

文章编号: 1007-2780(2012)03-0313-05

高性能顶栅结构有机薄膜晶体管

洪 飞, 谭 莉, 朱棋锋, 向长江, 韩学斌, 张其国, 郭晓东, 申剑锋

(中国科学院 上海高等研究院 新型显示技术研究中心, 上海 201210, E-mail: hongf@casail.com)

摘 要: 采用六联苯(p-6P)和氧钒酞菁(VOPc)作为有源层材料, 利用弱外延生长技术制备有机薄膜晶体管(OTFT)。在相同的工艺条件下制备了顶栅结构(top-gate)和底栅结构(bottom-gate)两种器件构型, 发现两种不同结构的 OTFT 器件特性存在较大的差异, top-gate OTFT 的迁移率比 bottom-gate OTFT 高很多。在顶栅结构的器件构型中获得了较高的器件特性参数, 迁移率达到 $1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。研究了弱外延生长技术应用在两种不同器件构型中的差异, 并解释了顶栅结构 OTFT 迁移率较高的原因。

关 键 词: 有机薄膜晶体管; 顶栅结构; 弱外延; 氧钒酞菁

中图分类号: TN321.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20122703.0313

High Performance Organic Thin Film Transistor Based on Top-Gate Configuration

HONG Fei, TIAN Li, ZHU Qi-feng, XIANG Chang-jiang,

HAN Xue-bin, ZHANG Qi-guo, GUO Xiao-dong, SHEN Jian-feng

(New Display Technology Research Center, Shanghai Advanced Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201210, China, E-mail: hongf@casail.com)

Abstract: Organic thin film transistors based on Weak Epitaxy Growth (WEG) technology are fabricated with two different design: top-gate and bottom-gate configurations. The active layer materials of the OTFT are p-6P and vanadyl phthalocyanine (VOPc). The two structural OTFTs are prepared under the same process conditions, and it is found that the device performance is different. The mobility of top-gate OTFT is much higher than that of the bottom-gate OTFT. A high mobility of $1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ is obtained in the top-gate structure. The differentiation of top-gate and bottom-gate OTFTs is studied by Weak Epitaxy Growth (WEG) technology, and the reasons of higher mobility OTFT based on the top-gate configuration is explained.

Key words: organic thin film transistor; top-gate configuration; weak epitaxy growth; VOPc

1 引 言

随着有源显示的发展, 越来越多的 TFT 技术受到关注^[1,2]。有机薄膜晶体管(OTFT)因其在柔性显示、智能卡、传感器和射频识别卡等领域

的潜在应用价值^[3-5], 近些年得到了快速的发展。与无机薄膜晶体管相比, OTFT 具有制备工艺简单, 可大面积制备, 成本低等优点, 而且 OTFT 与柔性衬底有较好的兼容性, 有望用于柔性 AMOLED 显示的驱动技术^[6]。但是 OTFT 一直没

收稿日期: 2011-12-27; 修订日期: 2012-01-16

基金项目: 上海市科委科研项目(No. 10dz1100300)

作者简介: 洪飞(1983-), 男, 河南商丘人, 硕士, 工程师, 主要从事有机电子器件方面的研究。

有得到应用,其中一个最主要的原因就是有机半导体的化学和热稳定性比较差,在溶液加工的过程中其电学特性会受到很大的破坏。因此,对高稳定性的有机半导体材料的研究将会推动 OTFT 的商业化应用。在所有的有机材料中,金属酞菁化合物有着良好的化学稳定性和热稳定性,将是 OTFTs 有源层的极佳的候选材料。遗憾的是酞菁化合物的载流子的迁移率相对于目前比较热门的并五苯材料(迁移率可达到 $5\sim 8\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$)来说太低了^[7],所以如何有效地提高以酞菁化合物为有源层的 OTFT 器件的迁移率是很有意义的事情。2007 年,中科院应化所闫东航研究组首次提出了弱外延(weak epitaxy growth, WEG)的生长方法将酞菁化合物的迁移率提高了 2 个数量级^[8],随后又采用弱外延生长技术将氧钒酞菁(VOPc)OTFT 的迁移率提高到 $1\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 以上^[9]。至此以酞菁化合物为代表的 OTFT 迁移率已达到并超过了非晶硅的水平,OTFT 产业化近在眼前。

目前报道的关于弱外延技术大量工作都是集中在对有机半导体层的研究,所制备的 OTFT 均是采用底栅结构的器件构型。而弱外延技术在不同器件构型中的应用还没有被报道过。本文工作中,我们分别在玻璃基板上制备了底栅结构(bottom-gate)和顶栅结构(top-gate)的 OTFT,其中有机半导体层选用六联苯(p-6P)和 VOPc 弱外延生长方法制备。我们发现弱外延生长技术应用于顶栅结构的器件构型中其迁移率水平高出底栅结构的 OTFT 近 1 倍,得到的最高的 OTFT 器件迁移率可达到 $1.6\text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$,并针对半导体层的结构做出了解释。这将进一步扩展 OTFT 的应用领域并加快 OTFT 的应用步伐。

2 实 验

试验中 OTFT 器件结构示意图如图 1 所示。其中图 1(a)为底栅结构,OTFT 构建在玻璃基板上,通过溅射 Mo 金属 300 nm 形成栅电极(Gate),采用 PECVD 方法形成 300 nm 厚的 SiN_x 膜作为栅绝缘层。为了改善有机半导体与绝缘层接触的界面特性^[10-11],将 200 nm 的 BCBO 旋涂于 SiN_x 之上,作为聚合物绝缘层,整体绝缘层电容 $9\text{ nF}/\text{cm}^2$ 。有机材料 p-6P、VOPc 通过商业途径购买。在基板温度 $170\text{ }^\circ\text{C}$ 的条件下,p-6P

(3 nm)和 VOPc(40 nm)采用真空热蒸发的方式依次沉积于 BCBO 绝缘层上。最后采用漏掩膜版的方式热蒸发蒸镀 Au 40 nm 充当 OTFTs 的源漏电极,沟道宽长比为 $2\ 000\ \mu\text{m}/100\ \mu\text{m}$ 。图 1(b)为顶栅结构示意图,首先玻璃上旋涂 200 nm 厚的 BCBO 作为 p-6P 生长的衬底,保证了顶栅结构和底栅结构有源层的成膜条件相同。然后采用与底栅结构制备条件相同的方法依次制备半导体层 p-6P/VOPc、Au 源漏电极、BCBO 聚合物层、 SiN_x 绝缘层和栅电极 Mo,构成顶栅构型的器件结构。所有器件 I-V 性能采用 Agilent 公司的半导体测试仪 B1500A 测试,原子力图像(AFM)通过 SPI400 获得。电学特性的测试均在室温大气环境下进行。

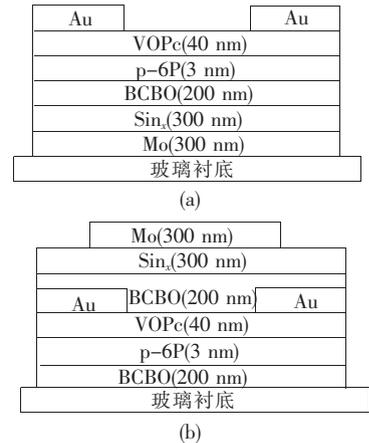


图 1 OTFT 器件结构示意图。(a)底栅结构,(b)顶栅结构。
Fig.1 Structure of OTFT. (a) bottom gate, (b) top-gate.

3 结果与讨论

图 2 给出了顶栅结构(top-gate)和底栅结构(bottom-gate)的 OTFT 的转移特性曲线,扫描电压 V_{DS} 固定在 -20 V ,栅极电压从 5 V 扫描至 -20 V ,扫描间隔 0.5 V 。可看出器件工作在典型的 p 沟道增强型传输模式。OTFT 的阈值电压可从图 2(a) $|I_{\text{D}}|$ 的平方根与栅源电压 V_{g} 的对应关系曲线获取^[12]。拟合得出 top-gate OTFT 的阈值电压 (V_{T})为 -7 V ,bottom-gate OTFT 的 $V_{\text{T}} = -6\text{ V}$ 。

OTFTs 的场效应迁移率可以从转移特性曲线的饱和区提取,使用公式(1):

$$I_{\text{DS}} = \frac{WC_i\mu}{2L}(V_{\text{GS}} - V_{\text{T}})^2 \quad (1)$$

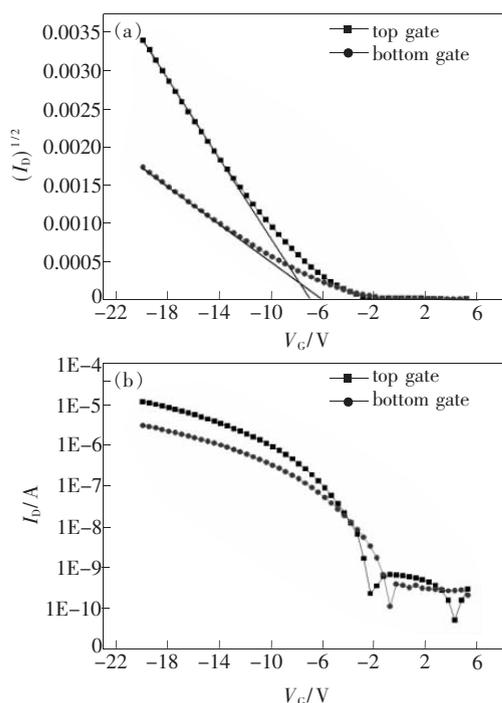


图 2 顶栅结构和底栅结构的 OTFT 的转移特曲线。(a) $|I_D|$ 的平方根与栅源电压 V_G 的对应关系曲线, (b) $\log |I_D|$ 与栅源电压 V_G 的对应关系曲线。

Fig. 2 Transfer characteristic of top-gate and bottom gate OTFT. (a) $\text{Sqrt} |I_{DS}| - V_g$ curve, (b) $\log |I_{DS}| - V_g$ curve.

这里 W 和 L 分别是沟道宽度和长度, C_i 是栅绝缘层的电容, μ 是场效应迁移率, V_{GS} 是栅源电压, V_T 是阈值电压。计算得到 bottom-gate OTFT 迁移率为 $0.86 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$, top-gate OTFT 的迁移率为 $1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。从图 2(b) 可看出两种器件的开关电流比均为 10^{-5} 量级。

首先, 我们考察不同器件构型的半导体层的生长是否存在差异。图 3(a)、(b) 分别给出了底栅结构和顶栅结构下制备的 p-6P 和 VOPc 的 AFM 表面形貌图。其中图片的左上角为分别为生长在玻璃衬底/Mo/SiN_x/BCBO 上和生长在玻璃衬底/BCBO 上的 p-6P 单层的 AFM 形貌。可见在底栅构型和顶栅构型中同样的制备条件下 p-6P 的生长形貌较为近似, 都是第一分子层连续, 第二分子层零星出现, 表面较为平坦。分别在这两种 p-6P 薄膜上生长的 VOPc 薄膜也较为类似, 从表面形貌来看图 3(a) 和 (b) 基本没有差异, 且两种薄膜的均方根粗糙度也都在 3.5 nm 左右。

这就说明不同的器件结构下, 有机半导体的生长基本没有差异。可见造成 OTFT 器件特性差

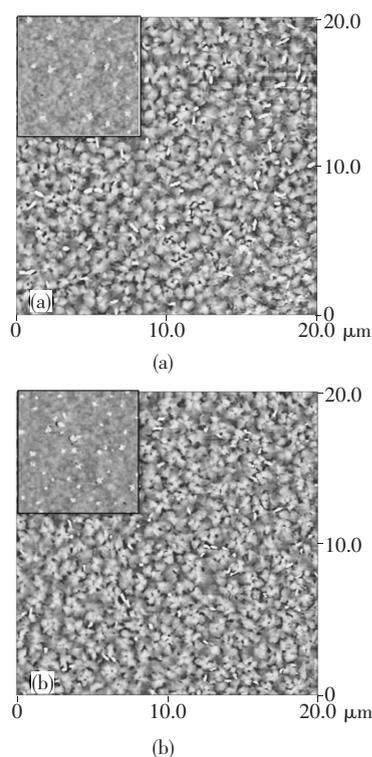


图 3 (a)底栅结构的 p-6P/VOPc AFM 形貌, (b)顶栅结构的 p-6P/VOPc AFM 形貌。

Fig. 3 (a) p-6P/VOPc AFM morphology in bottom-gate configuration, (b) p-6P/VOPc AFM morphology in top-gate configuration.

异的来源应该在于器件结构本身。从阈值电压方面来看, 顶栅结构 ($V_T = -7 \text{ V}$) 略高于底栅结构 ($V_T = -6 \text{ V}$), 这可能与半导体层与绝缘层的接触界面有关系。顶栅结构中 BCBO 旋涂在 VOPc 之上, 而 VOPc 的表面粗糙度约为 3.5 nm, 这就造成了绝缘层和半导体层 VOPc 的接触界面的平坦程度较差。而底栅结构中则是半导体层生长在较为平坦的 BCBO 绝缘层之上, 相对来说顶栅结构的绝缘层界面处的陷阱态可能就会较多, 这就导致了电荷积累的过程中空穴被陷阱所捕获, 从而导致顶栅结构器件的阈值电压相对较高一些。

而在 OTFT 器件工作的过程中, 在栅源电场 (V_{GS}) 的作用下, 空穴从源极注入, 大量的载流子会汇聚在半导体层接近绝缘层几个纳米的厚度的薄层^[13], 在漏源横向电场 (V_{DS}) 的作用下, 载流子在半导体层内就会沿着这一薄层传输, 从漏极流出。图 4(a)、(b) 分别给出了弱外延方法制备的 OTFT 底栅结构和顶栅结构的空穴累积和传输示意图。

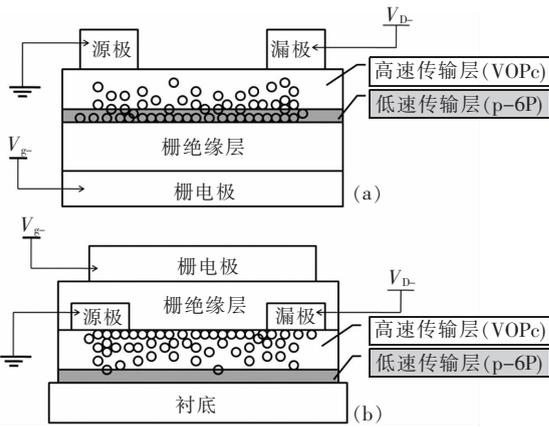


图 4 底栅结构(a)和顶栅结构(b)空穴累积和传输示意图

Fig. 4 Bottom-gate (a) and top-gate (b) holes accumulate and transfer schematic diagram

我们知道在弱外延生长技术是首先在绝缘层上生长 2~3 nm 的 p-6P 作为诱导层,然后在 p-6P 上沉积酞菁化合物半导体材料,这样酞菁化合物分子才会排列有序地生长^[8-9],其 OTFT 的半导体层是由 p-6P 和酞菁化合物 2 种材料构成的。在 OTFT 工作的过程中,顶栅构型的器件和底栅构型的器件其载流子的累积和传输位置则会存在较大的差别。如图 4(a)所示,在底栅结构中大量载流子会累积在 p-6P 层和 VOPc 的下层,载流子的传输介质为 p-6P 和 VOPc 两种材料。而在图 4(b)顶栅结构中,大多数载流子累积和传输的介质基本上都是 VOPc 层来承担。我们知道,p-6P 材料在半导体层中的主要作用是作为 VOPc 有序生长的诱导层,其本身也是一种 p 型半导体材料,但迁移率水平极低(约为 $10^{-2} \sim 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$

级别),而高有序的 VOPc 薄膜才是真正的载流子的高效传输层。鉴于以上分析,就可以合理地解释造成顶栅结构和底栅结构迁移率差异的原因:底栅结构中低速传输层 p-6P 和高速传输层 VOPc 共同承担载流子的传输,这样就会导致有很大一部分电荷在绝缘层界面处传输时受到 p-6P 的阻碍,传输速度较低,从而限制了整体载流子的传输效率。而在顶栅结构中,载流子的传输仅由高速传输的 VOPc 层承担,传输速度较快。所以在同样的栅源电压和漏源电压下,顶栅结构的漏极电流 I_D 则会明显高于底栅结构,如图 2(b)所示。采用弱外延生长技术制备 OTFT 时,顶栅结构的器件构型在器件特性方面会优于底栅结构的器件构型。

4 结 论

在相同的工艺条件下制备了顶栅结构和底栅结构的 OTFTs,器件源层的制备采用弱外延生长技术。结果显示,不同结构的 OTFT 器件特性存在较大的差异,top-gate OTFT 的迁移率会高出 bottom-gate OTFT 近 1 倍。其主要原因是不同的器件构型造成了载流子积累和传输的位置不同,底栅结构中载流子积累和传输发生在 p-6P 和 VOPc 双层内,限制了载流子的传输速度。而在顶栅结构中载流子的积累和传输基本上都发生在高效的 VOPc 层,获得的器件的迁移率水平较高,最高的迁移率达到 $1.6 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$ 。在稳定性较好的酞菁化合物上获得如此高的迁移率水平,将会更有利于推动 OTFT 产业化的进程。

参 考 文 献:

- [1] 吴为敬,颜骏,许志平,等. IGZO TFT 与 ZnO TFT 的性能比较 [J]. 液晶与显示, 2011,26(2): 147-153.
- [2] 徐小丽,刘如,郭小军,等. 基于不同 TFT 技术的 AMOLED 像素电路仿真分析 [J]. 液晶与显示, 2010,25(4): 565-568
- [3] Zaumseil Z, Friend R H, Sirringhaus H, *et al.* Spatial control of the recombination zone in an ambipolar light-emitting organic transistor [J]. *Nature Mat.*, 2006, (1):69-74.
- [4] Crone B, Dodabalapur A, Lin Y Y, *et al.* Large-scale complementary integrated circuits based on organic transistors [J]. *Nature*, 2000, (403): 521-523.
- [5] Someya T, Sekitani T, Kato Y, *et al.* A large-area, flexible pressure sensor matrix with organic field-effect transistors for artificial skin applications [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 2004, (101):9966-9970.
- [6] Kitamura M, Imada T, Arakawa Y, Organic light-emitting diodes driven by pentacene-based thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 83(16):3410-3412.

- [7] Kelly T W, Muyres D V, Baude P F, *et al.* High performance organic thin film transistors [J]. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, 2003, 771:169-179.
- [8] Wang H B, Zhu F, Ya D H, *et al.* Weak Epitaxy Growth Affording High-Mobility Thin Films of Disk-Like Organic Semiconductors [J]. *Adv. Mater.*, 2007, 19(16):2168-2171.
- [9] Wang H B, Song D, Yan D H, *et al.* High mobility vanadyl-phthalocyanine polycrystalline films for organic field-effect transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, (90):253510(1-3).
- [10] 刘向,刘惠,薛钰芝. OTS 修饰的不同厚度酞菁铜 OTFT 的研究 [J]. 液晶与显示, 2009, 24(1):66-70.
- [11] 袁剑锋,闫东航,许武. 有机薄膜晶体管阈值电压漂移现象的研究 [J]. 液晶与显示, 2004, 19(3):168-173.
- [12] 廖燕平,王军. 有机薄膜晶体管及其集成电路 [J]. 现代显示, 2007, (78): 7-14.
- [13] Lee J, Kim K, Kim J, *et al.* Optimum channel thickness in pentacene-based thin-film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(23):4169-4171.

《发光学报》

——EI 核心期刊 (物理学类; 无线电电子学、电信技术类)

《发光学报》是中国物理学会发光分会与中国科学院长春光学精密机械与物理研究所共同主办的中国物理学会发光分会的学术会刊。该刊是以发光学、凝聚态物质中的激发过程为专业方向的综合性学术刊物。

《发光学报》于 1980 年创刊, 曾于 1992 年, 1996 年, 2000 年和 2004 年连续四次被《中文核心期刊要目总览》评为“物理学类核心期刊”, 并于 2000 年同时被评为“无线电电子学、电信技术类核心期刊”。2000 年获中国科学院优秀期刊二等奖。现已被《中国学术期刊(光盘版)》、《中国期刊网》和“万方数据资源系统”等列为源期刊。英国《科学文摘》(SA)自 1999 年; 美国《化学文摘》(CA)和俄罗斯《文摘杂志》(AJ)自 2000 年; 美国《剑桥科学文摘社网站》自 2002 年; 日本《科技文献速报》(CBST, JICST)自 2003 年已定期收录检索该刊论文; 2008 年被荷兰“Elsevier Bibliographic Databases”确定为源期刊; 2010 年被美国“EI”确定为源期刊。2001 年在国家科技部组织的“中国期刊方阵”的评定中, 《发光学报》被评为“双效期刊”。2002 年获中国科学院 2001~2002 年度科学出版基金“择重”资助。2004 年被选入《中国知识资源总库·中国科技精品库》。本刊内容丰富、信息量大, 主要反映本学科专业领域的科研和技术成就, 及时报道国内外的学术动态, 开展学术讨论和交流, 为提高我国该学科的学术水平服务。

《发光学报》自 2011 年改为月刊, A4 开本, 144 页, 国内外公开发行。国内定价: 40 元, 全年 480 元, 全国各地邮局均可订阅。《发光学报》欢迎广大作者、读者广为利用, 踊跃投稿。

地 址: 长春市东南湖大路 3888 号

《发光学报》编辑部

邮 编: 130033

电 话: (0431)86176862, 84613407

E-mail: fgxbt@126.com

国内统一刊号: CN 22-1116/O4

国际标准刊号: ISSN 1000-7032

国内邮发代号: 12-312

国外发行代号: 4863BM

http://www.fgxb.org