

最小二乘拟合计算有机薄膜晶体管 迁移率的研究*

陈跃宁¹⁾²⁾ 徐 征^{1)†} 赵谏玲¹⁾ 孙钦军¹⁾ 尹飞飞¹⁾ 董宇航²⁾

1) (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)

2) (辽宁大学物理学院, 沈阳 110036)

(2010 年 3 月 11 日收到; 2010 年 6 月 24 日收到修改稿)

本文通过制备了一个基于并五苯为有源层的顶栅底接触 OTFT 器件获取电流电压实验数据, 并运用电流电压特性曲线理论拟合计算方法计算其场效应迁移率. 研究发现, 采用不同的拟合方法得到的场效应迁移率值有较大的差异. 若选取转移特性曲线线性区距中心 1/2 范围内测试点进行最小二乘拟合计算出的场效应迁移率能减少采用其他拟合方法的固有不准确性, 而且与其他方法得到的场效应迁移率最接近.

关键词: 最小二乘拟合, 场效应迁移率, 有机薄膜晶体管

PACC: 7340, 7340T, 7360R

1. 引 言

有机薄膜晶体管由于在电子标签、射频识别卡和平板显示的驱动电路等中的潜在应用而获得了广泛的关注^[1,2]. 近年来, 有机薄膜晶体管 (OTFT) 的研究获得了迅速发展. 特别是对一些基础而关键问题的研究, 例如, 有机和无机材料的接触处能级的排列、不同基底沉积出的有机薄膜的分子排列以及在同一基底上不同沉积条件对有机薄膜分子排列的影响等取得了一定的进展^[3-7]. 而无论对有机薄膜晶体管结构的研究还是有源层薄膜的制作和用材的选取的研究, 都是围绕提高机薄膜晶体管性能, 即迁移率、阈值电压和开关比等而展开的. 据文献报道, 基于并五苯作为有源层的有机薄膜晶体管具有较高的场效应迁移率和开关比, 相当于多晶硅场效应晶体管的水准^[8-10]. 然而, 确定某个有机薄膜晶体管的场效应迁移率和阈值电压必须要有科学的计算和检测方法, 否则获得的值是不准确的. 目前获取有机薄膜晶体管迁移率的方法主要有根据实验测得的电流电压特性曲线理论拟合计算方

法^[11-13]和渡越时间方法^[14-16]. 而根据实验电流电压特性曲线理论拟合计算法应用更加广泛. 本文针对这种方法进行研究. 并通过实际制作一个 OTFT 器件获得实验数据, 运用实验电流电压特性曲线理论拟合计算法计算其迁移率来说明采用不同的拟合方法获得的迁移率值具有较大的差异. 对这种误差的产生进行了深入研究. 并提出了采用最小二乘拟合方法计算有机薄膜晶体管的场效应迁移率.

2. 实 验

我们根据参考文献[17]的方法, 用并五苯作为有源层制作一个顶栅底接触结构的 OTFT, 器件结构如图 1 所示. 首先, 将 ITO 作为源漏电极沉积在玻璃基底上. 然后把纯度为 98% 的并五苯作为有源层通过 2×10^{-3} Pa 高真空热蒸发沉积在 ITO 电极上. SiO₂ 作为栅绝缘层通过电子束蒸发沉积在并五苯有源层上. 各部分薄膜厚度为: 源、漏电极厚度 80 nm, 并五苯有源层厚度 100 nm, 二氧化硅绝缘层厚度 350 nm. 最后, 用掩模板热蒸发沉积厚度为

* 国家自然科学基金 (批准号: 10974013, 10774013, 60978060), 教育部博士点基金 (批准号: 20090009110027, 20070004024), 博士点新教师基金 (批准号: 20070004031), 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2010CB327704), 北京市自然科学基金 (批准号: 1102028) 和北京市科技新星计划 (批准号: 2007A024) 资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: zhengxu@bjtu.edu.cn

110 nm的铝作栅电极. 所有薄膜都在低温 ($< 100^\circ\text{C}$) 和低沉积速率 ($\leq 0.06 \text{ nm}$) 下制备. 沟道宽长比 $10000 \mu\text{m}/500 \mu\text{m}$. 器件的电流电压特性曲线在暗室室温条件下用吉时利 2410 和 6430 参数分析仪测得输出特性曲线如图 2 (a), 图 2 (b) 为转移特性曲线.

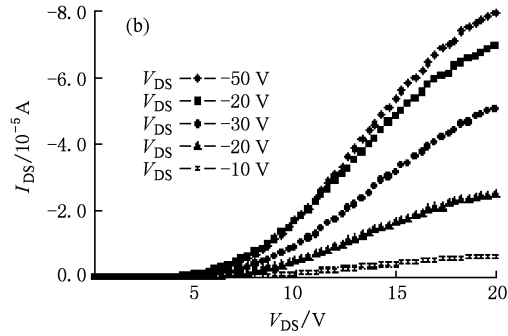
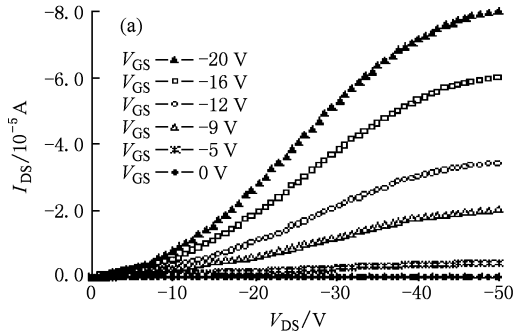


图 2 器件输出特性(a)和转移特性(b)

3. 迁移率计算及讨论

我们采用常用的获取晶体管沟道载流子迁移率的方法计算上述制备的 OTFT 器件的迁移率和阈值电压. 这种方法的前提条件是假设有机薄膜晶体管的输出特性遵循无机场效应晶体管的输出特性数学模型, 且求得的是沟道内平均迁移率. 在线性区 $V_{\text{DS}} < (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})$ 时, I_{DS} 遵循下列表达式^[18,19]:

$$I_{\text{DS}} = \frac{W\mu_{\text{EF}}C_i}{L} \left[(V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})V_{\text{DS}} - \frac{V_{\text{DS}}^2}{2} \right], \quad (1)$$

式中, W 是晶体管沟道宽度, L 是晶体管沟道长度, μ_{EF} 是场效应迁移率, V_{TH} 是阈值电压, C_i 是绝缘层单位面积电容.

在饱和区 $V_{\text{DS}} > (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})$ 时, I_{DS} 满足下列表达式:

$$I_{\text{DS}} = \frac{W\mu_{\text{EF}}C_i}{2L} (V_{\text{GS}} - V_{\text{TH}})^2, \quad (2)$$

如果 W, L 和 C_i 已知, 在线性区, 场效应迁移率根据下列公式计算:

$$\mu_{\text{EF}} = \frac{L}{WC_i V_{\text{DS}}} \frac{\partial I_{\text{DS}}}{\partial V_{\text{GS}}}, \quad (3)$$

式中 $\partial I_{\text{DS}}/\partial V_{\text{GS}}$ 可通过 $I_{\text{DS}} - V_{\text{GS}}$ 转移特性的拟合直线斜率获得. 而在饱和区, 场效应迁移率根据下列公式计算:

$$\mu_{\text{EF}} = \frac{2L}{WC_i} \left(\frac{\partial \sqrt{I_{\text{DS}}}}{\partial V_{\text{GS}}} \right)^2, \quad (4)$$

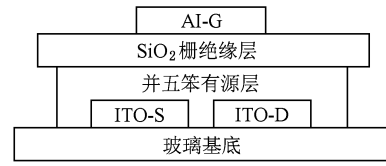


图 1 OTFT 器件结构

式中 $\partial \sqrt{I_{\text{DS}}}/\partial V_{\text{GS}}$ 可通过 $\sqrt{I_{\text{DS}}} - V_{\text{GS}}$ 曲线拟合直线斜率获得. 显然, 对于采用不同方法得到的拟合直线存在着差异, 因而计算出的场效应迁移率是不同的. 下面我们通过计算饱和情况下, $V_{\text{DS}} = -50 \text{ V}$ 时的场效应迁移率来说明这种误差. 首先, 可以从 OTFT 器件的转移特性获得 $V_{\text{DS}} = -50 \text{ V}$ 时的 $\sqrt{I_{\text{DS}}} - V_{\text{GS}}$ 曲线如图 3 所示.

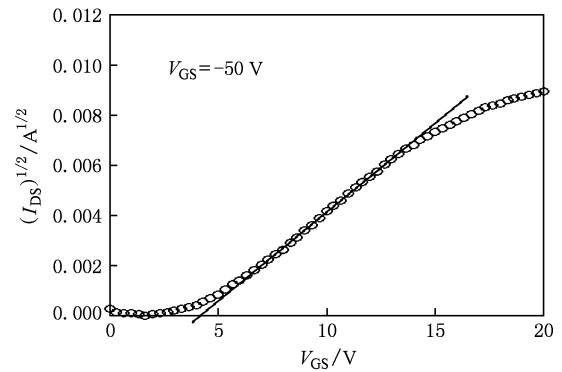


图 3 $\sqrt{I_{\text{DS}}} - V_{\text{GS}}$ 曲线及拟合直线

下面我们采用 3 种获得拟合直线的方法分别计算 OTFT 器件的场效应迁移率. 首先, 我们通过绘图法, 在 $\sqrt{I_{\text{DS}}} - V_{\text{GS}}$ 曲线线性部分直接画出拟合直线, 并读取两点坐标值计算出拟合直线的斜率 $K (= \partial \sqrt{I_{\text{DS}}}/\partial V_{\text{GS}})$, 代入 (4) 式求得场效应迁移率. 其次, 我们运用计算法. 假设拟合直线方程为

$$\sqrt{I_{\text{DS}}} = KV_{\text{GS}} + b, \quad (5)$$

然后在线性部分任意选取两点 $(\sqrt{I_{DS}}, V_{GS})$ 实验数据代入(5)式,计算出拟合直线斜率 K ,再运用(4)式求得场效应迁移率.最后我们运用最小二乘法.假设拟合直线方程为(5)式,在 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 曲线线性部分取 n 点 $(\sqrt{I_{DS}}, V_{GS})$ 实验数据,则第 i 个实验数据与拟合直线上相应值之间的残差为

$$\Delta_i = (\sqrt{I_{DS}})_i - (KV_{GSi} + b). \quad (6)$$

最小二乘法就是要使 $\sum \Delta_i^2$ 为最小,即

$$\sum_{i=1}^n \Delta_i^2 = \sum_{i=1}^n [(\sqrt{I_{DS}})_i - (KV_{GSi} + b)]^2 = \min, \quad (7)$$

也就是使 $\sum \Delta_i^2$ 对 K 和 b 一阶导数等于零,即

$$\frac{\partial}{\partial K} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum [(\sqrt{I_{DS}})_i - KV_{GSi} - b](-V_{GSi}) = 0,$$

$$\frac{\partial}{\partial b} \sum \Delta_i^2 = 2 \sum [(\sqrt{I_{DS}})_i - KV_{GSi} - b](-1) = 0,$$

从而求出 K 和 b 的表达式为

$$K = \frac{n \sum (\sqrt{I_{DS}})_i V_{GSi} - \sum (\sqrt{I_{DS}})_i \sum V_{GSi}}{n \sum V_{GSi}^2 - (\sum V_{GSi})^2}, \quad (8)$$

$$b = \frac{\sum V_{GSi}^2 \sum (\sqrt{I_{DS}})_i - \sum (\sqrt{I_{DS}})_i V_{GSi} \sum V_{GSi}}{n \sum V_{GSi}^2 - (\sum V_{GSi})^2}. \quad (9)$$

将 n 个点实验数据代入(8)和(9)式求的斜率 K 值,再代入(4)式求得场效应迁移率.三种方法求得的场效应迁移率如表 1 所示.

表 1 三种方法求得的场效应迁移率

拟合方法	$K/10^{-4}$	b	$\mu_{EF}/(\text{cm}^2/\text{Vs})$
绘图法	7.60	-0.0028	0.578
计算法	7.21	-0.0031	0.527
二乘法	7.40	-0.0033	0.547

注: $W=10000 \mu\text{m}, L=500 \mu\text{m}, C_i=0.1 \text{ nF}/\text{cm}^2$.

由上述计算场效应迁移率可知,对于用不同的拟合方法求得的迁移率存在着一定的误差.究其原因,我们分析认为,对于绘图法拟合的误差主要产生在直线的绘制和数据的读取.绘制直线时以尽量覆盖测试点多为原则可减少由此产生的误差,而计算法要在线性区任取两点计算,这两点本身的测试误差就直接影响场效应迁移率的值.所以可以采用多组计算取平均值的方法减少误差.若采用最小二乘法拟合计算场效应迁移率,在理论上应该还是比较精确的,但是,对于选取不同的实验数据区间进行最小二乘拟合,计算出的场效应迁移率也有一定的差异.图 4 为不同实验数据区间进行最小二乘拟合

直线.表 2 为对应不同实验数据区间和选取不同个测试点进行最小二乘拟合计算出的场效应迁移率. n 为选取的测试点数.

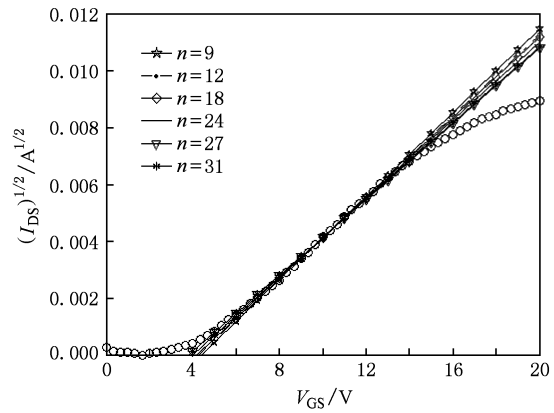


图 4 不同实验数据区间的拟合直线

表 2 不同实验区间的场效应迁移率

n	V_{GS}/V	$K/10^{-4}$	b	$\mu_{EF}/(\text{cm}^2/\text{Vs})$
9	8.0—10.6	7.33	-0.0032	0.537
12	7.0—10.6	7.15	-0.0030	0.511
18	6.0—11.6	7.05	-0.0029	0.497
24	5.0—12.6	6.88	-0.0028	0.473
27	4.0—12.6	6.66	-0.0025	0.444
31	4.0—14.0	6.70	-0.0030	0.449

表 3 线性区中心选取测试点的场效应迁移率

n	V_{GS}/V	$K/10^{-4}$	b	$\mu_{EF}/(\text{cm}^2/\text{Vs})$
5	9.3—10.7	7.2638	-0.0032	0.527
7	9.0—11.0	7.2639	-0.0032	0.527
9	8.7—11.3	7.40	-0.0033	0.5476
13	8.0—12.0	7.31	-0.0032	0.5344
19	7.0—13.0	7.16	-0.0031	0.5127
23	6.3—13.7	7.05	-0.0029	0.4970

有上述计算可以看出,对于选取不同的测试点数和不同的栅压区间,运用最小二乘拟合计算的场效应迁移率具有很大的误差.表 3 为以线性区中心 ($V_{GS} = 10 \text{ V}$) 向两侧分别对称选取测试点,再利用最小二乘法计算的场效应迁移率.由表 3 可知,测试点选取过多,由于 $\sqrt{I_{DS}}-V_{GS}$ 曲线两侧的非线性,计算出的场效应迁移率偏小.若选取的测试点过少,计算出的场效应迁移率也偏小.选取线性区距中心 1/2 范围内测试点进行拟合计算出的场效应迁移率较大.且与其他拟合方法计算的场效应迁移率接近.

本文认为采用最小二乘法拟合计算场效应迁移率能减小前面所述的其它两种方法计算的场效应迁移率所产生的误差.

4. 结 论

通过本文研究表明,运用实验电流电压特性曲线理论拟合计算方法计算场效应迁移率,对于采用

不同的拟合方法计算出的场效应迁移率值是不同的.因而计算出的场效应迁移率来反映 OTFT 器件的性能是不准确的.本文提出的最小二乘拟合方法可以减小绘图法和算法所固有的不精确性.并认为选取线性区距中心 $1/2$ 范围内测试点进行最小二乘拟合计算出的场效应迁移率与其他方法得到的场效应迁移率最接近.可以采用此方法计算场效应迁移率来表征有机薄膜晶体管的性能.

-
- [1] Han S H, Kim J H, Janga J, Cho S M, Oh M H, Le S H, Choo D J 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 073519
- [2] Bana D, Han S, Lu Z H, Oogarah T, Spring Thorpe A J, Liu H C 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 093108
- [3] Lee S H, Choo D J 2007 *Appl. Phys. Lett.* **90** 033502
- [4] Zhang F J, Aollmer A, Zhang J, Xu Z, Rabe J P, Koch N, Org 2007 *Electron.* **8** 606
- [5] Gundlach D J, Zhou L, Nichols J A 2006 *Appl. Phys.* **100** 024509
- [6] Tian X Y, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J 2009 *Chin. Phys. B* **18** 5078
- [7] Tian X Y, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J 2010 *Chin. Phys. B* **19** 018103
- [8] Jackson T N 2005 *Nature (London)* **4** 581
- [9] Berggren M 2007 *Nature (London)* **6** 3
- [10] David J G 2007 *Nature (London)* **6** 173
- [11] Liang W, Daniel Fine, Ananth Dodabalapur 2004 *Appl. Phys. Lett.* **85** 6386
- [12] Wang J, Wang H B, Yan X J, Huang H C, Yana D H 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 093507
- [13] Berliocchil M, Manentil M, Bolognesil A, Carlot A D, Luglil P, Paolesse R, Mandoy F, Natale C D, Proietti E, Petrocco G 2004 *Semicond. Sci. Technol.* **19** 354
- [14] Antoniadis H, Hsieh B R, Abkowitz M A 1993 *Appl. Phys. Lett.* **62** 3167
- [15] Lin L B, Jenekhe S A, Borsenberger P M 1996 *Appl. Phys. Lett.* **69** 3495
- [16] Wei Z Q, Yang Q X, Sun G J 2001 *Journal of Optoelectronics · Laser* **12** 930 (in Chinese) [魏振乾、杨庆鑫、孙桂娟等 2001 光电子·激光 **12** 930]
- [17] Yuan G C, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J 2008 *Chin. Phys. B* **17** 1887
- [18] Singh T B, Sariciftci N S 2006 *Annu. Rev. Mater. Res.* **36** 199
- [19] Dimitrakopoulos C D, Mascaro D J 2001 *IBM J. Res. Dev.* **45** 11

Research on least-squares fitting calculation of the field-effect mobility*

Chen Yue-Ning¹⁾²⁾ Xu Zheng^{1)†} Zhao Su-Ling¹⁾ Sun Qin-Jun¹⁾ Yin Fei-Fei¹⁾ Dong Yu-Hang²⁾

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

2) (*Physics Department, Liaoning University, Shenyang 110036, China*)

(Received 11 March 2010; revised manuscript received 24 June 2010)

Abstract

In this article, organic thin-film transistors (OTFTs) with top-gate and bottom contact geometry based on pentacene as active layer were fabricated. The experimental data of the I - V were obtained from the organic thin-film transistors. The field-effect mobility of the OTFT was calculated by fitting of theoretical calculation to the experimental data. We find that field-effect mobility values have great difference by different fitting methods. We calculate the field-effect mobility by least-squares fitting method to the experimental data of the I - V away from the center of the linear region of the transfer characteristics curves 1/2 range. The inherent inaccuracy of other fitting method can be reduced. The results is the nearest field-effect mobility obtained with other methods.

Keywords: least-squares fitting, field-effect mobility, organic thin-film transistor

PACC: 7340, 7340T, 7360R

* Project supported by the National Science Foundation of China (Grant Nos. 10974013, 10774013, 60978060), the Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education (Grant Nos. 20090009110027, 20070004024), the Research Fund for the Youth Scholars of the Doctoral Program of Higher Education (Grant No. 20070004031), the National Basic Research Program of China (Grant No. 2010CB327705), the Beijing Municipal Natural Science Foundation, China (Grant No. 1102028), and the Beijing NOVA program, China (Grant No. 2007A024).

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