研究论文

Sb_2Se_3 铁电晶体管突触器件的制备及其性能研究

柯榕坚，赖云锋*

（福州大学 物理与信息工程学院，福州 350108）

摘要：铁电晶体管（ferroelectric field-effect transistor, FeFET）兼具无损读取、低功耗以及栅压可调的非易失沟道电导等优势，被认为是实现高性能人工突触器件的重要候选之一。为满足神经形态系统对多模态信息处理的需求，本研究设计并制备一种融合电信号与光信号感知功能的 FeFET 型突触器件。采用 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$（HZO）作为铁电栅介质层，以光敏 Sb_2Se_3 半导体作为导电沟道层，成功制备出 Sb_2Se_3 铁电晶体管。实验结果表明，通过调控栅极电脉冲参数，该器件能够有效模拟兴奋性突触后电流（excitatory postsynaptic current, EPSC）、双脉冲易化（paired-pulse facilitation, PPF）以及短时程可塑性到长时程可塑性转变等一系列生物突触行为。在手写数据集识别任务中，该器件实现了 90.2% 的识别精度。在光信号感知方面，该器件在 405~1 050 nm 的宽光谱范围内表现出优异的光电响应特性。当光信号与电信号协同输入时，该器件成功实现了布尔逻辑“与”运算，展现了在光电信息感知与逻辑处理方面的综合性能。研究为开发高效多模态的神经形态计算系统提供了新的材料与器件选择。

关键词：铁电晶体管；人工突触；Sb_2Se_3；$Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$

中图分类号：TN386　　**文献标志码：**A

DOI: 10.3724/jfmd.2511091　　CSTR: 32180.14.jfmd.2511091

Fabrication and performance study of Sb_2Se_3 ferroelectric transistor synaptic devices

KE Rongjian, LAI Yunfeng*

(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: The ferroelectric field-effect transistor (FeFET) is considered a highly promising candidate for high-performance artificial synapses due to its non-destructive readout capability, low power consumption, and gate-voltage-controlled non-volatile modulation of channel conductance. To meet the increasing demand for multimodal information processing in neuromorphic systems, this study introduces a FeFET-based synaptic device that integrates both electrical and optical signal sensing functionalities. The device was fabricated using $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$ (HZO) as the ferroelectric gate dielectric layer and photosensitive Sb_2Se_3 semiconductor as the conducting channel layer. Experimental results indicate that

收稿日期：2025−11−10；　**修订日期：**2025−12−11

基金项目：福建省自然科学基金项目（No. 2025J01460）

作者简介：柯榕坚（2001—），男，硕士研究生，研究方向为智能半导体材料与器件（E-mail: 1310902001@qq.com）

通信作者：赖云锋（1978—），男，教授，研究方向为半导体存储技术（E-mail: yunfeng.lai@fzu.edu.cn）

by modulating the parameters of electrical pulses applied to the gate electrode, the device effectively emulates various biological synaptic behaviors, including excitatory postsynaptic current (EPSC), paired-pulse facilitation (PPF), and the transition from short-term plasticity to long-term plasticity. In a handwritten digit recognition task, the device achieves a recognition accuracy of 90.2%. Regarding optical signal detection, the device demonstrates excellent photoresponse characteristics across a broad spectral range from 405-1 050 nm. Furthermore, through the synergistic use of optical and electrical inputs, the device successfully implements Boolean logic "AND" operations, showcasing its ability to integrate both photoelectric information sensing and logical processing within a single platform. This study offers new material and device alternatives for the development of efficient, multimodal neuromorphic computing systems.

Key words: ferroelectric transistor; artificial synapse; Sb_2Se_3; $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$

0 引言

“存算分离”是冯·诺伊曼架构计算机系统的固有特性，导致其在处理海量数据时面临高能耗和高延迟等问题，难以满足人工智能技术快速发展的需求[1-3]。相比之下，人脑凭借高度并行与存算一体的优势，能够以极低功耗处理复杂信息。因此，发展“类脑”信息处理架构成为突破冯·诺伊曼架构局限的重要方向。突触是神经系统中信息传递的基本单元，因此开发高性能人工突触器件对构建“类脑”处理架构具有重要意义[4-7]。

在众多候选器件中，铁电晶体管（ferroelectric field-effect transistor, FeFET）因其非易失性电导调控、低功耗及快速响应等优势，成为高性能突触器件的重要研究方向[8-13]。近年来，基于 HfO_2 的 FeFET 突触研究取得了显著进展。Liu 等[14] 通过在 HfO_2 中掺杂 La 元素形成 HfLaO 铁电栅介质层，并结合超薄 ITO 沟道，成功制备出低功耗、超快响应的人工突触；Song 等[15] 利用 $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$（HZO）与二维 SnS_2 构建 FeFET，模拟了双脉冲易化、脉冲时序依赖可塑性等突触行为，并在手写数据集识别任务中实现了 94% 的识别精度。

然而，上述 FeFET 器件均采用单一电信号调控，与生物系统对光、声、力等多模态信号的感知能力存在显著差距。以光信号为例，人类约 80% 的信息获取依赖视觉感知。若人工突触器件无法感知光信号，在应用于视觉识别等领域时，需额外集成光电探测器。这种分立结构将引发系统冗杂、信号传递延迟及能耗增加等问题。因此，开发兼具光、电信号感知能力的新型 FeFET，对实现更高效的神经形态系统具有重要意义。

赋予 FeFET 光信号感知能力的有效途径之一是采用光敏材料作为导电沟道层。已有研究采用具有光敏特性的氧化物半导体及二维材料，成功制备出具备光感知能力的 FeFET 器件[16-19]。然而，氧化物半导体受带隙限制，光响应波段较窄（多集中于紫外及部分可见光区域），限制了器件的应用场景；而二维材料则面临大面积制备困难的问题，规模化生产仍具挑战。

为此，本研究提出一种基于 HZO 铁电栅介质层和光敏 Sb_2Se_3 半导体导电沟道层的 FeFET 型突触器件。Sb_2Se_3 是一种二元窄带隙（约 1.21 eV）半导体，具有高吸收系数（$>10^5$ cm^{-1}）和宽光谱响应范围，近年来备受关注[20]。此外，Sb_2Se_3 可通过热蒸发法制备，工艺简单，易于实现大面积且均匀性良好的薄膜沉积。因此，采用 Sb_2Se_3 作为光敏导电沟道层，有望同时克服氧化物半导体光谱响应范围窄以及二维材料难以大规模制备的固有缺陷。实验结果表明，本研究制备的器件可对外部电刺激产生典型的兴奋性突触后电流（excitatory postsynaptic current, EPSC）响应，并成功模拟了双脉冲易化（paired-pulse facilitation, PPF）、短时程可塑性到长时程可塑性转变等关键突触可塑性行为。此外，该器件在模拟手写数据集识别任务中实现了 90.2% 的识别精度。在光电特性方面，器件在 405~1 050 nm 的宽光谱范围内表现出良好的光电响应。进一步地，通过将光信号与电信号协同输入，器件成功实现了布尔逻辑“与”运算。本研究构建的 Sb_2Se_3 铁电晶体管突触器件具备对光电双模态信号的感知

与融合处理能力, 为发展多模态人工突触提供了新的器件选择。

1 实验部分

1.1 器件制备

器件制备流程如图 1 所示, 具体步骤如下: 首先, 将尺寸为 2.0 cm × 2.5 cm 的钠钙玻璃衬底按标准工艺进行清洗; 随后, 在衬底表面旋涂负性光刻胶, 并通过光刻工艺形成底部条状栅极图案。光刻步骤依次包括旋涂、前烘、曝光、后烘、显影、甩干及坚膜。在栅极材料的选择上, 由于 TiN 电极在 HZO 薄膜退火过程中能够提供额外应力, 促进 HZO 铁电相的形成, 因此本研究采用 TiN 作为电极材料[21-22]。利用磁控溅射法生长约 25 nm 厚的 TiN 薄膜, 再经湿法去胶工艺完成 TiN 底栅电极的制备。

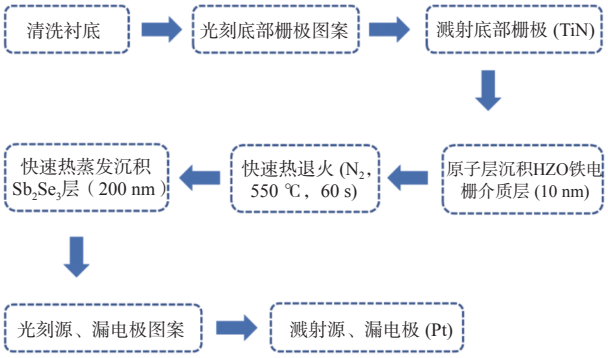

图 1 器件制备流程

Fig. 1 Fabrication process of the device

在完成底部栅极制备后, 分别以四 (二甲胺) 铪 (tetrakis(dimethylamido)hafnium, TDMAH)、四 (二甲胺) 锆 (tetrakis(dimethylamido)zirconium, TDMAZ) 和去离子水作为 Hf、Zr 和 O 的前驱体源, 采用原子层沉积 (atomic layer deposition, ALD) 工艺在 280 ℃ 下沉积厚度为 10 nm 的 HZO 薄膜。沉积完成后, 在 550 ℃ 的氮气 (N_2) 环境中对器件进行 60 s 的快速热退火处理, 以诱导 HZO 薄膜形成铁电正交相, 从而赋予其铁电特性。随后, 将器件转移至快速热蒸发管式炉中, 在 570 ℃ 下沉积厚度约为 200 nm 的 Sb_2Se_3 薄膜。接下来, 通过光刻工艺在 Sb_2Se_3 表面定义顶部源漏电极图案, 电极间距为 10 μm, 宽度为 50 μm。最后, 通过溅射工艺沉积厚度为 100 nm 的 Pt 电极, 并在去胶后完成源漏电极的制备。TiN 及 Pt 电极的具体制备参数如表 1 所示, 器件的结构示意图如图 2 所示。

表 1 电极溅射参数

Table 1 Sputtering parameters for electrodes

薄膜	溅射功率/W	溅射气压/Pa	靶基距/cm	时间/min	膜厚/nm
TiN	130	0.15	12.8	5	25
Pt	60	0.50	12.8	15	100

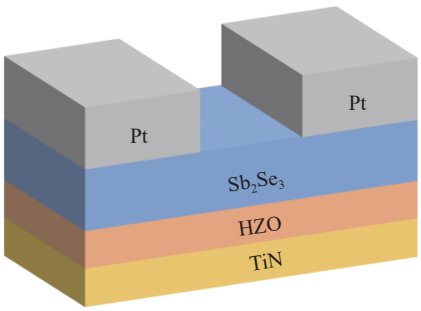

图 2 突触器件结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the synaptic device structure

1.2 器件性能表征

器件的转移特性与突触性能测试采用半导体参数分析仪 (概伦 FS-PRO) 完成, 铁电性能测试则通过铁电测试仪 (Radiant Technologies, Precision Ⅱ) 进行表征。实验光学测试平台包括波长为 405 nm、530 nm、625 nm、850 nm 和 1 050 nm 的发光二极管 (light-emitting diode, LED) 光源 (Thorlabs 公司), 4 通道 LED 驱动器 (Thorlabs 公司), 光功率计以及 F05A 型函数信号发生器。

2 结果与讨论

2.1 Sb_2Se_3 铁电晶体管的基本电学性能测试

在 FeFET 器件中, 铁电栅介质层的极化行为对晶体管沟道电导的调控起着关键作用。为验证本研究制备的 HZO 薄膜的铁电性, 首先对采用相同工艺条件制备的 TiN/HZO/Pt 结构电容器进行电滞回线测试 (*P*-*V* 测试)。结果如图 3(a) 所示, 在±5 V 的电压扫描范围内, 电滞回线表现出显著的铁电特征, 其二倍剩余极化强度 ($2P_r$) 超过 30 μC·cm^{-2}。该结果表明, 本研究制备的 HZO 薄膜具有优异的

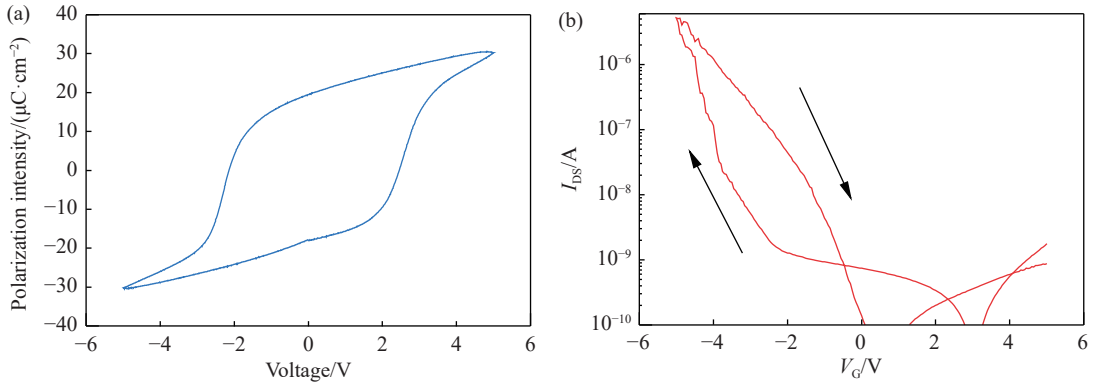

图 3　器件的基本电学性能测试。(a)TiN/HZO/Pt 电容器的 *P*-*V* 曲线;(b)Sb_2Se_3 铁电晶体管的转移特性曲线

Fig. 3 Basic electrical performance characterization of the device. (a) *P*-*V* curve of the TiN/HZO/Pt capacitor; (b) transfer curve of the Sb_2Se_3 ferroelectric transistor

铁电性能,为后续实现 FeFET 对沟道电导的调控及突触行为的模拟奠定了基础。

随后,制备以 HZO 为栅介质层、Sb_2Se_3 为导电沟道层的 FeFET 器件。图 3(b)展示了晶体管在 ±5 V 扫描电压范围下的转移特性曲线,其中,I_{DS} 为沟道电流,V_G 为栅极电压。曲线呈现 P 型晶体管特性,开关比约为 3×10^3,最小亚阈值摆幅为 230 $mV\cdot dec^{-1}$。此外,转移特性曲线表现出顺时针滞回现象,这是 FeFET 的典型特征。对于 P 型 FeFET 而言,当施加正栅压时,铁电层中的铁电畴向上极化翻转,排斥沟道中的空穴,导致阈值电压升高;而当施加负栅压时,铁电畴向下极化翻转,吸引沟道空穴,从而降低阈值电压。这一过程最终导致转移特性曲线呈现顺时针滞回。

2.2　Sb_2Se_3 铁电晶体管的突触特性

突触是神经系统中神经元之间实现信息传递的关键结构。如图 4(a)所示,生物突触主要由突触前膜、突触间隙和突触后膜组成。当动作电位到达突触前膜时,神经递质从突触前膜释放,经过突触间隙作用于突触后膜上的受体,从而引发突触后电流的变化,进而改变突触后神经元的膜电位,完成信息传递过程。将晶体管的栅极视为突触前膜,漏极视为突触后膜,在此基础上开展对器件突触特性的研究。

为模拟生物突触在不同刺激强度下 EPSC 的变化,对晶体管栅极施加不同幅度的电脉冲刺激(−1.0~−4.5 V),脉冲持续时间为 100 ms,测试结果如图 4(b)所示。在不同幅度的电脉冲刺激下,器件的 EPSC 表现出不同程度的响应,且随着刺激幅度的增加,EPSC 响应持续增强,这与生物突触对外部刺激增强时的响应特性一致。在撤去电脉冲 1 s 后,提取电流水平发现,EPSC 仍能维持在一定水平,并随电脉冲幅值的增大呈现出多级非易失性电导变化。图 4(c)对此现象进行了说明:在撤去电脉冲后,铁电层保留剩余极化,部分铁电畴保持翻转状态,并对沟道载流子(空穴)产生吸引作用。随着电脉冲幅值的增大,剩余极化增强,翻转的铁电畴数量增多,导致更多载流子积累,从而形成逐级递增的非易失性电导状态。此外,对器件栅极施加不同幅度的正电压脉冲(1.0~4.5 V),脉冲宽度同样为 100 ms,测试结果如图 4(d)所示。在施加正栅压后,器件表现出抑制性突触后电流(inhibitory postsynaptic current, IPSC)响应。随着脉冲幅度的增大,IPSC 响应增强,表明抑制效果也随之增强,这一特性与 EPSC 随外部刺激增强而增强的现象类似。

突触可塑性是指突触间连接强度可调节的特性。根据持续时间的不同,突触可塑性通常分为短时程可塑性和长时程可塑性。短时程可塑性的重要表现形式为 PPF,其现象为:当两个相同的刺激信号在短时间内连续作用于突触时,第 2 个刺激信号引起的突触后电流响应大于第 1 个刺激信号引起的响应。为模拟 PPF 现象,对器件栅极施加两个连续的电脉冲信号,脉冲幅值为−3.5 V,脉冲持续时间为 100 ms,脉冲间隔为 100 ms。如图 5(a)所示,器件对第 2 个电脉冲的响应电流明显大于对第 1 个电脉冲的响应电流,成功模拟了生物突触的

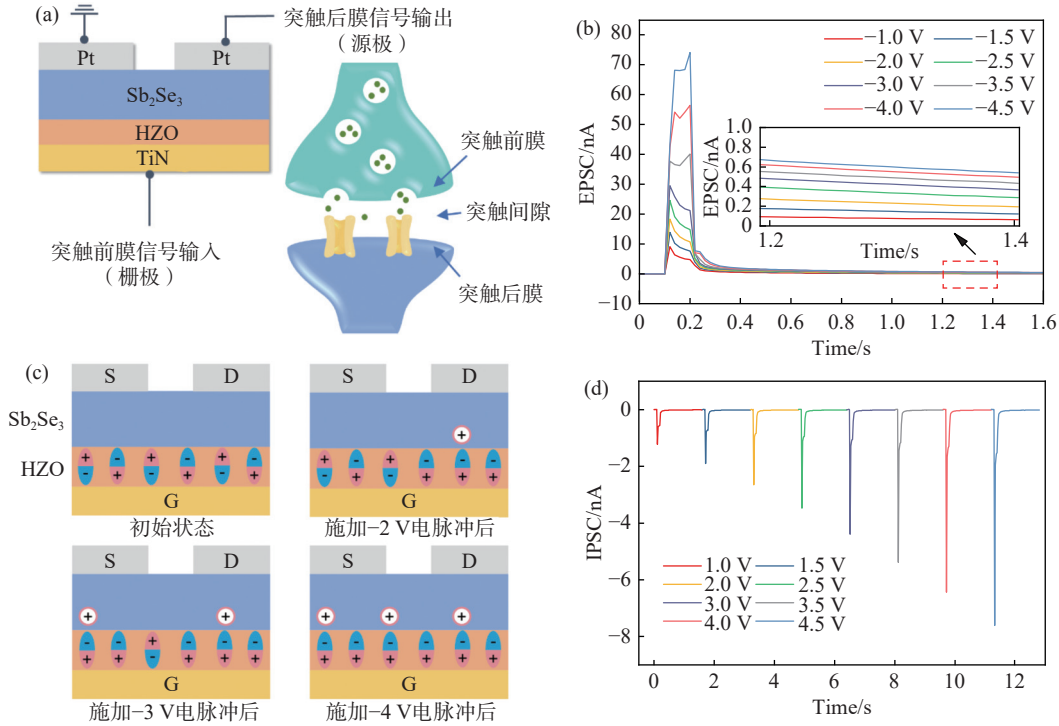

图 4　器件在单脉冲刺激下的突触后电流响应。(a)生物突触结构示意图;(b)不同幅值栅极电脉冲刺激下器件的 EPSC 响应;(c)器件非易失性电导变化机制;(d)不同幅值栅极电脉冲刺激下器件的 IPSC 响应

Fig. 4　Postsynaptic current response characteristic of the device under single-pulse stimulation. (a) Schematic diagram of the structure of a biological synapse; (b) EPSC response of the device when subjected to gate electrical pulse stimulation with varying amplitudes; (c) mechanism of non-volatile conductance changes in the device; (d) IPSC response of the device under gate electrical pulse stimulation with differing amplitudes

PPF 现象。当对栅极施加电脉冲时,铁电层中的铁电畴发生极化翻转;当脉冲撤去后,铁电畴的翻转并未完全消失。第 2 个脉冲来临时,铁电畴的翻转得以累积,铁电极化强度进一步增强,从而诱导沟道电流增大。为进一步研究双脉冲间隔对 PPF 现象的影响,固定脉冲宽度为 100 ms,改变脉冲时间间隔 ΔT,测试双脉冲电流的变化,并提取 PPF 指数($A_2/A_1\times100\%$),其中 A_1 与 A_2 分别为第 1 个与第 2 个脉冲刺激下的 EPSC 响应峰值。如图 5(b)所示,随着双脉冲时间间隔 ΔT 的增大,PPF 指数逐渐衰减,表明双脉冲易化程度随脉冲时间间隔的增加而下降。

对于生物突触而言,通过强化外部刺激可实现突触可塑性从短时程可塑性向长时程可塑性的转变。对此,通过改变对栅极施加的连续电脉冲数量,探究这种可塑性转变过程。其中,连续电脉冲的幅值为−3.5 V,脉冲时间和脉冲间隔均为 100 ms。图 5(c)展示了不同脉冲数量刺激下器件的 EPSC 变化,在施加的电脉冲数量从 1 增加至 50 的过程中,响应电流持续增大。当电脉冲撤去后,随着刺激脉冲数量的增加,电流衰减速度放缓,电流能够更长时间保持在较高水平,从而实现了短时程可塑性向长时程可塑性的过渡。此外,改变电脉冲信号频率也会影响突触可塑性行为。如图 5(d)所示,向栅极施加不同频率的 10 个电脉冲信号,观察 EPSC 的变化。脉冲幅值为−3.5 V,脉冲时间为 100 ms,通过改变脉冲间隔时间调节脉冲频率。随着脉冲频率的增加,EPSC 增大得更快;在脉冲撤去后,EPSC 衰减速度更慢,这体现了 EPSC 具有脉冲频率依赖的可塑性。

为测试器件的突触权重更新行为,对器件施加从 −3.00~−4.95 V(步进 −0.05 V)以及 1.50~3.45 V(步进 0.05 V)的 80 个连续电脉冲信号,脉冲宽度和间隔均为 100 ms,模拟器件在长时程增强(long-term potentiation, LTP)和长时程抑制(long-term depression, LTD)过程中的权重变化。测试结果如图 6(a)所示。为进一步探究器件在神经形态系统

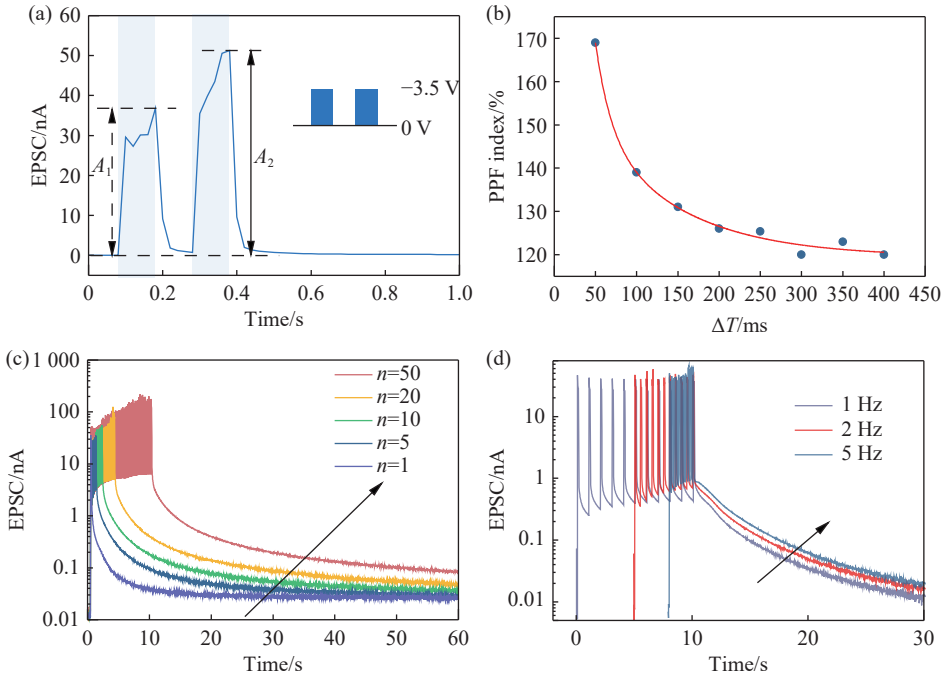

图 5　器件在多脉冲刺激下的突触可塑性行为。(a) EPSC 随时间的变化关系；(b) PPF 指数随脉冲时间间隔的变化关系；(c)电脉冲数量对 EPSC 的影响；(d)电脉冲频率对 EPSC 的影响

Fig. 5 Synaptic plasticity behavior of the device under multi-pulse stimulation. (a) Relationship between EPSC and time; (b) relationship between the PPF index on pulse interval; (c) effect of the number of electrical pulses on EPSC; (d) effect of electrical pulse frequency on EPSC

中的应用潜力，使用多层感知机模拟器（NeuroSim V3.0）模拟器件在 MNIST（modified National Institute of Standards and Technology）手写数据集分类识别任务中的识别精度变化[23]。该模拟器的神经网络结构由 400 个输入神经元、100 个隐藏神经元和 10 个输出神经元组成。其中，输入层的 400 个神经元对应于 20×20 的 MNIST 图像，输出层的 10 个神经元对应数字 0~9。突触器件在 LTP/LTD 行为下的权重变化按以下公式拟合：

$$G_{\mathrm{LTP}} = B\left(1-\mathrm{e}^{-P/A}\right)+G_{\min} \tag{1}$$

$$G_{\mathrm{LTD}} = -B\left[1-\mathrm{e}^{(P-P_{\max})/A}\right]+G_{\max} \tag{2}$$

$$B = \frac{G_{\max}-G_{\min}}{1-\mathrm{e}^{-P_{\max}/A}} \tag{3}$$

式中，G_{LTP} 和 G_{LTD} 分别为 LTP 和 LTD 的电导，$G_{\max}$ 和 $G_{\min}$ 分别为最大电导和最小电导，P 为施加的脉冲数量，$P_{\max}$ 为施加的最大脉冲数，A 为控制权重更新非线性行为的参数。通过拟合，获得本研究中

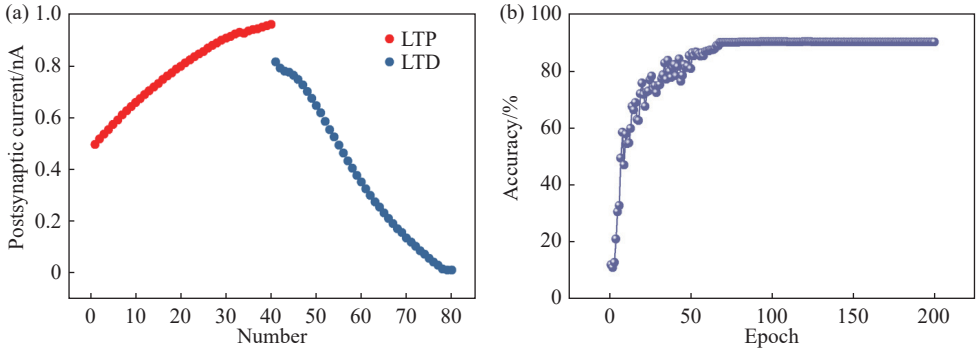

图 6　器件在手写数据集识别任务中的训练精度模拟。(a)LTP/LTD 过程的突触权重变化；(b)不同训练周期下图像识别精度的变化

Fig. 6 Simulation of training accuracy of the device in handwritten digital recognition task. (a) Synaptic weight change during LTP/LTD processes; (b) variation in image recognition accuracy across different training epochs

器件在 LTP 与 LTD 权重更新过程中的非线性因子值分别为 1.46 和 1.37, G_{max} 与 G_{min} 的比值大于 80。学习结果如图 6(b)所示, 器件在 200 个训练周期后能够达到 90.2% 的最大识别精度。

2.3 器件的光响应与光电布尔逻辑“与”运算

选用 Sb_2Se_3 作为半导体层, 利用其光敏特性实现器件对光信号的感知能力。为评估器件的光响应性能, 采用不同波长的光脉冲照射器件表面, 光功率密度固定为 5 mW·cm^{-2}, 脉冲持续时间与间隔时间均设置为 5 s。测试过程中, 栅极电压保持为 0 V, 漏极电压设为 1 V。如图 7(a)所示, 器件在 405~1 050 nm 波长范围内的光源照射下均表现出显著的光电流响应。在图 7(b)中, 提取不同波长照射条件下的响应度(R), 计算公式如下:

$$R = \frac{I_{ph}}{P_{in}S} \tag{4}$$

式中: R 为响应度, A·W^{-1}; $I_{ph} = I_{light} - I_{dark}$, 为光电流, 其中, I_{light} 为光照下的总电流, I_{dark} 为暗电流; P_{in} 为入射的光功率密度; S 为有源区域的面积。实验结果表明, 在 405~1 050 nm 的波长范围内, 器件的光响应度均超过 0.2 A·W^{-1}, 并在 625 nm 的红光波段达到最大值 0.59 A·W^{-1}。分析认为, 器件在 625 nm 波段表现出最高响应度的原因主要与 Sb_2Se_3 材料的本征光吸收特性及表面复合损失有关。相比于更长波段的光信号, 625 nm 的光信号具有更高的能量, Sb_2Se_3 对其展现出更高的吸收系数; 而相较于短波长光信号, 625 nm 光信号的穿透深度更大, 光生载流子主要在体区产生, 从而有效减少了表面复合损失[24]。因此, 器件在 625 nm 波段实现了最大的光响应度。上述实验结果表明, 本研究制备的器件具有较宽的光谱响应范围, 对可见光及近红外波段的光源均表现出良好的光响应性能, 充分展现了在宽光谱范围内的光电探测能力。

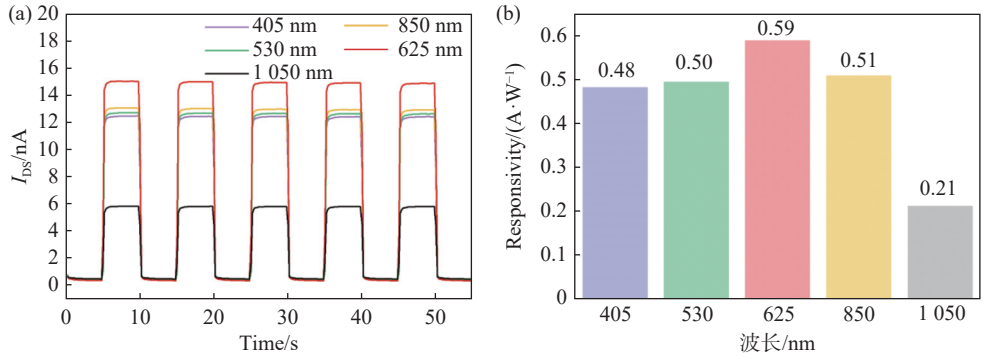

图 7 器件对 405~1 050 nm 波长范围内光的光电响应。(a)I-T 曲线; (b)响应度

Fig. 7 Photoresponse of the device to light in the wavelength range of 405-1 050 nm. (a) I-T curve; (b) responsivity

Pei 等[25] 指出, 将突触器件与传统逻辑门相结合是开发混合系统的关键一步。此类系统可同时发挥神经形态计算与传统计算范式的优势, 在人工智能与机器学习、实时数据处理及边缘计算等领域具有重要意义。为深入探究器件光电协同作用及其在逻辑运算方面的能力, 设计一种以光信号和电信号作为输入的布尔逻辑“与”运算方案。其中, 光输入信号的波长为 625 nm, 功率密度为 5 mW·cm^{-2}, 输入的电脉冲信号的电压为−3.5 V, 脉冲持续时间为 100 ms。当存在光信号或电信号输入时, 对应的输入信号定义为“1”, 否则为“0”。如图 8 所示, 在输入外部信号的同时, 通过读取沟道电流 I_{DS} 的大小判断输出状态。具体而言, 当 I_{DS} 大于阈值电流(60 nA)时, 输出为“1”, 否则为“0”。通过观察 I-T 曲线发现, 仅当光信号和电信号同时输入时, I_{DS} 才会超过阈值电流, 此时输出状态为“1”。分析

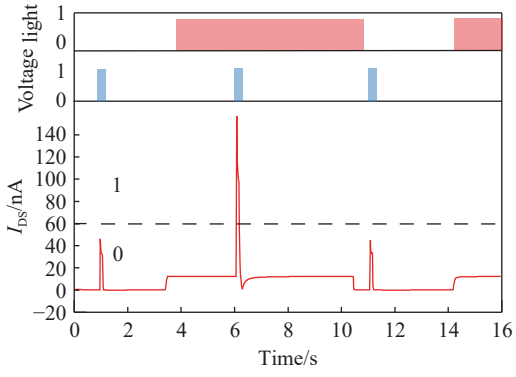

图 8 光信号与电信号混合输入时沟道电流 I_{DS} 的变化

Fig. 8 Channel current (I_{DS}) variation under mixed optical and electrical input signals

认为，在光信号输入时会生成大量光生载流子，而施加电信号能有效吸引这些载流子，从而形成较大的沟道电流，实现光电协同增强电流的效果。该行为符合光电信号逻辑“与”运算的特征，其真值表如表 2 所示。上述测试结果表明，所制备的突触器件具备光电双模感知能力以及双模信号输入的逻辑运算功能，进一步拓展了 FeFET 型突触器件的应用场景。

表 2　布尔逻辑 “与” 运算的真值表

Table 2 Truth table of Boolean AND operation

Voltage	Light	Output
0	0	0
1	0	0
0	1	0
1	1	1

3　结论

本研究以 HZO 作为铁电栅介质层，光敏 Sb_2Se_3 半导体作为导电沟道层，制备了 FeFET 型人工突触器件，并成功模拟了 EPSC、PPF 以及短时程可塑性到长时程可塑性转变等突触行为。研究表明，通过调整栅极电压脉冲参数，可有效调控铁电栅介质层的极化状态，从而实现沟道电导的非易失性调控。此外，在模拟手写数据集识别任务中，该器件的识别精度可达 90.2%。在光信号感知方面，器件对 405~1 050 nm 波段的光信号表现出良好的光电响应特性。将光信号与电信号作为两种输入信号时，可在单一器件中实现布尔逻辑“与”运算。该突触器件兼具多模态信息感知和逻辑运算能力，为构建高效的神经形态系统提供了新的器件设计思路。

致谢：

本工作在福建省光伏行业技术开发基地完成，感谢团队负责人程树英教授提供的优良实验环境和支持。

参考文献：

[1] Upadhyay N K, Joshi S, Yang J J. Synaptic electronics and neuromorphic computing[J]. Science China Information Sciences, 2016, 59(6): 061404.

[2] Kim M K, Lee J S. Short-term plasticity and long-term potentiation in artificial biosynapses with diffusive dynamics[J]. ACS Nano, 2018, 12(2): 1680-1687.

[3] 武俊齐, 赖凡. 后摩尔时代新兴计算芯片进展 [J]. 微电子学, 2020, 50(3): 384-388.
Wu Junqi, Lai Fan. Progress of new computing chips in the more than Moore's era[J]. Microelectronics, 2020, 50(3): 384-388.

[4] Jang Y, Park J, Kang J, et al. Amorphous InGaZnO (a-IGZO) synaptic transistor for neuromorphic computing[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2022, 4(4): 1427-1448.

[5] 周琮泉, 秦瑞东, 李鑫. 基于非易失性存储器件的类脑计算研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2021, 27(6): 505-513.
Zhou Congquan, Qin Ruidong, Li Xin. Research progress of nuero-inspired computing using non-volatile memory[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2021, 27(6): 505-513.

[6] 章鹏, 陈耿旭. 基于二维铁电钙钛矿的人工光突触晶体管制备与性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(1): 64-69.
Zhang Peng, Chen Gengxu. Studies on the fabrication and performance of artificial optical synaptic transistor based on 2D perovskite ferroelectrics[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2025, 31(1): 64-69.

[7] He Ke, Wang Cong, He Yongli, et al. Artificial neuron devices[J]. Chemical Reviews, 2023, 123(23): 13796-13865.

[8] Kim I J, Lee J S. Ferroelectric transistors for memory and neuromorphic device applications[J]. Advanced Materials, 2023, 35(22): 2206864.

[9] Kim D, Jeon Y R, Ku B, et al. Analog synaptic transistor with Al-doped HfO_2 ferroelectric thin film[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2021, 13(44): 52743-52753.

[10] Li Qingxuan, Wang Siwei, Li Zhenhai, et al. High-performance ferroelectric field-effect transistors with ultra-thin indium tin oxide channels for flexible and transparent electronics[J]. Nature Communications, 2024, 15: 2686.

[11] 赵兰天, 刘晨鹤, 任青华, 等. 基于铁电材料的人工突触器件的研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(3): 160-168.
Zhao Lantian, Liu Chenhe, Ren Qinghua, et al. Research progress of artificial synaptic devices based on ferroelectric materials[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2020, 26(3): 160-168.

[12] Oh S, Kim T, Kwak , et al. $HfZrO_x$-based ferroelectric synapse device with 32 levels of conductance states for

neuromorphic applications[J]. IEEE Electron Device Letters, 2017, 38(6): 732-735.

[13] Zhao Guoqing, Wu Shuhao, Zhan Xuepeng, et al. Design-technology co-optimizations for symmetric linear synapse behaviors in ferroelectric FET based neuromorphic computing[J]. IEEE Transactions on Nanotechnology, 2022, 21: 747-751.

[14] Liu Yongkai, Wang Tianyu, Xu Kangli, et al. Low-power and high-speed HfLaO-based FE-TFTs for artificial synapse and reconfigurable logic applications[J]. Materials Horizons, 2024, 11(2): 490-498.

[15] Song C M, Kim D, Lee, et al. Ferroelectric 2D SnS_2 analog synaptic FET[J]. Advanced Science, 2024, 11(16): 2308588.

[16] Tan Chao, Wu Haijuan, Lin Zhicheng, et al. Human memory-inspired MoS_2/BST ferroelectric phototransistor with synchronous sensory, short-term and long-term memories[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(4): 2414186.

[17] Hao Rui, Hu Xiaoliang, Luo Lili, et al. Two-dimensional optoelectronic memristive device realized by ferroelectric regulation[J]. IEEE Electron Device Letters, 2024, 45(6): 1080-1083.

[18] Eom D, Kim H, Lee W, et al. Temperature-driven co-optimization of IGZO/HZO ferroelectric field-effect transistors for optoelectronic neuromorphic computing[J]. Nano Energy, 2025, 138: 110837.

[19] Chung W, Kim D, Kim J, et al. Optically and electrically modulated artificial synapses based on MoS_2/PZT ferroelectric field-effect transistor for neuromorphic computing system[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2025, 218: 25-34.

[20] Liu Jiaojiao, Chen Zhenbo, Wu Cheng, et al. Recent advances in antimony selenide photodetectors[J]. Advanced Materials, 2024, 36(41): 2406028.

[21] Han D H, Lee A J, Nam M K, et al. Wake-up and endurance characteristics in $Hf_{0.5}Zr_{0.5}O_2$-based metal-ferroelectric-metal capacitor depending on the crystal orientation of the TiN bottom electrodes[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2023, 70(4): 1983-1988.

[22] Lee Y, Goh Y, Hwang J, et al. The influence of top and bottom metal electrodes on ferroelectricity of hafnia[J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2021, 68(2): 523-528.

[23] Chen Paiyu, Peng Xiaochen, Yu Shimeng. NeuroSim+: An integrated device-to-algorithm framework for benchmarking synaptic devices and array architectures[C]//Proceedings of the 2017 IEEE International Electron Devices Meeting. New York: IEEE, 2018: 6.1. 1-6.1. 4.

[24] Cao Yu, Qu Peng, Wang Changgang, et al. Epitaxial growth of vertically aligned antimony selenide nanorod arrays for heterostructure based self-powered photodetector[J]. Advanced Optical Materials, 2022, 10(19): 2200816.

[25] Pei Budan, Han Xuchen, Wang Yan, et al. Dual-functional optoelectronic synaptic device based on $MoTe_2$/h-BN transistor through UV light induced doping[J]. Small, 2025, 21: 2500184.