

文章编号: 1007-4252(2025)02-0113-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0012 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0012

基于手性有机小分子材料的圆偏振光电突触二极管器件

黄伟龙, 陈惠鹏*

(福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108)

摘要:随着数字化进程的持续推进, 光信号处理的复杂度急剧攀升。在单一器件上实现对光信号的多功能、可切换处理, 已成为一项重要的研究目标。基于此, 我们成功研发出一种基于手性有机小分子材料的光电二极管器件。该器件能够在负电压或零电压条件下高精度地区分不同旋向的圆偏振光, 表现出优异的圆偏振光探测性能。当切换至正偏压状态时, 器件在界面层出现电荷累积现象, 使得界面电导率发生变化, 从而产生突触效应。该器件的双模式切换特性突破了传统光电器件的功能单一性限制, 其创新设计结合了手性材料的光电协同调控与突触仿生机制, 为光通信、智能感知与神经形态计算等领域提供了多功能集成化的解决方案, 展现出推动新一代光电技术发展的潜力。

关键词:手性有机小分子; 光电二极管; 圆偏振光; 光电突触; 光通信

中图分类号: TN364.2

文献标志码: A

Circularly polarized optoelectronic synaptic diode device based on chiral organic small molecule materials

HUANG Wei-long, CHEN Hui-peng*

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

Abstract: With the continuous advancement of digitalization, the complexity of optical signal processing has increased dramatically. Achieving multifunctional and switchable processing of optical signals on a single device has become an important research goal. Based on this, we have successfully developed a photodiode device based on chiral organic small-molecule materials. Under the conditions with negative or zero voltage, the device can differentiate circularly polarized light signals with different handedness with a high precision, exhibiting excellent performance in circularly polarized light detection. When switched to a positive bias state, the device exhibits a charge accumulation phenomenon at the interface layer, causing a change in the interfacial conductivity and thus generating a synaptic effect. The dual-

收稿日期: 2025-02-13; 修订日期: 2025-03-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62374033); 国家自然科学基金区域联合重点项目 (No. U21A20497).

作者简介: 黄伟龙 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为神经形态器件 (E-mail: 2965954931@qq.com).

通信作者: 陈惠鹏 (1981—), 男, 博士, 研究员, 主要从事半导体材料器件及应用、神经形态显示等方面的研究 (E-mail: hpchen@fzu.edu.cn).

mode switching characteristics of this device break through the limitation of the single-functionality of traditional optoelectronic devices. Its innovative design combines the optoelectronic synergistic regulation of chiral materials with synaptic biomimetic mechanisms, providing a multifunctional and integrated solution for fields such as optical communication, intelligent sensing, and neuromorphic computing. This device demonstrates the potential in driving the development of next-generation optoelectronic technologies.

Key words: chiral organic small molecules; photodiode; circularly polarized light; optoelectronic synapse; optical communication

0 引言

随着信息技术的迅猛发展,光学信息的处理与传输已成为现代科技中不可或缺的一部分^[1-4]。光通信、光学遥感、神经形态计算等领域的快速进步,不仅推动了社会生产力的提升,也对基础技术提出了更高的要求^[5,6]。在这些领域中,光信号的高效探测与处理,无疑是技术发展的关键环节^[7]。尤其是在当前数字化转型的背景下,光信号处理的复杂度和对处理精度的需求显著增加,传统的元器件往往难以满足多场景、多功能、高性能的应用需求^[8]。因此,能够实现对光信号多功能、可切换处理的高性能元器件,成为了当前研究的热点问题^[9]。光信号处理的核心挑战在于如何高效地获取、转换和利用光学信息。在光通信领域,随着数据传输量的爆发式增长,传统的单信道通信模式已难以契合当下复杂多元的通信需求^[10]。

为了提升通信系统的容量和效率,研究者们提出了偏振复用技术,即利用不同偏振态的光信号来传输信息^[11]。然而,偏振复用技术的成功实施,依赖于能够精确区分和处理不同偏振态的器件。受限于器件结构和材料的局限性,传统器件在这方面的性能往往无法满足高速、高精度的需求^[12]。因此,开发一种能够高效区分不同偏振态信号的器件,成为了光通信领域的迫切需求。

与此同时,人工智能技术的飞速发展,也对新型计算架构提出了新的需求。传统的冯·诺依曼计算架构在处理大规模、复杂数据时,面临着能耗高、延迟大等问题^[13]。为了解决这些问题,神经形态计算作为一种模拟生物神经系统的计算范式应运而生^[14]。神经形态计算通过模拟人脑的信号传递与信息处理机制,能够在模式识别、智能决策等领域展现出巨大的潜力。然而,神经形态计算的实现

依赖于能够模拟生物神经元突触功能的电子器件^[15]。传统电子器件在这方面往往难以满足需求,因此开发一种能够在光电器件中实现光电突触功能的器件,成为了神经形态计算领域的研究重点。

正是在这样的背景下,我们制备了一种手性本体异质结光电二极管,其活性层由手性小分子受体苯并噻二唑类衍生物(S,S)-BTP-4Cl和非手性聚合物给体PM6共混制备而成。值得注意的是,现有材料对圆偏振光的响应范围多局限在可见光区,难以满足近红外波段的技术需求,而我们设计、合成的手性有机小分子(S,S)-BTP-4Cl在近红外波段表现出显著的圆二色吸收能力,其与PM6电子给体构筑的器件能够胜任近红外探测工作,从而为该领域带来了新的解决方案。

该器件不仅在圆偏振光探测方面表现出色,还具备光电突触功能,能够在不同应用场景中实现多功能切换。首先,在光探测方面,该器件在负电压或零电压工况下展示出卓越的圆偏振光探测性能。它能够以极高的精度区分不同偏振态的光信号,这一特性在光通信的偏振复用架构中具有重要应用价值。通过有效地区分不同偏振态的光信号,该器件可以在不增加额外设备的情况下大幅提升光通信系统的信道容量,同时减少信号干扰,确保通信的高质量运转。其次,当该器件切换至正偏压状态时,其内置的光电突触功能模块将被激活。这一功能模块能够在神经形态计算中模拟生物神经元突触的信号传递与信息处理机制,从而为人工智能在模式识别、智能决策等关键领域的突破奠定基础。通过这种模拟生物突触的设计,该器件能够实现更加高效、低功耗的神经形态计算,为未来的智能系统开发提供了新的技术路径^[16-21]。

1 实验

1.1 器件制备

本文制备的器件是以 $25\text{ mm} \times 25\text{ mm} \times 1.1\text{ mm}$ 氧化铟锡 (ITO) 导电玻璃片为基底, 同时作为器件的阳极。首先撕掉玻璃片上自带的静电仿尘膜, 然后使用专用的清洗剂对玻璃片进行第一次清洗。将初步清洗的玻璃片浸入异丙醇和丙酮配合超声清洗机交替清洗, 每次清洗 5 min 。然后在使用去离子水超声去除玻璃片上残留的溶液。重复二次浸入超声步骤。将清洗后的玻璃片用氮气吹干表面的可见水分后放入烘箱干燥 10 min 。之后, 构建器件的功能层, 步骤如下: (1) 空穴传输层 (PEDOT: PSS): 采用旋涂法, 将适量的聚 (3,4-乙烯二氧噻吩) - 聚苯乙烯磺酸 (PEDOT: PSS) 溶液, 在 3500 rpm 的转速下进行涂覆, 然后在空气中 $120\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火 10 min , 以提高其均匀性和结晶性。(2) 活性层 (PM6: (S,S)-BTP-4Cl): 将 PM6 和 (S,S)-BTP-4Cl 按 1:1.2 的质量比混合, 溶于氯仿中, 配成浓度为 16 mg/ml 的溶液, 以 1500 rpm 的转速进行旋涂, 然后在 $110\text{ }^\circ\text{C}$ 下退火 10 min , 以优化其形貌。(3) 电子传输层 (PFN-Br): 将 PFN-Br 溶于甲醇中, 配成浓度为 0.5

mg/ml 的溶液, 以 3000 rpm 的转速进行旋涂。(4) 金属银 (Ag) 电极: 最后, 通过真空蒸发沉积 160 nm 厚的 Ag 电极, 作为器件的阴极, 完成器件制备。

1.2 器件测试

在本实验中, 采用具备全波长输出能力的发光二极管 (LED) 灯作为光源。其发射的光线, 依次透过线性偏振器 (LPVISE100-A, Thorlabs) 与四分之一波片 (AQWP05M - 600, Thorlabs), 以产生圆偏振光。光强度的测定, 借助标准光功率计 (S120VC, Thorlabs) 来完成。针对光电二极管器件的电学特性, 则运用半导体参数分析仪 (Keithley4200-SCS) 来开展测量。使用原子力显微镜 (AFM, MultiMode 8) 对薄膜的表面粗糙度进行表征。上述所有测量工作, 均在室温环境下的空气下进行, 以确保实验条件的一致性与数据的可靠性。

2 结果与讨论

2.1 器件结构与原理

在图 1(a) 中显示了我们所制备光电二极管器件结构图、以及聚合物给体 PM6 和小分子受体

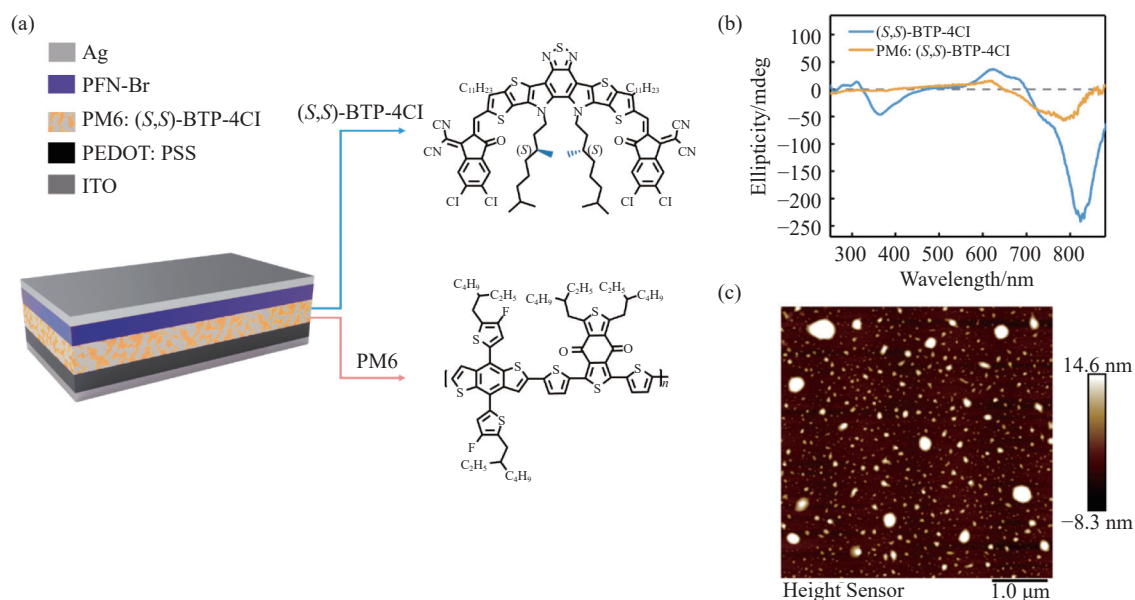


图 1 光电二极管的器件结构及表征。(a) 光电二极管的器件结构以及 (S,S)-BTP-4Cl 和 PM6 的分子结构; (b) (S,S)-BTP-4Cl 及其与 PM6 共混体系的圆二色性 (CD) 谱图; (c) 活性层 PM6:(S,S)-BTP-4Cl 的原子力显微镜图

Fig. 1 Device structure and characterization of photodiodes. (a) The device structure of photodiodes and the molecular structure of PM6 and (S,S)-BTP-4Cl. (b) The circular dichroism (CD) spectra of (S,S)-BTP-4Cl and its blend system with PM6. (c) The atomic force microscope image of the active layer PM6:(S,S)-BTP-4Cl.

(S,S)-BTP-4Cl 的分子结构。可以看到,该光电二极管器件包含不同的功能层。首先,器件的阳极采用氧化铟锡(ITO),这是一种被广泛用作光伏器件基极的透明导电材料,具有出色的光学透明度和电导率。以 PEDOT:PSS 层作为空穴传输层。然后,通过将小分子受体苯并噻二唑衍生物 (S,S)-BTP-4Cl 与聚合物给体 PM6 共混,制备本体异质结活性层,以便于在光照下高效地产生激子并分离成载流子。PFN-Br 被用作电子传输层,便于金属 Ag 电极从活性层中提取电子。作为顶部电极的 Ag,是一种良好的导电材料,可用于在器件中收集电子。

图 1(b) 中黄色曲线,呈现的是光电二极管器件本体异质层 PM6:(S,S)-BTP-4Cl 的圆二色性(CD)谱图,用以展示该本体异质层对左旋圆偏振光和右旋圆偏振光吸收能力的差异。由图可知,在波长大于 700 nm 时,PM6:(S,S)-BTP-4Cl 对右旋圆偏振光的吸收能力显著强于左旋圆偏振光。这意味着,在相同光强且波长大于 700 nm 的条件下,器件在右旋圆偏振光的辐照下会产生更大的电流。并且,在 808 nm 波长处,左、右旋圆偏振光激发所产生的电流差异达到峰值。为了探究纯 (S,S)-BTP-4Cl 及其与 PM6 共混体系在圆偏振光吸收性能差异,我们表征了 (S,S)-BTP-4Cl 的圆二色性(CD)光谱,如

图 1(b) 中的蓝色曲线所示。结果表明,共混后对圆偏振光的吸收强度有所降低,但吸收峰位置并未发生明显偏离。这一现象说明,在向手性材料 (S,S)-BTP-4Cl 加入非手性材料 PM6 后,其仍能保持较明显的圆二色性(CD)吸收特性。但 PM6 在整个体系中却扮演不可或缺的角色:在器件的工作过程中,PM6 的加入能够促进电子和空穴的分离,从而产生光电流以确保器件正常工作。图 1(c) 展示了活性层的原子力显微镜 (AFM) 图,以呈现本体异质结层的表面微观形貌。从 AFM 图上看,PM6:(S,S)-BTP-4Cl 膜的均方根 (Root mean square, RMS) 粗糙度值为 1.72 nm,表明该薄膜拥有较为平整的表面。

图 2 所呈现的该光电二极管本体异质结的能级图与工作机理图,对本体异质结吸收光子进而产生光电流的工作机制予以了详尽阐释。具体而言,(S,S)-BTP-4Cl 在吸收光子后会生成激子,这些激子会向 (S,S)-BTP-4Cl 与 PM6 的界面处扩散;在两种材料的能级差(如图 2(a)所示)的驱动下,激子分离为空穴和电子。其中,空穴会通过 PM6 传输至阳极,电子则经 (S,S)-BTP-4Cl 传输至阴极,从而产生光电流,如图 2(b)所示。并且,由于该材料对不同极化状态圆偏振光的吸收能力存在差异,因此产生的电流大小也随之不同。

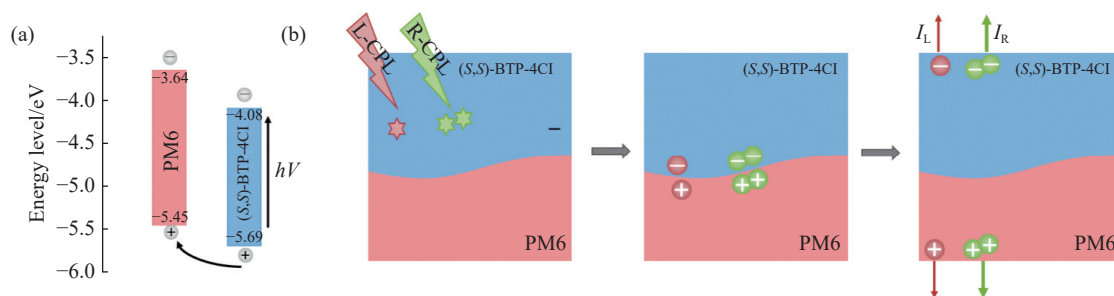


图 2 光电二极管器件的工作机理图。(a) 活性层中 PM6 与 (S,S)-BTP-4Cl 的能级结构;(b) 活性层在左、右旋圆偏振光激发下的激子产生和电荷分离过程

Fig. 2 Working mechanism of photodiode device. (a) The energy level structure of PM6 and (S,S)-BTP-4Cl in the active layer. (b) The exciton generation and charge separation process of the active layer under left and right circularly polarized light excitation.

值得注意的是,在本研究所制备的光电二极管上施加不同极性的电压时,其功能表现会产生显著差异。如图 3(a) 和 3(b) 所示,当向光电二极管施加负偏压或者零偏压时,活性层产生的光生电子和空穴会分别通过电子和空穴传输层被传输到相应电极,进而产生光生电流,这使得器件能够迅速进入光探测器的工作状态。此时,器件能够敏锐地感知

光信号,从而可以在光通信、光学遥感等领域发挥关键作用。当对该光电二极管施加正偏压时,如图 3(c) 所示,活性层产生的光生电子和空穴由于能级关系会在界面处累积,使得界面电导率发生变化,从而产生光电突触的功能特性。在神经形态计算场景里,这一特性能够模拟生物神经元突触的信号传递与信息处理机制,通过对输入光脉冲的响应和

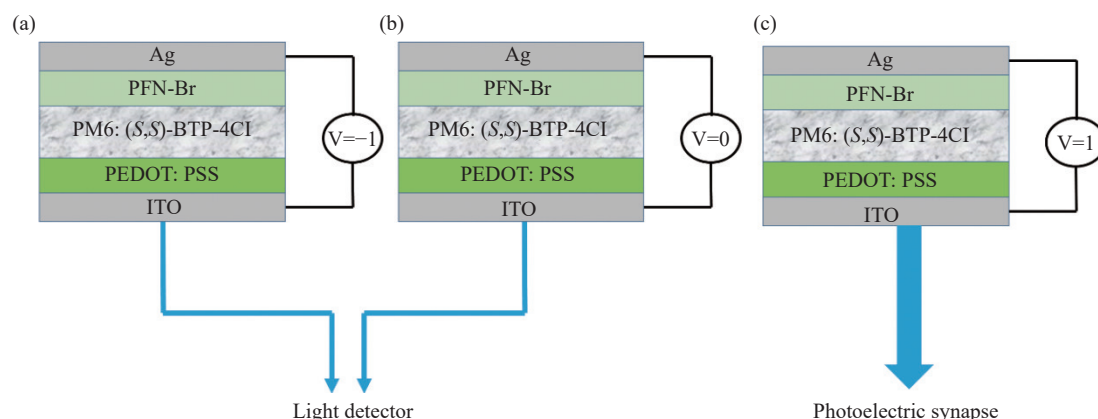


图3 不同偏压下光电二极管器件实现的不同功能。在(a)负偏压和(b)零偏压下实现圆偏振光探测器功能,图中“-1”和“0”分别代表负偏压和零偏压;(c)在正偏压下实现光电突触功能,图中“1”代表正偏压

Fig. 3 Different functions achieved by photodiode devices at different voltages. (a) Photodiode devices achieve circularly polarized light detector function under negative bias voltage, "-1" in the figure represents negative bias voltage; (b) Photodiode devices achieve circularly polarized light detector function under zero bias voltage, "0" in the figure represents zero bias voltage; (c) Photodiode devices achieve synaptic function under positive bias, "1" in the figure represents positive bias voltage.

处理,实现诸如信号加权、记忆存储等功能,为人工智能在模式识别、智能决策等核心层面的突破奠定基础。

2.2 圆偏振光探测

如图4所示,我们测试了光电二极管的电学性能。其中, I_{out} 表示器件的响应电流, U_{in} 表示器件的输入电压。从图4(a)可以看到,当处于零偏压状态时,随着光强的增大,二极管器件所产生光生电流也在随之增大。进一步对实验数据进行拟合,我们发现其光生电流的大小与光强之间存在着显著的线性关系,器件表现出良好的线性响应。同时,

在光强低于约 5 mW/cm^2 时,器件的响应电流对光强的依赖开始偏离线性,因此器件对弱光的检测极限为 5 mW/cm^2 左右,进而计算得出响应度为 0.12 A/W 。器件良好的线性响应特性,意味着在实际应用中,通过精确测量其输出电流值,便能够准确推算出所施加的光强度,从而为光信号强度的检测提供了一种可靠且高效的方法。从如图4(b)所示的整流特性曲线可以看出,此光电二极管表现出与传统二极管相似的单向导电特性。这表明,在电路中该光电二极管能够如同传统二极管一样,有效地控制电流的流向,确保电路按照预定的设计正常工作。因此,在构建各类电子电路系统时,该器件可作为

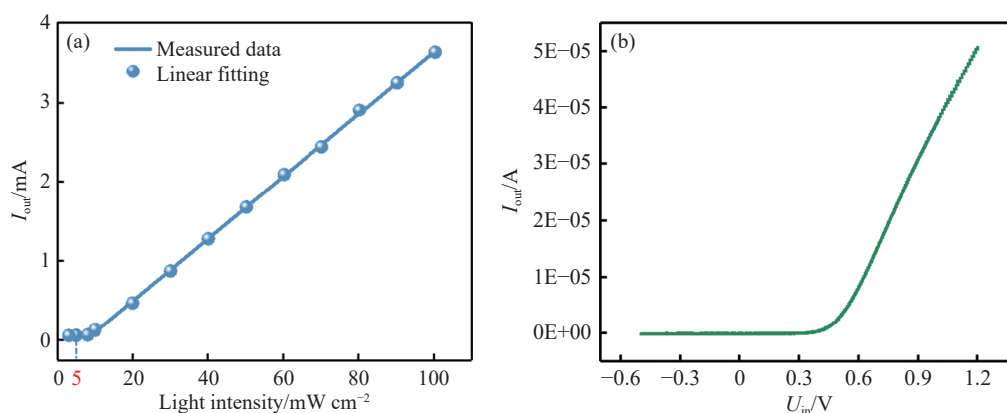


图4 光电二极管器件的电学性能。(a)光电二极管的相应电流随光强的变化;(b)光电二极管器件的整流特性曲线,能够反应出该器件的单向导电性

Fig. 4 Electrical performance of photodiode device. (a) Response current of photodiodes as a function of light intensity. (b) The rectification characteristic curve of a photodiode device showing the unidirectional conductivity.

一个稳定可靠的电子元件发挥作用;并且,其独特的光-电转换特性与单向导电性相结合,为实现光电器件在复杂电路环境下的多功能应用提供了有力保障。

如图 5(a)所示,我们精心构建了一套圆偏振光获取及光照测试体系。选用 LED 光源作为初始光源,借助线偏振片与四分之一波片,成功获取圆偏振光。具体流程为:LED 光源(波长为 808 nm)发出的光先穿过线偏振片,完成从自然光到线偏振光的转变;紧接着,线偏振光入射至四分之一波片,经其调制后可以输出圆偏振光,进而精准照射到氧化铟锡(ITO)透明电极上。实验过程中,通过调控线偏振片的偏振轴与四分之一波片快轴的夹角,可

以按需产生不同偏振态的光信号。其中,当偏振轴与四分之一波片快轴之间的夹角为 45° 时可以得到右旋圆偏振光,夹角为 135° 时可以得到左旋圆偏振光。考虑到能耗与实验复杂度,我们在光电二极管器件上施加零偏压。如图 5(b)所示,在相同光强的左旋/右旋圆偏振光照射下,响应电流从 3.60 mA 跃升至 3.71 mA,相对差异幅度达 3.06%。可见,本研究所制备的光电二极管器件在圆偏振光探测方面性能卓越,能够精准区分不同偏振态的光信号并实现高精度探测。在光通信领域,该器件可应用于偏振复用技术,提升信号传输的准确性;在光学遥感领域,有助于识别目标的偏振特征,获取更为丰富、精细的目标信息。

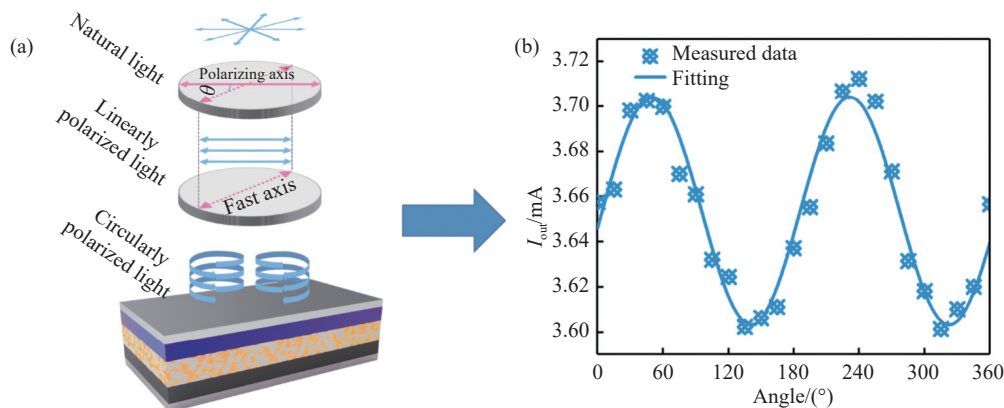


图 5 (a)圆偏振光获取及光照测试装置示意图;(b)光电二极管器件在不同偏振态的光照情况下产生的响应电流

Fig. 5 (a) Schematic diagram of the device for obtaining circularly polarized light and conducting illumination testing. (b) The response current of the photodiode device generated by the incident light with different polarization states of signal.

为了研究器件在 -1 V 与 0 V 电压下工作时的性能差异,我们在光探测模式下分别测试了这两种电压下的器件响应特性,结果如图 6(a、b)所示。其中, L-CPL 和 R-CPL 分别表示左旋圆偏振光和右旋圆偏振光。结果表明,在负偏压(-1 V)下,器件的响应电流显著高于零偏压下的情况。此外,从图 6 可以看到,连续施加 10 个光脉冲,器件在光探测模式下的响应电流保持稳定,未出现明显波动,这表明该器件在光探测模式下具有良好的稳定性。

2.3 光电突触功能验证

我们对该光电二极管器件的光电突触功能进行了验证。首先,将 1 V 的正偏压施加于光电二极管器件,随即采用波长为 808 nm 的光源对其进行时长为 1 s 的照射。在此过程中,成功获取到了如

图 7(a)所示的突触后兴奋性电流(EPSC)。这一结果初步表明了该器件在光电信号转换方面的响应能力,为后续进一步探究其光电突触特性奠定了基础。随后,在相同的正偏压下,对二极管施加 2 个光脉冲,每个脉冲的持续时间设定为 1 s ,且脉冲间隔也为 1 s 。通过这样的操作,成功观测到了如图 7(b)所示的双脉冲易化(PPF)现象。值得一提的是,双脉冲易化现象在生物突触的信号传递过程中极为常见,它反映了突触在短时间内对连续刺激的一种特殊响应机制,即第二次刺激所引发的突触后反应会在一定程度上有所增强。该器件能够呈现出这一现象,显示了与生物神经系统信号处理机制的相似性,有力地暗示了其在模拟生物突触功能方面的潜力。最后,我们依旧保持相同的正偏压,同时向二极管施加多个脉冲,每个脉冲持续时间和

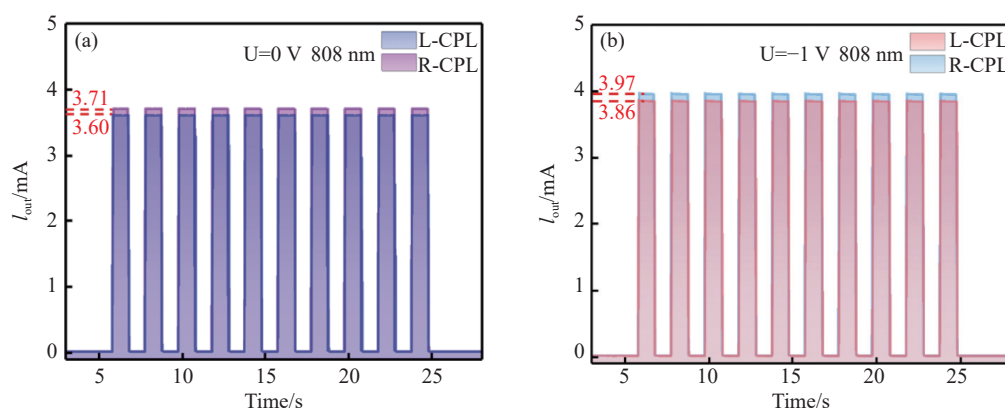


图6 光电二极管器件的稳定性测试。(a)在0 V条件下,连续施加10个光脉冲,光电二极管器件的响应电流;(b)在-1 V条件下,连续施加10个光脉冲,光电二极管器件的响应电流

Fig. 6 Stability testing of the photodiode device. (a)The response current of the photodiode device under continuous application of 10 light pulses at 0 V; (b)The response current of the photodiode device under continuous application of 10 light pulses at -1 V

间隔均为1 s。从所得到的电流输出现象中(如图7(c)所示)可以发现,随着光脉冲数量的不断增加,最终产生的兴奋性突触后电流呈现出逐渐增大的趋势。这种电流变化规律与生物突触在受到多次刺激时的反应特性高度吻合,充分展示了该器件在信息处理过程中的累积效应和动态响应能力。

综合以上各个实验环节所获得的结果,我们可

以确定,所研制的光电二极管器件在光电突触功能模拟中展现出与生物突触高度相似的电学行为,具体表现为:在单脉冲刺激下,器件产生明确的EPSC信号;连续时间二个脉冲时,器件表现出双脉冲易化(PPF)效应,第二个脉冲触发的电流响应强度大于首个脉冲;连续施加10个光脉冲时,器件的兴奋性电流呈现阶梯式累积。

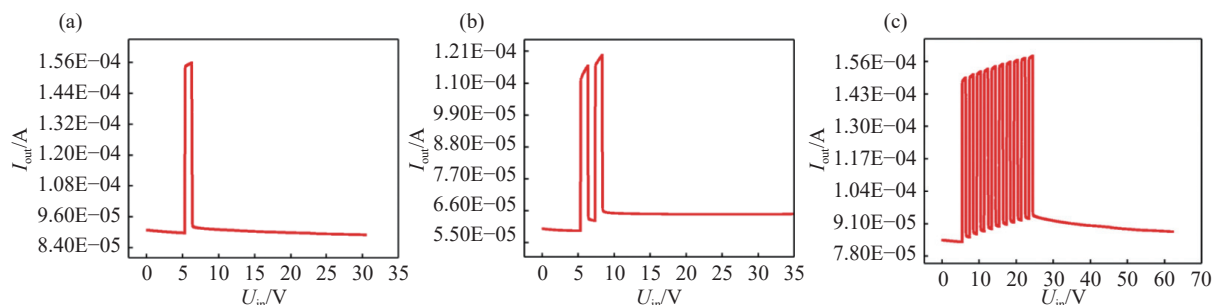


图7 光电二极管器件光电突触电学性能。(a)光电突触在单个光脉冲刺激下的突触兴奋性电流(EPSC);(b)光电突触的双脉冲易化(PPF)现象;(c)光电突触受到多个光脉冲刺激所产生的电流输出

Fig. 7 Electrical performance of photoelectric synapse of photodiode device. (a)Synaptic Excitatory Current (EPSC) of Optoelectronic Synapses; (b)Double pulse facilitation (PPF) phenomenon in optoelectronic synapses; (c)The photoelectric synapse is stimulated by multiple light pulses to generate electrical current output.

3 结论

本文成功研制了基于有机手性小分子材料的光电二极管器件,通过电压极性切换实现了圆偏振光探测与光电突触行为的功能集成,为多功能光电器件的发展提供了新范式。在光探测方面,负/零偏压条件下,器件能够实现对不同偏振态光信号的精准分辨。该特性可在光通信领域被应用于偏振复用技术,显著提升信道容量并抑制串扰;在光学

遥感中,可实现微弱圆偏振光信号的高灵敏度检测,为环境监测与资源勘探提供关键数据支撑。当施加正偏压时,器件展现出优异的光电突触行为:成功模拟了生物神经元的突触可塑性,包括突触后电流(EPSC)的产生、双脉冲易化(PPF)现象及多脉冲刺激下的电流累加效应。这些特性为神经形态计算在模式识别、智能决策等领域的突破提供了硬件基础,有望推动人工智能技术的发展。器件通过

电压调控实现功能切换, 将光探测与神经形态计算功能集成于单一器件, 为光电器件的多功能化发展开辟了新路径。

参考文献:

- [1] Fan Z, Shi Y, Wang H, et al. Vortex clusters and their active control in a cold Rydberg atomic system with PT-symmetric Bessel potential[J]. *Chinese Physics B*, 2024, 33(12): 213-220.
- [2] Lu Q, Chao H, Zeyun S, et al. Soliton molecules and their scattering by a localized PT-symmetric potential in atomic gases[J]. *Optics express*, 2023, 31(7): 11116-11131.
- [3] Li X, Aftab S, Mukhtar M, et al. Exploring Nanoscale Perovskite Materials for Next-Generation Photodetectors: A Comprehensive Review and Future Directions[J]. *Nano-Micro Letters*, 2025, 17(02): 54-116.
- [4] Yi L, Liu D, Cheng W, et al. A peak enhancement of frequency response of waveguide integrated silicon-based germanium avalanche photodetector[J]. *Journal of Semiconductors*, 2024, 45(07): 64-72.
- [5] Zhong K, Zhou X, Huo J, et al. Chapter Digital signal processing for Short-Reach optical communications: A Review of Current Technologies and Futuer Trends[J]. *Journal of Lighewave Technology*, 2018, 36(2): 377-400.
- [6] Qiu C, Xiao H, Wang L, et al. Recent advances in integrated optical directed logic operations for high performance optical computing: a review[J]. *Frontiers of Optoelectronics*, 2022, 15(1): 1.
- [7] Cvijetic M, Djordjevic I. Advanced optical communication systems and networks [M]. Artech House, 2013.
- [8] Khonina S N, Kazanskiy N L, Butt M A, et al. Optical multiplexing techniques and their marriage for on-chip and optical fiber communication: a review[J]. *Opto-Electronic Advances*, 2022, 5(8): 210127.
- [9] Chen Z Y, Yan L S, Pan Y, et al. Use of polarization freedom beyond polarization-division multiplexing to support high-speed and spectral-efficient data transmission[J]. *Light: Science & Applications*, 2017, 6(2): e16207.
- [10] Mehonic A, Sebastian A, Rajendran B, et al. Memristors—From in - memory computing, deep learning acceleration, and spiking neural networks to the future of neuromorphic and bio - inspired computing[J]. *Advanced Intelligent Systems*, 2020, 2(11): 2000085.
- [11] Huang W, Xia X, Zhu C, et al. Memristive artificial synapses for neuromorphic computing[J]. *Nano-Micro Letters*, 2021, 13: 1-28.
- [12] Yariv A, Yeh P, Yariv A. Photonics: optical electronics in modern communications [M]. New York: Oxford university press, 2007.
- [13] Shan L, Yu R, Chen Z, et al. Memory - Processing - Display Integrated Hardware with All - In - One Structure for Intelligent Image Processing[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(25): 2315584.
- [14] Chen Y, Qiu WJ, Wang XW, et al. Solar-blind SnO2 nanowire photo-synapses for associative learning and coincidence detection [J] *Nano Energy*, 2019, 62: 393-400.
- [15] Wu XM, Li EL, Liu YQ, et al. Artificial multisensory integration nervous system with haptic and iconic perception behaviors [J] *Nano Energy*, 2021, 85: 106000.
- [16] Zuo Y, Li B, Zhao Y, et al. All-optical neural network with nonlinear activation functions[J]. *Optica*, 2019, 6(9): 1132-1137.
- [17] 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.
- [18] 朱赛克, 赵毅. 面向神经形态系统的突触器件及芯片综述与展望 [J]. *功能材料与器件学报*, 2024, 30(6): 287-299.
- [19] Gao C, Liu D, Xu C, et al. Toward grouped-reservoir computing: organic neuromorphic vertical transistor with distributed reservoir states for efficient recognition and prediction[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 740.
- [20] Chen Z, Lin Z, Yang J, et al. Cross-layer transmission realized by light-emitting memristor for constructing ultra-deep neural network with transfer learning ability[J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 1930.
- [21] Gao C, Liu D, Xu C, et al. Feedforward Photoadaptive Organic Neuromorphic Transistor with Mixed - Weight Plasticity for Augmenting Perception[J]. *Advanced Functional Materials*, 2024, 34(18): 2313217.