

《半导体器件物理》课程教学改革与创新

李文武^{1*}, 王瑞雪², 郭 浩^{3#}, 刘富才^{4#}

¹复旦大学未来信息创新学院, 上海

²华东师范大学物理与电子科学学院, 上海

³中北大学仪器与电子学院, 山西 太原

⁴电子科技大学光电科学与工程学院, 四川 成都

收稿日期: 2025年12月29日; 录用日期: 2026年1月26日; 发布日期: 2026年2月4日

摘要

集成电路是我国急需重点发展的卡脖子领域之一。其中, 《半导体器件物理》课程对于集成电路、微电子和电子科学与技术等学科领域的研究生教育和人才培养至关重要。本文致力于深化学生对半导体材料物理特性、器件基础理论及制造工艺等有关教学问题的理解, 为进一步的专业学习和科研活动奠定理论基础。鉴于研究生的专业背景多样性, 本文提出了面向研究生的《半导体器件物理》课程教学改革策略。通过改革教学方法, 本文旨在提升学生的课堂参与度和自主学习能力, 利用人工智能(AI)开启个性化教学, 进而提高教学质量, 培养符合当前半导体产业和科学研究领域需求的高素质半导体技术人才。

关键词

《半导体器件物理》, 教学方法, 研究生自主学习, AI辅助教学

Teaching Reform and Innovation of the Course “Semiconductor Device Physics”

Wenwu Li^{1*}, Ruixue Wang², Hao Guo^{3#}, Fucai Liu^{4#}

¹College of Future Information Technology, Fudan University, Shanghai

²School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai

³School of Instrumentation and Electronics, North University of China, Taiyuan Shanxi

⁴School of Optoelectronic Science and Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu Sichuan

Received: December 29, 2025; accepted: January 26, 2026; published: February 4, 2026

*第一作者。

#通讯作者。Email: guohao@nuc.edu.cn; fucailiu@uestc.edu.cn

Abstract

Integrated circuits (ICs) are one of the critical “bottleneck” fields that China urgently needs to prioritize for development. Among related disciplines, the course “Semiconductor Device Physics” is crucial for graduate education and talent cultivation in fields such as integrated circuits, microelectronics, and electronic science and technology. This paper aims to deepen students’ understanding of key teaching content, including the physical properties of semiconductor materials, basic device theories, and manufacturing processes, laying a theoretical foundation for their further professional learning and scientific research activities. Given the diverse professional backgrounds of graduate students, this paper proposes teaching reform strategies for the “Semiconductor Device Physics” course tailored to graduate students. By innovating teaching methods, the paper seeks to enhance students’ classroom participation and independent learning abilities, leverage artificial intelligence (AI) to implement personalized teaching, thereby improving teaching quality and cultivating high-quality semiconductor technology talents who meet the demands of the current semiconductor industry and scientific research fields.

Keywords

“Semiconductor Device Physics”, Teaching Methods, Graduate Independent Learning, Artificial Intelligence (AI) Assisted Teaching

Copyright © 2026 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

在 21 世纪的信息时代，信息技术的迅猛发展正深刻地改变着我们的生活和工作方式。半导体技术作为信息技术进步的基石，扮演着至关重要的角色。从集成电路的微小晶体管到光电子器件的高效能量转换，再到传感器的精准信息捕捉，半导体器件广泛应用于计算机、通信、医疗、智能传感、能源等关键领域，它们不仅是现代电子工程的核心，更是推动社会进步和科技创新的关键因素^[1]。在全球范围内，许多国家已经认识到半导体技术的战略重要性，并将其视为国家竞争力的重要组成部分。为了抢占技术制高点，各国纷纷出台政策，以财政、税收、研发支持等多种形式，推动半导体产业的发展。在中国，国务院将集成电路产业纳入“十四五”规划的重点发展领域，这一战略部署不仅凸显了半导体技术对于国家发展的重要性，也为相关领域的教育和研究提供了强有力的政策保障^[2]。上海市也将集成电路、人工智能、生物医药作为三大先导产业进行重点支持。

在此背景下，高等教育机构面临着调整和改革教育内容的迫切需求，以培养能够适应和引领新时代半导体和集成电路产业发展的高素质人才。半导体技术相关人才的短缺限制了集成电路产业的发展。其中：《半导体器件物理》课程作为电子类工科专业的核心必修课，课程内容涵盖半导体材料的基本特性、物理理论、器件工作原理、制造工艺、可靠性分析以及逻辑电路等前沿研究。主要教学模块包括：半导体的晶体结构与能带理论、载流子输运行为、PN 结与金属 - 半导体接触、二极管与晶体管工作原理、器件模型与参数提取、制造工艺技术、可靠性与失效分析、高级半导体器件特性以及器件模拟与设计方法^[3]。本课程肩负着为学生提供坚实理论基础和应用实践技能的双重使命。

然而，在半导体器件物理教学过程中陆续出现了一些新的问题和挑战[4]。例如，当教育对象是硕博研究生时，由于学生们前期的本科专业背景差异非常大，部分跨专业读研的同学们会缺乏相关内容的知识储备，因此在学习很多内容时，普遍反映理解困难，难以达到课程学习的预期目的。这个问题的有效解决对于培养高质量的微电子和集成电路技术人才具有重要性和紧迫性。

另一方面，人工智能(AI)的发展为教育的改革和创新带来了新突破，2022年11月ChatGPT问世，紧接着2024年OpenAI又推出视频生成模型Sora，这些AI带给教育的改变是革命性的，与其被动接受，不如主动融合，创新性地采用AI进行辅助教学。例如：北京市教委选取的首批25所中小学试点学校正在探索智能作业、辅导答疑、教学行为分析等10余个场景的人工智能试点应用，这些探索可以为高等教育提供宝贵的经验和示范[5]。这些试点学校的应用场景包括智能作业、虚拟数字人问答、智慧备课及教学管理等，显示了AI在教育中的多样化应用。目前市面上有ChatGPT、Deepseek、豆包、Class Companion等50多个适用于教育的机器学习模型或AI应用。它们可以帮助教师提高教学效率、个性化教学内容，并为学生提供更加丰富的学习体验[6]。

为了应对AI时代对集成电路和微电子相关专业研究生教学的新挑战，本文主要从教学方式的改革对半导体器件物理这门课程的教学进行探索。可以显著提高半导体器件物理课程的教学质量，系统培养出更多符合集成电路产业需求的高素质半导体技术人才。希望能够主动地融入新一轮教育教学改革的大潮，进一步摸索出高质量人才培养的新模式。

2. 课程教学中出现的新问题与挑战

历经数十年的教学积淀，众多高等教育机构在半导体器件物理课程的教学实践中积累了宝贵的授课经验。然而，伴随着时代的演进，该领域的教学同样面临着一些新兴的问题和挑战。主要呈现出以下三个问题。首先，教学对象教育背景多样化：针对于研究生的课程，普遍存在生源背景差异化现象。具体而言，由于研究生本科专业问题，可能部分学生有相关专业背景，学习过固体物理，半导体物理等课程，他们可能更容易适应研究生阶段的学习。然而，还有一部分同学可能是从材料学、物理学、化学等专业跨专业读研的学生，因此对于这些学生来说，此课程学习起来会存在显著的学习障碍，他们可能需要额外的指导和资源来弥补知识上的不足。其次，教学方法单一，半导体器件物理课程需要将理论知识与实际应用紧密结合，但目前的教学模式往往偏重理论，依赖传统的课堂讲授和教科书，缺乏互动性和实践性，这导致学生在学习过程中难以将抽象的理论知识与具体的器件制造和应用联系起来。再次，教学内容更新不够及时，当今集成电路行业沿着摩尔定律快速发展，集成电路制造工艺和半导体器件结构也在不断迭代更新，未来还将引入人工智能进行辅助生产制造，因此开展有针对性的教学实践改革和教学内容更新。

3. 改革措施

针对这些在教学中面临的问题，结合作者所在学校的教学实践经验，本文以AI辅助作为教学工具，从学生学习方法、教师教学方法两个方面入手进行半导体器件物理课程教学改革的探索。

3.1. 个性化学习路径

利用AI辅助技术，可以根据每个学生的学习背景、能力和进度，提供个性化的学习资源和路径。AI系统还可以通过分析学生的学习数据，推荐适合他们的学习材料和布置合适的学习任务，让每个学生都能按照自己的节奏学习，并及时调整学习内容和难度以适应他们的需要。AI助教可以提供 7×24 小时的学习支持，通过自然语言处理技术，回答学生的问题，提供解释和示例，帮助学生克服学习障碍。AI助

教还可以辅助学生进行深入思考，激发学习灵感，并提供个性化的学习建议。以本课程中的半导体材料物理知识点 - 布里渊区为例，很多缺乏半导体专业背景的学生是没有涉猎过能带理论这些部分相关知识的，那么就可以在课堂中，或者课前给予学生时间，利用 AI 辅助学习和理解此部分内容。例如，在课前或课堂学习过程中，学生可以通过与 AI 助教进行对话来初步理解相关概念。以下是学生与 AI 的对话片段：

学生：什么是布里渊区？

AI：布里渊区是倒易空间中的基本区域，用来描述晶体中电子允许的波矢范围，与能带结构密切相关。

学生：那布里渊区是不是一种真实存在的空间结构？

AI：可以理解为描述电子运动的一种空间，它反映了晶体周期性对电子行为的限制。

针对上述回答，教师引导学生进行分析与辨析，指出 AI 的解释在方向上是正确的，但表述中容易引起误解。教师进一步强调布里渊区是定义在倒易空间中的一种数学构造，用于描述晶体周期性对电子波矢的限制，其本身并非实空间中的物理结构，但具有明确的物理意义。并引导学生区分实空间晶格与倒易空间之间的关系，从而加深学生对布里渊区物理意义和适用范围的理解。

AI 系统还可能会推荐交互式模拟、视频讲解和阅读材料等资源。交互式模拟可以通过模拟软件，学生可以观察不同晶体结构下的布里渊区变化，以及电子在能带中的运动。视频讲解也是一个很好的辅助教学的手段，通过提供由领域专家讲解的短视频，以浅显易懂的方式介绍复杂概念。在阅读材料准备方面，可以分类推荐适合学生阅读水平的学术论文或章节，以及交互式电子书，其中包含自我测试和讨论问题。因此，AI 辅助技术通过个性化学习、智能分析、自动化任务、实时反馈和丰富资源等多方面的支持，可以提高研究生的自主学习能力，为他们的学术追求提供了强有力的助力。

3.2. 小组学习与协作

将学生分为小组，分组的时候应确保每个组都有至少 1 名已经有半导体器件物理知识背景的同学作为组长，每组指定一个课题，进行深入研究并最终进行汇报。通过小组学习，学生可以与来自不同背景的同伴一起学习和合作。这种跨学科的协作学习不仅有助于学生从不同角度理解知识，还能培养他们的团队合作和沟通的能力。小组学习还可以促进学生之间的知识互补，帮助他们共同克服学习中的挑战。同时，也要鼓励学生围绕半导体器件的实际案例开展项目实践，例如设计、模拟和分析特定的半导体器件。通过项目式学习，学生可以更好地理解理论与实践结合的意义。

以本课程的半导体 - 金属接触知识点为例。首先，学生需要明确学习目标，设定小组学习的具体目标，例如：理解半导体 - 金属接触的基本原理、特性和应用；掌握接触电阻、肖特基接触与欧姆接触的区别等。其次，为每个小组分配不同的子任务，鼓励深入研究。例如：第一组研究半导体 - 金属接触的基本原理，准备简报；第二组探讨肖特基接触的特性与应用，进行案例分析；第三组分析器件欧姆接触的制作工艺及其优缺点；第四组设计模拟实验，验证接触性能，使用半导体工艺模拟以及器件模拟工具 (Technology Computer Aided Design, TCAD) 工具进行仿真。随后，开展小组的再次讨论与合作，鼓励小组成员定期召开会议，分享各自的研究进展。使用在线讨论平台(例如微信群等)实现信息共享和即时交流。条件允许的情况下，还可以使用 TCAD 工具进行仿真实验。学生可以通过模拟不同材料和条件下的接触特性，加深对理论知识的理解。最后，每个小组准备一个简报或 PPT，总结他们的研究成果和讨论，强调各小组之间的知识交流。组织小组汇报会，各组展示他们的研究成果和实验结果。鼓励其他小组在汇报后进行提问和讨论，促进知识的深入理解和思考。通过以上步骤，学生能够在小组合作学习中深入理解半导体器件物理课程中半导体 - 金属接触这一知识点，同时提升了合作能力、沟通能力和实践技能。

这种互动与讨论将促进多角度理解和更全面的知识吸收。

3.3. 仿真实验和 TCAD 工具

通过 TCAD 仿真工具，例如 Sentaurus TCAD，进行半导体器件的模拟，使学生能够在虚拟环境中进行器件仿真模拟实验，增强对理论知识的理解和应用。这种仿真实验可以提高学生的学习兴趣，拓展视野，对抽象的知识点产生更感性认识。对于那些缺乏实验条件学校或者需要额外实践操作的学生，仿真教学提供了一个虚拟的实验环境。学生通过仿真实验学习，可在无物理硬件设备条件下完成器件工艺模拟验证，这有助于他们更好地理解理论知识，并将其应用于实际情境中。通过器件参数扫描功能，学生可系统观察工艺参数对接触特性的影响。通过可视化分析手段，帮助学生将理论知识与具体应用联系起来。

以《半导体器件物理》课程中最熟悉的短沟道效应这个知识点的教学为例，传统教学往往侧重于阈值电压滚降、漏致势垒降低等效应的定性分析和数学推导，学生对其空间分布特征及形成机理缺乏直观认识。通过引入 TCAD 仿真，可将短沟道效应的教学设计为一个基于问题的探究过程。教学中引导学生在保持器件结构基本一致的前提下，改变 MOS 管的沟道长度，比较不同尺度器件的电学特性变化。通过分析仿真：1. 设定器件仿真目标；2. 创建 MOS 管器件模型；3. 选择掺杂工艺与材料；4. 运行静态特性仿真等步骤得到 I_D-V_G 和 I_D-V_D 特性曲线，学生可以直观观察沟道缩短对阈值电压、漏电流以及亚阈值特性的影响，并结合电势分布和电场分布的可视化结果，深入理解短沟道效应产生的物理原因，如沟道电场增强、势垒调制能力减弱等。

单纯做 TCAD 容易出现一个问题：学生得到的是理想的结果(无掺杂、无界面缺陷、无噪声等)，而现实器件的结果往往更复杂。怎样将“虚实”结合起来呢？我们可以将 TCAD 仿真与真实数据结合起来，教学组织一个“理论 - 仿真 - 实验 - 修正”的探究闭环。在进行以上的仿真结果之后，引入真实器件的测量曲线或实验数据与仿真结果进行对照，指导学生分析二者差异的来源，如界面态、接触电阻以及工艺偏差等非理想因素，并在 TCAD 中逐步加入相应物理模型或调整参数进行拟合修正，最终实现仿真结果对真实器件特性的合理解释与预测。通过这一过程，学生不仅能够直观理解短沟道效应的形成机理，还能掌握器件参数扫描、数据提取、误差分析和模型校准的方法，将理论知识与实验数据有效结合。

3.4. 数据分析和反馈

AI 教学系统可采集并分析学生的学习行为和表现，为教师提供洞察，辅助教师精准识别学生的学习难点和需求，从而实现差异化教学干预。该闭环反馈机制有助于教师动态优化教学策略与内容，同时也让学生能够及时了解自己的学习成效和需要改进的地方。

4. 结语

随着半导体器件物理课程在研究生教育中的重要性日益凸显，教学改革显得尤为迫切。本文提出了相应的改革策略，旨在通过利用 AI 技术，应对教育背景多样化和教学方法单一化所带来的挑战。通过 AI 工具制定个性化学习路径、小组学习与协作、仿真实验和 TCAD 工具的应用，以及数据分析和反馈，这些举措不仅能够提高学生的课堂参与度和自主学习能力，还能促进理论与实践的紧密结合，为学生提供更丰富、更有效的学习体验。

面向未来，我们期待这些改革措施能够进一步深化和迭代，以适应快速变化的技术环境和教育需求。相信通过不断的探索和实践，半导体器件物理课程将能够更好地服务于学生的学术成长和职业发展，为培养下一代半导体技术人才做出更大的贡献。同时，我们也期待教育者、技术专家和产业界的持续合作，共同推动半导体教育的创新和发展，以满足国家战略需求，促进科技进步和产业升级。

基金项目

2023 年度复旦大学课程思政教育教学改革研究课题(KT23028), 电子科技大学研究生教研教改项目(JYJG2024032)。

参考文献

- [1] 国家发展和改革委员会. 中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要 [EB/OL]. https://www.gov.cn/xinwen/2021-03/13/content_5592681.htm, 2021-03-13.
- [2] 国务院. 国务院关于印发新时期促进集成电路产业和软件产业高质量发展若干政策的通知[EB/OL]. https://www.gov.cn/zhengce/content/2020-08/04/content_5532370.htm, 2020-08-04.
- [3] Sze, S.M. and Ng, K.K. (2006) Physics of Semiconductor Devices. Wiley. <https://doi.org/10.1002/0470068329>
- [4] 钟英辉, 弓巧侠, 李梦珂, 等. 浅谈“半导体器件物理”教学改革[J]. 电气电子教学学报, 2021, 43(2): 27-29.
- [5] 北京市教育委员会关于公布首批高等教育人工智能典型应用场景培育名单的通知[EB/OL]. https://jw.beijing.gov.cn/tzgg/202410/t20241011_3916859.htm, 2024-10-11.
- [6] 杨宗凯, 王俊, 吴砥, 陈旭. ChatGPT/生成式人工智能对教育的影响探析及应对策略[J]. 华东师范大学学报(教育科学版), 2023, 41(7): 26-35.