

文章编号:1007-2780(2018)06-0451-06

液晶栅介质场效应晶体管及突触行为模拟

张云峰, 葛 丰, 邱龙臻, 王晓鸿*

(特种显示技术国家工程实验室, 现代显示技术省部共建国家重点实验室培育基地,
合肥工业大学 光电技术研究院, 安徽 合肥 230009)

摘要:采用液晶 E7 作为栅介质, 聚异靛蓝噻吩乙烯噻吩(PII-TVT)作为半导体, 利用光刻/蚀刻技术制备了漏极-源极-栅极(D-S-G)共面的有机场效应晶体管器件, 并测试了晶体管性能, 对液晶作为栅介质应用于有机场效应晶体管进行研究。实验结果表明, 器件表现出比较特别的晶体管性能, 开关比达到 10^3 。通过光学显微镜观察发现, 施加栅极电压后液晶发生形变, 表明栅极电压对电极上的液晶分子的取向排列有较大影响。在施加脉冲栅压时, 沟道电流随着脉冲栅压时间的延长而增强。利用液晶分子在电场下发生极化和迟滞作用, 可一定程度上模拟突触的刺激时间依赖性。

关键词:液晶; 液晶栅介质有机场效应晶体管; 极化; 突触行为

中图分类号: TN141.9 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183306.0451

Liquid crystal-gated organic field-effect transistors and synaptic behavior simulation

ZHANG Yun-feng, GE Feng, QIU Long-zhen, WANG Xiao-hong*

(National Engineering Laboratory of Special Display Technology,
National Key Laboratory of Advanced Display Technology, Academy of
Opto-electronic Technology, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Novel organic field-effect transistor (OFET) devices with drain-source-gate (D-S-G) coplanar configuration are fabricated by using E7 liquid crystal as a gate insulator and PII-TVT as active layer, through typical photolithography/etching processes, in order to prepare an OFET with liquid crystal as the gate insulator. The transistor performance was measured and experimental results indicated that the device showed some special untypical transistor performance with I_{on}/I_{off} could be up to 10^3 . From optical microscope images, it was observed that the liquid crystal was deformed upon the applied gate voltage, which manifested that the gate voltage has a greater impact on the alignment of the liquid crystal molecules. When the pulse gate voltage is applied, the channel current increase with the time of pulse gate voltage. Therefore, the polarization and relaxation of liquid crystal mole-

收稿日期:2018-01-19; 修订日期:2018-02-07.

基金项目:国家自然科学基金(No.51573036; No.51703047); 中央高校基本科研业务费专项(No.JZ2017HGBZ0919)
Supported by National Natural Science Foundation of China(No.51573036; No.51703047); Fundamental
Research Funds for the Central Universities (No.Z2017HGBZ0919)

* 通信联系人, E-mail: xhwang11@hfut.edu.cn

cules under the electric field partially simulate the spike-time-dependent plasticity of synapse.

Key words: liquid crystal; LC-gated OFET; polarization; synaptic behavior

1 引言

有机场效应晶体管 (OFET) 因具有低成本、高柔韧性、材料选择广泛等独特性质^[1-2], 受到了广泛关注。大量研究发现, 影响 OFETs 性能的因素有很多, 如半导体的性质^[3]、制备工艺^[4]、电介质性质^[5]等。高介电常数的电介质通常可以降低器件的工作电压和阈值电压, 是 OFET 的研究重点之一。

迄今已有许多材料被运用于晶体管栅绝缘层。氧化硅 (SiO_x) 由于其高介电常数的特性被广泛应用于无机场效应晶体管中, 但氧化硅栅极的制备需要高温工艺 (>150 °C) 才能保证形成无缺陷的致密层^[7]。聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA), 透明氟树脂 CYTOP 等聚合物栅极绝缘层也受到了广泛研究^[5-10], 但是聚合物材料通常介电常数较低, 这导致了器件的工作电压和阈值电压较高。液晶是一类具有较高的介电常数的材料^[8], 但是至今对其应用于栅绝缘层却鲜有报道。

除了具有高介电常数外, 液晶材料还能够在电场作用下发生极化, 改变液晶分子的取向排列的特点。近来, 场效应晶体管 (OFET) 器件被创造性地用于模拟生物突触功能的人工突触。由于施加在栅电极上的电压脉冲可以调制源极和漏极之间的沟道电导, 因此可以实现模拟突触的作用^[11-14]。

Chen 和他的同事提出了一种基于碳纳米管晶体管的人工突触, 并展示了生物突触的学习、动态逻辑功能以及刺激时间依赖性 (spike-time-dependent plasticity, STDP)——即随刺激时间和频率的增加, 响应信号增强^[15]。将液晶运用于场效应晶体管, 利用液晶材料的极化作用将有可能实现电容变化, 从而能够实现模拟突触的作用。

本文采用液晶作为电介层材料制备了一种新型的液晶栅介质有机场效应晶体管 (LC-gated OFET)。用高介电常数的液晶 E7 作为栅绝缘层, 聚异靛蓝噻吩乙炔噻吩 (PII-TVT) 作为有源层, 通过光刻/蚀刻技术制备了漏极-源极-栅极 (D-S-G) 共面的 OFET, 研究了器件的电学性能。并利用液晶分子在电场作用下的极化作用, 模拟了神经元器件的刺激时间依赖性 (STDP)。

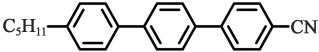
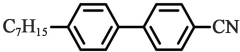
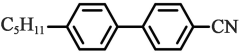
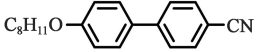
2 实验

2.1 试剂与仪器

石英玻璃购自合肥科晶公司; 十八烷基三氯硅烷 (OTS) 和聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 均购自 Sigma-Aldrich 公司; 光刻正胶购自北京信德公司; 液晶 E7 购自江苏合成显示科技有限公司, 组成成分及其结构式在表 1 中列出; PII-TVT 为本课题组合成的新型半导体材料, 结构式在图 1(b) 中列出。

表 1 液晶 E7 的组分及分子结构式

Tab.1 Constituents and molecular structure of E7

化学结构	所占比例/%
	8
	16
	25
	51

2.2 器件制备过程

器件的制备过程如下:将洗净的石英玻璃片 100 °C 热烘 1 min 后置于黄光下,在其表面滴满光刻正胶,以 3 500 r/min 的速度旋涂 40 s,之后,在 100 °C 热烘 10 min 使光刻胶充分干燥。使用具有三电极形状的掩模版对其掩膜,紫外曝光 5 s(紫外光波长为 365 nm,光强为 16 mJ/cm³)。将其取出放入显影稀释液内显影 15 s,再迅速移入去离子水中漂洗,氮气吹干。再将已图案化的石英玻璃片热蒸镀 30 nm 的金薄层。金薄层蒸镀好之后,用丙酮冲洗表面,将不需要的金以及光刻胶底层除去,这样便制备了漏-源-栅(D-S-G)电极(沟道长 20 μm,宽 1 000 μm)。将金电极用 OTS 处理,再以 4 000 r/min 旋涂 5 mg/mL PII-TVT 制备半导体层,并以 100 μm 的 PET 薄膜作为间隔层。之后使用探针针对栅极与源极之间的半导体进行擦除,灌入液晶 E7 制备液晶盒。

3 结果与讨论

3.1 液晶栅介质晶体管的电学性能

通过光刻、曝光、显影等一系列步骤制备共平面的漏-源-栅电极,再旋涂 PII-TVT 制备有源层,灌入液晶 E7 制备液晶盒,从而制备了一种新型的液晶栅介质 OFET,制备流程如图 1(a) 所示,制备的共平面液晶栅介质 OFET 结构如图 1(b) 所示。

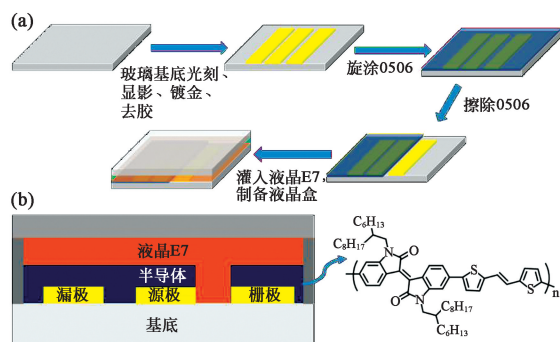


图1 (a)液晶栅介质 OFET 器件制备过程;(b)液晶栅介质 OFET 的器件结构和 PII-TVT 的结构式

Fig.1 (a) Preparation process of LC-gated OFET device; (b) Structure of LC-gated OFET device and molecular structure of PII-TVT

图 2(a)和图 2(b)分别为液晶栅介质 OFET (LC-gated OFET)的转移特性曲线和输出特性曲线。均表现出器件具有场效应晶体管性能,开关比达到 10³。图 2(c)和图 2(d)分别为 SiO₂ 栅介质 OFET 的转移特性曲线和输出特性曲线,表现出典型的 SiO₂ 栅介质晶体管的性能,开关比达到 10⁶。图 2(a)与图 2(c)存在显著不同,本文制备的液晶栅介质 OFET 的转移曲线表现出较大的顺时针方向迟滞,意味着在相同的栅电压下,正向扫描时的沟道电流小于逆向扫描,而图 2(c)则无明显迟滞。图 2(b)在高栅压(−80 V)下才会出现明显饱和区与线性区,而图 2(d)在较低栅压(−40 V)下便出现明显的饱和区与线性区。这一现象可能与液晶分子在电场下的极化有关,下文对此进行实验与分析。

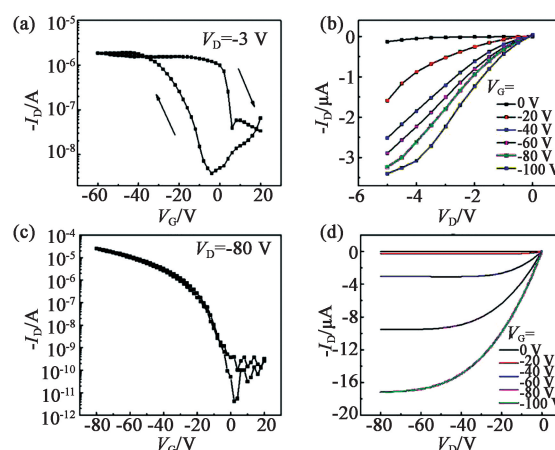


图2 液晶栅介质(a, b)和 SiO₂栅介质(c, d)的有机场效应晶体管器件的(a, c)转移特性曲线和(b, d)输出特性曲线

Fig.2 (a, c) Transfer curves and (b, d) output curves for (a, b) a LC-gated OFET device and (c, d) SiO₂ gate insulator OFET device

3.2 光学显微镜下的形貌

为了研究液晶电介质 OFET 的工作原理,我们利用光学显微镜观察液晶层的形貌。维持漏极和源极电压为 0 V,给栅极施加一个负向逐渐增大的电压。依次给栅极施加 0 V, −20 V, −40 V, −60 V 的电压,液晶层在光学显微镜下的形貌在图 3 中展示。明显看到,在栅压 0 V 时图 3(a),膜是平整均匀的,当栅压增大到 −20 V 时图 3(b),电极上的液晶与其周围的液晶的折射率发

生变化,随着栅压继续增大到 -60 V 图 3(d),这种趋势更为明显。这是因为在施加栅压下,电压诱使电极上的液晶分子极化,使其液晶分子的排列和取向发生变化,与周围的液晶分子形成不同的取向。栅压越大,液晶分子的这种极化作用越明显。

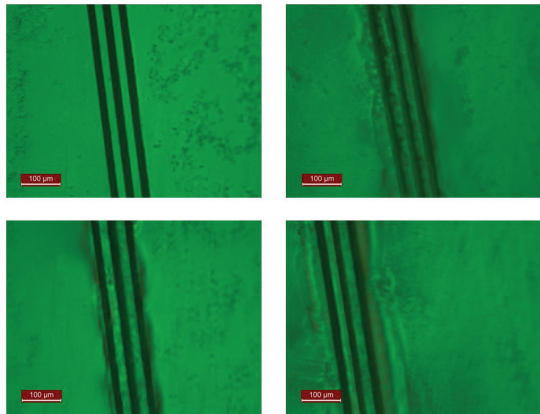


图 3 光学显微镜下,不同栅极电压对液晶分子排列的影响:(a) 栅压 0 V , (b) 栅压 -20 V , (c) 栅压 -40 V , (d) 栅压 -60 V . 图中黑色的是电极

Fig. 3 Optical microscope image for the liquid crystal gated OFET device with different gate voltage: (a) 0 V , (b) -20 V , (c) -40 V , (d) -60 V . Black is the electrode.

3.3 液晶栅介质晶体管的刺激时间依赖性

基于液晶电介质 OFET 的特性,利用液晶分子在电场下的极化和迟滞效应,有效地模拟了生物突触的 STDP 效应。图 4 展示了不同栅绝缘层材料以及不同栅压脉冲对沟道电流的影响。在栅极上施加 -30 V 的脉冲电压,周期均为 2 s 。图 4 a 和图 4 b 是以 300 nm 厚的 SiO_2 为栅介质的 PII-TVT 的 OFET 器件测试得到的沟道电流变化,施加 -30 V 的脉冲栅压后,得到的沟道开态电流和关态电流是稳定的,因为 SiO_2 栅介质不会因为电压的改变而发生偶极变化,也就不会发生电容的变化。图 4 c 和图 4 d 为液晶 E7 为栅介质的 OFET 器件测试得到的沟道电流变化,得到的沟道电流的绝对值随时间的增加呈现上升的趋势。脉冲栅压对于液晶电介质场效应晶体管,具有时间依赖的增益作用。随着脉冲施加时间的延

长,沟道电流逐渐增强,即有刺激时间依赖性。当 -30 V 的脉冲电压施加给液晶分子时,液晶分子随着电场方向产生极化,进行有序排列,OFET 器件产生沟道电流;当电压为零时,虽然没有外电场,但液晶分子由于其原有的有序度,无法立即恢复原有的无序状态,沟道仍然有电流;再次施加电压,在一定的有序液晶的基础上,更多的液晶分子被极化,产生更大的电容,因此 OFET 的沟道电流进一步增加。我们发现图 4(d)的沟道电流变化趋势比图 4(c)的更明显,这是因为图 4(d)的占空比为 $2:3$ 而图 4(c)的占空比为 $1:4$,也就是说,在同一周期内后者的施加栅压时间更长,这导致了更多液晶分子被极化,产生了更大的电容和沟道电流,所以图 4(d)的沟道电流变化趋势更明显。这种沟道电流随着施加脉冲栅压的延长而增加的特点,与生物突触的随着刺激时间的延长而响应信号增强的特点——突触的刺激时间依赖性 (spike-time-dependent plasticity) 相似,这为制备人工突触、实现人工神经网络提供了有效的途径。

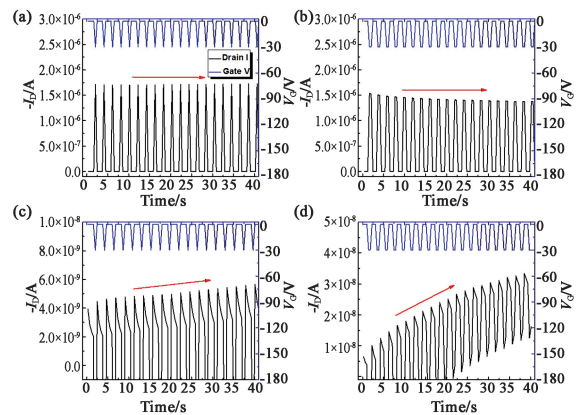


图 4 (a,b)不同栅极电压脉冲对 SiO_2 栅介质 OFET 沟道电流的影响:(a)脉冲周期 2 s ,占空比 $1:4$, (b)周期 2 s ,占空比 $2:3$; (c,d)不同栅极电压脉冲对液晶栅介质 OFET 沟道电流的影响: (c)周期 2 s ,占空比 $1:4$, (d)周期 2 s ,占空比 $2:3$ 。

Fig. 4 Transient response of transistors measured by applying pulse voltage on gate electrode, the period is 2 s : (a) SiO_2 gate insulator, duty cycle is $1:4$; (b) SiO_2 gate insulator, duty cycle is $2:3$; (c) liquid crystal E7 gate insulator, duty cycle is $1:4$; (d) liquid crystal E7 gate insulator, duty cycle is $2:3$.

4 结 论

利用液晶 E7 作为栅介质,通过光刻/蚀刻的方法制备漏极-源极-栅极(D-S-G)共平面的液晶栅介质 OFET(LC-gated OFET)。光学显微镜观测表明,在栅极施加不同的电压,会使液晶 E7 发

生不同程度的极化,电压越大,极化程度越明显。这种液晶电介质,在施加脉冲栅压时,利用液晶分子极化和迟滞作用,能够有效地为 OFET 模拟突触的刺激时间依赖性(STDP)。这种晶体管丰富了仿生电子器件,有望为实现人工神经网络和脑计算提供新的途径。

参 考 文 献:

- [1] 王晓鸿,邱龙臻.基于聚噻吩/聚己内酯共混物的有机薄膜晶体管[J].发光学报,2012,33(8):857-862.
WANG X H, QIU L Z. Organic thin film transistors based on blends of poly (3-hexylthiophene) and polycaprolactone [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2012, 33(8): 857-862. (in Chinese)
- [2] 庞博,葛丰,邱龙臻.聚 3-己基噻吩-*b*-聚十六烷氧基联烯嵌段聚合物的制备及其场效应性能[J].发光学报,2016,37(6):669-675.
PANG B, GE F, QIU L Z. Synthesis and field effect transistor performance of poly(3-hexylthiophene)-*b*-poly(hexadecyloxyallene) blockpolymer [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2016, 37(6): 669-675. (in Chinese)
- [3] 崔秋红,侯延冰.共轭分子自身结构转变对结晶形貌及电学性能的影响[J].液晶与显示,2017,32(6):461-466.
CUI Q H, HOU Y B. Effects of molecular topological transformation on crystallization and electric properties [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2017, 32(6): 461-466. (in Chinese)
- [4] 林广庆,李鹏,王明晖,等.表面修饰制备高性能薄膜晶体管[J].液晶与显示,2013,28(4):490-494.
LIN G Q, LI P, WANG M H, *et al.* Preparation of high-performance organic thin-film transistor through surface modification [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Disp.*, 2013, 28(4): 490-494. (in Chinese)
- [5] VERES J, OGIER S, LLOYD G. Gate insulators in organic field-effect transistors [J]. *Chem. Mater.*, 2004, 16(23): 4543-4555.
- [6] WALTER S R, YOUN J, EMERY J, *et al.* In-situ probe of gate dielectric-semiconductor interfacial order in organic transistors: origin and control of large performance sensitivities [J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 2012, 134(28): 11726-11733.
- [7] VERES J, OGIER S D, LEEMING S W, *et al.* Low-*k* insulators as the choice of dielectrics in organic field-effect transistors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2003, 13(3): 199-204.
- [8] HISAKADO Y, KIKUCHI H, NAGAMURA T, *et al.* Large electro-optic kerr effect in polymer-stabilized liquid-crystalline blue phases [J]. *Adv. Mater.*, 2005, 17(1): 96-98.
- [9] UKAH N B, GRANSTROM J, GARI R R S, *et al.* Low-operating voltage and stable organic field-effect transistors with poly (methyl methacrylate) gate dielectric solution deposited from a high dipole moment solvent [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2011, 99(24): 243302.
- [10] KALB W L, MATHIS T, HAAS S, *et al.* Organic small molecule field-effect transistors with Cytop™ gate dielectric: eliminating gate bias stress effects [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2007, 90(9): 092104.
- [11] CHANG T, JO S H, LU W, *et al.* Term memory to long-term memory transition in a nanoscale memristor [J]. *ACS Nano*, 2011, 5(9): 7669-7676.
- [12] WANG Z Q, XU H Y, LI X H, *et al.* Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous InGaZnO memristor [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2012, 22(13): 2759-2765.
- [13] LIU Y H, ZHU L Q, FENG P, *et al.* Freestanding artificial synapses based on laterally proton-coupled transistors on chitosan membranes [J]. *Adv. Mater.*, 2015, 27(37): 5599-5604.
- [14] JOSBERGER E E, DENG Y X, SUN W, *et al.* Two-terminal protonic devices with synaptic-like short-term de-

- pression and device memory [J]. *Adv. Mater.*, 2014, 26(29): 4986-4990.
- [15] KIM K, CHEN C L, TRUONG Q, *et al.* A carbon nanotube synapse with dynamic logic and learning [J]. *Adv. Mater.*, 2013, 25(12): 1693-1698.

作者简介:张云峰(1994—),男,山西忻州人,2015 年于合肥工业大学获得学士学位,主要从事机有机半导体合成和性能研究。E-mail: yunf_zh@163.com

王晓鸿(1981—),女,山东临朐人,助理研究员,2006 年于中国科学技术大学获得硕士学位,2016 年于合肥工业大学获得博士学位,主要从事有机薄膜晶体管器件的研究。E-mail: xhwang11@hfut.edu.cn