光电智能识别与感知

DOI: 10.16818/j.issn1001－5868.20260118001

基于二维锡基钙钛矿的负光电导人工光电突触

李佳航，陈耿旭*

（福州大学 物理与信息工程学院，福州 350108）

摘 要： 针对传统光电突触器件以正光电导为主、难以在器件层面实现视觉抑制与前端预处理的问题，文章提出一种基于二维锡基钙钛矿的负光电导人工光电突触晶体管。通过在二维钙钛矿$(PenA)_2SnI_4$中引入Bi掺杂调控缺陷态结构，制备了底栅顶接触型光电突触器件，并系统研究其光电突触特性。结果表明，该器件在300～600 nm波段内表现出稳定的负光电导响应，可模拟抑制性突触后电流、双脉冲抑制及长时程抑制等突触行为，并在电脉冲刺激下实现兴奋性突触调控。进一步将其用于过曝图像前端预处理与分类识别，在严重过曝条件下获得95.93%的识别准确率。研究表明，NPC光电突触器件在神经形态视觉前端处理与复杂光照感知中具有重要应用潜力。

关键词： 人工突触；负光电导；神经形态计算；二维钙钛矿；视觉预处理

中图分类号： TN364 **文章编号：** 1001－5868(2026)05－0856－07

Negative-Photoconductive Artificial Optoelectronic Synapses Based on Two-Dimensional Tin-Based Perovskites

LI Jiahang, CHEN Gengxu

(**College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, CHN**)

Abstract: To address the limitation that conventional optoelectronic synaptic devices predominantly exhibit positive photoconductivity and therefore struggle to realize visual inhibition and front-end preprocessing at the device level, this work proposes a negative photoconductivity (NPC) artificial optoelectronic synaptic transistor based on a two-dimensional tin-based perovskite. By introducing Bi doping into the two-dimensional perovskite $(PenA)_2SnI_4$ to modulate the defect-state configuration, a bottom-gate top-contact optoelectronic synaptic device was fabricated, and its optoelectronic synaptic characteristics were systematically investigated. The results demonstrate that the device exhibits stable negative photoconductivity across the 300～600 nm spectral range, enabling the emulation of inhibitory synaptic behaviors, including inhibitory postsynaptic current, paired-pulse depression, and long-term depression, while excitatory synaptic modulation can be achieved under electrical pulse stimulation. Furthermore, the NPC-based device was employed for front-end preprocessing and classification of overexposed images, achieving a recognition accuracy of 95.93% under severe overexposure conditions. These results indicate that NPC optoelectronic synaptic devices hold significant potential for neuromorphic visual front-end processing and robust visual perception in complex illumination environments.

Key words: artificial optoelectronic synapses; negative photoconductivity; neuromorphic computing; two-dimensional perovskites; visual preprocessing

收稿日期：2026－01－18.

基金项目：国家自然科学基金项目(NFSC-62274035)；福建省自然科学基金项目(2024J01253).

* **通信作者：**陈耿旭

0　引言

随着智能视觉、无人自主系统及生物启发计算的持续发展，如何在硬件层面以类神经方式实现高效率、低功耗的前端视觉信息处理，已成为神经形态人工智能体系中的关键问题[1-3]。传统视觉架构通常遵循感知、数字化、存储与集中式计算相分离的串行范式，严重依赖数据搬运与存储带宽，在能耗与延迟方面受到冯·诺依曼架构的约束，难以支撑实时、高维度及长期在线运行的视觉任务[4-6]。相比之下，生物视觉系统通过视网膜内多级神经回路的并行协同，在感知阶段即可完成边缘提取、对比调制、时域抑制与颜色通道分离等神经形态预处理，可有效压缩冗余信息并突出关键特征，为后续更深层次的认知提供高效编码[7-9]。人工光电突触是一类融合光感知与突触可塑性调控的神经形态器件，能够在传感端直接完成光信号到突触权重变化的转换。其通过光调制载流子产生、俘获与释放过程，实现类生物突触的短时与长时可塑性、抑制与增强响应，从而在器件层面完成视觉信息的并行编码与预处理[10]。

然而，现有的光电突触器件多为正光电导器件，在面对复杂视觉特征的前端处理任务时能力有限，通常依赖后端电路或算法实现对比度调制、背景抑制等功能，导致系统结构复杂、能耗增加[11]。负光电导（NPC）器件因其负的响应极性与视觉预处理的功能需求天然匹配，能更好地完成这些任务。它将传统上需要数字化计算的“减法”和“非线性变换”操作内化为器件物理层面的固有响应，从而实现了一种“感算一体”的高效处理[12-13]。因此，构建高性能的负光电导光突触晶体管至关重要，而这依赖于具有优良光电响应特性的材料体系，其合理的选用对于满足神经形态视觉计算相关应用的功能与性能要求也至关重要。

近年来，研究者已经尝试过多种材料以制造负光电导光电突触晶体管，主要的物理机制可分为两类：第一类是发生在半导体异质结上的电荷转移，第二类是内部存在或外部引入的缺陷用以捕获载流子[14]。2023 年，Zhu 等通过构建双层二维分子晶体（2DMC）p-n 异质结场效应晶体管，利用栅压调控光生载流子的传输极性，在同一光刺激下实现了兴奋型与抑制型突触行为，从而实现高对比度的双向光电突触功能[15]。2024 年，Kumar 等通过在超薄黑磷（BP）场效应晶体管中引入氧分子化学吸附效应，利用光照下吸附氧对载流子的调制作用，实现了负光电导与正光电导在同一器件中的共存[16]。2024 年，Jiang 等通过在 Cs_2CoCl_4 单晶中引入本征空位缺陷，利用缺陷对光生载流子的俘获及由此产生的反向内部电场，实现了宽光谱的负光电导行为，并进一步将该 NPC 效应用于人工光电子突触与神经形态计算[17]。常见的用于实现负光电导的材料还包含过渡金属硫化物制备的二维半导体材料、金属卤化物钙钛矿、金属氧化物[14]。其中，钙钛矿材料凭借其高光吸收系数、长载流子寿命及低温可加工性，在光电突触晶体管制备中兼具优异光电性能与工艺优势，而二维钙钛矿依托其天然的层状结构与丰富界面态调控能力，在稳定性、载流子调制精度及突触可塑性和可控性方面相较其他种类的钙钛矿更具优势，但钙钛矿的低载流子输运及其本征的正光电导为制造负光电导突触晶体管带来困难[18]。

本文提出一种基于二维钙钛矿 $(PenA)_2SnI_4$ 的光电突触晶体管。通过在 $(PenA)_2SnI_4$ 中掺杂 Bi 元素，器件实现负光电导，成功模拟视杆细胞和视锥细胞中的超极化行为。同时，$(PenA)_2SnI_4$ 具有较长的线性烷基铵有机层，在室温空气条件下抑制了离子迁移与光敏降解，并提升面内载流子传输，实现突触晶体管性能。实验结果表明，该器件在 300～600 nm 范围的光脉冲刺激下都表现为负光电导，成功模拟了抑制性突触后电流（IPSC）、双脉冲抑制（PPD）、长时程抑制（LTD）等生物突触的功能。该策略表明，基于负光电导效应的突触晶体管可用于实现低功耗、颜色敏感的边缘增强与图像预处理功能，为神经形态视觉体系提供了新的应用方向。

1　实验过程

1.1　材料准备与测试

碘化亚锡（SnI_2，99.99%）、碘化铋（BiI_3，99.99%）和 1-戊胺氢碘酸盐（PenAI，≥99.5%）购自 Adamas-beta，二甲基亚砜（DMSO，99.9%）来自 Sigma-Aldrich，含 100 nm 二氧化硅层的硅片来自苏州晶矽电子科技有限公司。

尽管二维锡基钙钛矿相较于其三维 $ASnX_3$ 结构在环境稳定性方面具有一定提升，但 Sn^{2+} 在空气条件下发生氧化仍是不可忽视的问题。针对该问题，实验通过前驱体纯化与结构设计相结合的策略对 Sn^{2+} 氧化进行有效缓解。即使高纯度的商业

SnI_2，往往已经含有一定比例的Sn^{4+}杂质，因此研究利用SnI_2几乎不溶于甲苯而SnI_4在甲苯中高度可溶的特性，将商品SnI_2粉末加入到5 mL甲苯中搅拌30 min，过滤得到湿润的SnI_2。上述洗涤过程重复三次，然后将所得的SnI_2放在60℃的N_2手套箱中的热板上干燥10 h后使用[19]。相较于常用的SnF_2等添加剂策略，该方法避免了额外离子物种的引入，从而有利于保持二维钙钛矿晶体管中的界面电学纯净性和有效的栅控调制能力。同时，引入长链烷基铵阳离子（$PenA^+$）作为有机间隔层，其构筑的二维钙钛矿具有连续致密的有机间隔层，显著的疏水性有效抑制了氧气和水分向无机Sn-I层中的扩散，从而减缓Sn^{2+}的氧化动力学过程。此外，层状结构在空间上隔离了可能产生的氧化缺陷，避免了Sn^{4+}相关自掺杂在沟道中的连续扩展，有利于维持有效的栅极调制能力[18]。因此，该$PenA^+$基二维钙钛矿薄膜能够在大气环境下实现稳定的场效应晶体管特性。相比之下，虽然短链或芳香族铵基2D钙钛矿展现出优异的光电特性，但其相对有限的疏水屏障和缺陷隔离能力导致Sn^{2+}的迅速氧化，使得有效的场效应调制变得困难[20]。

器件转移特性曲线等晶体管性能及光电流的测试均通过半导体参数分析仪（Keysight B2912A）及探针台在室温大气环境下测试完成，光源采用卓立汉光的多通道LED光源（MLED4），所使用的450 nm，635 nm波段的最大光功率分别为96 mW/cm²和143.5 mW/cm²。晶体管的电压通过扎在电极上的探针输入，在进行转移曲线及光电学突触测试过程中，施加的源漏电压均为－10 V，相关电学测试的栅极电压均在图中及正文部分标出，所有的光电流测试均未施加栅极电压。紫外可见（UV-vis）吸收光谱是使用紫外-可见近红外分光光度计（岛津UV-3600 Plus）测得的。

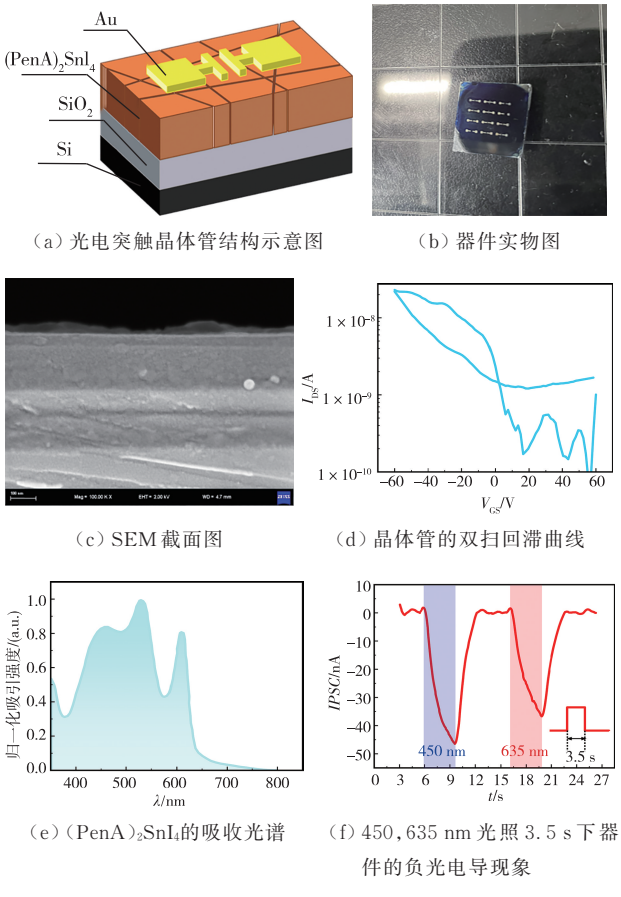
1.2 人工光突触晶体管的制备

在DMSO溶液中，将PenAI和SnI_2混合以制备0.2 M的$(PenA)_2SnI_4$溶液，PenAI和BiI_3混合以制备0.2 M的$(PenA)_3Bi_2I_9$溶液。两种溶液均在60℃下加热搅拌6 h，再使用聚四氟乙烯（PTFE）滤嘴过滤，将过滤后的两种溶液以Bi的摩尔百分数（mol%）为1%混合在一起制备Bi掺杂的$(PenA)_2SnI_4$溶液。人工光突触晶体管为底栅顶接触的结构，器件的基底为重掺杂n型硅片，并带有热生长的SiO_2栅介质层（100 nm）。基底依次用丙酮、异丙醇和去离子水进行清洗，以去除表面污染物。清洗后，基底用99%纯度的氮气吹干，确保表面清洁无水分残留。将50 μL制备的Bi掺杂的$(PenA)_2SnI_4$钙钛矿溶液以4 000 rpm旋涂30 s沉积在Si基板上，在大气环境下以100℃退火10 min形成二维钙钛矿薄膜层，最后使用掩模板通过热蒸发蒸镀将50 nm的Au电极沉积在钙钛矿层上，形成晶体管的源漏电极。

2 结果与讨论

2.1 负光电导晶体管的基本光学与电学性能测试

如图1（a）所示，构建的光电突触晶体管为底栅顶接触结构。图1（b）为器件的实物图，用锉刀将器件一个角上的薄膜磨去，直至露出Si层，以便栅极的扎针测试。图1（c）为器件的SEM截面图，可以看到SiO_2层为100 nm，$(PenA)_2SnI_4$约为230 nm。图1（d）展示了器件在漏源电压V_{DS}=－10 V条件下，栅压V_{GS}从＋60 V扫描至－60 V所得的转移特性曲线。



（a）光电突触晶体管结构示意图　（b）器件实物图

（c）SEM截面图　（d）晶体管的双扫回滞曲线

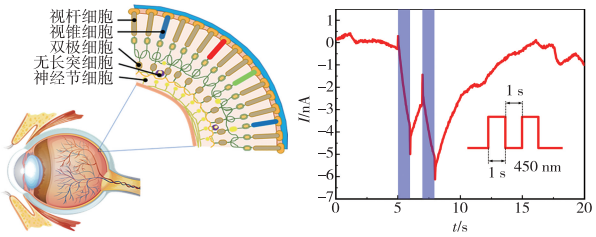
（e）$(PenA)_2SnI_4$的吸收光谱　（f）450，635 nm光照3.5 s下器件的负光电导现象

图1 器件结构及其基础光电学性能表征

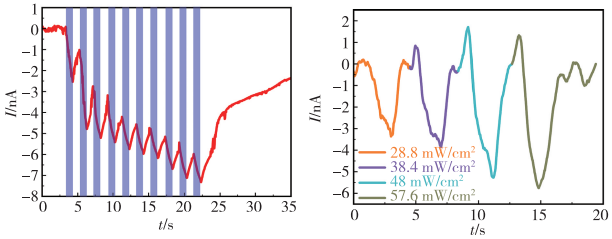
可以看出，器件表现出典型的p型半导体传输行为，但是由于[(PenA)$_2$SnI$_4$]存在碘缺陷和锡缺陷，该器件具有一定迟滞，这也是产生突触现象的原因。为探究该器件的负光电导特性，实验测试了(PenA)$_2$SnI$_4$的吸收光谱，如图1(e)所示，(PenA)$_2$SnI$_4$在350～600 nm的可见光区域具有较强的光吸收特性，这一特性为构建光电感知器件奠定了基础。图1(f)展示了器件在450 nm(96 mW/cm^2，3.5 s)及635 nm(143.5 mW/cm^2，3.5 s)光脉冲照射下，漏极电流I_{DS}下降至低于暗电流水平，器件表现出负光电导说明器件在该波段具备有效的光致载流子捕获或复合机制，其中源漏电极施加－10 V的电压，成功模拟IPSC。结果表明，晶体管在这两种波段的光脉冲刺激下均可产生负光电导。

2.2　负光电导突触晶体管光学与电学突触性能测试

图2(a)所示为人类视网膜中多类视觉细胞的分工与协同机制。锥体细胞作为初级感光单元，负责光信号的感知与颜色分辨，对不同波长光产生差异化响应；水平细胞横向连接多个锥体细胞，通过侧向抑制机制削弱局部过强光刺激，从而增强空间对比度；双极细胞可分为ON型与OFF型，其中OFF型双极细胞在光强增强时被抑制，在强光环境下起到亮度抑制与动态范围压缩的作用；无长突细胞进一步参与时间域调制；神经节细胞则对来自不同通路的兴奋与抑制信号进行整合，输出适于后级神经处理的编码信息。从功能本质上看，视网膜并非对光强进行线性放大，而是通过多级抑制通路主动抑制冗余亮度信息，避免强光饱和对信息传输的干扰，从而显著提升复杂光照条件下的有效信息密度与可判别性。这一生物视觉中的抑制优先策略，与负光电导器件在强光下电导反向调制、自发削弱过曝信号的物理行为高度一致。图2(b)展示了在间隔1 s的两个450 nm(57.6 mW/cm^2)光脉冲刺激下，器件响应表现出典型的PPD行为。该现象类似于当两个电刺激以较短时间间隔依次作用于生物突触时，第二次所引发的突触后电位或电流幅度较第一次显著降低的行为。这一光突触响应特性表明，该器件可有效模拟生物突触的短期抑制机制。图2(c)展示了器件在10个450 nm光脉冲刺激下所表现出的LTD特性。随着光脉冲的持续施加，器件的响应电流逐渐降低，并最终稳定在一个较低的水平，显示出突触权重可被光输入显著且持久地调制。图2(d)记录了器件在不同入射光功率(1 s，450 nm)下的光电流响应。结果表明，IPSCs的幅度可通过光照条件进行精确调控，证明该器件能够利用光输入模拟生物突触中权重的动态调节过程。



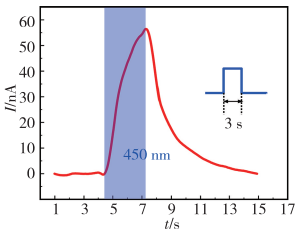
(a) 人类视觉细胞的结构示意图 (b) 两个间隔1 s的450 nm光照射下器件的PPD行为



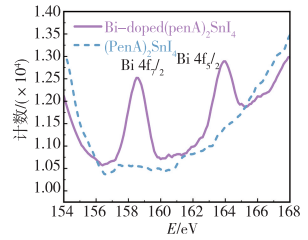
(c) 多个连续脉冲刺激下器件的突触后电流响应　(d) 在不同功率的450 nm光照下器件表现出的不同电流幅值

图2　器件的光学突触性能表征

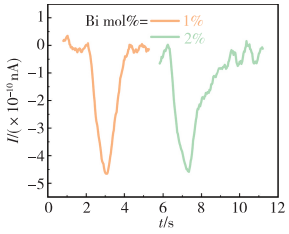
为探究掺杂Bi对器件光电响应的影响，制作并测试未掺杂Bi的钙钛矿器件的光电响应。图3(a)展示了未掺杂Bi的器件在光照下的光电响应，器件的光电流在光照施加时上升，在撤去光照后下降，表现为明显的钙钛矿本征正光电导。



(a) 未掺杂的器件在450 nm(96 mW/cm^2)光照下表现出的光电响应



(b) 掺杂Bi/未掺杂Bi样品的XPS能谱

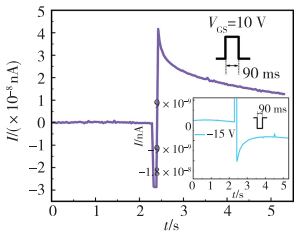


(c) 不同掺杂比例下器件的负光电导响应

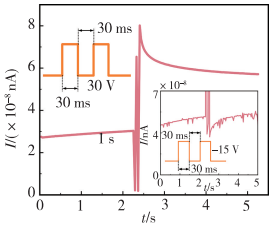
图3　Bi掺杂对器件的影响

接下来对掺杂和未掺杂的钙钛矿样品进行了X射线光电子能谱仪(XPS)测试,如图3(b)所示,未掺杂Bi的样品并未表现出特征峰,而掺杂Bi的样品在约158.9 eV($4f_{7/2}$)和164.2 eV($4f_{5/2}$)处有明显双峰,$\Delta E \approx 5.3$ eV,与Bi^{3+}的特征值高度一致。这说明样品中的Bi更可能以三价状态进入无机骨架,而非形成金属Bi或高价氧化物相。进一步探究了不同掺杂Bi mol%对负光电导响应的影响,如图3(c)所示,Bi mol%分别为1%和2%的器件表现出的抑制电流幅值差别并不明显,说明该负光电导响应并非随掺杂比例线性增强。

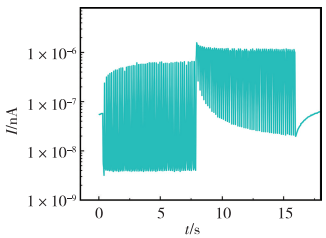
对电学突触性能进行测试,如图4(a)所示,在施加了90 ms的10 V栅极电压后,器件成功模拟了兴奋性突触后电流(EPSC),右下的小图展示了在−15 V的栅极电压下器件成功模拟了IPSC。



(a) 人工突触晶体管在电学刺激下的EPSC及IPSC响应



(b) 器件在电学刺激下的PPF及PPD响应

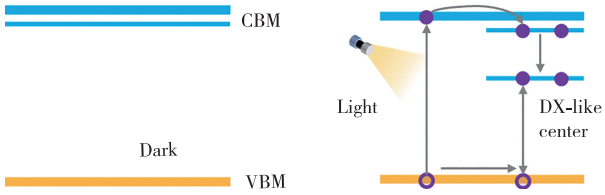


(c) 在施加了50个正脉冲与50个负脉冲下器件的突触后电流响应

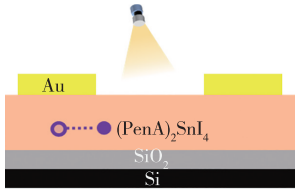
图4 器件的电学突触性能表征

图4(b)展示了器件在连续的两个30 V栅压下所表现出的双脉冲增强(PPF)行为,右下角小图展示了在两个连续的−15 V栅压下器件的PPD行为,这两种突触行为都是在间隔30 ms、持续时间30 ms的双电脉冲序列对刺激下测得的。为全面验证其突触行为模拟能力,施加了50个正栅压脉冲(+20 V)及50个负栅压脉冲(−15 V),脉冲间隔为30 ms,如图4(c)所示,突触后电流在正脉冲刺激下逐渐增强,在负脉冲刺激下则逐步减弱,表现出良好的突触权重调节特性。这证明该器件在电学上能够实现类似生物突触的长时程增强(LTP)与LTD行为,具备用于构建神经形态计算系统的基本单元功能。

接下来深入分析该器件中负光电导现象的产生机理。图5(a)为黑暗条件下钙钛矿的能级示意图,当入射光照射样品时,光子能量若大于材料带隙,会促使价带电子发生本征跃迁,产生大量电子-空穴对。这些光生载流子的产生导致电导率瞬间急剧上升,表现为典型的正光电导响应。



(a) 在暗态下器件的能级　(b) 光照下器件的能级



(c) 在光照下器件中的光生载流子示意图

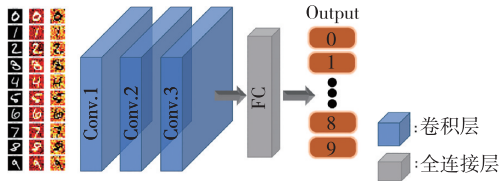
图5 能级机理解释示意图

值得注意的是,光生电子的大量涌入显著改变了体系的载能级分布状态,导致系统的准费米能级发生明显上移,逐渐逼近导带底。当费米能级上移至某一临界阈值时,原本处于亚稳态的I—Sn浅施主缺陷的晶格结构开始失稳。这一相变过程表现为Bi原子沿〈111〉晶向发生位移,同时打破三个Bi—I键,导致缺陷的晶格对称性发生改变。这一结构重组使得缺陷从浅能级施主态转变为一个深能级陷阱中心,如图5(b)所示。在传统半导体物理中,将这种具有晶格弛豫特征的缺陷称为“DX-like中心”。新形成的DX-like深能级陷阱表现出极强的电子捕获能力,能够有效俘获导带中的光生电子。这些被陷阱俘获的电子与价带中的空穴之间发生非辐射复合的概率显著增大,从而大幅降低了载流子的寿命。随着导带中可自由移动的电子数量因捕获和复合过程而急剧减少,材料的总体电导率开始下降,甚至低于暗态时的电导率水平,最终表现为负光电导现象。值得注意的是,Bi掺杂诱导NPC并非线性随掺杂比例增强,而是在低掺杂区间迅速触发,在更高掺杂时进入饱和区。在

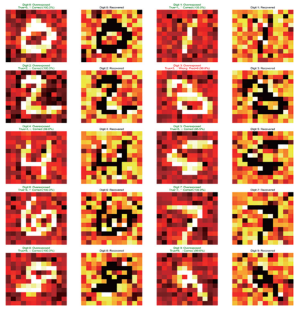
Haque等的工作中明确指出，Bi掺杂在二维钙钛矿中是高度受限的，当前驱体中Bi mol%为1%时，实际进入晶格的Bi含量≈0.012%，因此1%与2%的Bi掺杂出现相近的抑制型光电流幅度是缺陷饱和的直接体现[21]。

2.3　负光电导突触晶体管用于过曝图像的处理及分类识别

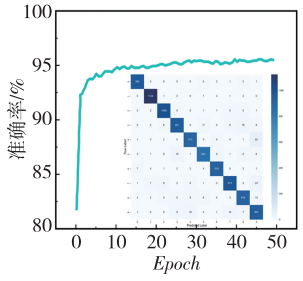
在成像领域，过曝是最常见且棘手的技术问题之一。由于过曝区域像素值饱和，局部梯度、纹理与色彩差异完全丢失，后端算法面对的是已损坏数据，而传统的器件及神经网络的本质都是“事后猜测”，无法真实恢复被饱和区域的物理信息。针对该问题，利用负光电导突触晶体管的特性，当传感器感受到光强即将过曝时，主动降低电导，从而从根源上防止信息丢失。图6(a)展示了卷积神经网络(CNN)架构，由输入层、三个卷积层、一个全连接层和输出层构成。



(a) 将图像进行人为过曝处理并输入进CNN中进行识别的流程示意图



(b) 不同数字过曝图片及识别情况



(c) 随着训练周期的增加，CNN对过曝图像分类识别的准确率

图6　过曝图像处理与分类识别的过程及其结果

针对原始28×28像素的Fashion-MNIST图像，引入亮度增强或饱和，构造“过曝输入样本”，以模拟真实高动态光照场景。将NPC输出映射为6个等效特征通道，构成12×12×6的输入特征图，CNN接收NPC处理后的特征图，提取空间结构特征，并基于这些特征完成10类(0~9)数字分类，来探究前端NPC物理抑制是否能降低后端识别难度。图6(b)为分类结果可视化图表，左侧列为过曝图像，右侧列为恢复图像，展示了模型在测试集上对10个数字样本的具体预测结果。结果表明，除了由于中间狭窄连接处的细微拓扑特征可能无法完全重建，数字3可能会被错误预测为8，而其他数字均被正确分类且置信度较高，证明了本方法的有效性。图6(c)为准确率与混淆矩阵，过曝图像的最终准确率可达到95.93%，其中右下角10×10的混淆矩阵进一步证明了这10种过曝图像的分类精度整体处于较高水平。该高精度分类性能的核心来自负光电导效应，其通过物理机制抑制过曝区域，可有效恢复图像的关键细节和对比度。该效应使过曝图像中原本丢失的特征得以保留，为后续神经网络分类提供了清晰、高质量的特征输入。因此，本系统在极端光照条件下仍能达到高准确率，这是传统数字处理方法难以实现的。

3　总结

本文提出一种基于二维锡基钙钛矿$(PenA)_2SnI_4$的负光电导人工光电突触晶体管。通过Bi掺杂，该器件在可见光范围内实现了稳定可控的负光电导，其机理可归因于光生载流子触发的深能级陷阱形成与增强复合过程。在此基础上，器件同时实现了光诱导的抑制型突触可塑性和电诱导的兴奋型突触调控。进一步将该负光电导特性用于视觉前端预处理，可有效抑制过曝引起的信号饱和，并显著提升后端神经网络的分类鲁棒性。结果表明，负光电导突触器件可作为一种具备计算意义的抑制单元，为构建高能效、类生物的神经形态视觉系统提供了新的材料体系与器件设计思路。

参考文献：

[1] Chai Y. In-sensor computing for machine vision[J]. Nature, 2020, 579(7797): 32-33.

[2] Mennel L, Symonowicz J, Wachter S, et al. Ultrafast machine vision with 2D material neural network image sensors[J]. Nature, 2020, 579(7797): 62-66.

[3] Huang Y, Tan Y, Kang Y, et al. Bioinspired sensing-memory-computing integrated vision systems: biomimetic mechanisms, design principles, and applications[J]. Science China Information Sciences, 2024, 67(5): 151401.

[4] Matsuzaka Y, Yashiro R. AI-based computer vision techniques and expert systems[J]. AI, 2023, 4(1): 289-302.

[5] Xu C, Zhu Z, Zeng H, et al. Towards dynamic computing: multi-dynamic neuronal-synaptic transistors for visual intelligence[J]. Nano Energy, 2026, 148: 111656.

[6] Yao P, Wu H, Gao B, et al. Fully hardware-implemented memristor convolutional neural network [J]. Nature, 2020, 577(7792): 641-646.

[7] Demb J B, Singer J H. Functional circuitry of the retina [J]. Annual Review of Vision Science, 2015, 1: 263-289.

[8] Dacey D M, Crook J D, Packer O S. Distinct synaptic mechanisms create parallel S-ON and S-OFF color opponent pathways in the primate retina [J]. Visual Neuroscience, 2014, 31(2): 139-151.

[9] Dacey D M. Primate retina: cell types, circuits and color opponency [J]. Progress in Retinal and Eye Research, 1999, 18(6): 737-763.

[10] Wang X, Yang H, Li E, et al. Stretchable transistor-structured artificial synapses for neuromorphic electronics [J]. Small, 2023, 19(18): e2205395.

[11] Xie C, Liu C K, Loi H L, et al. Perovskite-based phototransistors and hybrid photodetectors [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(20): 1903907.

[12] Jin C, Wang J, Liu W, et al. Adaptive vision sensor based on nonlinear negative photoconductivity behavior [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(34): 2501284.

[13] Gao Z, Jiang R, Deng M, et al. Tunable negative and positive photoconductance in van der Waals heterostructure for image preprocessing [J]. Advanced Materials, 2024, 36(29): 2401585.

[14] Wang L, Wang H, Liu J, et al. Negative photoconductivity transistors for visuomorphic computing [J]. Advanced Materials, 2024, 36(38): 2403538.

[15] Zhu X, Gao C, Ren Y, et al. High-contrast bidirectional optoelectronic synapses based on 2D molecular crystal heterojunctions for motion detection [J]. Advanced Materials, 2023, 35(24): 2301468.

[16] Kumar A, Intonti K, Viscardi L, et al. Memory effect and coexistence of negative and positive photoconductivity in black phosphorus field effect transistor for neuromorphic vision sensors [J]. Materials Horizons, 2024, 11(10): 2397-2405.

[17] Jiang H, Ji H, Ma Z, et al. Simultaneous achieving negative photoconductivity response and volatile resistive switching in Cs_2CoCl_4 single crystals towards artificial optoelectronic synapse [J]. Light: Science & Applications, 2024, 13: 316.

[18] Wang S, Kalyanasundaram S, Gao L, et al. Unveiling the role of linear alkyl organic cations in 2D layered tin halide perovskite field-effect transistors [J]. Materials Horizons, 2024, 11(5): 1177-1187.

[19] Zeng G, Pu D, Huang L, et al. Enhancing the performance of tin-based perovskite solar cells through solvent purification of tin iodide [J]. Journal of Materials Chemistry A, 2023, 11(21): 11245-11253.

[20] Matsushima T, Terakawa S, Leyden M R, et al. Toward air-stable field-effect transistors with a tin iodide-based hybrid perovskite semiconductor [J]. Journal of Applied Physics, 2019, 125(23): 235501.

[21] Haque M A, Li J L, Abdelhady A L, et al. Transition from positive to negative photoconductance in doped hybrid perovskite semiconductors [J]. Advanced Optical Materials, 2019, 7(22): 1900865.

作者简介：

李佳航(2001—)，男，甘肃省会宁县人，硕士研究生，主要研究方向为神经形态晶体管及忆阻器；

陈耿旭(1988—)，男，福建省泉州市人，博士，副教授，主要研究方向为神经形态器件。