

有机薄膜晶体管气体传感器的研究进展

谢光忠, 吴寸雪, 蒋亚东, 太惠玲, 苏元捷, 杜晓松

(电子科技大学光电信息学院 成都 610054; 电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室 成都 610054)

【摘要】重点介绍了电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室在国家自然科学基金资助下开展的有机薄膜晶体管(OTFT)气体传感器方面的研究进展。制备了酞菁铜(CuPc)薄膜为有源层的底栅底接触式结构的有机薄膜晶体管,对器件的制备工艺和结构参数进行了优化,研究了其对H₂S气体的敏感特性。同时制备了P3HT-ZnO纳米棒的复合薄膜、P3HT单层薄膜、P3HT-MoS₂分层膜和复合膜的有机薄膜晶体管气体传感器,系统地分析了OTFT器件的电学性能和气敏特性。

关键词 复合薄膜; 气体传感器; 分层薄膜; 有机薄膜晶体管; P3HT薄膜

中图分类号 TP212 **文献标志码** A **doi**:10.3969/j.issn.1001-0548.2016.04.019

Recent Progress of Organic Thin Film Transistors Gas Sensors

XIE Guang-zhong, WU Cun-xue, JIANG Ya-dong, TAI Hui-ling, SU Yuan-jie, and DU Xiao-song

(School of Optoelectronic Information, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054;

State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices, University of Electronic Science and Technology of China Chengdu 610054)

Abstract This paper discusses the research progress of organic thin film transistors (OTFT) gas sensors in the State Key Laboratory of Electronic Thin Films and Integrated Devices of University of Electronic Science and Technology of China, under the support of the National Natural Science Foundation of China. In this work, organic thin film transistor with a bottom-gate bottom-contact type structure was used as the sensor element, the preparation process and structure parameters of the device were optimized, and the sensing properties of copper phthalocyanine (CuPc) film to H₂S were studied. Besides, the OTFT gas sensor based on P3HT-ZnO nanorods composite film, P3HT single-layer film, P3HT-MoS₂ composite and layered film was fabricated. Furthermore, the electrical properties and gas sensing performance of OTFT device were analyzed systematically.

Key words composite film; gas sensor; layered film; organic thin-film transistors (OTFT); P3HT thin film

1947年12月,美国贝尔实验室用元素锗(Ge)发明了世界上第一个晶体管^[1];1962年,文献[2]首次提出了薄膜晶体管的概念,其结构很好地适用于低导电率的半导体材料,器件的源极和漏极直接与导电沟道形成欧姆接触,是栅绝缘器件,并工作于积累模式^[3]。有机薄膜晶体管(OTFT)是一种在传统无机场效应管(FET)基础上发展起来的有机电子器件^[4]。有机薄膜晶体管气体传感器在化学传感器领域发展迅速,其低功耗、质量轻、成本低、工艺简单、易于集成等优势使其在化学传感器领域具有良好的发展前景^[5-6]。本文主要就电子科技大学电子薄膜与集成器件国家重点实验室在有机薄膜晶体管及传感器方面的研究进行了分析和介绍。

1 CuPc OTFT的性能及气敏特性

器件采用底栅底接触式结构的有机薄膜晶体管,即栅极在底部,敏感材料作为有源层沉积在该器件的顶部,如图1所示。

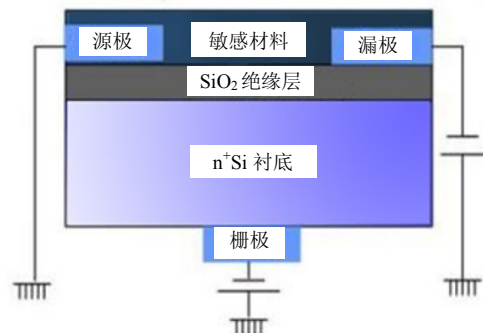


图1 有机薄膜晶体管示意图

收稿日期: 2016-05-15

基金项目: 国家自然科学基金(61571097, 61421002)

作者简介: 谢光忠(1967-), 男, 博士, 教授, 主要从事敏感薄膜与传感器方面的研究。

绝缘层对有机薄膜晶体管的电学性能和层间电荷传输过程有很大的影响^[7-9]。SiO₂具有一定的介电常数, 只有通过改变绝缘层的厚度来提高单位面积电容率来达到提高器件的性能^[10]。本文分别设计了绝缘层厚度为125、195和300 nm的有机薄膜晶体管,

所采用沟道宽长比为 $500 \times 8 \mu\text{m} / 25 \mu\text{m} = 160$ ^[11]。选取酞菁铜(CuPc)作为薄膜晶体管的敏感材料, CuPc薄膜厚度约为90 nm。对3种绝缘层厚度的CuPc OTFT进行了电学特性测试, 图2所示分别是3个不同绝缘层厚度的CuPc OTFT的输出和转移特性曲线。

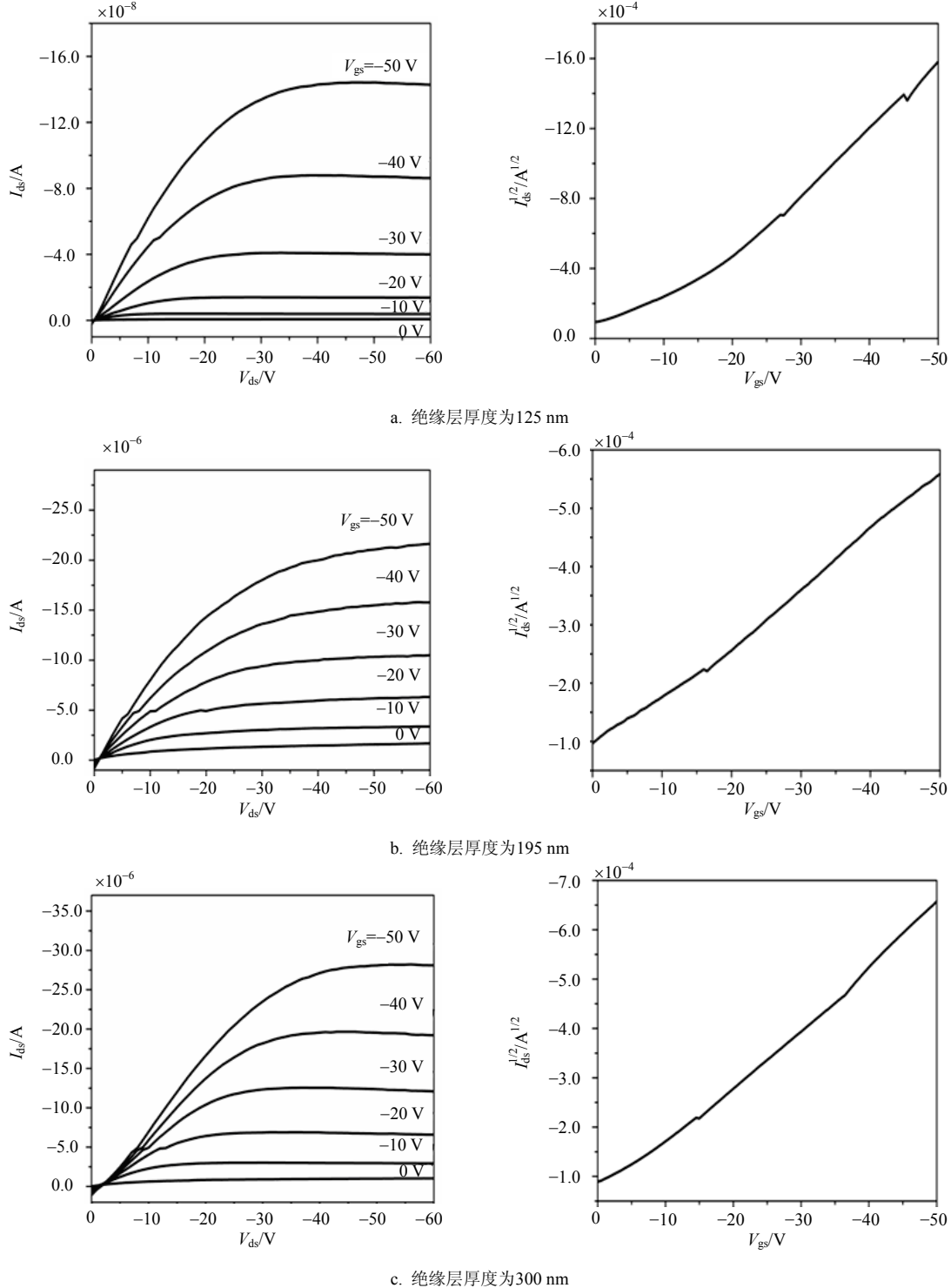


图2 绝缘层厚度为125、195和300 nm的CuPc薄膜晶体管的电学特性曲线

从图2中可以看出, CuPc OTFT具有明显的线性区和饱和区。绝缘层厚度越大, CuPc OTFT的源漏

电流越大。绝缘层厚度为125、195和300 nm的单位面积电容率分别为27.6、17.7和11.5 nF/cm²。分别计

算得到3个器件的阈值电压 V_{th} 、场效应迁移率 μ 、开关电流比 $\lambda(I_{on}/I_{off})$ 如表1所示。

表1 绝缘层厚度对CuPc OTFT性能影响

厚度/nm	单位面积电容率/nF·cm ⁻²	场效应迁移率/cm ² ·Vs ⁻¹	开关电流比 λ	阈值电压/V
125	26.7	1.533×10^{-5}	13	-6.5
195	17.7	3.661×10^{-4}	203	-16.5
300	11.5	6.897×10^{-5}	27.3	-11.3

从表1可以得到，绝缘层厚度为195 nm的CuPc薄膜晶体管具有较高的场效应迁移率、开关电流比和阈值电压，300 nm绝缘层厚度的器件次之，125 nm绝缘层厚度的器件各参数指标均最小。

从气体传感器角度出发，对3个不同绝缘层厚度的CuPc薄膜晶体管的气敏特性也进行了测试。测试过程中发现CuPc薄膜晶体管对H₂S气体具有良好的气敏响应。以100 ppm的H₂S气体为检测对象，分别对3个不同绝缘层厚度器件的气敏性能进行了检测。设置3个器件的 $V_{ds}=-50$ V， $V_{gs}=-40$ V，分别得到源漏电流随时间的变化情况。将漏电流利用响应率转化为响应率曲线，图3是室温下3个器件对100 ppm H₂S气体的实时响应曲线。可以看到，绝缘层厚度不同对器件的气敏性能有一定的影响，其中，195 nm绝缘层厚度器件的响应率最高。在后续的研究中，均采用绝缘层厚度为195 nm的薄膜晶体管。

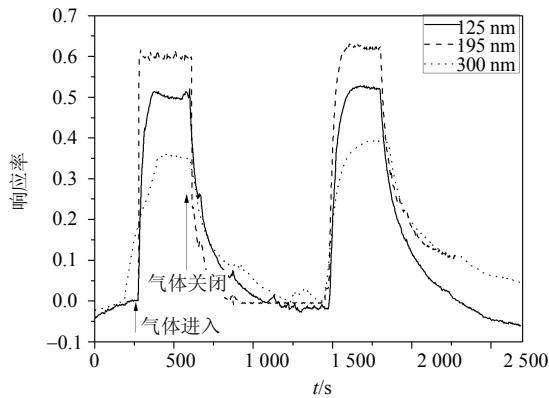


图3 3种绝缘层厚度的CuPc OTFT室温下对100 ppm H₂S气体的响应

图3对100 ppm浓度的H₂S气体进行了2次重复性测试，从图中可以看出，CuPc薄膜晶体管气体传感器具有良好的重复性。

图4是室温下195 nm SiO₂层的CuPc薄膜晶体管对不同浓度H₂S气体的实时响应曲线(工作点参数： $V_{ds}=-50$ V， $V_{gs}=-40$ V)。依次对CuPc薄膜晶体管通入100、200、300、400、500 ppm浓度的H₂S气体，CuPc薄膜晶体管对不同浓度的H₂S气体表现出了不

同的响应。

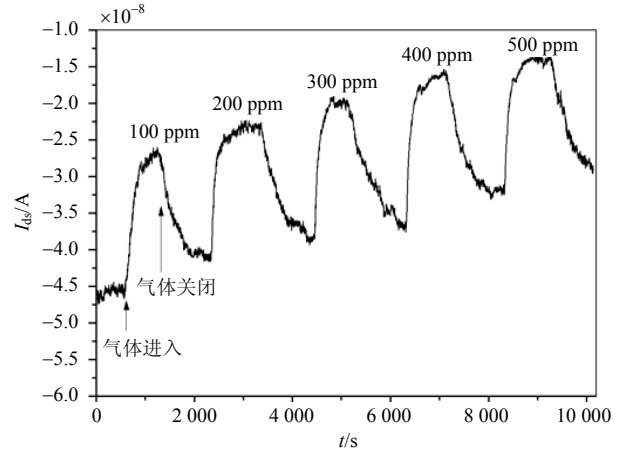


图4 CuPc OTFT在室温下对不同浓度H₂S气体的实时响应/恢复曲线

图4表明CuPc薄膜晶体管表现出基线漂移的情况，器件对不同H₂S的响应变化不明显，根据图4的实验结果通过计算响应率，绘制出CuPc薄膜晶体管对不同浓度H₂S气体的响应度曲线，如图5所示。从图5可以看出，其线性相关系数达到96.7%，表明CuPc薄膜晶体管对不同浓度H₂S气体的响应率表现出良好的线性关系。

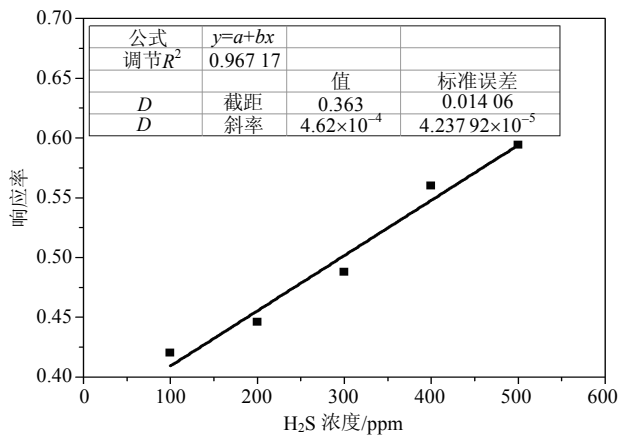


图5 CuPc OTFT对H₂S气体的响应图

实验还对CuPc薄膜晶体管在不同浓度H₂S气氛下的转移特性曲线进行了测试，并和在干燥空气中的曲线进行对比，如图6所示。从图6可以看出，CuPc薄膜晶体管在接触H₂S气氛后，在相同栅压下 $I_{ds}^{1/2}$ 变小，并随H₂S浓度增大而减小，这与CuPc薄膜晶体管对H₂S的实时响应情况一致。

同时，CuPc薄膜晶体管对不同气体的选择性也进行了测试。图7是室温下CuPc OTFT对100 ppm浓度的不同气体(H₂S、SO₂、CH₄、H₂、CO₂)的响应率柱状图。从图7中可以看出，CuPc薄膜晶体管对H₂S的响应率最大。

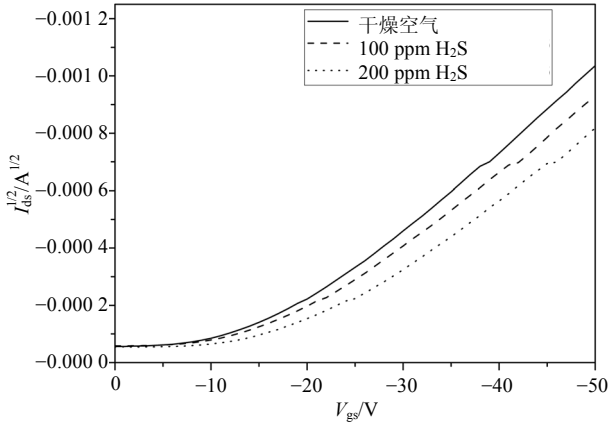


图6 CuPc OTFT在干燥空气和H₂S气氛下的转移特性曲线($V_{ds}=-50$ V)

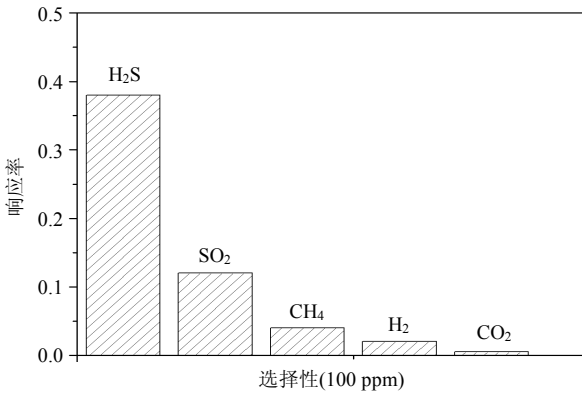


图7 CuPc OTFT选择性(100 ppm)

2 基于P3HT-ZnO纳米棒敏感膜的NO₂气体传感器

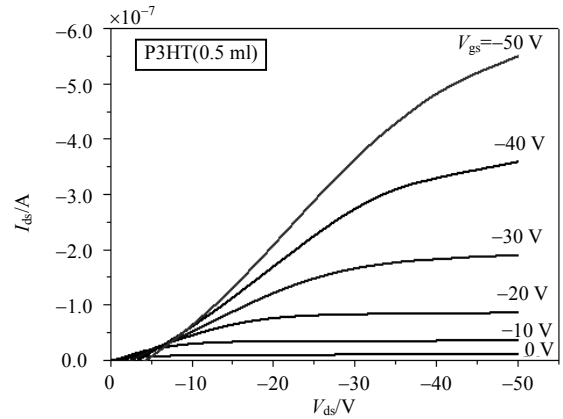
采用不同质量比的P3HT-ZnO纳米棒复合材料作为有机薄膜晶体管的有源层。配制了3种不同质量比的P3HT-ZnO纳米棒复合材料的溶液,其质量比分别为6:1、6:2和6:6。共制备了8个不同的器件以研究不同配比和不同喷涂量对OTFT电学性能的影响,具体参数如表2所示。

8个器件的输出和转移特性曲线如图8和图9所示。源漏电源随着薄膜厚度的增加而增加,将器件阈值电压和载流子迁移率的变化趋势绘制如图10所示。结果表明OTFT器件的阈值电压和载流子迁移率均随喷涂量即膜厚的增加而增加。喷涂量为0.5 ml的OTFT器件的载流子迁移率随着ZnO纳米棒的增加而提高,从 $5.49 \times 10^{-4} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 提高到 $1.29 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。同样,喷涂量为1 ml的器件,载流子迁移率从 $1.30 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 变大到 $2.62 \times 10^{-3} \text{ cm}^2/\text{Vs}$ 。可以看出,OTFT器件的载流子迁移率由于ZnO纳米棒的掺杂增加了1倍。载流子迁移率的增加是由于沟道

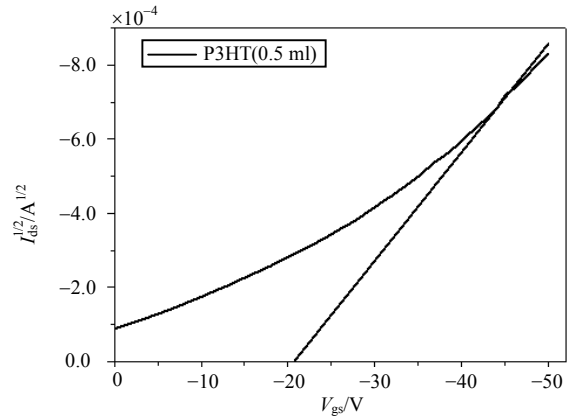
中空穴浓度的增加造成的^[12]。

表2 OTFT器件的具体电学参数

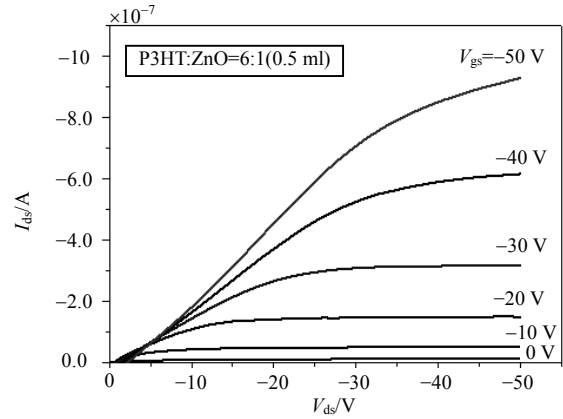
器件	敏感薄膜	喷涂量/ml	V_{th}/V	$\mu/\text{cm}^2 \cdot \text{Vs}^{-1}$
1	P3HT	0.5	-20.8	5.49×10^{-4}
2	P3HT	1	-12.8	1.30×10^{-3}
3	P3HT:ZnO=6:1	0.5	-20	9.49×10^{-4}
4	P3HT:ZnO=6:1	1	-10.1	1.61×10^{-3}
5	P3HT:ZnO=6:2	0.5	-18.7	1.2×10^{-3}
6	P3HT:ZnO=6:2	1	-7	1.83×10^{-3}
7	P3HT:ZnO=6:6	0.5	-10.9	1.29×10^{-3}
8	P3HT:ZnO=6:6	1	-6.1	2.62×10^{-3}



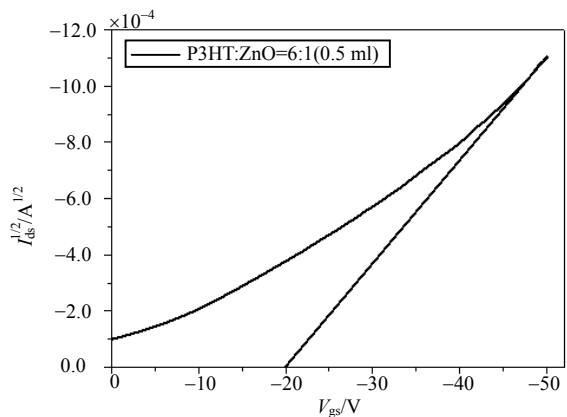
a. 纯P3HT薄膜晶体管输出特性曲线



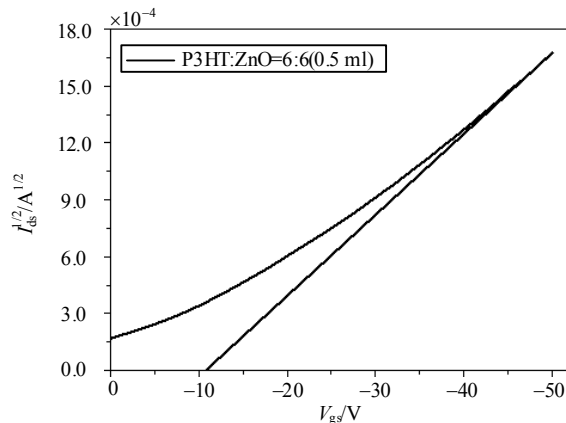
b. 纯P3HT薄膜晶体管转移特性曲线



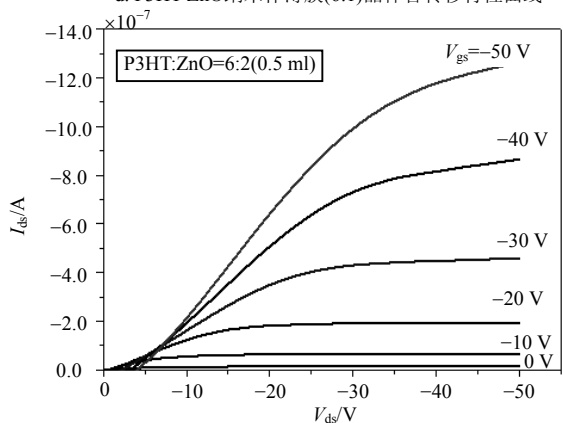
c. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:1)晶体管输出特性曲线



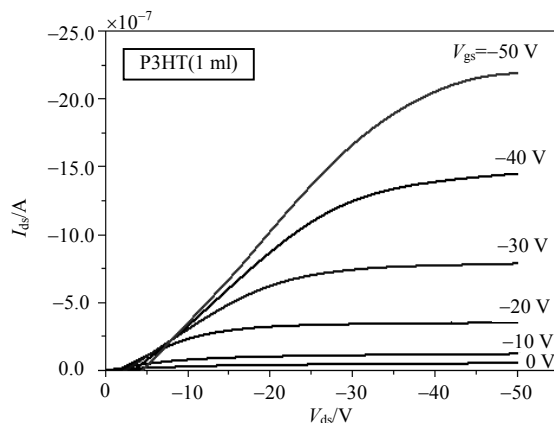
d. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:1)晶体管转移特性曲线



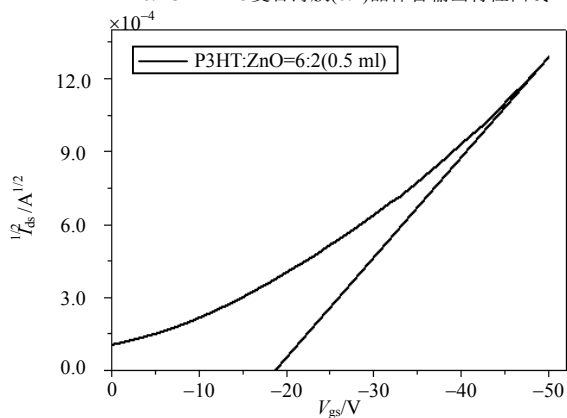
h. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:6)晶体管转移特性曲线
图8 喷涂量0.5ml的器件的电学特性曲线



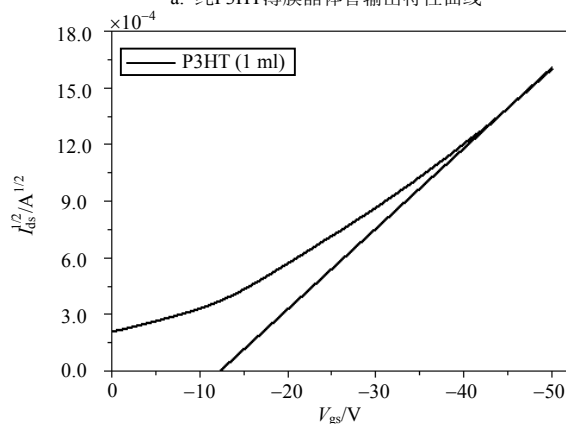
e. P3HT-ZnO复合薄膜(6:2)晶体管输出特性曲线



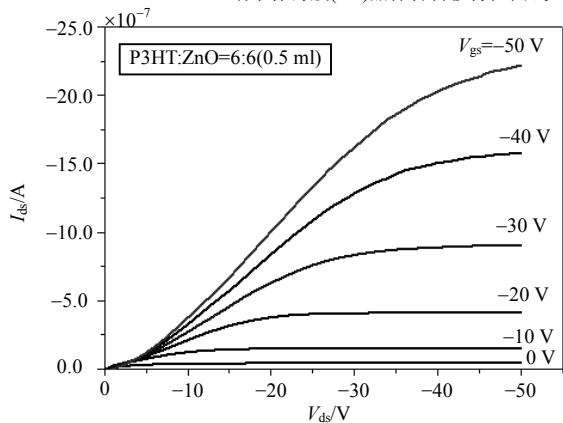
a. 纯P3HT薄膜晶体管输出特性曲线



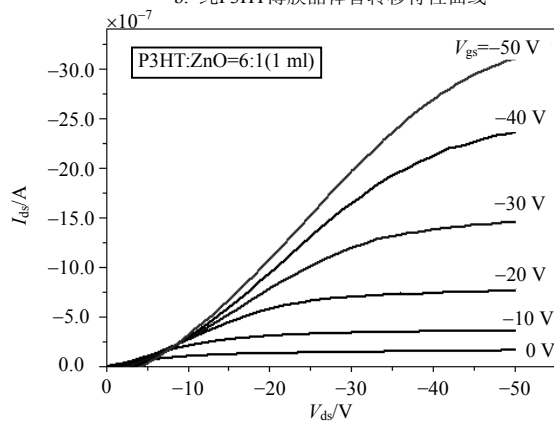
f. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:2)晶体管转移特性曲线



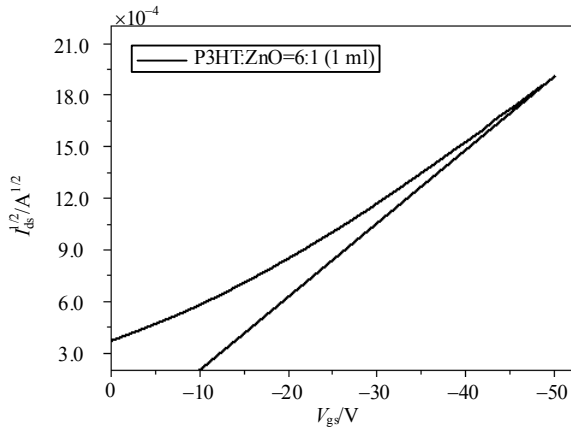
b. 纯P3HT薄膜晶体管转移特性曲线



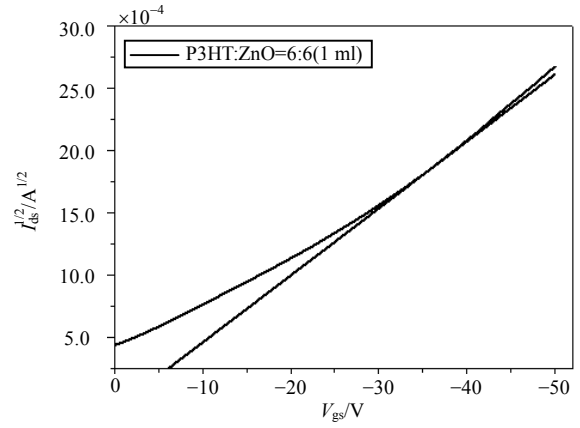
g. P3HT-ZnO复合薄膜(6:6)晶体管输出特性曲线



c. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:1)晶体管转移特性曲线

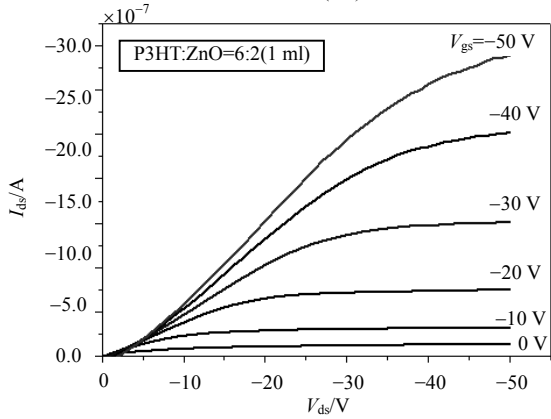


d. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:1)晶体管转移特性曲线

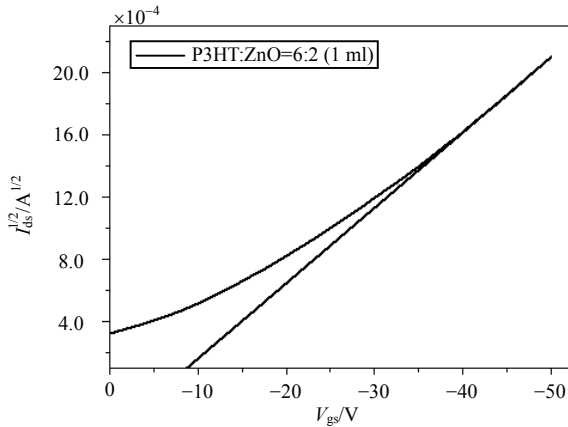


h. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:6)晶体管转移特性曲线

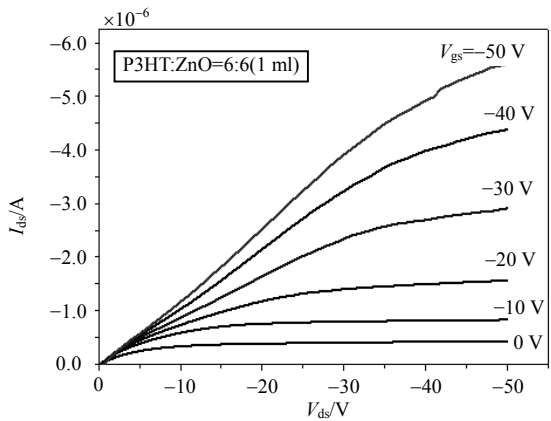
图9 喷涂量为1 ml的器件的电学特性曲线



e. P3HT-ZnO复合薄膜(6:2)晶体管输出特性曲线



f. P3HT-ZnO纳米棒薄膜(6:2)晶体管转移特性曲线



g. P3HT-ZnO复合薄膜(6:6)晶体管输出特性曲线

由于ZnO纳米棒的掺杂, 基于P3HT-ZnO纳米棒复合薄膜的OTFT的阈值电压值随掺杂浓度的增加向正向移动, 同时载流子迁移率随着掺杂浓度的增加而变大, 如图10所示。选取器件中的3个(器件2、4、6)进行NO₂气敏特性测试。

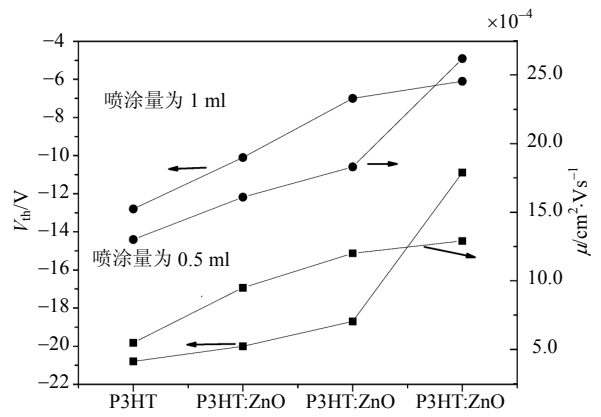
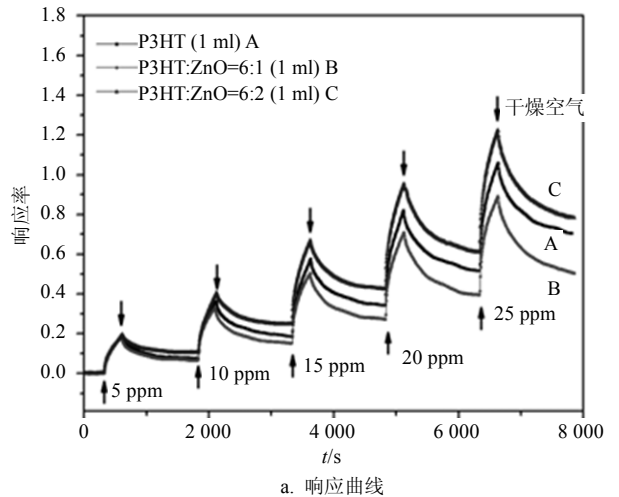
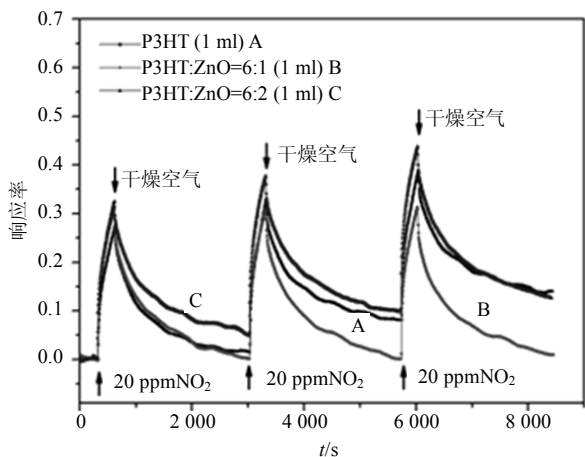


图10 阈值电压和载流子迁移率随着掺杂量和喷涂量的变化趋势

图11a是3个器件对NO₂的实时响应-恢复曲线。图11b是3个器件对20 ppm的NO₂重复性测试曲线。



a. 响应曲线



b. 重复性

图11 OTFT气体传感器的气敏性能测试曲线

在响应-恢复曲线中3个器件对20 ppm的NO₂响应值分别为0.81、0.70和0.95。而重复性曲线中，OTFT气体传感器对20 ppm的NO₂响应值分别为0.39、0.31和0.44。从图中可以看出：制备的OTFT气体传感器对于NO₂气体存在一定的敏感特性，传感器在接触到NO₂之后源漏电流迅速增加。

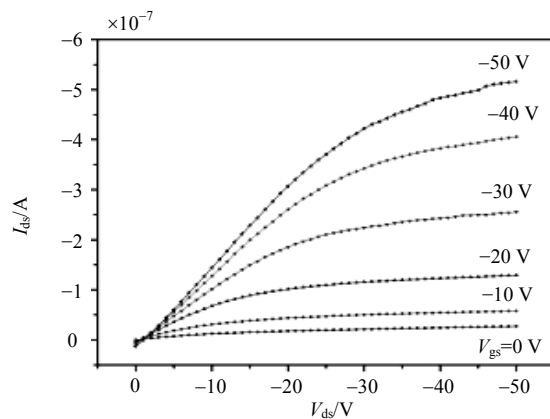
3 基于聚合物(P3HT)-MoS₂敏感膜的气体传感器

采用喷涂的方法制备了基于(P3HT)-MoS₂敏感膜的气体传感器，表3为5种器件的制备参数与电学性能参数。为了保证OTFT器件工作在饱和区，将V_{ds}固定在-70 V。

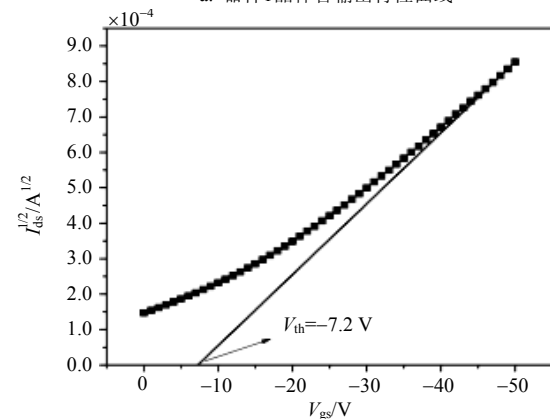
表3 5个器件的具体参数

器件	薄膜结构	喷涂体积/ml	阈值电压/V	迁移率/cm ² ·Vs ⁻¹
1	P3HT	0.5	-7.2	2.82×10 ⁻⁴
2	P3HT/MoS ₂	0.5/1	12.1	9.04×10 ⁻⁴
3	MoS ₂ /P3HT	1/0.5	14.7	7.56×10 ⁻⁴
4	P3HT-MoS ₂	0.5	-5.1	1.89×10 ⁻⁴
5	P3HT-MoS ₂	1	18.1	4.13×10 ⁻⁴

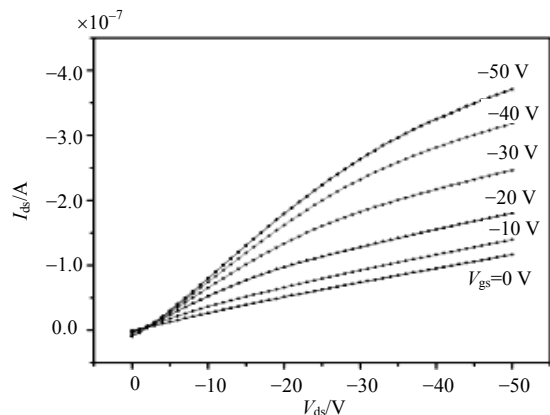
图12是器件1、2、3、4、5的输出和转移特性曲线。在负的栅压下，随着V_{ds}的增加，OTFT器件的I_{ds}先经过线性区的增长然后逐渐趋于饱和，且随着栅压向负方向移动，器件的I_{ds}逐渐变大。如图12所示，单层MoS₂掺杂的器件输出特性曲线中没有明显的饱和区。此外，器件1的阈值电压是所有制备的OTFT器件中最小的，仅为-7.2 V。分层膜和复合膜在加入MoS₂之后，阈值电压都会向正方向移动。对比表3中所列的载流子迁移率发现，由于MoS₂的载流子迁移率很高，导致了分层膜和复合膜的载流子迁移率都有所提升^[13]。器件的迁移率变大和阈值电压向正方向移动都是因为掺杂了MoS₂导致的。



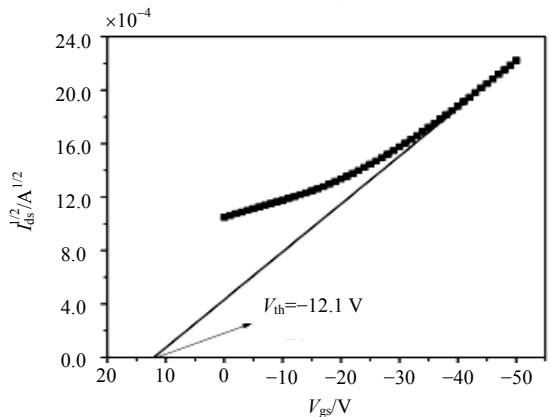
a. 器件1晶体管输出特性曲线



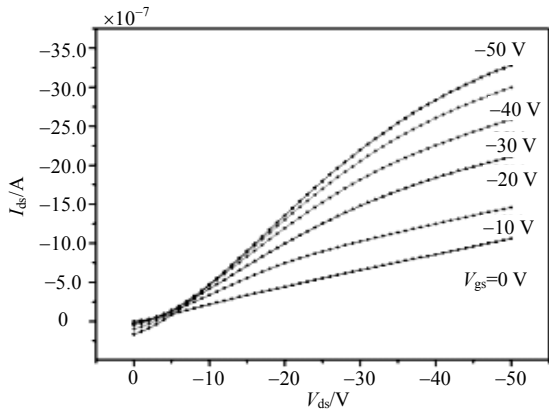
b. 器件1晶体管转移特性曲线



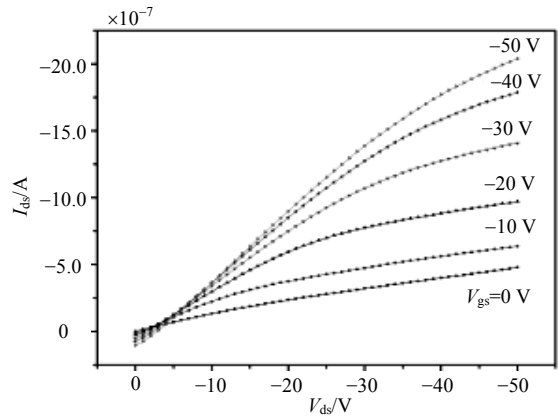
c. 器件2晶体管输出特性曲线



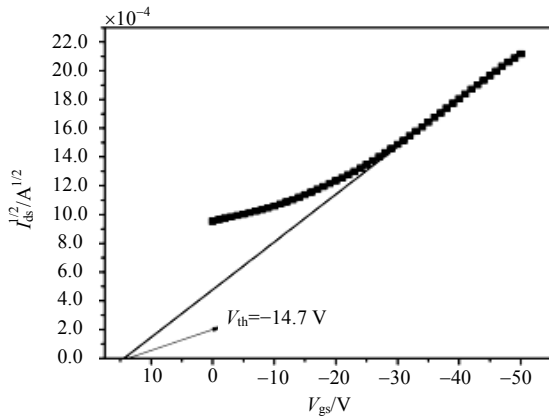
d. 器件2晶体管转移特性曲线



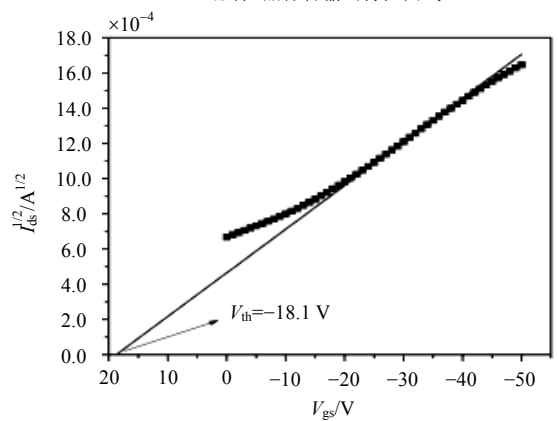
e. 器件3晶体管输出特性曲线



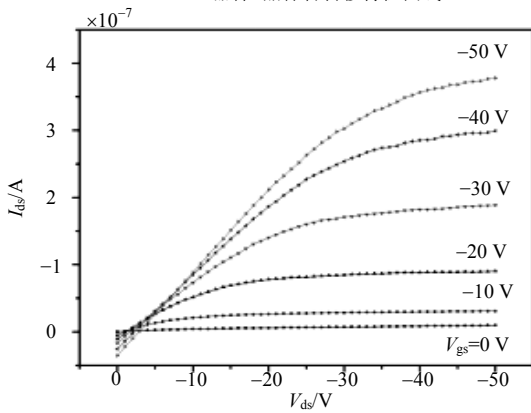
i. 器件5晶体管输出特性曲线



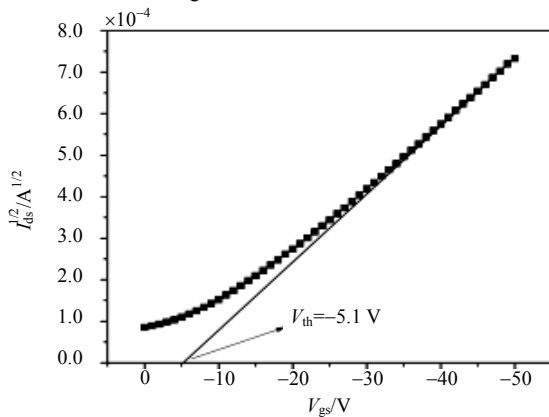
f. 器件3晶体管转移特性曲线



j. 器件5晶体管转移特性曲线



g. 器件4晶体管输出特性曲线



h. 器件4晶体管转移特性曲线

图12 OTFT器件的电学性能

将5个OTFT气体传感器分别在不同浓度的NH₃下进行气敏性能测试。测试时OTFT器件的V_{ds}和V_{gs}均固定在-50 V。

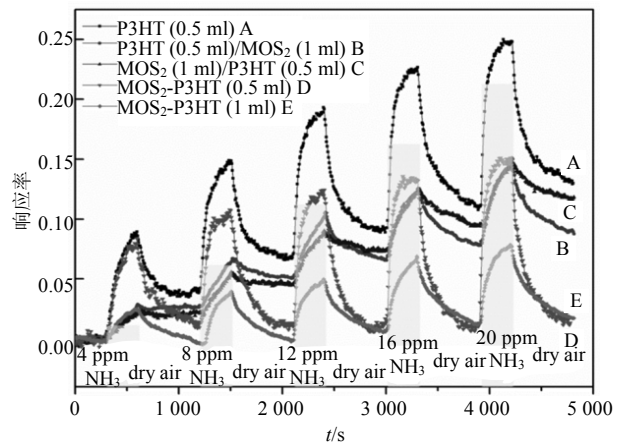


图13 OTFT气体传感器对不同浓度的NH₃的响应-恢复曲线图

图13为OTFT气体传感器在不同浓度NH₃下的实时响应-恢复曲线。可以看出器件1的响应最大,但是通入干燥空气(dry air)10 min后不能恢复到初始状态。器件2、3也有相同情况,但是器件4、5却几

乎可以恢复。器件4、5采用了P3HT-MoS₂复合薄膜作为敏感薄膜,可以看出具有分层薄膜结构的器件2、3在恢复性能方面有所欠缺。

图14表明,基于P3HT薄膜的OTFT气体传感器的灵敏度最大,基于分层膜的灵敏度次之,基于复合膜的灵敏度最小。这是因为P3HT薄膜和分层膜在一个测试循环中不能恢复到器件的初始状态,使得基线漂移导致灵敏度相对变大^[14]。然而对比器件4和器件5的灵敏度发现喷涂体积小的器件表现出更高的灵敏度。其中,线性相关系数 r^2 值越接近1表明传感器的性能越好^[15]。器件5表现出最好的线性度。

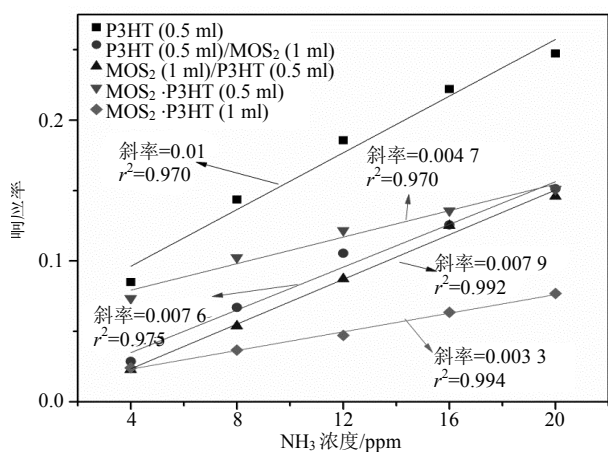


图14 OTFT气体传感器对NH₃的灵敏度和线性度曲线

对比制备的OTFT气体传感器的电学性能发现:由于单层MoS₂薄膜的掺入,OTFT器件的电学性能发生了明显的变化,特别是输出特性曲线的饱和区变得不明显了。这是由于MoS₂薄膜的本征特性决定。经过MoS₂掺杂的OTFT器件的阈值电压会向正向移动,同时载流子迁移率也会增加,这是由于单层MoS₂改变了薄膜的微观结构和薄膜内载流子状态造成的^[16]。对制备的器件进行NH₃敏感特性测试,结果表明基于P3HT-MoS₂复合膜的OTFT气体传感器的恢复时间最短。

4 结束语

本文对底栅底接触结构薄膜晶体管的结构进行了参数优化,制备了绝缘层厚度为125、195和300 nm的薄膜晶体管,对不同绝缘层厚度的CuPc薄膜晶体管的电学特性和在室温下对H₂S气体的气敏性能进行了对比分析,结果表明,绝缘层厚度为195 nm的器件具有最佳的电学特性和气敏性能。

在此基础上,还将ZnO纳米棒与P3HT混合,配制不同比例的复合材料,用喷涂的方法在器件上成膜。P3HT与ZnO纳米棒由于功函数的差别,电子会

从P3HT分子转移到ZnO纳米棒中,形成多子的积累,减小静电势造成阈值电压的正向移动^[17]。采用P3HT-ZnO纳米棒复合材料作为NO₂气体的敏感材料,研究传感器的气敏响应性能。传感器对于NO₂气体的恢复时间很长,导致响应曲线和重复性曲线检测到的传感器响应有所偏差,这是因为传感器的基线漂移造成的偏差^[18]。结果表明掺杂比例为6:1的复合薄膜表现出的气敏性能最优。

另外,制备了基于MoS₂-P3HT复合材料的有机薄膜晶体管,对比了MoS₂-P3HT分层膜和复合膜器件的电学性能和NH₃气敏性能差异。由于单层MoS₂具有与RG0类似的电学性能,最主要的表现是阈值电压向正向移动和载流子迁移率变大^[19]。在室温下对器件的NH₃敏感性能进行了测试。基于MoS₂-P3HT复合薄膜的气体传感器在每次的测试循环中都恢复到了传感器的初始状态。所以,传感器的恢复能力得到了明显的提高。

参 考 文 献

- [1] 何杰, 夏建白. 半导体科学与技术[M]. 北京: 科学出版社, 2007: 524-554.
HE Jie, XIA Jian-bai. Semiconductor science and technology[M]. Beijing: Science Press, 2007: 524-554.
- [2] WEIMER P K. The TFT a new thin-film transistor[J]. Proceedings of the IRE, 1962, 50(6): 1462-1469.
- [3] HOROWITZ G. Organic field-effect transistors[J]. Advanced Materials, 1998, 10(5): 365-377.
- [4] 张波, 太惠玲, 段成丽, 等. 多壁碳纳米管/ α -六噻吩双层OTFT气体传感器的制备及特性分析[J]. 功能材料, 2014, 45(6): 6041-6044, 6050.
ZHANG Bo, TAI Hui-ling, DUAN Cheng-li, et al. The preparation and characteristic analysis of bilayer organic thin-film transistors gas sensor based on MWCNTs/ α 6T[J]. Functional Materials, 2014, 45(6): 6041-6044, 6050.
- [5] KLAUK H, GUNDLACH D J, NICHOLS J, et al. Pentacene organic thin-film transistors for circuit and display applications[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 1999, 46(6): 1258-1263.
- [6] SHERAW C D, ZHOU L, HUANG J R, et al. Organic thin-film transistor-driven polymer-dispersed liquid crystal displays on flexible polymeric substrates[J]. Appl Phys Lett, 2002, 80: 1088-1090.
- [7] 李娴. 有机薄膜晶体管气体传感器的制备及特性研究[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
LI Xian. Preparation and characteristics of organic thin film transistor gas sensor research[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2013.
- [8] QIU Yong, HU Yuan-chuan, DONG Gui-fang, et al. Preparation of organic thin-film field effect transistor[J]. Chinese Science Bulletin, 2002, 47(47): 1529-1532.
- [9] 胡远川. 有机薄膜场效应晶体管及其载流子传输特性[D].

北京: 清华大学, 2004.

HU Yuan-chuan. Organic thin film field effect transistor and its carrier transmission characteristics[D]. Beijing: Tsinghua university, 2004.

- [10] LI Xian, JIANG Ya-dong, XIE Guang-zhong, et al. Copper phthalocyanine thin film transistors for hydrogen sulfide detection[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2013, 176(6): 1191-1196.
- [11] 李娴, 蒋亚东, 谢光忠, 等. α -六噻吩OTFT器件痕量NO₂气体传感器的制备及特性研究[J]. 材料导报, 2012, 26(11): 16-19.
LI Xian, JIANG Ya-dong, XIE Guang-zhong, et al. Study on preparation and properties of organic thin-film transistors based on α -Sexithiophene to trace NO₂[J]. Materials Review, 2012, 26(11): 16-19.
- [12] LI Xian, JIANG Ya-dong, XIE Guang-zhong, et al. Ethanol gas sensors based on copper phthalocyanine thin-film transistors[C]//International Conference on Apperceiving Computing and Intelligence Analysis 2010. [S.l.]: IEEE, 470-473.
- [13] XIE Tao, XIE Guang-zhong, DU Hong-fei, et al. Two novel methods for evaluating the performance of OTFT gas sensors[J]. Sensors & Actuators B Chemical, 2015, 230: 176-183.
- [14] 李娴, 蒋亚东, 太惠玲, 等. 酞菁铜薄膜晶体管气体传感器制备及特性研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2012, 26(12): 1074-1079.
LI Xian, JIANG YA-dong, TAI Hui-ling, et al. The fabrication and the characteristics investigation of organic thin-film transistor gas sensors based on the copper phthalocyanine[J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2012, 26(12): 1074-1079.
- [15] CHEN Yu-yang, XIE Guang-zhong, XIE Tao, et al. Thin film transistors based on poly(3-hexylthiophene)/[6,6]-phenyl C61 butyric acid methyl ester hetero-junction for ammonia detection[J]. Chemical Physics Letters, 2015, 638: 87-93.
- [16] XIE Tao, XIE Guang-zhong, SU Yuan-jie, et al. Ammonia gas sensors based on Poly (3-hexylthiophene)-molybdenum disulfide films transistors[J]. Nanotechnology, 2016, 27(6): 065502.
- [17] LI Xian, JIANG Ya-dong, TAI Hui-ling, et al. The fabrication and optimization of OTFT formaldehyde sensors based on Poly(3-hexylthiophene)/ZnO composite films[J]. Science China, 2013, 56(8): 1877-1882.
- [18] XIE Tao, XIE Guang-zhong, YE Zong-biao, et al. Thin film transistors gas sensors based on poly(3-hexylthiophene)/ Zinc oxide-nanorods composite film for nitrogen dioxide detection[C]//Conference on IEEE Sensors, 2015. [S.l.]: IEEE, 2015: 1-4.
- [19] XIE Tao, XIE Guang-zhong, ZHOU Yong, et al. Thin film transistors gas sensors based on reduced graphene oxide/poly(3-hexylthiophene) bilayer film for nitrogen dioxide detection[J]. Chemical Physics Letters, 2014, 614: 275-281.

编辑 漆 蓉

谢光忠(1968—), 男, 教授, 博士生导师。主要从事敏感材料与传感器技术研究, 研究成果已转化并获得广泛应用, 获国家技术发明二等奖1项, 国家科技进步二等奖1项, 省部级科技奖励11项, 申请国家发明专利近20项。在Sensors and Actuators B、IEEE Sensors Journal、Chemical Physics Letters、Nanotechnology、Journal of Materials Science-materials in Electronics、Applied Physics Letters等国内外刊物上发表论文110余篇。

