

《表面科学与外延生长导论》课程教学大纲

课程英文名称: An Introduction to Surface Science and Epitaxial Growth

课程代码: H0313820

学 时 数 : 32

学 分 数: 2

学时分配: 理论 24 学时, 实验 4 学时, 课程设计 4 学时

课程类型: 学科前沿课

适用学科专业: 本课程适用于电子科学与技术专业、微电子科学与工程专业、集成电路设计与集成系统专业、应用化学专业学生

先修课程: 量子力学, 固体物理

执 笔 者: 李含冬、牛晓滨

编写日期: 2016.7

审 核 人: 于奇

一、课程简介

外延生长是获制备高质量薄膜与低维量子结构的最优技术途径, 它是从物质的表面开始的, 外延生长的过程对应着材料表面的演化, 可以说表面科学是理解外延生长技术的基础。为了让学习者深入了解表面科学与外延生长技术, 并接触到相关前沿研究进展, 更好地拓展科学视野, 我们精选了表面科学与外延生长技术的核心知识、经典实例构成本课程主体教学内容; 安排了表面科学研究技术实验实践课程; 并且将根据学科研究进展组织前沿课题互动研讨。期望通过这种理论-实践-互动交流相互结合的培养模式将有兴趣的同学引入到实际的科研工作中去。

Surfaces and thin films' epitaxy are two, interdependent, and now fairly mature disciplines. Epitaxial growth is the best way to achieve high-quality thin films and low-dimensional quantum structures. And it starts from the condensation of vapor molecules on solid surfaces. This course is about processes that occur at surfaces and in epitaxial thin films. A case-study approach will be adopted during the teaching activities for better inspiring the students. Subject-oriented seminars and experiments will be arranged to help students fully master the knowledge and technologies of surface sciences being taught in class too. With the efforts to combine theory with practice, it's expected that we can take the students to the forefront of current research in surface sciences and epitaxial growth.

二、课程目标

本课程授课对象为完成一定基础课程的本科高年级学生。将针对各种重要技术材料的单晶薄膜与微尺度结构的外延生长开展教学, 分为材料的结构与表面界面科学基础、外延生长理论、外延生长工程技术、以及该领域的前沿动态。通过该课程的学习, 学生将对表面科学及外延生长理论与技术有更为全面、深入的了解, 重点掌握常见材料的单晶表面结构、表面生长动力学基本概念、不同

材料体系的生长特性、外延工程技术以及外延生长实验与理论研究手段，具备独立开展表面与外延生长科学研究的能力，为该专业领域研究生未来从事相关技术和研究工作奠定基础。

This course aims at high grade undergraduate students with fundamental knowledge of quantum mechanics and solid-state physics. It covers the experimental and theoretical understanding of surface and epitaxial processes. Emphasis is placed on the strong link between science and technology in the description of, and research for, new devices based on thin film and surface science. Practical experimental design, sample preparation and analytical techniques are covered, including detailed discussions of scanning tunneling microscopy and other surface analysis methods. Thermodynamic and kinetic models of electronic, atomic and vibrational structure are emphasized throughout. It's expected that the students can understand the unique description of surface processes in adsorption and crystal growth, including bonding in metals and semiconductors by the end of this course. It'll also help the interested students build a solid basis before they get involved in the research society of surface science and thin-film technology industries.

三、课程内容安排和要求

（一）教学内容、要求及教学方法

本课程共 32 学时，分为三部分共十章。

绪论（1 学时）

本章从分子束外延生长的发展历史、科学研究及实际应用等方面入手，介绍外延生长和材料表面科学之间关系，对外延科学的研究对象、技术特点以及发展动态等方面进行概述，建立对课程的整体了解。

第一部分：材料的结构与表面科学基础

该部分授课内容主要涉及到分子束外延生长技术的基础-表面科学以及对常见外延生长对象结构和表面的具体了解。将从表面再构的基本概念出发，介绍各种常见技术材料的晶体结构和表面结构，以及研究外延生长所涉及到的原位检测技术。难点为对表面晶体再构和表面态的理解。要求学生能掌握常见金属和半导体表面的基本知识，如台阶-扭折-台面以及各种再构结构，理解并掌握各种表面分析技术原理，实践操作部分要求能正确操作扫描隧道显微镜获取清洁固体表面原子分辨相。

第一章：材料的表面结构概述（1 学时）

§ 1.1 二维结晶学概述

§ 1.2 外延材料的键合与分类

第二章：实际固体的表面（3 学时）

§ 3.1 固体表面再构

§ 3.2 表面电子结构

§ 3.3 固体表面吸附

第三章：扫描探针显微术与扫描透射谱（SPM/STS）技术（4 学时）

§ 2.1 STM/STS 基本概念和理论

§ 2.2 STM 的构造和仪器知识

§ 2.3 STM 的应用操作

第二部分：分子束外延技术

该部分将学习分子束外延技术的最新进展，重点为各种技术的原理以及适用对象，难点为束流源的束流空间分布计算。通过本部分的学习要求学生能熟悉分子束外延技术的系统构成，并了解分子束外延技术的前沿。

第四章：分子束外延技术（3 学时）

§ 9.1 超高真空系统

§ 9.2 束流源物理

§ 9.3 射频辅助分子束外延（RF-MBE）

§ 9.4 化学束外延（CBE）

实验实践安排：

本部分第四章课堂教学任务完成后，分组安排实验操作 1 次（半导体表面再构的观察）共 4 学时，1 周内上交实验报告。

第三部分：外延生长科学与理论

该部分主要针对外延生长基础理论进行学习，将介绍外延生长中的基本概念与物理模型。重点将放在表面张应力与表面能关系的正确理解，正确区分表面热力学与动力学因素，表面形核、迁移，外延膜的应力演化与缺陷产生。难点在于理解分子束外延的非热力学平衡生长本质、不同键合以及结构材料的外延生长特性以及相应外延生长理论。要求学生理解并掌握常见技术材料的外延生长细节技术。

第五章：外延生长理论基础（4 学时）

§ 4.1 外延生长热力学基础

§ 4.2 外延生长动力学基础

§ 4.3 热力学非平衡生长（离子晶体的外延）

第六章：外延生长中的缺陷控制（2 学时）

§ 5.1 点缺陷、位错、堆垛与孪晶的形成

§ 5.2 自补偿半导体材料的外延掺杂

§ 5.3 SiGe 位错阻挡层理论

§ 5.4 GaN 临位面外延理论

第七章：半导体纳米材料的外延生长（2 学时）

§ 6.1 “气-液-固（VLS）”催化生长理论

§ 6.2 纳米结构的分子束液滴外延

§ 6.3 纳米结构的催化分子束外延

第八章：有机分子材料的分子束外延（2 学时）

§ 7.1 分子的吸附

§ 7.2 “准外延（quasi-epitaxy）”理论

§ 7.3 有机材料的外延生长

第九章：各向异性材料的外延生长（2 学时）

§ 8.1 晶体密堆积面内各向异性外延生长

§ 8.2 “范德华外延（van der Waals epitaxy）”理论

§ 8.3 层状拓扑绝缘体的外延生长

课程设计安排：

在教学过程中根据授课进展穿插安排前沿进展调研任务 1-2 次，安排论文 Seminar 交流 1-2 次，共 4 学时。完成课程设计相关英文综述性小论文 1 篇（标准格式，>3000 words），题目由老师指定，2 周内完成。

教学方法：

本课程采用教师引导，学生为主的教学方式。将课堂讲授、配套实验以及课程设计（以课题调研任务结合学术研讨为形式实施）有机衔接起来。将多媒体技术、板书、教材等现代化教学手段和途径结合起来，利用各种教学和先进科研资源，培养学生初步具备独立开展表面与外延生长科学相

关研究的能力。

教学形式有：

1. 教师讲授方式：基本概念、基本操作等由教师结合多媒体方式课堂讲授。
2. 作业：及时练习、巩固基本知识和方法。
3. 配套实验课程，主讲教师亲自辅导：利用微电子与固体电子学院的超高真空分子束外延-扫描隧道显微镜系统等一流软硬件条件，提高学生的实际动手能力，将课本上的理论与工程中的实践问题结合起来，使学生学以致用。

《表面科学与外延生长导论》课程为学科前沿课，所涉及到的基础知识和实验部分不仅需要深入讲授，还应该充分结合实验实践方式进行，以引导学习者的主动性。因此该课程的具体授课结构计划分由以下三部分构成：

1. 课堂讲授：24 学时，分为材料的结构与表面科学基础，分子束外延技术，与外延生长科学与理论三部分，分别由两位老师主讲。
2. 实验：4 学时，在第一、二部分课程授课结束后，参与者将可以直接操作分子束外延（MBE）与扫描隧道显微镜（STM）等科研仪器研究实际固体的表面结构并实践薄膜材料的外延生长。
3. 课程设计：4 学时，穿插于课程教学过程中，将由主讲老师提出前沿课题，学生进行相关调研并完成学术论文，最后以小组研讨的方式进行课题讨论。

（二）自学内容和要求

无。

（三）实践性教学环节和要求

教学内容：利用超高真空扫描隧道显微镜系统直接观测半导体表面再构形貌

时间：4 学时

实验要求：通过该部分的实践操作，要求学习者能深入理解扫描隧道显微镜的工作原理，掌握扫描隧道显微镜系统与配套数据处理软件的操作，能够设定扫描隧道显微镜系统控制参数以获得典型半导体表面的原子分辨相，并能对获得的数据进行软件处理优化，结合课堂知识准确分析表面结构。

四、考核方式

考核方式为期末考试+实验报告+平时考核。

成绩构成及比例：平时考核 10%+实验报告 40%+期末考核 50%。

平时考核包含课后作业与学术讨论交流的质量评定，占 10%；实验报告根据课程实践部分的实验工作及报告完成情况评定，占 40%；期末考核根据课程设计部分论文完成情况评定，占 50%。

课后作业、学术讨论交流：主要考核学生平时的学习态度、课堂讨论参与程度以及主要知识点的理解和掌握程度。

期末考核：主要考核学生调研前沿学科进展，整理、归纳以及分析资料文献的能力；综述、展望学科科研方向的能力；英文语言及文字表达能力和英文科技报告的撰写能力。

五、建议教材及参考资料

（一）教材：

1. John A. Venables, Introduction to Surface and Thin film Processes. Cambridge University Press, 2000
2. J.W. Matthews, Epitaxial Growth. Academic Press, Inc., 1975

（二）参考资料：

1. F. Bechstedt, Principles of Surface Physics. Springer Verlag Berlin Heidelberg New York, 2003
2. L.B. Freund and S. Suresh 著/卢磊等译，薄膜材料——应力、缺陷的形成和表面演化. 科学出版社，2006
3. Marc De Graef and Michael E. McHenry, Structure of Materials: An introduction to crystallography, diffraction and symmetry. Cambridge University Press, 2012
4. 徐亚伯，表面物理导论，浙江大学出版社，1992
5. 白春礼，扫描隧道显微术及其应用，上海科学技术出版社，1992
6. 郭可信，叶恒强，吴玉琨，电子衍射图在晶体学中的应用，科学出版社，1983
7. 恽正中、王恩信，完利祥编，表面与界面物理，电子科大出版社，1993