

文章编号:1007-2780(2017)04-0281-06

一种精确的有机薄膜晶体管 模型参数提取方法研究

尹飞飞^{1,2,3}, 徐 征^{1,2*}, 赵谔玲^{1,2}, 乔 泊^{1,2}, 张成文^{1,2}, 陈跃宁³, 徐叙蓉^{1,2}

(1. 北京交通大学 发光与光信息技术教育部重点实验室, 北京 100044;

2. 北京交通大学 光电子技术研究所, 北京 100044;

3. 辽宁大学 物理学院, 辽宁 沈阳 110036)

摘要:提出了一种可以精确获得有机薄膜晶体管(OTFT)的直流电流-电压模型中的参数提取方法。该方法通过对实验获得的输出特性曲线和转移特性曲线进行计算和处理,精确获得 OTFT 器件模型中的 7 个参数。实验制备了两种采用不同绝缘栅的基于并五苯的底栅顶接触的 OTFT,并对其进行了参数提取。利用提取的参数及直流电流-电压模型对 OTFT 进行模拟,将模拟结果与实验测试结果相比较发现,模拟得到的输出特性及转移特性与测试结果拟合得很好,验证了本文中参数提取方法的正确性。应用建立的模型及本文中的参数提取方法可以用于 OTFT 器件的设计与模拟。

关键词:有机薄膜晶体管;直流电流-电压模型;参数提取

中图分类号:TN386.2 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/YJYXS20173204.0281

Parameters extraction method for organic thin film transistor model

YIN Fei-fei^{1,2,3}, XU Zheng^{1,2*}, ZHAO Su-ling^{1,2}, QIAO Bo^{1,2},ZHANG Cheng-wen^{1,2}, CHEN Yue-ning³, XU Xu-rong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Luminescence and Optical Information,

Ministry of Education, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

2. Institute of Optoelectronics Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China;

3. Physics Department, Liaoning University, Shenyang 110036, China)

Abstract: A new procedure is proposed to extract the basic parameters for the accurate spice-like direct

收稿日期:2016-12-27; **修订日期:**2017-03-10.

基金项目:国家重点研发计划(No. 2016YFB0401302);国家自然科学基金(No. 11474018, No. 61575019);北京市科委重大项目(No. D161100003416001);中央高校基本科研业务费专项资金(No. 2016JBM066);辽宁省教育厅一般项目(No. L2014003);辽宁大学青年科研基金项目(No. LDQN201431)资助项目
Supported by National Key Research and Development Program of China(No. 2016YFB0401302); National Natural Science Foundation of China(No. 11474018, No. 61575019); Key Project of Beijing Municipal Science and Technology Commission(No. D161100003416001); Fundamental Research Funds for the Central Universities(No. 2016JBM066); General Science and Technology Research Plans of Liaoning Educational Bureau(No. L2014003); Scientific Research Foundation for Young Teachers of Liaoning University(No. LDQN201431)

* 通信联系人, E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

current (DC) current-voltage mode for OTFTs, which provides a much rigorous and accurate determination of main electrical parameters of organic TFTs. All the main electrical parameters are extracted in a simple and direct way from the experimental measurements, including the output characteristics curve and the transfer characteristics curve, with no need of assigning predetermined values to any other model parameter or using optimization methods. Two types of top source and drain contact (TC) pentacene TFTs using different gate dielectrics are researched on and parameters are extracted from experimental data. With these parameters extracted and the model, simulation results based on SPICE are obtained, which show a very good agreement with measured curves in both transfer and output characteristics, then the accuracy of the extracted parameters method is verified. The unified model and the parameter extraction method should present a high level of accuracy in OTFTs' design and simulations.

Key words: organic thin film transistor; direct-current current-voltage model; parameter extraction

1 引言

近年来,以有机材料为基础的有机薄膜晶体管(OTFT)的发展非常迅速,其性能取得了很大的提高^[1-3],由于具有成本低、易加工、可大面积制造等优点,在射频识别标签(RFID)、集成电路、数据存储以及平板显示等方面有着巨大的应用潜力,因而获得了广泛的关注^[4-8]。

利用有机薄膜晶体管(OTFT)实现有机射频识别标签、存储器、平板显示的驱动电路以及集成电路的设计需要预估其性能,这需要通过对其性能的模拟来完成^[9],建立可用于仿真程序(SPICE)的有机薄膜晶体管(OTFT)的直流(DC)电流-电压模型是实现其性能模拟的重要环节,为此,我们建立了有机薄膜晶体管的直流电流-电压模型并验证了其精确性^[10-11],电路模拟的精确性不仅与器件模型本身有关,还与给定的器件模型参数值的准确性有密切关系^[12],因此,在器件模型的建立和应用过程中,模型参数的提取成为建模中的一个重要环节。本文对建立的模型提出一种准确的参数提取方法,该方法通过对实验获得的输出特性曲线和转移特性曲线进行计算和处理,精确提取 OTFT 器件模型中所有参数。

为了验证提取的参数精确性,实验制备了两种采用不同绝缘栅的 OTFT,并对其进行了参数提取和性能仿真,将仿真结果与实验结果进行对比分析,结果发现,利用所提取参数及有机薄膜晶体管(OTFT)的直流(DC)电流-电压模型对器件性能进行仿真得到的结果与实验测试结果具有良好的 consistency,验证了所得参数及其参数提取方法的准确性。

2 参数提取

2.1 传输模型

在有机薄膜晶体管中,由于材料中大量陷阱的存在,其载流子传输过程即存在跳跃机制,又存在表面散射机制,场效应迁移率 μ_{FET} 与栅压有一定的依赖关系^[12-13],表示为:

$$\mu_{\text{FET}} = \mu_0 \left[\frac{(V_{\text{gs}} - V_{\text{T}})}{V_{\text{aa}}} \right]^{\gamma_a}, \quad (1)$$

其中: μ_0 是低场迁移率, V_{gs} 为栅压, V_{T} 是阈值电压, V_{aa} 是场效应迁移率的特征电压, γ_a 为迁移率幂律参数。此外,考虑到沟道长度调制效应、载流子迁移速度饱和效应等的影响,建立了基于非晶硅(a-Si:H) TFT 的 OTFT 的直流电流-电压模型为^[15-16]:

$$I_{ds} = \frac{W/L \cdot C_{DIEL} \mu_0 (V_{gs} - V_T)^{\gamma_a+1} / V_{aa}^{\gamma_a}}{1 + (R_s + R_D) \cdot W/L \cdot C_{DIEL} \mu_0 (V_{gs} - V_T)^{\gamma_a+1} / V_{aa}^{\gamma_a}} \times \frac{V_{ds} (1 + \lambda \cdot V_{ds})}{\left[1 + \left(\frac{V_{ds}}{\alpha_{sat} \cdot (V_{gs} - V_T)} \right)^m \right]^{1/m}} + \sigma_0 \cdot V_{ds} \quad (2)$$

其中 V_{ds} 为漏源电压, C_{DIEL} 为栅绝缘层单位面积的电容, R_s 、 R_D 为源、漏接触电阻, q 为单位电荷, σ_0 为泄漏电流参数, λ 为沟道长度调制系数, 由沟道长度调制效应决定, m 弯曲调制参数, α_{sat} 为饱和调制参数, 用以描述输出电流达到饱和时源漏电压 V_{sate} 和过驱动电压 $(V_{gs} - V_T)$ 的关系。

2.2 模型参数提取方法

式(2)所示的电流-电压传输公式中, 需要提取的参数主要有以下几个: V_T 、 V_{aa} 、 γ_a 、 α 、 m 、 λ 、 σ_0 。从模型出发, 对实验测试数据进行以下计算和处理, 可逐一确定各个参数的提取方法。

(1) V_T 是阈值电压

V_T 是器件开启时的电压, 根据其定义从转移特性曲线中提取。

(2) 迁移率幂律参数 γ_a

迁移率幂率参数 γ_a 用来描述场效应迁移率 μ_{FET} 与过驱动电压 $(V_{gs} - V_T)$ 之间的依赖关系, γ_a 与导电机制有关, 是一个经验参数, 只能从实验数据中获得, 利用可以帮助分析器件的传输机制。因此, 在研究有机薄膜晶体管的电流传输特性的过程中, γ_a 是一个非常重要的参数, 由式

$$\mu_{FET} = \mu_0 \left[\frac{(V_{gs} - V_T)}{V_{aa}} \right]^{\gamma_a} \quad \text{可以看到, 调制参数 } \gamma_a$$

是否准确对于能否准确获得载流子迁移率 μ_{FET} 以及漏源电流 I_{ds} 的影响非常大, 对 I_{ds} 做以下处理获得参数 γ_a [17-18]。

$$\text{令 } H(V_{gs}) = \frac{\int_0^{V_{gs}} I_{ds}(x) dx}{I_{ds}(V_{gs})} \quad (3)$$

利用式(3)计算可得:

$$H(V_{gs}) = \frac{1}{\gamma_a + 2} (V_{gs} - V_T) \quad (4)$$

根据式(3)对转移特性曲线进行相应的计算和处理得到 $H(V_{gs})$, 可得到参数 γ_a 。

(3) 场效应迁移率的特征电压 V_{aa}

特征电压 V_{aa} 对载流子迁移率及漏源电流的

影响仅次于迁移率幂率参数 γ_a , 因此, 准确获得 V_{aa} 的值也非常重要, 忽略泄漏电流、沟道长度调制效应和寄生效应的影响, 从式(1)、(2)计算可得

$$V_{aa} = \left[\frac{\mu_0 \cdot W/L \cdot C_{DIEL} \cdot (V_{gs} - V_T)^{\gamma_a+1} \cdot V_{ds}}{I_{ds}} \right]^{1/\gamma_a}$$

那么令 $I_{ds}^{1/(1+\gamma_a)}$ 相对于 $(V_{gs} - V_T)$ 的斜率为 Sl , 则

$$V_{aa} = \left[\frac{\mu_0 \cdot W/L \cdot C_{DIEL} \cdot V_{ds}}{Sl^{1+\gamma_a}} \right]^{1/\gamma_a} \quad (5)$$

对转移特性曲线进行相应的计算和处理, 根据(5)式计算即可得到参数 V_{aa} 。

(4) 饱和调制参数 α

器件处于饱和区时, $V_{dssat} = \alpha(V_{gs} - V_T)$, 忽略器件寄生电阻、沟道长度调制效应及漏电流的影响, 电流电压方程简化为 $I_{ds} = \frac{W/L \cdot C_{DIEL} \mu_0 (V_{gs} - V_T)^{\gamma_a+2}}{V_{aa} \gamma_a} \times \frac{\alpha}{2^{1/m}}$, 令 S_s 为近饱和区域 $I_{ds}^{1/(\gamma_a+2)}$ 相对于 $(V_{gs} - V_T)$ 的斜率, 则饱和调制参数 α 计算如式(6):

$$\alpha = S_s^{\gamma_a+2} V_{aa}^{\gamma_a} 2^{1/m} / (\mu_0 \cdot W/L \cdot C_{DIEL}) \quad (6)$$

因此, 对转移特性曲线饱和点附近作相应的计算, 即可得到饱和调制参数 α 的值。

(5) 弯曲调制参数(形状调制参数) m

式(2)的电流-电压方程中忽略沟道长度调制效应影响, 则可求的 m 由上式可得:

$$m = \log 2 / \log [\alpha \cdot \mu_0 \cdot C_{DIEL} \cdot W / (L \cdot V_{aa}^{\gamma_a} S_s^{\gamma_a+2})] \quad (7)$$

(6) 沟道长度调制参数 λ

沟道长度调制参数 λ 反应的是饱和区的电流电压特性, 由式(2)的电压电流方程计算可得:

$$\lambda = \left[\frac{I_{ds}}{V_{ds}^2} \left[1 + \left[\frac{V_{ds}}{\alpha (V_{gs} - V_T)} \right]^m \right]^{1/m} - \frac{1}{K/V_{aa}^{\gamma_a} (V_{gs} - V_T)^{\gamma_a} \cdot (V_{gs} - V_T)} \right] - \frac{1}{V_{ds}} \quad (8)$$

(7) 泄漏电流参数 σ_0 :

泄漏电流是由于栅绝缘层电荷以及缺陷的存在而产生的,由泄漏电流的关系表达式 $I_{\text{leakage}} = \sigma_0 \cdot V_{\text{ds}}$,有:

$$\sigma_0 = I_{\text{leakage}} / V_{\text{ds}}, \quad (9)$$

泄漏电流可从测试曲线中获得,由此利用式(9)可以提取泄漏电流参数 σ_0 。

因此利用以上的参数提取方法,我们可以准确的获得模型中所有的参数。

3 实验及参数提取方法验证

我们分别采用两种不同介质作为栅绝缘层制备顶接触的 OTFT 并对其进行了参数提取,两种 OTFT 具有图 2 所示的器件结构。

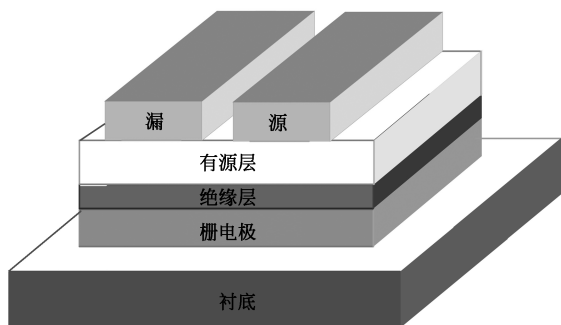


图 1 底栅顶接触 OTFT 结构图,OTFT1 的栅绝缘层为 SiO_2 , OTFT2 的栅绝缘层为 PMMA

Fig.1 OTFT structures for Top source and drain contact configuration, OTFT1 with SiO_2 as gate dielectric materials and OTFT2 with PMMA as gate dielectric materials

这两种 OTFT 以重掺杂的硅作为衬底和栅电极,以真空蒸镀法沉积并五苯(pentacene)作为有源层,在栅绝缘层及有源层之间都自组织生长一层三氯十八烷基硅烷(octadecyltrichlorosilane, OTS)作为修饰层,来改善 SiO_2 和并五苯接触界面以及薄膜晶体管的电学特性^[14],在 pentacene 有源层上真空沉积金作为源漏电极。不同的是,OTFT1 用热氧化法在衬底上生长 350 nm 的 SiO_2 作为栅绝缘层,OTFT2 用旋涂法在衬底上生长 500 nm 的聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)作为栅绝缘层。OTFT1 的沟道长度和宽度分别为 50 μm 和 1000 μm ,OTFT2 的沟道长度和宽度分别为 80 μm 和 2 000 μm 。

用上述方法对 OTFT1、OTFT2 进行参数提取,将所有参数值列于表 1 中。

表 1 OTFTs 参数列表

Tab.1 Technological parameters of transistors		
	OTFT1	OTFT2
gate dielectric	SiO_2	PMMA
V_{T}/V	-5	4
γ_{a}	0.62	1.1
V_{aa}	99e3	750
α_{sat}	0.65	0.35
m	4	2
λ	-0.00 006	0.000 008
σ_0	65e-12	0.6e-13

利用表 1 中的参数,进行仿真,得到以下结果。

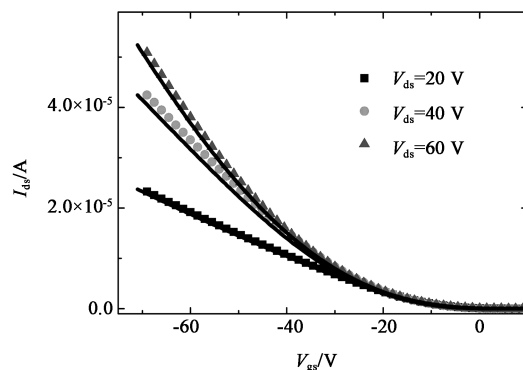


图 2 OTFT1 的实验结果(曲线)与仿真结果(符号)对比(1):转移特性曲线

Fig.2 Comparison between modeled (symbols) and measured (lines) result of OTFT1 (1): the transfer characteristics

图 2、图 3、图 4、图 5 分别为 OTFT1、OTFT2 的仿真结果和测试结果的比较,其中(a)为转移特性曲线,(b)为输出特性曲线,由图中的仿真结果和测试结果的对比发现,二者十分接近,说明利用以上提参方法完全可以准确地获得模型中的参数,可用于模拟 OTFT 的直流特性。

利用以上方法及传统方法对 TFT1 器件的场效应迁移率 μ_{FET} 进行提取并分析比较,结果如图 6 所示,其中(a)所示曲线为我们根据文献所用的传统方法获得,(b)曲线为本文方法所得,可以

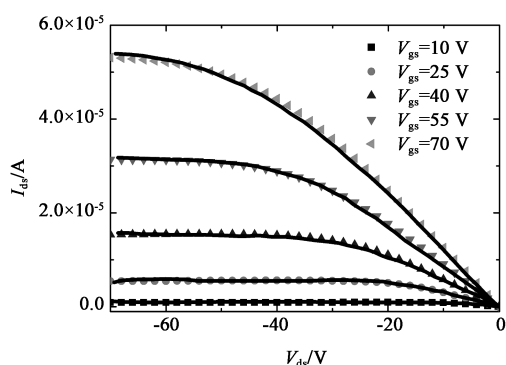


图3 OTFT1 的实验结果(曲线)与仿真结果(符号)对比(2):OTFT 传输特性曲线

Fig.3 Comparison between modeled(symbols) and measured(lines) result of OTFT1 (2): the output characteristics

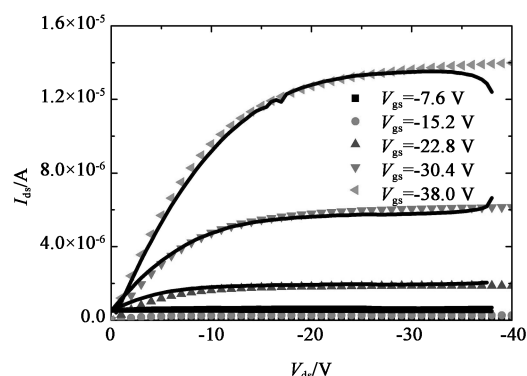


图5 OTFT2 的实验结果(曲线)与仿真结果(符号)对比(2):OTFT 传输特性曲线

Fig.5 Comparison between modeled(symbols) and measured(lines) result of OTFT2 (2): the output characteristics

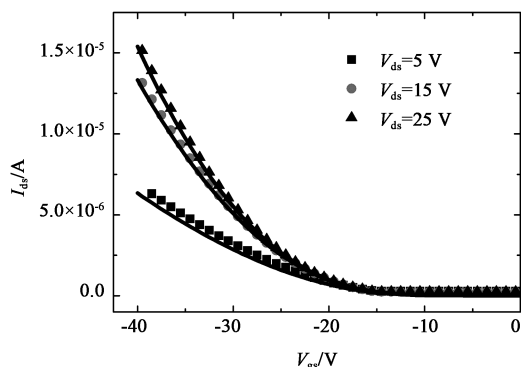


图4 OTFT2 的实验结果(曲线)与仿真结果(符号)对比(1): OTFT 转移特性曲线

Fig.4 Comparison between modeled(symbols) and measured(lines) result of OTFT2 (1): the transfer characteristics

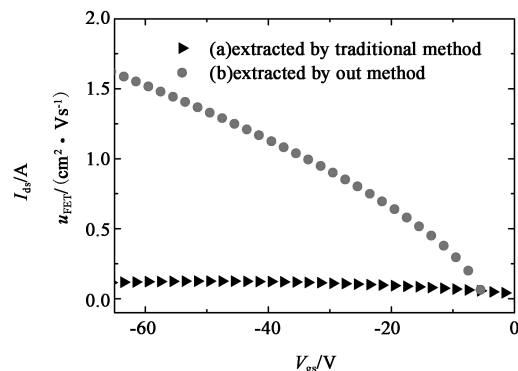


图6 OTFT1 的 μ_{FET} 随栅压变化情况:(a)传统提取方法所得 μ_{FET} ;(b)本文提取方法所得 μ_{FET}

Fig.6 Comparison of μ_{FET} of T1 extracted by traditional method (a) with which extracted by our method (b).

看出,按着我们方法得到的曲线,场效应迁移率 μ_{FET} 随栅压 V_{gs} 变化趋势明显,充分展示了场效应迁移率 μ_{FET} 与栅压有一定的依赖关系^[12-14],从而真实地体现出有机材料的特性,而按着传统方法获得的场效应迁移率 μ_{FET} ,与栅压变化几乎没有关系,因此也无法体现有机材料中缺陷对沟道导电性的影响。

4 结 论

本文完善了一个以非晶 SPICE 模型为基础的有机薄膜晶体管 SPICE 模型的参数提取方法。该模型可以通过电流-电压方程,只需要知

道几个参数就可以准确描述 OTFT 的直流特性,通过计算确立了一种提取模型中各个参数的方法,将本文确立的参数提取方法运用于实验制备的 OTFT 的直流特性模拟,模拟结果曲线与实验测试曲线的线性区和饱和区都拟合得很好,验证了所有参数的正确性以及给出的参数提取方法的准确性。因此,本文中参数提取方法完全可以用于 OTFT 直流特性分析,以及基于 OTFT 的有机电路的性能模拟,对于实现射频识别标签,集成电路,存储器以及平板显示的驱动电路的电子设计自动化(EDA),以最终实现大规模、大面积的有机集成电路具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] 白钰.表面修饰的 ZnPc 薄膜晶体管性能研究[J].光电子·激光,2010,21(6):856-860.
BAI Y. Investigation of ZnPc thin film transistors with surface modified insulators [J]. *J. Optoelectron. • Laser*, 2010, 21(6): 856-860. (in Chinese)
- [2] TSUMURA A, KOEZUKA H, ANDO T. Macromolecular electronic device: field-effect transistor with a polythiophene thin film [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1986, 49(18): 1210-1212.
- [3] 曲崇,徐征,张世玉,等.有机-无机复合薄膜电致发光器件中势垒对光电性能的影响[J].光电子·激光,2012,23(1):46-50.
QU C, XU Z, ZHANG S Y, *et al.* Influence of the potential barrier in the organic-inorganic hybrid luminescent devices on the photoelectric properties [J]. *J. Optoelectron. • Laser*, 2012, 23(1): 46-50. (in Chinese)
- [4] KLAUK H, HALIK M, ZSCHIESCHANG U, *et al.* Pentacene organic transistors and ring oscillators on glass and on flexible polymeric substrates [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2003, 82(23): 4175-4177.
- [5] 冯魏良,黄培.柔性显示衬底的研究及进展[J].液晶与显示,2012,27(5):599-607.
FENG W L, HUANG P. Advances in flexible displays substrates [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2012, 27(5): 599-607. (in Chinese)
- [6] CLEMENS W, FIX W, FICKER J, *et al.* From polymer transistors toward printed electronics [J]. *J. Mater. Res.*, 2004, 19(7): 1963-1973.
- [7] MYNY K, STEUDEL S, VICCA P, *et al.* Plastic circuits and tags for 13.56 MHz radio-frequency communication [J]. *Solid-State Electron.*, 2009, 53(12): 1220-1226.
- [8] 田雪雁,徐征,赵谡玲,等.有机无线射频识别技术的研究进展[J].半导体技术,2008,33(4):277-280.
TIAN X Y, XU Z, ZHAO S L, *et al.* R&D of wireless organic RFID technology [J]. *Semicond. Technol.*, 2008, 33(4): 277-280. (in Chinese)
- [9] FADLALLAH M, BENZARTI W, BILLIOT G, *et al.* Modeling and characterization of organic thin film transistors for circuit design [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 99(10): 104504.
- [10] YIN F F, XU Z, ZHAO S L, *et al.* A DC current - voltage model for organic thin film transistor for circuit design [J]. *Optik*, 2014, 125(1): 257-259.
- [11] 尹飞飞,徐征,赵谡玲,等.有机薄膜晶体管直流电流-电压模型的研究[J].光电子·激光,2013,24(3):476-480.
YIN F F, XU Z, ZHAO S L, *et al.* Research on the DC current-voltage model for organic thin film transistor [J]. *J. Optoelectron. • Laser*, 2013, 24(3): 476-480. (in Chinese)
- [12] ORTIZ-CONDE A, CERDEIRA A, ESTRADA M, *et al.* A simple procedure to extract the threshold voltage of amorphous thin film MOSFETs in the saturation region [J]. *Solid-State Electron.*, 2001, 45(5): 663-667.
- [13] MARINOV O, DEEN M J, INIGUEZ B. Charge transport in organic and polymer thin-film transistors: recent issues [J]. *IEE Proc. Circuits Devices Syst.*, 2005, 152(3): 189-209.
- [14] KLAUK H, HALIK M, ZSCHIESCHANG U, *et al.* High-mobility polymer gate dielectric pentacene thin film transistors [J]. *J. Appl. Phys.*, 2002, 92(9): 5259-5263.

作者简介:尹飞飞(1979—),女,辽宁凌源人,博士研究生,讲师,主要从事光电材料与器件以及集成电路设计方面的研究。E-mail:yffyyw@yeah.net

徐征(1959—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事光电子材料、器件,发光与显示,光伏电池、光电纳米材料等方面的科研与开发工作。E-mail:zhengxu@bjtu.edu.cn