

薄膜材料虚拟仿真实验的建设与教学实践*

——磁控溅射镀膜和原子力显微镜(AFM)在氢化纳米硅薄膜制作过程中的应用

王晓峰 杨珺 陈 佶

(南方科技大学物理系 广东 深圳 518055)

(收稿日期:2022-07-21)

摘要:为解决薄膜材料物理实验在大学物理实验教学中实验仪器昂贵,实验过程高危等困难,设计与建设了“磁控溅射镀膜和原子力显微镜(AFM)在氢化纳米硅制作过程中的应用”虚拟仿真实验.此虚拟仿真实验项目借助3D技术,真实还原并模拟了实验场景与过程,人机交互程度高,可操作性强.通过三年的教学实践与网络平台推广,取得了良好的教学效果以及学生的一致好评.

关键词:磁控溅射;原子力显微镜;虚拟仿真;实验教学

磁控溅射和原子力显微镜(AFM)是制备与表征薄膜材料的常见物理方法,也向来是大学物理实验教学中的重点和难点.薄膜材料具有优于固体材料本身的优越性能,在新材料领域中占有非常重要的地位,在光电、生物、工业制造等功能性领域都具有广阔的应用前景^[1-2].然而这一类的实验往往由于设备高端,材料昂贵,实验过程具有一定危险性,不适合大面积开展实验教学.

计算机虚拟仿真实验自20世纪90年代发展以来,随着计算机技术的发展,在实验场景、人机交互、虚拟现实增强方面有了显著提高.教育部从2013年开始推动全国高校探索虚拟仿真实验教学资源建设;2018年上线了“实验空间”虚拟仿真实验教学平台^[3],全国各高校在这个平台展示各个专业类别的特色虚拟仿真实验.在物理类与材料类的虚拟仿真实验中,大部分都是大型仪器为基础,实验内容或为材料的表征,或为材料的制备.因此,南方科技大学物理实验教学中心以薄膜材料为重点,将制备和表征这两种实验技术方法有效结合,设计了这一仿真实验项目,利用磁控溅射和原子力显微镜(AFM)进行氢化纳米硅薄膜的制备和表征,并将此实验项

目通过实验空间网站以及校内课程实验平台进行教学与推广,取得了良好的教学效果.

1 实验项目设计与建设

此虚拟仿真实验项目的具体教学目的如下:

第一,了解氢化纳米硅薄膜制备的成膜过程;

第二,了解氢化纳米硅薄膜的主要功能及用途;

第三,熟悉磁控溅射制备氢化非晶硅薄膜的操作流程;

第四,熟悉原子力显微镜测量薄膜化情况、晶粒大小及表面形貌的操作流程.

为了保障实验教学过程的真实度,我们采用射频磁控溅射技术制备4种不同氢气分压和沉积时间条件下的氢化纳米硅薄膜^[4-5],再用原子力显微镜(AFM)测量薄膜的晶化、晶粒大小及表面形貌.其中,射频磁控溅射仪器是3D的虚拟仿真场景,镀膜溅射过程的真空溅射室以及辉光放电过程是100%仿真模拟真实仪器设备,镀膜溅射的主要参数如真空度、氢气分压、沉积时间都可调整.原子力显微镜(AFM)仪器的微悬臂结构、位置检测部分、反馈系统也是100%仿真模拟真实仪器设备,实验过程中

* 南方科技大学本科教学质量及教学改革工程项目基金资助,项目编号:Y01201823;广东省示范性虚拟仿真实验教学项目.

通讯作者:陈佶(1981-),女,博士,高级实验师,研究方向为大学物理实验教学、虚拟仿真实验.

激光光路的调节、进针和扫描也高度仿真还原了真实实验过程^[6-7]。

在仿真实验中,磁控溅射设备的所有设备可如图1进行真实3D模拟,镀膜溅射过程的真空溅射室以及辉光放电过程可如图2和图3真实模拟。

原子力显微镜的整套设备可如图4、图5和图6进行真实模拟。

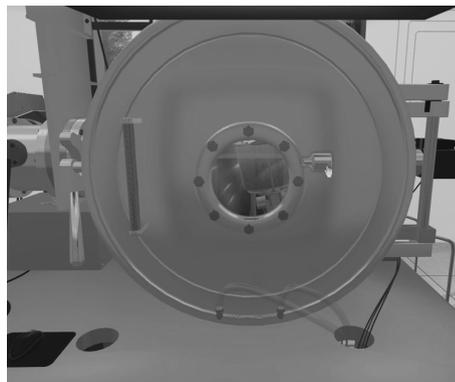


图3 3D仿真模拟辉光放电过程

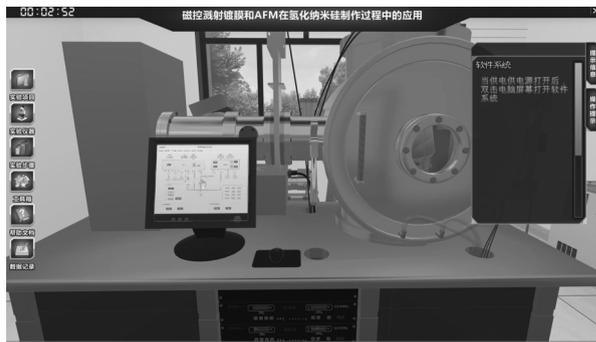


图1 3D仿真模拟磁控溅射设备



图4 原子力显微镜(AFM)虚拟仿真仪器

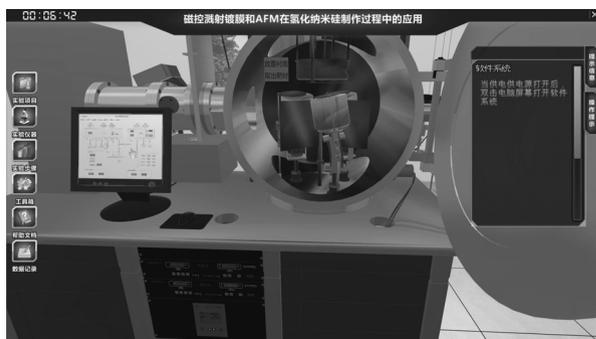


图2 3D仿真模拟真空溅射室

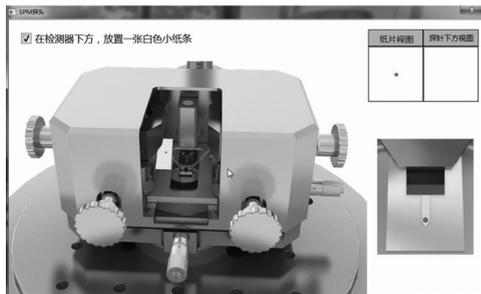


图5 原子力显微镜(AFM)探头



图6 原子力显微镜(AFM)反馈系统

2 实验教学项目技术架构

开放式虚拟仿真实验教学管理平台采用开放架结构和统一数据接口设计,为在线仿真教学提供教学环境和支撑服务,功能包含教学管理、教学实验资源学习、在线仿真实验、在线互动讨论、在线资源评价、实验数据管理、实验情况统计等,如图7所示。



图7 实验项目技术架构图

系统由教学应用模块、虚拟仿真模块和最下面数据模块组成。教学应用模块为教学开展提供保障服务和资源,调用虚拟实验开展在线实验,形成教学管理数据、实验数据等保存数据模块。

此虚拟仿真实验采用组件技术设计,将仪器按照数学物理原理建模设计相对独立的组件。用户根据实验内容调用不同的仪器组件形成实验方案,开展实验步骤,调用合适的算法,得到实验数据和实验状态,并通过动画、文字、图形等多种可视化技术将模拟真实的实验过程展示出来,给予合适的提示和指导,协助学生自主完成实验。

3 实验交互性步骤

此虚拟仿真实验操作的交互步骤包含样品制备与样品检测两大部分,真实模拟还原了整个实验过程,学生需要完成所有的实验步骤才能完成实验。实验交互步骤如表1所示。实验项目中的教学引导视频以及帮助文档给出了详细的实验操作过程。

表1 实验详细交互步骤

序号	步骤名称	步骤目标要求	目标达成度赋分模型
1	样品制备准备工作	鼠标双击水冷系统屏幕点击“水冷系统开关”按钮,打开水冷系统;双击电源总面板,打开电源	完成才能继续实验,否则将给出提示
2	开腔装样品	进入气体室打开氮气瓶,打开氮气瓶“总阀”和“减压阀”;返回磁控溅射室,打开软件系统,鼠标点击打开V10,充入氮气,使腔体气压恢复大气压;腔内气压为大气压后(1.0×10^5 Pa),关闭V10,打开溅射腔;打开样品挡板、C靶挡板;放置靶材和衬底;关闭样品挡板、C靶挡板	完成才能继续实验,否则将给出提示
3	关闭腔体,粗抽真空	单击门的开关,关闭溅射室大门;点击M1按钮,打开机械泵;点击V3,打开V3,腔内气压开始降低	完成才能继续实验,否则将给出提示
4	启动分子泵	腔内压强为10 Pa后,关V3,V2由暗绿色变为浅绿色;开V2,开分子泵,溅射室真空降低;真空低于0.1 Pa后,系统自动切换到电离规显示真空值;真空值低于 1.0×10^{-4} Pa后,可进行起辉溅射	完成才能继续实验,否则将给出提示
5	起辉溅射	进入气体室打开氩气气瓶“总阀”和“减压阀”,然后打开氢气气瓶的“总阀”和“减压阀”,返回磁控溅射室,设置界面电离规以及阀门V6—V33,使得腔压稳定在10 Pa;设置“射频电源”以及“工艺电源”面板,启动射频电源;设置衬底温度以及靶位自转速度后,开始溅射	完成才能继续实验,否则将给出提示
6	溅射结束	镀膜时间为15 min,完成镀膜后,关闭C靶挡板;关闭样品挡板;关闭样品自转;将衬底温度设定为室温;切换到“工艺电源”面板,关闭射频电源;切换到“系统供气”面板,关闭一系列气瓶阀门	完成才能继续实验,否则将给出提示

续表 1

序号	步骤名称	步骤目标要求	目标达成度赋分模型
7	取出样品	关 G2;关分子泵,等分子泵停止转动后,关闭一系列阀门,打开溅射室,取出衬底;重新关闭溅射室;双击电脑屏幕,打开软件系统,开 V3,用机械泵维持腔内真空环境. 经过上面的操作,样品 a(参数为:沉积条件为 $rH = 60\%$,沉积时间为 15 min) 就制备好了	完成才能继续实验, 否则将给出提示
8	样品检测表征	在主场景中向左移动场景,点击打开左边墙面上的检测门,进入检测室	完成才能继续实验, 否则将给出提示
9	调节光路	双击实验主场景中的 SPM 探头,打开 SPM 探头的大视图.菜单栏中的“帮助”菜单,可打开观看调节光路的演示动画.在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,观察光斑落在检测器中的位置.调节检测器水平旋钮、垂直旋钮,直至光斑落在检测器的中心	完成才能继续实验 否则将给出提示
10	更新扫描器	在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,鼠标单击菜单栏中的“系统”菜单,完成扫描器设置操作	完成才能继续实验, 否则将给出提示
11	放置样品 a	鼠标双击实验主场景中的 SPM 探头,打开 SPM 探头的大视图.点击“放置样品”按钮,弹出选择放置样品的选择界面,选择样品 a	完成才能继续实验, 否则将给出提示
12	设置系统参数	在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,找到系统设置窗口中的扫描范围、扫描角度、X 偏移、Y 偏移等参数文本框,设定合理的实验中扫描样品所需的参考点值	完成才能继续实验, 否则将给出提示
13	进针	在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,找到系统设置窗口中“进针”按钮,单击“正常进针”按钮,开始自动进针操作,若完成自动进针后,Z 电压过大,超于 20 V,可继续点击“自动进针”页面的精细进针或“单步控制”页面的单步进针,进行进一步进针,直至 Z 电压变化至零左右,20 V 以内位置	完成才能继续实验, 否则将给出提示
14	扫描样品	打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,进行系统设置窗口中“扫描”.扫描样品过程中,观察“形貌通道”的“示波器”窗口中的扫描曲线,调节参数设置中的“信号放大”参数的数值,改变数据曲线的振幅,使示波器上的信号处于中间并不超过可测量的范围且可观察到合适对比度的扫描图像; 可调节参数设置中的“信号放大”参数的数值,改变数据曲线的振幅,使示波器上的信号处于中间并不超过可测量的范围且可观察到合适对比度的扫描图像.在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,可调节系统设置窗口中的积分增益参数文本框、比例增益参数文本框,使示波器上的信号最灵敏而且不出现自激噪音; 可设置系统窗口中的扫描频率参数,设定合适的实验中扫描样品所需的扫描频率	完成才能继续实验, 否则将给出提示
15	退针	完成扫描后,再次点击“进针”按钮打开“进针”窗口,点击“退针”页面的“开始退针”按钮,直至完成自动退针	完成才能继续实验, 否则将给出提示
16	保存 AFM 图像和数据	在打开的 SPM Console 在线控制软件大视图中,鼠标单击菜单栏中的“功能”菜单,在“功能”菜单的下拉框中,选中“保存项目”,弹出保存界面窗体	完成才能继续实验, 否则将给出提示
17	取下样品	鼠标双击实验主场景中的 SPM 探头,打开 SPM 探头的大视图.点击“取下样品”按钮,放置的样品被取下	完成才能继续实验, 否则将给出提示

4 项目特色与创新

此虚拟仿真实验在教学中的特色创新主要为以下3个方面。

(1) 实验项目方案设计

磁控溅射镀膜和原子力显微镜是常用的薄膜材料制备和表征的物理仪器设备,然而这两种设备价格昂贵,不适合大面积开展实验教学;另外,用于液晶制造业的氢化非晶硅薄膜因为在溅射过程中需要用到氢气,整个实验过程有一定的危险性,因此,我们设计这一仿真实验,在一定程度上弥补真实实验的缺憾,使学生更好地掌握薄膜材料实验研究、磁控溅射、原子力显微镜等方面的基础知识。此虚拟仿真实验利用3D技术100%真实地模拟高危实验场景以及价格昂贵的实验仪器;并100%真实模拟整个实验过程,人机交互程度高,可操作性强。

(2) 教学方式方法创新

在教学方式方法上,利用虚拟仿真实验在网络平台上开设实验满足学生的求知需求,提高学生对物理实验学习的兴趣。学生可自主参与虚拟仿真实验,实现“以学生为中心”的教学方式,达到提升学

生的前沿科学知识素养、培养学生的自主实践能力的教学目标。

(3) 对传统实验教学的延伸与拓展

此虚拟仿真实验项目适合大面积开展磁控溅射镀膜和原子力显微镜表征的实验教学,通过该项目可以让学生对薄膜材料的科学研究有初步认识和了解,有利于学生尽早熟悉和进入科研阶段。同时,通过此虚拟仿真项目,学生也能对氢化非晶硅薄膜材料的工业制造和用途有基本的了解,提高学生对薄膜领域的应用性认识。

5 应用效果数据

此虚拟仿真项目自2019年开始依托南方科技大学“前沿物理虚拟仿真实验”课程进行教学,并依托教育部实验空间网站(www.ilab-x.com)向全社会、全高校进行公开推广教学。此虚拟仿真实验项目2019—2022学年内在教育部实验空间网站的浏览数高达17906,做实验人数为1524人,实验通过率为85.1%,如图8所示。在3年的教学过程中,学生也对此虚拟仿真项目给出了一致好评,纷纷表示实验场景真实,实验引导视频详尽清晰(图9)。



图8 实验项目在 ilab-x 网页的统计数据

 【学生】 访客 Temp0023e6b3- da5d-4b44- bfd2- f6f6b9f9bdfe	实验很精致详尽，仿真程度与实际操作十分接近，非常适合学生	10分	2019/11/22 17:28:54
 【学生】 mj_2179289	实验步骤精确，做得很真实	10分	2019/11/22 17:03:39
 【学生】 mj_2124587	步骤十分详尽，操作简单易懂，实验场景的仿真程度远超想像，是上好的实验，非常适合初学者观察	10分	2019/11/21 22:41:55
 【学生】 mj_2022744	仿真程度非常高 关氢气减压阀那里有bug	9分	2019/11/21 19:24:10
 【学生】 mj_1545744	操作步骤详细，指导报告也很详细，就是制备样品要分开制备，比较繁琐	10分	2019/11/20 13:29:15
(a)			
 【学生】 姚	制作优秀、指导详细准确、还原度高、逼真，转动视角有点慢	9.5分	2022/6/1 22:28:14
 【学生】 社	讲解步骤非常详细	10分	2022/5/4 11:20:44
 【学生】 陈	实验很精致且步骤详细。但是有一些可以改进的地方：有操作失误使进程难以继续时，可以加个一键恢复到上一个进程状态（如光路调整时光斑找不到了）。另外实验过程中出现了氢气瓶减压阀按键没反应的bug，和AFM扫描图像卡住的bug，不过不影响实验。	10分	2022/5/4 10:18:02
 【学生】 李	ahh 	9.5分	2022/5/3 12:00:12
 【学生】 尹	指导很详细，适合学生	10分	2022/4/29 13:12:44
(b)			

图 9 实验项目学生评价

6 结论与展望

高效优质的知识传授一直是教学追求的最终目标。传统课堂无法做到大面积推广的高危或造价昂贵的实验，我们可以借助虚拟仿真实验以及网络实验平台跨越教学时间和空间，进行大范围大面积地教学和推广。“磁控溅射镀膜和原子力显微镜(AFM)在氢化纳米硅制作过程中的应用”虚拟仿真实验应用3D真实实验场景，为学生们进行薄膜物理前沿各知识点的教学，实现了教学与科研相结合，获得了良好的教学效果以及学生的一致好评，展望未来的科技发展，虚拟仿真实验技术还有很大的发展空间，还有许多需要研究探讨的问题。相信在师生的共同努力下，在认真完成课程

实验的同时，也为今后开展真实的实体实验研究打下了良好的理论基础。

参考文献

- [1] 王力衡, 黄远添, 郑海涛. 薄膜技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 1991.
- [2] 吴自勤, 王兵. 薄膜生长[M]. 北京: 科学出版社, 2001.
- [3] 张盖伦. 虚拟仿真实验: 为现实教学所不能为、不敢为、不好为[N]. 科技日报, 2022-05-26(6).
- [4] 赵占霞. 基于太阳电池的氢化纳米硅薄膜 RF 法低温制备及其光、电特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2004.
- [5] 王陆一. 氢化非晶 / 纳米硅液晶空间光调制器光敏层性质研究[D]. 西安: 电子科技大学, 2013.
- [6] 白春礼. 扫描隧道显微术及应用[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1992.
- [7] 本原纳米仪器公司. CSPM5000 扫描探针显微镜用户手册[Z]. 2013.