

石墨烯/Bi₂O₂Se/石墨烯双异质结器件的 光探测和仿生突触研究

孙 丽¹, 徐永善², 高义华¹

(华中科技大学 1. 物理学院 & 武汉光电国家研究中心; 2. 材料科学与工程学院, 材料成形与模具技术全国重点实验室, 武汉 430074)

摘 要: 随着电子器件朝着微型化、集成化与多功能智能化方向发展, 二维材料凭借其丰富的结构及独特的物理化学性质为该领域开辟了全新的发展路径。其中, Bi₂O₂Se 因其适宜的带隙、高载流子迁移率及良好的环境稳定性而受到广泛关注。然而, 目前 Bi₂O₂Se 基器件仍存在暗电流大、响应度低等问题, 制约了其在高性能光电器件领域的进一步发展。本研究采用化学气相沉积工艺在云母衬底上可控生长了高质量二维 Bi₂O₂Se 纳米片, 并首次采用对称石墨烯(Graphene)作为接触电极构建了 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 对称双异质结器件。该结构利用 Gr 与 Bi₂O₂Se 之间形成的双界面内建电场, 优化了载流子的注入与分离过程。系统表征了该器件在黑暗及不同波长光照下的电流-电压特性、时间响应特性及光谱响应范围, 并深入探究了器件在脉冲光刺激下的动态电学行为, 模拟了生物突触的短期与长期可塑性功能。研究表明, 在 532 nm 光照下, 器件展现出良好的响应度(2.52 A/W)和探测率(3.39×10^9 Jones), 且在宽波长范围(365~1050 nm)内具有稳定的光响应, 证明了其作为宽带光探测器的潜力。在 365 nm 脉冲刺激下, 该器件展现出从短时程可塑性到长时程可塑性的转变, 通过调节光脉冲的强度、频率和数量, 精确模拟了包括兴奋性突触后电流、尖峰时序依赖可塑性在内的核心生物突触行为。此外, 该器件还成功复现了“经验学习”这一特征, 充分证明了其在神经形态计算领域的潜力。

关 键 词: 二维材料; Bi₂O₂Se; 石墨烯; 光探测; 仿生突触

中图分类号: TB383 文献标志码: A 文章编号: 1000-324X(2026)06-0795-10

Photonic-detection and Bionic-synapse of Graphene/Bi₂O₂Se/Graphene Bi-heterojunction Device

SUN Li¹, XU Yongshan², GAO Yihua¹

(1. School of Physics & Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In the process of modern electronic devices developing towards miniaturization, integration, and multi-functional intelligence, two-dimensional (2D) materials offer a promising development path for this field with

收稿日期: 2025-11-18; 收到修改稿日期: 2025-12-31; 网络出版日期: 2026-01-22

基金项目: 国家自然科学基金(11874025, 12274151)

National Natural Science Foundation of China (11874025, 12274151)

作者简介: 孙 丽(1994-), 女, 博士. E-mail: Sunl_qdu@163.com

SUN Li (1994-), female, PhD. E-mail: Sunl_qdu@163.com

通信作者: 高义华, 教授. E-mail: gaoyihua@hust.edu.cn

GAO Yihua, professor. E-mail: gaoyihua@hust.edu.cn

their diverse structures and unique physicochemical properties. Among numerous 2D materials, $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ has attracted extensive attention due to its suitable bandgap, high carrier mobility, and excellent environmental stability. However, current $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ -based devices still suffer from issues such as large dark current and low responsivity, which hinder their further development in the field of high-performance optoelectronic devices. In this study, high-quality 2D $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ nanosheets were grown on mica substrates *via* chemical vapor deposition. Innovatively, symmetric graphene (Gr) electrodes were used to construct a Gr/ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ /Gr bi-heterojunction device. This structure utilizes the built-in electric field formed at the dual interfaces between Gr and $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ to optimize carrier injection and separation processes. Subsequently, the current-voltage characteristics, transient current responses, and spectral responsivity of the device under dark and illumination were systematically characterized at different wavelengths. Especially, the dynamic electrical behavior of the device under pulsed light stimulation was thoroughly investigated to mimic short-term and long-term synaptic plasticity functions. Under 532 nm light illumination, the device exhibits a favorable responsivity of 2.52 A/W and a detectivity of 3.39×10^9 Jones, and maintains stable photoresponse across a wide wavelength range (365–1050 nm), confirming its potential as a broadband photodetector. Especially under 365 nm pulsed stimulation, the device demonstrates the transition from short-term plasticity to long-term plasticity. By adjusting the intensity, frequency, and number of light pulses, key biological synaptic behaviors, including excitatory postsynaptic currents and spike-timing-dependent plasticity, were accurately simulated. Furthermore, the device successfully reproduces the feature of “empirical learning”, fully demonstrating its potential in the field of neuromorphic computing.

Key words: two-dimensional material; $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$; graphene; photonic detection; bionic synapse

2004 年, 研究人员利用机械剥离技术首次从石墨中剥离出石墨烯, 开启了二维材料研究的新纪元^[1-5]。二维材料层间依靠弱范德瓦尔斯力结合, 表面呈现原子级平整度且无悬挂键, 这些特性使其在光电器件领域展现出独特的应用潜力^[6-12]。其中, 过渡金属二硫属化物(TMDs)因其可调节的直接带隙, 可适配光电器件对特定波段的光吸收和发射需求, 同时较高的光吸收系数可有效提升光与物质相互作用效率, 因此受到广泛关注^[9, 13]。然而, TMDs 普遍存在载流子迁移率低和严重的肖特基势垒效应等问题, 制约了器件性能的进一步提升^[14-15]。与此同时, 黑磷(BP)作为另一种备受关注的二维材料, 虽具有高载流子迁移率和可调带隙等优势, 但其易与空气中的氧气和水反应, 导致结构和性能迅速恶化, 限制了实际应用^[16]。近年来, 新型二维半导体 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 为解决上述问题提供了新思路。该材料具有 0.8 eV 的间接带隙^[17]和优异的空气稳定性, 无需复杂封装即可长期保存, 因而在高性能光电器件中展现出重要潜力。Peng 团队^[18]首次报道了基于二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的场效应晶体管, 其开关比高达 10^6 , 室温载流子迁移率高达 $450 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$, 低温下可进一步提升至 $20000 \text{ cm}^2/(\text{V} \cdot \text{s})$ 。Yin 等^[19]研制出基于 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的高

速红外光探测器, 响应度为 65 A/W, 响应时间仅约 1 ps, 为低成本、高灵敏度红外探测器的发展做出了重要贡献。Zhang 等^[20]首次将 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 应用于三端忆阻器, 通过施加栅极电压调控沟道电荷载流子, 实现了具有短期和长期可塑性的阻变行为, 为发展高动态神经形态计算的通用忆阻器平台提供了新思路。

本研究利用化学气相沉积工艺在云母衬底上实现了高质量二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米片的可控生长, 利用湿法转移结合微纳加工技术构建了以对称石墨烯(Gr)作为接触电极的 Gr/ $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ /Gr 双异质结器件, 并系统研究了其光电响应与生物突触的特性, 证实了其在光电器件中的应用潜力, 也为基于二维材料的神经形态模拟提供了思路。

1 实验方法

1.1 二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 的制备

采用化学气相沉积法制备二维 $\text{Bi}_2\text{O}_2\text{Se}$ 纳米片。使用直径 3.0 cm、长度 30.0 cm 的石英管作为反应器, 将氧化铋和硒化铋按质量比 1.4 : 1.0 分别置于加热中心和上游 8.0 cm 处。新鲜剥离的云母片作为生长衬底, 放置在加热的下游 13.0~15.0 cm 处。以氩

气为载气(流量 200.0 sccm (Standard cubic centimeter per minute)), 将管式炉加热至 700.0~750.0 °C 并保持 30.0 min。生长结束后, 系统自然冷却至室温。

1.2 器件制造

首先, 采用机械剥离法从石墨单晶中剥离出石墨烯薄片, 随后通过湿法转移技术将其精准转移至 SiO₂/Si 衬底表面。为制备 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 异质结, 利用电子束光刻(Nexdep, Angstrom Engineering)在石墨烯中刻画出沟道, 随后进行反应离子刻蚀, 形成两片独立的石墨烯电极区域。通过聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)辅助湿法转移技术, 从云母衬底上将制备好的 Bi₂O₂Se 转移至目标衬底。随后, 在光学显微镜辅助下, 利用聚二甲基硅氧烷(PDMS)将 Bi₂O₂Se/PMMA 转移至 G/SiO₂/G 的沟道上方。最后, 通过电子束光刻与热蒸发工艺制备与石墨烯接触的 Cr/Au 电极(厚度分别为 10.0 和 50.0 nm), 完成器件制造。

1.3 表征

通过光学显微镜 (Olympus BX51) 观察 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 异质结的微观结构。采用原子力显微镜(AFM, Bruker Dimension FastScan)观察材料表面形貌并测量其厚度。在 WITec Alpha300 系统上测试

拉曼光谱, 激发波长为 532 nm。借助探针台(TTPX, Lakeshore)与半导体器件分析仪(B1500A)评估器件的光电性能。在光照测试中, 使用特定波长激光作为光源, 通过功率计(FieldMax-TO, Coherent)控制与校准激光强度。

2 结果与讨论

2.1 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 异质结的物相与结构表征

图 1(a)展示了采用电子束光刻与反应离子刻蚀技术制备的对称结构石墨烯电极, 其与化学气相沉积生长的 Bi₂O₂Se 形成界面接触, 共同构成 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 异质结场效应晶体管(具体制备流程参见 1.2 节)。图 1(b, c)分别展示了 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件的结构示意图和光学显微镜图像, 其中 Bi₂O₂Se 位于结构上层, Gr 作为基底, 源极和漏极电极分别连接至两侧的石墨烯上。AFM 测试显示, Bi₂O₂Se 和 Gr 的厚度分别约为 16.5 和 4.27 nm (图 1(d))。图 1(e)展示了在 532 nm 激光激发下 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 的拉曼光谱。低频区域位于 159 cm⁻¹ 处的峰归属于 Bi₂O₂Se 的面外 A_{1g} 振动模式^[21]。高频区域约 1582 cm⁻¹(G 带)和 2698 cm⁻¹(2D 带)为 Gr

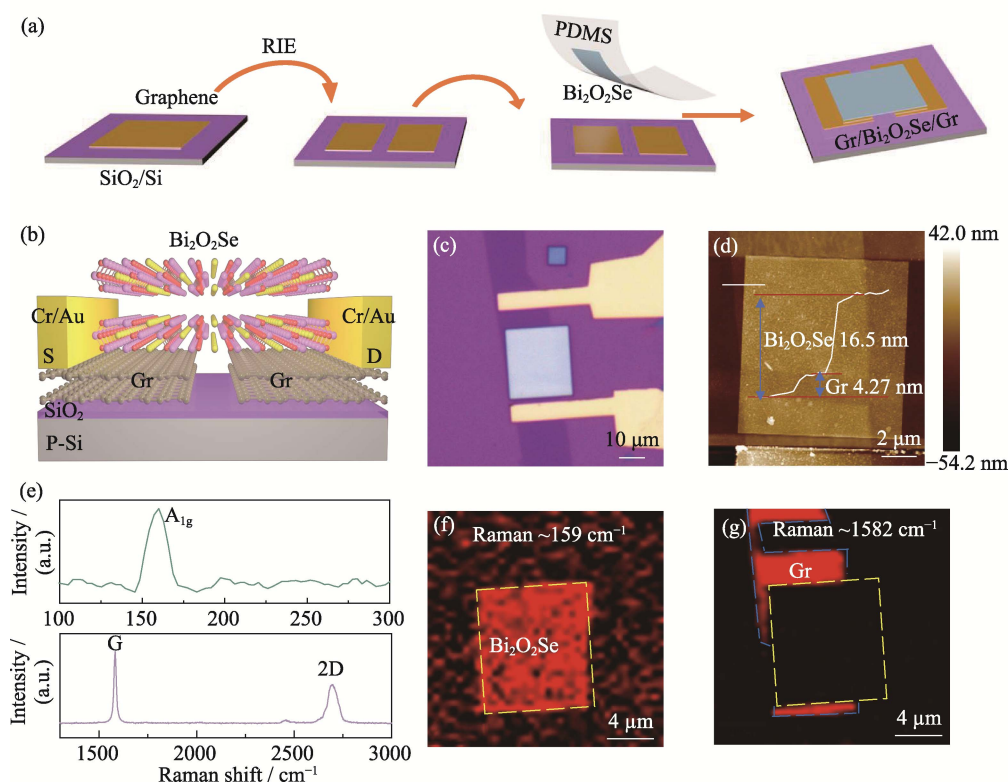


图 1 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件的结构与表征

Fig. 1 Characterization of Gr/Bi₂O₂Se/Gr bi-heterostructure device

(a) Schematic diagram of device fabrication; (b) Schematic diagram of the structure; (c) Optical microscope image; (d) AFM image and edge height profile; (e) Raman spectra; (f, g) Raman mapping images of (f) Bi₂O₂Se and (g) graphene

的特征峰^[22]。此外, Bi₂O₂Se 和 Gr 的拉曼成像均显示出各组成部分具有高度均匀性, 进一步证实了该异质结具有高质量的特性(图 1(f, g))。

2.2 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 的光探测性能与机理

为了深入理解器件的电学行为, 首先对 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件进行了系统测试。图 2(a)展示了器件的输出特性曲线, 随着栅压从 -60.0 V 增至 +60.0 V, 电流显著上升并趋于饱和。图 2(b)展示了器件在线性坐标系和对数坐标系下的转移特性曲线, 沟道电流随栅压变化呈现显著的栅控效应: 在负向栅压区域电流水平较低, 随着栅压正向增大, 载流子浓度显著提高, 沟道电流呈现数量级增长。这种变化趋势与输出特性曲线具有良好的一致性, 表明该材料具备典型的 n 型半导体特征, 且开关比接近 10²。在 532 nm 光照下, 器件表现出明显的光电响应特性。图 2(c)展示了器件在不同光功率密度下的电流-时间(*I*-*t*)曲线, 随着入射光功率密度增加, 材料中产生的光生载流子数量增多, 光电流也相应增加, 说明 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件具备优异的光探测能力, 能够有效地将光信号转化为电信号。为揭示光电流产生的内在机制, 提取光电流(*I*_{ph}, 即光照下的器件电流减去暗态下的器件电流)并分析其与入射光功率密度(*P*)的关系(图 2(d))。进一步, 采用幂律 *I*_{ph} ∝ *P*^α 进行拟合^[23-24]。理论上, 功率因子 α=1 表明光电导效应(本征载流子的快速生成和输运)起主导作用; 而 α=0 则意味着光电流主要由光门控效应(陷阱态调制)主导^[24]。本研究拟合得到 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件的 α=0.74, 表明其光电流来源于光电导效应与光门控效应的共同贡献。具体而言, 异质结的内建电场促进光生载流子的快速分离与输运, 形成了快速的本征光电导响应; 而界面存在的缺陷态、杂质能级等陷阱对载流子俘获与释放则产生持续调制沟道电导的等效栅压, 即光门控效应^[25-26]。为了定量解析两种机制的贡献比例, 对光电流的瞬态响应曲线进行了双指数函数拟合^[12, 27]。

$$y = y_0 + k_1 e^{-\frac{x}{t_1}} + k_2 e^{-\frac{x}{t_2}} \quad (1)$$

其中, *y* 为实时光电流, *x* 为响应时间, *y*₀ 为稳态暗电流, *k*₁ 和 *t*₁ 分别代表快过程(光电导效应)的振幅和时间常数, *k*₂ 和 *t*₂ 则分别代表慢过程(光门控效应)的振幅和时间常数。如图 3 所示, 随着入射光功率的增加, 快过程相对贡献呈现上升趋势。这是因为器件中可供填充的陷阱态密度有限, 光门控效应在较低光强下趋于饱和; 而自由载流子的生成则随光强增

加持续增强。因此, 低光强下器件的高响应度主要由高增益的光门控效应主导; 而高光强下的响应则逐渐转向由速度更快的本征光电导效应主导。

响应度(*R*)和探测率(*D*^{*})是评估光探测性能的关键指标, 计算公式如下^[28-29]:

$$R = \frac{I_{ph}}{PS} \quad (2)$$

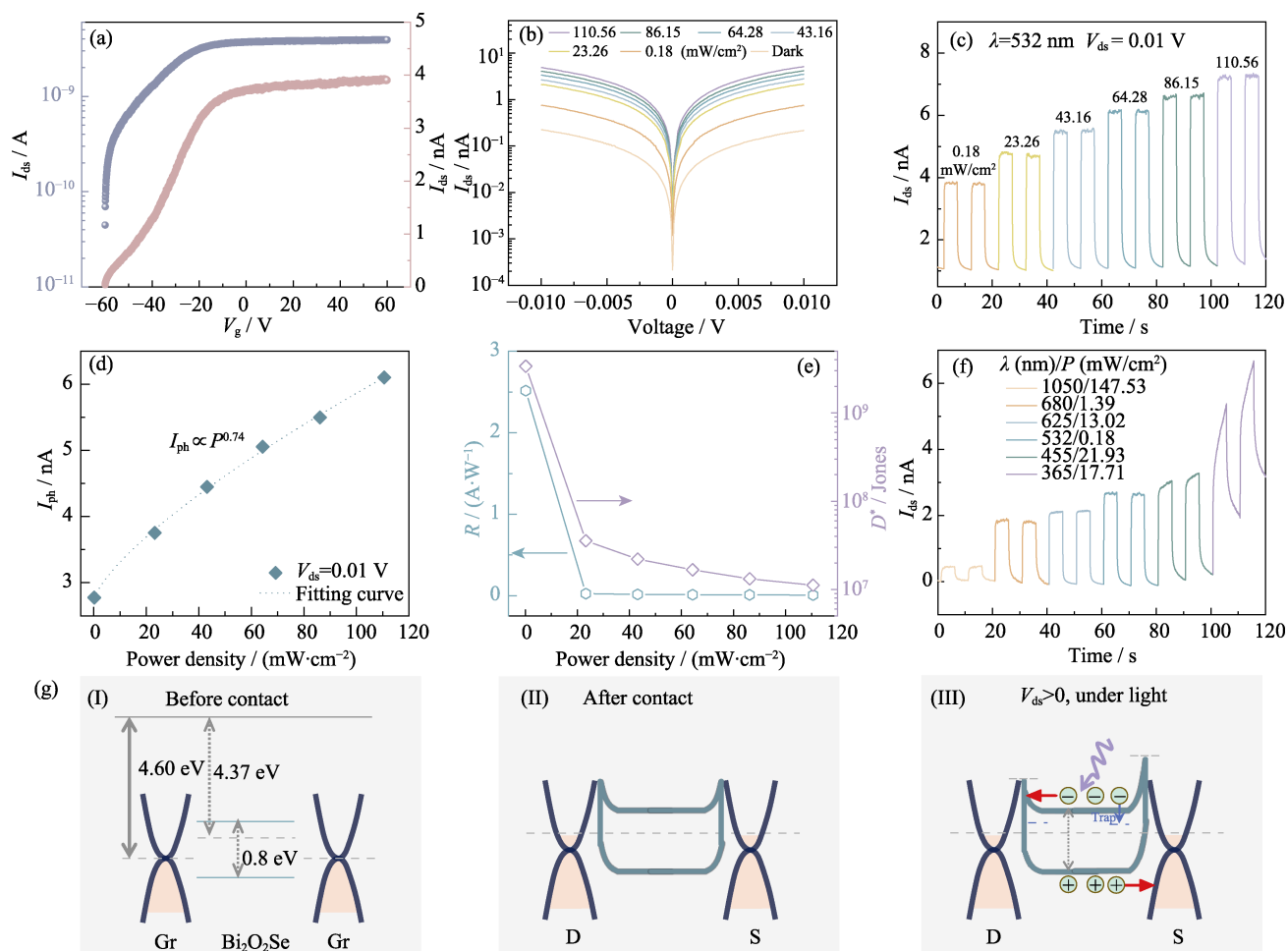
$$D^* = \frac{\frac{1}{RS^2}}{\frac{1}{(2eI_d)^2}} \quad (3)$$

其中, *P* 为入射光功率密度, *S* 为探测器的有效吸光面积, *I*_d 为器件在暗态下的电流^[30]。图 2(e)显示了 Bi₂O₂Se 器件在不同光功率密度下的响应度和探测率。在 0.176 mW/cm² 的弱光照射条件下, 该探测器的响应度为 2.52 A/W, 探测率达 3.39×10⁹ Jones, 表现出良好的弱光探测能力。图 2(f)展示了器件在 0.01 V 偏压、不同波长(紫外(365 nm)、可见光(455、532、625 及 680 nm)至近红外(1050 nm))光照下的实时光响应特性。实验采用 10 s 光照/10 s 暗态的周期性光照模式。结果表明, 该器件在紫外-可见-近红外宽波段均具有明显的光响应特性。

根据文献报道, 石墨烯与 Bi₂O₂Se 的功函数分别为 4.60 和 4.37 eV^[31], Bi₂O₂Se 的带隙约为 0.8 eV^[32]。基于此, 绘制接触前的能带示意图(图 2(g))。接触后因初始费米能级存在差异, 界面会发生显著的电荷重排, 电子从高费米能级的 Bi₂O₂Se 向低费米能级的石墨烯迁移, 直到二者费米能级完全对齐, 此时界面处形成对称分布的内建电场并引起能带弯曲。在光照下施加正的源漏电压, 能带弯曲方向偏向漏极。在此情况下, 漏极侧允许电子注入, 而 Bi₂O₂Se 导带底处光生电子-空穴对分离, 产生的大量电子向漏极侧移动。与此同时, 部分光生电子被异质结界面处的缺陷态捕获而产生局域电场, 进一步调制沟道电导, 贡献光门控效应。同时, 源极处的高势垒会阻碍空穴注入^[33-34]。值得注意的是, 在 365 nm 光照射下, Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件表现出缓慢的恢复特性与明显的弛豫行为, 与生物突触行为极为相似。因此, 后续着重探究该器件在 365 nm 光照射下的光突触特性。

2.3 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 的光学突触性能

图 4(a, b)分别展示了生物突触和 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 光突触双异质结器件的示意图。在该器件中, 光信号模拟突触的前端信号, 而光电流则对应突触后端信号。如图 4(c)所示, 当对 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件施加脉宽 0.2 s、功率密度 73.60 mW/cm² 的光脉冲时,

图 2 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件的性能Fig. 2 Performance of Gr/Bi₂O₂Se/Gr bi-heterojunction device

(a) Output characteristic curves; (b) Transfer characteristic curves; (c) Photocurrent *versus* light power density curves; (d) Relationship curve between photocurrent and power density; (e) Responsivity and detectivity; (f) Transient current responses under different illumination wavelengths; (g) Schematic diagrams of the energy bands. Colorful figures are available on website

电流迅速上升至 6.91 nA, 这是由于光照射到材料上, 光子能量被吸收后, 价带电子跃迁到导带, 产生电子-空穴对; 同时, 部分光生载流子被材料中的缺陷态捕获。光照结束后, 被捕获载流子缓慢释放, 导致光电流呈指数衰减特征^[35]。这种独特的弛豫行为与生物神经系统中兴奋性突触后电流(EPSC)的变化极为相似, 表明该器件不仅能够模拟神经突触的信号传递过程, 还具备信息存储能力^[35]。本研究还测试了不同光功率密度对突触可塑性的调节作用(图 4(d)), 随着光功率密度从 8.25 mW/cm² 增加至 90.64 mW/cm², EPSC 从 3.83 nA 增加至 8.41 nA, 并且电流的弛豫时间也随之延长, 该现象成功模拟了生物突触的光强依赖性响应机制。如图 4(e)所示, 在固定光功率密度(73.60 mW/cm²)条件下, 分别对器件施加 0.1、0.5、1.0、5.0 和 10.0 s 的光脉冲。随着脉宽的增加, EPSC 相应增大。当脉宽从 0.1 s 延长至 10.0 s 时, EPSC 由 6.25 nA 增加至 19.44 nA, 表现

出明显的脉宽依赖性。

图 5(a)显示了在不同频率(0.05~0.5 Hz)光脉冲照射下光电流的衰减行为。结果表明, 延长光脉冲持续时间或提高刺激频率均可有效地延长器件的记忆保持时间, 并诱导器件从短期可塑性(Short-term plasticity, STP)向长期可塑性(Long-term plasticity, LTP)转变^[36]。除了上述参数外, 本研究还考察了光脉冲数量对突触可塑性的影响规律(图 5(b))。随着对器件施加的光脉冲刺激次数从 3 次增加到 20 次, 器件的 EPSC 幅值由 11.57 nA 上升至 18.71 nA, 展现出典型的脉冲数量依赖性。综上, 通过调节光脉冲光照强度、光脉冲宽度、光脉冲频率及光脉冲次数均可实现 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件从 STP 到 LTP 的转换。图 5(c)显示了器件在单次和 25 次光脉冲刺激下的长时记忆效应。在这一过程中, 器件的电阻态持续发生变化, 体现了神经突触可塑性。与单次光脉冲刺激情况相比, 经 25 次脉冲刺激后, 器件表现

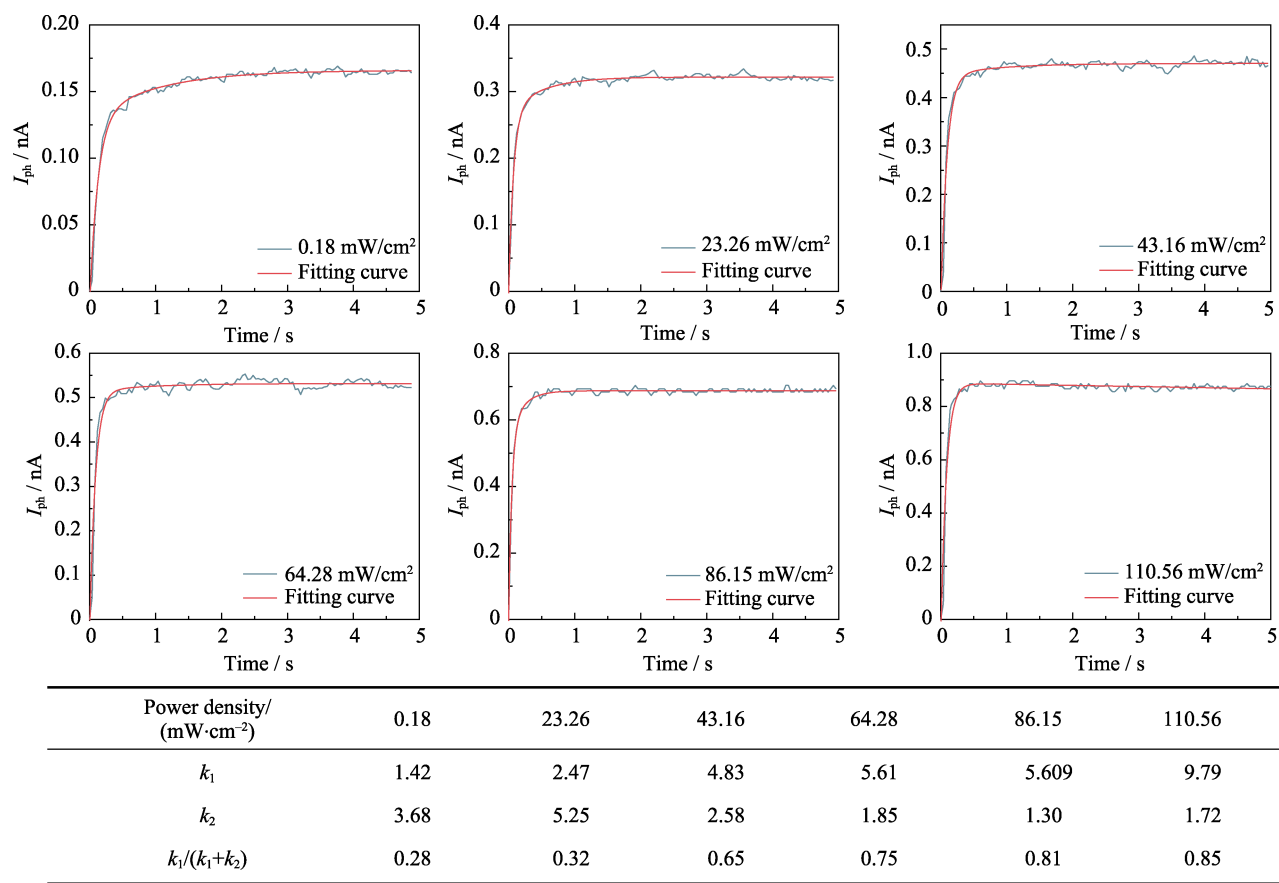


图 3 不同光功率密度下的光电流瞬态响应曲线及拟合曲线

Fig. 3 Light current transient response curves and fitting curves under different light power densities
Colorful figures are available on website

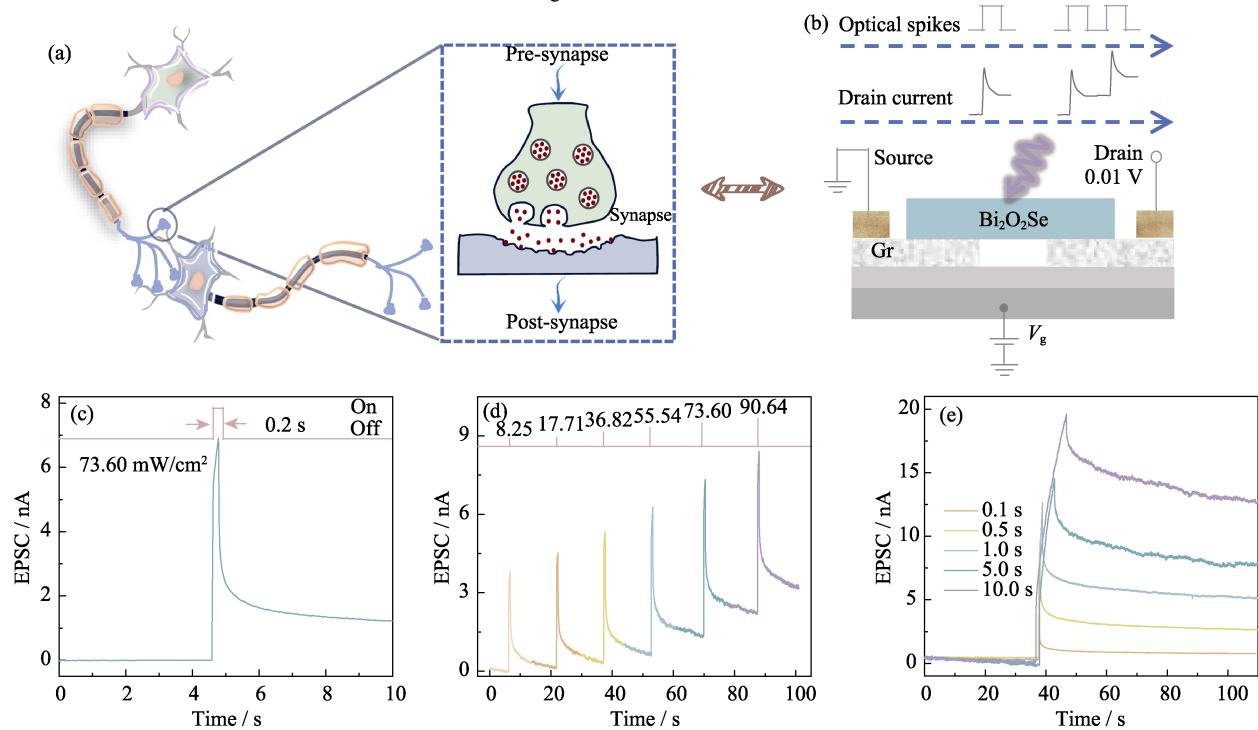
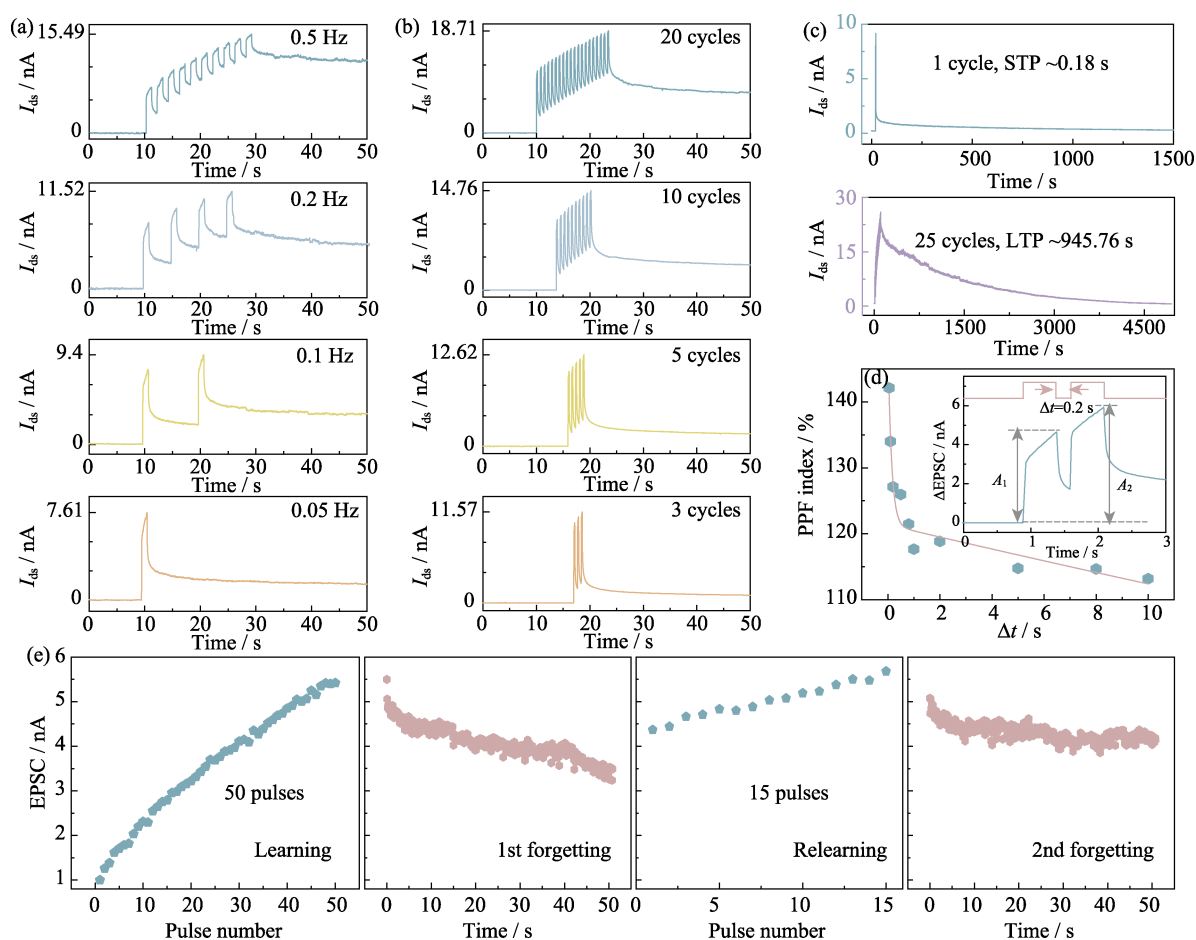


图 4 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件的光调控突触特性

Fig. 4 Light-regulated synaptic performance of Gr/Bi₂O₂Se/Gr bi-heterojunction device

(a) Schematic diagram of a biological synapse; (b) Schematic diagram of the device working principle; (c) EPSC response of the device under one light pulse; (d) Light intensity dependent EPSC response; (e) EPSC responses under different light pulse durations

图 5 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件的突触可塑性Fig. 5 Synaptic plasticity of Gr/Bi₂O₂Se/Gr bi-heterojunction device

(a) EPSC responses of the device under different light pulse frequencies; (b) Transition from short-term plasticity to long-term plasticity with the increase of light pulse number; (c) Photocurrent decay characteristics; (d) Relationship between paired-pulse facilitation (PPF) index and inter-pulse interval (Δt), with inset showing the excitatory postsynaptic current triggered by a pair of light pulses with a duration of 0.5 s and an interval of 0.2 s; (e) “Learning-forgetting-relearning” behavior of the device

出长时间的电流衰减现象, 并且电流衰减时间随光脉冲增加而延长。测试表明, 该器件在单次脉冲刺激下的记忆保持时间为 1500 s, 而在 25 次脉冲刺激下的记忆保持时间延长至 5000 s, 体现出卓越的记忆性能。

双脉冲易化(Paired-pulse facilitation, PPF)作为 STP 的关键体现形式, 在神经态器件研究中占据重要地位^[37-38]。本研究中的 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 光电突触器件在双脉冲光刺激下(脉宽 500.0 ms, 脉冲间隔 200.0 ms, 光功率密度 73.60 mW/cm²)展现出典型的 PPF 特性。实验数据显示, 第一个光脉冲引发 4.65 nA 的突触后电流(A_1), 而第二个光脉冲则产生显著增强的电流响应(A_2 , 5.91 nA)。这种电流增强现象源于 Bi₂O₂Se 材料的独特载流子动力学: 首个光脉冲激发产生的光生电子被材料本体以及石墨烯界面处的缺陷态捕获, 在 200.0 ms 的脉冲间隔内未能完全释放; 当次脉冲到达时, 其与新激发电子产生叠加效

应^[39], 使得载流子浓度增加, 从而实现类似生物突触的 STP 调控。图 5(d)直观展示了这种由缺陷介导的电荷存储机制对该光电突触行为的调控作用。脉冲间隔越短, 第二个脉冲诱导的突触后电流相较于第一个脉冲诱导的电流增加越显著, PPF (PPF = $A_2/A_1 \times 100\%$)指数越大。

本研究还利用 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 光电器件实现了对人类神经系统“学习-遗忘-再学习”行为的仿生模拟(图 5(e))。实验采用光脉冲(脉冲宽度 100.0 ms, 光功率密度 17.71 mW/cm²)作为模拟神经刺激信号, 在首次学习阶段, 施加 50 个连续光脉冲, 器件的 EPSC 从初始的 1.00 nA 显著提升至 5.40 nA, 这一动态变化过程再现了记忆形成与巩固的神经机制。随后 50.0 s 无刺激阶段中, EPSC 自然衰减至 3.23 nA, 模拟了记忆的自然遗忘过程。而在再学习阶段, 仅需 15 个光脉冲刺激即可使 EPSC 迅速恢复至首次学习所达到的峰值水平, 体现了经验依赖的高效学习

特性, 与人类“温故知新”的认知规律高度相符。

Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件呈现出与生物突触紧密相关的可靠性。在长期稳定性方面, 器件在 25 次脉冲激励后(图 6(a)), 被增强的光电流状态可稳定保持 4600 s, 展现出对长时程记忆的非易失性特征, 而电流最终回到初始值, 表明由界面陷阱态调制的电荷俘获/释放过程的高度可逆性, 器件具备长期循环使用的能力。在循环耐受性方面(图 6(b)), 在 128 次连续光脉冲(波长 365 nm, 光功率密度 73.60 mW/cm², 持续时间 0.2 s, 间隔时间 0.5 s)刺激

下, 器件的输出光电流随着循环次数增加持续稳定上升, 成功模拟了生物突触在重复刺激下长时程增强的学习行为, 表明其模拟突触可塑性的高度重复性。综上, 该光突触器件具备构建人工神经网络所需的循环耐受性和长期稳定性。

本研究对脉冲间隔在 0.05~10.00 s 范围内的 EPSC 进行了系统测试(图 7)。当脉冲间隔(Δt)从 0.05 s 增加到 10.0 s, PPF 指数从 142.1%降低至 112.6%。此外, 通过公式(4)对光刺激突触晶体管的 PPF 指数进行拟合^[40]:

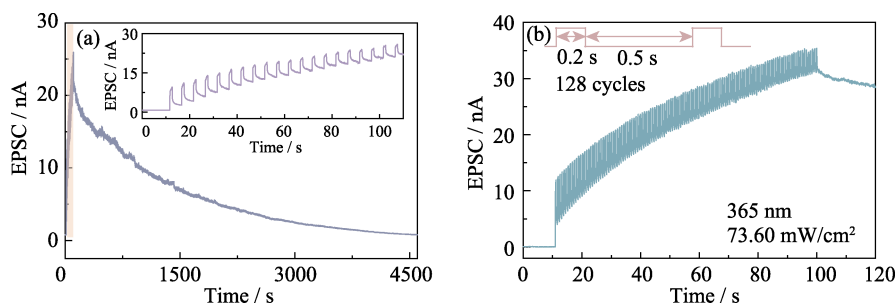


图 6 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件在(a) 25 次光脉冲和(b) 128 次光脉冲后的保持性能
Fig. 6 Retention behavior of Gr/Bi₂O₂Se/Gr device after (a) 25 and (b) 128 light pulses

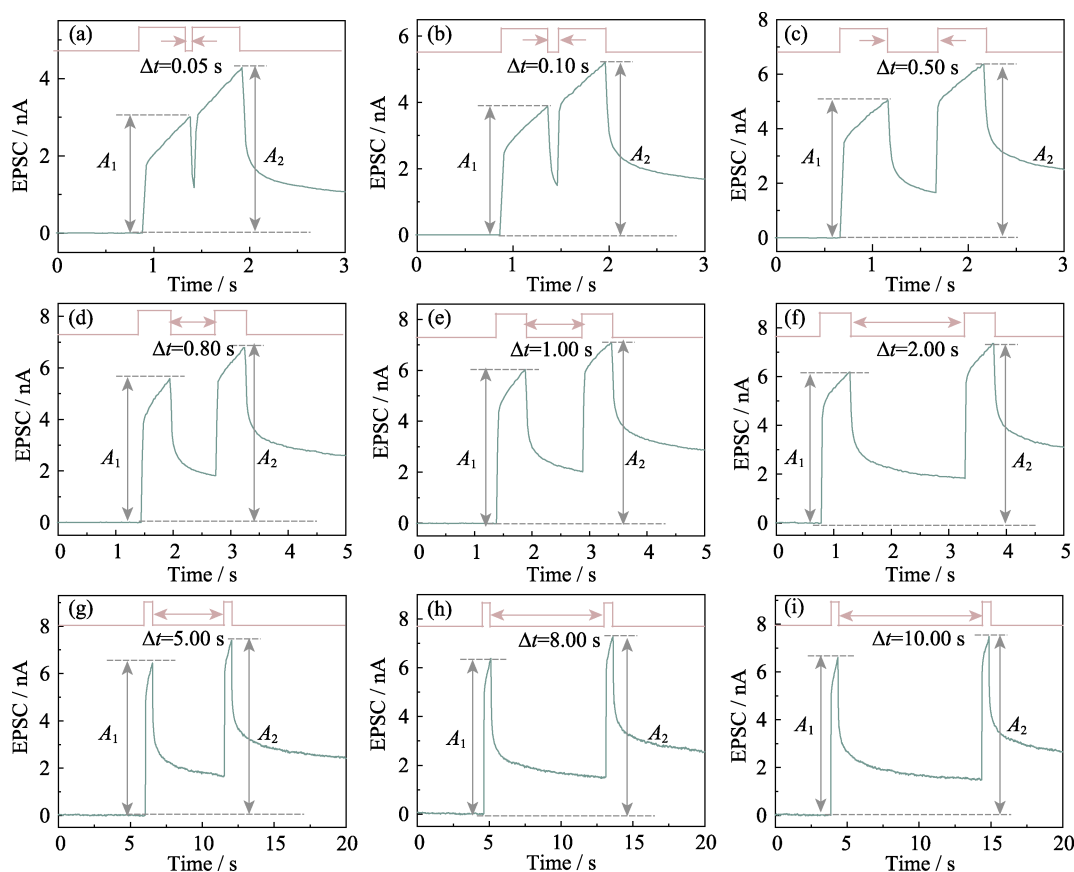


图 7 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件的 PPF 行为模拟

Fig. 7 Stimulated PPF behavior of Gr/Bi₂O₂Se/Gr bi-heterojunction device

A pair of light stimuli with a duration of 0.50 s and inter-pulse intervals of (a) 0.05, (b) 0.10, (c) 0.50, (d) 0.80, (e) 1.00, (f) 2.00, (g) 5.00, (h) 8.00 and (i) 10.00 s

表 1 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件与已报道光突触的性能参数对比

Table 1 Properties comparison between the Gr/Bi₂O₂Se/Gr device and other reported synapse

Device	Voltage/V	Wavelength/nm	EPSC/nA	PPF/%	Ref.
MoS ₂ /h-BN/ α -In ₂ Se ₃	1	405	0.3	240	[42]
MoS ₂ /SnSe ₂	1	400	0.3	1.25	[43]
Bi ₂ O ₂ Se-V _{se}	0	532	0.3	133	[44]
c-PtTe ₂ /PtSe ₂	1	625	15	1.25	[45]
Te/SnS ₂	2	532	0.1	187	[46]
p-WSe ₂ /n-Ta ₂ NiS ₅	-1	1064	0.01	23	[47]
Ph-BTBT-10 2DMC	-1	365	0.15	248	[48]
Gr/Bi ₂ O ₂ Se/Gr	0.01	365	6.91	142.1	This work

$$PPF = C_1 e^{\frac{-\Delta t}{\tau_1}} + C_2 e^{\frac{-\Delta t}{\tau_2}} \tag{4}$$

其中, C₁ 和 C₂ 分别代表快速和慢速成分的初始易化幅度, 而 τ_1 和 τ_2 则表示这些成分的弛豫时间。经过拟合得到 C₁、C₂、 τ_1 和 τ_2 分别为 2.8%、121%、0.14 s 和 130.3 s, 这一结果表明 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件在模拟生物突触方面具有显著效果^[41]。表 1 对比了 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件与已报道器件的操作电压、EPSC 及 PPF 等关键性能指标, 表明 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 器件在神经形态系统中具有应用潜力。

3 结论

本研究利用化学气相沉积工艺生长了高质量二维 Bi₂O₂Se, 并以对称石墨烯作为电极构建了 Gr/Bi₂O₂Se/Gr 双异质结器件, 系统研究了其光探测和突触仿生性能。研究表明, 在 532 nm 光照下, 器件展现出良好的响应度 (2.52 A/W) 和探测率 (3.39×10⁹ Jones), 且在 365~1050 nm 的宽光谱区间保持稳定的光响应特性。在 365 nm 光激发下, 该器件成功实现了从 STP 到 LTP 的转变, 并模仿了生物突触的多项基本功能。此外, 器件复现了“经验学习”这一高级神经活动特征, 有力证实了其在神经形态计算领域具备广阔的应用前景。

参考文献:

[1] NOVOSELOV K S, GEIM A K, MOROZOV S V, *et al.* Electric field effect in atomically thin carbon films. *Science*, 2004, **306**(5696): 666.

[2] KIM K S, KWON J, RYU H, *et al.* The future of two-dimensional semiconductors beyond Moore's law. *Nature Nanotechnology*, 2024, **19**(7): 895.

[3] AKINWANDE D, HUYGHEBAERT C, WANG C H, *et al.* Graphene and two-dimensional materials for silicon technology. *Nature*, 2019, **573**(7775): 507.

[4] XING R, ZHANG X, FAN X, *et al.* Coupling strategies of

multi-physical fields in 2D materials-based photodetectors. *Advanced Materials*, 2025, **37**(16): 2501833.

[5] BA K, WANG J L, HAN M K. Perspectives for infrared properties and applications of MXene. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(2): 162.

[6] WANG S, LIU X, XU M, *et al.* Two-dimensional devices and integration towards the silicon lines. *Nature Materials*, 2022, **21**(11): 1225.

[7] DAS S, SEBASTIAN A, POP E, *et al.* Transistors based on two-dimensional materials for future integrated circuits. *Nature Electronics*, 2021, **4**(11): 786.

[8] LIU Y, DUAN X, SHIN H J, *et al.* Promises and prospects of two-dimensional transistors. *Nature*, 2021, **591**(7848): 43.

[9] TAN C, YU M, TANG J, *et al.* 2D fin field-effect transistors integrated with epitaxial high-*k* gate oxide. *Nature*, 2023, **616**(7955): 66.

[10] WYSS K M, LUONG D X, TOUR J M. Large-scale syntheses of 2D materials: flash joule heating and other methods. *Advanced Materials*, 2022, **34**(8): 2106970.

[11] LI L, SHEN G Z. 2D MXenes based flexible photodetectors: progress and prospects. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(2): 186.

[12] LI S, LIU X, YANG H, *et al.* Two-dimensional perovskite oxide as a photoactive high- κ gate dielectric. *Nature Electronics*, 2024, **7**(3): 216.

[13] ZHANG Q, HOU L, SHAUTSOVA V, *et al.* Ultrathin all-2D lateral diodes using top and bottom contacted laterally spaced graphene electrodes to WS₂ semiconductor monolayers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2023, **15**(14): 18012.

[14] TAN C, YIN S, CHEN J, *et al.* Broken-gap PtS₂/WSe₂ van der Waals heterojunction with ultrahigh reverse rectification and fast photoresponse. *ACS Nano*, 2021, **15**(5): 8328.

[15] WU F, XIA H, SUN H, *et al.* AsP/InSe van der Waals tunneling heterojunctions with ultrahigh reverse rectification ratio and high photosensitivity. *Advanced Functional Materials*, 2019, **29**(12): 1900314.

[16] LIU X, QU D, LI H M, *et al.* Modulation of quantum tunneling via a vertical two-dimensional black phosphorus and molybdenum disulfide p-n junction. *ACS Nano*, 2017, **11**(9): 9143.

[17] LI J, WANG Z, WEN Y, *et al.* High-performance near-infrared photodetector based on ultrathin Bi₂O₂Se nanosheets. *Advanced Functional Materials*, 2018, **28**(10): 1706437.

[18] WANG W, MENG Y, ZHANG Y, *et al.* High electron mobility and quantum oscillations in non-encapsulated ultrathin semiconducting Bi₂O₂Se. *Nature Nanotechnology*, 2017, **12**: 530.

[19] YIN J, TAN Z, HONG H, *et al.* Ultrafast and highly sensitive infrared photodetectors based on two-dimensional oxyselenide

- crystals. *Nature Communications*, 2018, **9**: 3311.
- [20] ZHANG Z, LI T, WU Y, *et al.* Truly concomitant and independently expressed short-and long-term plasticity in a Bi₂O₂Se-based three-terminal memristor. *Advanced Materials*, 2019, **31**(3): 1805769.
- [21] LUO P, ZHUGE F, WANG F, *et al.* PbSe quantum dots sensitized high-mobility Bi₂O₂Se nanosheets for high-performance and broadband photodetection beyond 2 μ m. *ACS Nano*, 2019, **13**(8): 9028.
- [22] FAKIH I, DURNAN O, MAHVASH F, *et al.* Selective ion sensing with high resolution large area graphene field effect transistor arrays. *Nature Communications*, 2020, **11**: 3226.
- [23] WANG W, MENG Y, WANG W, *et al.* Highly efficient full van der Waals 1D p-Te/2D n-Bi₂O₂Se heterodiodes with nanoscale ultra-photosensitive channels. *Advanced Functional Materials*, 2022, **32**(30): 2203003.
- [24] LIU W, LV J, PENG L, *et al.* Graphene charge-injection photodetectors. *Nature Electronics*, 2022, **5**(5): 281.
- [25] SHIN J, YOO H. Photogating effect-driven photodetectors and their emerging applications. *Nanomaterials*, 2023, **13**(5): 882.
- [26] TSAI T H, LIANG Z Y, LIN Y C, *et al.* Photogating WS₂ photodetectors using embedded WSe₂ charge puddles. *ACS nano*, 2020, **14**(4): 4559.
- [27] 张世斌, 孔光前, 徐艳月, 等. 微量硼掺杂非晶硅的瞬态光电导衰退及其光致变化. *物理学报*, 2002, **51**(1): 111.
- [28] HAN J, FANG C, YU M, *et al.* A high-performance Schottky photodiode with asymmetric metal contacts constructed on 2D Bi₂O₂Se. *Advanced Electronic Materials*, 2022, **8**(7): 2100987.
- [29] LIU J, HAO Q, GAN H, *et al.* Selectively modulated photoresponse in type-I heterojunction for ultrasensitive self-powered photodetectors. *Laser & Photonics Reviews*, 2022, **16**(11): 2200338.
- [30] YANG J L, WANG L J, RUAN S Y, *et al.* Highly weak-light sensitive and dual-band switchable photodetector based on CuI/Si unilateral heterojunction. *Journal of Inorganic Materials*, 2024, **39**(9): 1063.
- [31] LIU C H, CHANG Y C, NORRIS T B, *et al.* Graphene photodetectors with ultra-broadband and high responsivity at room temperature. *Nature nanotechnology*, 2014, **9**(4): 273.
- [32] SUN L, XU Y, HUO G, *et al.* Multifunctional neuromorphic optoelectronic computing using all 2D floating-gate transistors. *Nano Energy*, 2025, **143**: 111311.
- [33] GAO W, ZHANG S, ZHANG F, *et al.* 2D WS₂ based asymmetric Schottky photodetector with high performance. *Advanced Electronic Materials*, 2021, **7**(7): 2000964.
- [34] CHEN J, ZHANG Z, FENG J, *et al.* 2D InSe self-powered Schottky photodetector with the same metal in asymmetric contacts. *Advanced Materials Interfaces*, 2022, **9**(35): 2200075.
- [35] HUANG W, HANG P, WANG Y, *et al.* Zero-power optoelectronic synaptic devices. *Nano Energy*, 2020, **73**: 104790.
- [36] HAO Z, WANG H, JIANG S, *et al.* Retina-inspired self-powered artificial optoelectronic synapses with selective detection in organic asymmetric heterojunctions. *Advanced Science*, 2022, **9**(7): 2103494.
- [37] WANG J Y, WAN C J, WAN Q. Dual-gate IGZO-based neuromorphic transistors with stacked Al₂O₃/chitosan gate dielectrics. *Journal of Inorganic Materials*, 2023, **38**(4): 445.
- [38] WANG X, ZONG Y, LIU D, *et al.* Advanced optoelectronic devices for neuromorphic analog based on low-dimensional semiconductors. *Advanced Functional Materials*, 2023, **33**(15): 2213894.
- [39] ZHANG H S, DONG X M, ZHANG Z C, *et al.* Co-assembled perylene/graphene oxide photosensitive heterobilayer for efficient neuromorphics. *Nature Communications*, 2022, **13**: 4996.
- [40] WANG W X, GAO S, LI Y, *et al.* Artificial optoelectronic synapses based on TiN_xO_{2-x}/MoS₂ heterojunction for neuromorphic computing and visual system. *Advanced Functional Materials*, 2021, **31**(34): 2101201.
- [41] HUANG W, HANG P, XIA X, *et al.* Two-terminal self-rectifying optoelectronic synaptic devices with largest-dynamic-range updates. *Applied Materials Today*, 2023, **30**: 101728.
- [42] HE J, CHEN K, HUANG C, *et al.* Explicit gain equations for single crystalline photoconductors. *ACS Nano*, 2020, **14**(3): 3405.
- [43] LI X, CHEN F, WANG X, *et al.* Emulation of optical and electrical synaptic functions in MoS₂/SnSe₂ van der Waals heterojunction memtransistors. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2024, **63**(5): 056502.
- [44] REN X, HE X, DUAN Z, *et al.* Self-powered and broadband optical synapse device based on Se-vacancy Bi₂O₂Se for artificial vision system application. *ACS Photonics*, 2024, **11**(11): 4990.
- [45] HAN S S, SHIN J C, GHANIPOUR A, *et al.* High mobility transistors and flexible optical synapses enabled by wafer-scale chemical transformation of Pt-based 2D layers. *ACS Applied Materials & Interfaces*, 2024, **16**(28): 36599.
- [46] ZHANG Y, TANG Y, LIU K, *et al.* Optoelectronic synapse based on Te/SnS₂ heterostructure with integrated sensing-memory-computing for neuromorphic visual system. *Advanced Optical Materials*, 2025, **13**(26): e01371.
- [47] HOU P, TAN S, ZHENG S. Design and implementation of an infrared artificial visual neural synapse based on a p-WSe₂/n-Ta₂NiS₅ van der Waals heterojunction. *Journal of Materials Chemistry C*, 2024, **12**(41): 16722.
- [48] DONG M, ZHANG Y, ZHU J, *et al.* All-in-one 2D molecular crystal optoelectronic synapse for polarization-sensitive neuromorphic visual system. *Advanced Materials*, 2024, **36**(40): 2409550.