

## 面向本科课堂的有机聚合物导电薄膜制备与改性实验教学创新

贾堡<sup>2</sup>, 柯蕴哲<sup>2</sup>, 孙世悦<sup>1</sup>, 于冬雪<sup>2</sup>, 刘莹<sup>2</sup>, 丁帅帅<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup>天津大学分子聚集态科学研究院, 有机集成电路教育部重点实验室, 天津市分子光电科学重点实验室, 天津 300072

<sup>2</sup>天津大学理学院化学系, 有机集成电路教育部重点实验室, 天津市分子光电科学重点实验室, 天津 300072

**摘要:** 近年来, 作为前沿交叉领域, 有机电子学的相关研究方兴未艾。有机电子学旨在使用有机材料制造出更灵活、更环保、更经济的电子器件, 用于显示技术、光电子学、能源转换等领域。为深化本科生对有机电子学的理解, 本实验教学方案以常见有机聚合物P3HT为主体, 利用旋涂仪实现活性层的制备与改性, 通过台阶仪、光学显微镜、原子力显微镜表征薄膜表面形貌, 最后利用探针台对器件导电性进行测试。实验过程中保护措施规范周全, 安全性得到可靠保障, 同时实验中包含多项基本操作及实验仪器的使用, 有利于提升学生的实践能力和科学素养。本次实验旨在通过对有机聚合物薄膜的制备、改性与测试表征, 激发本科生对有机电子学前沿领域的学习兴趣, 提升学生的创新意识和综合素质。

**关键词:** 有机电子学; 薄膜制备; 形貌表征; 电学测试

**中图分类号:** G64; O6

## Innovative Experimental Teaching for the Preparation and Modification of Conductive Organic Polymer Thin Films in Undergraduate Courses

Bao Jia<sup>2</sup>, Yunzhe Ke<sup>2</sup>, Shiyue Sun<sup>1</sup>, Dongxue Yu<sup>2</sup>, Ying Liu<sup>2</sup>, Shuaishuai Ding<sup>1,\*</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Organic Integrated Circuits, Ministry of Education & Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Sciences, Institute of Molecular Aggregation Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China.

<sup>2</sup> Key Laboratory of Organic Integrated Circuits, Ministry of Education & Tianjin Key Laboratory of Molecular Optoelectronic Sciences, Department of Chemistry, School of Science, Tianjin University, Tianjin 300072, China.

**Abstract:** In recent years, research in organic electronics, a burgeoning interdisciplinary field, has seen significant growth. Organic electronics aims to use organic materials to manufacture more flexible, environmentally friendly, and cost-effective electronic devices for applications in display technology, optoelectronics, energy conversion, and other fields. To enhance undergraduate students' understanding of organic electronics, this experimental teaching plan centers on the commonly used organic polymer P3HT. Using a spin coater, students prepare and modify active layers, then characterize the surface morphology of these films with a step profiler, optical microscope, and atomic force microscope. Conductivity testing of the devices is performed using a probe station. Comprehensive and standardized protective measures ensure safety throughout the experimental process. Additionally, the experiment incorporates fundamental techniques and the use of various instruments, fostering students' practical skills and scientific literacy. This experiment aims to ignite undergraduates' interest in the forefront of organic electronics through hands-on

收稿: 2024-04-22; 录用: 2024-06-17; 网络发表: 2024-07-09

\*通讯作者, Email: dingshuaishuai@tju.edu.cn

基金资助: 国家自然科学基金面上项目(52373250); 国家自然科学基金青年项目(52003190); 天津市科学技术普及项目(22KPxMRC00140); 2023年天津市高等学校研究生教育改革研究计划项目(TJYG017)

preparation, modification, and characterization of organic polymer films, thereby enhancing their innovative thinking and overall competencies.

**Key Words:** Organic electronics; Thin film preparation; Morphology characterization; Electrical testing

在全球柔性电子技术发展的浪潮之下, 柔性电子的研究与开发对我国的科技领域具有重要的战略性意义。有机电子学是柔性电子中极具代表性的一个研究方向, 相较于传统的无机硅基电子学, 有机电子器件的成本低、柔韧性好、重量轻且效率大多比较高<sup>[1]</sup>, 因而一经问世便受到广泛关注。凭借自身优势, 有机电子学在新能源、环保节能、生物医疗、信息技术等领域可发挥重要作用, 而基于有机电子学衍生出来的诸如有机场效应晶体管、有机发光二极管、有机太阳能电池等材料器件目前已被证明具有广阔的应用前景<sup>[2]</sup>。

有机聚合物薄膜是有机电子器件结构中常见的重要组成部分, 有机聚合物薄膜的制备方法以及对其进行改性与器件的实际生产密切相关, 而其中所涉及的实验流程与仪器操作对有意向投身有机电子学领域研究的学生来说更是十分重要。然而, 对于化学专业的本科生而言, 传统的课堂教学往往是向学生传递抽象的理论知识, 很少与具体实践相结合, 因而学生难以真正理解和掌握有机电子学的概念和实验技能。所以, 设计相关实验教学, 进行方法创新, 通过实践操作引导学生深入了解这项技术的原理和应用, 对于提升学生的实践能力和理论水平具有重要的意义。

聚(3-己基噻吩-2,5-二基) (P3HT)是一种低成本、合成简单、性能优异的有机聚合物空穴传输材料<sup>[3]</sup>, 因而非常适合作为有机电子器件材料实现商业化生产。自2002年以来<sup>[4]</sup>, 相关研究人员不断开发并改善基于P3HT的有机太阳能电池, 使P3HT有机太阳能电池性能得到很大程度的提高。类似的, P3HT在有机场效应晶体管和有机发光二极管等领域也显示出极大的应用价值。例如, 2009年, Chong等<sup>[5]</sup>通过引入P3HT实现了对顶发射聚合物发光二极管中银电极的修饰改性, 提高了阳极的空穴注入能力。而在2022年, Hao等<sup>[6]</sup>开发了一种基于双层介质层的P3HT有机场效应晶体管, 此器件可用于无标记检测免疫球蛋白G (IgG), 具有检测范围宽、检测限低、选择性高等优势。由此可见, P3HT已成为有机电子学中广泛使用的活性层材料。

本实验以P3HT为主体研究材料, 旨在通过理论与实验教学, 使化学专业本科生对有机电子器件的结构和工作原理有基本的了解; 在实验过程中, 学生将学习使用各种仪器对材料进行测试和表征, 如旋涂仪、台阶仪、探针台、光学显微镜、原子力显微镜等; 实验后将由学生自主对实验结果进行观察与分析。期待通过科研实践, 锻炼本科生理论联系实际的能力, 提升其科研素养。

## 1 实验目的

- 1) 了解常见有机电子器件的基本结构;
- 2) 掌握如何使用旋涂仪对活性层进行制备与改性;
- 3) 了解台阶仪、光学显微镜、原子力显微镜、探针台的原理及使用方法。

## 2 实验原理

实验原理部分, 教师主要对有机场效应晶体管、有机发光二极管、有机太阳能电池等经典有机电子器件的结构和工作原理进行讲解。

### 2.1 有机场效应晶体管

有机场效应晶体管由三个电极(即源极、漏极和栅极)、有机半导体层和栅绝缘层组成<sup>[7]</sup>。就具体结构而言, 根据栅电极位置的不同, 有机场效应晶体管可分为顶栅和底栅两种结构, 栅极沉积在栅绝缘层上方的称为顶栅, 沉积在栅绝缘层下方的称为底栅; 而又由于源漏电极与有机半导体层位置的不同, 可分为顶接触和底接触两种类型, 所谓顶接触, 指有机半导体生长在栅绝缘层上再进行源

漏电极沉积，同理，底接触指的是有机半导体直接以源漏电极和栅绝缘层为基底。因此，有机场效应晶体管共有四种结构类型(图1)<sup>[8]</sup>。

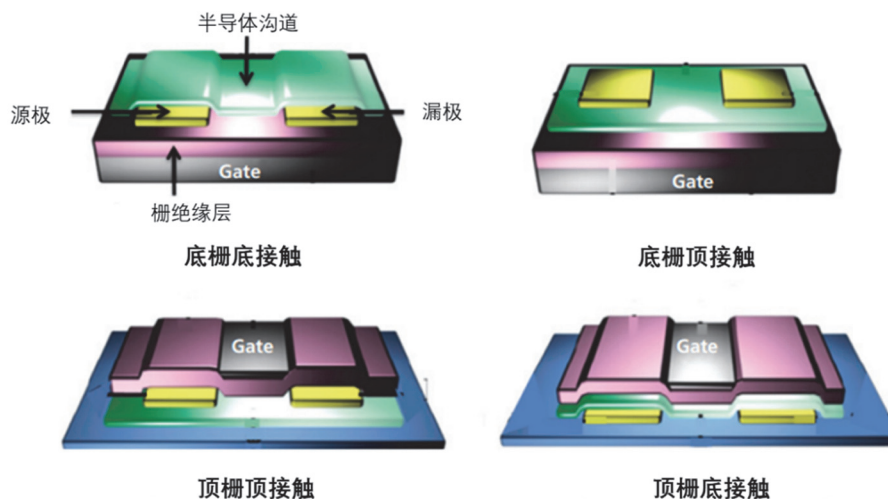


图1 有机场效应晶体管的基本结构类型<sup>[8]</sup>

有机场效应晶体管的基本工作原理是，通过调节栅电压改变器件的电场，从而实现对源漏电极之间电流的控制。迁移率是衡量有机场效应晶体管导电性能的重要指标，表示载流子在有机半导体中的运动能力。它的概念是指单位电场下的载流子漂移速率，通常用厘米平方每伏特秒( $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ )来表示。有机场效应晶体管的迁移率通常通过测量其输出( $I_{\text{DS}}-V_{\text{DS}}$ )特性和转移( $I_{\text{DS}}-V_{\text{GS}}$ )特性来表征(图2)。迁移率的大小直接影响了晶体管的开关速度和电流驱动能力，是评价有机场效应晶体管(OFET)性能的重要指标之一。高迁移率意味着更高的导电性能和更快的响应速度，因此是制备高性能有机电子器件的关键之一。

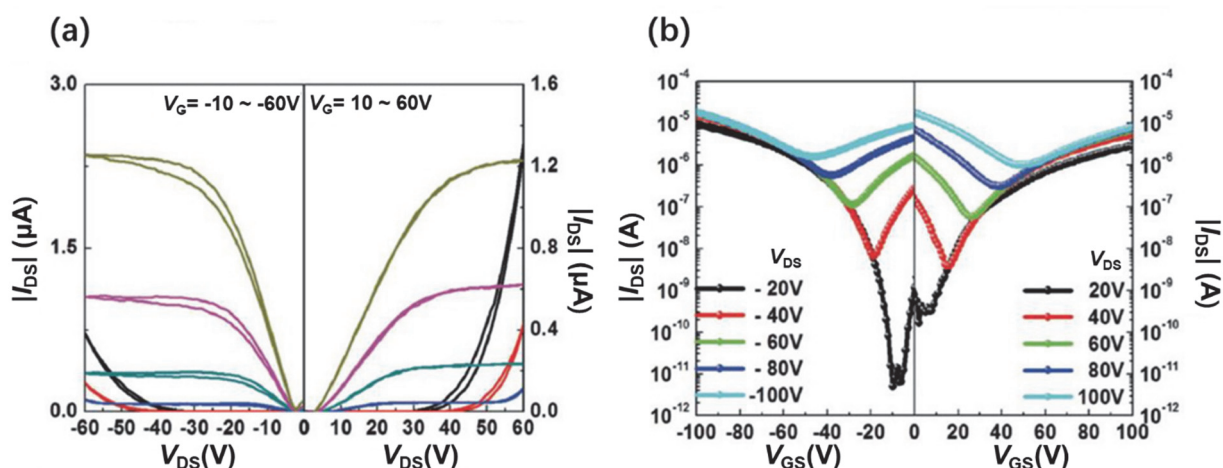


图2 有机场效应晶体管输出(a)和转移(b)特性曲线示意图<sup>[9]</sup>

## 2.2 有机发光二极管

有机发光二极管<sup>[10]</sup>主要由阴极、电子传输层、有机发光层、空穴传输层和阳极组成(图3)。当有机发光二极管运行时，在电场的作用下，由阳极产生的空穴和由阴极产生的电子分别经由空穴传输

层和电子传输层在有机发光层相遇结合，形成激子。激子活化发光层中的有机分子，使其轨道最外层的电子跃迁到激发态，在电子从激发态重新回到基态跃迁的过程中实现发光。衡量有机发光二极管性能的指标包括发光效率、光电流效率、色度均匀性、亮度和对比度等。这些指标通常通过实验室的专业测试设备进行测量和评估，从而指导材料设计和器件制备过程，进一步提高器件的性能和稳定性。图4为工作状态下的柔性白色有机发光二极管。

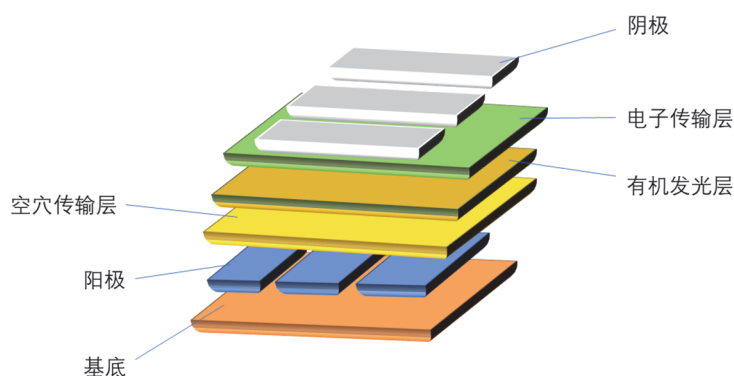
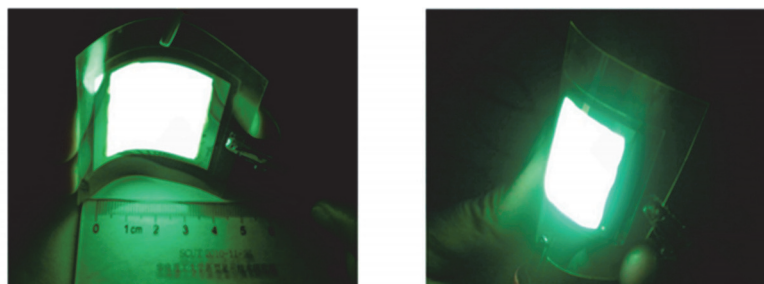


图3 有机发光二极管结构

图4 工作状态下的柔性白色有机发光二极管<sup>[11]</sup>

### 2.3 有机太阳能电池

有机太阳能电池主要有单质结结构和P-N异质结结构两种(图5)。单质结结构中，组成部分主要是阳极、阴极和介于阴阳极之间的有机层。在工作状态下，有机太阳能电池利用两个电极的功函数不同，形成电场，电子在电场作用下实现定向移动，进而形成光电流，但由于电子空穴都在同一有机材料中传递，导致器件的光电转换效率不够理想。P-N异质结结构在单质结结构的基础上，将有机层替换为给体材料和受体材料，有效地分离光生电荷对并促进电荷输运，提高了光电转换效率<sup>[12]</sup>。

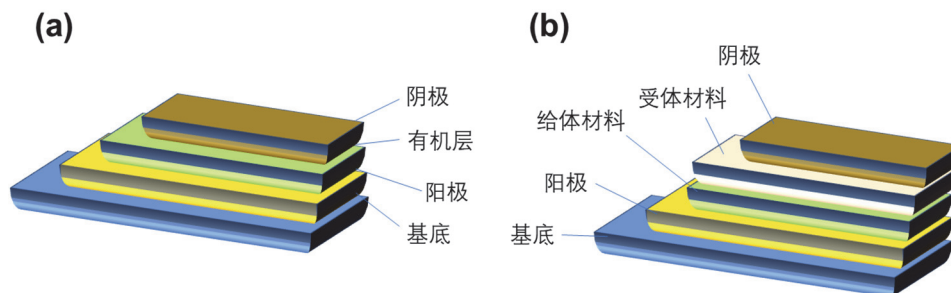


图5 有机太阳能电池

(a) 单质结结构；(b) P-N异质结结构

有机太阳能电池的主要指标包括光电转换效率、开路电压、短路电流、填充因子和稳定性等。其中，光电转换效率是衡量有机太阳能电池性能的关键指标，通过将光能转换为电能的效率来评估；开路电压和短路电流密度分别表示电池在光照条件下的最大电压和电流输出；填充因子则反映了电荷在电池内部的输运效率和电池的内部电阻情况。在有机太阳能电池的表征与测试技术中， $I$ - $V$ 测试是最基本、最重要、最直接的测试方式。 $I$ - $V$ 测试能够得到器件以下参数：光电转换效率、开路电压、短路电流、填充因子，而这四个参数正是衡量电池性能好坏的最直接的标准(图6)。

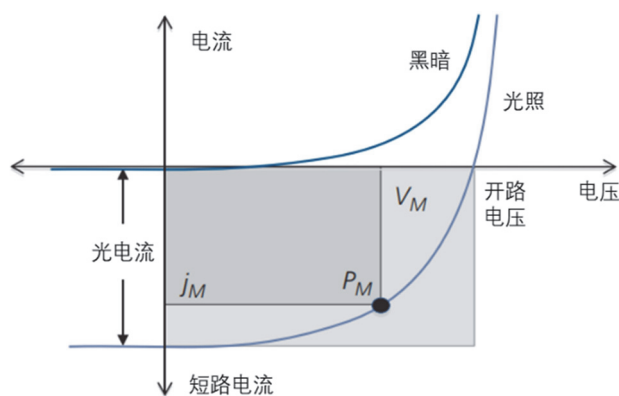


图6 有机太阳能电池的性能参数<sup>[8]</sup>

综合上述三类有机电子器件结构，不难发现，有机薄膜是有机电子器件中关键的组成部分。有机薄膜根据使用原料的不同，可分为有机小分子薄膜和有机聚合物薄膜，本次实验将以P3HT为例，着重演示有机聚合物薄膜的制备。

### 3 试剂与仪器

#### 3.1 试剂

本实验所需试剂如表1所示。

#### 3.2 仪器

本实验所需仪器如表2所示。

### 4 实验步骤

本实验包括P3HT薄膜制备、样品厚度形貌表征以及电学性能测试几个环节。

#### 4.1 P3HT薄膜制备

##### 4.1.1 旋涂基本原理

旋涂是通过样品自身重力和由旋转产生的离心力，将样品涂覆在衬底上，形成薄膜的制备方法。因为旋涂所用的流体往往粘度大呈胶状，所以也被称为匀胶。典型的旋涂包括四个流程(图7)，分别是抽真空吸片、滴胶、旋转、干燥。具体而言，首先，打开真空泵，使载片固定于载物台上；其次，将样品液滴在载片上；再者，通过旋转使溶液铺展；最后，使用退火的方法去除薄膜中多余的溶液。与此同时，退火也常常能够使薄膜表面形貌得到优化。

##### 4.1.2 薄膜制备流程

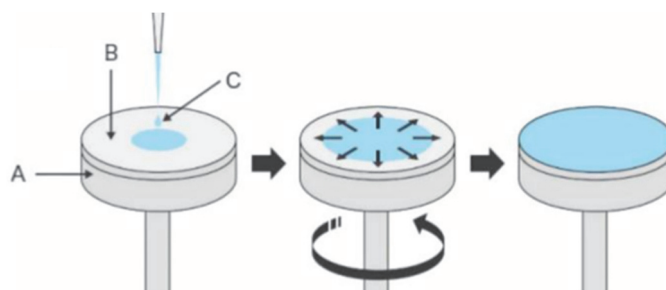
用分析天平称取5、10、15 mg的P3HT，以邻二氯苯为溶剂，分别在试剂瓶中配制5、10、15  $\text{mg}\cdot\text{mL}^{-1}$ 的溶液，向试剂瓶中加入小磁子，将试剂瓶置于磁力搅拌器上，搅拌20 min，随后，将所得溶液分别用注射器通过有机相滤膜过滤，得到样品液。取干净的玻璃载片，置于旋涂仪载物台上，开启真空泵，待玻璃载片固定在载物台上后，用量程为100  $\mu\text{L}$ 的移液枪吸取30  $\mu\text{L}$ 溶液，均匀滴到玻璃片上，

表1 所需试剂

试剂名称	规格	生产厂家
异丙醇	分析纯	上海阿拉丁生化科技股份有限公司
P3HT	> 99.0%	东京化成工业株式会社
F4TCNQ	> 98.0%	东京化成工业株式会社
邻二氯苯	> 99.8%	上海麦克林生化科技有限公司
乙酸正丁酯	> 99.0%	东京化成工业株式会社

表2 所需仪器

仪器名称	型号	生产厂家
超声波清洗仪	SK2200HP	上海科导超声仪器有限公司
旋涂仪	VTC-100	英国M77 Corporation
热台	DB-XAB	邦西仪器科技(上海)有限公司
原子力显微镜	Dimension Icon	德国布鲁克(北京)科技有限公司
氧等离子体清洗仪	ZEPTO	德国Diener Electronic
手套箱	MB-200B	德国布劳恩惰性气体系统(上海)有限公司
台阶仪	ET200A	日本株式会社小坂研究所
材料和半导体参数分析仪	4200A-SCS	美国吉时利
光学显微镜	LV-UEPI-N	日本尼康
探针台	-	国望智承(北京)振动控制技术有限公司

图7 旋涂法制备步骤示意图<sup>[13]</sup>

将旋涂时间设定为60 s, 分别对每种溶液设置2000、3000、4000  $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$ 三种不同的转速, 得到9个样品薄膜。通过测试膜厚, 可探究浓度、转速与膜厚的关系, 并通过测试结果, 选出最适合后续实验探究的旋涂浓度及转速条件。同理, 通过观察表面形貌, 也可得出形貌与转速和浓度的关系。

## 4.2 厚度及形貌表征

在本次实验中, 我们选用台阶仪对薄膜厚度进行测量, 随后在光学显微镜下观察薄膜大致的表面情况, 再选取合适的样品使用原子力显微镜观察薄膜的表面形貌, 接下来对所使用的两台仪器进行简单介绍。

### 4.2.1 台阶仪

台阶仪属于接触式表面形貌测量仪器, 通过触针在待测物体表面滑移所产生的微小的上下移动, 实现对物体表面形貌的观测。当使用台阶仪测量薄膜厚度时, 往往会人为对表面施加划痕, 通过载片与薄膜之间的高度差, 计算出薄膜的厚度。在台阶仪工作状态下, 触针会沿着观测表面轻轻滑动, 通过其垂直于表面的上下运动来反映表面的轮廓情况。台阶仪内置传感器, 传感器将触针的移动转

换成电信号输出放大, 我们便可通过图像数据借以观测(如图8所示)。而又因传感器的不同, 台阶仪又可分为电感式、压电式和光电式。台阶仪的测量精度相对较高, 一般来说, 观测范围能够达到纳米级别。

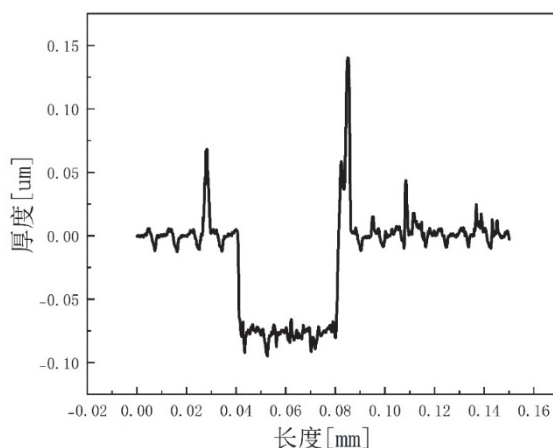


图8 台阶仪测试示例

#### 4.2.2 原子力显微镜(AFM)

原子力显微镜是扫描探针显微镜的一种, 其关键部件是探针和用于控制探针在一定距离范围内移动的扫描管。原子力显微镜的基本工作原理是, 当探针距离样品表面足够近时, 扫描管控制探针在样品表面附近移动, 探针通过自身与样品间的相互作用产生信号, 我们借此来观察样品的表面性质。根据成像模式的不同, 原子力显微镜可分为接触模式、非接触模式和轻敲模式, 下面将一一进行介绍。

**接触模式AFM:** 探针针尖紧贴样品表面, 当针尖在样品表面滑动时, 与针尖相连的悬臂由于受到相互作用力而出现弯曲偏移, 以此反映样品形貌。其优点是观测结果的分辨率高, 但由于作用力较大, 可能会对样品表面形成损伤, 因此使用接触模式时, 建议选取硬质样品, 不推荐测试软质样品。

**非接触模式AFM:** 在非接触模式下, 探针与样品表面距离始终保持在几纳米, 振动的探针与样品表面的原子通过范德华力产生相互作用, 以此形成观测信号。在非接触模式中, 由于没有直接接触, 不会损伤到样品, 保证了样品的完整性, 但该模式所得结果分辨率低, 扫描的速度也比较慢。

**轻敲模式AFM:** 探针通过上下振动敲击样品表面, 与探针相连的悬臂因样品表面形貌起伏变化而出现振幅上的改变, 进而反映样品形貌。该模式直接消除了接触模式中扫描横向力对测试的影响, 且分辨率相对较高, 缺点是扫描速率相对较慢。

综合考虑以上三种基本成像模式和本次实验研究样品的特点, 我们选取轻敲模式对薄膜样品的表面形貌进行观察。

### 4.3 电学性能测试

电学性能测试使用探针台完成, 本次实验的电学性能测试主要是水平方向的 $I-V$ 测试, 使用表面带有二氧化硅绝缘层的硅片(后文简称硅片)承载。

#### 4.3.1 清洗衬底

将硅片裁剪成尺寸 $1.0\text{ cm} \times 1.0\text{ cm}$ , 随后将其浸没在异丙醇中, 用超声波清洗仪进行超声, 时长设定为 $5\text{ min}$ , 随后换新的异丙醇重新超声, 如此重复三次, 清洗完成后用氮气枪将硅片吹净, 最后将硅片置于氧等离子体清洗仪中清洗 $10\text{ min}$ , 取出。

### 4.3.2 配制溶液

使用电子天平称量15 mg的P3HT，转移到小药品瓶中，放入磁子，用注射器吸取1 mL邻二氯苯，加入药品瓶中，配成15 mg·mL<sup>-1</sup>的溶液，在70 °C的温度下加热搅拌30 min，随后静置冷却到室温，用有机相滤膜过滤，得到最终样品液。

### 4.3.3 制片

打开旋涂仪真空泵，将硅片对准载物台小孔固定放置，用移液枪移取15 μL的溶液，均匀滴在硅片上，设置旋涂时间为60 s，设定转速为3000 r·min<sup>-1</sup>，将旋涂好的载片置于热台，以120 °C的温度退火5 min。操作完成后，将样品片收好待进一步操作。

### 4.3.4 蒸镀

用双面胶将硅片贴在载玻片上，覆上掩模板。用真空沉积系统为样品蒸镀60 nm的金，该步骤由指导教师统一完成。

### 4.3.5 探针台原理及操作

探针台是一种常用于测量器件电阻的实验设备。其工作原理基于两端法或四端法测量技术，通过将探针与待测样品的表面接触，并施加一定电压，同时测量在不同电压下通过样品的电流。系统根据检测到的电流和电压值，绘制出电流-电压曲线(*I-V*曲线)。通过分析曲线拟合参数，可以计算出样品的电阻值。

在使用探针台时，首先将样品放在平台上，转动旋钮，使样品正对光学显微镜，调节光学显微镜直至能在光学显微镜下能够看到清晰的样品影像，转动探针x、y、z旋钮，使探针移动到被测点，确定探针与样品接触表面后，运行系统，开始测量。

## 5 结果与讨论

### 5.1 P3HT厚度表征

用AFM对9种P3HT薄膜层进行厚度分析，将P3HT的厚度、浓度及转速绘成表3。

分析表3中数据，可以看出P3HT薄膜层的厚度与溶液浓度及旋涂转速均有一定关系，直观来说，当溶液浓度一定时，旋涂转速越快，所得的P3HT层厚度越小；当转速一定时，溶液浓度越大，所得的P3HT层厚度越大。在后续的蒸镀操作中，为避免因有机层太薄而导致蒸镀过程中有机层被破坏导致器件失效，我们选取溶液浓度为15 mg·mL<sup>-1</sup>转速为2000 r·min<sup>-1</sup>对硅片进行旋涂。

表3 P3HT的厚度(nm)、浓度及转速关系

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	厚度 <i>h</i> /nm		
	5 mg·mL <sup>-1</sup>	10 mg·mL <sup>-1</sup>	15 mg·mL <sup>-1</sup>
2000	25	31	64
3000	18	26	37
4000	14	21	29

### 5.2 P3HT形貌分析

通过原子力显微镜对P3HT薄膜的表面形貌进行表征，图9为典型的原子力显微镜形貌图，可以通过软件拟合得到P3HT薄膜的表面粗糙度。由表4的测量结果可以总结出，P3HT的表面粗糙度与溶液浓度关系不密切，但与旋涂转速有关，在同一浓度的溶液中，旋涂的转速越大，P3HT的表面粗糙度越小，薄膜越平整。

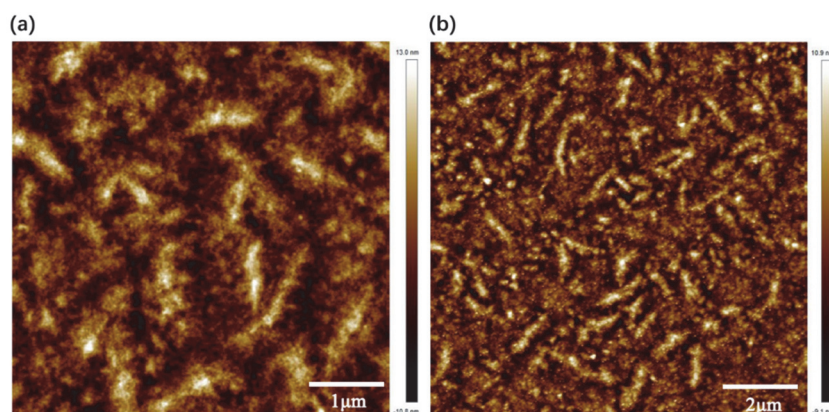

 图9 AFM下P3HT薄膜形貌示例，未经掺杂的尺寸分别为5  $\mu\text{m}$  (a)和10  $\mu\text{m}$  (b)的P3HT的AFM图

表4 P3HT的表面粗糙度(nm)与浓度及转速关系

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	表面粗糙度/nm		
	5 mg·mL <sup>-1</sup>	10 mg·mL <sup>-1</sup>	15 mg·mL <sup>-1</sup>
2000	$R_q = 6.65$	$R_q = 4.35$	$R_q = 8.33$
	$R_a = 2.59$	$R_a = 3.47$	$R_a = 6.84$
3000	$R_q = 3.42$	$R_q = 3.25$	$R_q = 5.19$
	$R_a = 2.82$	$R_a = 2.56$	$R_a = 4.18$
4000	$R_q = 1.78$	$R_q = 2.28$	$R_q = 3.48$
	$R_a = 1.26$	$R_a = 1.75$	$R_a = 2.74$

### 5.3 电学性能测试及改性

用探针台及电学测试系统完成对P3HT样品电学性能的测试，用探针台的探针分别接触样品的两个电极，运行系统程序，得到测试的*I-V*拟合曲线，曲线的斜率为 $1/R$ ，根据斜率可算得样品的电阻，学生测试完成后，将数据填入表5。

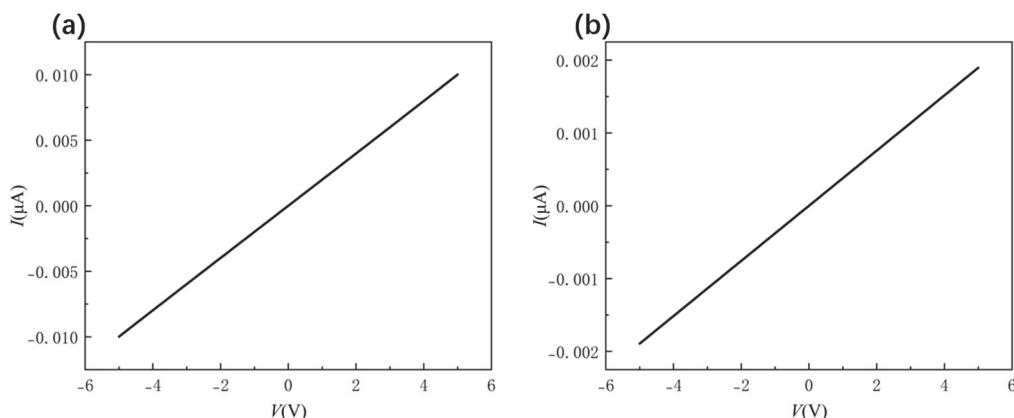
表5 P3HT水平方向的电阻测量

编号	曲线斜率/(1/ $\Omega$ )	电阻值/ $\Omega$
样品1		
样品2		
样品3		
样品4		

一般来说，有机半导体本征电导率比较低，自身的电阻往往比较大，研究人员通常会使用各种各样的改性手段，尝试提升材料的性能，掺杂便是常用的基本方法之一。目前已有的掺杂方法有浸泡掺杂、旋涂掺杂和蒸镀掺杂，不同方法的效果往往不同，需要结合实际情况选取最优条件。

后续的改性操作，由感兴趣的同学自行结组，通过查找文献、小组讨论的方式，进行实验方案的确定，后期经过实验探究检验方案的可行性，并对实验结果进行分析。

就P3HT而言，目前已探索出的结果表明掺杂F4-TCNQ是一个可行的途径，学生通过改变掺杂方式，可以显著降低P3HT薄膜的电阻(图10)。经计算可得各个图像的电阻，图(a)  $R = 420 \Omega$ ，(b)  $R = 365500 \Omega$ 。

图10 a) 浸泡掺杂和b) 旋涂掺杂下水平方向的 $I$ - $V$ 曲线对比

对本实验探究感兴趣的同学，可在掺杂F4-TCNQ的基础上进行拓展，进一步探索优化F4-TCNQ的用量，尝试找到最佳掺杂条件，亦可另启思路，通过查阅已有文献，尝试找到P3HT其他有效的掺杂剂，为学生的探索提供充分的发挥空间。

## 6 实验教学安排

本实验课程主要面向高年级本科生，作为拓展性教学实验，实验从研究背景及安排的整体介绍、P3HT薄膜的制备、薄膜形貌表征、薄膜电学性能测试、对P3HT进行掺杂改性(选做)、数据处理分析、实验报告撰写等几方面开展，预计30学时，具体内容及安排如表6所示。

表6 实验内容与安排

实验部分	学时	具体内容
背景及安排介绍	2	介绍有机电子学的发展现状，对三种基本有机电子学器件的结构和工作机理进行讲解
P3HT薄膜的制备	4	学生按要求配制不同浓度的P3HT溶液，老师对旋涂仪的原理及操作进行讲解，学生进行旋涂操作
薄膜形貌表征	4	老师讲解原子力显微镜的原理及操作并通过样品进行演示，学生观看，演示结束后，随机选择学生代表进行仪器操作，在老师陪同下完成
薄膜电学性能测试	4	学生完成制片后，由老师统一对样品进行蒸镀，随后老师对探针台进行讲解，学生轮流操作探针台，体验测试电学性能的整个流程
对P3HT进行掺杂改性 (选做)	12	对后续实验感兴趣的同学，可自行结组进行探究。指导教师以F4-TCNQ为例，对掺杂改性进行介绍，学生自行查找文献、组织讨论、制定方案，并通过实验验证方案的可行性
数据处理分析	2	老师讲解Origin、NanoScope Analysis等软件的基本操作后，学生课下对已有实验数据进行整理，利用软件处理实验结果，并对结果加以分析
实验报告撰写	2	学生撰写实验报告，注意撰写规范

## 7 实验注意事项

(1) 实验过程中要注意实验安全，学生必须遵守实验室纪律，注意防护，严格穿戴实验服、口

罩、手套、护目镜等。

(2) 配好的溶液要用有机相滤膜进行过滤，避免其中含有未溶解的颗粒，对旋涂造成影响。

(3) 旋涂过程中要将溶液均匀滴到载片上，设置合适参数，否则可能会出现气泡、圆晕等现象，注意载片表面的清洁，否则薄膜表面可能出现针孔。

(4) 由于玻璃是透明的，在一开始旋涂完成后，要注意区分正反面，用原子力显微镜观察表面形貌时，要确保旋涂薄膜的一面置于载物台上方正对光学显微镜。

(5) 测定厚度时，施加划痕要保证力度适中，太轻不易观察影响测量，太重可能划破玻璃片存在危险性。

(6) 邻二氯苯存在一定的毒性和燃爆性，学生在使用过程中应小心谨慎，溶液配制需在通风橱下进行，如果不慎使邻二氯苯洒落，应用砂土或其他不燃材料吸附或吸收。

## 8 成绩评定与教学成果

本次实验课程，学生最终成绩主要由两部分构成，实验操作占比40%，实验报告占比60%，成绩需综合考量学生实验操作的规范性、对待实验的态度以及实验报告撰写质量等。我们希望通过该实验教学，提升本科生的实验能力和探究思维，从而为后续的科学研究奠定良好基础。实验的教学创新成果主要体现在以下几个方面：

- (1) 了解了基本有机电子器件的类型、原理与结构。
- (2) 掌握了利用旋涂制备有机聚合物薄膜的操作流程。
- (3) 了解了原子力显微镜、探针台、台阶仪等仪器的原理和操作。
- (4) 掌握了Origin、NanoScope Analysis等软件的基本操作。

## 9 学生反馈与评估

我们针对实验教学进行了一次全面的学生反馈评估。通过收集和分析学生的意见和建议，旨在了解实验课程的教学效果，以便进一步改进和优化。

大多数学生认为实验课程的内容设计合理，与理论课程紧密结合，有助于加深对理论知识的理解。同时，实验内容具有一定的挑战性，能够激发学生的学习兴趣，培养学生的实验技能。在实验过程中，学生普遍表示能够按照实验步骤进行操作，并得到教师的及时指导和帮助。实验设备齐全，实验环境良好，为学生提供了良好的实验条件。

在意见方面，有学生建议增加实验课程的课时量，以便更深入地学习和掌握实验技能；还有学生建议加强实验课程的实践性和应用性，让学生能够更好地将理论知识应用到实际问题中。针对这些建议，我们将认真研究和探讨，以便进一步改进和优化实验课程的教学效果。

## 10 结语

P3HT作为典型的聚合物给体材料，近年来在有机半导体领域不断取得突破性进展。本次实验启发了近年的研究热点与教师的课题相关研究，有助于本科生了解前沿课题，激发学生科研潜力。实验中包括P3HT薄膜旋涂制备和形貌、电学性能表征的过程，能够接触到诸多仪器设备，极具综合型、创新性，适合作为本科生科研训练项目。

## 参 考 文 献

- [1] Yuvaraja, S.; Nawaz, A.; Liu, Q.; Surya, S. G.; Salama, K. N.; Sonar P. *Chem. Soc. Rev.* 2020, 49 (11), 3423.
- [2] 黄维, 密保秀, 高志强. 有机电子学. 第1版. 北京: 科学出版社, 2011: 13–27.
- [3] Wang, J. C.; Cai, G. L.; Jia, B. Y.; Lu, H.; Lu, X. H.; Zhan, X. W.; Chen, X. G. *J. Mater. Chem. A* 2021, 9 (10), 6520.

- [4] Huynh, W. U.; Dittmer, J. J.; Alivisatos, A. P. *Science* **2002**, *295* (5564), 2425.
- [5] Chong, L.-W.; Chou, Y.-N.; Lee, Y.-L.; Wen, T.-C.; Guo, T.-F. *Org. Electron.* **2009**, *10* (6), 1141.
- [6] Hao, R. F.; Yue Y. F.; Li, L. L.; Ji, J. L.; Zhang, Q.; Ding, L. F.; Sang, S. B.; Li, Q. *J. Biotechnol.* **2022**, *359*, 75.
- [7] 胡文平. 有机场效应晶体管. 第1版. 北京: 科学出版社, 2015: 25–26.
- [8] Forrest, S. R. *Organic Electronics: Foundations to Applications*; Oxford University Press: Oxford, UK, 2020; pp. 804–806, 626–627.
- [9] Ren, Y.; Yang, X. Y.; Zhou, L.; Mao, J.-Y.; Han, S.-T.; Zhou, Y. *Adv. Funct. Mater.* **2019**, *29* (40), 1902105.
- [10] 查朝云. 电子制作, **2016**, No. 15, 14.
- [11] Luo, D. X.; Chen, Q.; Liu, B. Q.; Qiu, Y. *Polymers* **2019**, *11* (2), 384.
- [12] Tang, C. W. *Appl. Phys. Lett.*, **1986**, *48* (2), 183.
- [13] Yin, Y. *ACE.*, **2023**, *7* (1), 291.