研究论文

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, 可集成光传感、存储与处理功能的光突触器件显得尤为重要。然而, 现有器件在光信号持久存储与动态调控之间存在性能瓶颈。为此, 本文提出并制备了一种基于长余辉材料/聚二甲基硅氧烷(polydimethylsiloxane, 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($A_9/A_1 \approx 3$)。同时, 器件的发光响应具有显著的温度依赖性, 随着温度升高, 发光强度先增加至约 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的应用价值, 这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 and memory properties

WU Bingkun[1], 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, an optical synaptic device capable of integrating light sensing, storage, and processing functions is of critical importance. However, existing devices encounter performance bottlenecks in balancing persistent optical signal storage with dynamic regulation. To address this challenge, this paper proposes and fabricates an optical

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)

通信作者: *wxmin@fjnu.edu.cn

synaptic device based on a composite of long-afterglow material and polydimethylsiloxane (PDMS). Experimental results reveal that the device exhibits a transient brightness enhancement effect under ultraviolet pulse excitation, followed by a fast-to-slow dual-stage decay once stimulation ceases, successfully mimicking the dynamic transition from short-term to long-term memory in the biological visual system. Furthermore, the device demonstrates a paired-pulse facilitation (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. Meanwhile, the luminescent response of the device displays notable temperature dependence: as the temperature rises, the luminescence intensity initially increases to about 1.4 times the initial value before subsequently declining. These findings confirm 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(artificial intelligence, AI)与物联网(internet of things, IoT)技术的发展,传统冯·诺伊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[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与存储,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,光突触器件因具有响应速度快、串扰低、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、有机半导体等材料体系的光突触器件研究已取得显著进展,但这些器件的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,其发光机理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。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,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,深入探究器件的瞬态发光动力学。实验结果表明,兴奋性突触后亮度(excitatory postsynaptic brightness, EPSB)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(paired-pulse facilitation, 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(polydimethylsiloxane, PDMS)均购自 Sigma-

Aldrich。首先, 称取一定量的 PDMS 溶液置于容器中, 然后加入质量分数为 30%(相对于 PDMS)的长余辉粉末。将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。玻璃基板依次经去离子水、丙酮和乙醇超声清洗(每步 20 min), 再用去离子水冲洗, 并在烘箱中干燥。之后, 将混合的 PDMS 和长余辉溶液以 250 r·min^{-1} 的转速在清洁后的玻璃基板上旋涂 60 s。涂覆的薄膜在 75 ℃ 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, 用于后续测试。

1.2 样品测试

器件的光致发光(photoluminescence, 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。多通道发光二极管(light emitting diode, 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。该光突触器件的功能层由均匀分散在 PDMS 基质中的长余辉粒子组成。该器件的工作原理源于内部的变价离子(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, 这些载流子的相互作用引发光子吸收与随后的可见光发射, 并伴有 EPSB 的出现。

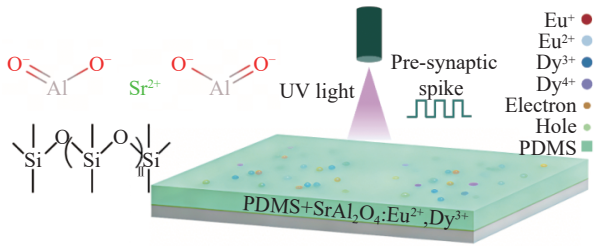

图 1 长余辉光突触器件的 3D 示意图与材料组成

Fig. 1 Three-dimensional schematic diagram 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 激发光下呈现峰值位于 520 nm(470~600 nm 范围)的窄发射带, 其半高宽(full width at half maximum, FWHM)为 75 nm, 表明黄绿色发光是其主要的光输出颜色。

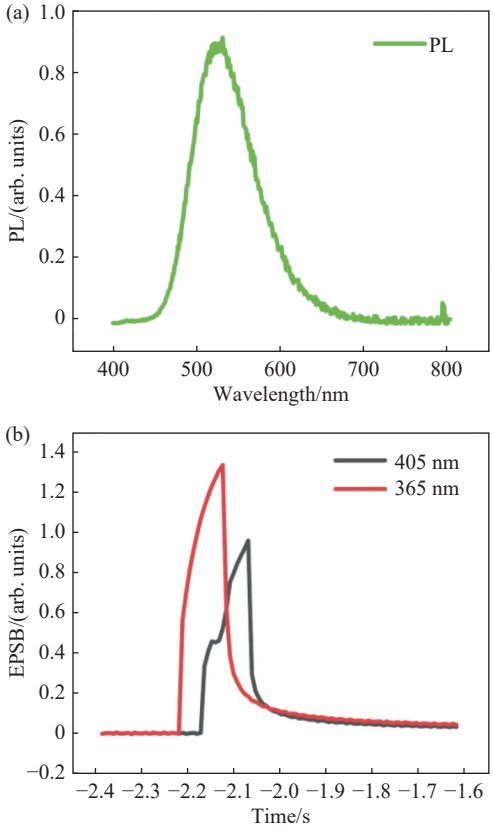

图 2 长余辉材料的(a)PL 光谱特征及(b)其对不同波长光输入的响应

Fig. 2 (a) PL spectral characteristics of the long-afterglow material and (b) its response to light input of different 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)对比了 365 nm 和 405 nm 两种典型波长的光输入, 可以看出, 365 nm 波长的光输入可引发更大的 EPSB 响应, 表明该器件对不同波长的光刺激具有不同的响应特性。本文选用波长为 365 nm 的紫外光作为光输入, 其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，其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 0.1 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至基础状态，这表明光突触器件 EPSB 具有增强与衰减的动态过程。

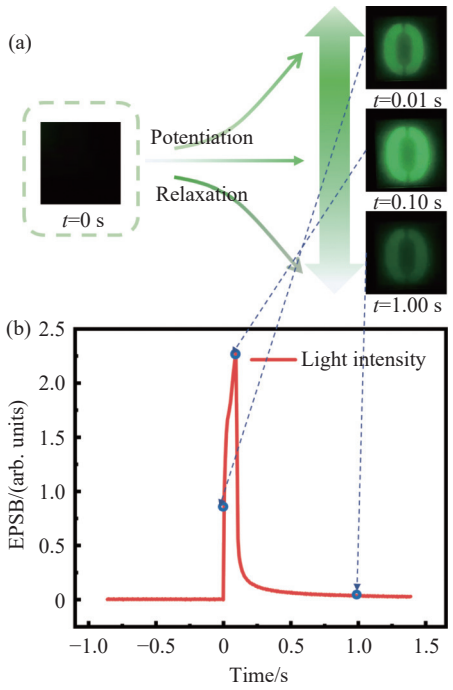

图 3　长余辉光突触器件的光响应与记忆特性。(a)光脉冲激发下发光强度的增强与衰减过程；(b)短期记忆特性

Fig. 3 Photoresponse and memory characteristics of the long-afterglow photonic synaptic device. (a) Potentiation and relaxation 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，瞬态光响应表现为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。图 3 还展示了器件在 0 s、0.01 s、0.1 s 和 1.0 s 时的发光实物图及对应的发光强度数据。

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，同时在基态中留下空穴。由于电离能较低(约 0.06 eV)，这些空穴会被释放到价带中，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($Eu^{2+}\rightarrow Eu^{+}$)。激发停止后，从 Dy^{3+}捕获陷阱中释放出的空穴在热激发的作用下，与 Eu^{+}位点俘获的电子发生复合，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、释放和辐射复合等过程。长余辉突触的时间衰减分为两个不同的阶段：(1)快速衰减阶段，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)缓慢衰减阶段，由被困载流子的延迟释放和捕获所主导，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。在短暂的高强度激发下，发光衰减的快速分量占优(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，从而延长发光持续时间。

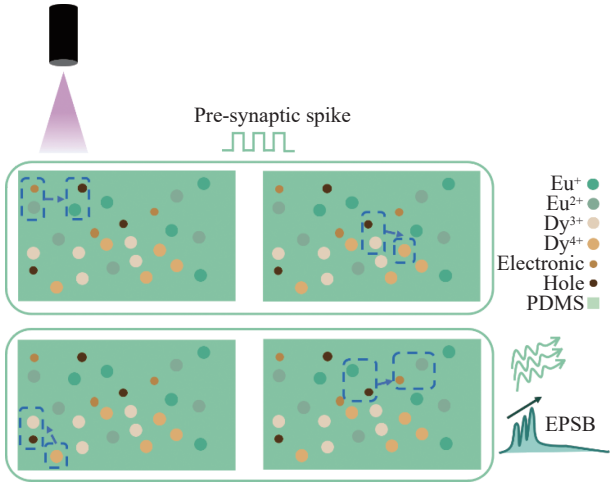

图 4　长余辉光突触的发光机理

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 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 Δt=30 ms)会引发增强的 EPSB，其增强比 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

免因持续照射使发光中心或陷阱能级饱和。选择30 ms作为典型的脉冲间隔, 依据是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指数采用$(A_2/A_1)\times100\%$计算, 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30~800 ms的Δt值相对应。PPF指数曲线按以下指数函数进行拟合:

$$\mathrm{PPF}(\Delta t)=B_0+B_1\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_1}\right)+B_2\exp\left(-\frac{\Delta t}{\tau_2}\right) \quad (1)$$

式中, B_0表示稳态基线, B_1和B_2分别对应快速衰减项和缓慢衰减项的振幅, 特征衰减时间常数τ_1和τ_2通过拟合得到(τ_1=85 ms, τ_2=408 ms)。其中, 快速衰减项主导衰减初期, 模拟突触的短期易失性响应; 缓慢衰减项决定信息的长期保持性, 直观体现短期记忆向长期记忆转化的动力学特征。随着Δt的增加, PPF指数逐渐降低, 并在较长间隔(Δt>800 ms)时接近100%。这是因为过长的脉冲间隔使光突触器件内部的载流子几乎消耗殆尽, 第一个脉冲对第二个脉冲的增强效果减弱, 为该光突触器件提供了可调的短期可塑性。

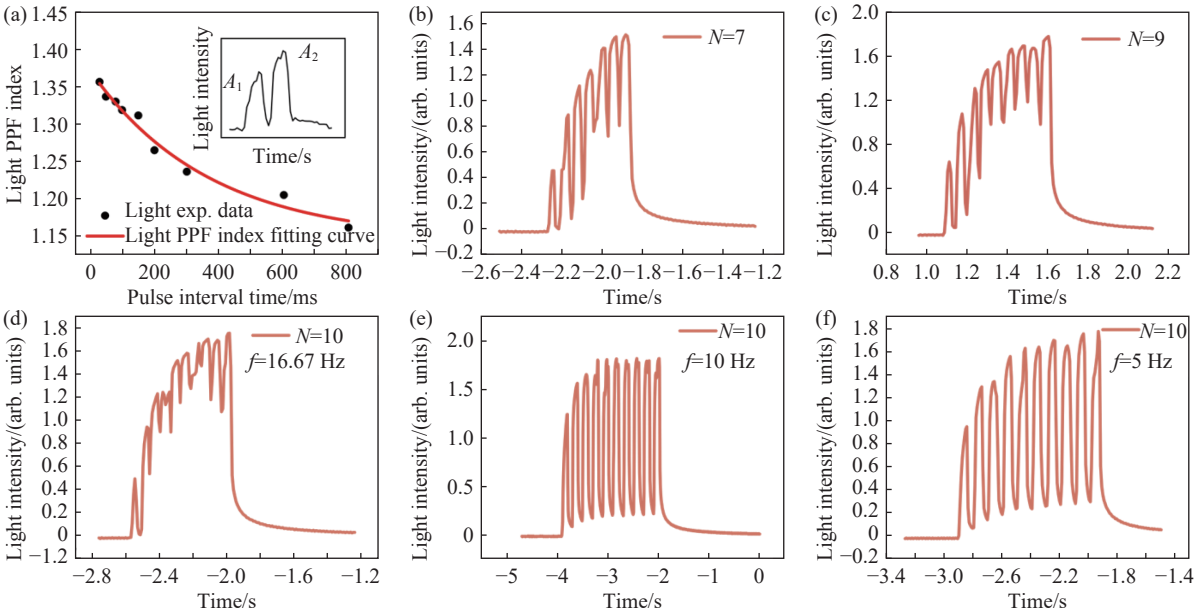

图5　长余辉光突触的仿生突触可塑性。(a)PPF效应; (b)~(f)不同脉冲数量和频率下的多脉冲依赖性

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

图5(b)~(d)展示了器件在不同数量连续光脉冲刺激下的时间整合能力。如图5(c)所示, 在给定的9个连续光脉冲(脉冲宽度d = 30 ms, 脉冲间隔Δt = 30 ms)刺激下, 器件呈现渐进式EPSB增强, 最终光强约为初始值的3倍($A_9/A_1\approx3$)。刺激停止后, EPSB逐渐恢复至初始状态。这是因为前一个光脉冲产生的载流子尚未完全消耗, 第二个脉冲紧接着到来, 使光突触器件内部的载流子逐渐积累, 电子复合现象增多, 余辉效应愈发显著。至最后一个脉冲时, 突触后亮度达到峰值, 随后逐渐恢复到初始状态。由此可见, 峰值强度随脉冲数量的增加而增强。图5(d)~(f)展示了器件在不同频率的连续光脉冲刺激下的行为, 可以看出, 峰值强度随着脉冲频率的减小而略微降低。

此外, 温度对长余辉光突触器件的性能同样具有显著影响。如图6(a)所示, 本文在常温、70 ℃、120 ℃、160 ℃和200 ℃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, 随着温度升高, 器件的发光强度先增加后降低, 最高增加至常温时的1.4倍。本文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。

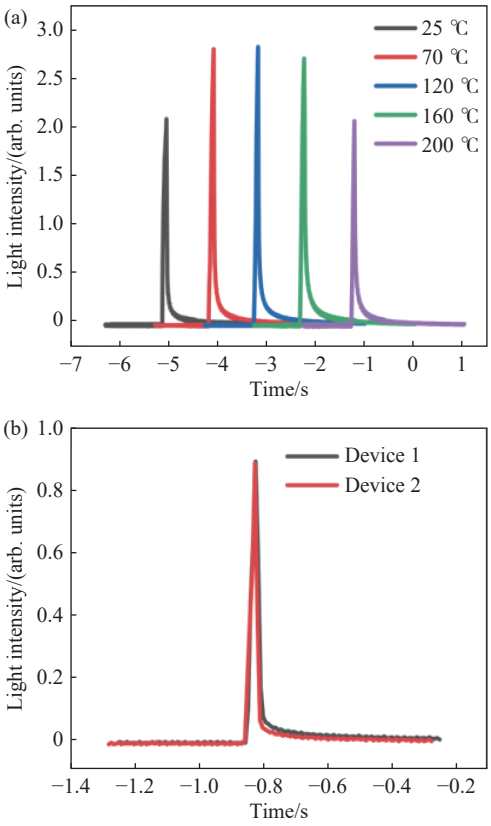

图 6　长余辉光突触的器件(a)温度依赖性以及(b)器件间性能一致性

Fig. 6 (a) Temperature dependence and (b) performance consistency among devices with long-afterglow optical synapses

3　结论

本文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，该器件可再现典型的光突触行为，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PPF效应，其增强指数随脉冲间隔的增大而逐渐衰减。同时，器件可对连续多脉冲刺激进行时间整合，响应强度随脉冲数量的增加而累积增强。此外，器件的发光强度随温度变化呈现先增强后减弱的非单调趋势，表现出显著的温度调控特性。该长余辉光突触器件不仅可精准模拟生物突触的动态记忆行为，还凭借独特的长余辉效应为光信息的动态保持与处理提供了新的解决方案。本研究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具有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 Ang, 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 Yusheng, Wang Hanlin, Chen Hu, et al. Li promoting long afterglow organic light-emitting transistor for memory optocoupler module[J]. Advanced Materials, 2024, 36(27): 2402515.

[4] Ye Zhijie, Fang Shuangqiang, Zhang Tiancheng, 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 Changfei, Gao Changsong, Huang Weilong, 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 Minrui, Gao Changsong, Lin Zhenyuan, 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 Bingyong, Wang Xiumei, An Chuanbin, 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 Zhenjia, Lin Zhenyuan, Yang Ji, 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 Jingting, Ge Chen, Du Jianyu, et al. Artificial synapses emulated by an electrolyte-gated tungsten-oxide transistor[J]. Advanced Materials, 2018, 30(34): 1801548.

[14] Wang Yan, Lyu Ziyu, Chen Jinrui, et al. Photonic synapses based on inorganic perovskite quantum dots for neuromorphic computing[J]. Advanced Materials, 2018, 30(38): 1802883.

[15] Yan Xiaobing, Zhang Lei, Chen Huawei, 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.