

基于超低功耗 ReS_2 光电突触器件的图像边缘特征提取与联想学习功能*

孙雨含^{1) #} 梁卜嘉^{1) #} 康艳¹⁾ 夏永顺¹⁾ 危波^{1) 2)} 杨晓阔^{1) †}

1) (空军工程大学基础部, 西安 710051)

2) (国防科技大学计算机学院, 长沙 410073)

(2025年11月26日收到; 2026年2月17日收到修改稿)

为突破传统视觉信息处理系统面临的“存储墙”与“功耗墙”瓶颈, 本文基于二维 ReS_2 优异的持久性光电导效应, 成功构建了一种超低功耗两端光电突触器件. 通过系统的第一性原理计算与实验表征, 重点分析了S空位缺陷对 ReS_2 电子云密度分布及能带结构的调控作用. 该器件实现了单次突触事件 49 fJ 的超低能耗, 达到与生物突触相当的水平. 器件不仅能通过调控光脉冲实现突触权重的改变, 还展现出优异的频率依赖可塑性. 利用其高通滤波特性, 使器件实现了有效的图像边缘增强. 此外, 基于对不同波长光脉冲的响应差异, 器件成功模拟了“巴甫洛夫狗”经典条件反射, 验证了其联想学习能力. 本研究设计的两端 ReS_2 突触器件在结构复杂度与超低功耗性能间实现了优异平衡, 为开发面向边缘计算等应用的高性能、低功耗神经形态视觉系统提供了新途径.

关键词: ReS_2 , 超低功耗, 边缘特征提取, 联想记忆

DOI: 10.7498/aps.75.20251606

CSTR: 32037.14.aps.75.20251606

1 引言

随着大数据和人工智能时代的到来, 传统基于冯·诺依曼架构的计算系统在处理海量视觉信息时, 面临着“存储墙”和“功耗墙”的严峻瓶颈^[1]. 神经形态视觉系统 (neuromorphic vision systems, NVS) 通过模仿生物视觉系统感知与信息处理一体化的模式, 有望突破这一瓶颈, 实现高效、低功耗的视觉计算^[2,3].

作为 NVS 的核心单元, 光电突触器件能够直接感知光信号并模拟生物突触的可塑性功能^[4-10] 如短时/长时可塑性 (STP/LTP)、脉冲时序依赖可塑性 (STDP) 等, 从而在器件层面实现感算融合, 受到了广泛关注^[11-15]. 近年来, 为了构建高性能光

电突触, 研究人员开发了多种不同结构的光电器件. 例如, 基于钙钛矿材料的光电突触因其优异的光电特性而备受关注, 但其在环境稳定性上仍面临挑战^[16]. 传统的氧化物半导体 (如 IGZO) 也被用于制备光电晶体管型突触器件, 实现了对光脉冲的响应和记忆功能, 但其器件多为三端结构, 结构较为复杂, 集成度相对受限^[17]. 二维 (2D) 材料因其原子级厚度、可调的能带结构以及优异的光电特性, 为构建新型光电突触提供了理想平台^[18-22]. 其中, 二维 MoS_2 , WSe_2 等过渡金属硫化物已被成功应用于光电突触器件, 通过构建浮栅或异质结等复杂结构, 可实现对突触权重的调控^[23]. 目前, 多数光电突触器件的功耗仍在皮焦耳甚至纳焦耳量级, 且器件结构相对复杂, 难以同时满足超低功耗、结构简单与高仿生功能的多重需求, 成为了制约其实

* 国家自然科学基金 (批准号: 62274183) 资助的课题.

同等贡献作者.

† 通信作者. E-mail: yangxk0123@163.com

际应用的关键技术挑战^[24-26]. 因此, 开发具有超低功耗、结构简单且功能完备的新型光电突触器件, 对于推动神经形态视觉系统的发展至关重要.

针对上述挑战, 本文利用 ReS_2 优异的持久性光电导效应, 设计并制备了一种两端结构的超低功耗光电突触器件. 该材料中的本征硫空位缺陷可在带隙中引入缺陷能级, 有效捕获光生载流子, 从而产生显著的持久性光电导效应^[27,28], 为模拟生物突触的长时程记忆特性提供了天然的物理基础. 实验结果表明, 其单次突触事件能耗可低至 49 fJ, 展现出了与生物突触相当的超低功耗特性. 当施加 532 nm 光脉冲刺激后, 该器件在不同光脉冲强度、数目条件下实现了突触权重的灵活调控. 进一步研究发现, 其频率依赖的高通滤波特性在图像边缘提取任务中与理想滤波器的相似度高达 93%. 通过不同波长光脉冲的协同刺激, 成功模拟了“巴甫洛夫狗”联想学习行为. 所设计的两端 ReS_2 突触器件操控简单、可靠性高, 为未来高性能、极端环境下的低功耗 NVS 的设计提供了重要设计思路.

2 ReS_2 光电器件

2.1 器件制备与测试

1) 器件制备. ReS_2 光电突触器件的制备流程包括材料的获取与转移, 电极蒸镀与器件成型, 具体步骤如下: 首先, 取自深圳六碳公司采购的 ReS_2 块体晶体材料, 采用机械剥离法剥离从块体 ReS_2 上获取少层薄片; 随后采用干法转移技术, 将薄片转移至表面生长有 SiO_2 介电层的硅衬底上. 样品经干燥及退火处理, 以去除转移过程中引入的有机

物残留并增强 ReS_2 晶体薄膜和衬底的耦合强度. 通过紫外光刻技术进行图形化处理, 最后利用电子束蒸镀技术, 在处理后的材料表面镀制 Cr/Au 电极, 完成器件制备.

2) 测试方法. 利用 Raman 光谱仪对转移后的 ReS_2 薄片进行结构分析 (图 1(a)), 结果表明在 160 cm^{-1} 和 211 cm^{-1} 处出现两个显著的特征振动峰, 分别对应材料的 E_{2g} (面内振动) 与 A_{1g} (面外振动) 模式, 这与已有文献^[29]报道的 ReS_2 拉曼信号一致. 此外, 对器件的电学输出特性进行测试 (图 1(b)), 当漏源电压从 -1 扫描至 +1 V 时, 输出电流呈现良好的线性关系且曲线通过原点, 表明金属电极与 ReS_2 之间形成了良好的欧姆接触特性, 为后续光电突触行为的准确测试奠定了基础.

2.2 光电突触特性与机理分析

突触权重的动态调整是高级认知功能的基础, 为复刻生物突触的复杂调控行为^[30], 本研究通过多参数协同调控 ReS_2 光电突触器件, 探究光脉冲强度与宽度依赖的可塑性, 从而实现对学习记忆功能的高保真模拟.

脉冲强度是调控突触权重的关键指标, 如图 2 所示, 在固定光脉冲持续时间 (1 s) 和漏源电压 ($V_{ds} = 1 \text{ V}$) 下, 采用 532 nm 绿光脉冲对 ReS_2 器件进行刺激, 光强从 0.5 mW/cm^2 增至 1.5 mW/cm^2 时, 兴奋性突触后电流 (EPSC) 显著增强. 进一步地, 将光脉冲的持续时间从 1 s 延长至 10 s, 同样导致 EPSC 上升 (图 2(b), (c)), 证明长时间刺激可强化响应, 与人类视觉中“持久光刺激增强印象”的规律相符.

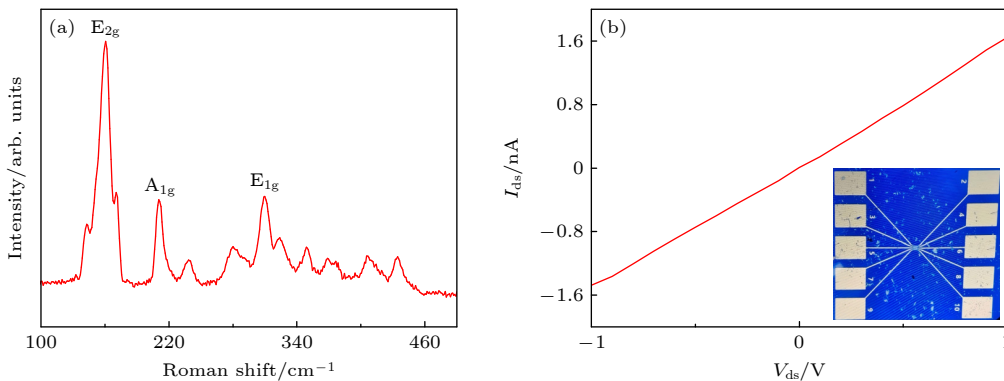


图 1 ReS_2 光电突触的器件表征 (a) ReS_2 光电突触的 AFM 厚度图与拉曼光谱图; (b) ReS_2 光电突触输出曲线

Fig. 1. Device characterization of ReS_2 photoelectric synapse: (a) AFM thickness map and Raman spectrum of ReS_2 photoelectric synapse; (b) ReS_2 photoelectric synaptic output curve.

由于 ReS_2 对视觉信号的强度与持续时间均表现出优异的敏感性, 可望用于模拟人类视觉感知过程中视觉对光信号的差异性响应, 进而用于识别图像. 为了验证其可塑性, 采用 16 个 ReS_2 模拟单元利用仿真软件构建了 4×4 阵列, 将光强差异映射到字母“Z”的图像. 上半区域施加 1.5 mW/cm^2 光脉冲, 下半区域为 0.8 mW/cm^2 , 背景填充为 0.5 mW/cm^2 . 图 3 显示, 在撤光后不同衰减时间下, EPSC 大小代表色阶, 高光强区域响应更持久; 但随着时间延长, 电流衰减导致图像模糊, 突显了器件对短期记忆的模拟能力. 这种强度与持续时间依赖的可塑性, 为后续边缘特征提取提供了基础.

由于视觉对光强的差异性响应有助于准确检测图像对比度, 保留图像光强差异信息. 本工作采用色阶颜色的深浅, 来表征光刺激撤除后特定衰减时间的 EPSC 值, 固定光脉冲持续时间分别为 10 s (图 3(a))、5 s (图 3(b)) 和 1 s (图 3(c)). 如图 3 所示, 在 1.5 mW/cm^2 , 0.8 mW/cm^2 和 0.5 mW/cm^2 三种不同光照强度照射下, 阵列单元的电导在相同的衰减时间下呈现差异性响应, 随着光照强度的增大, EPSC 逐渐增大. 通过读取电流对比度, 可观测到预设的字母图像“Z”, 在撤除光照后, 器件电流随之衰减, 随着衰减时间的延长, 阵列单元的光响应电流逐步降低, 最后已无法有效识别图像信息. 实验

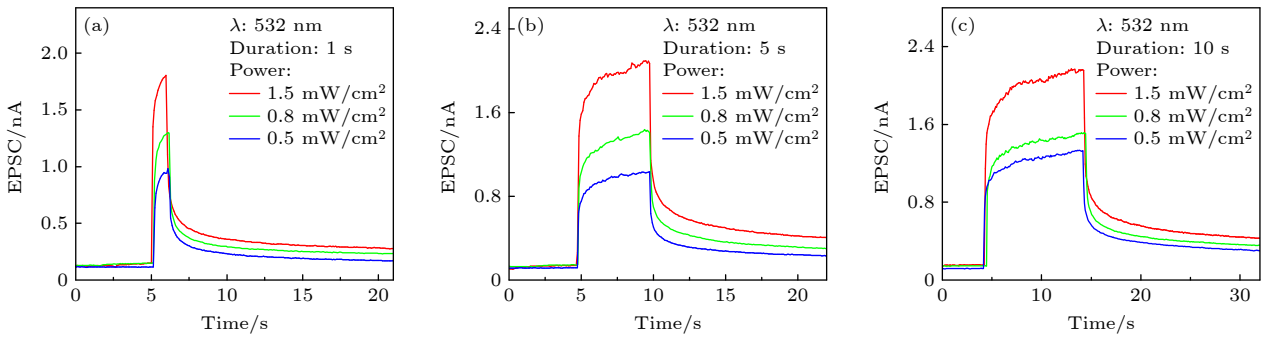


图 2 ReS_2 光电突触器件脉冲强度依赖可塑性

Fig. 2. The pulse intensity of ReS_2 photoelectric synaptic devices is dependent on plasticity.

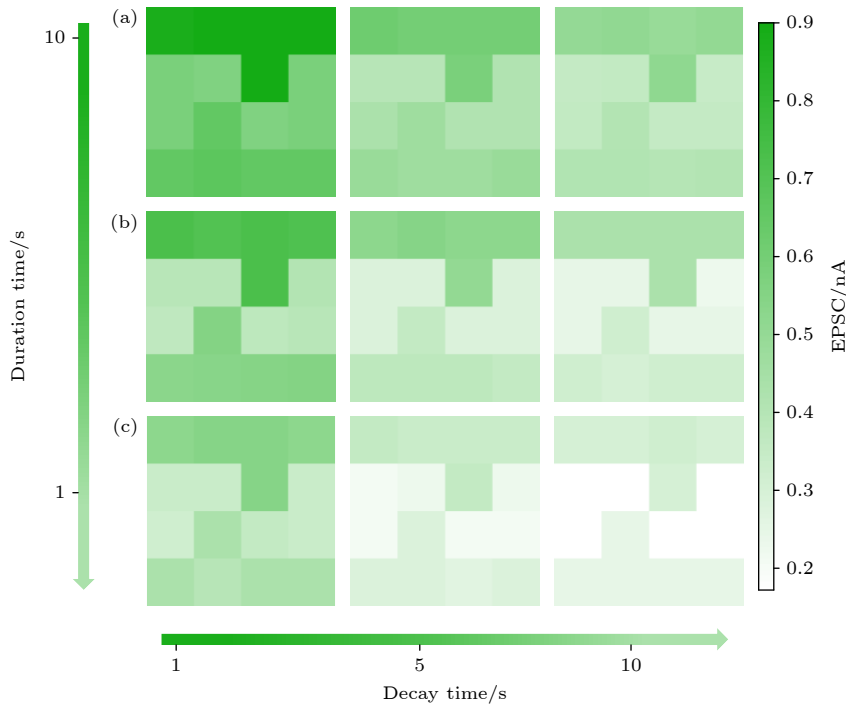


图 3 器件经过不同光照强度, 其 EPSC 所形成的图像映射. 由不同光强组成的字母“Z”的衰减过程持续时间 (a) 10 s; (b) 5 s; (c) 1 s

Fig. 3. The attenuation process of the letter “Z” composed of different light intensifications when the EPSC image mapping of the device is subjected to different light intensifications with durations: (a) 10 s; (b) 5 s; (c) 1 s.

结果表明,随着光脉冲持续时间延长,器件的光电响应呈现上升趋势,这一特性与人类视觉感知中的“长时间光刺激下视觉印象更强”的规律高度一致.

脉冲数目等效于视觉信息重复观看次数,是模拟记忆巩固的核心.图 4(a) 呈现了器件在不同光脉冲刺激数目下的 EPSC 变化,随着光脉冲数目的增加,EPSC 呈现持续上升趋势.图 4(a)—(e) 分别展示了衰减时间为 100 ms, 5 s, 10 s, 20 s 和 30 s 时,不同观察次数(光脉冲数目)的 EPSC 响应,进一步扩大了可塑性的动态范围.实验结果表明,突触权重得到了有效且稳定的增强,展现了与人类视觉记忆的形成与巩固过程高度相似的特性.

为探究 ReS_2 中的持续光电导效应是否源于硫空位缺陷,本研究采用第一性原理计算,对比分析了无缺陷与含硫空位缺陷的单层 ReS_2 的能带结构.图 5(a) 计算结果显示,无缺陷 ReS_2 的带隙为 1.22 eV,与已有文献 [31] 报道相符.而当引入硫空位缺陷后,能带结构中出现了两个缺陷能级:位于导带底下方 0.31 eV (ΔE_2) 的电子陷阱(蓝色),以及位于价带顶上方 0.23 eV (ΔE_1) 的空穴陷阱(红

色),如图 5(b) 所示,为深入理解硫空位诱导缺陷能级的微观机制,我们进一步计算了态密度(DOS),如图 5(c), (d) 所示.结果表明,在费米能级附近(0—2 eV) 出现了新的态密度峰,证实了缺陷的存在.此外,通过导带底(CBM)和价带顶(VBM)波函数分布的可视化分析,可以直观观察到载流子分布的变化 [32].在无缺陷的 ReS_2 中,VBM 波函数分布在所有 Re 及部分 S 原子上,如图 5(e) 所示,而 CBM 波函数分布于部分 Re 和 S 原子上,如图 5(f) 所示.在含硫空位缺陷的 ReS_2 中,VBM 波函数主要局域在与空位同层的 Re 原子上(图 5(g)),CBM 波函数则主要分布于与空位不同层的部分 Re 和 S 原子上(图 5(h)).

图 6(a) 给出了撤去光照后 EPSC 在 95 s 内的弛豫过程.该衰减过程呈现多时间尺度特征,可拟合为 3 个指数衰减阶段:快速阶段(0—0.5 s, $\tau_1 = 0.085$ s)、中速阶段(0.5—2.5 s, $\tau_2 = 1.149$ s)和慢速阶段(2.5—95 s, $\tau_3 = 20.84$ s).这种快慢弛豫并存的特性,主要归因于 ReS_2 晶格中普遍存在的硫空位引入的缺陷能级,通过调控持续光电导(PPC)效应对载流子复合过程产生显著影响.

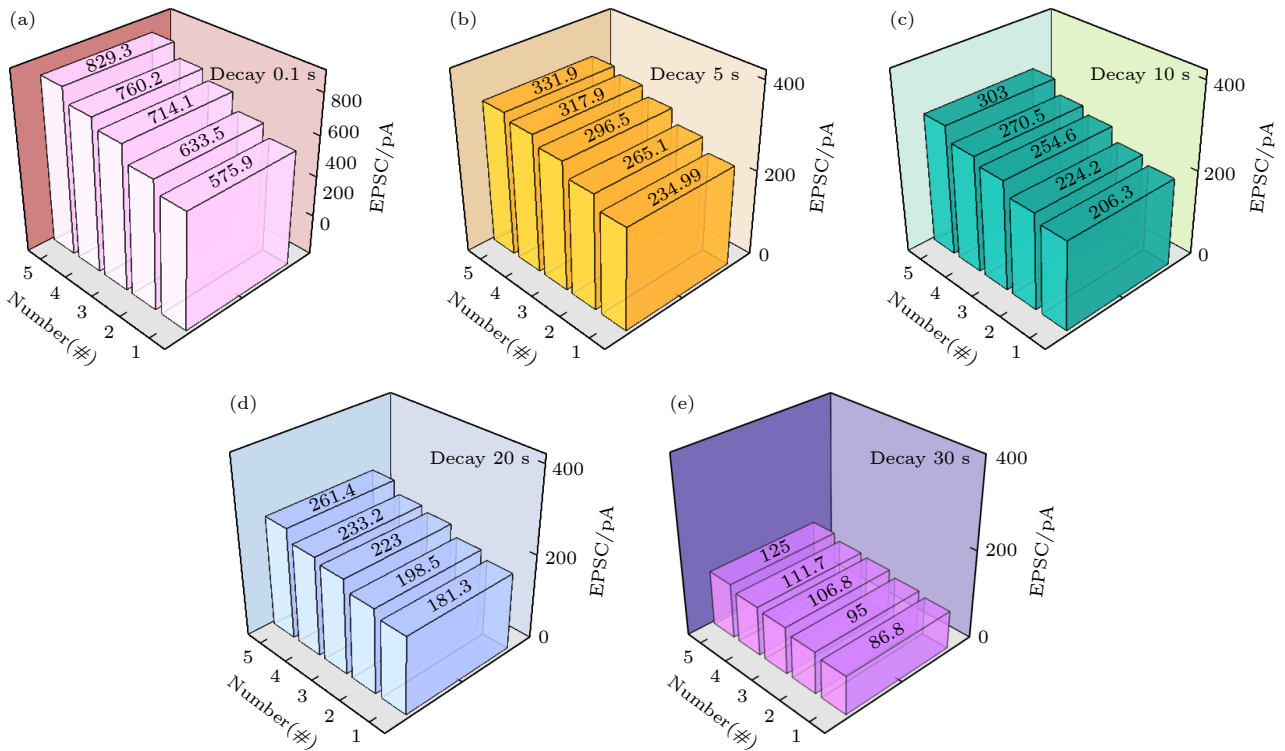


图 4 ReS_2 光电突触器件不同衰减时间下脉冲数目依赖可塑性 (a) 100 ms; (b) 5 s; (c) 10 s; (d) 20 s; (e) 30 s

Fig. 4. Pulse number-dependent plasticity of ReS_2 optoelectronic synapse devices under different decay times: (a) 100 ms; (b) 5 s; (c) 10 s; (d) 20 s; (e) 30 s.

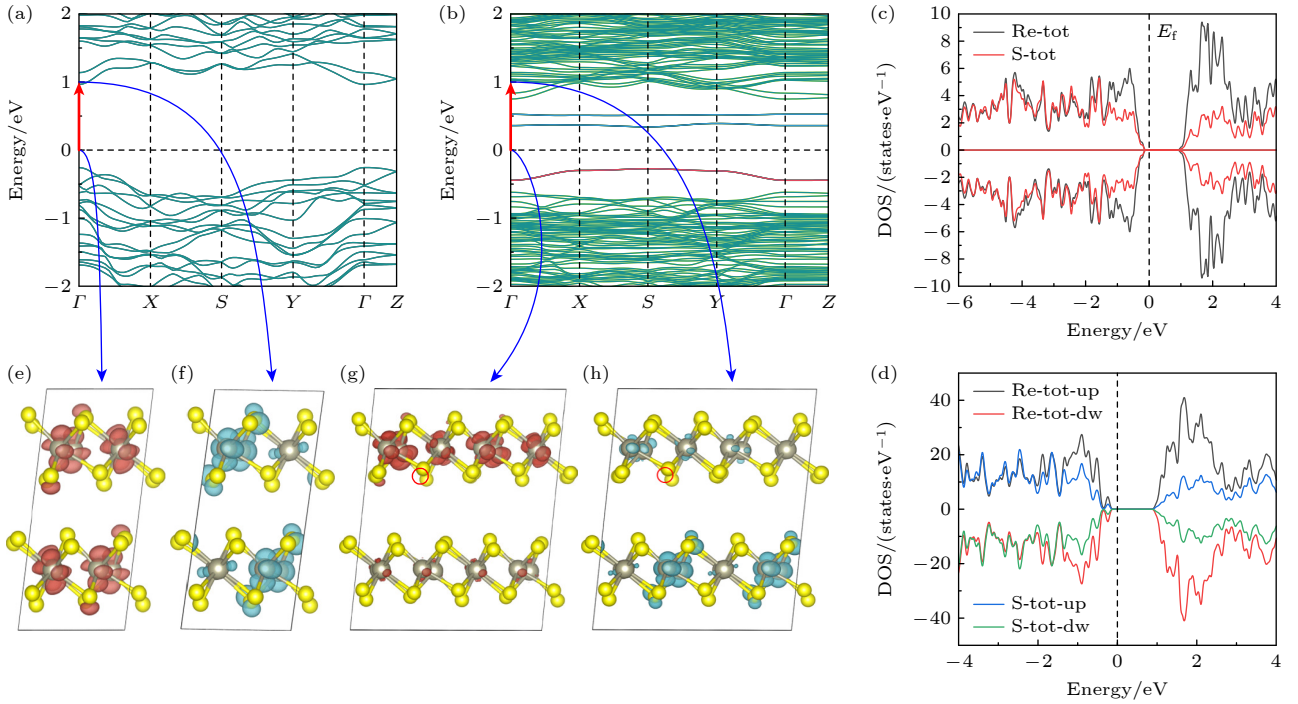


图5 S空位对 ReS_2 的电子云密度及能带结构的影响 (a) 无缺陷和(b)存在S空位 ReS_2 的能带结构; (c) 无缺陷的 ReS_2 总态密度; (d) 存在S空位的 ReS_2 总态密度; (e) 无缺陷的 ReS_2 CBM波函数分布; (f) 无缺陷的 ReS_2 VBM波函数分布; (g) 存在S空位的 ReS_2 CBM波函数分布; (h) 存在S空位的 ReS_2 VBM波函数分布

Fig. 5. Influence of S vacancies on the electron cloud density and band structure of ReS_2 : (a) Band structure of defect-free and (b) monolayer ReS_2 with S vacancies; (c) total state density of complete ReS_2 ; (d) total state density of ReS_2 with S vacancies; (e) distribution of CBM wave function of defect-free ReS_2 ; (f) distribution of VBM wave function of defect-free ReS_2 ; (g) ReS_2 CBM wave function distribution with S vacancies; (h) ReS_2 VBM wave function distribution with S vacancies.

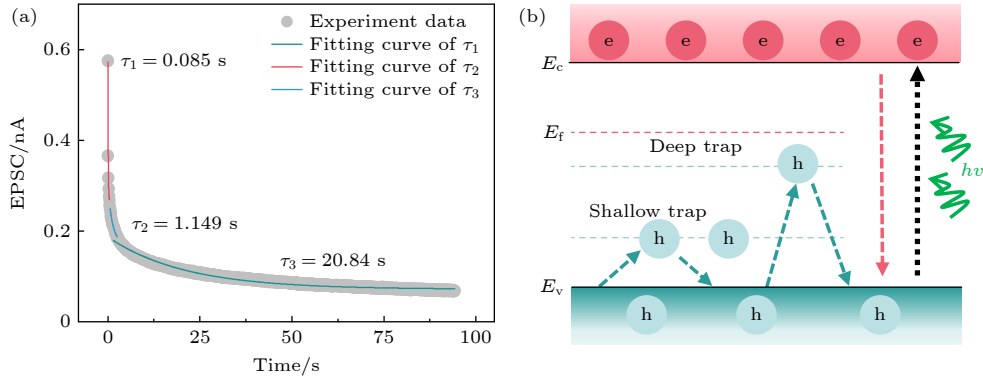


图6 ReS_2 光电突触机理分析 (a) EPSC衰减过程及3个阶段提取的弛豫时间常数; (b) ReS_2 光电突触器件中光生载流子被捕获、复合与热激发的示意图

Fig. 6. Analysis of the photoelectric synaptic mechanism of ReS_2 : (a) EPSC attenuation process and relaxation time constants extracted in the three stages; (b) schematic diagram of the capture, recombination and thermal excitation of photogenerated carriers in ReS_2 optoelectronic synaptic devices.

其微观物理机制如图6(b)所示,光照激发下,电子从价带(E_v)跃迁至导带(E_c),产生非平衡载流子.光照停止后,载流子通过多种路径复合.除导带电子与价带空穴的直接复合外,部分载流子会被浅能级缺陷或深能级缺陷捕获,被捕获的载流子需经热激发才能重新回到能带并参与后续复合,这

一过程显著延长了有效载流子寿命,从而延长弛豫时间.因此,观测到的宏观弛豫时间 τ 取决于直接复合寿命 τ_R 与陷阱热激发寿命 τ_T 的协同作用.其中,陷阱热激发过程的时间常数可由以下关系进行描述^[33]:

$$\tau_T = \tau_0 \cdot e^{\Delta E/kT}, \quad (1)$$

其中, ΔE 为缺陷能级与能带边的能量差, τ_0 为特征时间常数, k 为玻尔兹曼常数, T 为温度. 该式表明, 在恒定温度下, τ_T 随 ΔE 呈指数增长. 当缺陷能级深度 ΔE 介于 0.23—0.31 eV 时, 不同陷阱能级所对应的弛豫时间可跨越数个数量级, 从而有效延长光电流的衰减过程, 解释了实验中观察到的多阶段弛豫现象.

理论与实验结果均表明, ReS_2 中的硫空位在价带顶 (VBM) 及导带底 (CBM) 附近引入了局域化的浅陷阱态, 分别作为空穴与电子陷阱, 有效延缓了载流子复合, 从而无需依赖复杂的异质结或浮栅结构即可产生强烈的持久性光电导效应. 相比之下, 经典二维材料如 MoS_2 中的硫空位通常形成深能级陷阱, 从而使光响应偏向“瞬态、短寿命”^[34]. 因此, MoS_2 中与硫空位相关的深空穴陷阱需要更多能量才能释放空穴回到价带参与复合, 这使得器件响应较快、增益与持久性受限. 由此可见, ReS_2 更适合实现超低功耗与持久性光电导效应的协同.

2.3 器件超低功耗特征

值得注意的是, ReS_2 突触器件展示出了优异的低功耗性能. 如图 7(a), (b) 漏源电压从 0.1 V 降低到 0.01 V 时, EPSC 随电压的降低而减小. 在漏源电压为 0.01 V 时, 器件仍然表现出良好的突触可塑性, 在此基础上, 固定漏源电压 0.01 V, 结合能耗公式^[35,36]:

$$dE = V_{ds} \times \int I_{ds} \times dt. \quad (2)$$

进一步探索降低持续时间和光功率是否可以降低能耗. 其中, V_{ds} 是漏源电压, I_{ds} 是光刺激下的漏源峰值电流, t 是光脉宽. 如图 7(c) 所示, 固定光功率为 1.5 mW/cm^2 , 持续时间由 500 ms 降低到 200 ms 时, EPSC 降低, 结合能耗公式可知, 能耗随之降低. 同样, 降低光功率影响电流值的大小, 同样可以降低能耗. 固定持续时间 500 ms, 光功率由 1.5 mW/cm^2 降低到 0.5 mW/cm^2 , EPSC 降低, 功耗随之降低 (图 7(d)). 综上所述, 当同时在低电压 (0.01 V)、弱光照 (0.5 mW/cm^2)、短时间 (200 ms)

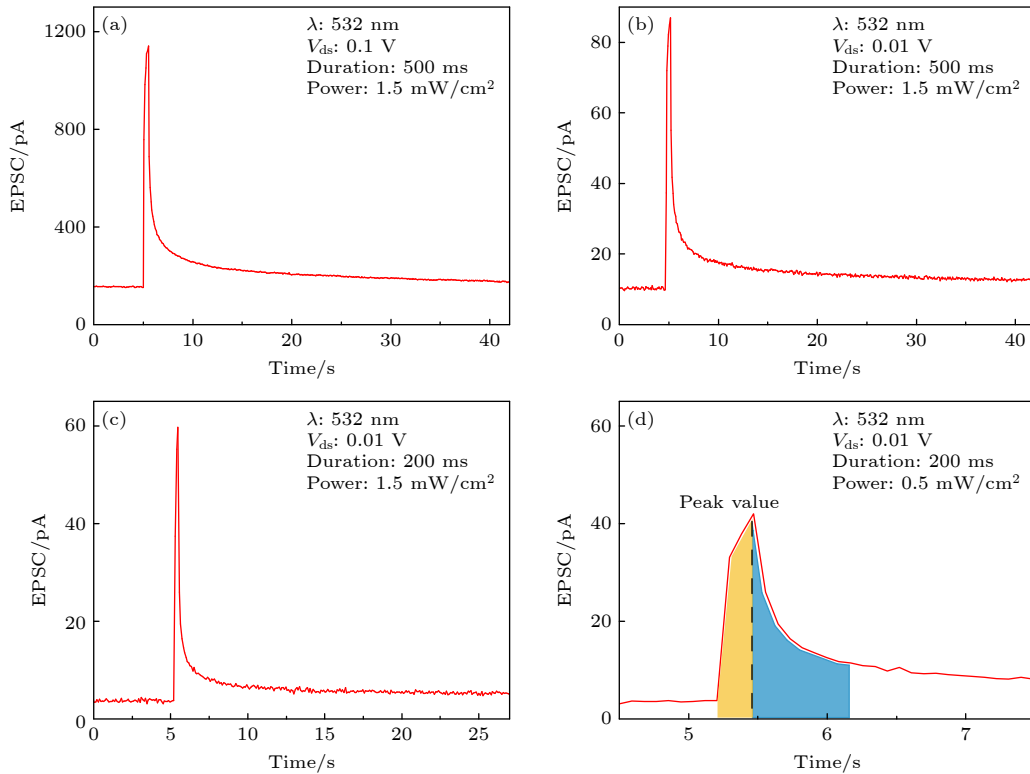


图 7 不同漏源电压 V_{ds} 下的单脉冲冲突触特性 (a) $V_{ds} = 0.1 \text{ V}$; (b) $V_{ds} = 0.01 \text{ V}$. 不同光功率下的单脉冲冲突触特性 (c) 1.5 mW/cm^2 ; (d) 0.5 mW/cm^2

Fig. 7. Single pulse conflict trigger characteristics under different source voltages V_{ds} : (a) $V_{ds} = 0.1 \text{ V}$; (b) $V_{ds} = 0.01 \text{ V}$. Single pulse conflict trigger characteristics under different optical powers: (c) 1.5 mW/cm^2 ; (d) 0.5 mW/cm^2 .

的极端情况下, 器件仍然表现出明显的 EPSC 响应, 如图 7(d) 所示, 此时按照 (2) 式计算器件的单个突触事件功耗, 即为图 7(d) 中黄色阴影所对应的积分面积, 所得功耗最低为 49 fJ. 以光电流峰值衰减至 10% 所需的时间为弛豫时间^[37], 计算器件的静态功耗为黄色与蓝色阴影对应积分面积之和, 为 591 fJ. 对比不同类型突触性能, 如表 1 所示, 本文的 ReS₂ 突触器件不仅器件结构简单, 还在能耗方面与生物突触的能耗相当, 且较现有典型光电突触器件能耗降低达 1—3 个数量级, 具有一定的优势.

表 1 ReS₂ 光电突触器件与其他类型突触的性能比较
Table 1. Performance comparison of ReS₂ optoelectronic synaptic devices with other types of synapses.

No.	Channel materials	Wavelength /nm	V _{ds} /V	Δt /ms	Energy consumption	Ref.
1	Sn-MoO ₃	1570	0.01	100	40 nJ	[18]
2	WSe ₂	532	—	—	~8 nJ	[38]
3	BP	280	0.01	100	924 pJ	[39]
4	MoS ₂	450, 530, 650	—	—	1.8 pJ	[40]
5	IGZO/Al ₂ O ₃	405	1.5	500	750 fJ	[41]
6	CsPbBr ₃ QDs	450	1	500	400 fJ	[42]
7	Bio synapse	—	—	—	1—100 fJ	[43]
8	ReS ₂	520	0.01	200	49 fJ	本文

3 基于 ReS₂ 器件的图像边缘特征提取

外界视觉信号经初步处理后, 可被解耦为承载不同信息的频率通道. 通过特定滤波机制可以高效地提取轮廓、纹理等底层视觉要素, 为后续图像识别与场景理解建立计算基础. 为探究光电突触器件高通滤波特性, 采用 20 个波长 532 nm、功率密度 10 mW/cm² 的固定光脉冲序列进行刺激, 设定单脉冲宽度为 100 ms, 通过调节脉冲间隔实现 0.5—8 Hz 的频率变化, 如图 8 所示. 在相同的时间内 (固定时间为 10 s), 器件的兴奋性突触后电流 (EPSC) 随频率升高而逐渐增强的趋势. 同时, 弛豫过程也相应延长, 表明该响应具备显著的频率可调性.

为了量化这一频率依赖特性, 引入归一化 EPSC 增益来定量描述. 将其定义为第 20 次和第 1 次光脉冲引起的 EPSC 幅度的比值 (A_{20}/A_1), 如图 9(a) 所示. EPSC 增益随频率增大呈现先快速上升后渐趋饱和的趋势, 其变化可以很好地使用 S 型函数进行拟合^[44]:

$$H(f) = \frac{a_1 - a_2}{(1 + f/f_H)^p} + a_2, \quad (3)$$

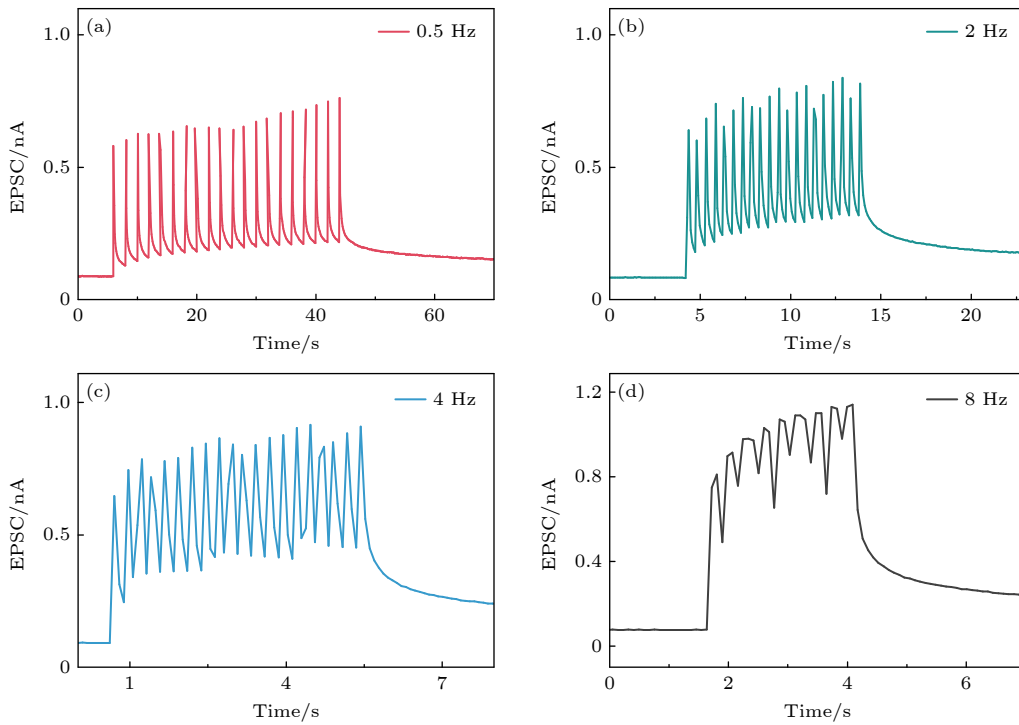


图 8 脉冲个数相同时, 不同激光频率下 EPSC 变化趋势图 (a) 0.5 Hz; (b) 2 Hz; (c) 4 Hz; (d) 8 Hz

Fig. 8. Trend of EPSC changes at different laser frequencies when the number of pulses is the same: (a) 0.5 Hz; (b) 2 Hz; (c) 4 Hz; (d) 8 Hz.

其中, p 为函数的阶次, a_1 是初始振幅, a_2 是最终振幅. 拟合求得截止频率 f_c 为 3.195 Hz, 表明 EPSC 对频率的依赖性类似于生物学中观察到的高通滤波器的特征, 即频率低于 f_c 的低频信号被抑制, 高于 f_c 的高频信号被保留, 其原理如图 9(b) 所示.

为模拟不同频率的视觉信息处理并验证 ReS₂ 光电突触器件的滤波性能, 以动物图像 (图 10(a)) 作为测试对象为例, 首先通过快速傅里叶变换 (FFT) 将其转换为频率图 (图 10(b)), 其中频率图的中心区域对应 0 Hz 低频区域. 从图像处理的物

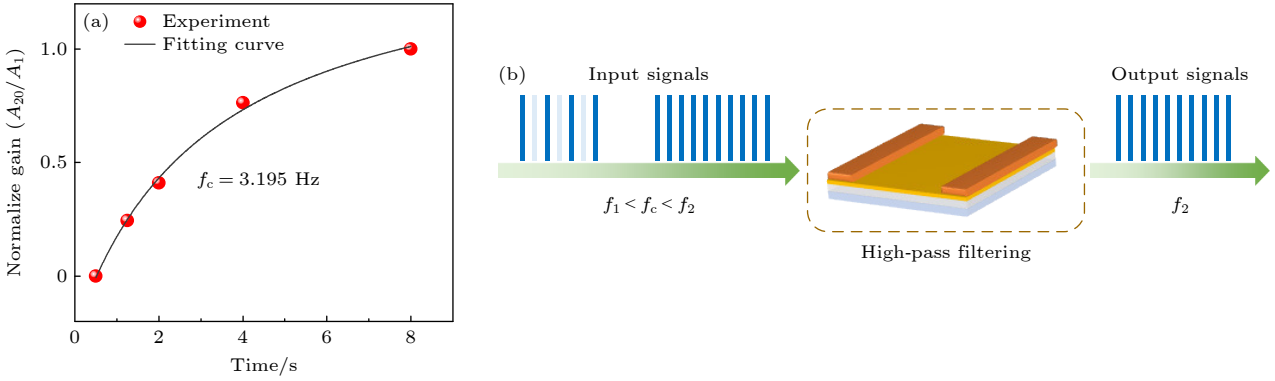


图 9 ReS₂ 光电突触器件高通滤波原理 (a) Gain 比值与 S 型函数拟合关系; (b) 基于 Gain 与脉冲频率的关系进行高通滤波原理
 Fig. 9. High-pass filtering Principle of ReS₂ optoelectronic synaptic device: (a) Gain ratio and S-shaped function fitting relationship; (b) the principle of high-pass filtering is based on the relationship between Gain and pulse frequency.

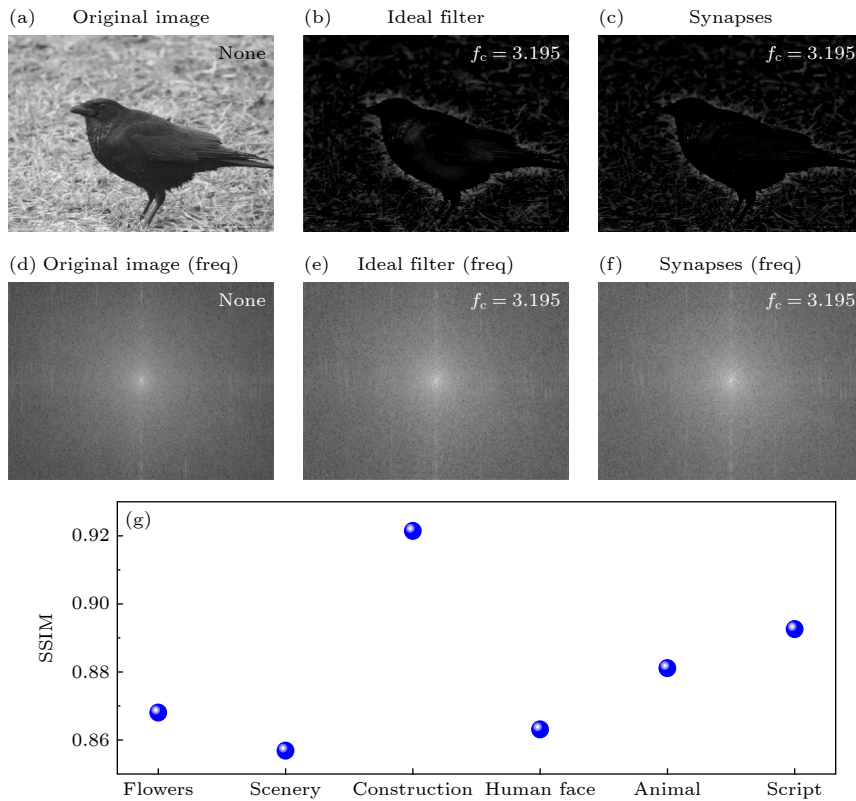


图 10 高通滤波实现边缘特征提取 (a) 原始图像; (b) 由理想高通滤波器处理后的图像; (c) 使用突触器件处理后的图像; (d) 原始图像频率图; (e) 由理想高通滤波器处理后的图像频率图; (f) 使用突触器件处理后的图像频率图; (g) 多类别测试图像的 SSIM 值对比图

Fig. 10. Edge feature extraction achieved by high-pass filtering: (a) Original image; (b) image processed by an ideal high-pass filter; (c) image processed with synaptic devices; (d) frequency map of the original image; (e) frequency map of the image processed by the ideal high-pass filter; (f) frequency map of the image processed by the synaptic device; (g) comparison chart of SSIM values of multi-category test images.

理机制来看, 图像的边缘与线条等细节特征在频域中对应高频分量, 而背景信息则主要由低频分量构成. 基于此原理, 构建了理想阈值型高通滤波器, 设定截止频率为 3.195 Hz, 以此作为验证器件滤波性能的对照组. 图 10(c) 展示了经理想高通滤波器处理后的图像, 由于高频特征得以保留, 低频背景受到有效抑制, 图像呈现出显著的边缘增强效果. 值得注意的是, 上述滤波操作均在频率域中完成, 因此最终的处理后图像需通过对滤波后的频率图 10(d) 执行快速反傅里叶变换 (IFFT) 获得. 在此基础上, 为了演示 ReS₂ 光电突触器件的高通滤波功能, 在上述基础上将该器件的 S 型拟合特性曲线直接作为滤波器的传递函数. 在该机制下, 输入频率谱中的每一个频率分量均依据该传递函数计算增益系数, 进而实现对其原始幅度的调制. 作为信号传递函数, 该器件表现出对低频分量的大幅衰减作用, 同时保留了高频分量. 如图 10(e) 所示, 经突触处理后的图像同样表现出明显的边缘增强特征. 对应的频谱图 10(f) 显示, 其中心代表低频信息的 0 Hz 亮部区域相较原始图像频率图扩大, 证明低频信号被突触器件成功抑制.

为量化评估 ReS₂ 光电突触器件的滤波性能, 引入结构相似度 (structural similarity index measure, SSIM) 对理想高通滤波图像 (图 10(c)) 和突触处理图像 (图 10(e)) 进行相似度分析, 结果显示二者 SSIM 值达到 0.8631 (SSIM 最大值为 1, 代表两幅图像完全一致). 为证明 ReS₂ 光电突触器件在

多类别图像边缘提取中的稳定性, 进一步将多种类别图像作为原始图像对其边缘增强功能进行了验证. 如图 10(g) 所示, 该 ReS₂ 光电突触器件在人像、风景、手写字、建筑物、花朵等多类图像处理中, 其输出与理想高通滤波结果的 SSIM 值均高于 0.85, 其中文字和风景类图像识别较为优异, 最高可达 93%. 且性能波动极小 (极差仅 0.06). 上述的实验结果共同表明, ReS₂ 光电突触器件具有优异、均衡且适用范围广泛的高通滤波与边缘特征提取能力. 能够对视觉信号进行高通滤波操作, 从而实现图像边缘特征的精准提取.

4 ReS₂ 器件的联想记忆模拟

基于上述可塑性特性, 器件进一步模拟了联想学习, 大脑通过关联刺激形成新记忆的机制. “巴甫洛夫狗”实验是其中的经典模型之一. 由于 ReS₂ 光电突触可塑性具有和生物突触可塑性相似的神经学特点, 因此利用光电突触模拟与联想学习过程相关的巴甫洛夫条件反射实验. 由图 11(a), (b) 可知, 在同一光功率 2.5 mW/cm² 下, 532 nm 处响应度较高, 而 650 nm 处较低, 这源于材料带隙结构对不同波长吸收系数的差异. 因此, 选择使用 10 个 650 nm 的红光脉冲作为铃声刺激, 10 个 532 nm 的绿光脉冲作为食物刺激, 选取 0.45 nA 作为阈值电流. 为确保 EPSC 阈值的差异性, 选取 532 nm 绿光光功率为 15.2 mW/cm² 选取 650 nm 红光光

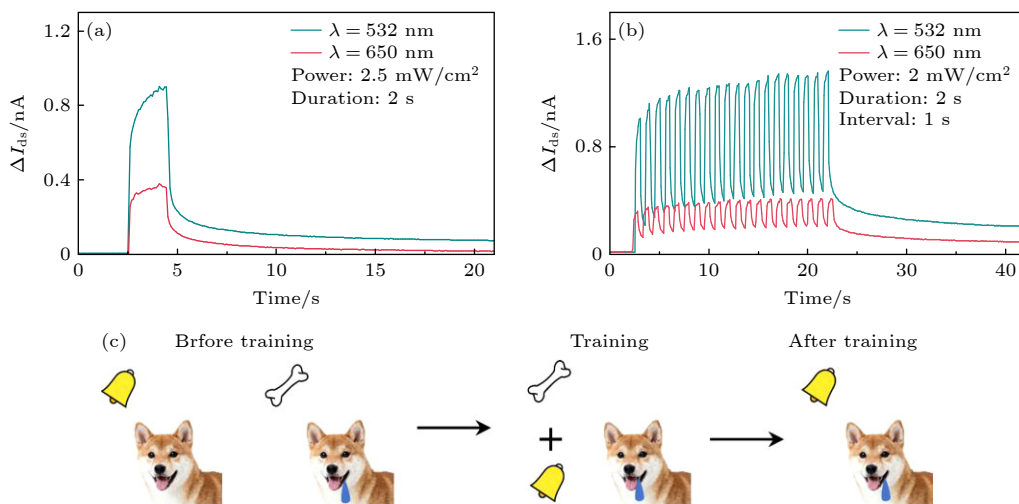


图 11 巴甫洛夫条件反射实验原理 (a) 不同波长的单脉冲光电流响应; (b) 不同波长的多脉冲光电流响应; (c) 巴甫洛夫条件反射实验

Fig. 11. Principle of Pavlov's conditioned reflex experiment: (a) Single-pulse photoelectric current responses at different wavelengths; (b) Multi-pulse photoelectric current responses at different wavelengths; (c) Pavlovian conditioned reflex experiment.

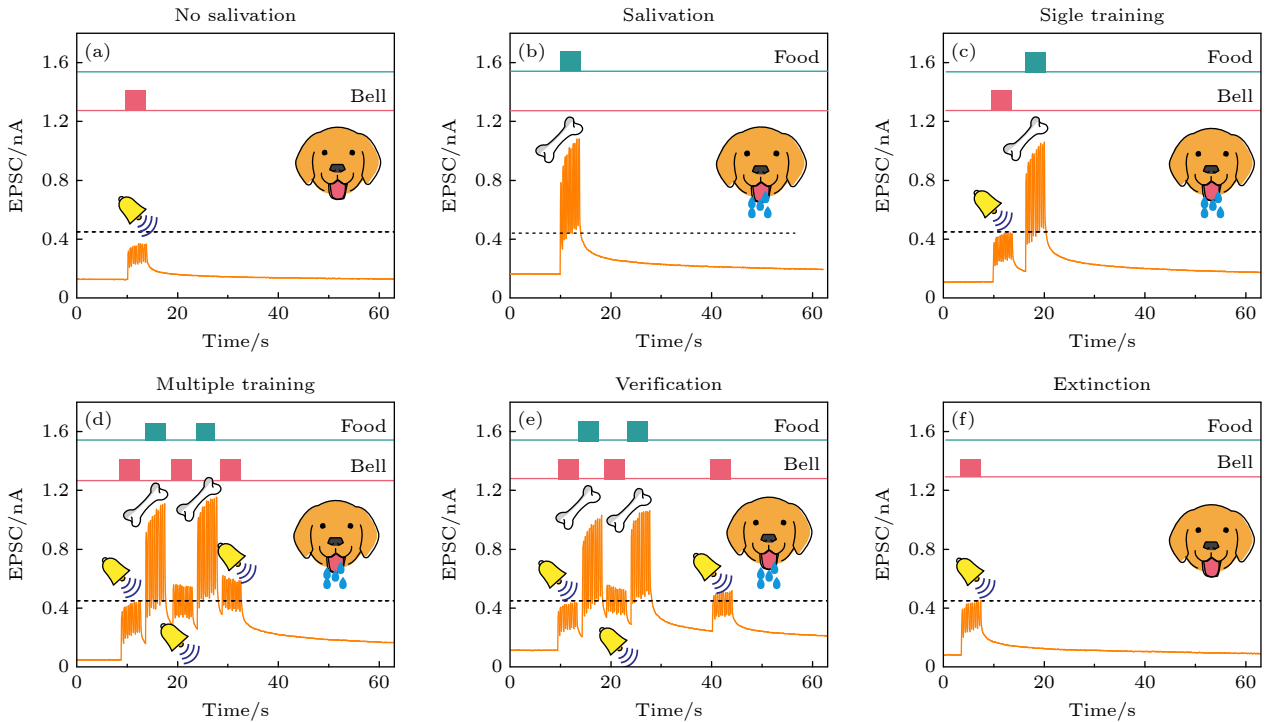


图 12 联想学习-巴甫洛夫的狗实验模拟 (a) 非条件刺激; (b) 条件刺激; (c) 根据“铃声后必然出现食物”定义一个训练周期为 1 个铃声刺激和 1 个食物刺激; (d) 多次训练后, 铃声引发流涎反应; (e) 多次训练后间隔 12 s, 单个铃声引发流涎反应; (f) 联想记忆消失
 Fig. 12. Associative learning-Pavlov's dog experiment simulation: (a) Unconditioned stimulus; (b) conditioned stimulus; (c) define a training cycle as one bell stimulus and one food stimulus based on the principle that “food must appear after the bell”; (d) after multiple trainings, the ringtone triggers a salivation response; (e) after multiple trainings with an interval of 12 s, a single bell sound triggers a salivation response; (f) disappearance of associative memory.

功率为 1.5 mW/cm^2 . 此时, 当 EPSC 高于 0.45 nA 时表示狗出现流涎行为, 反之则没有出现流涎行为, 如图 11(c) 所示.

如图 12(a) 所示, 训练前, 连续施加 10 次红光脉冲刺激, EPSC 未能达到阈值电流, 其作用相当于“巴甫洛夫狗”实验中的铃声. 而在连续 10 次绿光脉冲刺激后, EPSC 的峰值大于阈值电流, 说明其相当于实验中的食物刺激, 触发流涎反应, 如图 12(b) 所示. 我们将训练周期定义为先施加 10 个红光脉冲, 再施加 10 个绿光脉冲, 如图 12(c) 所示. 在经过多次训练后, 单独施加铃声刺激, 单独红光刺激也能使 EPSC 超阈值 (图 12(d), (e)), 证明铃声与食物关联形成. 然而, 长时间间隔后 (如不训练), 红光响应消失 (图 12(f)), 模拟了记忆遗忘. 此实验不仅验证了 ReS_2 突触能够成功模拟巴甫洛夫联想学习, 展现了高度仿生的突触可塑性.

5 结 论

本文针对神经形态视觉系统 (NVS) 对低功耗

核心器件的需求, 成功设计并制备了基于 ReS_2 材料的超低功耗两端突触器件. 该器件在 532 nm 光脉冲刺激下, 展现出优异的兴奋性突触后电流 (EPSC) 响应与持久性光电导效应, 有效模拟了包括短程可塑性 (STP)、长程可塑性 (LTP) 在内的生物突触功能, 并表现出对光脉冲强度、数目及频率的依赖性可塑性. 该器件核心优势在于其极低的单次突触事件能耗 49 fJ , 较现有典型光电突触器件能耗降低达 1—3 个数量级, 与生物突触功耗相当. 基于该器件光电导效应所固有的高通滤波特性, 成功实现了对多类型图像的边缘增强处理, 理想结果最高相似度可达 93%. 利用其对不同波长光脉冲的差异化响应, 成功模拟了“巴甫洛夫狗”经典条件反射实验, 展示了良好的联想学习能力. 实验结果凸显了本设计在器件结构简单与操控 (可靠光控) 上的优势, 以及在实现复杂突触功能与超低功耗之间取得的卓越平衡. 该器件在具体神经形态视觉任务中展现出显著的应用潜力, 其结构简单、超低功耗的特性使其在低密度集成阵列构建和面向极端环境的实际 NVS 应用方面具有独特优势.

参考文献

- [1] Hou Y X, Li Y, Zhang Z C, Li J Q, Qi D H, Chen X D, Wang J J, Yao B W, Yu M X, Lu T B, Zhang J 2021 *ACS Nano* **15** 1497
- [2] Wang G Z, Wang R B, Kong W Z, Zhang J H 2018 *Cogn. Neurodyn.* **12** 615
- [3] Wei B, Chen Y B, Han X T, Kang Y, Liang B J, Li C, Yang X K, Liang F, Peng Y X 2025 *Sci. China Inf. Sci.* **68** 140406
- [4] Choi C S, Leem J Y, Kim M S, Taqieddin A, Cho C H, Cho K W, Lee G J, Seung H J, Bae H J, Song Y M, Hyeon T G, Aluru N R, Nam S W, Kim D H 2020 *Nat. Commun.* **11** 5934
- [5] Wang Z C, Li J L, Fan X Y, Tang W, Zhu H F, Li L J 2024 *Adv. Mater. Technol.* **10** 2401589
- [6] Li S Y, Li J T, Zhou K, Yan Y, Ding G L, Han S T, Zhou Y 2024 *J. Phys. Mater.* **7** 032002
- [7] Lian H X, Liao Q F, Yang B D, Zhai Y B, Han S T, Zhou Y 2021 *J. Mater. Chem. C* **9** 640
- [8] Lee G, Baek J H, Ren F, Pearton S J, Lee G H, Kim J H 2021 *Small* **17** 2100640
- [9] Sun L F, Wang W, Yang H J 2020 *Adv. Intell. Syst.* **2** 1900167
- [10] van der Burgt Y, Lubberman E, Fuller E J, Keene S T, Faria G C, Agarwal S, Marinella M J, Talin A A, Salleo A 2017 *Nat. Mater.* **16** 414
- [11] Han C, Han X W, Han J Y, He M Y, Peng S L, Zhang C Y, Liu X C, Gou J, Wang J 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2113053
- [12] Zhai Y B, Xie P, Feng Z H, Du C Y, Han S T, Zhou Y 2022 *Adv. Funct. Mater.* **32** 2108440
- [13] Fuller E J, El Gabaly F, Léonard F, Agarwal S, Plimpton S J, Jacobs-Gedrim R B, James C D, Marinella M J, Talin A A 2017 *Adv. Mater.* **29** 1604310
- [14] Park J, Lee M 2025 *J. Korean Phys. Soc.* **86** 649
- [15] Zhao X Y 2024 *Mater. Res. Express* **11** 055901
- [16] Huang X, Wang M, Wen W, Wei S S, Zhang K Y, Guo Y L, Liu Y Q 2025 *Small* **21** 2412025
- [17] Hong S, Choi S H, Park J, Yoo H, Oh J Y, Hwang E, Yoon D H, Kim S K 2020 *ACS Nano* **14** 9796
- [18] Kang Y, Chen Y B, Tan Y L, Hao H, Li C, Xie X N, Hua W H, Jiang T 2023 *J. Materiomics* **9** 787
- [19] Yoo C, Ko T J, Kaiyum M G, Martinez R, Islam M M, Li H, Kim J H, Cao J, Acharya M, Roy T, Jung Y 2022 *APL Mater.* **10** 070702
- [20] Chen J X, Xu W T 2023 *eScience* **3** 100178
- [21] Zhao M Y, Hao Y R, Zhang C, Zhai R L, Liu B Q, Liu W C, Wang C 2022 *Crystals* **12** 1087
- [22] Li C, Yang D L, Sun L F 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 218504 (in Chinese) [李策, 杨栋梁, 孙林峰 2022 物理学报 **71** 218504]
- [23] Wu G J, Zhang Z F, Ba K, Zhang X M, Zeng J H, Bai C Y, Liu Q, Wang J L 2023 *IEEE Electron Device Lett.* **44** 857
- [24] Xia Q F 2019 *Proceedings of the 7th International Conference on Semiconductor Technology for Ultra-Large Scale Integrated Circuits and Thin Film Transistors* Kyoto, Japan, May 19–23, 2019 p36
- [25] Ma M J, Huang C N, Yang M Y, He D, Pei Y F, Kang Y F, Li W Q, Lei C, Xiao X H 2024 *Small* **20** 2406402
- [26] Lin J W, Chen J W, Li L H, Yang Z M 2025 *Chin. J. Lasers* **52** 209 (in Chinese) [林基伟, 陈杰威, 李丽华, 杨中民 2025 中国激光 **52** 209]
- [27] Wang S Y, Chen C S, Yu Z H, He Y L, Chen X Y, Wan Q, Shi Y, Zhang D W, Zhou H, Wang X R, Zhou P 2019 *Adv. Mater.* **31** 1806227
- [28] Song J R, Meng J L, Wang T Y, Wan C J, Zhu H, Sun Q Q, Zhang D W, Chen L 2024 *J. Semicond.* **45** 47
- [29] Zhang E Z, Jin Y B, Yuan X, Wang W Y, Zhang C, Tang L, Liu S S, Zhou P, Hu W D, Xiu F X 2015 *Adv. Funct. Mater.* **25** 4076
- [30] Shan H, Ying H W, Cheng P H, Hu L X, Wang J R, Ye Z Z, Zhuge F 2025 *Chin. J. Lumin.* **46** 245 (in Chinese) [单海, 应宏微, 程培红, 胡令祥, 王敬蕊, 叶志镇, 诸葛飞 2025 发光学报 **46** 245]
- [31] Baglov A, Khoroshko L, Zhoidzik A, Dong M, Weng Q, Kazi M, Khandaker M U, Islam M A, Chowdhury Z Z, Sayyed M I, Trukhanov S, Tishkevich D, Trukhanov A V 2024 *Helvion* **10** 28646
- [32] Komsa H P, Krasheninnikov A V 2015 *Phys. Rev. B* **91** 125304
- [33] Konstantatos G, Levina L, Fischer A, Sargent E H 2008 *Nano Lett.* **8** 1446
- [34] Li J T, Bai J, Meng M, Hu C H, Yuan H L, Zhang Y, Sun L L 2022 *Nanomaterials* **12** 1365
- [35] Huang W, Hang P J, Wang Y, Wang K, Han S H, Chen Z R, Peng W B, Zhu Y Y, Xu M S, Zhang Y Q, Fang Y J, Yu X G, Yang D R, Pi X D 2020 *Nano Energy* **73** 104790
- [36] Wang Y, Yin L, Huang W, Li Y Y, Huang S J, Zhu Y Y, Yang D R, Pi X D 2021 *Adv. Intell. Syst.* **3** 2000099
- [37] Pecunia V, Anthopoulos T D, Armin A, et al. 2025 *Nat. Photon.* **19** 1178
- [38] Guo Z H, Liu J H, Han X, Ma F Y, Rong D K, Du J Y, Yang Y H, Wang T L, Li G W, Huang Y, Xing J 2023 *ACS Appl. Mater. Interfaces* **15** 19152
- [39] Ahmed T, Kuriakose S, Mayes E L H, Ramanathan R, Bansal V, Bhaskaran M, Sriram S, Walia S 2019 *Small* **15** 1900966
- [40] Du J Y, Xie D G, Zhang Q H, Zhong H, Meng F Q, Fu X K, Sun Q C, Ni H, Li T, Guo E J, Guo H Z, He M, Wang C, Gu L, Xu X L, Zhang G Y, Yang G Z, Jin K J, Ge C 2021 *Nano Energy* **89** 106439
- [41] Song S H, Choi C, Ahn J T, Lee J J, Jang J S, Yu B S, Hong J P, Ryu Y S, Kim Y H, Hwang D K 2024 *InfoMat* **6** 131
- [42] Zhang J Y, Sun T L, Zeng S, Hao D D, Yang B, Dai S L, Liu D P, Xiong L Z, Zhao C R, Huang J 2022 *Nano Energy* **95** 107001
- [43] Sun Y L, Li M J, Ding Y T, Wang H P, Wang H, Chen Z M, Xie D 2022 *InfoMat* **4** 12317
- [44] Wan H C, Zhao J Y, Lo L W, Cao Y Q, Sepulveda N, Wang C 2021 *ACS Nano* **15** 14587

Neuromorphic visual image processing and associative learning functions based on ultra-low power ReS₂ optoelectronic synaptic devices*

SUN Yuhan^{1) #} LIANG Bujia^{1) #} KANG Yan¹⁾ XIA Yongshun¹⁾
WEI Bo^{1) 2)} YANG Xiaokuo^{1) †}

1) (*Fundamentals Department, Air Force Engineering University, Xi'an 710051, China*)

2) (*College of Computer, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China*)

(Received 26 November 2025; revised manuscript received 17 February 2026)

Abstract

To circumvent the “storage wall” and “power consumption wall” limitations inherent in traditional visual information processing systems, this study develops an ultra-low power two-terminal photoelectric synaptic device leveraging the pronounced persistent photoconductive effect of two-dimensional ReS₂. Employing a combination of first-principles calculations and experimental characterizations, we elucidate the regulatory mechanism of sulfur vacancies on the electronic density distribution and band structure of ReS₂. The introduction of sulfur vacancies induces defect energy levels within the band gap, elevates the local density of states, and promotes the separation and trapping of photogenerated electron-hole pairs. These mechanisms significantly amplify the persistent photoconductive effect, establishing a robust physical foundation for synaptic weight implementation. Notably, the device achieves an ultra-low energy consumption of 49 fJ per synaptic event, comparable to the energy efficiency of biological synapses. The synaptic weights can be continuously and controllably modulated by varying the intensity, number, and timing of optical pulses, accompanied by typical frequency-dependent plasticity. Leveraging its high-pass filtering characteristics, the device demonstrates effective edge enhancement in image preprocessing. Furthermore, by exploiting wavelength-dependent photoresponses, the device successfully emulates the “Pavlovian dog” conditioned reflex, validating its capability for associative learning. This work unveils the sulfur vacancy-mediated photoelectric synaptic mechanism in ReS₂ at the atomic and electronic structure levels. It offers novel insights into balancing structural intricacy with ultra-low power performance, holding significant implications for the advancement of high-performance neuromorphic vision systems in edge computing.

Keywords: ReS₂, ultra-low power consumption, edge feature extraction, associative memory

DOI: [10.7498/aps.75.20251606](https://doi.org/10.7498/aps.75.20251606)

CSTR: [32037.14.aps.75.20251606](https://cstr.cn/32037.14.aps.75.20251606)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62274183).

These authors contributed equally.

† Corresponding author. E-mail: yangxk0123@163.com

基于超低功耗 ReS_2 光电突触器件的图像边缘特征提取与联想学习功能

孙雨含 梁卜嘉 康艳 夏永顺 危波 杨晓阔

Neuromorphic visual image processing and associative learning functions based on ultra-low power ReS_2 optoelectronic synaptic devices

SUN Yuhan LIANG Bujia KANG Yan XIA Yongshun WEI Bo YANG Xiaokuo

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 75, 100803 (2026) DOI: 10.7498/aps.75.20251606

CSTR: 32037.14.aps.75.20251606

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251606>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于负光电导效应的 PtSe_2 光电突触器件机理特性与感存算功能

Mechanism, characteristics and sensing, storage and computing function of PtSe_2 photoelectric synaptic devices based on negative photoconductivity effect

物理学报. 2025, 74(16): 168501 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250403>

基于深度学习的流场时程特征提取模型

Flow feature extraction models based on deep learning

物理学报. 2022, 71(7): 074701 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20211373>

压控应变-自旋轨道矩协同调控的磁性随机存取存储器单元超低功耗翻转

Ultra-low power switching of magnetoresistive random access memory cells via synergistic regulation of voltage-controlled strain and spin-orbit torque

物理学报. 2026, 75(7): 074701 <https://doi.org/10.7498/aps.75.20251661>

光电神经形态器件及其应用

Optoelectronic neuromorphic devices and their applications

物理学报. 2022, 71(14): 148505 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220111>

非对称电极对二维SiC场效应晶体管工作性能调控与低功耗优化

Performance and low power consumption of two-dimensional SiC field effect transistors regulated and optimized with asymmetric electrodes

物理学报. 2025, 74(19): 198502 <https://doi.org/10.7498/aps.74.20250849>

基于磁性隧道结和双组分多铁纳磁体的超低功耗磁弹模数转换器

Ultra-low power magneto-elastic analog-to-digital converter based on magnetic tunnel junctions and bicomponent multiferroic nanomagnet

物理学报. 2024, 73(13): 137502 <https://doi.org/10.7498/aps.73.20240129>