

引用格式: ZHANG Guo-cheng, ZHANG Ping-jun, HE Xing-li, *et al.* Preparation and Performance Optimization of Inkjet-printed Vertical Organic Phototransistor[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2019, **48**(12): 1223001

张国成, 张平均, 何兴理, 等. 喷墨打印垂直有机光晶体管及其性能优化[J]. 光子学报, 2019, **48**(12): 1223001

# 喷墨打印垂直有机光晶体管及其性能优化

张国成<sup>1,2</sup>, 张平均<sup>3</sup>, 何兴理<sup>1</sup>, 张红<sup>2</sup>

(1 福建工程学院 微电子技术研究中心, 福州 350108)

(2 福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福州 350108)

(3 福建工程学院 信息科学与工程学院, 福州 350108)

**摘 要:** 通过旋涂透明源极并在其上采用喷墨打印的方式制备有源层及源漏电极, 从而得到一种垂直结构光晶体管, 并获得了较好的光电性能, 其响应率为  $\sim 1\ 500\ \text{A/W}$ , 探测率可达  $1.6 \times 10^{14}$  Jones. 向有源层中掺杂一定比例电子捕获材料 PCBM, 使有源层中光生空穴复合减小, 光生电流增大, 从而进一步提高其光探测性能. 研究发现当掺杂 5wt% 电子捕获材料时, 垂直结构光晶体管性能达到最优, 响应率为  $\sim 6\ 000\ \text{A/W}$ , 探测率可达  $1.4 \times 10^{15}$  Jones.

**关键词:** 喷墨打印; 垂直结构晶体管; 超短沟道; 电子捕获; 光晶体管

中图分类号: TN321+.5

文献标识码: A

doi: 10.3788/gzxb20194812.1223001

## Preparation and Performance Optimization of Inkjet-printed Vertical Organic Phototransistor

ZHANG Guo-cheng<sup>1,2</sup>, ZHANG Ping-jun<sup>3</sup>, HE Xing-li<sup>1</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>

(1 *Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China*)

(2 *Institute of Optoelectronic Display, National & Local United Engineering Lab of Flat Panel Display Technology, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China*)

(3 *College of Information Science and Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China*)

**Abstract:** The source electrode and drain electrode are prepared with inkjet printed active layer on the spin-coated transparent source electrode, obtaining a vertical phototransistor with high photoresponsivity of  $\sim 1\ 500\ \text{A/W}$  and high detectivity of  $\sim 1.6 \times 10^{14}$  Jones. By doping electron capture materials PCBM into the active layer, the recombination of photo-generated holes in the active layer decreases and the photo-generated current increases. Thus the photodetector performance is improved further. It is found that when the electron capture material doping is 5wt%, the performance of phototransistor is better. The photoresponsivity is boosted to about 6 000 A/W and the detectivity is up to  $1.4 \times 10^{15}$  Jones.

**Key words:** Inkjet printing; Vertical transistors; Ultra-short channel; Electron capture; Phototransistors

**OCIS Codes:** 230.0040; 230.0250; 040.5160; 040.5150; 040.1880

## 0 引言

光探测器是一种将光信号转换成电信号的器件, 它是光电系统中非常重要的部分. 有机光探测器具有物理柔性、价格低廉及能大面积制备等优点<sup>[1-4]</sup>, 其光敏感材料包括量子点、有机分子、钙钛矿或有机材料的混

**基金项目:** 国家重点研发计划 (No.2016YFB0401103), 福建省自然科学基金 (Nos.2017J05097, 2018J01535), 福建省中青年教育科研项目 (No.JAT160334), 福州大学人才基金 (No.XRC-17047)

**第一作者:** 张国成 (1981-), 男, 副教授, 博士研究生, 主要研究方向为薄膜晶体管. Email: zgc@fjut.edu.cn

**通讯作者:** 张红 (1978-), 女, 副教授, 博士, 主要研究方向为薄膜晶体管、太阳能电池. Email: 651695142@qq.com

**收稿日期:** 2019-06-17; **录用日期:** 2019-07-26

<http://www.photon.ac.cn>

合物等,材料的选择对光探测器的探测范围及性能有很大的决定作用.光敏感材料薄膜的制备有多种方式,包括真空蒸镀、磁控溅射、溶液法等.而溶液法制备薄膜的工艺中,又以喷墨打印最为突出,一直受到研究人员的广泛关注,主要因其有无需掩模板图案化及消耗材料少等显著优点<sup>[5-6]</sup>.

有机光探测器又分为有机光晶体管和有机光二极管,主要区别在于前者为三端器件,而后者为两端器件.有机光晶体管相当于在有有机场效应晶体管的工作基础上增加了一个光控栅电极,在光照条件下,半导体材料内部产生激子(电子空穴对),并分解形成自由载流子.根据材料传输类型的不同,其中一种载流子(如电子)就限制在载流子陷阱中,从而影响阈值电压,实现对电流的放大.由于这种特殊操作机理,与有机光二极管相比,有机光晶体管能获得更高的光敏感性和更低的噪声<sup>[7-9]</sup>.

近年来,垂直场效应晶体管(Vertical Field Effect Transistor, VFET)研究成为场效应晶体管研究的一个热门话题<sup>[10-12]</sup>.垂直场效应晶体管中,其半导体层厚度即晶体管的沟道长度,所以,有超短的沟道长度是垂直场效应晶体管的最大特点.获益于此,载流子能快速地在源极和漏极之间进行传输,使晶体管有相当快的操作速度.文献[13]利用垂直场效应晶体管超短沟道的特性制备了一种具有快速光响应的电化学光晶体管阵列;另外,因沟道较短,有更多的载流子到达电极,所以,一般垂直场效应晶体管都有较大的电流密度,文献[14]利用该特点研制出了高电流密度、低操作电压的垂直有机场效应晶体管;此外,垂直场效应晶体管具有电流垂直传输的特点,即使器件水平弯曲甚至断裂,其垂直方向的电流传输也不会受到较大影响,文献[15]利用该特点,研究了一种高性能柔性非易失存储器.

将某种吸光材料作为垂直场效应晶体管有源层,当有源层施加光照时,由于垂直场效应晶体管具有超短的沟道长度,光生载流子在到达电极前被复合的几率更小,并且其受到缺陷或晶界的散射概率也更小,将会有更多的光生载流子贡献给光电流,从而加强场效应晶体管的光电性能<sup>[16]</sup>.另外,对于光晶体管来说,对少子的捕获也是提高性能的一种有效方法.当少子被捕获时,光生多子与少子的复合几率将大大降低,促使更多的光生多子转变成光电流,也加强了光晶体管的光电性能<sup>[17-18]</sup>.

本文用有机半导体作为有源层材料,利用垂直结构制备了一种有机垂直场效应晶体管,并测试了其光晶体管性能.同时,通过向垂直场效应晶体管的有源层中掺杂不同比例的电子捕获材料,研究掺杂及掺杂的比例对垂直结构光晶体管性能的影响.

## 1 实验

### 1.1 材料与测试

吸收可见光(波长约为 700 nm)的有源层材料 PCDTPT: Copolymer poly[4-(4,4-dihexadecyl-4H-cyclopenta[1,2-b:5,4-b']dithiophen-2-yl)-alt-[1,2,5][3,4-c]pyridine] (PCDTPT)和掺杂材料 PC61BM: [6,6]-phenyl C<sub>61</sub>-butyric acid methyl ester 均购买于加拿大 1-Materials 公司.有源层墨水溶液包含两种,纯 PCDTPT 和 PCDTPT:PCBM 混合溶液.纯 PCDTPT 溶液是 PCDTPT 以 5 mg/mL 的比例溶解于三氯甲烷中;PCDTPT:PCBM 混合物溶液包含两个配置比例,一种溶液掺杂 5wt% PCBM,另外一种为掺杂 10wt% PCBM,均以 5 mg/mL 的比例溶解于三氯甲烷中.

喷墨打印垂直结构场效应晶体管的电学特性均利用 Keithley 4200 半导体参数分析仪进行测试分析,测试环境为室温大气条件.测试用光源为北京纽比特公司的 300 W 广谱氙灯光源(Solar-500)和单色光源(Omno501).测试过程中,先通过自带软件调节其出射光波长至 700 nm,将光纤出口放置于距被测样品约 3 cm处,通过调节单色光源出光处的阀门来调节出光面积从而实现出射光强度的调节(分别包括 5, 10, 50, 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ ).

### 1.2 垂直结构光晶体管的制备

以 PCDTPT:PCBM 作为有源层的喷墨打印垂直光晶体管示意图如图 1 所示.垂直结构光晶体管(Vertical Optical Phototransistor, VOPT)的制备过程中,除有源层材料外(纯 PCDTPT 和 PCDTPT:PCBM 混合物),其它工艺均相同.器件均以含 300 nm SiO<sub>2</sub>的硅片作为衬底,该衬底首先在去离子水、丙酮、异丙醇、三氯甲烷中超声 15 min,吹干后再进行紫外臭氧(Ultra Violet Ozone, UVO)处理 20 min.该垂直沟道光晶体管以银纳米线作为透明源电极,是在干净的衬底上以 2 000 rpm 的速度旋涂银纳米线溶液 1 min 后,将该衬底 100℃退火 5 min 得到.喷墨打印垂直光晶体管的有源层和源漏电极均采用喷墨打印装置制备

(MicroFab 公司的 Jetlab II 喷墨打印机),其喷嘴直径为  $60\ \mu\text{m}$ .打印有源层时,喷嘴驱动电压为  $80\ \text{V}$ ,频率  $1\ 000\ \text{Hz}$ ,每一滴液滴约  $200\ \text{pL}$ ,衬底温度加热至  $80^\circ\text{C}$ ,打印的薄膜直径约  $450\ \mu\text{m}$ .银源漏电极的打印,同样采用  $60\ \mu\text{m}$  喷嘴,但驱动电压为  $40\ \text{V}$ ,频率为  $1\ 000\ \text{Hz}$ ,单滴液滴约为  $150\ \text{pL}$ ,打印出的银电极直径约  $200\ \mu\text{m}$ .

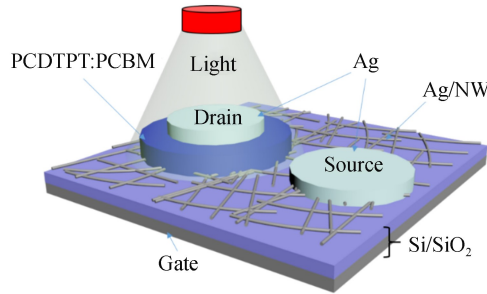


图 1 喷墨打印垂直光晶体管示意图

Fig.1 The schematic of the inkjet-printed vertical photodetectors

## 2 结果与讨论

### 2.1 垂直结构光晶体管的光电特性

VFET 作为一种新型的晶体管结构,其本质的工作机理与平面场效应晶体管基本相同.如图 1,当不加光照时,该结构即为一个普通的底栅 VFET.该结构主要包括结构底部的衬底(栅极和绝缘层),以及绝缘层上的孔洞源极,孔洞源极上一部分区域制备有源层及漏电极,另外一部分区域为制备的利于测试扎针用的源接触电极.为了让 VFET 能正常工作,要求源电极要有孔洞,这样才能让栅电场进入到源电极-半导体界面,从而产生一个场诱导的能带弯曲来降低源电极与半导体层间的势垒高度.以一个 P 型 VFET 为例,当栅极和漏极上都加负电压,源极接地时,栅极电压通过绝缘层产生电场调控孔洞源极与有源层间的势垒,使源极注入的空穴能顺利进入有源层,最终通过有源层垂直流向漏电极,从而形成沟道电流.因此 VFET 中,电流是载流子从孔洞源极经有源层流向漏极而形成的,所以,其有源层膜厚即为沟道长度,一般仅为几十~几百纳米.图 2 为喷墨打印 PCDTPT 薄膜光学图及轮廓图,从轮廓图可知,其薄膜厚度约  $120\ \text{nm}$ ,薄膜直径约  $450\ \mu\text{m}$ ,且薄膜较均匀.同时,也测试了喷墨打印 PCDTPT 薄膜的表面 AFM 形貌,如图 3,在  $5\ \mu\text{m}\times 5\ \mu\text{m}$  扫描范围内,其均方根粗糙度为  $1.31\ \text{nm}$ ,进一步说明其薄膜表面较均匀.

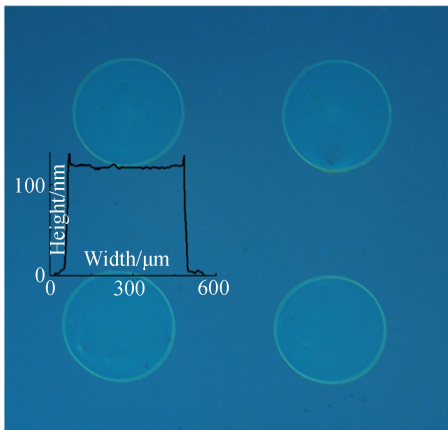


图 2 喷墨打印 PCDTPT 薄膜光学图及轮廓图

Fig.2 Optical image and profile of the inkjet-printed PCDTPT film

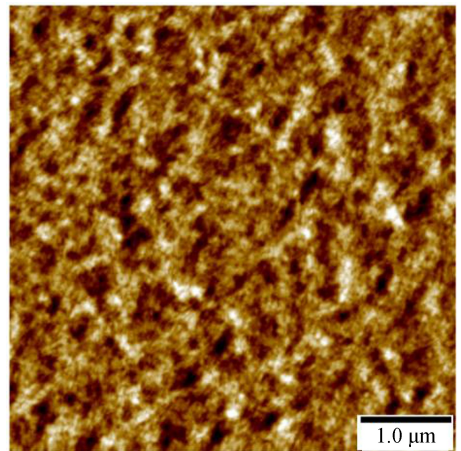


图 3 喷墨打印 PCDTPT 薄膜 AFM 表面形貌

Fig.3 AFM image of the inkjet-printed PCDTPT film

在光晶体管中,将光生激子尽可能多的转换为光生电流,是提高光晶体管性能的一种重要方法.当 VFET 应用于光晶体管时,由于 VFET 超短沟道的特点,当光生激子中的多子和少子分离后,其光生多子在沟道中运行的距离将很短,多子与少子相遇而复合的几率减小,同时,多子与晶界及缺陷发生碰撞而被散射或捕获的几率也减少,这将大大提高光生激子转换成光生电流的几率,从而提高其光晶体管性能.

为了研究 VOPT 的光响应,对其一定范围光照强度下的转移特性曲线进行了研究.图 4 为有源层材料 PCDTPT 的光吸收谱,由图可知该材料在 700 nm 附近有较强的吸收峰,因此,后续光响应测试过程中,均采用 700 nm 波长的光来照射被测样品.

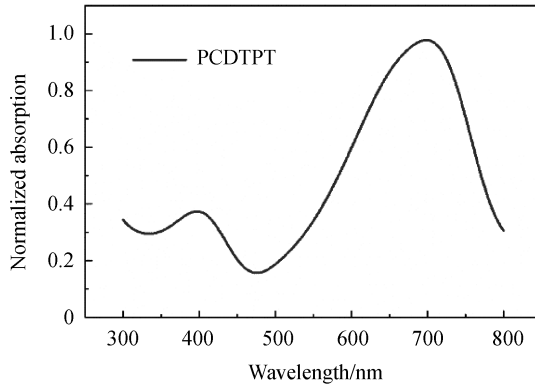


图 4 PCDTPT 吸收谱  
Fig.4 The absorption spectrum of the PCDTPT

图 5(a)为  $500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$  光照条件下,光晶体管的输出特性曲线,由该曲线可知,光晶体管的电极与半导体层间有良好的欧姆接触.图 5(b)为 PCDTPT 作为有源层时,VOPTs 在无光照和四种光照强度下 ( $5, 10, 50, 500 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ) 的转移特性曲线,光照时  $V_{\text{DS}} = -30 \text{ V}$ ,  $V_{\text{GS}}$  在  $-30 \sim 30 \text{ V}$  之间变化.无论是暗态情况下,还是光照情况,器件都展现了较好的 P 型晶体管特征.从其不同光照强度下的转移特性曲线可以看出,随着光照强度增加,不管是开态还是关态的漏极电流都明显增加.即使光照强度只有  $5 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,电流仍有明显增加,说明该 VOPT 有较好的光敏感性.主要因为加光照时,有源层材料吸收光子产生激子,激子会在内建电

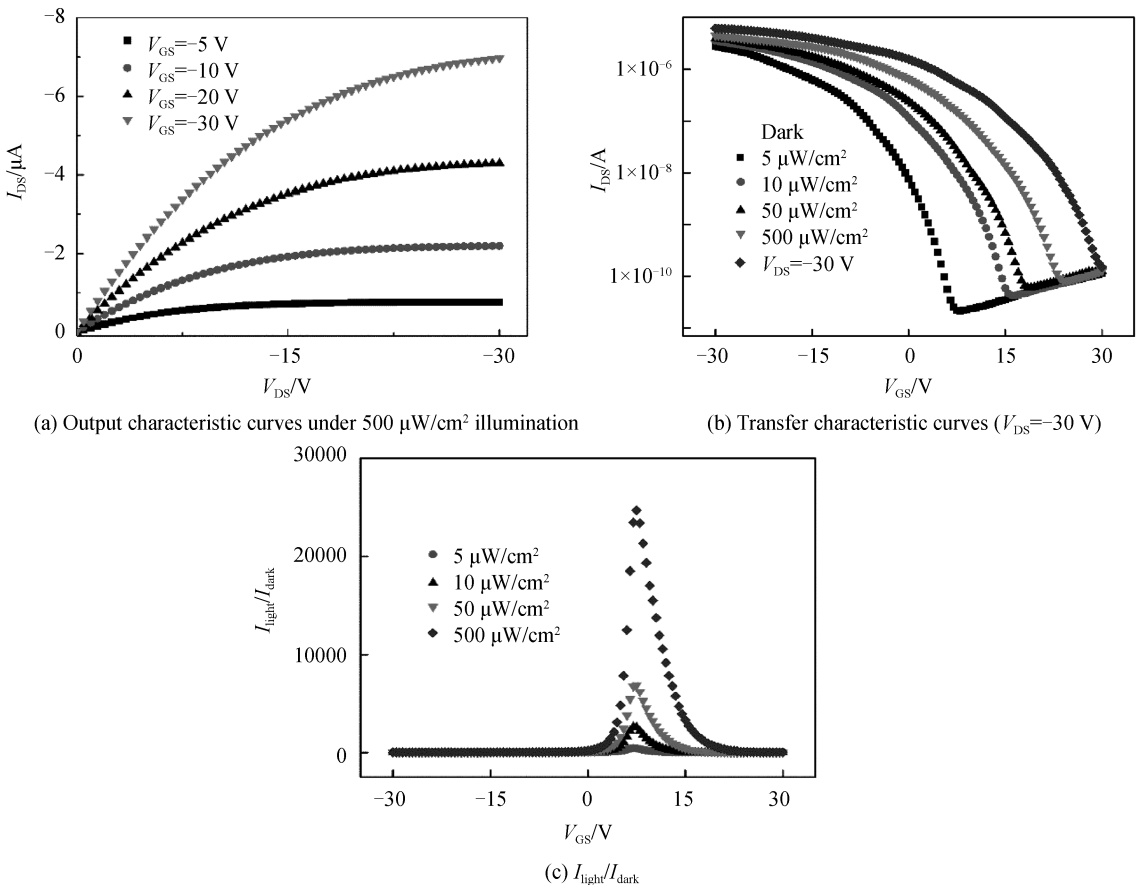


图 5 垂直结构光晶体管的  $I$ - $V$  特性曲线和光敏感性  
Fig.5  $I$ - $V$  characteristic curves and photosensitivity of the VOPTs

势及源漏电极之间的电场作用下分离成自由电子和空穴,对于垂直结构,由于其沟道长度非常短,空穴在沟道中传输的距离很短,与电子相遇而复合的几率变小,与晶界及缺陷发生散射的几率也很小,使半导体中空穴浓度大大增加,最终导致漏电流增加.而光照强度越大,光生空穴浓度就越高,光生电流就越大.并且,相对于无光照时,光照后的阈值电压正向漂移,阈值电压从无光照时的近 5 V 右漂到 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  光照时的大于 30 V.这也与加光照后,半导体层中有更多的光生空穴有关.因为光照后沟道中有更多的光生空穴,即使晶体管在一个更正的栅电压下,沟道中也有足够多的空穴使晶体管开启.这也说明在光探测器中,光可以作为另一个栅极对晶体管进行调控.

对于光晶体管来说,入射光和栅电压都能用来控制沟道的载流子<sup>[19]</sup>.而光敏感性  $P$  是光晶体管的一个重要指标,它定义为加了光照后的器件电流  $I_{\text{light}}$  与暗态下的电流  $I_{\text{dark}}$  的比值,该比值随栅电压和光照强度的变化曲线如图 5(c)所示.由于暗态情况下,器件电流在近 5 V(开/关态转折点)时最小,故不同光照强度下  $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$  在此处达到最大,由曲线可知,在光照强度为 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,  $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$  达到最大值  $\sim 2.5 \times 10^4$ ,该比值从另一个方面也说明在较小的光照强度下,VOPTs 能产生较大的光生电流.另外,栅电压也能控制 VOPTs 的  $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ .从图中可以看出,光敏感性明显和栅电压有关,当栅电压在近 5 V 时,  $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$  最大.暗态条件下,VOPTs 在  $V_{\text{GS}} \approx 5$  V 时工作在关态,此时的暗态电流很低.光照情况下,器件由于阈值电压的漂移而开启,  $I_{\text{light}}$  由于光生激子和超短的沟道长度的共同作用而明显增加.

对于光晶体管来说,光响应度  $R$  定义为光生电流与入射光功率密度间的比值,该值反映了光晶体管对光信号的反应能力及光电转换的能力,公式为

$$R = \frac{I_{\text{ph}}}{P_{\text{inc}} A} = \frac{I_{\text{light}} - I_{\text{dark}}}{P_{\text{inc}} A} \quad (1)$$

式中,  $I_{\text{ph}}$  代表光生电流,  $P_{\text{inc}}$  为入射光功率密度,  $A$  为器件受光面积.

图 6(a)为 VOPTs 在不同光照强度下,光响应度  $R$  随栅电压的变化曲线.测试中,  $V_{\text{DS}}$  保持 -30 V 不变.从图中可以看出,在低的光照强度下(5  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )器件的最大响应度可达到  $\sim 1500$  A/W.并且随着光照强度的增加,VOPTs 的光响应度慢慢减小,主要是因为光照强度增加后,光生电子浓度更高,导致光生空穴与电子的复合几率更高,相对于光照强度的增加,光生电流并没有成比例的增加.

光晶体管中另一个重要参数为比探测率  $D^*$ ,它反映了光晶体管对弱光的敏感性和弱光的探测能力.其表达式为<sup>[20]</sup>

$$D^* = \frac{\sqrt{S \Delta f}}{P_{\text{NEP}}} \quad (2)$$

$$P_{\text{NEP}} = \frac{i_n}{R} \quad (3)$$

式中,  $\Delta f$  为带宽;  $P_{\text{NEP}}$  为噪声等效功率,  $i_n$  是所测得的噪声电流,由探测器中所有的噪声源所产生的电流共同构成,包括暗态电流的散射噪声、约翰逊噪声和闪烁噪声.但在比探测率的计算中,通常只考虑散射噪声为暗态电流的主要噪声源<sup>[21]</sup>.所以,比探测率  $D^*$  的表达式可转换为

$$D^* = \frac{R}{(2qJ_d)^{1/2}} \quad (4)$$

式中,  $q$  代表单位电荷量,  $J_d$  代表暗态电流密度.

图 6(b)为四种光照强度下 VOPTs 的比探测率  $D^*$  随栅压变化的曲线. VOPTs 器件的比探测率  $D^*$  最大可达  $1.6 \times 10^{14}$  Jones.

测试了该 VOPTs 的光开关特性.在光照强度为 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  的光脉冲(光照 10 s,暗态 5 s)条件下,  $V_{\text{DS}} = -30$  V,  $V_{\text{GS}} = 10$  V,测得其光电流的变化情况,如图 6(c).从图中可以看出,该 VOPTs 有良好的光开关特性,且其上升时间较短,说明 VOPTs 对光具有快速的响应.

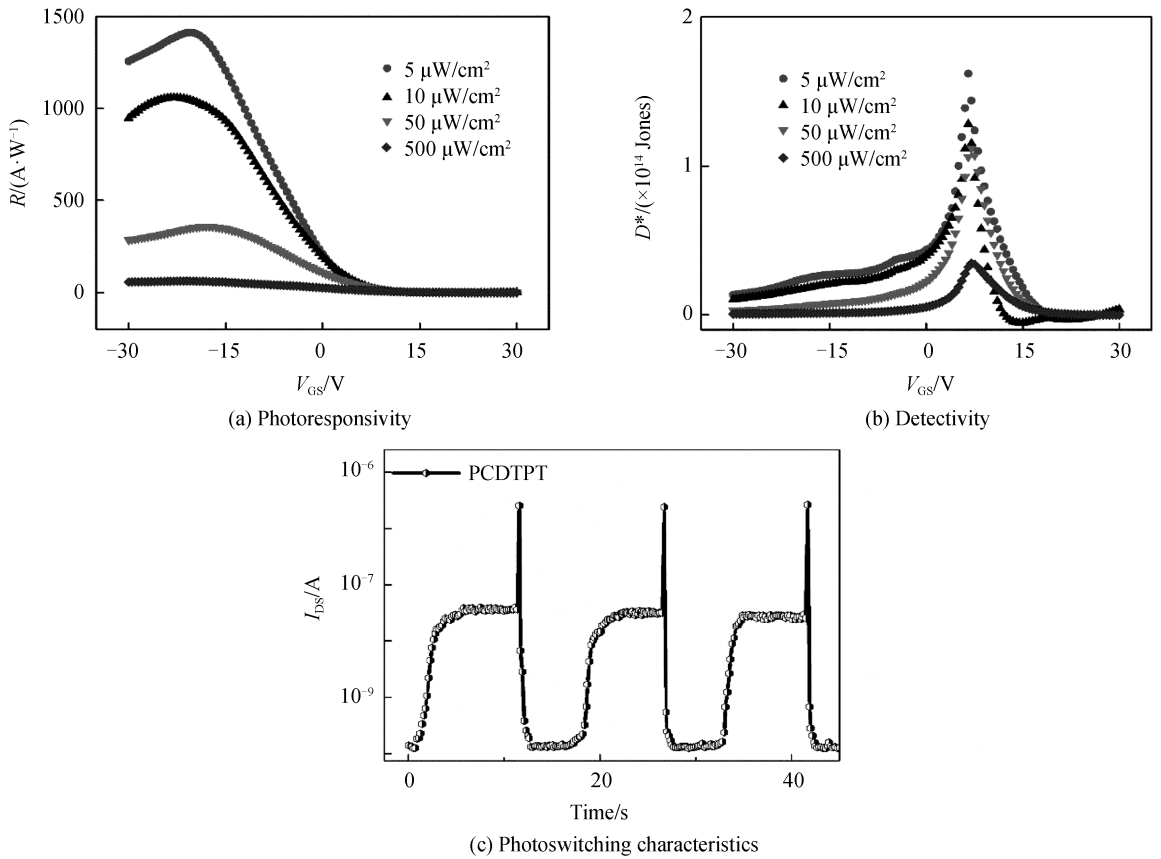


图6 PCDTPT VOPTs的光响应度、比探测率及光开关特性

Fig.6 Photoresponsivity, detectivity and photoswitching characteristics of PCDTPT VOPTs

与文献[22-23]相比,本文光晶体管的重要参数,包括光敏感性  $P$ 、光响应度  $R$  和比探测率  $D^*$ , 都明显更高,见表1.VOPTs 光电性能的提高,主要归因于其采用了垂直结构,使得光生空穴在超短沟道中更易于与光生电子分离,且光生空穴受到晶格原子及缺陷散射的几率更小,使沟道中有更多的光生空穴转换成光生电流。

表1 不同器件的光电特性比较

Table 1 Comparison indifferent device photoelectric performance

Devices	Structure	$P(I_{\text{light}}/I_{\text{dark}})$	$R/(\text{A} \cdot \text{W}^{-1})$	$D^*/\text{Jones}$	Reference
PDBT-T1	Polymer	NA	3.24	$3.2 \times 10^{11}$	22
BPE-PTDCI	Polymer	20	2.5	$1.9 \times 10^{13}$	23
P1; PCBM	BHJ	NA	0.154 4	$2.0 \times 10^{12}$	17
P3HT; PCBM	BHJ	$5.2 \times 10^3$	0.18	$5.3 \times 10^{11}$	18
PCDTPT	Polymer	$2.5 \times 10^4$	1 438	$1.6 \times 10^{14}$	This work
PCDTPT; PCBM	BHJ	$2.4 \times 10^5$	5 936	$1.4 \times 10^{15}$	This work

## 2.2 垂直结构光晶体管的性能优化

对于光晶体管来说,光生多子的传输与光生少子的捕获对光晶体管的光电性能都很重要,只有光生多子更快地传输到电极,并且光生少子尽可能多地被捕获,才能使更多的光生多子转换成光电流.有机光晶体管通常采用单一的有机材料作为吸光层,同时作为光生多子的传输材料,但对于少子的捕获,单一有源层材料的作用很有限.若向吸光的有源层材料中掺杂少量少子捕获材料,构成体异质结,将增大对少子的捕获,并且不会影响多子的传输,从而减小光生多子和少子的复合几率,大大提高光晶体管的光电性能。

因此,通过向 PCDTPT 溶液中掺杂少量 PCBM 来增加一种电子捕获机构,从而提高垂直结构光晶体管的光电性能.图7给出了 PCDTPT 与 PCBM 共混后形成异质结的能级图<sup>[24-26]</sup>,从能级图可以看出,PCBM 的最低未占有分子轨道(Lowest Unoccupied Molecular Orbital, LUMO)能级比 PCDTPT 的 LUMO 能级低。

对于混合异质结光晶体管,当施加光照时,有源层中将产生大量的激子,这些电子空穴对在自建电场的作用下,空穴将以 PCDTPT 为传输通道,快速传输到漏极;由于 PCBM 的 LUMO 能级比 PCDTPT 的低,此时电子将在 PCDTPT 与 PCBM 界面处被 PCBM 所捕获.PCBM 的添加将较大程度地促进电子空穴对的分离,使电子空穴的复合减小,从而进一步增加光生电流.

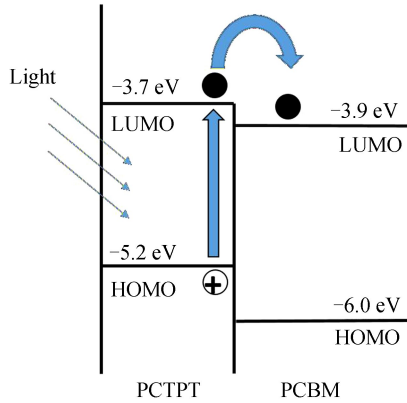


图 7 PCDTPT/PCBM 异质结能级

Fig.7 Energy band of PCDTPT/PCBM heterojunction

为了验证以上工作机理,同时研究 PCBM 掺杂比例对混合光晶体管性能的影响,对掺杂的 PCBM 选取了两种比例,5%PCBM 和 10%PCBM.图 8(a)为混合 VOPTs 在无光照和四种光照强度下(5, 10, 50, 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ )的转移特性曲线(光波长为 700 nm),光照时  $V_{\text{DS}} = -30\text{ V}$ ,  $V_{\text{GS}}$  在  $-30 \sim 30\text{ V}$  之间变化.从转移曲线可以看出,在无光照情况下,混合 VOPTs 器件的关态电流和开态电流都有所降低.关态电流降低主要因为掺杂 PCBM 后,关态情况下的电流实际由空穴电流和电子电流共同构成,而 PCBM 易俘获电子,使关态时电子电流减小,所以,关态时的总电流减小;而开态时电流降低,主要因为掺杂 PCBM 后,PCBM 作为电子俘获中心,俘获电子后该区域带负电,易对空穴产生束缚或散射作用,从而使开态时空穴电流减小.但是,对于加光照后的混合 VOPTs 器件转移特性曲线,开态电流有少许增加,并且,其阈值电压比纯的 VOPTs 正向偏移更明显,说明混合 VOPTs 器件相对于纯有源层的 VOPTs 器件,光生电流更大,这也验证了上述机理,即加光照后,混合有源层中的光生电子被 LUMO 能级更低的 PCBM 所捕获,有更多的光生空穴快速传输到漏电极,使光生电流变大.图 8(b)为光敏感性  $P$  在不同光照强度下随栅压变化的曲线,由该曲线可以看出,当光照强度达到 500  $\mu\text{W}/\text{cm}^2$  时,其光敏感性  $P$  (即  $I_{\text{light}}/I_{\text{dark}}$ ) 最高可达  $\sim 2.4 \times 10^5$ ,与纯的 VOPTs 相比提高了近 10 倍,说明加光照后,混合 VOPTs 的电流变化量(暗态到加光照电流的变化)比纯的 VOPTs 大很多.

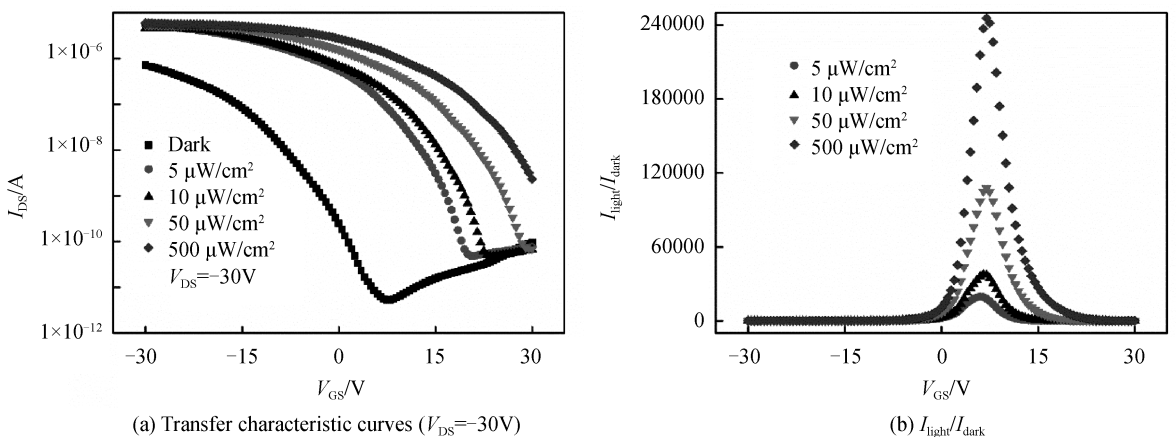


图 8 PCDTPT/PCBM(5%PCBM)混合 VOPTs 在不同光强下的转移特性曲线和光敏感性

Fig.8 Transfer characteristic curves and photosensitivity of the PCDTPT/PCBM (5%PCBM) hybrid VOPTs under different illuminations

图9为混合VOPTs的光响应度 $R$ 和比探测率 $D^*$ 在不同光照强度下随栅压变化的曲线.对于混合VOPTs,随着PCBM的添加,其光响应度 $R$ 值达到约6000 A/W,是纯VOPTs的4倍;比探测率 $D^*$ 达到约 $1.4 \times 10^{15}$  Jones,是纯VOPTs的近9倍.这些光探测性能方面的较大提升,都是因为垂直结构光晶体管有源层中添加少量PCBM后,光生电子被添加的PCBM所捕获,而垂直沟道中光生空穴传输到漏电极的距离较短,使更多的光生空穴流向漏极,致使光生电流变大.

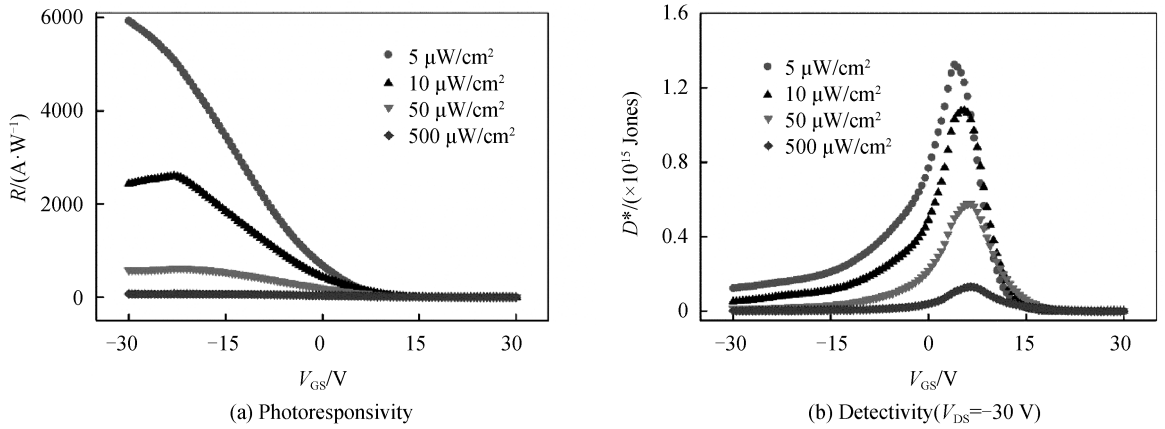


图9 PCDTPT/PCBM(5%PCBM)混合VOPTs在不同光强下的光响应度和比探测率

Fig.9 Photoresponsivity and detectivity of the PCDTPT/PCBM (5%PCBM) hybrid VOPTs under different illuminations

为了研究所掺杂的PCBM比例对混合VOPTs性能的影响,做了掺杂比例为10%的实验,在不同光照强度下的转移特性曲线如图10所示.由图可以看出,在暗态情况下,掺杂10%PCBM的器件,其关态电流比用纯PCDTPT做有源层的VOPTs更高,比掺杂5%PCBM的混合VOPTs器件的关态电流高几乎1个量级.其原因主要在于,对于掺杂10%PCBM的VOPTs器件,由于PCBM掺杂较多,而垂直方向膜厚较小,所以,一种可能是较多的PCBM在垂直方向上连成了一个电子通道,无光照关态情况下,电子电流增加,导致关态总电流增加.而加光照情况下,由于垂直方向PCBM连接成了电子通道,该电子通道中电子处于饱和状态,已不能俘获多余电子,光生激子较难分离,且该电子通道容易俘获并复合沟道原有空穴,导致沟道空穴电流变小;当光照强度越大时,光生电子容易形成更多的电子通道,而复合更多的沟道空穴,使沟道空穴电流越小,所以,不同光照情况下,器件阈值电压反向漂移不同.总之,当掺杂10%PCBM后,混合VOPTs在暗态时的关态电流更大,而光生空穴电流变小,根据光响应度公式(1)和比探测率公式(4)可知,其光相应度和比探测率将大大减小.

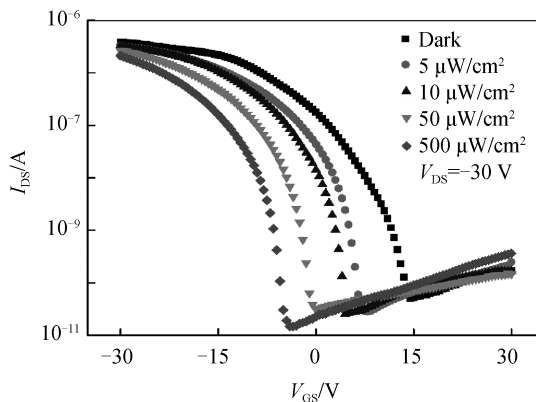


图10 PCDTPT/PCBM(10%PCBM)混合VOPTs在不同光强下的转移特性曲线

Fig.10 Transfer characteristic curves of the PCDTPT/PCBM (10%PCBM) hybrid VOPTs under different illuminations

### 3 结论

本文利用喷墨打印可快速图案化有源层的优点,制备了一种垂直结构的光晶体管.由于垂直结构有源层



的厚度即为光晶体管的沟道长度,使光晶体管具有超短沟道的特点,对光晶体管施加光照后,光生电子和空穴易在强电场作用下分离,超短沟道更进一步促进了这种分离,使光生电流变大,从而提高了光晶体管的探测器性能.另外,通过向垂直结构光晶体管的有源层中添加少量(5wt%PCBM)电子捕获材料,使光生电子被捕获,而光生空穴在强电场和超短沟道的共同作用下快速传输至漏电极,整个垂直光晶体管的光生电流变大,使其光响应度相对于纯的垂直结构光晶体管提高了4倍(达到6000A/W),而比探测率提高9倍(达到 $1.4 \times 10^{15}$  Jones).

### 参考文献

- [1] PERSANO L, CAMPOSEO A, PISIGNANO D. Active polymer nanofibers for photonics, electronics, energy generation and micromechanics[J]. *Progress in Polymer Science*, 2015, **43**: 48-95.
- [2] PEUMANS P, YAKIMOV A, FORREST S R. Small molecular weight organic thin-film photodetectors and solar cells [J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, **93**(7): 3693-3723.
- [3] RENSHAW C K, XU X, FORREST S R. A monolithically integrated organic photodetector and thin film transistor[J]. *Organic Electronics*, 2010, **11**(1): 175-178.
- [4] ZHAO D, WU M, QIN R, *et al.* Low dark-current and high-photodetectivity transparent organic ultraviolet photodetector by using polymer-modified ZnO as the electron transfer layer[J]. *Optics Letters*, 2018, **43**(14): 3212-3215.
- [5] SONG D, ZARE B F, HYUN W J, *et al.* All-printed, self-aligned carbon nanotube thin-film transistors on imprinted plastic substrates[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2018, **10**(18): 15926-15932.
- [6] CHUNG S J, CHO K J, LEE T. Thin-film transistors: recent progress in inkjet-printed thin-film transistors[J]. *Advanced Science*, 2019, **6**(6): 1970031.
- [7] GELINCK G H, KUMAR A, van der STEEN J L, *et al.* X-ray imager using solution processed organic transistor arrays and bulk heterojunction photodiodes on thin, flexible plastic substrate[J]. *Organic Electronics*, 2013, **14**(10): 2602-2609.
- [8] NAU S, WOLF C, SAXS, *et al.* Organic non-volatile resistive photo-switches for flexible image detector arrays[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(6): 1048-1052.
- [9] NOH Y Y, KIM D Y, YOSHIDAY, *et al.* High-photosensitivity p-channel organic phototransistors based on a biphenyl end-capped fused bithiophene oligomer[J]. *Applied Physics Letters*, 2005, **86**(4): 043501.
- [10] KIM S, CHOI Y J, CHOI Y, *et al.* Large-area schottky barrier transistors based on vertically stacked graphene - metal oxide heterostructures[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(30): 1700651.
- [11] YUAN S, YANG Z, XIE C, *et al.* Ferroelectric-driven performance enhancement of graphene field-effect transistors based on vertical tunneling heterostructures[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(45): 10048-10054.
- [12] SHIM J, KIM H S, SHIM Y S, *et al.* Extremely large gate modulation in vertical graphene/WSe<sub>2</sub> heterojunction barristor based on a novel transport mechanism[J]. *Advanced Materials*, 2016, **28**(26): 5293-5299.
- [13] YAN Y, WU X, CHEN Q, *et al.* High-performance low-voltage flexible photodetector arrays based on all-solid-state organic electrochemical transistors for photosensing and imaging[J]. *ACS applied materials & interfaces*, 2019, **11**(22): 20214-20224.
- [14] MCCARTHY M A, LIU B, RINZLER A G. High current, low voltage carbon nanotube enabled vertical organic field effect transistors[J]. *Nano Letters*, 2010, **10**(9): 3467-3472.
- [15] HU D, WANG X, CHEN H, *et al.* High performance flexible nonvolatile memory based on vertical organic thin film transistor[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(41): 1703541.
- [16] ZHANG H, ZHANG Y, SONG X, *et al.* Short channel quantum dot vertical and lateral phototransistors[J]. *Advanced Optical Materials*, 2017, **5**(2): 1600434.
- [17] HU L, HAN J, QIAO W, *et al.* Enhancement of photodetector performance by tuning donor-acceptor ratios in diketopyrrolopyrrole-and thiophene-based polymers[J]. *Polymer*, 2016, **99**: 427-433.
- [18] KIM H, LEE K T, ZHAO C, *et al.* Top illuminated organic photodetectors with dielectric/metal/dielectric transparent anode[J]. *Organic Electronics*, 2015, **20**: 103-111.
- [19] WANG Jia-wei, LIU Feng-jing, WANG Gong-tang, *et al.* Novel organic-perovskite hybrid structure forward photo field effect transistor[J]. *Organic Electronics*, 2016, (38): 158-163.
- [20] CHEN G, YU Y, ZHENG K, *et al.* Fabrication of ultrathin Bi<sub>2</sub>S<sub>3</sub> nanosheets for high-performance, flexible, visible-NIR photodetectors[J]. *Small*, 2015, **11**(24): 2848-2855.
- [21] DOU L, YANG Y M, YOU J, *et al.* Solution-processed hybrid perovskite photodetectors with high detectivity[J]. *Nature Communications*, 2014, **5**: 5404.
- [22] GAO H, FENG J, ZHANG B, *et al.* Capillary-bridge mediated assembly of conjugated polymer arrays toward organic photodetectors[J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, **27**(34): 1701347.

- 
- [23] LIU X, LEE E K, KIM D Y, *et al.* Flexible organic phototransistor array with enhanced responsivity via metal-ligand charge transfer[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2016, **8**(11): 7291-7299.
- [24] PHAN H, WANG M, BAZAN G C, *et al.* Electrical instability induced by electron trapping in low-bandgap donor-acceptor polymer field-effect transistors[J]. *Advanced Materials*, 2015, **27**(43): 7004-7009.
- [25] LUO C, KYAW A K K, PEREZ L A, *et al.* General strategy for self-assembly of highly oriented nanocrystalline semiconducting polymers with high mobility[J]. *Nano Letters*, 2014, **14**(5): 2764-2771.
- [26] FAN L, DING Y, SHI B, *et al.* Novel insight into the function of PC61BM in efficient planar perovskite solar cells[J]. *Nano Energy*, 2016, **27**: 561-568.

---

**Foundation item:** The National Key Research and Development Program of China (No.2016YFB0401103), the Natural Science Foundation of Fujian Province (Nos.2017J05097, 2018J01535), Fujian Young and Middle-aged Teacher Education and Scientific Research Projects (No.JAT160334), Foundation of Fuzhou University Talents (No.XRC-17047)