

面向新一代智能视觉的光电忆阻器研究进展

诸葛霞¹, 诸葛飞^{2,3,4,5}

- (1. 宁波工程学院电子与信息工程学院, 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. 中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心, 上海 200031)
(4. 中国科学院大学材料科学与光电技术学院, 北京 100049)
(5. 浙江大学温州研究院, 浙江 温州 325006)

摘要: 基于冯·诺依曼计算架构和互补金属氧化物半导体 (complementary oxide semiconductor, CMOS) 技术的传统人工视觉系统, 因其图像感知、存储和处理单元物理分离, 在集成度、能耗、处理效率等方面均面临挑战。受生物视觉系统的启发, 基于光电忆阻器的神经形态视觉系统可实现感/存/算共融, 并具有视觉信息的并行处理功能, 因此是新一代智能视觉的重要发展方向。该系统不仅能够模拟视网膜的功能, 包括直接响应光信号、完成对比度增强及降噪等图像预处理工作, 而且能够模拟大脑视皮层的功能, 对图像进行识别、分类等, 完成感知任务。对光电忆阻器件的研究进展及其在人工视觉系统中的应用进行了总结。首先概述了忆阻器的特征; 其次综述了光电忆阻器件的研究进展, 包括材料、结构、工作机理、突触功能模拟等; 再次介绍了光电忆阻器在人工视觉系统中的应用; 最后总结了光电忆阻器研究面临的困难以及未来发展趋势。

关键词: 忆阻器; 光电器件; 人工视觉; 神经形态系统; 图像处理

中图分类号: O472⁺.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-3962(2023)08-0614-11

引用格式: 诸葛霞, 诸葛飞. 面向新一代智能视觉的光电忆阻器研究进展[J]. 中国材料进展, 2023, 42(8): 614-624.

ZHUGE X, ZHUGE F. Recent Progress in Optoelectronic Memristors for Next Generation Artificial Visual Systems[J]. Materials China, 2023, 42(8): 614-624.

Recent Progress in Optoelectronic Memristors for Next Generation Artificial Visual Systems

ZHUGE Xia¹, ZHUGE Fei^{2,3,4,5}

- (1. School of Electronic and Information Engineering, Ningbo University of Technology, Ningbo 315211, China)
(2. Ningbo Institute of Materials Technology and Engineering, Chinese Academy of Sciences, Ningbo 315201, China)
(3. Center for Excellence in Brain Science and Intelligence Technology, Chinese Academy of Sciences, Shanghai 200031, China)
(4. College of Materials Science and Opto-Electronic Technology, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)
(5. Institute of Wenzhou, Zhejiang University, Wenzhou 325006, China)

Abstract: Conventional artificial visual systems are based on the von Neumann architecture and CMOS technologies, in which image perception, memory and processing units are physically separated, thus facing great challenges of realizing high-density integration, low power consumption and high speed.

Inspired by biological visual systems, neuromorphic visual systems based on optoelectronic memristors can realize integrated sensing-computing-memory as well as parallel processing of visual information, which becomes one of the most important developing directions of artificial visual systems. They can not only mimic retinal functions such as responding directly to light and performing the preprocessing of visual information like image contrast enhancement and noise reduction, but also mimic the functions of the visual

收稿日期: 2022-09-14 **修回日期:** 2023-02-13

基金项目: 国家自然科学基金项目(U20A20209, 61874125);
浙江省自然科学基金项目(ID19E020001); 环境友好能源材料国家重点实验室开放基金项目(20kfhg09)

第一作者: 诸葛霞, 女, 1979 年生, 博士, 讲师

通讯作者: 诸葛飞, 男, 1975 年生, 研究员, 博士生导师,

Email: zhugefei@nimte.ac.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202209016

cortex, *i. e.*, visual perception including pattern recognition and classification. This review focuses on the research progress of optoelectronic memristors and their applications in artificial visual systems. First, the features of memristor are introduced. Second, the research progress of optoelectronic memristors is reviewed in terms of materials, structures, working mechanisms and synaptic function emulation. Then, the applications of optoelectronic memristors in artificial visual systems are discussed. Finally, the problems of optoelectronic memristors which need be resolved for practical applications are summarized.

Key words: memristor; optoelectronic devices; artificial visual systems; neuromorphic systems; image processing

1 前言

生物视觉系统能够轻而易举地识别各式各样的物体,理解复杂环境呈现的各种信息。视网膜是生物视觉系统的重要组成部分,它位于眼球的后端内侧位置,只有0.5 mm厚,却包含大约1.5亿个感光神经元(将光能量转换为动作电位)和精细复杂的神经电路(完成初级阶段的图像处理工作)^[1,2]。光信号通过视网膜转变为电学信息,再由视觉神经传递给大脑(视觉皮层)作进一步处理,完成视觉感知任务,如图1所示。大脑是由简单的处理器(神经元^[3])和存储器(突触)组成的高度分布式密集网络,以人脑为例,包含大约 10^{11} 个神经元和 10^{15} 个突触。每个神经元通过 $10^3 \sim 10^4$ 个突触与其他神经元连接,功耗仅在20 W左右^[4]。大脑主要基于神经元进行计算,通过调节突触权重进行学习和存储。生物视觉系统可并行处理多个信息,并且能耗很低。长期以来,人们一直致力于人工视觉系统的开发,将之应用于医疗(如视觉假体)、工业(如机器视觉)、交通(如城市数据大脑)等各个行业。传统的人工视觉系统由感光器、存储单元和计算单元组成^[5-9],这种结构存在2方面严重问题:一方面,即便使用最先进的感光器,它能够实现图像的实时检测,但是和生物系统相比,会产生大量的冗余数据,造成存储、计算和能耗负担;另一方面,数据存储和计算是分开的(冯·诺依曼架构^[10]),执行任务时,先从存储单元读取指令和数据,再到计算单元进行计算,

最后又将计算结果写入到存储单元,如此往复,不仅能耗大,而且严重降低了系统的工作效率(程序的执行快慢受限于指令和数据的读取速度——存储墙问题^[11,12])。神经形态计算通过电子部件的集成从结构和功能上模拟大脑,具有2个关键特征:一是高度的并行性;二是适应性和容错性比较强(输入信号是多变的、不确定的)。以神经形态计算为基础的神经形态视觉系统作为新一代人工视觉系统,能够实现感/存/算共融,具有信息并行处理功能,有望从根本上解决能耗和存储墙问题。

目前,神经形态视觉系统的研究主要借助图像传感阵列将光信号转换为电信号,再传递给神经形态芯片进行后续处理^[13-18]。2013年,Wong团队^[16]以Pt/HfO_x/TiO_x/HfO_x/TiO_x/TiN结构的忆阻器作为突触,以执行非监督学习算法的赢家通吃(winner-take-all, WTA)神经网络为模型,构建了一个神经形态视觉系统,从结构和功能上模拟人脑的初级视皮层。初级视皮层的特定区域对图像的方向或边缘非常敏感,这是进行图像识别或分类的第一步。通过1000张图片的训练,该系统成功挑选出了不同方向的图片。该系统不涉及人工视觉的前端工作,图像是由其他设备提供的。2018年Shen团队^[17]基于氧化铜图像传感器和氧化铝忆阻器构建了神经形态视觉系统,能够对紫外光图像进行探测并长时间存储。2020年Han团队^[18]基于太阳能电池和钙钛矿忆阻器构建了神经形态视觉系统,实现了视网膜的部分功能。但是,光电转换和信息处理部件的分离增加了系统复杂度,降低了系统效率。

新兴的光电忆阻器不仅能够直接感知外界光信号,而且能够对信号进行实时处理和存储,因此能实现感/存/算共融,从而大幅提升人工视觉系统的效率。不同于图像传感器只能对像素亮度作线性响应,光电忆阻器感受信息的同时,能够实现图像的初级处理功能,比如降噪、增强对比度等。本文主要对光电忆阻器的研究进展进行梳理和总结,内容包括忆阻器概述、光电忆阻器研究进展,以及光电忆阻器在人工视觉系统中的应用,最后对领域发展方向进行展望。

2 忆阻器概述

忆阻器是与电阻、电感、电容并列的第4种无源电子器件^[19]。忆阻描述的是电荷和磁通之间的关系,即

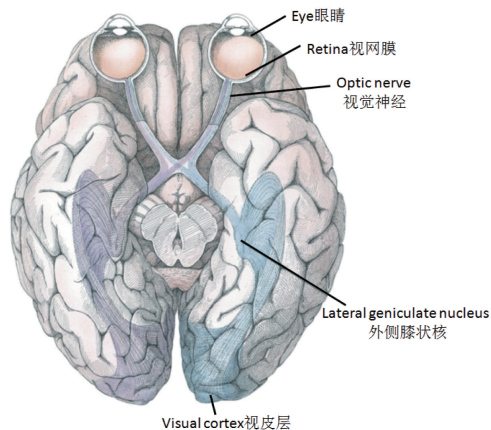


图1 视觉通路概图:从视网膜到视皮层^[1]

Fig.1 Overview of the visual pathway from retina to visual cortex^[1]

$d\varphi(q) = M(q)dq$, 其中 M 代表忆阻, 具有电阻的量纲, 如图 2a 所示。任一时刻 $t=t_0$, M 的值取决于从 $t=-\infty$ 到 $t=t_0$ 整个历史时间段内流经器件的电荷总量, 因此忆阻器具有电荷记忆功能。如果在忆阻器两端施加正弦类的周期激励信号(电压或电流), 在电压-电流平面画出激励响应图, 得到的是集中在第一和第三象限、过原点的滞回曲线, 这是一个器件是否为忆阻器的判据, 和具体材料及物理机制无关^[20]。早在 1971 年, 加州大学蔡少棠^[19]就在理论上预测了忆阻器的存在。2008 年, 惠普 (Hewlett-Packard, HP) 公司结合理论和实验分析, 指出电阻式随机存储器就是忆阻器的一种, 并成功制备了 Pt/TiO₂/Pt 结构的忆阻器, 该器件的电压-电流关系表现出了良好的滞回特征^[21], 如图 2b 所示。此后, 人们对忆阻器展开了广泛研究^[22-27], 忆阻器功能层材料包括氧化物^[28]、硫族化合物^[29]等半导体。忆阻器独特的非线性电

学特性、超低的能耗(单脉冲所需能量不到 1 pJ^[16])、优异的尺寸缩放性(尺寸已经可以缩至 2 nm 以内^[30])和超快的计算速度(电阻切换速度已经快到 1 ns 以内^[30, 31])使其在实现存/算共融和模拟突触功能方面极具优势。

忆阻器具有简单的两端结构, 通过外加激励信号将之由低电导态转变为高电导态的过程定义为 SET 操作, 反之为 RESET 操作。传统忆阻器 SET 和 RESET 过程均通过电信号进行调控, 工作过程涉及离子迁移, 同时电压或电流激发出的焦耳热会加速该过程, 导致器件微结构发生改变, 工作性能不稳定^[32]。光信号有着超快的速度和超高的带宽, 如果代替电信号调控忆阻器阻态, 则能有效避免器件微结构改变和焦耳热产生, 有望从原理上解决忆阻器稳定性不佳的难题^[33]。另外, 光电忆阻器的感光性能使其在感/存/算共融的新型人工视觉领域具有广阔的应用前景^[34, 35]。

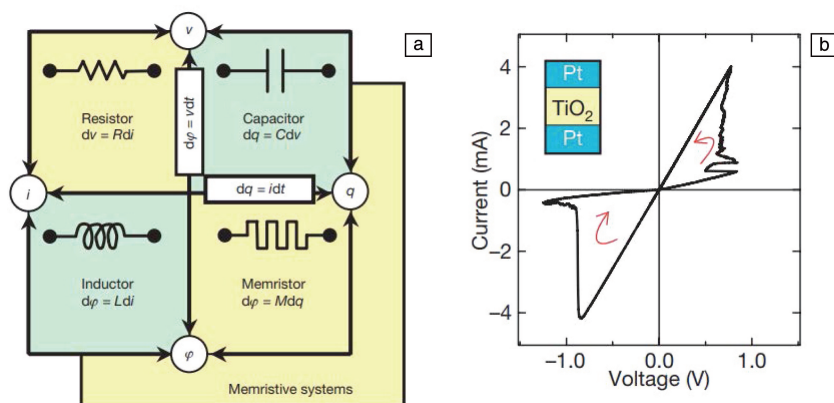


图 2 4 种基本电路元件(a)^[19]; 惠普 Pt/TiO₂/Pt 结构忆阻器的电压-电流滞回曲线(b)^[21]

Fig. 2 Four fundamental circuit elements(a)^[19]; the voltage-current pinched hysteresis loop of HP's Pt/TiO₂/Pt memristor(b)^[21]

3 光电忆阻器件研究进展

按照工作机制划分, 目前光电忆阻器主要包括电子型和离子型。电子型光电忆阻器包括 2 种: ① 光 SET, 电 RESET; ② 光 SET, 光 RESET。而离子型只有 1 种情况, 即电 SET 和光 RESET。

3.1 电子型光电忆阻器

电子型光电忆阻器主要是利用光照下的持续光电导效应实现电导调控^[36-40]。器件的光敏介质层受到光照时, 价带电子或缺陷捕获的电子吸收光子能量后跃迁到导带, 使器件内部载流子浓度变大, 电导升高; 光照撤除后, 材料内部的缺陷会阻碍光生电子复合, 使得器件在一段时间内无法恢复到原状, 表现出持续光电导效应^[41]。入射光的波长、照射时间、功率密度等都可以影响光电响应幅度, 通过改变这些参数可以实现器件电导的调控。光信号对器件的作用是一种整体效应, 因此器

件的稳定性和器件之间的均匀性比较好。

3.1.1 光电导单向增强

电子型光电忆阻器的 SET 过程由光信号调控, RESET 过程由电信号调控。

2012 年, Hueso 团队^[36]制备了一款简单的基于三氧化二铝 (Al₂O₃) 的忆阻器, 如图 3a 所示, 首次将光信号引入到了忆阻器的电导调控中, 研究了紫外光和红外光参与下忆阻器的工作状态。该器件在光照下工作电流很小 (<1 μA), 有利于减少焦耳热的产生, 但是只能实现高、低 2 个电导态的切换, 并且数据保持性能不佳, 如图 3b 所示。2013 年, Wu 团队^[37]基于氧化锌纳米线/铌掺杂钛酸锶异质结忆阻器, 实现了电压脉冲驱动下的多电导态调节, 进一步研究了紫外光对异质结的影响, 如图 3c 所示。紫外光照射下该器件呈现出一个较大电流, 并且光照撤除以后这种状态能够持续很长时间, 如图 3d 所示。

2018 年 Guo 团队^[38]基于 ZnO_{1-x}/AlO₃ 异质结制备了

光电忆阻器, 如图 3e 所示。研究了紫外光照对该器件电导的影响, 揭示了紫外光照射下 AlO_y 层在持续光电导效应中的作用, 并用该器件成功模拟了生物突触的短程和长程可塑性过程。当紫外光照射器件时, 电子被激发到导带, 器件电导增大, 光生空穴在内电场作用下聚集到 $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 界面并被氧化铝层捕获; 撤除光照后, 光生空穴在热作用下又回到原界面处, 产生持续光电导效应, 如图 3f 所示。无论是低阻态还是高阻态, 器件光照下都能产生明显的持续光电导, 如图 3g 所示。通过调整入射光的频率, 该器件可以模拟生物突触的短程和长程可塑

性过程。例如, 施加 0.1 Hz 的光照时器件电导急速增大, 去光照后器件电导逐渐降到初始状态, 如此反复可以实现突触的短程可塑性功能; 1 Hz 的紫外光作用时, 器件会长时间保持在较高的电流状态, 相当于突触的长程可塑性过程, 如图 3h 所示。光照只能增大器件电导, 电导的降低过程需要通过外加电压控制, 如图 3i 所示。

近年来, 人们相继研究了基于各种不同介质层材料的光电忆阻器, 例如氧化物半导体材料^[42-46]、钙钛矿^[47-49]、二维材料^[50, 51]、一维材料^[52, 53]、有机材料^[54, 55]等等。

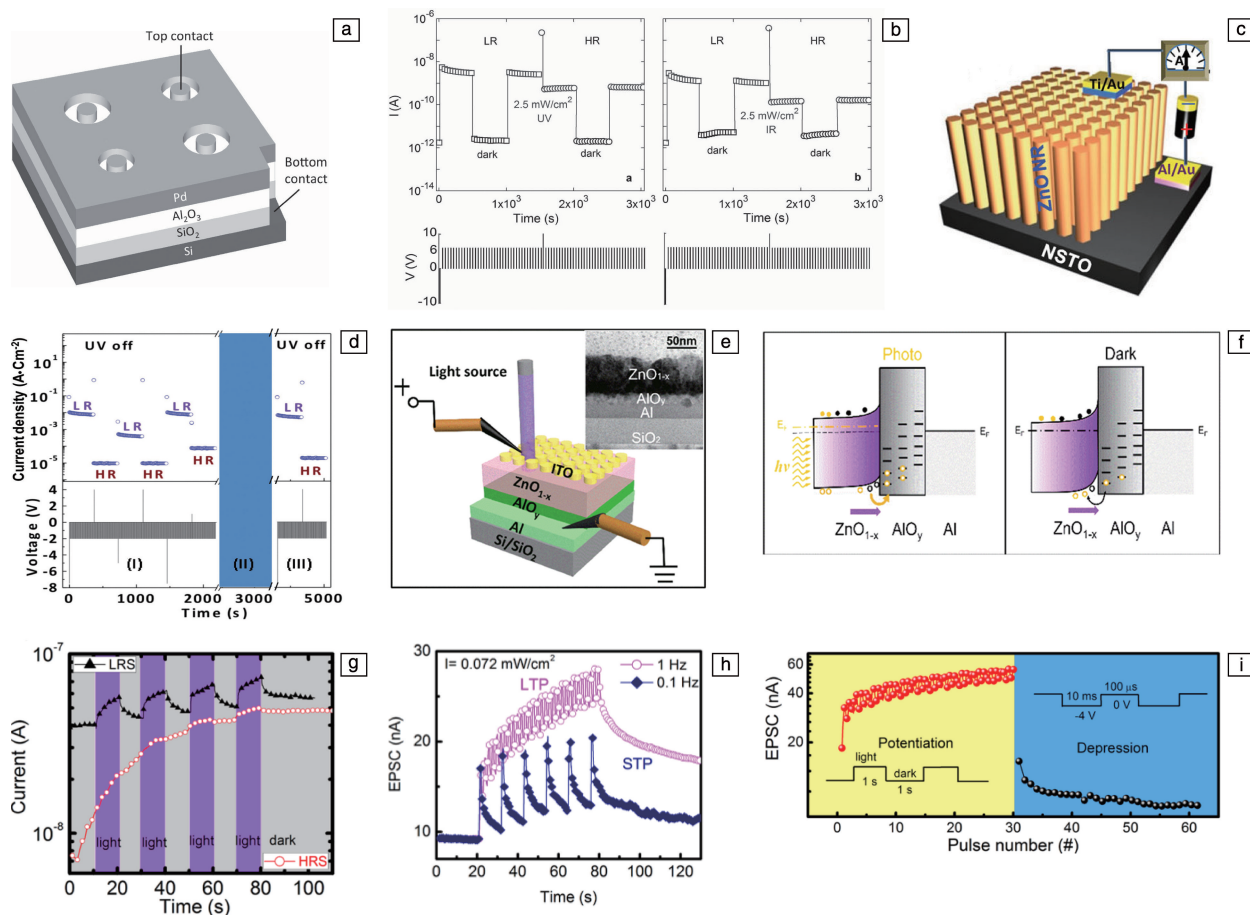


图 3 基于 Al_2O_3 的忆阻器结构示意图(a), 器件在不同波长光照射下的电流响应(b)^[36]; 基于 ZnO 纳米线/铌掺杂钛酸锶异质结的忆阻器结构示意图(c), 器件在电压和光照共同调控下表现出多个电导态(d)^[37]; 基于 $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 异质结的忆阻器结构示意图(e), $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ 结能带示意图(f), 器件的高、低阻态对紫外光照的响应(g), 通过调节光脉冲频率实现短程和长程可塑性(h), 在光信号和电信号激励下实现突触增强和抑制(i)^[38]

Fig. 3 Structural illustration of the memristor based on Al_2O_3 (a), optoelectronic response to light illumination with different wavelengths(b)^[36]; structural illustration of the memristor based on ZnO nanowires/Nb-doped SrTiO_3 heterojunction (c), multiple resistance states achieved by combining electrical and optical pulses (d)^[37]; structural illustration of the memristor based on $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ heterojunction (e), schematic illustration of the band diagram of $\text{ZnO}_{1-x}/\text{AlO}_y$ junction (f), optoelectronic response to UV-light illumination for both high and low resistance states (g), short and long term plasticity realized by light pulses with different frequencies (h), emulation of synaptic long term potentiation and inhibition by optical and electric stimuli, respectively (i)^[38]

3.1.2 光电导双向可控

电子型光电忆阻器的 SET 和 RESET 过程均由光信号独立调控。实现忆阻器全光双向调控是国际难题^[35, 56, 57]，由于半导体材料固有的光电效应，光照一般只能增大器件电导。

2021 年，作者研究组^[32]率先研发出了具有实际应用前景的全光控忆阻器，并模拟了生物突触的脉冲时间依赖可塑性学习规则，如图 4a~4d 所示。该器件使用了双层铟镓锌氧 (InGaZnO, IGZO) 半导体材料，上层缺氧 (O_D -IGZO)，下层富氧 (O_R -IGZO)，该双层结构是实现全光控忆阻器的关键，如图 4a 所示。 O_D -IGZO/ O_R -IGZO 界面势垒区在阻变的转换过程中起着重要作用。短波光照射器件时，氧空位的电离作用占主导，界面势垒区变窄，器件电导增大；长波光照射器件时，氧空位的中和作用占主导，界面势垒区变宽，器件电导减小，如图 4b 所示。SET 和 RESET 过程分别使用 420 nm 的蓝光和 800 nm 的近红外光，成功实现了忆阻器电导的全光可逆调控，如图 4c 所示。该器件稳定的全光双向多态调控性能使之可以很好地模拟神经突触功能，通过调整长波长和短波长光照的先后顺序便可模拟突触的脉冲时间依赖可塑性学习规则。如果用蓝光脉冲代表突触前神经元激励，近红外光脉冲代表突触后神经元激励，蓝光先于近红外光照射时，器件电导增大，增大程度与 2 种光脉冲出现的时间间隔长短成反比关系；如果近红外光先于蓝光照射，器件电导则减小，减小程度与 2 种光脉冲的时间间隔长短成反比关系，如图 4d 所示。该全光控忆阻器使用的半导体材料制备工艺成熟，需要的光能量密度低 ($\sim 20 \mu\text{W}/\text{cm}^2$)，工作机理只涉及电子捕获与释放，性能稳定、结构简单，便于大规模集成，对实现光电类脑计算具有里程碑意义。

2022 年，东北师范大学的 Liu 团队^[58]以 Ag-TiO₂ 纳米复合材料为介质层制备了一款全光控忆阻器，并模拟了生物突触的长程增强和抑制功能。可见光照射时，由于银纳米颗粒的表面局部等离子体效应，热电子被转移到二氧化钛导带，Ag/TiO₂ 微纳界面的肖特基势垒减弱，器件电导增大；紫外光照射时，价带电子被激发到二氧化钛的导带，阴离子和电子复合，器件电导减小，如图 4e 所示。可见光照射时，器件电导快速增大，停止光照后，电导逐步减小到一个高于初始光照时刻的电导状态，并长时间保持，相当于突触的长程增强过程；紫外光照射时，器件电导迅速增大，停止光照后，电导逐步减小到一个低于初始光照时刻的电导状态，并长期保持，相当于突触的长程抑制过程，如图 4f 所示。

近期，作者研究组^[59]制备了简单的 Au/ZnO/Pt 结构

全光控忆阻器。短波长 (350, 420 和 530 nm) 光照射时，器件从低电导态转变为高电导态，对应 SET 过程；长波长 (650, 725 和 800 nm) 光照射时，器件从高电导态转变为低电导态，对应 RESET 过程。器件在 SET 之后，先放置 30 min 待其状态稳定，再进行 RESET 操作，如图 4g 所示。分别使用 530 和 650 nm 的光脉冲照射，器件表现出非常稳定的循环开关特性，如图 4h 所示。通过改变光脉冲数量可以实现多个电导态，并且每个电导态都表现出了良好的保持特性，如图 4i 所示。SET 和 RESET 过程的阻变机理可以解释如下：短波光照射使氧空位发生电离反应，电离氧空位的增多使导带曲率变大，器件电导增大；之后进行的长波光照射会降低电离氧空位浓度，导带曲率变小，器件电导减小，如图 4j 所示。该器件能够实现非易失性神经形态计算和完备的布尔逻辑功能。以逻辑运算为例，假设 p 和 q 为输入，其中 p 代表器件的初始电导态 (电导值大于 100 ns 时， $p=1$ ；反之， $p=0$)， q 代表光照 (530 或 650 nm，有光照时 $q=1$ ，反之 $q=0$)，输出 p' 代表器件的最终电导态 (取值方式和 p 一样)。当 $p=0$ 时，用 530 nm 光照射 ($q=1$)，器件电导增大，输出 $p'=1$ ，此过程对应于逻辑“或 (OR)”运算；当 $p=0$ 时，用 530 nm 光照射 ($q=1$)，器件电导增大，之后再长波长的控制光照射，器件电导减小到 100 ns 以下，输出 $p'=0$ ，此过程对应于逻辑“与 (AND)”运算，如图 4k 所示。

Hartmann 团队^[60]基于砷化铟 (InAs) 量子点掺杂的 GaAs/AlGaAs 异质结制备了一种类光电忆阻器。不同于两端忆阻器，它有 4 个端口 (多了 2 个栅极)。一定范围的电压驱动下，不同波长的光照能够使 InAs 量子点充电或放电，进而改变介质层的电导。因此，该器件在电压的辅助作用下，能够实现不同波长光照下电导的双向调控，即 SET 和 RESET 过程均可由光信号进行调控。比如，红外光作用下电导增大，红光作用下电导减小。

3.2 离子型光电忆阻器

离子型光电忆阻器的工作机理涉及导电细丝的连通和断裂。器件的 SET 过程由电信号调控，RESET 过程由光信号调控^[61-68]。对器件施加外电压时，中间介质层的阴离子或者阳离子发生迁移，介质层中存在的晶界、位错等缺陷诱导电场集中，使离子在某个狭窄区域迁移较快，形成局部导电通道，即导电细丝，器件由最初的低电导态转变为高电导态；后续对器件进行光照时，光照产生的热量或者光生载流子破坏导电细丝的完整性，使其发生断裂，器件由高电导态变回低电导态。

2015 年 Bersuker 团队^[61]利用二氧化铪 (HfO₂) 制备了导电细丝型光电忆阻器，研究了白光对二氧化铪中氧空位导电细丝的影响，如图 5a 和 5b 所示。白光对二氧化

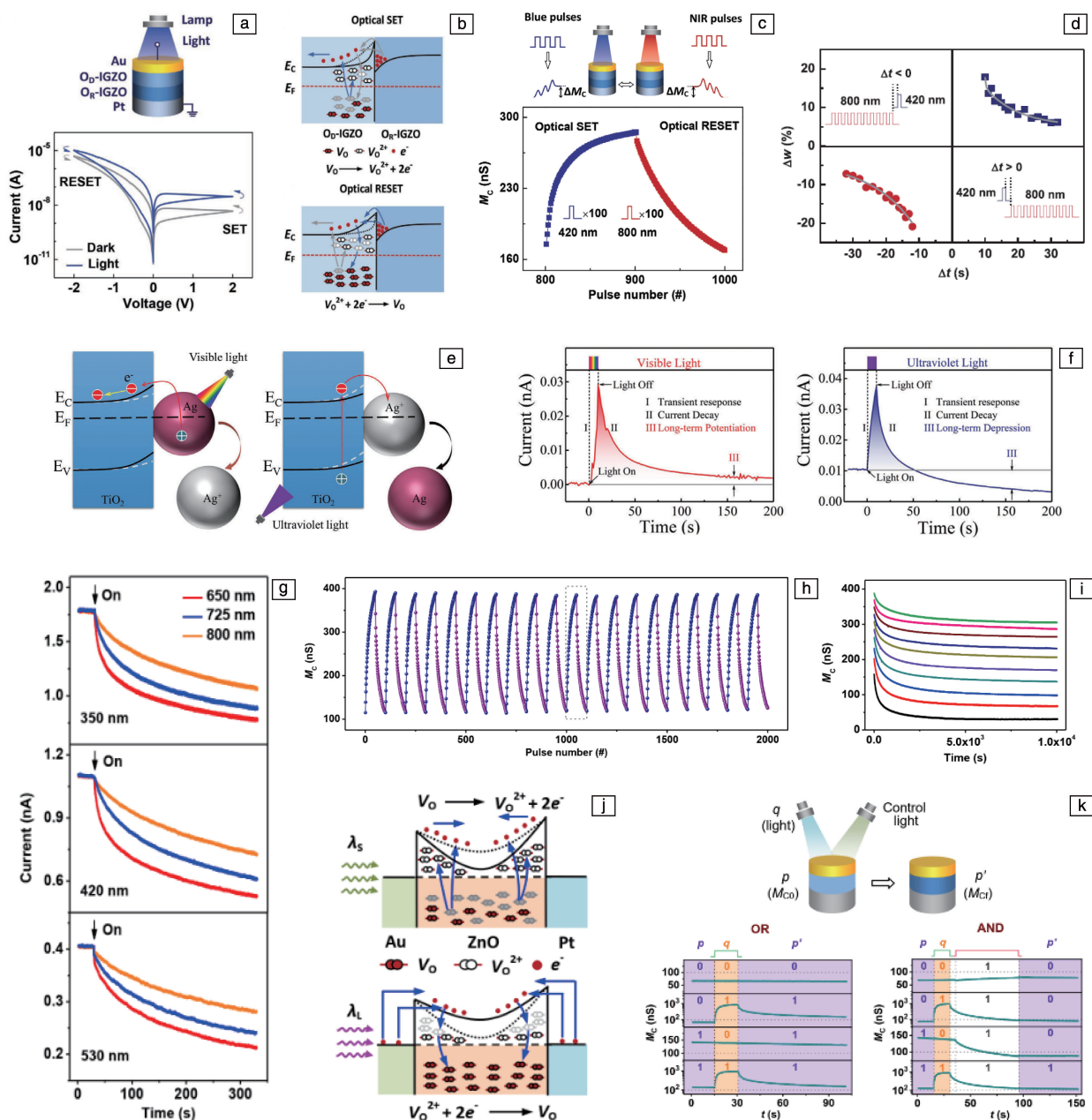


图 4 基于 InGaZnO 的忆阻器结构示意图(上)和光照前后的电流-电压特性(下)(a), 器件的工作机理示意图(b), 器件在光照下实现的可双向可调特性(c), 器件在光激励下模拟突触的脉冲时间依赖可塑性功能(d)^[32]; 基于 Ag-TiO₂ 纳米复合材料忆阻器的工作机理示意图(e), 由可见光激发的长程增强(左)和紫外光激发的长程抑制(右)(f)^[58]; 基于 ZnO 的忆阻器在长波光照射下实现电导减小(g), 光激励下实现的连续 20 个电导增大/减小周期(h), 光激励下实现的 10 个不同电导态的数据保持特性(i), 器件的工作机理示意图(j), 光控下实现的逻辑功能(k)^[59]

Fig. 4 Structural illustration of memristor based on InGaZnO (upper) and current-voltage characteristics before and after light irradiation (down) (a), schematic illustration of the working mechanism (b), reversible regulation of conductance by optical stimuli (c), emulation of synaptic spike-timing-dependent plasticity by optical stimuli (d)^[32]; schematic illustration of the working mechanism of Ag-TiO₂ nanocomposite-based memristor (e), visible light induced long term potentiation (left) and UV light induced long term depression (right) (f)^[58]; decrease of conductance of ZnO-based memristor upon light illumination with different wavelengths (g), 20 successive conductance increase/decrease cycles by optical stimuli (h), data retention characteristics of 10 light-induced conductance states (i), schematic illustration of the working mechanism (j), Boolean logic functions by optical stimuli (k)^[59]

钨中导电细丝的形成过程没有任何影响,但是,一旦氧空位导电细丝已经形成,白光的照射会促使氧空位和附近的阳离子结合,破坏导电细丝,降低器件的电导率,如图 5a 所示。白光的功率密度越大,导电细丝的破坏速度越快,并且通过光照的开和关可以实现多个阻态,如图 5b 所示。2018 年密歇根大学的 Lu 团队^[62]基于有机无机复合卤化物钙钛矿(MAPbI₃)制备了一种横向结构的光电忆阻器,研究了宽波段可见光对碘空位导电细丝的影响,实现了对生物突触长程增强和抑制过程的模拟,如图 5c 和 5d 所示。在外加电压作用下,MAPbI₃ 中形成碘空位导电细丝,在这个过程中进行可见光照射,会增加碘空位的形成能,抑制碘空位的生成。和无光照相比,为了达到同样的高电导状态,可见光照射下需要施加更高的电压。在外加电压撤除以后,可见光照射会加速碘空位和碘离子结合,减小器件电导,如图 5e 所示。在持

续电压脉冲作用下,器件电导慢慢增大,该过程可以模拟生物突触的长程增强;在可见光照射下,器件电导逐渐减小,该过程可以模拟生物突触的长程抑制,如图 5d 所示。

有些光电忆阻器的 SET 和 RESET 过程本质上是由电信号控制的,光信号只起辅助作用,可以改善忆阻器的调控性能^[69-74],比如降低工作电压、减小运行功耗。2019 年韩国 Wang 团队^[69]基于 CH₃NH₃PbI₃(即 MAPbI₃ 或 OHP)制备了一款垂直结构的忆阻器,如图 5e 所示,它的电导增大和减小均需要外加电压调控,光信号对它的作用就像生物多巴胺一样能够提升电导增大的效果,或者说能够降低调控电压,如图 5f 所示。电导的增大过程就是碘空位导电细丝的形成过程,这时施加光照会产生一个与外加电场同向的光生电场,促进碘空位迁移,加速导电细丝的形成,如图 5g 所示。

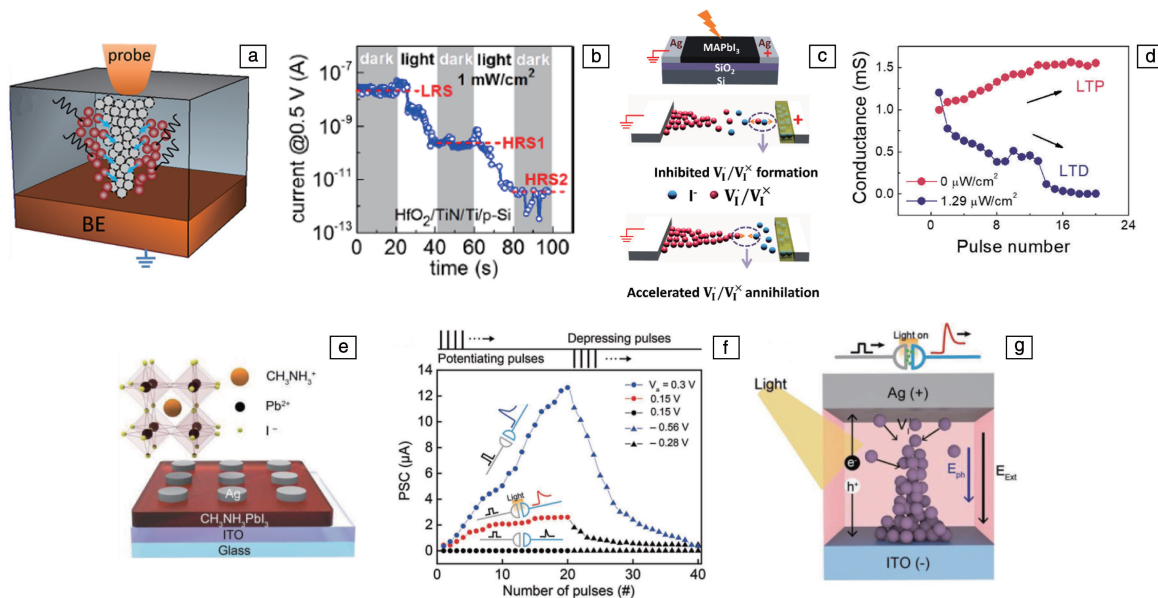


图 5 基于 HfO₂ 的忆阻器导电细丝破坏过程(a), 器件在光激励下实现多阻态(b)^[61]; 光照抑制 MAPbI₃ 平面型忆阻器内部碘空位形成和加速碘空位湮灭的过程(c), 器件在电信号和光信号激励下实现突触长程增强和抑制(d)^[62]; 基于 MAPbI₃ 的垂直型忆阻器结构示意图(e), 器件在光照下突触后电流随电压脉冲变化的情况(f), 器件工作机制示意图(g)^[69]

Fig. 5 Schematic illustration of filament disruption of HfO₂-based memristor(a), multiple resistance levels by optical stimuli(b)^[61]; schematic illustration of the suppression of formation and the acceleration of annihilation of iodine vacancies in MAPbI₃-based planar memristor(c), emulation of synaptic long term potentiation and depression by electric and optical stimuli, respectively(d)^[62]; structural illustration of MAPbI₃-based vertical memristor(e), post-synaptic current as a function of the applied electrical pulses upon light illumination(f), schematic illustration of the working mechanism(g)^[69]

4 光电忆阻器在人工视觉系统中的应用

人类视觉系统主要由 2 部分组成: 视觉器官, 负责从外界获取视觉信息并作预处理; 大脑视皮层, 负责进一步处理视觉信息, 完成感知任务^[1]。人类的视网膜不仅能够感受外界光刺激, 而且能够对图像进行初级处

理^[2]。光电忆阻器的感光特性和光电调控过程使其能够模拟人眼的部分功能, 比如视网膜的图像预处理功能, 包括增强对比度、降噪等; 以光电忆阻器为突触器件构建神经形态网络, 能够实现视皮层的部分功能, 如图像识别、分类等。

2019 年 Chai 团队^[75]制备了基于 Pt/MoO_x/ITO(氧化

钢锡, indium tin oxide) 结构的光电混合调控忆阻器, 器件在紫外光照射下电导增大, 增大程度和光照强度成正比关系。该团队构建了 8×8 的忆阻器阵列, 每个忆阻器

件对应一个像素, 在“F”形状掩膜版的遮挡下进行紫外光照射, 完成了对图像“F”的存储, 光照强度越大存储效果越好, 如图 6a 所示。为了演示图像对比度增强功能,

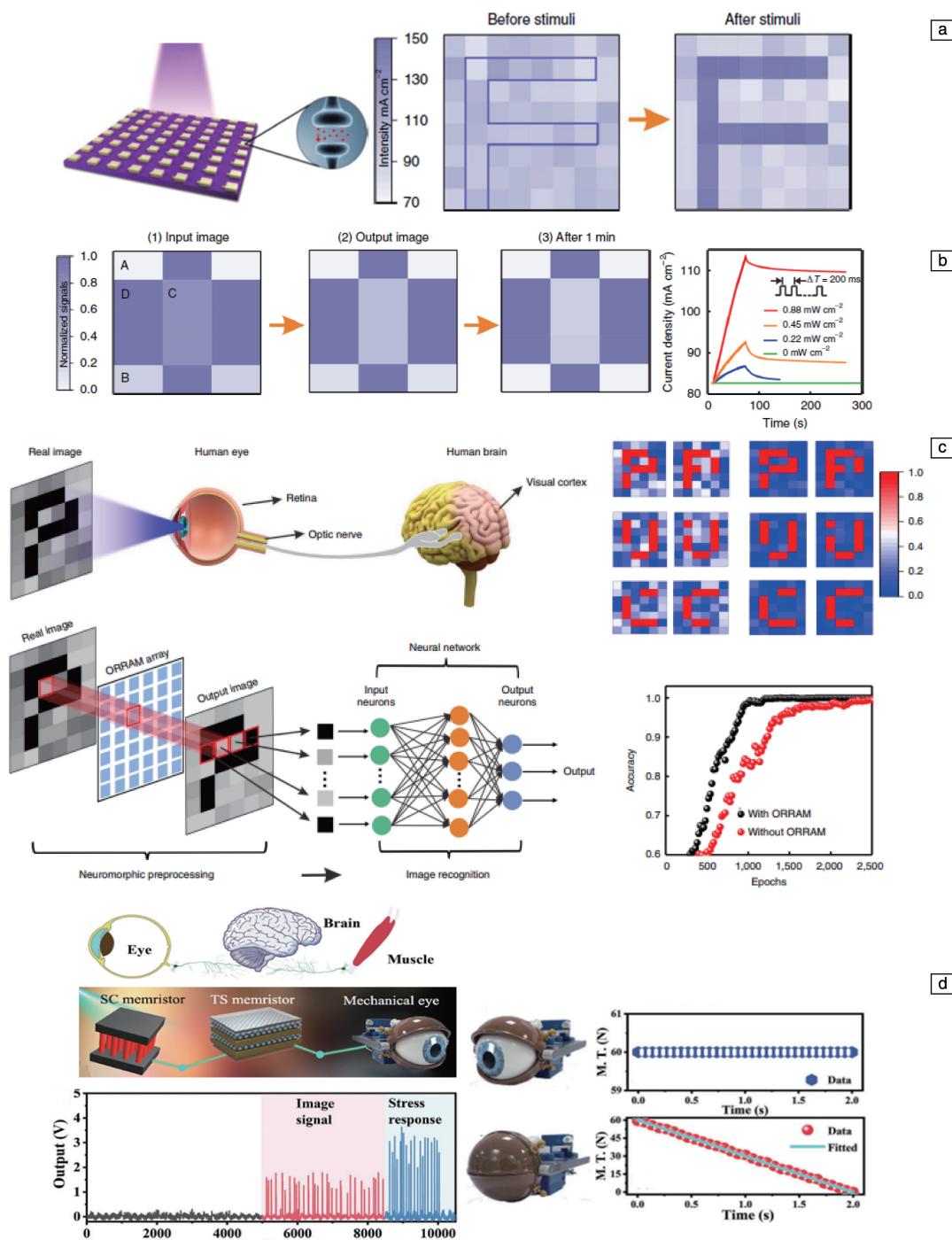


图 6 8×8 光电忆阻器阵列结构示意图(左)和光激励下对字符“F”的存储(a), 3×5 光电忆阻器阵列在训练之后的图像对比度增强以及训练过程进行中和完成后的电流变化(b), 基于光电忆阻器的神经形态视觉系统模拟人类视觉图像识别功能(c)^[75]; 基于 $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ 核壳结构纳米棒阵列忆阻器的神经形态视觉系统模拟强光照射时人眼通过闭合进行自我保护的行为(d)^[76]

Fig. 6 Schematic structure of an 8×8 optoelectronic memristor array(left)and storage of image of the letter “F” by optical stimuli(right) (a), contrast enhancement of the image after training processes and current response during and after the training process of 3×5 optoelectronic memristor array(b), simulation of image recognition in the neuromorphic visual system with optoelectronic memristors(c)^[75]; simulation of self-protection of human eye upon strong light illumination with the neuromorphic visual system based on $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ -Core/Shell nanorod-based memristors(d)^[76]

该团队构建了 3×5 的忆阻器阵列, 用 4 种不同强度的紫外光照射阵列不同区域的器件。随着时间的流逝, 不同光照区域的电流差异越来越明显, 这就相当于增强了一幅四阶灰度图像的对比度, 如图 6b 所示。此外, 该团队还利用软件构建了一个神经形态视觉系统, 包含 2 部分: 基于忆阻器阵列的预处理单元和基于三层神经网络的图像识别单元, 忆阻器阵列被用来模拟人眼视网膜的光信号感知和预处理功能。通过 2 组图像识别数据的比较, 一组先用忆阻器阵列进行对比度增强处理再识别, 另外一组直接进行识别, 该团队发现用忆阻器阵列预处理过的图像识别效率更高、速度更快、能耗更低, 如图 6c 所示。

2022 年 Yan 团队^[76]基于 $\text{Sb}_2\text{Se}_3/\text{CdS}$ (SC) 核壳结构纳米棒阵列光电混合调控忆阻器设计了一款多功能人工视觉系统, 如图 6d 所示。该系统主要由 3 部分组成: SC 光电忆阻器(模拟人眼功能)、基于 Ag/MoS_2 纳米片/ $\text{Ag}/\text{MoO}_x/\text{Ag}$ 的阈值开关忆阻器(模拟人脑功能)和传动装置(模拟人眼肌肉功能)。其中, 传动装置需要 12 V 的电压驱动, 因此附加了一个电压调节模块。通过改变 SC 忆阻器的光照强度, 可以调节阈值开关忆阻器输出脉冲电压的幅度。当普通强度的光照射时, 输出电压不足以驱动传动装置, 系统只对图像进行存储; 当强光照射时, 输出电压超出设定范围, 驱动传动装置, 使其前端的机械眼闭合, 该过程可以模拟人眼在强光刺激时通过闭眼进行自我保护的功能, 如图 6d 所示。

5 结 语

光电忆阻器包含光电混合调控忆阻器和全光双向调控忆阻器, 因在感受光信号的同时完成信息处理的工作模式与人类视觉系统非常相似, 光电忆阻器在智能视觉方面有着广阔的应用前景。本文综述了光电忆阻器件的研究进展及其在人工视觉系统中的应用, 涉及器件的材料、结构、工作机理、突触功能模拟等。经过将近 10 年的发展, 光电忆阻器已经实现了电导的全光调控, 并且在简单视觉功能模拟方面得到了原理性验证。虽然取得了较大进展, 但是目前该领域仍然处于研究的初级阶段, 还有很多问题需要解决。首先, 光照下器件阻变的微观机理还不够清晰, 无法实现对器件阻变的精准调控; 尤其是全光控忆阻器光致电导降低的确切机理, 需要进一步合理阐释。其次, 光电忆阻器都采用光源外置模式, 光源和器件相互独立, 很难有效调控大规模阵列中单个器件的光电导状态; 最后, 器件稳定性、不同器件之间性能差异等非理想因素限制了光电忆阻器在视觉神经网络

中的应用。以上问题需要多学科交叉协同解决, 包括材料、化学、物理学、微电子、光电子、计算机科学、神经科学等。目前有关光电忆阻器的研究正在如火如荼地进行, 在国内外学者的共同努力下, 光电忆阻器性能及其在新型人工视觉系统中的应用有望很快跨上一个新台阶。

参考文献 References

- [1] SHEPHERD R K, SHIVDASANI M N, NAYAGAM D A X, *et al.* Trends in Biotechnology[J], 2013, 31(10): 562-571.
- [2] KOLB H. American Scientist[J], 2003, 91(1): 28-35.
- [3] LI Z X, ZENG X Y, WANG J R, *et al.* Frontiers in Neuroscience [J], 2021, 15: 717947.
- [4] DRACHMAN D A. Neurology[J], 2005, 64(12): 2004-2005.
- [5] KIM Y G, CHORTOS A, XU W T, *et al.* Science[J], 2018, 360 (6392): 998-1003.
- [6] LEE G J, CHOI C S, KIM D H, *et al.* Advanced Functional Materials[J], 2018, 28(24): 1705202.
- [7] SONG Y M, XIE Y Z, MALYARCHUK V, *et al.* Nature[J], 2013, 497: 95-99.
- [8] JEONG K H, KIM J Y, LEE L P. Science[J], 2006, 312(5773): 557-561.
- [9] KO H C, STOYKOVICH M P, SONG J Z, *et al.* Nature[J], 2008, 454: 748-753.
- [10] JEONG D S, HWANG C S. Advanced Materials [J], 2018, 30 (42): 1704729.
- [11] Proceedings of 2014 IEEE International Solid-State Circuits Conference [C]. San Francisco, California, USA: IEEE, 2014: 10-14.
- [12] WULF W A, MCKEE S A. ACM SIGARCH Computer Architecture News[J], 1995, 23(1): 20-24.
- [13] DU C, CAI F X, ZIDAN M A, *et al.* Nature Communications[J], 2017, 8: 2204.
- [14] WU C X, KIM T W, CHOI H Y, *et al.* Nature Communications [J], 2017, 8: 752.
- [15] YAO P, WU H Q, GAO B, *et al.* Nature Communications[J], 2017, 8: 15199.
- [16] YU S M, GAO B, FANG Z, *et al.* Advanced Materials[J], 2013, 12(25): 1774-1779.
- [17] CHEN S, LOU Z, CHEN D, *et al.* Advanced Materials[J], 2018, 30(7): 1705400.
- [18] YANG X Y, XIONG Z Y, CHENG Y J, *et al.* Nano Energy[J], 2020, 78: 105246.
- [19] CHAI L. IEEE Transactions on Circuit Theory[J], 1971, 18(5): 507-519.
- [20] CHAI L. Applied Physics A[J], 2011, 102: 765-783.
- [21] STRUKOV D B, SNIDER L G S, STEWART D R, *et al.* Nature

- [J], 2008, 453: 80–83.
- [22] YANG J J, STRUKOV D B, STEWART D R. *Nature Nanotechnology*[J], 2013, 8: 13–24.
- [23] PREZIOSO M, MERRIKH-BAYAT F, HOSKINS B D, *et al.* *Nature*[J], 2015, 521: 61–64.
- [24] SHERIDAN P M, CAI F X, DU C, *et al.* *Nature Nanotechnology* [J], 2017, 12: 784–789.
- [25] ALIBART F, ZAMANIDOOST E, STRUKOV D B. *Nature Communications*[J], 2013, 4: 2072.
- [26] SERB A, BILL J, KHIAT A, *et al.* *Nature Communications*[J], 2016, 7: 12611.
- [27] WANG J R, ZHUGE F. *Advanced Materials Technologies*[J], 2019, 4(3): 1800544.
- [28] WANG J R, ZHUGE X, ZHUGE F. *Science and Technology of Advanced Materials*[J], 2021, 22(1): 326–344.
- [29] ZHUGE F, LI K, FU B, *et al.* *AIP Advances* [J], 2015, 5(5): 057125.
- [30] XIA Q F, YANG J J. *Nature Materials*[J], 2019, 18: 309–323.
- [31] WANG M, CAI S H, PAN C, *et al.* *Nature Electronics*[J], 2018, 1: 130–136.
- [32] HU L X, YANG J, WANG J R, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2021, 31(4): 2170027.
- [33] ZHUGE X, WANG J R, ZHUGE F. *Physica Status Solid (RRL) – Rapid Research Letters*[J], 2019, 13(9): 1900082.
- [34] MAO J Y, ZHOU L, ZHU X J, *et al.* *Advanced Optical Materials* [J], 2019, 7(22): 1900766.
- [35] PAN X, JIN T Y, GAO J, *et al.* *Small* [J], 2020, 16(34): 2001504.
- [36] UNGUREANU M, ZAZPE R, GOLMAR F, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2012, 24(18): 2496–2500.
- [37] BERA A, PENG H Y, LOUREMBAM J, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2013, 23(39): 4977–4984.
- [38] HU D C, YANG R, JIANG L, *et al.* *ACS Applied Materials & Interfaces*[J], 2018, 10(7): 6463–6470.
- [39] TAN H W, LIU G, YANG H L, *et al.* *ACS Nano*[J], 2017, 11(11): 11298–11305.
- [40] LING H F, TAN K M, FANG Q Y, *et al.* *Advanced Electronic Materials*[J], 2017, 3(8): 1600416.
- [41] LEE M Y, LEE W B, CHOI S B, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2017, 29(28): 1700951.
- [42] CHEN Y, WEI Q, YIN J, *et al.* *Advanced Electronic Materials* [J], 2018, 4(9): 1800242.
- [43] ZHAO J H, ZHOU Z Y, WANG H, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2019, 115(15): 153504.
- [44] DONG A H, CHANG K, WANG R Z, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2020, 117(7): 072104.
- [45] ZHAO B, XIAO M, SHEN D Z, *et al.* *Nanotechnology*[J], 2020, 31(12): 125201.
- [46] XIAO W, SHAN L B, ZHANG H T, *et al.* *Nanoscale*[J], 2021, 13(4): 2502–2510.
- [47] GUAN X W, HU W J, HAQUE M A, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2018, 28(3): 1704665.
- [48] MA F M, ZHU Y B, XU Z W, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2020, 30(11): 1908901.
- [49] YANG L, SINGH M K, SHEN S W, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2021, 31(6): 2008259.
- [50] ZHANG K, MENG D H, BAI F M, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2020, 30(34): 2002945.
- [51] HE H K, YANG R, ZHOU W, *et al.* *Small*[J], 2018, 14(15): 1800079.
- [52] ZHOU W, YANG R, HE H K, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2018, 113(6): 061107.
- [53] OKELLY C J, FAIRFIELD J A, MCCLOSKEY D, *et al.* *Advanced Electronic Materials*[J], 2016, 6(2): 1500458.
- [54] ZHAO Y W, DAI S L, LIU D P, *et al.* *Organic Electronics* [J], 2020, 83: 105749.
- [55] JAAFAR A H, ONEIL M, KELLY S M, *et al.* *Advanced Electronic Materials*[J], 2019, 5(7): 1900197.
- [56] ZHU J D, ZHANG T, YANG Y C, *et al.* *Applied Physics Reviews* [J], 2020, 7(1): 011312.
- [57] HAN X, XU Z S, WU W Q, *et al.* *Small Structures*[J], 2020, 1(3): 2000029.
- [58] SHAN X Y, ZHAO C Y, WANG X N, *et al.* *Advanced Science* [J], 2022, 9(6): 2104632.
- [59] YANG J, HU L X, SHEN L F, *et al.* *Fundamental Research*[J/OL], 2022. (2022–07–25). <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.06.019>
- [60] MAIER P, HARTMANN F, DIAS M X S, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2016, 109(2): 023501.
- [61] ZHOU Y, YEW K S, ANG D S, *et al.* *Applied Physics Letters*[J], 2015, 107(7): 072107.
- [62] ZHU X J, LU W D. *ACS Nano*[J], 2018, 12(2): 1242–1249.
- [63] ZHOU F C, LIU Y H, SHEN X P, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2018, 28(15): 1800080.
- [64] ZHAI Y B, YANG X Q, WANG F, *et al.* *Advanced Materials*[J], 2018, 30(49): 1803563.
- [65] CHEN X L, ZHU X, ZHANG S R, *et al.* *Advanced Materials Technologies*[J], 2019, 4(3): 1800551.
- [66] LI H, WEN Y Q, LI P W, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2009, 94(16): 163309.
- [67] WANG L, JIN K J, CE C, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2013, 102(25): 252907.
- [68] CHEN Z C, ZHANG Y T, YU Y, *et al.* *Applied Physics Letters* [J], 2019, 114(18): 181103.

- [69] HAM S G, CHOI S Y, CHO H I, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2019, 29(5): 1806646.
- [70] ZHAO X N, WANG Z Q, LI W T, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2020, 30(17): 1910151.
- [71] CHEN Z L, YU Y, JIN L F, *et al.* *Journal of Materials Chemistry C* [J], 2020, 8(6): 2178–2185.
- [72] REN Z J, ZHOU G D, WEI S Q, *et al.* *Physical Chemistry Chemical Physics*[J], 2020, 22(5): 2743–2747.
- [73] FU X, ZHANG L, CHO H D, *et al.* *Small*[J], 2019, 15(45): 1903809.
- [74] STATHOPOULOS S, TZOUVADAKI T, PRODROMAKIS T. *Scientific Reports*[J], 2021, 11: 7348.
- [75] ZHOU F C, ZHOU Z, CHEN J W, *et al.* *Nature Nanotechnology* [J], 2019, 14: 776–782.
- [76] PEI Y F, LI Z Q, LI B, *et al.* *Advanced Functional Materials*[J], 2022, 32(29): 2203454.

(编辑 张雨明)



特约撰稿人诸葛飞

诸葛飞:男,1975年生,中国科学院宁波材料技术与工程研究所研究员,博士生导师,主要研究方向为光电半导体材料/器件及其在类脑人工智能领域的应用。2005年博士毕业于浙江大学,其后得到日本学

术振兴会(JSPS)的资助,在广岛大学从事博士后研究,2008年至今在中国科学院宁波材料所工作,2018年入选中国科学院脑科学与智能技术卓越创新中心骨干人才。在 *Advanced Materials* 等期刊发表论文 50 余篇,

被引用 4000 余次。主持中国科学院战略性先导科技专项子课题、国家自然科学基金(重点项目等 6 项)、浙江省杰出青年基金、浙江省自然科学基金重大项目等。入选浙江省钱江人才、宁

波市领军人才,获浙江省自然科学一等奖、中国电子学会科学技术二等奖、宁波市科学技术二等奖各 1 项。现担任国际期刊 *Frontiers in Neuroscience* 和 *Frontiers in Photonics* 副主编。