

文章编号: 1000-7032(2026)06-0909-26

氮化物光电类脑神经形态器件

赵建璐^{1,2}, 吴云飞², 胡令祥², 刘威², 卢焕明²,
叶志镇^{3,4}, 诸葛飞^{2,4,5,6*}

(1. 宁波大学材料科学与化学工程学院, 浙江宁波 315211;

2. 中国科学院宁波材料技术与工程研究所, 浙江宁波 315201;

3. 浙江大学材料科学与工程学院, 硅及先进半导体材料全国重点实验室, 浙江杭州 310027;

4. 浙江大学温州研究院, 浙江温州 325006;

5. 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031;

6. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100029)

摘要: 受生物大脑启发的神经形态计算是突破传统冯·诺依曼计算架构存算分离瓶颈的理想途径。其中, 融合光与电信号优势的光电神经形态器件, 因其具备高速、低串扰及感存算一体的潜力而备受瞩目。以氮化硼、氮化镓、氮化铝及其合金为代表的氮化物半导体, 带隙可调范围宽以及光电特性优异, 为构建高性能光电神经形态器件提供了理想的材料平台。本文系统阐述了氮化物光电神经形态器件的最新进展及其应用。首先, 介绍了生物神经元与突触, 接着分别从器件结构、工作机制、神经形态功能模拟等方面, 深入分析了氮化物人工突触和人工神经元器件。随后, 探讨了该类器件在人工视觉、逻辑运算、生物医疗等领域的应用前景。最后, 讨论了该领域在材料、器件、大规模集成等方面面临的挑战, 并对未来发展方向, 如多模态融合感知与异质集成进行了展望。本文旨在理清氮化物光电类脑器件的发展脉络, 为推动下一代高效、高速智能计算硬件的研发提供参考。

关键词: 类脑神经形态器件; 光电器件; 人工突触; 人工神经元; 氮化物

中图分类号: O472

文献标识码: A

DOI: 10. 37188/CJL. 20260057

CSTR: 32170. 14. CJL. 20260057

Nitride Optoelectronic Brain-inspired Neuromorphic Devices

ZHAO Jianlu^{1,2}, WU Yunfei², HU Lingxiang², LIU Wei², LU Huanming²,
YE Zhizhen^{3,4}, ZHUGE Fei^{2,4,5,6*}

(1. School of Materials Science and Chemical Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China;

2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China;

3. State Key Laboratory of Silicon and Advanced Semiconductor Materials, School of Materials Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China;

4. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325006, China;

5. Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China;

6. School of Materials Science and Optoelectronic Technology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

* Corresponding Author, E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn

Abstract: To address the increasingly severe challenge of the separation of memory and processor modules in the era of artificial intelligence, neuromorphic computing inspired by the biological brain has emerged as an ideal approach to break through the bottleneck of the traditional von Neumann architecture. Optoelectronic devices that

收稿日期: 2026-02-17; 修订日期: 2026-02-26

基金项目: 国家自然科学基金(62304228, U25A20498); 浙江省自然科学基金(LD25F040006); 宁波市科创甬江2035重点研发计划项目(2025Z086)

Supported by National Natural Science Foundation of China (62304228, U25A20498); Zhejiang Provincial Natural Science Foundation of China (LD25F040006); Ningbo Municipal Science and Technology Innovation Yongjiang 2035 Key R&D Plan (2025Z086)

integrate the advantages of light and electrical signals have attracted much attention due to their potential for high speed, low crosstalk, and integration of sensing, storage, and computing. Nitride semiconductors represented by boron nitride, gallium nitride, aluminum nitride, and their alloys provide an ideal material platform for building high-performance optoelectronic devices due to their wide tuning range of band gap and excellent optoelectronic properties. This review systematically presents the latest progress and applications of nitride optoelectronic neuromorphic devices. Firstly, the biological neurons and synapses were introduced. Then, from aspects such as device structure, working mechanism, and neural morphological function simulation, the nitride-based artificial synapses and artificial neuron devices were analyzed in depth. Next, the application prospects of these devices were explored in fields such as artificial vision, logical operations and biomedicine. Finally, the challenges in materials, devices, and large-scale integration were discussed, and future development directions, such as multimodal fusion perception and heterogeneous integration, were prospected. This work aims to clarify the development trajectory of nitride optoelectronic neuromorphic devices and provide a reference for developing the next-generation high-efficiency, and high-speed intelligent computing hardware.

Keywords: brain-inspired neuromorphic devices; optoelectronic devices; artificial synapses; artificial neurons; nitrides

1 引 言

人工智能的飞速发展正以前所未有的力度驱动着社会变革,其对算力与能效的需求呈现指数级增长。然而,以处理器与存储器分离为特征的经典冯·诺依曼计算系统遇到了速度和能耗等瓶颈,难以满足未来智能计算对实时性与能效的苛刻要求^[1-2]。人类的大脑相当于一台生物计算机,其功耗只有 20 W^[3]。受生物大脑启发的神经形态计算,凭借其存算一体、事件驱动与高度并行的核心特征,正成为突破冯·诺依曼架构瓶颈、推动下一代高效智能硬件发展的关键路径。

实现神经形态计算的核心在于构建能够模拟生物突触可塑性及神经元脉冲动力学的物理器件。自从 20 世纪 80 年代加州理工学院 Mead^[4]提出“神经形态”概念以来,该领域的研究主要沿着两大技术路径。一方面,基于成熟的互补金属氧化物半导体(Complementary metal oxide semiconductor, CMOS)技术,通过混合电路设计实现突触与神经元功能,已构建出功能完整、可编程性强的系统级芯片。然而,该路径在很大程度上依赖于晶体管逻辑门的堆叠来模拟神经功能,其能效与集成密度面临挑战。另一方面,新兴的非易失性存储器件,如忆阻器^[5-11]、记忆晶体管^[12]、磁阻器件^[13]、相变器件^[14]、铁电器件^[15]、自旋器件^[16]等,可以单器件模拟突触与神经元功能,与传统 CMOS 技术相比,这些器件在神经形态计算方面展现出功耗低、速度快、集成度高等优势。和电信号相比

较,光信号具有超高带宽、超低串扰、传输速度高,以及与通信波段天然兼容^[17-21]等特性。因此,发展光电融合的神经形态器件正成为该领域最具前瞻性的方向之一。

神经形态器件的发展涉及到各种功能材料的使用,包括金属氧化物(如 InGaZnO、ZnO、HfO_x、TaO_x 和 TiO_x)^[22-30]、氮化物(BN、GaN、SiN_x 和 AlN)^[31-35]、钙钛矿型材料^[36]、过渡金属硫化物(如 MoS₂ 和 WS₂)^[37-38] 等。在众多候选材料中,氮化物因其优异的物理性能,在构建高性能光电神经形态器件方面展现出独特与不可替代的优势,包括带隙调控范围宽^[39-41](0.7~6.2 eV 连续可调)、电子迁移率高^[42](10²~10³ cm²·V⁻¹·s⁻¹)、导热系数高^[43](可达 400 W·m⁻¹·K⁻¹)、可抵抗恶劣环境(极端温度、辐射等),以及与 CMOS 工艺兼容性好等^[44-46]。其中,六方氮化硼(h-BN)凭借其超宽带隙、原子级平整表面、极低介电损耗及超高导热系数,不仅自身可作为低维材料与量子器件的理想平台,更在异质集成体系^[35, 47-48]中扮演着不可或缺的角色。其原子级平整且无悬挂键的惰性表面为在其上外延或转移集成其他功能材料提供了近乎完美的界面,能够最大限度地抑制载流子散射与电荷陷阱,保持异质结的本征输运特性。同时,h-BN 可作为高效的隧穿势垒层或电荷存储介质,在浮栅型突触器件中实现超低功耗的权重更新;其超高导热性则为高密度集成的异质结阵列提供了关键的热管理通道,有效抑制热串扰与性能退化。因此,h-BN 并非孤立的功能材料,而是作为连接氮化物半导体、

二维材料与量子功能体系的关键“胶黏剂”,通过构建高质量的范德华异质结或外延异质结构,可为实现高稳定、高集成度、多物理场融合的下一代神经形态芯片提供核心材料。Ga_N表现出高电子迁移率、压电特性以及可耐受 800 °C 高温的优异热稳定性^[19, 49-50]。以 AlGa_N/Ga_N 异质结^[51-52]为代表的材料体系具有极强的自发与压电极化效应,能在界面处诱导出高浓度、高迁移率的二维电子气(Two-dimensional electron gas, 2DEG),该导电沟道对光、电、应变乃至化学环境等多物理场刺激极为敏感,可以把感光、记忆、权重更新集成在同一沟道里,实现无需浮栅、两端驱动、单光子级能耗的光电突触功能。在 AlScN 中,钪元素引入可引发巨大的压电极化增强效应^[53-55],开启了铁电-光电-压电多物理场神经形态计算这一全新研究方向。考虑到氮化物材料中普遍存在的缺陷与陷阱态,若加以巧妙利用,可成为实现突触权重渐变调控的天然物理基础。这些特性使得氮化物器件能够将光感受、信号调制与神经形态功能融为一体,从而为实现光驱动、低功耗的类脑计算提供全新的材料解决方案。

近年来,基于氮化物的光电神经形态器件研究已取得一系列进展,成功实现了从光电突触到光电神经元的基本功能。然而,该领域的研究仍处于初期阶段,成果相对分散,缺乏从材料物理本质到器件功能实现,再到系统集成潜力的系统性梳理与展望。基于此,本综述旨在全面梳理氮化物光电神经形态器件的最新进展,理清其发展脉络与技术原理。本文将首先介绍生物神经元与突触的概念,阐述神经形态功能实现的物理基础;进

而系统综述光电突触与光电神经元器件的结构、工作原理以及性能表现;接着探讨其在人工视觉、逻辑运算和生物电信号识别等方面的应用前景;最后,深入分析当前面临的材料、器件与集成挑战,并对未来的发展方向进行展望。期望本文能为相关领域的研究者提供一个清晰蓝图,共同推动氮化物光电神经形态计算从实验室走向实际应用。

2 生物神经元与突触

神经形态计算的灵感直接源于对生物神经系统基本构成与运行原理的模仿。生物神经系统由海量的神经元通过突触相互连接而成,构成了一个高效、并行、感存算一体的信息处理网络。

生物神经元是神经系统的基本功能单元,结构如图 1 所示。其核心工作机制可概括为整合来自其他神经元的化学信号(神经递质),只要达到阈值,就会发放动作电位^[56-57]。神经元通过树突接收来自上游神经元、经由突触传递的化学信号,并将其转换为膜电位的变化。当这些时空分布的兴奋性或抑制性输入在胞体进行时空整合,使膜电位超过一个关键阈值时,神经元便会激发一个短暂、幅值固定的电脉冲,即动作电位,随后电脉冲传递至下一个神经元,完成神经元之间的信号传递。脉冲发放后,离子通道迅速关闭,膜电位不仅恢复至静息水平,甚至会短暂低于静息电位(超极化)。在此期间,神经元难以或无法再次发放,确保脉冲是离散、单向传播的。这种“全有或全无”的脉冲发放模式,以及脉冲频率、时序所编码的信息,是神经系统计算和通信的基础语言。

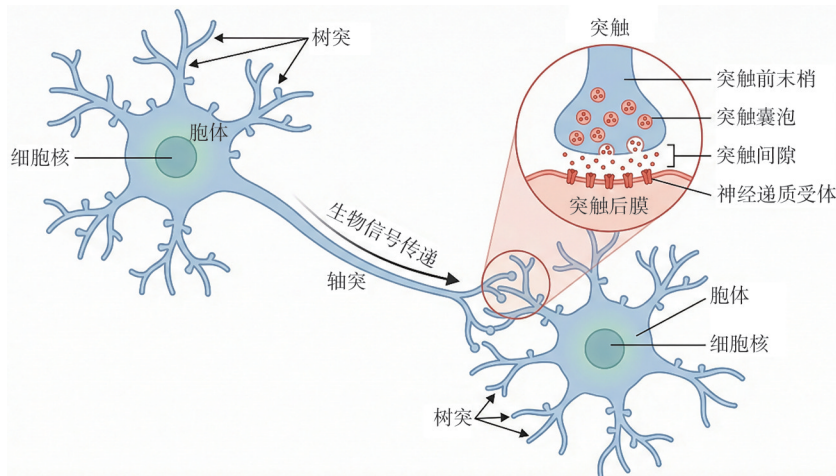


图1 生物神经元和突触结构示意图

Fig.1 Schematic illustration of the structure of biological neurons and synapses

如图 1 中插图所示,生物突触是由突触前末梢、突触间隙和突触后膜构成的精细结构,是信息传递和加工的关键部位。其中,突触前末梢内包含大量突触囊泡,其内储存着神经递质。当动作电位抵达时,囊泡与膜融合释放递质,完成信号传递。突触可塑性,即突触权重根据神经活动而动态调节的能力,被认为是学习和记忆的物理基础。突触可塑性^[17,51,58-61]可分为短时程可塑性与长时程可塑性。短时程可塑性是指突触权重在神经元活动后发生的持续时间从几十毫秒到数分钟的暂时性变化,主要表现形式有兴奋性突触后电流(Excitatory post-synaptic current, EPSC)、双脉冲易化(Paired-pulse facilitation, PPF)、双脉冲抑制(Paired-pulse depression, PPD)、短时程增强(Short-term potentiation, STP)与短时程抑制(Short-term depression, STD)。而长时程可塑性是指由特定神经元活动所引发的持续时间为数小时乃至数天的突触权重变化。它超越了短暂的生理调节,涉及突触结构与功能的持久性重构,被认为是信息长期存储的细胞机制。长时程可塑性通常分为长时程增强(Long-term potentiation, LTP)与长时程抑制(Long-term depression, LTD)。基于长时程可塑性的脉冲时间依赖可塑性(Spike-timing-dependent plasticity, STDP)与脉冲频率依赖可塑性(Spike-rate-dependent plasticity, SRDP)、脉冲数量依赖可塑性(Spike-number-dependent plasticity, SNDP)、脉冲幅值依赖可塑性(Spike-amplitude-dependent plasticity, SADP)、脉冲宽度依赖可塑性(Spike-width-dependent plasticity, SWDP)、脉冲强度依赖可塑性(Spike-intensity-dependent plasticity, SIDP)在突触学习中起着重要作用。其中,STDP是一种经典且重要的Hebbian学习规则:如果突触前神经元脉冲略早于突触后神经元脉冲,则该突触权重增加;反之则减小。这种基于脉冲精确时序的权重调整机制使得神经网络能够自适应地优化其连接,从而处理复杂的时空信息。

生物神经系统的卓越能效与智能处理能力,为突破传统计算架构的瓶颈提供了框架。神经形态计算的核心目标便是采用物理器件来模拟两个基本功能^[50,62]:突触器件实现模拟可变的突触权重,实现如STDP等学习规则,并具备多态、非易失等特性;神经元器件完成模拟整合、发放功能,产生并处理类似动作电位的脉冲信号。将光引入

这一仿生框架,则可进一步模拟生物视觉等系统的感算融合过程,并利用光的高速、并行特性来增强信息处理与互联能力。

3 氮化物光电突触器件

类脑计算的实现迫切需要在硬件层面精准模拟生物突触的核心特性,即可根据神经活动动态调节突触权重。传统纯电学突触器件虽已取得长足进展,但在处理高速、并行、低串扰的信息方面面临瓶颈。引入光作为调控维度,不仅可模拟视觉等生物感知系统的“感存算一体”过程,更能凭借光信号的高速、宽带与无互连干扰等特性,为构建大规模并行神经形态系统提供物理基础。在这一前沿方向上,氮化物半导体因其带隙可调带来的光谱选择性(尤其紫外波段)、2DEG赋予的高速灵敏响应,以及强极化场与丰富缺陷态提供的多样化电荷调控机制,脱颖而出成为实现高性能光电突触的理想材料平台。本节将系统评述基于氮化物的光电突触器件进展,依据其核心工作结构与物理机制,主要分为光电忆阻器、光电晶体管及其他两端结构三大类,重点阐述其如何利用光与电的协同作用,模拟从短时程可塑性到长时程可塑性乃至复杂学习规则(如STDP)的关键功能,并分析其性能潜力与技术挑战。

3.1 光电忆阻器

1971年,加州大学伯克利分校Chua教授从电路理论完备性出发,预言了除电阻、电容、电感之外的第四种基本电路元件——忆阻器^[63]。其核心特征在于,器件的电阻状态由流经的电荷或磁通历史决定,且断电后该状态得以保持。这一物理特性恰好完美映射了生物突触权重的非易失可调性,使忆阻器成为构建人工突触的理想元件。然而,在随后的数十年间,忆阻器的物理实现始终是悬而未决的难题。直至2008年,惠普实验室Strukov等^[64]首次将忆阻器概念和阻变存储器相关联,将这一理论预言转化为可操作的物理器件,掀起了忆阻器研究与神经形态计算应用的热潮。随着研究的深入,忆阻器的电导调控已从纯电学调控拓展至光电融合的新模式。通过引入光作为协同调控维度,光电忆阻器不仅继承了电控忆阻器的记忆与存算一体特性,更赋予了器件波长选择性响应、并行光写入及光电信号直接交互等新能力。下面将聚焦于光电协同型忆阻器,重点阐述器件的结构、工作原理及性能等。

3.1.1 光辅助电调控

在光电神经形态计算框架下,光电协同忆阻器是当前研究的主流模式,其核心思想是将光刺激与电刺激相结合,共同精确调控器件的电阻态。光辅助电调控一般对应于光照可降低工作电压、提高开关比等。中国科学院长春光机所 Li 团队^[55]在 2024 年基于氮化物制备了光电忆阻型突触器

件,器件结构如图 2(a)所示。研究人员利用金属有机化学气相沉积在蓝宝石衬底上生长无掺杂 GaN 薄膜,然后将外延片转移到射频反应磁控溅射系统中生长 AlScN 层,从而得到了 GaN/AlScN 异质结器件。该器件具有电和光电双编程模式,电流开关比均可达到 10^4 量级,并且能对电阻状态进行重置、写入和长期存储。电控模式下,器件分

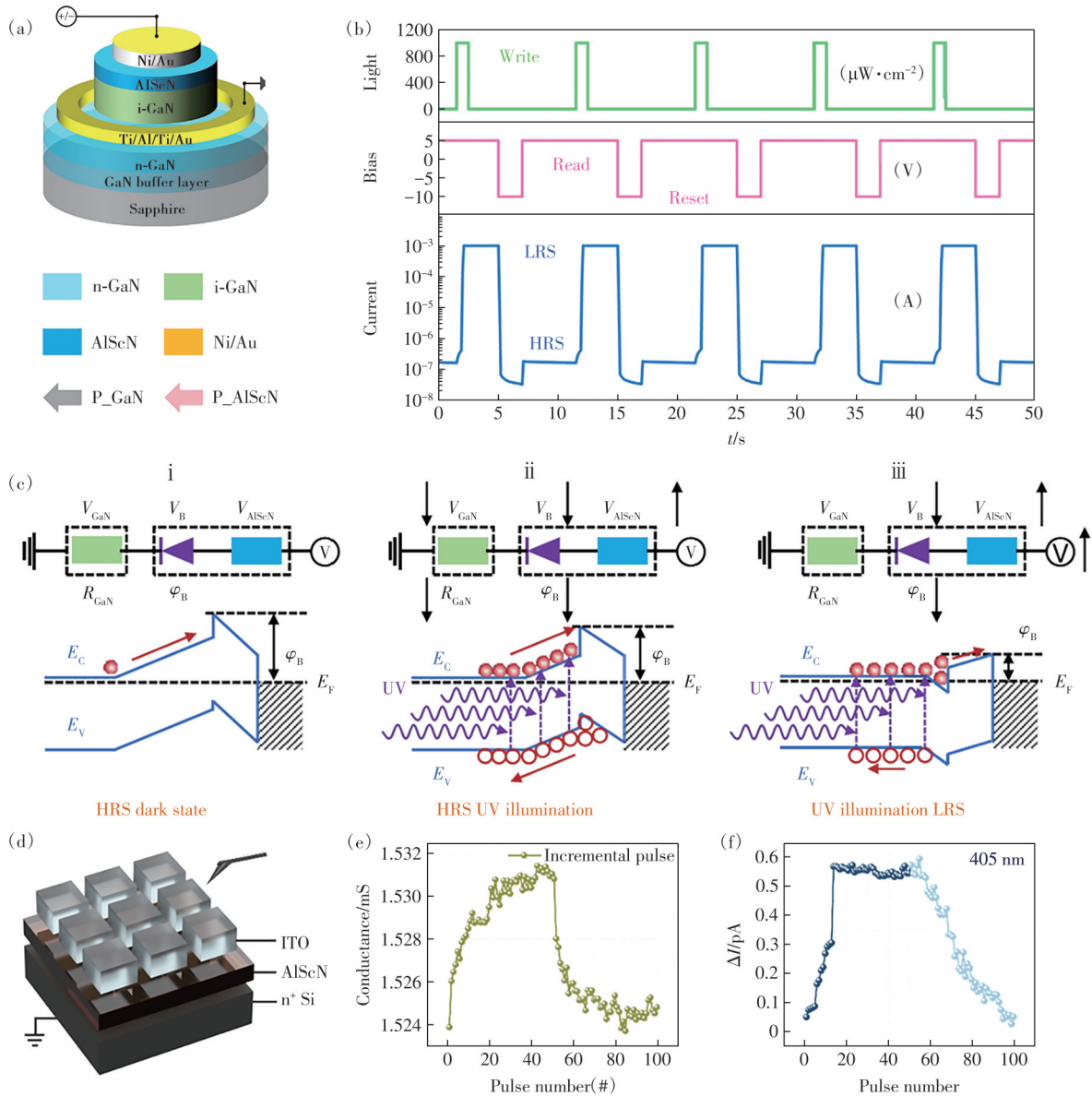


图 2 基于忆阻器实现的光辅助电调控型突触器件。(a)GaN/AlScN 异质结忆阻器结构示意图^[55];(b)忆阻器光电编程过程^[55];(c)AlScN 铁电极化和器件能带结构在光照下的变化示意图^[55];(d)ITO/AlScN/n⁺-Si 忆阻器结构示意图^[53];(e)忆阻器在电压幅值递增的脉冲方案下的增强和抑制行为^[53];(f)忆阻器在光脉冲辅助下的增强和抑制行为^[53]

Fig.2 Optically-assisted electrically-controlled synaptic devices based on memristors. (a) Schematic diagram of the memristor structure based on a GaN/AlScN heterojunction^[55]. (b) Photoelectric programming process of the memristor^[55]. (c) Schematic diagrams of the ferroelectric polarization of AlScN and the change of the memristor's energy band structure under illumination^[55]. (d) Schematic diagram of the structure of the ITO/AlScN/n⁺-Si memristor^[53]. (e) Potentiation and depression behaviors of the memristor under incremental pulse schemes^[53]. (f) Potentiation and depression behaviors of the memristor under 405 nm light pulses^[53]

别在 7 V 和 -10 V 电压下进行写入和擦除操作。电阻态的变化源于异质结构中 AlScN 层的铁电极化反转,影响了器件的耗尽区宽度和电子传输势垒高度。而在光电编程模式下,光可以降低器件写入门槛;在 355 nm 紫外脉冲下,器件只需要 5 V 电压即可完成光写入,撤光后仍保持在低阻态(LRS),之后施加 -10 V 电压脉冲器件返回高阻态(HRS),实现“光写入-电擦除”循环,如图 2(b)所示。图 2(c)展示了器件的工作机制,紫外光照产生电子-空穴对使得 GaN 光电导骤增,使外加偏压(5 V)更多分压到 AlScN,当其局部场强超过矫顽场时,发生极化翻转,HRS 变为 LRS。进一步利用该器件实现了“IMP”和“FALSE”逻辑运算。

光可以辅助增加器件电导,亦可辅助降低电导。Kim 团队^[53]在 2025 年提出了 ITO/AlScN/n⁺-Si 结构光电忆阻器,如图 2(d)所示。正向递增脉冲(7.5 V→9 V)增大器件电导,而负向递增脉冲(-2 V→-3 V)则降低电导,电导调控表现为非易失性,如图 2(e)所示。施加 405 nm 光照时,对器件始终加 4 V 偏压,高功率密度光脉冲($12.8 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)诱导电导逐渐增加,模拟突触增强;在相同条件下,低功率密度光脉冲($2.56 \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$)引起电导下降,对应易失性突触抑制,如图 2(f)所示。器件电导调控机理解释如下:正负电压脉冲使铁电 AlScN 极化翻转,调制 ITO/AlScN 界面肖特基势垒高度,实现非易失、线性多阶阻变;405 nm 光照在 AlScN 内产生电子-空穴对,4 V 偏压将载流子分离形成瞬态电导,光照停止后电子-空穴复合,因此表现为易失性电导调控。

3.1.2 光增强电抑制

光不仅可以降低器件写入电压,也可以单独作为一种输入信号使得器件电导增加。Han 等^[65]在 2024 年提出了一种基于 $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 异质结的忆阻器结构,如图 3(a)所示。图 3(b)显示了 254 nm 光照对器件电导的影响。光照期间电导快速增加,光照结束后,电导缓慢衰减,但不会回到初始电导值,表明持续光电导效应的存在。图 3(c)显示了不同光照时间下光电流的变化。光照 5 s 时,突触后电流变化($\Delta_{\text{post-synaptic current}}, \Delta\text{PSC}$)增大至约 21 pA;当光照 20 s 时, ΔPSC 攀升至约 37 pA。不同光照时间下 ΔPSC 变化过程代表了记忆的逐步加深,对应于从 STP 到 LTP 的转换。254 nm 光可同时被 Ga_2O_3 层和 GaN 层吸收,在

两层中均产生电子-空穴对,光生载流子可在两层间转移;同时, $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ 界面附近的缺陷捕获光生载流子,形成空间电荷区,阻碍载流子复合。当撤光后,被界面陷阱捕获的载流子无法完全释放,导致电导不能恢复到暗态值,从而产生持续光电导效应。通过调节光照波长(365 nm 或 254 nm)、脉宽、频率和光强,可实现从 STP 到 LTP 的转换,模拟生物突触的学习和记忆功能。

Shen 团队^[59]在 2021 年提出了一种由 $\text{Al/TiN}_x\text{O}_{2-x}/\text{MoS}_2/\text{ITO}$ 构成的人工光电突触,如图 3(d)所示。图 3(e)所示的是突触在 365 nm 紫外光下的光写入与随后 -3 V 电压下的电擦除过程。该器件具有光电双模式调控机制,在电控模式下,正电压驱动 $\text{TiN}_x\text{O}_{2-x}$ 层中的氧空位向 MoS_2 层迁移,降低界面势垒实现 LTP,负电压则使氧空位反向迁移,实现 LTD;在光控模式下,紫外光激发产生电子-空穴对,经异质结内建电场分离后形成光电流,通过调控光强与光照时间可分别实现短时程记忆(STM)和长时程记忆(LTM)的模拟,而 -3 V 电脉冲可快速擦除光诱导电导态;两种机制协同使器件能够很好地模拟生物突触的可塑性与学习-遗忘-再学习行为,如图 3(f)所示。

此外,研究人员在 GaN/AlN ^[61]、 $\text{NaNbO}_3/\text{n-GaN}$ ^[20]、 $\text{AlScN}/\text{p-GaN}$ ^[66] 异质结光电忆阻器中也发现了类似的“光增强-电抑制”过程,并将其用于突触可塑性模拟。

3.2 光电晶体管

基于晶体管的神经形态计算架构^[67]最初是在 1996 年提出的,旨在通过电学手段模拟突触的学习功能。之后发展的多栅极结构神经形态晶体管,因其在物理结构上与生物神经元的树突整合机制高度相似,展现了超越简单存储的复杂动力学模拟潜力^[68]。光电晶体管不仅继承了多栅电控的灵活性与精确性,更通过光信号的引入,实现了高带宽、并行、低串扰的信息注入与处理能力。光与电在沟道中的协同作用使得器件能够更逼真地模拟生物突触中多模态信号的整合,为直接实现依赖于光脉冲时序的高级学习规则、乃至构建感存算一体的神经形态系统,提供了至关重要的硬件基础。基于氮化物的光电晶体管凭借其优异的光电响应与高速特性,正成为实现这类高性能光电突触的理想载体。本节将从器件结构、工作原理以及性能表现等几个方面介绍光电晶体管。

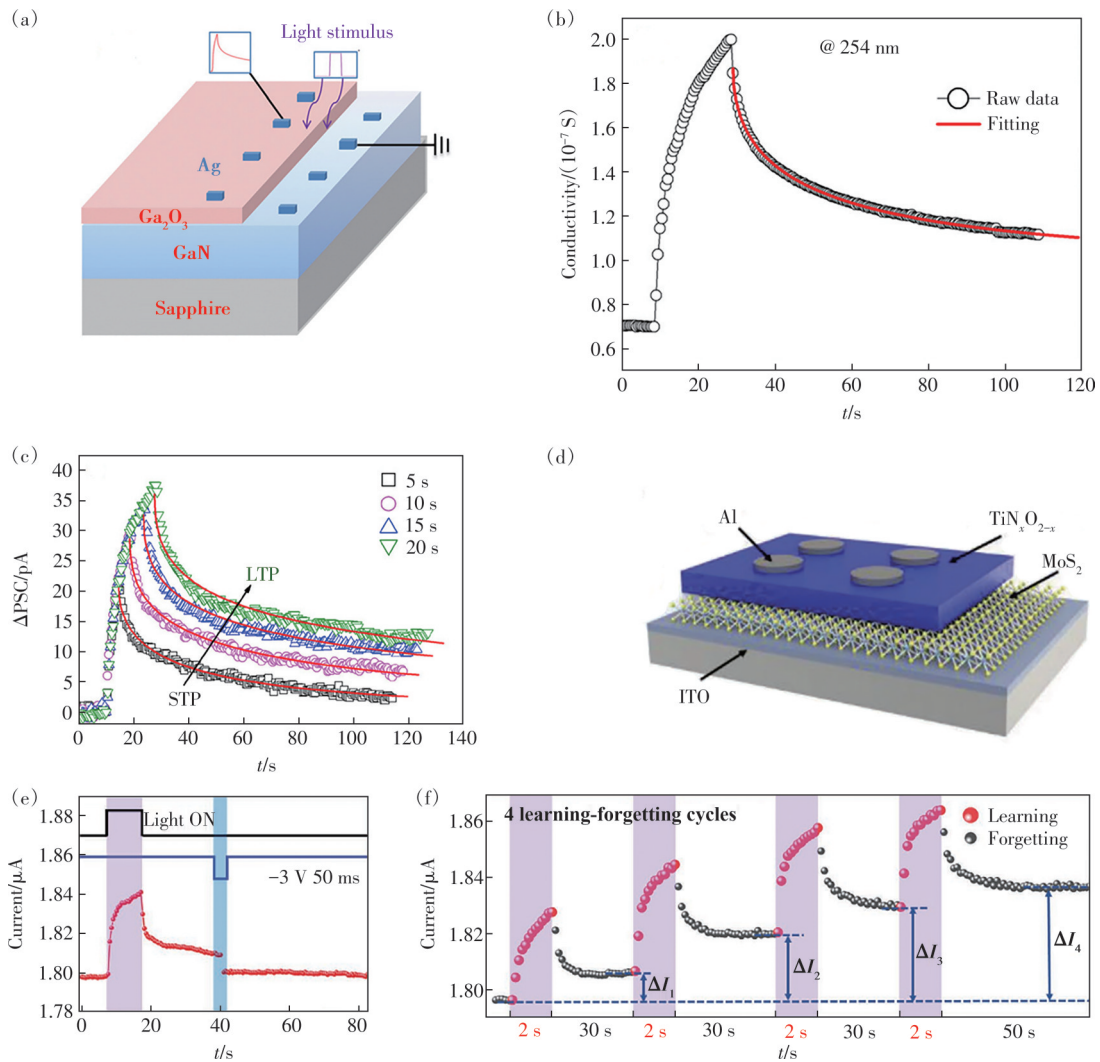


图 3 基于忆阻器实现的光增强电抑制型突触器件。(a)基于 Ga₂O₃/GaN 异质结的忆阻器结构示意图^[65];(b)忆阻器的光增强过程^[65];(c)光照时间与 ΔPSC 的关系^[65];(d)基于 Al/Ti_xO_{2-x}/MoS₂/ITO 异质结的忆阻器结构示意图^[59];(e)忆阻器光增强和电抑制过程^[59];(f)4 个循环的“学习-遗忘-再学习”过程^[59]

Fig.3 Memristive synaptic devices with optical potentiation and electrical depression. (a)Schematic diagram of the memristor structure based on a Ga₂O₃/GaN heterojunction^[65]. (b)Optical potentiation process of the memristor^[65]. (c)Dependence of ΔPSC on illumination time^[65]. (d)Schematic diagram of the memristor structure based on an Al/Ti_xO_{2-x}/MoS₂/ITO heterojunction^[59]. (e) Optical potentiation and electrical depression processes of the memristor^[59]. (f) Four cycles of the “learning-forgetting-relearning” process^[59]

3.2.1 栅极电压调控

(1) 光辅助电调控

在光电晶体管设计中,结合光与栅压进行协同调控是主流方案,它实现对器件性能的灵活调控。Lin 团队^[69]在 2023 年报道了一种基于 h-BN/ReSe₂/h-BN 异质结的晶体管,如图 4(a)所示。在 405 nm 光照下,施加 -40 V 负栅压脉冲增大器件电导,随后施加 40 V 正栅压脉冲可减小电导,从而模拟生物突触 LTP 与 LTD 行为,如图 4(b)所示。405 nm 光照在 ReSe₂ 沟道内生成电子-空穴对;施加负栅压时,空穴被驱至 h-BN/SiO₂ 界面,被

陷阱捕获,这些电荷的存在诱导静电感应使沟道呈 n 型;施加正栅压时,电子被捕获,沟道呈 p 型;由此实现光照与栅压协同的非易失性信息写入。

Oh 等^[58]在 2021 年提出了一种基于 MoS₂/h-BN 异质结的晶体管突触,通过光脉冲与电脉冲的协同刺激实现了权重双向调控,如图 4(c)所示。图 4(d)为采用高功率光脉冲刺激(8.1 mW·cm⁻²)、光-电协同刺激下的双向权重调控,表明器件可通过单一波长光配合不同极性电脉冲实现 LTP 与 LTD 功能。图 4(e)则采用较低功率光脉冲刺激(2.1 mW·cm⁻²)进行了 LTP 与 LTD 连续操作,综合

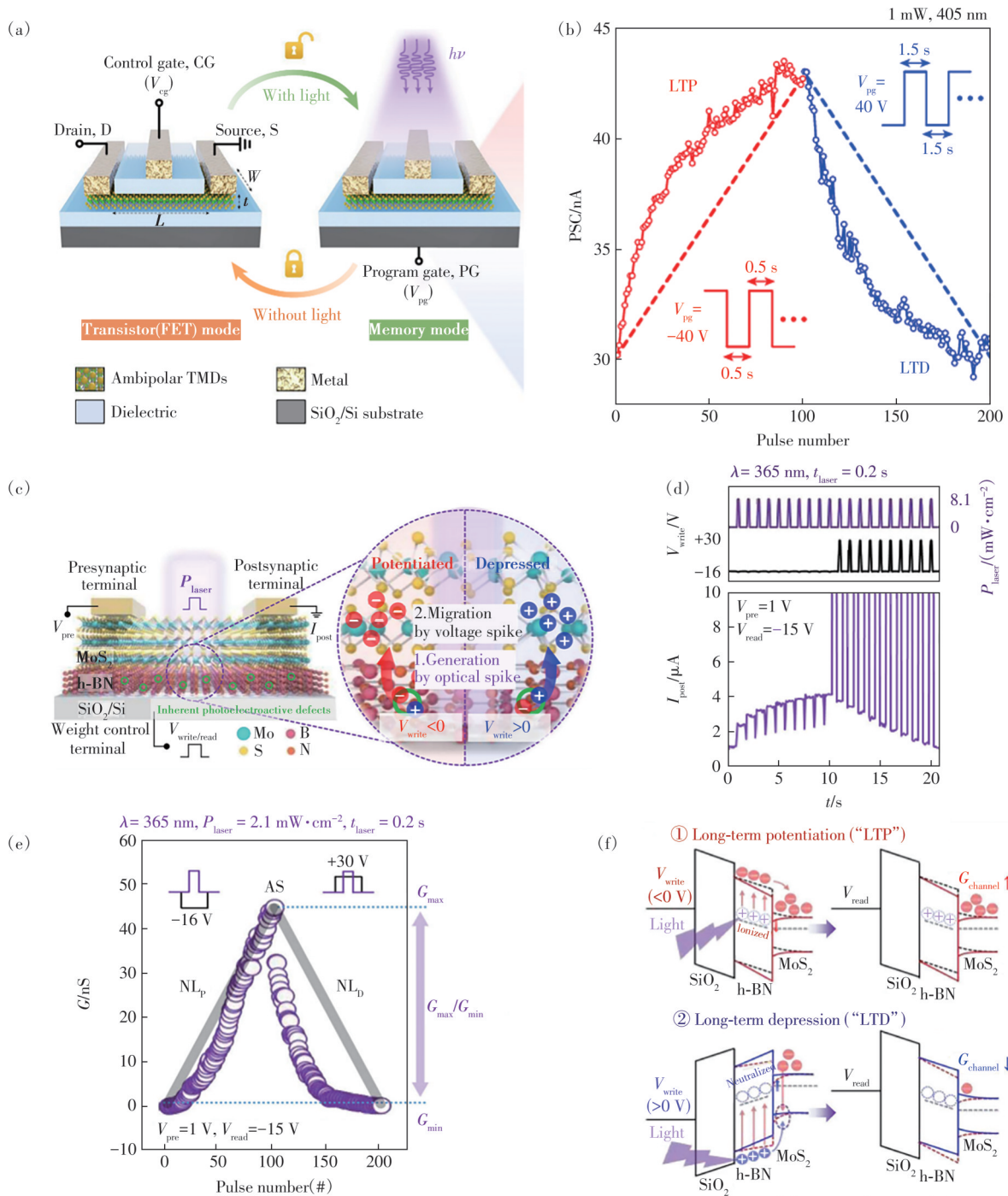


图4 光辅助电调控型突触晶体管。(a)基于h-BN/ReSe₂/h-BN异质结的光电晶体管结构示意图^[69];(b)光电协同作用下的LTP与LTD行为^[69];(c)基于MoS₂/h-BN异质结的光电晶体管结构示意图^[58];(d)器件电流对光电协同刺激响应^[58];(e)器件的LTP/LTD特性^[58];(f)光电协同调控机理能带示意图^[58]

Fig.4 Optically-assisted electrically-controlled synaptic transistors. (a)Schematic diagram of the phototransistor structure based on a h-BN/ReSe₂/h-BN heterojunction^[69]. (b)LTP and LTD behaviors under photoelectric synergy^[69]. (c)Schematic diagram of the phototransistor structure of a MoS₂/h-BN heterojunction^[58]. (d)Device current responses to the co-stimuli of optical and electrical spikes^[58]. (e)LTP and LTD characteristics^[58]. (f)Energy band diagrams indicating weight-updating principles of LTP and LTD^[58]

评估了器件的模拟学习性能,证实其具备支持复杂神经网络训练所需的精细多值存储与权重连续更新能力。器件工作机制解释如下:当365 nm光

脉冲与负栅压协同作用时,h-BN缺陷被激发电离,光生电子注入MoS₂沟道,提升沟道表面势与电子注入效率,实现LTP;反之,光脉冲与正栅压

协同作用时,光生电子填充缺陷态,同时空穴注入 MoS₂与电子复合,表面势恢复导致 LTD;从而通过单一波长光配合电脉冲极性调控完成双向突触权重更新,如图 4(f)所示。

此外,研究人员也基于 AlGaIn/GaN^[49,70-71]、PtS₂/h-BN/graphene^[47]、WSe₂/h-BN^[72-74]、h-BN/SiO₂^[75]、h-BN/graphene^[76]和 WSe₂/GaN 异质结^[77]设计了具有类似突触特性的光电晶体管。

(2) 光增强电抑制

光和栅压协同调控既有光辅助电调控类型,也有光脉冲作为兴奋性刺激提升电导、而电(栅

极)脉冲则作为抑制性刺激降低电导的模式。Kai 等^[51]在 2023 年提出了一种基于 AlGaIn/GaN 的光电突触器件,如图 5(a)所示。图 5(b)展示了器件从短时记忆向长时记忆的转变过程,通过施加一系列脉宽 1 s、光功率密度 63.69 mW·cm⁻²的光脉冲,随着光脉冲数目增加,EPSC 的衰减速度逐渐变慢,记忆保持时间显著延长。图 5(c)则展示了器件的光写入和电擦除特性,使用波长 375 nm、脉宽 2 s、功率密度 407 mW·cm⁻²的激光脉冲进行写入操作,随后施加 10 V 栅压、持续时间 50 ms 的电压脉冲进行擦除,可实现稳定的擦写操作,且开

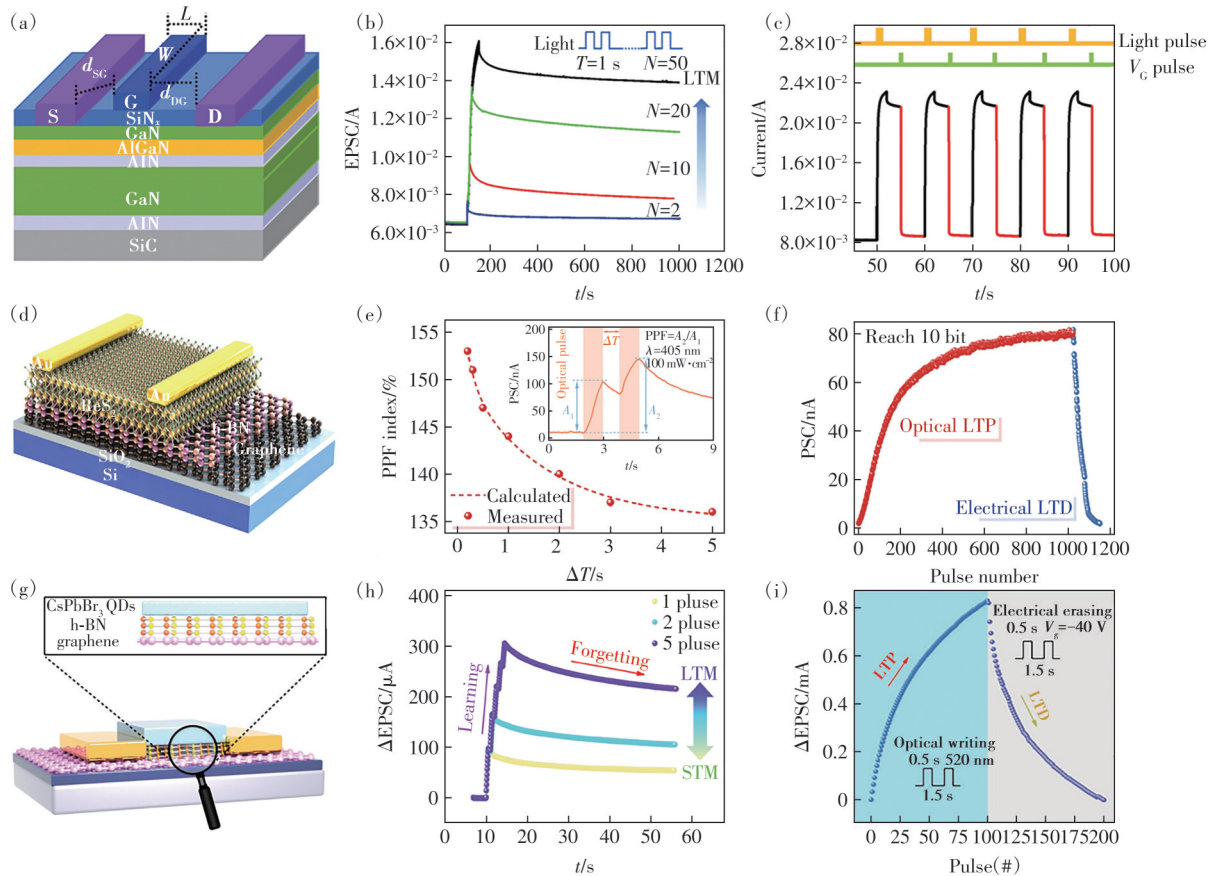


图 5 栅极电压调控的光电突触晶体管。(a)基于 AlGaIn/GaN 异质结的光电晶体管结构示意图^[51];(b)从 STM 到 LTM 的转变^[51];(c)分别使用 375 nm 激光脉冲和栅极电压脉冲对器件进行写入和擦除^[51];(d)基于 ReS₂/h-BN/Graphene 异质结的光电晶体管结构示意图^[78];(e)PPF 指数与 ΔT 之间的关系,插图是 PPF 及其对应的输入信号^[78];(f)光电协同作用下的 LTP 与 LTD 行为^[78];(g)Graphene/h-BN/CsPbBr₃-QD 量子点的光电晶体管结构示意图^[60];(h)通过增大光脉冲数量将 STP 行为转变为 LTP 行为^[60];(i)光电协同作用下的 LTP 与 LTD 行为^[60]

Fig.5 Gate voltage controlled optoelectronic synapse transistors. (a)Schematic diagram of the phototransistor structure based on an AlGaIn/GaN heterojunction^[51]. (b)The transition from STM to LTM^[51]. (c)Writing and erasing of the device using 375 nm laser pulses and gate voltage pulses, respectively^[51]. (d)Schematic diagram of the phototransistor structure based on a ReS₂/h-BN/Graphene heterojunction^[78]. (e)Relationship between the PPF index and ΔT . Inset is the input signal for PPF and its corresponding response^[78]. (f)LTP and LTD behaviors under photoelectric synergy^[78]. (g)Schematic diagram of the phototransistor structure of graphene/h-BN/CsPbBr₃-QD^[60]. (h)The transformation from STP to LTP by increasing the pulse number^[60]. (i)LTP and LTD behaviors under photoelectric synergy^[60]

态和关态电流在多次循环中保持高度一致,表现出良好的可重复性和可靠性。AlGaIn/GaN 异质结界面因极化效应形成高密度 2DEG 沟道,使器件呈现常开特性;当施加负栅压耗尽 2DEG 后,紫外光照射 GaN 层产生电子-空穴对,光生电子在极化电场驱动下隧穿进入 SiN_x 并被缺陷捕获,导致阈值电压负向漂移,器件重新导通,实现光写入;随后施加正栅压脉冲可释放捕获电子,使阈值电压恢复,器件关断,实现电擦除。这一光生载流子分离-隧穿-捕获机制赋予了器件非易失性光存储和突触可塑性。

Yang 等^[78]在 2025 年制备了一种 ReS₂/h-BN/Graphene 异质结光电突触,如图 5(d)所示。图 5(e)展示了 PPF 特性:随着两个连续光脉冲(405 nm, 100 mW·cm⁻², 1 s)之间的时间间隔 ΔT 增大,PPF 指数从 153% 单调递减至 136%,呈现双指数衰减趋势,这与生物视觉系统工作机制一致。图 5(f)则展示了光学 LTP 与电学 LTD 过程,通过连续光脉冲(1 mW·cm⁻², 10 ms, 1 Hz)编程可实现 1 024 个突触权重,而电擦除脉冲(9 V, 10 ms, 1 Hz)则使权重恢复。这种光电协同的权重更新机制使单次操作能耗低至 500 fJ,显著优于传统电学模式。光电编程是利用光照射在 ReS₂ 产生光生电子-空穴对,在浮栅存储电荷形成的内建电场作用下,光生空穴隧穿至浮栅中和原有电子复合,实现非易失性电导增强。这种光电协同的载流子隧穿机制使器件兼具高带宽、低串扰、多比特存储和超低能耗的突触特性。

Wang 团队^[60]在 2022 年提出了一种 Graphene/h-BN/CsPbBr₃ 量子点的光电晶体管,如图 5(g)所示。图 5(h)展示了器件通过调控光脉冲数量实现从短期记忆向长期记忆转变的特性。随着光脉冲数量从 1 个增加到 5 个,器件的 EPSC 在刺激结束后衰减速度逐渐变慢,记忆保持时间显著延长,成功模拟了人脑通过重复学习将短期记忆巩固为长期记忆的过程。图 5(i)所示是该器件在 520 nm 光脉冲照射下沟道电流逐级增加,模拟突触 LTP 的行为;施加 -40 V 电脉冲后电流降低到初始值,完成突触 LTD 行为。520 nm 激光激发 CsPbBr₃ 量子点产生电子-空穴对,光生电子被捕获在 CsPbBr₃ 量子点中,h-BN 超薄层把空穴缓慢释放进 p 型石墨烯,沟道载流子浓度逐级升高,电导持续增大;负栅压瞬间向沟道注入大量空穴,加速光生电子-

空穴复合并阻断载流子隧穿,电导迅速降低完成抑制,由此形成“光增强-电抑制”的突触权重调控。

此外,基于 AlScN/二维半导体异质结^[79]、AlGaIn/GaN 异质结^[52,80-82]、h-BN/In₂Se₃ 异质结^[83]、MoS₂/h-BN 异质结^[84]、AlScN 材料^[85]和 AlN 材料^[34],也实现了“光增强-电抑制”型突触晶体管。

3.2.2 漏极电压调控

除了栅极电压外,还可以调整源漏极电压来调节突触晶体管的电导。Lee 等^[35]在 2019 年提出了基于 MoS₂/h-BN/Graphene 异质结的光电晶体管,如图 6(a)所示。图 6(b)中,器件施加 -10 V 电压脉冲,沟道电流降低至 10⁻¹⁴ A;随后施加 458 nm 光脉冲后,电流迅速增大至 10⁻⁸ A,开关比大于 10⁶,实现了低能耗、高可靠的光控存储。图 6(c)所示是器件光增强电抑制的 5 个循环过程,证明该结构具备稳定、可逆、非易失的光电存储功能。施加负电压脉冲时,电子从漏极经 h-BN 隧穿进入石墨烯浮栅并滞留,产生等效负栅压,静电屏蔽使 MoS₂ 沟道耗尽,电流被抑制,呈现关态;而在光照下,MoS₂ 吸收光子产生电子-空穴对,空穴在浮栅负电吸引下隧穿 h-BN 与石墨烯内的存储电子复合,浮栅电荷被中和,使得等效负栅压解除,沟道恢复高电导态,实现光增强。

Chen 等^[86]在 2024 年提出了 AlGaIn/GaN 光电晶体管,如图 6(d)所示。图 6(e)展示了 PPF 效应,当两个间隔 250 ms 的光脉冲依次施加时,第二个脉冲产生的 EPSC 峰值电流显著高于第一个脉冲,PPF 指数达 125.5%,这是由于第一个脉冲后浅层陷阱中残余的光生载流子未完全释放,促进了第二个脉冲的响应增强。图 6(f)进一步显示 PPF 指数随脉冲间隔时间增加呈双指数衰减,从 125.5% 降至 113.1%,表明该器件成功模拟了生物突触依赖残余钙离子的短时记忆增强特性。图 6(g)展示了通过增加光脉冲数量实现从 STP 到 LTP 转换的特性,当施加 3 个光脉冲时器件呈现短时可塑性,而随着脉冲数增加至 30 个,EPSC 幅值从 1 117.5 nA 显著提升至 1 887.4 nA,表明突触连接强度被巩固。光脉冲激发陷阱产生光生载流子,在沟道中形成 EPSC,随后被陷阱缓慢释放而衰减;浅陷阱对应短时记忆,深陷阱对应长时记忆。此外,Zhan 等也在 TiO₂/AlGaIn/GaN 异质结^[50,87]突触中实现了光和漏极电压的协同调控。

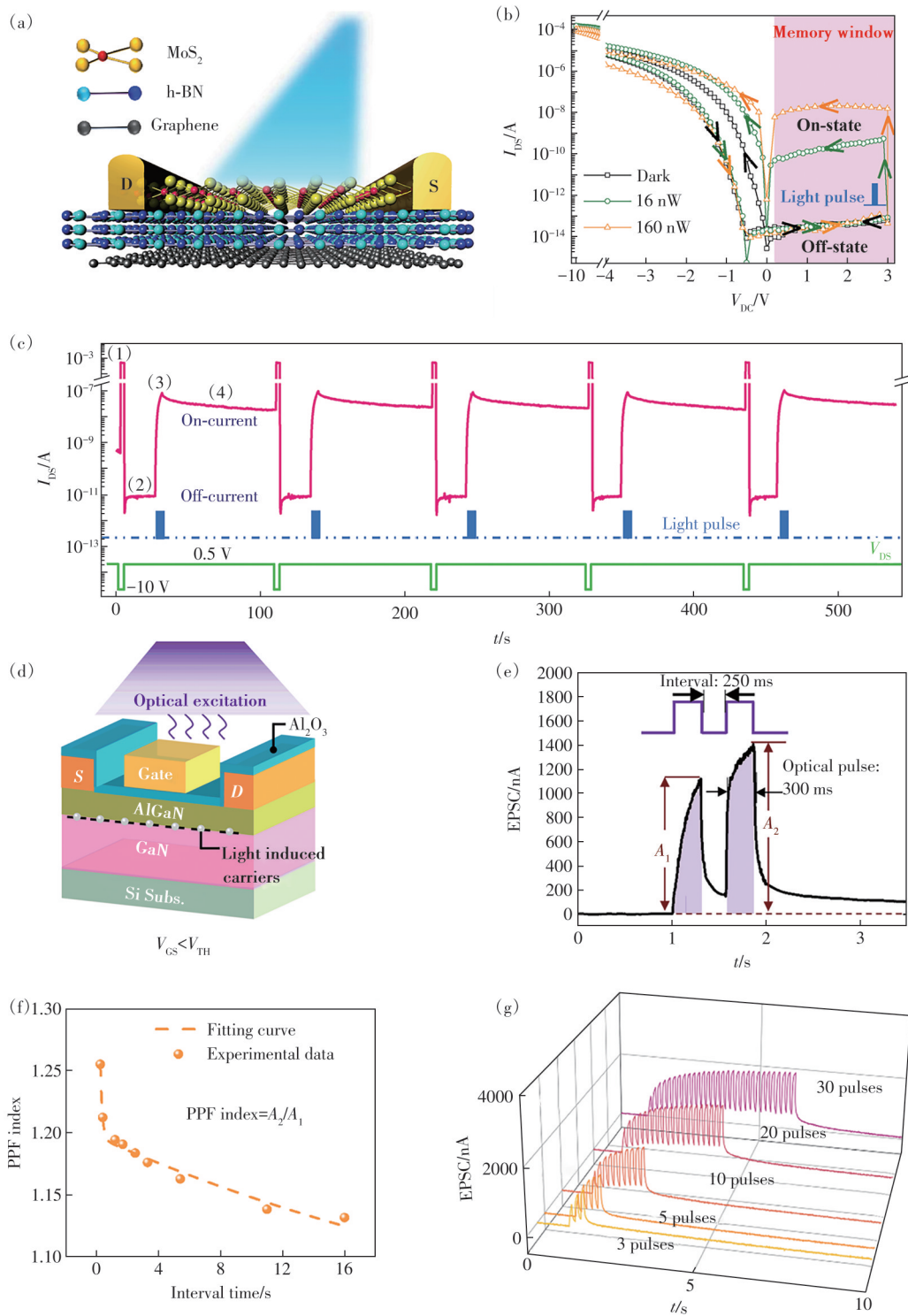


图 6 漏极电压调控的光电突触晶体管。(a)基于 MoS₂/h-BN/Graphene 异质结的光电晶体管^[35];(b)光增强和电抑制过程^[35];(c)光增强电抑制的 5 个循环过程^[35];(d)基于 AlGaIn/GaN 异质结的光电晶体管结构示意图^[86];(e)典型 PPF 行为^[86];(f)PPF 指数与脉冲间隔时间的关系^[86];(g)多个光脉冲下的 STP 和 LTP^[86]

Fig.6 Drain voltage controlled photoelectric synapse transistors. (a)Schematic diagram of the phototransistor structure based on a MoS₂/h-BN/Graphene heterojunction^[35]. (b)Optical potentiation and electrical depression processes^[35]. (c)Five cycles of optical potentiation and electrical depression^[35]. (d)Schematic diagram of the phototransistor structure based on an Al-GaN/GaN heterojunction^[86]. (e)Typical PPF behavior^[86]. (f)PPF index as a function of the pulse interval^[86]. (g) STP and LTP upon multiple optical spikes^[86]

3.3 其他光电突触器件

在忆阻器与晶体管这两大类主流光电突触架构之外,一系列结构简单的两端器件同样在模拟

突触可塑性方面展现出独特价值。Zhao 等^[88]在 2025 年提出了一种基于多孔 GaN 纳米锥阵列的“光增强-电抑制”型人工突触,器件结构如图 7(a)

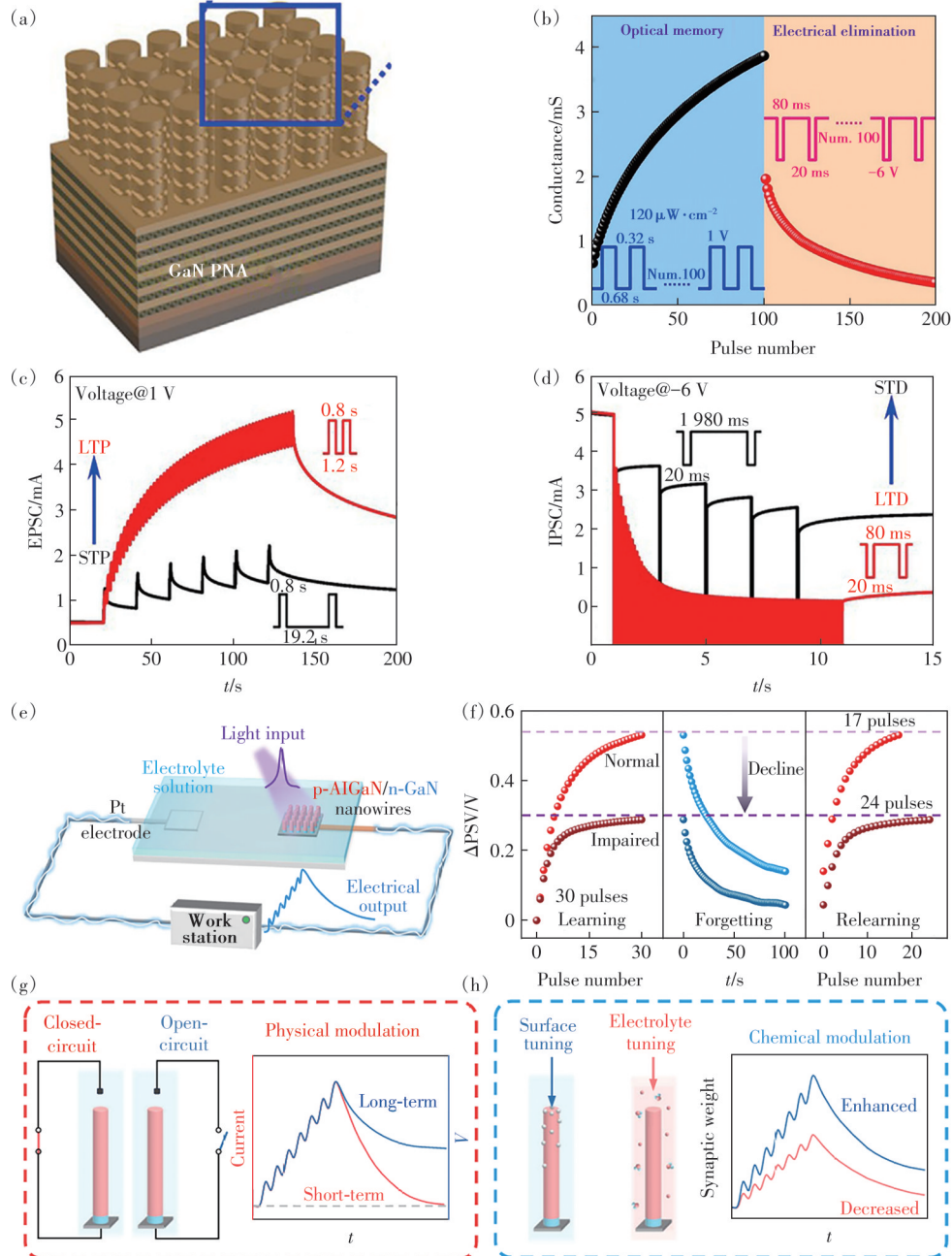


图 7 其他两端光电突触器件。(a) GaN 多孔纳米锥阵列光电人工突触示意图^[88]; (b) 光增强和电抑制过程^[88]; (c) 调节光脉冲频率将 STP 转变为 LTP^[88]; (d) 调节电脉冲频率将 STD 转变为 LTD^[88]; (e) 基于 p-AlGaIn/n-GaN 纳米线的光电化学突触器件^[19]; (f) 正常和受损条件下的学习-遗忘-再学习行为^[19]; (g) 物理法调节突触活性示意图^[19]; (h) 化学法调节突触活性示意图^[19]

Fig. 7 Other two-terminal photoelectric synaptic devices. (a) Schematic diagram of GaN porous nanocone array optoelectronic artificial synapse^[88]. (b) Optical potentiation and electrical depression processes^[88]. (c) Transition of STP to LTP by adjusting optical stimulation frequency^[88]. (d) Transition of STD to LTD by adjusting electrical stimulation frequency^[88]. (e) Schematic diagram of the photoelectrochemical synaptic device based on p-AlGaIn/n-GaN nanowires^[19]. (f) Learning-forgetting-relearning behavior under normal and impaired conditions^[19]. (g) Synaptic activity modulation by physical approach^[19]. (h) Synaptic activity modulation by chemical approach^[19]

所示。图7(b)所示是器件光增强-电抑制行为。图7(c)通过改变光脉冲频率实现从STP(19.2 s间隔)到LTP(1.2 s间隔)的转变,模拟生物的学习记忆过程。图7(d)则通过调节电脉冲频率实现从STD(1 980 ms间隔)到LTD(80 ms间隔)的转换,对应生物遗忘机制。两者结合,该器件以光脉冲实现“学习-记忆”写入,电脉冲实现“遗忘-擦除”重置,完整模拟了生物突触的双向调节功能。光照时电子-空穴对分离,空穴被陷阱态捕获而电子参与导电,撤光后陷阱态缓慢释放空穴使电导持续保持;施加负向电脉冲时,电场加速空穴与剩余电子复合,实现电学擦除,从而以“光写入-电擦除”机制模拟生物突触可塑性。

把纳米线放置于电路中,通过电路的开和关也可完成STP和LTP的转换。Sun团队^[19]在2024年提出了一种基于p-AlGaIn/n-GaN纳米线的光电化学突触器件,结构如图7(e)所示。该器件通过电路状态切换与化学环境调控实现多维度突触可塑性。闭路时电子经外电路快速泄放表现为STP,开路时载流子仅通过电解液缓慢消耗实现LTP,如图7(g)所示。Pt纳米颗粒表面修饰可放大电流响应,而抗坏血酸添加、Na₂SO₄电解液替换及pH升高则可抑制电流响应,从而成功模拟生物突

触的化学敏感性与氧化应激状态,如图7(h)所示。图7(f)表示光电化学突触模拟正常和受损条件下的学习-遗忘-再学习行为。该器件基于p-AlGaIn/n-GaN纳米线光电化学结构,通过内部光电效应与外部电解液调控的化学-电效应的协同作用实现突触功能。光照激发产生电子-空穴对,在p-n结内建电场与纳米线/电解液界面的反向电场共同作用下,空穴于纳米线内短暂积累形成电导变化;闭路时双电场反向导致空穴短期存储并经外电路快速泄放(~60 s),开路时空穴仅能通过电解液氧化还原反应缓慢耗散,实现长期积累(> 1 500 s);电解液环境(H₂SO₄/Na₂SO₄浓度、pH、抗坏血酸等)通过调控界面电荷转移动力学调制响应强度,Pt纳米颗粒表面修饰则作为人工受体加速电子消耗,从而构建兼具物理-化学双模态调控的生物神经形态功能。

此外,在AlGaIn材料^[89]、GaN纳米线^[90-94]、ScN材料^[54]、GaN材料^[95-96]、InSe/GaN异质结^[97]两端器件中也观察到类似的光电突触行为。

3.4 不同光电突触器件性能比较

表1梳理了基于氮化物材料的光电忆阻器、光电晶体管及其他两端器件的调控机制与突触功能等。可以看到,不同器件类型在调控机制、性能

表1 氮化物光电突触器件比较

Tab. 1 Comparison of nitride-based photoelectric synaptic devices

器件类型	功能层	调控波长/ nm	开关比	调控机制	突触功能	文献	
忆阻器	GaN/AlScN	355	~10 ⁴	铁电层极化和去极化	LTP/LTD	[55]	
	AlScN	405	~10 ⁴	铁电层极化和去极化	LTP/LTD/SNDP/SADP/SWDP	[53]	
	Ga ₂ O ₃ /GaN	254	~4	界面陷阱态电子捕获和释放	PPF/STP/LTP	[65]	
	TiN _x O _{2-x} /MoS ₂	365	~4.6	氧空位电子捕获和释放	PPD/PPF/STP/LTP/LTD	[59]	
	GaN/AlN	365	~50	界面势阱电子捕获和释放	PPF/STM/LTM/STDP	[61]	
	h-BN/ReSe ₂ /h-BN	405	~10 ⁶	界面陷阱态电子捕获和释放	LTP/LTD/STDP	[69]	
	MoS ₂ /h-BN	365	>384	氮空位电子捕获和释放	PPF/LTP/LTD	[58]	
	AlGaIn/GaN	337	~10 ⁶	二维电子气	LTP/LTD	[82]	
	AlGaIn/GaN	405	~10 ⁹	界面陷阱态电子捕获和释放	PPF/STM/LTM/STDP	[86]	
	TiO ₂ /AlGaIn/GaN	365	~30	界面陷阱态空穴捕获和释放	PPF/STP/LTP	[87]	
晶体管	AlGaIn/AlN/GaN	300	>10 ⁵	氧复合缺陷(Ⅲ族原子空位与替位氧原子,V _Ⅲ -O _N)空穴捕获和释放	PPF/STP/LTP/SRDP/SNDP	[52]	
	GaN/AlGaIn/AlN/GaN	375	~1.15	Si _{N_x} 电子捕获和释放	PPF/STM/LTM	[51]	
	WSe ₂ /GaN	310	>10 ²	Fowler-Nordheim隧穿、浮栅电荷存储	PPF/STP/LTP/SRDP/SNDP	[77]	
	ReSe ₂ /h-BN/Graphene	405	~10 ⁷	Fowler-Nordheim隧穿、浮栅电荷存储	PPF/PPD/LTP/LTD/STDP	[78]	
	Graphene/h-BN/CsPbBr ₃ -QD	520	~35	CsPbBr ₃ -QD本征缺陷电子捕获和释放	PPF/STP/LTP	[60]	
	MoS ₂ /h-BN/InSe	520	~10 ⁸	Fowler-Nordheim隧穿、浮栅电荷存储	PPF/STP/LTP/LTD	[84]	
	MoS ₂ /h-BN/Graphene	458	>10 ⁶	Fowler-Nordheim隧穿、浮栅电荷存储	LTP/LTD/STDP	[35]	
	其他两端器件	GaN	370	~10	陷阱态空穴捕获和释放	PPF/STP/LTP/STD/LTD	[88]
		GaN/Ga ₂ O ₃ /GaN	254	~154	氧空位电离和中和	PPF/STP/LTP	[96]
		InSe/GaN	400	>10 ³	界面陷阱态电子捕获和释放	PPF/STP/SIDP/SNDP/SRDP	[97]

特征与功能侧重上呈现出显著差异。光电忆阻器结构简单、易于高密度集成;光电晶体管凭借其三端调控优势,在复杂学习规则模拟与感存算一体方面表现突出;而其他两端器件则以其简单结构与多样的物理机制,为特定应用场景提供了差异化选择。

从调控机制来看,界面陷阱态电子捕获和释放是氮化物光电突触最核心的物理基础,广泛存在于各类器件中。忆阻器主要依赖铁电极化或陷阱态电子捕获和释放实现电阻态调制。晶体管则充分利用 AlGaIn/GaN 异质结的二维电子气与界面的缺陷等调控电阻,部分器件引入浮栅结构,通过 Fowler-Nordheim 隧穿和浮栅电荷存储实现非易失存储。其他两端器件多基于陷阱态空穴/电子捕获和释放。而 AlScN 材料的引入为忆阻器提供了全新的极化调控维度。

得益于氮化物宽带隙可调特性,多数器件工作在紫外波段(254~405 nm),其中日盲紫外(< 280 nm)器件在抗背景干扰的感算一体场景中独具优势。部分器件通过异质集成二维材料(如 MoS₂、ReS₂、graphene)将响应波段拓展至可见光(458~520 nm),实现了光谱响应范围的延伸。开关比直接决定突触权重的动态范围与多态存储能力。晶体管器件普遍表现出更高的开关比,如 AlGaIn/GaN、MoS₂/h-BN/InSe 等异质结晶体管,这得益于其三端结构对沟道电导的精确调控。在突触功能模拟方面,晶体管器件表现出较全面的功能覆盖。多数晶体管不仅实现了基础的短时程可塑性与长时程可塑性,还可模拟复杂的 STDP 等行为。忆阻器侧重于 LTP/LTD 的实现,部分可模拟 STDP。而其他两端器件则主要聚焦于 PPF/STP/LTP 等功能。

综合分析表明,氮化物基光电突触器件的核心优势体现在:以 AlGaIn/GaN 为代表的三端器件凭借二维电子气的高迁移率与界面缺陷的捕获动力学,在开关比、响应速度与功能复杂度上表现优异;铁电材料 AlScN 的引入为忆阻器提供了非易失、低功耗的极化调控新机制。GaN/Ga₂O₃ 等异质结构在日盲紫外波段展现出独特的感算一体潜力;与二维材料的异质集成有效拓展了光谱响应范围与功能多样性。值得注意的是,h-BN 虽不直接作为光电调控的核心有源层,却在异质集成体系中扮演着不可或缺的角色。其原子级平整

且无悬挂键的惰性表面为二维材料(如 MoS₂、ReS₂、Graphene)提供了近乎完美的生长/转移基底,最大限度抑制载流子散射;作为隧穿势垒层或浮栅介质,其在浮栅型突触器件中实现了超低功耗的非易失存储;而其面内超高导热系数则为高密度集成的异质结阵列提供了关键的热管理通道。因此,h-BN 以其独特的物理惰性、界面完美性与热管理能力,成为连接氮化物半导体与二维材料体系、构建高性能异质集成突触器件的关键基石。

4 氮化物光电神经元器件

在成功模拟了可塑性突触之后,构建完整的神经形态系统需要另一核心组件:能够产生和处理动作电位脉冲的神经元。生物神经元的核心功能是将来自突触的时空输入转换为离散的脉冲输出,即“整合-发射”。光电神经元旨在利用光与电的信号形式,在硬件上高效实现这一功能。与突触器件追求权重的渐变式更新不同,神经元器件需要表现出明确的阈值特性、全有/全无特性以及不应期^[98]。氮化物半导体,特别是其高电子迁移率和优异的光电响应特性,为实现高速、低功耗且能与光电突触无缝衔接的光电神经元提供了理想平台。

光电子神经元的发展带来了低功耗、高效率等优点,拓展了电子神经元在光电神经形态计算和视觉功能模拟中的应用。尽管有这些潜在的好处,但由于光电神经元复杂的动态行为,其研究相对较少。2020年,Wang 等^[99]设计了基于 WSe₂/h-BN/Al₂O₃ 异质结的器件来模拟视网膜中的神经元功能,特别是双极细胞和光感受器。图 8(a)展示了生物视网膜中 ON/OFF 双极细胞的膜电位响应机制。ON 双极细胞在暗态时因谷氨酸持续释放而超极化,光照时谷氨酸释放被抑制、离子通道开放导致去极化(膜电位上升);OFF 双极细胞则相反,暗态时谷氨酸结合使离子通道开放而去极化,光照时谷氨酸释放被抑制、离子通道关闭导致超极化(膜电位下降)。图 8(b)展示了 WSe₂/h-BN/Al₂O₃ 器件的 ON/OFF 光电响应特性及其工作机制。零栅压时,光照激发 WSe₂ 产生电子-空穴对使源漏电流增加,实现正光电响应来模拟 ON 双极细胞的去极化;负栅压时,光照激发 h-BN 中的缺陷电子在垂直电场作用下向上迁移,滞留的正电荷缺陷屏蔽栅压电场从而抑制 WSe₂ 沟道导电,

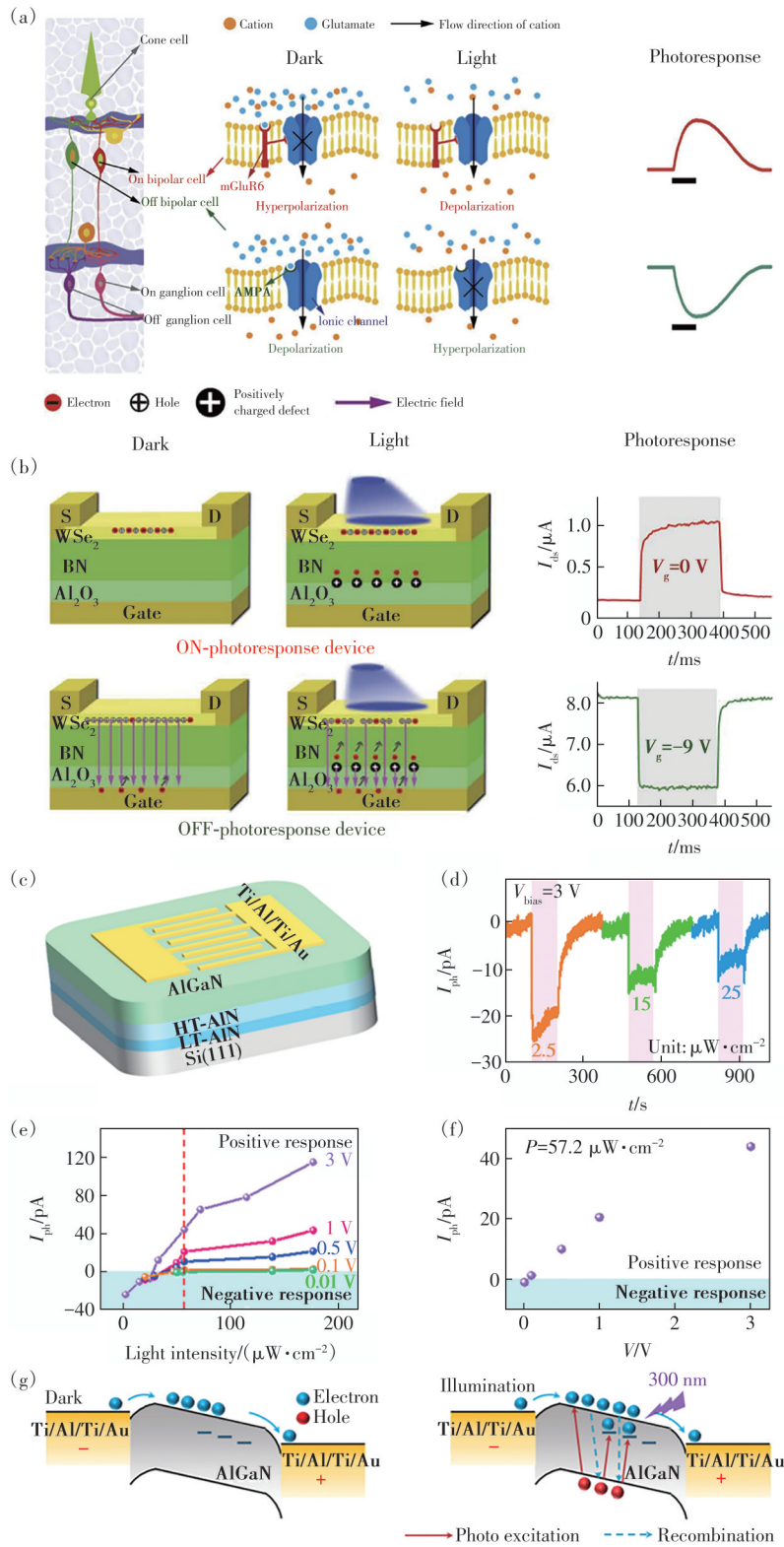


图 8 光电神经元器件。(a)ON 和 OFF 双极细胞的生物学工作机制^[99];(b)ON 和 OFF 光响应器件的工作机理^[99];(c)Al-GaN 紫外光电探测器示意图^[100];(d)低光强下负向光电导效应^[100];(e)不同偏置电压下光电流与光强的关系^[100];(f)光电流与偏置电压的关系^[100];(g)在黑暗中和在 300 nm 低光强下的能带图^[100]

Fig. 8 Optoelectronic neuron devices. (a)Biological mechanism of ON and OFF bipolar cells^[99]. (b)Operating mechanism of ON and OFF devices^[99]. (c)Schematic of the AlGaN ultraviolet photodetector^[100]. (d)Negative photoconductivity effect at lower light intensities^[100]. (e)Photocurrent as a function of light intensity at different bias voltages. (f)Photocurrent as a function of bias voltage^[100]. (g)Energy band diagrams in dark and 300 nm illumination^[100]

使源漏电流减少,实现负光电响应来模拟 OFF 双极细胞的超极化。

Dai 等^[100]在 2025 年提出了一种用于神经形态计算的双极 AlGaIn 紫外光探测器,如图 8(c)所示。该 AlGaIn 光电探测器模拟了神经元的双极性激活与抑制功能。图 8(d)所示是该器件在 $2.5\sim 25\ \mu\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$ 的阶梯式弱光照射下,均呈现负光电导响应,且响应幅度随光强增加而减小。在图 8(e)、(f)中,通过光电竞争机制,在低光强下表现为负光电导,在高光强或高偏压下转变为正光电导,同时具备阈值整合特性,可以自动区分信号与噪声,实现视网膜层面的神经形态预处理。双极性响应机理源于光生载流子产生与陷阱辅助复合的竞争,当 300 nm 紫外光照射时,光子激发产生电子-空穴对,同时沟道内高密度的电子陷阱俘获光生电子,光生空穴则与沟道自由电子复合导致载流子浓度降低;在低光强或低偏压下,陷阱俘获效应主导表现为负光电导,在高光强或高偏压下光生载流子产生占主导,从而表现为正光电导,如图 8(g)所示。

5 氮化物光电神经形态器件的应用

氮化物光电神经形态器件高速、低功耗、存算一体等特性,结合其材料体系特有的紫外波段光谱选择性、卓越的环境稳定性及多物理场敏感性,使其具备广阔的应用前景,有望为下一代智能感知、边缘计算及极端环境信息处理开辟一系列独具特色的技术路径^[101-102]。

5.1 人工视觉

在成功模拟生物突触与神经元之后,氮化物光电神经形态器件最直接且最具特色的应用在于新型人工视觉系统。受生物视觉系统“感算一体”启发,氮化物器件能直接在传感器端对光信息进行并行、高效的预处理与特征提取。Seo 等^[72]在 2018 年制备了一种基于 h-BN/WSe₂ 范德华异质结的光电突触,实现光学传感与神经突触功能的单片集成,如图 9(a)所示。该器件可模拟人眼细胞的波长选择性响应(图 9(b))。图 9(c)中,通过构建光学神经网络,实现了彩色及混色图案的准确识别。将光信号直接映射为突触权重更新,在单一器件内完成从光感知到神经形态计算的全流程处理,相比传统分离式传感-计算架构,显著提升了能效与识别精度(>90%),如图 9(d)所示。该器件有望为自动驾驶、机器人视觉、边缘计算等场

景中的低功耗实时视觉感知与处理提供硬件基础。

Hong 等^[71]在 2022 年提出了一种基于 AlGaIn/GaN 异质结的光电晶体管。图 9(e)展示了基于该视觉传感器硬件卷积核的图像预处理效果,通过对比“反转”、“OFF 感受野”和“浮雕”三种操作的计算机模拟结果、即时实验结果以及 200 s 后的实验结果,证明该器件能够实现可编程的图像风格化处理,且硬件输出与理论模拟高度吻合,同时利用其非易失性存储特性使处理后的图像信息可保持 200 s 以上不丢失。神经网络在不到 50 个训练周期内即可达到接近 100% 的识别准确率,而纯软件卷积核的识别率仅维持在约 32% 且难以提升(图 9(f)),从而为感存算一体化的神经形态视觉系统提供了可靠的硬件基础。

此外,研究人员在 AlGaIn/GaN 异质结^[50,86]、Graphene/h-BN/CsPbBr₃ 量子点^[60]、WSe₂/GaN 异质结^[77]、AlGaIn/GaN 异质结^[82]、GaN 纳米线^[93]、GaIn^[95]、InSe/GaN 异质结^[97]等光电神经形态器件中也实现了类似的图像边缘增强、去噪、对比度增强、识别等功能。

在动态视觉信息处理方面,氮化物光电神经形态器件展现出了超越传统帧式相机的独特优势,尤其适用于运动检测与动态场景分析。Zhang 等^[73]在 2022 年提出了一种 BP/Al₂O₃/WSe₂/h-BN 异质结神经形态器件。图 10(a)展示了该器件结构,光信号感知对应视网膜感光细胞功能,可编程的正/负非易失光电导(PPC/NPC)模拟双极细胞。图 10(b)展示了器件对三色移动手推车的运动检测与识别性能,随着帧差时间 Δt 增加(33.3→66.7→133.3 ms),红绿蓝三色手推车逐渐实现 100% 分离检测且无鬼影。构建了含 10%~90% 噪声水平的检测图像数据库,通过电导映射的卷积神经网络进行训练,在 10% 噪声下仅需 4 个周期即可达到 90% 以上的识别精度(图 10(c))。

5.2 逻辑运算

氮化物光电器件另一类关键应用为逻辑运算。Feng 等^[96]在 2023 年设计了一种 GaIn/Ga₂O₃/GaN 双异质结人工突触,通过调控紫外光波长(254 nm/365 nm)和光功率密度,在单一器件上实现了可重构的光逻辑运算功能。弱光条件下

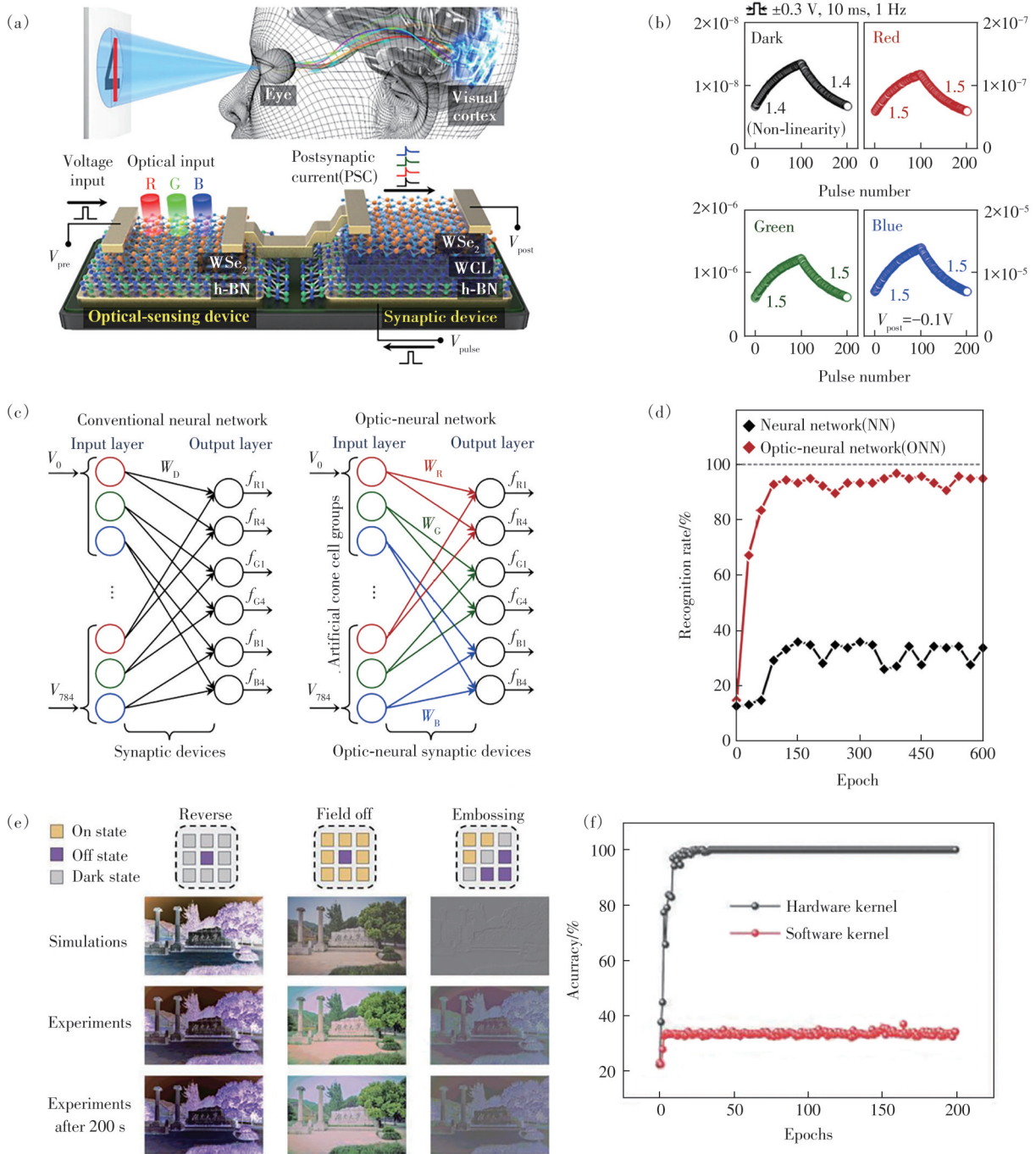


图9 静态图像的识别与处理。(a)h-BN/WSe₂视神经突触示意图^[72]; (b)不同光照条件下的LTP和LTD行为^[72]; (c)用于识别28×28 RGB彩色图像的光学神经网络^[72]; (d)网络识别率^[72]; (e)三种图像预处理操作^[71]; (f)基于硬件和软件卷积核的图像识别精度^[71]

Fig.9 Recognition and processing of static images. (a)Schematic illustration of the h-BN/WSe₂ optic-neural synaptic device. (b) LTP and LTD behaviors under different illumination conditions. (c) Optical neural networks for recognition of 28×28 RGB images. (d)Recognition rate as a function of number of training epochs. (e)Image preprocessing under three different operations^[71]. (f)Image recognition accuracy based on hardware and software kernels^[71]

利用 365 nm 光响应微弱而 254 nm 光响应强的特性完成 AND 逻辑运算, 强光条件下通过增强 365 nm 光响应实现 OR 逻辑运算, 如图 11(a)、(b)所示。

Xie 等^[55]在 2024 年基于 GaN/AlScN 异质结构制备了光电忆阻器, 实现了“IMP”和“False”两种基本逻辑运算。图 11(c)为三种工作模式(电-电(E-E)、光-电(O-E)和光-光(O-O))下器件电路结构, 通过

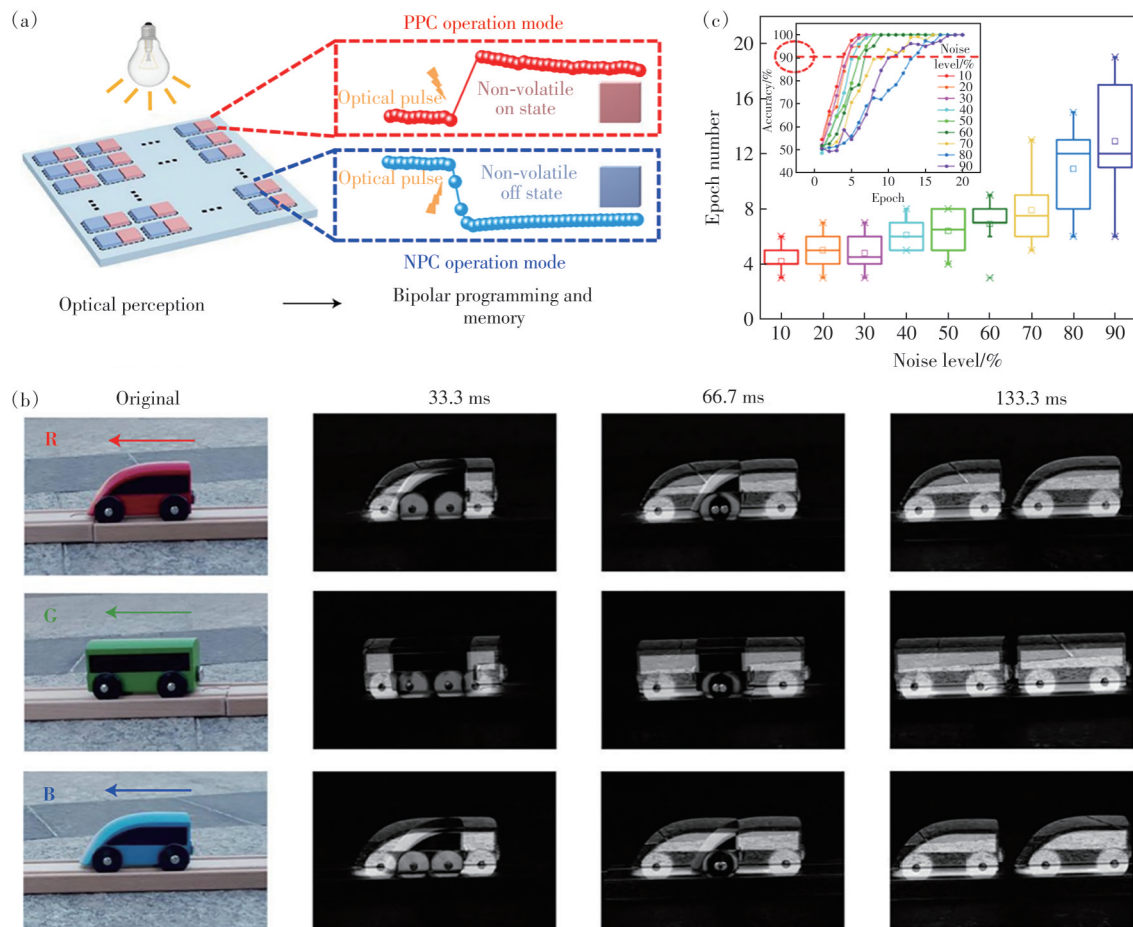


图 10 运动物体的检测和识别。(a)受视网膜启发的视网膜神经形态器件^[73];(b)在不同帧差时间下,对三原色小车进行运动检测^[73];(c)在不同噪声水平下,小车识别准确率超过90%所需训练周期数的统计分布。插图显示了不同噪声下的识别准确率^[73]

Fig.10 Detection and recognition of moving objects. (a) Retina-inspired all-in-one 2D retinomorphic devices^[73]. (b) Motion detection of trichromatic trolleys at different frame differences^[73]. (c) Statistical distribution of the needed epoch number with trolley recognition accuracy above 90% for various noise levels. The inset shows the recognition accuracy at different noise levels^[73]

外部电阻 S 与忆阻器 p 、 q 的电压分压实现“IMP”和“False”运算。图 11(d)为器件 p 和 q 在暗态及光照条件下的正向 $I-V$ 曲线,用于确定“IMP”运算的条件电压(5.5 V)、置位电压(7.0 V)、复位电压(-10 V)及读取电压(5.0 V)等关键参数。图 11(e)为三种工作模式下“IMP”和“False”的完整真值表,验证了当 p 为“0”时输出恒为“1”、 p 为“1”且 q 为“0”时输出为“0”的“IMP”逻辑特性,以及强制清零的“False”功能,证明该器件可通过电、光或光电混合方式实现逻辑运算,为感存算系统提供了灵活的硬件基础。此外,Kai等^[51]在 $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}$ 异质结中也实现了逻辑运算功能。

5.3 生物电信号识别

神经形态计算在生物电信号识别中的应用

是指利用类似生物神经网络结构与功能的硬件系统,对心电图、脑电图、肌电图等生理电信号进行低功耗、高效率的实时处理与模式识别,从而自动识别异常波形特征(如心律失常、癫痫发作),为可穿戴健康监测、植入式医疗设备和即时诊断系统提供硬件级智能解决方案。Oh等^[58]在2021年提出了一种基于 $\text{MoS}_2/\text{h-BN}$ 异质结的人工突触,通过光脉冲与电脉冲的协同刺激实现了权重双向调控。该器件可应用于智能医疗诊断系统,特别是通过图 12(a)中的硬件神经网络实现心电图(ECG)信号的实时自动分类,如图 12(b)所示。利用其高动态范围(>384)和低非对称性(<3.9)的优异突触特性,建立了光电突触神经网络对600个测试样本的心电图分类混淆矩

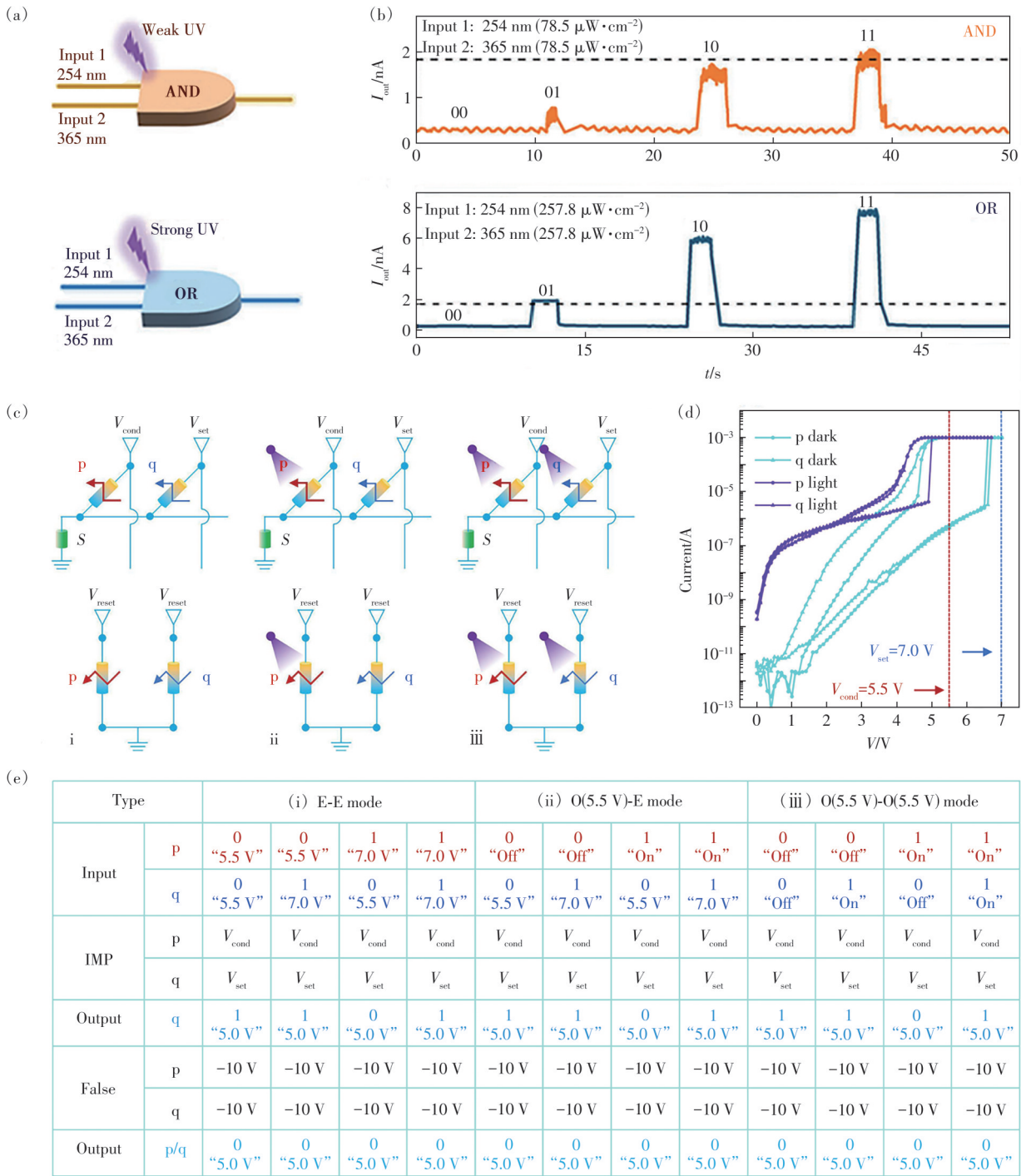


图 11 逻辑运算。(a)“AND”和“OR”逻辑功能示意图^[96];(b)“AND”门和“OR”门对不同光输入组合的光电响应^[96];(c)分别以 E-E、O-E 和 O-O 模式写入的“IMP”和“False”逻辑操作示意图^[55];(d)正向偏置下器件 p 和 q 在黑暗和光照下的 $I-V$ 曲线^[55];(e)不同工作模式下的逻辑运算及对应的真值表^[55]

Fig.11 Logical operations. (a)Schematic diagrams of “AND” and “OR” gates^[96]. (b)Photoreponses of “AND” and “OR” gates to different light input combinations. (c)Schematic illustration of “IMP” and “False” operations under E-E, O-E, and O-O modes^[55]. (d) $I-V$ curves of devices p and q in dark and illumination under forward bias^[55]. (e) Logic functions and corresponding truth tables under different working modes^[55]

阵,如图 12(c)所示。该器件能够以 96.1% 的准确率识别五种不同类型的心跳波形(正常、室上性早搏、室性早搏、融合搏动和无法分类搏动)

(图 12(d)),为可穿戴心脏监测设备和边缘计算辅助诊断提供了低功耗、高可靠性的神经形态计算硬件基础。

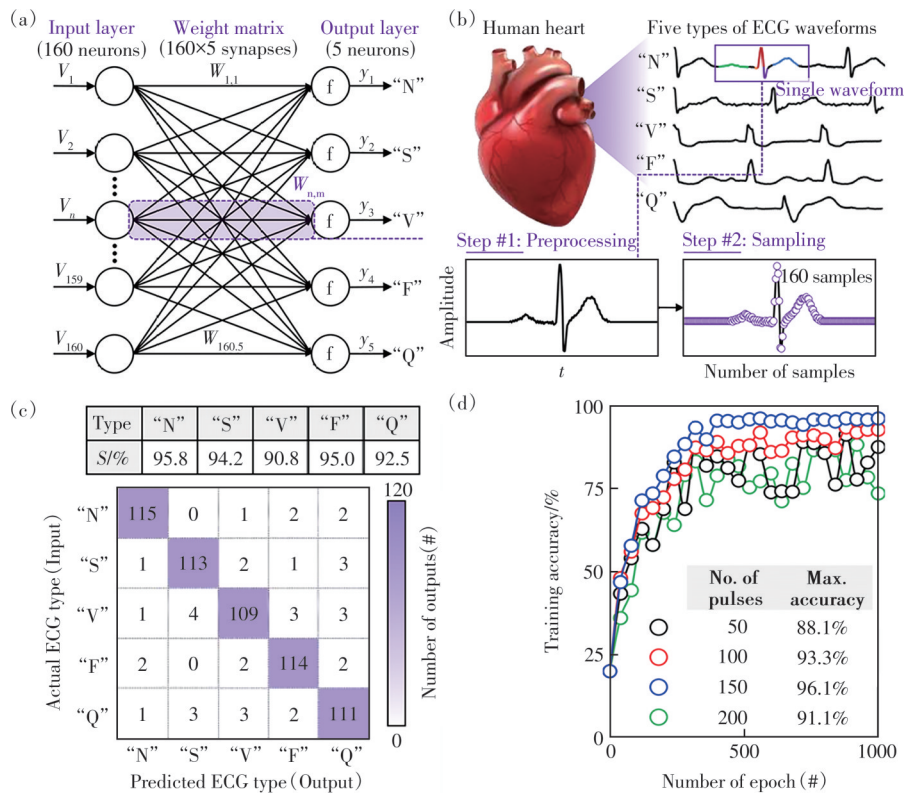


图 12 生物电信号识别。(a) 160×5 单层神经网络示意图^[58]; (b) 五种类型的心电波形及训练和测试数据集的采集过程^[58]; (c) 600 个测试数据集中心跳类型分类的混淆矩阵^[58]; (d) 训练精度随脉冲数目的变化^[58]

Fig.12 Recognition of bioelectric signals. (a) Schematic illustration of the designed 160×5 single-layer neural network^[58]. (b) Five types of ECG waveforms and collecting processes of training and testing datasets^[58]. (c) Confusion matrix of heart-beat type classification across 600 test datasets^[58]. (d) Training accuracy for different pulse numbers^[58]

6 总结与展望

氮化物半导体凭借其带隙可调范围宽、电子迁移率高、强极化诱导二维电子气以及优异的光电与热稳定性等本征物理优势,已成为实现高性能光电神经形态器件最具竞争力的材料体系之一。本文系统回顾了该领域从材料基础到功能器件,再到系统应用的完整进展链条。在器件层面,基于氮化物的光电忆阻器利用缺陷工程实现了低能耗的权重调制;而光电晶体管(特别是 AlGaIn/GaN 异质结晶体管)则以其灵活的多端调控和高速响应,成为实现复杂突触可塑性和感存算一体功能的平台。光电神经元的探索则为构建完整的脉冲处理系统奠定了基础。在应用层面,氮化物器件展现出在紫外波段感算一体、动态视觉处理、多模态融合感知及极端环境计算等方面的独特潜力,为实现超越传统冯·诺依曼架构的高能效、实时性智能处理提供了新的硬件路径。

尽管进展显著,该领域从实验室走向实际应

用仍面临系列核心挑战:大规模阵列的均匀性、可靠性以及 AlScN 等新型材料的可控生长与集成亟待突破;高效光电混合集成方案、专用的脉冲神经网络架构以及匹配硬件非理想性的训练算法尚属空白;对器件动态行为的精确建模和多物理场耦合机制的理解仍需深入探究。氮化物光电神经形态器件的研究需要沿以下方向发展。

(1) 材料创新与异质融合:在材料层面,除了传统的 GaN、AlN 及其合金,高 Sc 组分的 AlScN 铁电相正成为备受关注的新兴材料。其兼具强铁电极化(可实现非易失、低功耗权重更新)与高压电系数(提供多物理场调控新维度),为构建超越传统电荷俘获机制的超低能耗突触与神经元器件开辟了新路径。在异质融合层面,应进一步拓展视野,探索氮化物与氧化物、硫化物及其他功能材料体系的复合集成。氧化物材料(如 HfO₂、ZnO、TiO₂等)凭借其丰富的离子/缺陷动力学和高介电常数,可在氮化物器件中作为阻变功能层、栅介质或电荷俘获层,实现光电协同调控下的多态存储

与低功耗权重更新。硫化物体系(如 MoS_2 、 ReS_2 等二维过渡金属硫化物)则以其原子级厚度、可调带隙及强光-物质相互作用,为氮化物器件赋予高效宽带光吸收、浮栅存储节点等附加功能。通过合理的能带与界面工程设计,这些异质结构可实现“氮化物高速运输和氧化物多态存储加硫化物高效感知”的协同增效。与此同时,与硅基CMOS工艺的异质集成已具备成熟技术基础,未来可通过三维单片集成或芯片级异构集成,将氮化物光电神经阵列与硅基数字控制、存储及学习算法单元深度融合,构建兼顾高性能前端感知处理与灵活后端计算控制的混合架构系统。

(2)器件机制深化与功能集成:在机制层面,研究将从基本的突触可塑性向更复杂的生物仿生功能演进。通过利用多栅极结构模拟树突的局部非线性整合能力,借助不同能级缺陷的共存实现多时间尺度可塑性的协同调控,并在硬件层面实现频率依赖、脉冲模式依赖等高级学习规则,使器件行为更逼近生物真实性。在功能层面,重点在于感存算一体的深度集成与全光控器件^[24, 25, 103-106]的探索。利用氮化物兼具光感知、电调制与非易失存储的本征优势,可在单芯片上集成突触阵列与神经元电路,构建面向特定应用的紧凑型感算系统。全光控神经形态器件——即器件的写入、擦除均由光信号完成,无需任何电学信号调控。其优势在于实现超高速、超低功耗的信息传输与处理,避免电学互连带来的串扰与热耗散。

(3)系统架构与应用场景突破:在系统架构层

面,推动氮化物光电神经形态器件从单器件到中等规模光电神经形态阵列的跨越,这要求在器件一致性、良率与串扰抑制等工程化问题上取得突破。通过构建小型交叉阵列或脉冲神经网络硬件原型,可验证其在真实计算任务中的处理能力。与之配套的算法与工具链开发同样关键:现有的深度学习框架难以直接适配光电脉冲神经元的行为特性,亟需发展面向硬件非理想性(如权重更新非线性、噪声)的训练算法、网络架构及自动化设计工具,实现软件算法与硬件特性的协同优化。在应用场景层面,氮化物器件的独特物理优势将引领其在多个前沿领域开展原型验证:利用日盲紫外的低背景噪声特性,构建用于火焰预警、电晕放电监测及紫外光通信的感算一体系统,实现从信号感知到识别的零延迟处理;凭借氮化物器件的纳秒级响应速度,探索其在光脉冲驱动的片上/片间互连中的应用,构建低延迟、高带宽的光-电混合计算架构。

总之,氮化物光电神经形态器件正处在一个从原理验证走向功能集成的关键阶段。通过材料、器件、电路与算法多学科的深度融合与协同创新,这一领域有望为实现下一代高能效、高智能的感知与计算系统贡献不可替代的硬件解决方案。

本文专家审稿意见及作者回复内容的下载地址:
<http://cjl.lightpublishing.cn/thesisDetails#10.37188/CJL.20260057>

参 考 文 献:

- [1] VON NEUMANN J. First draft of a report on the EDVAC [J]. *IEEE Ann. Hist. Comput.*, 1993, 15(4): 27-75.
- [2] YANG Y, QIN J R, LEI J, *et al.* Research status and challenges on the sustainable development of artificial intelligence courses from a global perspective [J]. *Sustainability*, 2023, 15(12): 9335.
- [3] DU W W, LI S, WANG Z S. Research on the human brain, the external brain and the public external brain [J]. *J. Phys. Conf. Ser.*, 2019, 1168(3): 032053.
- [4] MEAD C. Neuromorphic electronic systems [J]. *Proc. IEEE*, 1990, 78(10): 1629-1636.
- [5] LIU H T, HUA Q L, YU R M, *et al.* A bamboo-like gan microwire-based piezotronic memristor [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2016, 26(29): 5307-5314.
- [6] DUAN H, CHENG S Q, QIN L, *et al.* Low-power memristor based on two-dimensional materials [J]. *J. Phys. Chem. Lett.*, 2022, 13(31): 7130-7138.
- [7] KWON O, LEE Y, KANG M, *et al.* Synaptic plasticity features and neuromorphic system simulation in AlN-based memristor devices [J]. *J. Alloys Compd.*, 2022, 911: 164870.
- [8] DAI X H, HUA Q L, JIANG C S, *et al.* Artificial synapse based on a tri-layer AlN/AlScN/AlN stacked memristor for neuromorphic computing [J]. *Nano Energy*, 2024, 124: 109473.

- [9] DU S, YANG W Q, GAO H Y, *et al.* Sliding memristor in parallel-stacked hexagonal boron nitride [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(35): 2404177.
- [10] LIU M R, LU S P, JIA Y P, *et al.* AlScN/n-GaN ferroelectric memristors with controllable on/off ratios and reversible bipolar resistive switching characteristics [J]. *IEEE Electron Device Lett.*, 2024, 45(3): 356-359.
- [11] WANG S B, LIU X H, YU H, *et al.* Transfer-free analog and digital flexible memristors based on boron nitride films [J]. *Nanomaterials*, 2024, 14(4): 327.
- [12] ZHOU H, ZHANG C Q, ZHANG K, *et al.* High power density gallium nitride radio frequency transistors *via* enhanced nucleation in heteroepitaxy [J]. *Nat. Commun.*, 2026, 17: 556.
- [13] MOSTUFA S, ZENG M X, WU K. Non-traditional granular magnetoresistive devices: a short review [J]. *Nanoscale*, 2026, 18(9): 4568-4580.
- [14] LE GALLO M, KREBS D, ZIPOLI F, *et al.* Collective structural relaxation in phase-change memory devices [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2018, 4(9): 1700627.
- [15] WANG D, WANG P, MONDAL S, *et al.* Ultrathin nitride ferroic memory with large ON/OFF ratios for analog in-memory computing [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(20): 2210628.
- [16] CHEN B J, ZENG M G, KHOO K H, *et al.* Spintronic devices for high-density memory and neuromorphic computing—A review [J]. *Mater. Today*, 2023, 70: 193-217.
- [17] WANG Y, YIN L, HUANG W, *et al.* Optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing [J]. *Adv. Intell. Syst.*, 2021, 3(1): 2000099.
- [18] SUN Y L, DING Y T, XIE D. Mixed-dimensional van der Waals heterostructures enabled optoelectronic synaptic devices for neuromorphic applications [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(47): 2105625.
- [19] LIU X, WANG D H, CHEN W, *et al.* Optoelectronic synapses with chemical-electric behaviors in gallium nitride semiconductors for biorealistic neuromorphic functionality [J]. *Nat. Commun.*, 2024, 15(1): 7671.
- [20] DONG H J, JIN K X, LUO B C. Optoelectronic neuro-synaptic behaviors of antiferroelectric NaNbO₃/n-GaN heterostructures [J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2025, 23(6): 062502.
- [21] GHOSH A, GHOSH D K, ANAND N, *et al.* Optoelectronic InGaN neuromorphic synapse for artificial intelligence applications [C]. *2025 Photonics North, Ottawa, 2025: 1-2.*
- [22] ZHOU Z Y, WANG L L, LIU G J, *et al.* A facile photonics reconfigurable memristor with dynamically allocated neurons and synapses functions [J]. *Light Sci. Appl.*, 2025, 14(1): 269.
- [23] LIN Y H, WANG W X, LI R L, *et al.* Multifunctional optoelectronic memristor based on CeO₂/MoS₂ heterojunction for advanced artificial synapses and bionic visual system with nociceptive sensing [J]. *Nano Energy*, 2024, 121: 109267.
- [24] HU L X, YANG J, WANG J R, *et al.* All-optically controlled memristor for optoelectronic neuromorphic computing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(4): 2005582.
- [25] 单海, 应宏微, 程培红, 等. 氧化物全光控突触研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(2): 245-259.
SHAN H, YING H W, CHENG P H, *et al.* Advances in all-optically controlled oxide synapses [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(2): 245-259. (in Chinese)
- [26] HU L X, ZHUGE X, WANG J R, *et al.* Emerging optoelectronic devices for brain-inspired computing [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2025, 11(3): 2400482.
- [27] 张晴怡, 杨羽欣, 刘凯, 等. ZnO 基器件中的负光电导特性研究 [J]. *发光学报*, 2025, 46(4): 582-596.
ZHANG Q Y, YANG Y X, LIU K, *et al.* Negative photoconductivity in ZnO devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(4): 582-596. (in Chinese)
- [28] 刘凯, 张晴怡, 廖延安, 等. 光电器件中的负光电导效应及应用 [J]. *发光学报*, 2024, 45(2): 317-333.
LIU K, ZHANG Q Y, LIAO Y A, *et al.* Negative photoconductivity and its applications in optoelectronic devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2024, 45(2): 317-333. (in Chinese)
- [29] 史佳娟, 单旋宇, 王中强, 等. 氧化锌基忆阻器件研究进展 [J]. *发光学报*, 2025, 46(5): 753-769.
SHI J J, SHAN X Y, WANG Z Q, *et al.* Recent progress in ZnO-based memristive devices [J]. *Chin. J. Lumin.*, 2025, 46(5): 753-769. (in Chinese)
- [30] SHI Z W, WANG W S, AI L, *et al.* Non-associative learning behavior in mixed proton and electron conductor hybrid pseudo-diode [J]. *J. Mater. Sci. Technol.*, 2023, 160: 204-213.

- [31] YANG Y, LI H T, HUA Q L. III-nitride memristors: materials, devices, and applications [J]. *Mater. Futures*, 2025, 4(3): 032701.
- [32] BEN J W, LIU X K, WANG C, *et al.* 2D III-nitride materials: properties, growth, and applications [J]. *Adv. Mater.*, 2021, 33(27): 2006761.
- [33] ZHANG Y, HUANG Z H, JIANG J. Emerging photoelectric devices for neuromorphic vision applications: principles, developments, and outlooks [J]. *Sci. Technol. Adv. Mater.*, 2023, 24(1): 2186689.
- [34] LEE M, NAM S, CHO B, *et al.* Accelerated learning in wide-band-gap AlN artificial photonic synaptic devices: impact on suppressed shallow trap level [J]. *Nano Lett.*, 2021, 21(18): 7879-7886.
- [35] TRAN M D, KIM H, KIM J S, *et al.* Two-terminal multibit optical memory *via* van der Waals heterostructure [J]. *Adv. Mater.*, 2019, 31(7): 1807075.
- [36] ROGALSKI A, WANG F, WANG J, *et al.* The perovskite optoelectronic devices—a look at the future [J]. *Small Methods*, 2025, 9(1): 2400709.
- [37] WANG W, PANIN G N, FU X, *et al.* MoS₂ memristor with photoresistive switching [J]. *Sci. Rep.*, 2016, 6: 31224.
- [38] PATIL J, B S, DIVYASHREE P, *et al.* WS₂ based optoelectronic memristor as artificial synapse: integrated neuromorphic computing solution for Braille alphabet recognition [J]. *Opt. Mater.*, 2025, 167: 117346.
- [39] WANG Z X, WANG G D, LIU X T, *et al.* Two-dimensional wide band-gap nitride semiconductor GaN and AlN materials: properties, fabrication and applications [J]. *J. Mater. Chem. C*, 2021, 9(48): 17201-17232.
- [40] LEGESSE M, RASHKEEV S N, SAIDAOUI H, *et al.* Band gap tuning in aluminum doped two-dimensional hexagonal boron nitride [J]. *Mater. Chem. Phys.*, 2020, 250: 123176.
- [41] KUDRAWIEC R, HOMMEL D. Bandgap engineering in III-nitrides with boron and group V elements: toward applications in ultraviolet emitters [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2020, 7(4): 041314.
- [42] FAHY S, O'REILLY E P. Theory of electron mobility in dilute nitride semiconductors [J]. *Phys. E*, 2004, 21(2-4): 881-885.
- [43] DUAN X F, SONG Y S, SHI Y N, *et al.* Lattice thermal conductivity of monolayer III-V subgroup of nitrides: from BN to TIN [J]. *Comput. Mater. Sci.*, 2025, 258: 113987.
- [44] WANG P, WANG D, MONDAL S, *et al.* Dawn of nitride ferroelectric semiconductors: from materials to devices [J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 2023, 38(4): 043002.
- [45] XU B Q, CAI Y, WANG Z K, *et al.* CMOS-compatible ScAlN ferroelectric thin films with enhanced polarization for high-performance FeFET memory and artificial synapses [J]. *Small Methods*, 2026, 10(2): 2500842.
- [46] KIM M H, KIM S, BANG S, *et al.* Pulse area dependent gradual resistance switching characteristics of CMOS compatible SiN_x-based resistive memory [J]. *Solid-State Electron.*, 2017, 132: 109-114.
- [47] CHEN Y Q, YU J, ZHUGE F W, *et al.* An asymmetric hot carrier tunneling van der Waals heterostructure for multibit optoelectronic memory [J]. *Mater. Horiz.*, 2020, 7(5): 1331-1340.
- [48] SONG S B, YOON S, KIM S Y, *et al.* Deep-ultraviolet electroluminescence and photocurrent generation in graphene/hBN/graphene heterostructures [J]. *Nat. Commun.*, 2021, 12(1): 7134.
- [49] CHANG K C, FENG X B, DUAN X Q, *et al.* Integrating ultraviolet sensing and memory functions in gallium nitride-based optoelectronic devices [J]. *Nanoscale Horiz.*, 2024, 9(7): 1166-1174.
- [50] CHANG K C, LIU H B, DUAN X Q, *et al.* Optoelectronic dual-synapse based on wafer-level GaN-on-Si device incorporating embedded SiO₂ barrier layers [J]. *Nano Energy*, 2024, 125: 109564.
- [51] KAI C H, WANG Y, LIU X P, *et al.* AlGaIn/GaN-based optoelectronic synaptic devices for neuromorphic computing [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2023, 11(7): 2202105.
- [52] ZHANG Y L, HUANG Y W, HUANG C Y, *et al.* Plasma-engineered AlGaIn/GaN optoelectronic synapses for low-power neuromorphic computing [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(13): 2403370.
- [53] PARK W, CHAE H, PARK J, *et al.* AlSeN-based ferroelectric memristor for electrical synapse emulation and light-stimulated reservoir computing [J]. *J. Chem. Phys.*, 2025, 163(23): 234707.
- [54] RAO D, PILLAI A I K, GARBRECHT M, *et al.* Scandium nitride as a gateway III-nitride semiconductor for both excitatory and inhibitory optoelectronic artificial synaptic devices [J]. *Adv. Electron. Mater.*, 2022, 9(3): 2200975.
- [55] XIE Z W, JIANG K, ZHANG S L, *et al.* Nonvolatile and reconfigurable two-terminal electro-optic duplex memristor

- based on III-nitride semiconductors [J]. *Light Sci. Appl.*, 2024, 13(1): 78.
- [56] BALUBAID M, TAYLAN O, YILMAZ M T, *et al.* Central nervous system: overall considerations based on hardware realization of digital spiking silicon neurons (DSSNs) and synaptic coupling [J]. *Mathematics*, 2022, 10(6): 882.
- [57] MA J. Biological neurons to neural circuit, review from physical perspective [J]. *Nonlinear Dyn.*, 2025, 113(19): 25365-25387.
- [58] OH S, LEE J J, SEO S, *et al.* Photoelectroactive artificial synapse and its application to biosignal pattern recognition [J]. *npj 2D Mater. Appl.*, 2021, 5(1): 95.
- [59] WANG W X, GAO S, LI Y, *et al.* Artificial optoelectronic synapses based on $\text{TiN}_x\text{O}_{2-x}/\text{MoS}_2$ heterojunction for neuromorphic computing and visual system [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2021, 31(34): 2101201.
- [60] HAN C, HAN X W, HAN J Y, *et al.* Light-stimulated synaptic transistor with high PPF feature for artificial visual perception system application [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2022, 32(22): 2113053.
- [61] HUA X Y, ZHENG J Y, HAN X, *et al.* Artificial optoelectronic synapse with nanolayered GaN/AlN periodic structure for neuromorphic computing [J]. *ACS Appl. Nano Mater.*, 2023, 6(10): 8461-8467.
- [62] VASHISHTHA P, ABIDI I H, GIRIDHAR S P, *et al.* CVD-grown monolayer MoS_2 and GaN thin film heterostructure for a self-powered and bidirectional photodetector with an extended active spectrum [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2024, 16(24): 31294-31303.
- [63] CHUA L. Memristor-the missing circuit element [J]. *IEEE Trans. Circuit Theory*, 1971, 18(5): 507-519.
- [64] STRUKOV D B, SNIDER G S, STEWART D R, *et al.* The missing memristor found [J]. *Nature*, 2008, 453(7191): 80-83.
- [65] HAN X R, MO Y H, WANG Y B, *et al.* Amorphous $\text{Ga}_2\text{O}_3/\text{GaN}$ heterostructure for ultralow-energy-consumption optically stimulated synaptic devices [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2024, 124(1): 013502.
- [66] XIE Z W, JIANG K, ZHANG S L, *et al.* Ultraviolet optoelectronic synapse based on AlScN/p-i-n GaN heterojunction for advanced artificial vision systems [J]. *Adv. Mater.*, 2025, 37(19): 2419316.
- [67] DIORIO C, HASLER P, MINCH B A, *et al.* A single-transistor silicon synapse [J]. *IEEE Trans. Electron Devices*, 1996, 43(11): 1972-1980.
- [68] ZHU L Q, XIAO H, LIU Y H, *et al.* Multi-gate synergic modulation in laterally coupled synaptic transistors [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2015, 107(14): 143502.
- [69] TSAI M Y, HUANG C T, LIN C Y, *et al.* A reconfigurable transistor and memory based on a two-dimensional heterostructure and photoinduced trapping [J]. *Nat. Electron.*, 2023, 6(10): 755-764.
- [70] LI X Q, SUN H Z, GE M, *et al.* Optically tunable synaptic transistors based on AlGaN/GaN heterostructure for neuromorphic vision processing [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127(21): 213301.
- [71] HONG X T, HUANG Y L, TIAN Q L, *et al.* Two-dimensional perovskite-gated AlGaN/GaN high-electron-mobility-transistor for neuromorphic vision sensor [J]. *Adv. Sci.*, 2022, 9(27): 2202019.
- [72] SEO S, JO S H, KIM S, *et al.* Artificial optic-neural synapse for colored and color-mixed pattern recognition [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9: 5106.
- [73] ZHANG Z H, WANG S Y, LIU C S, *et al.* All-in-one two-dimensional retinomorphic hardware device for motion detection and recognition [J]. *Nat. Nanotechnol.*, 2022, 17(1): 27-32.
- [74] XIANG D, LIU T, XU J L, *et al.* Two-dimensional multibit optoelectronic memory with broadband spectrum distinction [J]. *Nat. Commun.*, 2018, 9(1): 2966.
- [75] CHOI H H, PARK J, HUH S, *et al.* Photoelectric memory effect in graphene heterostructure field-effect transistors based on dual dielectrics [J]. *ACS Photonics*, 2018, 5(2): 329-336.
- [76] FRYDENDAHL C, INDUKURI S R K C, GRAJOWER M, *et al.* Graphene photo memtransistor based on CMOS flash memory technology with neuromorphic applications [J]. *ACS Photonics*, 2021, 8(9): 2659-2665.
- [77] SU Z J, YAN Y, SUN M R, *et al.* Broadband artificial tetrachromatic synaptic devices composed of 2D/3D integrated WSe_2 -GaN-based dual-channel floating gate transistors [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2024, 34(33): 2316802.
- [78] YANG Z Y, HUO S D, ZHANG Z, *et al.* High-precision multibit opto-electronic synapses based on $\text{ReS}_2/\text{h-BN}/\text{graphene}$ heterostructure for energy-efficient and high-accuracy neuromorphic computing [J]. *Adv. Funct. Mater.*, 2025, 35(48): 2509119.
- [79] XIAO F, TAN D X, LUO Z D, *et al.* CMOS-compatible 2D semiconductor-nitride ferroelectric based optoelectronic

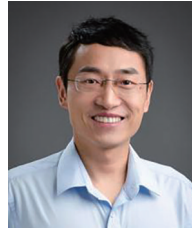
- memristive transistors for neuromorphic sensory computing and optical decoding [J]. *Sci. Bull.*, 2026, 71(2): 293-303.
- [80] YAN J B, SUN Z H, FANG L, *et al.* Light-stimulated artificial synapses with accelerating photopic adaption based on InN -nitride heterojunction transistor [J]. *ACS Photonics*, 2024, 11(10): 4161-4169.
- [81] YAN J B, CHU Z L, HUANG M Q, *et al.* Monolithic integration of GaN synapse and photodetector for bio-inspired adaptive vision [J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2025, 127(15): 153304.
- [82] ZHANG H C, LIANG F Z, YANG L, *et al.* Superior AlGaIn/GaN-based phototransistors and arrays with reconfigurable triple-mode functionalities enabled by voltage-programmed two-dimensional electron gas for high-quality imaging [J]. *Adv. Mater.*, 2024, 36(36): 2405874.
- [83] XU K, JIANG W, GAO X S, *et al.* Optical control of ferroelectric switching and multifunctional devices based on van der Waals ferroelectric semiconductors [J]. *Nanoscale*, 2020, 12(46): 23488-23496.
- [84] CHENG Y, ZHAO S G, ZHANG Q M, *et al.* High-performance optoelectronic memory based on the $\text{MoS}_2/\text{h-BN}/\text{InSe}$ van der Waals heterostructure [J]. *Optica*, 2025, 12(9): 1434-1441.
- [85] LI Q X, WANG T Y, FANG Y Q, *et al.* Ultralow power wearable organic ferroelectric device for optoelectronic neuromorphic computing [J]. *Nano Lett.*, 2022, 22(15): 6435-6443.
- [86] CHEN J X, DU H T, QU H L, *et al.* AlGaIn/GaN MOS-HEMT enabled optoelectronic artificial synaptic devices for neuromorphic computing [J]. *APL Mach. Learn.*, 2024, 2(2): 026113.
- [87] ZHAN T, SUN J W, LIN J, *et al.* Nanowatt-level optoelectronic GaN-based heterostructure artificial synaptic device for associative learning and neuromorphic computing [J]. *J. Semicond.*, 2025, 46(2): 022404.
- [88] CHEN J W, HUANG Y Q, WEN H, *et al.* High sensitivity optoelectronic artificial synapse based on GaN porous nanowire array for neuromorphic computing [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2025, 13(24): 01078.
- [89] YE Z Q, BAI J X, ZHANG H, *et al.* Light-induced artificial synapse integrated with AlGaIn quantum well DUV source for neuromorphic computing [J]. *J. Lightwave Technol.*, 2024, 42(22): 7882-7887.
- [90] ZHOU M, ZHAO Y K, GU X S, *et al.* Light-stimulated low-power artificial synapse based on a single GaN nanowire for neuromorphic computing [J]. *Photonics Res.*, 2023, 11(10): 1667-1677.
- [91] LIU X, WANG D H, CHEN W, *et al.* Gallium nitride nanowire array-based optoelectronic synapses for biorealistic neuromorphic functions [C]. *2025 IEEE Photonics Conference, Singapore, 2025*: 1-2.
- [92] ZHOU M, ZHAO Y K, GU X S, *et al.* Realize low-power artificial photonic synapse based on (Al, Ga)N nanowire/graphene heterojunction for neuromorphic computing [J]. *APL Photonics*, 2023, 8(7): 076107.
- [93] GAO Z X, JU X, YU H B, *et al.* Ultrathin gallium nitride quantum-disk-in-nanowire-enabled reconfigurable bioinspired sensor for high-accuracy human action recognition [J]. *Nanomicro Lett.*, 2025, 18(1): 54.
- [94] JI Y H, GAO Q, HUANG A P, *et al.* GaO_x/GaN nanowire arrays on flexible graphite paper with tunable persistent photoconductivity [J]. *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2021, 13(35): 41916-41925.
- [95] SUN X Y, WANG D H, WU X J, *et al.* Facile formation of van der Waals metal contact with InN -nitride semiconductors [J]. *Sci. Bull.*, 2024, 69(23): 3692-3699.
- [96] FENG S Y, LI J X, FENG L Z, *et al.* Dual-mode conversion of photodetector and neuromorphic vision sensor *via* bias voltage regulation on a single device [J]. *Adv. Mater.*, 2023, 35(49): 2308090.
- [97] MIAO X C, ZHANG Y N, LIN Y N, *et al.* Robust self-powered optoelectronic synapses based on epitaxial InSe/GaN heterojunction with interfacial charge-trapping layer [J]. *Adv. Opt. Mater.*, 2024, 12(19): 2400358.
- [98] 李宗晓, 胡令祥, 王敬蕊, 等. 氧化物神经元器件及其神经网络应用 [J]. *无机材料学报*, 2024, 39(4): 345-358.
Li Z X, HU L X, WANG J R, *et al.* Oxide neuron devices and their applications in artificial neural networks [J]. *J. Inorg. Mater.*, 2024, 39(4): 345-358. (in Chinese)
- [99] WANG C Y, LIANG S J, WANG S, *et al.* Gate-tunable van der Waals heterostructure for reconfigurable neural network vision sensor [J]. *Sci. Adv.*, 2020, 6: eaba6173.
- [100] DAI Y H, CHENG X H, HUANG Y W, *et al.* Bipolar AlGaIn ultraviolet photodetector for neuromorphic computing applications [J]. *IEEE Sens. J.*, 2025, 25(3): 4474-4480.
- [101] 沈柳枫, 胡令祥, 康逢文, 等. 光电神经形态器件及其应用 [J]. *物理学报*, 2022, 71(14): 148505.
SHEN L F, HU L X, KANG F W, *et al.* Optoelectronic neuromorphic devices and their applications [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2022, 71(14): 148505. (in Chinese)

- [102] 李策, 杨栋梁, 孙林锋. 基于二维层状材料的神经形态器件研究进展 [J]. 物理学报, 2022, 71(21): 218504.
LI C, YANG D L, SUN L F. Research progress of neuromorphic devices based on two-dimensional layered materials [J]. *Acta Phys. Sinica*, 2022, 71(21): 218504. (in Chinese)
- [103] YANG J, HU L X, SHEN L F, *et al.* Optically driven intelligent computing with ZnO memristor [J]. *Fundam. Res.*, 2024, 4(1): 158-166.
- [104] HU L X, SHAO J L, WANG J R, *et al.* *In situ* cryptography in a neuromorphic vision sensor based on light-driven memristors [J]. *Appl. Phys. Rev.*, 2024, 11(1): 011411.
- [105] SHAN X Y, WANG Z Q, XIE J, *et al.* Hemispherical retina emulated by plasmonic optoelectronic memristors with all-optical modulation for neuromorphic stereo vision [J]. *Adv. Sci.*, 2024, 11(36): 2405160.
- [106] 杨静, 卢焕明, 叶羽敏, 等. ZnO 全光控忆阻器及其类突触行为 [J]. 材料科学与工程学报, 2021, 39(3): 393-397.
YANG J, LU H M, YE Y M, *et al.* All-optically controlled ZnO memristor and its synaptic behavior [J]. *J. Mater. Sci. Eng.*, 2021, 39(3): 393-397. (in Chinese)



赵建璐(1998-),男,山东淄博人,硕士研究生,2021年于山东建筑大学获得学士学位,主要从事氮化物光电忆阻器研究。

E-mail: zhaojianlu@nimte.ac.cn



诸葛飞(1975-),男,江苏常州人,博士,研究员,2005年于浙江大学获得博士学位,主要从事低维半导体材料与器件及其在类脑人工智能领域的应用研究。

E-mail: zhugefei@nimte.ac.cn