



集成电路工艺课程实践教学设计

蒋苓利, 刘欢, 于洪宇

(南方科技大学 深港微电子学院, 深圳 518055)

摘要: 随着集成电路工艺技术呈现日新月异的发展, 集成电路工艺实践的教学需要通过现代化的课程设计、完善的教学内容, 全面培养学生在集成电路工艺领域的实践能力。通过对集成电路工艺实验教学的课程目标、课程内容、教学环节、课程考核等多方面讨论, 展开对集成电路工艺实践课程的研究与探索。以一个电容器的设计和制造贯穿整个课程, 综合运用器件仿真软件、版图绘制软件、工艺制造设备、电学测量设备, 构建完善连贯的实验流程, 以期提升学生利用已有知识解决实际问题的能力。

关键词: 集成电路; 实践教学; 工艺; 半导体

中图分类号: TN305

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20210332

Design of Experiment Teaching for Integrated Circuit Process

JIANG Lingli, LIU Huan, YU Hongyu

(School of Microelectronics, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Abstract: With the rapid development of Integrated Circuit (IC) process, there exists an urgent need for the IC process experiment teaching to improve students' practical ability through modern curriculum design and well-designed teaching content. It is elaborated for the curriculum objectives, curriculum content, teaching links, and curriculum assessments of IC process experiment teaching. The whole experiment course is about the design and manufacture of a capacitor device. In this course, the device simulation software, the layout design software, the manufacturing equipment and the electronic measuring equipment will be applied to build a coherent experimental process. Through this experiment course, students' ability to solve practical problems based on existing knowledge can be improved.

Key words: integrated circuit; experiment teaching; process; semiconductor

集成电路产业是支撑经济社会发展和制造强国建设的战略性、基础性和先导性产业。当前, 集成电路成为了国际竞争的焦点领域^[1-2]。集成电路工艺是集成电路制造的基础, 是半导体技术硬件实现的方法与手段, 是微电子专业重要的实践学科^[3]。通过实验教学, 能让学生有效地整合已学过的知识, 将其运用到实践当中, 为未来的科研、工程、创新提供必要的能力储备^[4], 为“实践导向”的新工科^[5]建设添砖加瓦, 突破集成电路产业“卡脖子”的困境^[6-7]。

对于国内绝大部分高校来讲, 集成电路工艺实验教学受洁净间场地和高值制造设备的限制, 主要通过软件仿真和实习见习的方式开展^[8-12]。以

集成电路制造设备为基础, 让学生自主动手操作的本科实践教学在全国非常少见。通过对集成电路工艺实践课程设计进行研究和探索, 基于高校已有实验资源, 最大化地将理论教学中的基础知识运用到实践教学当中, 课程构建了完善连贯的实验流程, 呈现半导体工艺制造的完整过程。

1 课程目标设置

集成电路工艺实践课是高等学校电子科学与技术微电子专业的专业选修课程, 总学分 3 学分, 其中理论课 1.5 学分、24 学时, 实验课 1.5 学分、48 学时。实验课拟在有限的时间内, 使用校内的实验资源, 让学生学习到集成电路工艺全链

收稿日期: 2021-07-23; 修回日期: 2021-12-09

基金项目: 南方科技大学本科教学质量及教学改革工程项目(XJJG202001)。

作者简介: 蒋苓利(1984-), 女, 博士, 实验师, 主要从事半导体、集成电路等课程教学。E-mail: jiangll@sustech.edu.cn

条流程, 包括集成电路工艺仿真、版图绘制、工艺制造及器件测试等。通过实验实践, 学生能对所学的理论知识进行回顾和印证。实验操作的教学方式, 亦可激发学生学习兴趣, 培养学生实验动手能力及安全规范意识, 为进一步学习集成电路其他知识打好坚实的基础。

2 课程内容设计

为了在有限的时间和实验条件内, 保证教学质量, 获得最优教学效果, 课程内容设计应当遵循以下4个原则。

1) 应保证实验内容的连贯性。以一个完整的工艺流程作为实验主体, 由始至终主题明确。避免插入与实验主题无关的其他实验内容。课程以一个电容器的制造和测试作为主线, 让学生完成一个系统性的工艺流程。

2) 应对学生以往的学习内容进行回顾与印证。尽量多的复现课程理论教学部分介绍到的各种半导体工艺方法, 充分利用半导体设备资源, 开展工艺制备。使用学生必修课程中已经学习过的工艺仿真软件 Silvaco 进行工艺流程设计, 所仿真模拟的工艺过程与后续实际操作工艺流程完全一致。使用版图设计软件 Cadence 对后续工艺中用到的掩模版进行设计, 帮助学生复习版图绘制方法, 并结合制造过程的光刻实验, 学习对位标记等相关知识。

3) 应保证实验课程的教学效率。在保证工艺流程完整的前提下, 做到每节课主题鲜明, 避免因重复使用同一种工具或仪器进行相同内容的重复性实验, 导致教学资源及教学时间浪费。若存在不可避免的重复实验, 或者由教师在课下代为完成实验内容并告知学生, 或者关注不同的实验重点, 让学生能学习到新的知识点。

4) 应包含对工艺实践实验结果测试部分的教学内容。应讲解集成电路常用测试设备的原理及使用方法, 使学生能够独立操作测试设备, 并实际测量自己完成的集成电路器件的参数曲线。在极大地提高学生学习积极性的同时, 可通过分析所得到的测试数据, 加深对理论知识的理解, 并探究造成实验结果偏差的原因。

根据以上原则, 结合高校所具有的实验资源, 课程具体安排如图1所示, 主要分为4个板块, 依流程顺序分别为:

1) Silvaco 软件为基础的待制造器件结构仿真, 3学时;

2) Cadence 软件为基础的待制造器件版图设计, 3学时;

3) 洁净间半导体工艺制造设备为基础的器件制备, 39学时;

4) 探针台、测量设备为基础的器件 C-V 特性测量和分析, 3学时。



图1 课程架构安排

3 教学环节安排

实验教学授课环节主要包括实验目的介绍、实验原理介绍、实验内容演示、学生实验操作、实验结果对比分析5部分内容。

3.1 实验目的介绍

课程伊始, 向学生介绍该课程安排、主要实验内容、流程以及课程的整体学习目标等。并在第一堂课时, 发放实验流程表(如表1所示), 使学生可以清晰地了解整个学期该实验课的环节与进度安排, 以便学生做好课前预习及实验后的复习总结。此外, 第一次课程中, 学生对整个学期的几乎全部工艺流程进行了仿真, 也能帮助学生更好地理解本学期的所有实验安排。

具体到每一堂课程开始时, 会根据实验流程表, 回顾已完成的实验内容, 讲解当堂课程的实验目的、工艺原理及所用设备的使用, 让学生对课程的实验学习做到心中有数。

3.2 实验原理讲解

课程涉及半导体工艺中的多项实验, 如 LPCVD 淀积 SiO_2 、光刻、湿法刻蚀 SiO_2 、原子层沉积系统淀积 Al_2O_3 、磁控溅射系统淀积 TaN、ICP 干法刻蚀金属、RTP 快速热退火、金属蒸镀淀积铝等。在课程中, 将依照具体实验步骤, 向学生介

绍实验原理,使学生理解实验的机理、条件和达到的目的。由于洁净间的安全和洁净度要求,不

具备多媒体教学条件,通常使用特殊无尘洁净纸打印课件讲解。

表 1 实验流程表

时间	内容	设备	备注
第1周	待制造器件工艺仿真	Silvaco	使用Athena进行工艺仿真,使用Atlas进行器件性能仿真
第2周	待制造器件版图设计	Cadence	重点回顾版图的绘制方法
第3周	激光打标	激光打标机	每片硅片标记对应学生学号
第4周	硅片标准清洗、烘干	1号清洗台、烘箱	重点学习洁净间的安全规则
第5周	生长SiO ₂ 材料	低压化学气相沉积LPCVD	与理论课CVD内容呼应
第6周	SiO ₂ 膜厚测量	椭偏仪	无损测量方式简要介绍其他膜厚测量手段
第7周	SiO ₂ 光刻	旋胶机、曝光机、热板、显影液	掩模板与第2周绘制的版图形状一致,使用光学显微镜观察
第8周	湿法刻蚀SiO ₂ 、去胶	1号清洗台、2号清洗台、BOE、去胶液	着重介绍BOE的危险性、实验中特殊的防护要求及意外发生处理手段
第9周	Al ₂ O ₃ 薄膜淀积	原子层沉积系统ALD	ALD原理及沉积过程监控方法
第10周	TaN淀积	磁控溅射系统Sputter	溅射原理及机台操作
第11周	TaN光刻	旋胶机、曝光机、热板、显影液	与SiO ₂ 光刻类似,但实验重点在于学习套刻对准方法
第12周	TaN刻蚀	电感耦合等离子体刻蚀机ICP	干法刻蚀刻蚀完成后,教师代为进行硅片去胶
第13周	快速热退火	快速热退火系统RTP	快速热退火原理、作用及机台操作
第14周	背面铝淀积	金属蒸镀系统	蒸镀原理及机台操作蒸镀前,教师代为去除器件背面氧化层
第15周	硅片切割	硅片切割机	掌握背面覆膜的手法及切割参数设置
第16周	电容器件测试	探针台、半导体测试仪B1505A	与教材电容波形图对照分析实验结果

3.3 实验内容演示

由教师进行本堂课程实验操作过程演示。演示内容包括样品准备(如半导体标准清洗、烘干、托片黏合等)、反应物准备(如反应液、反应源等)、实验设备操作流程与安全要求讲解、实验完成后的注意事项及设备设置方法等(如腔体清洁、腔体抽真空、气阀关闭等)。在进行实验内容的演示过程中,需要穿插讲解该步骤工艺原理及设备工作原理等,让学生对实验原理及设备的使用具有更深入的认识。

3.4 学生实验操作

学期初,每位学生分发一片硅片并进行标记。随着工艺流程的进展,学生每堂课都会使用属于自己的硅片进行工艺实验,并最终完成半导体电容器件的样品制作及测试。全学期的所有工艺操作均在同一硅片上依据工艺顺序逐步完成,学生需要对自己的实验样品从头至尾负责。学生实验所用硅片如图2所示。

受学生人数和实验条件的限制,很多高校半导体实验课程变成了“观摩”课,无法给学生提

供足够的动手机会。本课程特别设计为小班制教学^[13],严格控制单班体量,以保障每位学生全程能自己动手操作,积累实操经验。



图2 学生实验硅片,硅片不同颜色表明处于不同实验阶段

3.5 实验结果对比分析

每堂实验课程,会对本次课完成的样品进行观察对比。如直接使用肉眼观察外观形貌(沾污、颗粒等)、均匀性(不均匀的膜厚因折射作用产生不同的色彩);使用光学显微镜观察线条、形状和清洁度并进行测量;使用椭偏仪测量膜厚等。对于比较特殊的实验结果,还将使用电子显微镜(SEM)等手段作深入分析。学生需要通过对比自

己制作的样品与他人样品的区别, 以及教师样品的区别, 发现问题并分析造成该问题的原因。

图3展示了学生在实验过程中出现的一些问题。显影后样品照片如图3(a)所示, 肉眼可见在显影后出现大面积脱胶。其原因可能是表面二氧化硅膜含水量过高、显影液被污染或其他。学生通过自我排查, 确定实际原因是未进行足够时间的前烘导致脱胶。原子层沉积(ALD)三氧化二铝(Al_2O_3)后显微镜观察的样品如图3(b)所示, 可见

其表面存在一些黑点。经反复排查, 最终确认这是由于ALD设备仓盖未按时清洁淀积物, 导致样品制备时向下掉落微粒, 污染了三氧化二铝绝缘介质层。快速热退火之后的样品显微照片如图3(c)所示, 器件区域出现了大尺寸黑斑。然而通过显微照片无法分辨其产生原因, 因此进一步采用电子显微镜进行观察, 如图3(d)所示, 可见金属出现了鼓泡, 需要重新选择合适的靶材或调整热退火工艺参数。

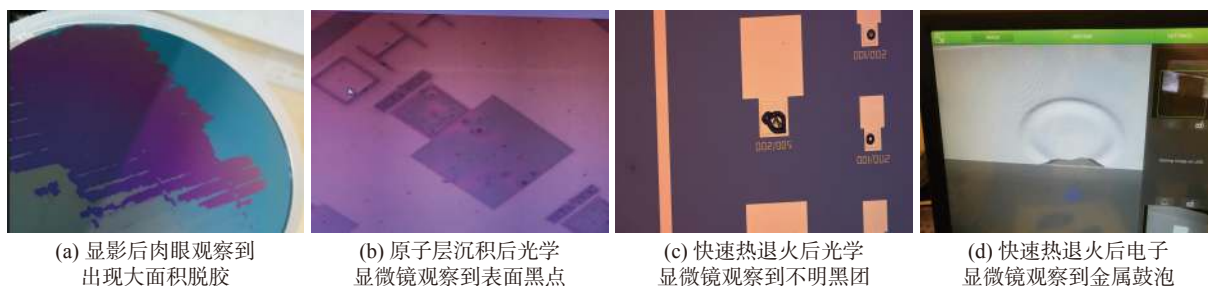


图3 学生分析实验中金属鼓泡现象

学期末, 学生已经完成全部工艺步骤实现样品制作后, 需使用探针台和晶体管电学特性测试机台进行电容器件的C-V特性测试。所测量的C-V测试曲线, 需与教师提供的标准样品进行对比, 并且与教科书标准曲线进行对比。学生需要观察曲线的差异, 分析差异出现的原因, 并在实验报告中对曲线中的各特征点予以理论阐述及问题解释。

4 课程考核设计

作为实验课程, 实验全过程需要被完整考量。由于学生需要按进度完成相关工艺步骤, 且每人负责一片晶圆, 任何一次缺课都会导致后续工艺无法进行。因此, 课程不允许缺课, 但可根据实际情况协商调换课程时间。考核设置如下:

1) 工艺及器件特性仿真(10%), 主要评判内容包括是否设置合理的网格结构, 是否按要求进行器件结构建立, 是否会使用C-V仿真语句进行器件特性仿真;

2) 器件版图绘制(10%), 主要评判内容包括是否会建立基本元胞并进行调用, 是否会处理版图层次之间的尺寸关系, 是否完成了要求的不同参数的器件版图绘制;

3) 工艺实验过程能力评估(40%), 主要评判内容包括是否遵守实验安全守则, 实验过程的流

利程度, 是否在实验中存在重大失误, 工艺参数设置是否正确;

4) 实验报告评估(40%), 主要评判内容包括实验报告中对于全学期工艺流程及重要工艺参数的回顾是否完整可靠, 实验报告中对所完成器件的测量参数曲线是否合理、测量参数曲线的理论分析解释是否正确等。

课程考核不以期末考试来判定学生的学习水平, 将通过细致划分的长时考核来保证上课的效率, 以期末实验报告的考核来保证学生对全学期内容的回顾和掌握, 并通过实验结果与理论值的对照加强对理论知识的掌握。

5 实验教学效果

课程的教学效果主要通过两个维度来进行反馈。

第一个维度是来自学生们的反馈。课程在期末发放给学生两份问卷: 评教问卷、学习效果反馈问卷。由问卷反馈可知, 同学们对课程的进度设置、内容安排、教学手段很满意。同学们非常赞同在半导体工艺的实验课上, 能将以往学期学过的版图、仿真等知识进行复习巩固, 并运用于实际操作。在实验课程的学习中, 同学们会发现自身在理论知识方面的欠缺, 能更加积极主动地参与到理论课程的学习, 把“要我学”的心态转

变为“我要学”，很好地促进了同学们对知识的深入学习和理解。

第二个维度来自各课题组教师的反馈。按南方科技大学本科生培养的规划，大三同学可以根据兴趣进入各课题组学习。完成本课程的学习后，同学们的动手能力有了极大的提升。课题组老师们反馈，完成课程的学生基本掌握了洁净间中半导体制备设备的操作方法，培养了良好的实验习惯、安全规范意识，为学生进入课题组参与科研工作做好了充分的准备。

6 结束语

集成电路工艺实验教学，是培养学生基础实践、科研能力的核心环节。受超净间教学场地、高值微纳加工设备的限制，以机台实操为核心的实验课程在国内比较少见，因此本课程无法直接照搬已有先例进行安排，需要依据实际情况进行全新设计。

在课程内容安排上，集成电路工艺实践教学将 Cadence 版图绘制、Silvaco 器件仿真、微纳加工设备操作、探针台电学测试有机地融合在一起，让学生在有限的时间内掌握工艺实验的核心技术和方法。通过小班教学模式，保证每位学生能真正上手操作，实现动手能力的提高。借鉴国内外相关学科实验教学的考核方式进行课程考核，评估学生的学习效果。通过本课程的学习，学生能在掌握理论知识的基础上，具有集成电路工艺实践的基本能力，从而为在后续学习及工作中的自主研究、独立创新等夯实基础。

参考文献

- [1] 赵玉军. 以党建引领半导体行业 开创可持续发展新篇章[J]. 可持续发展经济导刊, 2021(Z2): 108-109.
- [2] 杨道州, 苗欣苑, 邱祎杰. 我国集成电路产业发展的竞争态势与对策研究[J]. 科研管理, 2021, 42(5): 47-56.
- [3] 李劲, 吕辉, 耿亮, 等. 集成电路创新创业人才的培养模式实践[J]. 集成电路应用, 2021, 38(6): 74-75.
- [4] 赵洪洋. 多元化实验教学模式研究[J]. 实验科学与技术, 2021, 19(2): 123-127.
- [5] 刘坤, 代玉, 张志金, 等. 首批新工科研究与实践项目指南达成度评价及未来发展研判[J]. 高等工程教育研究, 2021, 42(1): 31-38.
- [6] 任继球. 澄清认识 加快构建“卡脖子”技术攻关长效机制[J]. 宏观经济管理, 2021(4): 19-25.
- [7] 王立娜, 唐川, 徐婧. 未来芯片技术发展态势分析[J]. 世界科技研究与发展, 2020, 42(1): 47-56.
- [8] 李卫, 方玉明, 郭宇锋, 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(2): 74-76.
- [9] 吴丽娟, 宋月, 张银艳, 等. “微电子工艺学”课程设计与实践[J]. 当代教育实践与教学研究, 2017(6): 248.
- [10] 张冷, 李玉魁, 张鹏展, 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.
- [11] 田丽, 王蔚, 兰慕杰, 等. “微电子工艺与实践”课程群建设与教改实践[J]. 电气电子教学学报, 2020, 42(2): 48-51.
- [12] 马新国, 吕辉, 徐鹏, 等. 微电子工艺综合实验课程的教学实践[J]. 电子技术, 2021, 50(1): 24-26.
- [13] 刘继芝, 廖昌俊, 任敏, 等. 小班教学在“微电子器件”课程中的探索与实践[J]. 实验科学与技术, 2019, 17(3): 87-90.

编辑 张莉