

基于AI辅助的磁控溅射镀膜实验教学创新设计

罗杰炜, 范睿楷, 黄骏熙, 蓝善权, 田灿鑫, 于存阔, 项燕雄*

岭南师范学院物理科学与技术学院, 广东 湛江

收稿日期: 2025年6月27日; 录用日期: 2025年7月24日; 发布日期: 2025年7月31日

摘要

磁控溅射技术已广泛应用于芯片制造、表面防护及高端模具涂层等高科技领域, 开展磁控溅射镀膜实验教学可有效提高学生对PVD技术的了解。受限于设备数量、教师数量等教学资源限制, 传统模式的教学下所取得的教学效果十分有限。本研究针对传统磁控溅射镀膜实验教学的不足, 引入AI辅助教学手段, 构建了“AI+ 虚实结合课堂”的新型实验教学平台用于优化教学效果。该平台包含智能预习、动态优化及实时监控三大模块, 通过虚拟仿真实验、智能参数优化及个性化学习反馈, 有效解决了设备资源受限、试错成本高及教学监督不足等问题。研究表明, 采用AI辅助教学的学生相比传统教学模式, 在原理掌握、设备结构了解、前处理工序、镀膜过程性参数理解及课后思考等方面均有显著提升, 总体教学效果提升13.5%。该创新设计不仅提升了学生的实验技能和创新能力, 还为物理实验教学改革提供了新思路, 展现了AI技术在工科教育中的广阔应用前景。

关键词

磁控溅射, AI辅助教学, 教学改革

Innovative Design of AI-Assisted Experimental Teaching for Magnetron Sputtering Coating

Jiewei Luo, Ruikai Fan, Junxi Huang, Shanquan Lan, Canxin Tian, Cunkuo Yu, Yanxiang Xiang*

School of Physics Science and Technology, Lingnan Normal University, Zhanjiang Guangdong

Received: Jun. 27th, 2025; accepted: Jul. 24th, 2025; published: Jul. 31st, 2025

Abstract

Magnetron sputtering technology has been extensively utilized in high-tech domains, including chip

*通讯作者。

文章引用: 罗杰炜, 范睿楷, 黄骏熙, 蓝善权, 田灿鑫, 于存阔, 项燕雄. 基于AI辅助的磁控溅射镀膜实验教学创新设计[J]. 教育进展, 2025, 15(7): 1572-1579. DOI: 10.12677/ae.2025.1571389

fabrication, surface protection, and High-end mold coating. Implementing experimental instruction on magnetron sputtering coatings can significantly deepen students' comprehension of Physical Vapor Deposition (PVD) technology. However, constrained by the limited availability of teaching resources, including equipment and qualified instructors, the teaching outcomes achieved under the traditional teaching model are significantly restricted. This study addresses the deficiencies in traditional magnetron sputtering coating experimental teaching by introducing AI-assisted teaching methods and constructing a novel experimental teaching platform, namely the "AI + virtual-real integrated classroom", to enhance the teaching effectiveness. This platform is comprised of three key modules: intelligent previewing, dynamic optimization, and real-time monitoring. By leveraging virtual simulation experiments, intelligent parameter optimization, and personalized learning feedback mechanisms, it successfully addresses challenges such as limited equipment resources, high trial-and-error costs, and inadequate teaching supervision. The research findings indicate that students utilizing AI-assisted teaching demonstrate substantial improvements in various areas, including principle comprehension, equipment structure understanding, pretreatment procedures, coating process parameter interpretation, and post-class critical thinking, as compared to the traditional teaching approach. Additionally, the overall teaching effectiveness has been enhanced by 13.5%. This design enhances students' experimental skills and innovation capabilities, offers insights into physics experiment teaching reform, and showcases the application potential of AI in engineering education.

Keywords

Magnetron Sputtering, AI-Assisted Teaching, Teaching Reform

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

“磁控溅射镀膜技术”作为物理气相沉积技术(PVD)中的一项关键组成,具有沉积速率高、重复性好、靶材利用率高、沉积质量好等优势,现已广泛运用于模具涂层、电极沉积及芯片制造等高科技领域。加强理工科学生对磁控溅射技术的理解,是帮助学生适应新时代条件下国家高质量发展需求的一项有效举措。我校岭南师范学院应用物理(真空方向)是继东北大学和合肥工业大学后第三个开设真空专业的学校,自2016年开始招生以来,一直致力于培养真空获得和真空镀膜方向的专业技术人才。磁控溅射技术作为真空镀膜系列课程中极为重要的一部分,是应用物理(真空方向)专业学生必须要掌握的知识点之一。但在以往的实验教学中,学生常面临设备组成及操作复杂、实验参数不熟悉、数据记录与分析效率低等问题。此外,教师需投入大量时间进行过程监督与结果评估,教学资源分配不均现象普遍存在。通过教学模式的改革与创新,优化教学过程,提高学习效率将为学生适应“新工科”模式提供巨大助力。

本文研究以“新工科”背景下岭南师范学院应用物理学(真空方向)培养方案为导向,运用AI模拟案例情景,构建真空镀膜实验课教学新模式,培养学生自主探究的学习习惯以及提升学生将所学知识应用于解决实际问题的能力[1]。基于AI辅助的磁控溅射实验教学,构建“AI+虚实结合课堂”的新型实验教学平台,通过“虚拟仿真与实验预演”、“智能辅助与流程优化”以及“个性化学习与互动反馈”的三个AI教学设计弥补传统线下教学的以下几点不足:①在传统实验教学中因设备不足和资源受限,导致同学们参与度不高、动手率低的问题;②实验现象不可逆导致的试错成本过高;③教师无法实时对学生监督纠错以及问题的答疑。并且通过AI智能教学,来达到缩短实验学习曲线,进一步提高学习

效率。同时“AI+ 虚实结合课堂”可以让学生不局限于课堂时间进行多次实验操作，积累磁控溅射镀膜实验经验，在仪器实机操作时更加得心应手，提高镀膜实验的成功率。

2. 基于 AI 辅助的磁控溅射镀膜教学设计

2.1. 磁控溅射镀膜实验课程规划

“新工科”建设对实验教学提出了系统性改革需求，旨在培养具备跨界整合能力和创新思维的高素质工程人才。综合而言，“新工科”对实验教学提出的革新需求主要体现在以下五个维度：

一是教学理念革新。这其中有主要包含两项：能力导向和创新思维激发。从知识传授转向实践能力培养，建立“学生中心、目标导向、持续改进”的教学理念。实验设计需支撑毕业要求指标点，落实 OBE (成果导向教育)模式，强化问题解决能力与工程素养培养。通过自主实验、PBL (问题导向学习)等方法，培养学生的观察力、分析能力和创新意识，激发科技报国使命感。

二是教学内容重构。这又包括跨学科融合及前沿技术融入。这需要打破传统课程壁垒，构建模块化实验体系，科研成果转化为实验项目。

三是教学方法与手段升级。开发虚拟仿真、线上/线下混合式实验资源，通过 AI 引入，及时反馈教学结果，实现实时反馈。

四是资源与平台优化。依托数字技术构建虚实结合的实验环境，提升设备利用率和教学效能。

五是完善实时评价体系。建立实验教学质量评估体系，结合过程性评价与多元考核，持续改进教学闭环。

基于以上五点，我们对磁控溅射镀膜实验课程进行了重新规划，其课程规划如下：

一、预习阶段

- ① 建立学习通课程群，并进行合理分组，明确组内人员分工；
- ② 下发学习资料和任务，完成预习作业；
- ③ 安装虚拟实验软件，完成实验预演；
- ④ 汇总预习问题，并做出总结和反馈。

二、实验阶段

- ① 以小组为单位，派代表讲解实验设备组成及实验操作流程；
- ② 教师点评各组讲解内容，做必要的补充；
- ③ 各组通过总结教师点评，重新梳理实验流程，并制定新的实验方案；
- ④ 在教师的监督下，各组依次开展实验；
- ⑤ 各组总结实验内容，并做问题反馈。

三、课后总结及教学评价

- ① 学生通过学习通回顾实验过程，完善知识体系，并根据教学内容完成实验报告；
- ② 教师总结教学过程，及时反思教学流程中存在的问题，以便实现自我提升；
- ③ 教师根据各组实验教学过程的表现及实验报告对各组进行评分，并做统计分析。

2.2. 虚拟仿真与实验预演

为迎合“新工科”背景下对新时代大学生发展的需求，提高教学效率，我们专门设计开发了一款 AI 智能教学平台，其界面如图 1 所示。该平台主要包括“智能预习模块”、“动态优化模块”以及“实时监控模块”三大模块。

在第一部分的“智能预习模块”中，包含数据层(记录历史各项实验数据、镀膜工艺参数和各类材料

性能表征)、实验层(搭建构建 1:1 高精度设备模型, 并通过 Unity3D 平台重现磁控靶材放电过程, 学生可 360°观察等离子体分布)。

在第二部分的“动态优化模块”中, 包含算法层(基于历史数据的蒙特卡洛仿真, 来预测不同参数组合下的膜层生长趋势, 并结合 AI 智能模型 DeepSeek 进行优化溅射参数)、交互层(优化模拟设备平台的操作指引、添加智能语音交互助手以及部署动态预警系统, 当模拟参数超过安全阈值时自动触发红色预警)。

在最后的“实时监控模块”中则包含应用层(通过 AI 进行实时解析 SEM/XRD 检测结果, 自动生成膜层质量报告, 生成学生个性化学习路径, 根据学生不当操作记录, 推送针对性学习资源, 并实时和学生进行答疑)。

磁控溅射镀膜实验中, 所涉及的涂层及工艺参数繁杂, 仅靠课堂上的实验, 无法使学生将每个类别的产品全部做一遍。同时, 也受限于昂贵的设备成本, 我们所能提供的实验设备数量极其有限, 远低于学生数量, 往往 5~10 个学生才能分到一台设备, 这极大限制了教学效果。利用包含“智能预习模块”、“动态优化模块”以及“实时监控模块”三大模块的 AI 智能教学平台和虚拟现实(VR)技术, 可以创建虚拟的物理实验室环境, 让学生在学完磁控溅射镀膜工艺流程后, 在虚拟环境进行实验操作, 观察实验现象, 分析实验数据, 并且虚拟实验有较多试错机会, 从而提高实验教学的效果和创新性。

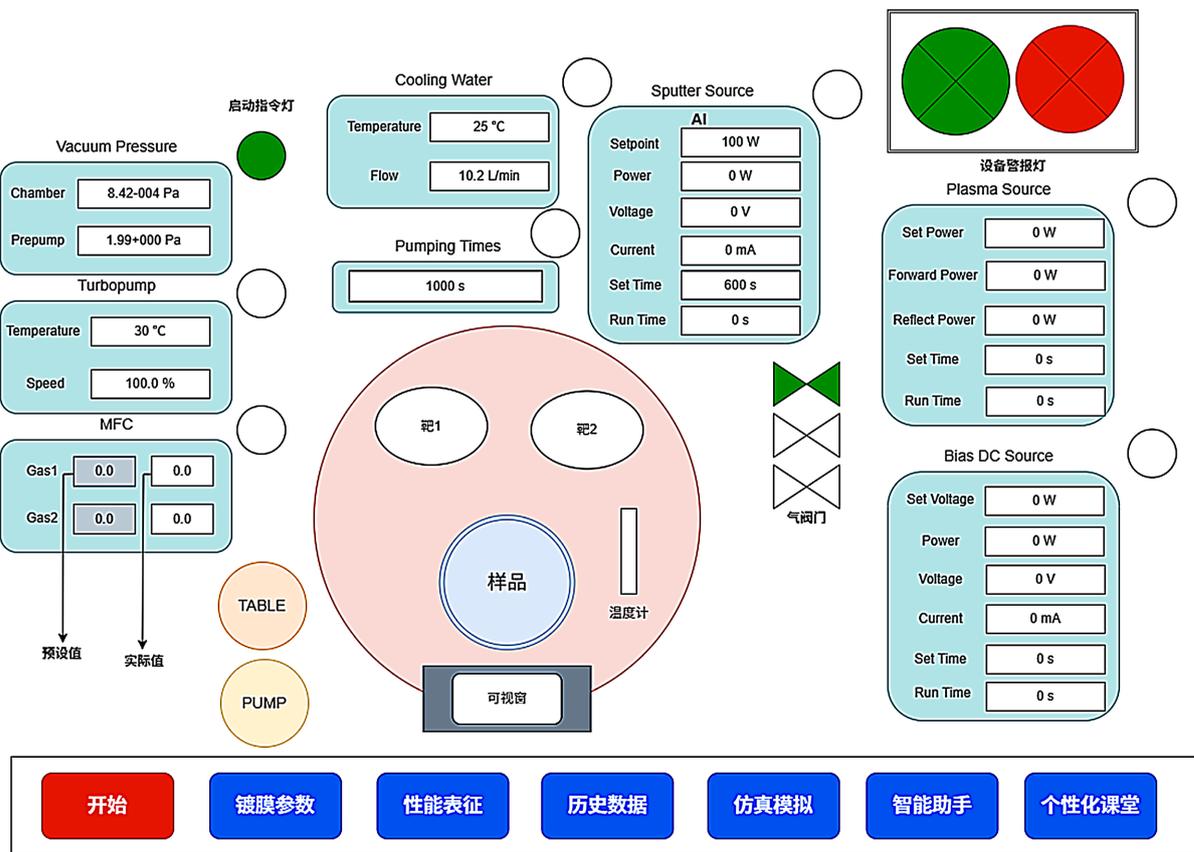


Figure 1. Interface diagram of the intelligent coating platform

图 1. 智能镀膜平台界面图

2.3. 磁控溅射镀膜工艺流程及智能辅助

溅射作为物理气相沉积中的一种经典沉积技术, 其放电属于辉光放电范畴。磁控溅射技术是为了提

高成膜速率和沉积速率而在溅射镀膜基础上发展起来的[2]。通过正交磁场的引入,磁控溅射阴极发射的电子在相互垂直的磁场和电场的双重作用下,做螺旋线运动[3],提高了其与工作气体的碰撞概率,提高了溅射产额及靶材离化率。与二级溅射相比,其沉积速度更快,膜层致密且与基片附着性更好,是目前工业上精密镀膜的主要方法之一,非常适合于大批量且高效率的工业化生产[4]。

在磁控溅射过程中,主要工艺流程如图2所示[5]:

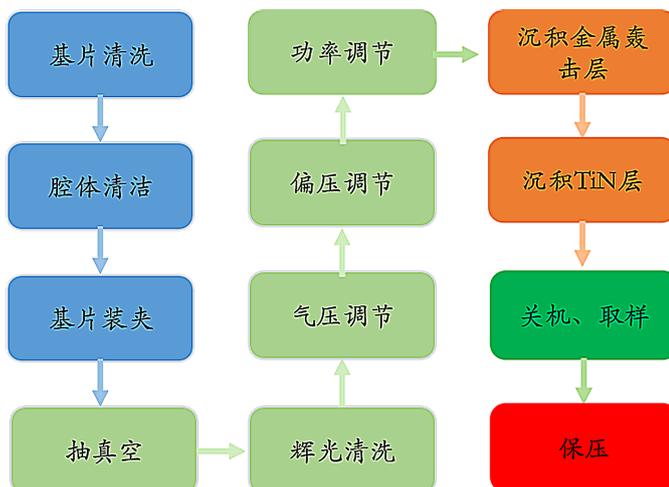


Figure 2. Flowchart of the magnetron sputtering coating process
图2. 磁控溅射镀膜工艺流程图

通过“动态优化模块”中的算法层和交互层来预测不同参数组合下的膜层生长趋势,并结合AI模型进行优化溅射参数,达到镀膜效果最优化。并且该AI教学平台会进行操作指引,通过智能语音交互助手来提醒学生实验操作的不足之处,弥补了教师无法实时对学生实验操作的指引,以及部署了动态预警系统,当模拟参数超过安全阈值时自动触发红色预警,解决了在实验过程中产生的安全隐患。同时在仪器实机操作过程中,AI教学模块会实时监控仪器,并及时提醒及触发预警,确保镀膜实验成功率。

2.4. 个性化学习与互动反馈

每个学生的学习能力是完全不同的,如果用同样的方式、同一个步调去学习,有些学生会觉得很吃力,而学习能力很强的同学又想获取更有深度的知识,这样的不同频也会导致学生效率低下,学习主动性变差。通过改变传统的教学模式,利用AI技术构建智能化教学系统,在该系统中,学生拥有各自的账号,在使用系统进行学习时,AI会通过分析学生预习测试、虚拟仿真操作记录(如靶材安装耗时、参数调试准确率等),生成个性化动态能力图谱(如“真空系统知识薄弱”“工艺优化能力突出”),以及推送差异化学习资源(如真空泵原理微课等)。并且在实验后,系统会通过整合各个学生实验时的42项过程数据生成一份个性化雷达图评估报告,并发放到学生个人平台;并进行错题强化训练,系统根据学生实验时的操作失误,进行分析纠正并自动推送定制化训练模块,从而进行实验操作的纠正与巩固。

3. 教学实验安排

目前大部分的实验课授课方式主要是实验老师在实验室给学生们进行口头讲解实验原理、操作方法以及注意事项,然后学生依据着老师的步骤操作实验仪器,记录测量出的实验数据,并进行数据分析,然后书写实验报告。这种授课方式,学生在课堂上吸收到的知识是有限的,完全是被动地接收知识,不能培养出“新工科”背景下的创新型实验型人才[6]。如果通过“AI+ 虚实结合课堂”,学生就可以提前

使用 AI 教学平台的学习资源进行课前预习或者使用虚拟现实(VR)实验系统进行线上操作, 再进行仪器实机的动手操作, 可以增强学生对磁控溅射镀膜实验的理解, 提升实验教学效果。

3.1. 预习阶段

通过“理论课 + 虚拟仿真实验”方式进行实验预习, 在实操前先由实验教师进行理论课的教学, 并为学生科普 AI 辅助平台操作步骤, 课后学生通过 AI 智能学习平台观看“磁控溅射镀膜技术”一系列微课, 并进行知识答题, AI 根据答题正确率动态调整内容难度。AI 自动为不同学生生成个性化学习路径(如靶材选择困难的学生定向推送“靶材 - 膜层关系”专题)。

同时通过构建的虚拟溅射腔室进行手势识别操作练习(模拟靶材安装、真空泵启动流程等)故障模拟训练(AI 随机触发“真空泄漏”“等离子体异常”等场景, 学生需在 5 分钟内诊断问题)从而减少上机实操时会忽略的错误, 提高效率。

3.2. 实操阶段

每组分配 3 人, 角色轮换(设备操作员、参数监控员、数据分析师)并基于预习阶段的表现, 平衡组内技能差异(如将虚拟实验中故障排除能力强的学生分散至各组)。

实验流程:

(1) 靶材安装:

- ① 靶材预处理: 清洁靶材表面(超声清洗、惰性气体吹扫), 去除氧化层或污染物。
- ② 靶材固定: 将靶材安装在磁控溅射阴极上, 确保靶材与背板紧密接触(避免打火或散热不良)。
- ③ 靶材检查: 确认靶材表面无裂纹或污染, 检查冷却水管路连接(防止溅射时过热)。

(2) 基片预处理:

- ① 基片清洗: 依次使用金属清洁剂、酒精、去离子水超声清洗基片, 氮气吹干。
- ② 基片安装: 将基片固定在样品台上, 调整基片与靶材的距离(影响膜层均匀性)。

(3) 抽真空:

- ① 粗抽真空: 使用机械泵将腔体抽至低真空($\sim 10^{-1}$ Pa), 检查系统气密性(保压测试)。
- ② 分子泵抽高真空: 启动分子泵, 将腔体抽至高真空($\sim 10^{-4} \sim 10^{-5}$ Pa), 确保真空达到工艺要求

(4) 气体引入:

- ① 通入工作气体: 向腔体通入工作气体, 并进行流量控制(通常 10~50 sccm)。
- ② 调节气压: 通过节流阀调节腔体压力至溅射工作范围(0.1~10 Pa)。
- ③ 预溅射(靶材清洁): 开启溅射电源进行短时预溅射(5~10 分钟), 去除靶材表面污染物。

(5) 溅射参数设置:

- ① 功率设置: 选择直流(DC)或射频(RF)电源, 设定溅射功率(影响沉积速率)。
- ② 偏压设置(可选): 对基片施加偏压(改善膜层致密性)。
- ③ 沉积时间: 根据膜厚需求计算时间(需结合沉积速率校准值)。

(6) 过程监控:

- ① 等离子体状态: 观察辉光放电颜色(异常颜色可能提示污染或气体比例问题)。
- ② 膜厚监控: 使用石英晶体振荡仪或光学监控仪实时监测膜层厚度。
- ③ 参数稳定性: 记录溅射电压、电流、腔压等参数波动(需控制在 $\pm 5\%$ 以内)。

(7) 镀膜结束与设备维护:

- ① 自然冷却: 关闭电源后保持真空环境冷却靶材(防止氧化)。

- ② 取出样品：缓慢向腔体通入高纯氮气或氩气至常压，然后佩戴无尘手套，避免触碰膜层表面。
- ③ 腔体清洁：清除沉积在腔壁和样品台上的残留物。
- ④ 靶材回收：记录靶材使用时间，更换耗尽靶材。
- ⑤ 真空系统保养：检查分子泵油位，定期更换机械泵油。

3.3. 总结阶段

- (1) 学生通过 AI 学习平台、MOOC 慕课网以及学习通进行复习和回顾实验内容。
- (2) 学生根据实验情况，填写纸质版的实验报告并按时提交。
- (3) 完成 AI 学习平台推送的个性化学习，查漏补缺，夯实基础。
- (4) 教师对“AI + 虚实结合课堂”的教学情况以及学生的实验报告进行及时总结和归纳，完善教学方式。

4. 教学效果分析

传统的实验教学模式一直以来严重依赖教师的言传身教，但有限的实验设备和实验课时长严重制约了教学效果。在以往的教学实验中，受限于上述弊端，磁控溅射镀膜实验教学的效果往往很难达到预期，有相当一部分的同学在教学过程中沦为了看客。在采用传统教学模式对 2020 级及 2021 级教授磁控溅射镀膜实验课程时，教师难以全程监督、实时答疑，这些问题严重阻碍了学生对实验知识与技能的掌握。学生难以建立完善的磁控溅射知识体系，甚至连基础的本底真空度、工作压强等都容易混淆。并且实验所具有的不可逆性，让学生在操作中一旦出现失误，可能导致整个实验失败，不仅浪费时间和资源，还会给学生带来心理压力，不敢轻易尝试新的操作方法，给学生的学习经历带来了巨大的阻碍。

但 AI 智能教学系统的“虚拟实验”功能完美化解了这一难题。通过 AI 智能教学借助虚拟仿真技术，为每位学生构建了专属的实验学习空间。通过模拟磁控溅射镀膜实验的全流程，学生不再受设备数量和场地的限制，能够随时随地开启实验操作，大大增加了动手实践的机会，充分调动了学习积极性。学生在虚拟环境中进行磁控溅射镀膜实验时，可随时暂停、回溯实验步骤，反复尝试不同的操作参数和流程。这种零成本的试错机制，让学生在不断探索和修正中积累经验，快速掌握实验要点，显著降低了实际操作中的失误率。

在 AI 辅助教学下，我们收集了 2020 级、2021 级以及使用了“AI + 虚实结合课堂”的 2022 级学生的实验报告数据，其结果如表 1 所示。由表 1 可知，五个评价项目的提升率均超过了 10%，而总体

Table 1. Comparison of teaching effects under different teaching modes

表 1. 不同教学模式下教学效果对比

评估项	传统模式				AI 辅助模式		提升率
	2020 级		2021 级		2022 级		
	得分	得分率	得分	得分率	得分	得分率	
原理掌握	14.8/20	74%	15.2/20	76%	16.7/20	83.5%	11.3%
设备结构组成	13.9/20	69.5%	14.3/20	71.5%	15.6/20	78%	10.6%
前处理工序	14.8/20	74%	15.4/20	77%	16.9/20	84.5%	11.9%
镀膜过程性参数	13.4/20	67%	14.3/20	71.5%	16.2/20	81%	17%
课后思考	13.9/20	69.5%	13.6/20	68%	16.1/20	80.5%	17.1%
总评	70.8/100	70.8%	72.8/100	72.8	81.5/100	81.5%	13.5%

提升率高达 13.5%，这体现了 AI 辅助模式的巨大优势。其中值得注意的是，在镀膜过程性参数的考核中，学生的分数从传统教学模式下的 13.4 分(2020 级)和 14.3 分(2021 级)提高至 16.2 分，提升率高达 17%。造成这一巨大差异的原因可能是 AI 辅助教学平台为学生的学习提供了大量的试错机会，并被系统及时反馈，学生在试错中实现自我完善，这加深了学生对镀膜过程的理解与掌握。

由以上的教学结果对比可知，AI 智能教学的应用，大幅度改变了传统磁控溅射镀膜实验教学的困境。它打破了时间、空间和资源的限制，为学生创造了更加优质、高效的学习环境，推动实验教学朝着智能化、个性化的方向迈进，为培养具备扎实实验技能和创新能力的高素质新工科人才奠定了坚实基础[7]。

5. 结语

磁控溅射镀膜技术应用广泛，涵盖了电子、芯片、表面防护及模具涂层等高科技领域，开展磁控溅射镀膜实验教学可加深学生对新工科领域的了解，培养高科技人才，助力我国高质量发展。但受传统教学模式对设备资源、试错成本、授课时长等限制，我校的磁控溅射镀膜实验教学一直存在显著短板。随着科技发展的浪潮，AI 技术在不同的领域都产生了深刻的影响，而 AI 对磁控溅射镀膜等工科类实验教学的影响更加符合了“新工科”理念。为此，本文以 AI 为辅助，通过“AI + 虚实结合课堂”将虚拟实验与实际操作深度融合，对磁控溅射镀膜实验进行了创新性的教学改革。学生通过虚拟训练夯实基础，在实机操作时更加游刃有余，大幅提升镀膜实验成功率。它不仅为学生提供了更丰富、高效的学习体验，助力培养适应时代需求的创新型工科人才，也为教师教学和教学管理工作提供了强大的支持工具。结果表明，在新教学模式的助力下，各项评价指标的提升率均超过了 10%，总体教学效果提升了 13.5%。然而，AI 在工科实验教学中的应用仍处于不断发展和完善阶段，在实际应用中还需关注一些技术与教育深度融合过程中的问题，如数据安全、教师技术应用能力提升，以及 AI 辅助教学对于主动性较差的学生的刺激仍然有所欠缺等问题。AI 辅助教学的在未来教学改革中将不断地深化，上述问题需要则仍需要教师不断调整策略，整合优化，为日新月异的工科行业输送创新型人才。

基金项目

就业需求和专业素养养成为导向的应用物理学专业《真空镀膜》课程教学探索与实践，粤教高函[2024] 30 号。就业需求和素质养成为导向的专业课程教学探索与实践——以《真空镀膜》为例，教务[2023] 93 号。2024 年度广东省本科高校教学质量与教学改革工程项目。2024 年岭南师范学院教改项目：人工智能赋能《热学》课程教学的探索。19 年校级人才专项 - 蓝善权。

参考文献

- [1] 沈凯, 郑岳久, 来鑫. AI 在新工科教学中的应用[J]. 南方农机, 2025, 56(6): 183-185.
- [2] 季思源, 万维财, 彭卓豪, 等. 切削高温合金用涂层的研究进展[J]. 工具技术, 2022, 56(2): 3-10.
- [3] 石文辉. 磁控溅射纳米晶钴的微观结构及力学行为研究[D]: [硕士学位论文]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [4] 马景灵, 任风章, 孙浩亮. 磁控溅射镀膜技术的发展及应用[J]. 中国科教创新导刊, 2013(29): 136+138.
- [5] 程建平, 杨晓东. 真空磁控溅射镀膜设备及工艺技术研究[J]. 电子工业专用设备, 2009, 38(11): 27-31.
- [6] 张燕, 谢卫东. 大学物理实验教学考核现状及分析[J]. 科技风, 2021(36): 28-30.
- [7] 王轩, 肖玲, 李红霞. 利用人工智能提高高分子物理教学效率和质量[J]. 化工管理, 2025(7): 38-41.