

有机薄膜晶体管中接触效应的研究*

孙钦军 徐 征[†] 赵谔玲 张福俊 高利岩 田雪雁 王永生

(北京交通大学光电子技术研究所, 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044)

(2009 年 11 月 25 日收到; 2010 年 3 月 24 日收到修改稿)

研究了接触效应对有机薄膜晶体管性能的影响. 首先在 n 型重掺杂 Si 片上制备了以 M_oO_3 修饰的 Al 电极为源漏电极的 Pentacene 基 OTFTs (organic thin film transistors), 器件场效应迁移率 μ_{ef} 达到 $0.42 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 阈值电压 V_T 为 -9.16 V , 开关比 4.7×10^3 . 通过中间探针法, 对器件电势分布做了定性判断, 发现源漏端电势分布不均匀; 沟道电阻 R_L 和接触电阻 R_C 都随着栅压 V_G 增加而减小, 并且 R_L 减小的比 R_C 更快; R_L 随源漏电压 V_{DS} 增加缓慢变大. 随后采用电荷漂移理论对其输出特性进行了分析和理论模拟, 发现考虑接触电阻后, 由实验结果计算得出的器件场迁移率增加两倍多, 达到 $1.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 因此如何分析、减小接触电阻是 OTFT 器件提高性能和实现、扩大应用中要解决的重要问题之一.

关键词: 有机薄膜晶体管, 场效应迁移率, 接触效应, 电荷漂移

PACC: 7340L, 7360L, 7340C, 7210B

1. 引 言

有机薄膜晶体管 (OTFTs) 具有成本低、易加工、可大面积制造等优点, 在平板显示、传感器、射频识别卡 (RFID)、集成电路以及数据存储等方面有着巨大的应用潜力, 近年来深受广大研究人员的关注^[1-9]. 其中, 大量的研究集中在开发新的有机半导体材料和优化其绝缘层界面, 以提高器件的场效应迁移率, 且已取得很好的结果^[10-15]. 2006 年, Lee 等^[14] 研究这一界面羟基对 OTFTs 性能的影响, 通过增加这个界面的羟基基团, 使 Pentacene 基的 OTFT 器件场效应迁移率达到了 $5.5 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$; 目前已报道的最高场效应迁移率器件是基于 Pentacene 单晶为有源层的 OTFT 器件, 室温下空穴迁移率达 $35 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 225 K 时空穴迁移率则达到了 $58 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ ^[15].

然而在实际应用中, 由于 OTFT 器件响应频率太低, 影响了其大规模应用于有机电子工业. 以 RFID 为例, 有机 RFID 工作的标准频率为 13.56 MHz , 而目前制备的 OTFTs 的响应频率仅为 $0.1-1 \text{ MHz}$. 我们

知道 OTFT 器件的响应频率 F 反比于沟道长度 L 的二次方, 因此, 提高响应频率的一个重要方法就是缩短沟道长度. 当沟道长度缩短时, 沟道电阻变小, 接触电阻的影响就会增加. 因而研究接触效应并减小接触电阻逐渐成为一个急需解决的问题^[16-18].

一般认为 OTFT 器件中接触电阻产生的主要原因是电极与有机层之间的注入势垒. MoO_3 超薄层能调节复合电极的功函数, 减小注入势垒^[19], 同时有效阻止金属电极向有机层扩散和渗透^[20]. 因而本文采用 MoO_3 做缓冲修饰层. 增加缓冲层后金属电极没有与有机层直接接触, 不需要选用功函数较高但价格昂贵的 Au, 因此本文选用了廉价的 Al 做源漏电极.

本文通过对实验数据进行理论模拟, 研究了接触效应对 OTFT 器件的影响. 成功制备了以 M_oO_3 修饰的 Al 电极为源漏电极的 Pentacene 基 OTFT 器件. 通过传统的 MOSFET (metal-oxide-semiconductor field-effect transistor) 公式得到器件的场迁移率为 $0.42 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 阈值电压 -9.16 V , 开关比 2.1×10^3 . 随后采用中间探针法, 对器件电势分布做了定

* 国家自然科学基金 (批准号: 10774013, 10804006, 10974013, 60978060), 国家高技术研究发展计划 (批准号: 2006AA03Z0412), 教育部博士点基金 (批准号 20070004024), 博士点新教师基金 (批准号: 20070004031), 北京市科技新星计划 (批准号: 2007A024), 国家杰出青年科学基金 (批准号: 60825407) 资助的课题.

[†] 通讯联系人. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

性判断,发现源漏端电势分布不均匀; R_L 和 R_C 都随着 V_C 增加而减小,并且 R_L 减小的比 R_C 更快; R_L 随 V_{DS} 增加缓慢变大. 对器件的输出曲线进行理论模拟,结果表明考虑接触效应后,从实验结果计算得出的器件场效应迁移率提高了 2 倍多,达到 $1.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

2. 实 验

我们选用重掺杂 n 型 Si 片为衬底,器件结构如图 1 所示. 首先在基片上热氧化生长 170 nm 的 SiO_2 , 分别用酒精、丙酮超声清洗 $15\text{--}25 \text{ min}$, 随后用去离子水 ($18 \text{ M}\Omega$) 超声清洗 15 min 数遍. 用氮气吹干,放入紫外臭氧处理盒中,紫外线臭氧处理 20 min 后放入热蒸发镀膜机蒸镀 OTFT 器件的有源层 Pentacene, 制备过程中真空度为 $1 \times 10^{-4} \text{ Pa}$, 生长速率 $0.01\text{--}0.03 \text{ nm/s}$, 衬底温度为常温,衬底旋转速率 12 r/min . 然后将制备好有源层的器件经过中转室传送到热蒸发镀膜机无机腔内,中转室真空度保持在 $2 \times 10^{-1} \text{ Pa}$ 以上. 在预先放置好掩膜装置的无机腔内依次掩膜蒸镀 MoO_3 , Al 电极, 生长速率分别为 $0.03\text{--}0.1 \text{ nm/s}$, $0.5\text{--}1 \text{ nm/s}$. 制备过程的真空度在 $2 \times 10^{-3} \text{ Pa}$ 以上,衬底旋转速率 20 r/min . 器件制备的具体参数如表 1 所示. 将制备好的 OTFT 器件放入有高纯氮循环保护的手套箱中, 90°C 退火 1 h , 待器件温度冷却至室温(用时 $5\text{--}10 \text{ min}$), 从手套箱中取出测试.

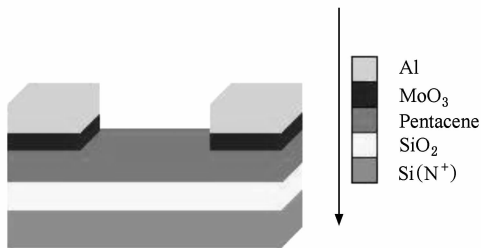


图 1 底栅 OTFT 器件结构示意图

表 1 OTFT 器件制备的具体参数表

	真空度 /Pa	衬底转速 /(r/min)	生长速率 /(nm/s)	膜层厚度 /nm	材料纯度 /%
SiO_2	—	—	0.1	170	99.99
Pentacene	1×10^{-4}	12	$0.01\text{--}0.03$	40	98
MoO_3	2×10^{-3}	20	$0.03\text{--}0.1$	10	99.8
Al	2×10^{-3}	20	$0.5\text{--}1$	120	99

采用 KEITHLEY I - V 系统测量器件的电学特

性,该系统主要包括 KEITHLEY 2612, KEITHLEY-2410 和 LPT 型通用探针台等. 所有测量过程都是在室温、暗室条件下进行的.

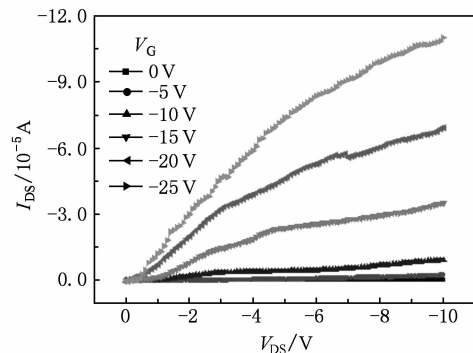


图 2 OTFT 器件的输出特性

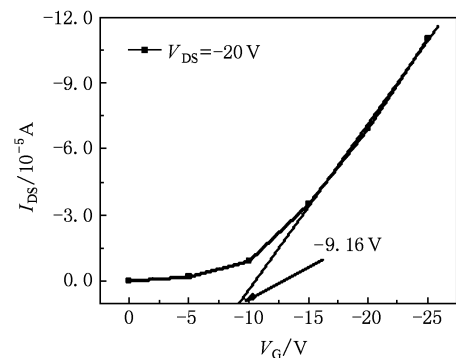


图 3 OTFT 器件的转移曲线

3. 结果与讨论

目前,大多数 OTFTs 都是沿用 MOSFET 中采用缓变沟道近似法得到的公式进行计算的^[21-25]. 在 MOSFET 中,输出电流表达式为

$$I_{DS} = \frac{WC_i\mu_{ef}}{L} \left[(V_{GS} - V_T)V_{DS} - \frac{V_{DS}^2}{2} \right], \quad (1)$$

其中, W , L 分别为沟道的宽度和长度, C_i 为绝缘层的电容系数, V_{DS} , V_{GS} , V_T , I_{DS} 和 μ_{ef} 分别是源漏电压, 栅源电压, 阈值电压, 源漏电流和场效应迁移率.

作为 TFT 的一个重要应用之一, 在 AMLCD (active-matrix liquid crystal display) 中, TFT 在像素充电工作过程中总是处于线性区, 因而本文主要讨论接触效应对器件在线性区场效应迁移率的影响. 在 MOSFET 中, 线性区的条件是 $V_{DS} < V_{GS} - V_T$, 输出电流表达式为

$$I_{DS} = \frac{WC_i\mu_{ef}}{L}(V_{GS} - V_T)V_{DS} \quad (2)$$

通过引入跨导 g_m , 即一个电路单元的输出电流与该单元的输入电压的比值, 可以方便的得到器件场效应迁移率的表达式

$$g_m = \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} = \frac{WC_i\mu_{ef}}{2L} \cdot V_{DS}, \quad (3)$$

即

$$\mu_{ef} = \frac{2L}{WC_iV_{DS}} \cdot \frac{dI_{DS}}{dV_{GS}} \quad (4)$$

对于我们制备的 p 型 Pentacene OTFT 器件, 由于在栅极和漏极上加的均为负电压, 只要线性区条件变为 $V_{DS} > V_{GS} - V_T$, 又 V_G 也就是 V_{GS} , 这样就可以应用上面的公式进行计算了.

将 $W = 5 \text{ mm}$, $L = 50 \text{ }\mu\text{m}$, $C_i = 10 \text{ nF}$ 等参数代入后, 可得到器件线性区场效应迁移率为 $0.42 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 阈值电压为 -9.16 V , 开关比 4.7×10^3 .

采用 Bullejos 等人^[26]的电荷迁移理论模型对实验结果进行分析. 在这之前, 首先用一种简单的中间探针法对我们制备的器件的电势分布进行定性判断. 图 4 为中间探针法的测试简图.

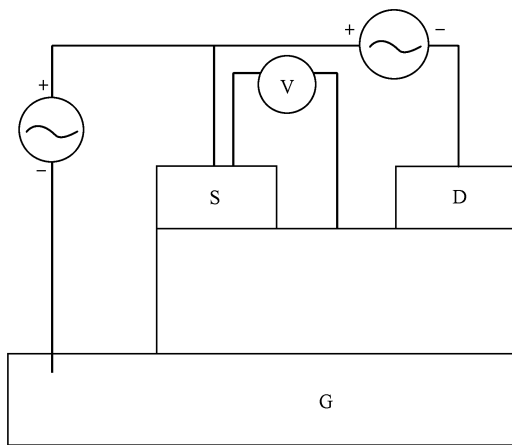


图 4 中间探针法测试简图(探针在沟道的中央)

一般情况下, 如果接触电阻很小, 或者源漏端接触电阻一样大, 沟道中间电势 V_{middle} 应该基本与源漏之间电压的一半 $V_{DS}/2$ 重合. 从图 5 所示的中间探针法测试结果可以看出, 所测的 V_{middle} 明显高于 $V_{DS}/2$, 说明电势在器件沟道两端分布不均匀, 源端附近电势差大于漏端附近电势差. 显然, V_{middle} 偏离 $V_{DS}/2$ 远近能说明源漏两端电势差相差的大小. 这样就可以定性的对器件电势分布进行简单讨论(图 6). 通常在 V_G 不是很大的情况下, R_C 随着 V_G 增加

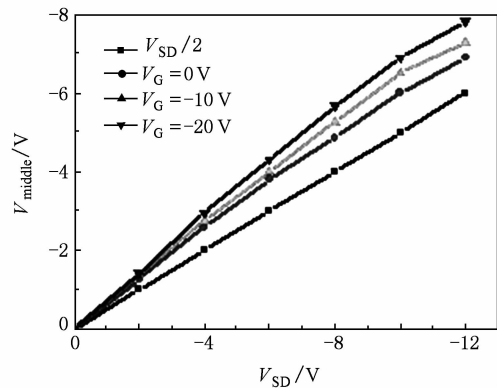


图 5 OTFT 器件的中间电势($L = 300 \text{ }\mu\text{m}$)

而下降^[27]. 在图 5 中, 随着 V_G 增加, V_{middle} 缓慢增加, 这说明源端电势差增加, 即 R_C 在总电阻 R_T 中的比重增加. 这样就可以判断出 R_L 和 R_C 都随着 V_G 增加而减小, 并且 R_L 减小的比 R_C 更快. 从图中还可以看出在相同 V_G 下, V_{middle} 的值不是线性的, 而是向 $V_{DS}/2$ 曲线略微靠近. 通常认为接触良好的 R_C 是欧姆接触, 也就是说在一定栅压下, R_C 不随 V_{DS} 变化. 图 5 中, V_{middle} 的变化说明随着 V_{DS} 增加, R_C 在总电阻 R_T 中的比例略有下降, 从而说明 R_L 随 V_{DS} 增加而缓慢变大.

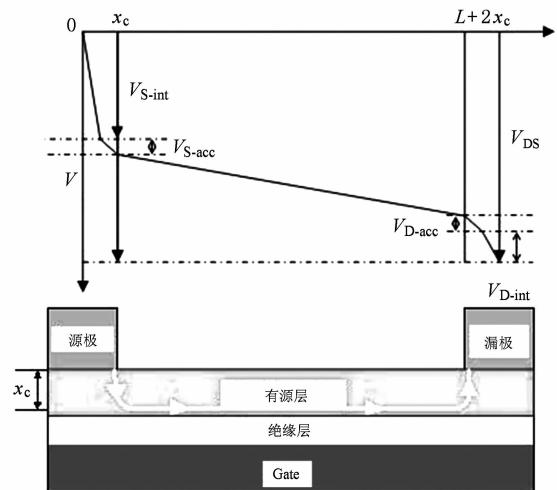


图 6 底栅上接触 OTFT 器件电势的分布

图 6 是 OTFT 器件的电势分布图, 其中 V_{S-acc} , V_{S-int} , V_{D-acc} , V_{D-int} , x_c 分别是源极入门电势, 源极界面电势, 漏极入门电势, 漏极界面电势和入门传输距离. x_c 一般在 $20\text{--}30 \text{ nm}$ 之间, 比沟道长度 L 小得多. 总电势表示为

$$V_C = V_{S-acc} + V_{S-int} + V_{D-acc} + V_{D-int}, \quad (5)$$

在这四部分中, $V_{S\text{-acc}}$ 和 $V_{D\text{-acc}}$ 大小基本一致, 因此, 源漏端电势分布不同来源于 $V_{D\text{-int}}$ 和 $V_{S\text{-int}}$ 相差较大. 从接触电阻产生的原因来说, 一般有如下几种: 有机半导体材料的氧化还原反应电势 V_{redox} , 电荷注入电势 $V_{\text{injection}}$, 接触区域载流子漂移电势 V_{drift} . Pentacene 与 MoO_3 之间的势垒很小^[19], 即 $V_{\text{injection}} \approx 0$, $V_{\text{redox}} \approx 0$. 这样 $V_{D\text{-int}}$ 和 $V_{S\text{-int}}$ 相差比较大就应该主要由源漏端 V_{drift} 的差异造成的.

通过上面分析可知, 本实验中制备的器件可以应用 Bullejos 等人的电荷迁移理论进行分析. 将接触电势 V_C 与源漏电势 V_{DS} 的比值 b 代入(1)式中

$$I_{DS} = \frac{WC_i\mu_{\text{ef}}}{L} \left[V_{GS} - V_T - \frac{(1+b)V_{DS}}{2} \right] \times (1-b)V_{DS}. \quad (6)$$

一般情况下, V_T 随接触电阻 V_C 增加变化很小^[28]. 因此, 我们忽略 V_T 在模拟过程中的微小变化, 重点研究场效应迁移率 μ_{ef} 与 V_C 之间的关系来分析接触效应对 OTFT 器件的影响.

以器件在 $V_{GS} = -20$ V 时的输出曲线为研究对象, 首先通过实验得到的数据给出模拟曲线的初始值: $V_T = 5.0$ V, $\mu_{\text{ef}0} = 0.42$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, $b_0 = 0$. 从图 7

(a) 可以看出, 将初始值代入理论模拟公式后, 两条曲线相差比较大. 然后通过改变 μ_{ef} , b 的值, 使理论模拟得到的曲线逐渐与实验所得的曲线接近、重合: 1) 先保持 b_0 不变, 改变 μ_{ef} 大小使理论模拟曲线与实验数据曲线在线性部分重合而取值 $\mu_{\text{ef}1}$, 如图 7(b) 所示; 2) 保持 $\mu_{\text{ef}1}$ 不变, 改变 b 大小使理论模拟曲线与实验数据曲线相接近而取值 b_1 , 如图 7(c) 所示; 3) 重复过程 1 和 2, 使理论拟合曲线与实验数据曲线不断接近. 经过 4 次重复以后, 得到与实验数据符合很好的模拟曲线. 在图 7(d) 中, $b_4 = 0.42$, $\mu_{\text{ef}4} = 1.1$ $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 结果表明我们制备的 OTFT 器件, V_C 占总电势 V_{DS} 的 0.42, 也就是说接触电阻将近占总电阻的一半. 考虑接触电阻后, 场效应迁移率增加了 2 倍多, 从 0.42 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$ 增加到 1.1 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$.

我们制备的以未经修饰的 Al 为源漏电极的该类型 OTFT 器件的场效应迁移率仅为 0.02 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 经过 MoO_3 修饰后器件性能明显提高, μ_{ef} 达到 0.42 $\text{cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 然而经过理论模拟发现, 接触电阻依然比较大, 将近占总电阻的一半. 下一步, 将重点修饰 MoO_3 与有源层之间的接触面, 以期进一步减小接触电阻, 提高场效应迁移率.

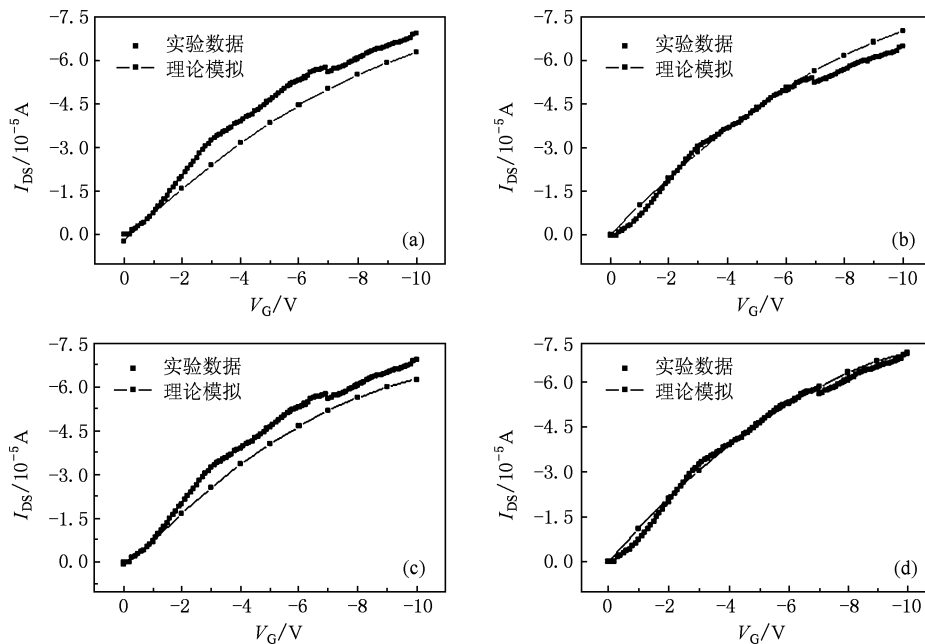


图 7 OTFT 器件在 $V_{GS} = -20$ V 的输出曲线与理论模拟曲线 (a) 实验数据与理论模拟的初始曲线; (b) 保持 b 不变, 场效应迁移率取 $\mu_{\text{ef}1}$ 时的曲线; (c) 保持不变 $\mu_{\text{ef}1}$, 比值 b 取 b_1 时的曲线; (d) 经过 4 次重复后得到的实验与理论拟合较好的曲线

4. 结 论

通过在 Pentacene 与 Al 之间蒸镀 MoO_3 修饰层,能有效降低金属与半导体之间的注入势垒,制备的 OTFT 器件具有较好的输出特性(采用 MOSFET 缓变沟道近似法得到的公式进行计算),线性区场效应迁移率为 $0.42 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$, 阈值电压 -9.16 V , 开关比 4.7×10^3 . 随后通过中间探针法,

对器件电势分布做了定性判断,发现源漏端电势分布不均匀; R_L 和 R_C 都随着 V_C 增加而减小,且 R_L 减小比 R_C 更快; R_L 随 V_{DS} 增加缓慢变大. 对器件在 $V_{\text{GS}} = -20 \text{ V}$ 时的输出曲线进行电荷迁移理论模拟,模拟结果发现 V_C 占 V_{DS} 的 0.42, 实验中得到的器件场效应迁移率提高了 2 倍多,达到 $1.1 \text{ cm}^2/\text{V}\cdot\text{s}$. 可见如何分析、减小接触电阻是 OTFT 器件提高性能和实现、扩大应用中要解决的重要问题之一.

- [1] Sundar V C, Zaumseil J, Podzorov V, Menard E, Willett R L, Someya T, Gershenson M E, Rogers J A 2004 *Science* **303** 1644
- [2] Facchetti A, Yoon M H, Marks T J 2005 *Adv. Mater.* **17** 1750
- [3] Bana D, Han S, Lu Z H, Oogarah T, Spring T A J, Liu H C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 093108
- [4] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Jiang W W, Huang J Z, Song D D, Zhu H N, Huang J Y, Xu X R 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5911 (in Chinese) [袁广才、徐征、赵谡玲、张福俊、姜薇薇、黄金昭、宋丹丹、朱海娜、黄金英、徐叙璐 2008 物理学报 **57** 5911]
- [5] Yang S Y, Du W S, Qi J R, Lou Z D 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3427 (in Chinese) [杨盛谊、杜文树、齐洁茹、娄志东 2009 物理学报 **58** 3427]
- [6] Reese C, Bao Z 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 763
- [7] Liu Y R, Wang Z X, Yu J L, Xu H H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8566 (in Chinese) [刘玉荣、王智欣、虞佳乐、徐海红 2009 物理学报 **58** 8566]
- [8] Cao J, Hong F, Xing F F, Gu W, Guo X A, Zhang H, Wei B, Zhang J H, Wang J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 037106
- [9] Zou J H, Lan L F, Xu R X, Yang W, Peng J B 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 1275 (in Chinese) [邹建华、兰林锋、徐瑞霞、杨伟、彭俊彪 2010 物理学报 **59** 1275]
- [10] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Jiang W W, Song D D, Zhu H N, Li S Y, Huang J Y, Huang H, Xu X R 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1887
- [11] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Xu N, Sun Q J, Xu X R 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 4941 (in Chinese) [袁广才、徐征、赵谡玲、张福俊、许娜、孙钦军、徐叙璐 2009 物理学报 **58** 4941]
- [12] Torsi L, Marinelli F, Angione M D, Dell' Aquila A, Cioffi N, Giglio E D, Sabbatini L 2009 *Org. Electron.* **10** 233
- [13] Yuan G C, Xu Z, Gong C, Cai Q J, Lu Z S, Shi J S, Zhang F J, Zhao S L, Xu N, Li C M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 153308
- [14] Lee S, Koo B, Shin J, Lee E, Park H 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 162109
- [15] Jurchescu O D, Baas J, Palstra T T M 2004 *Appl. Phys. Lett.* **84** 3061
- [16] Liu G, Liu M, Wang H, Shang L W, Ji Z Y, Liu X H, Liu J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3530
- [17] Li Y C, Lin Y J, Wei C Y, Lin Z X, Wen T C, Chang M Y, Tsai C L, Wang Y H 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 163303
- [18] Petrovic A, Pavlica E, Bratina G, Carpentiero A, Tormen M W 2009 *Synth. Met.* **159** 1210
- [19] Bai Y, Liu X, Chen L, Khizar-ul-Haq, Khan M A, Zhu W Q, Jiang X Y, Zhang Z L 2007 *Microelectr. J.* **38** 1185
- [20] Chu C W, Li S H, Chen C W, Shrotriya V, Yang Y 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 193508
- [21] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Xu N, Tian X Y, Xu X R 2009 *Chin. Phys. B* **18** 3990
- [22] Celle C, Suspene C, Simonato J, Lenfant S, Ternisien M, Vuillaume D 2009 *Org. Electron.* **10** 119
- [23] Lee W H, Wang C C, Ho J C 2009 *Thin Solid Film* **517** 5305
- [24] Kwon J H, Shin S, Kim K H, Cho M J, Kim K N, Choi D H, Ju B K 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 13506
- [25] Yun Y, Pearson C, Petty M C 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 34508
- [26] Lara Bullejos P L, Jimenez Tejada J A, Rodriguez-Bolivar, Deen M J, Marinov O 2009 *J. Appl. Phys.* **105** 084516
- [27] Pesavento P V, Chesterfield R J, Newman C R, Frisbie C D 2004 *J. Appl. Phys.* **96** 7312
- [28] Street R A, Salleo A 2002 *Appl. Phys. Lett.* **81** 2887

Contact effect in organic thin film transistors*

Sun Qin-Jun Xu Zheng[†] Zhao Su-Ling Zhang Fu-Jun

Gao Li-Yan Tian Xue-Yan Wang Yong-Sheng

(*Institute of Optoelectronics Technology, Beijing Jiaotong University, Key Laboratory of Luminescence and Optical Information (Beijing Jiaotong University), Ministry of Education, Beijing 100044, China*)

(Received 25 November 2009; revised manuscript received 24 March 2010)

Abstract

The contact effect on the performances of organic thin film transistors (OTFTs) is studied here. We fabricate Bottom-gated top-contact Pentacene-OTFTs on heavily doped n type Silicon wafers with using Al modified by MoO₃ as source and drain electrodes. Field effect mobility μ_{ef} of the OTFT reaches 0.42 cm²/V·s, the threshold voltage and the on/off current ratio arrive at -5.0 V and 4.7×10^3 respectively. The electric potential distribution in the channel is qualitatively investigated by means of middle probe method (MPM) and the output curve is simulated by the charge drift method. Considering the contact effect, the μ_{ef} is greatly improved to 1.1 cm²/V·s, which indicates the importance of the contact engineering in OTFTs.

Keywords: organic thin film transistor, field effect mobility, contact effect, charge drift

PACC: 7340L, 7360L, 7340C, 7210B

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 10774013, 10804006, 10974013, 60978060), the National High Technology Research and Development Program of China (Grant No. 2006AA03Z0412), the Research Foundation for the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070004024), the Research Foundation for the Youth Scholars of the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070004031), the Beijing NOVA program (Grant No. 2007A024), the National Natural Science Foundation for Distinguished Young Scholar (Grant No. 60825407).

[†] Corresponding author. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn