

科研为导向反哺教学的教育模式用于半导体物理课程的教学改革

赵 江

(南京邮电大学集成电路科学与工程学院, 江苏 南京 210023)

摘 要 半导体物理的知识点相对烦琐且内容抽象,传统的课堂教学方法已无法满足学生的需求,以科研为导向反哺教学的教育模式为半导体物理学课程教学改革提供了全新的思路。科研为导向反哺教学的教育模式注重将科研与教学有机结合,实现“教学与研究”的一体化,该模式充分利用半导体物理课程中的基础知识和新兴科研工具,旨在培养学生的主动性、独立思考能力、科研能力和创新意识。这种科研为导向反哺教学的教育模式针对半导体物理教学内容给出了具体优化措施,通过让学生参与科研实践,既能满足学生更好地理解半导体物理课程的重要概念和原理,掌握课堂知识,取得非常好的教学效果,又能够带给他们前沿知识,激发他们的学术兴趣和创新能力,为未来从事半导体物理学领域的研究和创新打下坚实基础。

关键词 半导体物理;科研导向;反哺教学;科研工具;教学改革

THE EDUCATIONAL MODEL OF SCIENTIFIC RESEARCH-ORIENTED TEACHING APPLIED IN THE TEACHING REFORM OF SEMICONDUCTOR PHYSICS COURSE

ZHAO Jiang

(College of Integrated Circuit Science and Engineering, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing, Jiangsu 210023)

Abstract The knowledge points of semiconductor physics course are relatively intricate and abstract. Traditional classroom teaching methods can no longer meet the needs of students. The education model of research-oriented feedback teaching provides a new approach for the teaching reform of semiconductor physics course. This educational model emphasizes the integration of scientific research and teaching, achieving the integration of “teaching and scientific research”. It fully utilizes the foundational knowledge and emerging research tools in semiconductor physics course, aiming to cultivate students’ initiative, independent thinking ability, research skills, and innovation consciousness. This scientific research-oriented teaching model provides specific optimization measures for the teaching content of semiconductor physics. By involving students in scientific research practices, it not only helps them better understand the important concepts and principles of semiconductor physics, master classroom knowledge, and achieves excellent teaching results, but also exposes students to cutting-edge knowledge, stimulates their academic interests and innovative potential, and lays a solid foundation for

收稿日期: 2023-07-10

基金项目: 江苏高校品牌专业建设工程资助项目(TAPP);国家自然科学基金项目(51604157)。

作者简介: 赵江,南京邮电大学集成电路科学与工程学院副教授,jzhao@njupt.edu.cn。

引文格式: 赵江. 科研为导向反哺教学的教育模式用于半导体物理课程的教学改革[J]. 物理与工程, 2024, 34(1): 67-72.

Cite this article: ZHAO J. The educational model of scientific research-oriented teaching applied in the teaching reform of semiconductor physics course[J]. Physics and Engineering, 2024, 34(1): 67-72. (in Chinese)

their future research and innovation in the field of semiconductor physics.

Key words semiconductor physics; research-oriented; feedback teaching; research tools; teaching reform

教育部在《关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见》中提到推动科研反哺教学,强化科研育人功能,推动高校及时把最新科研成果转化为教学内容,以高水平科学研究提高学生创新和实践能力,旨在将科研与教学更加有机地结合起来,促进学生深入参与科学研究,通过推动科研为导向反哺教学的教育模式,提升本科教育的质量和水平^[1,2]。我院微电子科学与工程专业作为国家级一流本科专业建设点,是推动学校“双一流”建设的重要措施之一。一流本科专业教育需要从课程设置、教学质量、实践教学等多个方面入手,为学生提供优质的教育资源和全面的发展机会,培养具有科研素养和创新精神的高级复合型人才^[3]。半导体物理作为微电子科学与工程专业的核心课程,涉及多个学科的交叉,包括量子力学、固体物理、电子学等,需要掌握较多的概念和理论,使得半导体物理的知识点相对烦琐且内容抽象,于初学者来说可能较为晦涩难懂。

1 传统的半导体物理课程教学的缺陷

1) 理论与实践脱节

传统的半导体物理课程通常过于注重理论知识的传授,而忽视了实际应用和实验的重要性。学生可能只是被灌输了大量的物理概念、理论和公式,但很难将其与实际情况联系起来。

2) 缺乏互动与实践机会

传统的半导体物理教学以教师为中心,学生主要是被动接受知识。缺乏互动与实践机会限制了学生的参与度和思维能力的培养。

3) 更新速度较慢

半导体技术快速发展,新材料、新器件和新工艺层出不穷,但传统的半导体物理课程内容更新滞后,无法及时跟上最新的研究进展和产业需求。

4) 缺乏系统性和综合性

传统的半导体物理课程通常分散地介绍半导体物理的各个方面,并缺乏将这些方面进行有机结合和系统性讲解的能力。

5) 缺乏实际应用导向

半导体物理课程应该更加注重培养学生解决

实际问题的能力,如器件设计、性能优化和制造工艺等方面的能力,但传统的半导体物理课程对此的关注度不足,通常忽略了最新的科研成果和应用前景,不利于学生拓展视野和提升个人能力。

2 以科研为导向的半导体物理课教学探索

针对传统的半导体物理课程教学的不足,笔者结合近年来的科研经历,以科研为导向反哺教学,探索半导体物理课程教学改革,来满足学生的学习需求和未来科研领域的需求。

2.1 注重理论计算

半导体物理课程的理论知识是非常重要的,它是做好实验和解决问题的基础。在教学过程中,我们可以注重理论的建立,通过物理模型的分析 and 计算,让学生深入理解半导体物理学的基本概念和性质。例如,半导体物理学中的禁带宽度是一个重要的参数,它决定了半导体材料的电学特性和应用性能。在教学中,我们通过成熟而强大的量子力学开源软件 QUANTUM ESPRESSO^[4],准确地计算Ⅲ-V族化合物砷化镓半导体的能带结构、状态密度等物理量。图1是开源软件 QUANTUM ESPRESSO 构建的砷化镓半导体的晶体结构,通过计算得到砷化镓的能带结构和状态密度分布,如图2所示。

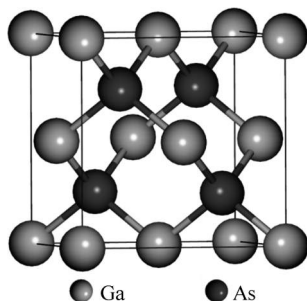


图1 半导体砷化镓晶体的闪锌矿晶体结构

通过软件 QUANTUM ESPRESSO 构建砷化镓半导体的晶体结构,可以在半导体物理课程方面获得以下收获:

(1) 晶体结构理解。通过构建砷化镓晶体的闪锌矿结构,可以深入理解晶体的空间排列、晶胞

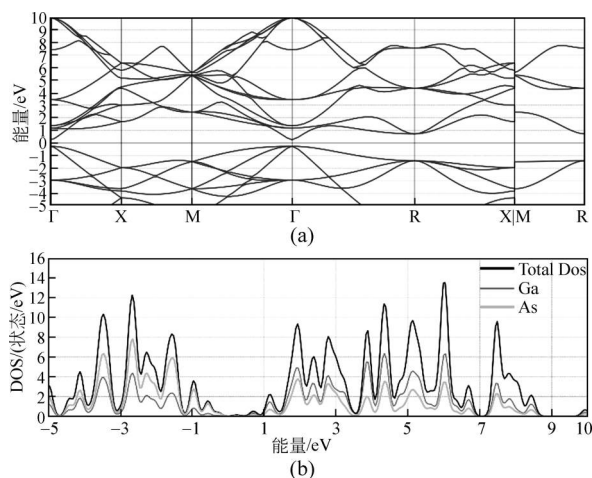


图2 砷化镓半导体的计算结果
(a) 能带结构; (b) 状态密度

参数的设置和原子间的相互作用。了解原子的空间排列和晶格结构对半导体的性质有重要影响。

(2) 能带结构和状态密度。通过分析砷化镓晶体的能带结构,可以探索半导体材料的能级分布和能带间隙,学生可以通过研究能带图、能带边缘以及禁带宽度等参数,深入理解半导体材料禁带宽度的概念以及能带理论的基本原理。同时,通过计算砷化镓晶体的状态密度,学生还可以理解能量与态密度之间的关系,有助于理解材料的导电性和禁带宽度等关键特性。

(3) 缺陷和杂质效应。通过软件构建晶体结构时引入缺陷或杂质原子,可以研究和模拟杂质、缺陷对半导体性能的影响。例如,可以探索掺杂引入的额外能级、缺陷态的形成以及它们对能带结构和状态密度的影响。

(4) 计算方法和工具。使用 QUANTUM ESPRESSO 这样的计算软件,学生能够熟悉量子力学计算的基本原理和方法,了解计算模型和数值计算技术的应用,以及如何解释和分析计算结果,在此基础上可以拓展到其他半导体材料的计算。

综上所述,使用开源软件 QUANTUM ESPRESSO 计算半导体材料的能带结构等内容,反哺教学有利于科研与教学之间的互动和交流,可以增强学生对半导体物理相关知识点的理解和掌握,也为半导体物理学科学研究提供了新的思路 and 工具。

2.2 重视实践操作

半导体物理课程中,实践操作是非常重要的

组成部分。为了让学生更好地理解课程内容,我们可以引入一些实验仿真项目,如太阳能电池的核心结构 pn 结的电流-电压 (I - V) 特性测量等。这些实验仿真可以让学生亲身体验半导体器件的性能,掌握实验仿真操作技巧和数据处理方法。

澳大利亚新南威尔士大学开发的开源太阳能电池建模程序 PC1D 可以对基于硅、锗、砷化镓、磷化铟等半导体的太阳能电池的关键因素进行建模和仿真^[5]。PC1D 可以通过改变参数如体内掺杂水平、温度、发射极掺杂浓度变化、背面场和载流子寿命等来可视化太阳能电池的性能,并以图形格式提供太阳能电池器件的性能,如能带、载流子迁移率、 I - V 曲线等。笔者在教学中使用 PC1D 模拟硅太阳能电池。首先,需要在 PC1D 程序中建立所需的硅太阳能电池 pn 结器件结构模型,图 3 给出了 PC1D 构建的硅太阳能电池模型的原理图;其次,对器件的物理参数进行设置,表 1 给出了 PC1D 程序中太阳能电池所涉及的材料和工艺参数具体数值;最后,在完成上述设置后,可以运行 PC1D 进行模拟计算。PC1D 将使用数值方法求解连续性方程等,得到 pn 结的能带曲线、载流子浓度分布、载流子产生与复合曲线、扩散长度、 I - V 特性曲线等信息,如图 4 所示。

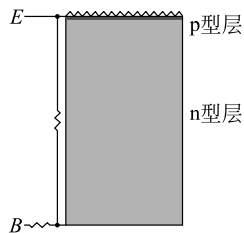


图3 PC1D 构建的硅太阳能电池模型

表1 PC1D 程序中的材料和工艺参数

材料/工艺	参数	数值
单晶硅	厚度	$300\mu\text{m}$
	禁带宽度	1.124eV
	面积	100cm^2
	介电常数	11.9
植绒(金字塔型)	高度	$3\mu\text{m}$
	角度	54.74°
扩散(p型)	掺杂浓度	$1.513 \times 10^{-16}\text{cm}^{-3}$
	电阻	$0.9997\Omega \cdot \text{cm}$

通过 PC1D 程序仿真硅太阳能电池 pn 结,可

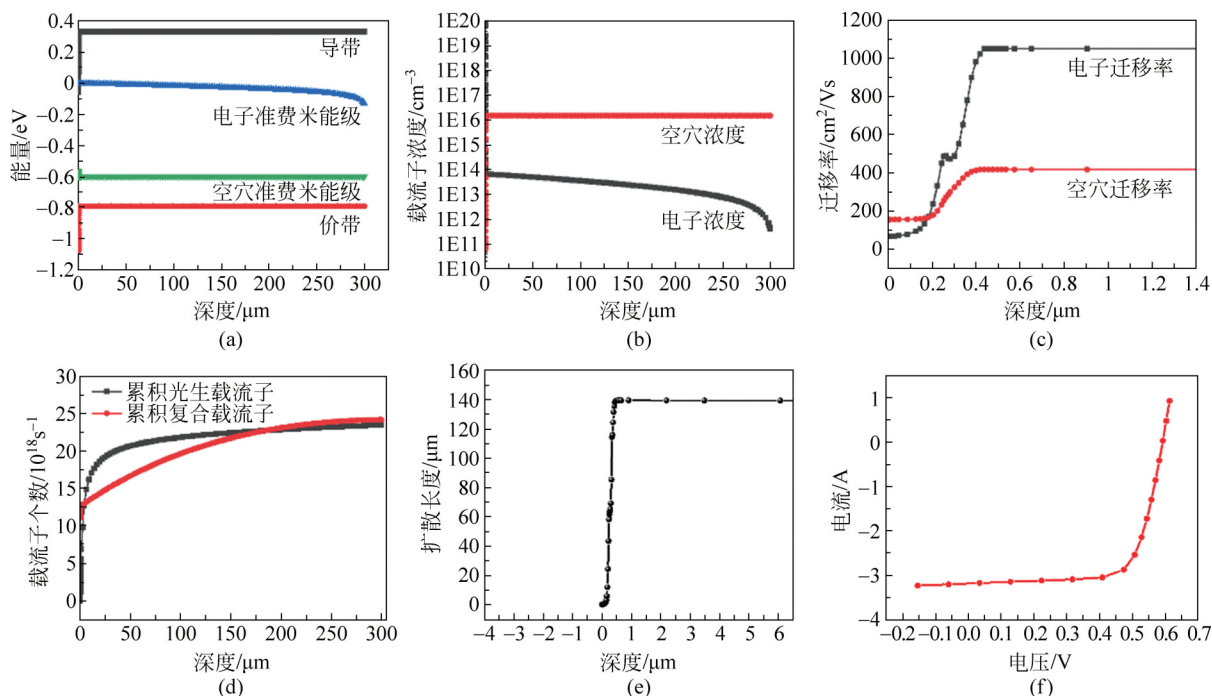


图4 PC1D 仿真的硅太阳能电池结果

(a) 能带曲线; (b) 载流子密度曲线; (c) 载流子迁移率曲线; (d) 载流子产生和复合曲线; (e) 扩散长度; (f) 器件 $I-V$ 曲线

以在半导体物理课程方面获得以下收获:

(1) pn 结形成和原理。通过 PC1D 仿真, 学生可以了解 pn 结形成的基本原理。可以观察 p 型和 n 型硅材料的分布, 以及随着掺杂浓度的变化, pn 结的形成过程。

(2) 太阳能电池结构。通过 PC1D 仿真, 可以深入了解典型硅太阳能电池的结构和工作原理。学生可以理解 pn 结、p 型和 n 型硅材料的特性, 以及光生载流子的产生和漂移过程。

(3) 光伏效应。通过 PC1D 仿真, 可以研究太阳能电池在光照条件下的行为, 包括光吸收、载流子产生和分离。学生可以探索不同波长和强度的光对电池性能的影响, 以及优化光吸收层的厚度和掺杂浓度等因素。

(4) 载流子的产生和漂移。通过 PC1D 仿真, 学生可以观察到光吸收时如何产生电子-空穴对, 理解载流子的产生和复合过程, 并了解载流子在 pn 结中的漂移过程。

(5) $I-V$ 特性。PC1D 仿真可以提供太阳能电池的 $I-V$ 特性曲线。学生可以分析曲线的形状和特征, 如开路电压、短路电流、填充因子等。这有助于理解太阳能电池的性能参数以及优化设计的方法。

(6) 输入参数的影响。学生可以使用 PC1D 仿真中的不同参数, 如掺杂浓度、载流子迁移率等, 从仿真中获得直观的视觉效果, 加深这些输入参数对 pn 结形成、载流子产生和漂移等基本原理、pn 结导电性和电流电压特性之间的关系。

综上所述, 通过 PC1D 仿真硅太阳能电池 pn 结等内容, 学生可以将半导体物理课程中的理论知识应用于实际的电池设计和性能优化中, 反哺教学有助于加深对半导体物理原理的理解, 并培养学生的实践动手能力、创新思维和团队协作意识。

2.3 引入前沿研究

半导体物理作为一个高科技领域, 其研究前沿也在不断推进。引入前沿研究来启发学生的思维 and 创新能力, 加深对半导体物理学的理解 and 应用, 是培养学生科研能力的重要环节^[6]。笔者认为可以通过以下几种方式引入前沿研究:

(1) 研究论文讨论。利用课堂空余时间, 组织研究论文讨论会, 让学生阅读并分析最新的前沿论文。学生可以分享自己对文献的理解、提出问题, 并进行深入的讨论和辩论。这样的活动有助于学生掌握科学写作和批判性思维的技巧, 激发他们在前沿研究领域的创新思维。

(2) 科研实习和交流。鼓励学生积极参与老师的科研项目,让学生接触到真实的前沿研究项目,并与老师交流和合作,提升他们的实践能力和创新意识。

(3) 科研竞赛和会议。鼓励学生参加各种学科竞赛和线上学术会议,积极与其他研究者交流。这样的经历可以激发学生的创造力和竞争意识,同时也可以扩展他们的视野,了解更广泛的前沿研究领域。

通过引入前沿研究,学生可以接触到最新的半导体领域科学发展动态,激发他们的学术兴趣和创新意识。

3 科研为导向反哺教学的教育模式的优点

1) 培养积极的学术态度

科研为导向反哺教学的教育模式,有助于学生形成积极的学术学习态度和行为习惯,提高科研意识和独立思考能力。通过科研实践探究,学生能够更好的理解和掌握半导体物理学科,同时也能加深对于学科研究的理解和认识,提高学生的实践能力,从而有助于学生树立对于半导体知识的热爱、对于未知领域的好奇心以及对于持续学习的信心。

2) 加强学生思考能力

科研为导向反哺教学的教学模式,能够培养学生针对问题的观察、分析、把握、解决及提出新问题的能力^[7],尤其是在实践环节中,通过多方面的探究及数据的统计和分析,从而加深学生对于学科及专业领域的熟悉程度,并能在实践中加强学科知识的联系和整合。

3) 加强学生团队合作意识

在科研为导向教学模式中需要进行大量的跨学科合作,涉及到很多不同的学科知识。通过与同学们的合作,学生在实践中能够真正实现知识的整合和交流。这也培养了学生的团队合作意识、沟通能力、领导能力以及决策能力等。

4 科研为导向反哺教学的教育模式的反馈

教学改革是一个动态过程,需要持续地进行反馈和改进,学生期末总评成绩可以作为评估教学改革效果的依据之一。期末总评成绩由平时成

绩(40%)和期末考试成绩(60%)组成,其中平时成绩从上课出勤率、上课回答问题、作业完成情况、科研分组讨论等几方面进行考核,期末考试成绩来自闭卷考试的分数。考试试卷紧扣教学大纲,题型涉及半导体物理专业名词解释、简答、画图分析和计算分析,难度中等,且每年基本保持一致,具有较好区分度。图5给出了近三年半导体物理期末总评成绩分布图。经过对比分析可知,近三年来,80分以上的学生在总评成绩和期末成绩中所占比例逐渐增加,而60分以下的学生在期末成绩中的比例逐渐减少。同时,近三年总评成绩和期末成绩的平均分也呈现稳步增长的趋势。这表明科研为导向反哺教学的教学方法能够使得学生更好的理解和掌握半导体物理基本知识,并应用于解决较为复杂的问题。由于笔者从2021—2022学年才开始初步探索科研为导向的半导体物理课教学改革,并将科研过程用于平时作业,学生刚开始不太适应(因疫情改为线上教学),导致这一学年平时成绩平均分略低于其他两个学年。全面实施科研为导向反哺教学的模式后,2022—

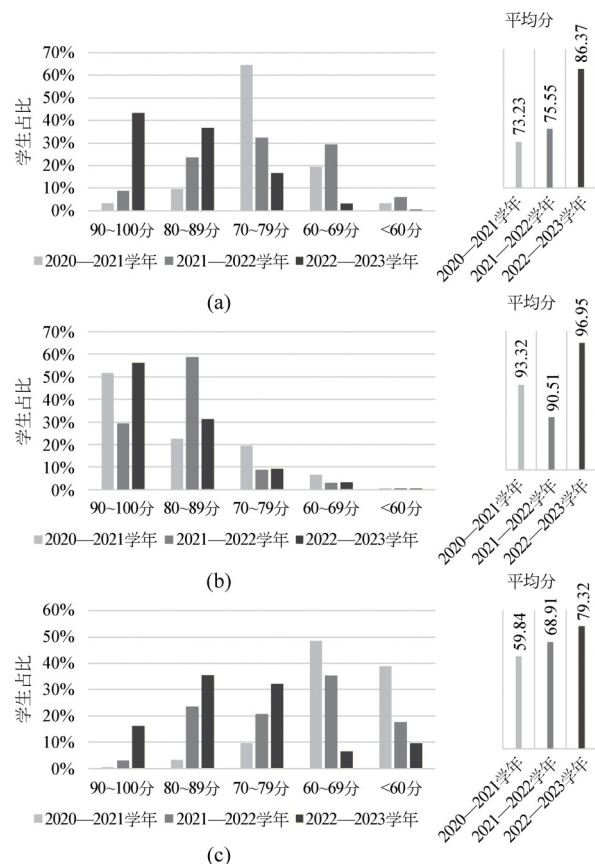


图5 近三年半导体物理期末总评成绩分布图

(a) 总评成绩; (b) 平时成绩; (c) 期末成绩

2023 学年,由于学校加大了大学生科技创新训练计划(STITP)立项的资助强度,多数学生能够参与到老师的科研项目中,这一举措客观上促进了科研为导向反哺教学的开展,学生基本上适应这种模式,平时成绩也随之增长。这些结果表明,科研为导向反哺教学的教学模式取得了非常好的教学效果。

此外,半导体物理课程的科研为导向反哺教学的教育模式,也从侧面影响了学生参与科研的热情。我院微电子科学与工程专业学生在大学生创新训练计划、学科竞赛和发表论文方面取得了优异成绩,获奖数量、层次以及学生覆盖度显著提升。据不完全统计,近两年来,在省级以上各类学科竞赛获奖 90 余项、获批校级及以上大学生创新训练计划批准立项 60 余项;近百人次学生积极参与了各类学科竞赛与大学生创新训练计划;十几次发表学术论文。学生创新水平、获奖层次和论文档次明显提高,成绩斐然。

5 结语

总之,科研为导向反哺教学的教育模式将教学与研究有机结合,充分利用半导体物理课程中的基础知识和新兴技术工具,旨在培养学生的创新、探究和问题分析能力,使他们熟练掌握课程内容,并参与科研实践活动,为实践提供创新思路,为研究提供科学实践经验。这种教育模式强调激发学生的学习兴趣、培养探究思维、鼓励创新创造和培养社会责任感,不仅注重知识的学习和掌握,更是一种新的人才培养方式。学生在这个过程中扮演主角的角色,通过科研实践能够更好地掌握课堂知识,并在探究和实践中积极思考、克服困难、发现问题、提出新解决方案,并通过实践验证这些方案的可行性。

参 考 文 献

- [1] 教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量的意见[EB/OL] (2019-10-12) [2023-07-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-10/12/content_5438706.htm.
Opinions of the Ministry of Education on deepening the reform of undergraduate education and comprehensive improvement of the quality of talent cultivation[EB/OL]. (2019-10-12) [2023-07-10]. https://www.gov.cn/xinwen/2019-10/12/content_5438706.htm. (in Chinese)
- [2] 钱娟, 刘洋, 刘圣彬. 新文科视角下基于科研项目牵引的经济学类课程研究型教学模式探索与实践[J]. 高教论坛, 2023(2): 47-54.
QIAN J, LIU Y, LIU S B. Exploration and practice of research-based teaching model in economics courses from the perspective of new liberal arts [J]. Higher Education Forum, 2023(2): 47-54. (in Chinese)
- [3] 张节松, 伯娜. 一流专业建设背景下本科教学质量提升路径综合探究[J]. 宿州学院学报, 2023, 38(4): 74-79.
ZHANG J S, BO N. Exploration and comprehensive investigation of undergraduate teaching quality improvement path under the background of first-class professional construction [J]. Journal of Suzhou University, 2023, 38(4): 74-79. (in Chinese)
- [4] GIANNOZZI P, BARONI S, BONINI N, et al. QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials[J]. Journal of Physics: Condensed Matter, 2009, 21: 395502.
- [5] SINGH B, GUPTA V. Modelling and simulation of silicon solar cells using PC1D[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 54(3): 810-813.
- [6] 孙鹏岗, 苗启广, 万波, 等. 人才培养“西电现象”的新征程—以“拔尖计划 2.0”计算机拔尖基地建设为例[J]. 西安电子科技大学学报(社会科学版), 2022, 32(1): 113-119.
SUN P G, MIAO Q G, WAN B, et al. The new journey of talent cultivation “Xi Dian phenomenon”—Taking the construction of “top-notch plan 2.0” computer elite base as an example[J]. Journal of Xi'an University of Electronic Science and Technology (Social Sciences Edition), 2022, 32(1): 113-119. (in Chinese)
- [7] 刘玉荣, 胡荣, 王锦标, 等. 基于高校科研平台反哺教学的探索与实践[J]. 高教学刊, 2022, 8(34): 91-94.
LIU Y R, HU R, WANG J B, et al. Exploration and practice of feedback teaching based on university research platforms[J]. Journal of Higher Education, 2022, 8(34): 91-94. (in Chinese)

[1] 教育部关于深化本科教育教学改革全面提高人才培养质量