

文章编号:1007-2780(2022)07-0797-09

基于三组分共轭聚合物的高灵敏度有机 晶体管二氧化氮传感器

王冠龙, 王晓鸿, 邱龙臻*

(合肥工业大学 光电技术研究院 特种显示技术国家工程实验室,
测量理论与精密仪器安徽省重点实验室, 安徽 合肥 230009)

摘要:研究了基于联噻吩-氮杂异靛蓝-双(2-氧代二氢-7-氮杂吡啶-3-亚基)苯并二呋喃二酮的三组分给体-受体共轭聚合物(BTNIDNBIBDF-50)薄膜对二氧化氮气体传感特性。通过控制半导体浓度调控半导体薄膜表面形貌,研究其对二氧化氮气体灵敏度的影响。聚合物半导体BTNIDNBIBDF-50的浓度为2 mg/mL时对NO₂气体表现出最优的传感性能,对体积分数为 10×10^{-6} NO₂气体的灵敏度为121.44%。实验结果表明:三组分共轭聚合物BTNIDNBIBDF-50呈现双极型半导体特性,降低聚合物半导体浓度会使薄膜表面出现明显的孔洞结构,提高传感器对NO₂气体的灵敏度。但过多的孔洞又会使气体解吸附速率的变化大于吸附速率变化,导致传感器灵敏度降低。

关键词:三组分给体-受体共轭聚合物;有机薄膜晶体管;气体传感器;二氧化氮检测;双极性半导体

中图分类号: TN321⁺.5 **文献标识码:** A **doi:** 10.37188/CJLCD.2022-0101

High sensitivity organic transistor nitrogen dioxide sensor based on three component conjugated polymer

WANG Guan-long, WANG Xiao-hong, QIU Long-zhen*

(National Engineering Lab of Special Display Technology, Anhui Province Key Laboratory of
Measuring Theory and Precision Instrument, Academy of Opto-Electronic Technology,
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: A three-component donor-acceptor conjugated polymer (BTNIDNBIBDF-50) film based on dithiophene-aza-isoindigo-bis (2-oxodihydro-7-azaindol-3-ylidene) benzodifurandione was investigated for the sensing characteristics of nitrogen dioxide gas. The effect of semiconductor concentration on the sensitivity of nitrogen dioxide was studied by controlling the morphology of semiconductor film. The polymer semiconductor BTNIDNBIBDF-50 showed the best sensing performance for NO₂ gas at a concentration of 2 mg/mL, and the sensitivity for NO₂ gas at 10×10^{-6} (volum fraction) was 121.44%. The experimental results show that bipolar semiconductor polymer BTNIDNBIBDF-50 shows ambipolar charge transport characteristics. Reducing the concentration of the polymer semiconductor will lead to obvious holes on the

收稿日期:2022-03-30;修订日期:2022-04-21.

基金项目:中央高校业务经费(No. PA2021GDSK0098)

Supported by Fundamental Research Funds for the Central Universities of China(No. PA2021GDSK0098)

*通信联系人, E-mail: lzhqiu@hfut.edu.cn

surface of the film and improve the sensitivity of the sensor to NO_2 gas. However, the excessive porosity can cause the change in gas desorption rate to be greater than the change in adsorption rate, leading to the decrease of sensor sensitivity.

Key words: three-component donor-acceptor conjugated polymer; organic thin film transistor; gas sensor; nitrogen dioxide detection; ambipolar semiconductor

1 引言

随着人们环保意识的增强以及世界各国对有毒气体排放和污染物排放方面的严格立法,各种气体监测及预警装置正在得到越来越广泛的应用,人们对气体传感器的需求不断增加。其中,基于有机场效应晶体管(OFET)的传感器因为成本低廉、响应快速、使用简便等优点,具有非常广阔的发展前景^[1-4]。

高灵敏度对传感器的实际应用至关重要,已经有许多关于提高晶体管式气体传感器灵敏度的报道^[5-10]。Lu等通过真空冷冻干燥模板的方法制备了多孔半导体薄膜,有利于气体分子的扩散,提高了传感器的灵敏度,但需要先真空冷冻干燥制备半导体层生长模板,在沉积半导体层后要用胶带将模板去除干净,其制备工艺复杂^[11]。Zhou等报道了基于双极型的OFET气体传感器,与单极晶体管相比,双极晶体管器件的电流信号表现出双重响应,通过测试几种氧化还原气体,观察到更高的信号变化,从而使双极晶体管能够区分混合气体。但制备分层双极型晶体管,一种材料既充当p沟道传输层又充当后续n性材料的生长模板,需要高质量的薄膜表面,制备起来不够简便,对工艺的要求很高^[12]。而三组分共轭聚合物从材料改性的角度出发,在两组分给受体共轭聚合物中引入第三组分降低了双极性器件制备的复杂程度,在制备双极型半导体中受到广泛关注^[13-17]。目前关于三组分聚合物半导体在有机晶体管型气体传感器中的报道还相对较少,因此需要对其进行系统的研究。

本工作研究了基于给体-受体共轭聚合物联噻吩-氮杂异靛蓝-双(2-氧代二氢-7-氮杂吡啶-3-亚基)苯并二咪喃二酮(BTNIDNBIBDF-50)的有机场效应晶体管传感器,通过在给体-受体单元引入第三组分NBIBDF增强聚合物的电子转移,达到双极性半导体的传输性质,使制备的传

感器具有对目标气体多参数分析、高灵敏度和高稳定性的优势。通过合成三组分聚合物能够降低多层制备p型、n型半导体的工艺复杂性,且通过简单的浓度控制,可调控BTNIDNBIBDF-50半导体薄膜的表面形貌,研究其对 NO_2 气体灵敏度的影响。

2 实验

2.1 OFET传感器的制备

制备底栅顶接触OFET器件结构如图1(a)所示,用硅片刀将 SiO_2 基底裁成 $1.1\text{ cm} \times 1.1\text{ cm}$,并通过浓硫酸溶液与过氧化氢溶液比例为7:3的混合溶液 $150\text{ }^\circ\text{C}$ 加热90 min后,回收混合溶液并妥善保管,将加热并冷却后的 SiO_2 基底用去离子水反复冲洗,再用氮气气体吹干并加热烘干表面水分。清洗干净的 SiO_2 基底通过旋涂仪旋涂全氟(1-丁烯基乙烯基醚聚合物)(Cytop)作为修饰层,旋涂速度为 $3\ 000\text{ r/min}$,加速度为 $3\ 000\text{ r/min}$,旋涂时间为40 s。将旋涂后的基底放置在 $180\text{ }^\circ\text{C}$ 热台上加热15 min固化。将不同质量聚合物半导体BTNIDNBIBDF-50溶解于氯苯溶液中,配制成 1 mg/mL 、 2 mg/mL 、 3 mg/mL 浓度的聚合物半导体溶液, $80\text{ }^\circ\text{C}$ 加热溶解4 h后,用针管抽取半导体溶液,通过过滤头以 $3\ 000\text{ r/min}$ 的速度, $3\ 000\text{ r/min}$ 加速度,40 s旋涂时间在氮气手套箱中旋涂到被Cytop修饰的 SiO_2 基底上,并在真空干燥箱中放置30 min抽干多余溶剂。在高真空条件下加热金(Au),并通过掩模版将蒸镀的金图案化作为OFET的源漏电极($W=1\ 000\text{ }\mu\text{m}$, $L=100\text{ }\mu\text{m}$)。

2.2 实验材料及仪器

聚合物材料的合成路线如图1(b)所示,以联噻吩(BT)为给体单元,两受体单元氮杂异靛蓝(NID)与双(2-氧代二氢-7-氮杂吡啶-3-亚基)苯并二咪喃二酮(NBIBDF)以1:1的比例无规共聚

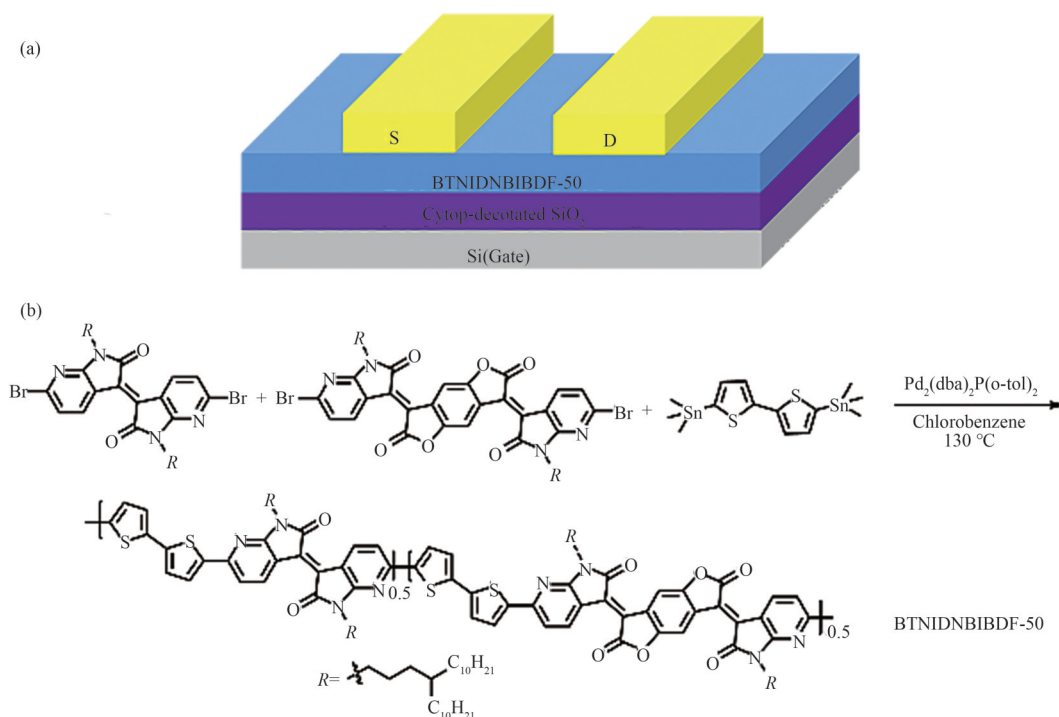


图1 (a)传感器器件结构;(b)聚合物半导体合成路线。

Fig. 1 (a) Sensor device structure; (b) Polymer semiconductor synthesis route.

合成聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50^[18]。氯苯(C₆H₅Cl)购自 Sigma-Aldrich Chemical Co; Cytop 购自 Asahi Glass Co., Ltd.。Keithley 4200 型半导体特性分析系统用于测试 OFET 气体传感器的电学特性和气体传感特性。轻敲式原子力显微镜(AFM)用于研究半导体表面的微观形貌。

3 结果和讨论

3.1 BTNIDNBIBDF-50 薄膜的表面形貌及传感器电学性能

利用原子力显微镜表征不同浓度 BTNIDNBIBDF-50 薄膜的表面形貌,图 2(a)是浓度为 3 mg/mL、2 mg/mL 和 1 mg/mL BTNIDNBIBDF-50 薄膜的 AFM 图像。从图 2 可以看出,聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的浓度为 3 mg/mL 时,半导体薄膜的厚度为 8.7 nm,聚合物表面呈现一层致密的薄膜结构。当 BTNIDNBIBDF-50 的浓度降低到 2 mg/mL 时,半导体薄膜的厚度为 6.3 nm,表面出现明显的孔洞结构。当聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的浓度继续降低为 1 mg/mL 时,半导体薄膜厚度为 5.9 nm,聚合物表面表现出大而连续的孔洞。由图 2(b)不同

浓度聚合物薄膜的孔径分布可以看到,浓度为 3 mg/mL 的半导体薄膜表现出平整的表面形貌,不存在孔洞结构。当聚合物浓度为 2 mg/mL 时,半导体薄膜会出现较少的孔洞结构,平均孔径为 86 nm。而聚合物浓度为 1 mg/mL 时,聚合物表面出现较密且大的孔洞结构,平均孔径为 118 nm。因此,随着聚合物浓度的降低,半导体薄膜的孔洞结构增加,孔径增大。半导体薄膜的厚度随聚合物浓度的变化如图 2(c)所示,对于厚度仅为几个分子层的半导体薄膜,继续降低半导体溶液的浓度,薄膜的厚度变化较小,而薄膜的表面形貌会发生较大的变化,不仅出现明显的孔洞结构,且孔径和孔隙面积也会随着聚合物浓度降低而增大,如图 2(d)所示。

使用底栅/顶接触结构的有机场效应晶体管器件研究不同浓度聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的电学性能,设置漏极源极电压 $V_{DS} = -80$ V,栅极电压从 20 V 施加到 -80 V 测试传感器器件的转移特性,结果如图 3(a)~(c)所示。从转移特性曲线可以看到,聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 表现出典型的双极性半导体的传输性质,图 3(d)为提取的传感器迁移率及阈

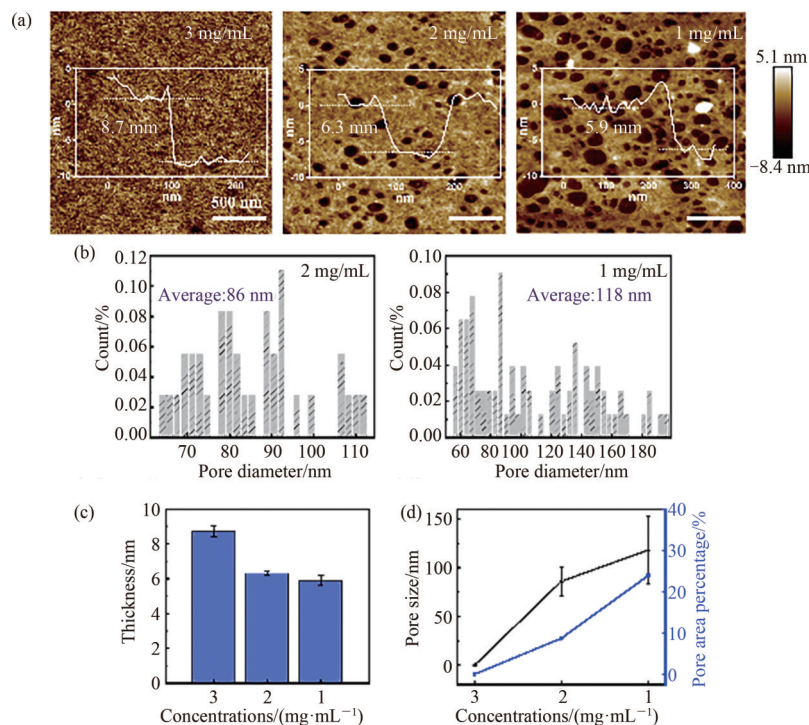


图2 不同浓度聚合物薄膜。(a)表面形貌;(b)孔径分布;(c)膜厚变化;(d)孔径和孔隙面积百分比变化。

Fig. 2 Polymer films with different concentrations. (a) Surface morphology; (b) Pore size distribution; (c) Film thickness variation; (d) Percentage change in pore size and pore area.

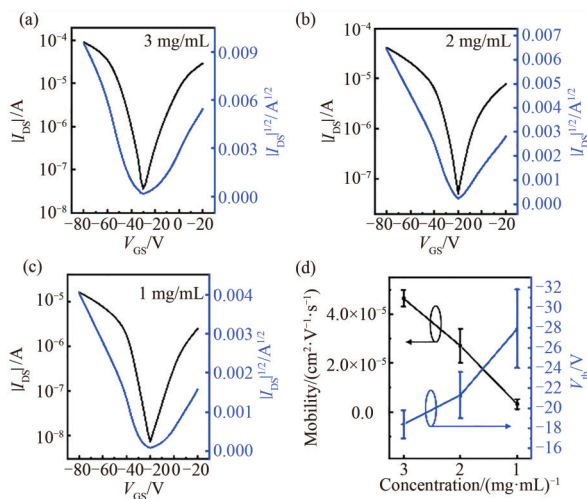


图3 不同浓度BTNIDNBIBDF-50传感器转移特性曲线。(a) 3 mg/mL; (b) 2 mg/mL; (c) 1 mg/mL; (d) 电学性能参数。

Fig. 3 Transfer characteristic curves of BTNIDNBIBDF-50 sensor at different concentrations. (a) 3 mg/mL; (b) 2 mg/mL; (c) 1 mg/mL; (d) Electrical performance parameters versus concentration of polymer solution curve.

值电压的参数变化。从图3(d)可以看到,随着聚合物浓度的不断降低,器件的迁移率从 $4.64 \times$

$10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ 降低至 $3.22 \times 10^{-5} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 阈值电压从 -18.4 V 升高至 -27.9 V ,表明随着聚合物半导体浓度的降低,聚合物薄膜会变得不连续,影响了载流子的有效导通沟道,使导通电流减小。

3.2 不同浓度BTNIDNBIBDF-50薄膜对二氧化氮的传感性能

为了研究不同浓度BTNIDNBIBDF-50聚合物对 NO_2 气体的传感性能,制备OFET传感器并在大气环境下测试其对 NO_2 气体的传感性能,设置漏极源极电压 $V_{\text{DS}} = -80 \text{ V}$,栅极电压从 20 V 施加到 -80 V 测试传感器器件的转移特性。首先测试不同浓度BTNIDNBIBDF-50的传感器在未通入 NO_2 气体前的转移特性曲线作为基线,如图4(a)~(c)中黑线所示。对传感器通入相同浓度(10×10^{-6})的 NO_2 气体,保持相同的气体通入时间(10 s),气体流速控制在 400 mL/min ,测试传感器在通入 NO_2 气体后的转移特性曲线如图4(a)~(c)中红线所示。与未通入 NO_2 气体的传感器电流相比,在通入 NO_2 气体后,传感器的电流升高,这主要是由于 NO_2 作为一种氧化性气体,会

在半导体内形成电子陷阱,捕获半导体内电子,提高空穴浓度,从而提高导电沟道的空穴电流^[19]。由于聚合物半导体内的电子被NO₂气体分子捕获,电子浓度降低而空穴浓度提高,所以

聚合物半导体的传输性质也发生了变化,由未通入NO₂气体的双极性传输变成通入NO₂气体的p型传输,因此会对NO₂气体的响应表现出敏感性。

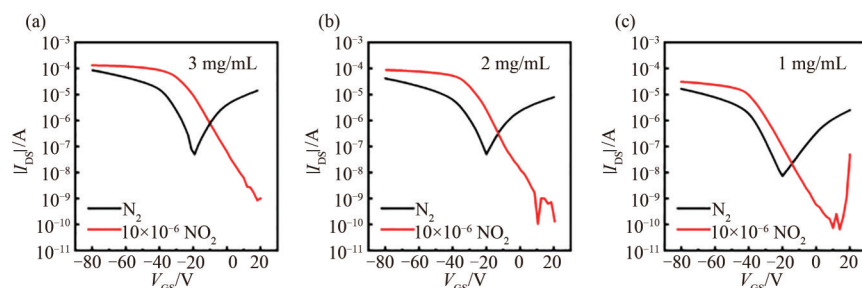


图4 不同浓度BTNIDNBIBDF-50传感器NO₂传感特性。(a)3 mg/mL;(b)2 mg/mL;(c)1 mg/mL。

Fig. 4 NO₂ sensing characteristics of BTNIDNBIBDF-50 sensor at different concentrations. (a) 3 mg/mL; (b) 2 mg/mL; (c) 1 mg/mL.

对不同浓度BTNIDNBIBDF-50的传感器施加 $V_{GS} = -35$ V的栅极电压,测试传感器在通入NO₂气体前后电流和阈值电压的变化如图5(a)、(b)所示。从图中可以看到,传感器在通入NO₂气体后

表现出电流升高的现象,且聚合物半导体浓度为2 mg/mL时,传感器电流变化率最大。阈值电压在通入NO₂气体后降低,主要是由于空穴浓度的升高使传感器可以在更低的栅极电压下形成导电沟道。

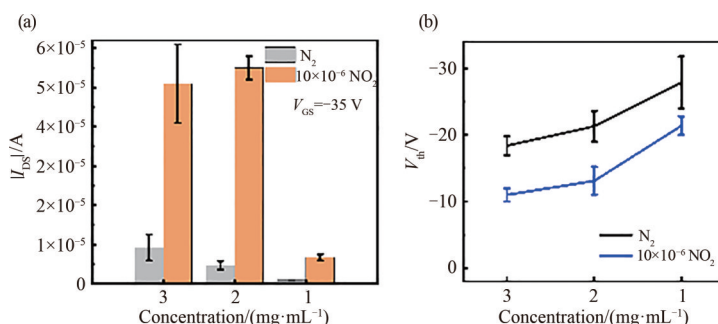


图5 不同浓度BTNIDNBIBDF-50传感器。(a)源漏电流与溶液浓度的关系;(b)阈值电压与溶液浓度的关系。

Fig. 5 BTNIDNBIBDF-50 sensors of different concentrations. (a) Source leakage current versus solution concentration; (b) Threshold voltage versus solution concentration.

为了进一步研究不同浓度BTNIDNBIBDF-50聚合物半导体对NO₂气体传感性能的影响,分别对传感器通入不同浓度的NO₂气体,气体浓度是通过流量计控制NO₂气体与高纯度N₂气体的流量比例,总流速控制在400 mL/min。对传感器的栅极施加0.2 Hz的脉冲工作电压,以克服OFET偏压不稳定的特性, $V_{on} = -35$ V, $V_{off} = 0$ V,漏极电压恒定为-35 V,测试结果如图6(a)~(c)所示。通过传感器对NO₂气体的循环测试,计算其对NO₂气体的灵敏度变化,计算结果如图6(d)所

示。灵敏度的计算通过公式(1)来定义^[20]:

$$S = \frac{|I_{Gas} - I_0|}{I_0} \times 100\% \quad (1)$$

其中S为传感器灵敏度, I_{Gas} 为传感器暴露在NO₂气体条件下的源漏极电流, I_0 表示未暴露在NO₂气体条件下的源漏极电流。从图6(a)中可以看到,当聚合物半导体BTNIDNBIBDF-50的浓度为3 mg/mL时,随着NO₂气体浓度从 800×10^{-9} (体积分数),逐渐升高到 10×10^{-6} ,传感器对NO₂气体的灵敏度不断提高,在通入 10×10^{-6} NO₂气

体时的最高灵敏度达到 82.17%,而当聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的浓度为 2 mg/mL 时,传感器对 NO_2 气体的灵敏度有所提升,在通入 10×10^{-6} NO_2 气体时的最高灵敏度达到 121.44%,但当聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的浓度为 1 mg/mL 时,传感器对 NO_2 气体的灵敏度有所下降,在通入 10×10^{-6} NO_2 气体时的最高灵敏度只有 76.95%。图 6(d) 是不同浓度聚合物半导体随着 NO_2 气体浓度变化,传感器灵敏度的变化曲线。可以看到,聚合物半导体浓度为 2 mg/mL 时对 NO_2 气体的灵敏度要高于其他两种不同浓

度。这主要是由于,随着聚合物浓度的降低,分子数量减少,导致薄膜出现不连续的结构,形成一些大的孔洞,这种孔洞结构有利于气体分子的扩散,从而提高聚合物半导体对 NO_2 气体的灵敏度。随着聚合物半导体浓度的进一步降低,聚合物表面出现更多大而密的孔洞,这些孔洞结构在增大气体吸附速率的同时,也会增加气体解吸附速率,且气体解吸附速率的变化率大于气体吸附的变化速率,导致半导体薄膜无法与更多的气体分子进行电荷交互,所以会导致传感器的灵敏度降低^[21]。

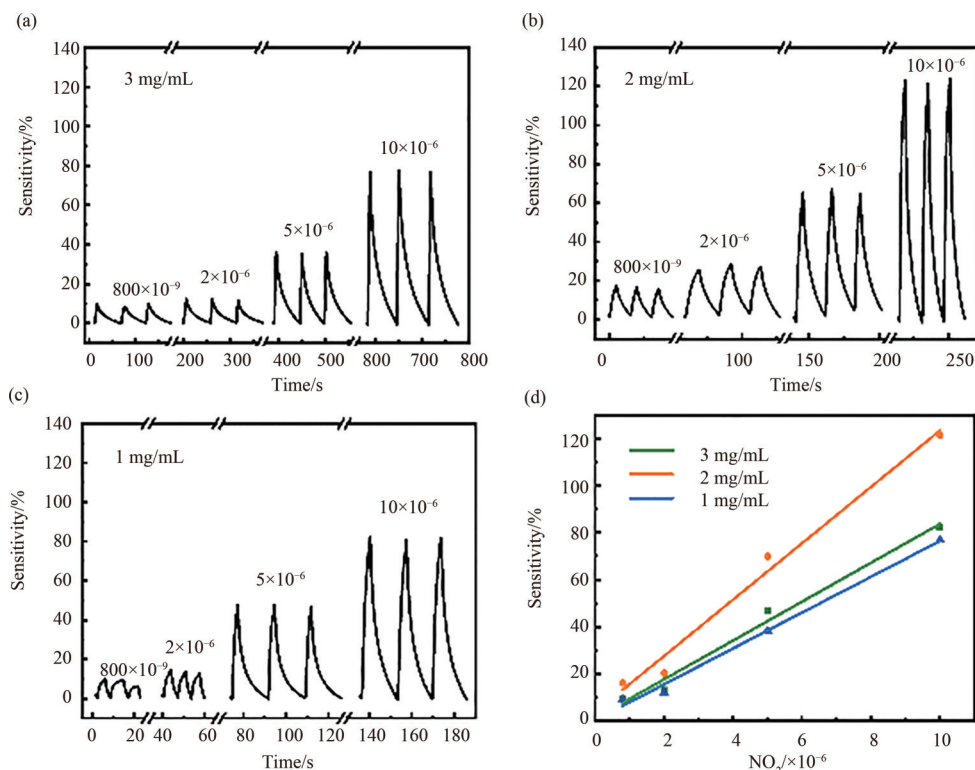


图 6 对不同浓度 NO_2 气体灵敏度变化。(a) 3 mg/mL; (b) 2 mg/mL; (c) 1 mg/mL; (d) NO_2 浓度与灵敏度变化曲线。

Fig. 6 Sensitivity curves of NO_2 gas with different concentrations. (a) 3 mg/mL; (b) 2 mg/mL; (c) 1 mg/mL; (d) Sensitivity curve versus concentration of NO_2 .

3.3 BTNIDNBIBDF-50 传感器的选择性测试

气体选择性测试是测试传感器在混合气体中对目标气体的辨别能力。采用饱和蒸汽压的方式对不同浓度 BTNIDNBIBDF-50 传感器进行气体选择性测试,测试装置如图 7(a) 所示,将目标溶剂放置在锥形瓶中,向内通入高纯度 N_2 气体,通入流量控制在 400 mL/min,将传感器暴露于溶剂蒸汽环境,并通过半导体分析测试系统对传感器电学参数进行实时监测,计算传感器对不

同气体的电流变化,结果如图 7(b) 所示。分别通入 $(23 \sim 1\,165) \times 10^{-6}$ 的甲醇、丙酮、水、乙醇、乙酸丁酯、正己烷、甲苯、四氢呋喃和乙腈溶剂的饱和蒸汽,传感器的电流变化如图 8 所示。溶剂蒸汽浓度的计算通过公式(2)安托因方程来定义:

$$\lg P = A - B/(T + C), \quad (2)$$

其中, P 是饱和蒸汽压, T 是温度, A 、 B 、 C 为安托因常数,可以通过查找表找到。从图 7(b) 中可以看到,传感器对溶剂在 $(23 \sim 1\,165) \times 10^{-6}$ 范围内

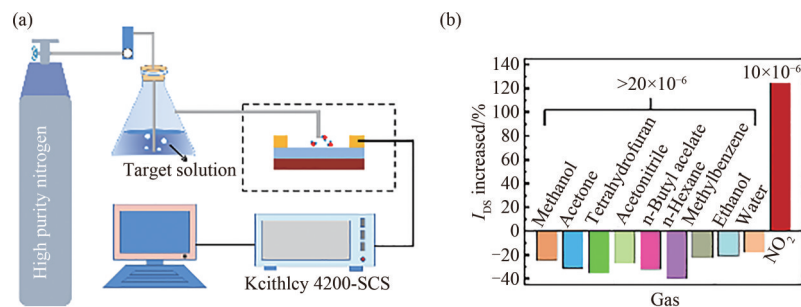


图7 (a)选择性测试装置示意图;(b)BTNIDNBIBDF-50浓度为2 mg/mL时对不同气体的电流变化。

Fig. 7 (a) Schematic diagram of the selectivity test device; (b) Current change of BTNIDNBIBDF-50 to different gases at concentration of 2 mg/mL.

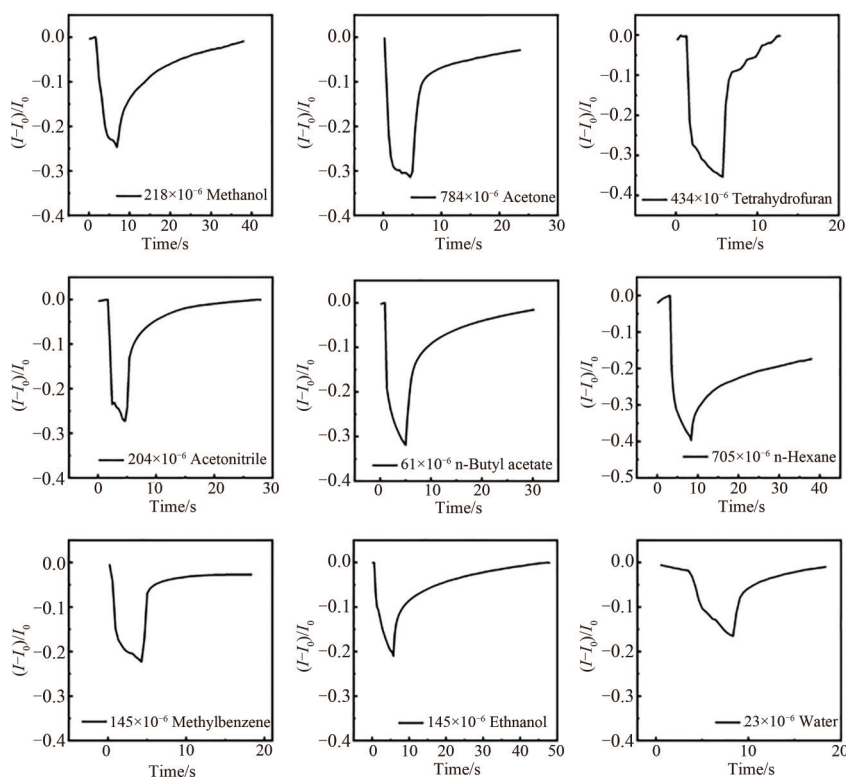


图8 BTNIDNBIBDF-50浓度为2 mg/mL时对不同气体的电流变化

Fig. 8 Current change of 2 mg/mL BTNIDNBIBDF-50 films to different gases

的饱和蒸汽气体表现出电流的降低,而对 10×10^{-6} NO_2 气体表现出 121.44% 的电流增加,远高于其他溶剂蒸汽的电流变化率,因此证明基于聚合物半导体 BTNIDNBIBDF-50 的气体传感器对 NO_2 气体具有良好的选择性。

3.4 BTNIDNBIBDF-50 传感器的循环测试

循环测试可以测试传感器的稳定性和可重复性。为了克服 OFET 偏压不稳定的特性,对传感器的栅极施加 0.2 Hz 的脉冲工作电压, $V_{\text{on}} = -35$ V, $V_{\text{off}} = 0$ V,漏极电压恒定为 -35 V,循环

测试结果如图9所示。传感器在未通入 NO_2 气体时,源漏极电流为一个较低的初始值,在通入 NO_2 气体后,传感器源漏极导通电流短时间内迅速增加,当气体关闭时,传感器源漏电流会在一定时间内恢复至初始状态,以此循环进行测试。从图9的测试结果中可以看到,传感器在大于100个测试循环依旧能够保持稳定的测试曲线。通过计算传感器源漏极电流从初始值增加到最大值的90%时的时间定义为响应时间,源漏极电流从最大值降低90%时的时间定义为恢复时间,

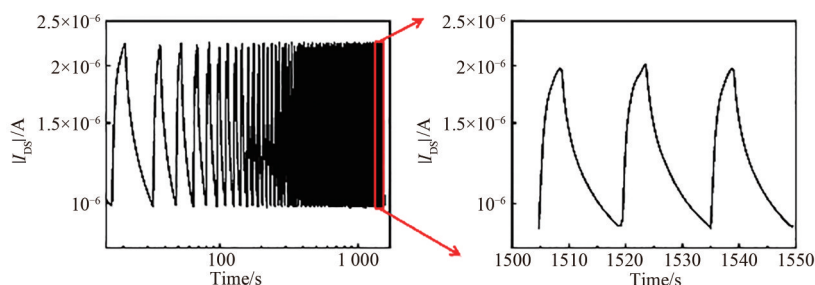


图9 BTNIDNBIBDF-50浓度为2 mg/mL时对NO₂气体的循环测试曲线

Fig. 9 Cyclic test curve of NO₂ gas at 2 mg/mL concentration of BTNIDNBIBDF-50

可以得到传感器在初始几个测试循环中,对 10×10^{-6} NO₂气体的响应时间为3.3 s,恢复时间为37.3 s,灵敏度达到121.44%。插图作为传感器在大于100次循环测试后的气体响应测试,通过计算得到此时传感器的灵敏度为107.30%,表明传感器在大于100次的循环测试后可以保持初始灵敏度的88.36%,证明传感器具有良好的稳定性。

4 结 论

本文研究了三组分聚合物BTNIDNBIBDF-50所制备的OFET传感器电学性能和对NO₂气体的传感特性,并通过简单的浓度控制,调控聚合物薄膜的表面形貌。聚合物BTNIDNBIBDF-50所表现出的双极性传输性质使其制备的传感

器对NO₂气体表现出优异的传感性能。通过调控旋涂溶液的浓度,使半导体薄膜出现明显的孔洞结构,提高了传感器对NO₂气体的灵敏度,在半导体浓度为2 mg/mL时对 10×10^{-6} NO₂气体的灵敏度为121.44%。由于解吸附速率的变化大于吸附速率的变化,进一步降低半导体的浓度会使传感器的灵敏度下降。半导体BTNIDNBIBDF-50浓度为2 mg/mL时,传感器在混合气体中对NO₂气体表现出高选择性,且在100次以上的循环测试后保持较高的可重复性和稳定性。这种将三组分聚合物应用到OFET气体传感器的方法使制备的双极型传感器工艺简便,且通过简单的浓度控制,便可调控薄膜表面的孔洞结构,能够进一步提高传感器的灵敏度,对OFET传感器的发展具有重要意义。

参 考 文 献:

- [1] ZHENG C Z, XIANG L Y, JIN W L, *et al.* A flexible self-powered sensing element with integrated organic thermoelectric generator [J]. *Advanced Materials Technologies*, 2019, 4(8): 1900247.
- [2] ZHUANG X M, ZHANG D Y, WANG X L, *et al.* Biocompatible and degradable gelatin dielectric based low-operating voltage organic transistors for ultra-high sensitivity NH₃ detection [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(26): 263301.
- [3] ZHANG C C, CHEN P L, HU W P. Organic field-effect transistor-based gas sensors [J]. *Chemical Society Reviews*, 2015, 44(8): 2087-2107.
- [4] WU M G, HOU S H, YU X G, *et al.* Recent progress in chemical gas sensors based on organic thin film transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2020, 8(39): 13482-13500.
- [5] FAN H D, HAN S J, SONG Z H, *et al.* Organic field-effect transistor gas sensor based on GO/PMMA hybrid dielectric for the enhancement of sensitivity and selectivity to ammonia [J]. *Organic Electronics*, 2019, 67: 247-252.
- [6] JEONG S H, LEE J Y, LIM B, *et al.* Diketopyrrolopyrrole-based conjugated polymer for printed organic field-effect transistors and gas sensors [J]. *Dyes and Pigments*, 2017, 140: 244-249.
- [7] XIE Q, WANG L, ZHU Y Y, *et al.* Highly sensitive NO₂ sensors based on organic field effect transistors with Al₂O₃/PMMA bilayer dielectrics by sol-spin coating [J]. *Organic Electronics*, 2019, 74: 69-76.
- [8] SONG R X, ZHOU X, WANG Z, *et al.* High selective gas sensors based on surface modified polymer transistor [J]. *Organic Electronics*, 2021, 91: 106083.

- [9] TRUL A A, SIZOV A S, CHEKUSOVA V P, *et al.* Organosilicon dimer of BTBT as a perspective semiconductor material for toxic gas detection with monolayer organic field-effect transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2018, 6(36): 9649-9659.
- [10] YANG Z C, HAN S J, LIU Y F, *et al.* Investigation of the atmosphere influence on device characteristics and NO₂ sensing performance of organic field-effect transistors consisting of polymer bulk heterojunction [J]. *Organic Electronics*, 2018, 62: 114-120.
- [11] LU J J, LIU D P, ZHOU J C, *et al.* Porous organic field-effect transistors for enhanced chemical sensing performances [J]. *Advanced Functional Materials*, 2017, 27(20): 1700018.
- [12] ZHOU X, WANG Z, SONG R X, *et al.* High performance gas sensors with dual response based on organic ambipolar transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2021, 9(5): 1584-1592.
- [13] DU Y C, YAO H B, GALUSKA L, *et al.* Side-chain engineering to optimize the charge transport properties of isoindigo-based random terpolymers for high-performance organic field-effect transistors [J]. *Macromolecules*, 2019, 52(12): 4765-4775.
- [14] KIM K H, PARK S, YU H, *et al.* Determining optimal crystallinity of diketopyrrolopyrrole-based terpolymers for highly efficient polymer solar cells and transistors [J]. *Chemistry of Materials*, 2014, 26(24): 6963-6970.
- [15] KHIM D, CHEON Y R, XU Y, *et al.* Facile route to control the ambipolar transport in semiconducting polymers [J]. *Chemistry of Materials*, 2016, 28(7): 2287-2294.
- [16] NAIR V S, SUN J B, QI P L, *et al.* Conjugated random donor-acceptor copolymers of [1]benzothieno[3, 2-*b*] benzothiophene and diketopyrrolopyrrole units for high performance polymeric semiconductor applications [J]. *Macromolecules*, 2016, 49(17): 6334-6342.
- [17] JUNG J W, LIU F, RUSSELL T P, *et al.* Semi-crystalline random conjugated copolymers with panchromatic absorption for highly efficient polymer solar cells [J]. *Energy & Environmental Science*, 2013, 6(11): 3301-3307.
- [18] 杜玉昌. 三组分给受体共轭聚合物结构与性能关系研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
- DU Y C. Study on the structure-property relationship of donor-acceptor terpolymers [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019. (in Chinese)
- [19] KIM Y, LEE S, SONG J G, *et al.* 2D transition metal dichalcogenide heterostructures for p- and n-type photovoltaic self-powered gas sensor [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(43): 2003360.
- [20] MENG Q, ZHANG F J, ZANG Y P, *et al.* Solution-sheared ultrathin films for highly-sensitive ammonia detection using organic thin-film transistors [J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(7): 1264-1269.
- [21] LV A F, WANG M, WANG Y D, *et al.* Investigation into the sensing process of high-performance H₂S sensors based on polymer transistors [J]. *Chemistry*, 2016, 22(11): 3654-3659.

作者简介:



王冠龙(1996—),男,山东济南人,硕士研究生,2019年于济南大学获得学士学位,主要从事有机场效应晶体管及其传感特性方面的研究。E-mail: dragon1008@foxmail.com



邱龙臻(1980—),男,福建宁化人,博士,研究员,2006年于中国科学技术大学获得博士学位,主要从事有机光电材料及器件、印刷电子、柔性/弹性电子方面的研究。E-mail: lzhqiu@hfut.edu.cn