

文章编号: 1007-2780(2013)02-0210-05

Tips-Pentacene OTFT 电极接触电阻的研究

刘 欢, 余 屯, 邱 禹, 钟传杰*

(江南大学 电子工程系 轻工过程先进控制教育部重点实验室, 江苏 无锡 214122)

摘 要: 采用转移线性法分析了以 PVP 为栅绝缘层、以 Tips-pentacene 为有源层的有机薄膜晶体管(OTFT)电极与有源层间的接触电阻,其中介电层和有源层均采用旋涂法制备,银电极采用喷墨印刷法制备。沟道长度分别取 200, 250, 300 μm 和 400 μm ,有源层退火时间分别为 2 h, 6 h 和 10 h,提取到的 3 种不同退火时间的 OTFT 的接触电阻分别为 8 M Ω , 4.5 M Ω 和 3 M Ω ,退火 10 h 的 OTFT 的接触电阻较小主要是因为较长时间的退火使得 Tips-pentacene 有源层中的杂质较少,电极和有源层之间的接触势垒较小。

关 键 词: 转移线性法; 有机薄膜晶体管; 接触电阻; 喷墨打印

中图分类号: TN321⁺.5

文献标识码: A

DOI: 10.3788/YJYXS20132802.0210

Contact Resistance of Electrodes in Tips-Pentacene OTFTs

LIU Huan, YU Tun, QIU Yu, ZHONG Chuan-jie*

(Key Laboratory of Advanced Process Control for Light Industry (Ministry of Education),

Department of Electronic Engineering, Jiangnan University, Wuxi 214122, China)

Abstract: This paper analyzed the contact resistance between inkjet-printed silver source/drain (S/D) electrodes and organic semiconductor layer of Organic Thin-film Transistors (OTFTs) using transmission line method(TLM). Spin-coated PVP thin-film and Tips-pentacene thin-film were used as gate dielectric layer and semiconductor layer, respectively. S/D electrodes with four different channel lengths of 200, 250, 300 μm and 400 μm were inkjet-printed, and the annealed time of different semiconductor layers was 2 h, 6 h and 10 h, respectively. The extracted contact resistances were 8 M Ω , 4.5 M Ω and 3 M Ω for OTFTs with three different kinds of annealed time, respectively. Lower contact resistance for OTFTs with annealed time of 10 h can be explained by the fact that longtime annealing can reduce the impurity in the semiconductor layer and lower the contact barrier between electrodes and semiconductor layer.

Key words: transmission line method; organic thin-film transistor; contact resistance; inkjet-printing

1 引 言

有机薄膜晶体管(OTFT)因为其成本低、工艺简单、可大面积生产等一系列优点,越来越受到

关注^[1-6]。溶液法制备有机薄膜晶体管操作简单,可在室温条件下进行,被研究者广泛采用。喷墨印刷法制备电极没有掩膜和高温环境的要求,可以进行电极的微图案化加工,大大降低了晶体管

收稿日期: 2012-10-28; 修订日期: 2012-12-25

基金项目: 国家自然科学基金项目(No. 60776056); 江南大学研究生“创新计划”项目

作者简介: 刘欢(1988—),男,安徽安庆人,硕士研究生,主要从事有机薄膜晶体管的研究。

* 通信联系人, E-mail: zhongchuanjie@jiangnan.edu.cn

制造的成本^[7]。

与无机半导体材料相比,有机半导体材料由于导电机理不同,其导电性能与无机材料相比还有一定差距。随着器件的微小化,影响 OTFT 电流大小的主要因素之一就是接触电阻,因此,对源漏电极和有源层接触电阻的研究越来越重要,这对 OTFT 在大面积、高速的、低消耗集成电路的应用有着重要的意义^[8]。本文采用 TLM 法提取了银电极和 Tips-pentacene 有源层之间的接触电阻的,并分析了有源层不同退火时间对接触电阻的影响及其原因。

2 实 验

实验选择高掺杂的 P 型 Si 片作为衬底, Si 片依次用丙酮、酒精、去离子水分别超声清洗 20 min,烘干后紫外线处理 30 min,留作备用。溶液配制:质量分数为 5% 的 PVP 和 6% 的 PMF 混合溶液用来制备栅绝缘层,溶剂为 PGMEA,其中 PMF 作为交联剂;质量分数为 2% 的 Tips-pentacene 和 10% 的葵烷混合溶液用来制备有源层,溶剂为苯甲醚,其中葵烷作为交联剂,以上材料均购于 Aldrich 公司。

实验采用喷墨印刷的方法制备了以银作为源漏电极的顶接触 OTFT,其结构如图 1 所示。

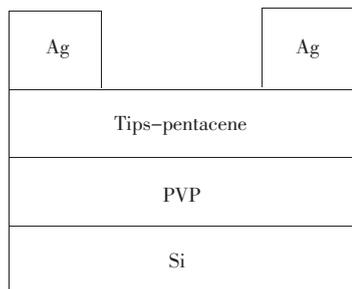


图 1 顶接触 OTFT 的结构图

Fig. 1 Structure of top-contact OTFT

首先在 Si 片上通过旋涂法制备 PVP 薄膜作为栅绝缘层(500 r/min、10 s,然后 1 000 r/min、50 s),然后 180 °C 真空退火 1 h,在 PVP 栅绝缘层上旋涂制备 P 型的 Tips-pentacene 薄膜作为有源层(500 r/min、15 s,然后 10 00 r/min、30 s),然后 110 °C 真空退火,再在 Tips-pentacene 有源层上通过喷墨打印的方法制备源漏银电极,最后放入 110 °C 的干燥箱中处理 30 min 将银浆还原成

银。退火温度取 110 °C 主要因为在 110 °C 时 Tips-pentacene 薄膜的结晶性和平整性较好,当温度较高时使得溶剂挥发过快使得 Tips-pentacene 薄膜的结晶性不佳^[9],而实验采用的银浆最佳烧结温度为 140 °C,当温度过低时又不利于银浆的烧结。

由于本文采用 TLM 法来提取接触电阻,即测出不同沟道长度 L 的 OTFT 的输出特性曲线,根据不同数值的 V_{GS} 所对应的 $I_{DS}-V_{DS}$ 数值计算出输出电阻 R_{ON} ,然后作出 $R_{ON}-L$ 图,所得直线在 $L=0$ 时得到的数值就是所求的接触电阻^[10]。实验制备了沟道长度分别为 200, 250, 300 μm 和 400 μm 、沟道宽度为 5 000 μm 的顶接触结构的 OTFT。为了比较不同退火时间条件的 OTFT 的接触电阻,分别制备了在 110 °C 下真空退火时间为 2, 6, 10 h 和 12 h 的 4 组 OTFT。所有制备的样品均在常温大气环境中测试,OTFT 的电流特性使用 Agilent 4155C 半导体参数分析仪进行测量。

3 结果与讨论

3.1 制备的 OTFT 的输出特性

图 2 所示的是制备的沟道长度为 200 μm 、沟道宽度为 5 000 μm 的 OTFT 的输出特性曲线,退火时间为 10 h。测得其阈值电压 V_{TH} 约为 -10 V,开关电流比为 10^3 左右,迁移率 μ_i 约为 $0.01 \text{ cm}^2/\text{V} \cdot \text{s}$,数值与 S. K. Parka 等^[11] 同样采用旋涂法的结果较为接近。由于旋涂法制备的 Tips-pentacene 有源层的结晶度要比真空蒸镀制备的并五苯有源层的结晶度差,有序性也较差,所以迁移率较小一些。

对退火时间分别为 2, 6, 10 h 和 12 h 的 OTFT 的输出特性进行了比较,图 3 所示为 $V_{GS} = -40 \text{ V}$

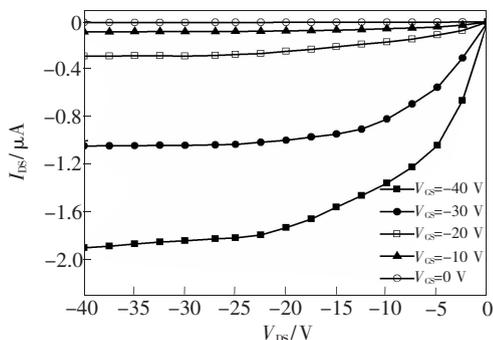


图 2 退火 10 h 的 OTFT 的输出特性曲线

Fig. 2 Output characteristic curves of OTFT annealed 10 h

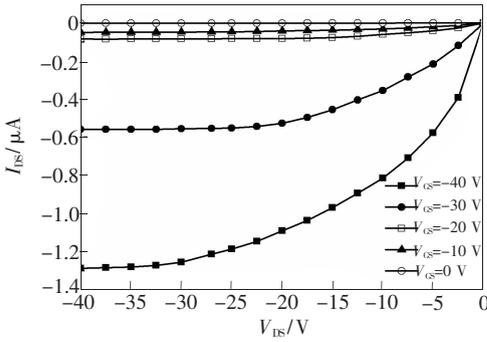


图 3 不同退火时间的 OTFT 在 $V_{GS} = -40$ V 时的输出特性

Fig. 3 Output characteristic curves of OTFT annealed for different time at $V_{GS} = -40$ V

时不同退火时间的 OTFT 的输出特性。可以看出退火时间为 2 h 时,输出特性最差,源漏饱和电流最小,约为 500 nA;而退火时间为 10 h 和 12 h 时,输出特性最好而且几乎相同,源漏饱和电流也最大,约为 $1.9 \mu\text{A}$;退火时间为 6 h 时,输出特性介于它们之间。通过上述分析可以得到, Tips-pentacene 有源层在 110°C 时真空退火时间达到 10 h 后,OTFT 的性能较好且比较稳定。

3.2 不同退火时间下 OTFT 的接触电阻

OTFT 工作在线性区时电极和有源层之间的接触可以看作欧姆接触,源漏之间的总电阻 R_{ON} 可以看作电极与有源层之间的接触电阻 R_C 和沟道电阻 R_{CH} 之和^[12],可以用式(1)求得^[13]:

$$R_{ON} = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_{DS}} = R_C + R_{CH} = R_C + \frac{L}{W\mu_i C_i (V_{GS} - V_{TH})} \quad (1)$$

其中 L 、 W 、 μ_i 和 C_i 分别对应导电长度、沟道宽度、有源层迁移率和栅绝缘层单位面积电容。测得的 PVP 栅绝缘层的 C_i 约为 20 nF/cm^2 , R_C 是源极和漏极与有源层的接触电阻的总和,即 $R_C = R_S + R_D$, R_S 、 R_D 分别表示源极和漏极的接触电阻,由于两个电极电流的流向不同,一般这两个值是不完全相等的。

本文使用 TLM 法分析基于溶液法制备的 OTFT 电极的接触电阻,分别提取退火时间为 2 h, 6 h 和 10 h 的 OTFT 的接触电阻,由于退火 12 h 的 OTFT 的输出特性和退火 10 h 的几乎相同,因此只考虑退火 10 h 的接触电阻。令 $V_{DS} = -5$ V, V_{GS} 分别为 -20 、 -30 、 -40 V,求得沟道长度分

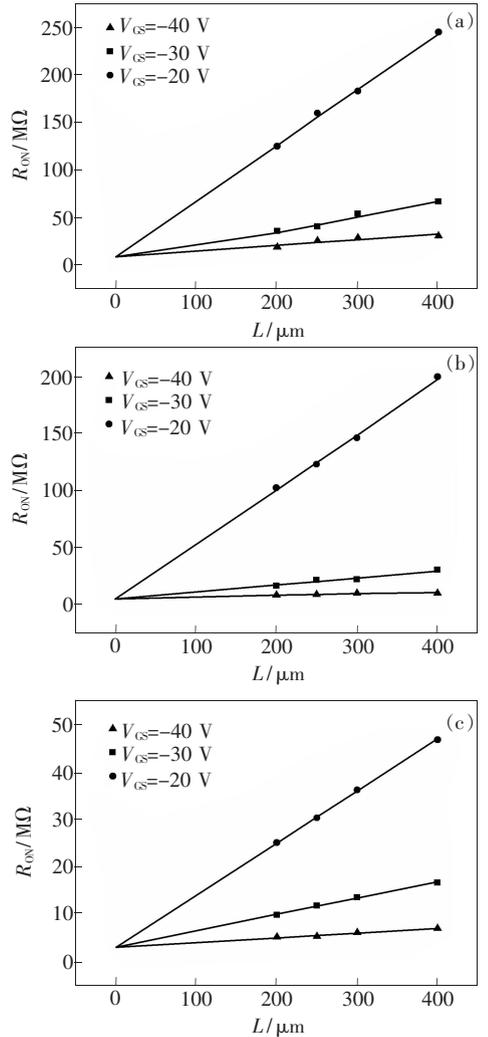


图 4 不同退火时间下 OTFT 的 TLM 法提取结果. (a) 2 h; (b) 6 h; (c) 10 h.

Fig. 4 TLM results for OTFTs of different annealed time (a) 2 h; (b) 6 h; (c) 10 h.

别为 200, 250, 300 μm 和 400 μm 时 OTFT 的输出电阻,结果如图 4 所示。

从图中可以看出,退火 10 h 的 R_{ON} 要比退火 2 h 的 R_{ON} 小很多,而且 10 h 的 R_{CH} 比 2 h 的 R_{CH} 也要小很多,随着 L 的增大 R_{CH} 增大的幅度也较小。采用 TLM 法提取到退火时间为 2 h、6 h 和 10 h 的 OTFT 的 R_C 分别为 8 m Ω 、4.5 m Ω 和 3 M Ω ,退火 10 h 的 R_C 较小而退火 2 h 的 R_C 较大,退火 6 h 的 R_C 介于两者之间。

图 5 所示的是不同退火时间的有源层表面的形貌图,可以看出,退火 2 h 后,晶体排列比较分散,没有明显的纹理,结晶性较差;退火 6 h 后,结晶性有所改善,但晶体排列比较混乱;退火 10 h

和 12 h 后,有源层表面比较平整,有序性较好,有明显的纹理,结晶性也较好。

由于制备 Tips-pentacene 有源层溶液的溶剂苯甲醚的沸点是 155 °C,比其他常用溶剂的沸点要高,比如氯仿(61 °C)、甲苯(110 °C)等,所以苯甲醚的挥发速度较慢,薄膜有较长的时间从液相转变为固相,结晶性较好^[14]。本实验采用的温度为 110 °C 低于它的沸点,需要长时间的退火才能使得有源层中的溶剂完全挥发掉, Tips-pentacene 晶体也得到了充分的生长时间,残留的溶剂分子会在薄膜中成为杂质。退火 2 h 后,有源层中残留的溶剂较多,退火 10 h 后有源层中的溶剂几乎完全挥发,而退火 6 h 后残留的溶剂量介于上述两者之间。

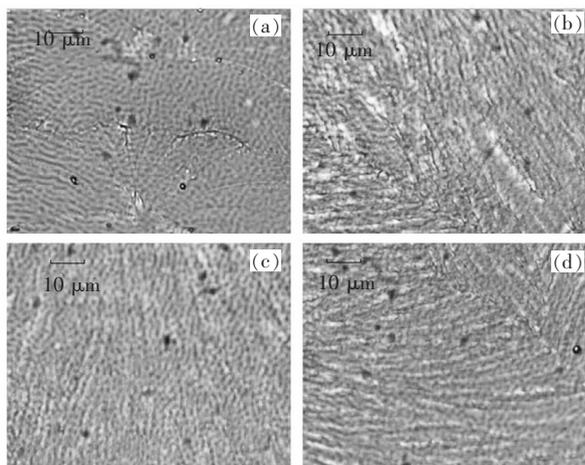


图5 不同退火时间的表面形貌图。(a)2 h;(b)6 h;(c)10 h;(d)12 h。

Fig. 5 Surface morphology images of different annealed time. (a) 2 h; (b) 6 h; (c) 10 h; (d) 12 h.

参 考 文 献:

- [1] Lee S H, Choi M H, Han S H, *et al.* High-performance thin-film transistor with 6,13-Bis (triisopropylsilyl)pentacene by inkjet printing [J]. *Organic Electronics*, 2008, 9(5):721-726.
- [2] Tao C L, Zhang X H, Zhang F J, *et al.* Solution processed pentacene thin films and their structural properties [J]. *Materials Science and Engineering B*, 2007, 140(1-2):1-4.
- [3] Choi M H, Jang J. Effect of SAM layer on bias-stability of inkjet printed TIPS pentacene thin-film transistor [J]. *Current Appl. Phys.*, 2012, 12(1):e6-e9.
- [4] 洪飞,谭莉,朱棋锋,等,高性能顶栅结构有机薄膜晶体管 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(3):313-317.
- [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.
- [6] 陈世琴,陈梦婕,邱龙臻. 石墨烯电极有机薄膜晶体管研究 [J]. *液晶与显示*, 2012, 27(5):595-598.
- [7] Chung S J, Jang J S, Cho J H, *et al.* All-inkjet-printed organic thin-film transistors with silver gate, source/drain electrodes [J]. *Japanese J. Appl. Phys.*, 2011, 50(3):03CB05(1-5).

就金属与有源层接触而言,从金属向有源层注入的电流密度 J 和金属/有机材料间的接触势垒 Φ_{eff} 有关^[15]。对于 Tips-pentacene 这样的 P 型材料, Φ_{eff} 由金属的费米能级与有源层的 HOMO 能级间的差决定,载流子必须克服这一势垒高度才能注入到有源层内。在其他条件不变的情况下,电流密度 J 正比于 $\exp(-\Phi_{\text{eff}}/2K_{\text{B}}T)$, K_{B} 为波尔兹曼常数, T 为绝对温度,所以电极和有源层间的接触电阻 R_{C} 应正比于 $\exp(\Phi_{\text{eff}}/2K_{\text{B}}T)$ 。当有源层内部和有源层与电极接触界面处有缺陷时,产生的缺陷态作为陷阱能够捕获从电极注入的空穴,在界面处形成一个多空穴的积累层并产生一个反向电场,阻碍空穴的进一步注入,使有源层处的 HOMO 能级升高,增加了注入势垒 Φ_{eff} , R_{C} 也随之增加,所以,退火 10 h 后 OTFT 的接触电阻较小。而对于沟道电阻而言,导电沟道中的缺陷态会影响载流子的迁移,使得迁移率 μ_{i} 变小,由于沟道电阻 R_{CH} 正比于 $1/\mu_{\text{i}}$,所以退火时间较长时 R_{CH} 也较小。

4 结 论

采用 TLM 法分析了不同退火时间的溶液法制备的介电层和有源层以及喷墨印刷法制备的银电极的 OTFT 的接触电阻,结果表明退火 10 h 的 OTFT 的接触电阻最小,主要是由于较长时间的退火使有源层中的杂质变少,薄膜结晶性较好,导致电极和有源层之间的接触势垒较小。同时长时间的退火也使有源层迁移率提高,减小了沟道电阻。因此在 110 °C 下退火时间在 10 h 后器件性能较好。

- [8] Peter V N, Michael S S, David J G, *et al.* Contact resistance extraction in pentacene thin film transistors [J]. *Solid-State Electronics*, 2003, 47(2):259-262.
- [9] Chen J H, Chee K T, Max S, *et al.* Controlled solution deposition and systematic study of charge-transport anisotropy in single crystal and single-crystal textured TIPS pentacene thin films [J]. *Organic Electronics*, 2009,10(4): 696-703.
- [10] Graciela B B, Fincher C R, Michael L. Contact resistance in organic thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, 84(2):296-298.
- [11] Sung K P, Thomas N J, John E A. High mobility solution processed 6,13-bis(triisopropyl-silylethynyl) pentacene organic thin film transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 91(6):063514(1-3).
- [12] Rhee S W, Yun D J. Metal-semiconductor contact in organic thin film transistors [J]. *J. Materials Chem.*, 2008, 18: 5437-5444.
- [13] Chung S J, Jeong J W, Kim D Y, *et al.* Contact resistance of inkjet-printed silver source-drain electrodes in bottom-contact OTFTs [J]. *J. Display Technology*, 2012, 8(1):48-53.
- [14] Choi K N, Kim K S, Chung K S, *et al.* Solvent effect on the electrical properties of triisopropylsilylethynyl (TIPS) pentacene organic thin-film transistors [J]. *Device and Materials Reliability*, 2009, 9(3):489-493.
- [15] Islam M N, Mazhari B. An analytical model for current crowding and source contact resistance in Top-contact organic thin-film transistors [J]. *Semiconductor Science and Technology*, 2008, 23(12):1-8.

《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