

文章编号:1005-4642(2020)11-0035-06



MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源建设

李 曼^{a,b}, 郭宇锋^{a,b}, 顾世浦^b, 姚佳飞^b

(南京邮电大学 a. 信息电子技术国家级虚拟仿真实验教学中心;
b. 电子科学与技术国家级实验教学中心, 江苏 南京 210023)

摘 要:为了解决大多数高校微电子专业实验教学面临的难题,建设了 MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源。引入半导体器件的虚拟制造和虚拟测试理念,基于半导体工艺仿真软件和器件模拟软件进行二次开发,包含教学管理、虚拟制造和虚拟测试 3 大部分,共 17 个模块,实现了 MOS 场效应晶体管的各种制造工艺流程和直流、交流、瞬态等各种性能测试。虚拟仿真实验教学资源知识点覆盖面广,理念先进,辐射范围广,具有较好的学习效果,为微电子专业人才培养提供了优质的实验教学资源。

关键词:MOS 场效应晶体管;虚拟仿真;虚拟制造;虚拟测试;微电子;教学管理

中图分类号:O4-39;G642.423

文献标识码:B

DOI:10.19655/j.cnki.1005-4642.2020.11.006

当前社会已经进入了信息时代,信息时代的标志是以计算机和互联网等信息技术的广泛应用。而信息技术的基石是微电子技术。进入 21 世纪以来,我国把发展微电子技术放到了国家战略地位,从 2000 年的 18 号文,到 2010 年的 4 号文,一直到 2015 年的《国家集成电路产业发展推进纲要》,国家出台了一系列的政策和措施推动微电子技术的发展^[1]。

人才的极度缺乏是当前我国微电子领域面临的主要问题之一^[2]。为此,从本世纪起,各大高校开始大力加强微电子人才的培养,许多学校都开设了微电子专业或集成电路工程专业,2015 年,教育部出台了在高校建设示范微电子学院的文件,掀起了微电子人才培养的又一个高潮。

微电子技术的核心是集成电路技术,而集成电路技术的发展是以 MOS (Metal-oxide-semiconductor) 场效应晶体管的出现和集成化为基础^[3-4]。当前,MOS 场效应晶体管的特征尺寸遵循摩尔定律迅速变小,已经由微米进入了纳米时代,MOS 场效应晶体管的性能是决定集成电路性

能的关键因素。因此,MOS 场效应晶体管的设计、制造和测试技术是微电子专业人才培养的必须环节。但是由于 MOS 场效应管的制造和测试需要几十道工序和上百台设备,并且必须在超净环境下进行,普通高等学校很难有财力来建设和维持大规模的超净生产线,如何让学生在不具备实际加工和测试条件下学习 MOS 场效应晶体管的设计、制造和测试,是大多数高校微电子专业实验教学面临的难题。

半导体器件的虚拟制造和虚拟测试技术是近 10 年来微电子工业界和学术界发展起来的新技术。虚拟制造是借助计算机仿真技术,研究给定的器件结构、工艺步骤和工艺参量的条件下半导体器件内部的结构变化和杂质分布,并在计算机上完成晶体管的虚拟加工过程;虚拟测试是借助计算机仿真技术,通过求解器件内部物理方程,获得不同工作环境和偏置条件下半导体器件的各种工作特性,从而在计算机上完成晶体管性能的虚拟测量。虚拟制造和虚拟测试技术已经成为微电子工业界和学术界开展微电子器件研究的必备

收稿日期:2020-06-01;**修改日期:**2020-07-22

基金项目:江苏省在线开放虚拟仿真实验教学项目(No. SYS2017SXF03);电子科学与技术国家级实验教学示范中心项目(虚拟 201802,综合 201806)

作者简介:李 曼(1992-),女,江苏盐城人,南京邮电大学助理实验师,硕士,研究方向为半导体功率器件。E-mail:qiqing0206@njupt.edu.cn

通讯作者:郭宇锋(1974-),男,河南洛阳人,南京邮电大学教授,博士,研究方向为新型微电子器件技术、集成电路设计技术以及无线能量和信息协同传输技术。E-mail:yfguo@njupt.edu.cn



手段。

南京邮电大学依托于信息电子技术国家级虚拟仿真实验教学中心^[5-6]和电子科学与技术国家级实验教学示范中心,面向微电子专业学生,整合“半导体器件物理”、“集成电路工艺”、“集成电路与CAD”、“微电子器件设计”、“新型微电子器件”和“微电子专业实验”等6门课程中的相关知识,引入工业界和学术界流行的虚拟制造和虚拟测试技术,开发MOS场效应晶体管虚拟仿真实验资源,为创新型、工程型和应用型的微电子专业人才培养提供优质的实验教学项目。

1 虚拟仿真实验的教学目标

虚拟仿真实验教学综合运用多媒体技术、仿真技术与网络通信技术等信息技术,结合仿真技术和虚拟现实技术,构建逼真的可视化实验环境和实验对象,使学生在开放、自主、交互的虚拟环境中开展高效、安全、经济的实验活动,从而达到提高自身实践能力的效果^[7-13]。

MOS场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源是根据微电子方向教学目标和教学内容,利用现代信息技术,综合众多教学资源开发的教学系统^[7]。通过此系统,学生能够了解MOS场效应晶体管的制造工艺流程、工艺参量对器件结构和掺杂分布的影响,并掌握采用工艺仿真软件进行虚拟制造的方法,根据工艺要求编写相应的程序,通过优化工艺参量来实现特定的器件结构;了解MOS场效应晶体管的工作机理、器件结构参量对器件各种电学特性的影响关系,并掌握采用器件模拟软件进行虚拟测试的方法,编写电学特性测试的程序,选择正确的模型和求解方法,通过优化器件结构参量来获得所需要的器件性能指标;掌握工艺、器件和电路联合模拟的方法,并采用该方法进行材料和物理级的模拟和仿真;有利于培养学生综合运用所学多门课程的专业知识解决复杂科学问题和工程问题的能力,并在解决问题的过程中展现出创新意识和创新精神。

2 虚拟仿真实验教学设计

MOS场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源引入了半导体器件的虚拟制造和虚拟测试理念,基于工艺仿真软件和器件模拟软件进行二次开发,包含教学管理、虚拟制造和虚拟测试3大部

分,共17个模块,如图1所示。MOS场效应晶体管根据参与导电载流子类型分为NMOS和PMOS,两者互补组成CMOS(Complementary MOS)。

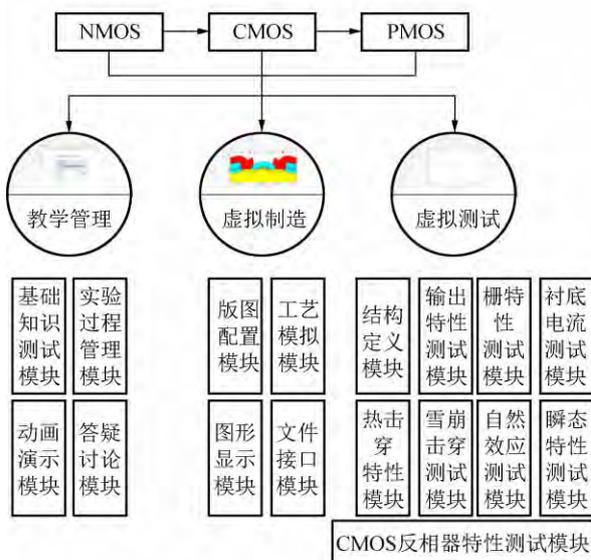


图1 MOS场效应晶体管虚拟仿真实验资源架构

2.1 教学管理

教学管理部分共分为4个模块:基础知识测试模块、动画演示模块、实验过程管理模块与答疑讨论模块。

基础知识测试模块:该模块共设置30道左右的选择題,对本实验所涉及的主要知识点以及易于混淆和难于掌握的重点和难点进行测试。学生可以通过网络进行解答,系统会根据解答情况进行成绩评判。

动画演示模块:利用Flash,制作时长45min的动画,演示几种常见的工艺流程。为了方便演示,在软件中设置了播放、暂停、前进、后退和停止等功能键。

实验过程管理模块:一方面用于发布实验室开放信息、仪器设备信息、教学大纲、培养方案、演示视频和网络课件等各种实验资源信息;一方面可进行资源共享,实现实验数据、实验结果和实验报告的网络传输,开展网络化教学。

答疑讨论模块:学生可以通过网络平台进行提问、回答和交流讨论,教师也可以通过该平台及时回应学生的提问,并可以提出提高性、开放性的问题供大家讨论。实现了师生之间、生生之间在互联网环境下的随时随地无障碍交流。

2.2 虚拟制造

虚拟制造部分共分为 4 个模块:版图配置模块、工艺模拟模块、图形显示模块与文件接口模块。

版图配置模块:该模块的功能是对版图文件进行配置。

工艺模拟模块:该模块的功能是模拟 NMOS、PMOS 和 CMOS 的工艺流程,包括氧化、粒子注入、光刻、刻蚀、淀积、溅射等各种工艺过程。

图形显示模块:该模块的功能是显示各个模拟阶段的器件剖面 and 杂质分布的图形输出。

文件接口模块:该模块的功能是生成工艺模拟和器件模拟的接口文件,并定于电极。

2.3 虚拟测试

虚拟测试部分共分为 9 个模块:结构定义模块、输出特性测试模块、栅特性测试模块、衬底电流测试模块、热击穿测试模块、雪崩击穿测试模块、自热效应测试模块、瞬态特性测试模块与 CMOS 反相器特性测试模块。

结构定义模块:该模块的功能是定义 NMOS 或 PMOS 的器件结构。有 2 种形式:其一是利用器件模拟软件的区域、电极和掺杂定义语句来进行器件结构的定义,其二是直接读取工艺仿真软件生成的结构。

输出特性测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 输出特性的模拟。即给定不同的栅压,模拟随着漏压的变化源漏电流的变化关系。

栅特性测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 栅特性的模拟。即模拟给定不同的漏压,不同界面电荷下随着栅压的变化源漏电流的变化关系。

衬底电流测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 衬底漏电流的模拟。即给定不同的漏压,来模拟随着栅压的变化衬底电流的变化关系。

热击穿测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 在不同温度下的热击穿模拟。即给定不同的栅压,来模拟不同环境温度下随着漏压的变化源漏电流的变化关系。

雪崩击穿测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 的雪崩击穿模拟。即给定不同的栅压,模拟考虑碰撞电离效应时随着漏压的变化源漏电流的变化关系。

自热效应测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 的自热效应模拟。即考虑器件内部载流子加热效应和晶格热效应时,随着漏压的变化源漏电流的变化关系。

瞬态特性测试模块:该模块进行 NMOS 或 PMOS 的瞬态小信号模拟。即通过在直流偏置上施加交变的小信号,模拟输出特性的变化,在此基础上提取器件的截止频率和最高工作频率。

CMOS 反相器特性测试模块:该模块进行电路和器件混合仿真。通过读入工艺模拟或定义的 NMOS 和 PMOS 器件结构,进行工艺和物理级的电路模拟,获得 CMOS 反相器的传输特性、交流特性和瞬态特性。

2.4 实验结果与结论要求

在本实验的 17 个模块中,要求学生自主学习,完成 MOS 场效应晶体管虚拟制造(图 2)和虚拟测试(图 3)。

实验要求学生通过改变 MOS 场效应晶体管虚拟制造和虚拟测试预设关键参量,完成不同参量下的工艺仿真和器件特性仿真,能够针对工艺过程以及实际测试的异常问题提出合理方案并验证。对于工艺仿真,需完成包括氧化、离子注入、光刻、刻蚀、淀积、溅射等各种工艺过程;对于器件特性仿真,需完成输出特性、栅特性、衬底电流、热击穿特性、雪崩击穿特性、自热效应、瞬态特性、交流特性的仿真,分别提取出击穿电压、阈值电压、饱和电流、截止频率以及最大工作频率。

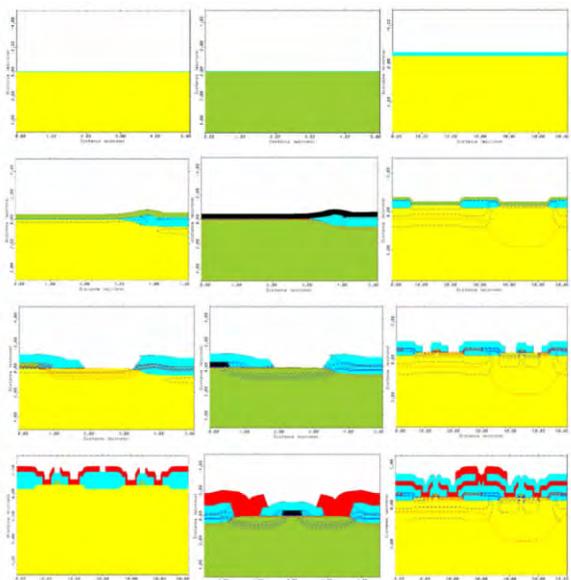


图 2 MOS 场效应晶体管虚拟制造结果图

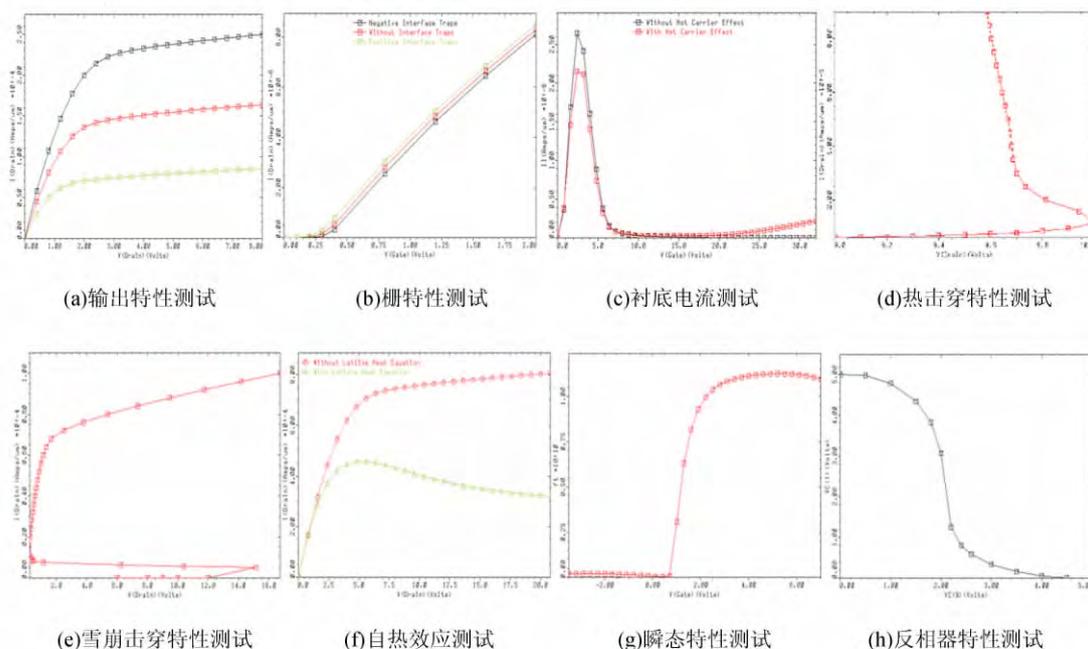


图 3 MOS 场效应晶体管虚拟测试结果图

3 虚拟仿真实验教学项目建设

依托南京邮电大学信息电子技术国家级虚拟仿真实验教学中心和电子科学与技术国家级实验教学示范中心,建设 MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学项目。教学项目包括基础型、提高型、创新型虚拟制造和虚拟测试仿真实验以及虚实结合实验等相关实验案例。

3.1 平台架构

图 4 是虚拟仿真实验教学项目在南京邮电大学信息电子技术虚拟仿真实验教学中心网站的运

行界面,采用 B/S 架构,实现了虚拟仿真实验教学、实验教学管理、门户网站管理等功能于一体。搭建了云平台,实现了校内外及更广范围的实验教学资源共享,即学生只需要连接网络,通过该平台,即可在任何时间、任何空间共享实验教学资源,无限制地进行预习自测和实验操作,打破学生专业实验的限制,有利于学生泛在化学习和创新能力的培养。

3.2 实验教学管理

实验教学管理贯彻“自主学习、协作学习、探究学习”的实验实践教学培养模式,包括实验预习管理、实验自测管理、实验操作管理、实验报告管理、实验批改管理、实验成绩管理等环节,部署学校、学院、教师和学生 4 个层次的管理,主要是教师和学生。教师根据教学计划在实验前后进行实验安排、上传、维护和更新实验资源、考勤管理、实验打分、查看和批改实验报告以及统计并且发布实验成绩。学生根据任课教师的要求,进行实验的预习并自我机测,通过考核后进行情景式教学,浏览实验相关视频,而后进行实验操作。实验过程中,学生能够查看和修改实验资源的源代码,提升创新性实验的比例,将启发式教学引入到实验教学过程中,培养学生探索、发现和创造的学习能力。



图 4 虚拟仿真实验教学项目建设平台

3.3 应用成效

虚拟仿真实验教学项目自开发十多年以来,主要服务于南京邮电大学电子与光学工程学院、微电子学院微电子科学与工程专业、电子科学与技术专业、南京邮电大学通达学院微电子科学与工程等专业的本科生、南京邮电大学微电子学与固体电子学专业和集成电路工程专业的硕士生,受众学生数总计近 2 900 人,实验总人数达到 40 776 人时。

2016 年获批江苏省高等学校虚拟仿真实验教学培育项目,在全省范围免费共享使用,起到了一定的示范作用。

4 虚拟仿真实验教学的特色

4.1 知识点覆盖面广

构建的微电子器件仿真模拟资源库涵盖了专业核心课程 90% 以上的知识点,对各种 MOS 场效应晶体管的制备工艺和性能测试进行全面而系统地虚拟仿真,且所设计的实验项目多样化,为不同需求的学生提供多种选择,有利于因材施教。通过学习,学生可以全面掌握 MOS 场效应晶体管的各种制造工艺流程和直流、交流、瞬态等各种性能测试。

4.2 理念先进

引入微电子技术发展的最新理念——虚拟制造和虚拟测试,解决了普通高等院校无工艺线和无测试环境进行微电子器件制作和测试教学的难题,大幅度降低了实验成本。所设计的实验项目或来源于工程实际,或来源于微电子技术发展前沿技术,仿真工具也与工业界和学术界无缝对接,有利于提升学生解决复杂问题的工程能力和创新能力。

4.3 辐射范围广

MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源面向微电子专业学生,甚至电子科学与技术学生,微电子学与固体电子学、集成电路工程等专业的硕士研究生,提供了主流微电子器件的工艺和器件仿真模拟资源库,具有重要的实践意义和推广价值。

5 结束语

将虚拟仿真技术引入了微电子学专业中,建

设了 MOS 场效应晶体管虚拟制造和虚拟测试实验教学资源,是适应高校现代化教育教学建设的必然趋势,解决了多数高校实验教学的瓶颈问题,实现了教学资源的共享和教学质量的提升。南京邮电大学建设的 MOS 场效应晶体管虚拟仿真实验教学资源是对信息化教学的初步尝试与探索,在教学过程中还需进一步完善,以建立完整的半导体器件虚拟仿真实验体系,形成完善的质量保证机制,建立创新型人才培养模式。

参考文献:

- [1] 洪京一. 工业和信息化蓝皮书:世界信息技术产业发展报告(2014—2015)[M]. 北京:社会科学文献出版社,2015.
- [2] 郭凌先. 我国电子信息技术存在的问题及发展趋势[J]. 信息记录材料,2018,19(2):5-6.
- [3] 高辰. 集成电路技术应用及其发展前景研究[J]. 科技与创新,2017(24):153-154.
- [4] 张春光. 微电子科学技术和集成电路产业[J]. 电子测试,2017(2):126,128.
- [5] 程勇,孙科学,郭宇锋,等. 信息电子技术虚拟仿真实验教学中心建设的探索与实践[J]. 实验室研究与探索,2018,37(5):153-157.
- [6] 刘小花,唐贵进,吉新村. 基于虚拟仿真平台的信息电子技术实验教学研究[J]. 软件导刊,2018,17(10):223-226.
- [7] 徐芊歆,唐芳. 基于 Unity3D 的光栅自成像虚拟仿真实验[J]. 物理实验,2020,40(6):53-56.
- [8] 徐冰,雷维蟠,王宁,等. 鸟类识别与野外工作方法虚拟仿真实习教学系统的设计[J]. 实验技术与管理,2018,35(10):113-116,139.
- [9] 洪澜,蔡修奋,李佼洋,等. 基于虚拟仿真实验的创新能力培养[J]. 物理实验,2018,38(9):43-47.
- [10] 任斌,李志新,陈洋,等. 虚拟仿真技术在物联网工程专业课程实验教学中的应用与实践[J]. 现代信息技术,2018,2(11):67-68,78.
- [11] 马学条,程知群,郑雪峰,等. 电子信息技术虚拟仿真实验教学平台的建设与实践[J]. 实验技术与管理,2018,35(11):130-133.
- [12] 贺占魁,黄涛. 虚拟仿真实验教学项目建设探索[J]. 实验技术与管理,2018,35(2):108-111,116.
- [13] 朱礼亚,闫茂德,关丽敏. 基于虚拟仿真的电工电子实验教学改革与实践[J]. 实验科学与技术,2018,16(2):129-133.

Construction of virtual simulation experiment teaching resource for MOS field effect transistor

LI Man^{a,b}, GUO Yu-feng^{a,b}, GU Shi-pu^b, YAO Jia-fei^b

(a. National Virtual Simulation Experiment Teaching Center for Information Electronic Technology;

b. State-Level Experimental Teaching Center for Electronic Science and Technology,
Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: In order to solve the problems faced by most college microelectronics professional experimental teaching, a virtual simulation experiment teaching resource for MOS field effect transistor was constructed. The virtual manufacturing and testing of semiconductor devices were introduced. Process simulation and device simulation software were redeveloped. It consisted of three parts: teaching management, virtual manufacturing and testing, with a total of 17 modules. Various manufacturing processes of MOS field effect transistors and various performance tests such as DC, AC, and transient were realized. The knowledge points covered a wide range, the concept was advanced, the radiation range was wide, and the learning effect was better, which could provide high quality experimental teaching resources for the training of microelectronics professionals.

Key words: MOS field effect transistor; virtual simulation; virtual manufacturing; virtual testing; microelectronics; teaching management

[责任编辑:郭 伟]

(上接 34 页)

Home-based DIY physics experiments characterized by real operation and interest driven

LIU Wei-long, ZHAO Hai-fa, LI Jun-qing, LOU Xiu-tao, HUANG Li, XIN Li,

GAO Wei-jin, ZHAO Jing-geng, WEI Bo, JIANG Ze-hui, ZHANG Sheng,

ZHAO Hua, LIN Shan, WU Da-kun, WANG Yi, ZHANG Yu

(College of Physics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

Abstract: A series of home-based DIY physics experiment courses characterized by real operation and interest driven were carried out in Harbin Institute of Technology to deal with the dilemma in experiment teaching caused by the COVID-19 epidemic. A new teaching mode was therefore explored. The teaching design, process and effect of the college physics experiment A(2) course was introduced in this paper. The summary and analysis on the home-based physics experiment course offered important insights to design the experiment context for the online and offline hybrid teaching mode.

Key words: home-based DIY physics experiment; teaching design; teaching effect

[责任编辑:任德香]