文章编号: 1007-4252(2025)02-0105-08 DOI: 10.20027/j.gncq.2025.0014 CSTR: 32180.14.j.gncq.2025.0014

基于 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}的全光突触用于模式识别的研究

杜婷婷, 黄伟龙, 陈耿旭*
(福州大学物理与信息工程学院, 福建 350108)

摘要: 传统上用于模式识别的神经形态器件大多基于电信号, 存在带宽受限、电阻电容延迟和电流串扰等问题, 会导致图像产生失真, 进而严重影响模式识别的结果。因此, 避免电信号带来的信号串扰等问题以保证后续模式识别结果的有效性至关重要。与电信号相比, 光信号具有运算速度快、抗干扰能力强、能量损失小等优点。本文提出了基于磷光材料的单层全光器件, 成功模拟了兴奋性突触后光强(EPSI)和双脉冲易化(PPF)等类似生物突触的基本功能。该器件可以处理视觉信息并产生类似突触的发光输出, 以实现光在信息显示、信息识别中的多样化利用。最后, 利用 MNIST 数据集对手写数字进行识别, 获得了 97.36% 的模式识别准确率。

关键词: 全光突触; 模式识别; 图像传输
中图分类号: TN256 **文献标志码:** A

All-optical synapse based on $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+} for pattern recognition

DU Ting-ting, HUANG Wei-long, CHEN Geng-xu*
(College of Physics and Information Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108, Fujian, China)

Abstract: Traditional neuromorphic devices used for pattern recognition are mostly based on electrical signals, which suffer from bottleneck problems such as bandwidth limitation, resistance capacitance delay, and current crosstalk, leading to image distortion and seriously affecting pattern recognition results. Therefore, it is crucial to avoid signal crosstalk caused by electrical signals to ensure the effectiveness of subsequent pattern recognition results. Compared with electrical signals, optical signals have the advantages of fast processing speed, strong anti-interference and small energy loss. This article proposes a single-layer all-optical device based on phosphorescent materials, which successfully simulates the basic functions such as excitatory postsynaptic intensity (EPSI) and paired-pulse facilitation (PPF), which are similar to biological synapses. The device can process visual information and its luminescent properties are similar to synapses, achieving diversified utilization of light in information display and recognition. Finally, the MNIST dataset was used to recognize handwritten digits, achieving a pattern recognition accuracy of 97.36%.

收稿日期: 2025−03−03; **修订日期:** 2025−03−20
基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 62274035); 福建省自然科学基金项目 (No. 2024J01253).
作者简介: 杜婷婷(2000—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光电材料与器件(E-mail: 2775487496@qq.com).
通信作者: 陈耿旭 (1988—), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为光电材料与器件 (E-mail: gxchen@fzu.edu.cn).

Key words: all-optical synapse; pattern recognition; image transmission

0 引言

随着物联网(IoT)、大数据(Big Data)和人工智能(AI)的发展,数据和信息的爆炸式增长对快速信息处理提出了严峻的挑战[1]。神经形态计算受到人脑的启发,旨在解决冯·诺伊曼瓶颈带来的挑战,并有望在处理复杂任务时显著提高计算效率[2]。突触器件作为阵列神经形态计算系统的核心连接点,近年来得到了大量的研究和关注[3]。受人工智能以及类脑计算的影响,利用器件来构建人工神经网络已经成为一个新兴领域。目前,突触器件已被应用于逻辑运算[4,5]、联想学习和图像识别[6,7]等方面。在光电混合人工神经网络的研究中,人们已经报道了各种类型的光电器件,其中大多数集中在光电信号的输入和电信号的输出上[8-16]。基于电输出的突触器件可能面临能量损失、潜流和有限带宽等挑战,这些挑战严重影响了神经形态计算的应用。

与电信号相比,光信号具有运算速度快、抗干扰能力强、能量损耗低的优点。同时,光电突触器件可实现光信号的远距离和一对多传输。但是,目前报道的包括 OLED 型[17]、发光电化学型[18]、有机薄膜晶体管型[19]在内的多种类型发光突触,主要采用电信号实现信号感知和处理,面临着集成能力和带宽方面的限制。幸运的是,全光神经器件可突破线路的制约,避免集成面积有限带来的带宽压力,实现较宽的带宽,从而提高了人工神经网络的信息处理能力[20,21]。

磷光材料是指在电磁辐射和离子射线激发下能发出磷光的材料。这类材料具备能量吸收与存储特性,并且在激发停止后可在一段时间内持续发射可见光。磷光材料的上述特点,使其在全光神经器件领域备受关注。这其中,铝酸盐类的磷光材料具有发光亮度强、余辉性能优异、化学稳定性好的优点。目前,以稀土离子作为激活离子、碱土铝酸盐作为基质的磷光发光体系,在磷光材料领域取得了巨大成功,成为磷光材料的主流。

在本研究中,我们通过将 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}材料分散于聚二甲基硅氧烷(PDMS)中,制备了全光突触。我们系统研究了激发光的强度、脉冲持续时间、脉冲数量等因素对器件的光输出特性的影响;结果表明,本文提出的全光突触,可以很好地模拟类似于生物突触的基本突触功能,如兴奋性突触后光强(Excitatory Post Synaptic Intensity, EPSI)、双脉冲易化(Paired-pulse facilitation, PPF)等。此外,我们制备的基于 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}材料的全光突触器件可以用于手写数字识别任务,识别准确率高达 97.36%。本工作提出的基于全光信号的突触器件,摆脱了传统电信号存在的串扰等问题,提高了图像识别有效性,展现出在神经形态计算领域中的潜力。

1 实验

1.1 全光突触制备

本研究所用的玻璃基板来自深圳市华南湘城科技有限公司,磷光材料($SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+})采购自 Sigma-Aldrich 公司,PDMS 和配套的固化剂采购自美国道康宁公司。

$SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}磷光层溶液的配制:将 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}粉末和 PDMS 以 1∶3 的质量比在常温下搅拌 12 h,使其分散均匀;在旋涂前 10 min,在混合溶液中加入与 PDMS 质量比为 1:10 的固化剂;最后,通过旋涂制备 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}磷光层。

全光突触器件的制备流程:首先将二氧化硅玻璃衬底依次在洗涤剂、去离子水、丙酮、乙醇、去离子水中超声清洗 20 min,然后放入干燥箱中烘干;接着,将 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}磷光层旋涂于清洗烘干后的玻璃基板上,旋涂转速为 300 r/min,旋涂时间为 60 s;最后在 65 ℃ 的温度下退火 12 h。

1.2 测试

利用 FL-4600 型光谱仪采集 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}磷光层的光致发光光谱。使用 ET-2030 型高速光电探测器和 Keysight DSOX 1202 示波器测试器件的光输出特性。在光输出性能测试过程中,使用光电探测器来监测器件的瞬态光强变化。光电探测器能够实时捕捉器件的光输出信号,并将其转换为电压信号。随后,通过连接示波器,将器件的光输出变化直观地显示在示波器上,从而准确表征全光突触器件光输出的动态特性。所有测试均在

室温大气环境下完成。

2　结果与讨论

2.1　全光突触的光学性能

制备的基于 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}材料的全光突触的器件结构如图 1(a)所示。其中, 玻璃基板的主要作用是为未成形的磷光层提供基板支撑及模板, $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}层是器件的发光层。由于 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}难溶于溶剂中, 因此本研究使用 PDMS 作为全光突触器件的包覆层, 并通过旋涂和退火工艺将其加工成膜。通常情况下, PDMS 为无色澄清的油状液体, 没有特殊气味并且没有毒性, 具有生理惰性和良好的化学稳定性。同时, PDMS 还具有良好的透光性, 因此作为包覆体可以保证其内部的功能材料很好地接收输入信号并输出响应信号。

在器件制备完成后, 需要表征其光致发光(photoluminescence, PL)光谱, 以确定其主要发光波段, 这决定了器件的光学显示效果。如图 1(b)所示, 我们使用 PL-4600 型光谱仪测试了全光突触的光致发光光谱。结果显示, 在 511 nm 处有一个发光峰, 其半峰全宽(FWHM)为 73 nm。显而易见, 本实验制备的全光器件输出的主要为黄绿光。

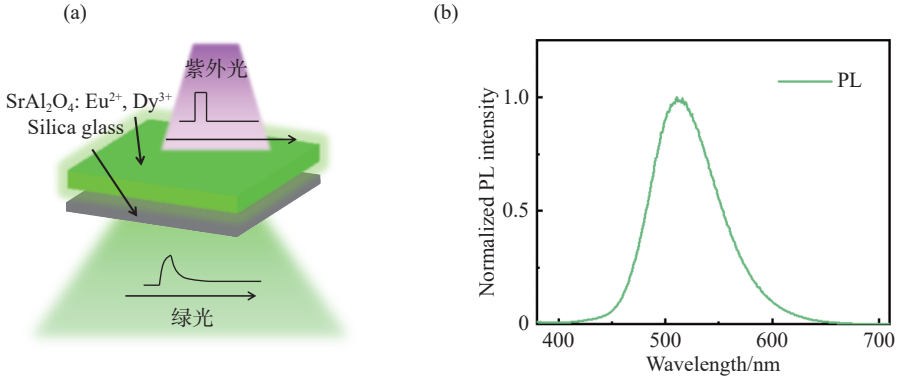

图 1　(a)全光突触结构图; (b)器件的光致发光光谱

Fig. 1　(a) Schematic structure of the all-optical synapse. (b) Photoluminescence spectra of the device.

2.2　突触性能测试

图 2(a)为生物突触的结构示意图, 其包含突触前膜、突触间隙和突触后膜三部分。动作电位到达突触前膜时, 会触发神经递质的释放, 进而作用于突触后膜完成信息传递。突触之间的连接强度可以通过后期的训练来进行调整, 这种行为被认为是生物后天学习和记忆的关键。全光突触器件是一种能够直接将光信号转换为记忆光学参数(例如透过率和发光强度)的器件, 本文所制备的全光突触器件的突触可塑性主要体现在瞬态发光强度和突触后光强的变化上。为了研究这种具有紫外光输入和可见光输出的全光突触器件的突触可塑性, 我们使用光电探测器对其光输出性能进行了详细的测试。图 2(b)为对全光突触施加单个强度为 4% 的紫外光脉冲时器件的 EPSI 响应, 纵坐标表示的是器件光输出的相对强度(Rel.intensity)。如图 2(c)所示, 我们通过对全光突触施加不同强度的紫外光(4%、7%、10%、12%、15%)来进行 EPSI 响应测试。在测试过程中脉冲宽度固定为 100 ms。结果表明, 随着激发光强的不断增大, 输出光强的峰值也越高; 当激发光强达到 15% 时, EPSI 转换成的电压峰值达到 900 mV。当撤去紫外光刺激后, 突触后光强迅速衰减到弱光强状态。这意味着可以通过控制外部刺激强度来调节突触的连接强度。

此外, 通过施加不同脉冲持续时间的紫外光脉冲, 器件的 EPSI 也不同。图 3(a)和(b)显示了施加脉冲持续时间为 50、100、200、400、800 和 1600 ms 的单脉冲后的 EPSI 强度和衰减特性。可以看到, 随着脉冲持续时间的增加, 器件的 EPSI 随之增加, 同时其衰减时间也随之增加。突触后可见光强度被认为对应着记忆水平, 因此这些现象证明了器件的记忆增强行为。随着紫外输入光脉冲持续时间的增加, EPSI 的峰值显著增加, 如图 3(c)所示; 同时衰减趋势减缓, 如图 3(d)所示。另外, 如图 3(a)的插图所示, 即使过了 12 s, 突触后的光强度仍然可见, 这表明更多的学习时间有助于提高器

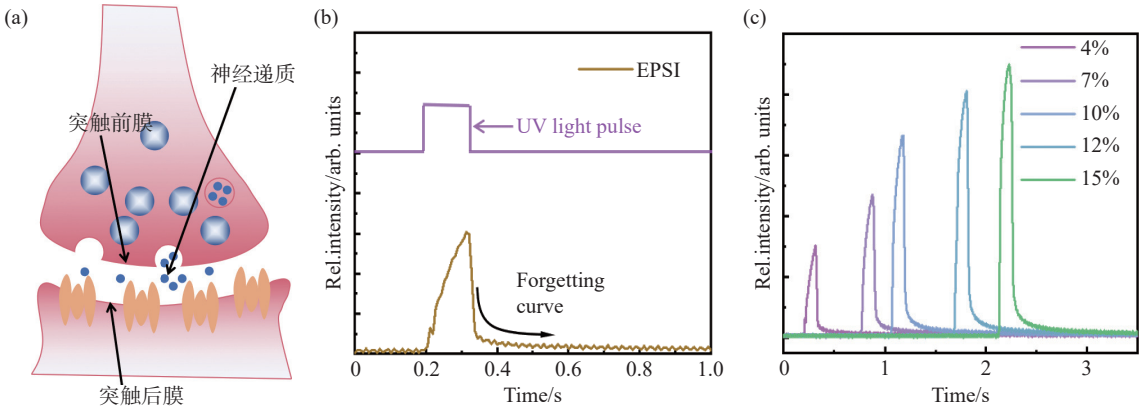

图 2 (a)生物突触示意图; (b) 全光突触的 EPSI 响应; (c)不同激发光强下全光突触的 EPSI 响应

Fig. 2 (a) Schematic diagram of a biological synapse. (b) EPSI responses of the all-optical synapse. (c) EPSI response of all-optical synapses under different excitation light intensities.

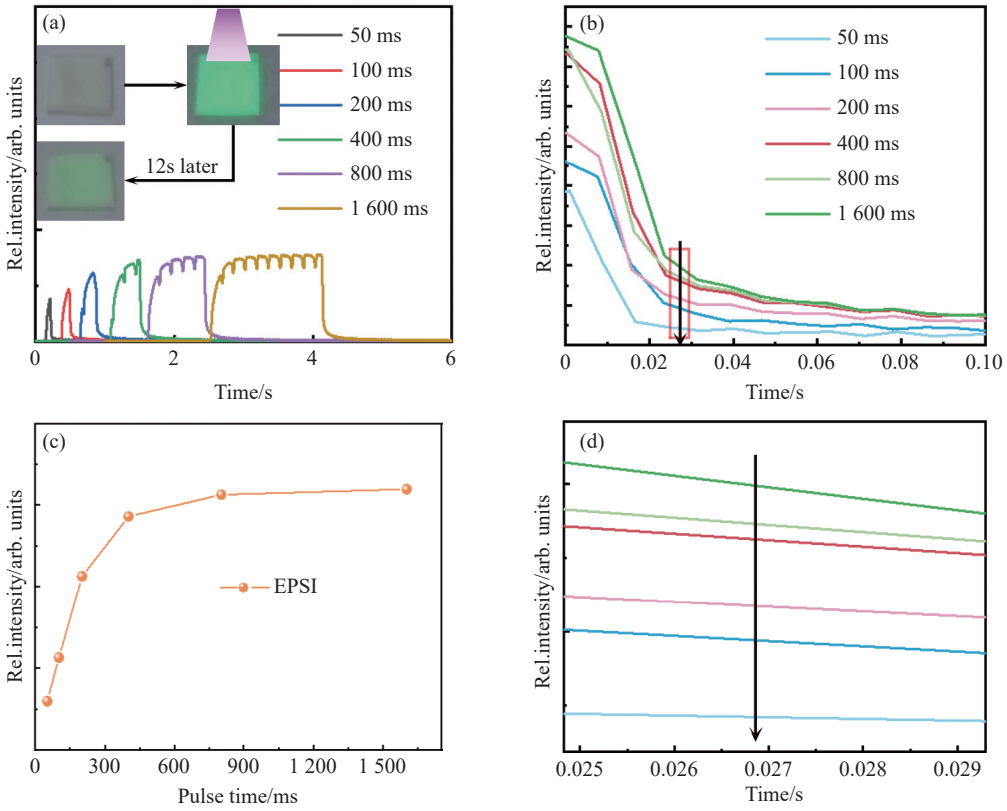

图 3 (a)不同脉冲持续时间下的 EPSI 响应, 插图为施加紫外光前、紫外光照射时、撤去紫外光 12 s 后器件的实物图; (b)不同脉冲持续时间下器件的衰减曲线; (c)不同脉冲持续时间下的 EPSI 峰值统计图; (d)图(b)方框内曲线的放大图

Fig. 3 (a) EPSI responses under different pulse durations. The inset shows the image of the device before applying ultraviolet light, during ultraviolet light irradiation, and 12 s after removing ultraviolet light. (b) The attenuation curve of the device under different pulse durations. (c) Statistical plot of EPSI peak values under different pulse durations. (d) An enlarged view of the curve within the box in (b).

件的记忆水平。

突触器件的学习记忆功能与其可塑性密切相关。PPF 是神经突触可塑性的一种表现形式, 其特征是当突触前末端接受两个连续相同刺激时, 第二个刺激引发的突触后电流幅值高于第一个刺激。为了模拟生物的 PPF 特性, 我们对器件施加两个相

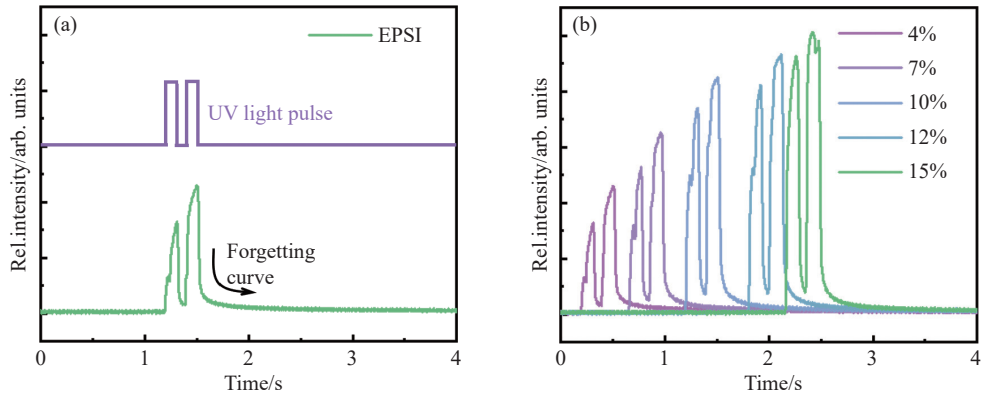

图 4　(a)全光突触的 PPF 响应; (b)全光突触的 PPF 响应与激发光强的关系

Fig. 4　(a) PPF responses of the all-optical synapses. (b) The relationship between PPF response and excitation light intensity.

同的连续脉冲(激发光强为 7%, 脉冲间隔和持续时间均为 100 ms)。如图 4(a)所示, 器件表现出明显的 PPF 特性。出现这种现象的原因是, 第一个脉冲刺激所引起的被缺陷能级捕获的空穴还没有完全被释放出来时, 第二个脉冲刺激就已经到来, 使得更多的空穴被陷阱能级捕获, 导致更多的电子空穴复合发光, 从而增大了突触后光强的峰值。同时, 我们也探究了双脉冲激发光的不同光强对突触后光强的影响。如图 4(b)所示, 双脉冲的突触后光强随着激发光强的增强而增大。整体而言, 全光突触器件中的 PPF 行为与生物突触中的行为一致。

另外, 我们还研究了在多脉冲的刺激下, 突触器件的可塑性增强效应。图 5(a)显示了 20 个紫外光脉冲(脉冲持续和间隔时间均为 100 ms)引起的所引发的突触后光强。第一个紫外光脉冲刺激后的初始突触后光强转换成电压值为 328 mV, 经过 20 个紫外光脉冲刺激后的突触后光强转换成电压值为 620 mV, 是初始值的 1.89 倍。由此可见, 器件的输出瞬态光强度随激发光脉冲数的增加而增强, 这证明了全光突触器件的输出瞬态光信号具有和生物突触类似的增强行为。图 5(b)显示了激发光强对 20 个紫外光脉冲下突触输出瞬态光强的影响, 可见器件的输出瞬态光强随着激发光强的增强而增强。此外, 图 5(c)展示了全光突触器件的脉冲数量依赖可塑性 (spike-number dependent plasticity, SNDP) 行为。为了方便观察器件的 SNDP 行为, 我们引入 SNDP 指数, 如公式(1)所示:

$$\text{SNDP index} = \frac{A_n}{A_1} \tag{1}$$

其中, A_n 和 A_1 分别为第 n 和第 1 个脉冲的 EPSI 峰值, 单位均为 mV。本研究系统考察了紫外光脉冲数量 (1、5、10、17、30、50 次) 对 SNDP 指数的影响, 并将实验结果汇总于图 5(c)。从图中可以观察到 SNDP 指数随输入脉冲数量的变化而变化: 随着脉冲数量的增加, SNDP 指数增加, 并在 n>17 时趋于饱和。这与人类的记忆模式相似, 当刺激的次数大于一定值时, 记忆的程度就会趋于饱和。此外, 本文还研究了输入光脉冲频率对突触可塑性的影响, 如图 5(d)所示。图中显示, 在输入光脉冲数量相同的情况下, 器件的 EPSI 随输入光脉冲频率的增大而增大。这是因为, 更高的频率意味着紫外光脉冲的间隔时间缩短, 导致更多待激发的电子被激发并与空穴复合发光, 从而使瞬态光强变大。

2.3　全光突触的工作机理

全光突触器件的发光过程分为激发光源照射时的光致发光过程和移除光源后的磷光发光过程, 如图 6 所示。$SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}磷光材料中的 Eu^{2+}为电子捕获中心, Dy^{3+}为空穴捕获中心。当器件暴露在紫外光下时, Eu^{2+}发光中心直接吸收外部光源的能量, 电子被从基态激发到激发态, 同时在基态中留下了相应的空穴。Eu^{2+}捕获电子变为 Eu^{1+}, 基态中的空穴被释放到价带(基态的深度约为 0.06 eV)中, 被 Dy^{3+}捕获从而使 Dy^{3+}变为 Dy^{4+}, 对应于图 6(i)的情况。在紫外光的持续刺激下, 电子和空穴不断复合发光, 对应于图 6(ii)。当紫外光照射停止后, 被 Dy^{3+}捕获的空穴在热扰动作用下缓慢脱离缺陷键, 被释放到价带中(Dy^{3+}缺陷能级深度为 0.65 eV), 对应于图 6(iii)的情况。最后, Eu^{1+}重新捕获空穴变为为 Eu^{2+}, 电子和空穴重新复合产生磷光, 对应于图 6(iv)的情况。可见, 光致发光突触的发光机理来源于电子和空穴的产生、转移、储存、释

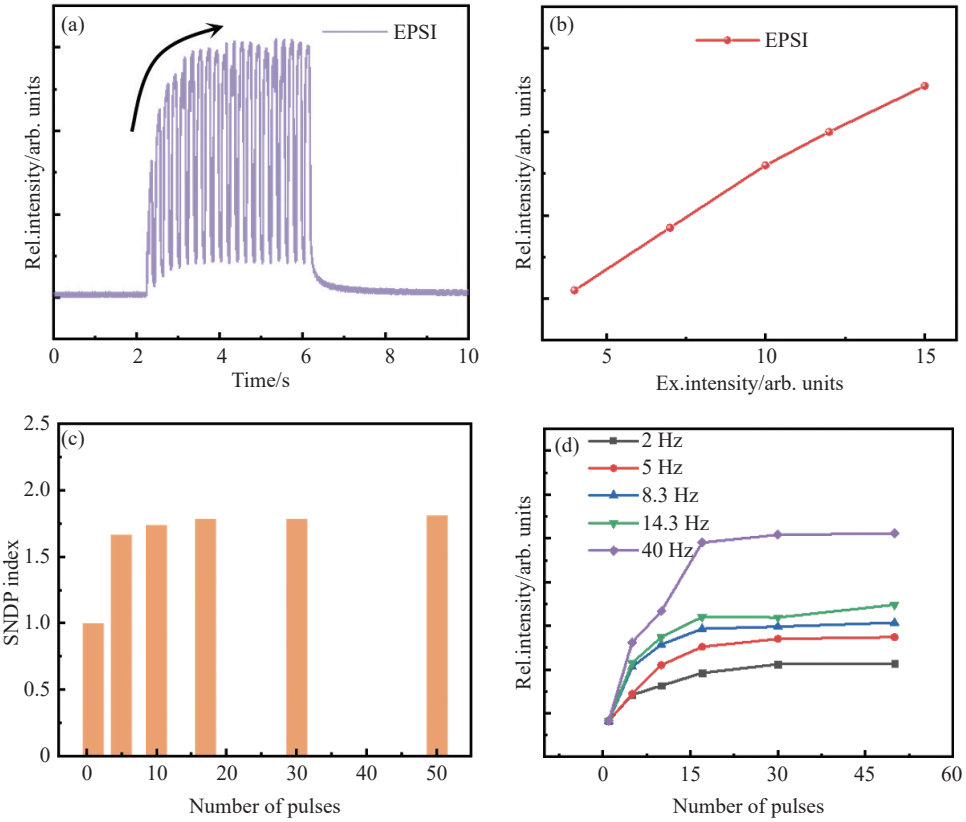

图 5 (a)由 20 个间隔为 100 ms 的连续突触前脉冲激发的 EPSI;(b)不同激发强度下 20 个脉冲的突触后光强;(c)SNDP 指数随紫外光脉冲数的变化;(d)不同频率下的 EPSI 随脉冲数量的变化

Fig. 5 (a) The EPSI triggered by 20 continuous presynaptic pulses with interval of 100 ms. (b) Post-synaptic light intensity of 20 pulses under different exciting intensity. (c) SNDP index as a function of number of ultraviolet light pulses. (d) The EPSI with different number of pulses at different frequencies.

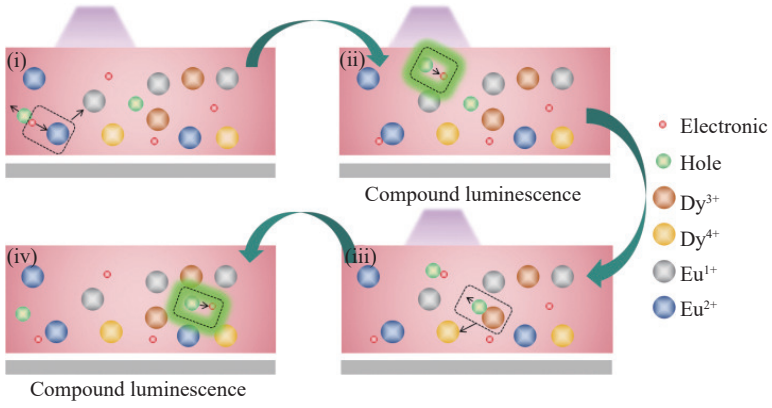

图 6 全光突触器件工作机理图

Fig. 6 Diagram of device working mechanism of all-optical synapses.

放和复合。

2.4 全光突触用于模式识别

根据样本的特征,用计算的方法将样本划分到一定类别的方法称为模式识别。其中图像识别已成为模式识别领域研究最广泛的方向之一。为了进一步验证器件在图像识别中的应用潜力,我们构造了一个 784×64×10 的三层(包括输入层、隐藏层和输出层)人工神经网络,如图 7(a)所示。其中,输入神经元的信号为光强信号(X),在该网络中三

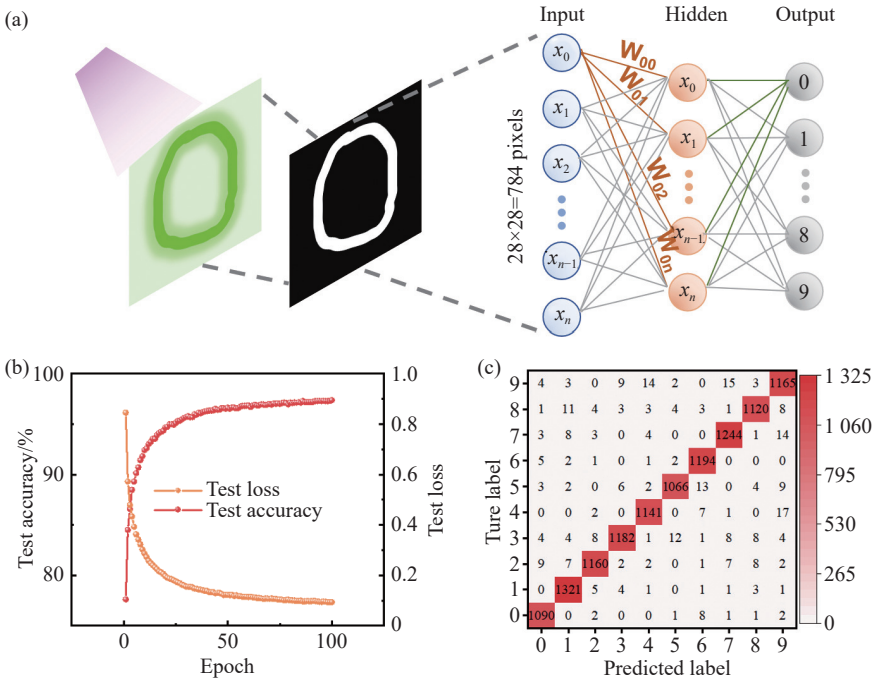

图 7　(a)全光突触用于手写数字识别的示意图; (b)不同训练周期下的识别准确率和损失; (c)器件的混淆矩阵示意图

Fig. 7　(a) Schematic diagram of handwritten digit recognition using all-optical synapses. (b) Accuracy and loss under different training cycles. (c) Diagram of confusion matrix of the device.

层之间分别由 784×64 和 64×10 的权重矩阵进行连接, 其中输入层与隐藏层之间连接的权值记为 W_{00}、W_{01}、W_{02}、...W_{0n}。通过 MATLAB 建模仿真, 测试了混合国家标准与技术研究所(MNIST)手写数据集的准确性。MNIST 手写数据集中的图片都被初始化为 784 (28×28) 个像素, 然后将每幅图像的 784 像素值编码为输入, 计算结果由隐含层处理后经输出层生成。当计算结果与正确结果之间存在误差时, 都会根据误差对连接层的权重进行修正, 直到误差在可接受范围内。这一计算过程被称为"训练", 其迭代次数由误差的收敛情况决定。在本研究中, 模拟网络权重训练的过程如下: 以前 10 个输出光脉冲的 EPSI 峰值作为初始权重基准, 通过施加额外激发光脉冲实现权重增强, 同时利用第 10 个光脉冲的自然衰减特性实现权重减弱。在仿真实验中, 以 20%～65% 的突触权重衰减率为突触的可塑性范围, 对应于 10 个以上光脉冲。

图 7(b)为不同训练周期数的 MNIST 测试集数字的识别精度和损失, 可见经过 100 个训练周期后识别精度最高可达 97.36%。混淆矩阵(见图 7(c))展示了使用训练好的神经网络对测试数据集进行分类的结果。混淆矩阵的每一列代表了预测类别, 每一行代表了数据的真实归属类别, 对角线的则表示神经网络的预测类别与数据的真实归属类别相同, 其数值的大小表示神经网络预测数据类别的正确概率, 其颜色越深(即数值越大)代表预测的正确概率越大。输出神经元在目标数字类别上呈现出明显的峰值响应分布, 表明网络实现了有效的分类功能。

3　结论

本文以 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}为发光层材料, 制备了全光突触器件, 并模拟了如 EPSI、PPF 等类似生物突触的基本行为。结果表明, 通过调节脉冲持续时间和脉冲数量, 可以控制器件的记忆保持程度: 脉冲持续时间越长或者脉冲数量越多, 其光强衰减所需的时间也越长, 器件的记忆保持特性越好。最后, 我们通过手写数字识别任务来验证基于 $SrAl_2O_4$: Eu^{2+}, Dy^{3+}材料的全光突触用于模式识别的可行性, 结果显示识别精度可达 97.36%。该全光突触器件摆脱了电信号的信号串扰而带来的图像失真问题, 为模式识别任务的信号传输方式提供了新的可能。

参考文献:

[1] Wang L, Zhang L, Hua S, et al. In-Sensor Noise Reduction and

Reservoir Computing System Using ZnO Optoelectronic Memristors for Artificial Vision Applications[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2024, 6(12): 9019-9028.

[2] Zidan M A, Strachan J P, Lu W D. The future of electronics based on memristive systems[J]. Nature Electronics, 2018, 1(1): 22-29.

[3] Huang W, Xia X, Zhu C, et al. Memristive artificial synapses for neuromorphic computing[J]. Nano-Micro Letters, 2021, 13: 1-28.

[4] Hao D, Zhang J, Dai S, et al. Perovskite/organic semiconductor-based photonic synaptic transistor for artificial visual system[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2020, 12(35): 39487-39495.

[5] Feng W, Hu J, Yin M, et al. Achieving Entire Seven Fundamental Boolean Logic Operations in a Two-Terminal Li-Based Memristor[J]. ACS Applied Electronic Materials, 2024, 6(12): 9194-9202.

[6] Gao S, Liu G, Yang H, et al. An oxide Schottky junction artificial optoelectronic synapse[J]. ACS Nano, 2019, 13(2): 2634-2642.

[7] Park Y, Kim M K, Lee J S. 2D layered metal-halide perovskite/oxide semiconductor-based broadband optoelectronic synaptic transistors with long-term visual memory[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2021, 9(4): 1429-1436.

[8] Jin C, Liu W, Xu Y, et al. Artificial vision adaption mimicked by an optoelectrical In2O3 transistor array[J]. Nano Letters, 2022, 22(8): 3372-3379.

[9] Zhao P, Ji R, Lao J, et al. Multifunctional two-terminal optoelectronic synapse based on zinc oxide/poly (3-hexylthiophene) heterojunction for neuromorphic computing[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2022, 4(8): 5688-5695.

[10] Zhang X, Wang C, Sun Q, et al. Inorganic halide perovskite nanowires/conjugated polymer heterojunction-based optoelectronic synaptic transistors for dynamic machine vision[J]. Nano Letters, 2024, 24(14): 4132-4140.

[11] Chen C, Chen Z, Liu D, et al. Three-terminal quantum dot light-emitting synapse with active adaptive photoelectric outputs for complex image processing/parallel computing[J]. Matter, 2024, 7(11): 3891-3906.

[12] 朱赛克, 赵毅. 面向神经形态系统的突触器件及芯片综述与展望 [J]. 功能材料与器件学报, 2024, 30(06): 287-299.

[13] 赵兰天, 刘晨鹤, 任青华, 等. 基于铁电材料的人工突触器件的研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2020, 26(03): 160-168.

[14] 章鹏, 陈耿旭. 基于二维铁电钙钛矿的人工光突触晶体管制备与性能研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2025, 31(01): 64-69.

[15] 孙富钦, 陆骐峰, 张珽. 柔性仿生触觉感知技术: 从电子皮肤传感器到神经拟态仿生触觉感知系统 [J]. 功能材料与器件学报, 2021, 27(04): 223-253.

[16] 秦瑞东, 陈玲丽, 朱宇波, 等. 忆阻器及其在人工突触器件中的研究进展 [J]. 功能材料与器件学报, 2021, 27(06): 494-504.

[17] Zhao S, Ni Z, Tan H, et al. Electroluminescent synaptic devices with logic functions[J]. Nano Energy, 2018, 54: 383-389.

[18] Zeng H, Chen Q, Shan L, et al. A light-emitting electrochemical artificial synapse with dual output of photoelectric signals[J]. Science China Materials, 2022, 65(9): 2511-2520.

[19] Chen Q, Yan Y, Wu X, et al. High-performance quantum-dot light-emitting transistors based on vertical organic thin-film transistors[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2019, 11(39): 35888-35895.

[20] Li D, Zhang K, Hu X, et al. Integrated convolutional kernel based on two-dimensional photonic crystals[J]. Optics Letters, 2024, 49(21): 6297-6300.

[21] Sun Z, Yu M, Song Z, et al. Optical Neural Network in Free-Space and Nanophotonics[J]. IEEE Access, 2023, 11: 88656-88669.