

新型电极材料在 N 型 OFET 中的应用

刘浩坤¹, 梁强兵¹, 郝阳¹, 张叶¹, 李战峰¹, 冀婷¹, 李国辉^{1,2}, 郝玉英¹, 崔艳霞^{1,2}

(1. 太原理工大学 物理与光电工程学院, 山西 太原 030024; 2. 山西浙大新材料研究院, 山西 太原 030032)

摘要: 相比于无机场效应晶体管, 有机场效应晶体管(OFET)具有制备工艺简单、成本低、柔性、透明等优点, 在柔性电子产品、可穿戴器件等领域中有广泛用途。电极作为 OFET 器件的一个重要组成部分, 其影响 OFET 器件的整体性能。为了提升电极性能, 一方面可以对金属电极进行修饰, 另一方面可以使用聚合物等新材料来制作 OFET 电极。围绕新型电极材料在 N 型 OFET 中的应用展开综述。首先, 介绍 OFET 的一般器件结构。接着依次介绍了修饰金属电极、聚合物电极、碳基电极、无机化合物电极和纳米线电极的 N 型 OFET 进展。最后, 总结全文, 并对 OFET 新型电极材料的未来发展做出了展望。

关键词: N 型有机场效应晶体管; 电极; 金属电极; 聚合物电极

中图分类号: TN304

文献标识码: A

DOI: 10.16157/j.issn.0258-7998.212109

中文引用格式: 刘浩坤, 梁强兵, 郝阳, 等. 新型电极材料在 N 型 OFET 中的应用[J]. 电子技术应用, 2022, 48(5): 12-20.

英文引用格式: Liu Haokun, Liang Qiangbing, Hao Yang, et al. Application of new electrode materials in N-type OFET[J]. Application of Electronic Technique, 2022, 48(5): 12-20.

Application of new electrode materials in N-type OFET

Liu Haokun¹, Liang Qiangbing¹, Hao Yang¹, Zhang Ye¹, Li Zhanfeng¹, Ji Ting¹, Li Guohui^{1,2},

Hao Yuying¹, Cui Yanxia^{1,2}

(1. College of Physics and Optoelectronics, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;

2. Research Institute of Shanxi-Zhejiang University New Materials, Taiyuan 030032, China)

Abstract: Compared with traditional field effect transistor, OFET has the advantages of simple preparation process, low cost, flexibility, transparency and so on. It is widely used in flexible electronic products, wearable devices and other fields. As an important part of OFET devices, electrodes affect the overall performance of OFET devices. In order to improve the performance of the electrode, on the one hand, the metal electrode can be modified, on the other hand, new materials such as polymer can be used to make OFET electrode. This paper reviews the application of new electrode materials in N-type OFET. Firstly, the general device structure is introduced. Then the development of N-type OFET using modified metal electrode, polymer electrode, carbon based electrode, inorganic compound electrode and nanowire electrode is introduced. Finally, the full text is summarized, and the future development of OFET new electrode materials is prospected.

Key words: N-type OFET; electrode; metal electrode; polymer electrode

0 引言

有机晶体管(OFET)具有制备工艺简单、成本低廉、可制成柔性或半透明器件等优点, 在柔性电子产品、可穿戴设备、透明显示屏幕等方面有着极大的应用潜力^[1-3]。根据在半导体中传输的载流子极性不同, OFET 分为 P 型 OFET、N 型 OFET 以及双极性 OFET 三种类型。由 P 型 OFET 与 N 型 OFET 共同组成的互补型开关电路, 是构成逻辑电路的基本单元之一。相比于 P 型 OFET, 现阶段 N 型 OFET 的研究相对滞后, 其性能有待提高^[4]。影响 N 型 OFET 性能的其中一个重要原因是其电极的制备。

当 N 型有机半导体与电极接触时, 两者间会存在能量势垒, 对应产生一定的接触电阻。能量势垒越高, 接触

电阻越大, 越不利于电子在 N 型有机半导体和电极之间传输^[5]。大多数 N 型半导体的最低未占分子轨道能级(LUMO)高于 -4.0 eV, 与其匹配的金属为低功函数金属, 如 Ca (2.9 eV)、Mg (3.66 eV)、Ag (4.26 eV) 和 Al (4.3 eV) 等。这些低功函数金属, 虽然从能级匹配的角度来看适合作为与 N 型有机半导体接触的电极^[6-8], 但是它们在空气中容易被氧化, 严重影响 OFET 的稳定性。与这些容易被氧化的金属不同, Au 具有良好的空气稳定性以及优良的导电性, 是制作 OFET 电极的优选材料之一。但是 Au 的功函数较高 (~5 eV), 与大多数 N 型有机半导体接触时, 会形成很高的能量势垒, 另外 Au 电极过于昂贵, 这些缺点限制了其在 OFET 器件中的应用。

对此,不少研究工作一方面致力于降低 N 型有机半导体和高功函数金属电极之间的能量势垒和接触电阻,另一方面也致力于将聚合物电极、碳基电极、无机化合物电极等一系列成本较低的新材料电极应用于 N 型 OFET 器件中,以获得优良的晶体管性能。本文围绕新型电极材料在 N 型 OFET 中的应用展开综述。首先,本文介绍 OFET 的一般器件结构。接着,介绍修饰金属电极应用于 N 型 OFET 中的研究进展。其次,介绍聚合物等新材料电极在 N 型 OFET 器件中的应用进展。最后,总结全文并对 N 型 OFET 中电极的发展提出展望。

1 OFET 的一般器件结构

OFET 的器件结构主要有四种类型,分别是底部栅极-顶部接触结构(BGTC)、底部栅极-底部接触结构(BGBC)、顶部栅极-底部接触结构(TGBC)、顶部栅极-顶部接触结构(TGTC),如图 1 所示。选择何种结构开发 OFET 器件,需要考虑以下三个方面的因素。第一,根据有机半导体材料的特性选择合适的器件结构。例如,对于在空气中不稳定的有机半导体,应当避免其与空气直接接触。第二,根据有机半导体材料的制作工艺选择合适的器件结构。制备 OFET 时,应尽量降低工艺损伤衬底上已制备好的材料。有机半导体通常不耐高温,当电极的制作必须在高温条件进行时,应当先制作电极,后制作有机半导体薄膜。第三,根据用途选择合适的 OFET 器件结构。例如,当 OFET 用做气体探测器时,有机半导体必须与空气接触。

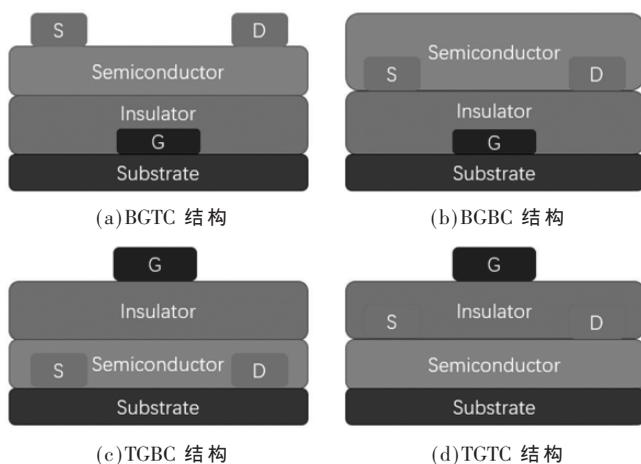


图 1 OFET 一般器件结构

图 1(a)为 BGTC 结构,栅极位于底部,中间是介电层和有机半导体层,有机半导体层的上方是源、漏电极。这种结构制备的 OFETs 载流子迁移率较高,在制作过程中可以对介电层进行后处理,改善成膜质量,提高器件的载流子迁移率。图 1(b)为 BGBC 结构,底部为栅极,中间为介电层、源漏电极,顶部为有机半导体层,其中源漏电极位于半导体的底部,形成底接触。在 BGBC 器件中,有机半导体层最后被制备,避免了电极制备工艺对有机半

导体层造成的损伤,有利于获得性能良好的器件。图 1(c)为 TGBC 结构,底部为源漏电极,其中间为有机半导体层和介电层,顶部为栅极的器件结构;图 1(d)为 TGTC 结构,底部为有机半导体层,中间为源漏电极和介电层,顶部为栅极的器件结构。TGBC 和 TGTC 这两种器件结构的有机半导体层处于底部,能避免有机半导体层与空气直接接触,从而使在空气中不稳定的有机半导体也能用于制备 OFET。但是,在 TGBC 与 TGTC 器件中,由于有机半导体层最先被制备,因此接下来制备介电层、栅电极等的工艺,可能会对有机半导体层造成损伤,进而导致器件性能变差。除此之外,还有些特殊晶体管结构,比如双栅结构^[9]和垂直结构^[10-11]。大部分有机半导体材料在空气环境中长久放置时,空气中的氧或者水蒸汽会对有机半导体产生不利影响,从而使器件性能退化。为了避免有机半导体与空气直接接触,可以在 OFET 最外层增加封装层结构^[12-13]。

2 基于新型电极材料的 N 型 OFET

新型电极材料分为修饰金属电极的新型材料和新型电极材料。前者能降低金属电极的功函数、接触电阻或者改善有机材料与电极的界面,从而提升器件性能。后者是利用新型电极的电学、光学、机械等特性,制备各种 N 型 OFET。

2.1 基于修饰金属电极的 N 型 OFET

基于低功函数金属的 N 型 OFET,其制备、测试和使用过程都必须在 N_2 环境进行。而基于高功函数金属,由于其能量势垒较高,因而无法获得高性能的 N 型 OFET。为了能够获得在空气环境中稳定工作的 N 型 OFET,可以用其他材料,比如使用还原氧化石墨烯(rGO)、六甲基二硅氮烷(HMDS)、自组装分子膜(SAM)等,对 Au 电极表面进行修饰,以降低 N 型有机半导体 LUMO 与 Au 电极之间的能量势垒,同时还能提高器件在空气中的稳定性。

2.1.1 基于石墨烯基修饰金属电极的 N 型 OFET

氧化石墨烯(GO)、rGO 及其衍生物制备成本低廉,同时与有机半导体有着良好的接触界面,这些特点使得 GO 成为修饰金属电极的良好材料。例如,Chen 等人报道了用 PDI-8CN₂ 作 N 型有机半导体材料,用氧化石墨烯(GO)修饰 Au 电极作源漏电极的 N 型 OFET,探讨了 Au 电极在 GO 修饰前后器件性能的变化^[14]。基于 Au-GO 电极的 BGTC 结构 OFET 的载流子迁移率为 $0.15\sim 0.6\text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,电流开关比为 10^5 。相比于同类型的 Au 电极 OFET,载流子迁移率分别提高了约 10^3 ,电流开关比提高了约 10^4 。其性能提升的一个原因在于 Au-GO 电极的使用降低了 OFET 的接触电阻:Au 电极 OFET 的接触电阻为 $1\ 915\text{ k}\Omega\text{ cm}$,而 Au-GO 电极 OFET 的接触电阻仅为 $114.3\text{ k}\Omega\text{ cm}$ 。另外,使用 Au-GO 电极有利于提升 PDI-8CN₂ 的薄膜质量。rGO 衍生物修饰 OFET 的 Au 源漏电极也可以提高 OFET 的性能。Gim 等人报道用

$\text{NO}_2\text{-Ph-rGO}$ 、 F-Ph-rGO 、 $\text{CH}_3\text{O-Ph-rGO}$ 三种不同的 rGO 衍生物喷涂到 Au 电极上,研究了它们对 N 型 OFET 性能的影响^[15]。他们首先在重掺杂 Si 上生长 300 nm 的 SiO_2 ,将 SiO_2 作为介电层,然后将具有疏水性的十八烷基三氯氢硅(ODTS)涂抹在 SiO_2 上,随后沉积 Cr/Au 电极,并分别喷涂 3 种 rGOs,最后沉积 N 型有机半导体材料 PTCDI-C₈,制备了 BGBC 结构的 OFET,如图 2 所示。他们的研究表明,相比于未经 rGO 处理的 Au 电极,经 rGO 处理 Au 电极的 OFET 载流子迁移率提高了 10~34 倍,并且经 rGO 处理器件的电流开关比也明显改善。这是因为 PTCDI-C₈ 和 rGO-Au 电极之间的电子注入势垒得到了明显降低,未经修饰的 Au 电极的功函数为 5.1 eV,而经 $\text{NO}_2\text{-Ph-rGO}$ 、 F-Ph-rGO 、 $\text{CH}_3\text{O-Ph-rGO}$ 修饰的 Au 电极,其功函数分别为 4.7 eV、4.5 eV 和 4.1 eV。

2.1.2 基于有机材料修饰金属电极的 N 型 OFET

Rhodocene dimer 作为界面修饰层时,能使器件接触电阻降低,从而提高 OFET 器件性能^[16]。Singh 等人制作了 C_{60} 作活性层,Al 作源漏电极的 BGTC 结构 N 型 OFET,当使用 rhodocene dimer 修饰金属电极时,器件的接触电阻为 5.5 k Ω cm,平均载流子迁移率为 1.65 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,而参比器件的接触电阻为 9.7 k Ω cm,平均载流子迁移率为 0.48 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。 Alq_3 在空气环境中稳定,Zheng 等人制备了 C_{60} 作为有机半导体,5 nm Alq_3 修饰 Al 源漏电极的 BGTC 结构 N 型 OFET^[17]。在氩气环境中,器件的载流子迁移率为 0.012 8 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压为 10 V。Li 等人报道用 TPBi、BCP、Bphen 作为 C_{60} 和源漏电极之间的缓冲层,从而降低两者之间的接触势垒^[18]。他们首先在玻璃衬底上镀 ITO 电极,然后旋涂 PMMA 作为介电层,沉积 C_{60} 作为有机层,随后在三个器件上分别蒸镀 TPBi、BCP 和 Bphen,最后热蒸发 Ag 电极。沉积缓冲层后,OFET 载

流子迁移率比未沉积缓冲层的 OFET 高 1~3 倍,阈值电压略有下降,电流开关比略有上升。性能提升的原因是未沉积缓冲层的 Ag 与 C_{60} 接触不良。在 C_{60} 和电极之间沉积 TPBi、BCP 和 Bphen 缓冲层后,缓冲层和 C_{60} 形成 $\pi\text{-}\pi$ 接触,提高了电子传输效率。Rapisarda 等人在 PEN 衬底上制备了 TGBC 结构 PDIF-CN₂ OFETs,考察了 HMDS 的加入对 PDIF-CN₂ OFET 的影响^[19]。在蒸镀 Au 电极后,接着依次蒸镀 HMDS 和 PDIF-CN₂,之后在其表面旋涂 Cytop,制备了 TGBC 结构的 N 型 OFET。未蒸镀 HMDS 的 PDIF-CN₂ OFET 具有最大载流子迁移率为 0.1 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压平均值为 -3.7 V。蒸镀有 HMDS 的器件,最大载流子迁移率为 0.44 $\text{cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压为 -11 V。在长时间施加栅极电压时,未经 HMDS 处理的器件随着时间的增加性能逐渐下降,而经 HMDS 处理的器件在 3 小时后仅表现出微小的性能差异。

Park 等人在 N 型有机半导体 PCBM 与 Au 源漏电极之间分别加入 $\text{PEIEH}^+\text{Cl}^-$ 、 $\text{PEIEH}^+\text{Br}^-$ 和 PEIEH^+I^- 三种非共轭聚电解质(NPE),制备了三种 BGTC 结构的 N 型 OFET,考察了三种不同浓度 NPE 对 PCBM OFET 的影响^[20]。在添加了 0.01%~0.1% 的 PEIEH^+I^- 层后,Au 电极和 PCBM 之间的能量势垒从 0.7 eV 降低到 0.33 eV,同时接触电阻也有所降低,载流子迁移率比未添加 NPE 的 OFET 提高了约 3 倍,阈值电压减小了约 3 倍,电流开关比提高了约 5 倍。在 NPE 浓度超过 0.6% 时,掺杂效应大于沟道效应,载流子迁移率逐渐降低,电流开关比也急剧下降。水溶性聚芴衍生物(WPFs)能作为电子传输层,同时又能作为空穴阻挡层。Kim 等人报道了用 CYTOP 作为介电层,将 WPFs 加入 PCBM 和 Au 源漏电极之间,获得了 TGBC 结构的 N 型 OFET^[21],如图 3 所示。未加入 WPFs 的 PCBM OFET 表现出双极性传输特性。WPFs 的

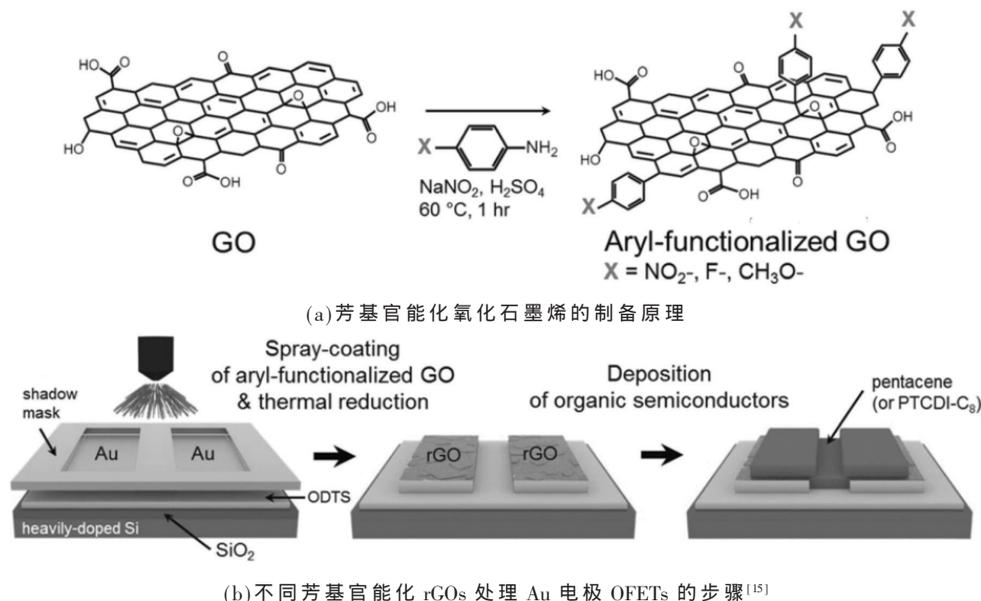
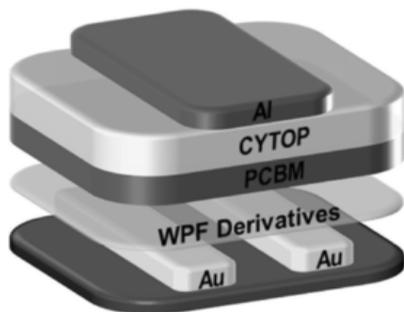
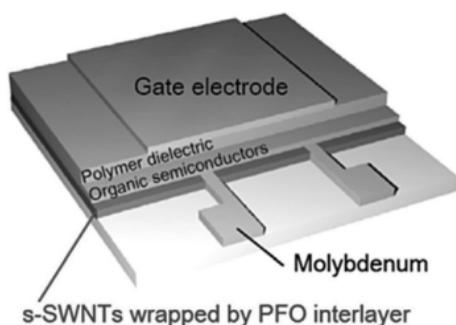


图 2 rGO 修饰 Au 电极的 N 型 OFET

图3 WPF OFET的结构图^[21]

加入使双极性 PCBM OFET 完全转变为 N 型 OFET, 其电子迁移率提高了 3 倍, 达到 $0.12 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压为 10.5 V, 同时器件在空气中的稳定性也有所提升。加入 WPFs 之前, PCBM 和 Au 电极之间的能量势垒为 0.7 eV, 接触电阻为 $18.65 \text{ M}\Omega \text{ cm}$ 。加入 WPFs 之后, PCBM 和 Au 电极之间的能量势垒为 0.2 eV, 接触电阻为 $0.09 \text{ M}\Omega \text{ cm}$, 因此器件性能获得了提升。Mo 具有 $5 \times 10^{-6} \Omega \text{ cm}$ 的高导电性, 功函数在 4.3~4.86 eV 之间, 每千克 Mo 的价格为 26 美元(价格比 Au 便宜)。这些特性使 Mo 在 OFET 中有潜力替代 Au, 成为大规模使用的金属电极。Lee 等人考察了 PFO:s-SWNT 对 OFET 的影响^[22]。他们使用 Mo 作为源漏电极, 将 PFO 包覆半导体-单壁碳纳米管(s-SWNT)嵌入到有机半导体和 Mo 电极中, 用双极性有机半导体 PTVPhI-Eh 作为活性层, 制备了 TGBC 结构的 N 型 OFET, 如图 4 所示。未嵌入 PFO:s-SWNT 的 Mo 电极 OFET, 未观察到电子传输特性; Au 电极 OFET, 其载流子迁移率为 $0.0039 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$; 加入 PFO:s-SWNT 的 Mo 电极 OFET, 其载流子迁移率为 $0.05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。PFO:s-SWNT 的 Mo 电极 OFET 中, 漏极电压使 SWNTs 产生一维静电场, 让有机半导体与电极接触面的能带弯曲, OFET 耗尽区厚度降低, 从而使器件实现了有效的电子传输。将 Mo 换成功函数为 5.2 eV 的 Ni, PFO:s-SWNT 的 Ni 电极 OFET, 载流子迁移率为 $0.03 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

图4 顶部栅极底部接触 OFET 结构图^[22]

自组装分子膜(SAM)由于其稳定性、致密性、有序性而在有机器件领域获得了广泛的应用。在 N 型有机半导体和电极之间制备 SAM 可以降低势垒高度, 从而促

进电子传输。一般来说, SAM 沉积方法主要分为干气相沉积和溶液沉积^[23]。Cernetic 等人将 Ag 作为源漏电极, C_{60} 和 PCBM 分别作为 N 型有机半导体, 沉积了 Ph6PA SAM, 研究了 Ph6PA 对 C_{60} 和 PCBM OFET 的影响^[24]。结果表明, 基于 C_{60} BGBC 结构 OFET 的接触电阻为 $11.6 \text{ k}\Omega \text{ cm}$, 平均载流子迁移率为 $0.32 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。基于 PCBM BGBC 结构 OFET 的接触电阻为 $45.5 \text{ k}\Omega \text{ cm}$, 平均载流子迁移率为 $0.063 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。Alt 等人在制备 N2200 TGBC 结构 OFET 过程中加入了 Juls SAM, 考察了 Juls 对 N2200 OFET 的影响^[25]。加入 Juls 后, Au 电极的功函数从 4.95 eV 降到 3.77 eV, N 型有机半导体和 Au 之间的接触电阻下降了 2 个数量级。对于 Ag 电极, 加入 Juls, 其功函数从 4.80 eV 降到 3.79 eV, N 型有机半导体和 Ag 之间的接触电阻下降约 1 个数量级。另外, 未使用 Juls 的 Ag OFET, 在制备 10 天之后, 接触电阻提高了约 4 个数量级, 14 天后基本观察不到器件的电子传输特性。加入 Juls 的 Ag 电极 OFET, 显示出良好的稳定性, 在制备 3 个月之后, 器件仍然保持稳定。

2.1.3 基于碱金属碳酸盐修饰金属电极的 N 型 OFET

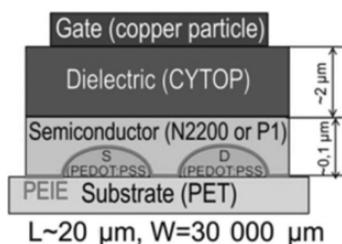
低功函数金属有时会与有机半导体反应, 并在两者的界面形成络合物, 产生额外的陷阱, 导致器件性能降低。碱金属碳酸盐易于制备, 在空气中高度稳定。Kumar 等人以 PTCDI- C_{13} 为 N 型有机半导体材料, 采用 Rb_2CO_3 修饰的 Au 为源漏电极, 制备了 BGTC 结构的 N 型 OFET^[26]。没有 Rb_2CO_3 层的 OFET, 其载流子迁移率为 $1.1 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压为 13.6 V。在相同条件下, Rb_2CO_3 厚度为 5 Å、10 Å 和 20 Å 时, 其 OFET 的载流子迁移率分别为 $2.62 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 、 $5.27 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 和 $1.4 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压分别为 4.7 V、7.5 V 和 9.1 V。在沉积 5 Å 和 10 Å Rb_2CO_3 后, PTCDI- C_{13} 和源漏电极之间的能量势垒分别降低了 0.36 eV 和 0.55 eV, 同时提高了 PTCDI- C_{13} 表面的电子浓度, 因此提高了器件的性能。Zheng 等人以 N 型有机半导体材料 P13 作为活性层, 用 Cs_2CO_3 修饰 Al 源漏电极, 制备了 BGTC 结构的 N 型 OFET^[27]。未加入 Cs_2CO_3 的 OFET, 其载流子迁移率为 $1.1 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压为 6 V。加入 Cs_2CO_3 的 OFET, 在加热的情况下, 其载流子迁移率为 $2.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压为 5 V。加热的 Cs_2CO_3 会趋向分解出 Cs、Cs 的亚氧化物和 CO_2 , 因此加热的 Cs_2CO_3 实际是作为重掺杂 N 型半导体, 并具有较高的导电性, 它能使 Al 电极的功函数降低至 2.1 eV。

2.2 基于聚合物电极的 N 型 OFET

电极为金属的 OFET 透光率低, 并且在沉积时容易造成有机半导体材料的损伤, 而氧化物电极通常需要高退火温度, 也可能会损伤有机半导体材料。在 OFET 的制备工艺过程中, 应尽量避免对有机聚合物造成损伤。导电聚合物的制备工艺不需要高温, 并且有着良好的导电性, 可透光, 可弯曲, 因此是制备 OFET 的良好电极材料。

2.2.1 基于 PEDOT:PSS 电极的 N 型 OFET

PEDOT:PSS 电极不仅是透明导体,而且有着较低的制作成本、高柔韧性以及能够使用各种涂层工艺制备的优点,因此其被用于制备 OFET。Albrecht 等人首先在玻璃衬底上制备了 PEDOT:PSS 源漏电极,最后沉积 N 型有机半导体 $F_{16}PcCu$,制备了基于 $F_{16}PcCu$ 的 BGTC 结构的 N 型 OFET^[28]。OFET 载流子迁移率为 $1.5 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 电流开关比为 22,透光率在 70% 到 85% 之间。有机半导体层的沉积是器件制备的最后一步,这避免了对有机半导体材料的损伤。 $F_{16}PcCu$ 薄膜晶粒大小和形状均匀,形成一个连续的薄膜,没有因制作工艺而造成针孔或明显的不连续性。PEDOT:PSS 电极具有 5.4~5.7 eV 的高功函数,大部分 N 型有机半导体的 LUMO 在 -4 eV 左右,两者接触后形成的能量势垒太高。PEIE 能降低金属、导电金属氧化物和导电聚合物的功函数。Schmidt 等人在柔性塑料衬底 PET 上制备了 PEDOT:PSS 源漏电极,然后用 PEIE 对其进行修饰,将 CYTOP 作为介电层,Cu 颗粒作为栅极,分别制备了 P1 和 N2200 的 TGBC 结构的 N 型 OFETs^[29],如图 5 所示。器件表征的结果表明,经过 PEIE 处理后,基于 P1 和 N2200 的载流子迁移率提高 1 倍多,分别为 $0.08 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 和 $0.086 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,器件阈值电压约下降为原来的 1/2,为 10.6 V 和 9.9 V。性能提高的原因是 PEDOT:PSS 经过 PEIE 处理后的 PEDOT:PSS 电极的功函数从 5.40 eV 降为 4.50 eV,同时 N 型有机半导体和电极之间的接触电阻降低。另外,该器件的制备和测试都是在空气环境中进行的。

图 5 PEDOT:PSS/铜颗粒电极的 OFET 结构^[29]

喷涂和光刻工艺被用于制备 PEDOT:PSS^[30],但这两种方法需要昂贵的设备和复杂的制备步骤。Mamo 等人开发了一种简单、经济、可靠的自对准图案工艺,用于制备 PEDOT:PSS 电极,制备出的 PEDOT:PSS 电极方阻为 $156 \Omega/\text{sq}$ ^[31]。他们将 P(NDI2OD-T2)作为 N 型有机半导体,PEDOT:PSS 作为源漏电极,制备了 TGBC 结构的 N 型 OFET。结果表明,新方法制备 PEDOT:PSS 电极的最优器件的载流子迁移率为 $0.05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压为 17.69 V,电流开关比为 4.8×10^2 ,接触电阻为 $12.3 \text{ k}\Omega \text{ cm}$ 。PEDOT:PSS 的导电率较低,在空气环境中也不稳定,这些缺点限制了 PEDOT:PSS 的实际应用。Kim 等人开发了一种新的制备方法,过滤 PEDOT:PSS 中的杂质和游离 PSS,

制备出的 PEDOT:PSS 导电率为 2000 S/cm ,并且在空气中稳定^[32]。常规的 PEDOT:PSS 方阻为 $151 \Omega/\text{sq}$,而新方法制备的 PEDOT:PSS 方阻为 $37 \Omega/\text{sq}$ 。将新方法制备的 PEDOT:PSS 作为源漏电极,P(NDI2OD-T2)作为 N 型有机半导体材料,制备 BGBC 结构 OFET,其载流子迁移率为 $0.05 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,电流开关比为 10^3 。

2.2.2 基于碳化 PAN 电极的 N 型 OFET

PAN 是一种不溶性高熔点材料,在碳纤维和碳膜方面有着广泛的研究。Zhang 等人将 PAN 加热至 $700 \sim 1040 \text{ }^\circ\text{C}$,使其碳化,从而获得了热解 PAN 电极(PPAN),其功函数为 4.52~4.66 eV,导电性约为 600 S/cm ,方阻约为 $100 \Omega/\text{sq}$ ^[33]。将 PPAN 作为源漏电极,TDPPQ 作为 N 型有机半导体,制备了 BGBC 结构的 N 型 OFET。以 Au 为电极的 OFET 载流子迁移率为 $0.123 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压为 -1.49 V,电流开关比为 2.61×10^6 。而以 PPAN 电极的 OFET,其载流子迁移率为 $0.129 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,阈值电压为 -2.93 V,电流开关比为 2.02×10^6 。

2.3 基于碳基电极的 N 型 OFET

石墨烯电极被认为是有潜力的 N 型 OFET 电极材料,因为:(1)石墨烯具有高载流子迁移率;(2)石墨烯的功函数与大多数 N 型有机半导体 LUMO 匹配;(3)与有机半导体和金属界面之间的高接触电阻相比,有机半导体和石墨烯界面之间的接触电阻较低;(4)石墨烯具有高化学稳定性,在空气中稳定,且具有高柔韧性;(5)制备石墨烯的工艺复杂度和成本正在不断降低。因此石墨烯或者 rGO 是开发低成本、大面积、柔性 OFET 最有前途的电极之一。

2.3.1 基于碳纳米管电极的 N 型 OFET

碳纳米管(CNT)是由石墨烯片卷曲而成的,根据 CNT 中卷曲层数的不同,可分为单壁碳纳米管(SWCNT)和多壁碳纳米管(MWCNT)^[34]。Itoh 和 Kanamori 在 MWCNT 上喷涂 Ag 纳米颗粒(Ag NPs),制备了 Ag NPs/MWCNT 电极,并对比了 Ag NPs,Ag NPs/MWCNT 和 MWCNT 分别作为源漏电极,PCBM 作为 N 型有机半导体时,BGBC 结构 N 型 OFET 的性能^[35]。当 Ag NPs 作为电极时,PCBM OFET 的载流子迁移率为 $4.2 \times 10^{-4} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,电流开关比为 70,阈值电压为 49 V。Ag NPs/MWCNT 作为电极时,PCBM OFET 的载流子迁移率为 $1.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,电流开关比为 9.1×10^3 ,阈值电压为 20 V。MWCNT 作为电极时,PCBM OFET 的载流子迁移率为 $1.99 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,电流开关比为 1.7×10^4 ,阈值电压为 10 V。Ag 的功函数为 4.3 eV,AgO 的功函数为 4.7~5.0 eV。当 Ag NPs 电极放置在空气中后,Ag NPs 电极的功函数约为 4.5 eV。MWCNT 的功函数为 4.9~5.0 eV。PCBM 的 LUMO 约为 -4 eV。从能量势垒的方面来说,PCBM 和 Ag NPs 之间的能量势垒比 PCBM 和 MWCNT 之间的能量势垒更低,基于前者的 OFET 性能应该更佳。然而实验结果却与预计

相反。PCBM 和 MWCNT 都是碳基材料,两者之间存在 $\pi-\pi$ 相互作用,这提高了两者之间的电子传输,使得 MWCNT 作为电极的 OFET 在两者中获得了最佳的器件性能。这说明对 OFET 而言,有机材料和电极之间良好的界面比低能量势垒更为重要。

2.3.2 基于石墨烯基电极的 N 型 OFET

石墨烯的功函数为 4.5 eV, Au 的功函数为 5.1 eV,前者与 N 型有机半导体形成较低的能量势垒。Lee 等人在透明柔性衬底^[36]上研究了 PTDPPSe-SiC4 作为有机半导体,石墨烯作为电极, BGBC 结构 N 型 OFET 的性能^[37]。使用 Au 作为电极的 OFETs, 其最佳器件的载流子迁移率为 $0.009 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。石墨烯作为电极时,溶液制备的 OFETs, 其最佳器件的载流子迁移率为 $0.37 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。PTDPPSe-SiC4 的 LUMO 为 -3.56 eV 。相比于 Au 电极, PTDPPSe-SiC4 和石墨烯电极接触时,具有更低的能量势垒,便于电子传输。另一方面,PTDPPSe-SiC4 和石墨烯之间有着很强的 $\pi-\pi$ 相互作用,从而便于电子传输。Parui 等人将 N2200 作为活性层,利用 CVD 法制备了石墨烯为电极 BGBC 结构的 N 型 OFET^[38]。基于 Au 电极的 OFET,其载流子迁移率为 $5.5 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$,而基于石墨烯电极的 OFET,其载流子迁移率为 $1.06 \times 10^{-2} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。N2200 的 LUMO 约为 -4.0 eV ,其与石墨烯之间的能量势垒比与 Au 之间的能量势垒更低,因此基于石墨烯的 OFET 性能更佳。

石墨烯电极的 OFET 在不同退火温度下,性能有所不同。Choi 等人将单层石墨烯作为源漏电极,制备了基于 pDTTDP-PT 的 OFET^[39]。同时制备了 Au 作为源漏电极的 OFET,考察了不同退火温度下两种器件的性能差异。结果表明,当退火温度为 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 时, Au 作为源漏电极的 OFET 载流子迁移率为 $0.06 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$; 而退火温度为 $200 \text{ }^\circ\text{C}$ 时,单层石墨烯作为源漏电极的 OFET 载流子迁移率为 $2.82 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。随着退火温度逐渐升高,两种 OFET 的载流子迁移率都有所提升。Au 和 pDTTDP-PT 的能量势垒为 1.04 eV ,单层石墨烯和 pDTTDP-PT 的能量势垒为 0.81 eV ,后者的能量势垒更低,因此更利于电子传输。其次,随着退火温度的升高, pDTTDP-PT 薄膜的晶体质量显著提高。最后,单层石墨烯电极表面比 Au 电极表面光滑 3 倍, pDTTDP-PT 和单层石墨烯之间形成有序的 $\pi-\pi$ 堆积,从而使电子传输效率更高。Jeong 等人将溶液制备法制备的 C_{60} 沉积在石墨烯源漏电极上,并用 PTS-SAM 对 SiO_2 表面进行改性,制备了石墨烯电极的 OFET,如图 6 所示^[40]。结果表明,器件的平均载流子迁移率为 $0.055 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压为 2.39 V , 电流开关比为 10^6 。 C_{60} 与石墨烯形成 $\pi-\pi$ 相互作用,且 PTS-SAM 与 C_{60} 形成 $\pi-\pi$ 相互作用,便于电子传输。 $130 \text{ }^\circ\text{C}$ 退火下的石墨烯和 C_{60} 薄膜显示出极佳的晶体结构和低电子注入势垒,并且 OFET 显示出最低的接触电阻,因此性能最高。

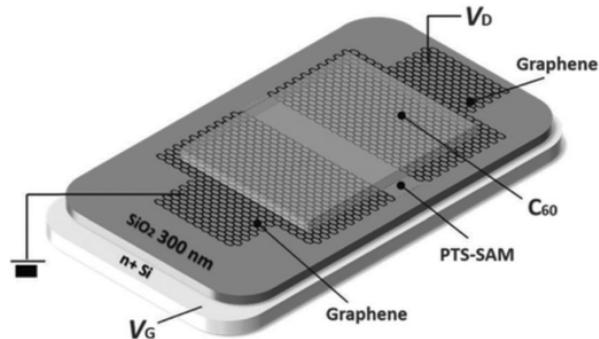
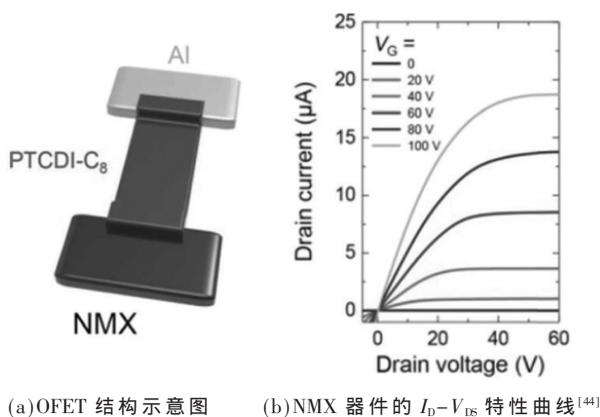


图 6 石墨烯源漏电极 C_{60} FET 的示意图^[40]

为了避免石墨烯制备过程中残留石墨颗粒的污染, Henrichsen 等人开发了一种特殊的工艺来有效地阻止污染物^[41]。他们在重掺杂 Si 上制备 SiO_2 , 然后将石墨烯纳米薄片沉积在 SiO_2 上,用电子束光刻图案,作为源漏电极,最后将六苯撑(p6P)旋涂在石墨烯电极上,制备了 BGTC 结构的 N 型 OFET。Lee 等人将 PTCDI- C_8 作为 N 型有机半导体,采用转移和反向冲压(TARS)法制备 rGO 源漏电极 BGBC 结构的 N 型 OFET^[42]。对 rGO 电极, Al 电极和 Au 电极的 OFET 进行了性能表征,使用 rGO 电极的 OFET 载流子迁移率为 $0.39 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压约 1.2 V , 电流开关比为 4.9×10^7 。使用 Al 电极 OFET 载流子迁移率为 $0.04 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压约 23.4 V , 电流开关比为 8.2×10^5 。使用 Au 电极 OFET 载流子迁移率为 $1.2 \times 10^{-5} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 阈值电压约 28.9 V , 电流开关比为 2.4×10^2 。PTCDI- C_8 在 rGO 上展示出比较平坦和清晰的表面,有机薄膜形貌和结晶性良好,而 PTCDI- C_8 在 Al 电极上显示出低有序度的小尺寸晶体,因此 rGO OFET 的性能最佳。Ren 等人将 F_{16}CuPc 作为有机半导体材料,采用真空沉积法制备了 rGO 电极的 BGTC 结构 N 型 OFETs^[43]。Au 电极 OFETs 的载流子迁移率为 $1.1 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 而 rGO 电极 OFETs 的载流子迁移率为 $7 \times 10^{-3} \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$ 。

2.4 基于无机化合物电极的 N 型 OFET

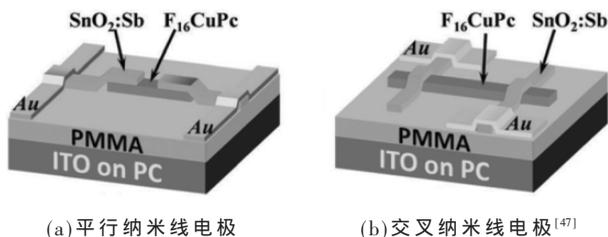
rGO 电极的导电性为 590 S/cm , PEDOT:PSS 电极的导电性为 $0.1 \sim 4000 \text{ S/cm}$, 而 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ (T 代表表面端基) 的导电性为 $1.5 \sim 2.6 \text{ kS/cm}$ 。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 具有高导电率、高透明度、高热稳定性、良好机械柔韧性、功函数可调的特性。Lyu 等人在 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 中加入 NH_3 改变了其功函数,在塑料柔性衬底 PEN 上,采用 PTCDI- C_8 作为 N 型有机材料,用溶液制备法获得了 N 型 OFET^[44],如图 7 所示。基于 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ OFET 的载流子迁移率为 $0.21 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 电流开关比为 2.9×10^6 , 阈值电压为 54.2 V 。 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 掺杂 NH_3 后的 OFET 载流子迁移率为 $0.65 \text{ cm}^2\text{V}^{-1}\text{s}^{-1}$, 电流开关比为 5.1×10^6 , 阈值电压为 17 V 。PTCDI- C_8 的 LUMO 为 -4.3 eV , $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 功函数为 4.7 eV , 掺杂 NH_3 后的 $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ 功函数为 4.4 eV 。后者与 PTCDI- C_8 之间的能量势垒比前者与 PTCDI- C_8 之间的能量势垒更低。

图7 NMX/PTCDI-C₈/Al OFET

2.5 基于纳米线电极的 N 型 OFET

纳米线电极不仅有着良好的导电性,在可见光范围内透明,并且有优良的机械柔韧性。纳米线电极可以独立地制备,然后转移到 OFET 上,这个过程不会对 OFET 上的有机材料造成工艺损伤。Ag 纳米线(Ag NW)的功函数为 4.2 eV,它具有低制备成本、高导电率、透明以及可弯曲等优点。因此,其作为 ITO 的替代品被广泛地研究。直径小于 100 nm 的 Ag NW 有着 80% 的透光率,且表面电阻低于 20 Ω/sq。Lee 等人制备了方阻为 5 Ω/sq,透光率为 92%(光波长 550 nm)的 Ag NW 电极^[45]。将 Ag NW 作为源漏电极,PTCDI-C₈ OFET 作为有机半导体,制备 BGBC 结构的 N 型 OFET,其载流子迁移率为 0.04 cm²V⁻¹s⁻¹,电流开关比为 10⁵。Ag 的功函数与 PDIR-CN2 的 LUMO 非常接近,这表明两者之间几乎没有电子注入的势垒。Yuji 等人在柔性衬底上将 Ag NW 作为源漏电极,Ag 作为栅极,PDIR-CN2 作为有机半导体材料,Cytop 作为介电层,制备了 OFET,其载流子迁移率为 0.04 cm²V⁻¹s⁻¹^[46]。

Sb 掺杂的 SnO₂ 纳米线(SnO₂:Sb)在可见光波段具有高的透明度,其功函数为 4.7~4.9 eV,与一些常用 N 型有机半导体的 LUMO 相匹配。SnO₂:Sb 具有良好的热稳定性、化学稳定性和机械柔韧性,被认为是一种有潜力的低成本电极。Wang 等人利用 SnO₂:Sb 单晶纳米线作为电极,制作了基于 F₁₆CuPc 纳米线的 N 型 OFETs^[47]。单个 F₁₆CuPc 纳米线 OFET 的电极可以做成平行或交叉电极结构,也可以使 F₁₆CuPc 纳米线夹在两条 SnO₂:Sb 纳米线之间,如图 8 所示。SnO₂:Sb 纳米线电极可在 F₁₆CuPc

图8 F₁₆CuPc OFET

纳米线上滑动。通过滑动 SnO₂:Sb 纳米线电极, F₁₆CuPc 在 5 μm、15 μm、23.5 μm 的沟道长度下的载流子迁移率分别为 0.18 cm²V⁻¹s⁻¹、0.45 cm²V⁻¹s⁻¹、0.65 cm²V⁻¹s⁻¹。SnO₂:Sb 纳米线电极可以弯曲超过 180°,可以折叠成具有小曲率半径的环,还可以在基底上保持折叠状态。

3 总结与展望

OFET 制备工艺简单,器件结构多样,部分有机半导体材料制备的 OFET 具有透明、可弯曲、重量轻等特点,使得 OFET 在未来的应用中前景广阔。电极作为 N 型 OFET 器件的一个重要组成部分,其直接影响 N 型 OFET 器件的性能。当 N 型有机半导体与电极接触时,两者间会存在能量势垒,并产生一定的接触电阻。能量势垒越高,接触电阻越大,越不利于电子在 N 型有机半导体和电极之间传输。因此研究者们一方面致力于降低 N 型有机半导体和高功函数金属电极之间的能量势垒和接触电阻,另一方面也将聚合物电极、碳基电极、无机化合物电极等一系列新型电极应用于 N 型 OFET 器件中,以获得优良的晶体管性能。采用石墨烯、有机材料和碱金属酸盐修饰金属电极能降低 N 型有机半导体和高功函数金属电极之间的能量势垒和接触电阻。聚合物、碳基、无机化合物和纳米线电极有着良好的导电性,可透光,可弯曲。

现今的研究虽然取得了一些成就,但是 N 型 OFET 的电极还存在着很大的探索空间。聚合物材料多种多样,其可被人工大面积廉价制备,在制备电极方面有着非常大的应用潜力,但是现今的聚合物电极在导电性和稳定性方面还不如人意。碳基电极虽然有着高导电性和环境稳定性,但其制备工艺相对昂贵,这限制了其当下的应用。无机化合物电极和纳米线电极有着良好的导电性,其在可见光范围内透光,可制备成柔性器件,但由其制备的 N 型 OFET 与 Au 电极制备的 N 型 OFET 性能相当,其 N 型 OFET 的性能潜力还有待进一步开发。相信在未来,会有更多的新型电极材料被开发用于 N 型 OFET,制备出更多性能优越的器件。

参考文献

- [1] 李青. 电子的注入与传输对有机光电子器件性能的影响[D]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- [2] 赵志远. 高迁移率共轭聚合物场效应晶体管器件的研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2017.
- [3] 董京, 柴玉华, 赵跃智, 等. 柔性有机场效应晶体管研究进展[J]. 物理学报, 2013(4): 431-44.
- [4] 谢吉鹏, 马朝柱, 杨汀, 等. 有机场效应晶体管最新实验研究进展[J]. 微纳电子技术, 2012, 49(5): 291-301.
- [5] 樊建锋. 接触电阻对有机场效应晶体管性能影响的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2014.
- [6] YASUDA T, TSUTSUI T. n-Channel organic field-effect transistors based on boron-subphthalocyanine[J]. Molecular Crystals And Liquid Crystals, 2006, 462(1): 3-9.

- [7] CHANG J W, HSU W L, WU C Y, et al. The polymer gate dielectrics and source-drain electrodes on n-type pentacene-based organic field-effect transistors[J]. *Organic Electronics*, 2010, 11(10): 1613-1619.
- [8] TSAI T D, HUANG C Y, LIN H M, et al. Switch the n-type to ambipolar transfer characteristics by illumination in n-type pentacene-based organic field-effect transistors[J]. *Organic Electronics*, 2014, 15(12): 3805-3810.
- [9] BAIRAGI K, ZUCCATTI E, CALAVALLE F, et al. Top dielectric induced ambipolarity in an n-channel dual-gated organic field effect transistor[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2019, 7(33): 10389-10393.
- [10] ORTEGA-CERVANTEZ G, GOMEZ-AGUILAR R, RUEDA-MORALES G, et al. Microwave-assisted synthesis of sponge-like carbon nanotube arrays and their application in organic transistor devices[J]. *Journal of Materials Science-Materials In Electronics*, 2016, 27(12): 12642-12648.
- [11] 胡子阳. 基于横向和垂直结构的有机场效应晶体管的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2009.
- [12] AHMED R, SIMBRUNNER C, SCHWABEGGER G, et al. Air stability of C-60 based n-type OFETs[J]. *Synthetic Metals*, 2014, 188: 136-139.
- [13] 朱虹, 徐晓洁, 塔力哈尔·夏依木拉提. 湿度对有机场效应晶体管稳定性的影响[J]. *伊犁师范学院学报(自然科学版)*, 2020, 14(4): 31-39.
- [14] CHEN X, ZHANG S, WU K, et al. Improving the charge injection in organic transistors by covalently linked graphene oxide/metal electrodes[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2016, 2(4).
- [15] GIM Y, KANG B, KIM B, et al. Atomically-thin molecular layers for electrode modification of organic transistors[J]. *Nanoscale*, 2015, 7(33): 14100-14108.
- [16] SINGH S, MOHAPATRA S K, SHARMA A, et al. Reduction of contact resistance by selective contact doping in fullerene n-channel organic field-effect transistors[J]. *Applied Physics Letters*, 2013, 102(15).
- [17] 郑宏. 界面修饰对有机场效应管性能影响的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2011.
- [18] LI Q, YU X, SHI W, et al. Effect of organic buffer layers on the performance of n-type organic field-effect transistor based on C-60 active layer[J]. *Synthetic Metals*, 2013, 163: 57-60.
- [19] RAPISARDA M, CALVI S, BARRA M, et al. Staggered top-gate PDIF-CN2 N-type thin film transistors on flexible plastic substrates[J]. *Organic Electronics*, 2018, 57: 226-231.
- [20] PARK Y J, CHA M J, YOON Y J, et al. Improved performance in n-type organic field-effect transistors via poly-electrolyte-mediated interfacial doping[J]. *Advanced Electronic Materials*, 2017, 3(10).
- [21] KIM J, KHIM D, KANG R, et al. Simultaneous enhancement of electron injection and air stability in n-type organic field-effect transistors by water-soluble polyfluorene inter-layers[J]. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2014, 6(11): 8108-8114.
- [22] LEE S H, KIM D Y, NOH Y Y. Improved ambipolar charge injection in organic field-effect transistors with low cost metal electrode using polymer sorted semiconducting carbon nanotubes[J]. *Organic Electronics*, 2017, 46: 28-34.
- [23] ZHANG Z, REN X, PENG B, et al. Direct patterning of self-assembled monolayers by stamp printing method and applications in high performance organic field-effect transistors and complementary inverters[J]. *Advanced Functional Materials*, 2015, 25(38): 6112-6121.
- [24] CERNETIC N, ACTON O, WEIDNER T, et al. Bottom-contact small-molecule n-type organic field effect transistors achieved via simultaneous modification of electrode and dielectric surfaces[J]. *Organic Electronics*, 2012, 13(12): 3226-3233.
- [25] ALT M, JESPER M, SCHINKE J, et al. The swiss-army-knife self-assembled monolayer: improving electron injection, stability, and wettability of metal electrodes with a one-minute process[J]. *Advanced Functional Materials*, 2016, 26(18): 3172-3178.
- [26] KUMAR A, PALAI A K, YANG D, et al. Rubidium carbonate modified gold electrodes for efficient electron injection in n-type organic field-effect transistors[J]. *Journal of Physics D-Applied Physics*, 2014, 47(35).
- [27] 郑灵程. 衬底加热和电极修饰对有机场效应晶体管性能影响的研究[D]. 天津: 天津理工大学, 2015.
- [28] ALBRECHT G, HEUSER S, KEIL C, et al. Strategy for preparation of transparent organic thin film transistors with PEDOT:PSS electrodes and a polymeric gate dielectric[J]. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 2015, 40: 772-776.
- [29] SCHMIDT G C, HOEFT D, HAASE K, et al. Naphtalen-ediiimide-based donor-acceptor copolymer prepared by chain-growth catalysttransfer polycondensation: evaluation of electrontransporting properties and application in printed polymer transistors[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2014, 2(26): 5149-5154.
- [30] 杨雷, 程涛, 曾文进, 等. 导电聚合物薄膜的喷墨打印制备及其光电器件[J]. *化学进展*, 2015, 27(11): 1615-1627.
- [31] MAMO M D, SHIN E S, NOH Y Y. Self-aligned patterning of conductive films on plastic substrates for electrodes of flexible electronics[J]. *Journal of Materials Chemistry C*, 2017, 5(41): 10900-10906.
- [32] KIM S, SANYOTO B, PARK W T, et al. Purification of PEDOT:PSS by ultrafiltration for highly conductive transparent electrode of all-printed organic devices[J]. *Advanced*

- Materials, 2016, 28(46): 10149–10154.
- [33] ZHANG J, WANG C, CHEN J, et al. The highly conducting carbon electrodes derived from spin-coated polyacrylonitrile films[J]. Science China–Chemistry, 2016, 59(6): 672–678.
- [34] 陈长鑫. 碳纳米管多沟道场效应晶体管研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2007.
- [35] ITOH E, KANAMORI A. Fabrication of organic FETs based on printing techniques and the improvement of FET properties by the insertion of solution-processable buffer layers[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2016, 55(4).
- [36] 陈卉, 文毅. 高性能柔性 OFET 器件最新进展研究[J]. 科技视界, 2017, 11: 41–42.
- [37] LEE E K, PARK C H, LEE J, et al. Chemically robust ambipolar organic transistor array directly patterned by photolithography[J]. Advanced Materials, 2017, 29(11).
- [38] PARUI S, RIBEIRO M, ATXABAL A, et al. Graphene as an electrode for solution-processed electron-transporting organic transistors[J]. Nanoscale, 2017, 9(29): 10178–10185.
- [39] CHOI J Y, KANG W, KANG B, et al. High performance of low band gap polymer-based ambipolar transistor using single-layer graphene electrodes[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(10): 6002–6012.
- [40] JEONG Y J, YUN D J, JANG J, et al. Solution-processed n-type fullerene field-effect transistors prepared using CVD-grown graphene electrodes: improving performance with thermal annealing[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2015, 17(9): 6635–6643.
- [41] HENRICHSEN H H, BOGGILD P. Graphene electrodes for n-Type organic field-effect transistors[J]. Microelectronic Engineering, 2010, 87(5–8): 1120–1122.
- [42] LEE J S, KIM N H, KANG M S, et al. Wafer-scale patterning of reduced graphene oxide electrodes by transfer-and-reverse stamping for high performance OFETs[J]. Small, 2013, 9(16): 2817–2825.
- [43] REN S, LI R, MENG X, et al. Self-assembly of reduced graphene oxide at liquid-air interface for organic field-effect transistors[J]. Journal of Materials Chemistry, 2012, 22(13): 6171–6175.
- [44] LYU B, KIM M, JING H, et al. Large-Area MXene electrode array for flexible electronics[J]. ACS Nano, 2019, 13(10): 11392–11400.
- [45] LEE S J, KIM Y H, KIM J K, et al. A roll-to-roll welding process for planarized silver nanowire electrodes[J]. Nanoscale, 2014, 6(20): 11828–11834.
- [46] TAKATERA Y, KAJI H, OHMORI Y, et al. Solution-processed top-gate-type n-channel organic field-effect transistors with silver-nanowire source/drain electrodes fabricated on polymer substrate[C]//2014 21st International Workshop on Active-Matrix Flatpanel Displays and Device (AM-FPD), 2014.
- [47] WANG G, TANG Q, TONG Y, et al. Individual single-crystal nanowires as electrodes for organic single-crystal nanodevices[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(37): 9534–9539.

(收稿日期: 2021-08-31)

作者简介:

刘浩坤(1992-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 光电器件。

梁强兵(1982-), 通信作者, 男, 研究员, 主要研究方向: 光电子学领域的研究与教学, E-mail: 252836987@qq.com。

崔艳霞(1984-), 女, 博士, 教授, 主要研究方向: 微纳光子与光电子学领域, 包括表面等离子体纳米器件、有机及钙钛矿光电探测器及钙钛矿激光器等。



扫码下载电子文档

(上接第 11 页)

- [15] 任辉, 姚志强, 邢文虹, 等. 基于国产核心芯片的变电站数据通信网关机设计[J]. 电子设计工程, 2021, 29(8): 150–155.
- [16] 普源精电. 数据手册: DS7000 系列数字示波器[Z]. 普源精电, 2020.

(收稿日期: 2021-08-17)

作者简介:

赵前(1994-), 男, 硕士, 研究实习生, 主要研究方向: 高速高精度数据采集系统。

罗通顶(1985-), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向: 高速高精度数据采集系统。



扫码下载电子文档

版权声明

经作者授权，本论文版权和信息网络传播权归属于《电子技术应用》杂志，凡未经本刊书面同意任何机构、组织和个人不得擅自复印、汇编、翻译和进行信息网络传播。未经本刊书面同意，禁止一切互联网论文资源平台非法上传、收录本论文。

截至目前，本论文已经授权被中国期刊全文数据库（CNKI）、万方数据知识服务平台、中文科技期刊数据库（维普网）、DOAJ、美国《乌利希期刊指南》、JST 日本科技技术振兴机构数据库等数据库全文收录。

对于违反上述禁止行为并违法使用本论文的机构、组织和个人，本刊将采取一切必要法律行动来维护正当权益。

特此声明！

《电子技术应用》编辑部

中国电子信息产业集团有限公司第六研究所