



基于实验驱动的半导体器件物理课程教学

李若舟¹, 严 静², 方玉明¹, 于 映¹

(1. 南京邮电大学 集成电路科学与工程学院, 南京 210023; 2. 南京邮电大学 电子与光学工程学院, 南京 210023)

摘要: 针对“半导体器件物理”课程教学中存在的知识点学科交叉性强、深度广度高、学生学习主动性差、师生互动效果差等特点和问题, 提出了将实验穿插引入半导体器件物理理论课程教学, 通过实验与理论的有机结合, 实现对教学的强化。结合课题调研、仿真实验、测量实验等提高学生的学习兴趣, 拓展视野, 对抽象的知识点产生感性认识, 发挥学生的主动性, 引导学生建立探索性学习的思维习惯, 培养学生分析问题和解决问题的能力, 达到提升教学效果的目的。

关键词: 实验驱动; 理论教学; 教学模式; 半导体器件物理

中图分类号: G642

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220085

Experiment-driven Teaching of Semiconductor Device Physics Course

LI Ruozhou¹, YAN Jing², FANG Yuming¹, YU Ying¹

(1. College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China;

2. College of Electronic and Optical Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210023, China)

Abstract: Cross-disciplinary issues, high depth and breadth, weak learning initiative, and poor teacher-student interaction are all issues that arise in semiconductor device physics course. This work offered a strategy for incorporating experiments into semiconductor device physics theory teaching in order to improve teaching outcomes. The use of a combination of topic research, simulation experiments, and measurement experiments can pique students' interest, broaden their horizons, generate perceptual understanding of abstract knowledge, boost students' initiative, encourage them to develop the habit of exploratory learning, develop their ability to analyze and solve problems, and achieve the goal of improving the teaching effect.

Key words: experiment-driven; theoretical teaching; teaching mode; semiconductor device physics

半导体产业是新一轮科技革命和产业变革的关键力量, 也是全球高技术争夺的焦点领域。面对行业的快速发展和国家的重大需求, 人才的培养成为寻求产业突破的关键之一。“半导体器件物理”作为高等学校集成电路、电子科学与技术、微电子等相关本科专业的核心专业基础课程, 是连接半导体基础理论、器件设计、工艺制程及集成电路设计与应用的桥梁与纽带, 在专业人才培养的课程体系中承上启下, 占据重要地位。

1 课程教学现状和主要问题

“半导体器件物理”是一个学科交叉性很强的课程, 内容涵盖二极管、场效应管、双极晶体管、晶闸管、太阳能电池等多种主流半导体器件的结构、能带、载流子输运等物理概念与机制, 亦包括上述器件的直流特性、高频特性、非理想效应、对应影响机制等内容, 涉及一定的数学推导计算, 具有极高的深度和广度。该课程要求学生需具有较为扎实的量子物理、固体物理和半导体

收稿日期: 2022-02-23; 修回日期: 2022-03-16

基金项目: 南京邮电大学 2021 年课程思政示范课程建设项目(KCSZSFKC202105); 南京邮电大学研究生课程思政示范课程建设项目(30006SFKC2102); 南京邮电大学 2020 年课程思政教改专项课题、校级教改项目(KCSZJG202002)。

作者简介: 李若舟(1988-), 男, 博士, 讲师, 主要从事表面等离激元、柔性传感器方面的科研与教学。E-mail: lirz@njupt.edu.cn

物理理论基础、相应的数学能力及较强的抽象思维和逻辑思维能力^[1]。因器件的特点及应用方面知识结构复杂、知识点分散^[2],学生在学习中容易感到枯燥乏味、思维混乱、理解困难、难于记忆。

同时,“半导体器件物理”的课程教学多采用较为传统的预习-听课-作业-复习的模式,课堂形式多采用老师讲、学生听的被动学习方式。尽管一定程度采用了分组研讨式、互动式教学等方式引导学生主动学习,但取得的效果有限。原因首先在于上述方法仍是完成任务式的学习模式,难以充分引起学生兴趣;其次,学生对知识框架和重点了解程度较低,对为什么学习这部分内容、能解决什么问题没有充分的认识,难以在短时间内形成知识体系,并在课堂内实现知识点的应用^[3];此外,教学班级内学生的基础参差不齐,对知识理解和应用能力有差异。这些问题都导致学生对课程知识点的理解不充分,容易产生畏难情绪,参与的主动性不高,并可能进一步影响教师的积极性^[4]。

2 实验驱动理论教学的动机

“半导体器件物理”课程的教学特点在于引导学生掌握以能带和载流子输运的视角分析半导体器件的方法策略,在此基础上寻找挖掘知识点间的逻辑关系,建立知识框架^[4]。

该课程理论和实验联系紧密。半导体器件的发明与改进依赖实验,器件从设计到测试应用都离不开理论与实验的充分结合。如贝尔实验室肖克利等人将覆盖有金箔的三角压紧在半导体锗表面,观察到两个触点间的电压增益,发明第一个双极晶体管,被称为“三条腿的魔术师”。实验中金箔与锗块体的接触包含了材料能带、肖特基接触、表面能级等知识点,金箔两触点极窄的间距对应了晶体管的基区,隐含了基区宽度对载流子的注入与抽取的影响;外部的增益特性则对应了晶体管的工作模式、双极输运、载流子分布、电流增益、效率等知识点;晶体管测试得到的特性曲线则可直观地展示出基区宽度调制、大注入等非理想效应的影响。双极晶体管在电路中的应用更需掌握器件等效电路模型、频率特性、开关特性等知识点。而实验采用的分立晶体管无法满足高集成、大功率、高频等应用需求,进而成为晶体管在材料、结构、机制上改进的动机等。

可以看出,通过引入实验教学,能够将复杂抽象的知识点模块化、具象化、生动化,激发学生的学习兴趣,让学生在实验中发现、认识问题、解决问题,从而加深学生对抽象半导体器件知识的认识和理解,实现知识串联,进一步培养学生对于复杂工程问题的分析解决能力。为此,理论教学与实验引导的充分配合是达到上述目的的重点。

3 实验驱动理论教学的实施

3.1 实验驱动理论教学的实施方法

利用实验驱动理论教学最好的方式是将实验穿插于理论讲解的前后过程中,与课程知识点形成有效配合的有机整体^[5]。在课程教学的准备阶段,根据“半导体器件物理”课程知识点把课程内容模块化设计^[6],建立知识框架和思维导图,标注教学的重点与难点,根据重点和难点完成实验选题。

知识框架思维导图可由学生在老师的引导下完成,可借助 PowerPoint、MindMaster 等软件绘制。通过思维导图可以使知识点充分的模块化,形成知识框架,并建立不同知识模块间的联系。

实验选题的确定可采用课堂讨论、学生投票等形式,便于充分发挥学生的主动性。实验的形式需考虑课时安排、实验条件等。课程开始前可有意识地引导学生关注相关概念,调研相关内容。在实验驱动教学过程中,以完成具体实验为线索,把理论知识点巧妙隐含在实验中。可把多个相关联的知识点由浅及深地编排成一系列的能够快速完成、具有明确目标的实验任务。实验任务的安排要充分考虑学生的基础、能力和前置课程;要注意重难点的分布,知识点的逻辑联系,以控制节奏,便于学生理解^[7]。在实验任务中引导学生观察实验现象,结合对比分析现象的形成原因,引出相关概念或规律,并引导学生思考蕴含的内在机制,尝试数学推导。最终培养学生从观察到思考,寻找问题解决问题、进而主动构建知识体系的能力与习惯^[8]。

针对在 pn 结二极管的教学中涉及 pn 结低频小信号的势垒电容和扩散电容的知识点,实验可按如下设置。

1) 通过实验引导知识点的提出。可在理论教学前引入实验演示,展示 pn 结存在电容效应,引

导学生查找 pn 结电容的来源,进而引出对知识点的讲解:势垒电容由外加偏压引起的空间电荷区宽度变化引起,类似于平板电容充放电现象;扩散电容与载流子扩散形成的电荷积累有关。

2) 通过实验引导学生对规律、机理的思考。可进一步测量 pn 结极间电容大小与偏压的关系曲线,引导学生分析不同偏压情况的电容变化规律,得到势垒电容在 pn 结反偏时表现明显,而扩散电容在正偏时起主导作用的结论。讨论中指导学生结合 pn 结的少子行为和能带变化展开分析,加深理解。还可加入电容表达式的解析推导作为拔高内容。

3) 通过实验领悟知识点的联系与区别,促进知识网络的构建。如进一步实验测试二极管的开关特性,展示二极管的关断延时现象,进而引导学生学习由扩散电容引发的电荷存储效应知识点;在讲述发光二极管知识点时,可以通过“比较法”实验对比普通二极管与发光二极管伏安特性曲线^[9],引导学生在二者能带、工作机制、阈值电压等方面进行比较与思考。如学生测试发现二者的阈值电压不同,可引导学生思考现象产生的原因,引入能带知识点的讲解。实验中可观察到仅发光二极管能被点亮,进而可向学生讲解电致发光现象,并引申出载流子的注入及少子辐射复合的知识点。而普通二极管并不涉及少子辐射复合。

3.2 实验的实施形式

实验驱动理论教学目的是通过实验充分引起学生兴趣,促进对知识点的理解,引导学生完成对知识网络的构建。考虑课时安排、实验条件、授课场地的限制,可结合线上线下资源,采用课题调研、演示实验、仿真实验、学生实操等多种形式呈现。

1) 通过课题调研引导学生了解新型器件的最新进展,开拓学生思维。现今半导体产业发展迅猛,科研发展迭代快速。“半导体器件物理”课程从内容上侧重对器件的基本概念、基本原理的学习,而从应用的角度来看,部分课本内容已和当今集成电路芯片厂商广泛采用的 FinFET、FD-SOI、HEMT 等技术产生一定的脱节^[10]。因此,可以通过文献调研、论文和专题介绍的形式引导学生主动关注行业的最新进展,让学生认识到本课程的现实价值与意义,为今后的科研、就业提供参考。

课题调研可按照课程章节设计一系列选题,由学生分组选择。课题内容需紧密联系章节知识点,细化到具体器件架构,有明确的应用背景。调研结果可通过 PPT、录制视频、论文报告等形式灵活展示。展示过程中需对某一器件的背景、具体设计、实验测试方法、性能测试结果和结论等进行简要介绍,引导学生了解课题调研的方法。

2) 通过在线媒体、互联网+等形式实现实验的灵活演示,引起学生兴趣,促进学生理解,降低对实验场地的要求。理论教学的内容相对枯燥,而半导体器件实验一定程度受制于实验设备与实验场地。如科研用半导体分析仪和配套探针台价值百万元上下,无法大量采购用于本科教学实验,且时间和场地均难以容纳大量学生开展实验。与此同时,丰富的多媒体资源为低成本的高效实验演示提供了条件。当前国内外线上开放式课程,如慕课、爱课程、中国大学 MOOC、学堂在线等均提供了大量在线课程;各类自媒体网站也提供了海量的视频素材;还可依托学校教学、科研实验室自行录制实验演示素材。多媒体实验演示可适用于知识点引入、知识点验证等多类型实验。此外,依托多媒体平台的生动展示,结合思政教学,能够很大程度调动学生积极性,活跃课堂气氛,为师生互动创造话题,加深学生对知识的理解。

3) 针对课程知识点,充分利用 EDA 软件开展仿真实验,达到服务理论教学的目的。微电子、集成电路等专业的学生已在“半导体器件物理”的前置课程及同时期课程的学习中掌握了包括 TCAD、Silvaco 等软件的使用方法。因此,可在理论教学过程中针对课程的重难点开展仿真实验,内容一般限制在某一器件的单一理论知识点,以控制仿真难度和工作量。实验可由学生分组完成,可根据具体情况将仿真安排在课前、课堂或课后,作为作业布置。如在 MOSFET 的缩小及非线性效应的教学过程中就可引入仿真实验教学,通过改变器件沟道尺寸、掺杂浓度等特征参数观察器件的特性变化,引导学生验证课本结论。也可通过课后思考题、互动讨论等形式,培养学生的探索意识。此外,还可以通过引入工厂实际参数创建器件模型,在 EDA 平台上直观展现 MOSFET 的非理想效应、工艺浮动影响等^[11],做到与理论教学的充分对接。

4) 结合课时安排和实验条件,适当安排学生实物操作,指导学生独立完成实验。利用学校教学实验条件开展理论与实验相结合的教学,通过学生的实际操作让学生对器件及相关实验设备产生直观的感性认识^[10]。如教学团队利用虚拟仪器软件和半导体电学特性测试设备自主搭建了多端口半导体器件的远程实验平台,课堂上学生可通过电脑远程连接直接操作数字源表、信号发生器、示波器、直流稳压电源等半导体测试仪表,配合视频通话,实现二极管、双极晶体管等半导体器件的远程测试实验。这种远程实验的方法仅需一名研究生助教在实验室配合软硬件连接即可,无需学生离开课堂前往实验室,有效降低了对课时安排、实验场地、实验设备数量的要求,具有较高的灵活性和可操作性。实验教学也可与“翻转课堂”结合,侧重分组实验、分组讨论,为学生提供多元化的学习环境,培养学生团队协作能力、动手能力,思辨能力^[12]。在实验过程中需指导学生根据自身特点把握实验进度,提高效率,做到因材施教。实验结果可采用 Origin、MATLAB 等软件进行数据处理、数据拟合^[8]。学生在分组讨论过程中注重运用课堂学习的理论知识,深入理解器件特性。可依据实验情况和分组讨论情况完成学生的评价^[13]。

4 课程的考核体系的优化

通常的课程考核多采用平时成绩与考试成绩结合的方式。平时成绩反映讨论互动、到课情况、作业情况等,而考试成绩反映学生对知识的掌握情况。然而上述方式具有一定的局限性。如作业通常是平时成绩的考察重点,但作业是否独立完成这点很难确认^[13];考试则存在“平时不学、考前突击”“临时抱佛脚”等情况^[2]。因此,在课程考核中需优化考核体系,将知识考核与能力培养相结合,鼓励和引导学生参与实验、自主学习,并达到成绩评价、课程质量监控与质量提升的目的。

在实验驱动的理论教学中,对应于多样化的课程教学方法,采用形成性评价与终结性评价相结合的综合评价方法。对应于实验、研讨、课堂、作业等教学形式,课程考核分为实验成绩、平时成绩及考试成绩。其中,平时成绩包含课堂互动、到课、作业等;考试形式为闭卷笔试,考

试内容除对知识点、计算分析的考察外,可增加实验设计分析作为拔高题。

课内实验的考核充分发挥“以学生为中心”的教学模式,注重对学生分析问题、解决问题能力的考察^[10]。实验成绩分为论文调研、实验实施两部分。论文调研侧重引导学生了解新型器件的最新进展,开拓学生思维,培养学生的文献调研、阅读及分析思考能力。论文由学生个人独立完成;结构可按照器件简述、器件实验设计、实验结果及问题分析等分节撰写,做到小而精、思路清晰;格式按照规范的论文格式提交。论文成绩综合考虑论文写作质量、逻辑层次、问题分析深度、论文规范、选题时效性等。实验实施则侧重调动学生的学习兴趣,增强带入感和体验感,培养学生的科研能力和动手能力。这部分成绩则根据实际情况灵活把握。可由学生在教学框架内自行分配实验课题,并参考体育赛事的计分方式,根据学生的选题难度设定基础分数和成绩系数,其中,实验实施总成绩=基础分数+(实验设计分数+实验操作分数+实验结果分析分数)×成绩系数。实验结果分析可由思维导图的形式呈现,注重与课程内容知识点的联系。为进一步调动学生的积极性,可引导学生分组答辩介绍实验情况,内容侧重问题呈现和感受分享。答辩通过学生投票、学生打分等方式得到答辩分数并按一定比例计入实验成绩。考虑课时安排,答辩也可由学生课后自行录制视频,并借助群投票、雨课堂等线上手段实现成绩评价。

5 教学效果

半导体器件物理课程的本科教学已开展多年,由于课程自身特点,学生对知识的理解困难、学习兴趣较低。为调动学生积极性,提升教学质量,提高学生将所学知识用于解决实际问题的能力,在原有课程教学的基础上,根据知识点的特点及自身联系,开展了将实验引入教学的尝试。内容包括演示实验、实验设计等,知识点主要涉及二极管、双极晶体管等。

从教学效果来看,学生的平均到课率高于94%;学生课后与老师的交流次数显著增多,方式多采用QQ和微信,探讨内容从单纯的“课后习题不会做、知识点没听懂”等问题扩展到包括课堂实验、知识点间的联系及应用背景、相关产业

情况、就业情况等一系列话题,减弱了“平时没问、考前拼命问”的状况。学生普遍反映,通过自主设计,能够直观感受到理论与实践的联系与区别,认识到无论工程设计还是科学研究都需要分析问题、解决问题。从期末成绩来看,卷面得分率也有一定提高。如双极晶体管少子分布、能带与工作模式之间关系的画图分析题,平均卷面得分率从 57.0% 提高到 71.3%。课程目标“通过学习半导体器件电子学相关基础知识,理解并能够解释半导体器件背后的工作原理,基于对半导体器件理论基础的学习,培养学生能够对复杂工程问题进行分析的能力”的达成度评价从 0.68 提升到 0.76。可以看出,引入实验提高了学生的学习兴趣和对知识点的理解,增加了师生互动,一定程度弥补了“不能够很好地将所学的基本原理和工程对应的实际问题结合”的短板。不足之处在于学生对问题背后根源的分析还需加强,解决问题有些过度依赖于网络资源。因此,在教学中需要进一步细化实验,调整课题深度并加强引导。

6 结束语

半导体器件物理是一门理论与应用相结合的课程,涉及多学科,知识点结构复杂,学习难度较高。若将实验融入本课程的理论教学,形成有机结合,能够在调动学生学习积极性的同时,有效提高学习效果。在文献调研过程中,能够使学生接触到半导体领域的前沿发展、拓展视野,通过文献写作培养学生的文献阅读及分析思考能力。通过实验促进学生主动思考,对知识点产生感性认识;通过实验设计和结果分析,培养学生分析问题,解决问题的能力;通过实验讨论和答辩提高了课堂的互动性;针对关键问题和难点的

实验分析与理论知识点对照,促进了知识体系的构建,培养了学生将所学知识用于实践的能力,为以后的学习与工作奠定基础。

参考文献

- [1] 陈显平,陶璐琪.“半导体物理与器件”教学改革探索[J]. 教育教学论坛, 2021(8): 47-50.
- [2] 陈亮,张世英.《半导体器件物理》课程教学中的问题及改革策略探索[J]. 教育现代化, 2020(32): 81-83.
- [3] 胡启昌,罗志聪,王玉柱,等.关于电子科学与技术专业的《器件物理》教学模式探索研究[J]. 电子元器件与信息技术, 2019, 3(10): 125-128.
- [4] 吕淑媛,刘崇琪,李晓莉,等.以学生为中心,提升课程质量的教学改革初探——以《半导体物理与器件》课程为例[J]. 高教学刊, 2020(21): 143-146.
- [5] 雷畅,付志平,龙来寿,等.《环境工程原理》实验与理论结合的教学方式探索[J]. 教育现代化, 2019, 6(76): 163-164.
- [6] 严家斌.以实验与实践驱动的课程教学模式研究[J]. 实验科学与技术, 2020, 18(1): 53-57.
- [7] 李莉,赵同刚,王雅琪.理论与实验相结合的电磁场教学方法[J]. 电气电子教学学报, 2019, 41(4): 127-129.
- [8] 张芳,任大庆,张纳.浅谈《半导体物理与器件》课程的教学改革[J]. 教育教学论坛, 2019(23): 133-134.
- [9] 蒋芸,鲍丽莎,曹正东.发光二极管的特性研究[J]. 实验室研究与探索, 2007, 26(6): 30-33.
- [10] 部建培,王卿璞.半导体物理实验教学改革研究[J]. 教育现代化, 2019, 6(66): 47-49.
- [11] 雷冰洁,张国和,程军,等.“半导体器件实验”课程改革探索与实践[J]. 电气电子教学学报, 2019, 41(4): 134-136.
- [12] 熊光明,龚建伟,陈慧岩,等.以慕课和实验项目驱动的智能车辆课程混合式教学实践[J]. 实验技术与管理, 2021, 38(1): 184-186.
- [13] 钟智勇,张怀武,任敏,等.“微电子器件”课程探究式小班教学模式[J]. 电气电子教学学报, 2017, 39(2): 17-18.

编辑 张莉