光电器件

DOI：10.16818/j.issn1001－5868.2023110102

硫系非晶态半导体人工神经突触的可塑性

陈 直*，曾 敏，范晓燕，原甜甜

（上海电子信息职业技术学院 通信与信息工程学院，上海 201411）

摘 要： 模拟大脑中的神经突触是实现下一代计算机——类脑神经形态计算的关键一步。为了利用光子模拟神经突触的可塑性进而发展全光人工神经突触器件，文章开展了基于可控光诱导抑制效应的硫系非晶态半导体人工神经突触的实验研究。分析了材料化学组分和抽运光功率对该人工神经突触的调控作用，描述了该人工神经突触的可塑性。结果表明掺入不同杂质的硫系非晶态半导体平面波导具有不同的可控光诱导抑制过程，且抑制深度受控于抽运光功率的变化。基于这些特性，该人工神经突触展现出了配对脉冲易化功能、短程抑制功能、长程抑制功能，具有良好的可塑性。

关键词： 人工神经突触；可塑性；硫系非晶态半导体；可控光诱导抑制效应

中图分类号： TN256 **文章编号：** 1001－5868(2024)01－0090－06

Chalcogenide Amorphous Semiconductor Artificial Synaptic Plasticity

CHEN Zhi, ZENG Min, FAN Xiaoyan, YUAN Tiantian

(Shanghai Technical Institute of Electronics Information, Shanghai 201411, CHN)

Abstract: Simulating the neural synapses of the brain is a key step to realize the next generation computer, that is, the brain-like neuromorphic computing system. To mimic the plasticity of neural synapses using photons and develop all-optical artificial synaptic devices, we carried out an experimental study on the chalcogenide amorphous semiconductor artificial synaptic device based on controllable light-induced inhibition. The control of the material chemical composition and pumping optical power on the artificial neural synapse was studied, and the plasticity of the artificial neural synapse was described. The results show that As-S planar waveguides with different impurities have different light-induced inhibition processes, and different pumping optical powers correspond to different suppression depths. Based on these characteristics, the artificial neural synapse exhibits short-term plasticity (STP), long-term plasticity (LTP), and paired-pulse depression (PPD), demonstrating that it has good plasticity.

Key words: artificial neural synapse; plasticity; chalcogenide amorphous semiconductor; controllable light-induced inhibition

0 引言

神经网络可用于文本、音频和视频数据的处理，在基于深度学习的人工智能中发挥着不可替代的作用[1-4]。然而，现有的冯·诺伊曼(von Neumann)计算架构的处理器和存储器分离，不仅对非结构化问题的处理效率较低，而且在处理大数据时消耗能量较大[5]。在过去将近半个世纪的时间里，冯·诺伊曼架构主导了结构性数据处理[6-7]，渡过了其黄金发展期，目前正在面临社会高度信息化的挑战，其能耗、计算速度、实时性、智能性、非结构化数据处理能力等都有待提升。人类大脑包含大量带有突触的神

收稿日期：2023－11－01.

* **通信作者：**陈 直

经元，每个神经元都具备独立的计算与记忆功能，与基于冯·诺伊曼架构的传统计算体系形成了鲜明对比[8]。人类大脑的这种独特结构有助于高效处理情感、学习和思考等问题。因此，模仿人脑的自主学习功能，构建类脑神经形态计算，是解决“冯·诺伊曼瓶颈”的新途径，给下一代计算机的发展提供了最佳选择[9-10]。人脑的神经系统由成千上万的神经元构成。一个神经元产生的突触前响应沿着轴突传播，并通过一个连接传递给下一个神经元，产生突触后响应。这种连接被称为突触，突触权重决定了两个神经元之间的通信强度。突触可塑性，即突触权重的变化，由神经活动决定，被认为是人类大脑记忆和学习的主要机制[11]。近年来，在大数据[12]、人工智能[13]以及物联网[14]的需求推动下，模拟人脑在物理层建立人工神经系统以实现神经形态计算(Neuromorphic Computing)受到了极大关注。由于突触是神经系统中数量最多的组成部分，其数量超过神经元几个数量级，因此作为构建神经形态计算的关键一步，开发具有可塑性的神经突触器件至关重要[15-16]。已有的相关研究主要集中于利用电子器件实现突触功能，例如：基于电致电阻变化的相变硫族化合物[17]、金属-绝缘体-金属结构[18]、铁电材料[19]，以及基于纳米材料的场效应晶体管[20]。少量的研究致力于用光电器件实现突触功能，例如：基于微光纤的光子突触[21]和使用碳纳米管的光电突触[22]也被证明具有大带宽[23]和无电互连功率损耗[24]的潜在优势。但是，它们往往难以集成，或者速度有限，并且仍然依赖于电信号的激励。

光作为一种信息传输媒质，已在通信与传感领域取得了重要应用，具有不可替代的作用。然而，光在神经形态计算中的研究仍然处于起步阶段，无论其作为人工神经突触的输入、调控，或者输出都有待深入研究。以人眼为例，光是视觉神经元的天然输入激励，光响应是生物体具有代表性的感知能力。由于人类绝大多数信息来源于视觉，因此构建光学神经突触是模拟人脑计算架构的关键。然而，已有的报道大多关注神经突触兴奋行为的模拟，忽略了神经突触的抑制行为。考虑到兴奋和抑制共同构成了神经突触的基本行为，未来的研究应该给予抑制行为更多的关注。此外，生物突触具有毫秒至秒级范围内的可调弛豫时间，体现出长程可塑性，是目前人工神经突触器件面对的一大难题[25]。人脑神经突触的响应主要包括短程与长程两种行为。因此，人工神经突触具备短程可塑性与长程可塑性是实现人工神经元器件与神经拟态计算的基础。其中，短程可塑性(Short-Term Plasticity，STP)是神经元受到刺激后的短暂恢复行为，决定了输入信息的识别和处理。由于短程可塑性仅仅依赖于神经元的神经反应，因此被识别的信息往往也很容易被遗忘[26]。配对脉冲易化(Paired Pulse Facilitation，PPF)和配对脉冲抑制(Paired Pulse Depression，PPD)是最具代表性的两类神经突触短程可塑行为[26-27]。长程可塑性(Long-Term Plasticity，LTP)作为突触权重的长期变化，决定了生物大脑中持续数小时或更长时间的学习和记忆的形成。长程可塑性包括长期增强(Long-Term Potentiation，LTP)和长期抑制(Long-Term Depression，LTD)，它们分别代表了神经突触在重复刺激过程中突触权重的兴奋性和抑制性变化[28]。长程可塑性与短程可塑性具有明显的差异，其行为受到刺激强度、频率和数量的多重影响，与短程可塑性仅受神经突触本身的影响明显不同。

人脑神经突触的功能十分丰富，展现出极强的可塑性。然而，已有的报道对于人工神经突触的可塑性，尤其长程可塑性的抑制作用较少涉及。而且，绝大多数人工神经突触利用了半导体的电学性质，忽略了半导体的光学性质，使得光的大带宽和高速率等优异特性无法应用于人工神经突触中。针对以上问题，本文利用硫系非晶态半导体特有的可控光诱导抑制效应[29-30]，模仿神经突触可塑性。具体研究了材料组分和激励光参数对人工神经突触行为的影响，实验展现了该人工神经突触的可塑性，得到了多种类型的神经突触功能，证明了基于可控光诱导抑制效应的硫系非晶态半导体人工神经突触器件的可行性。

1　硫系非晶态半导体平面波导的全光可调控特性

信号具有受控特性是模仿神经突触可塑性的前提。半导体可以提供受控载流子，在以电子信息处理为核心的信息时代占据了核心地位。除了最常见的硅晶半导体外，各种非晶态半导体也是构成各类光电子器件的基础，具有不可忽视的应用价值。硫系非晶态半导体的光电特性可以通过化学组分的调节而被灵活地调控，具有一些独特的性质。其中，硫化砷(As-S)作为一种典型的成分可调的硫系非晶

态半导体，广泛应用于光子、光电子、超材料等领域。尤其，平均配位数相对较低的 As_2S_8 具有较高的化学键缺陷密度，导致能带中亚能级较多，吸收光子能量的机理比较复杂，能够诱导产生一些独特的光学现象，例如：可控光诱导抑制效应。该效应表现为，较低光子能量的传导光被较高光子能量的抽运光照射后产生光强衰减的现象。在该过程中，传导光的强度受控于抽运光，并表现出与光开关瞬时恢复所不同的较慢恢复特性，与神经突触的抑制作用极其相似。可控光诱导抑制效应由阻断与恢复两个过程组成，其中阻断过程可表示为[29]：

$$1-\frac{C}{C_\infty}=\frac{\frac{2}{k_{sl}}\exp\left(-\frac{t}{2k_{sl}}\right)}{\left(\frac{1}{k_{sl}}+\frac{1}{k_1}\right)\exp\left(\frac{t}{2k_{sl}}\right)+\left(\frac{1}{k_{sl}}-\frac{1}{k_1}\right)\exp\left(-\frac{t}{2k_{sl}}\right)} \tag{1}$$

其中，$C_\infty=2N_p\mu_p\phi_pk_{sl}k_1/(k_{sl}+k_1)$，$1/k_{sl}=[(1/k_1)^2+4N_p\mu_p\phi_p\varepsilon]^{1/2}$，$1/k_1=(1-\psi)N_s\mu_s\phi_s+N_p\mu_p\phi_p/C_{max}$。$1-C/C_\infty$ 是传导光的归一化功率，可表示为 p，C_∞ 是当 $t\to\infty$ 时极化子势阱中自陷态电子的饱和浓度，与 N_p，k_1 和 k_{sl} 成正比。这是因为 k_1 或 k_{sl} 越大，小极化子势阱中自陷态电子的有效寿命越长。如果不考虑退激影响，k_1 与 k_{sl} 相等。$2k_{sl}$ 是小极化子势阱中自陷态电子的有效寿命。$N_p\mu_p\phi_p\varepsilon$ 与抽运光激发的退激电子数成正比，并在极化子势阱中处于自陷态。$(1-\psi)N_s\mu_s\phi_s$ 正比于单位体积单位时间内被传导光从小极化子势阱中的自陷态激发到扩展态的电子数。$N_p\mu_p\phi_p/C_{max}$ 与小极化子势阱中自陷态电子浓度的最大容限成反比。

可控光诱导抑制效应的恢复过程可表达为[29]：

$$1-\frac{C}{C_0}=\frac{\left(1+\frac{k_1}{k_0}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{t}{k_1}\right)\right]}{1+\frac{k_1}{k_0}\left[1-\exp\left(-\frac{t}{k_1}\right)\right]} \tag{2}$$

其中，C_0 为抽运光切断时小极化子势阱中自陷态电子的浓度，$1/k_0$ 为小极化子势阱中自陷态电子的复合概率，并且 $1/k_0=\varepsilon C_0$。$1/k_1$ 为单位时间单位体积内被传导光从自陷态激发到扩展态的电子泵浦速率，并且 $1/k_1=(1-\psi)N_s\mu_s\phi_s$。与式(1)类似，$1-C/C_0$ 也是传导光功率的归一化，可以表示为 P。

由以上半导体物理机制分析可知，可控光诱导抑制过程与半导体材料、传导光、抽运光的参数有关，例如：吸收系数、量子产率、吸收面积、激光功率、激光波长等。这些微观参数综合表示成式(1)与式(2)中的 t。t 与这些微观参数的具体定量关系比较复杂，目前尚在研究中。为了初步探明硫系非晶态半导体材料的化学组分对可控光诱导抑制过程的影响，选取八硫化二砷（As_2S_8）、掺磷八硫化二砷（$P_2As_{20}S_{78}$）、掺锡八硫化二砷（$Sn_1As_{20}S_{79}$）分别制造平面波导，开展可控光诱导抑制效应实验。实验装置如图 1 所示。由 633 nm 光源 LS_1 发出的激光经由透镜 L_1、透镜 L_2、光阑 A 组成的空间滤波器滤波后，入射到棱镜耦合系统 PC。该棱镜耦合系统 PC 由两个金红石棱镜与一个 As-S 平面波导构成，能够把入射的 633 nm 激光耦合进入 As-S 平面波导。另一个光源 LS_2 发出波长为 442 nm 的激光，照射 As-S 平面波导中的 633 nm 传导光，使得 633 nm 传导光发生光强衰减，从而产生可控光诱导抑制效应。从棱镜耦合系统出射的 633 nm 传导光由透镜 L_3 聚焦后，被光电探测器 PD 接收并转化为电信号，最后显示在示波器上。

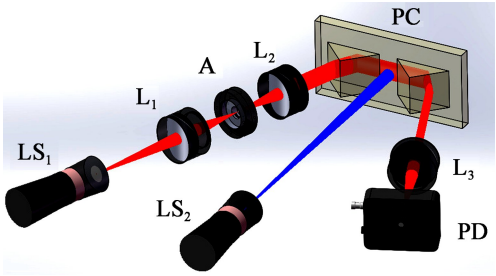
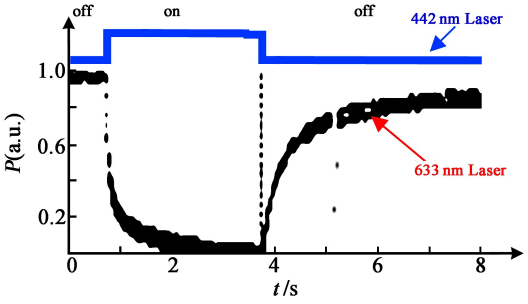


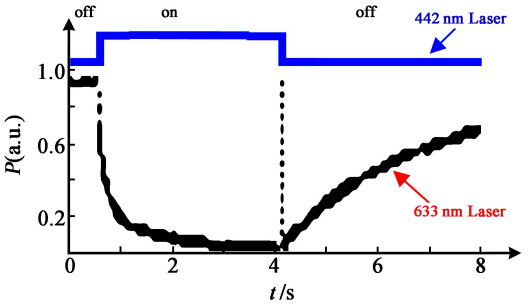
图 1 基于 As-S 非晶态半导体平面波导的可控光诱导抑制效应实验装置

实验选取 As_2S_8，以及掺杂的 $Sn_1As_{20}S_{79}$ 和 $P_2As_{20}S_{78}$ 三种不同化学组分材料制作的平面光波导作为样品，以间隔性开关 442 nm 激光的方式分别照射三种不同平面波导，采集得到 633 nm 传导光的实验曲线，如图 2 所示。实验进行到 1 s 左右时，打开 442 nm 激光的控制开关。由于 As-S 非晶态半导体内部存在大量缺陷态电子，它们吸收 442 nm 激光的光子能量，跃迁至高能级，并通过比较复杂的能量转化，最后形成小极化子自陷态电子，为此后吸收 633 nm 导通光，产生抑制效应创造前提条件。实验进行到 4 s 左右时，633 nm 导通光基本被小极化子自陷态电子吸收殆尽，达到了完全抑制。此时，关闭 442 nm 激光，633 nm 导通光开始恢复。由于小极化子自陷态电子存在残留，因此 633 nm 导通光需要一个相对缓慢的恢复过程，直至极化子自陷态电子具有几乎相同的抽空率和补偿率，才会恢复至原始强度。该可控光诱导抑制过程具有三个鲜明的特

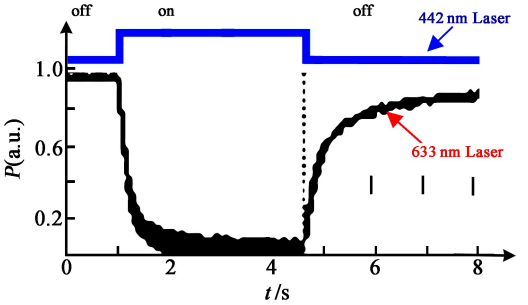
点。一是全光可控，意味着传导信号与控制信号都为光信号，使得器件在带宽与传输速度上具备优势。二是与光开关的高速响应形成鲜明对比，可控光诱导抑制效应的恢复过程相对较慢，为模仿神经突触的长程效应打下了基础。三是恢复过程与平面光波导的材料相关，磷（P）与锡（Sn）两种掺杂都会改变恢复过程的响应曲线，说明可以通过控制 As-S 非晶态半导体的化学组分而控制光诱导抑制过程。



（a）As_2S_8



（b）$P_2As_{20}S_{78}$



（c）$Sn_1As_{20}S_{79}$

图 2　三种不同化学组分 As-S 化合物平面波导的可控光诱导抑制效应实验曲线

除了材料化学组分对可控光诱导抑制过程产生影响以外，抽运光也是一个重要的影响因素。采用不同功率的 442 nm 激光照射相同功率的 633 nm 传导光，得到传导光的最大抑制功率不同，如图 3 所示。传导光的最大抑制功率，也就是传导光的抑制深度，会随着抽运光功率的增大而增大，呈现出一定的指数关系。633 nm 传导光的入射功率为 12.5 mW，当 442 nm 抽运光功率为 40 mW 时，633 nm 传导光得到最大抑制，输出功率仅为 1.2 mW。当 442 nm 抽运光功率为 3 mW 时，其对 633 nm 传导光的抑制作用趋于平稳。此外，不同的抽运光功率对应不同的抑制深度，体现出了调控的权重特性和抽运光对传导光的塑造作用，为模仿神经突触可塑性提供了技术基础。

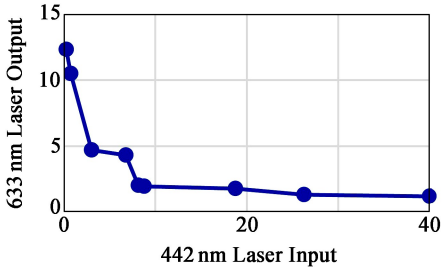


图 3　传导光功率的最大抑制深度与抽运光功率之间的关系

2　硫系非晶态半导体人工神经突触的可塑性实验

神经突触位于两个神经元之间，承担信号的传递与调控作用，如图 4 所示。实验采用 As_2S_8 非晶态半导体平面波导作为人工神经突触，功率为 20 mW 的 442 nm 抽运光作为激励信号，功率为 3 mW 的 633 nm 传导光作为传输信号，模仿神经突触的可塑行为。As_2S_8 非晶态半导体平面波导是在石英基底上蒸镀一层厚度约为 1 μm 的 As_2S_8 薄膜。为了展现该人工神经突触的可塑性，使用 442 nm 的抽运光以周期为 1 s 的脉形式间隔照射 As_2S_8 非晶态半导体平面波导，观察 633 nm 传导光的输出功率，如图 5 所示。

在 442 nm 抽运光的刺激下，633 nm 传导光呈现出间歇性的抑制与恢复，且每一周期恢复后的光功率都小于前一周期。以第一周期与第二周期为例，前后抑制功率差值占比为 40%，前后恢复功率差值

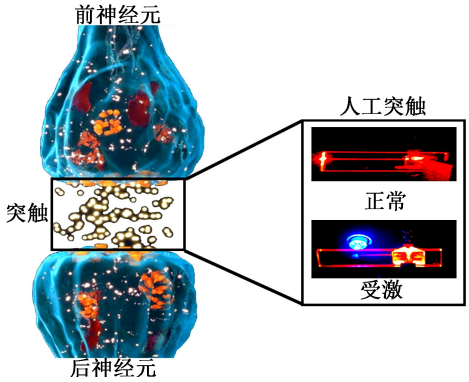


图 4　基于可控光诱导抑制效应的硫系非晶态半导体的人工神经突触示意图

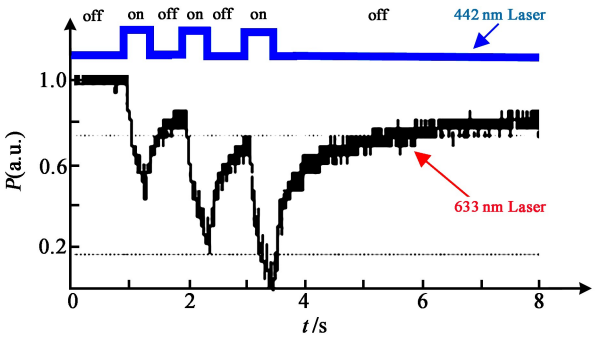


图 5 基于可控光诱导抑制效应的硫系非晶态半导体的人工防神经突触的功率输出曲线

占比为 17%，显示出良好的配对脉冲易化作用。结合第三个周期脉冲，可以看出整体恢复时间被延缓，体现出抑制作用的增强。如果在第三个周期脉冲后继续增加脉冲序列的个数，那么将极大地延长恢复时间，达到长时间抑制的作用，从而实现从短程可塑性到长程可塑性的过渡。此外，单个周期脉冲刺激所得到的完全抑制时间为毫秒级别，而三个周期脉冲所得到的完全抑制时间为 3.4 s，呈现出类似人脑那样缓慢遗忘的特点。

3 结论

基于硫系非晶态半导体可控光诱导抑制效应，采用平面波导作为人工神经突触，实验研究了该人工神经突触的可控性，模拟了神经突触行为。不同材料的可控光诱导抑制效应实验表明，非晶态半导体八硫化二砷（As_2S_8）、掺磷八硫化二砷（$P_2As_{20}S_{78}$）、掺锡八硫化二砷（$Sn_1As_{20}S_{79}$）三种不同材料制造的平面波导均可以实现可控光诱导抑制效应，但对传导光的抑制行为有所不同，主要体现为抑制恢复过程的不同，为硫化砷（As-S）非晶态半导体波导人工神经突触的可控性提供了化学组分这一新的自由度。实验表明，不同的抽运光功率对应不同的抑制深度，体现出了调控的权重特性和抽运光对传导光的塑造作用，为模仿神经突触可塑性提供了技术基础。人工神经突触可塑性实验结果表明，基于硫系非晶态半导体可控光诱导抑制效应的人工神经突触具有配对脉冲易化功能、短程抑制功能、长程抑制功能，体现出了短程抑制向长程抑制的转换能力，从而说明其具备良好的神经突触可塑性。

参考文献：

[1] Kim H, Hwang S, Park J, et al. Silicon synaptic transistor for hardware-based spiking neural network and neuromorphic system[J]. Nanotechnology, 2017, 28(40): 405202.

[2] 邹秀婷，徐绍夫，邹卫文. 人工智能赋能的多功能光子处理系统(特邀)[J]. 半导体光电，2022，43(1)：21-30.
Zou Xiuting, Xu Shaofu, Zou Weiwen. AI-powered multifunctional photonic processing system[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 21-30.

[3] 姚雨含，董建绩. 微波光子网络的可重构与智能化(特邀)[J]. 半导体光电，2022，43(1)：31-38.
Yao Yuhan, Dong Jianji. Reconfiguration and intellectualization of microwave photonic networks [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2022, 43(1): 31-38.

[4] 鲁 湛，代作晓. 基于异构多核处理器的实时红外人体目标检测技术[J]. 半导体光电，2018，39(5)：753-757.
Lu Zhan, Dai Zuoxiao. Research on real time infrared human target detection based on heterogeneous multi-core processor [J]. Semiconductor Optoelectronics, 2018, 39(5): 753-757.

[5] Merolla P A, Arthur J V, Alvarez-Icaza R, et al. A million spiking-neuron integrated circuit with a scalable communication network and interface[J]. Science, 2014, 345(6197): 668-673.

[6] Von Neumann J. The principles of large-scale computing machines[J]. IEEE Ann. Hist. Comput., 1988, 10: 243-256.

[7] Waldrop M M. The semiconductor industry will soon abandon its pursuit of Moore's law[J]. Nature, 2016, 530: 144-147.

[8] Indiveri G, Liu S C. Memory and information processing in neuromorphic systems[J]. Prc. IEEE, 2015, 103: 1379-1397.

[9] Kandel E, Schwartz J. Principles of Neural Science[M]. 5th ed. Beijing: China Machine Press, 2013.

[10] Ferrucci D, Brown E, Chu-Carroll J, et al. Building Watson: An overview of the deepQA project [J]. AI Magazine, 2010, 31(3): 59-79.

[11] Dan Y, Poo M-M. Spike timing-dependent plasticity: From synapse to perception[J]. Physiol. Rev., 2006, 86: 1033-1048.

[12] Esser S K, Merolla P A, Arthur J V, et al. Convolutional networks for fast energy-efficient neuromorphic computing [J]. Proc. of the National Academy of Sciences, 2016, 113(41): 11441-11446.

[13] Indiveri G, Chicca E, Douglas R J. Artificial cognitive systems: From VLSI networks of spiking neurons to neuromorphic cognition[J]. Cognitive Computation, 2009, 1(2): 119-127.

[14] Hoang B, Hawkins S-K. How will rebooting computing help IoT[C]// 2015 18th Inter. Conf. on Intelligence in Next Generation Networks, Paris, France, 2015: 121-127.

[15] Kuzum D, Yu S, Wong H-S P. Synaptic electronics: Materials, devices and applications [J]. Nanotechnology, 2013, 24: 382001.

[16] Indiveri G, Linares-Barranco B, Legenstein R, et al.

Integration of nanoscale memristor synapses in neuromorphic computing architectures[J]. Nanotechnology, 2013, 24: 384010.

[17] Tuma T, Pantazi A, Le Gallo M A, et al. Stochastic phase-change neurons[J]. Nat. Nanotechnol., 2016, 11: 693-699.

[18] Jo S H, Chang T, Ebong I, et al. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems[J]. Nano Lett., 2010, 10: 1297-1301.

[19] Chanthbouala A, Garcia V, Cherifi R O, et al. A ferroelectric memristor[J]. Nat. Mater., 2012, 11: 860-864.

[20] Alibart F, Pleutin S, Bichler O, et al. A memristive nanoparticle/organic hybrid synapstor for neuroinspired computing[J]. Advanced Functional Materials, 2012, 22(3): 609-616.

[21] Gholipour B, Bastock P, Craig C, et al. Amorphous metal-sulphide microfibers enable photonic synapses for brain-like computing[J]. Advanced Optical Materials, 2015, 3(5): 634-634.

[22] Agnus G, Zhao W, Derycke V, et al. Two-terminal carbon nanotube programmable devices for adaptive architectures [J]. Advanced Materials, 2010, 22(6): 702-706.

[23] Caulfield H J, Dolev S. Why future supercomputing requires optics[J]. Nat. Photon., 2010, 4: 261-263.

[24] Kuramochi E, Nozaki K, Shinya A K, et al. Large-scale integration of wavelength-addressable all-optical memories on a photonic crystal chip[J]. Nat. Photon., 2014, 8: 474-481.

[25] Van de Burgt Y, Melianas A, Keene S T, et al. Organic electronics for neuromorphic computing[J]. Nat. Electron., 2018, 1: 386-397.

[26] Zucker R S, Regehr W G. Short-term synaptic plasticity[J]. Annual Review of Physiology, 2002, 64(1): 355-405.

[27] Abbott L F, Regehr W G. Synaptic computation [J]. Nature, 2004, 431: 796-803.

[28] He T, Xi C, Yujun X, et al. Emulating bilingual synaptic response using a junction-based artificial synaptic device[J]. ACS Nano, 2017, 11(7): 7156-7163.

[29] Chen Z, Wang G, Wang X. Physical mechanism and response characteristics of unsaturated optical stopping based amorphous arsenic sulfide thin-film waveguides[J]. IEEE Photonics J., 2019, 11(1): 6100910.

[30] Chen Z, Wang G, Wang X, et al. Moving toward optoelectronic logic circuits for visible light: A chalcogenide glass single-mode single-polarization optical waveguide switch [J]. Appl. Optics, 2017, 56(5): 1405-1412.

作者简介：

陈　直(1982—)，男，吉林省梨树县人，博士，助理研究员，主要研究方向为光波导与集成光学、光学神经形态计算，以及计算成像等。