光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023102802

基于铁电材料的有机光电突触晶体管研究

王荃田[1]，龚　敏[1]，张嗣杰[1,2*]

（1. 四川大学 物理学院，成都 610064；2. 贵州工程应用技术学院，贵州 毕节 551700）

摘　要： 模拟生物突触结构的设备是实现神经网络计算的可行方案之一，其中人工视网膜器件为机器视觉和图像识别的实现提供了有力支持。通过旋涂制备聚偏氟乙烯-三氟乙烯(P(VDF-TrFE))制备铁电栅层，热蒸发酞菁铜(CuPc)作为半导体层，探究该晶体管模拟突触功能的光电响应。实验结果表明，该光电晶体管在625 nm具有显著的光响应，其能够产生兴奋性突触后电流(EPSC)并实现短期可塑性到长期可塑性的转变以及高通滤波功能。利用剩余极化强度模拟了大脑学习过程中提前施加注意的行为。此外，以栅电压和光照作为独立输入逻辑信号，在单个晶体管中实现了“与”和“或”的布尔逻辑功能。上述结果表明，CuPc可以与铁电材料进行良好结合并制备出具有突触响应特点的光电晶体管，这为人工视网膜器件的开发提供了有机铁电器件的参考。

关键词： 有机铁电突触；光电调节；逻辑门；人工视觉；能带结构

中图分类号： TN321.5　**文章编号：** 1001－5868(2024)01－0049－07

Optoelectronic Artificial Synapse with Ferroelectric Material for Logical Functions and Modulation of Visual Memory

WANG Quantian[1], GONG Min[1], ZHANG Sijie[1,2]

(1. College of Physics, Sichuan University, Chengdu 610064, CHN;
2. Guizhou University of Engineering Science, Bijie 551700, CHN)

Abstract: The use of devices that emulate biological synapses has gained recognition as a highly suitable alternative to the Von Neumann architecture. Artificial retinal devices provide advantageous contributions to the modeling of machine vision and image recognition. The goal of this research is to create artificial synaptic devices that are light-activated. This is achieved by using poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene) (P(VDF-TrFE)) as the ferroelectric layer and copper phthalocyanine(CuPc) as the semiconductor film. The researchers performed experiments aimed at replicating synapses, resulting in the generation of excitatory postsynaptic currents (EPSC), which allowed them to observe the synaptic plasticity characteristics and simulate memory responses to optical inputs. The experimental findings demonstrate that the polarization state of a ferroelectric material is influenced by the gate voltage, leading to a modulation of the decay rate of the photoresponsive current. The implementation of a high-pass filtering function was successfully accomplished. This device also enabled the realization of 'AND' and 'OR' Boolean logic functions by using gate voltage and light illumination as dual input logic signals.

Key words: organic ferroelectric synapse; optoelectronic regulation; logic gate; artificial vision; energy band structure

收稿日期：2023－10－28.

基金项目：国家自然科学基金项目(61871451)；四川省科学技术项目(2022YFG0166)；毕节市与贵州工程科技大学联合基金项目(毕节科技联合体合同[2023]16号).

* **通信作者：**张嗣杰

0 引言

面对日新月异的计算机技术，以及呈指数级增长的信息数据，存算分离的冯诺依曼计算架构遇到了能耗高、效率低等挑战[1]。生物大脑以突触为基本单元并行地执行计算和存储，具有高处理效率和低能耗的优势，利用硬件模拟生物突触来发展类脑计算的方式成为具有潜力的替代方案之一[2-3]。

与无机材料相比，使用有机材料作为晶体管功能层具有一定的优势。有机材料可以通过简单的溶液加工、光催化等多种方式合成[4-5]。其中，部分有机材料能在单一分子结构中将物理、化学和生物特性相结合[6]。有机材料还具有出色的机械柔韧性，因此其适用于柔性电子领域，例如柔性显示面板、电子皮肤等[7]。此外，有机材料本身具有可生物降解的特性[8]，在医疗电子领域也具有应用潜力。

人工突触装置主要分为双端和三端结构。Kim等[9]使用二维有机-无机杂化钙钛矿薄膜(OHP)制备了双端人工突触器件，实现了与实际神经突触活动相比拟的低能耗学习行为。Lee等[10]报告了一种可拉伸的有机纳米线突触晶体管(s-ONWST)，基于噻吩二酮吡咯并吡咯(FT4-DPP)的共轭聚合物和聚环氧乙烷(PEO)，制备了可通过光照来调控模拟肌肉系统收缩反应的器件。

据报道，约80%的外界信息是通过视觉系统获取[11]，因此开发人工视网膜装置具有非常重要的意义，通过研究光电协同调控的人工突触器件是一种有效的研究途径[12]。本研究制备了一种氧化铟锡(ITO)/P(VDF-TrFE)/CuPc/金(Au)多层结构有机突触晶体管(OST)。其中P(VDF-TrFE)价格低，且具有出色的铁电特性、稳定的物理化学特征、简单的薄膜制备方法和较高的剩余极化强度[13-14]。CuPc在大气中表现出惰性，制造成本也较低，具有较宽的吸收光谱[15]。实验表明该器件在625 nm波长光照下表现出光响应。本文重点探究了器件对突触行为的模拟，并观察到兴奋性突触后电流(EPSC)的响应，成功模拟了在不同光刺激的条件下由短期可塑性(STP)到长期可塑性(LTP)的过渡记忆行为，并实现了高通滤波功能。本文通过利用铁电材料的剩余极化强度对光响应电流的衰减速度进行了调制，此外剩余极化强度对栅电压信息的保留可以进一步降低能耗。此外，与双端结构比较，三端突触器件能够将光与电作为两种独立的调控方式。本文以栅电压和光源作为双输入逻辑信号，以沟道电流(I_{ds})作为输出信号，实现了基于单个晶体管上的“与”和“或”布尔逻辑功能。

1 实验

1.1 器件制备过程

器件制备工艺流程如图1所示。实验首先制备了P(VDF-TrFE)铁电薄膜。使用二甲基甲酰胺(DMF)作为溶剂，加入适量P(VDF-TrFE)(70∶30)粉末后在室温下连续搅拌14 h以配置质量分数为10 wt%的溶液。然后将剪裁好的镀有ITO涂层的聚萘二甲酸乙二醇酯(PEN)衬底作为底电极，依次使用DECON 90、去离子水、丙酮、无水乙醇超声清洗15 min后用氮气吹干，再置于真空干燥箱中干燥。P(VDF-TrFE)溶液的旋涂操作包括两个阶段：初始阶段的旋转速度为500 r/min，持续时间为10 s，随后调整旋转速度为1 500 r/min，持续时间为30 s。待完成旋涂后将样品移至真空干燥箱中，在135 ℃下退火3 h。

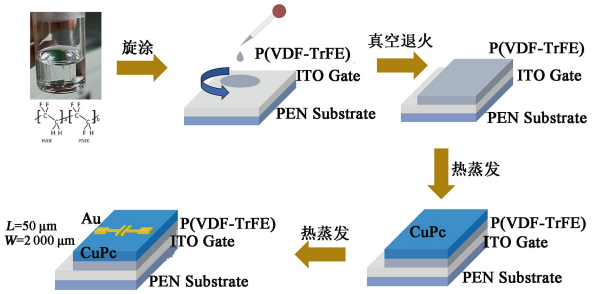


图1 OST的制备工艺流程及结构示意图

基于上述制备的铁电薄膜构建晶体管。CuPc通过热蒸发，在低于10^{-8} Pa的真空中以约0.01 nm·s^{-1}的速率沉积在P(VDF-TrFE)表面，通过沉积系统的显示得到，半导体层厚度约为70 nm。据报道Au与CuPc可形成欧姆接触，这表明Au是应用于CuPc上理想的电极材料[16]。在低于10^{-8} Pa的真空中，将Au置于由钨制成的坩埚中通过热蒸发沉积，使用的源漏电极掩膜沟道长度L为50 μm，宽度W为2 000 μm，沉积速率约为0.02 nm·s^{-1}，最终得到的电极厚度约为50 nm。

1.2 器件表征

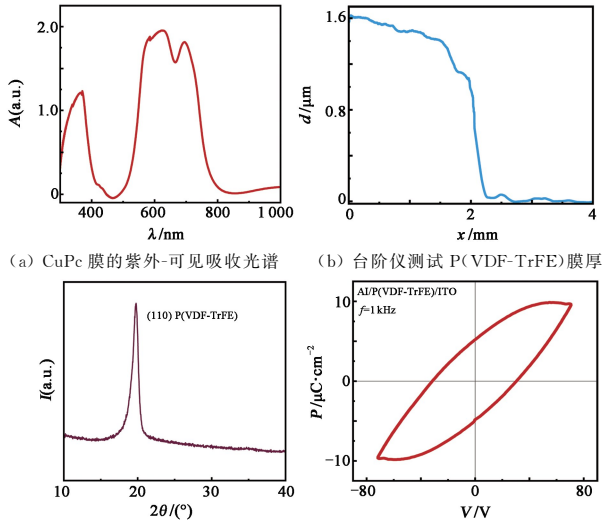
使用紫外可见近红外分光光度计(Hanon i5)测量CuPc薄膜的吸收光谱。使用X射线衍射仪(Malvern Panalytical Empyrean)对P(VDF-TrFE)(70∶30)进行X射线衍射(XRD)分析，以确定退火

后其在 ITO 表面结晶的薄膜的结晶相。X 射线衍射仪 2θ 角的扫描范围为 5°～60°，扫描步长为 0.026°。通过台阶仪（Ambios XP-200）测量了铁电薄膜厚度。另外，使用铁电压电分析仪（Aixacct TF Analyzer 3000）在 1 kHz 的频率下对电容器铝（Al）/P(VDF-TrFE)/ITO 进行电滞回线（*P-V*）测试。在完成以上步骤后，由实验室搭建的光电测试系统对器件进行光电调控测试，测试设备包括半导体参数分析仪（Keithley 2400）、探针台（CINDBEST CM4）、波长为 625 nm 的 LED（Thorlabs LED625L）和函数发生器（Keysight 33600A）。在照射设备之前，需使用光功率计（Newport 818-UV/DB）测量光功率。所有测量均在实验室大气环境和 25 ℃的室温条件下进行，同时测试系统搭配暗室使用以确保实验结果不受外部照明的影响。

2　结果与讨论

2.1　晶体管光突触功能表征

首先需对制备器件所用的材料进行物理性质表征。图 2(a)显示了 CuPc 的紫外-可见光（UV-Vis）吸收谱，可以看到 CuPc 在 625 nm 处显示出很强的光吸收，近紫外区域的峰表示了 $\pi\rightarrow\pi^*$ 跃迁中的 B 吸收带，可见光区域中的峰表示了 $\pi\rightarrow\pi^*$ 跃迁中的 Q 带，由于 Davydov 分裂 Q 带具有双峰[17]，因此本实验选择波长为 625 nm 的 LED 作为光源。



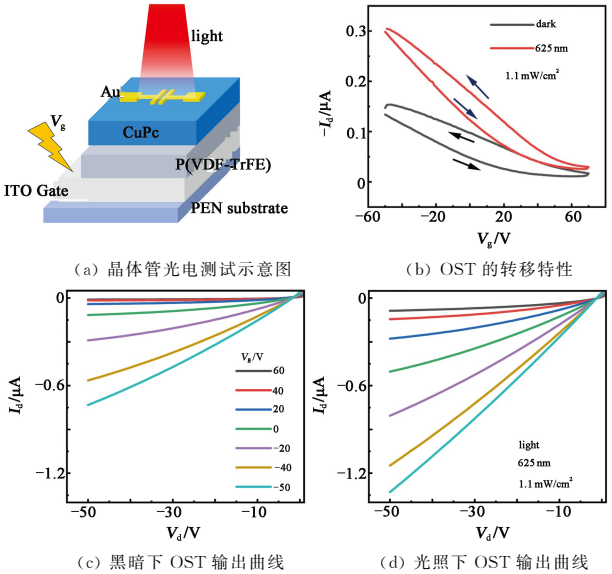
（a）CuPc 膜的紫外-可见吸收光谱　（b）台阶仪测试 P(VDF-TrFE)膜厚

（c）退火后 P(VDF-TrFE)层的 XRD 图　（d）Al/P(VDF-TrFE)/ITO 的 *P-V* 图

图 2　器件材料物理性质表征

P(VDF-TrFE)厚度 d 如图 2(b)所示，通过台阶仪测得其厚度约为 1.5 μm。图 2(c)显示了 P(VDF-TrFE)层的 XRD 图，由图可见在 19.8°处出现强衍射峰，说明其形成了具有(110)取向的晶面，这一结果表明在 P(VDF-TrFE)层内部形成了 β 相[18-19]。为了说明 P(VDF-TrFE)层的铁电性，实验使用 Al/P(VDF-TrFE)/ITO 结构的电容器进行电滞回线（*P-V*）测试，电压扫描频率为 1 kHz，扫描范围为＋70 到－70 V。图 2(d)展示了电滞回线图，可以看到曲线表现出明显铁电特征，剩余极化强度为 5 μC·cm^{-2}，说明退火后得到的 P(VDF-TrFE)具有良好的铁电性。

为了验证 OST 的光电调制效应，实验测试了所制备的 OST 在黑暗和光照条件下的传输、输出特性。图 3(a)展示了器件光响应测试的示意图。测试在室温下的暗室中进行，施加光功率为 1.1 mW·cm^{-2}、波长为 625 nm 的光照。在图 3(b)中，当栅极电压从－70 V 变化到＋70 V(读取电压 V_{ds}＝－10 V)时，栅极电压(V_g)向负方向升高，漏极电流(I_{ds})也随之增大。当光刺激持续作用在 OST 上时，可以观察到与无光时相比 I_{ds} 有明显增大，这一结果说明施加光照后有光生载流子参与 I_{ds} 的形成。在图 3(c)中，V_g 由＋60 V 扫描至－50 V，器件表现出显著的 p 型晶体管特点，且栅电压具有良好的调制效果。与图 3(d)对比可以看到，相同的 V_g 条件下在光照时沟道电流会显著上升，这表明在此实验中该器件有良好的光响应。



（a）晶体管光电测试示意图　（b）OST 的转移特性

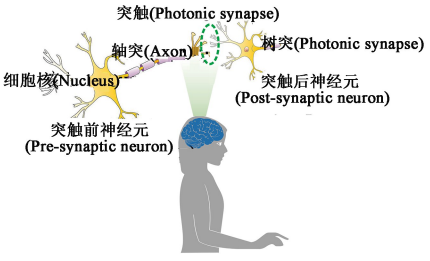
（c）黑暗下 OST 输出曲线　（d）光照下 OST 输出曲线

图 3　光照下器件的电学测试结果

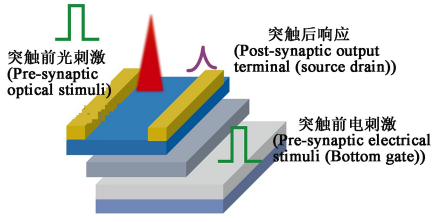
人的生理活动受神经系统调节，神经元是生物神经系统中信息处理的基本单元[20]。如图 4(a)所示，神经元的主要组成部分包括神经核、树突和轴突，它们具有接收和产生神经兴奋的能力[21]。神经

元间信息的传递由突触完成，突触通常由三大部分组成：突触前膜、突触间隙和突触后膜。兴奋性突触后电流（EPSC）或抑制性突触后电流（IPSC）是由突触前膜发送到突触后膜的电信号或化学信号的变化引起的[22-23]。突触可塑性可分为短期可塑性和长期可塑性，突触可塑性现象是生物学习和记忆的基础[24]。在视觉神经中外部光照也会影响视觉神经的突触可塑性，突触前神经元通过释放兴奋性或抑制性的神经递质对光信号做出反应[25-26]。如图 4（b）所示，施加在 OST 底部电极上的电压和 625 nm 的光照模拟突触前刺激，源漏电流（I_d）可视为突触后电流（I_{ps}）。图 4（c）展示了在光功率为 1 mW·cm^{-2} 时，施加光照持续时间由 5 s 增加至 100 s，ΔI_{ps} 值随光照时长的增加而增大，表明 CuPc 中电子吸收能量由 HOMO 跃迁至高能级产生电子空穴对，并且在结束光照的 50 s 后，光照持续时间为 100 s 的 ΔI_{PS} 值仍保持在较高水平，体现了其由短期可塑性到长期可塑性的转变。图 4（d）显示了在不同光照频率（脉冲宽度为 100 ms，光照总时长 20 s）条件下停止光刺激后的 ΔI_{ps} 值，图 4（e）显示了不同光照次数（脉冲宽度 500 ms，Δt 为 500 ms）条件下停止光刺激后的 ΔI_{ps} 值。可以看到停止光刺激后的 ΔI_{ps} 值随光照频率与光照次数的增加而增大，由此说明，通过改变光照频率和光照次数的刺激条件，该器件也可以模拟由 STP 到 LTP 转变的学习行为。

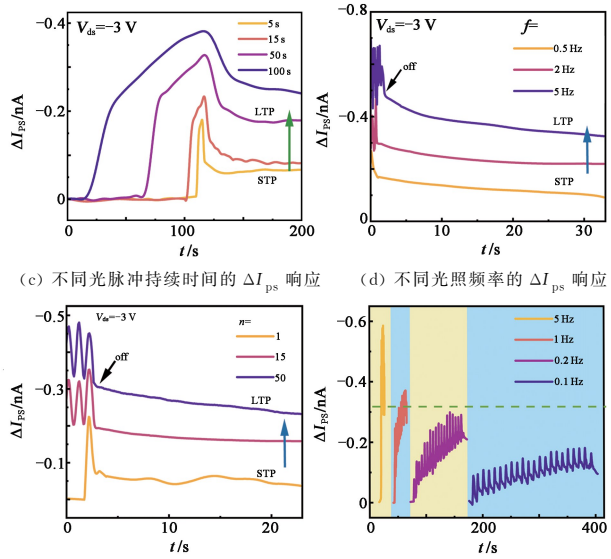
据报道，突触后膜可以选择性地过滤不同频率的调制信号，一些突触的神经递质释放概率相对较低，可以起到高通滤波器的作用[27]。如图 4（f）所示，为模拟该功能实验使用频率分别为 0.2，0.5，1，



（a）大脑突触结构示意图



（b）器件光电调制模拟突触信号示意图



（c）不同光脉冲持续时间的 ΔI_{ps} 响应　（d）不同光照频率的 ΔI_{ps} 响应

（e）不同光照次数的 ΔI_{ps} 响应　（f）OST 的高通滤波特性

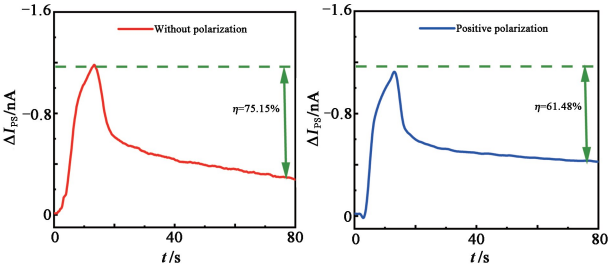
图 4　神经突触示意图及器件的光突触功能测试结果

5 Hz 的光脉冲序列对器件进行光刺激，每个光脉冲序列由 20 个光脉冲组成（625 nm，1.1 mW·cm^{-2}，脉冲宽度 100 ms），当电流阈值设置为 −0.32 nA 时，只有频率高于 1 Hz 的信号才能通过，体现出 OST 在信号处理领域有作为高通滤波器的潜力。

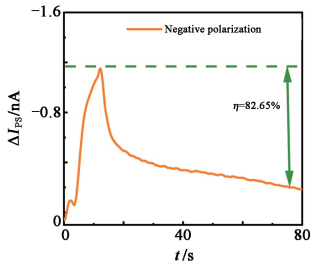
生物在的记忆过程中，注意力能促进 LTP 或长期记忆的形成。本实验通过施加持续时间为 10 s、振幅分别为 +60 V 与 −60 V 的 V_g 诱导 P（VDF-TrFE）层产生向上和向下的极化状态。图 5（a）～（c）展示了在三种不同的极化状态下，停止施加栅电压后继续施加 10 s 光刺激（1.1 mW·cm^{-2}，625 nm，V_{ds} = −3 V）后 OST 的弛豫行为。图中突触后电流的衰减率可通过以下公式计算得出：

$$\eta = \frac{I_p - I_t}{I_p} \times 100\% \tag{1}$$

式中，I_p 为峰值电流，I_t 为停止光照 65 s 后 ΔI_{ps} 的大小。可以看到在不同的极化状态下 ΔI_{ps} 衰减率有明显差异，未极化状态下衰减率为 75.15%，向上极化状态下衰减率为 61.48%，向下极化状态衰减率为 82.65%。



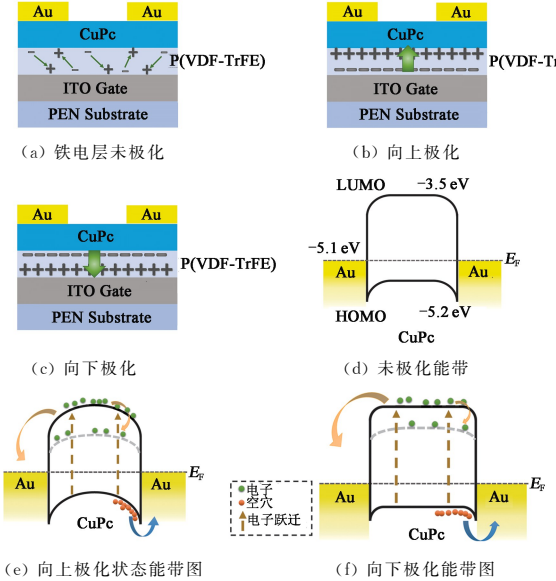
（a）未极化状态　（b）向上极化状态



(c) 向下极化状态

图 5　铁电极化对光电流弛豫行为的调制

如图 6(a)～(c)所示，分别为器件铁电层未极化、向上、向下极化的示意图。使用能带理论对该现象进行分析[28]，图 6(d)和图 6(e)分别显示出 P(VDF-TrFE)层未极化和向上极化时的横向能带结构。在本实验中铁电层向上的极化状态导致 Au/CuPc 界面负电荷的累积能带向下弯曲，图 6(d)与图 6(e)的能带图相比，空穴向 Au 电极移动的势垒升高，阻碍了空穴向 Au 电极的迁移，从而形成 LTP。如图 6(f)所示，当 P(VDF-TrFE)层极化状态向下时，在 Au/CuPc 界面处的负电荷减少导致势垒降低，空穴更容易由 CuPc 向 Au 电极移动，从而使电流下降得更快。通过实验比较可以得出，根据 P(VDF-TrFE)在没有外加电压时存在剩余极化强度的特点，提前施加不同的栅电压改变铁电材料的极化状态能够调节光响应电流的衰减速率，可以将铁电层极化的调制理解为“注意力”的强度，该现象能够模拟大脑学习行为中提前施加“注意”的过程，从而使器件可以实现更为复杂的功能。



(a) 铁电层未极化　(b) 向上极化

(c) 向下极化　(d) 未极化能带

(e) 向上极化状态能带图　(f) 向下极化能带图

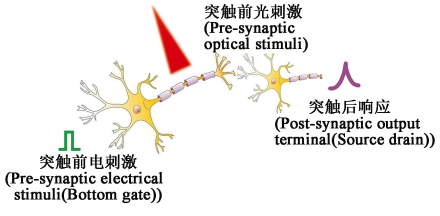
图 6　不同极化状态以及横向能带示意图

本实验通过该器件测得 EPSC，实现了在不同的光照条件下由 STP 到 LTP 的转变，高通滤波功能，并利用 P(VDF-TrFE)的剩余极化强度模拟了大脑记忆形成中“注意力”的施加。

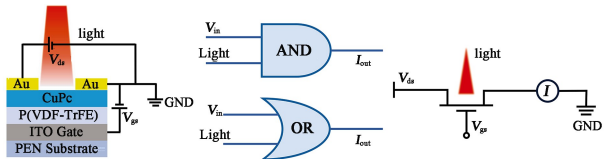
2.2　布尔逻辑测试

本实验还进一步探究了基于 OST 的布尔逻辑运算测试。布尔逻辑采用数学方法对逻辑进行了符号化，使用二进制值“0”和“1”来表示两种对立的逻辑状态，基本的逻辑运算有“与”、“或”等。McCulloch 和 Pitts 提出神经信号具有符号学“全有”、“全无”的特点，可用二元逻辑表示[29]，即“M-P 模型”，表明逻辑运算能够模拟大脑行为进而发展神经形态计算，因此通过器件实现布尔逻辑具有重要意义[30-31]。

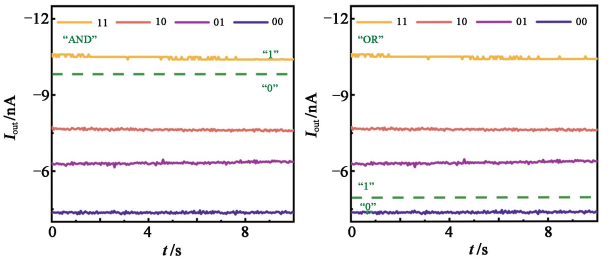
图 7(a)显示了在生物大脑中，突触前神经元利用视觉信号和电信号调节突触后呈现响应的效果。图 7(b)表示在器件的逻辑运算中，将持续光照 10 s (625 nm，0.45 mW·cm^{-2})视为光输入的“1”逻辑状态，无光源状态视为“0”逻辑状态，在以施加持续时长为 10 s、电压值分别为＋30 V 与－50 V 的 V_g 分别对应电信号输入的“0”和“1”逻辑状态(读取电压 V_{ds}＝－1 V)。图 7(c)用逻辑门的符号表示了 OST 的逻辑功能。在本实验中，将光输入与电输入信号状态组合为四种输入模式(分别为“00”、“01”、“10”和“11”)，其中“11”状态为同时施加光照与－50 V 的 V_g。OST 布尔逻辑功能测试的电路示意图如图 7(d)所示。对测得的数据进行分析，在图 7(e)中将－9.5 nA 设为“AND”逻辑的阈值，定义 $|I_{ds}|$ 大于 9.5 nA 时输出逻辑为“1”，在低于上述阈值时输出为“0”。在图 7(f)中，将－5 nA 设为“OR”逻辑的阈值，当 $|I_{ds}|$ 大于 5 nA 时，输出逻辑为“1”，当阈值小于 5 nA 时输出为“0”。表 1 所示实验结果真值表与表 2 布尔逻辑真值表一致，说明实验成功地使用单个晶体管将光信号与电信号作为双输入逻辑状态模拟了“AND”与“OR”的逻辑。由此可见，本实验制备的 OST 为布尔逻辑运算的硬件开发、简化逻辑电路方面提供了具有潜力的方案。



(a) 光电调制突触响应示意图



(b) OST 器件逻辑测试示意图；(c) AND 和 OR 逻辑门的操作符号；(d) 测试电路图



(e) AND 逻辑运算测试结果图　　(f) OR 逻辑运算测试结果图

图 7　布尔逻辑测试图

表 1　实验结果真值表

Input	Ele	0	0	1	1
	Opt (0.45 mW·cm^{-2})	0	1	0	1
"OR"	I_{out}(−5 nA)	0	1	1	1
"AND"	I_{out}(−9.5 nA)	0	0	0	1

表 2　布尔逻辑真值表

Input	0	0	1	1
	0	1	0	1
Output "OR"	0	1	1	1
"AND"	0	0	0	1

3　结论

综上所述，本实验证实了 ITO/P(VDF-TrFE)/CuPc/Au 结构的有机三端器件在模拟突触功能上的可行性。该器件制备工艺比较简单，对 625 nm 波长的光照具有显著响应。实验结果表明，该器件在不同的光照持续时间、光照频率、光照次数下光电流的衰减程度有明显的差异，即 STP 到 LTP 的转变，说明该器件在本实验中成功地模拟了基础的生物视觉突触功能。同时该器件对光脉冲频率响应体现出高通滤波的特性，说明其在图像处理领域也具有一定的应用潜力。P(VDF-TrFE)层的不同极化状态对光电流衰减速率的调制效果，模拟了生物对外部光照刺激的选择性记忆，并且利用剩余极化强度的保持特点模拟了大脑施加注意的行为与受外部刺激的发生时间点上不同步的情况，从而可以从存储的角度进一步探究剩余极化状态随着时间的变化对电流调制效果的影响，即注意力随时间变化对大脑学习效果的影响。通过光电协同调制，实现了布尔逻辑中“AND”与“OR”的逻辑，为简化编程逻辑电路领域提供了良好的实施方案。据报道 P(VDF-TrFE) 与 CuPc 在柔性器件领域具有应用潜力[32-37]，可以结合铁电材料的存储优势[38-39]在光存储、柔性测试等方面进一步展开研究。

参考文献：

[1] Wulf W A, McKee S A. Hitting the memory wall: Implications of the obvious[J]. ACM SIGARCH Computer Architecture News, 1995, (23): 20-24.

[2] Yang J Q, Wang R P, Ren Y, et al. Neuromorphic engineering: From biological to spike-based hardware nervous systems[J]. Adv. Mater., 2020, 32: 2003610.

[3] Li Z, Tang W, Zhang B, et al. Emerging memristive neurons for neuromorphic computing and sensing[J]. Science and Technol. of Adv. Mater., 2023, 24(1): 2188878.

[4] Zhan C, Jiang Y Y, Yang M Y, et al. Synthesis and optoelectronic properties of a novel molecular semiconductor of dithieno[5, 6-b: 11, 12-b′] coronene-2, 3, 8, 9-tetracarboxylic tetraester[J]. Chinese Chemical Lett., 2014, 25: 65-68.

[5] Xiao J, Liu S, Liu Y, et al. Synthesis, structure and physical properties of 5, 7, 14, 16-tetraphenyl-8: 9, 12: 13-bisbenzohexat-wistacene[J]. Chem.-An Asian J., 2012, 7: 561-564.

[6] Huang H, Chen D, Li F, et al. BN-embedded eleven-ring fused heteroaromatics: Synthesis, optoelectronic properties and fluoride susceptibility[J]. Dyes and Pigments, 2020, 177: 108271.

[7] Wang T Y, Meng J L, He Z Y, et al. Fully transparent, flexible and waterproof synapses with pattern recognition in organic environments[J]. Nanoscale Horizons, 2019, 4: 1293-1301.

[8] Qi H, Chang C, Zhang L. Properties and applications of biodegradable transparent and photoluminescent cellulose films prepared via a green process[J]. Green Chemistry, 2009, 11: 177-184.

[9] Kim S, Lee Y, Park M, et al. Dimensionality dependent plasticity in halide perovskite artificial synapses for neuromorphic computing[J]. Advanced Electronic Materials, 2019, 5: 1900008.

[10] Lee Y, Oh J, Xu W, et al. Stretchable organic optoelectronic sensorimotor synapse[J]. Science Advances, 2018, 4: eaat7387.

[11] Park H L, Kim H, Lim D, et al. Retina-inspired carbon nitride-based photonic synapses for selective detection of UV light[J]. Adv. Mater., 2020, 32: 1906899.

[12] Seo S H, Jo S H, Kim S H, et al. Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition[J]. Nature Communications, 2018, 9: 5106.

[13] Park Y J, Bae J. Novel P(VDF-TrFE) polymer electrolytes:

Their use in high-efficiency, all-solid-state electrochemical capacitors using ZnO nanowires[J]. J. Electrochem. Sci. Technol., 2018, 9: 126-132.

[14] Das S, Appenzeller J. FeTRAM. An organic ferroelectric material based novel random access memory cell[J]. Nano Lett., 2011, 11(9): 4003-4007.

[15] Mali S S, Dalavi D S, Bhosale P N, et al. Electro-optical properties of copper phthalocyanines (CuPc) vacuum deposited thin films[J]. RSC Adv., 2012, 2: 2100-2104.

[16] MacDonald G A, Veneman P A, Placencia D, et al. Electrical property heterogeneity at transparent conductive oxide/organic semiconductor interfaces: mapping contact ohmicity using conducting-tip atomic force microscopy[J]. ACS Nano, 2012, 6: 9623-9636.

[17] Xu J, Liu X, Hou W, et al. Effect of solvent-vapour annealing on morphology, structure of copper (Ⅱ) phthalocyanine thin films and device performance [J]. Bulletin of Materials Science, 2018, 41: 111.

[18] Thirmal C, Mohan P N, Suresh G, et al. Improved dielectric and AC conductivity properties of P(VDF-TrFE)-Nafion blends for high-temperature flexible capacitor applications [J]. Current Appl. Phys., 2022, 44: 63-70.

[19] Yu R, He L, Gao C, et al. Programmable ferroelectric bionic vision hardware with selective attention for high-precision image classification[J]. Nature Communications, 2022, 13: 7019.

[20] Siebner H R, Funke K, Aberra A S, et al. Transcranial magnetic stimulation of the brain: What is stimulated? -A consensus and critical position paper [J]. Clinical Neurophysiology, 2022, 140: 59-97.

[21] Furshpan E J, Potter D D. Transmission at the giant motor synapses of the crayfish[J]. The J. of Physiology, 1959, 145: 289-325.

[22] Levine D N. Sherrington's "The Integrative action of the nervous system": A centennial appraisal [J]. J. of the Neurological Sciences, 2007, 253: 1-6.

[23] Pereda A. Electrical synapses and their functional interactions with chemical synapses [J]. Nature Reviews Neuroscience, 2014, 15: 250-263.

[24] Morris R G. Long-term potentiation and memory [J]. Philos. Trans. R. Soc. Lond. B Biol. Sci., 2003, 358: 643-647.

[25] Dai S, Zhao Y, Wang Y, et al. Recent advances in transistor-based artificial synapses[J]. Advanced Functional Materials, 2019, 29: 1903700.

[26] Zhang Y, Huang Z, Jiang J E. Emerging photoelectric devices for neuromorphic vision applications: Principles, developments, and outlooks[J]. Science and Technol. of Advanced Materials, 2023, 24: 2186689.

[27] Huang W, Hang P J, Wang Y, et al. Zero-power optoelectronic synaptic devices[J]. Nano Energy, 2020, 73: 104790.

[28] Nath D, Dey P, Joseph A M, et al. CuPc/C60 heterojunction for high responsivity zero bias organic red light photodetector[J]. Appl. Phys. A, 2020, 126(8): 627.

[29] McCulloch W S, Pitts W. A logical calculus of the ideas immanent in nervous activity[J]. Bulletin of Mathematical Biophysics, 1943, 5: 115-133.

[30] Park H L, Lee Y, Kim N, et al. Flexible neuromorphic electronics for computing, soft robotics, and neuroprosthetics [J]. Adv. Mater., 2020, 32(15): 1903558.

[31] Yang Y C, Yin M H, Yu Z Z, et al. Multifunctional nanoionic devices enabling simultaneous heterosynaptic plasticity and efficient in-memory Boolean logic [J]. Advanced Electronic Materials, 2017, 3(7): 1700032.

[32] Yang Z H, Peng Y, Xu Y, et al. Bending strain induced photocurrent crossover from positive to negative in the flexible organic phototransistors[J]. Organic Electronics, 2020, 79: 105614.

[33] Li X J, Wang Y P, Sun S, et al. Flexible and ultrasensitive piezoelectric composites based on highly (001)-assembled $BaTiO_3$ microplatelets for wearable electronics application [J]. Adv. Mater. Technol., 2019, 4: 1900689.

[34] Song J, Wang X Y, Liao J H, et al. Horizontally-oriented growth of organic crystalline nanowires on polymer films for In-situ flexible photodetectors with Vis-NIR response and high bending stability[J]. Advanced Functional Materials, 2023, 33: 2213888.

[35] Nath B, Ramamurthy P C, Mahapatra D, et al. Broadband flexible CuPc-PCBM photodetector with responsivity in different spectral regions[J]. IEEE J. on Flexible Electron., 2023, 2: 209-215.

[36] Luo Y, Liu J, Zhang J, et al. A wearable nanoscale heart sound sensor based on P(VDF-TrFE)/ZnO/GR and its application in cardiac disease detection[J]. Beilstein J. of Nanotechnology, 2023, 14: 819-833.

[37] Ping Y F, Xia W M, Zhou J H, et al. A $(Ba_{0.94}Ca_{0.06})(Ti_{0.95}Zr_{0.05})O_3$ ceramic sheet doping to improve the inverse piezoelectric effect of the poly (vinylidene fluoride-trifluoroethylene)-based composite film [J]. Polymer Composites, 2023, 44(10): 6773-6782.

[38] Liu L, Wang H, Wu Q, et al. Ferroelectric-gated ReS2 field-effect transistors for nonvolatile memory [J]. Nano Research, 2022, 15: 5443-5449.

[39] Sun Y, He N, Wang Y, et al. Multilevel memory and artificial synaptic plasticity in P(VDF-TrFE)-based ferroelectric field effect transistors[J]. Nano Energy, 2022, 98: 107252.

作者简介：

王荃田(1999—)，女，陕西省汉中市人，硕士研究生，主要研究方向为有机半导体光电器件。