

硫化锑晶体管制备及其光电突触特性研究*

周婧文

(福州大学微纳器件与太阳能电池研究所,福州 350108)

摘要:采用快速热蒸发的方法制备薄膜,制作晶体管并模拟光、电信号刺激下的突触行为。研究表明,器件具有光、电信号调制的栅控能力,还可以模拟双脉冲抑制、长时程增强、巴普洛夫条件反射及遗忘过程、尖峰脉冲时间依赖可塑性等突触行为。

关键词:光电晶体管;人工突触;硫化锑

中图分类号: TN364⁺.3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-488X(2023)02-0150-06

Sb₂S₃-based Transistor and its Application to Artificial Synapse

ZHOU Jingwen

(Institute of Micro-Nano Devices and Solar Cells, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN)

Abstract: A Sb₂S₃-based transistor was fabricated to simulate synaptic behavior under optoelectronic stimuli. Channel conductance of the transistor could be controlled by optoelectronic stimuli through the gate. Additionally, the device was able to simulate long-term potential, paired-pulse depression, Pavlov's dog learning and extinction, and spike-timing dependent plasticity.

Key words: photonic transistor; artificial synapse; antimony sulfide

引 言

电子突触是神经形态计算重要的硬件基础。以三端晶体管作为电子突触,信号输入和输出可以同时进行,还能够实现多信号的输入,这为模拟生物突触行为提供了更大的便利。生物体对多类型信号刺激皆有响应,其中对光信号刺激响应占比极大^[1],研究晶体管型电子突触对光信号及光电信号协同刺激响应的模拟具有非常重要的意义。

目前,在光电晶体管模拟的突触行为中,模拟得较多的为兴奋/抑制性后突触电流^[2-5],双脉冲易化^[3-8],短时程促进/抑制^[5-8],长时程促进/抑制

等行为,而脉冲时序依赖可塑性^[2,7],巴普洛夫条件反射^[4]等行为模拟得较少。而在光电突触晶体管制备中,较热门的材料有MoS₂^[2,9,10]、石墨烯^[6]、碳纳米管^[11]、锡氧化物^[4,12]、钙钛矿^[9,13]等,但仍有各自的不足之处。过渡金属硫族化合物(如:MoS₂等)因其独特的电学、光电和机械性能而被认为是下一代半导体材料的候选材料,但其光吸收能力相对较弱^[9]。钙钛矿材料的光吸收系数高,制备方法简单、成本低廉,但大多数稳定的钙钛矿材料都含有毒的铅,会污染环境,危害人体健康^[14]。碳纳米管的载流子迁移率高,性能稳定,但光响应灵敏度有待提高^[14]。而有机材料制备沟道层,不够稳定且制备程序复

收稿日期:2022-12-11

* 基金项目:福建省自然科学基金(2019J01218)

作者简介:周婧文(1999—),女,硕士研究生,研究方向为基于光电晶体管的人工突触模拟。(E-mail:zhou.jing.wen@fox-mail.com)

杂,成本不够低廉。因此,基于新材料研究晶体管突触仿生行为是有意义的。

硫化锑是一种简单的二元无机化合物,不溶于水,受气温湿度影响很小,稳定性较高^[15-17]。其带隙约为1.6~1.7 eV^[16]、吸收系数高、吸光能力很强^[18],用其制备的光探测器对光的响应速度可以达到 μs 级别^[19],是一种性能优异的光电材料。文章用快速热蒸发法制备了硫化锑薄膜并以此制备晶体管,研究了器件的光电特性,并模拟了双脉冲抑制、长时程增强、巴普洛夫条件反射及遗忘过程、尖峰脉冲时间依赖可塑性等突触行为。

1 实验

1.1 晶体管的制备

首先,将ITO导电玻璃切成 $2.5\text{ cm} \times 2\text{ cm}$ 大小。在清洗好的ITO玻璃基片上,用磁控溅射法沉积100 nm厚的 HfO_2 薄膜作为栅氧化层;随后,通过快速热蒸发管式炉在 $550\text{ }^\circ\text{C}$ 的温度下沉积厚度为700~900 nm的硫化锑薄膜;接着在沉积好的薄膜上用负性光刻胶做出源漏电极图案,其间距(沟道长度)为 $30\text{ }\mu\text{m}$;最后,用溅射的钨电极制备源漏电极,获得如图1(a)所示的晶体管。

1.2 性能测试

图1(b)为生物突触的结构示意。突触前神经元受到刺激后,将会释放神经递质,将信号传递给突触后神经元。器件栅极可被视作“突触前神经元”,光刺激与电刺激均直接加在底栅极,而源漏电极之间的沟道层视作“突触后神经元”,其电流大小或电导率改变视作突触权重改变,因此可以将此晶体管视作电子突触进行研究。用扫描电子显微镜(SEM)观察硫化锑薄膜的形貌,并用单色光源(波长为 530 nm ,光功率密度为 $3.65\text{ mW}/\text{cm}^2$)配合半导体参数测试仪(Keithley 4200-SCS)进行了一系列器件性能的测试。

2 结果与讨论

2.1 晶体管的光电特性

从图1(c)硫化锑薄膜形貌图中可以看出,制备的硫化锑结构紧凑致密、几乎没有针孔,晶粒大小约在 $1\sim 2\text{ }\mu\text{m}$,证明成膜质量良好。

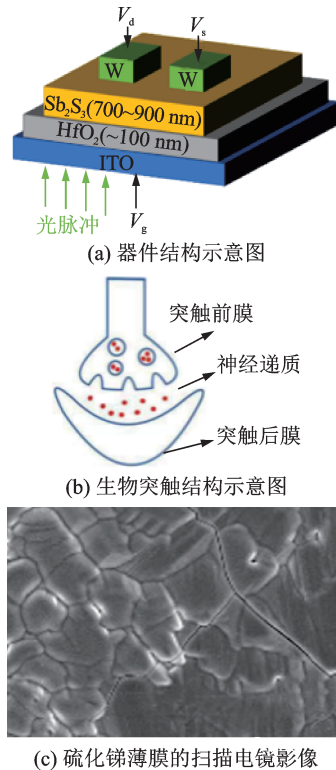


图1 突触及器件结构示意图和 Sb_2S_3 形貌

Fig.1 Synapse and device structure diagram and Sb_2S_3 morphology

为了考察器件晶体管特性及其对光的响应,测量了器件在暗态和绿光照射下的转移和输出曲线(图2)。器件暗态下的转移特性曲线(图2(a))表现

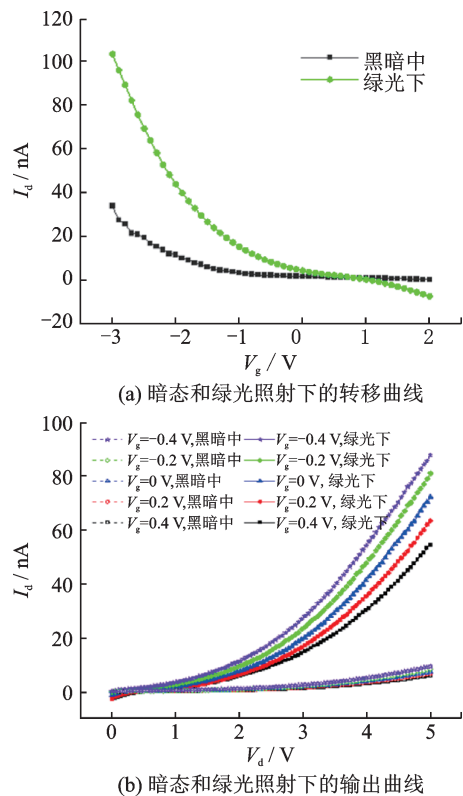


图2 Sb_2S_3 晶体管输出特性和转移特性

Fig.2 Output and transferring characteristics of Sb_2S_3 transistor

出负向栅压下源漏电流大于正向栅压下的源漏电流,这说明器件栅极电压可对沟道电流调控,器件具有晶体管基本特性。此外,绿光照射下的电流明显高于暗态下的电流,说明器件有着良好的光响应。此外,测试表明器件沟道是空穴导电,这与硫化锑的导电类型(P型)一致。图2(b)则展示了不同栅压下的输出曲线,栅压变化造成源漏电流变化,在绿光刺激下源漏电流的差异性更加明显,这进一步说明器件有着良好的光、电信号栅控特性。

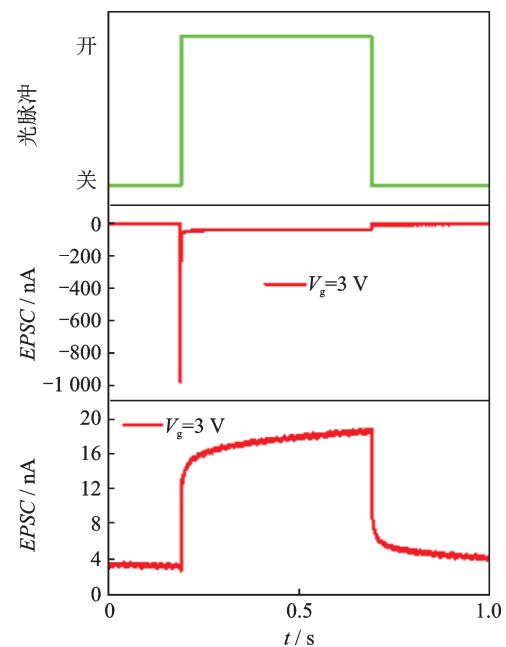
2.2 晶体管的突触行为模拟

在生物突触中,突触前膜受到刺激后,突触后膜会产生响应电流,这被称为兴奋性后突触电流(EPSC)或抑制性突触后电流(IPSC)。图3(a)是器件在绿光(光照时长为0.5 s)刺激下的EPSC响应。栅压对响应信号有一定影响。当栅压为3 V时,电流有一个明显的尖峰而后回落,这与栅压-3 V时的响应有较大差别。对此,推测是 $\text{HfO}_2/\text{Sb}_2\text{S}_3$ 界面有较多的空穴陷阱,当栅压为3 V时,氧化层附近的导电沟道是由电子形成,施加光脉冲后,光生载流子中的空穴迅速被陷阱俘获,电子失去复合对象,因而电流较之正栅压时更高。而当空穴被从陷阱释放后,电子与其复合,导致电流回落,最后达到平衡。当栅压为-3 V时,导电沟道是由空穴形成,陷阱中心已经被填满,导致产生的大部分光生载流子迅速复合,因而并没有尖峰形成。

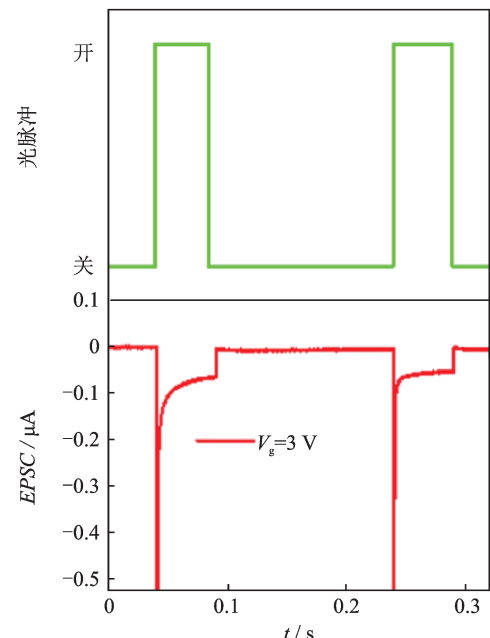
短时程突触可塑性(STSP)是突触的一种重要行为,而双脉冲抑制(PPD)是STSP中的一种典型行为,表现为第二个刺激引起的响应比第一个刺激引起的响应低且改变幅度与时间间隔有关。而双脉冲易化(PPF)则与之相反,即第二个刺激响应比第一个响应更高。目前的光电晶体管器件多数模拟PPF行为,而文中模拟了PPD行为。图3(b)展现了器件模拟的PPD行为,在栅压为3 V的情况下,同时于底栅极施加两个脉宽为50 ms、间隔为100 ms的绿光脉冲,第二个脉冲引起的响应峰值明显低于第一个脉冲的响应峰值。而脉冲间隔越短,第二个脉冲的响应峰值降低的越剧烈。记第一个脉冲的响应峰值为 I_1 ,第二个脉冲的响应峰值为 I_2 ,则定义突触权重改变幅度 $\Delta w = 100\% \times (I_2 - I_1) / I_1$,并将其与脉冲时间间隔的关系绘制在图3(c)中。从图中可以看出, Δw 随着时间间隔的缩短而增加,在 Δt 为80 ms时达到了-87%,较好的模拟了生物

突触的PPD行为。根据 $\Delta w = y_0 + C_1 \exp(-\frac{t}{\tau_1}) + C_2 \exp(-\frac{t}{\tau_2})$ ^[20],对突触权重改变幅度和脉冲间隔时间关系进行了拟合。其中, y_0 为常数, C_1 和 C_2 为初始易化幅度, t 为脉冲时间间隔, τ_1 和 τ_2 为弛豫时间。拟合表明, τ_1 和 τ_2 分别为282 ms和574 ms,在数量级上与生物突触匹配。

长时程突触可塑性(LTSP)是突触的另一种重要行为,指的是突触权重在刺激后发生了改变并且保持了较长时间,其与STSP的主要区别在于刺激撤除后,突触权重在短时间内无法恢复原样。这一



(a) 不同栅压下的光响应



(b) 光脉冲引起的兴奋性神经突触后电流 (脉宽为50 ms, 间隔0.2 s)

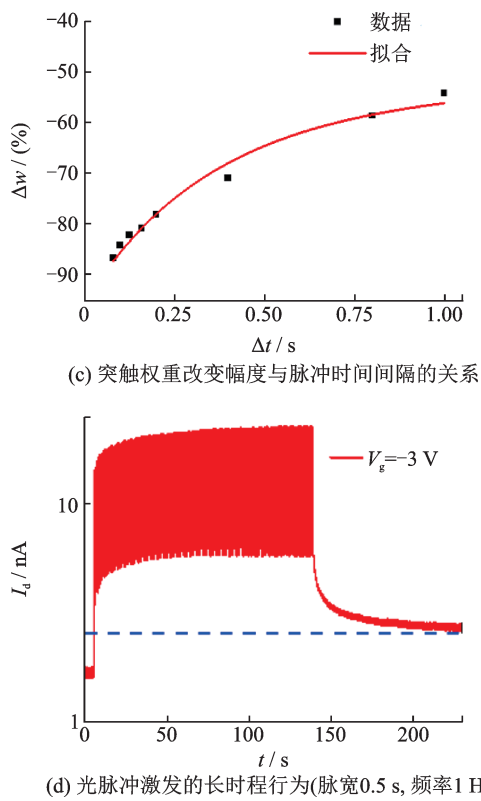
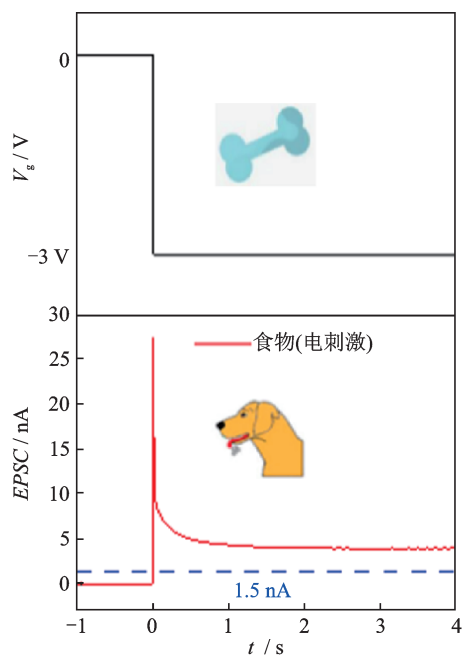
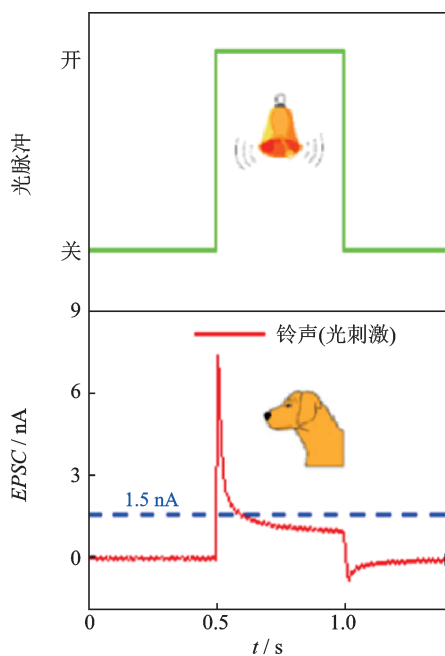


图3 Sb₂S₃晶体管光电响应的突触行为模拟
Fig.3 Synaptic behaviors simulation under stimuli

行为在大脑学习和记忆的过程中扮演了重要的角色。根据响应的不同又分为长时程抑制(LTD)和长时程增强(LTP)。图3(d)是器件对LTP行为的模拟。保持栅压为-3 V并在底栅极施加时长约为2 min的绿光脉冲(频率为1 Hz, 占空比为50%)。

撤去刺激后, 电流明显高于施加光刺激前, 衰减缓慢且刺激撤去1 min后仍未完全回落。

巴普洛夫的狗是一个条件反射建立过程的实验。巴普洛夫对狗进行反复训练, 成功地将听到铃声与流涎这两个原本并不相关的行为关联, 而这一行为也在器件上进行了模拟。如图4(a)所示, 以峰值超过15 nA且全程不低于1.5 nA(图中蓝色虚线位置)的响应电流作为流涎的标准。在光照(类比于“铃声”)下, 响应电流不仅没有达到15 nA, 甚至在大部分时刻低于1.5 nA(未“流涎”); 而如图3(b)所示, 在栅极施加-3 V恒压刺激(类比于“食物”)时, 响应电流峰值超过15 nA, 并全程保持在1.5 nA以上(成功“流涎”)。接着如图3(c), 同时施加100个光刺激和电刺激(类比“铃声”和“食物”)同时反复刺激), 随后在图3(d)中仅仅单独保留光照(类比“铃声”)刺激, 器件响应电流峰值超过15 nA, 并全程保持在1.5 nA以上(维持“流涎”), 这说明巴普洛夫条件反射行为被器件成功模拟。器件在静置一分钟后(图3(e)), 再次施加光照(类比“铃声”), 器件响应电流略有下降但仍到达“流涎”标准, 说明建立的条件反射得到了保持。又静置五分钟(图3(f)), 重新进行刚才的实验, 器件响应电流峰值已经低于15 nA, 未达到“流涎”标准, 建立的条件反射已经消失了。这充分说明, 器件不仅具有模拟条件反射行为的能力还具备对条件反射遗忘的能力, 这非常类似生物的学习和遗忘行为。



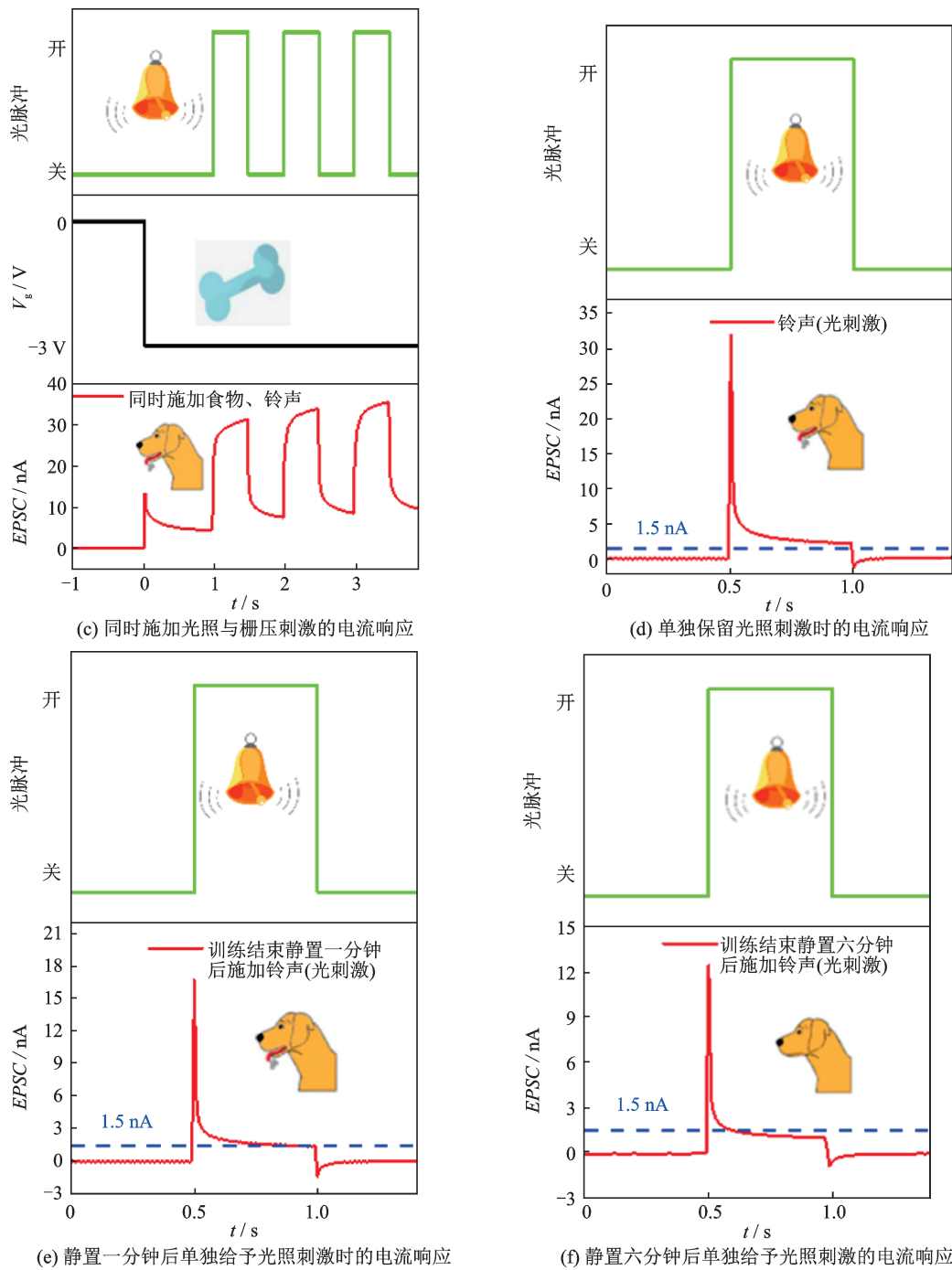


图 4 巴普洛夫条件反射实验在晶体管上的模拟

Fig.4 Classical conditionings of Pavlov's dog experiment of the synaptic transistor

峰电位时间依赖可塑性(STDP)是另一个重要的突触行为,它反映了突触前膜和突触后膜刺激的先后顺序会影响突触权重变化。将光刺激(脉宽 50 ms)和电刺激($V_g = -3\text{ V}$, 50 ms)分别作用于突触前膜和突触后膜,模拟光电协同刺激的 STDP 行为。由于时空相关效应是模拟 STDP 行为的基础,在图 5(a)中首先进行该行为的模拟。结果表明,光、电刺激时间顺序不同,EPSC 确实有着不对称性。随后对 STDP 行为进行模拟并在底栅极处各

自施加一个光刺激和电刺激(记第一个响应峰值为 I_1 ,第二个响应峰值为 I_2),通过 $\Delta w = 100\% \times (I_2 - I_1)/I_1$ 公式衡量突触权重的改变,而 $\Delta t = t_{\text{electric}} - t_{\text{light}}$ 。在图 5(b)中绘制了 Δw 与 Δt 的关系,可以清楚地观察到一种典型的不对称形式的 STDP。当电刺激在光刺激前时,突触权重减少,而当光刺激在电刺激前时,突触权重增加。此外,突触权重的改变幅度随着刺激间隔的缩短而增加。

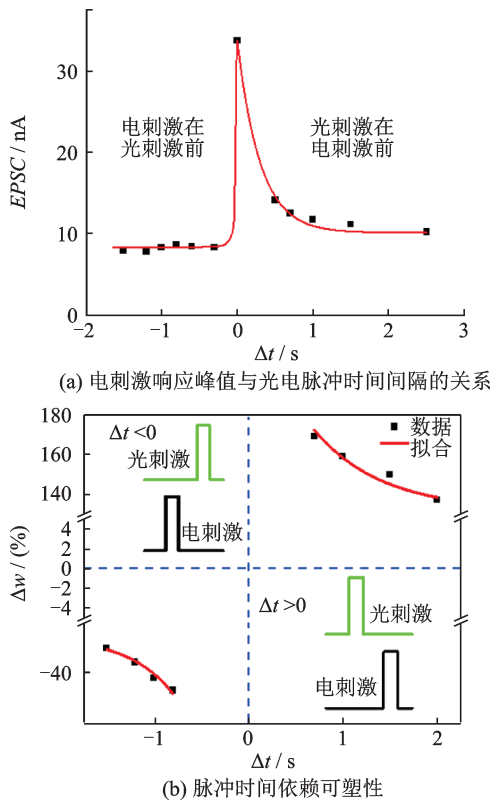


图5 STDP行为在晶体管上的模拟

Fig.5 Simulation of spike-timing-dependent plasticity on transistor

根据传统的STDP模型^[2],对突触权重改变幅度和刺激时间间隔的关系进行了拟合:

$$\Delta\omega = \begin{cases} A_1 \exp\left(\frac{T_{\text{pre}} - T_{\text{post}}}{\tau_1}\right) (T_{\text{pre}} - T_{\text{post}} < 0) \\ A_2 \exp\left(\frac{T_{\text{pre}} - T_{\text{post}}}{-\tau_2}\right) (T_{\text{pre}} - T_{\text{post}} > 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中 A_1 和 A_2 分别为突触增强和突触抑制对应的幅值,而经拟合, τ_1 为718 ms, τ_2 为465 ms,这也和生物突触的特征类似。

3 结论

通过快速热蒸发的方法沉积了硫化铟薄膜并制备了基于硫化铟的光电晶体管。该晶体管具有光、电信号的栅控能力,还能够在光、电信号刺激下模拟长时程增强、双脉冲抑制、尖峰脉冲时间依赖可塑性、巴普洛夫条件反射建立和遗忘过程等生物突触行为,对未来构建人工神经网络的研究有着积极意义。

参考文献

[1] 马可. 基于晶体管人工突触的光电调控的研究[D]. 南京: 南京邮电大学, 2020.

[2] Jiang J, Hu W, Xie D, et al. 2D electric-double-layer photo-

transistor for photoelectronic and spatiotemporal hybrid neuromorphic integration [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(3): 1360-9.

[3] Qin S, Wang F, Liu Y, et al. A light-stimulated synaptic device based on graphene hybrid phototransistor [J]. *2D Materials*, 2017, 4(3): 035022-31.

[4] Jiang D, Li J, Fu W, et al. Light-stimulated artificial synapse with memory and learning functions by utilizing an aqueous solution-processed $\text{In}_2\text{O}_3/\text{AlLiO}$ thin-film transistor [J]. *ACS Applied Electronic Materials*, 2020, 2(9): 2772-9.

[5] Duan N, Li Y, Chiang H C, et al. An electro-photo-sensitive synaptic transistor for edge neuromorphic visual systems [J]. *Nanoscale*, 2019, 11(38): 17590-9.

[6] Han C Y, Li Y, Zhang Z X, et al. An artificial synapse based on graphene field-effect transistor with silver gel/polarized-aptamer gate [J]. *Organic Electronics*, 2021, 92: 106118-25.

[7] Wang J, Chen Y, Kong L-A, et al. Deep-ultraviolet-triggered neuromorphic functions in In-Zn-O phototransistors [J]. *Applied Physics Letters*, 2018, 113(15): 151101-6.

[8] Yu J J, Liang L Y, Hu L X, et al. Optoelectronic neuromorphic thin-film transistors capable of selective attention and with ultra-low power dissipation [J]. *Nano Energy*, 2019, 62: 772-80.

[9] Hong S, Choi S H, Park J, et al. Sensory adaptation and neuromorphic phototransistors based on $\text{CsPb}(\text{Br}_{1-x}\text{I}_x)_3$ perovskite and MoS_2 hybrid structure [J]. *ACS Nano*, 2020, 14(8): 9796-806.

[10] Kim S G, Kim S H, Park J, et al. Infrared detectable MoS_2 phototransistor and its application to artificial multilevel optic-neural synapse [J]. *ACS Nano*, 2019, 13(9): 10294-300.

[11] Shao L, Wang H, Yang Y, et al. Optoelectronic properties of printed photogating carbon nanotube thin film transistors and their application for light-stimulated neuromorphic devices [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2019, 11(12): 12161-9.

[12] Liu Y, Huang W, Wang X, et al. A hybrid phototransistor neuromorphic synapse [J]. *IEEE Journal of the Electron Devices Society*, 2019, 7: 13-7.

[13] Huang X, Li Q, Shi W, et al. Dual-mode learning of ambipolar synaptic phototransistor based on 2D perovskite/organic heterojunction for flexible color recognizable visual system [J]. *Small*, 2021, 17(36): e2102820.

[14] Li M, Xiong Z, Shao S, et al. Multimodal optoelectronic neuromorphic electronics based on lead-free perovskite-mixed carbon nanotubes [J]. *Carbon*, 2021, 176: 592-601.

[15] H-J JO, Kim S H, Kim J S, et al. Time-resolved photocurrent of an organic-inorganic hybrid solar cell based on Sb_2S_3 [J]. *Journal of the Korean Physical Society*, 2016, 69(4): 541-6.

[16] 邓辉. 硫化铟薄膜制备及其光伏器件[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

[17] 杨兆良. 硫化铟和钙钛矿材料的激发态动力学研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2019.

[18] Versavel M Y, Haber J A. Structural and optical properties of amorphous and crystalline antimony sulfide thin-films [J]. *Thin Solid Films*, 2007, 515(18): 7171-6.

[19] Lin X, Deng H, Jia Y, et al. Self-powered Sb_2S_3 thin-film photodetectors with high detectivity for weak light signal detection [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2022, 14(10): 12385-94.

[20] Wang Y, Liao Q, She D, et al. Modulation of binary neuroplasticity in a heterojunction-based ambipolar transistor [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2020, 12(13): 15370-9.