

基于长余辉材料的仿生光突触及其记忆特性研究

吴炳坤¹, 巫晓敏^{2,*}

(1. 福州大学 物理与信息工程学院, 福州 350108; 2. 福建师范大学 福建省量子调控与新能源材料重点实验室, 福州 350117)

摘要: 神经形态视觉系统通过模拟生物视觉机制, 有望实现高效率的视觉信息处理。在此背景下, 能够集成光传感、存储与处理功能的光突触器件显得尤为重要。然而, 现有器件设计在光信号持久存储与动态调控之间存在性能瓶颈。为此, 我们提出并制备了一种基于长余辉材料/PDMS 复合材料的光突触器件。实验结果表明, 该器件在紫外脉冲激励下可产生瞬态亮度增强效应, 并在刺激停止后呈现先快后慢的双阶段衰减, 成功模拟了生物视觉系统中短期记忆向长期记忆转化的动力学过程。此外, 该器件还展现出配对脉冲增强(paired-pulse facilitation, PPF)效应, 其增强比为 1.35 ($A_2/A_1 = 1.35$), 并在连续 9 个光脉冲的刺激下实现了接近 3 倍的光强增强 ($A_9/A_1 \approx 3$)。器件的发光响应具有显著的温度依赖性, 随着温度升高, 发光强度先增加约 1.4 倍, 随后逐渐减弱。本研究证明, 基于长余辉材料的光突触器件在光信息的动态持续保持与处理方面具有重要应用价值, 为开发新型神经形态视觉感知系统提供了创新解决方案。

关键词: 长余辉; 光突触; 神经形态计算; 突触可塑性

中图分类号: O482.31

文献标志码: A

DOI: 10.3724/jfmd.2601012

CSTR: 32180.14.jfmd.2601012

A bio-inspired optical synapse based on long-afterglow material with memory properties

WU Bingkun¹, WU Xiaomin^{2,*}

(1. College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China; 2. Fujian Key Laboratory of Quantum Control and New Energy Materials, Fujian Normal University, Fuzhou 350117, China)

Abstract: The neuromorphic visual system, which emulates biological visual mechanisms, demonstrates significant potential for highly efficient visual information processing. In this context, the development of an optical synaptic device capable of integrating light sensing, storage, and processing functions is of critical importance. However, current designs encounter performance limitations when balancing persistent light signal storage with dynamic regulation. To address this challenge, we propose and

收稿日期: 2026-01-15; 修订日期: 2026-03-06

基金项目: 福建省自然科学基金项目 (No. 2023J01520)

作者简介: 吴炳坤 (2000—), 男, 硕士研究生, 研究方向为微纳光电器件与神经形态器件 (E-mail: w779071812@163.com)

通信作者: 巫晓敏 (1993—), 女, 副教授, 研究方向为半导体材料器件与神经形态器件 (E-mail: wxmin@fjnu.edu.cn)

fabricate an optical synaptic device based on a composite of long-afterglow material and PDMS. Experimental results reveal that the device exhibits a transient brightness enhancement effect under ultraviolet pulse excitation, followed by a dual-stage decay with fast-to-slow kinetics after the cessation of stimulation. This behavior successfully mimics the dynamic transition from short-term to long-term memory in the biological visual system. Furthermore, the device demonstrates a PPF effect, with an enhancement ratio of 1.35 ($A_2/A_1 = 1.35$), and achieves nearly a threefold increase in light intensity ($A_9/A_1 \approx 3$) under continuous stimulation by nine light pulses. The luminescent response of the device displays notable temperature dependence: as the temperature rises, the luminescence intensity initially increases by nearly 1.4 times before subsequently declining. These findings suggest that the long-afterglow material-based optical synaptic device has potential applications in non-volatile light information storage and dynamic processing, offering an innovative approach for advancing neuromorphic visual perception systems.

Key words: long-afterglow; optical synapse; neuromorphic computing; synaptic plasticity

0 引言

随着人工智能(AI)与物联网(IoT)技术的发展,传统冯·诺依曼架构中数据存储与运算单元物理分离的固有特性正引发日益严重的能效危机与计算瓶颈问题^[1-3]。为突破这一经典架构的根本局限,科学界开始探索仿生神经形态计算体系,其核心理念源于对生物大脑高效信息处理机制的深度模拟。在此类新型计算范式中,人工突触器件的开发成为关键突破口,并在近年来受到广泛关注。这类器件通过动态重构自身的电导(即突触权重),能够在单一物理载体内同步完成信息的实时传递,因而被视为构筑下一代智能计算系统的基础性技术^[4-7]。

在众多类型的突触器件中,光突触器件因光信号具有响应速度快、低串扰、并行处理能力强等优势,特别适用于仿生视觉系统与高速光互连领域^[8]。理想的光突触不仅需要对光刺激产生即时响应,更应具备将光信息转化为持续电信号或光信号的能力,即“记忆”功能,以模拟生物视觉系统的暂态与持续感知^[9-11]。目前,基于二维材料、钙钛矿、有机半导体等的光突触器件已取得显著进展,但其光记忆往往依赖于持续的外部能源或复杂的电路结构,难以实现简单、长效且可调控的信息保持。长余辉发光材料是一种在激发停止后仍能持续发光的特殊功能材料,其物理本质是激发态载流子被材料中的陷阱能级捕获,随后通过热扰动缓慢释放并发生辐射复合的过程。这种内在的、与时间及环境相关的发光动力学,与生物突触中神经递质的释放、

再吸收及信号衰减过程具有天然的相似性^[12]。因此,将长余辉材料引入光突触器件,有望直接利用其光发射的持续性与动态衰减特性,来模拟突触权重的增强、衰减与记忆行为,为构建具有记忆功能的光突触开辟一条简洁而高效的新路径^[13-17]。

本研究提出并制备了一种基于黄绿色长余辉发光材料的全光突触器件。通过施加紫外光脉冲刺激,深入探究了器件的瞬态发光动力学,并观察到兴奋性突触后亮度呈现典型的快速上升及随后的双阶段衰减行为。这一动态过程成功复现了生物突触中短期记忆向长期记忆的转化。此外,器件在配对脉冲增强(PPF)、多脉冲序列响应及不同温度下的性能测试中均表现出丰富的仿生突触可塑性。本研究不仅为神经形态视觉系统提供了一种新型的器件实现方案,还揭示了长余辉材料在模拟复杂神经功能方面的独特潜力,为未来开发高性能神经形态视觉芯片开辟了新的材料与器件设计路径。

1 实验

1.1 样品制备

实验中使用的长余辉绿粉和聚合物聚二甲基硅氧烷(PDMS)均购自 Sigma-Aldrich。首先,称取一定量的 PDMS 溶液并放入容器中,然后加入相对于 PDMS 质量分数为 30% 的长余辉粉末。混合物在室温下磁力搅拌 12 h,以确保充分混合。随后,按 PDMS 溶液与固化剂 10:1 的重量比加入固化剂,

并在室温下磁力搅拌 10 min, 使其充分混合。玻璃基板通过依次超声处理清洗, 顺序为去离子水、丙酮和乙醇(每步 20 min), 然后用去离子水冲洗, 并在烘箱中干燥。之后, 将混合的 PDMS 和长余辉溶液以 250 rpm 的速度旋涂于清洁后的玻璃基板上 60 s。涂覆的薄膜在 75 °C 下退火 12 h。最后, 使用镊子小心地将固化后的全光突触器件从玻璃基板上剥离, 以用于后续测试。

1.2 样品测试

本文中测试器件的光致发光(PL)光谱使用 FL 4600 光谱荧光仪测量。快门系统用于控制输入光的持续时间、脉冲间隔和脉冲数量。瞬态光响应特性使用连接到示波器(Keysight DSOX1202)的 EOT 硅 PIN 探测器(ET-2030)进行测试。多通道 LED 光源、滤光片、凸透镜及其他光学组件由 Zolix 提供。

2 结果与讨论

2.1 长余辉光突触器件结构

图 1 展示了长余辉光突触器件的 3D 结构以及长余辉材料和 PDMS 的化学结构式。该光突触器件通过将长余辉薄膜均匀地旋涂在玻璃基板上制备而成, 其中的功能层由均匀分散在聚二甲基硅氧烷(PDMS)基质中的长余辉粒子组成。其工作原理源于内部的多价离子(Eu^+ 、 Eu^{2+} 、 Dy^{3+} 、 Dy^{4+})与长余辉粉末晶格内电荷载流子之间的相互作用。在紫外光脉冲照射下, 这些载流子相互作用导致光子的吸收和随后的可见光发射, 并伴有兴奋性突触后亮度(EPSB)的出现。

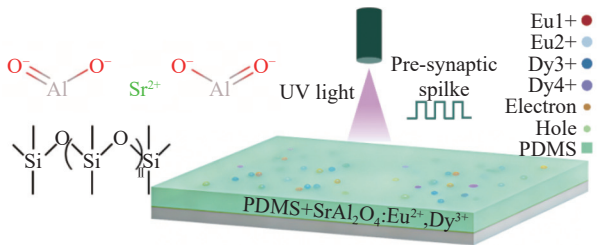


图 1 长余辉光突触器件 3D 示意图与材料组成

Fig. 1 Three-dimensional schematic of the long-afterglow optical synaptic device and its material composition

2.2 长余辉发光与光响应动力学

在测试长余辉突触器件的光致发光光谱后, 通过图 2(a) 的 PL 光谱分析可知, 长余辉材料在 365 nm 激发光下呈现出一个位于 520 nm(510~540 nm 范围内)的窄发射带, 其半高宽(FWHM)为 75 nm, 这表明黄绿色发光是其主要的输出颜色。

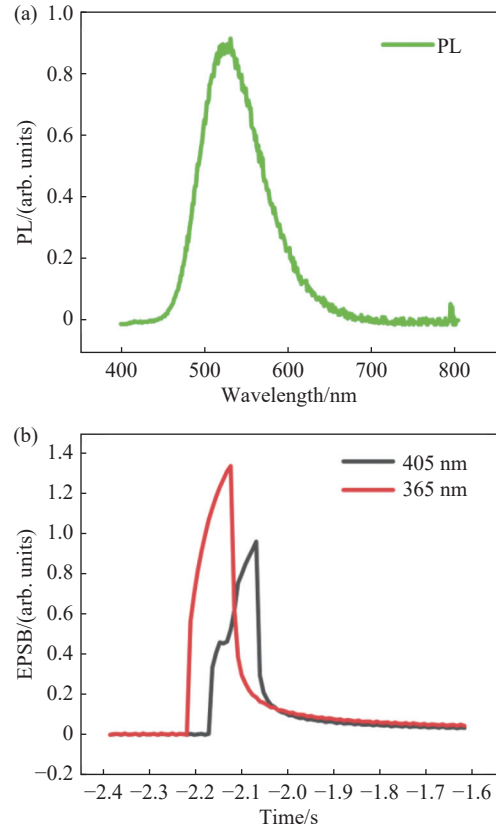


图 2 (a)长余辉材料的 PL 光谱特征;(b)长余辉材料对不同波长光输入响应

Fig. 2 (a) PL spectral characteristics of the long-afterglow material; (b) the response of the long-afterglow material to light input of varying wavelengths

此外, 针对不同的光输入, 该器件的光响应也有所不同。图 2(b)中对比了 365 nm 和 405 nm 两种典型波长的光输入, 显然, 365 nm 波长的光输入能够引发更大的 EPSB 响应。这表明该器件对不同波长的光刺激具有不同的响应特性。本文选用 365 nm 的紫外光作为光输入, 其选择依据是长余辉材料中 Eu^{2+} 离子的特征 4f-5d 跃迁吸收峰通常位于紫外-蓝光区域(365 nm), 在此波长下可实现最高的光吸收效率和余辉亮度。

当向光突触器件施加紫外光脉冲时, 器件内部的电子会不断与空穴重新结合, 从而引发发光现象,

使器件的发光强度逐渐增加。然而,若光脉冲的输入时间间隔过长,器件内部可供重新结合的空穴和电子将被耗尽,导致复合发光减弱,输出光强也随之衰减。图 3(a)展示了器件上字母“O”图案的亮度变化过程。当施加 0.2 s 的光脉冲时,图案逐渐变亮;在移除光脉冲后,图案逐渐变暗,直至完全消失并恢复到基础状态,这表明了光突触器件 EPSB 增强与衰减的动态过程。

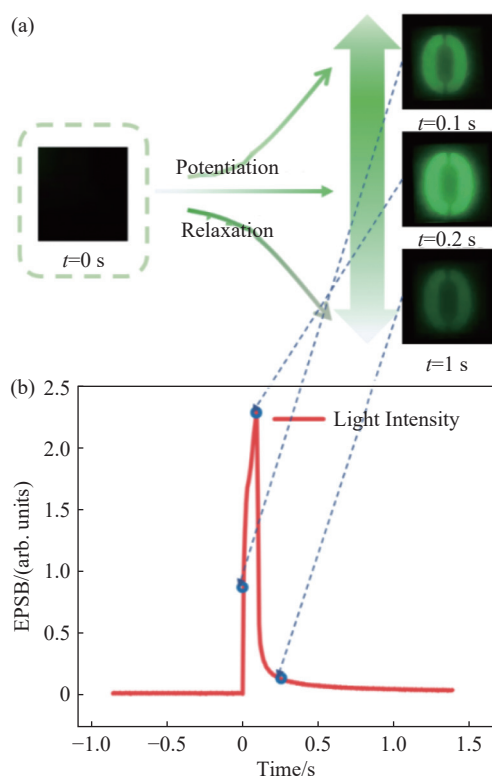


图 3 (a)光脉冲激发下发光强度的增强与衰减过程; (b)短期记忆特性

Fig. 3 (a) Potentiation and relaxation processes of luminescence intensity under optical pulse excitation; (b) short-term memory characteristics

图 3(b)展示了长余辉光突触器件的单脉冲 EPSB 数据。在光激发过程中,瞬态光响应表现出突触后亮度迅速增强,并在输入刺激结束后逐渐衰减直至完全消失。这一现象反映了器件的短期记忆行为,并形成了遗忘型衰减曲线。器件在 0 s、0.1 s、0.2 s 和 1 s 时的发光实物图及对应的发光强度数据如图 3 所示。

2.3 长余辉光突触的发光机理

长余辉突触的长时间后发光现象源于一种陷

阱辅助的复合过程,如图 4 所示。在紫外线照射下, Eu^{2+} 中心吸收光子并从基态跃迁至激发态,同时也在基态中留下空穴。由于其较低的电离能(约 0.06 eV),这些空穴会释放到价带中,并随后被 Dy^{3+} 位点捕获,转化为 Dy^{4+} 。同时,激发电子暂时被困在与 Eu^{2+} 相关的浅态中($\text{Eu}^{2+} \rightarrow \text{Eu}^{+}$)。当激发停止后,从 Dy^{3+} 捕获陷阱中释放出的空穴通过热刺激作用使电子与 Eu^{+} 重新复合,从而再生 Eu^{2+} 并产生持续的后发光现象^[18]。整个机制包括载流子生成、捕获、迁移、释放和辐射复合。长余辉突触的时间衰减分为两个不同的阶段: (1) 一个快速衰减部分,主要由紫外线照射后电子与价带空穴的即时辐射复合所主导,类似于短期突触反应; (2) 一个衰减速度较慢的成分,其受延迟释放和捕获被困载流子的影响,这类似于生物突触的长期记忆行为。快速衰减与缓慢衰减之间的转换受到光刺激强度和持续时间的调节。短暂的高强度激发有利于快速衰减(短期记忆),而长时间或重复的刺激则会将更多的载流子置于更深的陷阱状态,稳定电荷载流子并延长发光持续时间。

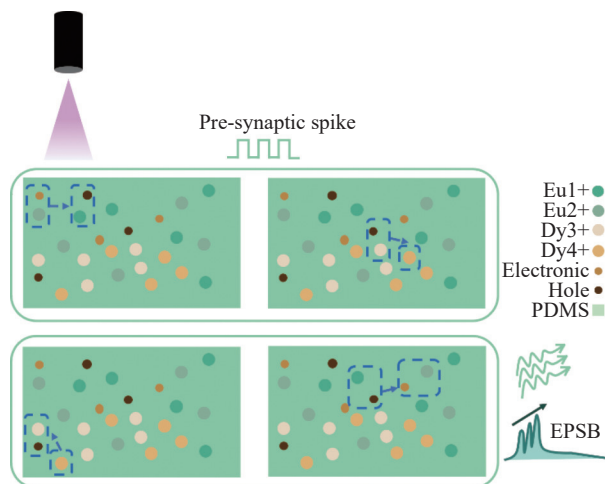


图 4 长余辉光突触的发光机理

Fig. 4 Mechanism of luminescence in long-afterglow optical synapses

2.4 长余辉光突触的性能分析

图 5(a)通过双脉冲刺激实验展示了配对脉冲增强 (PPF) 的动态变化。连续的两个光脉冲(脉冲宽度 $d=30$ ms, 脉冲时间间隔 $\Delta t=30$ ms)会引发增强的 EPSB, 其增强比约为 $A_2/A_1=1.35$ 。选择 30 ms 的脉冲宽度,旨在为器件提供足够的光输入以产生显

著的光响应, 同时避免因持续照射导致发光中心或陷阱能级饱和。选择 30 ms 作为典型的脉冲间隔, 是基于生物神经系统中短时程突触可塑性发生的典型时间范围。该间隔足以使第一个脉冲引发的载流子捕获/释放过程对第二个脉冲的响应产生显著的调制作用, 从而有效模拟并定量表征器件

的短期记忆行为。PPF 指数定义为 $PPF=(A_1/A_2) \times 100\%$, 其中 A_1 和 A_2 分别表示第一个和第二个脉冲的响应振幅。PPF 指数与跨度为 30 ms 至 800 ms 的 Δt 值相对应。PPF 指数曲线按照以下指数函数进行拟合:

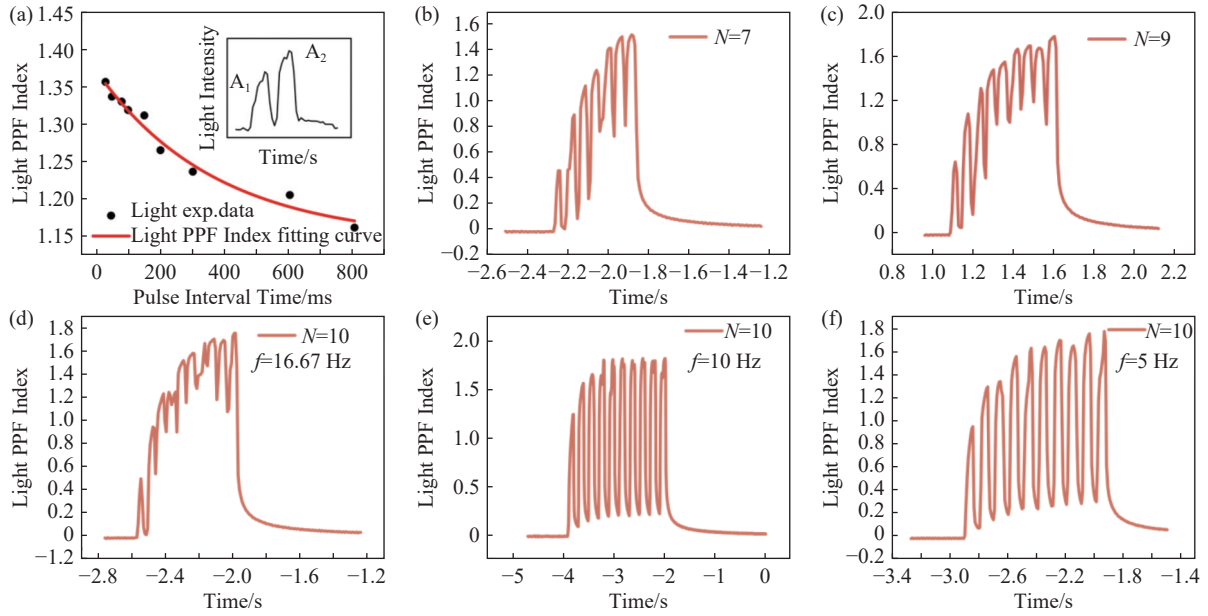


图 5 长余辉光突触的仿生突触可塑性。a() PPF 效应; (b)~(f) 不同脉冲数量和频率下的多脉冲依赖性

Fig. 5 Biomimetic synaptic plasticity of long-afterglow synapses. (a) PPF effect; (b) - (f) multi-pulse dependence under different numbers and frequencies of pulses

$$PPF(\Delta t) = A_0 + A_1 \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right) + A_2 \times \exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

式中, A_0 表示稳态基线, 而 A_1 和 A_2 分别对应快速和缓慢衰减成分的振幅, 特征衰减时间常数 τ_1 和 τ_2 通过拟合得到 ($\tau_1=85$ ms, $\tau_2=408$ ms)。其中, 快速的 τ_1 分量主导了衰减初期, 模拟了突触的短期易失性响应; 而缓慢的 τ_2 分量则决定了信息的长期保持, 直观体现了短期记忆向长期记忆转化的动力学特征。显而易见 PPF 指数随着 Δt 的增加而降低并且在较长间隔 ($\Delta t > 800$ ms) 时接近 100%, 这是因为过长的脉冲时间间隔导致了光突触器件内部的载流子几乎消耗殆尽, 导致第一个脉冲对第二个脉冲的增强效果减弱, 这为这个光突触器件提供了可调的短期可塑性。

图 5(b)~(d) 描述了器件在不同数量的连续光脉冲刺激下的时间整合能力。在给定的九个连续光脉冲中 (脉宽 30 ms, 脉冲间隔 $\Delta t=30$ ms), 观察到器件的渐进式 EPSP 增强, 最终光强度增强幅度约为 3 倍

($A_9/A_1 \approx 3$)。刺激后的衰减表明其 EPSP 逐渐恢复到初始状态。这是由于前一个光脉冲产生的载流子尚未完全消耗, 第二个脉冲又紧接着到来, 导致光突触器件内部的载流子逐渐积累, 电子复合现象增多, 余辉现象也愈发强烈。直至最后一个脉冲到来时, 突触后亮度达到峰值, 随后逐渐恢复到初始状态。由此可见, 峰值强度随着脉冲数量的增加而增强。此外, 图 5 (d)~(f) 描述了器件在不同频率的连续光脉冲刺激下, 峰值强度随着脉冲频率的减小而略微降低。

除此之外, 温度对长余辉光突触器件的性能也具有显著影响。如图 6(a) 所示, 我们在常温、70 °C、120 °C、160 °C 和 200 °C 条件下测试了长余辉光突触器件的单脉冲光响应特性。结果表明, 随着温度的升高, 器件的发光强度先增大后再下降。此外, 我们还评估了器件的制作稳定性。如图 6(b) 所示, 同一批次制备的两个不同器件的瞬态光响应差异较小, 表现出良好的一致性。

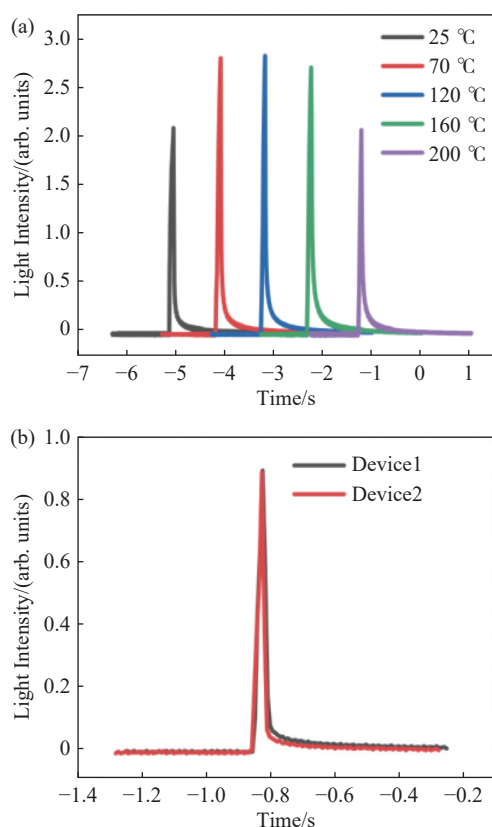


图 6 (a)长余辉光突触的温度依赖性;(b)器件间性能一致性

Fig. 6 (a) Long-afterglow optical synapse: temperature dependence; (b) device-to-device consistency

3 结论

在本研究中,我们成功设计并制备了一种基于长余辉材料的光突触器件。该器件通过将长余辉粉末均匀分散于PDMS基质中,并旋涂于玻璃基板上制得。在光脉冲刺激下,该器件能够成功再现典型的光突触行为,并在突触可塑性方面展现出多维度仿生功能。双脉冲测试结果表明,器件具有明显的配对脉冲增强(PPF)效应,其增强指数随脉冲间隔(Δt)的增大而逐渐衰减。同时,器件能够对连续多脉冲刺激进行时间整合,其响应强度随脉冲数的增加而累积增强。此外,器件的发光响应表现出显著的温度调控特性,其强度随温度变化呈现先增强后减弱的非单调趋势。本研究制备的长余辉光突触器件不仅精准模拟了生物突触的动态记忆行为,还凭借其独特的长余辉效应为光信息的动态持续保持与处理提供了新的解决方案。此项工作为下一代神经形态光电子器件及仿生视觉系统的发展提供了兼具功能性与启发性的材料与器件设计思路。

参考文献:

- [1] Van der Heggen D, Joos J J, Feng A, et al. Persistent luminescence in strontium aluminate: a roadmap to a brighter future[J]. *Advanced Functional Materials*, 2022, 32(52): 2208809.
- [2] 李雅瑶, 王越, 杨德仁, 等. 光电神经突触器件研究进展 [J]. 中国科学: 信息科学, 2020, 50(6): 892-912.
Li Yayao, Wang Yue, Yang Deren, et al. Recent progress on optoelectronic synaptic devices[J]. *Scientia Sinica (Informationis)*, 2020, 50(6): 892-912.
- [3] Chen Y, Wang H, Chen H, et al. Li promoting long afterglow organic light-emitting transistor for memory optocoupler module[J]. *Advanced Materials*, 2024, 36(27): 2402515.
- [4] Ye Z, Fang S, Zhang T, et al. Ultrasensitive Pa-level persistent mechanoluminescent material toward all-optical neural synapses for tactile-visual information recognition and memory[J]. *Advanced Materials*, 2026, 38(3): e14909.
- [5] Liu C, Gao C, Huang W, et al. Bipolar synaptic organic/inorganic heterojunction transistor with complementary light modulation and low power consumption for energy-efficient artificial vision systems[J]. *Science China Materials*, 2024, 67(5): 1500-1508.
- [6] 庄逸熙, 陈敦榕, 解荣军. 面向光学信息存储应用的深陷阱长余辉发光材料 [J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(15): 1516001.
Zhuang Yixi, Chen Dunrong, Xie Rongjun. Persistent luminescent materials with deep traps for optical information storage[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(15): 1516001.
- [7] Lian M, Gao C, Lin Z, et al. Towards mixed physical node reservoir computing: light-emitting synaptic reservoir system with dual photoelectric output[J]. *Light: Science & Applications*, 2024, 13: 179.
- [8] Zhuang B, Wang X, An C, et al. A general strategy for manufacturing flexible synaptic transistors with high mechanical stability[J]. *Science China Materials*, 2023, 66(7): 2812-2821.
- [9] Glüge S, Böck R, Palm G, et al. Learning long-term dependencies in segmented-memory recurrent neural networks with backpropagation of error[J]. *Neurocomputing*, 2014, 141: 54-64.
- [10] 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: 1930.
- [11] Zhang H, Gu M, Jiang X D, et al. An optical neural chip for implementing complex-valued neural network[J]. *Nature Communications*, 2021, 12: 457.
- [12] Huh W, Lee D, Lee C H. Memristors based on 2D materials as an artificial synapse for neuromorphic electronics[J]. *Advanced Materials*, 2020, 32(51): 2002092.
- [13] Yang J T, Ge C, Du J Y, et al. Artificial synapses emulated by an electrolyte-gated tungsten-oxide transistor[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(34): 1801548.
- [14] Wang Y, Lv Z, Chen J, et al. Photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots for neuromorphic computing[J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(38): 1802883.
- [15] Yan X, Zhang L, Chen H, et al. Graphene oxide quantum dots based memristors with progressive conduction tuning for artificial synaptic learning[J]. *Advanced Functional Materials*, 2018, 28(40): 1803728.
- [16] 高海阔, 苗扎根, 胡文平, 等. 有机发光晶体管的关键材料和器件研究 [J]. *化学学报*, 2022, 80(3): 327-339.
- Gao Haikuo, Miao Zhagen, Hu Wenping, et al. Research on key materials and devices of organic light-emitting transistors[J]. *Acta Chimica Sinica*, 2022, 80(3): 327-339.
- [17] 孙家跃, 夏志国, 杜海燕. 稀土红色长余辉发光材料研究进展 [J]. *中国稀土学报*, 2005, 23(3): 257-265.
- Sun Jiayue, Xia Zhiguo, Du Haiyan. Progress in research of red long-lasting phosphorescence materials doped with rare earth ions[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2005, 23(3): 257-265.
- [18] Van den Eeckhout K, Smet P F, Poelman D. Persistent luminescence in Eu^{2+} -doped compounds: a review[J]. *Materials*, 2010, 3(4): 2536-2566.