

脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验的设计与教学实践*

厉淑贞 韩汝取 张亚梅 戴俊

(江苏科技大学理学院 江苏 镇江 212003)

(收稿日期:2021-03-17)

摘要:脉冲激光沉积镀膜实验是材料物理、材料化学等相关专业的重要实验项目,也是高阶大学物理实验教学中的重点和难点.然而该设备精密、价格昂贵、操作复杂,一般不适合大规模实践教学使用.本文设计了一套脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验项目,完整模拟实验场景,具有直观、智能、界面友好等特点.通过线上线下、虚实结合的教学模式,有效地培养学生基本实验素养和创新思维能力,有利于推动高校实验教学改革.

关键词:脉冲激光沉积 虚拟仿真 实验教学

脉冲激光沉积技术是一种利用高能量光束与物质的相互作用,用来沉积薄膜的新型工艺技术,广泛应用于各种半导体薄膜、超导薄膜、光学薄膜等,尤其是外延单晶纳米薄膜及多层结构薄膜的制备,在薄膜器件研究中具有极为重要的意义^[1,2].脉冲激光沉积镀膜实验是材料物理、材料化学等相关专业的重要实验项目,也是高阶大学物理实验教学中的重点和难点.然而该设备精密、价格昂贵、操作复杂、维护成本高,且在制备薄膜的过程中使用到激光、易燃易爆气体等,在整个实验过程中具有一定的危险性,从而限制了该实验的普及,严重制约了学生自主创新实验能力以及教师教学科研能力的提高.

虚拟仿真实验融合互联网技术,具有成本低、效率高、可扩展性强、高度开放和资源共享等特点,广泛地应用于各学科领域.虚拟实验资源以其独特的优势,介入实验教学体系,弥补了传统实验教学的不足,解决了传统实验教学的实际问题:如实验场地、实验仪器、教师资源的有限性等.因此虚拟仿真实验教学成为近年来我国高等院校实验教学中主要推进的教学改革项目^[3,4].

我校采用校企协同合作方式研发了脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验项目.通过该项目的学习,使学生对薄膜材料的制备及科学研究有初步了解.项目支持学生随时随地反复学习,“以虚促实”指导真实

实践教学,为学生尽早进入实验室从事科学研究做好准备.

1 脉冲激光沉积镀膜的基本原理

脉冲激光器所产生的高功率脉冲激光束通过透镜聚焦后作用于靶材表面,靶材吸收光波能量,温度迅速升高至蒸发温度而产生熔蚀,使靶材气化蒸发.瞬时蒸发气化的气化物质与光波继续作用,使其绝大部分电离并形成局域化的高浓度等离子体.等离子体火焰形成后,继续与激光束作用,吸收激光束的能量,产生进一步电离,使等离子体区的温度和压力迅速提高,使其沿靶面法线方向向外做绝热膨胀发射,形成等离子体羽辉.之后,气相粒子在基体上相互集聚在一起,不断地形成生长核,并且随着不断的沉积,核不断长大,在整个基体上形成岛状结构.不断长大的生长岛会逐渐彼此接触合并,一直到形成整体连续的一层膜^[5].根据需要,可以控制沉积条件一层一层地不断生长,直到薄膜的厚度达到预定目标.

薄膜的生长是一个十分复杂的过程,其中包括烧蚀粒子与基体表面的相互作用、粒子之间的相互作用,因此激光功率密度、基体的温度、粒子的入射能量和靶材与基体之间的距离等等因素都对生长过程的演化有着重要影响^[6].

* 教育部产学合作协同育人项目,项目编号:201902282050

作者简介:厉淑贞(1983-),女,硕士,讲师,主要从事大学物理及实验教学.

2 虚拟仿真实验项目的构建与开发

为了满足学生对前沿高端制膜设备的学习需求,基于实验室真实仪器,结合实验教学的具体情况,设计了脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验项目。其设计思路主要是:保持实验内容的完整性,展现虚拟过程的物理属性,实现实验过程的虚实融合,体现交互过程的智能化。

具体的知识点包括:(1)脉冲激光沉积镀膜的基本原理;(2)掌握基片的清洗步骤、靶材和基片的安装过程;(3)准分子激光器的调节与使用;(4)熟悉超高真空物理设备的操作细节、工作气压的调节过程;(5)常见的单层膜和多层膜的制备等。整个实验项目开展分为题目布置、文献查阅、师生互动讨论、实体实验+虚拟实验、考核、互评等环节。本项目的实验内容可以根据课程要求动态调整,适合简单演示,也适合深入拓展研究。可与后续的薄膜性能测试等科研实验相结合,拓展实验内容。即适用于本科生的本科教学,也适用于研究生的探索性教学。

项目开发时采用二维动画、HTML5、数学建模、组件开发等技术,开发工具为 Unreal Development Kit, Visual Studio 等。项目单场景模型总面数小于 50 万,贴图分辨率 1024×1024 ,每帧渲染次数 3 次,动作反馈时间小于 10 ms,显示刷新率大于 30 fps,分辨率 1920×1080 。运行时服务器操作系统为 Windows Sever,数据库为 SQL Sever。带宽要求 100 M 以上,带宽不足时,系统自动提示。项目可同时支持 1 000 人以上在线实验,并提供在线排队提示服务,超过人数上限时,提示用户人数已满。

3 虚拟仿真实验项目的实施

该项目依据实验室实际布局搭建模型,操作画面具有环境真实感、操作灵活性。所有的操作步骤都有详细而准确的设定,系统可提示正确操作步骤及实验过程中的注意事项。学生在使用前需安装特定的虚拟实验环境,网站上提供相应的下载链接。

该项目的主操作界面如图 1 所示。



图 1 脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验主操作界面

3.1 基片清洗及靶材安装

根据需制备薄膜材料的不同,选择不同的基片和靶材。项目中提供常见的 Si 基片、 K_9 光学玻璃、 Al_2O_3 基片、ITO 玻璃基片。要求熟悉不同基片的

清洗流程。实验项目中有 4 个安装靶台,可以提供 4 种具有代表性的靶材,用于制备氮化物、氧化物、金属薄膜以及多层膜,如图 2 所示。



图 2 靶材的选择

3.2 真空的获得

实验中用机械泵、分子泵抽沉积腔内的气体,使其达到近似真空状态,腔内的气压可达 1×10^{-4} Pa. 分子泵界面可显示当前转速、频率、电流等具体信息. 该过程让学生了解在薄膜制备过程中真空的获取方法与测量技术. 掌握热偶真空规和电离真空规测量真空的原理及使用方法.

3.3 实验参数的设置

激光器的相关参数(激光频率、脉冲能量、光斑尺寸)对于薄膜质量的影响较大. 激光能量密度不能过低,但也并非越高越好,存在一个优化值,而优化值应结合靶的成分结构及一些综合外部条件,如气压、靶距等,可建立适当数学模型来求取,这方面工作有待进一步深入研究. 我们只能给出一个定性的参考,本次实验当中选用工作频率 5 Hz,工作电压 21 kV.

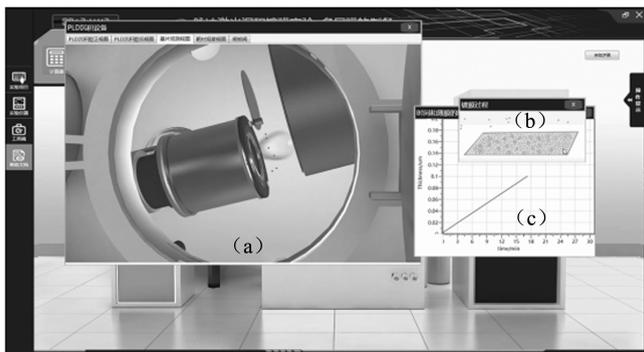
基体温度的高低及均匀性对薄膜的结构、生长速率等都有影响,基体温度的选择目前尚无系统理论指导,只能限于实际中反复实验,从而确定最佳的温度值. 因此本实验可设定加热台温度区间 $0 \sim 800$ °C,温度的设定需依据镀膜的具体需求而定. 同时靶

的转速也为连续可调.

不同的镀膜实验,需要选择不同的稀有气体及气体流量. 如在制备氧化物薄膜时,反应室通入一定量的氧气,可以避免产生缺氧薄膜^[7]. 在制备氮化物薄膜时,选择合适的氮气流量,往生长室内通入氮气达到所需压强,并保持平稳的气流^[8]. 因此本实验提供 3 种常用的气体: Ar, O₂, N₂. 气体流量通过流量计检测. 实验中可设定常见的气体流量在 $10 \sim 20$ mL/min,腔体的工作气压在 $10 \sim 20$ Pa.

3.4 薄膜的制备

本实验中薄膜的制备过程分为两大类:单层膜的制备和多层膜的制备. 制备时,可以通过基片观察窗口,观测等离子体羽辉的外形,动画再现等离子体膨胀直至到达基体最终沉积成膜的过程,便于学生直观地了解脉冲激光沉积的基本原理. 图 3(a)为等离子体羽辉观察界面. 其中薄膜镀制时长在实际操作中可根据薄膜类型的不同而不同. 图 3(c)中定性地给出了随着镀膜时间的增加,薄膜的厚度也相应增加. 图 3(b)中则动画显示了气相粒子在基体上聚集成分子团、晶核、岛化最终成膜生长的过程.



图中(a)为等离子体羽辉观察界面,(b)为薄膜沉积过程动画,(c)为膜厚与沉积时间关系曲线示意图

图3 薄膜的制备界面

4 虚拟仿真实验项目的教学实践

该实验项目的教学采用线上、线下相结合的授课方式,并在授课过程中加大了师生互动的力度. 首先,教师采用传统的课件讲解方式,对脉冲激光沉积镀膜的基本原理、沉积系统的仪器构成,以及薄膜性能表征等理论知识进行讲解,让学生对该实验有基本的认识;之后,通过虚拟仿真实验项目的三维模型及动态视频,可以让学生进一步深入理解实验原理、

仪器的基本操作;然后,学生上机操作,并根据系统提示及时调整操作方法,线上完成实验后通过系统提交报告;实验报告合格后,且线上实验预习成绩合格后,方可进入真实实验操作.

该实验项目已面向我校物理、光电、材料等专业学生及研究生开放,已经过 2 个学期的教学实践. 通过对参与该实验的学生和任课教师调查显示,虚拟仿真实验教学效果良好. 学生们认为,通过虚拟仿真实验,不仅可以更好地理解实验原理,更重要的是在

整个实验过程可以全程模拟操作,有参与感和满足感,学习的积极性和主动性获得提高. 任课教师则认为,通过虚拟仿真实验教学,改善了传统大型仪器实验教学的诸多弊端,优化了实验教学资源,提高了教学效率,促使学生成为实验教学课堂上真正的主体,对激发学生的创新思维,培养创新型人才,具有重要的意义.

该项目在我校在线虚拟仿真实验平台中运行,平台主要功能包含教学管理、在线仿真实验、在线互动讨论、在线资源评价、实验数据管理、各实验教学情况统计等. 今后,该项目可推广至全校学生,教师可依据平台中的各项功能,对选修该实验的学生进行数据分析,为下一步的教学改革提供数据支持.

5 结束语

本文对脉冲激光沉积镀膜虚拟仿真实验项目建设的必要性、建设思路、实验方案的构建与实施、教学实践等几个方面做了阐述. 通过该实验项目的建设,加深了基础实验教学的深度,拓展了传统教学的广度,使更多的学生能够更早地熟悉科学研究过程,提高学生对科研实验的认知,培养学生的动手能力、科研思维和创新意识. 虚拟仿真实验教学具有旺盛的生命力,它的持续发展,未来可能在一定程度上颠覆传统的教学理念和教学模式,并成为新时代教学改革的一个重要方向.

Design and Teaching Practice on Virtual Simulation Experiment of Coating Films by Pulsed Laser Deposition

Li Shuzhen Han Ruqu Zhang Yamei Dai Jun

(School of Science, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang, Jiangsu 212003)

Abstract: Preparation of films grown by pulsed laser deposition(PLD) is an important experimental project in material physics, material chemistry and other related disciplines. And it is also the key points and difficulties in the teaching of high-level college physics experiments. However, the precision of the instrument, the high price and the complicated structure of the instrument have restricted in large-scale practical teaching. In this paper, a set of virtual simulation experiment of PLD was developed. It could completely simulate the real scene of PLD experiment. It was intuitive, intelligent and user-friendly. The basic experimental literacy and innovation thinking for the students could be effectively cultivated through the learning mode of combination of online and offline, virtual and real experiments. This teaching mode is conducive to the reform of experimental teaching in universities.

Key words: PLD; virtual simulation; experimental teaching

参考文献

- 1 SS Hullavarad, RD Vispute, B Nagaraj, et al. Advances in pulsed-laser-deposited AlN thin films for high-temperature capping, device passivation, and piezoelectric-based RF MEMS/NEMS resonator applications[J]. Journal of Electronic Materials, 2006, 35(4): 777~794
- 2 刘玫. 脉冲激光沉积碲汞汞薄膜材料结构特性的研究[D]. 济南: 山东师范大学, 2009
- 3 贺占魁, 黄涛. 虚拟仿真实验教学项目建设探索[J]. 实验技术与管理, 2018, 35(2): 109~111
- 4 姚日晖, 高尚胜, 吴为敬, 等. 光电材料与器件国家级虚拟仿真实验教学中心建设与实践[J]. 实验技术与管理, 2017, 34(10): 153~157
- 5 张端明, 李智华, 钟志成, 等. 脉冲激光沉积动力学原理[M]. 北京: 北京科技出版社, 2011
- 6 SJ An, WI Park, GC Yi, et al. Heteroepitaxial fabrication and structural characterizations of ultrafine GaN/ZnO coaxial nanorod heterostructures [J]. Applied Physics Letters, 2004, 84(18): 3 612~3 614
- 7 韩军, 张鹏, 巩海波, 等. 生长条件对脉冲激光沉积制备 ZnO:Al 薄膜光电性能的影响[J]. 物理学报, 2013, 62(21): 301~307
- 8 李玉雄, 隋展鹏, 谷承艳, 等. 不同氮气气压脉冲激光沉积氮化钛薄膜的结构和电学性能[J]. 功能材料, 2018, 49(6): 6 196~6 200