

工科材料类专业固体物理教学内容更新研究

石锋 沈建兴 张灵翠 徐越

齐鲁工业大学(山东省科学院)材料科学与工程学院

DOI:10.12238/mef.v4i9.4040

[摘要] 固体物理是理论性较强的应用基础科学,内容广泛繁杂,专业术语晦涩难懂,学习难度对于数理基础比较薄弱的工科材料类学生来说困难重重。另外,工科生的学时设置有限,无法像物理专业那样长篇大论的讲授。为此,对教学内容进行更新就成了必须。本文介绍了本团队多年来在固体物理教学内容更新方面的心得体会,内容优化调整的基本方法和思路,将授课内容的更新与学生创新能力的提升建立了一一对应的密切联系,取得了良好的教学效果,对工科材料类专业的人才培养起到了至关重要的作用。

[关键词] 固体物理; 教学内容更新; 优化思路; 调整方法; 创新能力

中图分类号: O48

文献标识码: A

Research on Updating the Teaching Content of Solid State Physics for Engineering Materials Major

SHI Feng, SHEN Jianxing, ZHANG Lingcui, XU Yue

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

[Abstract] Solid state physics is a theoretically applied basic science with extensive and complicated content, and technical terminology is obscure and difficult to understand. The difficulty of learning is large for engineering materials students with relatively weak mathematical and physical foundations. In addition, engineering students have a limited set of hours, which makes it impossible to teach as long as physics majors. For this reason, it is necessary to update the teaching content. This article introduces the team's experience in updating solid physics teaching content over the years, the basic methods and ideas for content optimization and adjustment, and establishes a one-to-one correspondence between the updating of teaching content and the improvement of students' innovative ability, and has achieved good results. The teaching effect plays a vital role in the training of talents in engineering materials.

[Key words] solid state physics; update of teaching content; optimization of ideas; adjustment methods; innovation ability

固体物理研究构成物质的各种粒子的运动形态及固体的微观结构、宏观性质和它们之间相互关系的一门学科,是物理学中内容极丰富、应用极广泛的分支学科;是材料科学、微电子技术、光电电子技术、能源技术等技术学科的重要基础课;是工科材料类专业人才基础能力培养的重要保障,对于工科材料类专业本科生的培养具有重大的意义。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,

了解该领域的最新进展。固体物理的学习对培养学生的科学素质和创新思维、提高学生独立分析和解决问题的能力具有重要意义。固体物理学是理论性较强的应用基础科学,在国内外相关专业领域它均是一门基础主干课程,历来受到各大高校材料专业的重视;这是因为材料类专业学生都是工科学生,一向注重理论结合实践,而固体物理中存在大量的理论知识点,这些知识点往往可以在实践中得到体现,甚至在学生将来的科研和工作中也能得到实际应用。

1 现有教材的优劣分析

国外学者编写了两本具有代表性的固体物理教材——1953年加州大学伯克利分校查尔斯·基泰尔的《Introduction to Solid State Physics》和1976年康奈尔大学Neil W. Ashcroft的《Solid State Physics》;前者基泰尔体系注重结论,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;后者Ashcroft体系注重过程,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。国外比较有名的固体物理教材还有H. Ehrenreich等1970年编著经典教材《Solid State Physics》,多次被引用;尤其是1971年J. Patterson等编著的《Solid- State Physics: Introduction to the Theory》;该书非常经典,为以后的教材提供了样板;但是其缺点在于不能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。2009年匹兹堡大学David Snoke教授编著的教材《Solid State Physics, Essential concepts》起点低,简单易学;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。

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》教科书的编写,包括清华大学、北京大学等包括众多双一流高校在内的很多高校都积极编撰适合于本校学生使用的固体物理教材,至今不下于50多种。北京大学阎守胜主编的《固体物理基础》和清华大学顾秉林、王喜昆主编的《固体物理学》,均属于Ashcroft体系。最经典的是黄昆主编、韩汝琪改编的《固体物理学》,由高等教育出版社出版,这本著作被相关领域视为权威。

总之,上述教材中的很多内容对于数理知识薄弱的工科材料类本科生来说很有难度,不太容易接受;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,这对于工科学生的确是个难点。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,他们对固体物理知识点的需求也显然与纯物理等专业有所不同。

2 教学内容中的不足

事实上,目前很多固体物理教学内

容充满晦涩难懂的专业术语、繁乱的空间图形变换和烦琐的理论推导;很多固体物理教材存在理论性强、内容广泛繁杂甚至重复、学习重点不明晰等不足,需要学生具备复杂的三维空间想象与变换能力,尤其需要以高等数学、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基础。

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和性能,这些课程往往重工轻理,量子力学等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。故而,采纳以上理论性强的教材在教学和学习过程中存在着巨大的难度,学生在学习本课程的过程中感到相当的吃力,特别是涉及到一些抽象的定义和复杂的数学推导过程,使部分学生产生了厌学情绪。还有一点,由于在工科材料类专业中选修课程很多,固体物理的课时并不像在物理学专业中那样多,只有48个学时。如果不能很好的学习并掌握相关知识点,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,不利于性能优异的先进材料的研发。

上述不足和难点对于固体物理的教学内容更新提出了必然要求。为了让工科院校的学生更容易接受这门课程,更容易学会固体物理相关知识,提高学生的理论深度,近5年,我们团队结合工科材料类专业学生的知识结构和认知特点,与时俱进,对固体物理教学内容进行更新,探索《固体物理》课程的工科化,减少理论深度,提高学生的接受度。

3 教学内容更新的整体思路

目前,国内外多数的固体物理教材都是按照固体物理的发展顺序编排的,各章节之间缺少联系,知识点之间的过度不明显,就好像散落的珍珠一样,缺少一条主线把它们串起来。这对初次接

触固体物理的学生来说,感到很困惑,摸不着头绪;造成教学效果不佳,教学质量还有待进一步提高。

即,现存固体物理中的很多教学内容对于数理知识薄弱的工科材料类本科生来说很有难度,不太容易接受;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,这对于工科学生的确是个难点。另外,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,他们对固体物理知识点的需求也显然与前面两个专业有所不同。如果不能很好的学习并掌握相关知识点,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物理性质并构建其结构性能关系,不利于性能优异的先进材料的研发。

有没有可能找到一条主线,把散落的知识点联系在一起呢?可否将一些晦涩难懂的知识点以简单的方式传达出来呢?也就是说,需要更新现有固体物理教材中的教学内容,使其更加适合工科材料类专业学生的认知特点和知识结构,使学生在数理基础薄弱的情况下也能获得更多的固体物理相关知识。也就是说,使得课程通俗易懂,学生容易接受,听得懂,学的会。利用固体物理的相关知识点培养他们的创新思维能力,使学生在将来的学习、科研和工作中能有效运用学到的固体物理知识,这对于新工科背景下学生创新能力的提升具有十分重要的意义。

4 教学内容更新的方法

从新工科背景下,为了进一步提升材料类专业学生的创新思维和创新能力,以通识课程的视角去了解专业领域,更新固体物理课程的教学内容,适应工科材料类专业学生的认知特点,鼓励专业课程里的素质与通识能力培养,这是满足高阶性要求的必然做法;实现知识传承、创新思维能力和科学素养的有机融合,培养学生解决复杂问题的综合能力 and 高级思维。首先对齐鲁工业大学工科材料类专业学生的知识基础、知识结

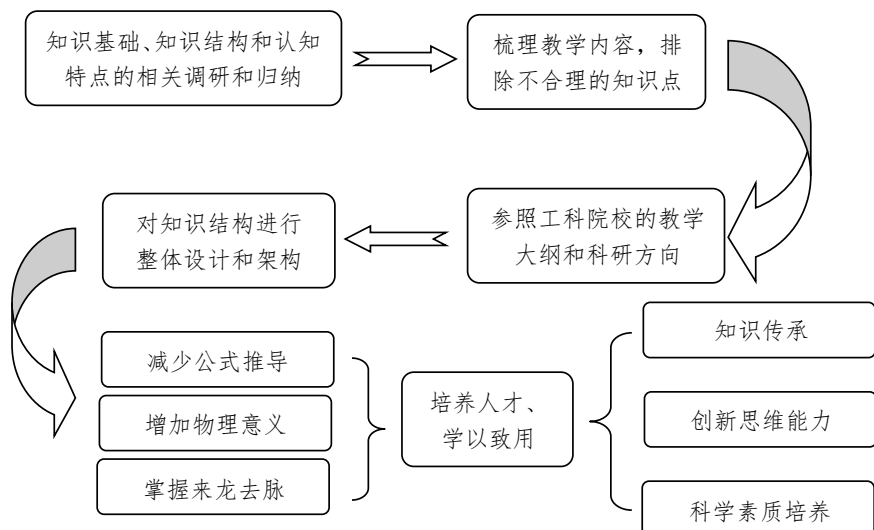


图1 教学内容更新的方法

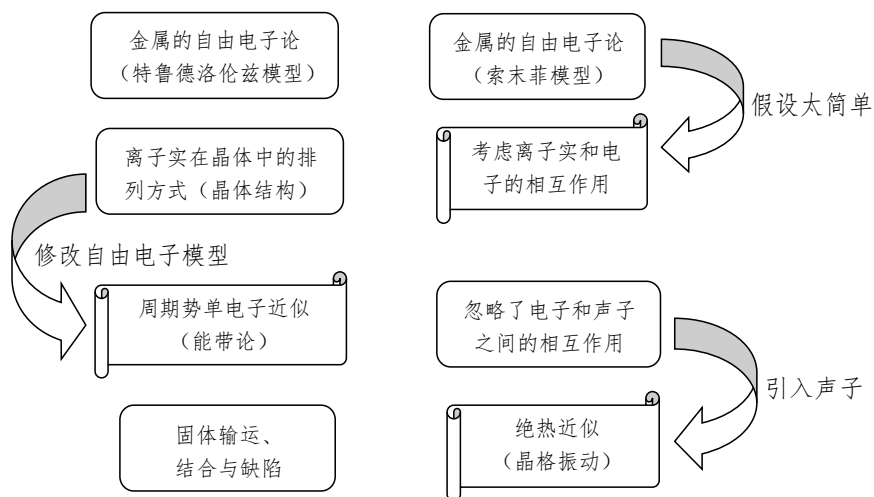


图2 教学知识点的串联和顺序安排

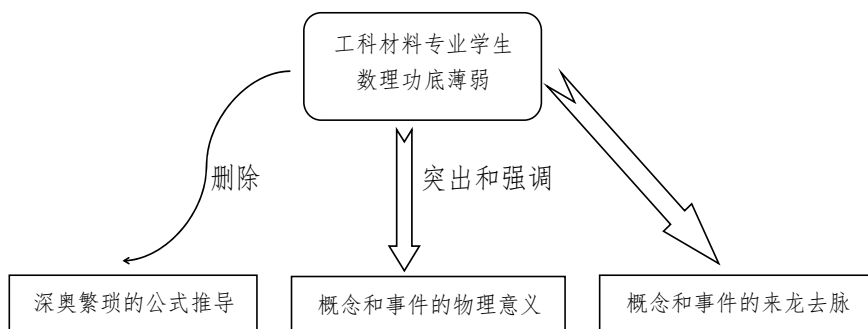


图3 教学内容优化的主要考虑因素

构和认知特点进行调研和归纳；据此并参照本校本专业的教学大纲和科研方向对固体物理课程讲授的知识结构进行整体设计和架构，对相关内容和知识点重新进行更新，对现在采纳的固体物理教材中的教学内容进行梳理，找出不适合本校材料专业科研方向的知识点并进行排除。从工科化要

求出发，以“学以致用”为根本出发点，在传统固体物理的理论框架和不增加篇幅的情况下，对一些一般教材讲解较少且材料专业常用的一些内容做深入的介绍（比如能带工程和晶格动力学部分），去除无谓的理论推导和公式，增加相关物理意义等的定性解释，有利于学生了解各个知识点的来龙去脉，如图1所示。

总之，教学内容更新需要兼顾学生的知识传承、创新思维能力和素质培养三个方面，满足创新性、高阶性和挑战度的要求。比如，对于《金属的自由电子论》这一部分内容，不仅仅要求学生通过学习能熟练掌握金属自由电子模型，还要求学生学会利用该模型对金属的电、热、光等物性进行分析，即该部分内容提升了学生的理论分析能力。在《能带论》这一部分，不仅要求学生掌握能带的影响因素，还要求学生掌握调控能带的方法，了解能带工程的涵义，在科研中运用能带知识调控物性；即这部分内容提高了学生运用理论知识解决复杂工程问题的科研能力和创新思维。

5 各高校教学大纲系统描述和分析

为了对现行固体物理教学大纲进行系统分析，我们充分调研了国内兄弟院校的教学大纲；学校档次从双一流高校（四川大学、天津大学、哈尔滨工业大学、电子科技大学、华中科技大学、西北工业大学）到地方普通院校（西安工业大学、山东科技大学、陕西科技大学），也包括少量师范院校（陕西师范大学、河北师范大学）。根据我们调研的结果，绝大多数学校的固体物理教学大纲多数采用或者参考黄昆院士主编的《固体物理学》（北京大学出版社，2009版）；另有少部分采用或者参考王矜奉主编的《固体物理教程》（山东大学出版社，2013版）、陈长乐主编的《固体物理学》（科学出版社，2007出版）、朱建国等编著的《固体物理学》（科学出版社，2017年出版）。他们的共性是绝大多数从晶体结构讲起，基本授课顺序如下：晶体结构—晶体结合及缺陷—晶格振动和晶体的热学性质—金属自由电子论—能带理论—表面与界面（含霍尔效应）。这种讲课顺序基本按照基泰尔体系进行的，直接给出研究结论，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，并没有介绍知识体系的发展过程。从科研的角度来说，这种顺序是可以的，因为包括了较多的固体物理基础知识，但是从教学的角度来说，由于没有详细

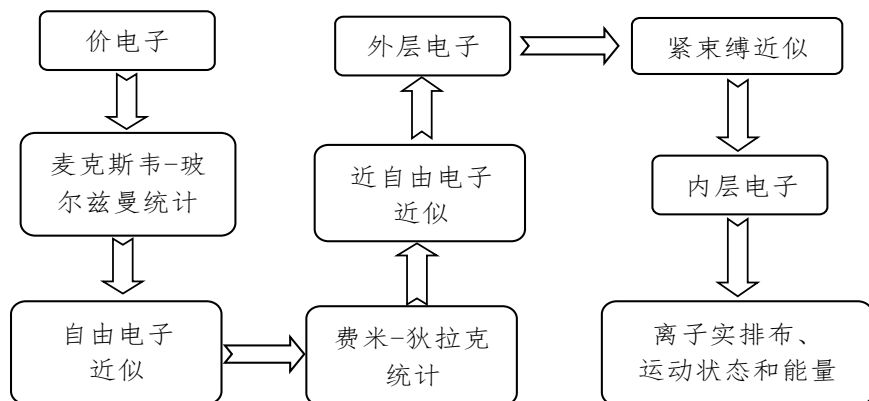


图4 教学内容更新的主线: 固体电子论

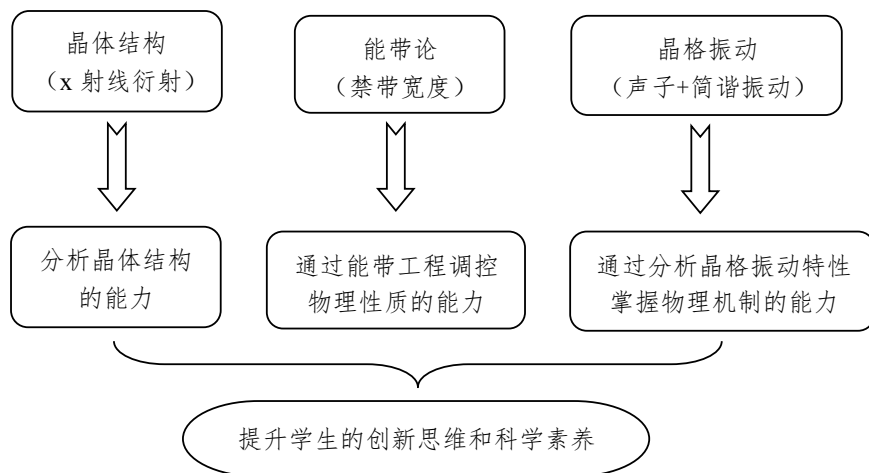


图5 创新思维和创新能力和教学内容之间的对应关系

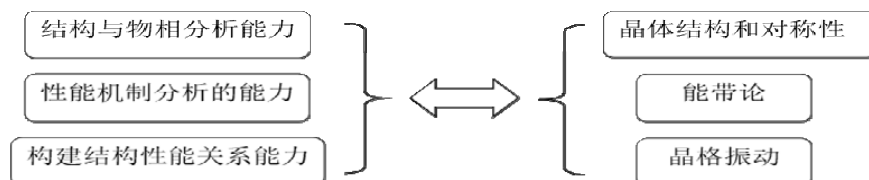


图6 不同知识点与不同能力提升之间的对应关系

介绍发展过程和知识点的来龙去脉,使得各个知识点比较零散,比较跳跃,知识点之间没有很多关联性,使得学生尤其是基础知识比较薄弱的学生接受起来难度较大。

为此,我们修正了上述教学大纲,调整了授课顺序,从金属的自由电子论开始讲起(研究对象是原子外层电子),到晶体结构(研究对象是除去外层电子之后的原子核与内层电子组成的离子实的排布),然后是能带理论(研究对象是原子内层电子),最后考虑声子与电子的相互作用,讲述晶格振动(研究对象是离子实本身的热运动)。这样的教学大纲

基本思路是以原子本身为研究对象,使得各个知识点之间有了密切的联系,使得物理事件之间由外及内再由内及外的建立了关联性;避免了前述知识点间跳跃零散的弊端;如图2所示为教学知识点的串联和顺序安排。

6 教学内容优化调整的主要因素

固体物理面对的是复杂的多体问题,只有抓住物理过程的主要方面,构造简化的模型,才能有效地进行数学处理,其中最关键的是弄清楚物理图像。作者所在的高校——齐鲁工业大学属于典型的工院校;基于此,我们进行教学内

容优化和调整的出发点是,根据工院校材料类学生数理水平不高以及学时不多的实际特点的特点,紧扣物理模型和物理思想,不拘泥于高深的理论,不纠结于繁琐复杂的公式推导,而是致力于寻找到一个主线,把各个散落的知识点串联起来,建立各章节之间的联系,使得学生容易明白各部分之间的关联性,了解各个知识点的来龙去脉,以便清晰的明了其物理图像。教学内容优化调整的主要考虑因素如图3所示。

7 教学内容优化调整的系统阐述

在教学内容优化实践中,我们注重基础理论的系统性,同时突出对于各个概念之间优缺点的学习,以便有利于把握其物理意义。我们利用一个主线将零散的知识点联系起来;这个主线就是固体的电子论,如图4所示。

首先研究价电子(金属自由电子论),然后分析外层电子(近自由电子近似),进一步研究内层电子(紧束缚近似),穿插研究离子实的排布(晶体结构和对称性),最后研究离子实的振动(晶格振动);如图4所示。上述知识要在课堂上讲述,其余简单的知识比如晶体的结合等学生自学即可。作为材料类专业的学生,在从事材料相关的工作中,都必不可少的涉及到材料的结构和物相分析,要分析结构-性能关系,研究二者的调控机制;必不可少的知识点是《固体物理》课程的相关章节和内容,比如晶体结构和对称性、能带论以及晶格振动等;这些知识点成为了学生创新能力和创新思维培养的关键,也是本项目教学内容更新所必不可少的;能力与知识点的对应关系见图5示。

以掌握了研究价电子的特鲁德-洛伦兹模型为例,根据其在热容和顺磁磁化率研究中不足,在量子力学建立后不久,由索末菲抛弃了该电子论的经典力学与经典统计背景,引入了费米-狄拉克统计分布;认为金属中的价电子相互独立地在恒定势场中自由运动,其运动行为应由量子力学的薛定谔方程来描述,大量的价电子构成的电子气系统服从费

米—狄拉克统计理论,使得经典的电子气变成了量子的费米电子气。对于价电子是利用自由电子近似、独立电子近似、自由电子费米气体和碰撞近似来研究,称为索末菲模型。该模型对于经典理论的诸多难题都给出了比较满意的解释,标志着这一模型的魅力所在,因而至今仍被使用。

尽管该模型能够解释如电子气的比热、霍尔效应等金属的诸多性质,但是对于物质为什么会分为导体、绝缘体、半导体以及类金属等则根本无法解释。还有,除去一价金属以外,在定量计算方面和实验结果的偏离极大,如比热、磁致电阻、霍尔系数等,不能解释二价金属镁的导电性比一价金属铜的导电性还要差的实验事实,对于某些金属的正的霍尔系数也不能用该模型给出解释。上述不足说明自由电子模型把实际情况太过理想化了。

为此,必须要考虑离子实系统对电子的作用,可以解决许多自由电子论不能解决的实际问题。要考虑离子实系统对电子的作用,就要知道离子实在固体中的排列情况,因为这属于静电相互作用。它与电子和离子实之间的间距有关,所以,离子实在固体中的分布就显得很重要了。学习了晶体结构和对称性这些知识,我们就可以考虑离子实系统对电子的作用了,亦即有了对金属自由电子气体模型改进的基础。

以索末菲模型为主的金属的自由电子论主要适用于金属的价电子,但对其他晶体中的电子,即使是金属的内层电子也并不适用。由于前述索末菲模型忽视了离子实系统对电子的作用,所以考虑弱周期性起伏的势场对价电子的影响,进一步发展了近自由电子近似——把晶体中运动的电子看作在弱周期场中接近自由运动的一种极端的情形,适用于金属中的传导电子。近自由电子近似认为离子实对电子的作用很弱,因而电子的运动基本是自由的。

近自由电子近似的应用范围有限,仅适用于碱金属;为了克服这个不足,进一步推出了紧束缚近似,认为晶体中

的电子态与组成晶体的原子在其自由电子态时差别不大,晶体电子的波函数可以用原子轨道线性组合来构成,适用于金属的较内层电子。通过绝热近似使学生认识到晶格体系和电子体系可以分开处理,把整个问题简化为相对较简单的电子体系运动和离子实体系运动,也就是把电子的运动和离子实(原子核)的运动分开了,为后面的晶格振动打下伏笔。紧束缚近似方法的一个突出优点是它可以把晶体中电子的能带结构与构成这种晶体的原子在孤立状态下的电子能级联系起来。紧束缚近似得到的结果除了使布洛赫电子的波函数和能带进一步具体化以外,还能初步解释半导体和绝缘体中所有电子的能带。能带论忽略了电子和声子之间的相互作用,而晶格振动导致的声子会对电子产生散射。前面研究了电子的运动状态及其能量,后面就要研究离子实的运动状态及其能量,所以必须引入声子,考虑晶格振动。

在晶体结构一部分中,我们讲述了构成晶格的离子实在晶体中的分布情况,但假定了这些离子实在晶体中是固定不动的——属于静止晶格的模型。实际上,在有限的温度下,组成晶体的原子并非固定于格点位置,而是以格点为平衡位置作热振动,称为晶格振动。显然,晶格振动将使晶体势场偏离严格的周期性,从而对布洛赫电子产生散射作用,并影响到与电子有关的输运性质。晶格振动的强弱依赖于温度,它在晶体热力学中起重要作用;晶体的比热、热膨胀和热导等热学性质直接依赖于晶格振动。因此,我们把晶格振动和热学性质放在最后一部分讲述。

总之,我们以固体电子论为主线,通过研究外层价电子、离子实排布、内层电子以及离子实振动等相关知识点,对固体物理的授课内容进行了大幅度的更新,将离散的知识点串联了起来,使得学生容易掌握物理事件的来龙去脉。固体的电子论就是教学内容更新的主线,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,以使能够掌握

从事材料研究的专业基础知识,实现教学内容与学生创新能力培养的密切结合,这对于学生创新思维和科学素养的提升很有帮助;如图6所示。

8 教学效果

我们团队结合工科学生实践性强而理论性弱的特点,从学以致用角度更新固体物理教学内容。不再单纯满足于纯粹的公式推导,而是讲述事情和知识的来龙去脉,通过一个主线将零散的知识穿插起来,使得学生容易掌握;同时重点强调一些科研中经常用到的知识点,比如利用XRD分析材料的物相和结构、利用晶格动力学分析材料物理性质的本征机制等;结合最新的研究成果,如没有带隙的石墨烯去分析如何进行禁带宽度的调控,反映了前沿性和时代性,满足了“创新性”的要求。

将增加一些高难度的理论知识,比如将普通的原子热运动(晶格振动)的内容,抬高到由1954年诺贝尔物理学奖得主、忠厚长者玻恩和“航空航天时代的科学奇才”冯·卡门开创的晶格动力学理论,不仅研究简单的振动,更重要的是分析复杂的动力学理论。让学生通过课程论文的形式,熟悉该部分知识,有利于他们未来研究材料的结构性能关系;这需要“跳一跳才够得着”,满足了“挑战度”的要求。

我们团队进行的固体物理教学内容更新兼顾知识传承、学生能力和素质培养三个方面。我们鼓励以通识课程的视角去了解专业领域,也鼓励专业课程里的素质与通识能力培养,这是满足“高阶性”要求的必然做法,知识能力素质的有机融合,培养学生解决复杂问题的综合能力和高级思维。为了提高学习效果,除了课堂的答疑之外,我们团队还建立了固体物理课程学习的QQ群,在线解答同学们的疑问,收到了良好效果。由于及时了解了前导课程的相关内容,学生对后面课程的知识有了期待,上课时认真听课,课堂纪律良好;对每次作业都认真批复和点评,通过作业师生之间有了良好的互动。

我们团队引入了大量的课程思政,

有意识的导入一些励志情节,比如课堂上还会穿插介绍如“两弹一星”功勋奖章获得者等著名科学家的丰功伟绩,让学生在感受科学家们伟大成就的同时,还能体会他们的家国情怀和为实现“中国梦”而奋斗的伟大献身精神;学生们听后深受鼓舞。还有,当在课堂上介绍到材料的应用时,我们团队会有意识地介绍中国超级工程中相关的材料知识,引导学生对专业的兴趣。还会告诉学生目前材料研究中我国存在的“卡脖子”关键问题,鼓励大家热爱科研,立志解决这些关键问题。

9 结语

总之,我们通过教学内容更新,使得教学内容更加适合工科材料类专业学生的认知特点和知识结构,使得工科材料类学生在数理基础薄弱的情况下也能获得更多的固体物理知识,并在将来的学习、科研和工作中运用学到的知识;以教促学、以教促研,提升学生的创新思维能力以及解决实际问题的能力。

【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]Kittel C. Introduction to Solid State Physics[M]. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [4]Ashcroft N W, Mermin N D. Solid State Physics[M]. Philadelphia: Saunders College Publishing, 1976.
- [5]韦丹.固体物理[M].北京:清华大学出版社,2004.
- [6]冯端.固体物理学大辞典[M].北京:高等教育出版社,1995.
- [7]冯端,师昌绪,刘治国.材料科学导论[M].北京:化学工业出版社,2002.
- [8]张飞鹏.理工科固体物理学课程特点与实践研究[J].广西民族师范学院学报,2014,31(3):41-44.
- [9]惠群,程南璞,陈志谦.材料学专业固体物理课程教学改革与实践[J].西南师范大学学报(自然科学版),2011,36(6):167-171.
- [10]文尚胜.材料学专业固体物理课程教学改革初探[J].中国科教创新导刊,2010(10):44-45.
- [11]苏兴华.材料学科专业的固体物理课程教学改革探析[J].科技创新导报,2012(21):187-188.
- [12]赵军伟,赵颢.材料类专业固体物理课程创新教学改革与实践初探[J].轻工科技,2012(01):134-135.
- [13]钟佑洁,杨尊先.电子学科的固体物理教学改革初探[J].物理通报,2013(08):17-19+21.
- [14]梅显秀.固体物理教学改革的探索与实践[J].大学物理,2010,29(7):43-45.
- [15]田真,陈镇平.大学物理教学现状及改革的思考[J].逻辑学研究,2001,21(01):25-27.
- [16]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.
- [17]党随虎.材料模拟软件在固体物理教学中的应用[J].科技与创新,2019(12):128.
- [18]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].教育教育论坛,2018,43(10):158-159.
- [19]解玉鹏.翻转课堂教学模式在固体物理教学中的应用研究[J].吉林化工学院学报,2016,3(11):244-246.
- [20]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.
- [21]许英,贾春霞.研究性教学在固体物理学课程教学中的探索[J].南昌师范学院学报(综合),2015,36(6):14-16.
- [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]毛飞,张振华.研究性学习在固体物理教学中的应用[J].课程教育研究,2016,5(10):123-125.
- [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]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.

作者简介:

石锋(1975--),男,汉族,山东泰安人,教授,博士,主要从事固体物理教学和电子材料与元器件以及氢能相关材料研究工作。

沈建兴(1963--),男,汉族,山东青州人,齐鲁工业大学(山东省科学院)材料科学与工程学院院长、教授,研究方向:玻璃与陶瓷材料。

张灵翠(1982--),女,汉族,山东泰安人,博士,研究方向:电介质薄膜。

徐越(1988--),男,汉族,山东聊城人,讲师,博士,研究方向:电介质薄膜和微波介质陶瓷。