

COMSOL仿真与大学物理实验的融合

周庆佳 邵伟佳

广西师范大学物理科学与技术学院, 中国·广西 桂林 541004

摘要: 传统大学物理实验课程中的透镜成像实验多侧重于验证几何光学规律, 实验内容与设计相对固化, 不利于学生深入理解光场调控的物理机制与科学前沿发展。本文基于仿真软件 COMSOL Multiphysics, 探讨汇聚超构透镜的设计及模拟在实验教学中的可行性与实施路径。将超构表面这一前沿人工结构引入实验教学, 设计并实现了用于光束聚焦的一维超构表面仿真模型。通过数值模拟, 直观展示超构表面对光波聚焦能力, 突破传统凸透镜在功能与设计上的局限。本文旨在借助前沿技术载体, 提升课程的研究性与趣味性, 培养学生面向未来的光学设计思维与创新实践能力。

关键词: 大学物理实验; 汇聚透镜; 数值模拟; 超构表面

Integration of COMSOL Simulation and College Physics Experiments

Zhou Qingjia, Shao Weijia

School of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, China Guangxi Guilin 541004

Abstract: The traditional lens imaging experiments in college physics courses mainly focus on verifying the laws of geometric optics, with relatively fixed experimental content and design, which is not conducive to students' in-depth understanding of the physical mechanisms of light field control and the development of scientific frontiers. This paper explores the feasibility and implementation path of designing and simulating converging metasurfaces in experimental teaching based on the simulation software COMSOL Multiphysics. By introducing the advanced artificial structure of metasurfaces into experimental teaching, a one-dimensional metasurface simulation model for beam focusing is designed and implemented. Through numerical simulation, the focusing ability of metasurfaces on light waves is visually demonstrated, breaking the limitations of traditional convex lenses in function and design. This paper aims to enhance the research and interest of the course by leveraging advanced technological carriers, and cultivate students' optical design thinking and innovative practical abilities for the future.

Keywords: College physics experiment; Converging lens; Numerical simulation; Metasurface

0 引言

汇聚透镜作为波动光学与几何光学中的基础元件, 是《大学物理实验》课程中验证成像规律、理解光场调控的核心载体之一, 在全国高校理工科实验教学中具有不可替代的地位。传统透镜实验通常基于几何光学理论, 通过实物透镜、光具座与像屏等装置, 引导学生验证薄透镜公式、测量焦距并观察成像规律^[1]。这类实验有助于学生建立对光传播与聚焦的初步认识, 培养其基本的实验操作与数据处理能力。

然而, 随着微纳光学与计算电磁学等前沿领域的快速发展, 传统实验内容与教学模式逐渐显现出其局限性^[2-3]。一方面, 实体实验受限于器件固定参数与加工工艺, 难以动态展示光场振幅、相位与偏振的灵活调控过程, 学生对“光是如何被精确操控”的物理机制理解往往停留在公式

层面。另一方面, 实验内容长期聚焦于经典验证, 与当前前沿的光子器件设计方法(如超构表面、光子晶体等)脱节^[4], 导致课程内容滞后于学科发展, 难以激发学生探索兴趣, 亦无法有效培养其面向未来的光学设计思维与创新实践能力。

鉴于此, 本文立足于教学改革与学科前沿相融合的理念, 尝试将超构表面这一新兴的人工结构引入“薄透镜焦距的测量”实验教学。通过设计可调控光束波前的超构表面模型, 并借助数值仿真软件实现光场可视化, 突破传统实验仅公式呈现的限制。本文将系统探讨该设计方案在教学实施中的可行路径、对学生深入理解光场调控机制的作用, 以及如何借助此类前沿载体增强实验课程的研究性与趣味性, 从而为大学物理实验教学的内容革新与模式升级提供有益参考。

1 汇聚透镜实现的探讨

1.1 引入超构表面设计的必要性与可行性

汇聚透镜的实验教学作为理解光场调控与成像规律的核心环节,长期以来主要依托几何光学原理,采用固定参数的实物透镜引导学生进行公式验证与焦距测量。这种传统教学模式虽然直观,却在内容与方法上逐渐显现出固化倾向。其局限在于,实验过程往往侧重于对既定规律的验证与数据记录,学生被动遵循操作步骤,对光场汇聚的物理机制缺乏深度探索^[5];同时,实体透镜的参数不可调节,难以动态、连续地呈现光场演变过程,限制了学生对复杂物理图景的直观构建;此外,教学内容与当代光学设计前沿(如微纳光学、计算光子学)之间存在明显代差^[6],既难以激发学生的探究兴趣,也不利于培养其面向未来的创新设计能力。在此背景下,引入基于超构表面的前沿设计方法显得尤为必要。超构表面通过亚波长人工结构实现对光波振幅、相位与偏振的灵活调控,其设计理念打破了传统透镜的物理限制,能够将抽象的波前调控原理转化为可设计、可操作的仿真模型,从而深化学生对光场机制的理解。借助数值模拟平台,学生可自主调整结构参数、实时观测光场响应,使实验从“被动验证”转向“主动设计与探究”,有效激发学习动力与科研热情。与此同时,这一尝试也有助于推动实验教学内容与学科前沿接轨,使学生接触并实践现代光学研究的主流工具与方法,为其创新思维与复杂工程问题解决能力的培养奠定基础。

同时,这一教学革新在实践中具备充分的可行性。在知识基础上,尽管面向不同专业,但学生在学习本实验前已通过《大学物理》课程掌握了光学基础概念,如光的波动性与传播规律,这为理解超构表面的调控思想提供了必要的认知框架。在技术工具层面,开源电磁仿真软件平台已较为普及,为实施模拟仿真教学提供了可靠的技术支撑^[7-8]。在实施条件上,虚拟仿真实验可突破现有实验室在设备、成本与安全方面的限制,便于开展大规模、可重复、高自由度的设计性实验。因此,将超构表面设计融入传统透镜实验教学,是一条兼具前瞻性与实践性的可行改革路径。

1.2 超构表面设计在薄透镜焦距测量实验教学中的作用

学生学习薄透镜焦距的测定实验,其核心目标在于理解薄透镜对光场操控的物理本质,并掌握光学成像的基本规律。因此,实验教学应当引导学生从物理机制出发,透过现象理解光与物质相互作用的深层逻辑。然而,传统透

镜实验多停留于验证几何光学公式与测量操作,学生通过调节物距、像距获得清晰像,记录数据,实验即完成。这类实验虽然能够训练基础操作技能,却难以引导学生思考“光为何能够被汇聚”“相位与传播方向如何关联”等更具物理学深度的命题。学生掌握了焦距的测量方法,却未必理解光场调控原理。

将超构表面设计引入薄透镜焦距的测定实验,可促使实验教学从单一的几何光学验证,拓展至波动光学与人工微结构调控的交叉领域,使课程内容更加丰富。学生在传统实验中建立对透镜功能的感性认识,再通过超构表面的设计实践,理解汇聚功能可以通过相位调控以全然不同的物理路径实现。这种“殊途同归”的设计体验,有助于完善学生对光学调控机制的整体认知,增强其对抽象物理概念的具象化理解。

1.3 超构透镜设计与课程内容的适配度

将超构透镜设计引入汇聚透镜实验教学,并非以前沿内容完全取代经典实验,而是在现有课程框架内寻求有机融合与适度拓展。超构透镜的物理本质是通过亚波长结构调控光波相位以实现汇聚或发散功能,其核心思想并未脱离学生已学的波动光学基础。《大学物理》或《普通物理》课程中关于光的干涉、衍射及惠更斯原理等内容,为理解超构表面“引入相位突变、重塑波前”的调控机制提供了必要的理论铺垫。教师无需额外补充过多前沿理论,只需在现有光学知识基础上向前延伸一步,即可实现从经典波动光学到现代微纳光学的自然过渡。此外,超构透镜设计在教学中的定位并非要求学生完全掌握电磁仿真全流程,而是以理解物理思想、体验设计过程为主要目标。借助商用仿真软件,教师提供好基本已经建好的超构透镜模型,学生只需要调整结构单元的关键几何参数,直观观察光场聚焦或发散效果的动态变化。最后,超构透镜设计可灵活嵌入现有实验教学环节。既可作为透镜成像实验的课前探究任务,引导学生思考“除了改变曲面形状,还能如何实现汇聚”;也可作为课后拓展项目,供学有余力的学生开展研究性学习。因此,超构透镜设计与现有课程内容具有相当高适配度,能够在不过度增加学时负担的前提下,有效丰富课程内容、拓展学生视野并培养学生学习能力。

2 基于 COMSOL 的超构透镜仿真实现

2.1 超构透镜模型的构建

在教学中,首先对超构透镜的基本模型及其对光的调控原理进行简要介绍。以汇聚型超构透镜实现光束聚焦为例,其模型如图 1(a)所示,该模型已由教师利用

COMSOL Multiphysics 软件预先构建完成。模型基于一块一维金属板,板上刻有 43 条宽度均为 w 的狭缝,相邻狭缝之间的间距为 g 。中间的狭缝折射率记为 n_1 ,从中间向两侧依次编号,折射率分别记为 n_2 至 n_{21} 。要实现光的汇聚功能,通常需要满足特定的相位条件:当光波到达透射界面时,其相位分布需满足 $\varphi(x) = -2\pi/\lambda(\sqrt{x^2 + f^2} - f)^{[9]}$,其中 λ 为入射光的波长, f 为超透镜的焦距。目标焦距为 1 cm,透镜厚度为 1 cm 且 $w = 0.18$ cm, $g = 0.02$ cm。图 1 (b) 实线为 φ 与 x 的变化关系。由于建模时狭缝个数是有限的,选择的狭缝透射相位必须是分立的。根据狭缝的坐标,选择的透射相位如图 1 (b) 的圆圈所示。为使每个狭缝的透射率不同,狭缝的折射率也应该不同。图 1 (c) 实线为狭缝透射相位与其折射率的关系。通过选择不同的折射率,可实现不同的透射相位,图 1 (c) 的圆圈从左到右依次即代表 n_1 至 n_{21} 所选择的值。学生根据图 1 (b) 和图 1 (c),将折射率填入对应的狭缝,即可完全超透镜的构建。在授课时,需要说明,这里是利用不同的折射率实现透射相位的调控,当前科学前沿,实现透射相位的调控有多种方法,方法不唯一。因此,让学生参与模型完成的最后一步,也是最重要的一步,让学生得到参与感,增加学生进一步学习的兴趣。模型构建完成,就能对入射光照到此超透镜的光路进行模拟,并进一步分析透镜的汇聚效果。

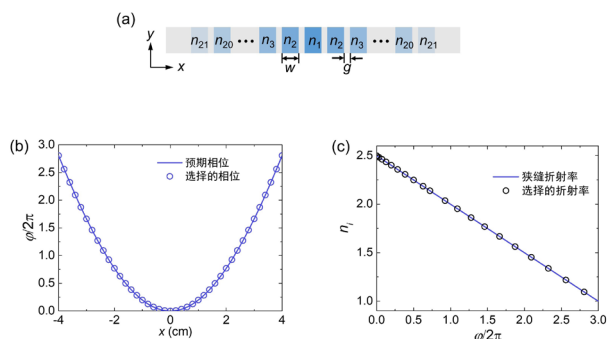


图1 (a) 超透镜模型; (b) 实现汇聚所需要的透射相位分布,圆圈代表选择的分立相位; (c) 狭缝的透射相位与所需折射率变化关系,圆圈代表选择的折射率

2.2 超透镜对光汇聚的模拟展示

完成超透镜模型构建并运行仿真后,即可获得如图 2 (a) 所示的光场分布图。图中,超透镜上方为入射端,下方为出射端。从光场分布可以清晰地观察到,在透镜下方预定的焦平面处出现了明显的聚焦光斑,这表明所设计的超透镜对入射光具有良好的汇聚作用。为进一步定量验证汇聚效果,图 2 (b) 对比展示了在有超透镜和无超

透镜两种情况下,焦平面上的电场强度分布。对比结果显示,有超透镜时电场包络的半高宽显著小于背景高斯光束包络的半高宽。这一差异从量化角度再次证实,所设计的超透镜能够有效调控光波前并实现能量汇聚。

然而,作为一项教学改革实践,仅呈现模拟结果远非终点。在授课过程中,教师需要引导学生在观察现象的基础上,将学生对知识的掌握,上升为对解决问题能力的培养。学生在亲手构建模型、调整参数并观察到聚焦效果的过程中,实际上已经完成了一次从抽象原理到具象实现的完整认知闭环。教师可以适时指出,超透镜的设计本质是一种逆向求解过程:给定目标光场(汇聚),反向设计结构参数(折射率)。学生在完成超透镜设计后,能够亲身体验从功能需求出发、逆向构建物理结构的完整设计思维过程。

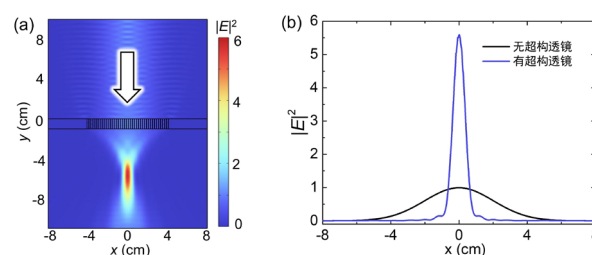


图2 (a) 模拟的电场强度分布图; (b) 焦平面上,有超透镜和无超透镜电场分布对比

3 结语

本文针对大学物理实验中实验内容固化、学生被动验证以及与学科前沿脱节等问题,将超透镜设计引入“薄透镜焦距的测定”实验教学中。利用仿真软件 COMSOL Multiphysics,构建一维超透镜仿真模型,模拟光束的聚焦,使学生从被动观察者转变为主动探究者,在参与模型参数调整与结果分析的过程中,深化对光场调控机制的理解。该方案在知识衔接、技术支撑与实施条件方面均具备可行性,能够在不显著增加学时负担的前提下,有效拓展课程内容、激发学生兴趣并培养其光学设计思维,为大学物理实验课程与学科前沿的有机融合提供了一种可推广的改革路径。

参考文献:

- [1] 方光宇,辛丽,赵海发.“薄透镜焦距测定”实验的教学探讨[J]. 物理实验, 2017, 37(09): 30-34.
- [2] 沈自序,周厚兵,荣家等. 大学物理实验的教学现状 & 改革探析[J]. 广西物理, 2018, 39(04): 32-34.
- [3] 尹吉庆,王卫国,陈珏先. 大学物理演示实验教学现状调查分析[J]. 物理之友, 2020, 36(02): 23-25.

[4] 马耀光, 高宇斌. 超构表面: 设计原理与应用挑战 (特邀) [J]. 中国激光, 2024, 51(01): 0103001.

[5] 吕凤珍, 陶维俱, 莫玉香. “薄透镜焦距的测定”实验方法探究[J]. 广西物理, 2014, 38(03): 32-36.

[6] 胡跃强, 李鑫, 王旭东等. 光学超构表面的微纳加工技术研究进展[J]. 红外与激光工程, 2020, 49(09): 20201035.

[7] 司黎明, 徐浩阳, 薛正辉等. 电磁波极化转换虚

拟仿真实验教学探究[J]. 实验室研究与探索, 2024, 43(04): 104-113.

[8] 陈倩, 韩露, 梁艳等. PhET 仿真实验与大学物理的融合[J]. 广西物理, 2025, 46(02): 77-89.

[9] 林若雨, 吴一凡, 付博妍等. 超构透镜的色差调控应用[J]. 中国光学, 2021, 14(04): 764-781.

作者简介: 周庆佳 (1995.10-), 男, 汉族, 广西宾阳县人, 博士研究生, 讲师, 研究方向: 物理学 - 光学。