

绝缘层等离子处理对有机薄膜晶体管突触性能的影响

饶智超, 汪秀梅, 刘亚倩, 李恩龙, 俞初坚, 陈惠鹏, 张国成

引用本文:

饶智超, 汪秀梅, 刘亚倩, 等. 绝缘层等离子处理对有机薄膜晶体管突触性能的影响[J]. *液晶与显示*, 2021, 36(8): 1093–1100.
RAO Zhi-chao, WANG Xiu-mei, LIU Ya-qian, et al. Impact of plasma treatment of dielectric layer on synaptic performance of organic thin film transistors[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2021, 36(8): 1093–1100.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/CJLCD.2021-0029>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

激光对固态电解质金属氧化物薄膜晶体管性能的影响

Influence of laser irradiation on solid–electrolyte based metal–oxide thin film transistors performance

液晶与显示. 2020, 35(11): 1103–1109 <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203511.1103>

薄膜晶体管中绝缘层的研究现状与趋势

Research status and trends of insulating layer in thin–film transistor

液晶与显示. 2016, 31(4): 380–385 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163104.0380>

绝缘层材料及结构对薄膜晶体管性能的影响

Effect of insulating layer material and structure on performance of thin film transistors

液晶与显示. 2017, 32(5): 344–351 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173205.0344>

基于不同自组装单层的酞菁氧钒薄膜晶体管

Vanadyl phthalocyanine thin film transistors based on different self–assembled monolayer

液晶与显示. 2015, 30(1): 57–63 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153001.0057>

溶液法氧化物薄膜晶体管的印刷制备

Oxide semiconductor thin film transistor device print fabrication based on solution method

液晶与显示. 2017, 32(6): 443–454 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20173206.0443>

文章编号:1007-2780(2021)08-1093-08

绝缘层等离子处理对有机薄膜晶体管突触性能的影响

饶智超¹, 汪秀梅¹, 刘亚倩¹, 李恩龙¹, 俞初坚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 350102;

2. 福建工程学院 微电子技术研究中心, 福建 福州 350108)

摘要:在冯·诺依曼架构陷入瓶颈的时代背景下,受生物神经启发而演化的人工突触器件获得了广泛关注,加速了人们迈向人工智能时代的脚步。本文通过在 P 型有机薄膜晶体管(OTFT)绝缘层 SiO₂ 表面进行等离子处理,探究了界面处理引入羟基对 OTFT 突触性能的影响。具体对绝缘层不同等离子处理时长的 OTFT 进行了突触行为的模拟和对比,包括兴奋性后突触后电流(EPSC)、双脉冲易化(PPF)、长程可塑性(LTP)等。突触特性的产生是由于等离子处理给半导体层/绝缘层界面引入的羟基对电子进行了捕获。而随着等离子处理时间的增加,绝缘层表面更多的羟基使得 OTFT 表现出更强的记忆和保持能力、更高的线性度,更有利于其在类脑学习、神经计算等方面的应用。

关键词:有机薄膜晶体管;人工突触;表面修饰;等离子处理

中图分类号:TN321+.5;TH691.9 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/CJLCD.2021-0029

Impact of plasma treatment of dielectric layer on synaptic performance of organic thin film transistors

RAO Zhi-chao¹, WANG Xiu-mei¹, LIU Ya-qian¹, LI En-long¹, YU Reng-jian¹,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 350002, China;*2. *Research Center for Microelectronics Technology, Fujian University of Technology, Fuzhou 350108, China)*

Abstract: Under the background of the bottleneck of V_{on} Neumann architecture, artificial synaptic devices inspired by biological nerve have gained extensive attention to accelerate people's steps towards the era of artificial intelligence. In this study, the effect of hydroxyl group on the synaptic performance of p-type organic thin film transistor (OTFT) is investigated by plasma treatment on the surface of SiO₂ dielectric layer. The synaptic behaviors of OTFTs with different plasma treatment time are simulated and compared, including Excitatory Post-Synaptic Current(EPSC), Paired Pulse

收稿日期:2021-01-30;修订日期:2021-03-14.

基金项目:福建省自然科学基金(No.2017J05097, No.2018J01535);科研启动基金(No.GY-Z20041)

Supported by Natural Science Foundation of Fujian Province(No.2017J05097, No.2018J01535); Research Startup Foundation (No.GY-Z20041)

* 通信联系人, E-mail: zgc@fjut.edu.com

Facilitation (PPF) and Long-term Potentiation (LTP). The generation of synaptic properties is due to the electrons being trapped by the hydroxyl groups introduced into the semiconductor layer/ dielectric layer interface by plasma treatment. With the increase of plasma treatment time, more hydroxyl groups on the surface of the dielectric layer make OTFTs exhibit better memory and retention capabilities, and higher linearity, which is more conducive to its application in brain-like learning and neural computing.

Key words: organic thin film transistor; artificial synapse; surface modification; plasma treatment

1 引言

过去几十年里,基于冯·诺依曼架构的数字计算机在科学计算方面取得了巨大的成功,带领人们走进了信息时代。但随着集成电路领域的飞速发展,受限存储器和处理器物理上独立的特性,基于冯·诺依曼架构的数字逻辑计算即将陷入瓶颈,不能再满足未来的计算需求^[1]。不同于冯·诺依曼架构下存算分离的逻辑电路,人脑可以以惊人的效率高速且并行地工作^[2]。在这样的启发下,模拟人脑神经系统的神经形态计算硬件成为了一个新的研究热点,以图实现同时执行信息的学习、存储和传输等多项任务^[3-4]。基于神经形态计算的人工神经形态器件可分为人工突触和神经元器件两大类,这当中人工突触就是神经网络的一个重要组成部分。通过改变突触的权重,人工突触器件可以有效地进行信号的传递,这使其得到了广泛的研究^[5-7]。

到目前为止,已经有各种基于神经形态计算的人工突触器件得到了开发,包括两端的电阻随机存储器^[8]、相变存储器^[9]、忆阻器^[10]以及三端的突触晶体管^[11-13]等。不幸的是,两端的突触器件虽可以对生物突触的行为进行有效地模拟,但由于其信号在传输与处理上存在时间差,因而不能够同时实现信息传递与学习^[14]。而三端结构的突触晶体管凭借着栅极的作用,能够在信号传输的过程中进行调控、处理,可以表现出与生物突触更为接近的特性。此外,基于有机薄膜晶体管(OTFT)的人工突触器件由于其具有低温加工、可大面积溶液法制造的特点,并且有着良好的机械柔性和生物兼容性,受到了极大的关注^[15-17]。

有机薄膜晶体管要实现对生物突触功能的模拟,关键在于如何调控沟道的载流子浓度,引

起沟道电导的变化(对应于生物突触权重的变化)。而在有机薄膜晶体管中,器件的载流子传输可以通过修饰半导体层和绝缘层之间的界面得到有效调节^[18-19],因此基于界面处理来改善突触性能的突触晶体管得到了开发^[20]。Dai 等利用有机薄膜晶体管的界面电荷捕获效应,通过在有机半导体/绝缘层界面插入 PAN 增加界面处的电荷捕获效果,成功制备了有机光突触晶体管^[21]。Wan 等利用低温原子层沉积的方法,在生成的 Al_2O_3 绝缘层中产生更多的氧空位缺陷,以达到在电压刺激下捕获载流子的目的,从而实现突触行为的模拟^[22]。因此,通过合适的半导体/绝缘层界面处理,可以有效地控制半导体层/绝缘层界面对沟道载流子的捕获,赋予有机薄膜晶体管以突触特性。

本文制备了以 P 型有机半导体 IDT-BT 为有源层的有机薄膜晶体管,通过对绝缘层进行不同时间的 N_2/O_2 等离子处理(0, 5, 10, 20 min),探究了等离子处理对有机薄膜晶体管突触性能的影响。我们在经过等离子处理的 OTFT 上成功地模拟出了兴奋性后突触后电流(EPSC)、双脉冲易化(PPF)、长程可塑性(LTP)等生物突触的基本特征。同时,通过对比发现,更长的等离子处理时间会给 SiO_2 绝缘层引入更多的羟基,造成更大程度的电子捕获,进而表现出了更好的突触可塑性。

2 实验

2.1 材料与测试

本实验所采用的有源层材料为 P 型半导体共聚物 IDT-BT($M_w < 100 \text{ k}$, 多分散指数 < 3), 来自于 Derthon Optoelectronic Materials Sci. Tech. Co., Ltd. 在沉积之前, IDT-BT 以 5 mg/mL 的比例溶解于氯苯溶液中,并静置在恒温加

热台上以 60 °C 加热溶解 2 h。

有机薄膜晶体管的电学性能测试以及突触行为模拟等均采用安捷伦 Keysight B2902A 半导体参数分析仪进行。接触角的测试采用的是 Kino SL200KS 设备。

2.2 有机薄膜晶体管的制备

本文制备了基于底栅顶接触结构的有机薄膜晶体管。重掺杂的硅片作为基底,同时用作栅极,其上覆盖有厚度为 100 nm 的致密二氧化硅层作为绝缘层使用。硅片分别在丙酮、异丙醇以及去离子水中进行清洗,再用高纯度的氮气吹干。之后,对清洗后的硅片进行不同时间的 N_2/O_2 等离子处理(0, 5, 10, 20 min),其中等离子处理的 N_2 流量和 O_2 流量分别为 322 mL/min 和 138 mL/min,电压为 620 V,电流为 200 mA,射频频率 13.56 MHz。接着,通过旋涂工艺在处理后的硅片上沉积 IDT-BT 有机半导体薄膜(旋涂的转速为 1 000 r/min,时间为 60 s)。旋涂操作完成后,再将硅片放置于 100 °C 的加热台进行 10 min 的加热退火以完成半导体层的制备。最后,通过掩膜版以真空热蒸发的方式在半导体层上蒸镀上 50 nm 厚的金,完成源、漏电极的制备。

3 结果与讨论

3.1 有机薄膜晶体管的电学性能

在传统有机薄膜场效应晶体管中,通常希望绝缘层可以有较小的表面粗糙度、尽可能少的界面陷阱密度,以减少载流子在半导体层/绝缘层界面处被捕获的概率,提高电荷传输效率,从而得到稳定的电学性能。但对于有机突触晶体管而言,半导体层/绝缘层界面处被捕获的电荷,如果能以缓慢的速度释放,就能够导致动态变化的沟道电流,这就非常类似于生物突触权重的变化。换言之,在外界刺激下,器件可以展现出动态变化的沟道电导(对应于生物突触权重),就极有可能模拟出生物突触的行为。

本次实验制备的基于底栅顶接触的有机薄膜晶体管如图 1 所示,其中绝缘层为 SiO_2 ,半导体层为 P 型材料 IDT-BT。为了探究界面捕获对于有机薄膜晶体管突触性能的改变和影响,我们对 SiO_2 绝缘层进行了 5, 10, 20 min 的等离子处理,以对比它们之间电学性能以及突触特性的差异。

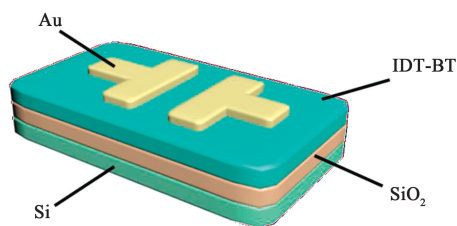


图 1 有机薄膜晶体管结构图

Fig. 1 Schematic structure of the organic thin film transistor

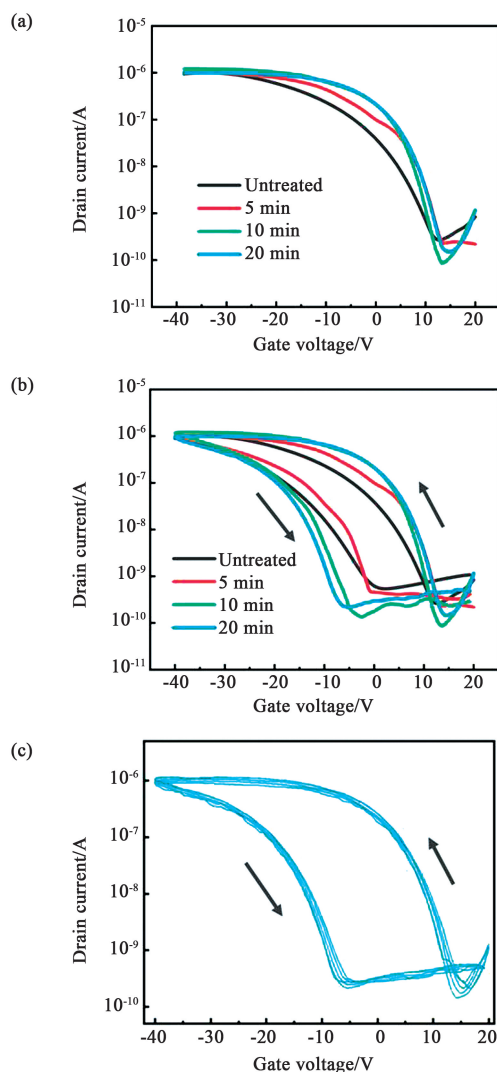


图 2 不同等离子处理时间的有机薄膜晶体管的 (a) 转移曲线和 (b) 双扫回滞曲线; (c) 等离子处理 20 min 器件的连续 5 次双扫回滞曲线。

Fig.2 (a) Transfer curves and (b) double sweep hysteresis curves of organic thin film transistors with different plasma treatment time; (c) Five successive double sweep hysteresis curves of the device with plasma treatment for 20 min.

图 2(a)为绝缘层未处理及等离子处理 0, 5, 10, 20 min 的有机薄膜晶体管的转移特性曲线。从图中可以看出, 四者之间的开关比差异并不大, 但经过等离子处理的晶体管的阈值电压有向右偏的趋势。而在图 2(b)的双扫回滞曲线中, 4 个器件显示出了较大的区别, 经过等离子处理的晶体管的曲线展现出了比未处理的晶体管更加明显的迟滞特性, 形成了更大的记忆窗口, 并且随着等离子处理时间的增加, 窗口的范围也在增加。此外, 我们对等离子处理 20 min 的薄膜晶体管进行了连续 5 次的双扫(图 2(c)), 曲线保持着较为一致的记忆窗口, 体现了稳定的迟滞特性。

等离子处理给该有机薄膜晶体管带来了更大迟滞的原因, 在于其给绝缘层界面引入了更大数量的羟基。我们对 4 种处理情况下的 SiO_2 绝缘层进行了接触角测试, 测试结果如图 3 所示。在未处理的情况下, 去离子水与绝缘层的接触角为 44.807° , 而在经过 5 min 等离子处理之后, 接触角发生了明显减小, 下降到 32.099° 。而随着等离子处理时间的增加, 处理 10, 20 min 的绝缘层的接触角下降得更多, 处理 20 min 的 SiO_2 的接触角仅为 19.252° , 绝缘层表面的亲水性得到了大幅提升。这证明了通过不同时间的等离子处理, SiO_2 表面的羟基数量得到了显著提升。

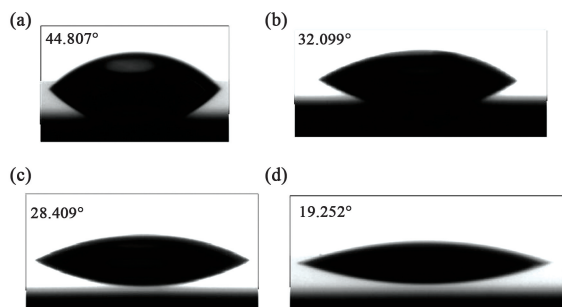


图 3 去离子水在不同等离子处理时间的 SiO_2 表面的接触角图。(a) 未处理; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 20 min。

Fig.3 Contact angle diagram of deionized water on SiO_2 surface at different plasma treatment time. (a) Untreated; (b) 5 min; (c) 10 min; (d) 20 min.

对于常规的有机薄膜晶体管, 绝缘层表面过多的羟基会影响载流子的传输, 增大器件的迟滞现象。因此往往科研人员会设法降低绝缘层表面的羟基数量, 如通过 OTS 处理使甲硅烷基键合到

SiO_2 表面, 产生一层坚固的自组装层, 减小 SiO_2 表面的羟基, 提高晶体管性能^[23]。但对于有机突触晶体管则不然, 更大数量的羟基将有利于突触功能的实现。如图 4(a)所示, 当给晶体管栅极施加正电压时, 受到电场的作用, 半导体层中的电子会向下方的半导体/绝缘层界面移动。而绝缘层表面的羟基对于半导体沟道中的电子具有捕获能力^[24], 因此即使此时将正电压去除或施加负电压, 部分的电子依然会被羟基捕获不能立刻回到沟道中(图 4(b))。而这些电子被捕获在基团中不仅无法与沟道中的空穴复合, 同时还会在自身周围感应出空穴, 这就导致了沟道中空穴浓度的增加。对于多子为空穴的 P 型半导体而言, 其沟道电流(电导)会得到增加, 导致阈值电压的右偏以及记忆窗口的增加。这种捕获并缓慢释放载流子的趋势对于实现突触行为的模拟十分重要。

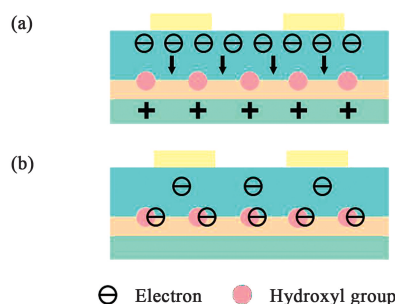


图 4 器件工作机理。(a)施加正栅压时; (b)电压消失时。

Fig.4 Working mechanism. (a) When a positive gate voltage is applied; (b) When the voltage disappears.

3.2 有机薄膜晶体管的突触行为模拟

图 5(a)是生物突触的示意图, 它由突触前膜、突触间隙以及突触后膜组成, 是在两个神经元之间传递神经脉冲的结构。当神经冲动到达突触前神经元时, 突触囊泡当中的神经递质会在 Ca^{2+} 离子的作用下从突触前膜中释放出来。然后化学神经递质通过突触间隙进行扩散, 之后与突触后膜上的受体进行结合, 并最终在突触后神经元中诱导兴奋性突触后电流 (Excitatory Post Synaptic Current, EPSC)^[25]。而如图 5(b)所示, 我们通过施加幅度为 20 V, 脉冲宽度为 60 ms 的电压脉冲对 4 种处理的有机晶体管分别进行了 EPSC 响应的模拟。可以发现, 对于没有等离子

处理过的晶体管,并没有产生明显的 EPSC 响应。尽管该晶体管的双扫曲线具备一定的回滞特性,但那是在电压作用下绝缘层界面缺陷所导致的。当电压消失后,界面缺陷没能对载流子形成有效捕获,载流子会迅速回到沟道中。因此,当所给脉冲消失之后,该器件的电流就急速衰减回接近初始状态的水平,表明其并不具有突触特性。而进行过等离子处理的 3 个晶体管,都可以看到明显的 EPSC 响应,并且随着等离子时间的增加,电流的衰减速度逐渐减缓,衰减之后的电流大小有明显提高。这是因为更长时间的等离子处理引入了更多的羟基产生了更多的捕获,进而造成了更慢的电流衰减。

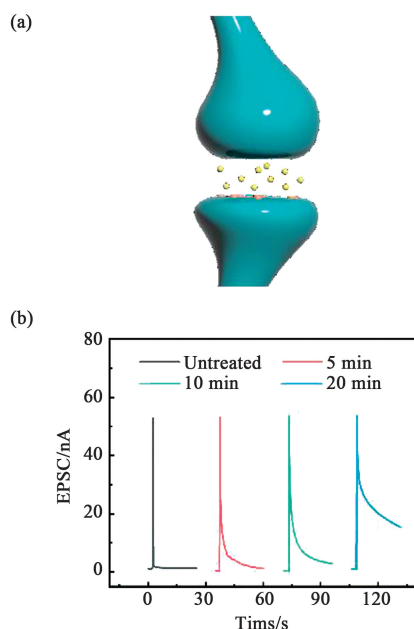


图5 (a)生物突触示意图;(b)不同等离子处理时间的有机薄膜晶体管的 EPSC 响应。

Fig. 5 (a) Schematic diagram of a biological synapse; (b) EPSC responses of organic thin film transistors with different plasma treatment time.

除了 EPSC 响应,突触的可塑性也是非常重要的一个特征,它对于学习、记忆以及信息加工至关重要。可塑性根据持续时间可以分为短程可塑性(Short Term Plasticity, STP)以及长程可塑性(Long Term Plasticity, LTP)。

双脉冲易化(Paired Pulse Facilitation, PPF)是 STP 的一种典型形式。它指的是当神经元快速且连续接受到两个刺激时,可以观察到第二脉

冲引起的 EPSC(A_2)大于第一脉冲引起的 EPSC(A_1)的现象。我们通过施加连续两个电压脉冲(20 V, 60 ms, 脉冲间隔时间为 30 ms)在经过等离子处理的 3 个晶体管上模拟出了同样的行为。与先前的 EPSC 响应的情况一样,经过 20 min 等离子处理的晶体管展现出了最显著的 PPF 现象(图 6(a))。 A_2 与 A_1 的比值被定义为 PPF 指数。该器件的 PPF 指数可以达到 187%,而处理 5 min 和 10 min 的晶体管分别为 164%和 175%。器件的这种 PPF 现象是因为施加第一个脉冲后绝缘层界面羟基所捕获的电子还没有完全释放,第二个脉冲就已经来到,导致了更多电子被捕获,进而提升了第二次的 EPSC 响应。进一步地,我们测试了不同脉冲间隔时间 Δt_{pre} 下器件的 PPF 指数变化,如图 6(b)所示。随着 Δt_{pre} 的增加,三者的 PPF 指数变化表现出一致的指数式下降规律,这同样与生物突触一致。

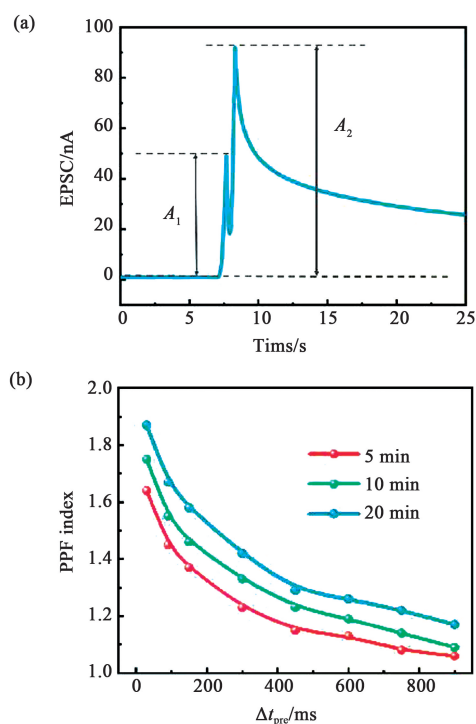


图6 (a)等离子处理 20 min 的有机薄膜晶体管的 PPF 响应;(b)不同等离子处理时间的有机薄膜晶体管的 PPF 指数与 Δt_{pre} 的关系。

Fig. 6 (a) PPF response of the organic thin film transistor treated with plasma for 20 min; (b) PPF index of organic thin film transistors with different plasma treatment time as a function of Δt_{pre} .

相比 STP, 突触的长程可塑性(LTP)可以在外界刺激下将权重的变化保持相对持久的时间, 这也是长期记忆以及学习的基础。本文同样对等离子处理的有机薄膜晶体管进行了长程可塑性的研究。我们给器件施加了连续 30 个电压脉冲(20 V, 60 ms, 脉冲间隔时间为 30 ms)以观察 EPSC 的变化。如图 7(a)展示了等离子处理 20 min 的晶体管经过 30 个正脉冲后的响应。显然, 随着脉冲数的增加, EPSC 响应也在不断增加, 而在脉冲结束之后, 其 EPSC 缓慢衰减, 并且保持在比较高的水平, 表现出类似于长程记忆的特性。图 7(b)展示了 3 个器件在 30 个脉冲后的 EPSC 水平。三者的 EPSC 的峰值以及记忆水平都相比之前少脉冲时有显著提升, 同时, 绝缘层界面具有更多羟基的晶体管依然展现出更高的累积响应, 体现了等离子处理对该有机薄膜晶体管长程可塑性的

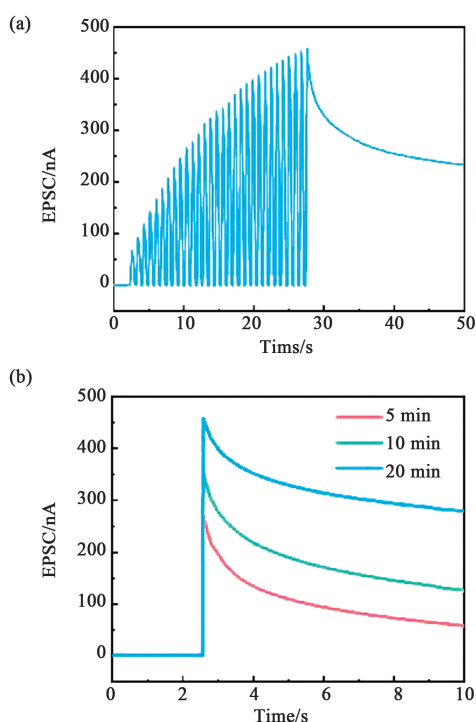


图 7 (a)对等离子处理 20 min 的有机薄膜晶体管施加 30 个突触前脉冲的 EPSC 响应;(b)不同等离子处理时间的有机薄膜晶体管在 30 个突触前脉冲刺激后的 EPSC 响应。

Fig.7 (a) EPSC response of 30 presynaptic spikes to the organic thin film transistor treated with plasma for 20 min; (b) EPSC response of organic thin film transistors with different plasma treatment time after 30 presynaptic spikes stimulation.

调控。

在对比了 3 个器件的长程可塑性后, 我们又对它们施加了连续 20 个为正脉冲(5 V, 60 ms) 20 个负脉冲(-5 V, 60 ms), 以模拟突触的长程增强(Long-Term Potentiation, LTP)和长程抑制(Long-Term Depression, LTD)。如图 8 所示, 我们提取了每个电压脉冲后的响应电流的峰值, 以观察突触器件在更新权重过程中的线性度。良好的线性度意味着更大、更稳定的电导变化, 这对于神经计算至关重要^[26]。从图 8 可以看出, 20 min 等离子处理的器件的线性度相比处理 5, 10 min 的器件有了明显提升, 这说明更久的等离子处理时间, 有助于改善有机薄膜晶体管的线性度, 提升了在神经计算领域的应用潜力。

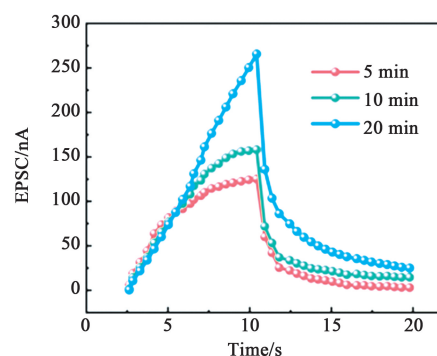


图 8 施加 20 个正脉冲和 20 个负脉冲后不同等离子处理时间的有机薄膜晶体管的增强和抑制特性

Fig.8 Potentiation and depression properties of organic thin film transistors with different plasma treatment time after applying 20 positive pulses and 20 negative pulses

4 结 论

本文通过对 SiO_2 绝缘层进行等离子处理, 成功地在以 IDT-BT 为有源层材料的有机薄膜晶体管上实现了突触行为模拟, 包括 EPSC、PPF、LTP 等典型突触特征。同时, 通过对比不同时间的等离子处理的有机薄膜晶体管, 探究了绝缘层界面羟基数量对于有机薄膜晶体管突触行为的影响。实验结果表明, 更长时间的等离子处理, 给绝缘层界面引入了更多的羟基, 基于羟基对于电子的捕获, 处理时间为 20 min 的有机薄膜晶体管在器件

迟滞、衰减时间以及突触可塑性上都优于处理时间为 5 min 和 10 min 的晶体管。我们的工作证实了对绝缘层进行等离子处理有助于提升有机半导体的突触性能。

参 考 文 献:

- [1] ZIDAN M A, STRACHAN J P, LU W D. The future of electronics based on memristive systems [J]. *Nat. Electron.*, 2018, 1(1): 22-29.
- [2] WALDROP M M. Computer modelling: brain in a box [J]. *Nature*, 2012, 482(7386): 456-458.
- [3] PREZIOSO M, MERRIKH-BAYAT F, HOSKINS B D, *et al.* Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors [J]. *Nature*, 2015, 521(7550): 61-64.
- [4] SUN J, OH S, CHOI Y, *et al.* Optoelectronic synapse based on IGZO-alkylated graphene oxide hybrid structure [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(47): 1804397.
- [5] 杨倩,杜世远,边锐.激光对固态电解质金属氧化物薄膜晶体管性能的影响[J].*液晶与显示*, 2020, 35(11): 1103-1109.
YANG Q, DU S Y, BIAN R. Influence of laser irradiation on solid-electrolyte based metal-oxide thin film transistors performance [J]. *Chin. J. Liq. Cryst. Displays*, 2020, 35(11): 1103-1109. (in Chinese)
- [6] 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.
- [7] LV Z Y, CHEN M, QIAN F S, *et al.* Mimicking neuroplasticity in a hybrid biopolymer transistor by dual modes modulation [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2019, 29(31): 1902374.
- [8] BERCO D. Rectifying resistive memory devices as dynamic complementary artificial synapses [J]. *Front. Neurosci.*, 2018, 12: 755.
- [9] KUZUM D, JEYASINGH R G D, LEE B, *et al.* Nanoelectronic programmable synapses based on phase change materials for brain-inspired computing [J]. *Nano Lett.*, 2012, 12(5): 2179-2186.
- [10] SHI C Y, LAN J L, WANG J J, *et al.* Flexible and insoluble artificial synapses based on chemical cross-linked wool keratin [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2020, 30(45): 2002882.
- [11] QIAN C, CHOI Y, CHOI Y J, *et al.* Oxygen-detecting synaptic device for realization of artificial autonomic nervous system for maintaining oxygen homeostasis [J]. *Adv. Mater.*, 2020, 32(34): 2002653.
- [12] SHARBATI M T, DU Y H, TORRES J, *et al.* Low-power, electrochemically tunable graphene synapses for neuromorphic computing [J]. *Adv. Mater.*, 2018, 30(36): 1802353.
- [13] YAN Y J, WU X M, CHEN Q Z, *et al.* An intrinsically healing artificial neuromorphic device [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2020, 8(20): 6869-6876.
- [14] ZHONG Y N, WANG T, GAO X, *et al.* Synapse-like organic thin film memristors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(22): 1800854.
- [15] LI E L, LIN W K, YAN Y J, *et al.* Synaptic transistor capable of accelerated learning induced by temperature-facilitated modulation of synaptic plasticity [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(49): 46008-46016.
- [16] YU R J, LI E L, WU X M, *et al.* Electret-based organic synaptic transistor for neuromorphic computing [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(13): 15446-15455.
- [17] REN Y, YANG J Q, ZHOU L, *et al.* Gate-Tunable synaptic plasticity through controlled polarity of charge trapping in fullerene composites [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2018, 28(50): 1805599.
- [18] DIBENEDETTO S A, FACCHETTI A, RATNER M A, *et al.* Molecular self-assembled monolayers and multilayers for organic and unconventional inorganic thin-film transistor applications [J]. *Adv. Mater.*, 2009, 21(14/15): 1407-1433.
- [19] KIM C, FACCHETTI A, MARKS T J. Gate dielectric microstructural control of pentacene film growth mode and field-effect transistor performance [J]. *Adv. Mater.*, 2007, 19(18): 2561-2566.
- [20] ZHENG C Y, LIAO Y, HAN S T, *et al.* Interface modification in three-terminal organic memory and synaptic device [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2020, 6(12): 2000641.

- [21] 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.
- [22] HE Y L, NIE S, LIU R, *et al.* Dual-functional long-term plasticity emulated in IGZO-based photoelectric neuromorphic transistors [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2019, 40(5): 818-821.
- [23] 张国成, 陈惠鹏, 郭太良. 绝缘层修饰对喷墨打印有机场效应晶体管形貌和性能的影响[J]. *发光学报*, 2017, 38(2): 194-200.
- ZHANG G C, CHEN H P, GUO T L. Impact of the modification of dielectric layers on the morphology and device performance of inkjet-printed OFET [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2017, 38(2): 194-200. (in Chinese)
- [24] 姜慧虹, 李寒莹. 基于酚羟基聚合物绝缘层的有机 n 型场效应晶体管[C]//中国化学会 2017 全国高分子学术论文报告会摘要集——主题 H: 光电功能高分子. 成都: 中国化学会, 2017: 72.
- JIANG H H, LI H Y. Organic n-type field effect transistor based on phenolic hydroxyl polymer dielectric layer [C]//*Abstracts of the 2017 National Polymer Academic Papers Conference of the Chinese Chemical Society-Theme H: Photoelectric Functional Polymer*. Chengdu: Chinese Chemical Society, 2017: 72. (in Chinese)
- [25] ZENG G X, HUANG X H, JIANG T Z, *et al.* Short-term synaptic plasticity expands the operational range of long-term synaptic changes in neural networks [J]. *Neural Netw.*, 2019, 118: 140-147.
- [26] GUO L Q, HAN H, ZHU L Q, *et al.* Oxide neuromorphic transistors gated by polyvinyl alcohol solid electrolytes with ultralow power consumption [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(31): 28352-28358.

作者简介:



饶智超(1995—),男,福建泰宁人,硕士研究生,2018 年于厦门理工学院获得学士学位,主要从事基于有机薄膜晶体管功能器件的研究。E-mail: 630822253@qq.com



张国成(1981—),男,湖北监利人,博士,副教授,2020 年于福州大学获得博士学位,主要从事薄膜晶体管的研究。E-mail: zgc@fjut.edu.com