



半导体薄膜研究性实验教学的探索与实践

实验教学研究

黄 凯,余江应,盛守奇,唐 震

(安徽建筑工业学院 数理系,安徽 合肥 230601)

摘 要:研究性实验教学是创新教育的重要内容.以 ZnO 薄膜为例,详细介绍了开展半导体物理研究性实验教学的实施方法,分析和探讨了开展研究性实验对于培养学生的创造性思维能力、科学研究能力和团队协作能力的作用.

关键词:半导体薄膜;研究性实验;实验教学

中图分类号:G642.423

文献标识码:B

文章编号:1005-4642(2012)04-0009-04

1 引 言

大学理工科实验课教学是加强学生素质教育、培养学生创新意识和创造能力、培养适应现代化建设人才的重要环节和途径^[1].全国各高校都在积极地进行着各种方式的改革,我校也在实验课中引入研究性实验的探索与实践.研究性学习是以培养学生的创造能力和创新意识为着眼点,在教学过程中为学生创设类似于科学研究的情景,让学生学会收集信息并能对其进行分析、利用,使学生能够自主探索、发现和体验,从而增强学生的思考力和创造力,是培养创新人才的重要途径^[2-5].

半导体薄膜在未来的高速计算机、高速通讯和发光二极管领域具有广阔的应用前景.ZnO 属于 II-VI 族化合物半导体,是一种重要的直接带隙宽禁带半导体材料,它具有良好的化学稳定性和热学稳定性,目前 ZnO 薄膜已被广泛地应用到表面声波器件、光发射二极管、太阳能电池上的透明电极和抗反射膜、光波导和气敏传感器等多个领域^[6-9].基于培养学生的创新能力和科研能力,选择目前前沿研究的热点半导体薄膜作为建设内容,将近年来教师的科研成果引入教学,围绕半导体薄膜的制备、微结构、表面形貌和光学性质等建立了半导体薄膜的研究性实验教学模块.本文主要介绍了半导体薄膜实验模块的主要建设内容和教学理念.

2 半导体薄膜研究性实验的主要内容

研究性实验教学以学生发展为本,学生是教学活动的主体.学生在教师的引导下,提出问题、分析和解决问题,充分体现学生为主体的教学思想.同时在研究性实验教学过程中,学生通过自主地参与科学研究的各个环节,掌握了实施科学研究应具备的科学方法,从而形成从事科学研究的能力^[10-11].研究性教学模式不仅注重实验技能和观察能力的培养,更强调研究能力的形成和科学态度的培养.

以半导体薄膜为主导,围绕 ZnO 薄膜晶体的性能,实验室提供从 ZnO 薄膜的制备到从不同角度研究半导体 ZnO 薄膜晶体的结构和性质的实验设备,要求学生利用仪器设计完成系列实验,研究半导体 ZnO 薄膜的性能,系列实验中不同实验之间相互关联,形成比较完整的小项目体系.目前已经建设的“半导体薄膜”研究性实验主要内容有 ZnO 半导体薄膜的制备、半导体薄膜的结构测试、半导体薄膜的表面形貌测试、半导体薄膜的光谱测试系列实验组成.

2.1 半导体薄膜的制备

目前,许多薄膜生长技术可以用于制备 ZnO 薄膜,包括脉冲激光沉积、电子束蒸发、磁控溅射和溶胶-凝胶法等.溶胶-凝胶法具有成本低、操作简单、不需要真空沉积环境、成膜面积大、组分容易控制等优点.我们利用溶胶-凝胶法在 Si(111)和石英玻璃衬底上制备 ZnO 薄膜.

收稿日期:2011-06-24;修改日期:2011-08-26

资助项目:安徽省教育厅教研项目资助(No. 20100772)

作者简介:黄 凯(1979—),男,安徽安庆人,安徽建筑工业学院数理系讲师,硕士,主要从事功能薄膜材料和近代物理实验教学与研究.

将一定量的醋酸锌 $[Zn(CH_3COO)_2 \cdot 2H_2O]$ 溶解在乙二醇甲醚 $[CH_3OCH_2CH_2OH]$ 溶剂中, 加入与醋酸锌等质量的乙醇氨 (MEA), 在 $60\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下搅拌 2 h, 形成均匀透明溶胶. 以上所用试剂均为分析纯. 所得溶胶在室温条件下陈化 24 h, 实验采用旋转涂覆技术在先后用丙酮和去离子水超声清洗过的石英玻璃和 Si(111) 基片上进行涂膜, 先在较低转速下向基片滴加溶胶, 然后在 $3\ 000\ \text{r/min}$ 的转速旋转 30 s, 形成的湿膜在 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下预处理 10 min, 然后进行第二次涂膜, 反复多次 (本实验为 10 次), 直至达到所需厚度. 在大气氛围中将所制备样品在 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下退火 1 h.

半导体薄膜的制备实验要求学生掌握薄膜的不同制备方法, 了解不同制备方法的工艺和条件. 要求学生在此基础上提出可行的制备方案, 探索薄膜制备的温度、时间等实验条件, 同时要求学生在薄膜制备过程中观察实验现象, 查阅相关文献资料, 对实验现象进行阐述, 并设计测量半导体薄膜性能的实验方案.

采用 X 射线衍射仪 (XD-3) 测薄膜的微结构, 衍射仪采用 $\text{Cu K}\alpha$ 射线, 波长为 $0.154\ 056\ \text{nm}$, 电压为 $40\ \text{kV}$, 电流为 $30\ \text{mA}$; 用原子力显微镜 (CSPM4000) 观察薄膜的表面形貌, 原子力显微镜的横向分辨率为 $0.26\ \text{nm}$, 纵向分辨率优于 $0.1\ \text{nm}$, 扫描方式为接触模式, 扫描范围 $3\ \mu\text{m} \times 3\ \mu\text{m}$. 用紫外-可见分光光度计 (U-4100) 测试薄膜的透射光谱. 利用 F-4500 荧光光度计测试的 ZnO 薄膜光致发光谱.

2.2 半导体薄膜的微结构测试

采用 XD-3 型 X 射线衍射仪 (XRD) 测量 ZnO 薄膜的微结构, 图 1 给出退火温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 的 ZnO 薄膜的 XRD 谱. 对照标准谱线, 薄膜为六角纤锌矿结构.

利用该实验还可以计算退火温度下的 ZnO 薄膜的晶格常量和晶粒尺寸 D . 计算公式为

$$2d\sin\theta = \lambda, \quad (1)$$

$$a = d_{hkl} \sqrt{\frac{4}{3}(h^2 + hk + k^2) + l^2 \left(\frac{a}{c}\right)^2}, \quad (2)$$

$$c = 2d_{002} = \lambda / \sin\theta, \quad (3)$$

$$D = 0.89\lambda / (\beta \cos\theta). \quad (4)$$

式中: d 为晶面间距, θ 为衍射角, λ 为 X 射线源波长 $0.154\ 056\ \text{nm}$, h, k 和 l 为密勒指数, a 与 c 为

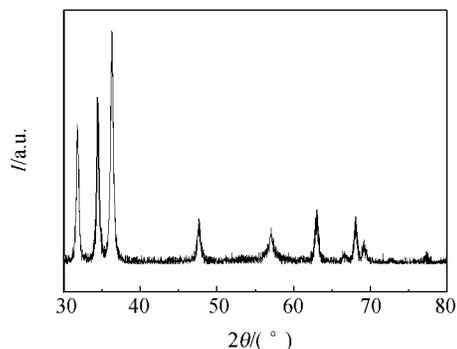


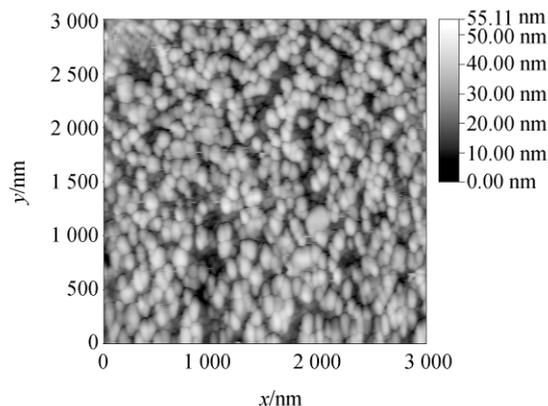
图 1 ZnO 薄膜的 XRD 谱

晶格常量, D 为晶粒尺寸, β 为半高全宽. 计算出 D 为 $21\ \text{nm}$.

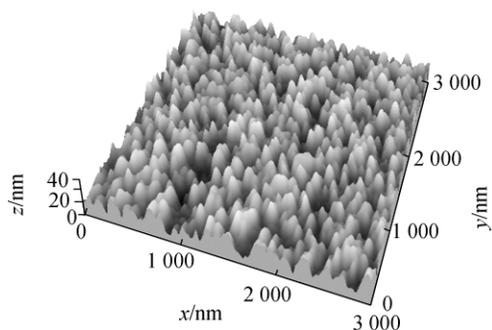
半导体薄膜的结构测试实验要求学生在半导体薄膜制备实验的基础上, 利用 X 射线衍射仪测量衬底上 ZnO 薄膜的微结构. 要求学生掌握利用标准谱线测量出其晶体结构, 研究薄膜晶体的晶格常量、晶粒尺寸随不同制备条件的变化, 并要求学生根据固体物理学的知识对实验结果进行分析, 探索其变化原因.

2.3 半导体薄膜的表面形貌测试

图 2 给出了退火温度为 $600\text{ }^\circ\text{C}$ 的 ZnO 薄膜的 AFM 图像, 采用 CSPM4000 扫描探针显微镜测量 ZnO 薄膜的形貌. 由 AFM 测得 ZnO 薄膜表面形貌的平面及三维图像分别如图 2(a) 和图 2(b) 所示. 可以看出, ZnO 薄膜表面晶粒尺寸均匀而且致密. 通过相关软件分析, 晶粒平均直径为 $40\ \text{nm}$, ZnO 纳米薄膜表面方均根粗糙度为 $8.26\ \text{nm}$.



(a) 平面图



(b) 三维立体图

图 2 ZnO 薄膜的 AFM 图像

半导体薄膜的表面形貌测试实验要求学生熟练掌握扫描探针显微镜原理和使用的基础上,利用扫描探针显微镜测量衬底上 ZnO 薄膜的表面形貌图.要求学生掌握利用相关软件分析薄膜的粗糙度,并结合 ZnO 薄膜的二维和三维形貌观测,要求学生对纳米薄膜的形貌做出清晰描述,对所做的薄膜质量进行解释.

2.4 半导体薄膜的光谱测试

图 3 是用紫外-可见分光光度计(U-4100)测试的 ZnO 薄膜的透射光谱.可以看出,ZnO 薄膜在 400~800 nm 波段范围内有很高的透射率(平均透射率均大于 85%),薄膜的吸收边在 370 nm 附近.由于 ZnO 是直接带隙半导体材料,其透射光谱吸收边的变化直接反映了其光学带宽的变化.利用其吸收边可以估算 ZnO 薄膜的光学带隙,得到其光学带隙 E_g 为 3.26 eV.

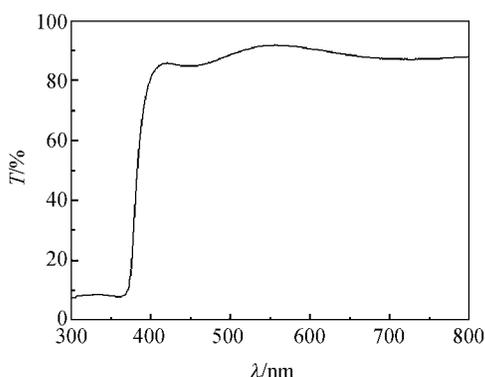


图 3 ZnO 薄膜的透射谱

本实验要求学生在掌握吸收边和光学带隙相关理论的基础上,用紫外-可见分光光度计测量薄膜的透射光谱.要求学生利用透射光谱并通过作

图法计算出光学带隙 E_g ,要求学生研究不同半导体的吸收边和光学带隙 E_g 之间的关系,并分析形成不同的光学带隙的原因.研究设计可调的宽光学带隙半导体,探索其在光电功能材料与器件上的应用.

图 4 是利用 F-4500 荧光光度计测试的 ZnO 薄膜的光致发光谱,其激发波长为 325 nm.从图中可以看出,ZnO 薄膜有 2 个发光峰,分别在 402 nm 和 451 nm 附近.

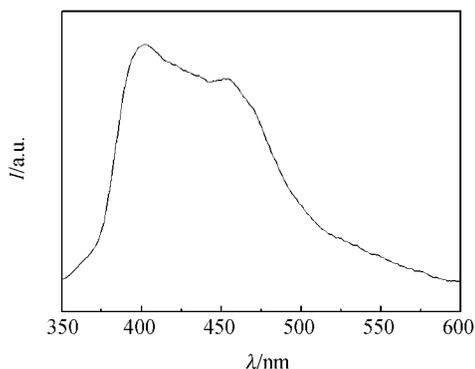


图 4 ZnO 薄膜的光致发光谱

通过测量薄膜的光致发光谱,要求学生掌握光致发光谱的相关机理,测量发光峰的位置和强度,研究源材料、制备方法和激发条件对 ZnO 薄膜发光峰的影响,探索优化特定发光谱线的薄膜制备工艺,探索其在发光器件上的应用.

3 半导体薄膜研究性实验教学理念

在开展半导体 ZnO 薄膜的系列实验之前,要求学生查阅文献,了解 ZnO 晶体的基本性质,并结合以前学习的半导体物理理论,进一步了解 ZnO 薄膜的缺陷以及半导体光学性质.在此基础上自主设计实验方案,完成半导体 ZnO 薄膜的制备和性能测试实验.在完成实验的过程中,要求学生对实验中观察到的现象和测量数据,查阅文献,进行分析,根据实验进程对实验方案进行必要的调整,结合文献得出结论.在整个系列实验过程中,指导教师对学生在相关半导体物理模型和机理上进行指导,对实验方案中不合理的方面可以调整,培养学生自行发现设计方案中的不足,并及时调整实验设计方案的意识,提高学生的综合科研能力.将从事科研的思维模式和方法引入教学,培养学生从文献调研开始,逐步提高综合应用

已有知识开展科研的素质.

4 结束语

将科研思维方式和方法引入教学,围绕半导体 ZnO 薄膜的制备、半导体薄膜的结构测试、表面形貌测试和光谱测试建立了半导体薄膜的研究性实验教学模块. 学生通过参加模块的系列实验,学会从文献调研到实验方案的提出与实施、实验数据的精确获取及实验结果的推导的科研技能,提高综合利用已有知识不断创新的科研素质.

参考文献:

- [1] 霍剑青. 大学物理实验课程教学基本要求的指导思想 and 内容解读[J]. 物理与工程, 2007, 17(1): 5-9.
- [2] 解光勇, 施卫. 课题研究性物理实验教学研究与实践[J]. 物理实验, 2009, 29(4): 19-22.
- [3] 雷宏香, 蔡志岗, 王嘉辉, 等. 研究性教学模式在光信息专业实验教学中的应用[J]. 实验室研究与探索, 2008, 27(11): 103-105.
- [4] 王引书, 刘慧民, 樊洁平, 等. “纳米晶体性能”实验研究性教学[J]. 物理实验, 2009, 29(8): 13-17.
- [5] 李海燕, 赵汗青, 高兴海, 等. 实验教学创新的研究与探索[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(8): 115-117.
- [6] 黄凯, 吕建国, 刘先松, 等. 溶胶-凝胶法制备 Mg 掺杂 ZnO 薄膜的微结构与光学性质[J]. 人工晶体学报, 2010, 39(5): 1171-1175.
- [7] 王雄, 才玺坤, 原子健, 等. 氧化锌锡薄膜晶体管的研究[J]. 物理学报, 2011, 60(3): 037305.
- [8] 商世广, 赵玲, 贺永宁, 等. 硅基铝掺杂氧化锌异质结太阳能电池的制备与性能研究[J]. 人工晶体学报, 2010, 39(6): 1499-1503.
- [9] Yi J B, Lim C C, Xing G Z, et al. Ferromagnetism in dilute magnetic semiconductors through defect engineering: Li-doped ZnO [J]. Phys. Rev. Lett., 2010, 104(13): 137201.
- [10] 王叶, 马国宏, 阎晓娜. 研究型实验教学探讨[J]. 实验室研究与探索, 2009, 28(4): 101-102.
- [11] 张增明, 孙腊珍, 霍剑青, 等. 创新研究型物理实验教学平台的建设与实践[J]. 物理实验, 2009, 29(7): 14-17.

Research and practice on semiconductor thin films experiment

HUANG Kai, YU Jiang-ying, SHENG Shou-qi, TANG Zhen

(Department of Mathmatic & Physics, Anhui University of Architecture, Hefei 230601, China)

Abstract: Investigative experimental teaching plays an important role in innovative education in universities. Taking the ZnO film experiment as an example, the teaching methods for semiconductor physics experiment were introduced. The effect on the creative thinking ability, research ability and coordination skills of students was analyzed and discussed.

Key words: semiconductor film; research experiment; practical teaching

[责任编辑:任德香]