

基于扫描隧道显微镜的前沿物理实验教学探究

贺佳琦¹, 吴亮², 丁皓璇³, 张鑫¹, 朱文亮¹, 高健智¹, 潘明虎^{1,4*}

¹ 陕西师范大学物理学与信息技术学院 陕西西安

² 华中科技大学外国语学院 湖北武汉

³ 英国伯明翰大学物理与天文学院 英国伯明翰

⁴ 华中科技大学物理学院 湖北武汉

【摘要】本文基于扫描隧道显微镜系统,将相应的前沿学术研究成果引入到实验教学中,详细介绍了如何引导学生完成二维晶体材料 C₆₀ 的制备、结构表征与分析和电子态密度测量.利用前沿物理实验教学的方式,有助于学生深入理解热力学与统计物理和固体物理中晶畴、晶胞以及局域电子态密度等相关概念,提高学生理论知识学习的兴趣,锻炼学生的实践动手能力,促进学生自主学习的内驱力,同时这也符合国家关于教学内容体现创新性、前沿性与时代性的课程建设标准的要求。

【关键词】扫描隧道显微镜; 实验物理教学; 二维晶体生长

【基金项目】国家自然科学基金(91745115); 中央高校基础研究经费(GK202102008)

【收稿日期】2023 年 8 月 25 日 **【出刊日期】**2023 年 9 月 27 日 **【DOI】**10.12208/j.pstr.20230008

Exploring teaching methods in Frontier experimental physics based on scanning tunneling microscopy

Jiaqi He¹, Liang Wu², Haoxuan Ding³, Xin Zhang¹, Wenliang Zhu¹, Jianzhi Gao¹, Minghu Pan^{1,4*}

¹School of Physics and Information Technology, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi

²School of Foreign Languages, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

³School of Physics and Astronomy, University of Birmingham, Birmingham B15 2TT, United Kingdom

⁴School of Physics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan, Hubei

【Abstract】Based on the technique of scanning tunneling microscope, this paper introduces the cutting-edge academic research results into experimental physics teaching, and exhibits in detail how to guide students to complete the preparation, structural characterization and analysis of two-dimensional crystal material C₆₀ and the measurement of its electronic density of states. Combined with the experimental teaching method, it can help students deeply understand the related concepts of crystalline domain, unit cell and local electronic density of states in thermodynamics, statistical physics and solid-state physics, improve students' interest in theoretical learning, exercise students' practical ability and promote students' internal interests and motivation of self-directed learning. Consequently, it also meets the requirements of the national curriculum construction standard that the teaching content has to reflect the characteristic of innovation, cutting-edge and modernity.

【Keywords】Scanning tunneling microscopy; Experimental physics teaching; Two-dimensional crystal growth

理论知识的学习制约着大学生目前及未来实践能力的提高,决定了大学生的高度、广度和深度。然而对于一些自然科学类专业的理论课程,往往抽象而深刻,不利于学生理解,尤其是物理学专业的核

心课程固体物理以及热力学与统计物理。多年以来,这些课程均采用纯理论教学模式,但是单一的理论教学很难让大学生达到对所学知识深入理解及融会贯通的程度,其中实验教学与理论教学的有机结合

作者简介:贺佳琦(2000-)男,陕西榆林,陕西师范大学物理学与信息技术学院硕士研究生

*通讯作者:潘明虎(1974-)男,安徽全椒,陕西师范大学物理学与信息技术学院教授,博士,研究方向:凝聚态物理和表面物理化学

是解决该问题的有效手段^[1,2]。

实验教学及实践拓展不仅能够加深学生对所学知识的进一步理解, 同时能够有效的提升大学生的创新精神和实践能力, 而且这也是促进当代大学生从知识型人才向实用技能型人才转变的重要手段^[3], 更是能够培养具备一定科研能力、能胜任中学物理教学以及相关科学技术领域中科研、教学、技术和管理工作的高级专门人才^[4]。

扫描隧道显微镜 (STM) 是一种扫描探针显微术工具^[5], 其基本工作原理为: 将一个非常尖锐的金属针尖靠近测量的样品表面, 当针尖到样品的距离为几个 Å 之内时, 针尖尖端的电子波函数与样品表面的电子波函数便会发生交叠。此时在样品和针尖之间加上偏压, 就会导致电流的流动, 这种现象被称为量子隧穿效应。而由于该隧穿电流对针尖样品间的距离十分敏感, 所以利用拥有皮米量级精度的压电陶瓷传感器便可实现对针尖的精确控制, STM 因此也具有了无与伦比的实空间分辨能力^[6]。

本文主要以固体物理及热力学与统计物理中的理论知识为基础, 以 C_{60} 分子与辛烷硫醇组成的二元分子体系在 Au (111) 表面的吸附组装为研究对象, 借助扫描隧道显微镜的原位生长及表征功能, 引导学生完成一种新型二维碳基晶体材料的制备与结构分析。通过对二维晶体材料形成过程的实时原位观测, 可以帮助学生加深对热力学与统计物理中关于原 (分) 子在固体表面热力学与动力学平衡等概念的理解; 同时通过扫描隧道显微镜对二维晶体材料的结构分析, 能够帮助学生理解固体物理课程中和晶体结构相关的内容以及加深对材料物理性质的认识。从而激发学生的学习兴趣, 拓宽学生的知识面, 有效提高学生的认知能力、创造能力和对理论知识的理解水平^[7]。

1 二维晶体材料的制备

二维晶体材料的外延生长涉及靶材原 (分) 子在基底表面复杂的热力学与动力学平衡过程, 然而由于学生对所学知识的掌握程度比较低, 难以理解这样复杂的物理图像, 所以在实验方面让学生自己动手制备材料可以强化学生对于抽象物理概念的理解, 也有助于培养学生良好的物理思维方式。

本实验涉及的二维晶体材料具体制备流程如下: 首先, 利用液相法在 Au (111) 表面制备单层饱和覆

盖度的辛烷硫醇分子薄膜; 其次, 通过低温退火处理, 实现部分辛烷硫醇分子的脱附及剩余分子的重新组装; 第三, 将一定量的 C_{60} 分子室温沉积到低覆盖度的辛烷硫醇分子膜表面, 并通过扫描隧道显微镜实时原位观测晶体的形成过程。

本文所采用的 C_{60} 分子与辛烷硫醇组成的二元分子体系是完全基于分子间的范德瓦尔斯相互作用构筑的, 因为单一相互作用的研究体系其复杂程度相对较低, 并且处于大学生的知识接受范围之内, 使学生对材料生长过程中分子热、动平衡的理解大有益处, 从而激发学生的学习兴趣。此外, 扫描隧道显微镜的实时观测能够让同学们在实空间直观地观察到二维晶体材料的形成过程, 有助于开拓学生的视野以及初步掌握科学研究的方法^[8,9]。

图 1 为学生基于本实验的晶体材料制备流程自己动手操作得到的二维 C_{60} 晶体材料形成过程的扫描隧道显微镜图像, 其中绿色虚线标注的是二维 C_{60} 晶体生长的位置, 从图像中我们可以清楚的看出, 当 C_{60} 分子数目较少时, 并不易于形成规则的二维晶体结构。然后引导学生结合所学理论知识进一步去分析晶体生长的全过程, 能够提高学生对二维材料界面力的平衡与新相的形成过程的理解, 进而推测出二维晶体材料形成过程中热力学以及动力学因素所起的关键作用, 让学生直观地感受到课堂内容与物理前沿科研问题的结合, 也有助于提升学生主动探索物理问题的积极性。

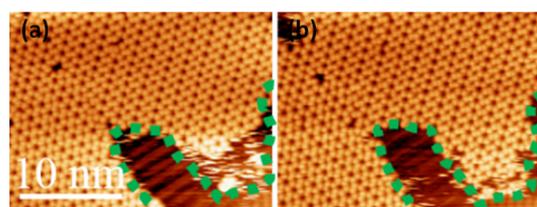


图 1 (a)、(b) 分别为二维 C_{60} 晶体材料原位生长前后的扫描隧道显微镜图像

2 二维晶体材料的结构表征分析

二维晶体材料的表面结构在实空间的表征分析有利于将固体物理课程中晶畴、晶胞等相对抽象的物理概念直观化、具象化, 使学生在学习过程中可以加强对课程知识的理解, 提高学生的学习热情。我们主要通过引导学生利用扫描隧道显微镜观测 C_{60} 晶体材料的精细结构, 从而让学生分析出二维晶体材料生长的结构特征。

图 2 (a) 为单层 C_{60} 薄膜的大范围扫描隧道显微镜图像, 从图中我们可以看出, Au (111) 表面规则的二维 C_{60} 薄膜有明显的晶畴划分, 且晶畴与晶畴之间以 $(1\bar{1}0)$ 方向为轴线镜像分布且与 $(1\bar{1}0)$ 方向各成 14° 夹角。这种典型的晶畴之间镜像对称的分布特点非常有助于学生从直观角度了解晶体生长的结构特征。

图 2 (b) 为二维 C_{60} 多孔晶体材料的高分辨扫描隧道显微镜图像, 从图中可以看出, 该二维多孔晶体结构由多个 C_{60} 二聚体 (由白色椭圆标出) 以及 C_{60} 单体有序排列构成。

其中绿色椭圆所标出区域的 C_{60} 分子与其他区域中的排列方式不一致, 我们通过对相邻分子间距离的测量后发现, 二维 C_{60} 多孔晶体结构中, 除了 C_{60} 二聚体之间紧密连接, 其他相邻分子之间依然存在着较大的间距, 而由于 C_{60} 分子在相对宽松的空间内排布, 所以其组装结构会在合理的范围内发生微小的变动。

在整个测量过程中涉及到了分子在金属表面的吸附、扩散以及分子间、分子与基底间相互作用力的相互平衡等内容, 我们让学生动手完成整个过程能够加深其对微观尺度分子运动过程的理解和掌握, 进而拓宽学生的知识面, 提高学生发现问题、分析问题和解决问题的能力。

图 2 (c) 为实验中测得的相邻 C_{60} 分子间的距离, 其中 C_{60} 二聚体的距离约为 1.03nm , 这个距离非常接近 C_{60} 晶体中分子间最近邻的距离, 而其他相邻分子间的距离都比 1nm 大很多, 这表明 C_{60} 二聚体中分子间存在着直接键合。

我们通过引导学生完成对相邻分子间距离的精确测量以及如何结合分子模型的相关内容进行分析, 不仅能够使学生独立地建立合理的分子结构图像, 更能激发学生思考与探索的积极性。

图 2 (d) 为二维 C_{60} 网格状晶体结构示意图, 我们对理论模型中相邻 C_{60} 分子之间的距离进行计算后发现, 模型与实验中测得的相邻 C_{60} 分子之间的距离基本一致。

由此启示学生对于物理学科而言, 理论与实验虽然是分开进行的, 但是彼此之间息息相关、缺一不可。实验结果对于理论发展给出建议, 理论预测对于实验设计给出引领。

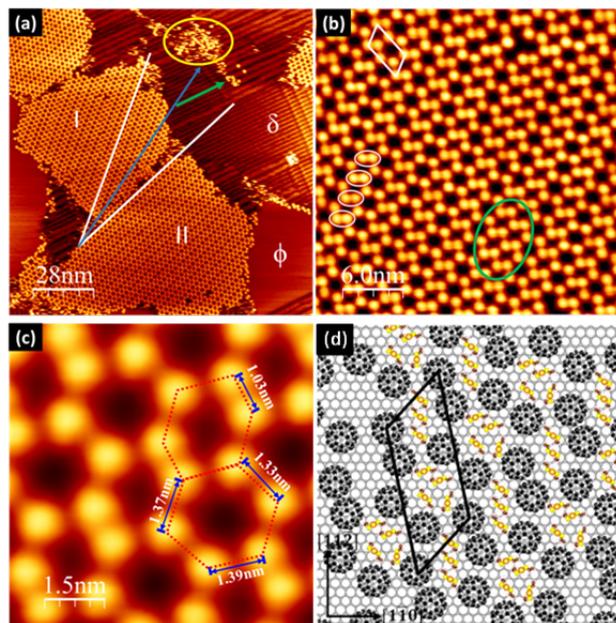


图 2 二维 C_{60} 晶体结构扫描图像。(a) 大范围扫描图像; (b) 二维 C_{60} 晶体结构放大图像; (c) 二维 C_{60} 晶体结构高分辨图以及最近邻 C_{60} 分子间的距离; (d) C_{60} 网格状晶体结构示意图

3 二维晶体材料低温下的表面局域电子态测量

二维 C_{60} 晶体极端条件下 (例如低温、强磁等) 的结构分析及物性测量将进一步加深学生对 C_{60} 分子本征电子性质以及结构特性的了解, 同时由于极端条件导致的晶体结构变化能够提高学生对二维晶体材料相变过程的认识^[10]。在本文中我们以低温导致的二维晶体结构相变以及材料电子性质变化为出发点, 通过扫描隧道显微镜特有的表面局域电子态测量手段, 引导学生在纳米尺度上认识 C_{60} 分子在二维晶体结构中的分子趋向规律以及二维材料表面局域的电子密度分布图像。图 3 (a) 为在液氮温度下观测到的二维 C_{60} 晶体内部分子趋向图, 高分辨的 C_{60} 分子趋向图能够比较容易地让学生发现结构内部分子趋向的分布规律, 培养学生结合物理图像分析问题的能力。图 3 (b)、(c) 为不同 C_{60} 分子趋向的结构模型图, 其中 (b) 图与 (a) 图的分子趋向分布一一对应。

除了通过观测晶体内部分子趋向图认识其排布规律以外, 我们还利用扫描隧道显微镜对低温下 C_{60} 分子对之间的电荷转移现象进行实空间观测, 从而帮助学生直观地认识二维 C_{60} 分子晶体表面局域电子态在实空间的分布。图 3 (d) 为在液氮温度下探测到的二维材料扫描图像, 图像中分子的亮暗程度

直接代表 C_{60} 单体的电子态密度的高低, C_{60} 分子对中明显的亮暗差别能够帮助学生观察 C_{60} 二聚体中电子的电荷转移现象, 这种直观的特征图像将有效提高学生对于纳米尺度下电子运动路径及状态等抽象理论知识的理解。

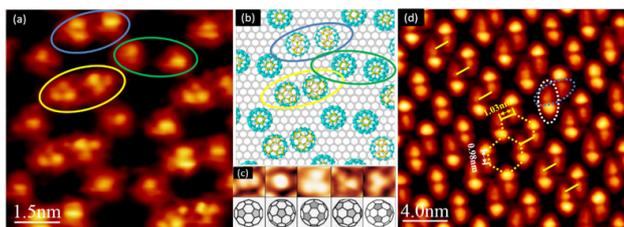


图3 二维 C_{60} 晶体结构液氮温度扫描图像。(a) C_{60} 分子趋向图像; (b) 与(a)对应的二维 C_{60} 晶体结构模型; (c) C_{60} 二聚体电荷转移图像; (d) 液氮温度下探测到的二维材料扫描图像

4 结论

本文结合最新的科学前沿成果二维 C_{60} 晶体材料, 利用扫描隧道显微镜的原位生长与表征分析功能, 引导学生完成了从样品制备出发到其实空间表征分析, 然后在极端条件下对二维晶体材料局域电子态密度的传输进行测量的全过程。在本实验中, 我们主要借助扫描隧道显微镜的测量优势, 将固体物理中晶畴、晶胞、电子态密度等抽象的概念具体化、直观化, 让学生对于在热力学与统计物理以及固体物理学中所学习的理论知识对科学前沿工作发挥的作用有了启蒙式教学, 也让学生切实体会到学习理论知识不是纸上谈兵, 只有理论与实验的有机结合才能发挥出理论指导实验前进的优势^[11]。这一系列的实验操作不仅让学生对二维晶体材料完整的生长过程有了系统性的了解, 更使得学生深入理解了固体物理和热力学与统计物理的基本理论和物理思想, 有助于提高学生对于理论知识的学习热情, 还锻炼了学生的实践动手能力, 更有助于学生掌握科

学研究的方法, 形成正确的科学观。

参考文献

- [1] 苗常青,赵二劳.理论与实际相结合的物理化学实验教学改革策略.轻工科技,2019,35(12):192-193.
- [2] 刘利红.浅谈混合碱液实验教学中如何引导学生理论与实验相结合.广州化工,2015,43(12):210-211.
- [3] 何亦名,张炳申.我国技能型人才供给不足的制度分析[J].教育与职业,2008(02):9-12.
- [4] 楚兴丽,张岩星,杜爱慧.第一原理的原子热力学方法及反应相图分析[J].大学物理,2021,40(12):8-11.
- [5] 宣锴.基于计算机仿真的扫描隧道显微镜原理分析[J].电子制作,2019(14):17-21.
- [6] 黄思远,田焕芳,郑丁国,李中文,朱春辉,杨槐馨,李建奇.高时空分辨透射电子显微镜发展与应用[J/OL].世界科技研究与发展:1-17[2022-04-26].
- [7] 方志刚,郝晓亮.新工科背景下地方高校学生创造能力培养研究[J].农业技术与装备,2021(07):115-116.
- [8] 张善涛,洪毅,朱宏达,马建行,臧文成.扫描隧道显微镜的原理和应用.自然杂志,1999(06):346-351.
- [9] 李斌,侯建国.扫描隧道显微镜在单分子科学中的应用.物理,2008(08):562-567.
- [10] 凌双梅,高学农,尹辉斌.低温相变蓄热材料研究进展.广东化工,2007(03):48-55.

版权声明: ©2023 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS