路加工过程中扩散工艺需要逾千摄氏度的高温环境，而刻蚀与气相沉积过程则不可避免地使用硅烷、砷烷等易燃易爆或剧毒特种气体。此外，光刻工艺涉及的强腐蚀性化学试剂对人身安全和环境防护提出了极高要求。为确保教学过程的绝对安全，教师往往必须对操作细节实施全过程、高强度的监控，这在客观上剥夺了学生自主操作的空间。同时，复杂的实验室危险废弃物处置流程与严苛的实验室安防标准，也极大增加了教学环节的边际成本。

（三）验证性实验偏重与工程创新思维缺失

当下绝大多数院校开设的实验课程多为沿袭传统的验证性实验，实验方案由教师预先设定，学生仅需通过机械式操作复现预期的实验结果。这种传统的教学模式难以激发学生的学习兴趣，导致其对现实工程问题认知不足。在此背景下，学生往往侧重于记忆操作步骤，而非深入探讨各种参数与实验背后的理论一句，缺乏对复杂工程问题的逆向分析能力。这种单向的知识传递模式，难以培养出长三角集成电路行业亟需的、具备自主解决产业复杂问题能力的高素质应用型人才。

三、虚拟仿真在《集成电路工艺原理与应用》实验课程中的应用路径

针对集成电路制造工艺实验面临的复杂困境，引入虚拟仿真技术不仅是教学手段的革新，更是构建应用型人才高地培养的破局之法。本节将从实验项目的情境化设计以及“虚拟与实际相结合”的教学模式，探讨虚拟仿真技术在芜湖学院集成电路专业中的应用实践。

（一）虚拟仿真实验内容的工程化设计

半导体集成电路行业具有极强的产教融合属性，因此虚拟仿真实验内容的开发应紧紧围绕长三角半导体产业链的典型工程案例。通过构建高度还原的“数字化流片工厂”，模拟从芯片设计、

生产、封装、测试、设备、材料等半导体全流程工艺链，使学生内化理论知识处理具体工程任务。

（二）“虚实融合”的协同教学策略

虚拟仿真技术并非排斥或替代实体实验，而是旨在构建“线上模拟预演、线下实操验证”的高效闭环，实现教学效能最大化。课前通过“虚拟预流片”，学生在进入超净间前完成不少于五次的完整操作模拟，既可掌握机台操作逻辑、降低线下失效率，又能缩短超净间占用时间，提升实验周转效率^[5-6]。针对精密仪器匮乏的现状，虚拟仿真可“以虚补实”，对涉及剧毒气体或周期较长的实验快速迭代呈现结果，并可模拟 EUV 光刻、三维堆叠封装等前沿工艺，拓展学生学术视野^[7]。同时，通过“虚实比对”的逻辑训练，鼓励学生将虚拟仿真理想参数与线下实测数据进行对比分析，在探究偏差中培养严谨的工程态度与解决复杂技术问题的创新思维能力^[8]。

四、实践应用与效果分析

作为服务于芜湖市及长三角地区的应用型本科高校，芜湖学院在集成电路专业实践教学环节中，积极探索“以虚促实、虚实结合”的育人模式^[9]。通过引入虚拟仿真技术，学校有效缓解了地方高校在精密半导体设备投入上的经费压力，努力构建对接长三角行业标准的工程认证体系。

（一）虚拟仿真平台的本土化实践

由于《集成电路工艺原理与应用》传统实验中流片成本很高、工艺周期极长，故学生在传统实验中只能借助教师演示来学习有关操作，因而难于形成扎实、充分的职业技能认知。因此学院有计划、有系统地建设了“半导体工艺虚拟集成实训中心”，使之直接对接西安电子科技大学芜湖研究院、熙泰科技有限公司等本地区企业对功率半导体及光电芯片的人才需求。

（1）职业素养预演及准入式评价是以学生进入线下超净间之前必须通过仿真平台所开展的“虚拟适岗考核”为具体载体的：仿真平台完整、真实地还原了氧化炉、光刻机等机台的控制界面，又合理模拟了车规级芯片制造中对环境控制极其严格的各项指标，因此学生可在虚拟环境中自然、流畅地完成机台参数设定、气路校准、硅片传递、显微检查诸种标准工序，系统后台实时、客观地记录各操作步骤的合规性，把学生的“失误成本”严格控制于数字化环境之中，此种“先虚后实”的模式十分有利于培养严谨的工程态度。

（2）从产业问题出发建构混合式教学路径，教师把芜湖本地半导体企业的真实工程案例自然、妥帖地引入，先在仿真平台发布“技改任务”，再让学生在虚拟实验室中进行工艺模拟，系统、有层次地调节各参数以求最优解，由此自然地线上数据逻辑推导与线下实验验证结合起来，故能很好地把单一的“填鸭式教学”转变为复合型的“问题解决式实战”。

（二）实施成效分析

从对近三个教学周期质量监控资料的分析中不难找出该模式在应用型人才培养上的种种优点。

（1）从工程实操能力、就业满意度两方面都得到切实提高的角度做了十分清楚、有力的说明：仿真训练使受训学生实习时上

手速度比往届缩短了近两周，而由于对工艺流程有总体把握，故学生遇到设备报警、操作失误时的心理素质更好，排障更高效。

（2）从教学资源精益化配置的角度可以十分清楚、有层次地看到虚拟仿真平台引进后的诸多效益：其使生均实操时长增加了3倍以上，集成电路加工制造环节中因误操作造成的硅片报废率从15%降到了3%以内，因而办学运行成本大大降低。更难得的是用虚拟环境模拟学校尚没有购置的高端装备，补齐了硬件断层^[10]。

（3）支撑地方产业的协同创新：借助仿真平台，学生参与“集成电路创新创业大赛”门槛显著降低，芜湖学院集成电路专业学生在2024年度、2025年度均获得国家级奖项，因此芜湖学院所采用的“教学+实操+学科竞赛”一体化的培养模式，在应用型集成电路专业人才培养上已初具的竞争力。

五、结语

虚拟仿真技术在《集成电路工艺原理与应用》课程中的深度应用，为破解地方应用型本科院校在实验资源匮乏、昂贵设备维护困难以及高危工艺实操受限等方面的瓶颈提供了关键的解决方案。通过打造还原度高的数字化虚拟仿真平台，开发以实际需求为导向的工程化项目，并实施“虚实融合”的教学策略，不仅能够显著强化学生对半导体全产业链的实践过程，更有利于塑造其严谨的工程逻辑与解决复杂问题的综合能力。芜湖学院的实践课程教学改革实践表明，虚拟仿真系统在缩短学生实训周期、降低实验运行成本以及提升产教融合深度方面具有不可替代的价值。未来，芜湖学院将继续秉持“虚实结合、产教融合”的新路径，为长三角集成电路产业输送更多高素质应用型人才。

参考文献

- [1] 蔡亚运. 虚拟仿真技术在电工电子技术课程教学中的应用[J]. 集成电路应用, 2023, 40(02): 338-339.
- [2] 李华. 虚拟仿真实训技术在集成电路复合型教学中的应用[J]. 集成电路应用, 2024, 41(03): 335-337.
- [3] 蔺智挺. 基于虚拟仿真实验的模拟集成电路实验教学[J]. 实验技术与管理, 2016, 33(01): 121-123.
- [4] 李卫, 方玉明, 郭宇峰, 等. 集成电路系列课程虚拟仿真实验教学研究[J]. 实验科学与技术, 2017, 15(02): 74-76+99.
- [5] 陈锦儒, 郑春龙. 基于虚拟仿真的电子技术课程设计教学改革[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(06): 100-106.
- [6] 黄永福, 季六祥. 基于VR技术的物流管理虚拟仿真实验教学中心建设探索[J]. 实验技术与管理, 2020, 37(8): 5.
- [7] 丛佩超, 张欣, 尹辉俊, 等. 基于虚拟现实技术的机械类实验教学资源建设与应用[J]. 工业和信息化教育, 2022(2): 77-80.
- [8] 王富刚. VR技术在高校实验教学改革中的应用分析[J]. 2024(8): 194-196.
- [9] 余美华, 戴智英. 探索采用VR虚拟仿真技术改革创新计算机理论课程教学设计的研究应用——以数据结构课程为例[J]. 计算机产品与流通, 2020(4): 1.
- [10] 王智杰. 基于VR虚拟仿真技术的电力系统运行维护与工程设计研究[J]. 电力设备管理, 2024(20): 209-211.