

文章编号: 1000-7032(2021)05-0700-08

# 异质诱导酞菁锌有机薄膜晶体管的蒸镀工艺

董金鹏<sup>1</sup>, 孙 强<sup>1</sup>, 李桂娟<sup>2</sup>, 苏和平<sup>1</sup>, 王 璐<sup>1</sup>, 朱阳阳<sup>1</sup>, 王丽娟<sup>1\*</sup>

(1. 长春工业大学 化学工程学院, 吉林 长春 130012; 2. 海南科技职业大学, 海南 海口 571126)

**摘要:** 通过调控对六联苯(*p*-6P)诱导层和酞菁锌(ZnPc)蒸镀工艺条件,研究了有机半导体小分子的结晶生长成膜与ZnPc有机薄膜晶体管(OTFT)器件电性能的关系。结果表明,*p*-6P在180~190℃较高的衬底生长温度和3~4 nm的生长厚度下能够形成更大的结晶畴以及对二氧化硅衬底表面更好的覆盖,有利于诱导ZnPc小分子的结晶生长,使晶畴的排列更加有序。同时通过X射线衍射分析晶体结构,结果表明*p*-6P衬底温度的升高会明显提高ZnPc薄膜的结晶性。电性能研究发现,ZnPc蒸镀厚度的增加会显著提高器件的饱和电流和迁移率,在异质诱导条件下,*p*-6P薄膜厚度为3 nm,ZnPc蒸镀厚度为20 nm时,器件的饱和电流为 $1.08 \times 10^{-6}$  A,迁移率为 $1.66 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

**关键词:** *p*-6P; 酞菁锌(ZnPc); 薄膜生长; 有机薄膜晶体管(OTFT); 电性能

中图分类号: TN321+.5 文献标识码: A DOI: 10.37188/CJL.20210024

## Evaporation Process of Heterogeneous Induced Zinc Phthalocyanine for Organic Thin Film Transistor

DONG Jin-peng<sup>1</sup>, SUN Qiang<sup>1</sup>, LI Gui-juan<sup>2</sup>, SU He-ping<sup>1</sup>,  
WANG Lu<sup>1</sup>, ZHU Yang-yang<sup>1</sup>, WANG Li-juan<sup>1\*</sup>

(1. College of Chemical Engineering, Changchun University of Technology, Changchun 130012, China;

2. Hainan Vocational University of Science and Technology, Haikou 571126, China)

\* Corresponding Author, E-mail: wlj15@163.com

**Abstract:** By adjusting the para-hexabiphenyl(*p*-6P) induction layer and zinc phthalocyanine(ZnPc) evaporation process conditions, the relationship between the crystal growth of organic semiconductor small molecules and the electrical properties of ZnPc OTFT devices was studied. The results showed that *p*-6P films can form larger crystal domains and better surface coverage on silicon dioxide substrate under the substrate growth temperature of 180 – 190 °C and the growth thickness of 3 – 4 nm. This was beneficial to induce the crystal growth of ZnPc molecules and make the arrangement of the crystal domains more orderly. At the same time, the crystal structure was analyzed by X-ray diffraction. The results showed that the rise in temperature of the *p*-6P substrate would significantly improve the crystallinity of the ZnPc films. Combined with the study of electrical properties, the increase of ZnPc vapor deposition thickness will significantly increase the saturation current and device mobility of the device. Under heterogeneous induction conditions, when the *p*-6P film thickness is 3 nm and the ZnPc film thickness is 20 nm, the saturation current of the device is  $1.08 \times 10^{-6}$  A, and the mobility is  $1.66 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

收稿日期: 2021-01-13; 修订日期: 2021-02-01

基金项目: 吉林省大学生创新创业训练计划项目(202010190106); 吉林省科技厅重点攻关项目(20200403146SF); 吉林省教育厅项目(JJKH20200682KJ)资助

Supported by Undergraduate Training Programs for Innovation and Entrepreneurship of Jilin Province(202010190106); Key Program for Science and Technology Department(20200403146SF); Scientific Research Foundation of Education Department of Jilin Province(JJKH20200682KJ)

**Key words:** *p*-6P; zinc phthalocyanine(ZnPc); films growth; organic thin film transistor(OTFT); electrical properties

## 1 引 言

基于有机半导体材料的有机薄膜晶体管(OTFT),相较于无机材料晶体管<sup>[1-3]</sup>的复杂制备方法,在有机材料可设计性、价格低廉、可大面积制备以及可应用于柔性器件等方面具有极大的优势,在物联网时代具有巨大的应用潜力,已经成为有机电子学等领域的研究热点。人们为获得性能优异的有机薄膜晶体管器件,在半导体材料<sup>[4]</sup>、器件结构设计<sup>[5]</sup>、界面修饰<sup>[6]</sup>和制备方法<sup>[7]</sup>等方面进行了大量研究。其中,获得高度有序的结晶性有机半导体薄膜仍是研究的重要方向。Zhou 等<sup>[8]</sup>构建了 *p* 型的并五苯和 *n* 型的氟代酞菁铜异质结,优化并五苯厚度促进氟代酞菁铜结晶成膜,制备了性能优异的 OTFT 器件;Kim 等<sup>[9]</sup>通过在石英管中注入氩气的方法干燥并五苯液滴,制备了结晶与取向良好的薄膜。Li 等<sup>[10]</sup>通过异质诱导酞菁铜薄膜制备了优良的半导体薄膜,获得了较好的性能。

酞菁锌(ZnPc)作为目前有重要应用前景的酞菁系材料,广泛应用于太阳能电池<sup>[11]</sup>、有机薄膜晶体管<sup>[12]</sup>、有机发光二极管<sup>[13]</sup>和气体传感器<sup>[14]</sup>等领域。迄今为止,研究者通过溶液法<sup>[15]</sup>、逐层自组装<sup>[16]</sup>、喷墨打印<sup>[17]</sup>和热蒸发<sup>[18-19]</sup>等方法来获得有机半导体薄膜。其中热蒸发方法具有安全、可自由调节膜厚以及可大面积制备的优点,具有较大的应用前景。Pan 等<sup>[20]</sup>通过弱外延生长法制备了以氟苯端基的四噻吩为诱导层的高性能酞菁氧钒薄膜晶体管,器件迁移率达到  $2.6 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ;Li 等<sup>[21]</sup>通过对用十八烷基三氯硅烷(OTS)对  $\text{SiO}_2$  表面进行修饰、蒸镀酞菁氧钛制备 OTFT 器件,迁移率大于  $1 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,因此热蒸发制备是一种可获得优异性能器件的工艺。本文通过调控对六联苯(*p*-6P)诱导层的蒸镀工艺条件以及 ZnPc 薄膜的蒸镀厚度,研究了不同的制备工艺下有机半导体的生长形貌与有机薄膜晶体管性能的关系,为制备性能优异的有机半导体薄膜提供了依据。

## 2 实 验

### 2.1 材料

高掺杂的硅( $\text{n}^{++} \text{Si}$ )衬底购于苏州晶矽电子

科技有限公司,带有 300 nm 的二氧化硅( $\text{SiO}_2$ )氧化层。其中  $\text{n}^{++} \text{Si}$  和  $\text{SiO}_2$  分别作为栅极和绝缘层,电容值为  $11 \text{ nF/cm}^2$ 。对六联苯(*p*-6P,纯度 95%)购于上海麦克林试剂有限公司。酞菁锌(ZnPc,纯度 97%)购于上海 Aladdin 公司。Au(纯度  $\geq 99.99\%$ )购于石久光学科技发展有限公司。其中 *p*-6P 和 ZnPc 均直接使用,未进一步提纯。

### 2.2 有机薄膜和器件制备

$\text{SiO}_2$  衬底依次用丙酮、乙醇和去离子水冲洗干净,然后用氮气吹干,放入烘箱  $80 \text{ }^\circ\text{C}$  烘干。有机半导体 *p*-6P 和 ZnPc 采用真空蒸镀的方法沉积在  $\text{SiO}_2$  衬底上形成有机薄膜,通过调控 *p*-6P 的生长衬底温度和蒸镀厚度以及 ZnPc 薄膜蒸镀厚度,研究有机半导体薄膜形貌与 OTFT 性能的关系。其中,*p*-6P 的蒸镀速率均为  $0.2 \text{ nm/min}$ ,ZnPc 的蒸镀速率均为  $0.6 \text{ nm/min}$ 。最后,在有机半导体薄膜表面通过掩膜版蒸镀方块电极,制备 OTFT 器件,沟道长宽比为 20,器件结构和材料分子式如图 1 所示。

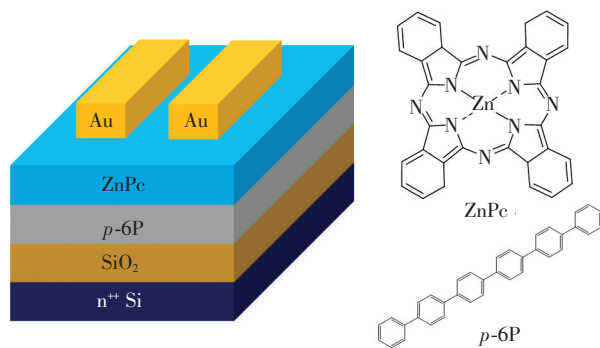


图 1 ZnPc OTFT 结构示意图(a)和材料分子式(b)

Fig.1 (a) Device configuration of ZnPc OTFT. (b) Molecular structures of ZnPc and *p*-6P.

### 2.3 性能测试与表征

有机薄膜的表面形貌采用日本精工株式会社的 Seiko SPI3800N 型原子力显微镜(AFM)进行表征,扫描模式为敲击模式。薄膜的晶体结构表征采用德国布鲁克公司生产的 D8 Discover 型掠入射 X 射线衍射仪(XRD),Cu  $\text{K}\alpha$  辐射源( $\lambda = 0.154056 \text{ nm}$ ,  $V = 40 \text{ kV}$ ,  $I = 40 \text{ mA}$ )。薄膜晶体管器件电性能采用 Keithley 2636 双通道电流-电压测试仪进行测试,测试环境均为室温下暗箱大气环境,温度  $20 \text{ }^\circ\text{C}$  左右,相对湿度

30%左右。

### 3 结果与讨论

#### 3.1 *p*-6P 诱导层衬底温度对 ZnPc OTFT 性能的影响

为研究 *p*-6P 诱导层制备工艺对 ZnPc 薄膜生长的影响,首先研究了不同衬底温度下 *p*-6P 诱导层的 AFM 形貌,如图 2(a)~(d)。在 130 °C 和 150 °C 较低的衬底温度下,*p*-6P 形成的结晶畴较小。随着衬底温度的升高,*p*-6P 分子倾向于形成更大的结晶畴,且在 180 °C 时晶畴间出现融合现

象,温度升高到 190 °C 时,融合现象消失。接着研究了在不同衬底温度下 *p*-6P 诱导层上生长 ZnPc, ZnPc 衬底温度为 180 °C,厚度为 20 nm, ZnPc 形貌如图 2(e)~(h), ZnPc 分子均形成了不同形状的结晶畴。在 *p*-6P 诱导层衬底温度较低时, ZnPc 形成的结晶畴较小,且晶须排列混乱,晶畴之间间隙较大。在衬底温度为 180 °C 和 190 °C 下,*p*-6P 诱导层上生长的 ZnPc 结晶畴较大,且晶畴之间紧密相连,说明 *p*-6P 分子在较高的衬底温度生长形成的连续的高质量薄膜会诱导 ZnPc 分子更好地结晶成膜。

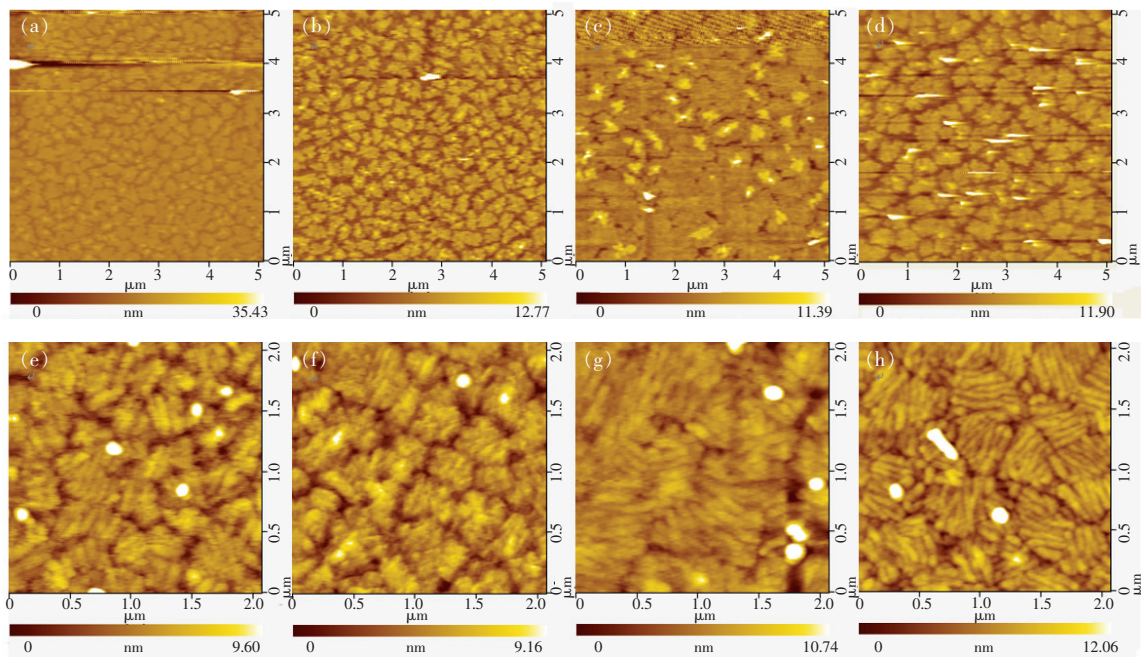


图 2 不同 *p*-6P 诱导层衬底温度下 *p*-6P 薄膜((a)~(d)) 和 ZnPc 薄膜((e)~(h)) 的 AFM 形貌图。(a)、(e)130 °C; (b)、(f)150 °C; (c)、(g)180 °C; (d)、(h)190 °C。

Fig. 2 AFM morphology of *p*-6P films((a)–(d)) and ZnPc films((e)–(h)) at different substrate temperatures of *p*-6P induction layer. (a), (e)130 °C. (b), (f)150 °C. (c), (g)180 °C. (d), (h)190 °C.

为了进一步分析诱导生长对 ZnPc 薄膜晶体结构的影响,采用 XRD 研究了不同衬底温度下 *p*-6P 诱导层上的 ZnPc 的晶态结构,如图 3(a)。不同衬底温度下 *p*-6P 诱导的 ZnPc 薄膜在  $2\theta = 6.92^\circ$  处存在明显的衍射峰,由公式  $2d\sin\theta = \lambda$ , 计算得到相应的晶胞间距为 1.271 nm。根据 ZnPc 的晶胞参数: $a = 2.5980$  nm,  $b = 0.3780$  nm,  $c = 2.4210$  nm,  $\beta = 90.6^\circ$ , 确定该衍射峰为 ZnPc 的 (200) 衍射峰,该衍射峰与文献[22]报道一致。并且随着 *p*-6P 诱导层的衬底温度升高, ZnPc 的衍射峰变得明显更强,说明 *p*-6P 在不同温度形成

的薄膜可以调控 ZnPc 的结晶形态,这与形貌得到的结果一致。

研究了不同衬底温度生长 *p*-6P 诱导的 ZnPc OTFT 器件的电性能。图 3(b)、(c) 分别为器件的输出和转移特性。从图 3(b) OTFT 器件的输出性能可以看出器件的饱和电流随 *p*-6P 衬底温度的升高而增大,这与高的 *p*-6P 衬底温度下生长的 ZnPc 的 AFM 形貌的有序性相统一。随着 *p*-6P 衬底温度的升高, ZnPc 晶须排列得更加规整,晶畴变大,晶界减少,从而降低了晶界中的缺陷带来的载流子捕获陷阱,降低了器件的阈值电压,同时有

利于载流子的产生和传输,产生更大的饱和电流和更高的载流子迁移率。图3(c)中不同的  $p$ -6P 生长衬底温度下 ZnPc OTFT 器件的关态电流基

本没有差别,但随着  $p$ -6P 衬底温度的升高,器件的开态电流增加,所以器件的开关比增大。因此,  $p$ -6P 衬底温度的调控有利于提高器件的性能。

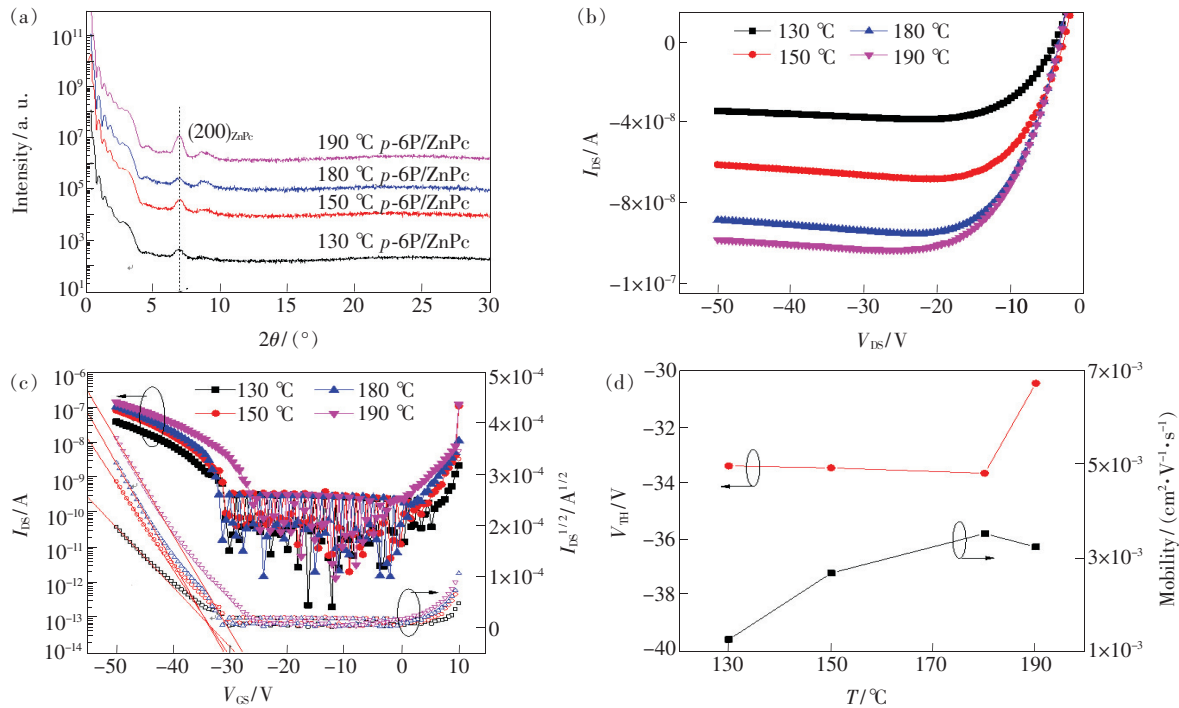


图3 不同  $p$ -6P 衬底温度的 ZnPc 薄膜的 X 射线衍射图(a)和 ZnPc OTFT 电性能图((b) ~ (d))。(b)输出性能( $V_{GS} = -50$  V);(c)转移性能( $V_{DS} = -50$  V);(d)阈值电压和迁移率。

Fig.3 ZnPc films X-ray diffraction pattern(a) and ZnPc OTFT electrical property((b) - (d)) at different  $p$ -6P substrate temperatures. (b)Output performance( $V_{GS} = -50$  V). (c)Transfer performance( $V_{DS} = -50$  V). (d)Threshold voltage and mobility.

### 3.2 $p$ -6P 诱导层厚度对 ZnPc OTFT 性能的影响

为了进一步分析诱导层的调控作用,研究了不同厚度  $p$ -6P 的 AFM 形貌图,如图4(a) ~ (d)。 $p$ -6P 薄膜的厚度为 1 nm 时, $p$ -6P 分子仅形成点状晶畴。 $p$ -6P 薄膜厚度增加到 2 nm 和 3 nm 时,晶畴间排列紧密。4 nm 厚度的  $p$ -6P 薄膜出现明显的第二层成核生长。在不同厚度的  $p$ -6P 诱导层生长 ZnPc,ZnPc 衬底温度为 180 °C,厚度为 20 nm,ZnPc 薄膜形貌如图4(e) ~ (h)。可以看出,随着  $p$ -6P 诱导层薄膜厚度的增加,ZnPc 由较为无序的短棒状结晶变为有序排列的晶须组成的晶畴,且  $p$ -6P 厚度越大,晶须长度增加,排列也越规整。这说明  $p$ -6P 诱导层厚度增加会明显提高其诱导生长 ZnPc 的能力,使 ZnPc 分子的生长更加有序。当  $p$ -6P 诱导层厚度增加到 4 nm 时,虽然

ZnPc 薄膜产生了较大的晶畴,但是出现了明显的晶界,这可能会降低载流子在晶畴间的传输效率。

研究了不同  $p$ -6P 厚度下的 ZnPc OTFT 器件的输出和转移性能并提取了性能参数,如图5(a)。可以看出, $p$ -6P 厚度在 3 nm 以下时,器件的饱和电流随着  $p$ -6P 厚度的增加明显增大,这主要是由于  $p$ -6P 薄膜厚度的增加使其诱导作用增大,促使 ZnPc 有序结晶畴形成,同时提高了载流子的传输。进一步提取了电性能参数阈值电压和载流子迁移率,如图5(c)、(d)。在  $p$ -6P 厚度为 3 nm 时,器件的载流子迁移率较大,为  $0.031 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。当  $p$ -6P 的厚度增加到 4 nm 时,器件的饱和电流和迁移率减小,这可能是由于较强的诱导作用使 ZnPc 在晶畴内有序性增加,但不同晶畴间排列的连续性降低,从而导致晶畴间载流子传输受阻,使器件性能降低。

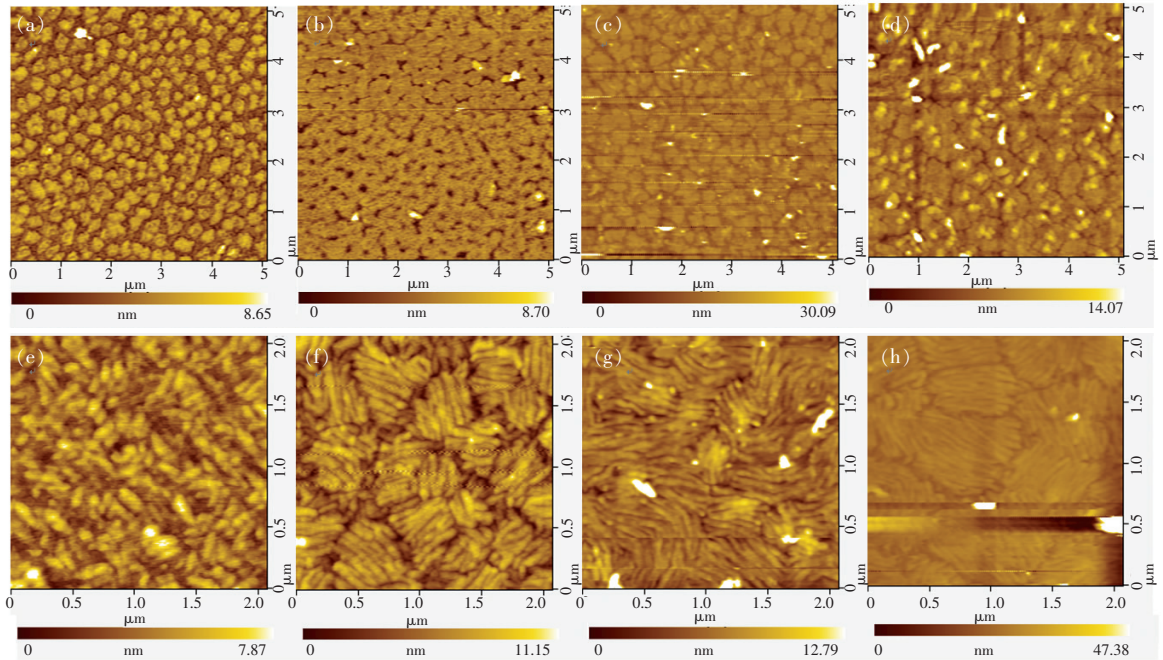


图 4 不同厚度  $p$ -6P 薄膜 ((a) ~ (d)) 及其诱导生长 ZnPc 薄膜 ((e) ~ (h)) 的 AFM 形貌图。(a)、(e) 1 nm; (b)、(f) 2 nm; (c)、(g) 3 nm; (d)、(h) 4 nm。

Fig. 4 AFM morphology of  $p$ -6P films and induced growth of ZnPc films with different thicknesses of  $p$ -6P films. (a), (e) 1 nm. (b), (f) 2 nm. (c), (g) 3 nm. (d), (h) 4 nm.

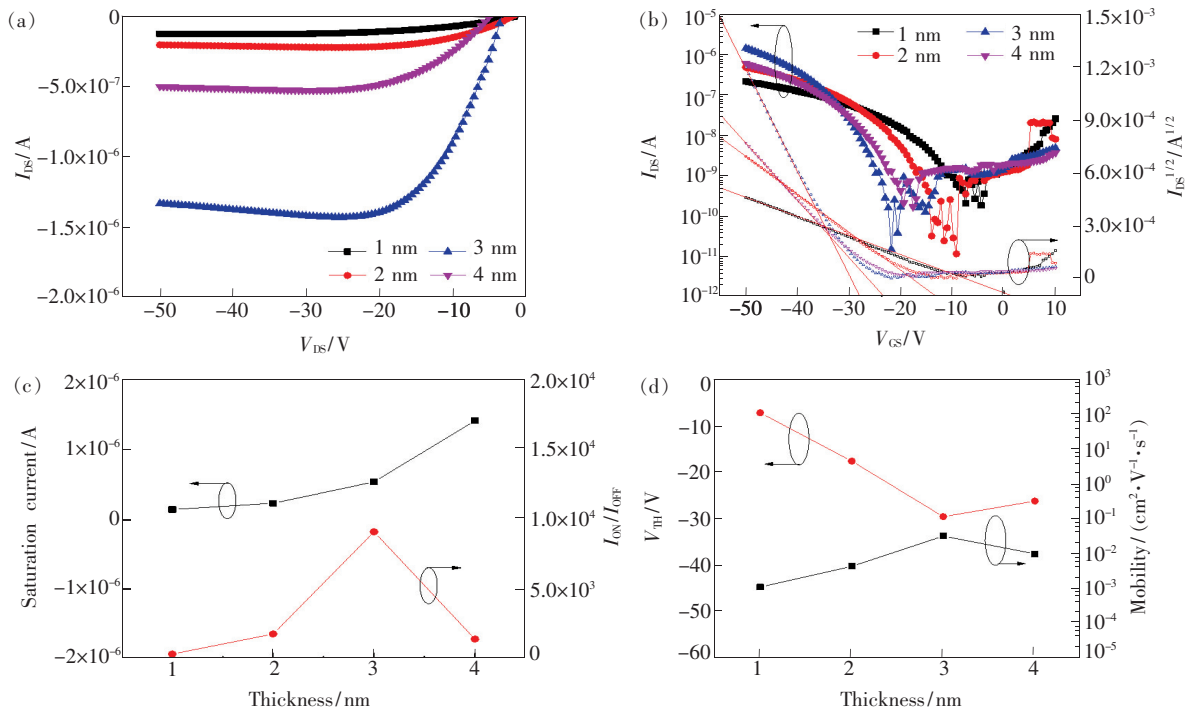


图 5 不同厚度  $p$ -6P 诱导生长的 ZnPc OTFT 的电性能。(a) 输出性能 ( $V_{GS} = -50$  V); (b) 转移性能 ( $V_{DS} = -50$  V); (c) 饱和电流和开关比; (d) 迁移率和阈值电压。

Fig. 5 Electrical property of ZnPc OTFT with different thickness of  $p$ -6P films. (a) Output performance ( $V_{GS} = -50$  V). (b) Transfer performance ( $V_{DS} = -50$  V). (c) Saturation current and switching ratio. (d) Threshold voltage and mobility.

### 3.3 ZnPc 厚度对 OTFT 性能的影响

为确定 ZnPc 的生长工艺,在诱导层 *p*-6P 厚度为 3 nm 时,研究对比了不同厚度 ZnPc 薄膜的 OTFT 器件的电性能,如图 6(a)~(d)。随着 ZnPc 薄膜厚度的增加,器件的饱和电流不断增大,如图 6(a),这归因于 ZnPc 薄膜厚度的增加提供了更多的载流子,相同的电压条件下能够产生更大的饱和电流。如图 6(b)OTFT 器件转移性能所示,在 ZnPc 厚度在 15 nm 以下时,器件开态电流随厚度增加而增大;在 15 nm 和 20 nm 较大的厚度下开态电流几乎相同。不同 ZnPc 厚度下 OTFT 器件的关态电流变化不大。因此,ZnPc 厚度的增加主要影响的是 OTFT 器件的

开态电流,故在 ZnPc 厚度为 15 nm 和 20 nm 时器件有较大的开关比,如图 6(c)。进一步从转移特性提取了阈值电压和迁移率,如图 6(d),由于 ZnPc 薄膜厚度的增加,较高的载流子浓度提供了器件较高的载流子迁移率和较低的开态电压,但随着 ZnPc 薄膜厚度从 15 nm 到 20 nm,器件的性能已基本一致。在 ZnPc 厚度为 20 nm 时制备的器件的迁移率较高,为  $1.66 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

因此,结合形貌和电性能,可以确定调控 *p*-6P 诱导层能够提高 ZnPc 的结晶性能和载流子迁移率,同时要有适当厚度的 ZnPc 才能保证足够的载流子密度。

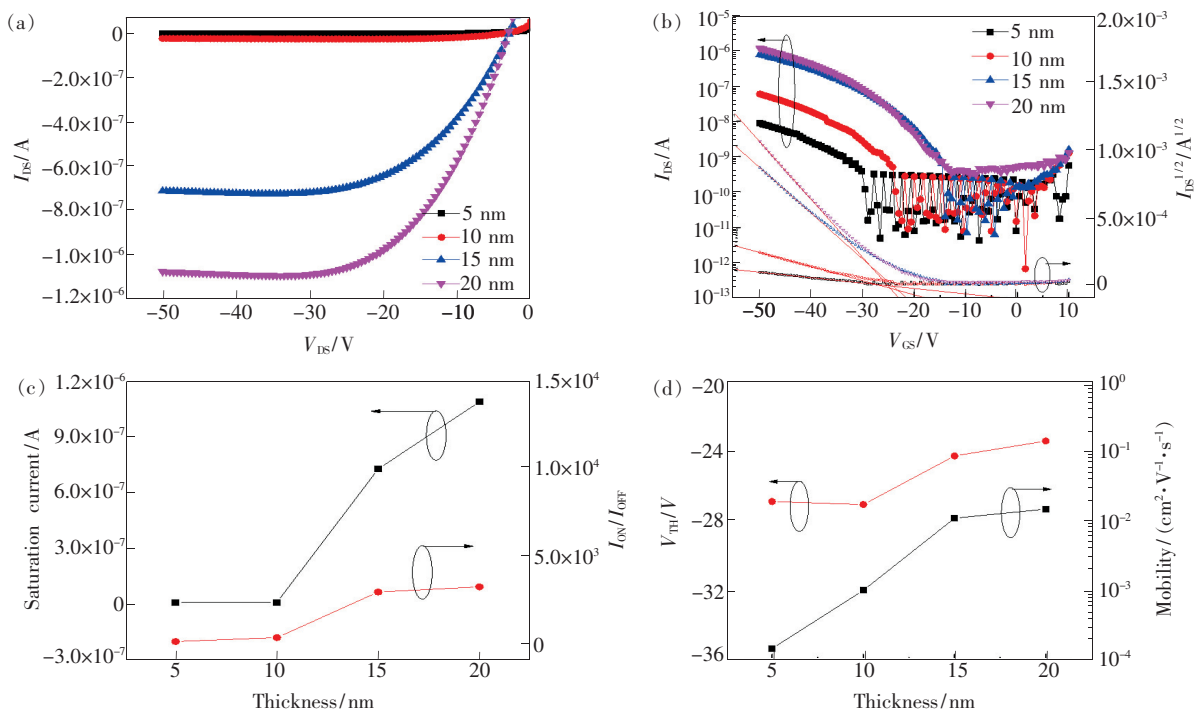


图 6 不同 ZnPc 沉积厚度的 OTFT 器件电性能。(a)输出性能( $V_{GS} = -50 \text{ V}$ );(b)转移性能( $V_{DS} = -50 \text{ V}$ );(c)饱和电流和开关比;(d)阈值电压和迁移率。

Fig. 6 Electrical properties of OTFT devices with different ZnPc deposition thicknesses. (a) Output performance( $V_{GS} = -50 \text{ V}$ ). (b) Transfer performance( $V_{DS} = -50 \text{ V}$ ). (c) Saturation current and switching ratio. (d) Threshold voltage and mobility.

## 4 结 论

本文通过对不同蒸镀工艺下的 *p*-6P 诱导层和 ZnPc 有机薄膜的形貌进行表征,研究了蒸镀工艺条件对有机半导体小分子成膜的影响。*p*-6P 诱导层在 180~190 °C 衬底温度、厚度 3~4 nm 的条件下,可在  $\text{SiO}_2$  表面形成结晶性良好的薄膜。诱导生长的 ZnPc 具有更大的晶畴,更少的晶界。XRD 结果表明,*p*-6P 在较高的衬底温度下生成的

有机分子层能对 ZnPc 起到更好的诱导作用,提高 ZnPc 薄膜的结晶性。同时,结合不同蒸镀工艺条件下 OTFT 器件电性能的研究,*p*-6P 薄膜在衬底温度 180 °C 下生长 3 nm、ZnPc 薄膜厚度 20 nm 能够获得较好性能的 OTFT 器件,迁移率为  $1.66 \times 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ,饱和电流在  $1.08 \times 10^{-6} \text{ A}$  左右。因此,通过优化调控,获得的高质量 *p*-6P 诱导层和 ZnPc 有机薄膜在柔性和大面积制备领域具有广阔的应用前景。

## 参 考 文 献:

- [ 1 ] 姜亦杨,陈艳,王旭东,等. 悬空氧化钢纳米线晶体管制备与光电性能表征 [J]. 中国光学, 2021,14(1):196-205.  
JIANG Y Y, CHEN Y, WANG X D, *et al.*. Fabrication and optoelectronic characterization of suspended  $\text{In}_2\text{O}_3$  nanowire transistors [J]. *Chin. Opt.*, 2021,14(1):196-205. (in Chinese)
- [ 2 ] 万云海,邹志翔,林亮,等. 氧化物薄膜晶体管刻蚀阻挡层 PECVD 沉积条件研究 [J]. 液晶与显示, 2019,34(1):7-13.  
WAN Y H, ZOU Z X, LIN L, *et al.*. Etch-stop layer plasma chemical enhanced vapor deposition for oxide thin-film-transistor [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2019,34(1):7-13. (in Chinese)
- [ 3 ] 董俊辰,郝文,李慧津,等. 高性能钆铝锌氧薄膜晶体管的制备 [J]. 液晶与显示, 2017,32(5):339-343.  
DONG J C, YU W, LI H J, *et al.*. Fabrication of high performance Gadolinium-aluminum-zinc-oxide thin film transistors [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017,32(5):339-343. (in Chinese)
- [ 4 ] SONG C, LI Y, GAO C C, *et al.*. An OTFT based on titanium phthalocyanine dichloride: a new p-type organic semiconductor [J]. *Mater. Lett.*, 2020,270:127666.
- [ 5 ] BORTHAKUR T, SARMA R. Performance enhancement of top contact pentacene-based organic thin-film transistor (OFET) using perylene interlayer between organic/electrode interface [J]. *Appl. Phys. A*, 2017,123(3):207-1-5.
- [ 6 ] ZHUANG X M, HUANG W, HAN S J, *et al.*. Interfacial modifying layer-driven high-performance organic thin-film transistors and their nitrogen dioxide gas sensors [J]. *Org. Electron.*, 2017,49:334-339.
- [ 7 ] NOBESHIMA T, UEMURA S, YOSHIDA M, *et al.*. Stretchable conductor from oriented short conductive fibers for wiring soft electronics [J]. *Polym. Bull.*, 2016,73(9):2521-2529.
- [ 8 ] ZHOU J L, JIANG Y Y, WANG Z, *et al.*. Influence of underneath pentacene thickness on performance of p-n heterojunction organic thin film transistors [J]. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.*, 2016,73(2):20201-1-6.
- [ 9 ] KIM M J, HEO H W, SUH Y K, *et al.*. Morphology control of TIPS-pentacene grains with inert gas injection and effects on the performance of OTFTs [J]. *Org. Electron.*, 2011,12(7):1170-1176.
- [ 10 ] 李亨利,都昊,王丽娟,等. 异质诱导生长的酞菁铜薄膜晶体管的研究 [J]. 液晶与显示, 2016,31(2):157-163.  
LI H L, DU H, WANG L J, *et al.*. Research of copper phthalocyanine thin film transistor by heterogeneous induced growth [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2016,31(2):157-163. (in Chinese)
- [ 11 ] PFUETZNER S, MEISS J, PETRICH A, *et al.*. Thick  $\text{C}_{60}$ :ZnPc bulk heterojunction solar cells with improved performance by film deposition on heated substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009,94(25):253303-1-3.
- [ 12 ] WANG H, ZHU F, YANG J, *et al.*. Weak epitaxy growth affording high-mobility thin films of disk-like organic semiconductors [J]. *Adv. Mater.*, 2007,19(16):2168-2171.
- [ 13 ] 李文佳,苏丽娜,任舰,等. 阴极修饰层 CuPc、ZnPc、 $\text{C}_{60}$ 对 OLED 光电性能的影响 [J]. 发光学报, 2018,39(12):1757-1764.  
LI W J, SU L N, REN J, *et al.*. Influence of CuPc, ZnPc,  $\text{C}_{60}$  as cathode modification layer on the performance of OLED [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(12):1757-1764. (in Chinese)
- [ 14 ] 李占国,张玉婷,谢强,等. 基于 p-6P 异质诱导生长酞菁铜薄膜的  $\text{NO}_2$  传感器 [J]. 物理化学学报, 2016,32(4):1005-1011. (in Chinese)  
LI Z G, ZHANG Y T, XIE Q, *et al.*.  $\text{NO}_2$  sensors based on p-6P heterogametic induction growth of copper phthalocyanine thin films [J]. *Acta Phy.-Chim. Sinica*, 2016,32(4):1005-1011.
- [ 15 ] ZHANG F J, QU G, MOHAMMADI E, *et al.*. Solution-processed nanoporous organic semiconductor thin films: toward health and environmental monitoring of volatile markers [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2017,27(23):1701117.
- [ 16 ] WOJUNG C, NAITO M, FUJII R, *et al.*. Preparation of phthalocyanine ultrathin film *via* layer-by-layer assembly [J]. *Thin Solid Films*, 2009,518(2):625-628.
- [ 17 ] 张国成,陈惠鹏,郭太良. 绝缘层修饰对喷墨打印有机场效应晶体管形貌和性能的影响 [J]. 发光学报, 2017,38(2):194-200.  
ZHANG G C, CHEN H P, GUO T L. Impact of the modification of dielectric layers on the morphology and device performance of inkjet-printed OFET [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(2):194-200. (in Chinese)

- [18] EL-NAHASS M M, ZEYADA H M, AZIZ M S, *et al.*. Structural and optical properties of thermally evaporated zinc phthalocyanine thin films [J]. *Opt. Mater.*, 2004, 27(3):491-498.
- [19] 孙洋, 闫闯, 谢强, 等. 双异质诱导层对红荧烯薄膜晶体管性能的影响 [J]. *高等学校化学学报*, 2018, 39(6):1221-1227.  
SUN Y, YAN C, XIE Q, *et al.*. Effect of heterogeneous inducing bilayer on the properties of rubrene thin film transistors [J]. *Chem. J. Chin. Univ.*, 2018, 39(6):1221-1227. (in Chinese)
- [20] PAN F, TIAN H K, QIAN X R, *et al.*. High performance vanadyl phthalocyanine thin-film transistors based on fluorene end-capped quaterthiophene as the inducing layer [J]. *Org. Electron.*, 2011, 12(8):1358-1363.
- [21] LI L, TANG Q, LI H, *et al.*. An ultra closely  $\pi$ -stacked organic semiconductor for high performance field-effect transistors [J]. *Adv. Mater.*, 2007, 19(18):2613-2617.
- [22] DEY A, SINGH A, DAS D, *et al.*. High-performance ZnPc thin film-based photosensitive organic field-effect transistors; influence of multilayer dielectric systems and thin film growth structure [J]. *ACS Omega*, 2017, 2(3):1241-1248.



董金鹏(1999 -), 男, 吉林松原人, 在读本科生, 主要从事有机薄膜晶体管与聚合物太阳能电池的研究。  
E-mail: 1538545969@qq.com



王丽娟(1975 -), 女, 黑龙江集贤人, 博士, 副教授, 2008年于长春理工大学获得博士学位, 主要从事有机薄膜晶体管、气体传感器、太阳能电池、新型显示技术等方面的研究。  
E-mail: wlj15@163.com