

大学物理实验课反溯教学方法研究

谢子昂¹ 张师平¹ 陈 森² 裴艺丽² 李 莉² 邱红梅¹ 赵雪丹¹ 王云良¹ 吴 平¹
(北京科技大学¹数理学院;²自然科学基础实验中心,北京 100083)

摘 要 为促进新形势下的“大学物理实验”课程体系改革,推动“高素质、创新型”人才培养朝新方向、高水平前进,北京科技大学“大学物理实验课反溯教学方法研究”课题组提出了物理实验课反溯教学方法,将现代科技的最新发展引入课程,对反溯教学方法进行了探索。课题组从实验现象出发,引导学生反溯基本物理学概念、原理和现象,并相应组织编排物理实验内容,激发学生的探索欲和创造欲,全面提升学生的学习兴趣和学习能力。课题组从实验室建设、新教材建设、新实验编排、本科生科技创新、实验课程与最新科研项目结合等多个角度出发,对“大学物理实验”课程体系进行了全面深化,促进学生变“要我学”为“我要学”,并取得了一系列教学成果。

关键词 大学物理实验;反溯教学方法;课程建设;现代科技

RESEARCH ON RETROACTIVE TEACHING METHOD FOR COLLEGE PHYSICS EXPERIMENT COURSE

XIE Ziang¹ ZHANG Shiping¹ Chen Sen² PEI Yili² LI Li² QIU Hongmei¹ ZHAO Xuedan¹
WANG Yunliang¹ WU Ping¹

(¹ School of Mathematics and Physics;

² Basic Experimental Center of Natural Science, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083)

Abstract In order to promote the reform of the College Physics Experiment curriculum system under the new situation, and to push forward the cultivation of “high-quality and innovative talents” at an advanced level, the research group on “Retroactive Teaching Method for College Physics Experiment” in University of Science and Technology Beijing has proposed the retroactive teaching method for the course. This teaching method introduces the latest developments in modern science and technology into the curriculum and explores retroactive teaching methods. The research team started from experimental phenomena, guided students to trace back basic physical concepts, principles, and phenomena, and organized physics experiment contents accordingly, stimulating students’ desire to explore and create, and thus com-

收稿日期: 2023-06-05

基金项目: 北京科技大学 2021 年度本科教育教学改革重点项目(JG2021Z05)和教育部高等学校大学物理课程教学指导委员会 2020 年教学研究项目(DJZW202006hb)。

作者简介: 谢子昂,男,讲师,主要研究方向为半导体光电器件、柔性功能材料、微纳结构制造与电磁仿真等,xieziang@ustb.edu.cn。

通讯作者: 吴平,女,教授,主要从事大学物理与实验教学研究及凝聚态物理研究,研究方向为低维能源材料、颗粒物质物理等,pingwu@sas.ustb.edu.cn。

引文格式: 谢子昂,张师平,陈森,等. 大学物理实验课反溯教学方法研究[J]. 物理与工程,2023,33(4):107-120.

Cite this article: XIE Z A, ZHANG S P, CHEN S, et al. Research on retroactive teaching method for college physics experiment course [J]. Physics and Engineering, 2023, 33(4): 107-120. (in Chinese)

prehensively enhancing their learning ability. The research team has conducted a comprehensive deepening of the College Physics Experiment curriculum system from multiple perspectives, including laboratory construction, new textbook and new experiment arrangements, undergraduate scientific and technological innovation projects, and the combination of experimental courses with the latest scientific research frontiers. These practices stimulated our students to change from being told “you must learn” to saying “I wish to learn” on their own initiative. As a result, a series of significant teaching achievements have been accomplished.

Key words college physics experiment; retroactive teaching method; curriculum construction; modern science and technology

目前,我国已成为世界制造大国,制造业规模跃居世界第一,已稳步迈入由“中国制造”转向“中国创造”的崭新阶段。未来 20 年内,我国人才需求方向将由“技术型”转变为“高素质、创新型”^[1-3]。如何从高校教育的角度,将解决问题的技术型人才提升至善于提出问题、分析问题和解决问题的创新型人才,是当今教学面临的重要改革方向^[4-5]。

作为高校理工科人才培养过程的必要环节,“大学物理实验”课程是学生进入大学后接受系统的实验技能训练的开端,对切实提高人才培养质量具有重要作用和意义^[6-7]。但课程中还存在部分实验项目形式陈旧、教学内容与教学方法传统、与前沿科技结合较弱、不易激发学习热情等情况。学生完成实验操作后缺乏兴趣,更不知道如何对实验结果进行分析和讨论。教师的引导因人而异^[8-9]。学生投入了时间精力,却远未能达到应有的学习效果。进行资源统合并改革教学方式,成为课程亟待解决的问题。

北京科技大学“大学物理实验课反溯教学法研究”课题组以培养学生实践能力与创新意识为目标,注重学生未来发展的实际需求,将现代科技的最新前沿发展引入课程,构建了符合“高素质、创新型”人才培养需求的“大学物理实验”课程反溯教学法。反溯教学法的基本思想,是从最新科技发展反溯其基本物理学概念、原理和现象,激发学生的探索欲和创造欲,全面提升学生的学习兴趣和学习能力。充分挖掘课程潜力,让学生从“要我学”变为“我要学”。三年来的教学实践表明,我们提出的大学物理实验课程反溯教学法成功构建了一整套大学物理实验课程教学范式,在

课程体系建设、学生能力与创新意识培养等诸多方面均发挥了重要作用。以实验竞赛、科研论文、专利等为代表的成果见证了反溯教学法的成功实施。反溯教学法所构建的新型课程体系与内容为建设适应新时期、新形势下人才培养需求的“大学物理实验”教学新方法进行了成功探索。

1 反溯教学法指导“大学物理实验”课程新编排

反溯教学法指导“大学物理实验”课程新编排的路线框图如图 1 所示。围绕这一路线图,我们从创新实验室建设、新教材编排、创新型新实验项目与内容设计编排等角度开展了工作。

1.1 创新实验室建设

创新、竞赛、实验教学相融合必须有教学环境改善的支持。三年来,课题组从实验室硬件建设、实验室师资队伍建设和学生开放性管理等方面全面建设创新实验室,同时做好实验室管理工作,以满足学生开展个性化实验与创新型实验的需求。

我们搭建了通用制作实验平台、热学物性测量平台、软物质研究平台、核磁成像技术及应用研究平台、分子动力学模拟仿真实验平台和光伏器件制备与测试平台等多个实验平台(图 2(a)~(f)),为学生开展科学实验研究、科技创新项目、仪器制作、学科竞赛、科技竞赛、社会实践等活动提供便利。

创新实验室是提升学生科学素养、建立正确科学观的重要场所。创新实验室每年支撑三十余组同学参加大学生科技创新项目、国家级和省部级实验竞赛等,使实验课堂实现由课内向课外自然延展。

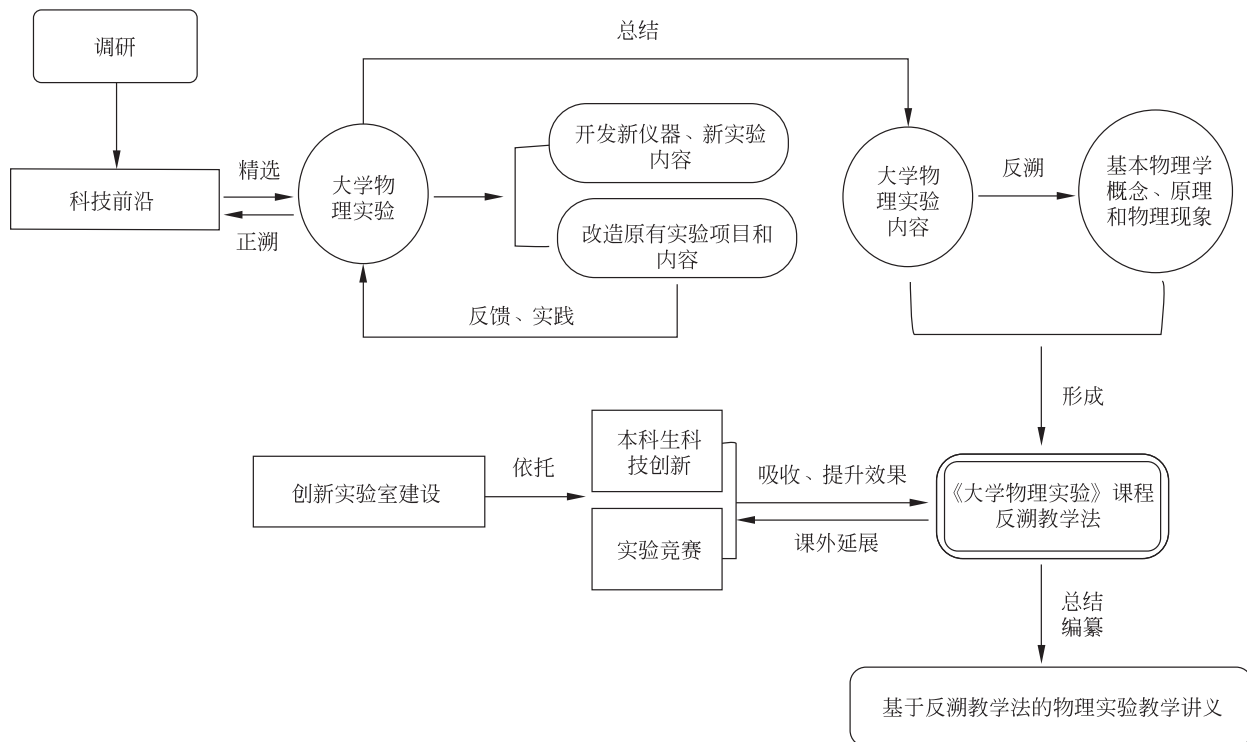


图1 “大学物理实验”反溯教学法的研究思路

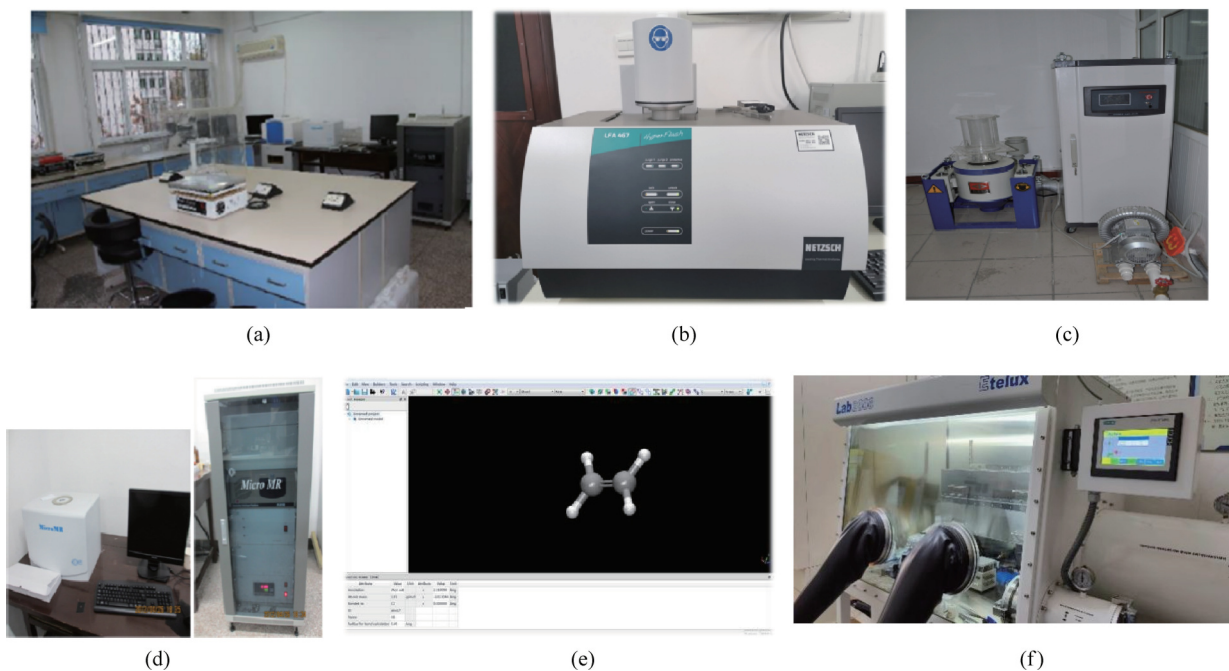


图2 实验平台建设情况

(a) 通用制作实验平台；(b) 热学物性测量平台；(c) 软物质研究平台；(d) 核磁共振成像技术及应用研究平台；(e) 分子动力学模拟仿真实验平台；(f) 光伏器件制备与测试平台

1.2 《理科物理实验教程(第2版):力学、热学、电磁学、光学实验分册》教材

为了凝练、固化反溯教学法的研究成果,我们

编排了《理科物理实验教程(第2版):力学、热学、电磁学、光学分册》教材^[10]。所选入的实验项目既考虑了课程体系的完整性,又兼顾了前沿科技

的最新发展。各实验项目的编排均以反溯教学法为核心指导思想,首先引入背景知识介绍或具体的高新技术应用,再引导学生回归到基础物理现象和知识点。“知之者不如好之者,好之者不如乐之者”,我们通过反溯教学法让实验项目激发了学生的学习兴趣 and 内在学习动力。教学实践表明,经过以上实验课程内容的学习,学生在知识获取、技能培训和科研兴趣培养等诸多方面都有了大幅提升。

在以上新教材编排的基础上,我们新申请了理科物理实验 I (2020—2021 年) 和基础物理实验 I & II (2022—2023 年) 两个教学示范课项目,以反溯教学方法全面组织实施了新时期实验课程,受到学生的欢迎和支持。

1.3 反溯教学法新实验

1) 干涉光刻技术实验

干涉光刻技术是一种无须用到复杂光学系统即可制备精细微纳结构的技术手段。该技术可反溯回光干涉这一基本物理原理。我们设计了使用两束或三束相干激光光束干涉产生周期性纳米织构图形的光学系统,并研究入射角度、光束强度、光束波长等因素对所成图形的影响。所研究的图形种类将包含光栅、孔阵、点阵、柱阵等多样化的结构,以满足不同的后续实验需求。结合图形转录方法,要求学生学习和掌握光刻图形“正模”与“倒模”的转移、转换技术,并探究不同类型光刻胶的性能。拟使用平面等离子体刻蚀等方法将所制微纳图形转移至硅衬底或砷化镓衬底上,使学生在领略光刻技术的同时,对刻蚀的基本原理、实验过程和影响因素有初步了解,也为学生未来进一步学习光刻技术做基础准备。

2) 基于 Sagnac 效应的激光干涉光纤陀螺仪实验

陀螺仪是一种古老而有生命力的仪器,能提供准确的方位、水平、位置、速度和加速度等信号,因而在国防军事、导航测控、汽车制造等领域有重要应用。基于 Sagnac 效应的激光干涉光纤陀螺仪的原理可反溯回光干涉等基本物理原理。同一光源发出的光分为两束后,在同一环路内沿相反方向绕行一周后会合可产生干涉。当环路所在平面旋转,干涉条纹将会发生移动,也即 Sagnac 效应。此时,两束光线的光程差与环路所在平面的旋转角速度成正比。基于这一效应制成的激光干涉光纤陀螺仪可测量装置的旋转角速度。通过这

一实验,可使学生回溯光干涉基本原理,掌握 Sagnac 效应的同时了解其应用,理解现代科学技术新发展与基本物理现象和物理原理之间的联系。将激光干涉光纤陀螺仪实验引入到大学物理实验中,可使学生反溯激光干涉的基本原理进行理论和实验探索,激发其学习兴趣,了解 Sagnac 效应及激光干涉陀螺仪,理解基本物理现象与现代科学技术新发展的关系。

3) LED 光谱实验

蓝光发光二极管(LED)是白光 LED 的基础,是一项里程碑式的发明。这种由于多数载流子注入而引起电子和空穴对复合发光的现象称为注入式电致发光,可回溯至能带理论等基本物理原理。LED 具有节能环保、寿命长、体积小、应用广泛、色彩丰富等特点,是继白炽灯、荧光灯之后的第三代照明光源,在生活上、工业上有多种应用。我们尝试将 LED 光谱实验引入到大学物理实验中,与光栅光谱仪实验相结合,让学生从 LED 的发光原理与特性出发,引发学习兴趣,体会物理学科在高新技术中的重要作用,再反溯回 LED 的光谱研究,使学生在完成实验的过程中掌握新型半导体器件的发光原理和光谱特性。本实验已编排为《理科物理实验(第 2 版):力学、热学、电磁学、光学分册》课程的光学实验项目。

4) 混沌摆实验

摆的发展与研究有着悠久的历史。双摆是一个由两个摆锤组成的简单物理系统,其中一个摆锤连接在另一个摆锤的末端。双摆属于混沌摆之一,具备丰富的动态特性,能够展现出混沌现象。混沌现象是指发生在确定性系统中的看似随机的不规则运动行为,表现为不确定性、不可重复、不可预测,是非线性系统的固有特性。双摆/混沌摆对于初始条件十分敏感,整个运动混沌无序、无法预测。混沌现象的发现和混沌理论的建立,同相对论和量子论一样,是对牛顿确定性经典理论的重大突破。许多科学家认为,20 世纪物理学三个辉煌的科学奇迹是相对论、量子论和混沌理论的创立。将混沌现象引入到大学物理实验中,可使学生反溯摆的基本运动规律进行理论和实验探索,激发其学习兴趣,了解混沌现象及混沌理论,体会物理学科在现代生活中的重要作用。本实验已编排为《理科物理实验(第 2 版):力学、热学、电磁学、光学分册》课程的力学实验项目。

5) 介电常数的频率特性

电容器存储和释放电能的能力产生了许多重要应用,比如摄影师使用的电子闪光装置、中国正在建设的“Z 机器”(Z Pulsed Power Facility)、电磁炮使用的电容器等。这些应用的原理均可回溯至电容器两极板间电介质材料的性质。学生使用高精度阻抗分析仪与相应夹具,可学习测量电介质材料介电常数和损耗与频率的关系。在此基础上教师作点评与讲解,使学生在掌握介电常数和损耗测量方法的同时,理解介电常数和损耗频率特性的产生原因等源头知识,并展望其应用。本实验已编排为《理科物理实验(第2版):力学、热学、电磁学、光学分册》课程的电磁学实验项目。

6) 磁耦合谐振实验

磁耦合谐振,即两个相同频率的谐振物体将会产生很强的相互耦合,与远离谐振环境的物体有较弱的交互,可实现无线能量的传输。其相关知识可回溯回耦合、谐振、频率分裂等基本概念。磁耦合谐振是本科生电磁场理论教学中的难点,也是电磁学领域科学研究前沿。它是目前无线供电技术的一种解决方案,也是当前电气工程领域最热门的研究方向之一。基于磁谐振耦合理论的无线电能传输现象,既可从物理理论上通过经典的耦合模理论,也可用电气、电工学科的 LC 共振电路模型来进行分析,创新性地引入大学物理实验课堂教学、填补教学空白。历时多年的课堂试用、课题组改进和优化了多线圈磁耦合谐振实验系统,并将其编排为《理科物理实验(第2版):力学、热学、电磁学、光学分册》课程的电磁学实验项目。

7) 声悬浮实验

声悬浮技术对于悬浮物体的性质没有特定要求,对声场内的固体和液体均可以进行悬浮,技术适用度高,近年来逐渐发展应用于分析化学,材料科学,医学等多个领域,是一种新兴、前景极其广阔的悬浮技术。其原理可以回溯至声辐射力对抗重力以实现物体的悬浮。学生利用自搭实验装置,控制悬浮物体移动,可以引起较大的学习兴趣和探索欲望。在实验基础上,教师作讲解,使学生在熟悉控制悬浮物操作的同时,掌握声辐射力以及驻波的原理和应用,理解现代科学技术新发展与基本物理现象和物理原理之间的关系。

8) 可变转动惯量装置与测量

转动惯量是大学物理实验教学中常见的实验

项目。在工业生产中,经常会使用具有大转动惯量的飞轮进行惯性储能。随着储能工业的发展,学界提出了可变转动惯量的储能方法,也即在较低的转速下可以较低的转动惯量运行,而在较高的转速下其自身的转动惯量可以增大,从而达到高效储能的目的。基于这种可变转动惯量的工作原理可以回溯至转动惯量的测量、物体质量分布的变化与转动惯量之间的关系等基本物理原理。在实验基础上,经教师讲解,学生可探究可变转动惯量装置的转动惯量测量,了解该装置的转动惯量变换原理,以及质量分布和转动惯量之间的关系。

9) 材料相变热的测量实验

材料的相变过程在工业生产和日常生活中都有重要作用,而研究相变过程的手段往往需要采用价格高昂的专业仪器设备。为此,我们从相变过程的应用和测量手段入手,提起学生研究的兴趣,从差热分析方法回溯回温度测量与热流之间的关系,通过实验室搭建的实验装置——开放式量热装置,让学生从中探究物质传热的基本原理,理解现代测试技术与基本物理现象和物理原理之间的关系。

2 回溯教学法在本科生 SRTP 科技创新项目中的实践

开展本科生 SRTP 科技创新项目是提升能力的重要手段。为了将最前沿、最新科技成果与本科生实验教学结合起来,我们尝试使用回溯教学法指导本科生科技创新项目,力求做到“立足科技创新,辐射实验教学”,并取得了一系列教育、教学经验。课题组通过以本科生科技创新和物理实验竞赛相结合的方式,走出了一条“以赛促教”的新路。

2.1 《基于 Sagnac 效应的激光陀螺仪》SRTP 项目(在研)

陀螺仪是重要的角运动检测装置。课题组通过已有的氦氖激光管、反射镜、分光镜和陶瓷玻璃等元件设计搭建出简单的激光陀螺仪(图 3(a))。其原理可回溯至角动量守恒、光干涉等基础知识。通过制作和运行激光陀螺仪,研究高速旋转下的物体性质。制作环形谐振腔,观测并分析其中两束光的干涉,及整个环形光路里形成的驻波现象

(图 3(b))。自主设计和搭建了单激光分光的矩形双循环干涉光路(图 3(c)),观察并探究陀螺在不同速度的高速运转下,驻波波结、波腹相对反射镜的位置变化,镜子转动距离对干涉条纹变化的影响。

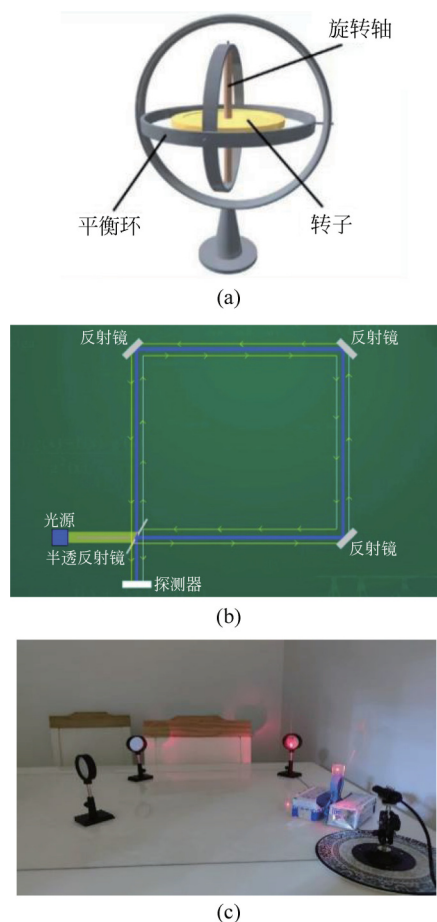


图 3 《基于 Sagnac 效应的激光陀螺仪》SRTP 项目成果
(a) 陀螺仪结构; (b) 光路图; (c) 单激光分光的矩形双循环干涉光路照片

2.2 《双摆的制作及其混沌现象的研究》SRTP 项目(结题)

混沌是非线性动力系统的固有特性,是非线性系统普遍存在的现象。牛顿确定性理论能够充分处理的多为线性系统,而线性系统大多是由非线性系统简化而来。项目对双摆中的混沌现象产生原因以及可能存在的规律进行了理论上的探索研究,并基于理论力学中的拉格朗日方程与 Runge-Kutta 法给出了双摆运动的轨迹模型,并对出现的混沌现象给出了一定的解释与理解。利用 Tracker 软件对图像进行了数据处理与分析,初步判断出在短周期内双摆的运动是混沌运动。在简易双摆装置的基础上,课题组增加外部驱动装置,进一步

实现对双摆施加可调的驱动力。基于混沌理论,即兼具质性思考与量化分析的方法,探讨了双摆动态系统中无法用单一的数据关系,以整体、连续的数据关系解释和预测了摆动行为。

2.3 《模块化的可见光通信设备研制》SRTP 项目(在研)

可见光通信技术是指利用可见光波段的光作为信息载体,在空气中直接传输光信号的通信方式。可见光通信的主要优势有绿色低碳,可实现近乎零耗能通信,还可有效避免电磁信号泄露等缺点,为快速构建抗干扰、抗截获的安全信息空间提供支持。其原理可反溯至亥姆霍兹方程、能带理论等基础知识。课题基于基本通信电路,通过改善信号发出端的输入信号以及信号接收端(硅光电池)的输出信号,使最后得到的信息连续且清晰,并且基于这些成果,本项目将推进信息的数字化,将电路中基本的元件转化成数字元件,通过编码与解码,利用信号发出端低延迟等特点,提高信息的传递效率。力求研制出具备模块化特性的光通信小型设备,并设计实验装置,以展示优异的物理性能和广泛的应用推广度。该实验装置可用于教学演示、实验教学以及中小学科普等场景。同时,我们期望通过该实验装置展示的原理和创新,能够在通信技术中如蜂窝网络等以及物联网、智慧城市(家庭)、航空、航海、地铁等领域中带来创新应用和价值体验。

2.4 《模块化的超声波悬浮与三维空间移动装置的研制》SRTP 项目(结题)

声悬浮是高声强条件下的一种非线性效应。本课题基于目前较为稳定的平面相控阵技术,通过波动学、声学等理论和实验创新,一定程度上解决现存平面相控阵声悬浮装置的不足。势能分布理论结果(图 4(a))揭示了空间中的势能位点呈周期性分布,可反溯至势能、驻波等基础知识。课题组自主搭建了声悬浮装置(图 4(b)),从悬浮物的悬浮稳定性以及三维移动角度,开展了驻波声悬浮中对悬浮小物件的操纵实验,实现了聚苯乙烯小球悬浮(图 4(c))。并改进现有的平面相控制声悬浮装置,一定程度上解决其存在的操控、成本等问题。力求研制模块化的设备,设计出具有优良的物理性能和推广度的实验装置,可用于教学演示、实验教学以及中小学生学习科普,并为其他势场中的物体移动提供了新思路。

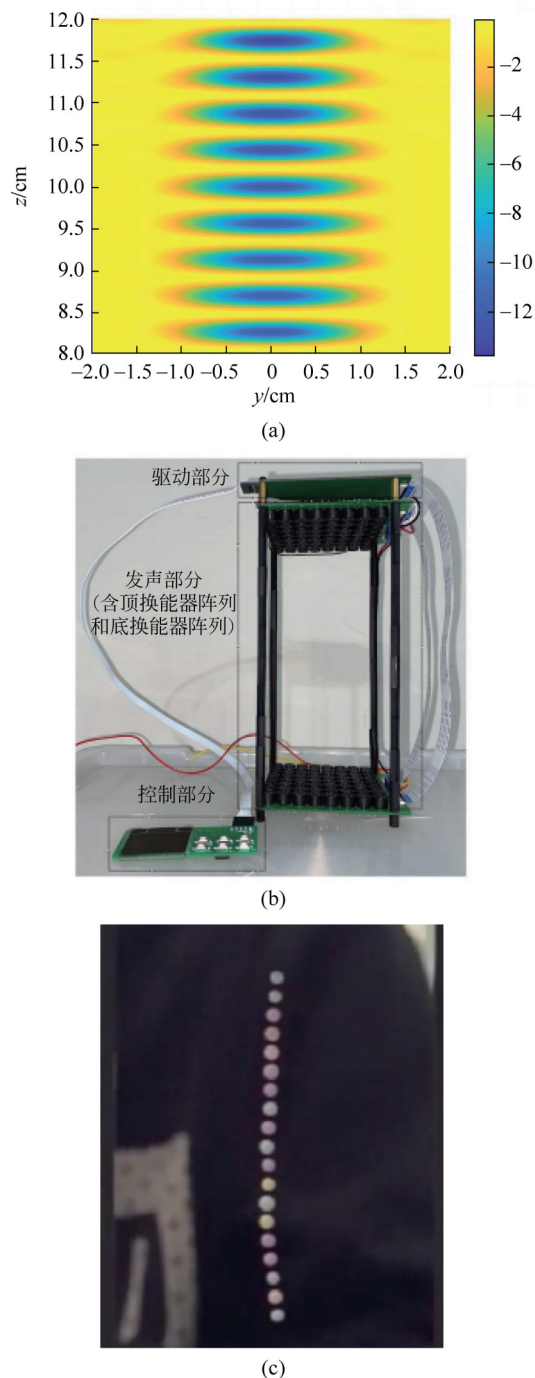


图4 《模块化的超声波悬浮与三维空间移动装置的研制》
SRTP项目成果

(a) 势能分布理论结果; (b) 声悬浮装置照片; (c) 声悬浮实现效果

以北京科技大学2018级本科生牟天钰为第一作者的论文《平面相控阵下微小固体的超声波悬浮与移动》已发表于《物理实验》^[11]。以北京科技大学2019级本科生张烨为第一作者的论文《用平面声波方式实现颗粒悬浮的理论讨论》已发表于《物理与工程》^[12]。

2.5 《柔性ITO电极受周期性冲击作用实时电阻表征》SRTP项目(结题)

柔性薄膜电极目前广泛用于柔性显示技术、可穿戴技术等领域当中,氧化铟锡(ITO)功能材料是其最重要的代表之一。柔性ITO薄膜电极广泛应用于光电器件、太阳能电池、平板液晶显示和透明电磁屏蔽等领域,具有很高的科研价值。其缺点是抗弯折能力差,易碎裂,使器件失效。研究柔性ITO电极受弯折等应力作用下失效的物理过程和物理机制,并进一步提升柔性电极性能,成为本领域关键考量之一。课堂上,教师首先向学生展示了柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯(PEN)衬底上ITO薄膜的导电特性,及其易碎裂的物理现象,使学生思考如何进行物理表征。着重引导学生反溯伏安法等基本物理原理,发展出了一套原位实时电阻表征实验系统。

该套实验系统(图5(a))可使柔性ITO电极在不同撞击半径、方式、速率的作用下,产生弯曲、拉伸、针戳、折叠等多种变形,并实时测量其电阻变化(图5(b))。学生自主设计仪器电路,进行Labview虚拟仪器编程,实现了实验参数及测量值的持续记录和实时展示(图5(c))。装置通过滚珠丝杠将扭矩转换成轴向反复作用力,使柔性ITO电极按特定方式弯曲变形,在单片机控制下产生规律的应力变化(图5(d))。

教学团队引导学生对ITO碎裂的过程做深入分析,探究在裂纹产生后电阻不断上升的物理机制。在周期性冲击过程中,导致ITO薄膜电阻增加的主要原因是在其表面形成的微观和宏观尺度的裂纹。这些裂纹起源于ITO和PEN基底之间的杨氏模量差异、内部应力和外部疲劳载荷等因素。由于缺陷、位错、褶皱、空洞和杂质粒子的存在,周期性冲击初期产生的微观裂纹通常较短且较浅,对电阻增加的贡献较小,也即非特征性裂纹。随着周期性冲击的进行,非特征性裂纹的长度逐渐增加。当非特征性裂纹的深度达到ITO层厚度,ITO层在厚度方向上完全破裂形成特征性裂纹,这种裂纹对电阻增加的贡献更大。结合理论课程中学习过的“道尔顿板”原理,阐明了相应的微观机制,并拓展为宏观物理模型,实现了“从理论出发进行实验,再用实验结果拓展理论”的完整知识研习过程。

以北京科技大学应用物理专业黄昆班2018

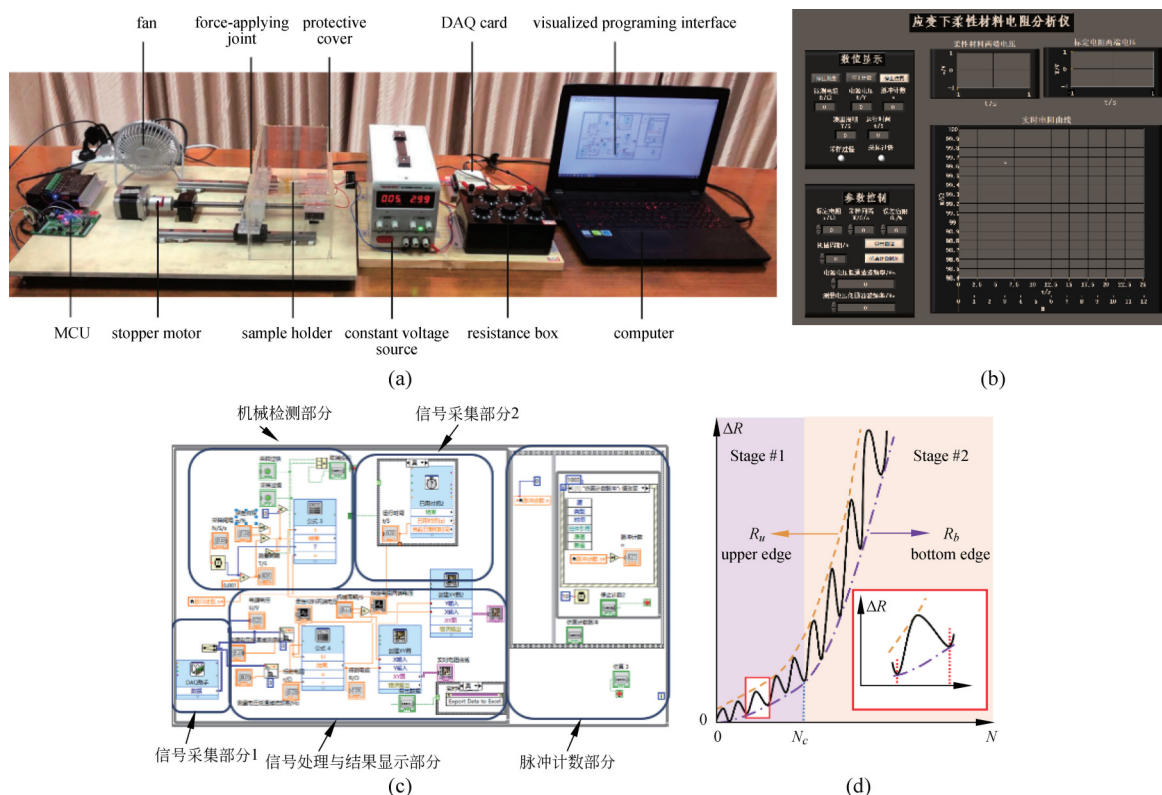


图5 《柔性 ITO 电极受周期性冲击作用实时电阻表征》SRTP 项目成果

(a) 实验系统照片；(b) 系统 Labview 视窗；(c) 系统程序架构；(d) ITO 薄膜电阻增量 ΔR 与撞击次数 N 的一般关系

级本科生于姗姗为第一作者的全英文 SCI 论文《Real-Time Resistance Characterization of ITO Film Electrode on Flexible Substrate Under Periodic Impact》(《柔性衬底上 ITO 薄膜电极在周期性冲击作用下的实时电阻表征》)已发表于《Materials Science in Semiconductor Processing》(《半导体加工中的材料科学》)杂志^[13]。相关的装置已获得实用新型专利^[14]。

2.6 《具有优化纳米结构的单结钙钛矿太阳能电池仿真研究》SRTP 项目(结题)

太阳能电池和纳米功能器件是凝聚态物理学在器件方面取得的较为突出的两类成就。在半导体太阳能电池表面生长具有周期性的纳米材料阵列结构,可以大幅提升太阳能电池的光吸收率。这一现象的物理基础是陷光效应,已在单晶硅、多晶硅、微晶硅、砷化镓等多种传统无机半导体电池中得到应用。然而对于新兴的钙钛矿电池行业,由于其电池结构的复杂性与特殊性,如何在其中引入周期性纳米结构,以及其潜力究竟有多大,成为了亟待探究的问题。

实验课程教学中,教师在讲授《光的等厚干涉》《太阳能电池性能测量》等实验时,通过图片、视频展示等方式讲解半导体材料中陷光效应(light trapping effect)的存在,并介绍钙钛矿光伏材料的最新研究进展。通过电磁仿真动画,介绍陷光效应是指通过在半导体表面或内部引入周期性纳米结构增强光的吸收。这种现象的基本原理是延长光在材料中的传播路径,形成多次反射、散射和衍射,从而增强光吸收,并提高光电转换效率。这一手段在传统无机半导体太阳能电池中已得到广泛应用。对于新兴的钙钛矿太阳能电池,引入周期性纳米结构并研究陷光效应的潜力具有重要意义,因为钙钛矿材料同样具有良好的光吸收能力,而通过优化陷光效应,可以进一步提高电池的光电转换效率。在此基础上,教师进一步引导学生思考:太阳能电池效率是否可能存在极限?如何求取这类极限?要求他们回溯在光学、电动力学、半导体物理学等课程中学习过的麦克斯韦方程组、电介质等知识,并介绍时域有限差分(FDTD)方法等仿真方法和基本结构类型(图 6(a)~(b))。

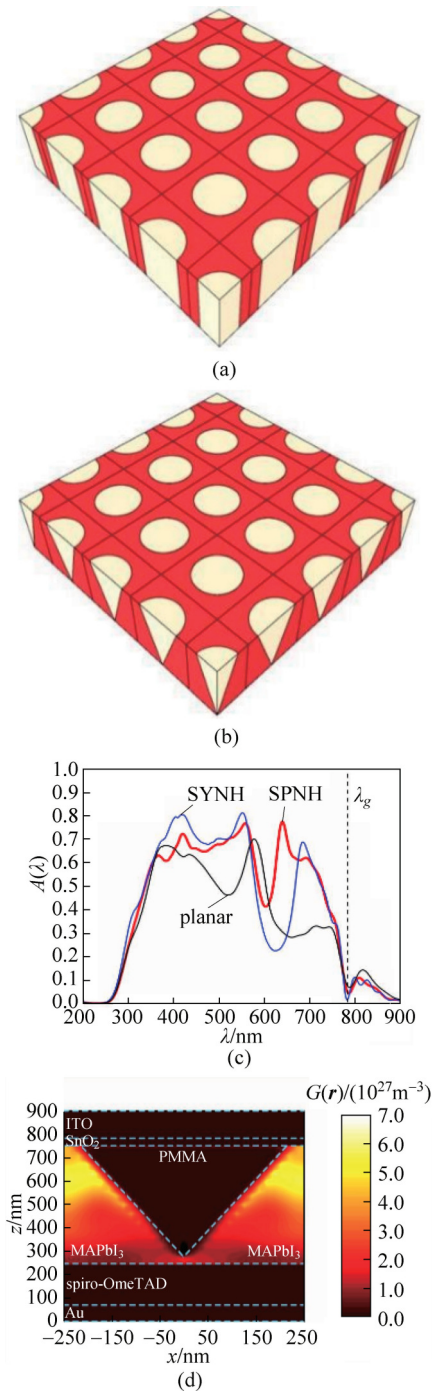


图6 《具有优化纳米织构的单结钙钛矿太阳能电池仿真研究》S RTP项目成果

(a)~(b) 空柱型结构与空锥型结构；(c) 含织构电池与平面、无织构电池吸收谱作比较；(d) 含空锥型结构电池剖面的载流子浓度分布

设计电池结构后,应用 FDTD 方法研究“ $n-i-p$ ”正型含周期性纳米织构钙钛矿电池的光吸收和极限效率(图 6(c))。该 S RTP 项目中,学生在 Lumerical FDTD 程序界面下通过自主编程,以织构类

型、钙钛矿层厚度、织构高度、织构周期、占空比等参数对电池极限效率之影响为研究目标,进行了诸多探索(图 6(d)),并总结出一套可实际实现的含织构电池制备流程,分析了载流子浓度、载流子寿命等诸多物理量与电池效率的关系。

以北京科技大学材料物理专业 2018 级本科生关昊辰为第一作者的全英文 SCI 论文《Simulation Study of Significant Optical Absorption Enhancement for “ $n-i-p$ ” Structured Perovskite Solar Cells with Optimized Periodic Nano Texture》(《具有优化周期纳米织构的“ $n-i-p$ ”型钙钛矿太阳能电池显著增强光吸收的仿真研究》)已发表于《Physica B》(《物理 B》)杂志^[15]。

2.7 《硅与钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率》S RTP 项目(在研)

传统硅电池的效率已近极限。钙钛矿作为廉价光伏材料,可与硅结合形成硅/钙钛矿叠层电池,以较低成本大大提高效率。目前对高性能硅/钙钛矿叠层电池的研究局限于改变异质结硅底电池的硅片工艺、厚度、表面尺寸和复合材料等,从电池结构上做突破性改进的报道还较少。在实验课教学中,我们首先介绍了叠层电池的概念,使学生亲身感受硅电池与钙钛矿电池相结合的“ $1+1>2$ ”之功效。在此基础上,进一步讲解顶电池和底电池之间的电流匹配关系,告诉学生在叠层电池中,顶部的钙钛矿电池和底部的硅电池在电流匹配方面需要进行优化,以确保电流在两个层之间的平衡以最大化光能吸收。从现象入手,引导学生反溯折射率(图 7(a))、物质守恒定律等基本物理原理,自主推导叠层电池内顶电池和底电池的电流匹配关系,并在阅读文献后使用 FDTD 方法论证最顶电池最优禁带宽度范围(图 7(b))。进一步地,引导学生寻找在硅/钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率的方法,并予以实验验证。

以北京科技大学应用物理专业 2019 级本科生谢盈为第一作者的论文《Significant Enhancement of Ultimate Efficiency for Perovskite/c-Si Tandem Solar Cell with Optimized Periodic Nano Texture》(《优化周期纳米织构显著增强钙钛矿/晶体硅叠层太阳能电池效率研究》)正在做最后整理,将于近期投出。

“授人以鱼”不如“授人以渔”。为使学生能够适应未来社会发展的挑战,其关键在于“学会学习”。科学思维是“学会学习”的重要基础,以“大

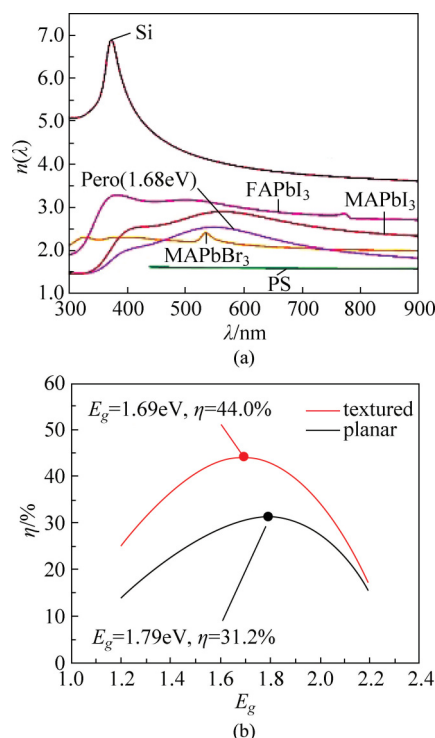


图7 《硅与钙钛矿叠层电池内制备纳米织构提升电池效率》SRTP项目成果

(a) 杂化钙钛矿(禁带宽度为1.68 eV)的折射率与其他钙钛矿材料对比; (b) 电池极限效率与顶电池禁带宽度关系理论结果

学物理实验”课程为基础,在SRTP本科生科技创新项目的不断锤炼下,我们通过教师-学生、学生-学生之间的互动探讨与实践探索,强化分析讨论训练,提高分析讨论的深度,逐步培养训练学生提出问题、分析问题并最终解决问题的能力。通过系统的实验方法与技能训练,在培养学生的实践能力与创新意识的同时,训练学生认知问题、提出问题与解决问题的思维能力,最终为学生应对未来工作、科技进步和社会发展做基础性准备。

3 反溯教学法的深度开拓

反溯教学法在本科生物理实验教学中得到了成功运用。为进一步开拓这一教学方法,课题组作了进一步的探索和挖掘,努力向教学输送可转化为本科生实验内容和研究方向的潜在课题项目。所取得的研究成果正源源不断地转化为本科生训练素材,为他们拓宽科学视野,进一步做好工作打下了良好的基础。

3.1 《多线圈磁耦合谐振实验仪》项目

通过对中、外大学物理实验课程内容体系现

状进行广泛调研,研究理论课与实验课教学内容、知识体系和教学难点之间的相互关系,聚焦学生以后在生产、科研活动中对物理原理的应用和要求,课题组从开展科学研究的思路 and 角度出发,紧密结合物理学科专业特点与创新型人才培养需求,重新梳理了我校电磁学相关实验项目。在物理实验课程中引入基于“磁耦合谐振原理”的无线电能传输这一科学研究前沿内容,以完善课程体系,填补我校大学物理实验教学空白。由于市场没有成熟设备,课题组仪器设计团队启动了磁耦合谐振原理实验仪的自研。

磁耦合谐振原理是本科生电磁场理论教学中的难点,也是电磁学领域科学研究前沿。历时多年的课堂试用、改进和优化,团队最终定型了多线圈磁耦合谐振实验仪(图8(a)~(b))。

实验仪由驱动线圈利用接入高频交流信号产生交变磁场,发生近距离的电磁感应耦合使发射线圈产生自谐振。由于发射线圈和接收线圈拥有一样的固有频率,且与产生的交变磁场的频率相同,因此发射线圈和接收线圈之间发生谐振。电磁能量在两线圈之间实现周期性的交换振荡,从而建立起一条能量传输的通路,发射线圈和接收线圈之间进行磁场能量的交换。通过近距离电磁感应耦合转移到设备线圈,进而为设备提供电能,从而实现系统源源不断的无线电能传输,可点亮“USTB”字样LED灯(图8(c)~(d)),或为手机充电。在此基础上,团队通过理论推导、数学建模,探究了强耦合线圈装置内品质因数等物理量与线圈数目、线圈半径的关系(图8(e)),并研究了趋肤效应等现象。

该套实验装置设计巧妙,便于推广。现象明显、趣味性较强。可用于大学物理演示实验、理论课堂教学演示等,开阔学生视野。系统的可拓展性强,学生通过自己动手组装无线供电系统,调节谐振频率,自制无线手机充电装置,现场为自己的手机充电,体验无线充电的生活方式和技前沿的孵化产品,使学生有强烈的成就感,培养学生对科技前沿探索的兴趣。可直观地对互感现象、谐振现象、频率分裂现象、趋肤效应、电磁耦合模理论等进行演示与验证,内容设计上既给学生留下了较大的发挥空间,难度恰当又不至于使学生难于上手,有利于学生的主动参与。相关的装置已获得实用新型专利^[16]。

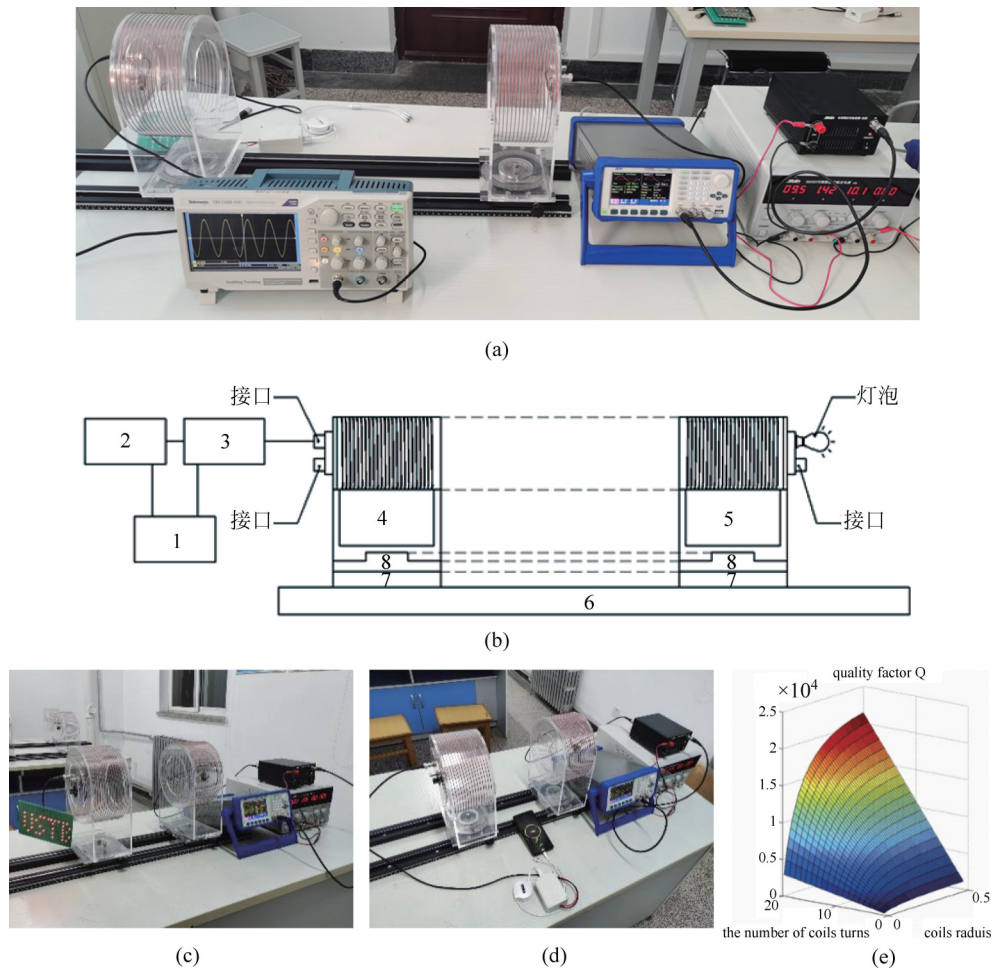


图8 《多线圈磁耦合谐振实验仪》项目成果

(a) 实验仪照片; (b) 实验仪结构; (c) 实验仪点亮“USTB”字样LED灯照片; (d) 实验仪为手机无线充电照片; (e) 品质因数与线圈数目、线圈半径的关系

3.2 《LiTFSI 等离子型化合物改性空穴传输层》项目

聚(3,4-乙烯二氧噻吩):聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT:PSS)具有可导电、透明度高、涂布能力强等优点,广泛应用于固态电容、防静电涂层、印刷电子等领域。在“*p-i-n*”反型钙钛矿电池中,PEDOT:PSS常作为空穴传输层使用。然而PEDOT:PSS存在导电性不够理想、具有酸性、易吸湿、在活性层表面浸润性差等缺点,限制了相应反型钙钛矿电池的光电转换效率和稳定性。

近10年来,通过掺杂等方法改进PEDOT:PSS材料的思路不断涌现。其中,掺杂双三氟甲磺酰亚胺锂(LiTFSI)等导电性增强掺杂剂以同时增强PEDOT:PSS材料导电性和耐弯折能力的研究获得了很大关注。以多种方法表征PEDOT:PSS:Li的弯折失效现象(图9(a)),制备优化后的

电池(图9(b)),并实现了16.8%的电池效率(图9(c))。

论文《Enhancing Power Conversion Efficiency and Anti-Bending Ability of Flexible Perovskite Solar Cells with PEDOT:PSS:Li Hole Transport Layer》(《PEDOT:PSS:Li空穴传输层提高柔性钙钛矿太阳能电池的光电转换效率和抗弯曲能力》)已发表于《Journal of Physics D: Applied Physics》(《物理期刊D:应用物理》)杂志^[17]。对这一课题的研究,可将对PEDOT:PSS:Li材料物理性质的测量反溯至伏安法、能带结构、库伦作用力等基础物理知识。课题组为此设计了进一步的实验计划和装置,计划于2022—2023年通过本科生SRTP项目予以实施。

3.3 《PVP修饰锡基钙钛矿》项目

聚乙烯吡咯烷酮(PVP)是重要的非离子型高

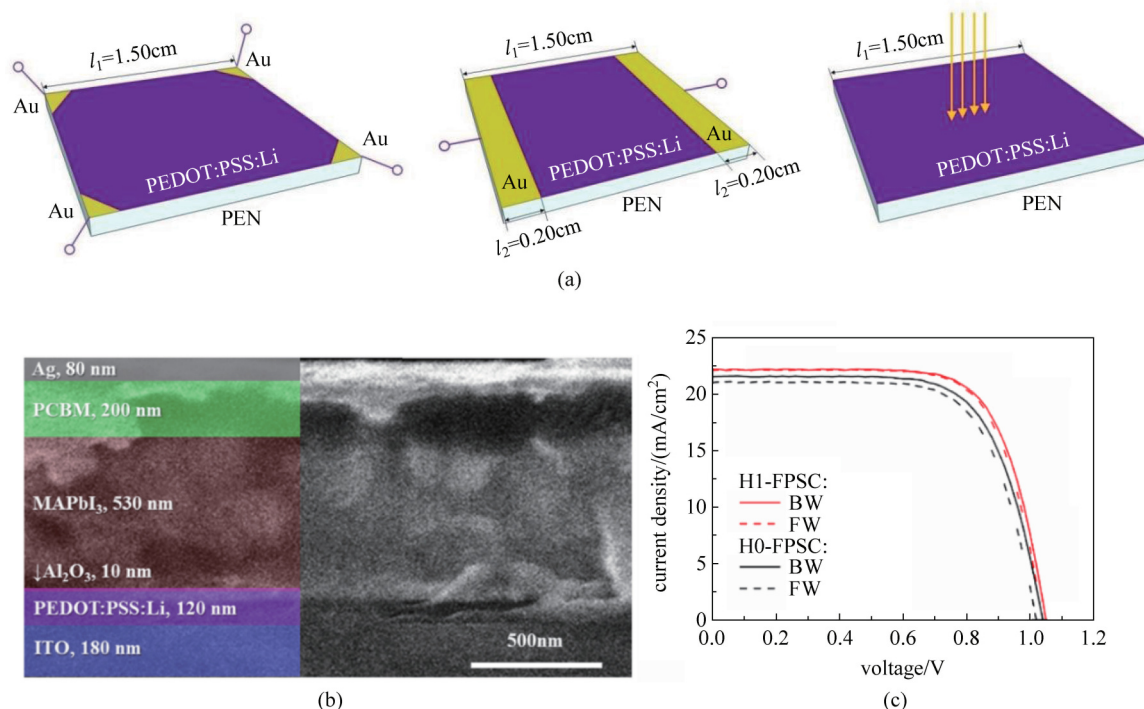


图9 《LiTFSI等离子型化合物改性空穴传输层》项目成果

(a) 使用霍尔法、电阻法和四探针法表征柔性 PEDOT:PSS:Li 层弯折失效现象原理示意图; (b) 所制电池结构与横截面 SEM 照片; (c) 改进后的电池正扫与反扫 $J-V$ 曲线结果

分子化合物,是 N -乙烯基酰胺类聚合物中最具特色,被研究得最深、最广泛的高分子化学物质。纺织印染行业中,PVP 因与许多有机染料有良好的亲和力,可与聚丙烯腈、聚氨酯、尼龙、纤维素等多种类疏水性合成纤维相结合,具有较为成熟的加工技术。而这一点,与锡基钙钛矿材料构建柔性可穿戴器件的未来发展方向不谋而合,为其应用打下了良好的基础。我们将 PVP 掺入甲氧锡碘(FASnI₃)材料,并对其薄膜结构进行了分析(图 10(a))。所制锡基电池(图 10(b))实现了 7.8% 的效率。时间分辨光致发光谱(TRPL)(图 10(c))和电池各层吸收率理论计算结果(图 10(d))验证了 FASnI₃:PVP 材料的结晶质量和光吸收能力。

论文《Enhancing Performance of Tin-Based Perovskite Solar Cells by Polyvinyl Pyrrolidone Doping Strategy》(《聚乙烯吡咯烷酮掺杂提高锡基钙钛矿太阳能电池性能研究》)已发表于《Optical Materials》(《光学材料》)杂志^[18]。课题中,锡基钙钛矿材料的光电性质可反溯至禁带宽度、谐振子、载流子扩散长度等基础物理知识。我们设计了进一步利用高聚物改进锡基钙钛矿的实验装

置,并将之应用于钙钛矿光伏器件准备。

3.4 《含锌离子液体 $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ 掺杂 PEDOT:PSS》项目

以 LiTFSI 为代表的离子型添加剂在掺杂 PEDOT:PSS 领域应用中取得了良好的效果。然而,锂离子在器件中易腐蚀 ITO 层,降低器件的使用寿命。为此,我们进一步尝试采用了基于锌元素为基础的双三氟甲磺酰基酰亚胺锌($\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$)作为 PEDOT:PSS 层的添加剂,形成 PEDOT:PSS: $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ 材料。通过紫外发光光谱(UPS)探究其功函数(图 11(a)),并将其作为空穴传输层材料,应用于玻璃衬底与柔性衬底上结构为“ITO/PEDOT:PSS: $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ /MAPbI₃:PVA/PCBM/Ag”的电池(图 11(b))中,取得了 18.4% 的效率。

论文《PEDOT:PSS: $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ for Rigid and Flexible “ $p-i-n$ ” Structured Perovskite Solar Cells: Strategies and Applications》(《PEDOT:PSS: $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ 用于刚性和柔性“ $p-i-n$ ”结构钙钛矿太阳能电池:策略和应用》)已发表于《Materials Letters》(《材料快报》)杂志^[19]。与 $\text{Zn}(\text{NTf}_2)_2$ 等多

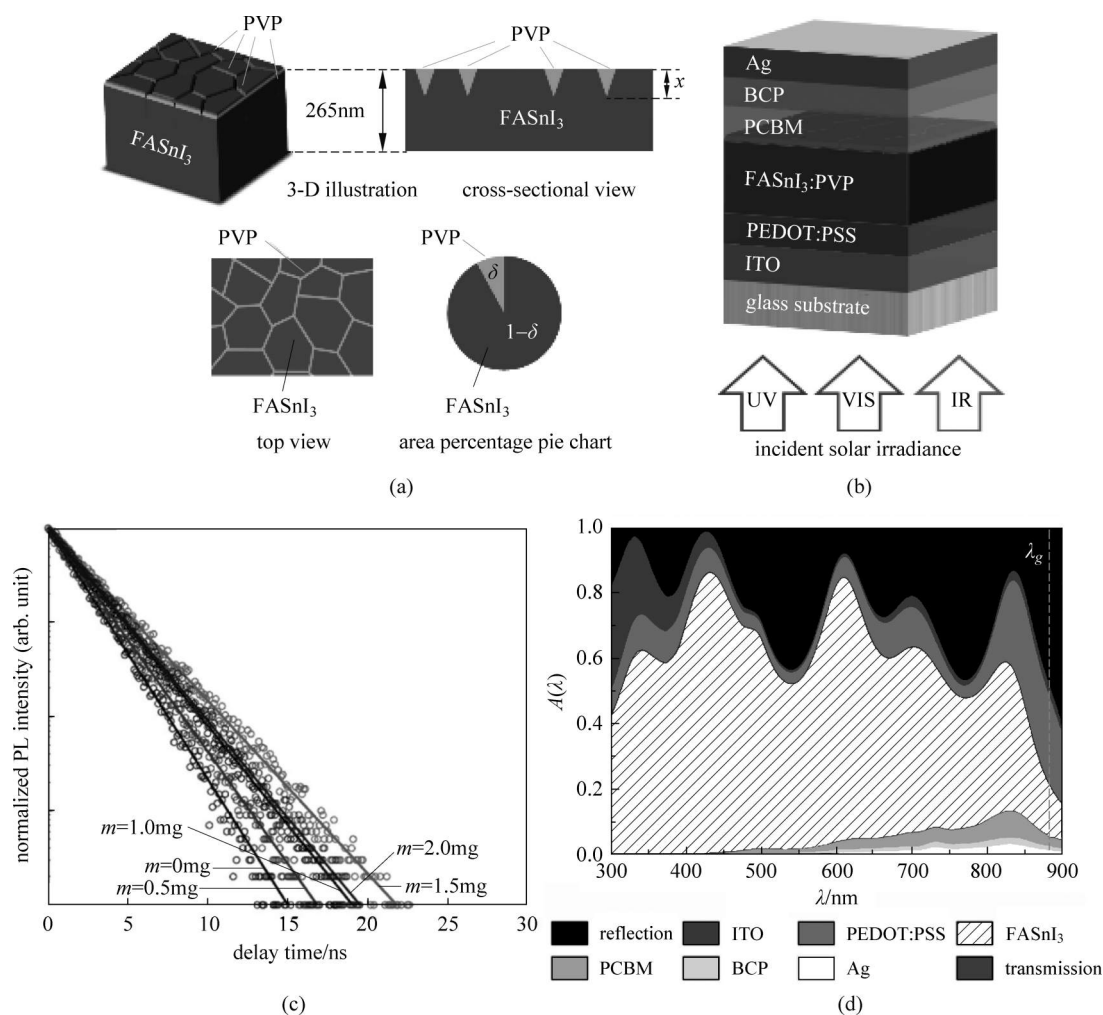
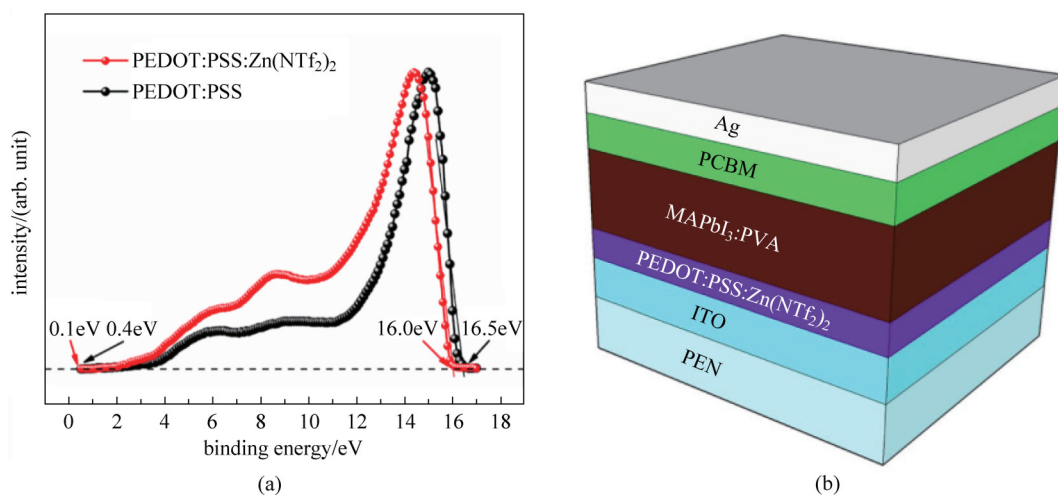


图 10 《PVP 修饰锡基钙钛矿》项目成果

(a) FASnI₃:PVP 薄膜结构模型；(b) 所制电池三维结构；(c) 改变 PVP 掺杂量后所形成 FASnI₃:PVP 的 TRPL 谱；(d) 电池各层吸收率理论结果

图 11 《含锌离子液体 Zn(NTf₂)₂ 掺杂 PEDOT:PSS》项目成果

(a) PEDOT:PSS:Zn(NTf₂)₂ 与 PEDOT:PSS 的 UPS 谱测量结果；(b) 所制电池三维结构

价态离子液体相关的材料性能,可反溯至化学键成键、拉曼光谱等基础物理知识,我们将围绕这类新型材料的器件应用,进一步开展教学及科研实验。

4 结语

综上所述,课题组探索使用反溯教学法,从实验室建设、新教材建设、新实验编排、本科生科技创新、实验课程与最新科研项目结合等角度,对“大学物理实验”课程体系进行了全面的研究和建设,取得了显著成效。课题组将继续开展研究,结合新的教学实践,紧扣科技发展前沿,进一步开展课程内容研究与建设工作。

参考文献

- [1] 吴平,邱宏,孙旭贵,等.将科学研究的思维方式引进普通物理实验教学[J].实验技术与管理,2003(1):73-75.
WU P, QIU H, SUN S G, et al. Introducing the scientific research mindset into ordinary physics experimental teaching [J]. Experimental Technology and Management, 2003(1): 73-75. (in Chinese)
- [2] 张师平,吴平,赵雪丹,等.以本科生科技创新和物理实验竞赛促进创新型人才培养的探索[J].物理与工程,2016(S1): 213-215.
ZHANG S P, WU P, ZHAO X D, et al. The exploration of promoting innovative talents cultivation by student research training program and physics experiment competition [J]. Physics and Engineering, 2016(S1): 213-215. (in Chinese)
- [3] 李永涛,张红光,陈伟,等.大学物理实验课程创新教学改革与实践[J].大学物理实验,2021(5):122-124.
LI Y T, ZHANG H G, CHEN W, et al. Innovation teaching reform and practice of college physics experiment course [J]. Physical Experiment of College, 2021(5): 122-124. (in Chinese)
- [4] 刘悦,周硕,郑君刚.工科院校物理实验教学改革现状分析与对策研究[J].物理通报,2012(3):65-67.
LIU Y, ZHOU S, ZHENG J G. Analysis and countermeasures research on the current situation of physics experimental teaching reform in engineering colleges [J]. Physics Bulletin, 2012(3): 65-67. (in Chinese)
- [5] 樊英杰.“新工科”背景下物理演示与探索实验的自主开发与创新研究[J].实验技术与管理,2020(5):200-202.
FAN Y J. Independent development and innovation of physical demonstration and exploration experiment under background of “New engineering” [J]. Experimental Technology and Management, 2020(5): 200-202. (in Chinese)
- [6] 李明雪.基于创新人才培养的大学物理实验五维一体教学改革[J].高师理科学刊,2015(3):87-90.
LI M X. Five-dimensional teaching reform based on innovative talents cultivation of college physics experiment teaching [J]. Journal of Science of Teachers' College and University, 2015(3): 87-90. (in Chinese)
- [7] 周珺.以物理实验课程教改促进新工科本科生创新型人才培养的探索[J].大学物理实验,2020(5):150-152.
ZHOU J. Physics experiment curriculum reform promotes the exploration of new engineering undergraduate, innovative talents training [J]. Physical Experiment of College, 2020(5): 150-152. (in Chinese)
- [8] 邱宏,赵雪丹,于明鹏,等.把“薄膜光电导效应”引入探究型实验教学[J].大学物理,2018(5):57-61.
QIU H, ZHAO X D, YU M P, et al. The research-based physics experiment: Photoconductivity of the semiconducting film [J]. College Physics, 2018(5): 57-61. (in Chinese)
- [9] 裴艺丽,张师平,李亚男,等.用四探针平台测量热电材料塞贝克系数的实验探索[J].物理与工程,2017(5):107-109.
PEI Y L, ZHANG S P, LI Y N, et al. Experimental exploration on testing Seebeck coefficients of thermoelectric materials used by four-probe platform [J]. Physics and Engineering, 2017(5): 107-109. (in Chinese)
- [10] 吴平,陈森,邱红梅,等.理科物理实验教程:力学、热学、电磁学、光学实验分册(第2版)[B].清华大学出版社,2022年4月.
- [11] 牟天钰,裴艺丽,张师平,等.平面相控阵下微小固体的超声波悬浮与移动[J].物理实验,2022(10):1-6.
MU T Y, PEI Y L, ZHANG S P, et al. Ultrasonic levitation and movement of tiny solids in planar phased array [J]. Physics Experimentation, 2022(10): 1-6. (in Chinese)
- [12] 张烨,张师平,牟天钰,等.用平面声波方式实现颗粒悬浮的理论讨论[J].物理与工程,2022(2):114-121.
ZHANG Y, ZHANG S P, MU T Y, et al. Theoretical discussion on particle suspension by plane acoustic wave [J]. Physics and Engineering, 2022(2): 114-121. (in Chinese)
- [13] YU S S, WANG C Y, WANG J L, et al. Real-time resistance characterization of ITO film electrode on flexible substrate under periodic impact [J]. Materials Science in Semiconductor Processing, 2022(140):106388.
- [14] 王晨洋,王金龙,于姗姗,等.一种用电学特性表征的柔性薄膜电极疲劳性能测试装置[P].CN216285484U.
- [15] GUAN H C, XIE Y, XING Y, et al. Simulation study of significant optical absorption enhancement for “n-i-p” structured perovskite solar cells with optimized periodic nano texture [J]. Physica B: Condensed Matter, 2022(643): 414171.
- [16] 陈森,何昀,吴平,等.磁耦合谐振实验仪[P].CN209312306U.
- [17] XIE Z A, et al. Enhancing power conversion efficiency and anti-bending ability of flexible perovskite solar cells with PEDOT:PSS:Li Hole transport layer [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2021(54):455105.
- [18] XIE Z A, WU P, CHEN S, et al. Enhancing performance of tin-based perovskite solar cells by polyvinyl pyrrolidone doping strategy [J]. Optical Materials, 2022, 129: 112511.
- [19] CHEN S, XIE Z A, PEI Y L, et al. PEDOT:PSS: Zn(NTf₂)₂ for rigid and flexible “p-i-n” structured perovskite solar cells: Strategies and applications [J]. Materials Letters, 2023, 333: 133668.