

工科材料类专业固体物理教材改革探索

石锋 张灵翠 徐越 沈燕 赵金博

齐鲁工业大学(山东省科学院)材料科学与工程学部

DOI:10.12238/jief.v6i2.7114

[摘要] 现在很多传统《固体物理学》教材在内容设置方面存在理论性强、内容深奥繁杂、学习重点不明晰等不足;且教学内容多数按照固体物理学本身的发展顺序进行编排,各章节之间缺少联系,知识点跳跃。采纳上述理论性较强的教材使得“教”和“学”过程中存在极大的难度,特别是涉及到一些抽象的定义和复杂的数学推导过程,甚至使部分学生产生了厌学情绪。经过多年的教学实践,我们对固体物理相关内容进行重新设计和编排,以“固体电子论”为主线,将离散的知识联系起来;我们删除深奥繁琐的公式推导,突出概念和事件的来龙去脉和物理意义,使得教学内容形成了一个完整的物理图像。这样编撰的新教材可兼顾知识传承、学生能力和素质培养三个方面,将知识、能力和素质进行有机融合,有益于培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维,极大地提高了学习效果。

[关键词] 固体物理;教材;教学内容更新;固体电子论;教学效果

中图分类号: G40 文献标识码: A

Exploration on teaching material reform of solid state physics for engineering materials major

Feng Shi Lingcui Zhang Yue Xu Yan Shen Jinbo Zhao

School of Material Science and Engineering, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences)

[Abstract] Now many traditional“Solid state physics” teaching materials in the content set up theoretical, profound and complex content, learning focus is not clear and so on; And most of the teaching contents are arranged according to the development order of solid state physics, the lack of links between the chapters, knowledge jump. The adoption of the above-mentioned theoretical teaching materials makes the process of“Teaching” and“Learning” extremely difficult, especially involving some abstract definitions and complex mathematical derivation process, some students even have a weariness of learning. After many years of teaching practice, we re-design and arrange the contents of solid state physics, with“Solid electron theory” as the main line, to link discrete knowledge points; We eliminated the esoteric and cumbersome formula derivation, and emphasized the In & Out and physical significance of concepts and events, making the teaching content a complete physical picture. The new textbooks compiled in this way can integrate knowledge, ability and quality organically, taking into account the three aspects of knowledge transmission, students' ability and quality cultivation, it is beneficial to train students' comprehensive ability and advanced thinking in solving complex problems, and greatly improves the learning effect.

[Key words] Solid state physics; Teaching material; Update of teaching content; Solid state electron theory; Teaching effect

传统《固体物理学》教材存在“教”+“学”的难题,这是因为教材理论性强、内容深奥复杂、知识点之间跳跃,为此作者基于多年的教学经验,提出了新教材改革的思路:实践表明新的教改思路取得了良好的教学效果。

1 固体物理学与《固体物理学》课程

固体物理学是研究固体的结构和物理性质的一门基础理论

学科,是物理学中内容极丰富、应用极广泛的分支学科。固体物理学的研究对象是固体物质,由于固体物理学学科的内在因素,相关研究论文已占物理学研究论文的三分之一以上。随着20世纪七八十年代凝聚态物理学的发展,固体物理学已经逐渐成为凝聚态物理学的重要分支。随着现代科学技术的飞速发展,固体物理学领域研究的内容越来越丰富,到目前为止,全世界有超过半

数的物理工作者从事固体物理学的研究, 研究手段越来越多样化, 研究深度和广度也都大大拓展。

相对于固体物理学这门学科, 《固体物理学》课程则是当代许多重要技术的源泉和基础, 是微电子技术、光电子技术、能源技术、凝聚态物理等工科材料类相关专业的重要基础主干课程, 是研究固体的性质、它的微观结构及其各种内部运动, 以及这种微观结构和内部运动同固体的宏观性质的关系的课程。《固体物理学》是人才基础能力培养的重要保障, 是学生理解固态物质物理性质的根基, 通过本课程的学习, 学生可以掌握从事无机非金属材料、材料物理甚至凝聚态物理等相关专业固体物理学的基本知识, 了解该领域的一些最新进展, 还能培养学生的科学素养。

2017年2月以来, 教育部积极推进“新工科”建设, 探索领跑全球工程教育的中国模式和中国经验。在“新工科”背景下, 未来新兴产业和新经济需要的是实践能力强、创新能力强、具备国际竞争力的高素质复合型新工科人才, 对学生利用理论知识解决实际问题的能力要求更高。事实上, 在培养学生的探索精神和创新意识等方面, 《固体物理学》课程具有其他课程不能替代的重要作用; 可提高学生独立分析和解决问题的能力, 对于工科材料类相关专业本科生和研究生的培养具有重大的意义, 在国内外各大高校广受重视^[1-5]。

2 《固体物理学》课程相关教材国外发展状况

国际上, 哈佛大学、斯坦福大学、剑桥大学、加州大学伯克利分校、康奈尔大学、加州理工学院等著名高校都开设《固体物理学》课程。而国内, 包括清华大学、北京大学、中国科技大学、复旦大学、北京航空航天大学、大连理工大学、吉林大学、山东大学、同济大学、东南大学等包括众多双一流高校也都同中南大学一样, 开设了《固体物理学》课程。

1940年, 杰出的物理学家和教育家、固体物理学发展中的一个主要参与者、1963年诺贝尔物理学奖得主尤金·维格纳的博士生、曾任伊利诺伊大学教授兼物理系主任、美国物理研究委员会主席、美国物理学会主席、美国国家科学院院长和纽约洛克菲勒大学校长的弗雷德里克·塞茨(Frederick Seitz)的专著《近代固体理论》(The Modern Theory of Solids)促成了现在所称的凝聚态物理学和材料科学中基础与应用科学家之间的跨学科合作, 为以后的固体物理学教材提供了样板。之后, 伴随着固体物理学的迅猛发展, 塞茨与大卫·特恩布尔(D. Turnbull)从1955年开始, 几乎每年都要出一本《固体物理学——研究与应用的进展》, 以便收集各分支最新进展的综述, 一直持续到2008年塞茨去世为止。固体物理学中著名的维格纳-塞茨原包(W-S原包), 就是他在普林斯顿大学跟随维格纳攻读博士学位期间的成果之一; 他也为固态物质的现代量子理论奠定了基础。

1953年, 曾经荣获奥斯特奖章的加州大学伯克利分校查尔斯·基泰尔教授(美国国家科学院院士、美国艺术与科学学院院士)编撰出版了《Introduction to Solid State Physics》教科书, 自70多年前出版以来, 该书一直是物理学专业的标准固体

物理教科书^[6]。该书基本上涵盖了现代固体物理学的理论基础和重要课题, 用数学的方式直接给出定律、概念, 说明这些定律的适用条件, 给出结果和结论; “重”物理、“轻”数学, 每一个新版本, 教材内容始终随学科发展而更新, 这是本书长盛不衰的一个根本原因。另外, 该书在结构上更注重固体物理学学科的整体性, 淡化基本理论与专题之间的划分, 这也是一大特色。该书以及类似该书的教科书均被称为基泰尔体系教材。

1976年, 康奈尔大学的世界著名理论物理学家Neil W. Ashcroft教授(美国国家科学院院士)与物理学荣誉教授N. David Mermin合著的《Solid State Physics》, 用物理的方式建立简单而容易接受的模型, 得到不完善的定律并找出问题所在, 修正模型、再演绎更准确的定律, 成为了固体物理学教科书的黄金标准。该书以及类似该书的教科书均被业内称为Ashcroft体系教材^[7]。

上面两本书是国外学者编写的具有代表性的《固体物理学》教材——前者基泰尔体系注重结论, 适合于科学研究但是不太有利于教学; 后者Ashcroft体系注重过程, 比较适合教学, 但是内容有足够的理论深度, 学习难度较大。

国外比较有名的《固体物理学》教材还有伊利诺伊大学H. Ehrenreich与弗雷德里克·塞茨和大卫·特恩布尔等于1970年编著的经典教材《Solid State Physics》, 多次被引用; 1971年美国国立大学拉皮德城校区的James D. Patterson和隶属于美国宇航局的位于佛罗里达卡纳维拉尔角的肯尼迪航天中心的Bernard C. Bailey等编著的《Solid-State Physics: Introduction to the Theory》非常经典, 为以后的教材提供了样板。该书首先介绍晶体结合和晶体结构, 然后介绍晶格振动和热特性, 再次介绍势场中的电子, 随之介绍电子的相互作用和晶格振动, 随后介绍各种材料, 如金属、合金、半导体、磁性材料、超导电性、电介质和铁电体以及固体的光学特性等; 但是该书的缺点在于没有从最简单的核外价电子的运动讲起, 导致起点难度有点大, 要求学生一开始就要有较强的空间想象能力。

1976年, 美国德克萨斯大学Michael P. Marder编著的《Solid State Physics》以及1985年伦敦大学学院J. S. Blakemore编著的《Solid State Physics》, 其内容都包含了很多当时的固体物理新进展。德国于利希研究中心的H. Ibach和H. Lüth等编著的教材《Solid State Physics: An Introduction to Principles of Materials Science》, 以实验物理学家的视角展示了固体物理, 该书自1981年开始, 总共再版了7次; 最后一次再版是在2009年。

2000年, 先后任教于帕维亚大学和比萨大学的意大利人G. Grosso和G. P. Parravicin编著的《Solid State Physics》, 信息量丰富, 涵盖面广, 推导细致, 适合自学; 有人称此书是到那时为止最好的《固体物理学》教材。此外, 2009年美国匹兹堡大学David Snoke教授编著的教材《Solid State Physics, Essential concepts》起点低, 简单易学; 比如第一章就以一种极其自然直观的方式引入了能带的概念, 图文并茂; 该书内容丰富, 既有最

基础的固体物理内容,也有比较现代的凝聚态理论的主题;所有的模型都通过最简单的数学推导得出,思路清晰。

3 《固体物理学》课程相关教材国内发展状况

在我国,“核司令”程开甲1957年出版了我国第一部《固体物理学》教科书,对中国固体物理的教学与科研起到了重要作用。黄昆1966年出版了他的《固体物理学》著作,属于基泰尔体系,直接给出各种结论及其推导,最为经典。

我国众多高校十分重视《固体物理学》教科书的编写,包括清华大学、北京大学、中国科技大学、复旦大学、北京航空航天大学、中南大学、大连理工大学、吉林大学、山东大学、同济大学、东南大学等包括众多双一流高校在内的很多大学都在积极编撰适合于本校学生使用的固体物理教材,至今不下50多种。

以中南大学为例:1965年该校金属物理本科专业首先开设《固体物理学》课程;1985年成为物理学院应用物理本科生的专业基础课;此后《固体物理学》课程先后在该校电子科学与技术、应用物理、微电子学、材料物理及冶金等材料类相关专业开设,属于重要的专业基础课,受到该校的高度重视。

现在经常使用的《固体物理学》教材主要包括^[1,2,8-19]:(1)费维栋主编的《固体物理学》,2014年由哈尔滨工业大学出版社出版;(2)胡安、章维益主编的《固体物理学》,2011年由高等教育出版社出版;(3)陆栋、蒋平主编的《固体物理学》,2011年由高等教育出版社出版;(4)孙会元主编的《固体物理基础》,2010年由科学出版社出版;(5)王奉衿主编的《固体物理教程》,2008年由山东大学出版社出版;(6)吴代鸣主编的《固体物理基础》,2007年由高等教育出版社出版;(7)陈长乐主编的《固体物理学》,2007年由科学出版社出版;(8)朱建国等主编的《固体物理学》,2005年由科学出版社出版;(9)陆栋、蒋平、徐至中主编的《固体物理学》,2003年由上海科学技术出版社出版;(10)阎守胜主编的《固体物理基础》,2000年由北京大学出版社出版;(11)黄昆原著和韩汝琦改编的《固体物理学》,1998年由高等教育出版社出版;(12)顾秉林、王喜昆主编的《固体物理学》,1989年由清华大学出版社出版;(13)方俊鑫、陆栋主编的《固体物理学》,1981年由上海科学技术出版社出版。

随着学科发展和人才需求形式的变化,《固体物理学》课程体系和人才培养模式也应不断完善和发展,以适应专业特点和新形势下的人才培养目标。与之相应,国内新的《固体物理学》教材还在不断推陈出新,以便适应不同发展时期、不同学校层级、不同专业方向以及不同学生水平的要求。

4 传统教材的优缺点

除了阎守胜的《固体物理基础》和顾秉林、王喜昆的《固体物理学》等少数教材属于Ashcroft体系之外,多数教材属于基泰尔体系;这些书籍用于科研资料很合适,作为教材有点牵强。其中最经典也是最权威的是1998年高等教育出版社的、由曾获中国科技最高奖的黄昆院士原著的《固体物理学》,是由韩汝琪

在黄昆原著的基础上改编而成的,总结了二人长期的教学经验,在改写过程中力图保持原著概念准确、讲解透彻的特点,对固体物理学中的一些基础部分做了必要的补充,内容更加丰富;但它的难度仍然很大,里面的很多物理符号与现在普遍使用的大相径庭;做科研参考资料尚可,做教材难度极大。

现在很多《固体物理学》教材在内容设置方面存在理论性强、内容深奥繁杂甚至重复、学习重点不明晰等不足。一般的《固体物理学》教材内容虽然基本覆盖了本科生和研究生的知识面,但多数按照固体物理学学科本身的发展顺序进行编排;各章节之间缺少联系,知识点跳跃,彼此之间的过渡不明显,碎片化严重,就好像散落的珍珠一样,缺少一条主线把它们串起来;很多学生直到课程结束也不知道为什么是这样的安排,这对初次接触固体物理的学生来说,感到很困惑,摸不着头脑。教材中复杂多变的内容设置,增加了学习难度,导致教学效果难以保证。

传统上,《固体物理学》教材包含了很多晦涩难懂的专业定义,复杂的三维空间想象与变换和烦琐的理论推导,需要以《高等数学》、《热力学与统计物理》尤其是《量子力学》等理论性很强的课程为先导。我们所在的齐鲁工业大学是一所典型的工科院校,材料专业课程往往更偏重材料的工艺、性质和性能,这些课程往往重工轻理;上述先导课程均没有学过,学生的数理基础薄弱,客观上造成了工科材料类专业的学生并未做好学习固体物理的准备,学生的知识基础和知识结构以及认知特点并没有达到固体物理学习的要求,难以满足传统的固体物理课程学习的需要。类似这样的情况在很多工科院校都存在;故而,采纳上述理论性较强的教材使得“教”和“学”过程中存在极大的难度,特别是涉及到一些抽象的定义和复杂的数学推导过程,甚至使部分学生产生了厌学情绪。如果不能很好的学习并掌握固体物理学相关知识点,那么针对他们的人才培养水平也可想而知;尤其是,学生将来在工作、科研中很难从理论深度去研究材料的结构性能关系,不利于研发性能优异的先进材料^[21-25]。

总之,当前大多数《固体物理学》教材在内容设置中有以下不足:(1)存在众多的概念、公式、模型、近似,各个结论在历史上出现的顺序是随机的,知识点零散,碎片化严重,不易把握彼此间的关系,学生直到课程结束也不明白为何是这样的设置,这就是关注结论不注重过程带来的弊端;(2)大量的公式和推导不仅仅涉及到物理知识,也涉及到繁琐的数学运算,这对数理基础薄弱的工科学生来说的确是个难点,不太容易接受。(3)材料专业学生将来从事的材料方面的科研和工作,并非专门研究理论物理或量子力学,他们没有必要掌握这些知识尤其是推导过程,他们对固体物理知识点的需求也显然与物理学等专业有所不同,只要会运用相关公式和理论就可以,就好比人们只要会用计算机进行运算或工作即可,并不需要知道如何编程或计算机内部是如何运行的。还有,(4)由于固体物理学发展迅速,很多教材尚未完全反映最新的成果,最新的科技案例不

多,内容相对陈旧;(5)由于《固体物理学》属于基础理论课程之一,课程思政在相关内容中难以体现,不能完全满足一流课程建设的需要。

5 编撰新的《固体物理学》教材的必要性、可行性和原则

该课程具有知识点多、难理解、抽象性强等特点,因此仍采用传统的课程内容和教材,难以适应课程传授的要求和材料科学高素质人才培养的需求。这就需要在该课程的教学内容上进行调整,以培养具有扎实数理基础、良好材料研究素质以及较强适应能力的本科人才和更高层次人才的后备军。

事实上,固体物理学强调对基本概念、研究方法、物理图像及模型建立的理解,要求掌握这些基础知识并了解它们在各类技术中的应用。目前的《固体物理学》教材中的内容设置远不能适应新形势的需要。

在大力发展新工科的背景下,为了提升学生的创新能力和创新思维,适应日新月异发展的新科技的需要,有必要编撰出一本适合于工科材料类专业学生的《固体物理学》教材,从工程化要求出发,以“学以致用”为根本出发点,培养学生敏捷的思维、正确的判断、善于发现问题和善于思考问题的能力,将理论知识和实践能力融会贯通,使得学生可以将学到的理论知识运用到未来的工作和科研之中。为此,我们认为应当基于“新工科”创新理念,培养学生解决复杂问题的创新思维和综合能力,逐步推进课程改革,重新构筑与时俱进的教学内容;为适应工科材料类专业学生的认知特点,建设新的《固体物理学》教材,将理论知识与创新思维 and 实践能力相结合,实现知识传承、创新思维能力和科学素养的有机融合;最终在同类学校的相关专业中进行示范推广,让学生在数理基础薄弱的情况下也能获得更多的知识,并在将来的学习、科研和工作中运用学到的固体物理知识,真正做到“学以致用”,以促进创新型人才培养。这对于提高工科院校材料类专业学生利用理论知识解决实际问题的能力以及提升学生独立分析和独立思考的科学素养和创新思维具有十分重要的意义。

经过多年的固体物理教学,我们对工科材料类专业学生知识基础、知识结构和认知特点等进行深入调研和总结,深入了解工科学生的学业水平现状。对《固体物理学》教材进行了深入思考,分析调研了大量的兄弟院校的课程设置及相应教材情况,完成了教学素材和教学内容的资料搜集和整理工作,积累了大量的一手资料和数据,形成了自己对新的《固体物理学》教材建设和编撰的想法及原则。同时,就《固体物理学》课程而言,教学内容重构和教材建设需要在高层次上体现先进性,不仅应反映当前的科学水平,还必须着眼于未来的科学进展,使教材在保证具有扎实基础知识的前提下,充实学科的前沿内容。

针对工科院校材料类专业学生数理功底薄弱的特点,要对现有《固体物理学》教材中的教学内容进行统计和梳理,删除深奥繁琐的公式推导,突出概念和事件的来龙去脉和物理意义,对固体物理相关内容进行重新设计和编排,排除重复及不适合工科院校材料专业科研方向的知识点,从“学以致用”的原则更新、调

整和编排相关内容,这对于数理功底薄弱的工科学生十分重要。

根据学生知识基础、知识结构和认知特点并参照教学大纲,对现有《固体物理学》教材中的教学内容进行更新,在内容取舍、顺序安排、难度处理等诸多方面都经过反复斟酌;排除重复及不适合工科院校材料类专业科研方向的知识点,在尽量不涉及高等量子力学和复杂的数学处理的情况下,做到物理图像清晰、内容融会贯通,使学生能够掌握从事材料研究的专业基础知识^[26-28]。

6 教材改革实践

为了培养适应时代发展潮流的新型创新性人才,国内各大高校都对固体物理学的教学内容、教学方法等全方面进行了改革,但基于固体物理偏重理论、综合性强、内容抽象难学、体系过于庞大、学科发展快的特点,课程教学及课程学习对教师和学生均产生了较多不必要的压力。为了使得繁杂深奥的《固体物理学》课程变得易懂,我们设计教材的总体思路是探索《固体物理学》课程的工科化,让学生易于接受。

基于工科院校学生数理水平不高的特点,不拘泥于高深的理论,不纠结于繁琐复杂的公式推导,我们致力于寻找到一个主线,把像散落的珍珠一样的各个零散的知识点串联起来;同时突出对于各个概念之间优缺点的学习,有利于把握其物理意义。

固体物理是以固体中的原子和电子状态为根本出发点来讨论固体的物理性质的学科,要想学好固体物理学,研究分析原子中电子的状态和行为非常关键。为此,我们关于教材内容重构的主线就是固体电子论——首先讲解价电子的运动状态,引出了索末菲模型;随后讲解离子实排布,引出了晶体结构;然后讲授内层电子,引出了布洛赫定理和能带论;最后通过分析离子实的热振动,研究晶格动力学,从微观角度分析宏观问题。这就使得教学内容形成了一个完整的物理图像,使得学生容易明白各章节内容之间的关联性,了解教学内容的来龙去脉,易于掌握。这有别于传统的《固体物理》教材,是一个全新的教材编撰思路,满足了金课的“创新性”要求。

总之,固体的电子论是我们对教学内容更新的主线;教学内容与学生创新能力培养密切结合,我们对教材的改革实践方案正是基于此;这种内容设置使得学生易于学习和掌握知识点之间紧凑的关联性,对于整体上理解固体物理很有帮助。

基于上述思路,我们完成了20学年的《固体物理》课程教学任务,授课本科生和研究生近千人;期间不断进行课程建设和优化,从知识、能力、素养等方面设定人才培养目标,重构固体物理课程内容并建设新的教材,实现知识传承、创新思维能力和科学素养的有机融合。我们一直探索《固体物理》课程的工科化,通过重构固体物理课程内容,实现知识传承、创新思维能力和科学素养的有机融合,使得教学内容更加适合材料类专业学生的认知特点和知识结构,令数理基础薄弱的工科学生能获得更多的固体物理知识,使学生从一开始的畏之如虎到逐渐喜欢,学习态度和学习热情发生了根本性的改变,极大地提高了学习效果;课堂出勤率和作业率都达到95%以上,部分作业堪称典范。

[基金项目]

齐鲁工业大学(山东省科学院)2023年校级教研一般项目:“材料结构与性能课程内容改革与教材建设”(2023yb27);齐鲁工业大学(山东省科学院)2023年校级教研一般项目:“材料专业课程知识、原理、方法三维架构问题的统一——以《复合材料结构设计基础》为例解析课程教学”(2023yb25);齐鲁工业大学(山东省科学院)人才培养建设项目:“新工科背景下材料类专业《固体物理》课程内容重构与教材建设研究”。

[参考文献]

- [1]孙会元.《固体物理基础》[M].北京:科学出版社,2010.
- [2]黄昆,韩汝琪.《固体物理学》[M].北京:高等教育出版社,1988.
- [3]王玉玲,徐权,郝淑娟.材料学科专业的固体物理模块化教学改革探索[J].大庆师范学院学报,2016,36(6):135-137.
- [4]刘其军.固体物理学教材在中国的发展历程[J].大学物理,2015,34(2):51-55.
- [5]胡美华,毕宁,宿太超.材料学科的固体物理课程教学与探讨[J].教育教学论坛,2018,43(10):158-159.
- [6]C.Kittel,Introduction to Solid State Physics[M].Hoboken:John Wiley & Sons,Inc.,1976.
- [7]N.W.Ashcroft,N.D.Mermin,Solid State Physics[M].Philadelphia:Saunders College Publishing,1976.
- [8]韦丹.固体物理[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [9]冯端.固体物理学大辞典[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [10]费维栋.固体物理[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2014.
- [11]阎守胜.固体物理基础[M].北京:北京大学出版社,2011.
- [12]胡安,章维益.固体物理学[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [13]陆栋,蒋平.固体物理学[M].北京:高等教育出版

社,2011.

- [14]王奉衿.固体物理[M].济南:山东大学出版社,2008.
- [15]吴代鸣.固体物理基础[M].北京:高等教育出版社,2007.
- [16]陈长乐.固体物理学[M].北京:科学出版社,2007.
- [17]朱建国.固体物理学[M].北京:科学出版社,2005.
- [18]陆栋,蒋平,徐至中.固体物理学[M].上海:上海科学技术出版社,2003.
- [19]顾秉林,王喜昆.固体物理学[M].北京:清华大学出版社出版,1989.
- [20]周凯,刘斌,姚义俊.固体物理课程少学时教学探讨[J].科技创新导报,2013,(19):135-136,138.
- [21]马建立,付志粉.《固体物理》教学中学生科学素养的培养[J].科技视界,2015,(35):118.
- [22]周本胡,曾爱华,刘桂香.浅析固体物理学课程教学中研究性教学的实施[J].教育教学论坛,2019,29(7):212-213.
- [23]周本胡.微课、计算机模拟、科研三者结合对传统固体物理教学的促进作用[J].教育教学论坛,2020,(52):313-314.
- [24]王云锋.基于固体物理课程的研究性教学模式探讨[J].教育现代化,2017,3(11):55-57.
- [25]王志,江兆潭.研究型固体物理课程教学探索与实践[J].大学物理,2017,3(14):244-246.
- [26]石锋,沈建兴,张灵翠,徐越.工科材料类专业固体物理教学内容更新研究[J].现代教育论坛,2021,4(9):4-9.
- [27]石锋,沈建兴,张灵翠,徐越.工科材料类专业固体物理教材改革构思与探索[J].现代教育论坛,2021,4(10):1-3.
- [28]石锋,张灵翠,徐越.工科材料类专业固体物理课程教学改革构思与实践[J].现代教育论坛,2022,5(5):4-7.

作者简介:

石锋(1975—),男,汉族,山东泰安人,工学博士、化学工程博士后,特聘教授,博士生导师,从事材料物理相关方向的教学和科研工作。