

产学合作范式下《集成电路工艺实验》课程教学改革的研究

王旭 杨城 王可 刘家宝 张泽宇
宁波大学

摘要：集成电路产业在当今数字化时代扮演着至关重要的角色，对经济、科技和社会发展都有着深远的影响，是现代产业体系中不可或缺的重要组成部分。集成电路工艺是集成电路产业中至关重要的环节，对于产品性能、成本、可靠性、创新、国家安全和环保等方面都具有重要的影响。近年来，在国家全力推进产学合作的背景下，集成电路产业不断向更高水平发展，这对高校集成电路工艺实验教学及相关专业人才培养提出了新的要求。本文深入地分析了高校集成电路工艺实验教学的现状及所面临的挑战，结合当前集成电路企业对高素质人才的培养需求，探索产学合作范式下的集成电路工艺实验教学策略，为我国高校从事集成电路工艺实验教学的工作者提出新思路。

关键词：集成电路工艺实验；产学合作；教学策略

【DOI】10.12252/j.issn.2096-6288.2024.08.013

引言

集成电路的出现大大减小电路的体积、重量和功耗，提高电路的可靠性和稳定性，降低制造成本，同时也提高了电路的性能和功能。集成电路的不断发展使得电子设备变得更加小巧、高效，因此被广泛应用于信息通信、计算机、消费电子、工业控制、医疗器械、物联网、智能驾驶的多个重要领域，它也成了推动信息技术和电子工业发展的关键，具有良好的发展前景^[1]。在实际生产过程中，利用光刻、薄膜沉积、刻蚀和离子注入等一系列的集成电路工艺将微电子器件集成到单个芯片上形成具有一定功能的集成电路结构，每一项工艺环节都直接影响了集成电路的性能。

《集成电路工艺实验》课程通常是电子工程、半导体工程或相关专业的课程之一。该课程旨在向学生介绍集成电路工艺的基本概念、原理和实践技能。《集成电路工艺实验》的本科教学课程涉及半导体材料的基本特性，以及半导体工艺的基本流程和技术，包括清洗、光刻、刻蚀、薄膜沉积、离子注入等集成电路工艺设备的操作。通过理论与实验相结合的教学方式开展教学活动，有助于学生了解集成电路工艺中的半导体工艺流程设计、工艺参数优化、工艺操作控制等方面的知识。另外，在集成电路工艺实验课程中，产学合作是非常重要的一环。通过与产业界的合作，学生可以更好地了解实际工程应用和市场需求，同时产业界也可以获得新鲜的想法和人才。本文将阐述《集成电路工艺实验》教学的现状和面临的问题，同时探寻当今产学合作范式下《集成电路工艺实验》课程教学方法。

一、《集成电路工艺实验》课程高校教学的现状

目前《集成电路工艺实验》课程的教学主要包括基本工艺流程、工艺参数调节、工艺设备使用、缺陷分析、先进工艺技术介绍等内容。高校开展《集成电路工艺实验》课程非常重要，即可以帮助学生深入理解集成电路制造的基本原理和技术，也可以提高学生的实践能力和就业竞争力。然而，在实际教学中，仍然存在一些问题需要解决和改进：

（一）高校教学《集成电路工艺实验》课程教学设备和实验室条件不足。集成电路工艺实验的教学过程中需要使用各种先进的工艺设备和工具，如光刻机、薄膜沉积机、腐蚀机等，而这些设备的购置和维护成本较高。高校在开展本课程的教学过程中由于经费限制或设备更新不及时，导致实验设备老化、缺失、不足，致使工艺实验课程教学只能停留在理论讲解阶段，无法保证学生有效掌握工艺设备的操作技能，影响实验教学的效果。

（二）高校教师队伍的专业水平和实践经验存在差异。《集成电路工艺实验》是一门较为专业和复杂的课程，具有理论与实践结合紧密、与产业需求接轨及时，团队合作与交流频繁等特点，要求开展工艺实验教学的教师具备深厚的专业知识和丰富的实践经验。然而，一些高校由于教师队伍结构不合理或培训不足，导致教师在教学内容、实验操作和案例分析方面存在欠缺，直接降低了工艺实验课程的教学质量。

（三）工艺实验课程内容的更新和课程实践性不足。随着我国集成电路产业的迅速发展和集成电路工艺技术

的不断更新,要求工艺实验课程教学内容紧跟产业前沿,课程教学方法随着新技术、新设备、新器件的出现不断调整和更新,以保持与集成电路产业发展的同步。高校由于教学资源 and 师资力量 的限制,导致课程教学内容及方法更新滞后,无法实现与产业发展同步,满足不了学生学习新兴技术和工艺的需求,影响了工艺实验课程教学的适应性和应用性。

(四) 集成电路产学研合作和实习机会缺失。集成电路工艺实验是一门强调实践能力和工程应用的课程,需要学生在实际工艺项目中进行操作和实践。我国的半导体产业现在主要集中在长三角、珠三角、京津冀地区。这些地区拥有优越的地理位置和经济环境,同时也得益于政府扶持政策和科技创新的推动^[2]。而相对于这些地区,其他省份的半导体产业则相对滞后。我国集成电路产业的分布差异使得高校与企业合作机会有限或实习资源不足,导致相关专业的学生缺乏实际工艺项目的参与机会,影响了他们的实践能力和职业发展准备。

(五) 集成电路工艺实验管理难度大:随着集成电路工艺技术的不断进步,集成电路的特征尺寸不断缩小。从最初的几微米到如今的纳米级别,集成电路的尺寸缩小了几个数量级。这也对实验环境提出了更加严格的要求。通常集成电路工艺实验需要洁净室、温湿度控制等特殊的实验环境条件,这对实验室的硬件设施提出了很高的要求,这些设备的维护和管理都需要专业人员的参与,增加了实验管理的难度。另外,集成电路工艺实验涉及化学品、高温等潜在的安全隐患。实验室必须制定完善的安全管理制度,并对学生进行系统的安全培训,同时还需要配备专业的安全防护设备,以确保实验过程的安全性。

二、产学研合作范式下集成电路工艺实验课程教学策略探索

产学研合作是我国创新体系建设的重要组成部分,是国家重点支持和鼓励的战略性举措,也是实施创新驱动发展战略的重要抓手。在实践性极强的集成电路工艺实验课程教学中具有重要意义。产学研合作范式下的集成电路工艺实验课程教学策略应将高校实验课程设计和企业实际需求有机结合,旨在提升学生的综合素质和能力。产学研合作范式下集成电路工艺实验课程教学策略的探索对于学生的实践能力提升、创新能力培养、实际问题解决能力改善、职业素质养成以及产学研合作优势发挥等方

面具有重要的意义。基于此,我们探索并制定了以下教学实践方案:

(一) 建立长期稳定的产学研合作机制:正如前面所提到的集成电路工艺实验课程教学与产业实践结合的十分紧密,因此,在开展集成电路工艺实验课程教学时应以产学研合作为切入点,与相关企业建立长期稳定的合作关系,根据企业的具体需求,尽可能开展以企业需求为导向的定制化实验教学。在产学研合作中,企业在技术方面的需求扮演着关键角色,企业对未来技术发展趋势和人才需求有着深入的洞察,能够为学校提供及时的反馈和建议。高校应邀请企业技术人员参与工艺实验教学,学生可以直接接触业内专家,了解前沿技术发展方向,能够为学生提供宝贵的实践经验和职业发展指导,对于培养高素质应用型人才具有重要意义。组织高校集成电路专业教师与企业技术人员进行座谈交流,通过与企业交流,教师们可以了解集成电路行业的最新发展动态、集成电路技术趋势以及企业对高校人才培养的需求,这有助于调整集成电路相关课程的教学内容和培养目标,使教育更好地服务于行业需求,增强自身的实践经验和工程意识,从而提高集成电路相关课程的教学质量,同时促进校企开展联合科研、技术转移等合作项目,在集成电路本科人才培养、关键技术攻关、科研成果产业化等多方面实现产学研的有机结合。

(二) 优化集成电路工艺实验教学平台:集成电路工艺实验课程是培养集成电路专业学生的重要实践环节,实验平台需要配备集成电路工艺所需的各类设备,如光刻机、薄膜沉积设备、蚀刻设备、离子注入机等,以确保学生能够全面掌握集成电路制造的各个工艺步骤^[3]。目前国内高校集成电路工艺实验平台建设普遍存在设备陈旧落后,洁净环境建设不足,安全管理制度不健全,信息化水平较低,产学研合作较少,实践教学脱离实际需求等问题。高校在建设和更新集成电路工艺实验平台时,资金问题是一个巨大的挑战。集成电路工艺所需的各类设备昂贵,单台设备价格往往在百万元以上。此外,这些先进设备不仅初始投资大,后续的维护和运行成本也非常高,需要专业的技术人员进行日常维护和维修,以及消耗大量的耗材和能源。为了确保实验教学高质量开展,高校应积极争取政府的资金支持,申请集成电路工艺实验专项建设资金,更要与企业合作,共同投入建设集成电路工艺实验室,通过产学研合作引进先进的工艺设备和测试仪器。在此基础上,校企共

建的集成电路工艺实验平台不仅可以满足本科教学需求，还可以为企业提供工艺验证和小批量生产服务，最终实现校企双赢。这样可以为集成电路工艺实验课程的开展提供扎实的硬件条件，还可以让学生在实验室进行工艺流程实践，掌握先进的集成电路制造技术，为未来的就业奠定坚实的实验基础。

（三）构建产学研结合的创新实验教学模式：目前高校很多集成电路工艺实验设计仍停留在传统的验证性实验模式，缺乏针对性的创新性实验设计，难以充分激发学生的探索和创新精神，这些传统验证性实验的评价也往往过于注重实验结果的正确性，而忽视了学生在实验过程中的问题分析、参数调控等能力的培养。同时，由于教师自身工艺经验的局限性，实验指导无法更深入、细致，不能充分发挥实验在培养学生实践能力方面的作用，这也导致了理论教学与实验教学之间存在一定程度的脱节，难以实现理论知识与实践技能的有机融合。因此，应该在传统的验证性实验基础上，根据目前集成电路企业的发展趋势，引入开放性实验和综合性实验，培养学生的创新意识和实践能力。开放性实验给学生提供自主设计的空间，鼓励学生发挥创意，在保证自身和实验设备安全的前提下，尝试新工艺和新技术。综合性实验则要求学生运用所学知识，完成从工艺设计到器件制造的全流程实践，培养学生的系统性思维。同时，高校应鼓励集成电路工艺实验教师走访相关领域企业，了解工业生产实际技术需求，掌握最新工艺技术，并建立产学研合作渠道，这样可以有效促进高校教学与行业需求的紧密结合，为学生的实践能力培养提供有力支撑。

（四）强化集成电路工艺实验实践环节考核：本科实验教学实践环节的考核是培养学生实践能力、检验教学效果、提高教学质量的重要环节。与大学物理实验不同，在集成电路工艺实验教学中，实验实践环节的考核应该占据重要地位，不仅要注重操作过程，还要评估实验报告、创新思维等多个方面，全面考核学生的专业技能。除书面实验报告评价之外，实验教学考核中还应设置工艺流程报告、工艺参数优化、器件性能测试等实践环节的考核，并邀请企业工艺技术专家参与评判。实践实验操作考核成绩占总成绩的较大比重，可以引导学生重视动手能力的培养，同时，企业技术专家的参与也确保了考核内容的针对性和实用性。此外，集成电路工艺实验考核还要注重流程的完整性，集成电路工艺实验的

完整流程通常包括晶圆制备、氧化扩散、光刻、薄膜沉积、金属化、封装、测试等重要的工艺实验环节以确保完整性。集成电路工艺实验流程的完整性在本科教学中非常重要，它有助于培养学生的系统性思维、实践动手能力、理论联系实践以及对新技术的接受能力。但是完整的集成电路工艺实验流程往往时间久且复杂，集成电路工艺实验教学的开展需要贯穿多个学期，实验考核环节需要与相关专业毕业设计相结合，在毕业设计中设置与集成电路工艺相关的实验项目，学生在完成工艺实验操作的同时进行毕业设计，以确保设计的可行性。这样既能够培养学生的实验技能，又能够提高工程实践能力，还可以使学生在实践中深入理解集成电路工艺的原理和技术，并能够将其应用到实际项目中。

结语

综上所述，产学研合作范式下集成电路工艺教学的开展，应保证实验教学课程内容和实验设计与企业的需求紧密结合，充分利用企业所提供的各种资源，让相关专业学生掌握的知识和技能更加贴近行业实践，同时，在实验室和企业实习中积累丰富的实践经验，为未来职业发展奠定良好基础。产学研合作模式为集成电路工艺实验课程教学注入了新的活力，有利于培养满足行业需求的高素质人才。我们将继续深化产学研合作，不断优化教学内容和方式，为集成电路产业输送更多优秀人才。

参考文献

- [1] 吴林晟, 毛军发. 从集成电路到集成系统 [J]. 中国科学: 信息科学, 2003, 10(5): 1843-1857.
- [2] 张越, 余江, 刘宇, 陈凤. 我国集成电路产业政策协同演变及其有效性研究 [J]. 科研管理, 2023, 7: 21-31.
- [3] 郭华飞, 王秀琴, 邱建华. 浅谈高校集成电路产业学院建设现状及对策—以常州大学为例 [J]. 教育教学论坛, 2023, 15: 21-24.

作者简介: 王旭, 1987年7月, 男, 山东, 博士研究生, 汉族, 副教授, 研究方向: 半导体材料与光电器件。

基金项目: 本文系宁波大学校级教学研究项目“产学研合作范式下《集成电路工艺实验》课程教学改革的研究”的研究成果。同时得到浙江省教育厅2023年省产学研协同育人项目(项目名称: 宽禁带半导体功率器件制备工艺协同育人平台开发)的支持。