



发光学报

CHINESE JOURNAL OF LUMINESCENCE



中文核心期刊

主管：中国科学院

主办：中国科学院长春光学精密机械与物理研究所

中国物理学会发光分会

主编：申德振

基于有机薄膜晶体管的光写入多级存储器

何伟欣, 何立铎, 陈惠鹏, 张国成

引用本文:

何伟欣, 何立铎, 陈惠鹏, 等. 基于有机薄膜晶体管的光写入多级存储器[J]. *发光学报*, 2020, 41(1): 95–102.

HE Wei-xin, HE Li-hua, CHEN Hui-peng, et al. Optical Write Multi-level Memory Based on Organic Thin Film Transistor[J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2020, 41(1): 95–102.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.3788/fgxb20204101.0095>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

双异质结构的双极型有机薄膜晶体管的研制

Ambipolar Organic Thin Film Transistors with Double Heterojunction

发光学报. 2015, 36(4): 480–484 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153604.0480>

单层密集ZnO纳米棒阻变器件的导电机理

Current Conduction Mechanism of The Resistive Memory Device with Single-layered Dense ZnO Nanorod Arrays

发光学报. 2015(7): 795–800 <https://doi.org/10.3788/fgxb20153607.0795>

飞秒脉冲激光辐照FRAM诱发的毁伤效应及热演化

Damage Effects and Thermal Evolution of FRAM Irradiated by Femtosecond Pulsed Laser

发光学报. 2019, 40(6): 815–825 <https://doi.org/10.3788/fgxb20194006.0815>

硅掺杂氧化锡柔性薄膜晶体管的制备与特性

Preparation and Properties of Flexible Thin Film Transistors with Si-incorporated SnO₂ Active Layer

发光学报. 2018, 39(7): 968–973 <https://doi.org/10.3788/fgxb20183907.0968>

非晶镁锡氧薄膜晶体管的制备及退火对其性能的影响

Fabrication and Effect of Annealing Treatment on Performance of Amorphous Mg–In–Sn–O Thin Film Transistor

发光学报. 2017, 38(11): 1539–1544 <https://doi.org/10.3788/fgxb20173811.1539>

文章编号: 1000-7032(2020)01-0095-08

基于有机薄膜晶体管的光写入多级存储器

何伟欣¹, 何立铎¹, 陈惠鹏¹, 张国成^{1,2*}

(1. 福州大学 平板显示技术国家地方联合工程实验室, 福建 福州 350108;

2. 福建工程学院 微电子技术研究中心, 福建 福州 350118)

摘要: 由于依靠不断缩小存储单元尺寸来提升单位面积存储能力的传统方法将会面临着器件尺寸的物理极限等瓶颈, 人们逐渐将目光投向了能够在单一器件上实现高密度存储的多级存储器件。本文利用有机薄膜晶体管中存在的持续光电导率(PPC)效应制备了一个光写入操作的多级存储器件, 有效地避免了电写入操作对器件的接触破坏性和较大功耗问题。研究了在不同功率(60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$)和不同持续时间(50 ~ 1 000 ms) 700 nm 光写入脉冲作用下的器件存储状态, 器件在光功率为 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、持续时间为 100 ms 的光脉冲下展现出了低至 0.189 nJ 的极低工作功耗。通过对器件施加 16 个连续光写入脉冲证实器件具有 16 个有效的存储状态, 实现了存储容量为 4 bits 的多级光写入存储功能。

关键词: 有机薄膜晶体管; 多级存储; 光写入存储

中图分类号: TN321+.5 文献标识码: A DOI: 10.3788/fjxb20204101.0095

Optical Write Multi-level Memory Based on Organic Thin Film Transistor

HE Wei-xin¹, HE Li-hua¹, CHEN Hui-peng¹, ZHANG Guo-cheng^{1,2*}

(1. Institute of Optoelectronic Display, National & Local United Engineering Lab of Flat Panel Display Technology,

Fuzhou University, Fuzhou 350108, China;

2. Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

* Corresponding Author, E-mail: zgc@fjut.edu.cn

Abstract: To increase the storage capacity per unit area, the traditional strategy is reducing the storage capacity per unit area, which will face bottlenecks such as the physical limits of device size. People are turning their attention to multi-level memory devices that can achieve high-density storage on a single device. In this paper, a multi-level memory device with optical write operation is fabricated by using the persistent photoconductivity (PPC) effect in organic thin film transistors, which effectively avoids the contact destructiveness and large work consumption of the device by the electrical write operation. The device storage state under different power (60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) and different duration (50 – 1 000 ms) 700 nm optical write pulse was studied. It exhibited extremely low operating power as low as 0.189 nJ under the optical pulse with power of 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ and duration of 100 ms. When 16 consecutive optical write pulses were applied, the device showed 16 distinct effective storage state, it meant that multi-level optical write storage function with a storage capacity of 4 bits was realized in this device.

Key words: organic thin film transistor; multi-level storage; optical storage

收稿日期: 2019-07-22; 修订日期: 2019-08-19

基金项目: 国家重点研发计划(2016YFB0401103); 国家自然科学基金(51503039); 福建省自然科学基金(2016J01749); 福建省教育厅中青年项目(JA15350)资助

Supported by National Key R&D Program of China (2016YFB0401103); National Natural Science Foundation of China (51503039); Natural Science Foundation of Fujian Province(2016J01749); Young and Middle-aged Program of Fujian Education Department(JA15350)

1 引 言

随着人类社会信息化的繁荣发展,计算机系统担负着越来越繁重的计算处理任务,如图像识别、大数据分析等。这些任务都包含着庞大的数据量,对计算机存储设备的存储能力提出了更高的要求。当前,为提高计算系统的存储能力,最常用的方法是不断缩小存储单元的尺寸,以谋求单位面积内存储能力的提升,然而,随着时间的推移,这种方式将会面临器件尺寸的物理极限且受限于未来精细化光刻技术的发展,无法支撑未来海量数据处理的计算系统的发展^[1-3]。因此,研究人员提出了另一种提升存储能力的途径,即尝试在单个存储单元上实现高密度存储-多级存储器。

相较于传统的晶体管,有机薄膜晶体管(OTFT)具有可溶液法制备、低温加工、与柔性衬底兼容等优势,且其适用于电子器件的大面积、低成本生产以及未来各类柔性场景的应用,业界广泛认为其有望取代传统非晶态硅器件以满足未来更加多元化的应用需求^[4-7]。在有机薄膜晶体管的结构中嵌入对载流子传输具有调控作用的功能层组分,如铁电材料、驻极体材料和金属纳米颗粒等,在栅电压脉冲的作用下,对沟道中的载流子实现俘获和释放,可以使器件实现多级存储功能,这为制备工艺简单、可柔性操作、与互补集成电路结构完全兼容的多级存储器件提供了一条崭新的路径^[8-12]。然而,这种基于栅电压写入的操作对器件存储组分的状态会产生一定的破坏,不利于器件循环操作的稳定性和抗疲劳特性。此外,在计算机系统中,存储器件需要频繁地与外界系统通信,电写入的操作也限制了存储器件的工作带宽,在一定程度上增加了计算机系统的硬件冗余,带来了系统整体功耗的增长^[13-16]。

在多级存储器件中,为避免电写入操作带来的诸多不利因素,研究人员提出采用光信号脉冲写入的方式。Shiono 等以 PMMA:TIPS-pentacene 为浮栅层、P3HT 为有源层制备了一种可以在蓝光、绿光和红光下实现多级存储编写的场效应晶体管,器件在各种存储状态下都具有较好的电流保持特性^[17];Leydecker 等通过在 P3HT 为有源层的晶体管中掺入光致变色材料,获取了一种 256 个电流状态(8 bits)的多级光写入存储晶体管,并

实现了器件的柔性化高稳定性应用^[18]。与传统的电写入操作相比,光信号写入操作具有写入速度快、工作带宽高、非接触性无损写入、能量耗散小等特有优势,在提升器件工作稳定性的同时,能够有效地降低存储系统的能耗,为开发新一代高密度、高稳定性、低功耗的非易失存储器提供了潜在可能性^[10,19-21]。

本文以有机半导体材料 PDVT-10 为有源层制备了一个底栅顶接触的薄膜晶体管器件,利用有机半导体的 PPC 效应(即在光照时,有机半导体中产生的光生电子被其内部的深陷阱能级俘获,光照撤去后,器件的光生电流具有良好的保持特性)实现了器件的光写入存储功能。通过调节光写入脉冲的强度和持续时间,我们获取了器件不同的存储状态。在施加连续光写入脉冲时,器件获得了多个可区分的电导状态,实现了 4 bits (16 个电导状态)的多级存储功能。

2 实 验

2.1 有机薄膜晶体管的制备

本文制备的有机薄膜晶体管采用底栅顶接触结构。基底为带有 100 nm 厚致密二氧化硅层的重掺杂硅片,二氧化硅层和硅基底分别作为有机薄膜晶体管的绝缘层和栅极使用。硅片依次在丙酮、异丙醇和去离子水中进行清洗,最后使用高纯度氮气吹干(纯度 99.999%)。随后,在硅片上采用旋涂的方式沉积 PDVT-10 薄膜,旋涂转速和旋涂时间分别为 1 000 r/min 和 60 s。旋涂完成后,将硅片放置于 150 °C 的恒温加热台 10 min 完成退火操作。退火后采用专用掩膜版($L = 30 \mu\text{m}$, $W = 1\ 000 \mu\text{m}$)以热蒸发的方式在器件上蒸镀源漏电极。

2.2 材料和多级光存储的测试

有机半导体聚合物材料 PDVT-10: poly[2,5-bis(alkyl)pyrrolo[3,4-c]pyrrole-1,4(2*H*,5*H*)-dione-*alt*-5,5'-di(thiophen-2-yl)-2,2'-(*E*)-2-(2-(thiophen-2-yl)vinyl)thiophene] (PDVT-10) ($M_w = 183 \text{ ku}$, $\text{PDI} = 2.49$) 购买自加拿大 1-Materials 公司,其结构式如图 1 所示。在旋涂前,PDVT-10 以 5 mg/mL 的浓度溶解于氯仿溶液中,并静置于 60 °C 的恒温加热台上两个小时,以使其充分溶解。硅片购买自苏州晶矽电子科技有限公司。

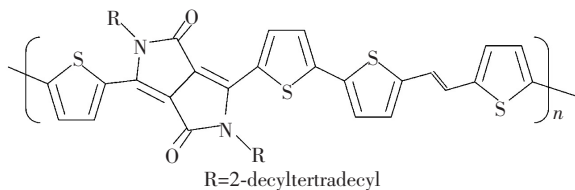


图 1 PDVT-10 结构式

Fig. 1 Schematic illustration of chemical materials

器件转移特性曲线等晶体管性能和光存储性能的测试均在半导体参数分析仪 (Keysight B2912A) 完成。光源系统包含一个氙灯 (Solar-500)、一个单色仪 (Omno501) 和一个光快门, 均购买自北京纽比特科技有限公司 (NBeT Group Corp.)。薄膜表面形貌表征采用 Bruker 公司生产的 Multimode system 原子力显微镜 (AFM)。材料的 UV-Vis 吸收谱采用 UV3600 测试获取。

3 结果与讨论

3.1 有机薄膜晶体管光响应特性的表征

图 2(a) 所示为本次实验制备的底栅顶接触型有机薄膜晶体管器件结构示意图。在有机薄膜晶体管中, 由于载流子的传输是在半导体层和绝缘层的界面进行, 因此半导体材料的成膜质量直接影响着载流子的输运, 进而影响晶体管的开关比、迁移率、阈值电压等性能参数^[22]。我们采用了原子力显微镜 (AFM) 的 tapping 模式来表征 PDVT-10 薄膜的成膜情况, 由图 2(b) 中可见, PDVT-10 薄膜较为均匀, 薄膜的均方根粗糙度为 0.941 nm, 均匀的成膜有利于载流子在其中通畅地传输。

半导体层的光吸收特性直接决定着有机薄膜晶体管的光响应特性, 使用半导体层强吸收波段的光照射有机薄膜晶体管时, 半导体层中产生大量的光生激子, 导致沟道中载流子浓度增加, 使有机薄膜晶体管展现出光响应特性, 研究人员利用这一原理制备了光存储器、光探测器、光突触等功能器件^[23-31]。图 2(c) 为 PDVT-10 薄膜在 300 ~ 800 nm 范围内的光吸收谱, 可见 PDVT-10 在 300 ~ 800 nm 波段光吸收强度呈现出逐渐增大的趋势。我们采用 700 nm 波长的单色光照射有机薄膜晶体管来研究其光响应特性。

图 3 所示为该有机薄膜晶体管在黑暗状态下和在光功率为 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的 700 nm 单色光分别照射 50 s 后的转移特性曲线 ($V_{\text{DS}} = -30 \text{ V}$)。

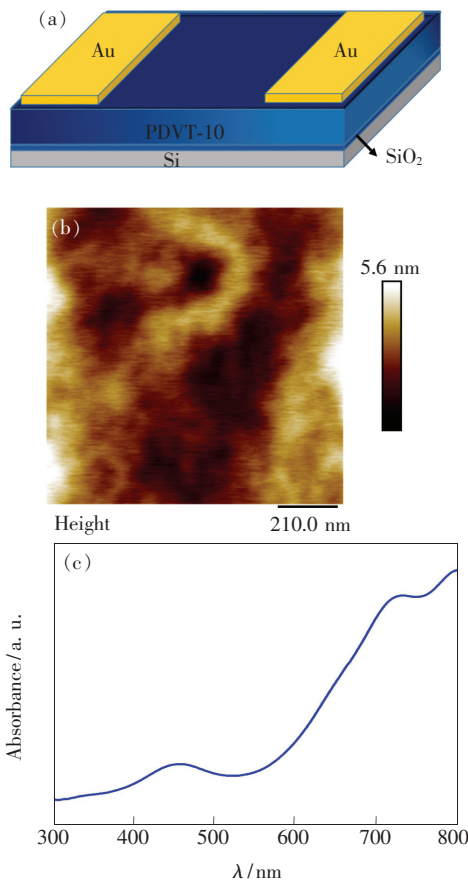


图 2 (a) 有机薄膜晶体管结构示意图; (b) PDVT-10 薄膜的 AFM 图; (c) PDVT-10 的吸收谱。

Fig. 2 (a) Schematic diagram of the structure of organic thin film transistor. (b) AFM image of PDVT-10 film. (c) Absorption spectrum of PDVT-10.

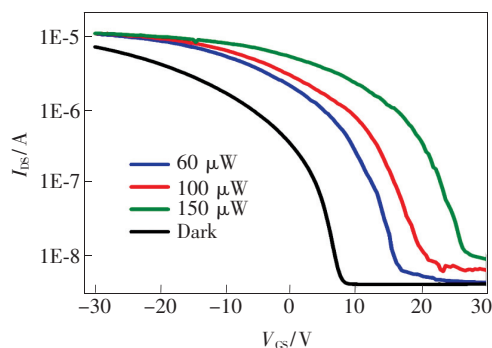


图 3 有机薄膜晶体管的光响应特性

Fig. 3 Photoresponse characteristics of organic thin film transistors

从图中可见, 有机薄膜晶体管具有良好的 P 型半导体特性, 在光照后, 转移曲线相对于暗态产生正向漂移, 并且有随着光功率增大正向漂移程度随之增大的现象, 阈值电压也随之正向漂移, 这是由于光照下半导体层中产生的光生激子有效分离并

参与传输、沟道中多数载流子浓度增加所致。这种光照后转移曲线正向漂移的光响应特性为我们将该晶体管作为多级存储器奠定了基础。

3.2 有机薄膜晶体管的光存储性能测试

基于有机薄膜晶体管的存储器件因具有制备工艺简单、满足柔性化应用要求、与 CMOS 电路具有高兼容性等独有优势而受到行业内研究人员的广泛关注,器件的结构、材料都在不断完善,存储性能不断提升,应用前景广阔。传统的 OTFT 存储器工作机理是通过电压的驱动实现载流子的捕获和释放,面对电操作给存储器带来的功耗上升和器件稳定性下降,人们提出了应用光写入操作的存储器件。光调控相当于晶体管除源极、漏极和栅极以外引入的第四调控端,通过光诱导载流子来控制阈值电压的漂移,从而获取器件的存储功能。与传统的电写入操作相比,光写入操作能够有效提升器件工作稳定性和降低存储系统的能量耗散^[21,32]。

根据光照下 OTFT 阈值电压的漂移特性,我们尝试研究了该器件的光存储功能。采用 700 nm 波长的光脉冲(持续时间 100 ms)照射器件,在 $V_{DS} = -1$ V 下读取其电流。如图 4(a) 所示,在 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 3 种光功率的光脉冲分别照射后, I_{DS} 由约 1.83 nA 分别上升至约 1.89, 1.92, 1.98 nA 并且呈现出良好的保持特性,在 10 s 内未见明显的衰减。以上现象说明器件在光脉冲的照射下展现出其对电荷的存储能力,并且在不同强度光脉冲的照射下达到不同的存储状态。沟道电导的变化能够最直观地表现出器件存储状态的变化情况,如图 4(b) 所示。我们还研究了 3 种光脉冲强度下,不同光脉冲持续时间(50 ~ 1 000 ms)对器件沟道电导的影响。从图 4(b) 中可见,在每一种光功率下,器件的沟道电导均随着光脉冲持续时间的增加而增加,值得说明的是,在每一种电导状态下,器件都展示出如图 4(a) 所示的良好保持特性。以上现象说明器件在 3 种光功率(60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) 及不同脉冲持续时间(50 ~ 1 000 ms)的光照射下展现出符合光写入存储器的电荷存储特征,能够作为一个光写入存储器件使用。并且,根据能耗计算公式 $E = I_{\text{peak}} \cdot V_{DS} \cdot T_{\text{pulse}}$ (I_{peak} 为执行光写入后器件电流的最大值, V_{DS} 为源漏电压, T_{pulse} 为写入脉冲的持续时间),器件在 60 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 、100 ms 的单个脉冲写入

功耗低至 0.189 nJ,这种纳焦级别的功耗有利于器件在低功耗存储领域的应用。

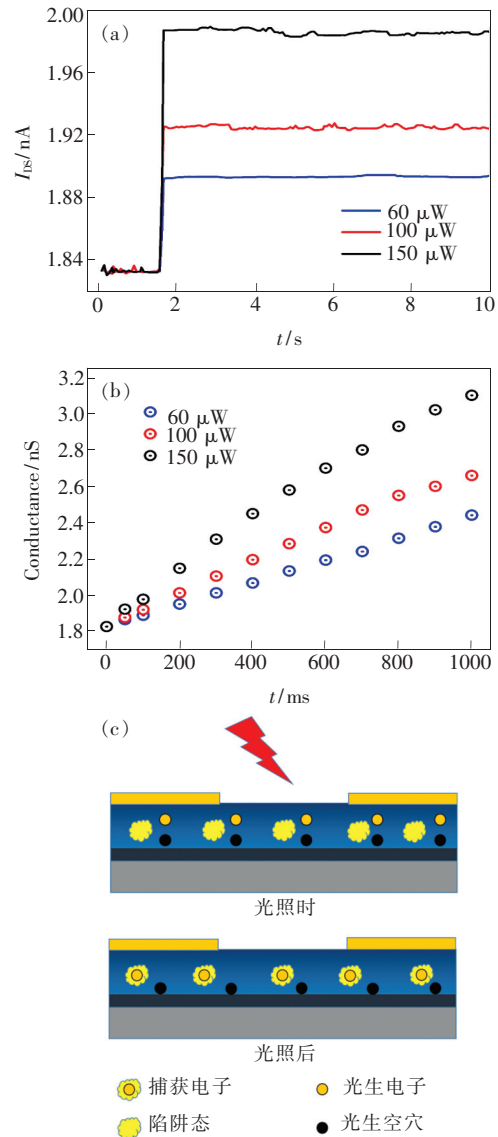


图 4 (a) 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 光照射后的源漏电流变化; (b) 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ 入射光不同持续时间(50 ~ 1 000 ms)作用后的沟道电导变化; (c) PPC 效应原理图。

Fig. 4 (a) Change of source and drain current after 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ light irradiation. (b) Change of channel conductance after 60, 100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$ incident light for different durations (50 - 1 000 ms). (c) Schematic diagram of PPC effect.

我们认为,器件展现出的上述光存储功能是由有源层材料的 PPC 效应导致的。在基于有机半导体的薄膜晶体管中,光照后漏源电流不会返回到初始值,而是以非常缓慢的速度衰退,这个衰退可能需要数天时间,这种现象被称为持续光电

导率效应, 被广泛研究用于开发具有光写入信息能力的光敏晶体管。通常, 研究认为其产生原因是光照时半导体材料固有的深陷阱能级俘获了光生少子, 并且释放缓慢, 带来了光电导的持续性^[33-34]。如图 4(c) 所示, 在光照诱导 PDVT-10 后产生了大量的光生激子, 其中, 光生电子被材料中固有的深陷阱能级所俘获, 难以快速释放, 而光生空穴则残留在了导电沟道中, 提升了沟道中的空穴浓度, 带来了持续的光电导现象。

3.3 有机薄膜晶体管的多级存储功能

传统的集成电路产业发展遵循着摩尔定律, 通过不断地减小器件尺寸以提升单位面积的存储、运算能力, 这种方式很快将面临器件尺寸的物理极限、精细化光刻技术发展等瓶颈, 多级存储技术的出现有望突破摩尔定律的发展瓶颈, 助推未来更加快速、高效的计算机系统发展^[35,19]。

如图 5(a)、(b) 所示, 器件在不同光功率和不同持续时间光脉冲照射下存在多个存储状态, 表明其具备多级存储功能。因此我们对器件施加了多个连续光脉冲照射, 以探究其多级存储功能, 光脉冲参数为: 波长 700 nm, 光功率 $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$, 脉冲持续时间 100 ms, 脉冲间隔时间 1 000 ms, 脉冲个数 16 个。图 5(a) 为施加上述连续光脉冲后器件的电导变化情况, 可见, 器件的电导随着施加光脉冲数量的增加而逐渐增加, 每一个光脉冲施加后器件的电导都能保持在一个相对稳定的值, 未见任何明显的衰减迹象, 在脉冲施加完毕后, 器件呈现出 16 个增长较为均匀且可区分的电导状态。

传统的 1 位存储器主要注重的是开关状态之间电流的差异度, 即一般指电流的最大值和最小值之间的差异。而面向多级存储, 我们更加关注的是每个存储状态的稳定性和状态之间的可区分度^[19, 30]。我们定义第 n 个脉冲所带来的电导增量为 ΔG_n , 用 $[(\Delta G_n - \Delta G_1) / \Delta G_1] \times 100\%$ 来表示第 n 个增加的电导值相对于第一个增加的电导值的偏离程度, 用以研究电导状态的均匀度和可区分度。从图 5(b) 中可见, 所有的电导增量相对于第一个电导增量的偏移都在 $\pm 3\%$ 范围内浮动, 说明每一次脉冲后的电导都呈现出均匀增长的状态, 器件的电导可区分度和均匀性较高。在图 6 中, 我们展示的是脉冲个数为 4 个、8 个、12 个和 16 个连续脉冲作用后的器件电导保持特性。在

1 000 s 内, 各个电导态均保持稳定, 并未产生明显的衰减, 呈现出良好的电导保持特性。本节的研究结果表明器件能够在 16 个连续光脉冲的照

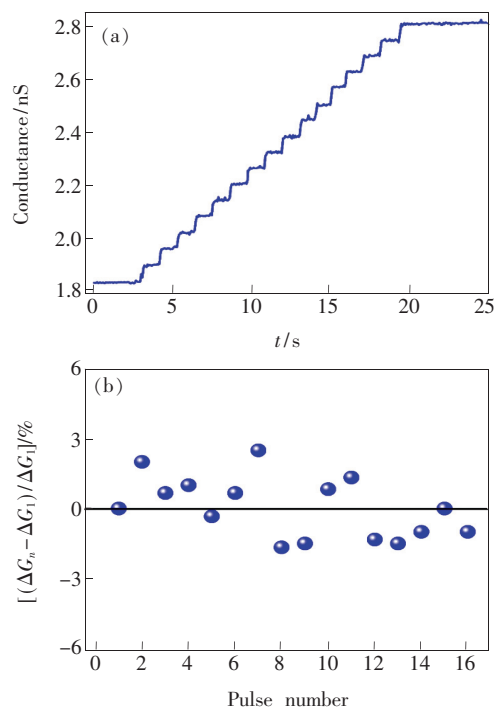


图 5 (a) 16 个 $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的连续写入光脉冲 (持续时间: 100 ms, 脉冲间隔: 1 000 ms) 作用后的电导变化; (b) 第 n 个写入脉冲带来的电导变化 ΔG_n 相对于第一个写入脉冲带来的电导变化 ΔG_1 的偏离度。

Fig. 5 (a) Conductance change after sixteen $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ continuous write light pulses (duration: 100 ms, pulse interval: 1 000 ms). (b) Deviation degree of n th conductance change ΔG_n relative to ΔG_1 .

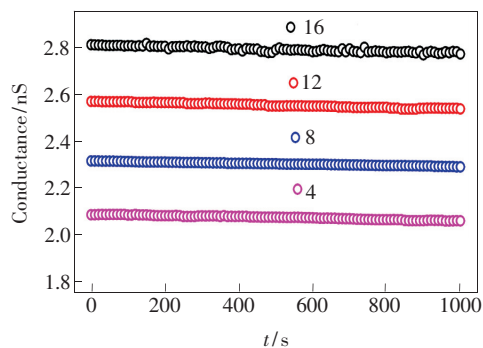


图 6 多个 $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ 的连续写入光脉冲 (持续时间: 100 ms, 脉冲间隔: 1 000 ms) 作用后的电导保持特性

Fig. 6 Conductance retention characteristics after multiple $60 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ continuous write light pulses (duration: 100 ms, pulse interval: 1 000 ms)

射下形成 16 个保持稳定、增长均匀、区分度高的存储状态,实现了容量为 4 bits 的多级存储功能。

相对于已报道的光写入多级存储晶体管器件,本文提出的器件利用有机材料自身所存在的 PPC 效应实现了多级存储功能,器件结构简单,制备工艺快捷,不存在多组分交叉干扰的问题,有机物的可溶液加工特性也赋予了这类器件在未来实现溶液法的大面积、低成本生产制备的可能性。

4 结论和展望

本研究以 PDVT-10 为有源层材料制备了有机薄膜晶体管,并研究了该器件的光响应特性,在 700 nm 波长的光照下,其阈值电压随着照射光功率的增加正向漂移。本研究还利用 PDVT-10 材料独特的持续光电导率特性,完成了对器件在不同写入时间(50 ~ 1 000 ms)和不同写入强度(60,

100, 150 $\mu\text{W}/\text{cm}^2$) 下的光写入存储操作,器件单脉冲写入功耗低至 0.189 nJ。此外,在 16 个连续光写入脉冲的作用下,器件展现出了增长均匀、区分度高、保持稳定的 16 个存储状态,实现了 4 bits 的多级光写入存储功能,存储保持能力超过 1 000 s。

我们认为,在未来更为繁重的数据处理任务面前,不仅要关注如何提升器件的存储能力,还应把目光放在如何降低存储器件的工作功耗上,光写入操作由于具有独特的低功耗特性将会在未来的存储器件中得到广泛应用。此外,随着电子产品在各类应用中柔性场景的增多,可柔性化应用也将是存储器件未来发展的一个主要方向。本文报道的低功耗、高密度的有机薄膜晶体管光存储器件为未来低功耗、适用于柔性场景且可大面积生产制备的多级存储器件的发展提供了一条全新的思路。

参 考 文 献:

- [1] CHEN X L, ZHOU Y, ROY V A L, *et al.* . Evolutionary metal oxide clusters for novel applications; toward high-density data storage in nonvolatile memories [J]. *Adv. Mater.* , 2018, 30(3):1703950-1-9.
- [2] SHIM J, PARK H Y, KANG D H, *et al.* . Electronic and optoelectronic devices based on two-dimensional materials; from fabrication to application [J]. *Adv. Electron. Mater.* , 2017, 3(4):1600364.
- [3] HONG H, LIU C, CAO T, *et al.* . Interfacial engineering of van der Waals coupled 2D layered materials [J]. *Adv. Mater. Interfaces* , 2017, 4(9):1601054.
- [4] JEONG U, TARSOLY G, LEE J, *et al.* . Interdigitated ambipolar active layer for organic phototransistor with balanced charge transport [J]. *Adv. Electron. Mater.* , 2019, 5(4):1800652-1-11.
- [5] 张华野, 张帆, 张猛, 等. 交联 PMMA 修饰的 PVA 绝缘层对 P3HT 有机场效应晶体管性能的影响 [J]. *发光学报*, 2018, 39(11):1542-1548.
ZHANG H Y, ZHANG F, ZHANG M, *et al.* . Influence of PVA insulator modified with cross-linked PMMA on the performance of P3HT OFETs [J]. *Chin. J. Lumin.* , 2018, 39(11):1542-1548. (in Chinese)
- [6] YI H T, PAYNE M M, ANTHONY J E, *et al.* . Ultra-flexible solution-processed organic field-effect transistors [J]. *Nat. Commun.* , 2012, 3:1259-1-7.
- [7] 刘东洋, 刘子洋, 王学会, 等. 利用混合有机空穴传输材料提升有机薄膜晶体管场效应迁移率 [J]. *发光学报*, 2014, 35(3):349-353.
LIU D Y, LIU Z Y, WANG X H, *et al.* . Improvement of the field effect mobility of OTFT by using organic hole transport material [J]. *Chin. J. Lumin.* , 2014, 35(3):349-353. (in Chinese)
- [8] HU D B, WANG X M, CHEN H P, *et al.* . High performance flexible nonvolatile memory based on vertical organic thin film transistor [J]. *Adv. Funct. Mater.* , 2017, 27(41):1703541.
- [9] 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]. *Adv. Funct. Mater.* , 2013, 23(44):5484-5493.
- [10] REN X C, CHAN P K L. 23 bits optical sensor based on nonvolatile organic memory transistor [J]. *Appl. Phys. Lett.* , 2014, 104(11):113302-1-5.
- [11] HU D B, ZHANG G C, YANG H H, *et al.* . High-performance nonvolatile organic transistor memory using quantum dots-

- based floating gate [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 2017,64(9):3816-3821.
- [12] VAN THO L, BAEG K J, NOH Y Y. Organic nano-floating-gate transistor memory with metal nanoparticles [J]. *Nano Converg.*, 2016,3:10-1-7.
- [13] CHENG S W, HAN T, HUANG T Y, *et al.*. Novel organic phototransistor-based nonvolatile memory integrated with UV-sensing/green-emissive aggregation enhanced emission (AEE)-active aromatic polyamide electret layer [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018,10(21):18281-18288.
- [14] YANG Y, HE Y L, NIE S, *et al.*. Light stimulated IGZO-based electric-double-layer transistors for photoelectric neuromorphic devices [J]. *IEEE Electron. Device Lett.*, 2018,39(6):897-900.
- [15] ATABAKI A H, MOAZENI S, PAVANELLO F, *et al.*. Integrating photonics with silicon nanoelectronics for the next generation of systems on a chip [J]. *Nature*, 2018,556(7701):349-354.
- [16] LEE J D, KIM Y, KIM C M. Model for petahertz optical memory based on a manipulation of the optical-field-induced current in dielectrics [J]. *New J. Phys.*, 2018,20(9):093029-1-7.
- [17] SHIONO F, ABE H, NAGASE T, *et al.*. Optical memory characteristics of solution-processed organic transistors with self-organized organic floating gates for printable multi-level storage devices [J]. *Org. Electron.*, 2019,67:109-115.
- [18] LEYDECKER T, HERDER M, PAVLICA E, *et al.*. Flexible non-volatile optical memory thin-film transistor device with over 256 distinct levels based on an organic bicomponent blend [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2016,11(9):769-775.
- [19] PERNICE W H P, BHASKARAN H. Photonic non-volatile memories using phase change materials [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2012,101(17):171101.
- [20] ZHAI Y B, YANG J Q, ZHOU Y, MAO, *et al.*. Toward non-volatile photonic memory: concept, material and design [J]. *Mater. Horiz.*, 2018,5(4):641-654.
- [21] SONG J F, LUO X S, LIM A E J, *et al.*. Integrated photonics with programmable non-volatile memory [J]. *Sci. Rep.*, 2016,6:22616-1-7.
- [22] 王向华, 顾励, 张春雨, 等. 非对称结构诱导取向生长的有机半导体薄膜 [J]. *发光学报*, 2017,38(10):1314-1320.
WANG X H, GU X, ZHANG C Y, *et al.*. Directional growth of organic semiconductor film on asymmetric structure [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017,38(10):1314-1320. (in Chinese)
- [23] LEE D, HWANG E, LEE Y, *et al.*. Multibit MoS₂ photoelectronic memory with ultrahigh sensitivity [J]. *Adv. Mater.*, 2016,28(41):9196-9202.
- [24] XIE C, YOU P, LIU Z K, *et al.*. Ultrasensitive broadband phototransistors based on perovskite/organic-semiconductor vertical heterojunctions [J]. *Light Sci. Appl.*, 2017,6:e17023-1-9.
- [25] DAUS A, ROLDÁN-CARMONA C, DOMANSKI K, *et al.*. Metal-halide perovskites for gate dielectrics in field-effect transistors and photodetectors enabled by PMMA lift-off process [J]. *Adv. Mater.*, 2018,30(23):e1707412.
- [26] WANG W H, DU R X, GUO X T, *et al.*. Interfacial amplification for graphene-based position-sensitive-detectors [J]. *Light Sci. Appl.*, 2017,6:e17113-1-5.
- [27] WANG Y, LV Z Y, CHEN J R, *et al.*. Photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots for neuromorphic computing [J]. *Adv. Mater.*, 2018,30(38):1802883-1-9.
- [28] 薛战, 田丰收, 王庆贺, 等. 氧敏感性供体-受体共轭聚合物薄膜晶体管 [J]. *发光学报*, 2018,39(8):1136-1142.
XUE Z, TIAN F S, WANG Q H, *et al.*. Oxygen sensing characteristics of donor-acceptor conjugated polymer transistors of organic semiconductor film [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2018,39(8):1136-1142. (in Chinese)
- [29] DAI S L, WU X H, LIU D P, *et al.*. Light-stimulated synaptic devices utilizing interfacial effect of organic field-effect transistors [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2018,10(25):21472-21480.
- [30] CHEN J Y, CHIU Y C, LI Y T, *et al.*. Nonvolatile perovskite-based photomemory with a multilevel memory behavior [J]. *Adv. Mater.*, 2017,29(33):1702217-1-7.
- [31] ZHU Y B, LI Z Y, HAO Z, *et al.*. Optical conductivity-based ultrasensitive mid-infrared biosensing on a hybrid metasurface [J]. *Light Sci. Appl.*, 2018,7:67-1-11.
- [32] GUO Y L, DU C Y, DI C A, *et al.*. Field dependent and high light sensitive organic phototransistors based on linear asymmetric organic semiconductor [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2009,94(14):143303-1-3.
- [33] DYAKONOV V, FRANKEVICH E. On the role played by polaron pairs in photophysical processes in semiconducting

polymers [J]. *Chem. Phys.*, 1998, 227(1-2):203-217.

[34] LUTSYK P, JANUS K, MIKOŁAJCZYK M, *et al.*. Long-lived persistent currents in poly (3-octylthiophene) thin film transistors [J]. *Org. Electron.*, 2010, 11(3):490-497.

[35] SALA F, GABRYS R, DOLECEK L. Dynamic threshold schemes for multi-level non-volatile memories [J]. *IEEE Trans. Commun.*, 2013, 61(7):2624-2634.



何伟欣(1995 -),男,福建上杭人,硕士研究生,2017年于福州大学获得学士学位,主要从事基于有机薄膜晶体管功能器件的研究。

E-mail: 1211612331@qq.com



张国成(1981 -),男,湖北监利人,博士研究生,副教授,2007年于福州大学获得硕士学位,主要从事薄膜晶体管的研究。

E-mail: zgc@fjut.edu.cn