

柔性有机场效应晶体管研究进展*

董京¹⁾²⁾ 柴玉华^{1)†} 赵跃智²⁾ 石巍巍²⁾ 郭玉秀¹⁾²⁾
仪明东²⁾ 解令海²⁾ 黄维^{2)‡}

1) (东北农业大学电气与信息学院, 哈尔滨 150030)

2) (南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院, 南京 210046)

(2012年7月2日收到; 2012年9月15日收到修改稿)

柔性有机场效应晶体管具有可折叠、质量轻、低成本等优点, 在柔性显示、柔性传感器、柔性射频标签和柔性集成电路等方面显示了广阔的应用前景. 本文在介绍柔性有机场效应晶体管最新研究进展的基础上, 总结了柔性有机场效应晶体管的器件结构和柔性有机场效应晶体管所使用的衬底材料、栅绝缘层材料、有源层材料及电极材料, 阐述了柔性有机场效应晶体管的制备工艺, 并讨论了不同的弯曲方式对柔性有机场效应晶体管性能的影响, 最后总结和展望了柔性有机场效应晶体管的应用领域.

关键词: 柔性, 晶体管, 有机/聚合物, 溶液加工

PACS: 73.40.Qv, 74.25.F-, 77.55.F-, 81.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.047301

1 引言

与传统的刚性场效应晶体管相比, 柔性有机场效应晶体管 (organic field-effect transistors, OFETs) 具有可折叠、质量轻、低成本等优点, 在柔性显示、柔性传感器和柔性集成电路等方面显示了广阔的应用前景, 受到了学术界和工业界的广泛关注, 已经成为当前的研究热点. 经过近几年的发展, 柔性 OFETs 的性能有了明显的提高, 部分器件性能达到甚至超过了非晶硅的水平. 但是仍然存在不少问题, 如柔性衬底极易被弯曲, 易对器件造成损坏或对器件性能产生影响, 且柔性衬底对操作条件敏感, 在长期操作过程中不稳定, 与柔性衬底相兼容的低温溶液制备技术有待开发. 本文根据国内外柔性 OFETs 发展情况, 首先介绍了柔性 OFETs 主要采用的器件结构, 总结了当前柔性 OFETs 主要使用的衬底材料、栅绝缘层材料、有源层材料及电

极材料, 阐述了柔性 OFETs 低温溶液制备工艺, 并讨论了不同的弯曲方式对柔性 OFETs 性能的影响, 最后总结和展望了柔性 OFETs 的应用.

2 柔性 OFETs 的器件结构

与传统的刚性场效应晶体管类似, 根据薄膜堆叠顺序的不同, 柔性 OFETs 的平面结构也可以采用底栅式顶接触结构、底栅式底接触结构、顶栅式顶接触结构和顶栅式底接触结构. 一般认为, 在相同有机材料的条件下, 底栅式顶接触结构有着更优的器件性能, 文献中报道最多的也是这种器件结构. 2010年 Zhang 等^[1] 在柔性聚酰亚胺 (PI) 衬底上制备了底栅式顶接触结构的 OFETs (如图 1(a) 所示), 其半导体层可通过溶液法制备, 同时器件的载流子迁移率达到 $0.05 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 而且表现出很好的机械柔性, 即在表面张力为 3% 时, 器件性能没有衰减.

* 国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2009CB930600, 2012CB933301, 2012CB723402)、国家自然科学基金 (批准号: 61204095, 21144004)、中国博士后科学基金 (批准号: 20070410883)、教育部博士点基金 (批准号: 20113223120003)、江苏省自然科学基金 (批准号: BK2012431, BK2011761, SBK201122680)、黑龙江省博士后基金 (批准号: BH-Z07233)、江苏省高校自然科学基金研究面上项目 (批准号: 11KJB510017) 和南京邮电大学人才科研启动基金 (批准号: NY211022, NY210030) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: yhchai@163.com

‡ 通讯作者. E-mail: iamwhuang@njupt.edu.cn

2010年 Kawasaki 等^[2]在柔性聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 衬底上同样制备了底栅式顶接触结构的 OFETs (如图 1(b) 所示), 器件表现出 P 沟道的转移/输出特性, 场效应迁移率达到 $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 而且有明显的氧气感应作用和转移曲线中可忽略的滞后作用, 标志着晶体管作为氧气选择性气敏元件的潜在应用. 2011年 Park 等^[3]在柔性聚醚砜树脂 (PES) 衬底上制备了底栅式顶接触结构的 OFETs, 其半导体层采用有机-无机混合材料, 获得的载流子迁移率高达 $7 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 以上, 可在低操作电压下工作, 且得到的器件展现出很好的热稳定性和机械稳定性, 具有较好的柔性和透明性. 同时, 在柔

性 OFETs 的研究过程中, 其他三种结构也有相关报道. 早在 2005年, Backlund 和 Sandberg^[4]就在柔性 PET 衬底上制备了顶栅式底接触结构的 OFETs 器件 (如图 1(c) 所示), 此器件采用可溶液制备的全聚合物材料, 得到迁移率 $0.016 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 阈值电压 10 V , 电流开关比 10^4 . 2010年 Gburek 和 Wagner^[5]用柔性透明 PET 作为装置衬底, 制备了顶栅式底接触结构的 OFETs (如图 1(d) 所示), 其载流子迁移率可达 $0.01 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 且器件具有长期的稳定性.

近年来, 垂直结构的柔性 OFETs 也有报道. 2011年 Uno 等^[6]报道了在柔性聚 2, 6- 萘二酸乙

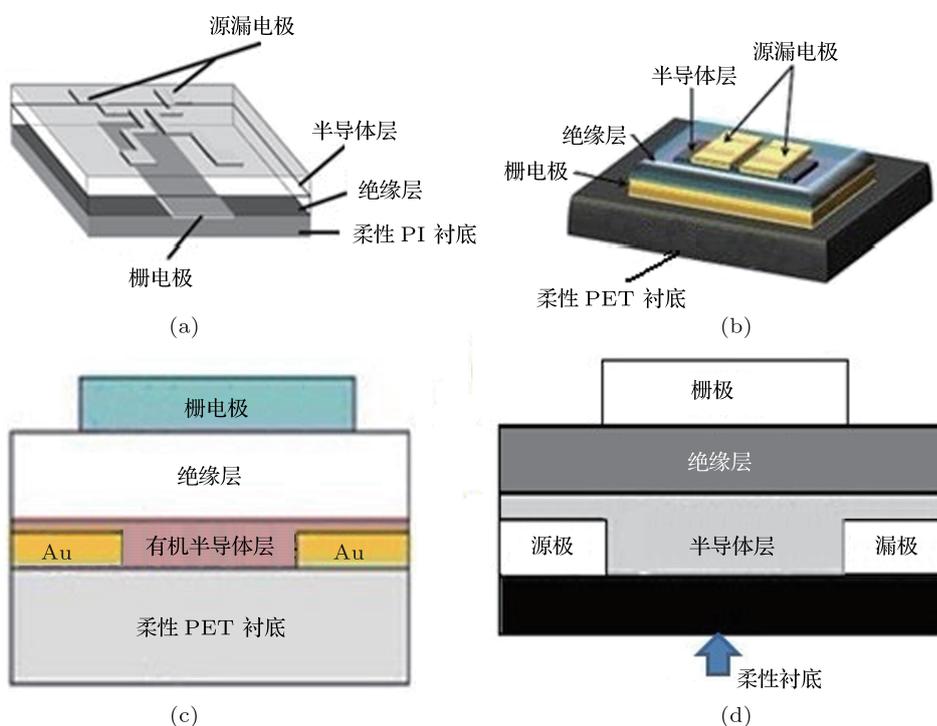


图 1 平面的柔性 OFETs 结构图

二醇酯 (PEN) 衬底上制备 3D 短沟道垂直结构的 OFETs (图 2), 这种结构有两个优势: 可以利用相对简单的操作过程来调节微型结构的高度, 从而控制沟道长度; 当柔性衬底发生弯曲时, 3D-OFETs 的垂直沟道不易发生形变, 更重要的是当弯曲半径为 8 mm 时, 柔性 3D-OFETs 器件不会损坏. 这种结构的器件性能和弯曲性能都比传统结构提高很多, 可以获得很高的载流子迁移率, 且电流开关比也高达 10^6 , 这是关于短沟道垂直结构的 OFETs 报道以来最好的器件性能.

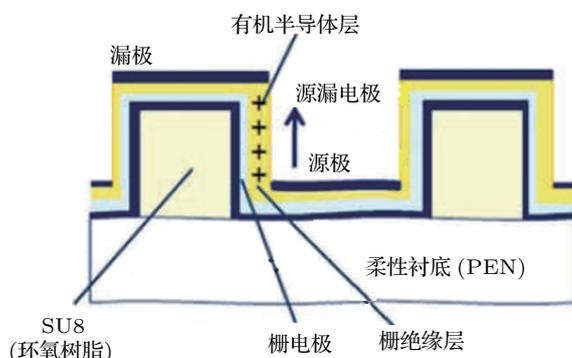


图 2 3D-OFET 的截面图^[6]

3 柔性 OFETs 材料

3.1 柔性衬底材料

柔性衬底材料的作用相当于柔性 OFETs 的骨架,直接影响着柔性 OFETs 的绝缘层、有源层的质量及其相应的制备工艺和器件的柔性效果. 要求 OFETs 衬底材料要具有良好的承受反复拉伸、卷曲和折叠的力学性能,另外对其空间稳定性、热稳定性、防护性能、耐溶剂性、表面光滑程度和光学性能也有较高的要求.

目前通用的柔性 OFETs 衬底材料有 PET, PEN, PES, PI 等聚合物材料,其分子式如图 3 所示, PET, PI 实物图如图 4 所示. 这些聚合物衬底材料质量轻、热敏电阻高,且具有很好的机械柔韧性、光学透明性和耐腐蚀性. 表 1 比较了这些聚合物衬底材料的性质. PET 和 PEN 在透明度、空间稳定性、化学腐蚀、吸湿性和成本等方面有优势,然而它们

的上限操作温度和表面粗糙度不是很好. PES 有很好的透明性和很高的操作温度,但是耐溶剂性和吸湿性较差,并且成本高. 另外, PI 有很高的热稳定性、极佳的机械柔性和化学性质,但它是橙色的且成本高. 最近,在合成无色透明的 PI 技术方面有很大进展 [7,8]. PET 由于其成本低、高透明度和传输性好等成为当前广泛研究的柔性材料 [9,10].

表 1 典型的聚合物衬底材料性质比较

	PET	PEN	PES	PI
透明性	G	G	G	P
上限操作温度	F	G	G	E
空间稳定性	G	G	F	G
表面粗糙度	P	P	G	G
耐溶剂性	G	G	P	G
吸湿性	G	G	P	P
成本	G	G	F	F

注: E, 极佳; G, 很好; F, 一般; P, 很差

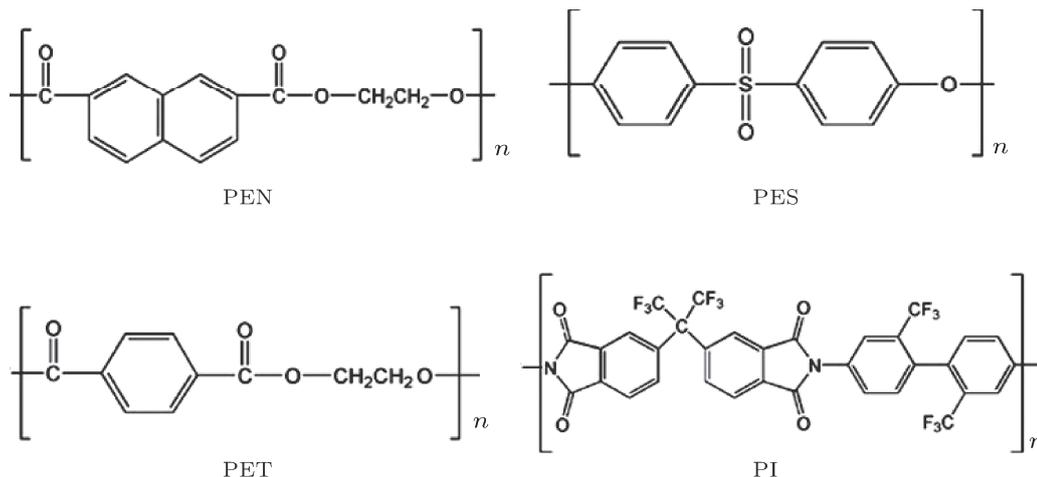


图 3 典型的聚合物衬底分子式

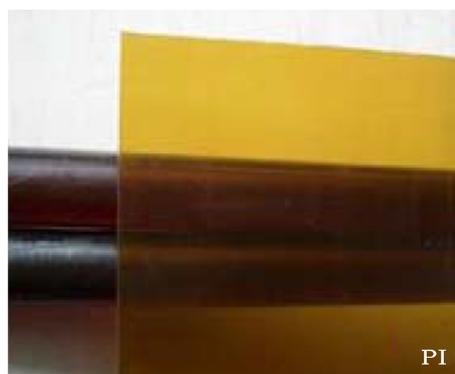
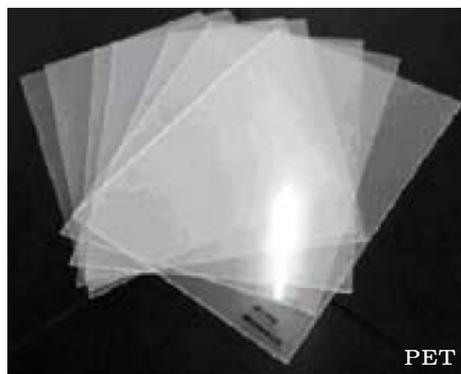


图 4 PET 与 PI 实物图

3.2 柔性 OFETs 栅绝缘层材料

同刚性 OFETs 栅绝缘层材料要求一样, 柔性 OFETs 栅绝缘层材料同样要求绝缘层具有较高的电阻系数以阻止栅电极与半导体沟道间的泄露电流和尽可能高的介电常数以实现 OFETs 的低电压操作^[11]. 另外, 柔性 OFETs 绝缘层材料还应具有在柔性 OFETs 发生机械形变时不易损坏的性质. 基于上述因素, 目前柔性 OFETs 绝缘层材料主要包括无机绝缘材料^[12,13]、聚合物绝缘材料^[1,4,9,14-19]、生物绝缘材料^[20-22]和复合杂化绝缘材料等^[23,24]. 其中鉴于聚合物绝缘材料与柔性衬底具有天然的兼容性, 被广泛地应用在柔性 OFETs 中, 具体包括 PI^[18]、聚乙烯吡咯烷酮 (PVP)^[9,14,16,19]、聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)^[4]和聚乙烯醇 (PVA)^[1]以及将 PVP 与 PMMA 复合^[17]等. 近年来采用生物绝缘材料作为栅绝缘层逐渐成为研究热点, 因为生物绝缘材料具有可简化器件制备过程、有效减少制作成本等优点.

由于无机绝缘材料具有介电常数高、耐高温、化学性质稳定、不易被击穿等优点, 用于柔性 OFETs 中一般可获得相对高的器件性能. 2008 年 Tan 等^[13]在柔性 PET 衬底上采用无机材料氮化硅 (SiN_x) 和溶胶-凝胶体硅 (sol-gel silica) 双层结构作为绝缘层, 获得了有效场效应迁移率为 $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 、操作电压小于 -5 V 、电流开关比为 10^5 的柔性 OFETs 器件, 该器件在弯曲过程中性能没有明显的下降, 在弯曲释放后可恢复原始状态. 2009 年 Chang 等^[12]在 PI 衬底上采用具有高介电常数的铪的氧化物 (HfLaO) 作为柔性 OFETs 器件的绝缘层, 获得的载流子迁移率为 $0.13 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电流开关比为 1.2×10^4 , 阈值电压为 -1.25 V , 操作电压仅为 2.5 V , 很低的亚阈值斜率为 0.13 V/decade . 这样的器件性能对于高速开关速度和低功耗的应用极具吸引力, 然而无机绝缘材料的固相高温和非柔性加工限制了它在晶体管微型化、大面积柔性显示、大规模集成电路、低成本溶液加工生产中的应用.

聚合物绝缘层材料与柔性衬底具有天然的兼容性, 被广泛地应用在柔性 OFETs 中, 具体包括 PI^[16,19]、PVP^[9,14,18]、PMMA^[4]和 PVA^[1]以及将 PVP 与 PMMA 复合^[17]等. Sidler 等^[18]在柔性 PI 衬底上同时也采用聚合物 PI 作为栅绝缘层, 用模板印刷的方法制备出了基于并五苯的柔性 OFETs 器件, 通过改变沟道长宽尺寸, 得到了器件的最高

场效应迁移率为 $0.053 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 最小阈值电压为 -2.5 V . Graz 和 Lacour^[15]在人造胶体上采用聚对二甲苯 C (parylene C) 为栅绝缘层, 制备出了基于并五苯的柔性 OFETs 器件, 获得的载流子迁移率为 $0.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电流开关比为 5×10^4 , 阈值电压大约为 -3 V , 而且基于此 OFETs 的电路可以经得住适度的反复弯曲, 对器件性能没有太大影响. 在聚合物材料作绝缘层中, 交联 PVP 是最广泛报道的^[9,14,16,19], 其可通过溶液旋涂方法获得, 简单易操作. 另外, Bäcklund 和 Sandberg^[4]旋涂 PMMA 作绝缘层制备柔性 OFETs 器件, 获得最高的载流子迁移率为 $0.016 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Zhang 等^[1]采用聚合物 PVA 作为柔性 OFETs 的绝缘层, 通过简单的旋涂法, 获得的载流子迁移率为 $0.05 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. Liu 等^[17]采用 PVP 与 PMMA 复合材料作为柔性 OFETs 的绝缘层, 经过修饰后的器件最高载流子迁移率为 $0.15 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 聚合物绝缘材料的开发与应用对于降低生产成本、简化制备工艺、实现全有机的柔性 OFETs 具有重要的意义.

近年来相继报道了采用生物材料作绝缘层的研究. 2010 年 Kim 等^[21]报道了在柔性 PET 衬底上采用高介电常数的离子凝胶作为栅绝缘层, 制备的石墨烯 OFETs 的空穴和电子迁移率分别为 203 ± 57 和 $91 \pm 50 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 操作电压小于 3 V , 同时表现出极佳的机械柔性. 2011 年 Wang 等^[22]在柔性 PET 衬底上同样采用生物材料蚕丝蛋白作为栅绝缘层, 通过低温溶液法制备了基于并五苯的柔性 OFETs, 得到饱和场效应迁移率为 $23.2 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 阈值电压为 -0.77 V , 操作电压也仅为 -3 V . 2011 年 Chang 等^[20]在柔性 PEN 衬底上采用鸡蛋蛋白为栅绝缘层, 制备了基于富勒烯 (C_{60}) 的 OFETs, 其输出电流最高可达 $5 \times 10^{-6} \text{ A}$, 且将柔性 OFETs 多次弯曲成半径为 0.5 cm 时, 输出电流的数量级仍然保持在同一水平, 且没有明显的滞后现象存在, 但电流开关比有所下降, 可能是因为弯曲后泄露电流的增加所导致. 采用生物绝缘材料作为柔性 OFETs 栅绝缘层可有效简化器件制备过程、减少制作成本, 有望在生物检测与传感领域得到应用.

聚合物绝缘层材料具有很好的柔韧性, 与柔性衬底具有天然的兼容性, 能够满足器件的柔性、可印刷、低价等实际应用要求, 是一种理想的绝缘材料. 但这种类型的材料很难获得较高的介电常数, 使得器件的操作电压往往很高, 不利于低功耗操作.

而聚合物/无机复合绝缘材料具有介电常数高、化学性质稳定等特点,可以有效降低器件的操作电压以减少损耗. 2007年 Zhao等^[25]采用五氧化二钽(Ta_2O_5)/PVP双层结构作绝缘层提高晶体管性能,这种双层栅绝缘层漏电流小、表面光滑,同时电容相对很大,使阈值电压降到很小值(-2.5 V). 同年, Zirkel等^[24]在柔性PET衬底上采用无机氧化物三氧化二铝(Al_2O_3)或二氧化锆(ZrO_2)与聚合物杂化,形成了具有高介电常数的光滑、致密绝缘层,在具有低泄露电流的同时,操作电压也相当低(小于2 V). 2011年 Hwang等^[23]在柔性PES衬底上采用有机物CYTOP和高介电常数的无机材料 Al_2O_3 进行复合杂化之后的双层结构作为器件的绝缘层,操作电压可以达到8 V以下.

绝缘层的表面性质直接影响到有机半导体材料的传输特性,在有机半导体活性层沉积之前,需要对栅绝缘层进行表面处理,使其与沉积在其上的半导体薄膜更佳匹配,以获得更大的结晶尺寸. 修饰绝缘层表面常用两种方法,即自组装单层(SAMs)修饰和聚合物修饰. Zyung等^[26]在沉积活性层之前,用自组装材料六甲基二硅氮烷(hexamethyldisilazane, HMDS)对绝缘层进行处理,改善了活性层与绝缘层之间的界面质量,提高了器件的迁移率. Liu等^[27]在制备柔性OFETs过程中,采用自组装4-苯丁基三氯硅烷(4-phenylbutyltrichlorosilane, PBTS)的方法对绝缘层PVP-EAD的表面进行修饰,可得到很高的水接触角(86°),有效提高了OFETs的性能. 刘玉荣等^[28]采用十八烷基三氯硅烷(OTS)对栅绝缘层表面改性,在空气环境下成功地制备出高性能聚合物薄膜晶体管,大幅度地改善了器件的电性能. Sekitani等^[29]将衬底沉浸在磷酸十八烷丙二醇溶液中,在氧化铝表面形成了致密的自组装单层薄膜,有效改善了器件的性能,制备了可极度弯曲的柔性OFETs. Zschiechang等^[30]在绝缘层修饰方面也做了类似的工作.

3.3 柔性OFETs有源层材料

有源层材料即有机半导体材料是OFETs中的活性材料,是决定器件输出特性的主要因素,若想获得良好的柔性OFETs器件性能,其有机半导体材料的选择至关重要.

在柔性场效应晶体管器件中,作为典型的p型有机半导体的小分子材料并五苯在柔性OFETs中

被广泛应用,具有良好的电学性能. Tan等^[13]在2008年报道了基于并五苯的柔性OFETs,场效应迁移率可达 $1\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,电流开关比为 10^5 ,操作电压小于-5 V. Sekitani等^[29]2010年在自然杂志上报道的柔性OFETs,采用并五苯为有机活性层,获得了极佳的器件性能,迁移率可达到 $0.5\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,操作电压仅为2 V,同时可极度弯曲. Hwang等^[23]在2011年报道的柔性OFETs,将并五苯和聚三芳胺(poly(triarylamine), PTAA)进行混合作为有机半导体活性层,获得最大场效应迁移率为 $0.32\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,操作电压小于8 V,同时器件在空气中具有很好的稳定性.

随着 C_{60} 等n型有机半导体材料的开发,n型柔性OFETs也得到快速发展. Sung等^[19]报道了在PET衬底上通过溶液法制备基于 C_{60} 活性层的柔性OFETs,获得场效应迁移率为 $0.057\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,电流开关比大于 10^4 ,阈值电压为11 V,亚阈值斜率为 4.1 V/decade . Fujisaki等^[31]在2010年报道了柔性PEN衬底上制备了 64×64 矩阵的基于苯基双噻二唑衍生物(FPTBBT)的n型底接触结构的柔性OFETs,获得电子载流子迁移率超过 $0.1\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,电流开关比高达 10^8 以上,同时在空气中有很好的稳定性. 这对于柔性n型OFETs来说是一个很大的突破. 对于柔性OFETs来说,n型柔性OFETs将是今后的重要研究方向.

具有单晶结构的有机半导体材料,其器件性能令人瞩目. 并五苯单晶OFETs的场效应迁移率已高达 $35\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,这是目前室温下获得的最高有机场效应迁移率. 但由于单晶结构比较脆弱,限制了其在柔性OFETs中的应用,因此需要发展具有机械柔性、非破坏性的有机半导体单晶材料. Briseng等^[14]在柔性PET衬底上采用红荧烯单晶为半导体层,PVP为绝缘层,制备了柔性OFETs,得到载流子迁移率高达 $4.6\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$,电流开关比大约 10^6 ,阈值电压为-2.1 V,亚阈值斜率为 0.9 V/decade ,并且当弯曲半径达到9.4 mm,张力为0.74%时,器件性能没有严重衰减;然而当弯曲半径从7.4 mm到5.9 mm变化时,载流子迁移率急剧下降. 有趣的是,当弯曲之后再释放柔性衬底,载流子迁移率恢复到之前没有弯曲时数值的91.3%,电流开关比也恢复到原始数值. 另外,基于单晶碳纳米管的半导体材料也被应用于柔性OFETs中^[32,33]. Cao等^[34]在柔性PET衬底上制备高弯曲度的OFETs,其所有导体和半导体层都采用单晶碳纳米管网状物材料,采

用弹性胶体为栅绝缘层,器件具有很好的光学透明性、机械柔性及电学性能,唯一存在的问题就是在获得很高的有效载流子迁移率 ($26\text{--}30\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$) 的同时,器件电流开关比却很低,这也是今后需要解决的问题。

另外,其他的有机半导体材料也被陆续应用到柔性 OFETs 上. Liu 等^[17] 2006 年在 JACS 上报道了全溶液制备基于聚噻吩衍生物 (PQT-12) 的柔性 OFETs, 获得载流子迁移率为 $0.15\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电流开关比为 10^6 , 阈值电压为 -2 V . Jiang 等^[35] 采用交联聚-3 己基噻吩 (P3HT) 作为有机活性层, 得到光滑的表面形貌, 获得不错的器件性能. Suganuma 等^[36] 2011 年报道了基于 P3HT 的透明柔性 OFETs, 其器件场效应迁移率为 $0.023\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. 可以看到, 基于溶液法制备的 OFETs 通常具有很高的电流开关比, 但迁移率很低, 而基于石墨烯的 OFETs 展现出很高的迁移率, 却在开关比方面不尽人意. 综合以上两点原因, Huang 等^[37] 制备了有机半导体与石墨烯混合的柔性 OFETs, 即将 P3HT 与石墨烯混合作为半导体层, 获得器件的迁移率为 $0.17\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 同时他们也将 PQT-12 与石墨烯混合作为半导体层, 获得高迁移率为 $0.6\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的柔性 OFETs.

3.4 柔性 OFETs 电极材料

柔性 OFETs 器件的电极材料要求载流子能顺利从电极注入到有机半导体层. 这就要求电极材料与有机半导体之间既要形成良好、紧密的物理接触, 又要与半导体材料形成良好的能级匹配, 即金属的功函数与 p 型有机半导体的最高占据分子轨道 (HOMO) 能级或 n 型有机半导体的最低空置分子轨道 (LUMO) 能级相匹配.

在柔性 OFETs 器件中, 常被报道的电极材料包括金 (Au)、铝 (Al)、氧化铟锡 (ITO)、聚乙烯撑二氧噻吩-聚(苯乙烯磺酸盐)(PEDOT: PSS) 等. 在这些电极材料中, 通常采用 Au 作源漏电极、Al 作栅电极^[24,30,31,38], 也有报道采用 ITO 作栅电极^[9,27,39]. 而 PEDOT:PSS 为透明导电材料, 可用作源、漏和栅电极^[9,40], 得到的器件性能可与 Au 作电极的器件性能相媲美.

在选择合适的源漏电极材料的同时, 对源、漏电极进行修饰也是至关重要的. 因为修饰层可减少电极与半导体活性层之间的接触电阻, 有利于载流子的注入. Seol 等^[41] 制备的柔性 OFETs 中, 在源漏

电极和半导体层之间插入修饰层 3- 巯基寡聚噻吩 (OMST), 有效提高了器件的性能. 还有相关报道采用自组装单层五氟苯硫酚 (pentafluorobenzenethiol, PFBT) 来修饰柔性 OFETs 的源漏电极^[23,42], 有效调节了源漏电极的功函数, 改善了金属电极与有机半导体层之间的界面接触. Sun 等^[43] 在电极与有源层之间插入极薄的 C60 修饰层, 有效地减小了界面接触电阻, 降低了载流子的注入势垒, 使载流子迁移率得到明显提高.

石墨烯具有良好的柔性和透明性, 是一种很有前景的柔性透明电极材料. 2010 年 Chen 等^[44] 采用溶液制备的方法, 将石墨烯材料作为电极, 在 PI 衬底上制备了全碳结构的柔性 OFETs, 该柔性 OFETs 表现出良好的器件性能, 载流子迁移率达到 $0.02\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 电流开关比达到 10^6 , 并表现出极佳的柔性, 在极度弯曲半径的条件下器件性能没有明显下降. Suganuma 等^[36] 在 2011 年同样采用石墨烯分别作为柔性 OFETs 的源、漏和栅电极, 通过溶液制备方法获得了透明柔性 OFETs 器件, 其载流子迁移率为 $0.023\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 阈值电压为 -1.8 V . Lee 等^[16] 在 2011 年报道了采用单层石墨烯作为源漏电极, 在聚芳基酸酯 (PAR) 塑料衬底上制备柔性 OFETs, 其器件场效应迁移率为 $0.12\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 并且具有良好的柔性和透明度. 可以看出, 具有高透明度和高导电性的石墨烯材料, 将有望成为下一代柔性 OFETs 的电极材料.

4 柔性 OFETs 的制备工艺

对于柔性 OFETs 来说, 有机半导体材料的性能固然重要, 但是其具体的制备工艺也对器件的性能有很大程度的影响. 在柔性 OFETs 中, 其柔性衬底对器件制备温度比较敏感, 高温加工技术会对柔性衬底造成破坏, 使其产生较大程度的热形变. 因此低温溶液制备技术对于制备高性能的柔性 OFETs 是非常必要的, 既可以避免对柔性衬底造成损害, 又可以使得柔性 OFETs 进行规模化生产.

随着低成本、低温溶液制备技术的进步, 特别是喷墨印刷技术的应用, 使得人们可以不通过任何真空设备就可以制备柔性 OFETs. 近几年, 基于低温溶液制备的柔性 OFETs 在性能和可靠性方面都有了显著提高. 例如通过溶液法制备的苯并噻唑衍生物 (C₈-BTBT) 单晶 OFETs^[45], 其平均场效应迁移率达到 $3.0\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$, 最高值达到 $9.1\text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$.

可溶的有机聚合物和低聚物都可以用溶液加工技术进行沉积. 常用的溶液成膜技术包括有机气相沉积 (organic vapor phase deposition, OVPD)^[46,47]、旋涂^[11,48,49]、LB膜^[50]、分子自组装^[51]和喷墨打印^[52,53]等方法. 有机气相沉积 (如图 5(a) 所示) 是将有机材料的溶液在低真空中蒸发, 由惰性气体载体运抵衬底进行沉积, 是一种基于气相传输原理的用于所谓“有机小分子”薄膜沉积的创新技术. 与传统技术 (高真空内蒸发) 相比, 在过程控制、可重复性和运行成本方面都具有很大的优势. 旋涂 (如图 5(b) 所示) 就是在衬底表面的中心滴上溶液, 以一定速率旋转, 当溶剂挥发完后就可以形成均匀有序的薄膜, 是最常用的低温溶液制备方法, 也是在平坦衬底上获得薄的、均匀的薄膜的首选方法. LB膜技术就是先将双亲分子在水面上形成有序的紧密单分子层膜, 再利用端基的水亲水、油亲油作用将单层膜转移到固体基片上, 是一种可以在分子水平上精确控制薄膜厚度的制膜技术. 首个 LB-OFETs^[54] 是聚 3- 烷基噻吩分子链在长链脂肪酸的辅助下铺展开并垂直沉积于基底上得到. 目前的 LB-OFETs 的场效应迁移率都不太高, 主要是因

为在拉膜时带入的水分子对器件工作性能有不利影响, 同时引入的水分子具有两亲性的侧链降低了整个分子的共平面性, 导致迁移率下降. 自组装成膜是分子通过化学键或非化学键相互作用, 自发地缔合形成热力学稳定的二维或三维有序的超分子结构, 分子自组装是实现柔性分子晶体管强有力的制备工艺. 喷墨打印就是通过喷墨得到图案化薄膜的过程, 这种制备工艺不但可以应用于制备器件薄膜, 也用于柔性 OFETs 源漏电极的图案化, 因此柔性 OFETs 的制作完全可以用喷墨打印来实现. 目前已有利用喷墨打印技术在柔性衬底上来制备全喷墨打印的 OFETs 的报道^[53,55]. 随着喷墨打印技术的改进, 尤其结合辊接辊技术, 喷墨打印在规模化制备柔性 OFETs 方面会大有所为.

溶液加工技术除了其低温特点可以使柔性衬底免遭破坏外, 还有个显著优点, 即在溶液加工过程中, 由于薄膜的形成来源于聚合物溶液中溶剂的蒸发, 因此, 薄膜的厚度可以小到 5—10 nm, 可以通过稀释溶液和降低溶液的黏稠性实现. 而且这种在柔性衬底上进行溶液制备 OFETs 的方法可以制备

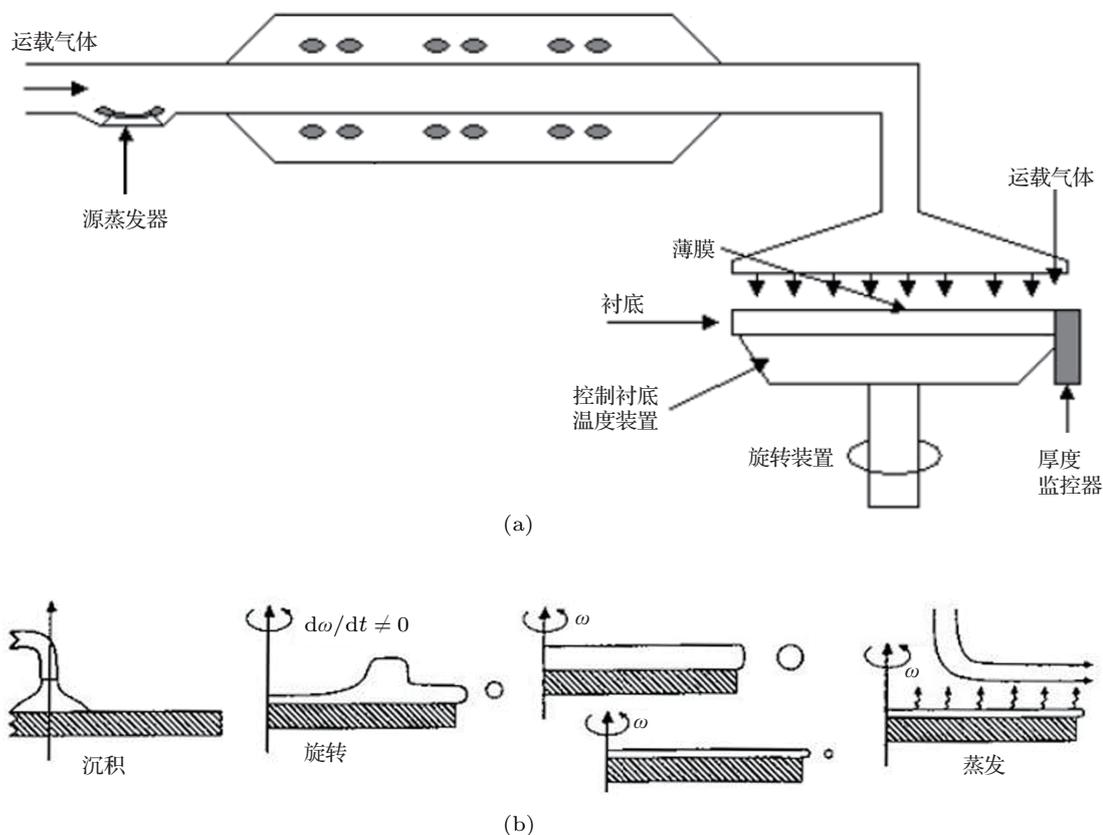
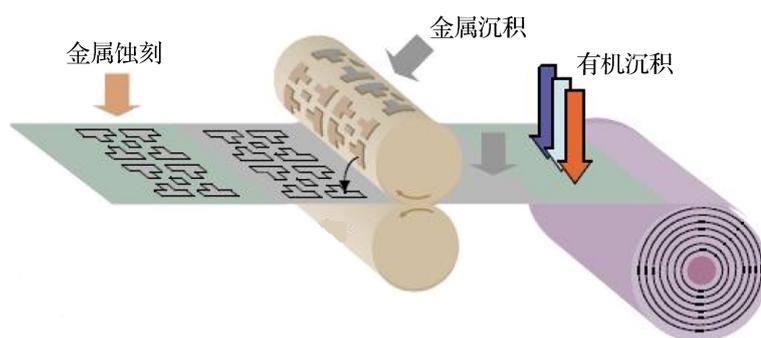


图 5 溶液制备技术示意图^[56] (a) 有机气相沉积; (b) 旋涂

图6 roll-to-roll 制备技术示意图^[57]

大面积、高产量的器件,可实现大规模的 roll-to-roll 制备(图6)。因此,溶液加工技术可以在低温下实现柔性 OFETs 规模化的制备,是一种很有应用前景的制备工艺。

5 弯曲方式对柔性 OFET 性能的影响

对于柔性 OFETs 来说,不同的弯曲方式会对其性能造成影响,本部分系统阐述弯曲次数、弯曲半径、弯曲方向对柔性 OFETs 性能产生的不同影响。

柔性 OFETs 的各项性能参数会随着弯曲次数的增加而产生不同的变化。例如柔性 OFETs 的关态电流会随着弯曲次数的增加而增加,从而导致其电流开关比下降,而柔性 OFETs 的场效应迁移率会随着弯曲次数的增加而增加^[39,41],这主要是由于随着弯曲次数的增加,并五苯层出现破裂,水和氧气分子进入其中,形成掺杂效应,沟道导电性增加,使电荷密度有所增加,场效应迁移率有所增大。同样,Seol 等^[58]也对柔性 OFETs 的性能随弯曲次数的变化进行研究,发现随着弯曲次数的增加,电流密度增加,载流子迁移率增加,关态电流增加,电流开关比减小,阈值电压没有明显的变化趋势,只是在一定范围内浮动。

弯曲半径越小,柔性 OFETs 性能退化越严重。例如 Briseno 等^[14]在 PET 衬底上制备的柔性 OFETs,器件的载流子迁移率随着弯曲半径的

减小而减小,如图 7(a) 所示。Wang 等^[59]对柔性晶体管进行弯曲测试,发现器件性能与弯曲半径有很大关系,当弯曲半径大于 8 mm 时,性能是可逆的,并认为这种可恢复性是由于陷阱密度的改变引起的。Uno 等^[6]在柔性 PEN 衬底上制备的 3D 结构的 OFETs,无论对器件进行压缩还是伸张,当弯曲半径大于 8 mm 时,器件性能都没有明显的退化,而弯曲半径小于 8 mm 之后,输出电流骤减,器件性能急剧退化,同时对形成于不同衬底的三个器件装置进行弯曲半径测试,可以观察到当弯曲半径减小到 5 mm 时,器件全部出现了崩溃现象,如图 7(b) 所示。同样,Seokitani 等^[29]在柔性 PI 衬底上制备的 OFETs,无论是平行沟道还是垂直沟道进行弯曲,器件的输出电流都会随着弯曲半径的减小而减小,漏电流随弯曲半径的减少而增大,但两者都是在一定半径范围内(大约 0.5 mm),变化不明显,当弯曲半径小于 0.5 mm 时急剧变化,如图 7(c), (d) 所示。但对于理想的柔性 OFETs 来说,还需要其在反复的折皱或折叠后器件性能不发生明显的退化,因此需要 OFETs 能够承受住极小的弯曲半径,柔性 OFETs 在这一方面具有突出的优势。表 2 列出了曾经报道的一些柔性 OFETs 与柔性多晶硅晶体管和柔性氧化物晶体的性能参数对比。可以看出,与其他两种传统晶体管相对比,柔性 OFETs 可承受的极限半径更小。

表2 文献报道相关数据(迁移率、操作电压、弯曲半径)比较

	多晶硅 TFTs ^[60]	金属氧化物 TFTs ^[38]	非晶硅 TFTs ^[61,62]	有机 TFTs ^[63]	有机 TFTs ^[64]	有机 TFTs ^[29]
场效应迁移率/cm ² ·V ⁻¹ ·s ⁻¹	> 10	7	0.5	0.5	0.1	0.5
操作电压/V	4	10	15	40	2.5	2
最小弯曲半径/mm	10	30	0.5	0.5	2.5	0.1

除了弯曲次数和弯曲半径对柔性 OFETs 有一定的影响外, 弯曲方向对器件的影响也是不容忽视的. 曾有报道 [65] 以 PET 为柔性衬底, 并五苯为半导体层, PMMA 为绝缘层, 制备了全有机的柔性 OFETs. 在报道中, 对器件在不同弯曲方向下的器件性能进行了测试, 发现平行于沟道方向的弯曲对

器件性能有很大影响, 而垂直于沟道长度方向的弯曲几乎不对器件产生影响; 在器件内曲的情况下, 器件载流子迁移率和饱和电流都提高了, 但是电流开关比明显下降; 而在器件外曲的情况下, 载流子迁移率下降, 但器件的漏电流基本保持不变. 表 3 为平行沟道方向的弯曲对器件性能的影响.

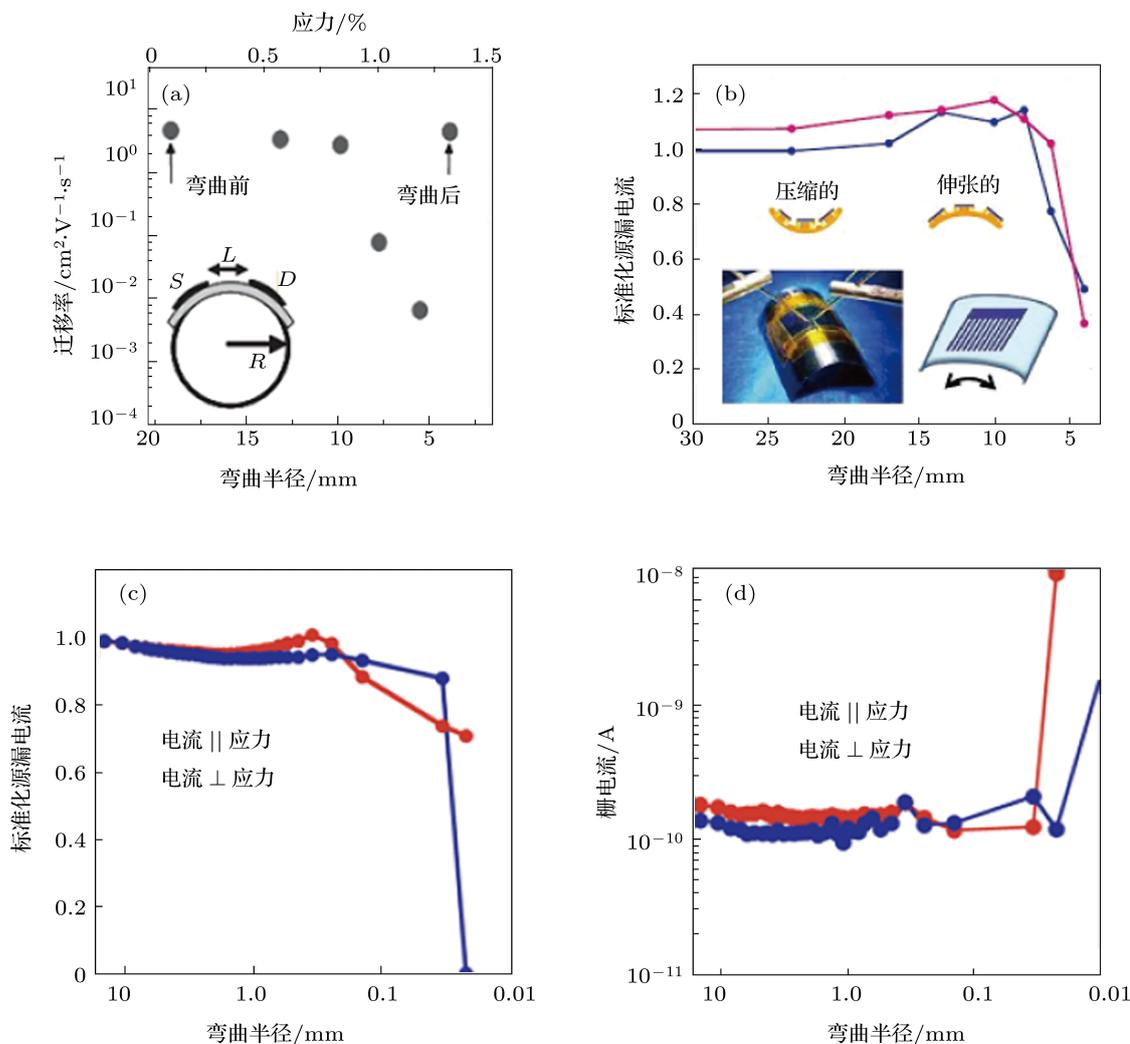


图 7 器件性能随弯曲半径的变化

表 3 平行于沟道长度方向的弯曲对器件性能的影响 [65]

	曲率半径 ^(a)	载流子迁移率/ $\text{cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$	最大开关电流比	饱和电流 ^(c) /mA
平放	—	0.0210	2×10^5	0.240
内曲 ^(b)	3.67	0.0251	3×10^4	0.303
内曲	7.33	0.0236	1×10^5	0.273
外曲 ^(b)	3.67	0.0189	1×10^5	0.223
外曲	7.33	0.0204	2×10^5	0.239

注: (a) 曲率半径按 PET 衬底中心计算; (b) “内曲”指器件在卷曲面内侧; “外曲”指器件在卷曲面外侧; (c) 饱和电流指在 70 V 栅极偏压下的饱和电流.

总之,在对柔性 OFETs 进行弯曲之后,会在界面处产生分层,源漏电极会产生破裂,这都限制了柔性 OFETs 的发展,因此需要对柔性 OFET 器件的破裂和分层做进一步研究,并进一步开发具有高度机械柔性的 OFETs 材料。

6 柔性 OFETs 的应用

柔性 OFETs 已初步应用到柔性显示^[66-69]、柔性传感器阵列^[29,70]、低成本射频标签^[71]和柔性集成电路^[72,73]中。

6.1 柔性显示

随着人们对信息获取要求的不断提高,消费者要求高质量、方便、便携式的数字显示装置,而柔性显示很大程度上将会满足这一要求^[74]。与传统平板显示器不同,这种显示器能够被反复地弯曲和折叠,因而给我们的生活带来极大的便利。例如,

我们的各种书籍、杂志、报纸和视频文件可以用这种柔性显示器呈现,可以随时随地观看。目前流行的电子产品(如 MP4)由于其显示屏不能弯曲和折叠,其视觉效果受到极大的制约,携带起来也不是很方便。而柔性显示器可以像报纸一样,在需要时将其展开,使用完毕后将其卷起来,在保证携带方便的同时充分地兼顾了视觉效果。在过去的几年里,已在实验室中研发出了柔性显示器。Rogers 等^[75,76]介绍了柔性电子显示器的结构、原理、材料特性以及制造的基本过程。而 Jain 等^[77]综述了柔性显示器的性能特点和关键制造技术的最新进展。普林斯顿大学 E-Ink 课题组^[78]则报道了像纸一样的有机电子柔性显示器件——电子显示器(e-paper),如图 8(a)所示,其分辨率达到 96 d.p.i.,白光反射系数为 43%,对比率为 8:5:1。而未来有机电子柔性显示的概念^[57]如图 8(b)所示,当器件不用时被卷曲在一个像笔一样的装置里面。相信随着这一研究的不断深入,柔性电子显示器各项技术会日渐成熟,性能会更加完善。

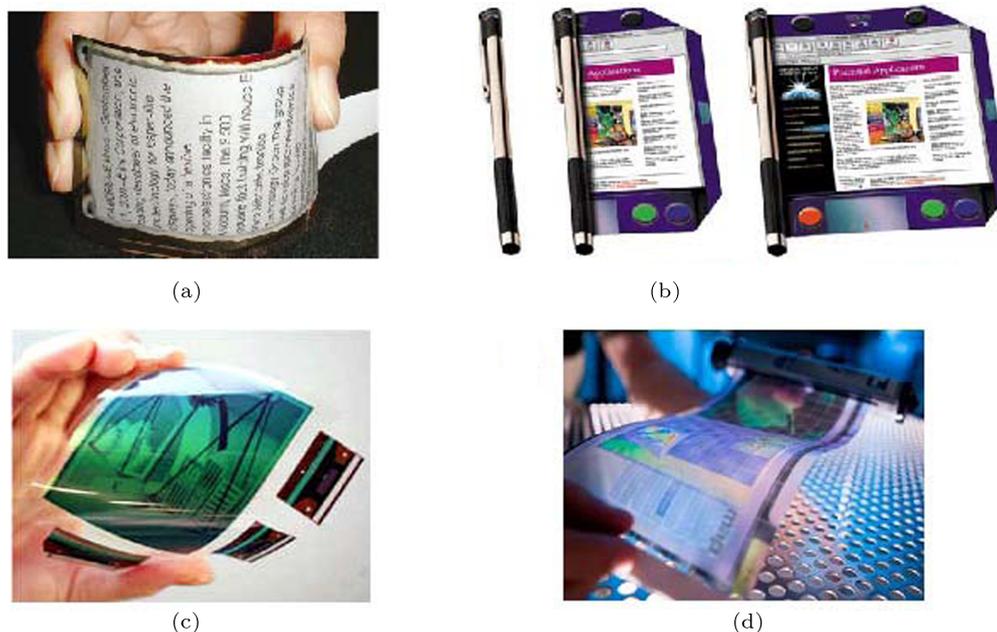


图 8 有机电子柔性显示

6.2 柔性传感器阵列

尽管有机半导体的载流子迁移率要比单晶硅的迁移率低 2—3 个数量级,但对于大多数大面积传感器的应用还是可行的,尤其是电子皮肤。在电子皮肤的基本结构中,柔性基板上的传感器按点阵

分布,再用交联导电体联接各个传感器。而基于柔性 OFETs 的压力传感器阵列,具有像皮肤一样的灵敏度,可以辨认触到的信息,是下一代人造电子皮肤的理想元件,这将成为下一代机器人的本质特征。在柔性压力传感器矩阵中^[79,80],柔性 OFETs 被用来从传感器中读出压力数据,这种压力传感器非

常适合于制备人造电子皮肤. 而这些传感器的弯曲半径可达到 2 mm, 这个尺寸对于机器人手指的制作已经足够小了. 图 9(a) 所示为基于塑料衬底的 OFETs 的传感器阵列, 在电子皮肤方面的应用. 同时, 也可将柔性 OFETs 具有机械柔性、大面积、低成本和相对简单的制造工艺等优点, 使其在电子皮肤方面的应用成为可能.



图 9 基于塑料衬底, 附着在手形上的 OFETs 传感器阵列^[81]

6.3 柔性射频标签

近年来, 人们对用于个人生活消费品跟踪的射频标签的发展很感兴趣. 这样的标签可以实现自动控制、存货控制、校验或购买操作. 大多数的消费模式告诉我们, 可随意丢弃的个人标签必须廉价, 这样才能使其具有经济的可行性. 2005 年, 利用全打印技术实现了低成本的射频标签的制备^[82](如图 10(a) 所示), 这种柔性射频标签具有 $1 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ 的载流子迁移率和 135 kHz 的频率, 具有很高的实用价值. 柔性射频标签的使用(如图 10(b) 所示)将使人们进入一个存货效率更高和个人消费更方便的时代.

6.4 柔性有机集成电路

随着有机场效应晶体管在工艺和性能上的不断进步, 大量单管器件可以互相连接起来以实现对各种信息的综合处理, 为人们的日常生活及工作带来方便. 有机场效应晶体管器件在微型电子电路方面主要发挥着两个方面的作用: 一方面是能够处理

数字信息的数字电路; 另一方面就是所谓的模拟电路, 用来处理、过滤和放大模拟信号, 或者用来将模拟信号转换成数字信号. 将大量的有机场效应晶体管器件大规模集成在柔性衬底上, 即得到柔性有机集成电路, 其可应用在柔性电子标签、柔性智能卡等对柔韧性有一定要求的场合中, 在具有一定处理信息功能的同时, 具有机械柔性和延展性. 早在 1998 年, 飞利浦实验室^[83]用有机场效应晶体管制成的塑料集成电路中包含了 326 个高分子晶体管, 是首次在柔性衬底上制备较大规模的有机集成电路, 是历史上第一个真正意义上的具有一定逻辑功能的较大规模的有机集成电路, 也是未来实现智能卡、价格标签、商品防盗标签等有机电子功能器件的基础. 而后 Kane 小组和 Jackson 小组^[84]共同合作, 在低成本的聚合物衬底上制备了有机模拟及数字电路. 2008 年, Yan 等^[73]在柔性 PET 衬底上采用溶液法制备了 n 型晶体管, 并将其集成互补电路. 目前大多数有机电路都是基于 p 型单一材料, 但是这种电路的复杂结构阻碍了在集成电路方面的应用, 因此, 寻找性能优异的 n 型材料, 形成互补型逻辑电路成为现在的首要任务.

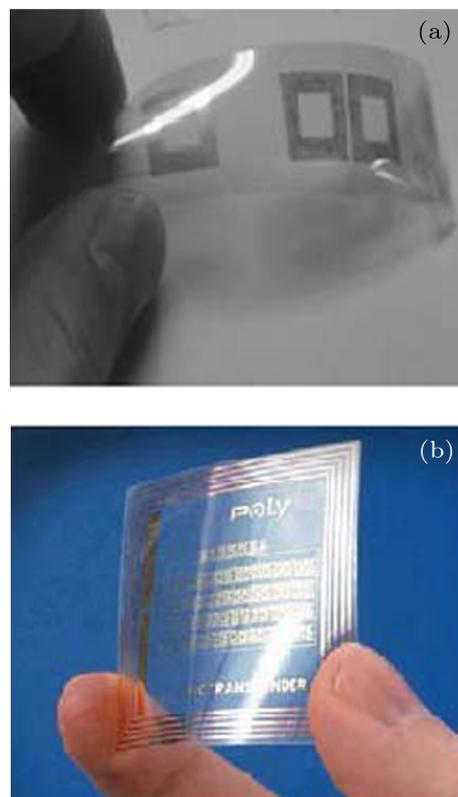


图 10 柔性射频标签 (a) 低成本全打印柔性射频标签; (b) 商业化柔性射频标签

7 总结与展望

柔性 OFETs 大规模应用的关键在于对其弯曲或者折叠后性能的稳定性的。目前为止, 已制备出具有较高电性能和机械性能的柔性 OFETs, 其成果令人振奋 [6,27,75]. 但柔性 OFETs 的发展和研究正处于方兴未艾时期, 还面临着很多问题, 柔性衬底极易被弯曲, 易对器件造成损坏或对器件性能产生影响, 柔性衬底对操作条件敏感, 在长期操作过程中不稳定, 与柔性衬底相兼容的低温溶液制备技术有待开发等。

柔性 OFETs 与传统半导体器件的最大区别在于其柔性和延展性, 这就对材料的力学性能提出了更高要求, 也为未来柔性 OFETs 的发展指明了方向. 今后对柔性 OFETs 的研究主要集中在以下几个

方面: 半导体层方面, 加快 n 型有机半导体的研制, 并提高 n 型柔性 OFETs 稳定性, 实现高性能柔性有机互补逻辑电路; 绝缘层方面, 寻找高介电常数并可低温制备的聚合物绝缘层, 并对其优化, 提高器件性能; 柔性衬底方面, 高透明、柔韧性好、耐高温、耐腐蚀、低成本的柔性衬底是我们需要的. 另外, 开发与柔性衬底相兼容的低温、低成本的溶液加工技术是产业化的必然要求。

随着柔性 OFETs 电学性能和机械柔性的不断提高, 加工技术的不断成熟, 柔性 OFETs 作为半导体技术的核心器件定会对我们的生活产生重要的影响. 在不久的将来, 柔性 OFETs 必将替代传统的电子器件, 在柔性显示、柔性传感器、柔性集成电路等领域大展宏图。

- [1] Zhang F, Funahashi M, Tamaoki N 2010 *Org. Electron.* **11** 363
- [2] Kawasaki N, Kalb W L, Mathis T, Kaji Y, Mitsuhashi R, Okamoto H, Sugawara Y, Fujiwara A, Kubozono Y, Batlogg B 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 113305
- [3] Park Y, Han K S, Lee B H, Cho S, Lee K H, Im S, Sung M M 2011 *Org. Electron.* **12** 348
- [4] Backlund T G, Sandberg H G O, Osterbacka R, Stubb H, Makela T, Jussila S 2005 *Synthetic. Met.* **148** 87
- [5] Gburek B, Wagner V 2010 *Org. Electron.* **11** 814
- [6] Uno M, Nakayama K, Soeda J, Hirose Y, Miwa K, Uemura T, Nakao A, Takimiya K, Takeya J 2011 *Adv. Mater.* **23** 3047
- [7] Lim H, Bae C M, Kim Y K, Park C H, Cho W J, Ha C S 2003 *Synthetic. Met.* **135** 49
- [8] Lim H, Cho W J, Ha C S, Ando S, Kim Y K, Park C H, Lee K 2002 *Adv. Mater.* **14** 1275
- [9] Roberts M E, Mannsfeld S C B, Stoltenberg R M, Bao Z 2009 *Org. Electron.* **10** 377
- [10] Tan H S, Mathews N, Cahyadi T, Zhu F R, Mhaisalkar S G 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 263303
- [11] Dimitrakopoulos C D, Purushothaman S, Kymissis J, Callegari A, Shaw J M 1999 *Science* **283** 822
- [12] Chang M F, Lee P T, McAlister S P, Chin A 2009 *IEEE Electron Dev. Lett.* **30** 133
- [13] Tan H S, Cahyadi T, Wang Z B, Lohani A, Tsakadze Z, Zhang S, Zhu F R, Mhaisalkar S G 2008 *IEEE Electron Dev. Lett.* **29** 698
- [14] Briseno A L, Tseng R J, Ling M M, Falcao E H L, Yang Y, Wudl F, Bao Z 2006 *Adv. Mater.* **18** 2320
- [15] Sung C F, Kekuda D, Chu L F, Lee Y Z, Chen F C, Wu M C, Chu C W 2009 *Adv. Mater.* **21** 4845
- [16] Chang J W, Wang C G, Huang C Y, Tsai T D, Guo T F, Wen T C 2011 *Adv. Mater.* **23** 4077
- [17] Kim B J, Jang H, Lee S K, Hong B H, Ahn J H, Cho J H 2010 *Nano Lett.* **10** 3464
- [18] Wang C H, Hsieh C Y, Hwang J C 2011 *Adv. Mater.* **23** 1630
- [19] Hwang D K, Fuentes-Hernandez C, Kim J B, Potscavage Jr W J, Kipelen B 2011 *Org. Electron.* **12** 1108
- [20] Zirkl M, Haase A, Fian A, Schon H, Sommer C, Jakopic G, Leising G, Stadlober B, Graz I, Gaar N, Schwodiauer R, Bauer-Gogonea S, Bauer S 2007 *Adv. Mater.* **19** 2241
- [21] Sidler K, Cvetkovic N V, Savu V, Tsamados D, Ionescu A M, Brugger J 2010 *Sensor. Actua. A-Phys.* **162** 155
- [22] Lee W H, Park J, Sim S H, Jo S B, Kim K S, Hong B H, Cho K 2011 *Adv. Mater.* **23** 1752
- [23] Liu P, Wu Y L, Li Y N, Ong B S, Zhu S P 2006 *J. Am. Chem. Soc.* **128** 4554
- [24] Graz I M, Lacour S P 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 243305
- [25] Zhao Y H, Dong G F, Wang L D, Qiu Y 2007 *Chin. Phys. Lett.* **24** 1664
- [26] Zyung T, Kim S H, Chu H Y, Lee J H, Lim S C, Lee J I, Oh J 2005 *Proc. IEEE* **93** 1265
- [27] Liu Z, Oh J H, Roberts M E, Wei P, Paul B C, Okajima M, Nishi Y, Bao Z 2009 *Appl. Phys. Lett.* **94** 203301
- [28] Liu Y R, Wang Z X, Yu J L, Xu H H 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8566 (in Chinese) [刘玉荣, 王智欣, 虞佳乐, 徐海红 2009 物理学报 **58** 8566]
- [29] Sekitani T, Zschieschang U, Klauk H, Someya T 2010 *Nat. Mater.* **9** 1015
- [30] Zschieschang U, Ante F, Yamamoto T, Takimiya K, Kuwabara H, Ikeda M, Sekitani T, Someya T, Kern K, Klauk H 2010 *Adv. Mater.* **22** 982
- [31] Fujisaki Y, Nakajima Y, Kumaki D, Yamamoto T, Tokito S, Kono T, Nishida J I, Yamashita Y 2010 *Appl. Phys. Lett.* **97** 133303
- [32] Bradley K, Gabriel J C P, Gruner G 2003 *Nano Lett.* **3** 1353
- [33] Hur S H, Park O O, Rogers J A 2005 *Appl. Phys. Lett.* **86** 243502
- [34] Cao Q, Hur S H, Zhu Z T, Sun Y G, Wang C J, Meitl M A, Shim M, Rogers J A 2006 *Adv. Mater.* **18** 304
- [35] Jiang C X, Yang X Y, Zhao K, Wu X M, Yang L Y, Cheng X M, Wei J, Yin S G 2011 *Chin. Phys. Lett.* **28** 127203
- [36] Sugauma K, Watanabe S, Gotou T, Ueno K 2011 *Appl. Phys. Express* **4** 021603
- [37] Huang J, Hines D R, Jung B J, Bronsgeest M S, Tunnell A, Ballarotto

- V, Katz H E, Fuhrer M S, Williams E D, Cumings J 2011 *Org. Electron.* **12** 1471
- [38] Nomura K, Ohta H, Takagi A, Kamiya T, Hirano M, Hosono H 2004 *Nature* **432** 488
- [39] Song K, Noh J, Jun T, Jung Y, Kang H Y, Moon J 2010 *Adv. Mater.* **22** 4308
- [40] Lee W H, Lim J A, Kwak D, Cho J H, Lee H S, Choi H H, Cho K 2009 *Adv. Mater.* **21** 4243
- [41] Seol Y G, Lee N E, Park S H, Bae J Y 2008 *Org. Electron.* **9** 413
- [42] Smith J, Hamilton R, McCulloch I, Heeney M, Anthony J E, Bradley D D C, Anthopoulos T D 2009 *Synthetic. Met.* **159** 2365
- [43] Sun Q J, Xu Z, Zhao S L, Zhang F J, Gao L Y 2011 *Chin. Phys. B* **20** 017306
- [44] Chen Y, Xu Y, Zhao K, Wan X, Deng J, Yan W 2010 *Nano Res.* **3** 714
- [45] Minemawari H, Yamada T, Matsui H, Tsutsumi J, Haas S, Chiba R, Kumai R, Hasegawa T 2011 *Nature* **475** 364
- [46] Baldo M, Deutsch M, Burrows P, Gossenberger H, Gerstenberg M, Ban V, Forrest S 1998 *Adv. Mater.* **10** 1505
- [47] Shtein M, Gossenberger H F, Benziger J B, Forrest S R 2001 *J. Appl. Phys.* **89** 1470
- [48] Crone B, Dodabalapur A, Lin Y Y, Filas R W, Bao Z, LaDuca A, Sarpeshkar R, Katz H E, Li W 2000 *Nature* **403** 521
- [49] Lovinger A J, Rothberg L J 1996 *J. Mater. Res.* **11** 1581
- [50] Xu G F, Bao Z N, Groves J T 1998 *Abstr. Paper Am. Chem. Soc.* **216** U802
- [51] Minari T, Liu C, Kano M, Tsukagoshi K 2012 *Adv. Mater.* **24** 299
- [52] Dimitrakopoulos C D, Mascaro D J 2001 *IBM J. Res. Dev.* **45** 11
- [53] Yin Z, Huang Y, Bu N, Wang X, Xiong Y 2010 *Chin. Sci. Bull.* **55** 3383
- [54] Paloheimo J, Kuivalainen P, Stubb H, Vuorimaa E, Ylilahti P 1990 *Appl. Phys. Lett.* **56** 1157
- [55] Yoon B, Ham D Y, Yarimaga O, An H, Lee C W, Kim J M 2011 *Adv. Mater.* **23** 5492
- [56] Shekar B C, Lee J Y, Rhee S W 2004 *Korean J. Chem. Eng.* **21** 267
- [57] Forrest S R 2004 *Nature* **428** 911
- [58] Seol Y G, Noh H Y, Lee S S, Ahn J H, Lee N E 2008 *Appl. Phys. Lett.* **93** 013305
- [59] Wang H, Li C H, Wang L J, Wang H B, Yan D H 2010 *Chin. Phys. Lett.* **27** 28502
- [60] Kodaira T, Hirabayashi S, Komatsu Y, Miyasaka M, Kawai H, Nebashi S, Inoue S, Shimoda T 2008 *J. Soc. Inf. Display* **16** 107
- [61] Gleskova H, Wagner S, Soboyejo W, Suo Z 2002 *J. Appl. Phys.* **92** 6224
- [62] Han L, Song K, Mandlik P, Wagner S 2010 *Appl. Phys. Lett.* **96** 042111
- [63] Sekitani T, Iba S, Kato Y, Noguchi Y, Someya T, Sakurai T 2005 *Appl. Phys. Lett.* **87** 173502
- [64] Jedaa A, Halik M 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 103309
- [65] Qiu Y, Hu Y C, Dong G F, Wang L D, Xie J F, Ma Y N 2003 *Chin. Sci. Bull.* **48** 1554
- [66] Gelinck G, Heremans P, Nomoto K, Anthopoulos T D 2010 *Adv. Mater.* **22** 3778
- [67] Gelinck G H, Huitema H E A, van Veenendaal E, Cantatore E, Schrijnemakers L, van der Putten J, Geuns T C T, Beenhakkers M, Giesbers J B, Huisman B H, Meijer E J, Benito E M, Touwslager F J, Marsman A W, van Rens B J E, de Leeuw D M 2004 *Nat. Mater.* **3** 106
- [68] Sekitani T, Noguchi Y, Hata K, Fukushima T, Aida T, Someya T 2008 *Science* **321** 1468
- [69] Zhou L, Wanga A, Wu S C, Sun J, Park S, Jackson T N 2006 *Appl. Phys. Lett.* **88** 083502
- [70] Mannsfeld S C B, Tee B C K, Stoltenberg R M, Chen C V H H, Barman S, Muir B V O, Sokolov A N, Reese C, Bao Z 2010 *Nat. Mater.* **9** 859
- [71] Baude P F, Ender D A, Haase M A, Kelley T W, Muires D V, Theiss S D 2003 *Appl. Phys. Lett.* **82** 3964
- [72] Klauk H, Zschieschang U, Pflaum J, Halik M 2007 *Nature* **445** 745
- [73] Yan H, Zheng Y, Blache R, Newman C, Lu S, Woerle J, Facchetti A 2008 *Adv. Mater.* **20** 3393
- [74] Huitema H E A, Gelinck G H, van der Putten J, Kuijk K E, Hart C M, Cantatore E, Herwig P T, van Breemen A, de Leeuw D M 2001 *Nature* **414** 599
- [75] Rogers J A, Bao Z 2002 *J. Polym. Sci. Pol. Chem.* **40** 3327
- [76] Rogers J A, Bao Z, Baldwin K, Dodabalapur A, Crone B, Raju V R, Kuck V, Katz H, Amundson K, Ewing J, Drazic P 2001 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **98** 4835
- [77] Jain K, Klosner M, Zemel M, Raghunandan S 2005 *Proc. IEEE* **93** 1500
- [78] Chen Y, Au J, Kazlas P, Ritenour A, Gates H, McCreary M 2003 *Nature* **423** 136
- [79] Someya T, Kawaguchi H, Sakurai T 2004 *2004 IEEE International Solid-State Circuits Conference, Digest of Technical Papers* pp288–289
- [80] Someya T, Sekitani T, Iba S, Kato Y, Kawaguchi H, Sakurai T 2004 *Proc. Natl. Acad. Sci. USA* **101** 9966
- [81] Someya T, Pal B, Huang J, Katz H E 2008 *MRS Bull.* **33** 690
- [82] Subramanian V, Frechet J M J, Chang P C, Huang D C, Lee J B, Molesa S E, Murphy A R, Redinger D R 2005 *Proc. IEEE* **93** 1330
- [83] Drury C J, Mutsaers C M J, Hart C M, Matters M, de Leeuw D M 1998 *Appl. Phys. Lett.* **73** 108
- [84] Kane M G, Campi J, Hammond M S, Cuomo F P, Greening B, Sheraw C D, Nichols J A, Gundlach D J, Huang J R, Kuo C C, Jia L, Klauk H, Jackson T N 2000 *IEEE Electron Dev. Lett.* **21** 534

The progress of flexible organic field-effect transistors*

Dong Jing¹⁾²⁾ Chai Yu-Hua^{1)†} Zhao Yue-Zhi²⁾ Shi Wei-Wei²⁾ Guo Yu-Xiu¹⁾²⁾
Yi Ming-Dong²⁾ Xie Ling-Hai²⁾ Huang Wei^{2)‡}

1) (School of Electrical and Information, Northeast Agricultural University, Haerbin 150030, China)

2) (Institute of Advanced Materials, Nanjing University of Posts and Telecommunications, Nanjing 210046, China)

(Received 2 July 2012; revised manuscript received 15 September 2012)

Abstract

Flexible organic field-effect transistors (OFETs) have revealed wide prospect in their applications to the flexible display, flexible sensor, flexible radio frequency tag and flexible integrated circuit due to their advantages such as foldability, light weight of device and low-cost fabrication process. On the basis of the introduction of advancement in the study of flexible OFETs in this paper, a broad overview about device structures of flexible OFETs, substrate materials, gate insulating layer materials, active layer materials and electrode materials used for flexible OFETs is given, the fabricating process of flexible OFETs is explained, and the effect of bending pattern on the performance of flexible OFETs is discussed. Finally, the application areas of flexible OFETs are summarized and prospected.

Keywords: flexible, transistors, organic/polymer, solution-process

PACS: 73.40.Qv, 74.25.F-, 77.55.F-, 81.05.Fb

DOI: 10.7498/aps.62.047301

* Project supported by the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2009CB930600, 2012CB933301, 2012CB723402), the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61204095, 21144004), the National Science Foundation for Post-Doctoral Scientists of China (Grant No. 20070410883), the Key Project of Chinese Ministry of Education, China (Grant No. 20113223120003), the Natural Science Foundation of Jiangsu Province, China (Grant Nos. BK2012431, BK2011761, SBK201122680), the Jiangsu Planned Projects for Postdoctoral Research, China (Grant No. BH-Z07233), the Natural Science Foundation of the Education Committee of Jiangsu Province, China (Grant No. 11KJB510017), and the Scientific Research Starting Foundation of Nanjing University of Posts and Telecommunications, China (Grant Nos. NY211022, NY210002, NY210030).

† Corresponding author. E-mail: yhchai@163.com

‡ Corresponding author. E-mail: iamwhuang@njupt.edu.cn