

文章编号: 1000-5641(2020)01-0083-10

新型聚合物半导体薄膜及其场效应晶体管的研究

叶建春¹, 周礼照², 李文武², 欧阳威¹

(1. 华东师范大学 物理与电子科学学院 纳光电集成与先进装备教育部工程研究中心, 上海 200062; 2. 华东师范大学 物理与电子科学学院 极化材料与器件教育部重点实验室, 上海 200241)

摘要: 以新型的有机聚合物半导体 (DPPTTT(poly(3,6-di(2-thien-5-yl)-2,5-di(2-octyldodecyl)-pyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione) thieno [3,2-b] thiophene)) 为研究对象, 利用溶液法制备了有机半导体薄膜并进行了一系列表征. 发现半导体薄膜的厚度、表面粗糙度和拉曼峰强度均随溶液浓度和转速呈规律性变化. 以该材料作为半导体活性层制备了 p 型有机场效应晶体管, 发现当沟道长度降低到 50 μm 时, 器件的有效载流子迁移率最高, 达到 0.12 cm^2/Vs ; 同时观察到随着沟道长度的降低, 载流子迁移率与阈值电压都有增大的趋势, 这与普遍观察到的短沟道效应相反. 这些研究内容或许可以为更好地理解有机场效应晶体管及器件物理提供新的观点.

关键词: 有机场效应晶体管; 聚合物半导体; 溶液法; 短沟道效应; 接触电阻

中图分类号: O472+.4 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1000-5641.201922006

Novel polymer semiconductor films and related field effect transistor devices

YE Jianchun¹, ZHOU Lizhao², LI Wenwu², OU-YANG Wei¹

(1. *Engineering Research Center for Nanophotonics and Advanced Instrument, Ministry of Education, School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200062, China;*
2. *Key Laboratory of Polar Materials and Devices, Ministry of Education, School of Physics and Electronic Science, East China Normal University, Shanghai 200241*)

Abstract: Thin films using a novel organic polymer semiconductor (DPPTTT(poly(3,6-di(2-thien-5-yl)-2,5-di(2-octyldodecyl)-pyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4-dione) thieno [3,2-b] thiophene)) were prepared by a solution process and characterized through different techniques. It was found that the thickness, surface roughness, and Raman peak strength of the semiconductor films changed with the solution concentration and rotation rate. The polymer semiconductor was used to prepare the active layer for p-type organic field effect transistors; with these, the influence of channel length on critical transistor parameters (i.e., carrier mobility and threshold voltage) was studied. It was found that the effective carrier mobility was the highest at 0.12 cm^2/Vs when the channel length was reduced to 50 μm . With a decrease in channel length, both carrier mobility and threshold voltage tended to increase, which was contrary to the short channel effect. This paper may provide new perspectives for better understanding the physics of field effect transistor devices.

收稿日期: 2019-03-19

基金项目: 国家自然科学基金 (61504042, 61771198); 上海市自然科学基金 (17ZR1447000); 中央高校基本科研业务费专项资金 (40500-20101-222092)

通信作者: 欧阳威, 男, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为纳米材料与器件. E-mail: ouyangwei@phy.ecnu.edu.cn

Keywords: organic field effect transistor; polymer semiconductor; solution process; short channel effect; contact resistance

0 引言

有机场效应晶体管 (Organic field effect transistors, OFETs) 由于在柔性标签、柔性显示、柔性电子电路等领域存在普遍的应用而受到大家广泛研究^[1-13]. 很多新型的有机小分子和聚合物半导体活性层材料在最近的薄膜晶体管 (Thin Film Transistors, TFTs) 的创新研究中不断涌现. 特别是近年来, 高迁移率的有机场效应晶体管活性层材料的发现和发展引起了许多研究者的关注^[6,12-13].

有机薄膜半导体层的制备一般有两种工艺: 一是采用真空热蒸镀的方法, 该方法通常适用于小分子材料^[4,7-9]; 另一种是溶液法, 该方法通常适用于聚合物材料^[5,10,14-18]. 与有机小分子相比, 有机聚合物薄膜可以用简单的溶液法来制备, 无需复杂的实验工艺和设备, 同样能获得较佳的载流子迁移率, 而且适合制成柔性器件. 因此, 一般认为与溶液法 (如旋涂法) 所兼容的有机聚合物半导体材料具有更大的应用潜力. 鉴于此, 最近以吡咯并吡咯二酮 (Diketopyrrolopyrrole, DPP) 基团为代表的有机聚合物半导体材料的出现受到了大家的广泛关注和报道^[18-20]. 在各种共轭有机物中, 呈现电子缺陷特性的 DPP 基团因具有可调的溶解度和较高的电子亲和力而受到广泛关注. 通过在 DPP 的氮原子上设置适当的烷基侧链, 可以提高得到的 DPP 衍生物的可加工性, 使其与辊对辊溶液处理工艺相兼容^[20]. 其中, DPPTTT 是一种新的高性能可溶性聚合物半导体材料.

另一方面, 器件小型化一直以来都是场效应晶体管的一个发展方向. 这是因为器件做得越小, 在同样大小的基板上就可以制备更多的器件, 进而提高芯片整体的传输速度和性能. OFETs 设计中需要解决的问题也是使器件不断趋于微型化, 但是在集成电路电子学领域内, 小尺寸 OFETs 器件的行为还没有得到充分的研究. 截至目前, OFETs 的场效应迁移率 (μ_{FE}) 或阈值电压 (V_{th}) 随沟道长度 (L) 的变化特性已经被不少学者所研究^[21-23]. 一些学者曾提出, 短沟道效应 (Short Channel Effect, SCE) 是促成二者随沟道长度规律变化的主要原因^[24-26]. 例如在 Ray 等的工作中, 阈值电压 (ΔV_{th}) 在短沟道区域明显变大^[25]; 同样在 Pretet 等的文章中, 当沟道长度降至一定程度时, 漏致势垒下降引起的阈值电压漂移 (DIBL ΔV_{th}) 就会显著上升^[26]. 器件小型化特别是沟道尺寸的减小在一定程度上会影响晶体管的性能, 如影响金属电极向有机半导体层注入电荷, 进而影响半导体层与金属电极之间的接触电阻及其他性能^[5,10,11,27-29]. 因此, 如何在实现器件微型化的同时, 改善或修复接触电阻对器件的影响, 也是大家不断探索的热点问题.

本文选用新型的聚合物 DPPTTT 作为有机半导体材料, 采用溶液法在硅衬底上制备了有机半导体薄膜, 并研究了不同的工艺参数对薄膜光电性能、表面形貌和厚度的影响. 之后在热氧化的硅片上制备了不同沟道长度 ($L = 50 \sim 300 \mu\text{m}$) 的有机聚合物薄膜晶体管器件, 并讨论了场效应迁移率和阈值电压随沟道长度的变化关系. 本文发现, 二者随沟道长度的变化规律一致, 其中, 沟道长度为 $50 \mu\text{m}$ 的器件展现了最大的场效应迁移率, 达到了 $0.12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 这与当前商业上正在大量使用的非晶硅薄膜的迁移率处于同一水平^[30-33], 也与很多最新报道的无机氧化物半导体和有机聚合物半导体的载流子迁移率大小基本在同一量级^[14-16,34-36].

1 实验

在基板清洗阶段, 将含有厚度为 100 nm 的 SiO_2 热氧化层的 n 型重掺杂硅片先后置于丙酮、异丙醇和去离子水中进行超声清洗^[1]. 接着, 将清洗过的硅片在 150°C 的热板仪上加热约 10 min 使其干

燥. 随后用紫外光对 SiO_2 热氧化层表面照射 20 min 以除去可能残留的有机杂质.

以氯苯为溶剂, 配置 5 mg/mL 和 10 mg/mL 两种浓度的 DPPTTT 溶液, 在室温下加入搅拌子进行磁力搅拌使其均匀. 然后, 在填充 N_2/Ar 的手套箱中, 以清洗后的硅片作为衬底, 在硅片上以一系列参数旋涂 DPPTTT 溶液, 并在手套箱中置于 150 °C 的平板加热仪上退火 30 min 以形成半导体薄膜晶体层. 苯并环丁烯 (BCB) 薄膜可用于改善半导体薄膜和金属电极的接触效果, 其制备同样是在手套箱中完成的. 最后对得到的 DPPTTT 薄膜进行 SEM(Scanning Electron Microscope)、AFM(Atomic Force Microscope) 和拉曼散射等一系列表征. 本文实验所采用的扫描电镜是荷兰生产的 FEI 型号电子显微镜 (SEM), 原子力显微镜 (AFM) 是由 Bruker 公司生产, 所用的拉曼光谱仪型号为 Jobin-Yvon LabRAM HR 800 UV, 共拥有 4 个激光器光源, 分别为 325 nm、488 nm、632.8 nm 和 785 nm.

以上述方法制备的有机聚合物半导体薄膜作为有机薄膜晶体管的活性层, 利用真空热蒸镀工艺在半导体层上沉积 30 nm 厚的金薄膜层作为源、漏电极 (S/D), 真空条件约为 5×10^{-4} Pa. 最终, 得到了底栅顶接触结构 (Back-gate top-contact configuration, BGTC configuration) 的有机薄膜晶体管器件, 其结构和半导体材料的结构式见图 1. 借助掩模板, 得到了不同沟道长度 ($L = 50 \sim 300 \mu\text{m}$) 的器件, 沟道宽度 (W) 均为 1 000 μm . 器件的电学性能测试在大气环境中的暗室进行. 采用源表 (Keithley 2450) 进行稳态电流-电压 ($I-V$) 测量, 以此来研究 OFETs 的电学特性.

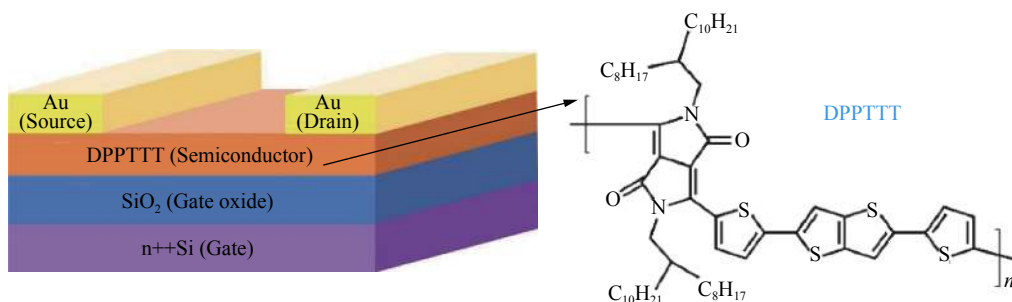


图 1 器件结构和 DPPTTT 的分子结构式, 沟道宽度 (W) 为 1 000 μm , 沟道长度 (L) 为 50~300 μm

Fig. 1 The schemed structure of the device and the constitutional molecular structure of DPPTTT, the channel width (W) is 1 000 μm and the channel length (L) is 50~300 μm

2 结果和讨论

2.1 聚合物半导体薄膜的性能与表征

2.1.1 薄膜表面形貌

图 2 为不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的表面 SEM 图. 从图 2 中可以看出, 在相同样品浓度, 不同转速下得到的半导体薄膜具有接近平滑的表面. 可见, 表面 SEM 结果难以直接判断薄膜旋涂工艺对制备的薄膜形貌的影响效果. 为了更深入地研究这些实验参数 (溶液浓度与旋涂速率) 对薄膜表面形貌的影响, 本文对所制得的样品进行了 AFM 表征.

图 3 为 BCB 薄膜和不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的 AFM 图. 由图 3 可以看出, 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 得到的薄膜具有最大的相对粗糙度, 约为 1.73 nm; 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 4 000 r/min 得到的薄膜的粗糙度适中, 约为 1.51 nm; 而样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 得到的薄膜的相对粗糙度最小, 约为 1.45 nm. 结果表明, 当溶液浓度一定时, 转速越大, 得到的薄膜的相对粗糙度越低; 而当转速一定时, 溶液浓度越小, 得到的薄膜的相对粗糙度越低. 这与预期结果一致.

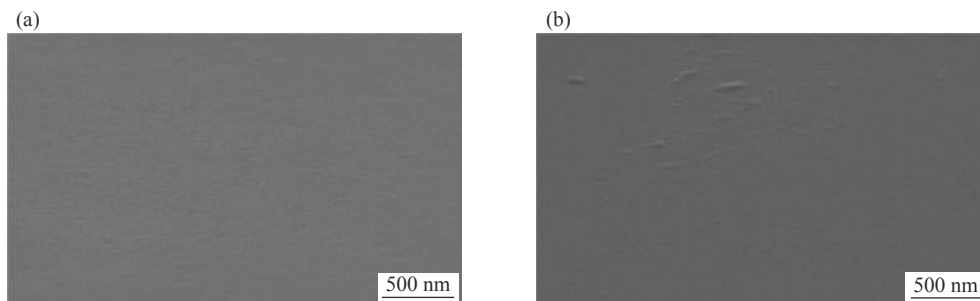


图 2 不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的表面 SEM 图: (a) 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min; (b) 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 4 000 r/min

Fig. 2 SEM top views of organic semiconductor thin films with various deposition parameters:

- (a) Solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 2 000 r/min;
(b) solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 4 000 r/min

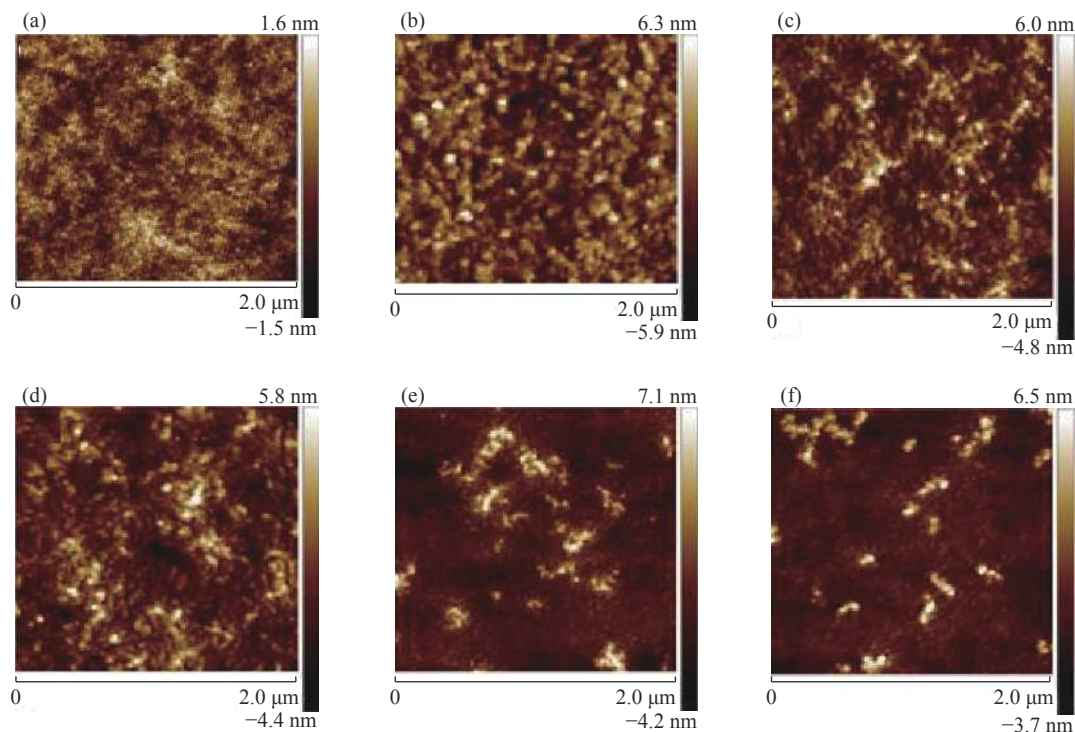


图 3 BCB 薄膜和不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的 AFM 图: (a) 转速为 2 000 r/min 的 BCB 薄膜; (b) 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min; (c) 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 4 000 r/min; (d) 样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 2 000 r/min; (e) 样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 4 000 r/min; (f) 样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 8 000 r/min

Fig. 3 AFM graphs of BCB thin films and DPPTTT thin films with various parameters:

- (a) BCB thin film made by 2 000 r/min;
(b) solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 2 000 r/min;
(c) solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 4 000 r/min;
(d) solution concentration of 5 mg/mL, rotation rate of 2 000 r/min;
(e) solution concentration of 5 mg/mL, rotation rate of 4 000 r/min;
(f) solution concentration of 5 mg/mL, rotation rate of 8 000 r/min

图 4 所示为不同溶液浓度和转速下得到的 DPPTTT 薄膜的相对粗糙度的比较. 从图 4 可以看出, 在转速为 4 000 r/min 或更低时, 溶液浓度对薄膜相对粗糙度的影响比转速的影响要大; 而当转速高于 4 000 r/min 时, 转速对薄膜相对粗糙度的影响比溶液浓度的影响要大.

2.1.2 薄膜厚度

图 5 为不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的侧面 SEM 图. 从图 5 中可以看出, 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 得到的薄膜最厚, 约为 33.0 nm, 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 4 000 r/min 得到的薄膜较厚, 约为 17.5 nm, 样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 得到的薄膜最薄, 约为 8.8 nm. 此外, 还能看出, 越厚的薄膜其表面起伏越明显, 即表面粗糙度越大, 而薄膜厚度越小, 其表面粗糙度越小, 这与图 3 和图 4 的结果一致.

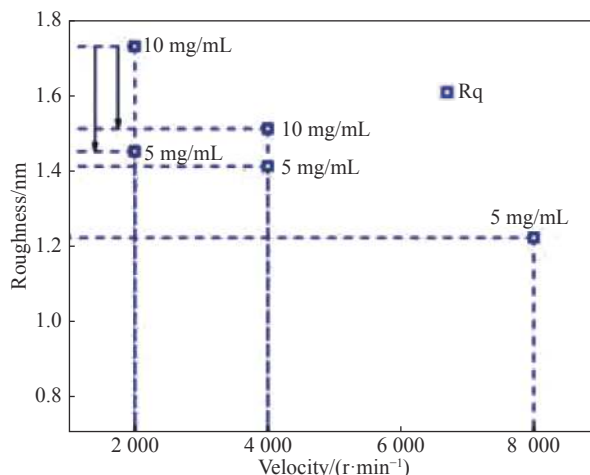


图 4 不同溶液浓度和转速下得到的 DPPTTT 薄膜粗糙度的比较

Fig. 4 Roughness of DPPTTT thin films deposited by various solution concentrations and rotation rates

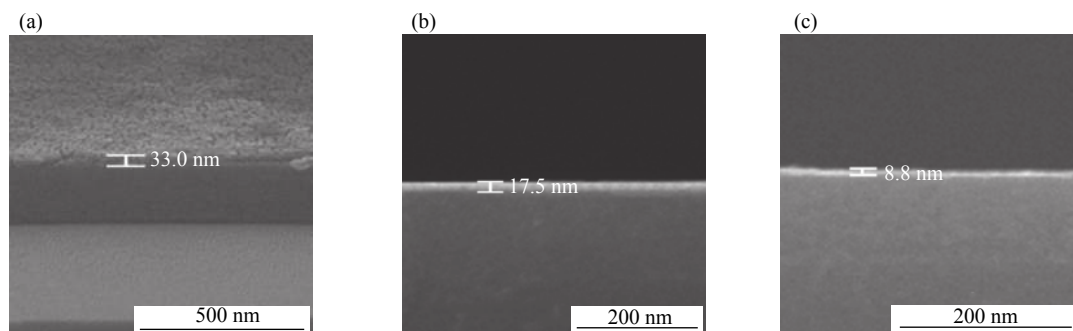


图 5 不同工艺参数下得到的有机半导体薄膜的侧面 SEM 图: (a) 样品浓度为 10mg/mL, 转速为 2 000 r/min; (b) 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min; (c) 样品浓度为 5mg/mL, 转速为 2 000 r/min

Fig. 5 SEM side views of organic semiconductor thin films with various deposition parameters: (a) solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 2 000 r/min; (b) solution concentration of 10 mg/mL, rotation rate of 4 000 r/min; (c) solution concentration of 5 mg/mL, rotation rate of 2 000 r/min

图 6 为不同工艺下得到的 DPPTTT 薄膜厚度与浓度和转速的关系图. 样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 时, 得到的薄膜厚度约为样品浓度为 10 mg/mL, 转速为 4 000 r/min 得到的薄膜厚度的两倍, 而样品浓度为 5 mg/mL, 转速为 2 000 r/min 得到的薄膜相对最薄. 这主要是由于溶液浓度和旋转离心力的差异造成的. 溶液浓度越大, 在相同转速条件下得到的薄膜厚度越大; 而旋转速度越高, 亦即离心力越大, 在相同溶液浓度条件下得到的薄膜厚度越小. 从结果来看, 溶液浓度对得到的薄膜厚度的影响比旋转速度更大一些.

2.1.3 薄膜拉曼光谱

图 7 为氧化硅片衬底、BCB 薄膜和不同工艺参数下得到的 DPPTTT 薄膜的拉曼散射谱图. 从图 7 中可以看出, DPPTTT 材料的特征拉曼散射峰(Raman shift)为 1 416 cm⁻¹、1 550 cm⁻¹、1 592 cm⁻¹ 和

$1\,696\text{ cm}^{-1}$, 其中, $1\,416\text{ cm}^{-1}$ 处的拉曼峰可能是由吡咯取代基和噻吩基团之间的 C-C 伸缩振动引起的; $1\,550\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,592\text{ cm}^{-1}$ 处的拉曼峰可能是由吡咯取代基和并二噻吩基团的 C=C 伸缩振动引起的; $1\,696\text{ cm}^{-1}$ 和 $1\,780\text{ cm}^{-1}$ 的拉曼峰是由吡咯烷酮基团的 C=O 伸缩振动引起的^[37-38]. 通过对比可知, 718 cm^{-1} 和 $1\,171\text{ cm}^{-1}$ 处的拉曼峰是由 Si/SiO₂ 衬底的特征振动引起的.

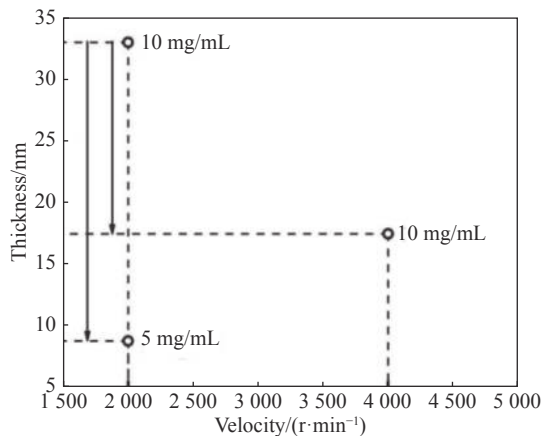


图 6 DPPTTT 薄膜厚度与浓度和转速的关系图

Fig. 6 The thickness of DPPTTT thin films with respective to various concentrations and rotation rates

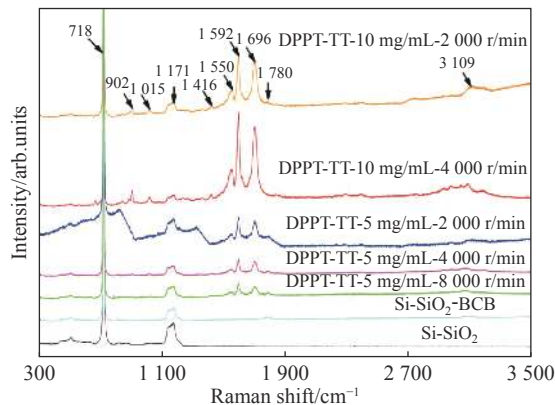


图 7 氧化硅片衬底、BCB 薄膜和不同工艺参数下得到的 DPPTTT 薄膜的拉曼散射谱图

Fig. 7 Raman spectrum of Si/SiO₂, BCB thin film, and DPPTTT thin films with various deposition parameters

此外, 从图 7 中还可以看出, DPPTTT 材料的特征拉曼峰的强度与薄膜的制备工艺关系密切; 且其各峰强度与薄膜的厚度呈正相关 (见图 5 和图 6), 即薄膜越厚, 测得的拉曼峰越强. 不同拉曼位移和拉曼峰强度的关系见表 1.

表 1 不同参数下得到的 DPPTTT 薄膜的拉曼位移和拉曼峰强度

Tab. 1 Raman shift and peak intensity of DPPTTT thin films with various deposition parameters

样品	拉曼位移/ cm^{-1}	拉曼峰强度
DPPTTT-10 mg/mL-BCB-2 000 r/min	1 550	1 034
DPPTTT-10 mg/mL-BCB-4 000 r/min	1 547	1 455
DPPTTT-5 mg/mL-2 000 r/min	1 546	425
DPPTTT-5 mg/mL-4 000 r/min	1 549	287
DPPTTT-5 mg/mL-8 000 r/min	1 545	243

2.2 聚合物半导体薄膜场效应晶体管器件的性能

有机场效应晶体管的性能表征主要包括以下几个指标: 场效应迁移率、电流开关比、阈值电压和亚阈值摆幅等. 其中, 场效应迁移率是体现晶体管性能的关键指标, 也是衡量半导体材料性能优劣的关键指标.

图 8 所示为器件在饱和区的转移特性曲线. 当栅源电压从 +5 V 慢慢负移, 源漏电流最初很小 (大约为 1 nA), 而后在 0 ~ -5 V 的范围内电流剧增, 之后又缓慢增加 (图 8 (a)). 对于 “ $L = 50 \mu\text{m}$ ” 器件而言, 其关态电流 (I_{OFF}) (对应正压区域) 看上去比其他沟道长度的器件高出很多. 这些器件的开关比 ($I_{\text{ON}}/I_{\text{OFF}}$) 都接近 10^4 , 其中 “ $L = 50 \mu\text{m}$ ” 器件的开关比相对最大. 这可能是因为最短沟道长度的沟道电阻相对最小, 因为不同沟道长度器件的源漏电压是恒定的 (20 V). 从图 8 (b) 中不难看出, 在沟道形成后 (对应负压区域), 源漏电流的平方根 ($\sqrt{I_{\text{DS}}}$) 关于栅源电压呈线性变化.

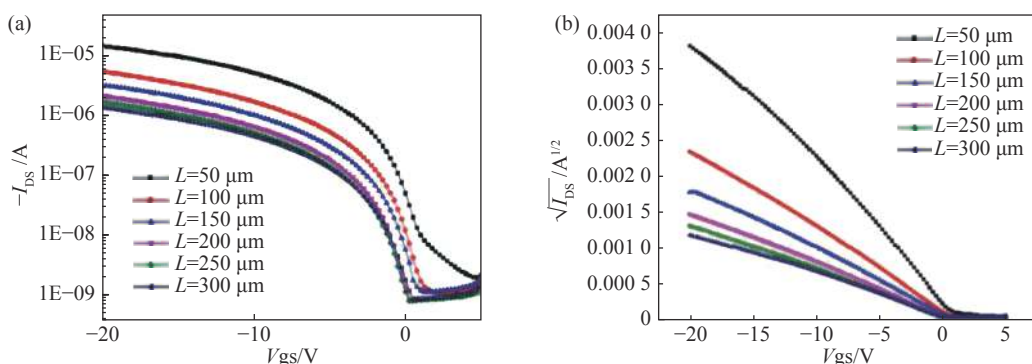


图 8 不同沟道长度的器件的转移特性曲线 ($L = 50 \sim 300 \mu\text{m}$): (a) 源漏电流绝对值 (对数坐标) 关于栅源电压的变化曲线; (b) 源漏电流的平方根 ($\sqrt{I_{\text{DS}}}$) 关于栅源电压的变化曲线

Fig. 8 Transfer characteristics of devices with various channel lengths from 50 to 300 μm : (a) absolute drain current in logarithmic scale versus gate voltage; (b) square root of drain current ($\sqrt{I_{\text{DS}}}$) versus gate voltage

饱和区的场效应迁移率和阈值电压可由

$$I_{\text{DS}} = \frac{\mu_{\text{FE}} W C_i (V_{\text{GS}} - V_{\text{th}})^2}{2L} \quad (1)$$

计算得到^[1,10]. 公式 (1) 中, L 是沟道长度, W 是沟道宽度, C_i 是栅绝缘层的单位面积电容 ($C_i = \epsilon_0 \epsilon_r / t$, 其中 ϵ_0 为真空介电常数, ϵ_r 是相对介电常数, t 是栅绝缘层的厚度), I_{DS} 是源漏电流, V_{GS} 是栅源电压, V_{th} 是阈值电压.

由公式 (1) 可知, 晶体管器件的场效应迁移率跟 $\sqrt{I_{\text{DS}}} - V_{\text{DS}}$ 曲线的斜率相关. 图 8 (b) 中 “ $L = 50 \mu\text{m}$ ” 器件的斜率是最大的, 这也促成了其场效应迁移率高于其他器件. 根据公式 (1) 计算得到的最大载流子迁移率为 $0.12 \text{ cm}^2/\text{Vs}$, 这与当前商业上正在大量使用的非晶硅薄膜的迁移率处于同一水平^[30-33], 也与很多最新报道的聚合物半导体的载流子迁移率大小基本在同一量级^[14-16,34-36].

场效应迁移率、阈值电压随沟道长度的变化关系见图 9. 最大的场效应迁移率对应于沟道最短的器件 ($L = 50 \mu\text{m}$). SCE 理论与相关实验结果表明场效应迁移率随沟道长度的减小而减小^[39-40]; 而本文的结果并不遵循这样的规律. 在本文的结果中, 电荷迁移率依赖阈值电压; 当沟道长度增大, 场效应迁移率和阈值电压都一起减小, 而且二者的变化幅度极为接近. 这显然不符合常见的 SCE 特征.

图 10 所示为计算得到的亚阈值摆幅 SS 和缺陷密度 N 随沟道长度的关系. SS 与 N 的关系为^[7,31,41]

$$SS = \left(\frac{\partial V_{GS}}{\partial \log I_{DS}} \right) = \frac{k_B T}{q} \left(1 + \frac{qN}{C_G \varphi_s} \right) \ln 10, \quad (2)$$

其中, $k_B T/q$ 为 26 mV (室温时), φ_s 为表面势, qN/φ_s 代表因为界面缺陷导致电荷俘获所引起的有效电容, N 为俘获电荷面密度 (缺陷面密度). 从图 10 可以看出, SS 与缺陷密度 N 随沟道长度的变化均呈规律性变化, 且二者趋势一致. 一般而言, 界面缺陷密度越大, 晶体管的器件性能就会相对越差, 其很多性能指标 (如载流子迁移率、阈值电压漂移等) 也会相应下降. 这与图 9 中本文的实验结果基本吻合.

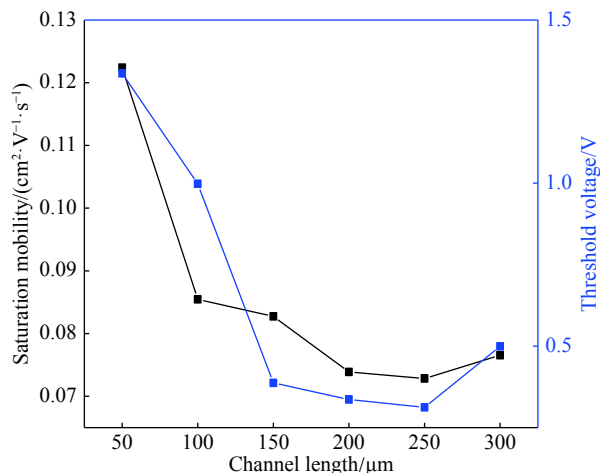


图 9 场效应迁移率和阈值电压随沟道长度的变化关系, 沟道宽度为 1 000 μm

Fig. 9 Field effect mobility (μ_{FE}) and threshold voltage (V_{th}) as a relationship of channel length (L); the channel width (W) is 1 000 μm and the channel length (L) is 50~300 μm

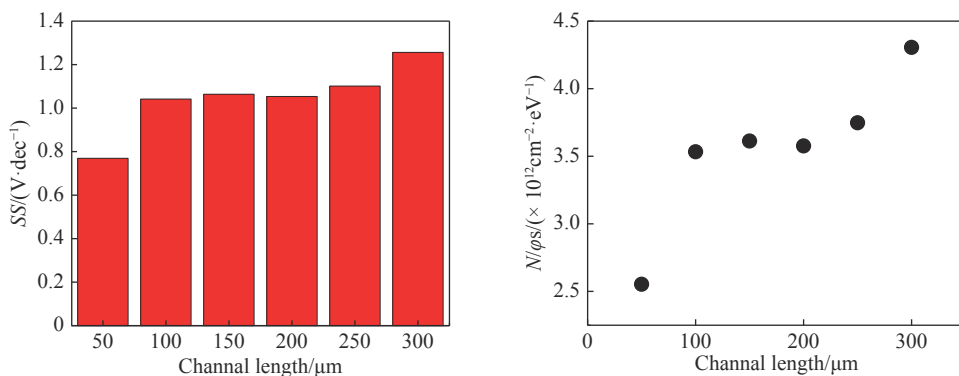


图 10 亚阈值摆幅 SS 和缺陷密度 N 随沟道长度的变化关系, 沟道长度 $L = 50 \sim 300 \mu\text{m}$

Fig. 10 Subthreshold swing (SS) and interface trap density N as a function of channel length, the channel length L is from 50 μm to 300 μm.

3 结 论

本文利用将有机聚合物半导体 (DPPTT) 溶液旋涂后退火的方法, 得到了聚合物半导体薄膜, 并进行了形貌、厚度和拉曼散射等一系列表征. 发现半导体薄膜的厚度、相对粗糙度及拉曼散射均与溶液浓度和旋转速度相关, 即溶液浓度越大、旋转速度越慢, 得到的薄膜越厚, 拉曼散射也越强. 然后我们在含有氧化层的硅片衬底上, 通过简单的旋涂工艺, 制备了半导体薄膜并真空热蒸镀金薄膜的源、漏电极, 得到了具有不同沟道长度的 p 型有机聚合物薄膜场效应晶体管器件, 实现了最佳的场效应迁

移率高达 $0.12 \text{ cm}^2/(\text{Vs})$, 这与早已市场化的非晶硅的迁移率相当, 而且与很多最近发表的有机、无机半导体材料的迁移率相当. 此外, 我们观察到实验制备的有机薄膜晶体管器件的场效应迁移率、阈值电压随沟道长度的变化关系不同寻常, 这不同于常见的由短沟道效应引起的依赖关系. 希望这些发现有助于更好地理解半导体器件的相关物理机制.

[参 考 文 献]

- [1] OU-YANG W, WEIS M, LEE K, et al. Function of interfacial dipole monolayer in organic field effect transistors [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2011, 50 (4S) : 04DK10-6. DOI: [10.7567/JJAP.50.04DK10](#).
- [2] CHEN M, ZHU Y N, YAO C, et al. Intrinsic charge carrier mobility in single-crystal OFET by “fast trapping vs. slow detrapping” model [J]. *Organic Electronics*, 2018, 54: 237-244. DOI: [10.1016/j.orgel.2017.12.042](#).
- [3] JI J J, ZHOU D G, TANG Y, et al. Partially removing long branched alkyl side chains of regioregular conjugated backbone based diketopyrrolopyrrole polymer for improving field-effect mobility [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6: 13325-13330. DOI: [10.1039/C8TC04954H](#).
- [4] OU-YANG W, WEIS M, TAGUCHI D, et al. Modeling of threshold voltage in pentacene organic field-effect transistors [J]. *Journal of Applied Physics*, 2010, 107 (12) : 124506. DOI: [10.1063/1.3449078](#).
- [5] WANG R, GUO Y K, ZHANG D, et al. Improved electron transport with reduced contact resistance in N-doped polymer field-effect transistors with a dimeric dopant [J]. *Macromol. Rapid Commun*, 2018, 39 (14) : 1700726. DOI: [10.1002/marc.201700726](#).
- [6] TEIXEIRA DA ROCHA C, HAASE K, ZHENG Y C, et al. Solution Coating of Small Molecule/Polymer Blends Enabling Ultralow Voltage and High-Mobility Organic Transistors [J]. *Adv Electron Mater*, 2018, 4 (8) : 1800141. DOI: [10.1002/aelm.201800141](#).
- [7] OU-YANG W, WEIS M, MANAKA T, et al. Effect of an upward and downward interface dipole langmuir-blodgett monolayer on pentacene organic field-effect transistors: A comparison study [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51(2R): 024102-5. DOI: [10.7567/JJAP.51.024102](#).
- [8] THUAU D, ABBAS M, WANTZ G, et al. Mechanical strain induced changes in electrical characteristics of flexible, non-volatile ferroelectric OFET based memory [J]. *Organic Electronics*, 2017, 40: 30-35. DOI: [10.1016/j.orgel.2016.10.036](#).
- [9] GAO X, DUAN S M, LI J F, et al. Deposition rate related DPA OFET threshold voltage shift and hysteresis variation [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6: 12498-12502. DOI: [10.1039/C8TC05327H](#).
- [10] NAKAYAMA K, OU-YANG W, UNO M, et al. Flexible air-stable three-dimensional polymer field-effect transistors with high output current density [J]. *Organic Electronics*, 2013, 14: 2908-2915. DOI: [10.1016/j.orgel.2013.08.002](#).
- [11] LI J, OU-YANG W, WEIS M, et al. Electric-field enhanced thermionic emission model for carrier injection mechanism of organic field-effect transistors: understanding of contact resistance [J]. *Journal of Physics D : Applied Physics*, 2017, 50(2): 035101. DOI: [10.1088/1361-6463/aa4e95](#).
- [12] UEMURA T, ROLIN C, KE T H, et al. On the extraction of charge carrier mobility in high-mobility organic transistors [J]. *Advanced Materials*, 2016, 28(1): 151-155. DOI: [10.1002/adma.201503133](#).
- [13] CHOI H H, CHO K, SIRRINGHAUS H, et al. Critical assessment of charge mobility extraction in FETs [J]. *Nature materials*, 2018, 17(1): 2-7. DOI: [10.1038/nmat5035](#).
- [14] NIKOLKA M, NASRALLAH I, ROSE B, et al. High operational and environmental stability of high-mobility conjugated polymer field-effect transistors through the use of molecular additives [J]. *Nature Mater*, 2017, 16: 356-361. DOI: [10.1038/nmat4785](#).
- [15] FARAJI S, DANESH E, TATE D J, et al. Cyanoethyl cellulose-based nanocomposite dielectric for low-voltage, solution-processed organic field-effect transistors (OFETs) [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2016, 49(18): 185102.
- [16] ZHANG W M, SMITH J, WATKINS S E, et al. Indacenodithiophene semiconducting polymers for high-performance, air-stable transistors [J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2010, 132(33): 11437-11439. DOI: [10.1021/ja1049324](#).
- [17] NIKOLKA M, SCHWEICHER G, ARMITAGE J, et al. Performance improvements in conjugated polymer devices by removal of water-induced traps [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(36): 1801874. DOI: [10.1002/adma.201801874](#).
- [18] LI Y N, SINGH S P, SONAR P. A high mobility P-type DPP-thieno[3,2-b]thiophene copolymer for organic thin-film transistors [J]. *Advanced Materials*, 2010, 22(43): 4862-4866. DOI: [10.1002/adma.201002313](#).
- [19] ZHOU N J, VEGIRAJU S, YU X G, et al. Diketopyrrolopyrrole (DPP) functionalized tetrathienothiophene (TTA) small molecules for organic thin film transistors and photovoltaic cells [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2015, 3(34): 8932-8941. DOI: [10.1039/C5TC01348H](#).
- [20] LI Y N, SONAR P, MURPHY L, et al. High mobility diketopyrrolopyrrole (DPP)-based organic semiconductor materials for organic thin film transistors and photovoltaics [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6: 1684-1710. DOI: [10.1039/c3ee00015j](#).
- [21] COUTO R, CHAMBON S, AYMONIER C, et al. Microfluidic supercritical antisolvent continuous processing and direct spray-coating of poly-(3-hexylthiophene) nanoparticles for OFET devices [J]. *Chemical Communications*, 2015, 51(6): 1008-1011. DOI: [10.1039/C4CC07878K](#).
- [22] CHIANESE F, CANDINI A, AFFRONTI M, et al. Linear conduction in N-type organic field effect transistors with nanometric channel lengths and graphene as electrodes [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 112(21): 213301. DOI: [10.1063/1.5023659](#).
- [23] VASIMALLA S, SUBBARAO N V V, GEDDA M, et al. Effects of dielectric material, HMDS layer, and channel length on the

- performance of the perylenediimide-based organic field-effect transistors [J]. *ACS Omega*, 2017, 2: 2552-2560. DOI: [10.1021/acsomega.7b00374](https://doi.org/10.1021/acsomega.7b00374).
- [24] LEOBANDUNG E, GU J, GUO L J, et al. Wire-channel and wrap-around-gate metal-oxide-semiconductor field-effect transistors with a significant reduction of short channel effects [J]. *Journal of Vacuum Science Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures*, 1997, 15(6): 2791-2794. DOI: [10.1116/1.589729](https://doi.org/10.1116/1.589729).
- [25] RAY B, MAHAPATRA S. Modeling of Channel Potential and Subthreshold Slope of Symmetric double-gate transistor [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2009, 56(2): 260-264. DOI: [10.1109/TED.2008.2010577](https://doi.org/10.1109/TED.2008.2010577).
- [26] PRETETJ, MONFRAYS, CRISTOLOVEANUS, et al. Silicon-on-nothing MOSFETs: Performance, short-channel effects, and backgate coupling [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2004, 51(2): 240-244. DOI: [10.1109/TED.2003.822226](https://doi.org/10.1109/TED.2003.822226).
- [27] HU Y Y, LI G D, CHEN Z J. The importance of contact resistance in high-mobility organic field-effect transistors studied by scanning kelvin probe microscopy [J]. *IEEE Electron Device Letters*, 2018, 39(2): 276-279. DOI: [10.1109/LED.2017.2781301](https://doi.org/10.1109/LED.2017.2781301).
- [28] CHOI S, FUENTES-HERNANDEZ C, WANG C Y, et al. A Study on reducing contact resistance in solution-processed organic field-effect transistors [J]. *ACS Applied Material and Interfaces*, 2016, 8(37): 24744-24752. DOI: [10.1021/acsami.6b07029](https://doi.org/10.1021/acsami.6b07029).
- [29] WADA H, SHIBATA K, BANDO Y, et al. Contact resistance and electrode material dependence of air-stable n-channel organic field-effect transistors using dimethyldicyanoquinonediimine (DMDCNQI) [J]. *Journal of Materials Chemistry*, 2008, 18 (35): 4165-4171. DOI: [10.1039/b808435a](https://doi.org/10.1039/b808435a).
- [30] OU-YANG W, MANAKA T, NAITOU S, et al. Optical second-harmonic generation in hydrogenated amorphous silicon single- and double-junction solar cells [J]. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2012, 51 (7R): 070209-.
- [31] OU-YANG W, MITOMA N, KIZU T, et al. Controllable film densification and interface flatness for high-performance amorphous indium oxide based thin film transistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2014, 105 (16): 163503. DOI: [10.1063/1.4898815](https://doi.org/10.1063/1.4898815).
- [32] RAJEEV K P, OPOKU C, STOLOJAN V, et al. Effect of nanowire-dielectric interface on the hysteresis of solution processed silicon nanowire FETs [J]. *Nanoscience and Nanoengineering*, 2017, 5(2): 17-24. DOI: [10.13189/nn.2017.050201](https://doi.org/10.13189/nn.2017.050201).
- [33] HEKMATSHOAR B. Thin-film silicon heterojunction FETs for large area and flexible electronics: Design parameters and reliability [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2015, 62(11): 3524-3529. DOI: [10.1109/TED.2015.2463721](https://doi.org/10.1109/TED.2015.2463721).
- [34] GAO X, LIN M M, MAO B H, et al. Correlation between active layer thickness and ambient gas stability in IGZO thin-film transistors [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2017, 50(2): 025102. DOI: [10.1088/1361-6463/50/2/025102](https://doi.org/10.1088/1361-6463/50/2/025102).
- [35] MITOMA N, AIKAWA S, OU-YANG W, et al. Dopant selection for control of charge carrier density and mobility in amorphous indium oxide thin-film transistors: Comparison between Si- and W-dopants [J]. *Applied Physics Letters*, 2015, 106 (4): 042106. DOI: [10.1063/1.4907285](https://doi.org/10.1063/1.4907285).
- [36] LIN M F, GAO X, MITOMA N, et al. Reduction of the interfacial trap density of indium-oxide thin film transistors by incorporation of hafnium and annealing process [J]. *AIP Advances*, 2015, 5 (1): 017116. DOI: [10.1063/1.4905903](https://doi.org/10.1063/1.4905903).
- [37] SALYK O, VYNUCHAL J, HORÁČKOVÁ P, et al. Structure and Raman spectra of pyridyl substituted diketo-pyrrolo-pyrrole isomers and polymorphs [J]. *Journal of Molecular Structure*, 2010, 983 (1/2/3): 39-47. DOI: [10.1016/j.molstruc.2010.08.026](https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2010.08.026).
- [38] CALVO-CASTRO J, WARZECHA M, MCLEAN A J, et al. Impact of substituent effects on the Raman spectra of structurally related N-substituted diketopyrrolopyrroles [J]. *Vibrational Spectroscopy*, 2016, 83: 8-16. DOI: [10.1016/j.vibspec.2015.12.004](https://doi.org/10.1016/j.vibspec.2015.12.004).
- [39] YANG J W, FOSSUM J G. On the feasibility of nanoscale triple-gate CMOS transistors [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2005, 52(6): 1159-1163. DOI: [10.1109/TED.2005.848109](https://doi.org/10.1109/TED.2005.848109).
- [40] MATSUMOTO T, OU-YANG W, MIYAKE K, et al. Study of contact resistance of high-mobility organic transistors through comparison [J]. *Organic Electronics*, 2013, 14 (10): 2590-2595. DOI: [10.1016/j.orgel.2013.06.032](https://doi.org/10.1016/j.orgel.2013.06.032).
- [41] OU-YANG W, UEMURA T, MIYAKE K, et al. High-performance organic transistors with high- k dielectrics: A comparative study on solution-processed single crystals and vacuum-deposited polycrystalline films of 2,9-didecyl-dinaphtho[2,3-b:2',3'-f]thieno[3,2-b]thiophene [J]. *Applied Physics Letters*, 2012, 101(16): 223304. DOI: [10.1063/1.4769436](https://doi.org/10.1063/1.4769436).

(责任编辑: 李 艺)