

基于有机场效应晶体管的非挥发性存储器研究进展

王宏^{①②}, 彭应全^{①*}, 姬濯宇^②, 刘明^②, 商立伟^②, 刘兴华^②

① 兰州大学物理科学与技术学院, 兰州 730000;

② 中国科学院微电子研究所纳米加工与新器件集成技术实验室, 北京 100029

* 联系人, E-mail: yqpeng@lzu.edu.cn

2010-04-23 收稿, 2010-10-11 接受

国家重点基础研究发展计划(2011CB808404, 2009CB939703)和国家自然科学基金(10974074, 90607022, 60676001, 60676008, 60825403)资助项目

摘要 由于易于集成, 基于有机场效应晶体管的非挥发性存储器件在低成本、轻便、柔性存储领域具有广泛的应用前景. 本文综述了浮栅型、有机电介体型和铁电型以及其他一些特殊结构的有机场效应晶体管存储器的最新研究进展, 并对目前所存在的主要问题进行了讨论.

关键词

有机非挥发性存储器
有机场效应晶体管
浮栅
铁电材料
有机电介体

与传统的无机半导体器件相比, 基于有机半导体材料的器件具有成本低、可实现大面积加工、可与柔性基底集成等优点, 因此有机电子学近年来引起广泛关注^[1-4]. 有机半导体器件如有机场效应晶体管^[5-7]、有机发光二极管^[8]、有机太阳能电池^[9]、化学和光传感器^[10,11]等在柔性电子领域具有广泛的应用前景. 有机非挥发性存储器是有机电子学的另外一个重要的研究和应用领域. 近年来有机非挥发性存储器取得长足的进展, 多种基于有机小分子或聚合物的存储器件被报道, 如有机电双稳态器件^[12-16]、有机无机混合存储器件^[17]、基于有机场效应晶体管的存储器件等^[18]. 与其他几种结构的存储器件相比, 基于有机场效应晶体管的存储器具有可用单个晶体管实现、非破坏性读取、易于和有机电路集成等优点, 因此基于有机场效应晶体管结构的存储器被认为是最具有应用前景的一类有机存储器件^[19]. 最近, Se-kitani 等人^[20]在 125 μm 厚的柔性衬底上集成了 26 \times 26 的基于有机浮栅晶体管的存储阵列, 器件的擦写次数超过 1000 次. Guo 等人^[21]利用基于并五苯和酞菁铜的有机场效应晶体管实现了多值存储, 他们用聚

苯乙烯(PS)或者聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)修饰二氧化硅介质层, 并借助光编程过程, 成功实现了有机场效应晶体管的 8 值存储, 器件存储信息的保持时间超过 250 h. 这是有机场效应晶体管存储器里程碑式的进展. 目前, 有机场效应晶体管存储器的性能与硅基器件或者其他类型的一些有机存储器件相比还有一定差距, 但它显示出了巨大的应用前景. 本文简单综述了浮栅型、有机电介体型和铁电型以及其他一些特殊结构的有机场效应晶体管存储器的最新研究进展.

1 评价有机场效应晶体管存储器件的性能参数

有机存储器件一般用操作电压、存储窗口、写入擦除速度、记忆保持时间以及耐受性等性能参数来表征. 有机场效应晶体管存储器的理想操作电压小于 10 V, 当操作电压过大时电路的功耗很大, 而且器件本身的可靠性会降低. 存储窗口用来表征不同的信息存储状态之间的区分程度, 对于有机场效应晶体管存储器, 存储窗口是指不同存储状态下阈值电压

的差别, 存储窗口的大小会影响判读数据的准确性, 如果存储窗口太小, 将可能无法准确地判读数据. 写入擦除速度是指器件成功写入或者擦除所需要的时间, 目前有机场效应晶体管存储器的写入擦除时间仍在微秒到毫秒量级. 记忆保持时间是存储器的另外一个重要的性能指标, 最佳的记忆时间是在室温下达到 10 年以上, 但现在大部分有机存储器器件并无法达到, 记忆时间越长越好, 万一无法到达时仍可利用电路设计的方式来改进. 耐受性是指反复擦写的次数, 对于非挥发性存储器而言, 其所需的次数在 10^6 左右, 这对于有机存储器来说目前还是一个挑战.

2 浮栅型有机场效应晶体管存储器

浮栅晶体管是具有两个栅电极的场效应晶体管, 其中控制栅电极与传统的场效应晶体管栅电极相同, 而浮栅嵌入到栅介质层中从而构成浮栅晶体管. 当栅介质的厚度够薄时, 在控制栅电极和源极之间加一个大的编程电压, 电荷就会通过量子隧穿效应或热电子发射效应注入到浮栅上, 电荷存储在浮栅上就会改变晶体管的阈值电压, 因此, 浮栅上存储和不存储电荷时阈值电压会有差别. 这种阈值电压的差别可通过测量一定栅电压下的漏端电流而确定. 由于浮栅嵌入到栅介质层中, 存储在浮栅上的电荷在没有外加电压作用下会保持下去, 因此浮栅型晶体管可作为非挥发性存储器应用. 要想擦除存储在浮栅上的信息, 在控制栅上加一个相反的电压, 电荷就会通过栅介质释放. 基于硅材料的浮栅型晶体管存储器具有很高的存储密度, 已经实现了实际应用^[22]. 浮栅型有机场效应晶体管存储器由于其低成本, 可

大面积在柔性基底上加工等优点, 具有广泛的应用前景. 图 1 所示为浮栅型有机场效应晶体管的制备流程, 图 2 为有机场效应晶体管存储器的一些基本性能参数. 2006 年, Liu 等人^[23]利用自组装的方法在栅介质中掺入一层金纳米颗粒, 实现了有机场效应晶体管存储器. 他们以重掺杂的 n 型硅为栅电极, 热氧化的 100 nm 二氧化硅为栅介质, 在氧化硅表面通过自组装技术生长一层金纳米颗粒, 再旋涂一层聚乙烯苯酚(PVP)作为隧穿层, 然后旋涂一层聚(3-己基噻吩)(P3HT)作为半导体层, 从而制备出了浮栅型的有机场效应晶体管存储器, 器件的开关比达到 1500, 但保持时间只有 200 s 左右. 最近, Kim 等人^[24]采用 PMMA 为隧穿层, 在 80 V 的编程电压下获得了 34 V 的存储窗口, 器件的保持时间可以达到一年. 以上这些工作都是采用有机无机混合的栅介质, 我们研究小组^[25]最近报道了全有机的浮栅型有机场效应管存储器. 我们以掺杂金纳米晶的聚酰亚胺(PI)为栅介质层, 酞菁铜为半导体层, 获得存储窗口达到 20 V

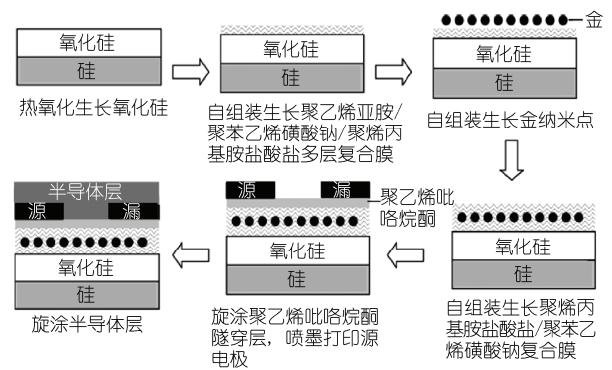


图 1 浮栅型有机场效应晶体管存储器制备流程示意图^[23]

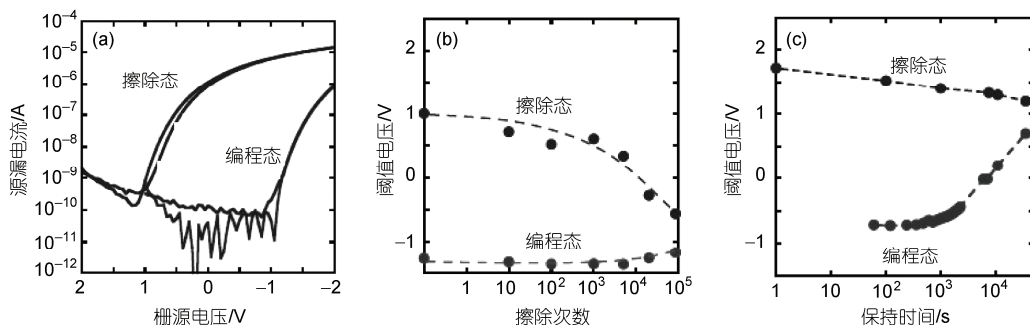


图 2 有机场效应晶体管存储器的主要性能参数^[20]

(a) 写入和擦除后器件的转移曲线; (b) 器件的耐受性; (c) 器件的记忆保持时间

的存储器件. 目前报道的大部分有机场效应晶体管存储器的擦写电压很高, 这与低功耗的集成电路设计要求不兼容. 采用高介电常数的栅介质是降低器件擦写电压一个很好的途径. Chang 等人^[26]采用 20 nm HfLaO, 20 nm HfON, 和 6 nm HfO₂ 分别作为阻挡介质层, 电荷俘获层和隧穿介质层制备了低电压的有机场效应晶体管存储器. 器件的编程电压为 12 V, 擦写速度为 1/100 ms, 初始的存储窗口为 2.4 V, 器件放置 48 h 后仍有 0.78 V 的存储窗口. 最近, Sekitani 等人^[20]报道了写入擦除电压仅为 -6~+3 V 的基于柔性基底的浮栅型有机场效应晶体管存储器. 他们采用的控制栅和浮栅都为 20 nm 的铝, 阻挡和隧穿介质层均为 2 nm 的单层烷基磷酸修饰的 4 nm 氧化铝 (AlO_x), 其中 AlO_x 采用等离子氧化技术制备. 这是目前报道的性能最好的浮栅型有机场效应晶体管存储器件之一. 顶栅结构的有机场效应晶体管由于有机半导体层被衬底和绝缘层以及电极包裹, 器件在空气中非常稳定, 相比于其他结构具有很大的优势. 因此, 顶栅结构的器件在存储器领域的应用也被报道. 图 3 所示为顶栅结构的浮栅型有机场效应晶体管存储器结构示意图. 最近, Wang 等人^[27]采用顶栅结构的器件, 以 Nylon 6 为阻挡和隧穿介质层, Ag 或者 CaF₂ 纳米点为浮栅, 获得了性能很好的存储器件. Baeg 等人^[18]采用顶栅结构, 以 PVP 为阻挡层, PS 为隧穿层, 在阻挡层和隧穿层中加入一层金纳米晶, 获得了性能良好的有机场效应晶体管存储器. 因此, 顶栅结构的浮栅型有机场效应晶体管存储器是实现有机存储器件的一个很好的选择.

3 有机电介体型场效应晶体管存储器

最近, 在以非铁电性质的聚合物作为栅介质的有机场效应晶体管中发现了回滞效应, 同时, 在这些聚合物的表面可以形成高质量的有机半导体薄膜, 获

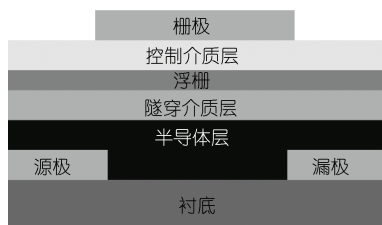


图3 顶栅结构的浮栅型有机场效应晶体管存储器结构示意图

得高性能的有机场效应晶体管. 因此, 开发基于有机电介体型场效应晶体管存储器具有很重要的意义. 图 4(a)所示为有机电介体型场效应晶体管存储器件的结构示意图, 图 4(b)所示为几种常见的聚合物电介体的化学结构示意图. 在 2004 年, Singh 等人^[28]首先报道了基于电介体的有机场效应晶体管存储器. 他们采用聚乙烯醇(PVA)为栅介质, 富勒烯为有机半导体材料, 制备了存储窗口达到 14 V, 源漏电流调制达到 10⁴, 保持时间为 15 h 的存储器件. 这种沟道电流开关效应是由于有机电介质中电荷存储和释放的结果. 最近, 有多种基于有机电介体的场效应晶体管存储器被报道, 其中大部分是利用有机聚合物修饰二氧化硅作为栅介质来实现存储效果. 这种存储器件可能的工作机理如图 5 所示, 在电场作用下, 有机半导体和介质层表面产生热载流子, 这些载流子在横向电场的作用下注入到聚合物/二氧化硅界面, 在相反的电场作用下, 这些载流子又可以从聚合物/二氧化硅界面回到有机半导体表面. 因此, 场效应晶体管的阈值电压会出现明显的可逆的变化^[19, 29]. Baeg 等人^[19]以聚- α -甲基苯乙烯(PaMS)修饰二氧化硅作为栅介质, 实现了有机电介体型场效应晶体管存储器. 他们的器件存储窗口达到 90 V, 开关比达到

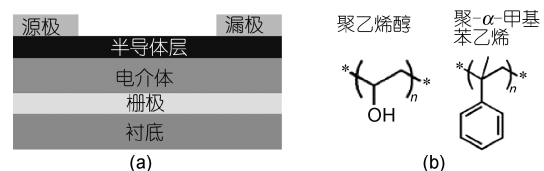


图4 有机电介体型场效应晶体管存储器的器件结构及常用电介体材料

(a) 有机电介体型场效应晶体管存储器件的结构示意图; (b) 几种常见的聚合物电介体的化学结构示意图

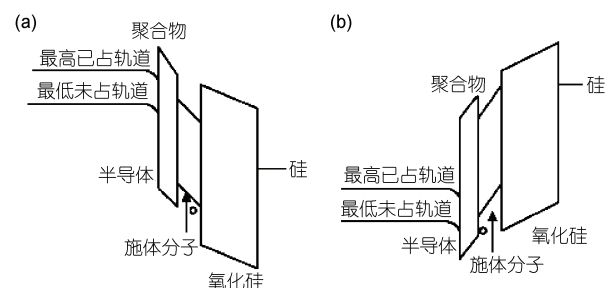


图5 有机电介体型场效应晶体管存储器件的能带示意图^[29]
(a) 写入模式, (b) 擦除模式

10^5 , 保持时间超过 100 h. 但是只有在特定的有机聚合物如(P α MS)修饰二氧化硅作为介质时, 有机场效应晶体管才表现出存储效应. 最近, Wu 等人^[29]以施体/聚合物混合体为缓冲层, 实现了回滞曲线非常陡直的高性能有机场效应晶体管存储器. 他们采用的器件结构为以施体/聚合物混合体修饰二氧化硅为栅介质的单晶体管结构. 其中施体分子为四硫富瓦烯(TTF)、二茂铁(FcH)等有机分子, 聚合物为聚氧乙烯(PEO), 聚碳酸酯(PC), PS, PMMA 等材料, 如图 6(a)和(b)所示. 他们制备的器件具有非常陡直的回滞曲线, 开关比达到 10^4 , 保持时间超过 24 h. 同时他们以交联的聚合物为栅介质, 以施体/聚合物混合体为缓冲层, 实现了操作电压小于 2 V 的性能很好的有机场效应晶体管存储器, 如图 6(c)所示.

在存储单元中, 降低成本最有效的方法就是减小器件尺寸和实现多值存储. 目前, 在这两个方面都

取得了长足的进展^[30,31]. 随着尺寸缩小受到光刻技术的限制, 多值存储引起人们的广泛关注. 最近, Guo 等人^[21]利用有机场效应晶体管实现了多值存储. 他们以 PS 或 PMMA 修饰的二氧化硅为栅介质, 以并五苯或酞菁铜为半导体材料, 借助于光编程过程, 成功实现了有机场效应晶体管的多值存储. 图 7(a)所示为在 $1 \text{ mW} \cdot \text{cm}^{-2}$ 的光照下基于并五苯的有机场效应晶体管的转移特性曲线, 其中栅介质为 PS 修饰的二氧化硅. 器件的阈值电压与初始栅电压有很大的依赖关系, 当正向的栅电压从 20 V 改变到 80 V 时, 器件的阈值电压有 55 V 的改变. 同样, 借助于光作用, 可以对器件进行擦除. 他们报道的器件记忆保持时间超过 250 h, 是目前报道的有机存储器件最好的结果之一, 如图 7(b)所示. 通过更加深入的研究和优化, 多值存储的有机场效应晶体管可以在低成本柔性系统中获得广泛应用.

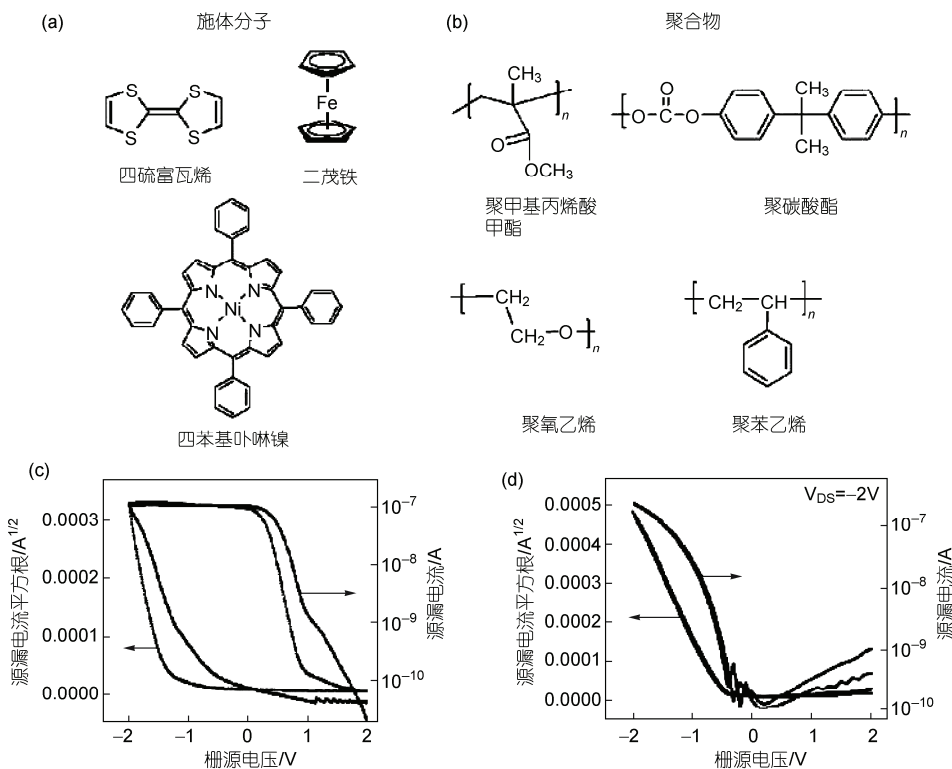


图 6 施体/聚合物混合体为缓冲层的有机电介体场效应晶体管存储器^[29]

(a) 用于有机晶体管存储器的有机施体分子和(b) 有机聚合物的化学结构式; (c) 以交联的聚合物为栅介质, 以施体/聚合物混合体为缓冲层的场效应晶体管存储器件的转移曲线; (d) 没有施体/聚合物混合体缓冲层的场效应晶体管转移曲线

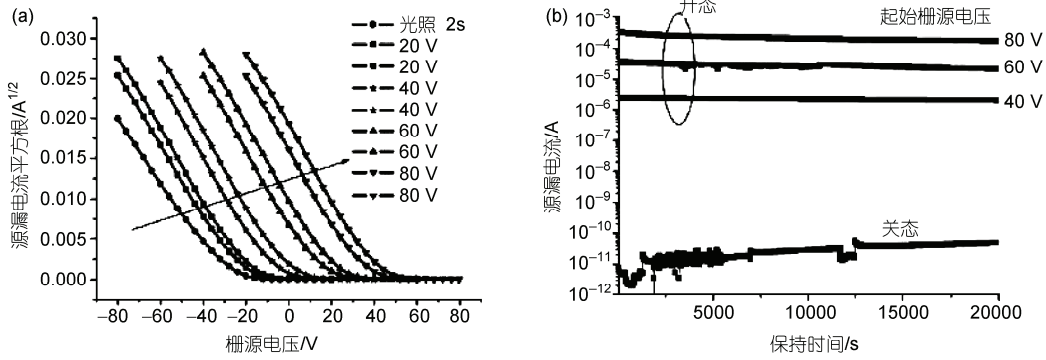


图7 有机场效应晶体管的多值存储特性^[21]

(a) 在光照条件下的有机场效应晶体管转移曲线($V_{GS, Start}=20\text{ V}, 40\text{ V}, 60\text{ V}, 80\text{ V}, V_{DS}=-60\text{ V}$); (b) 有机场效应晶体管存储器源漏电流的保持特性(借助光编程后去掉光照所测)

4 铁电型有机场效应晶体管存储器

目前报道的基于有机场效应晶体管的存储器大部分是利用铁电聚合物的铁电效应来实现数据存储^[32~45]。在数十年前,基于无极半导体的铁电型存储器就被报道,目前它们的性能已经达到实际应用的要求^[46,47]。它的存储原理是利用铁电晶体材料的自发极化和在外界电场的作用下改变极化方向的特性来进行数据存储。图8所示为在不同电压下的铁电薄膜电容的回滞曲线。图9(a)给出了铁电型有机场效应晶体管存储器件的结构示意图,图9(b)所示为一些常用的有机铁电材料的化学结构示意图。在2001年, Velu 等人^[32]首先报道了铁电型的有机场效应晶体管存储器,他们以铁电材料锆钛酸铅(PZT)为栅介质,噻吩为半导体材料。尽管它们的器件性能不好,但是他们的报道使得铁电型有机场效应晶体管存储器受

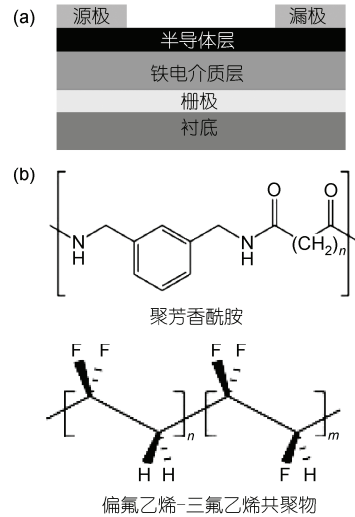


图9 铁电型有机场效应晶体管存储器件的器件结构及常用铁电材料

(a) 铁电型有机场效应晶体管存储器件的结构示意图; (b) 几种常见的有机铁电材料的化学结构示意图

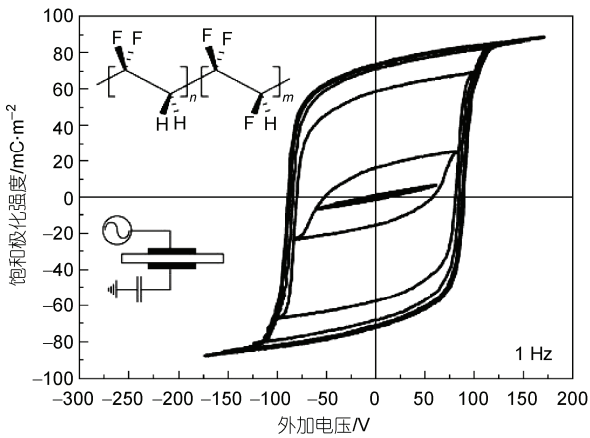


图8 铁电聚合物 P(VDF/TrFE)薄膜电容的回滞曲线^[34]

到广泛关注。2004年, Schroeder 等人^[33]以类铁电材料聚芳香酰胺(MXD6)为栅介质,制备的有机场效应晶体管存储器在2.5 V栅压下开关比达到200,保持时间超过3 h,这是第一次在有机场效应管存储器件中采用铁电性质的有机聚合物为栅介质的报道。2005年, Naber 等人^[34,35]以铁电材料偏氟乙烯-三氟乙烯共聚物(P(VDF/TrFE))为栅介质,聚(2-甲氧基, 5-(2-乙基-己氧基)-对苯乙炔(MEH-PPV))为半导体材料,制备的有机场效应晶体管存储器开关比达到 10^4 ,擦写时间为0.3 ms,保持时间超过一个星期^[34,35]。目前,大部分铁电型的有机场效应晶体管存储器都采用 MXD6

或 P(VDF/TrFE)为铁电介质^[36~45]. 但是基于铁电介质的有机场效应晶体管迁移率比较低(小于 $\sim 10^{-2} \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$), 同时栅介质的漏电流也比较大, 这限制了他们的实际应用. 最近, Lee 等人^[39]以并五苯为半导体材料, P(VDF/TrFE)为栅介质, 通过对 P(VDF/TrFE)介质层在真空中 160°C 条件下热处理 2 h, 然后在 N₂ 中冷却, 器件的迁移率达到了 $0.18 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, 在 $\pm 13 \text{ V}$ 的擦写电压下, 存储窗口达到 2.5~8 V, 同时器件的保持性能也非常好, 这是目前报道的迁移率最高的铁电型有机场效应晶体管存储器^[39]. 近年来, 铁电型有机场效应晶体管存储器取得了很大的进展, 但要想获得实际应用, 性能还需要有很大的提高.

5 几种特殊结构的有机场效应晶体管存储器

除了上述几种有机场效应晶体管存储器外, 还有一些其他类型的有机场效应晶体管存储器被报道. 在 2007 年, Scharnberg 等人^[48]提出了一种可以调节阈值电压的有机场效应晶体管, 他们的器件类似于双栅结构的有机场效应晶体管, 如图 10(a)所示, 在器件上旋涂一层具有电介质性质的聚四氟乙烯作为保护层, 通过对聚四氟乙烯进行电晕放电处理, 使其具有可以存储电荷的电介质性质, 从而可以对器件的阈值电压进行调控. 在沉积一层聚四氟乙烯保护层后, 器件的阈值电压可以从 +13.1 V 改变到 -2.3 V. 这种结构的器件作为存储器的优点是对电介质保护层进行编程后无需外加额外的电压, 存储的信息就可以永久保存. Guo 等人^[49]通过在半导体层酞菁铜中掺杂一层氧化钼(MoO₃)从而实现了有机场效应晶体管的非挥发性存储效应, 图 10(b)所示为他们的器件结构示意图. 他们制备的器件存储窗口达到 40 V, 开关比为 10³, 同时具有非常优越的保持特性. 这种

器件可能的存储机理为在比较大的正向栅压作用下, MoO₃ 会产生空穴电子对, 由于酞菁铜的电子传输能力很弱, 因此电子就会存储在 MoO₃ 表面, 当外加栅压去掉以后, 存储在 MoO₃ 表面的电子就会起到类似于浮栅的作用, 感应出相应的空穴, 从而改变场效应晶体管的阈值电压. 在 2008 年, Novembre 等人^[50]报道了一种新型的有机场效应晶体管存储器, 他们以二氧化硅为栅介质, 并五苯为半导体层, 在二氧化硅层和并五苯层之间采用自组装技术生长了一层金纳米颗粒, 器件表现出了非挥发性存储特性, 存储窗口为 22 V, 开关比为 3×10^4 . 最近, Mabrook 等人^[51]采用了相同的器件结构, 用 PMMA 代替二氧化硅作为栅介质, 如图 10(c)所示, 器件获得了很好的存储性能. 这类器件的存储机理为当在栅极施加负电压时, 空穴会从并五苯注入到金纳米点中, 实现对存储器件的编程过程, 相反的, 当栅极施加正电压时, 空穴会从金纳米点回到并五苯层中, 从而实现对器件的擦除过程. 以上这几种类型的有机场效应晶体管存储器为有机存储器的应用提供了更多的选择.

6 有机场效应晶体管存储器的应用与前景展望

有机场效应晶体管存储器作为射频标签, 智能卡等电路的存储单元具有光明的应用前景. 基于非挥发性存储器的有机存储卡是有机射频标签系统中最重要单元之一. 目前, 基于有机场效应晶体管的射频标签已可以在 13.56 MHz 的频率下稳定工作. 在 2009 年, Sekitani 等人^[20]把有机场效应晶体管存储器应用在了压力传感领域, 这开辟了有机场效应晶体管存储器又一个新的应用领域. 他们报道的传感器由三层功能单元叠加而成, 第一层为在聚邻苯二甲

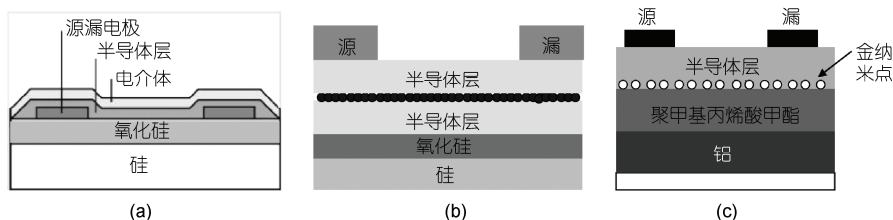


图 10 几种特殊结构的有机场效应晶体管存储器结构示意图

(a) 有电介质保护层的有机场效应晶体管存储器件的结构示意图; (b) 功能层中掺杂氧化钼的有机场效应晶体管结构示意图; (c) 金纳米点-并五苯有机场效应晶体管存储器件结构示意图

酸酯(PEN)衬底上制备的 26×26 的有机场效应晶体管存储阵列(如图 11(a)所示), 第二层为压力传感橡胶板, 第三层为制备了铜电极的 PEN 薄片. 图 11(b)所示为各个单元集成到一起之前的照片. 对传感器系统的铜电极施加电压, 它就会向有机场效应晶体管存储器阵列提供工作电压, 压力传感器上的信息就会存储到存储器阵列中. 图 11(c)所示为压力传感器系统工作的一个示范, 分别给传感器系统上放一卷透明胶带或者两个手指, 在 20 min 和 12 h 后分别读取存储的信息, 存储在有机场效应晶体管存储阵列中的信息损失很小.

自从有机场效应晶体管存储器被报道以来, 各方面的性能都取得了巨大进展, 目前, 有机场效应晶体管存储器的操作电压可以达到 2 V 以下, 擦写次数超过 10^3 , 保持时间达到几百个小时. 有机场效应晶体管存储器件与其他器件单元集成进行应用也被报道, 它在低成本、大面积加工、柔性系统中显示出了广泛的应用前景, 但是仍然面临着不少的挑战, 例如: 擦写读取电压依然较高, 数据保持时间离实际应用的要求仍有很大差距, 器件的工作机理不是非常明确. 明确的工作机理对于我们设计需要的器件具有非常重要的意义. 有机场效应晶体管存储器已经

展现出美好的应用前景, 我们相信, 通过研究人员的努力, 目前遇到的困难一定会被解决, 在有机电子领域会得到广泛应用.

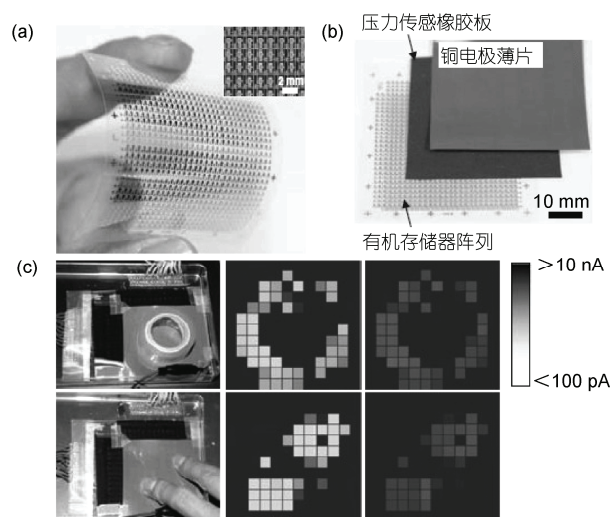


图 11 基于有机场效应晶体管存储器的压力传感器^[20]

(a) 基于浮栅型有机场效应晶体管存储器的 26×26 存储阵列; (b) 压力传感器系统各部分的照片, 下层为在聚邻苯二甲酸酯(PEN)衬底上制备的 26×26 的有机场效应晶体管存储阵列, 中间层为压力传感橡胶板, 上层为制备了铜电极的 PEN 薄片; (c) 压力传感器系统工作示范

参考文献

- 1 Di C A, Yu G, Liu Y Q, et al. High-performance organic field-effect transistors: Molecular design, device fabrication, and physical properties. *J Phys Chem B*, 2007, 111: 14083—14096
- 2 Klauk H, Zschieschang U, Pflaum J, et al. Ultralow-power organic complementary circuits. *Nature*, 2007, 445: 745—748
- 3 Moran I W, Briseno A L, Loser S, et al. Device fabrication by easy soft imprint nano-lithography. *Chem Mater*, 2008, 20: 4595—4608
- 4 Zschieschang U, Klauk H, Halik H, et al. Flexible organic circuits with printed gate electrodes. *Adv Mater*, 2003, 15: 1147—1152
- 5 Wang H, Ji Z Y, Liu M, et al. Advances in organic field-effect transistors and integrated circuits. *Sci China Ser E-Tech Sci*, 2009, 52: 3105—3116
- 6 Ribierre J C, Watanabe S, Matsumoto M, et al. Majority carrier type conversion in solution-processed organic transistors and flexible complementary logic circuits. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 083303—083305
- 7 Zhang X H, Kippelen B. Low-voltage C_{60} organic field-effect transistors with high mobility and low contact resistance. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 133305—133307
- 8 Ju S H, Li J H, Liu J, et al. Transparent active matrix organic light-emitting diode displays driven by nanowire transistor Circuitry. *Nano Lett*, 2008, 8: 997—1004
- 9 Feng Y, Ju X, Feng W, et al. Organic solar cells using few-walled carbon nanotubes electrode controlled by the balance between sheet resistance and the transparency. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 123303—123305
- 10 Roberts M, Mannsfeld S, Stoltenberg R, et al. Flexible, plastic transistor-based chemical sensors. *Org Electron*, 2009, 10: 377—383
- 11 Hamilton M, Kanicki J. Organic polymer thin-film transistor photosensors. *IEEE J Select Topics Quantum Electron*, 2004, 10: 840—848
- 12 Lee P, Chang T, Chen S. Tuning of the electrical characteristics of organic bistable devices by varying the deposition rate of Alq_3 thin film. *Org Electron*, 2008, 9: 916—920
- 13 Lin J, Ma D. Realization of negative differential resistance and switching devices based on copper phthalocyanine by the control of evaporation rate. *Org Electron*, 2009, 10: 275—279

- 14 Liu X, Ji Z, Tu D, et al. Organic nonpolar nonvolatile resistive switching in poly(3, 4-ethylene-dioxythiophene): polystyrenesulfonate thin film. *Org Electron*, 2009, 10: 1191—1194
- 15 Tsujioka T, Shimizu M, Ishihara E. Organic bistable memory characteristics with a photochromic diarylethene layer. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 213506—213508
- 16 Yook K, Jeon S, Joo C, et al. Organic bistable memory device using MoO₃ nanocrystal as a charge trapping center. *Org Electron*, 2009, 10: 48—52
- 17 Möller S, Perlov C, Jackson W, et al. A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory. *Nature*, 2003, 426: 166—168
- 18 Baeg K, Noh Y, Sirringhaus H, et al. Controllable shifts in threshold voltage of top-gate polymer field-effect transistors for applications in organic nano floating gate memory. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 224—230
- 19 Baeg K, Noh Y, Ghim J, et al. Organic nonvolatile memory based on pentacene field-effect transistors using a polymeric gate electret. *Adv Mater*, 2006, 18: 3179—3183
- 20 Sekitani T, Yokota T, Zschieschang U, et al. Organic nonvolatile memory transistors for flexible sensor arrays. *Science*, 2009, 326: 1516—1519
- 21 Guo Y, Di C, Ye S, et al. Multibit storage of organic thin-film field-effect transistors. *Adv Mater*, 2009, 21: 1954—1959
- 22 Bez R, Camerlenghi E, Modelli A, et al. Introduction to flash memory. *Proc IEEE*, 2003, 91: 489—502
- 23 Liu Z, Xue F, Su Y, et al. Memory effect of a polymer thin-film transistor with self-assembled gold nanoparticles in the gate dielectric. *IEEE Trans Nanotechnol*, 2006, 5: 379—384
- 24 Kim S, Park Y, Lyu S, et al. Nonvolatile nano-floating gate memory devices based on pentacene semiconductors and organic tunneling insulator layers. *Appl Phys Lett*, 2010, 96: 033302—033304
- 25 Zhen L, Guan W, Shang L, et al. Organic thin-film transistor memory with gold nanocrystals embedded in polyimide gate dielectric. *J Phys D: Appl Phys*, 2008, 41: 135111—135115
- 26 Chang M, Lee P, McAlister S, et al. A flexible organic pentacene nonvolatile memory based on high-k dielectric layers. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 233302—233304
- 27 Wang W, Shi J, Ma D. Organic thin-film transistor memory with nanoparticle floating gate. *IEEE Trans Electron Devices*, 2009, 56: 1036—1039
- 28 Singh T, Marjanovic N, Matt G, et al. Nonvolatile organic field-effect transistor memory element with a polymeric gate electret. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 5409—5411
- 29 Wu W, Zhang H, Wang Y, et al. High performance organic transistor memory elements with steep flanks of hysteresis. *Adv Funct Mater*, 2008, 18: 2593—2601
- 30 Lai S. Flash memories: Where we were and where we are going. *IEDM Tech Dig*, 1998, 971—973
- 31 Eitan B, Eitan P, Bloom I. NROM: A novel localized trapping, 2-bit nonvolatile memory cell. *IEEE Electron Device Lett*, 2000, 21: 543—545
- 32 Velu G, Legrand C, Tharaud O. Low driving voltages and memory effect in organic thin-film transistors with a ferroelectric gate insulator. *Appl Phys Lett*, 2001, 79: 659—661
- 33 Schroeder R, Majewski L, Grell M. All organic permanent memory transistor using an amorphous, spin-cast ferroelectric-like gate insulator. *Adv Mater*, 2004, 16: 633—636
- 34 Naber R, Tanase C, Blom P, et al. High-performance solution-processed polymer ferroelectric field-effect transistors. *Nat Mater*, 2005, 4: 243—248
- 35 Naber R, Blom P, Gelinck G, et al. An organic field-effect transistor with programmable polarity. *Adv Mater*, 2005, 17: 2692—2695
- 36 Gelinck G, Marsman A, Touwslager F, et al. All-polymer ferroelectric transistors. *Appl Phys Lett*, 2005, 87: 092903—092905
- 37 Stadlober B, Zirkel M, Beutl M, et al. High-mobility pentacene organic field-effect transistors with a high-dielectric-constant fluorinated polymer film gate dielectric. *Appl Phys Lett*, 2005, 86: 242902—242904
- 38 Nguyen C, Lee P, Ng N, et al. Anomalous polarization switching in organic ferroelectric field effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 042909—042911
- 39 Lee K, Lee G, Lee K, et al. Flexible low voltage nonvolatile memory transistors with pentacene channel and ferroelectric polymer. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 093304—093306
- 40 Yildirim F, Ucurum C, Schlieve R, et al. Spin-cast composite gate insulation for low driving voltages and memory effect in organic field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 083501—083503
- 41 Müller K, Henkel K, Paloumpa I, et al. Organic field effect transistors with ferroelectric hysteresis. *Thin Solid Films*, 2007, 515: 7683—7687
- 42 Schroeder R, Majewski L, Voigt M, et al. Memory performance and retention of an all organic ferroelectric-like memory transistor. *IEEE Electron Device Lett*, 2005, 26: 69—71

- 43 Tamura R, Lim E, Yoshita S, et al. Analysis of threshold voltage shift of pentacene field effect transistor with ferroelectric gate insulator as a Maxwell–Wagner effect. *Thin Solid Films*, 2008, 516: 2753—2757
- 44 Nguyen C, Lee P, Mhaisalkar S. Investigation of turn-on voltage shift in organic ferroelectric transistor with high polarity gate dielectric. *Org Electron*, 2007, 8: 415—422
- 45 Nguyen C, Mhaisalkar S, Ma J, et al. Enhanced organic ferroelectric field effect transistor characteristics with strained poly(Vinylidene fluoride–trifluoroethylene) dielectric. *Org Electron*, 2008, 9: 1087—1092
- 46 Xiong S, Sakai S, Ishii K, et al. Memory properties of a ferroelectric gate field-effect transistor with an adjoining metalferroelectric-metal assistance cell. *J Appl Phys*, 2003, 94: 2559—2562
- 47 Aizawa K, Park B, Kawashima Y, et al. Impact of HfO₂ buffer layers on data retention characteristics of ferroelectric-gate field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2004, 85: 3199—3201
- 48 Scharnberg M, Zaporozhchenko V, Adelung R, et al. Tuning the threshold voltage of organic field-effect transistors by an electret encapsulating layer. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 013501—013503
- 49 Guo Y, Liu Y, Di C, et al. Tuning the threshold voltage by inserting a thin molybdenum oxide layer into organic field-effect transistors. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 263502—263504
- 50 Novembre C, Guérin D, Lmimouni K, et al. Gold nanoparticle-pentacene memory transistors. *Appl Phys Lett*, 2008, 92: 103314—103316
- 51 Mabrook M, Yun Y, Pearson C, et al. A pentacene-based organic thin film memory transistor. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 173302—173304