

# 薄膜物理中厚度测量的教学设计与探索\*

金克新 陈云海 王海鹏

(西北工业大学物理科学与技术学院 陕西 西安 710072)

(收稿日期:2023-01-06)

**摘要:**物体厚度是一个简单的物理量,然而对于薄膜体系,厚度则扮演着极其重要的角色,尤其是对薄膜的各种物理和化学性质影响很大.因此,在薄膜物理这门课程中,需要强化薄膜厚度的概念及其测量方法的教学内容.本文从薄膜厚度的基本概念出发,围绕“学”来展开教学,以问题为导向,逐步引出厚度的重要性,解析厚度测量的方法和原理,具体讲解厚度的测量技术.教学内容由浅入深,推表及里,激发学生的思考,使学生更加深刻地掌握薄膜厚度概念及测量原理,同时在教学过程中引入领域科学前沿和思政元素,达到“教书”与“育人”的双重目的.

**关键词:**教学设计;课程思政;问题导向;薄膜厚度;测量方法

2020年10月,中共中央、国务院印发的《深化新时代教育评价改革总体方案》中提出构筑在“新工科”建设背景下的大类人才培养模式.在此形势下如何实现“厚基础、宽口径、重实践、求创新”的培养特色,并根据课程的具体内容进行科学合理的教学设计、吸引学生的学习兴趣、引导学生深刻学习课程知识,是每一位教师应当面对、思考和探索的问题.在“十四五”期间,国家将加快发展新一代信息技术、新能源、新材料等战略性新兴产业,这将涉及集成电路、光电子器件、磁性材料和器件、新型太阳能电池等高新技术的发展和运用,其核心关键技术与薄膜科学相关,并受到人们越来越多的重视<sup>[1]</sup>.在薄膜科学研究中,厚度的实时监测及精确测量尤为重要,因此在课程教学中,需要强化薄膜厚度概念和测量的内容.

早在西汉戴圣的《礼记·学记》中指出“知不足,然后能自反也;知困,然后能自强也.故曰:教学相长也.”在教育育人中,教学相长是一个关键的过程,然而通常注重“教”的环节和课程所要讲授的内容,

却忽略了学生在“学”上的主动性<sup>[2-3]</sup>.这样的教学过程是一个单向的知识“灌输”过程,虽然能让学生直接从中获益,简捷而高效,但学生却完全处于被动状态,难以吸引学生的学习兴趣 and 激发学生的思考.本文以薄膜厚度教学设计为例,围绕“学”来展开教学,以问题为导向,讲授薄膜厚度的重要性、如何测量、测量将面临的难题以及如何解决难题等,充分调动了学生的主观能动性和创造性.同时在教学过程中引入科学前沿和思政元素,达到“教书”与“育人”的双重目的.

## 1 教学设计思路

### 1.1 教学目标

**物理知识传授:**认识薄膜厚度的重要物理意义,掌握薄膜厚度的概念及其测量原理和方法,夯实学生的基础知识.

**科学思维培养:**以问题为导向,引入科学前沿,拓展学生思维的深度及广度,提升学生的科学思维能力.

\* 陕西省研究生教育综合改革研究与实践项目;教育部高等学校教学研究项目,项目编号:DJZW202315xb;西北工业大学教育教学改革研究项目支持,项目编号:2022JGY25.

作者简介:金克新(1977-),男,博士,教授,主要从事应用物理教学科研工作,研究方向为薄膜及低维材料物理.

**思想素质教育:**结合我国薄膜科学的发展现状,把爱国主义和责任担当融入课堂教学中,激励学生将个人的理想追求融入到国家和民族的事业中。

## 1.2 教学过程

教学设计思路如图1所示,以薄膜领域的科学前沿为牵引,引入薄膜测厚主题,吸引学生的学习兴趣;

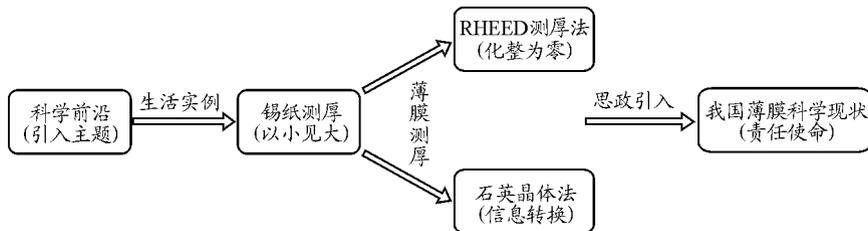


图1 教学设计思路图

## 2 教学过程设计

### 2.1 以科学前沿为牵引 讲授“薄膜厚度的重要性”

$\text{LaAlO}_3/\text{SrTiO}_3$  (LAO/STO) 异质界面是一种备受关注的体系,探索 LAO/STO 异质界面的新奇物理现象,对未来新型氧化物电子学和器件的应用具有非常重要的意义.其中 LAO 的厚度是一个重要的物理参量,且存在一个约为 4 uc (unit cell, 晶胞) 的临界厚度.以问题形式向学生展示有关 LAO/STO 界面物性的厚度依赖实验结果.图2是不同厚度 LAO/STO 界面电导率的数值,可以看到,当 LAO 薄膜厚度小于 4 uc 时,界面电导率很小.而当厚度大于 4 uc 时,其电导率有几个数量级的提升,表现为金属导电性.同一种材料,仅仅是在厚度上的微小差异,却表现出两种完全不同的导电行为.

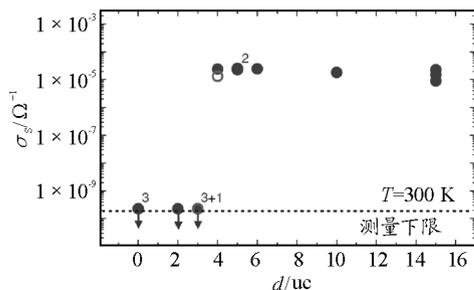


图2 LAO/STO 异质界面电导率与 LAO 薄膜厚度的关系<sup>[4]</sup>

进一步通过锡纸测厚的例子,讲述厚度测量的基本原理和物理思想,进而引出薄膜测厚的方法和原理,提高学生的科学素质;结合我国薄膜科学的现状,合理引入思政元素,增强学生的社会责任感和使命感。

由此可见,当厚度极小时,薄膜进入微观尺度,会出现许多体材料中不存在的复杂现象和效应.与体材料相比,薄膜最大的区别就在于维度,也就是厚度,其对薄膜材料的物理性质影响很大.无论是熟知的物理量,如质量、电导和光学常数(透射和折射)等,还是科学研究发现的新奇物理效应,都与薄膜厚度直接或间接相关.在薄膜科学研究中,对薄膜厚度进行实时监测以及薄膜厚度的精确测量尤为重要.

### 2.2 从简单实例出发 启发思考“如何测量薄膜厚度”

在以上分析基础上,进一步引导学生思考如何才能测量薄膜厚度,并探讨薄膜厚度的概念和测量方法的基本原理.

以锡纸为例,如何用直尺测量其厚度.显然,不能直接通过直尺测得锡纸的厚度,但是可以通过其他方式间接得到锡纸厚度.例如,通过物体密度、体积和质量之间的换算关系得出锡纸的厚度(图3).除质量外,一个物体的厚度也可以通过测量其电阻、入射光强和光程差等物理量间接获得(表1).一个难以直接测量的物理量,通过测量与其关联的另一个物理量而间接得到,这种方法为信息转换.信息转换是物理学中一种重要的研究方法,物理学中许多重要的物理量就是通过信息转换的方法后才被发现、认识和验证的.

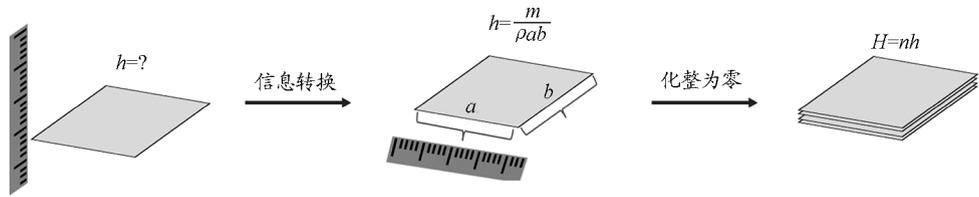


图3 锡纸厚度测量方法的物理思想

表1 几种典型的物理量和厚度  $h$  之间的关系

物理量	规律
质量	$m = \rho \alpha b h$
电阻	$R = \rho \frac{h}{S}$
入射光强	$I = I_0 e^{-\alpha h}$
光程差	$\Delta h = n\lambda$

如果把数张锡纸堆叠在一起,其总厚度依然很小,但是前面已经测得了单片锡纸的厚度,因此只要知道锡纸的数量,就能得出堆叠锡纸的厚度.这就是薄膜厚度测量的第二个原理——化整为零.

对于薄膜而言,其厚度介于单原子到微米之间,许多薄膜厚度只有几十纳米甚至是几个原子层,如此微小的尺寸,简单的直尺等工具显然是无济于事的.因此就需要利用厚度和薄膜其他性质之间的规律,通过传感器将厚度的信息转换为易测量的物理量,从而达到测量薄膜厚度的目的.同时薄膜从微观上来讲,也可以看作是由一层层原子层的堆叠而成,因此,通过测量薄膜原子层的数量也能得出薄膜的厚度.

### 2.3 讲授具体实例 使学生掌握薄膜厚度测量的方法与原理

通过上述讲授,学生初步掌握了薄膜厚度的基本概念、测量难点和基本原理,认识到从哪些方面出发可以获得厚度的信息,但这些知识还无法使学生真正了解薄膜厚度的测量技术.这里选取了石英晶体测厚法和反射式高能电子衍射(reflection high-energy electron diffraction, RHEED)测厚法,同时将两种方法进行比较,让学生掌握薄膜厚度测量方法的优缺点以及如何针对不同类型的薄膜来选取合适的测厚方法等.

#### (1) 石英晶体测厚法(信息转换)

石英晶体测厚法主要是利用物体质量与固有频

率的关系来测量薄膜的厚度,是一种常用的厚度测量技术<sup>[5]</sup>.石英晶体的质量( $m$ )和其固有特征频率( $f$ )的关系为

$$f = k \frac{E}{m}^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中  $k$  是一个与石英晶体相关的比例常数,  $E$  是石英片的弹性模量.当石英晶体质量改变  $dm$  时,其谐振频率改变量为

$$df = -\frac{1}{2} k E^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{m} \right)^{\frac{3}{2}} dm \quad (2)$$

$$K = -\frac{1}{2} k E^{\frac{1}{2}} \left( \frac{1}{m} \right)^{\frac{3}{2}} \quad (3)$$

假设石英片镀膜面积为  $S$ ,体材料密度为  $\rho$ ,镀膜过程中在石英片上生长的薄膜厚度为  $h$ ,那么石英片质量改变量为

$$dm = \rho S h \quad (4)$$

此时,若测量得到频率改变量  $df$ ,就可以计算得到薄膜的厚度为

$$h = \frac{1}{KS\rho} df \quad (5)$$

不过,当频率改变量  $df$  比较大时,  $dm$  与  $df$  之间不再满足线性关系,需要做出相应的修正.石英晶体测厚法灵敏度高,操作简便,可以测量金属、半导体和介质膜的厚度,但由于计算中的密度是块体密度,与实际薄膜的密度有一定差别,所以计算结果会有一些误差.

#### (2) RHEED 测厚法(化整为零)

从微观角度看,如果知道薄膜的单个原子层厚度和原子层数,就能得到薄膜的厚度. RHEED 测厚法就是基于这种原理的厚度测量技术. RHEED 的工作原理主要是电子的衍射行为<sup>[6]</sup>,晶体原子在空间中周期性有序排列,电子束入射到晶体点阵时会发生散射,当入射电子束满足劳厄方程时,则会发生衍射现象,形成衍射图案,劳厄方程表示为

$$k_f - k_i = G_n \quad (6)$$

其中  $k_i$  为入射电子束波矢,  $k_f$  为反射电子束波矢,  $G_n$  为薄膜晶体的倒格矢. 图 4 为 RHEED 测量薄膜厚度的示意图, 薄膜以层状生长, 电子枪发射出能量为 5 ~ 100 keV 的电子束, 并以  $1^\circ \sim 4^\circ$  的角度掠射

至薄膜样品表面<sup>[7]</sup>, 电子在薄膜表面发生衍射并在荧光屏上成像. 衍射图案信息经由电荷耦合器 (CCD) 收集并传输到电脑端, 就能够获得衍射强度和衍射图像等信息.

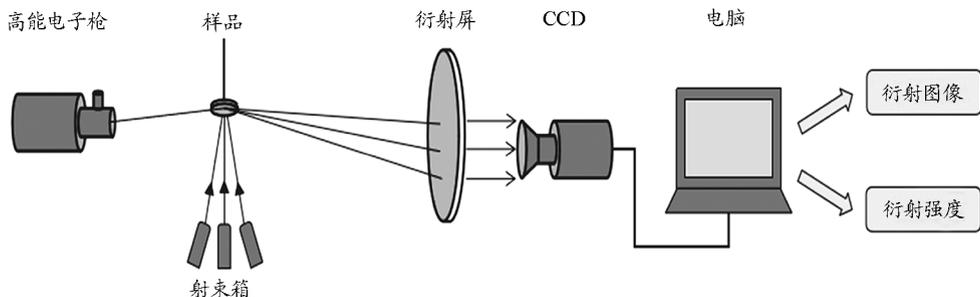


图4 RHEED工作原理图

由于衍射强度对表面粗糙度很敏感, 薄膜表面光滑时衍射强度最大, 衍射图案最清晰. 而当薄膜表面不平整时, 衍射强度则会降低. 衍射强度  $I$  和样品表面覆盖率  $R$  呈如下关系<sup>[8]</sup>

$$I \propto n^4 (1 - 2R)^2 \quad (7)$$

式中  $N$  为薄膜表面原胞数. 当薄膜表面覆盖率  $R=0$  或 1 时, 入射束发生镜面反射, 衍射强度最大; 当  $R=0.5$  时, 入射束发生漫反射, 衍射强度最小. 图 5 为样品表面覆盖率  $R$  分别为 0、0.5 和 1 的衍射情形.

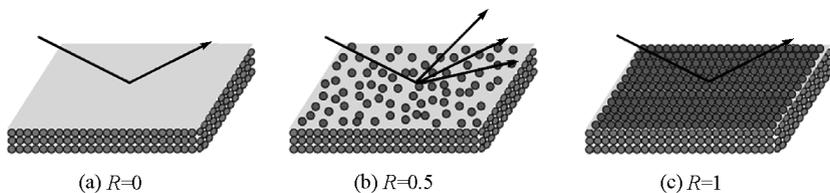


图5 不同表面覆盖率的衍射情形

图 6 是在 STO 基底上沉积 LAO 薄膜时记录的 RHEED 强度振荡曲线 (右上角是薄膜沉积后的衍射图像), 当样品一层一层地连续生长时, 衍射强度呈现周期性振荡, 每一次振荡对应完整的一个原子层. 通过观察衍射强度的振荡次数, 就可以知道薄膜沉积的原子层数.

RHEED 测厚法简洁灵敏、应用广泛, 在测量薄膜厚度的同时, 还能实时监测薄膜生长的情况, 而且与石英晶体法等测厚方法相比, 不会因为薄膜和体材料的性能差异而产生误差. 但是这种方法只适用于层状生长的薄膜, 无法测量岛状生长的薄膜.

## 2.4 引入思政元素 达到“教书”与“育人”双重目的

作为学生的引路人, 在教学过程中教师所要做的不仅是知识的传播, 更要注重对学生人格和思想品德的塑造. 因此在薄膜厚度测量的教学过程中, 学生要学的不仅是薄膜厚度测量的原理方法, 更要学习这些知识背后对国家发展的重要意义.

在讲到薄膜的发展前景和意义时, 与国家的政策和形势等联系起来, 培养学生在科学研究中的家国情怀和社会责任感. 当今时代, 我国科学技术高速

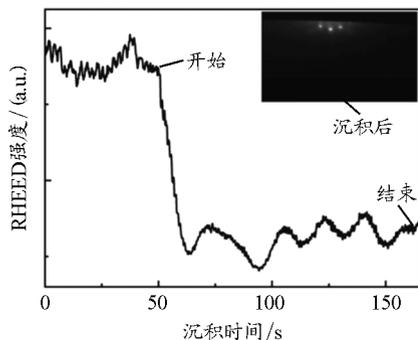


图6 LAO/STO 异质界面制备过程中的 RHEED 监控曲线及衍射图像<sup>[9]</sup>

发展,在许多科学领域中取得了瞩目的成就,然而在基础理论、新型电子器件等方面依然面临着“卡脖子”技术问题.因此,需要积极响应国家科技创新驱动战略,紧跟科学前沿,在薄膜科学领域取得更大的进展.对于高校大学生而言,更要刻苦钻研、夯实基础,树立将科学研究与国家战略需求相结合的理念,为实现中华民族伟大复兴做出自己的贡献.

### 3 总结

总之,我们在薄膜厚度测量的教学过程中,以科学前沿为牵引,以问题为导向,吸引学生的兴趣,从简单的生活实例到复杂的科学实验,让学生掌握了薄膜厚度测量原理和方法的同时,也让学生深刻理解了“信息转换”和“化整为零”的物理思想.最后将思政元素融入课堂,引导学生树立正确的世界观、人生观和价值观,实现“教书”与“育人”的双重目标.

#### 参考文献

- [1] 田民波. 薄膜技术与薄膜材料[M]. 北京:清华大学出版社,2006:1-10.
- [2] 刘雁,王天佐,李杏彩. 高校实验教学改革对学生创新能

- 力培养的作用[J]. 大学,2021(30):158-160.
- [3] 刘彦,赵金涛,葛力,等. 大学物理教学改革实践浅析——“问题导向”式学习的意义及应用[J]. 物理通报,2021(2):37-39.
- [4] Thiel S, Hammerl G, Schmehl A, et al. Tunable quasi-two-dimensional electron gases in oxide heterostructures[J]. *Science*, 2006, 313(5795):1 942-1 945.
- [5] 吴自勤,王兵,孙霞. 薄膜生长[M]. 2版. 北京:科学出版社,2013:232-234.
- [6] 曹青,叶志镇. 反射高能电子衍射的原理及其应用[J]. 材料科学与工程,1994(3):56-58.
- [7] 王萍,解廷月. 反射式高能电子衍射对氧化物薄膜生长的原位监测[J]. 山西大同大学学报(自然科学版),2011,27(5):23-40.
- [8] 葛芳芳,白黎,吴卫东,等. PLD制备钛酸铅薄膜过程的RHEED分析[J]. 真空科学与技术学报,2009,29(4):341-345.
- [9] YAN Hong, ZHANG Zhaoting, JIN Kexin, et al. Thickness dependence of photoresponsive properties at SrTiO<sub>3</sub>-based oxide heterointerfaces under different strains[J]. *Journal of Materials Science*, 2019, 54(1): 108-115.

## Teaching Design and Exploration on Thickness Measurement in Thin Film Physics

JIN Kexin CHEN Yunhai WANG Haipeng

(School of Physical Science and Technology, Northwestern Polytechnical University, Xi'an, Shaanxi 710072)

**Abstract:** Thickness is a simple physical quantity. But for the two-dimensional system of thin film, the thickness plays an extremely important role, especially for various physical and chemical properties. Therefore, in the course of thin film physics, it is necessary to strengthen the teaching process about the concept and measurement of film thickness. Starting from the basic concept of film, teaching around “learning” and be problem-oriented, this work gradually leads to the measurement of film thickness, discusses its difficulties of measurement, analyzes its principle of measurement method, and introduces the specific measurement technology. To attract students' interest, stimulate students' thinking, and make students have a deeper understanding of film thickness and measurement principle, the content is advanced from simple to deep, from surface to inside. At the same time, the scientific development frontier, and the ideological and political elements are introduced into the process, so as to achieve the dual purposes of “teaching” and “educating”.

**Key words:** teaching design; curriculum ideology and politics; problem orientation; film thickness; method of measurement