

# 基于产教融合的集成电路制造工艺课程 教学改革与实践

林俊辉\*, 赵晓芳, 刘华珠, 唐穗谷, 牛高强

东莞理工学院国际微电子学院, 广东 东莞

收稿日期: 2025年9月5日; 录用日期: 2025年10月4日; 发布日期: 2025年10月13日

## 摘要

随着集成电路产业的快速发展, 高校人才培养与产业需求之间的结构性矛盾日益突出。本文结合武汉易思达科技有限公司提出的“产教融合实验室建设方案”及其ES4518虚拟仿真软件, 探讨集成电路制造工艺课程的教学改革路径。通过构建“虚拟仿真 + 真实产线”的双轨教学模式, 优化课程内容与实训体系, 提升学生的工程实践能力和产业适应能力, 为集成电路人才培养提供可借鉴的改革方案。

## 关键词

集成电路制造, 教学改革, 产教融合, 虚拟仿真, 实验教学

# Teaching Reform and Practice of Integrated Circuit Manufacturing Process Course Based on Industry-Education Integration

Junhui Lin\*, Xiaofang Zhao, Huazhu Liu, Suigu Tang, Gaoqiang Niu

International School of Microelectronic, Dongguan University, Dongguan Guangdong

Received: September 5, 2025; accepted: October 4, 2025; published: October 13, 2025

## Abstract

With the rapid development of the integrated circuit (IC) industry, the structural mismatch between talent cultivation in universities and industry demands has become increasingly prominent. This paper explores the teaching reform path for the Integrated Circuit Manufacturing Process course,

\*通讯作者。

文章引用: 林俊辉, 赵晓芳, 刘华珠, 唐穗谷, 牛高强. 基于产教融合的集成电路制造工艺课程教学改革与实践[J]. 教育进展, 2025, 15(10): 509-514. DOI: 10.12677/ae.2025.15101863

drawing on the “Industry-Education Integration Laboratory Construction Solution” proposed by Wuhan Yistart Technology Co., Ltd. and its ES4518 virtual simulation software. By constructing a dual-track teaching model of “virtual simulation + physical production line”, the course content and practical training system are optimized. This approach enhances students’ engineering practical ability and industry adaptability, providing a referable reform scheme for cultivating IC talent.

## Keywords

Integrated Circuit Manufacturing, Teaching Reform, Industry-Education Integration, Virtual Simulation, Experimental Teaching

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

集成电路(Integrated Circuit, IC)产业是支撑现代经济社会发展的战略性、基础性和先导性产业,是衡量一个国家科技实力和综合竞争力的重要标志。近年来,在全球科技竞争加剧和我国科技自立自强战略的双重驱动下,我国集成电路产业进入了高速发展的快车道。然而,产业的迅猛扩张却遭遇了严峻的人才瓶颈。据《产业数字人才研究与发展报告(2023)》显示,2023年全行业人才需求约为76.65万,存在约20万的人才缺口,预计到2025年,这一缺口将扩大至25万[1]。更为严峻的是,供给侧出现了令人忧虑的高流失率现象,全国范围内集成电路相关专业毕业生每年超过20万,但从业流失率却高达86% [2]。这一巨大反差深刻揭示了当前高校人才培养体系与产业实际需求之间存在着严重的结构性矛盾。

造成这一矛盾的原因是多方面的。首先,集成电路制造是一个技术密集、资本密集且实践性极强的领域,其核心工艺环节(如光刻、刻蚀、薄膜淀积等)依赖于昂贵、精密的设备和严苛的超净环境[3]。这导致绝大多数高校受限于经费、场地和安全等因素,难以构建真实的产线级实践教学平台,使得实验教学多停留在“纸上谈兵”或“走马观花”式的参观阶段,学生动手操作机会匮乏。其次,传统课程教学内容更新速度往往滞后于日新月异的产业技术发展,导致学生所学知识与岗位技能要求存在代差[4]。最后,人才培养模式与产业应用要求脱节,毕业生普遍缺乏解决复杂工程问题的能力和对全流程工艺的系统性理解,难以快速适应企业岗位。

在此背景下,深入推进产教融合,改革现有的集成电路制造工艺课程教学模式,已成为突破人才培养瓶颈、赋能产业发展的关键路径[5]。虚拟仿真技术作为一种新兴的教育手段,以其在成本、安全、可及性和可重复性方面的独特优势,为破解上述难题提供了新的契机。它能够构建高保真、沉浸式的虚拟实验环境,让学生在“虚实结合”中掌握核心工艺原理与设备操作规范[6]。

本文旨在基于武汉易思达科技有限公司提出的“产教融合实验室建设方案”及其核心产品——ES4518集成电路制造与封装虚拟仿真软件,系统探讨集成电路制造工艺课程的教学改革路径。研究将围绕如何构建“虚拟仿真先行、实体实践强化”的双轨教学模式展开,详细分析如何利用虚拟仿真技术弥补实体实验的不足,优化课程内容与实训体系,最终提升学生的工程实践能力、创新思维和产业适应能力,为培养符合产业急需的高素质集成电路制造人才提供一套行之有效的解决方案。

## 2. 集成电路制造工艺课程教学现状与问题

当前高校集成电路制造工艺课程的教学面临多重挑战,已成为制约产业高素质人才培养的瓶颈。具

体而言，其主要问题体现在以下三个方面：

### 2.1. 理论教学与实践应用严重脱节

集成电路制造是一个复杂、精密且昂贵的工程实践过程。传统课程教学多依赖于教材、PPT 和视频资料，学生难以对“光刻”、“刻蚀”、“离子注入”等关键工艺建立直观、深入的认知。抽象的理论原理(如掺杂浓度分布、氧化层生长动力学)无法与实际的设备操作、工艺结果相关联，导致学生“知其然不知其所以然” [7]。这种“纸上谈兵”的教学模式，无法培养学生解决实际工艺问题的工程思维和能力。

### 2.2. 实训教学条件难以开展

真实集成电路产线投资巨大(动辄数千万乃至上亿美元)，对运行环境(超净间)、维护成本和安全性有极高要求，这决定了绝大多数高校无法建设真正的量产产线用于教学。以下是当前实训教学条件难以开展的具体原因：

设备成本高：一台先进的光刻机价值数千万美元，即使是教学用的二手设备也价格不菲。

材料成本高：硅片、特种气体、光刻胶等耗材成本高昂，学生操作失误会导致巨大浪费。

安全风险大：涉及高温、高压、化学危险品和高速运动部件，学生直接操作真实设备存在安全隐患。

教学效率低：一套工艺循环耗时较长，无法在有限课时内让所有学生完成全流程操作。

### 2.3. 人才培养体系与产业需求存在结构性错配

如建设方案中所述，产业人才需求呈“正金字塔”结构，需求量最大的是封装测试和芯片制造岗位。然而，传统课程体系往往重设计、轻制造；重理论、轻实操。这导致：

课程内容滞后：教材和课程大纲更新缓慢，无法跟上日新月异的制造技术(如 FinFET, GAA 等先进器件结构)和先进封装技术(如 2.5D/3D 封装)。

技能培养缺失：毕业生缺乏设备操作、工艺监控、良率分析和问题排查等产业界急需的实践技能，从而出现了“企业招不到人，学生就不了业”的尴尬局面，高达 86% 的毕业生流失率即是明证。

产教融合薄弱：高校教学与企业生产实践之间缺乏有效的桥梁，企业的新标准、新流程、新案例无法快速融入教学过程。

## 3. 教育改革方案设计

为解决上述问题，本研究提出一个以“产教融合”为核心，以“虚拟仿真 + 真实实操”为路径的一体化教学改革方案。

### 3.1. 重构“层次化、模块化”的课程体系

打破原有单一理论课程结构，构建“基础理论 - 虚拟仿真 - 实操训练”三层次递进的课程模块。

基础理论层：系统讲授半导体物理、器件原理及制造工艺理论。

虚拟仿真层：引入 ES4518 虚拟仿真软件作为核心教学平台，该虚拟平台构成如图 1 所示。覆盖从前段(FEOL)的晶体生长、光刻、刻蚀到后段(BEOL)的封装测试共 25 个实验项目。

实操训练层：在虚拟仿真熟练的基础上，安排学生进入简化版的半导体晶圆制造产线和封装产线进行实操，完成从硅片到芯片的完整流程体验。

### 3.2. 搭建“虚实结合、软硬联动”的教学平台

本方案的核心是建设一个融合虚拟与实物的综合性教学环境。

- 虚拟平台

功能：提供高保真的 3D 设备模型、沉浸式漫游操作、智能引导和自动评分系统。

优势：解决高成本、高风险、高损耗问题，允许学生“零成本”试错、反复演练，直至熟练掌握工艺流程和操作规范。

- 实体平台

功能：提供真实的工艺设备(如扩散炉、光刻机、划片机、焊线机等)，如图 2 所示。让学生接触真实物料、感受真实环境、处理真实问题。

优势：培养学生的工程严谨性、解决实际问题的能力，并获得宝贵的“实战”经验，弥补虚拟仿真的“真实感”缺失。



Figure 1. ES4518 virtual simulation software platform

图 1. ES4518 虚拟仿真软件平台图



Figure 2. Schematic diagram of the physical teaching platform

图 2. 线下实体教学平台示意图

### 3.3. 实施“项目驱动，案例引领”的教学方法

改变“教师讲、学生听”的被动模式，采用基于项目和案例的主动学习模式。

贯穿式项目：以“CMOS 反相器的制造与封装”为一个贯穿始终的综合项目。学生在虚拟仿真中完

成其 151 步的制造流程(ES4518-C 单元), 随后在实体产线上分组协作, 完成特定环节的实操。

企业真实案例: 将建设中提到的产业调研结论(如东莞市对制造、封装、设备运维人才的需求)转化为教学案例。例如, 引入企业提供的实际晶圆测试数据, 让学生分析缺陷原因并提出工艺改进方案。

### 3.4. 建立“多元评价, 持续改进”的考核机制

改革单一试卷考核方式, 建立全过程、多维度的评价体系。

虚拟实验评价: 系统自动记录操作步骤的规范性、流程完成的准确性和效率, 并生成评分。

实操技能评价: 考核学生在实体产线上的设备操作能力、团队协作能力和安全生产意识。

报告与答辩评价: 学生需提交实验报告和项目总结, 并参加答辩, 阐述其对工艺原理的理解和问题解决思路。

反馈与改进: 通过教学平台收集的数据, 分析教学痛点, 持续优化教学内容和教学方法。

## 4. 案例分析: 以“光刻工艺”虚拟仿真实验为例

### 4.1. 案例背景

光刻是集成电路制造中最关键、最复杂的工艺之一。传统教学仅通过动画展示, 学生难以理解其精度控制、对准原理和缺陷成因。

### 4.2. 改革方案实施

理论预习: 学生学习光刻原理、分辨率计算公式、流程步骤。

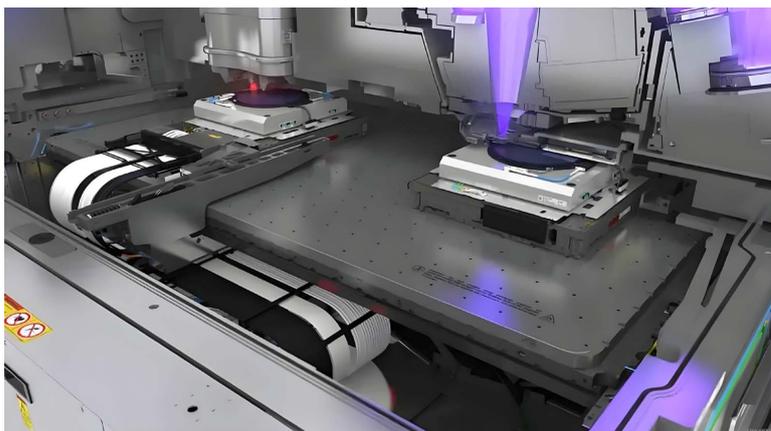


Figure 3. Schematic diagram of the photolithography process simulation platform  
图 3. 光刻工艺仿真平台示意图

虚拟仿真(ES4518-P 单元): 首先, 进行光刻设备认知, 学生在 3D 虚拟洁净室中漫游, 熟悉光刻机(Stepper)、涂胶显影机等设备的外形和接口。再进行流程操作, 逐步完成“底膜处理→涂胶→软烤→对准曝光→显影→硬烤”的完整流程。系统会提示每一步的参数设置(如转速、烘烤温度、曝光能量)。最后, 在流程操作的过程中, 教师可预设故障, 如“曝光不足”, 让学生在虚拟环境中观察导致的“显影不彻底”缺陷, 并学习如何调整参数进行排查和解决。该系统(图 3)可动态展示曝光过程中光刻胶的化学变化、光强分布模拟图, 将抽象原理具象化。

实体实操: 在虚拟仿真中操作熟练且通过考核后, 学生方可预约实体教学产线上的光刻机。在教师指导下, 分组完成真实硅片的光刻流程, 并使用显微镜检查光刻图形的质量。

数据分析与报告：学生对比虚拟仿真和实体实验的结果，分析可能存在的差异及原因(如环境振动、温湿度波动等实体因素)。最后提交一份包含原理、操作记录、结果分析和问题总结的综合性报告。

### 4.3. 实施效果

通过“虚拟-实体”闭环训练，学生不仅深刻理解了光刻工艺的理论知识，更掌握了其操作技能和 troubleshooting 能力。教学风险和安全事故率降为零，设备使用效率和教学质量得到显著提升。学生反馈，这种教学模式让其“仿佛在真正芯片工厂里走了一遍流程”，对未来从事制造岗位充满了信心。以下是教学改革效果评估表，如表 1 所示。

Table 1. Evaluation system resulting data of standard experiment

表 1. 教学改革效果评估表

指标类型	改革前 2023 年	改革后 2024 年	改革后 2025 年	两年增长百分比
平均课程成绩	70.5	75.2	82.1	↑ 16.4%
实验报告优秀率	40.8%	48.3%	60.3%	↑ 47.8%
学生课程评价满意度	70.3%	75.2%	80.2%	↑ 14.1%

如表 1 所示，教学改革显著提升了课程成效与学生满意度，实现教学效率的优化。

## 5. 结论与展望

本文提出的基于产教融合的集成电路制造工艺课程教学改革方案，通过虚拟仿真与真实产线相结合的方式，有效解决了传统教学中存在的理论与实践脱节、实训资源不足等问题。从实施效果可以看到，学生对集成电路制造工艺相关知识及技能的掌握得到进一步的提高，相信未来将进一步拓展与企业的深度合作，引入更多真实项目与工艺数据，推动课程内容持续更新，构建更加完善的集成电路人才培养生态系统。

### 基金项目

东莞理工学院人才启动经费项目(221110213)；2024 年校级产教融合课程建设项目“人工智能赋能集成电路制造技术”(221102036004)。

### 参考文献

- [1] 工业和信息化部教育与考试中心. 产业数字人才研究与发展报告(2023) [R]. 北京: 工业和信息化部教育与考试中心, 2023.
- [2] 武汉易思达科技有限公司. 微电子与集成电路产教融合实验室建设方案[R]. 武汉: 武汉易思达科技有限公司, 2024.
- [3] 万世松, 唐路. “集成电路制造工艺”职业教育的课程建设[J]. 电气电子教学学报, 2025, 47(3): 107-109.
- [4] 卫宁, 等. “集成电路制造技术——原理与工艺”课程思政教学探索[J]. 合肥师范学院学报, 2022, 40(3): 79-82.
- [5] 李严, 等. 集成电路工艺课程的教学实践[J]. 集成电路应用, 2022, 39(3): 20-22.
- [6] 黄玮, 等. 浅析分层递进式集成电路制造课程群的构建[J]. 新型工业化, 2021, 11(8): 170-171.
- [7] 张冷, 等. 集成电路制造工艺课程的教学实践研究[J]. 集成电路应用, 2020, 37(1): 32-33.