

文章编号: 1000-7032(2018)03-0356-07

掺杂富勒烯衍生物阻变存储器存储性质的调控研究

李静玉¹, 林青¹, 章婷^{1*}, 邓朝勇^{2*}

(1. 北京理工大学光电学院, 北京 100081; 2. 贵州大学大数据与信息工程学院, 贵州 贵阳 550025)

摘要: 以 PS(聚苯乙烯)和 PC₆₁BM([6,6]-苯基-C61-丁酸甲酯)为活性材料,通过加入导电性不同的缓冲层材料,优化了阻变存储器件的开关比。制备时分别以金纳米粒子(Au-NPs)、聚3,4-乙烯二氧噻吩/聚苯乙烯磺酸盐(PEDOT:PSS)、聚乙烯吡咯烷酮(PVP)材料作为器件的缓冲层,得到了开关比可调、存储机制不同的电双稳态器件。测试结果表明缓冲层材料导电性是影响器件开关比的关键因素,当缓冲层材料从绝缘性材料 PVP 换为导电性良好的金纳米粒子,其开关比从 10² 逐渐增大到 10⁵。另外对于不同结构的存储机制,通过电流电压拟合曲线和能带原理图分析,发现缓冲层材料的导电性质及能级匹配是影响器件存储机制的重要因素。

关键词: 有机; 电双稳; 存储器; 缓冲层

中图分类号: TP394.1; TH691.9 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3788/fgxb20183903.0356

Bistable Memory Devices Based on Fullerenes Derivative Doped Resistive Memory Properties

LI Jing-yu¹, LIN Qing¹, ZHANG Ting^{1*}, DENG Chao-yong^{2*}

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China;

2. College of Big Data and Information Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

* Corresponding Authors, E-mail: zhangting@bit.edu.cn; cydeng@gzu.edu.cn

Abstract: The memory devices based on composites of PS and PC₆₁BM were investigated. By adjusting the buffer layer materials, we optimized the ON/OFF current ratio of the device. With Au-NPs, PEDOT:PSS, PVP as a buffer layer at the context layer of the active layer respectively, the adjustable ON/OFF current ratio, different memory mechanism of electrical bistable device is obtained. The measurement results show that the buffer layer conductivity plays an important role in ON/OFF current ratio. When the buffer layer material changed PVP to Au-NPs, the ON/OFF current ratio increased gradually from 10² to 10⁵. In addition to the memory mechanism of different structure, through the *I-V* fitting curve and energy band diagram analysis, it is found that the conductive properties and energy level of buffer material are important factors of affecting the memory mechanism.

Key words: organic; electrical bistable; memory device; buffer layer

收稿日期: 2017-07-11; 修订日期: 2017-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(51462003)资助项目

Supported by National Natural Science Foundation of China(51462003)

1 引言

阻变型电存储依靠外加电场作用下存储介质的导电性高低差异,即电学双稳态或多稳态来实现数据存取,并具有高容量、高柔韧性、低成本、低能耗、可规模化等优点^[1-5]。目前,人们探索了多种材料应用于阻变型电存储器件,如金属纳米颗粒、纯有机材料、有机金属配合物材料、半导体量子点、核-壳半导体量子点、碳纳米管、石墨烯分子或石墨烯氧化物等^[6]。其作用机制仍然不统一,目前主要归结起来有以下几种:场致电荷转移机制、丝状电导机制、构象转变与相变机制、载流子捕获释放机制以及氧化还原机制^[7-8]。

一般情况下,丝状传导机制用来解释含有聚合物材料的器件^[9-10],如 Lee 等报道的在活性材料为 pEGDMA 的单层存储器件中利用 TEM 第一次直接观察到碳细丝^[11]。载流子捕获-释放机制用于含金属纳米颗粒的器件中^[12-15],如 Zhang 等的研究揭示了 ZCIS 纳米晶体和有机材料 PMMA 之间载流子捕获和释放形成的存储行为^[16]。构象转变机制适用小分子或石墨烯分子等器件^[17],如[2]-索烃分子在氧化还原作用下分子结构发生旋转,并且电子在氧化态和还原态所需克服的势垒不同,因此在两种状态下的导电能力就会有所差别,从而实现高导电态和低导电态的转变^[18]。在场致电荷转移机制中,有机材料在电场的作用下会形成电荷转移络合物,电子在外部刺激下发生转移从而导致转换行为^[19]。而氧化还原机制适用含氧化物如石墨烯氧化物的器件^[20-21]。

综上所述,不同种材料制备的存储器件其工作机制不同。而同种材料在不同结构中其作用机理也各不相同。如在 Awais 等的研究中,选用了 PEDOT: PSS 作上下电极,其工作机制解释为电极和活性材料 PVP 之间发生的载流子的传输和诱捕^[22]。其次, PEDOT: PSS 经常在双稳态器件中作为活性材料,如 Sven 等研究的单层器件中, PEDOT: PSS 的氧化还原机制解释了器件的转换行为^[23]。还有 Tang 课题组研究的 PEDOT: PSS 作缓冲层的电双稳态器件^[24-27],加入的缓冲层提高了薄膜的光滑性和势垒,同时对器件性能的提高也起到了辅助性的作用。但是对于相同体系,关于缓冲层材料电荷传输性质与器件存储机制关联的研究较少。在本工作中,通过在单层器件中加

入缓冲层材料,优化了器件的开关比。发现选择导电性不同的缓冲层材料对器件存储机制有重大影响。

2 实验制备

本文制备了单层 ITO/PS: PC₆₀BM/Al 和双层 ITO/buffer layer/PS: PC₆₀BM/Al 结构的存储器件。图 1 为双层结构的器件原理图。溶液制备时将 PS 和 PC₆₀BM 分别溶于氯苯溶剂中,完全溶解后将两种溶液混合,搅拌,得到不同 PC₆₀BM 掺杂浓度的混合溶液待用。PVP 颗粒溶于乙醇,配置的溶液浓度为 10 mg/mL。金纳米粒子采用经典的柠檬酸钠还原法合成^[28]。PEDOT: PSS 是从 BETTERCHEM 购买的 Heraeus4083。制备双稳态器件时,采用 ITO 玻璃作为基底电极,依次使用去离子水、丙酮和异丙醇分别超声清洗 20 min,再用纯净干燥的氮气吹干,紫外臭氧处理 10 min。

在洗净的 ITO 玻璃基底上分别制备缓冲层/活性层结构。缓冲层中,PVP 以 3 000 r/min、PEDOT: PSS 以 5 000 r/min 的转速旋涂于 ITO 基底上,150 °C 退火 15 min,Au-NPs 转速为 1 000 r/min,静置 30 min。不同缓冲层厚度利用椭偏仪(VB-400 VASE Ellipsometer)测量,约为 20 nm。活性层溶液旋涂转速为 2 000 r/min,90 °C 退火 30 min。最后在 2×10^{-3} Pa 的真空中热蒸发沉积 100 nm 厚的金属铝作为顶电极。本文利用 Keithley 2620 源仪表控制器在空气室温环境下测量器件的伏安特性,分析其电双稳态性能。

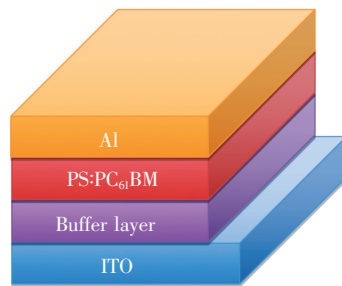


图 1 器件 ITO/buffer layer/PS: PC₆₀BM/buffer layer/Al 的结构原理图

Fig. 1 Structure diagram of ITO/buffer layer/PS: PC₆₀BM/Al memory device

3 结果与讨论

图 2 为单层器件 ITO/PS: PC₆₀BM (20: 1)/Al

的 I - V 特性曲线和能带原理图^[29-30]。其扫描方向为 1: $-10\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$, 2: $0\text{ V} \rightarrow +10\text{ V}$, 3: $+10\text{ V} \rightarrow 0\text{ V}$, 4: $0\text{ V} \rightarrow -10\text{ V}$ 。图中 I - V 曲线显示在 $-10 \sim 10\text{ V}$ 测量范围内器件具有较明显的电流电压转换特性。器件的初始状态表现为高导状态, 随着扫描电压的变化, 器件的电导并未发生变化, 直到阈值电压来临, 器件从高导状态变成低导状态, 相当于一个擦除的过程, 而后一直保持在低导状态, 直到第二个阈值电压来临器件又变回高导状态, 相当于一个写入的过程。由能带图可知 PS 具有较大的能带宽度, 因此活性层中的 PS 起到电荷阻挡的作用, 而 PC_{60}BM 是较强的亲电子材料, 在该体系中可以看成是捕获电子的陷阱^[31]。在未加电场时, PC_{60}BM 均匀地分布在 PS 基质中, 当在器件两端加正向偏压时, PC_{60}BM 中空陷阱捕获来自电极的电子, 随着所加偏压的增大, 一些被填充的陷阱诱捕区由于载流子的不断跳跃链接在一起而形成导电通道, 但此时它们还不能连接正负极, 当所加偏压达到阈值电压时, 被填充的陷阱足够多, 形成了电流通路, 器件从 OFF 态进入 ON 态, 之后器件维持 ON 态。而在加上相反偏压时, 捕获的电子从 PC_{60}BM 的诱捕区中释放, 形成的通道破裂, 器件从 ON 态回到 OFF 态。

为了进一步研究缓冲层材料导电性及电荷捕获能力对双稳态器件的作用机制, 我们在单层器件中加入三类电导性质迥异的材料作为对比, 包括绝缘性材料 PVP、导电聚合物 PEDOT: PSS 及导电性良好的金纳米粒子, 制备了双层结构的电双稳态器件。用不同的缓冲层材料制备的器件其 I - V 特性和开关比随缓冲层材料的电导变化见图 3。从图中可以看出, 在 3 个体系中都存在非易失性阻变开关现象。而且随着缓冲层材料导电性从低到高, 反向电压下, 器件的 OFF 态电流发生从高到低的变化, 导致器件的开关比从 10^2 逐渐增大到 10^5 。当 PVP 作为缓冲层材料时, 低导状态电流约为 10^{-5} A , 高导状态电流约为 10^{-3} A , 两种状态的开关比约为 10^2 ; 缓冲层是 PEDOT: PSS 时, 低导状态电流约为 10^{-8} A , 高导状态电流约为 10^{-3} A , 两种状态的开关比约为 10^5 ; 而 Au-NPs 作缓冲层时低导状态电流约为 10^{-7} A , 高导状态电流约为 10^{-2} A , 两种状态的开关比约为 10^5 。由此可见, 当在活性层前端加入导电性不同的缓冲层材料时, 对器件低导状态电流影响较大。

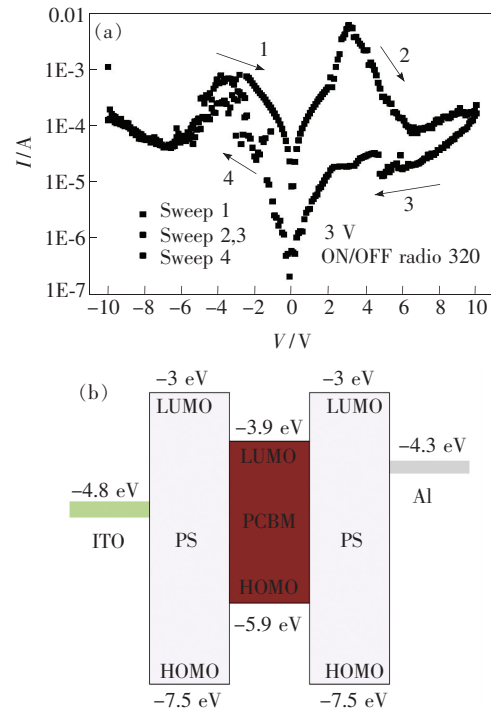


图 2 器件 ITO/PS: PC_{60}BM /Al 的 I - V 特性曲线 (a) 和能带原理图 (b)

Fig. 2 I - V characteristics (a) and energy band diagram (b) of ITO/PS: PC_{60}BM /Al memory device

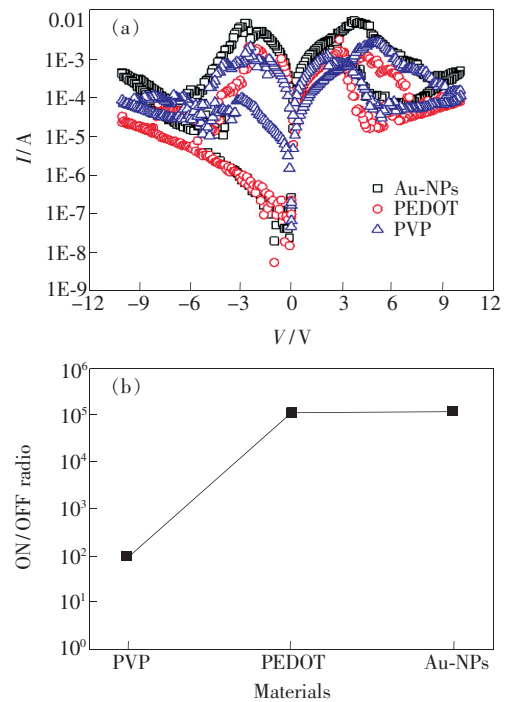


图 3 3 种器件结构的 I - V 特性曲线 (a) 和开关比随材料的变化曲线 (b)

Fig. 3 I - V characteristics (a) and dependence of ON/OFF current ratio on buffer layer materials (b) of three different memory devices

图 4 给出了器件所用材料的能级^[32-34]。可以看出,在双层结构中,由于 Al 电极直接接触共混活性材料,加正向偏压时,Al 电极中的电子直接隧穿过 PS 被 PC₆₁BM 捕获。因此,3 个体系中载流子注入和捕获方式相同,导致三者正向偏压时 ON 态和 OFF 态基本重合,电流表现和单层器件类似。加负偏压时,电流在 PEDOT 高导状态约为 10⁻² A,两种状态的开关比约为 10⁵。因此,当在活性层前端加入导电性不同的缓冲层材料时,对器件低导状态电流影响较大。

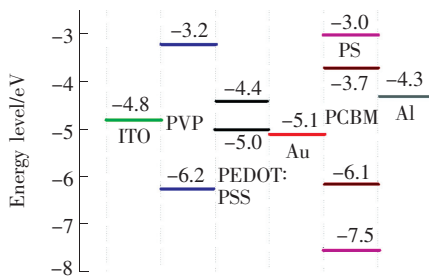


图 4 不同缓冲层材料器件结构的能带原理图

Fig. 4 Energy band diagram of different buffer materials devices

在 PEDOT: PSS 体系中,电子由 ITO 电极注入, PEDOT: PSS 高导状态的电流约为 10⁻² A,两种状态的开关比约为 10⁵。因此可见当在活性层前端加入导电性不同的缓冲层材料时,对器件低导状态电流影响较大。

PEDOT: PSS 的 LUMO 能级与 ITO 电极的势垒十分接近,约为 0.4 eV。电子在逐级跃过能级后被 PC₆₁BM 捕获,符合热电子发射模型(图 4)。金纳米粒子作缓冲层时,其功函数与 ITO 相差 0.3 eV,因此载流子注入和传输过程与 PEDOT: PSS 作缓冲层的器件类似。当缓冲层为 PVP 时,由于其带隙较宽(-3 eV),与 PS(-4.5 eV)的相近,对电荷有较大的阻挡作用。此时注入的电子隧穿过 PVP 和 PS 进入 PC₆₁BM。我们将它与单层器件中 PS: PC₆₁BM 质量比为 30: 1 的类比(图 5),发现两者的开关比十分接近。

由上述分析可知,缓冲层能级的匹配是影响双层结构电双稳态机制的重要因素。通过选择不同能级匹配的缓冲层材料,可以降低 OFF 态电流,由此来优化存储器件的开关比。

在有机共混光电器件中,电荷传输主要有以下几种模型^[35-37]:

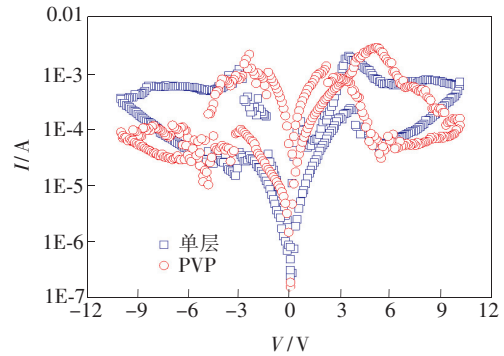


图 5 器件 ITO/PS: PC₆₁BM/Al 和 ITO/PVP/PS: PC₆₁BM/Al 的 I-V 特性曲线

Fig. 5 I-V characteristics of ITO/PS: PC₆₁BM/Al and ITO/PVP/PS: PC₆₁BM/Al memory devices

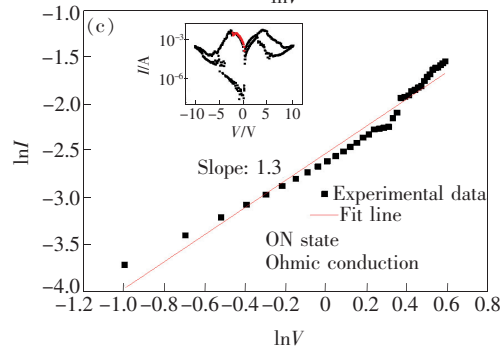
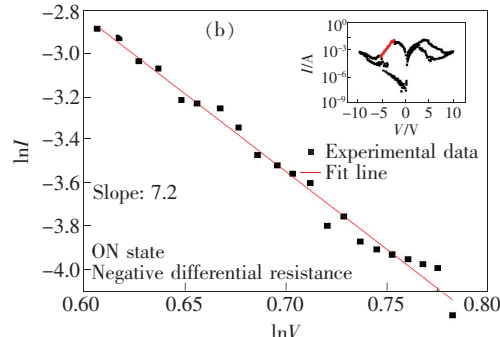
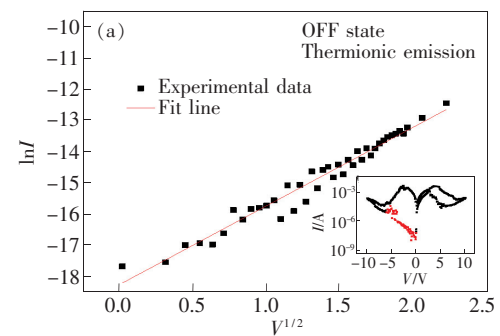


图 6 不同电压范围内 I-V 曲线的线性拟合图。(a) 热电子发射模型, OFF 态 0 ~ -6 V; (b) 负微分电阻效应, ON 态 -6 ~ -3 V; (c) 欧姆传导模型, ON 态 -3 ~ 0 V。

Fig. 6 Theoretical linear fitting (solid line) of I-V characteristics in negative voltage region. (a) Thermionic emission model plot in OFF state 0 - 6 V. (b) Negative differential resistance in ON state -6 - 3 V. (c) Ohmic conduction plot in ON state -3 - 0 V.

(1) 热电子发射模型 (Thermionic emission model):

$$I \propto A^* T \exp \left[-\frac{q\phi}{kT} + q \left(\frac{q^3 V}{4\pi\epsilon} \right)^2 \right], \quad (1)$$

(2) 空间电荷限制电流模型 (Space-charge-limited-current (SCLC) model):

$$I = kV^m, \quad (2)$$

(3) 欧姆传导模型 (Ohmic conduction):

$$I \propto V \exp \left(\frac{-\Delta E_{ac}}{kT} \right), \quad (3)$$

其中, A^* 、 T 、 ϵ 、 ϕ 、 k 、 q 、 d 、 V 、 ΔE_{ac} 依次代表理查德森常数、绝对温度、介电常数、势垒高度、玻尔兹曼常数、电荷量、势垒宽度、电场大小和电子的活化能。

为了进一步分析器件的工作过程,我们对 ITO/Au-NPs/PS: PC₆₁BM/Al 结构的 I - V 曲线进行了线性拟合分析,相应的实验点和拟合曲线如图 6 所示。

在图 6(a) 中,当器件处于 OFF 态低电压即 $0 \sim -6$ V 时,拟合的曲线很好地符合了热电子发射模型,此时电荷主要依靠热能驱动,逐级越势垒进入活性层,被 PC₆₁BM 捕获,注入较缓慢。当器件进入 ON 态,即电压扫描在 $-6 \sim -3$ V 时,如

图 6(b) 所示,随着电压的减小,电流逐渐增大,即出现了负微分电阻效应,这可能是由于注入电荷的大量积累而产生空间电荷所引起的^[26,35]。而随着电压的继续减小,如图 6(c) 所示,电流电压成正比,器件进入欧姆传导模型。

当器件结构为 ITO/PEDOT: PSS/PS: PC₆₁BM/Al 时,其电荷传输与 ITO/Au-NPs/PS: PC₆₁BM/Al 结构类似。改变 ITO 一侧的缓冲层材料时,由于其 LUMO 能级的差异,因此器件在负向电场下 OFF 态电流有差异,从而得到不同的开关比值。对于 Al 一侧与活性材料的接触几种结构是相同的,因而在正向扫描下的电流都十分接近。

4 结 论

本文通过在活性层 PS: PC₆₁BM 前端加入导电性由低到高的 3 种缓冲层材料,调节了双层器件的开关比和存储机制。实验结果发现随着缓冲层材料导电性的增强,器件开关比从 10^2 增大到 10^5 。通过电流电压拟合曲线和能带原理图分析,发现缓冲层材料的导电性质及能级的匹配是影响器件存储机制的重要因素。通过调整缓冲层材料能级带隙与活性材料的匹配,可以降低 OFF 态电流,从而优化双稳态器件的开关比。

参 考 文 献:

- [1] LIN W P, LIU S J, GONG T, *et al.*. Polymer-based resistive memory materials and devices [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(4):570-606.
- [2] MA Z, OOI P C, LI F, *et al.*. Electrical bistabilities and conduction mechanisms of nonvolatile memories based on a polymethylsiloxane insulating layer containing CdSe/ZnS quantum dots [J]. *J. Electron. Mater.*, 2015, 44(10):3962-3966.
- [3] DONG Y Y, PARK H M, KIM S W, *et al.*. Enhancement of memory margins for stable organic bistable devices based on graphene-oxide layers due to embedded CuInS₂ quantum dots [J]. *Carbon*, 2014, 75(75):244-248.
- [4] LAI Q, ZHU Z, CHEN Y, *et al.*. Organic nonvolatile memory by dopant-configurable polymer [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2006, 88(13):391.
- [5] KORNER P O, SHALLCROSS R C, MAIBACH E, *et al.*. Optical and electrical multilevel storage in organic memory passive matrix arrays [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(15):3688-3693.
- [6] KIM T W, YANG Y, LI F, *et al.*. Electrical memory devices based on inorganic/organic nanocomposites [J]. *NPG Asia Mater.*, 2012, 4(6):e18.
- [7] 石胜伟, 彭俊彪. 有机电双稳态器件 [J]. *化学进展*, 2007, 19(9):1371-1380.
SHI D H, PENG J B. Organic electrical bistable devices [J]. *Prog. Chem.*, 2007, 19(9):1371-1380. (in Chinese)
- [8] ZHANG B, CHEN Y, NEOH K G, *et al.*. Organic electronic memory devices [J]. *Elect. Memory Mater. Dev.*, 2015: 1-53.
- [9] HU B, FEI Z, ZHU X, *et al.*. Nonvolatile bistable resistive switching in a new polyimide bearing 9-phenyl-9H-carbazole

- pendant [J]. *J. Mater. Chem.*, 2011, 22(2):520-526.
- [10] JANG J, SONG Y, YOO D, *et al.*. Energy consumption estimation of organic nonvolatile memory devices on a flexible plastic substrate [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2016, 1(11):1500186.
- [11] LEE B H, BAE H, SEONG H, *et al.*. Direct observation of a carbon filament in water-resistant organic memory [J]. *ACS Nano*, 2015, 9(7):7306-13.
- [12] SONGY, LING Q D, LIM S L, *et al.*. Electrically bistable thin-film device based on PVK and GNPs polymer material [J]. *IEEE Electron Dev. Lett.*, 2007, 28(2):107-110.
- [13] PRAKASH A, OUYANG J, LIN J L, *et al.*. Polymer memory device based on conjugated polymer and gold nanoparticles [J]. *J. Appl. Phys.*, 2006, 100(5):539.
- [14] OUYANG J. Temperature-sensitive asymmetrical bipolar resistive switches of polymer; nanoparticle memory devices [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(9):1913-1922.
- [15] OUYANG J. Electron transfer at the contact between Al electrode and gold nanoparticles of polymer; nanoparticle resistive switching devices studied by alternating current impedance spectroscopy [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2013, 103(23):233508-1-4.
- [16] ZHANG X, XU J, ZHANG X, *et al.*. Electricalbistable properties of nonvolatile memory device based on hybrid ZCIS NCs: PMMA film [J]. *Mater. Sci. Semicond. Proc.*, 2017, 57:105-109.
- [17] XIE L H, LINGQ D, HOU X Y, *et al.*. An effective friedel-crafts postfunctionalization of poly(n-vinylcarbazole) to tune carrier transportation of supramolecular organic semiconductors based on π -stacked polymers for nonvolatile flash memory cell [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2008, 130(7):2120-2121.
- [18] COLLIER C P, MATTERSTEIG G, WONG E W, *et al.*. A [2] catenane-based solid state electronically reconfigurable switch [J]. *Science*, 2000, 289(5482):1172-1175.
- [19] SUN Y, LI L, WEN D, *et al.*. Bistable electrical switching and nonvolatile memory effect in mixed composite of oxadiazole acceptor and carbazole donor [J]. *Org. Electron.*, 2015, 25:283-288.
- [20] ZHUANG X D, CHEN Y, LIU G, *et al.*. Conjugated-polymer-functionalized graphene oxide: synthesis and nonvolatile rewritable memory effect [J]. *Adv. Mater.*, 2010, 22(15):1731-1735.
- [21] HA H, KIM O. Unipolar switching characteristics of nonvolatile memory devices based on poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrene sulfonate) thin films [J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2009, 48:031024.
- [22] AWAIS M N, CHOI K H. Resistive switching and current conduction mechanism in full organic resistive switch with the sandwiched structure of poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate)/poly(4-vinylphenol)/poly(3,4-ethylenedioxythiophene):poly(styrenesulfonate) [J]. *Electron. Mater. Lett.*, 2014, 10(3):601-606.
- [23] MOLLER S, PERLOV C, JACKSON W, *et al.*. A polymer/semiconductor write-once read-many-times memory [J]. *Nature*, 2003, 426(6963):166.
- [24] LI X, LU Y, GUAN L, *et al.*. Effects of buffer layer and thermal annealing on the performance of hybrid $\text{Cu}_2\text{S}/\text{PVK}$ electrically bistable devices [J]. *Solid-State Electron.*, 2016, 123:101-105.
- [25] LI X, TANG A, LI J, *et al.*. Heating-up synthesis of MoS_2 nanosheets and their electrical bistability performance [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2016, 11(1):171.
- [26] LI J, TANG A, LI X, *et al.*. Negative differential resistance and carrier transport of electrically bistable devices based on poly(N-vinylcarbazole)-silver sulfide composites [J]. *Nanoscale Res. Lett.*, 2014, 9(1):128.
- [27] CAO Y P, HU Y F, LI J T, *et al.*. Electrical bistable devices using composites of zinc sulfide nanoparticles and poly-(N-vinyl-carbazole) [J]. *Chin. Phys. B*, 2015, 24(3):298-301.
- [28] MICHALE J H, JULIA E W, ZHONG C J, *et al.*. Alkanethiolate gold cluster molecules with core diameters from 1.5 to 5.2 nm; core and monolayer properties as a function of core size [J]. *Langmuir*, 1998, 14(1):17-30.
- [29] WU C, LI F, GUO T, *et al.*. Controlling memory effects of three-layer structured hybrid bistable devices based on graphene sheets sandwiched between two laminated polymer layers [J]. *Org. Electron.*, 2012, 13(1):178-183.
- [30] HE Y, ZHAO G, PENG B, *et al.*. High-yield synthesis and electrochemical and photovoltaic properties of indene-C70 bisadduct [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2010, 20(19):3383-3389.
- [31] SUN Y M, LU J G, AI C P, *et al.*. Enhancement of memory margins in the polymer composite of [6,6]-phenyl-C61-

- butyric acid methyl ester and polystyrene [J]. *Phys. Chem. Chem. Phys.*, 2016, 18(44):30808.
- [32] OUANG J. Materials effects on the electrode-sensitive bipolar resistive switches of polymer: gold nanoparticle memory devices [J]. *Org. Electron.*, 2013, 14(6):1458-1466.
- [33] WANG J, GAO F, GREENHAM N C. Low-power write-once-read-many-times memory devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2010, 97(5):164.
- [34] LIU J Q, ZENG Z Y, CAO X H, *et al.*. Preparation of MoS₂-polyvinylpyrrolidone nanocomposites for flexible nonvolatile rewritable memory devices with reduced graphene oxide electrodes [J]. *Small*, 2012, 8(22):3517-3522.
- [35] ISLAM S M, BANERJI P, BANERJEE S. Electrical bistability, negative differential resistance and carrier transport in flexible organic memory device based on polymer bilayer structure [J]. *Org. Electron.*, 2014, 15(1):144-149.
- [36] LI Y, NI X, DING S. High performance resistive switching memory organic films prepared through PPy growing on graphene oxide substrate [J]. *J. Mater. Sci. : Mater. Electron.*, 2015, 26(11):9001-9009.
- [37] SON D I, PARK D H, CHOI W K, *et al.*. Carrier transport in flexible organic bistable devices of ZnO nanoparticles embedded in an insulating poly(methyl methacrylate) polymer layer [J]. *Nanotechnology*, 2009, 20(19):195203.



李静玉(1992 -),女,河北石家庄人,硕士研究生,2015年于江南大学获得学士学位,主要从事聚合物有机电双稳态器件的研究。
E-mail: lijingyu0806@126.com



邓朝勇(1977 -),男,贵州安龙人,博士,教授,博士生导师,2004年于北京交通大学获得博士学位,主要从事新型光电子材料与器件方面的研究。
E-mail: cydeng@gzu.edu.cn



章婷(1976 -),女,宁夏银川人,博士,副教授,2005年于北京交通大学获得博士学位,2005年于美国劳伦斯伯克利国家实验室从事博士后研究工作,主要从事光电子薄膜材料与器件方面的研究。
E-mail: zhangting@bit.edu.cn