【光电工程 / Optoelectronic Engineering】

多编程手段的浮栅晶体管非易失性存储器

温嘉敏, 闫成元, 孙振华

深圳大学物理与光电工程学院, 广东深圳 518060

摘要: 随着信息时代的发展, 新型晶体管基非易失性存储器体现出越来越重要的应用价值, 获得了广泛的研究关注. 本研究将具有 I 型能带结构的硒化锌/硫化锌核壳量子点集成到石墨烯晶体管中, 充当晶体管中的电荷捕获层和隧穿中心, 制备具有多重编程手段的非易失性存储器. 该量子点可以实现电子和空穴的双重存储, 通过正负脉冲栅压可以改变该器件的沟道电导状态, 实现信息存储. 表征实验结果表明, 该器件可实现 60 V 的超大存储窗口, 在 10 h 的测试范围内表现出良好稳定性, 在多次擦写过程中表现出良好的耐用性. 该器件还可以将光照作为辅助编程手段, 使用紫外光对写入的电荷进行擦除, 实现较好的电写-光擦功能. 研究结果表明, 核壳量子点是一种良好的电荷存储介质, 在晶体管基非易失性存储器中具有巨大应用潜力, 对基于半导体核壳量子点的晶体管基存储器进行光电赋能, 有望实现光电编程.

关键词: 纳米材料; 核壳量子点; 光电晶体管; 非易失性存储器; 光电存储器; 石墨烯晶体管; 高介电常数材料

中图分类号: TN36; O47

文献标志码: A

doi: 10.3724/SP.J.1249.2021.03232

Floating gate transistor non-volatile memory with multi-programming method

WEN Jiamin, YAN Chengyuan, and SUN Zhenhua

College of Physics and Optoelectronic Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, Guangdong Province, P. R. China

Abstract: With the development of the information age, novel transistor-based non-volatile memories have demonstrated more and more application potential, and thus attract extensive attention and investigation. In this paper, the zinc selenide/zinc sulfide core-shell quantum dots (ZnSe@ZnS QDs) with type-I energy band structure, which act as charge-trapping and tunneling centers, are integrated into a graphene transistor, rendering a non-volatile memory with multiple programming methods. The quantum dots are able to storage both electrons and holes so that the channel conductance of the graphene transistor can be adjusted by either positive or negative pulse gate voltage for information storage. A battery of characterizations show that the device has a large storage windows of 60 V, a good retention performance in 10 h test range and an excellent endurance performance in the process of multiple writing and erasing. In addition, this device can also use light illumination as an auxiliary programming method, where ultraviolet light is used to erase the written charge, demonstrating a benign electrically writing-optically erasing function. This work shows that the core-shell QDs are good charge storage media and have great application potential in transistor-based non-volatile memories. At the same time, due to the excellent optoelectronic properties of semiconductor

Received: 2020-03-28; Accepted: 2020-04-30

Foundation: Natural Science Foundation of Guangdong Province (2019A1515011367, 2016A030310055)

Corresponding author: Lecture SUN Zhenhua. E-mail: szh@szu.edu.cn

Citation: WEN Jiamin, YAN Chengyuan, SUN Zhenhua. Floating gate transistor non-volatile memory with multi-programming method [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2021, 38(3): 232-238. (in Chinese)

QDs, applying QDs in memories can empower the device with optoelectronic programming functionality.

Key words: nano-materials; core-shell quantum dots; optoelectronic transistors; nonvolatile memories; optoelectronic memories; graphene transistors; high- k dielectric

数字时代和网络技术的发展使数据存储成为日常生活中必不可少的重要环节, 存储器作为信息存储的媒介更是存储技术中的核心部分. 根据存储器断电后的数据保存情况, 存储器可以分为易失性存储器和非易失性存储器^[1-2], 其中, 非易失性存储由于具备断电后数据不丢失的特点, 已成为电子产品中必不可少的重要组成部分^[3-5]. KAHNG 等^[6]首次提出使用浮栅晶体管制备非易失性存储器的想法. 基于浮栅晶体管结构的非易失性存储器由于具备结构紧凑、性能稳定、易于集成及与金属氧化物半导体工艺相兼容等突出优点, 逐渐发展成为存储市场的主流产品^[7-8]. 一般的浮栅晶体管存储器是在普通晶体管的栅绝缘层上方插入悬浮栅层和较薄的绝缘隧穿层形成, 其中, 悬浮栅负责电荷的存储; 绝缘隧穿层负责电荷的保持^[5, 9-12]. 存储器工作时, 通过栅极脉冲电压使沟道中的载流子进入或拉出悬浮栅, 从而实现数据的写入或擦除^[13]. 大多数基于栅脉冲电压写入的浮栅存储器都对正电压或负电压有效, 操作方式较为单一^[14-19]. 此外, 这种基于电压的编程方式在一定程度上会对器件造成损害, 进而影响器件的可靠性和稳定性.

本研究以 I 型核壳硒化锌/硫化锌 (ZnSe@ZnS) 量子点 (quantum dots, QDs) 作为电荷捕获层和隧穿中心, 以石墨烯作为载流子传导层, 制备无隧穿层结构的浮栅晶体管非易失性存储器. 该存储器具备负电压写入/正电压擦除和正电压写入/负电压擦除两种电编程模式. 利用 ZnSe@ZnS QDs 的光敏特性, 将光照作为辅助编程手段, 避免电压操作对器件的损害, 有效提高器件的可靠性和编程操作性, 实现了编程手段多样性和多级存储特性.

1 器件制备及材料表征

1.1 器件制备

本研究采用底栅底接触结构制备多编程手段的浮栅晶体管存储器, 结构如图 1 (a). 其中, S 代表源极; D 代表漏极. 使用有机高介电常数材料聚偏氟乙烯-三氟乙烯-氯氟乙烯 [P(VDF-TrFE-CFE)] 作为器件的栅绝缘层, 可以提高器件的存储开关比和电荷存储密度, 厚度为 50 nm 的 SiO₂ 阻挡层可

以避免器件漏电和纵向电荷泄露问题. 器件制备过程如下.

1) 将表面生长有厚度为 50 nm SiO₂ 层的硅片依次用丙酮、无水乙醇及去离子水清洗干净, 随后用等离子清洗机处理 2 min;

2) 在氮气手套箱中将溶解均匀的质量浓度为 30 mg/mL 的 P(VDF-TrFE-CFE) 溶液旋涂至硅片衬底上, 旋涂速度为 3 000 r/min, 旋涂时间为 60 s, 得到有机高介电常数的栅绝缘层;

3) 利用氮气手套箱的加热台对该薄膜进行热处理. 工艺为先 60 °C 加热 4 h, 再 120 °C 加热 2 h;

4) 将质量浓度为 2 mg/mL 的 ZnSe@ZnS QDs 溶液均匀旋涂至上述衬底表面, 以 2 000 r/min 旋涂 40 s, 随后将样品进行温度为 60 °C、时间为 30 min 的退火处理.

5) 利用热蒸发设备进行源漏电极蒸镀, 金电极高度约为 100 nm, 沟道的长和宽分别 200 μm 和 2 mm;

6) 通过湿法转移工艺将覆盖有聚甲基丙烯酸甲酯 (polymethyl methacrylate, PMMA) 保护层的石墨烯转移至上述衬底上;

7) 用镊子划开各个器件, 用金刚笔划出底部的 Si 电极, 随后将样品在手套箱中以 60 °C 加热 30 min 后, 进行电学特性测试.

图1 ZnSe@ZnS QDs 器件结构及能带图
Fig.1 (Color online) Structure and electronic band diagram of ZnSe@ZnS QDs device

1.2 材料的表征

器件中使用的石墨烯购自深圳六碳科技有限公司, 为铜箔上化学气相沉积 (chemical vapor deposition, CVD) 法生长的单层石墨烯. P(VDF-TrFE-CFE) 聚合物购自法国 PIEZOTECH 公司. ZnSe@ZnS 核壳量子点甲苯溶液购自苏州星烁纳米科技有

限公司. 根据如图 1 (b) 的器件核心结构能带关系, 在 ZnSe@ZnS 核壳量子点中, 由于 ZnS 的导带高于 ZnSe 的导带, ZnS 的价带低于 ZnSe 的价带, 即二者形成 I 型能带结构, 因此, ZnS 可以将电荷束缚在 ZnSe 核中. 电荷在栅压下转移通过 ZnS 层被内层 ZnSe 俘获. 通过高分辨透射电子显微镜 (high resolution transmission electron microscopy, HRTEM) 观察 ZnSe@ZnS QDs 的晶格结构, 结果如图 2 (a). 可见, 量子点直径约为 6 nm, ZnS 层厚度约为 1.8 nm, ZnSe 和 ZnS 具有不同的 (111) 晶面方向, 表明量子点具备核壳结构. 图 2 (b) 为量子点的荧光光谱和光吸收谱. 可见, ZnSe@ZnS QDs 的光致发光 (photoluminescence, PL) 峰位置约在 415 nm 处, 对应能量约为 2.99 eV, 与 ZnSe 的带隙基本一致.

通过 X 射线衍射 (X-ray diffraction, XRD) 仪对有机高介电常数 P(VDF-TrFE-CFE) 薄膜的结晶情况进行表征, 结果如图 2 (c). 经过退火处理后的薄膜在 18.45° 处出现一个明显的狭窄峰, 该峰是由晶体的 $\{110, 200\}$ 反射而形成^[20-22]. 该峰具有较强的高度和较窄的半峰宽, 表明此时介电层薄膜具有较好的结晶度.

利用拉曼光谱仪对实验中转移的石墨烯进行表征, 图 2 (d) 是在波长 514.5 nm 激光激发下, Si/SiO₂ 衬底上石墨烯的拉曼图谱. 可见, 在 1582 cm^{-1} 和 2700 cm^{-1} 处表现出明显的 G 峰和 2D 峰, 为典型的单层石墨烯拉曼图, 表明石墨烯具有良好

的结晶度.

通过原子力显微镜 (atomic force microscope, AFM) 表征有机高介电常数 P(VDF-TrFE-CFE) 薄膜的表面形貌, 结果如图 3 (a). 可见, 经过退火结晶处理后的 P(VDF-TrFE-CFE) 介电层, 其薄膜表面形貌呈现棒状, 均匀的介电层表面可以有效避免浮栅层电荷泄露和器件失效.

对 ZnSe@ZnS QDs 在 P(VDF-TrFE-CFE) 介电层上的表面形貌也进行 AFM 表征, 结果如图 3 (b). 可见, 旋涂了量子点后的薄膜表面呈点状分布, 未观察到明显的量子点团聚现象, 表明 ZnSe@ZnS QDs 被均匀地分散到介电层上, 同时 P(VDF-TrFE-CFE) 介电层的棒状形貌被完全遮盖, 显示出量子点较好的成膜性和连续性. 量子点层表面具有一定的粗糙度, 但由于石墨烯层的柔韧性, 该粗糙度本质上不会影响载流子在石墨烯层中的传导. 此外, 由于量子点表面的油酸基团具有一定绝缘性, 量子点层的连续性不会导致其电荷传导, 可认为载流子传导仅在石墨烯中进行^[23].

图 2 ZnSe/ZnS 量子点、P(VDF-TrFE-CFE) 薄膜及石墨烯的材料表征结果

Fig. 2 (Color online) Characterizations of ZnSe/ZnS QDs, P(VDF-TrFE-CFE) film and graphene

图 3 P(VDF-TrFE-CFE) 薄膜和 ZnSe@ZnS QDs/P(VDF-TrFE-CFE) 薄膜的 AFM 表征结果

Fig. 3 (Color online) AFM images of P(VDF-TrFE-CFE) film and ZnSe@ZnS QDs/P(VDF-TrFE-CFE) film

2 存储器基本特性表征

图4(a)为无量子点空白对照组器件的转移特性曲线, 描述源漏电流 I_{DS} 随栅极电压 V_{GS} 的变化特性, 测试在源漏电压 $V_{DS} = 0.1 \text{ V}$ 下进行. 可见, 该曲线基本没有表现出迟滞效应. 图4(b)为基于 ZnSe@ZnS QDs 的浮栅存储器 (ZnSe@ZnS QDs 器件) 的转移特性曲线. 对于基于石墨烯载流子传导层的存储器来说, 通常用狄拉克点的变化量表示存储窗口 (ΔV_{th}). 由图4(b)可见, 在栅电压的作用下, 量子点浮栅层对沟道中的载流子产生了特定影响. 随着栅压扫描范围的增大, 曲线的迟滞效应增大, 器件存储窗口也随之增大, 大的存储窗口意味着器件具备多阶存储的能力.

图4 转移特性曲线

Fig. 4 (Color online) Transfer characteristic curves

3 存储器的电编程手段

由于 ZnSe@ZnS QDs 器件采用双极性的石墨烯载流子传导层, 浮栅层的 ZnSe@ZnS QDs 既能捕获

电子也能捕获空穴, 因此, 该存储器具备两种电编程手段, 即负栅压写入/正栅压擦除 (负写正擦)、正栅压写入/负栅压擦除 (正写负擦).

3.1 负栅压写入/正栅压擦除

图5为 ZnSe@ZnS QDs 器件在负写正擦模式下的存储特性. 图5(a)为器件经过高度为 -50 V 及宽度为 0.1 s 的栅压脉冲写入操作后的数据保持性测试结果, 通过对器件进行长达 11 h 的监控后, 发现器件的数据保持率在 80% 以上, 具备稳定的信息保持能力.

图5(b)为负写正擦模式下的 ZnSe@ZnS QDs 器件的循环特性表征结果. 其中, 擦、写脉冲宽度均为 0.1 s ; 脉冲电压如图中上半部分所示. 负栅压写入时, 石墨烯中的空穴在电场作用下进入 ZnSe 层, 从而实现数据写入; 量子点内的电子也会在电场力的作用下反向隧穿进入石墨烯. 利用正栅压擦除时, 被 ZnSe 层俘获的空穴在电场作用下被拉出

图5 负写正擦模式下 ZnSe@ZnS QDs 的存储特性表征
Fig. 5 (Color online) Storage characteristics of ZnSe@ZnS QDs in negative writing and positive erasing modes

量子点, 恢复到石墨烯中, 从而达到擦除的效果.

3.2 正栅压写入/负栅压擦除

图 6 为 ZnSe@ZnS QDs 器件在正写负擦模式下的存储特性. 图 6 (a) 为器件在经过高度和宽度分别为 50 V 和 0.1 s 的栅压脉冲写入操作后的数据保持性测试, 与负栅压写入情况类似, 正栅压写入时器件也具备稳定的信息保持能力. 图 6 (b) 为正写负擦模式下, ZnSe@ZnS QDs 器件的循环特性表征结果, 脉冲宽度为 0.1 s. 使用正栅压脉冲写入时, 石墨烯中的电子在电场作用下注入到 ZnSe 层中; 在负栅压脉冲擦除过程中, 被量子点俘获的电子在反向电压作用下被释放, 回到石墨烯中, 从而使 I_{DS} 恢复至初始状态.

图 6 正写负擦模式下 ZnSe@ZnS QDs 的存储特性表征
Fig. 6 (Color online) Storage characteristics of ZnSe@ZnS QDs in positive writing and negative erasing modes

4 存储器的电光编程手段

由于实验中使用的 ZnSe@ZnS QDs 属于光敏半导体材料, 在特定激光照射下, 量子点表面产生的

光生载流子能够转移到载流子传导层中, 从而引起器件阈值电压的改变. 利用这一特性, 可将光照作为 ZnSe@ZnS QDs 存储器的辅助编程手段.

图 7 (a) 为零背景光条件下, ZnSe@ZnS QDs 器件在负栅压脉冲 (高度为 -50 V、宽度为 0.1 s) 写入后, 利用波长为 261 nm 激光照射 30 ~ 40 s 进行擦除的实验结果. 一般来讲, 光编程存储器中的光电转换过程既可能存在于浮栅层, 也可能存在于半导体层中^[24-25]. 本研究中作为载流子传导层的石墨烯对 261 nm 的光照具有一定吸收能力^[26], 但是考虑到石墨烯的光生载流子寿命较短^[27], 并根据图 1 (b) 中的相对能带关系, 石墨烯中的光生载流子 (电子或空穴), 在无外加偏压下, 均较难越过能带势垒进入量子点中, 因此, 认为光照主要作用于半导体量子点上. 当负电压写入时, 石墨烯中的空穴在电场作用下注入量子点内, 并被核层和壳层的势垒高度所束缚; 对器件进行光照时, 光敏量子点和石墨烯界面处会产生高能量的光生激子, 其中, 光生空穴转移到石墨烯中, 使沟道电流恢复至

图 7 ZnSe@ZnS QDs 器件的光擦除测试

Fig. 7 Optical erasing tests of ZnSe@ZnS QDs device

初始状态, 实现数据的擦除。

图7(b)为零背景光条件下, 对 ZnSe@ZnS QDs 器件进行正写光擦的实验结果。使用高度为 40 V、宽度为 0.1 s 正栅压脉冲写入, 波长为 261 nm 激光照射 30~40 s 擦除。在写入时, 石墨烯中的电子被量子点捕获; 光照时量子点产生的光生电子转移到石墨烯半导体中, 使转移特性曲线向负偏移, 实现擦除操作。以上结果表明, 光照可以作为器件的擦除手段之一, 相较于电擦除方式, 光照擦除可以避免大电压操作时对器件产生的破坏和损耗。使用高能量激光照射, 还有利于实现低功耗存储器的制备。

5 光电存储器的多次循环擦写特性

实验对 ZnSe@ZnS QDs 器件的耐久性进行测试。图8(a)和(b)分别为器件在电写(脉冲高度和宽度分别为 50 V 和 0.1 s)电擦(脉冲高度和宽度分别为 -20 V 和 0.1 s)和电写(脉冲高度和宽度分别

为 50 V 和 0.1 s)光擦(261 nm 激光照射 30~40 s)工作模式下的循环特性分析。可见, 在两种编程方式下, 器件在每次循环操作过程中均表现出稳定的读擦写状态, 具备一定耐久性和可靠性。

结 语

本研究设计了以光敏核壳量子点 ZnSe@ZnS QDs 作为电荷捕获层和隧穿中心、双极性石墨烯作为载流子传导层的浮栅晶体管非易失性存储器。利用量子点的光敏特性, 该存储器在负写正擦、正写负擦、负写光擦和正写光擦 4 种编程模式下均表现出稳定的循环擦写特性, 实现非易失性存储器的多编程手段和光可复位操作。

在此研究基础上, 通过改进存储器结构可进一步提高器件性能, 如使用 MoS₂、IGZO 等开关比更高的半导体层材料, 可提高器件的存储开关比与编程精确性; 进一步降低有机介电层厚度可以提高器件的存储密度; 采用顶删的器件结构可以保护浮栅层, 提高器件的可靠性等。所取得研究结果可为后续多编程手段的浮栅晶体管非易失性存储器提供借鉴及研究方向。

基金项目: 广东省自然科学基金资助项目 (2019A1515011367, 2016A030310055)

作者简介: 温嘉敏 (1994—), 深圳大学硕士研究生。研究方向: 薄膜光电晶体管。E-mail: 706833447@qq.com

引 文: 温嘉敏, 闫成员, 孙振华. 多编程手段的浮栅晶体管非易失性存储器[J]. 深圳大学学报理工版, 2021, 38(3): 232-238.

参考文献 / References:

- [1] ZHOU Li, MAO Jingyu, REN Yi, et al. Recent advances of flexible data storage devices based on organic nanoscaled materials [J]. Small, 2018, 14(10): 1703126.
- [2] LING Qidan, LIAW D, ZHU Chunxiang, et al. Polymer electronic memories: materials, devices and mechanisms [J]. Progress in Polymer Science, 2008, 33(10): 917-978.
- [3] 刘利芳. 高密度电荷俘获型非挥发存储器研究[D]. 北京: 清华大学, 2015.
LIU Lifang. Research on high-density charge trapping non-volatile memories [D]. Beijing: Tsinghua University, 2015. (in Chinese)
- [4] MEENA J S, SZE S M, CHAND U, et al. Overview of emerging nonvolatile memory technologies [J]. Nanoscale Research Letters, 2014, 9(1): 526.

<http://journal.szu.edu.cn>

(a) 电写/电擦的循环擦写测试

(b) 电写/光擦的循环擦写测试

图8 不同模式下器件的循环擦写测试

Fig. 8 Endurance tests of ZnSe@ZnS QDs device in different operation modes

- [5] CHEN A. A review of emerging non-volatile memory (NVM) technologies and applications [J]. Solid-State Electronics, 2016, 125: 25-38.
- [6] KAHNG D, SZE S M. A floating gate and its application to memory devices [J]. Bell System Technical Journal, 1967, 46(6): 1288-1295.
- [7] HU Daobing, WANG Xiumei, CHEN Huipeng, et al. High performance flexible nonvolatile memory based on vertical organic thin film transistor [J]. Advanced Functional Materials, 2017, 27(41): 1703541.
- [8] HWANG S K, BAE I, CHO S M, et al. High performance multi-level non-volatile polymer memory with solution-blended ferroelectric polymer/high- k insulators for low voltage operation [J]. Advanced Functional Materials, 2013, 23(44): 5484-5493.
- [9] FROHMAN B D. Memory behavior in a floating-gate avalanche-injection MOS (FAMOS) structure [J]. Applied Physics Letters, 1971, 18(8): 332-334.
- [10] LEE J, KIM Y, KWON J, et al. Tunable memory characteristics of nanostructured, nonvolatile charge trap memory devices based on a binary mixture of metal nanoparticles as a charge trapping layer [J]. Advanced Materials, 2009, 21(2): 178-183.
- [11] HAN Suting, ZHOU Ye, XU Zongxiang, et al. Microcontact printing of ultrahigh density gold nanoparticle monolayer for flexible flash memories [J]. Advanced Materials, 2012, 24(26): 3556-3561.
- [12] 韩素婷, 付晶晶, 周 晔. 基于功能材料的非易失性存储器[J]. 深圳大学学报理工版, 2019, 36(3): 221-229.
- HAN Suting, FU Jingjing, ZHOU Ye. Nonvolatile memory based on functional materials [J]. Journal of Shenzhen University Science and Engineering, 2019, 36(3): 221-229. (in Chinese)
- [13] HAN Suting, ZHOU Ye, ROY V A L. Towards the development of flexible non-volatile memories [J]. Advanced Materials, 2013, 25(38): 5425-5449.
- [14] CHIU M Y, CHEN C C, SHEU J T, et al. An optical programming/electrical erasing memory device: organic thin film transistors incorporating core/shell CdSe@ZnSe quantum dots and poly (3-hexylthiophene) [J]. Organic Electronic, 2009, 10(5): 769-774.
- [15] ZHOU Ye, HAN Suting, YAN Yan, et al. Solution processed molecular floating gate for flexible flash memories [J]. Scientific Reports, 2013, 3(1): 3093.
- [16] SUN K H, INSUBG B, RICHARD H K, et al. Flexible non-volatile ferroelectric polymer memory with gate-controlled multilevel operation [J]. Advanced Materials, 2012, 24(44): 5910-5914.
- [17] CHEN Xiaoli, PAN Jingyi, FU Jingjing, et al. Polyoxometalates-modulated reduced graphene oxide flash memory with ambipolar trapping as bidirectional artificial synapse [J]. Advanced Electronic Materials, 2018, 4(12): 1800444.
- [18] KANNAN V, KIM H S, PARK H C. High speed switching in quantum dot Ti-TiO_x nonvolatile memory device [J]. Electronic Materials Letters, 2016, 12(2): 323-327.
- [19] HU Daobing, ZHANG Guocheng, YANG Huihuang, et al. High-performance nonvolatile organic transistor memory using quantum dots-based floating gate [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2017, 64(9): 3816-3821.
- [20] CHEN Xiangzhong, CHEN Xin, GUO Xu, et al. Ordered arrays of a defect-modified ferroelectric polymer for non-volatile memory with minimized energy consumption [J]. Nanoscale, 2014, 6(22): 13945-13951.
- [21] FANG Fei, YANG Wei, YANG Wen. Mechanical flexible and electric fatigue resistant behavior of relaxor ferroelectric terpolymer [J]. Journal of Applied Physics, 2009, 106(3): 34106.
- [22] BAO Huimin, SONG Jiaofan, ZHANG Juan, et al. Phase transitions and ferroelectric relaxor behavior in P(VDF-TrFE-CFE) terpolymers [J]. Macromolecules, 2007, 40(7): 2371.
- [23] SUN Z, GARY S, THOMAS P, et al. Reduced carrier recombination in PbS-CuInS₂ quantum dot solar cells [J]. Scientific Reports, 2015, 5: 10626.
- [24] LING Haifeng, LIN Jinyi, YI Mingdong, et al. Synergistic effects of self-doped nanostructures as charge trapping elements in organic field effect transistor memory [J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2016, 8: 18969-18977.
- [25] YI Mingdong, XIE Ming, SHAO Yaqing, et al. Light programmable/erasable organic field-effect transistor ambipolar memory devices based on the pentacene/PVK active layer [J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3: 5220-5225.
- [26] BAE S, KIM H, LEE Y, et al. Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes [J]. Nature Nanotechnology, 2010, 5: 574-578.
- [27] SUN Zhenhua, CHANG Haixing. Graphene and graphene-like two-dimensional materials in photodetection: mechanisms and methodology [J]. ACS Nano, 2014, 8(5): 4133-4156.

【中文责编: 方 圆; 英文责编: 溯 心】