

基于平面晶体管型器件的突触可塑性模拟

陈艳^{1†}, 张晨曦^{1†}, 王来源¹, 李腾飞¹, 朱颖¹, 仪明东^{1*}, 黄维^{1,2*}

1. 南京邮电大学信息材料与纳米技术研究院, 有机电子与信息显示国家重点实验室培育基地, 江苏省国家先进材料协同创新中心, 南京 210023;

2. 南京工业大学先进材料研究院, 江苏省柔性电子重点实验室, 先进生物与化学制造协同创新中心, 南京 211816

* 联系人, E-mail: iammdy@njupt.edu.cn; iamwhuang@njupt.edu.cn

† 同等贡献

2016-12-08 收稿, 2017-03-14 修回, 2017-03-14 接受, 2017-08-14 网络版发表

国家重点基础研究发展计划(2014CB648300, 2015CB932200)、国家自然科学基金(61475074, 61204095, 61136003, 61377019)、江苏省自然科学基金(BM2012010)、省级大学生创新训练计划(SYB2016009)、有机电子与信息显示协同创新中心、国家自然科学基金优秀青年科学基金(21322402)、长江学者和创新团队(IRT_15R37)、江苏省教育委员会自然科学基金(14KJB510027)和江苏省高校学术优先发展计划(PAPD)资助

摘要 在数据信息膨胀的大背景下, 传统的冯诺依曼体系结构的计算机早已无法满足灵活处理和存储大量信息的需求. 与之相比, 大脑高度并行的非线性信息处理能力展现出了明显的优势. 突触是大脑神经元之间信息交换的连接渠道, 突触可塑性是生物学习和记忆的分子基础, 为了模拟大脑, 必须研究出具有生物突触功能的物理器件, 从而实现能够在功能上模拟类脑行为的神经形态电路. 研究表明, 对于场效应晶体管, 把具有可调忆阻特性的场效应晶体管的传导沟道和栅极作为信号传输和调节模块, 可以分别对应于生物突触中的离子传导和神经递质释放的过程; 对于电子型晶体管, 可以利用电操作模式中的OFF(ON)状态的弛豫倾向来模拟生物兴奋(抑制)过程, 因而在晶体管中可以实现对突触功能的模拟. 本文总结了近年来研究人员用平面晶体管结构的突触器件模拟的突触可塑性功能, 包括: 短时程突触可塑性(包含双脉冲易化和双脉冲抑制, 动态过滤(高通滤波/低通滤波), 处理时空关联的脉冲, 适应等)、长时程突触可塑性、短时程向长时程的转变、放电时间依赖可塑性、分流抑制等, 详细说明了这些功能的特点及模拟方法并对其未来发展进行了展望.

关键词 平面型结构, 晶体管, 人工突触, 突触可塑性, 神经形态模拟

大脑的神经网络是高度并行的非线性信息处理系统, 能够通过复杂的计算, 在真实的环境中高效地记忆并同时处理视觉、听觉、嗅觉等各种信息, 而且只需要消耗很少的能量. 大脑有这样强大的能力关键在于其拥有神经元和突触组成的神经网络^[1]. 大脑中大约有 $10^{12} \sim 10^{14}$ 个突触, 它们是神经元之间信息交换的渠道, 每个神经元与其他神经元之间有1000多个突触连接. 突触最突出的特点是具有突触可塑性, 突触可塑性是生物学习和记忆的分子基础^[2], 在大脑神经信号的传输中起着至关重要的作用^[1]. 随着

当今数据信息的膨胀, 传统的冯诺依曼架构的计算机早已无法满足灵活处理和存储大量信息的需求, 其中一个原因就是所谓的“冯诺依曼瓶颈”^[3]: 计算单元和存储器的物理分离. 科学家认为如果计算机可以像大脑一样实时处理复杂的信息, 并且像大脑一样消耗很少的能量, 那么信息膨胀的问题将得以解决, 人类将进入智能信息时代. 通过对神经科学、物理学、化学、材料科学与工程的研究, 科学家发现成功制备出具有生物突触功能的物理器件是模拟大脑的必要条件^[4], 这一步的成功才有可能在未

引用格式: 陈艳, 张晨曦, 王来源, 等. 基于平面晶体管型器件的突触可塑性模拟. 科学通报, 2017, 62: 3319–3334

Chen Y, Zhang C X, Wang L Y, et al. Emulations of synaptic plasticity in the planar transistor configuration for neuromorphic computing (in Chinese). Chin Sci Bull, 2017, 62: 3319–3334, doi: 10.1360/N972016-01359

来实现能够在功能上模拟类脑行为^[1]的神经形态电路。但研究至今,人们发现如何将神经元器件和突触器件相连接是制约类脑计算机发展的关键问题,此外为了把神经形态电路缩小成人脑的尺寸,我们必须开发小尺寸和低功耗的器件。这些器件可以是简单的两端结构的忆阻器,该结构的特征在于可以达到大脑级别的平行度、高效性以及容错度,但它们普遍的样品是由氧化物构造的夹层结构,由不同极性的外部电场激发的离子迁移和重排来调节它的导电状态。在两端人工突触共享的物理空间中,信号监测和自我学习几乎不能实时同时操作^[5~8]。然而三端结构的平面晶体管在器件和材料方面获得了科学家们广泛的支持,被创造性地设计来作为模拟大脑突触的器件^[9]。至今已有很多科研小组利用晶体管的三端结构成功设计出了类突触器件,并对突触的各种功能进行了模拟,比如可调沟道电导率的三端晶体管^[10]、浮栅晶体管^[11]、纳米粒子的有机晶体管^[12,13]、碳纳米管(carbon nano tube, CNT)^[14]、离子/电子混合晶体管^[15,16]、氧化物基晶体管突触^[9,10]、有机电化学晶体管(OECT)^[1,17,18]、硅基MOS晶体管^[19]等晶体管器件中已经实现了突触功能仿真。三端平面晶体管结构在其明确的器件结构、广泛的可使用材料和与突触相符合的功能机理等方面对于模拟大脑突触有其独特的优势^[20]。当然将三端结构改造为二端结构来模拟突触也体现了科学创新性,具有一定的前景,但如今的研究还不够成熟。本文介绍了突触和晶体管的相关知识,总结了目前提出的平面晶体管型突触器件结构及它们所模拟的突触功能和相应的模拟方法,并且对其目前模拟的困难和挑战做了一些说明。

1 突触及突触可塑性

1.1 突触简介

突触是神经元细胞之间,或神经元细胞与非神经元细胞之间的一种特化的细胞连接,它是神经元之间交换信息,进行生理活动的关键结构,大脑中大约有 $10^{12} \sim 10^{14}$ 个突触。突触结构和功能的完整性对于保证神经元获得信息并顺利进行信息传递、加工和存储有非常重要的作用^[21]。

根据神经信号通过突触方式的不同,突触一般可以分为电突触和化学突触两大基本类型。电突触在突触前神经元与突触后神经元之间存在着电紧张

耦联(electrotonic coupling),突触前神经元产生的活动电流一部分向突触后神经元流入,使兴奋性发生变化,常存在于甲壳类、鱼类等无脊椎动物中^[22]。在人类和其他脊椎动物身体中存在的主要是化学突触^[2]。在本文中,我们提到的均为化学突触。

突触是由突触前膜、突触间隙和突触后膜3部分组成的。突触前膜是上一个神经元的神经末梢,突触后膜是下一个神经元的细胞体或分布在其周围的树突,突触前膜和后膜比一般神经元细胞膜略厚,是特化的神经元细胞膜。突触前膜的活动区域内有大量的突触小泡,突触小泡内含有化学物质——神经递质。突触前膜释放的神经递质经由突触间隙到达突触后膜,与突触后膜的受体结合产生生物学效应,其数量对神经元间信息传递的速度有重要的影响^[21]。

1.2 突触可塑性

根据Hebbian学习法^[23],相互连接的两个神经元在经历同步的放电活动后,他们之间的突触连接就会得到加强,信息传递效率就会提高,这种神经元之间突触信息传递的效能随着自身神经活动的变化而增强或减弱的现象被称为突触可塑性^[2]。大量研究证明,突触可塑性在大脑神经信号的传输中起着至关重要的作用,改变突触可塑性的形成机制可有效影响人脑的学习和记忆功能。

突触可塑性主要包括短时程突触可塑性(short-term synaptic plasticity, STP)与长时程突触可塑性(long-term synaptic plasticity)。短时程突触可塑性通常由短暂的突触前神经元的神经刺激信号引起,持续时间通常在数十秒之内^[24],使得神经信号能够进行传输,编码和过滤^[1],主要包括易化(facilitation)、抑制(depression)、增强(potentiation)和强直后增强(post-tetanic potentiation, PTP)等。长时程突触可塑性主要表现为长时程增强(long-term potentiation, LTP)和长时程抑制(long-term depression, LTD),它们均能选择性地修饰行使功能的突触,使突触连接增强或减弱,给神经网络带来更永久性的变化^[1],使大脑能储存大量信息,被公认为是学习记忆活动在细胞水平的生物学基础^[25]。

2 晶体管

2.1 晶体管简介

场效应晶体管有3个极,分别是源极、栅极和漏极,

由一种极性载流子(多数载流子)参与导电,也称为单极型晶体管.场效应晶体管属于电压控制型半导体器件,能在小电流和低电压的条件下工作,而且它的制造工艺可以很方便地把很多场效应管集成在一块硅片上,因此场效应管在大规模集成电路中得到了广泛的应用.

场效应晶体管分为结型、绝缘栅型两大类.结型场效应管(JFET)有两个PN结,而绝缘栅型场效应管(JGFET)的栅极与其他电极完全绝缘.MOS场效应管,简称MOS管(即金属-氧化物-半导体场效应管MOSFET)是目前在绝缘栅型场效应管中应用最为广泛的一类.MOS管有两种类型:一种是N型MOS管(NMOS),一种是P型MOS管(PMOS).当NMOS用来做开关时,基极接地,栅极作为控制开关的端点.当栅极电压与源极电压的差值超过其导通的临界电压时,开关为导通状态.随着栅极电压的继续升高,通过NMOS的电流会更大.NMOS做开关时操作在线性区,因为源极与漏极的电压在开关为导通时会趋向一致.当PMOS做开关时,其基极接至电路中电位最高处,通常是电源.当源极电压与栅极电压的差值超过其临界电压时,PMOS开关为导通状态.

在模拟突触时,研究人员主要选择的就有栅极结构的场效应晶体管,用源极和漏极分别模拟前神经元和后神经元^[1,18],在经历了众多的实验与研究后,研究人员对传统的场效应晶体管进行了改造,做出了平面型结构的器件,也就是所谓的广义晶体管,并发现它们能够更好地模拟突触的功能,下文会举例详细说明该结构的器件模拟突触的优势.图1(b)展示是Zhu等人所在科研小组^[10]对传统场效应晶体管进行改造后提出的一个平面型的底栅晶体管的原理图,栅电极被放在栅电解质和半导体沟道下面.在对突触可塑性进行模拟的过程中,器件原型的选择是至关重要的,研究人员在场效应晶体管的基础上对材料、结构等方面不断进行创新和改造,努力制备出性能更为优异,能够更好地模拟突触可塑性的器件.

2.2 晶体管与突触的联系

人脑中的单个突触主要依靠离子传导和神经递质释放的过程来完成神经元间的信息传递,这些生物过程由一系列实时的特定的蛋白质和能源供应调节,可以将它们分别作为突触信号的处理模块和调节模块^[26~28].用突触前和突触后神经元之间是否建立了连接来衡量突触是否有效,称之为突触权重(或

突触强度),突触权重可通过离子物质(例如, Ca^{2+} , Na^{+} 和 K^{+} 等)的浓度来精确地调节^[29~31].具有突触功能的物理器件的成功制备对神经形态计算系统的硬件实现是非常重要的^[10].虽然目前已经设计并制造出了可以模拟脑行为的硅CMOS(互补金属氧化物半导体)芯片,但是这种方法对小系统的应用有所限制,因为它至少需要7个硅晶体管构建一个电子突触,这使电路很难扩展到一个与大脑媲美的尺寸,而且消耗比人脑更多的能量^[12].而对于另一种模拟突触功能的器件——忆阻器来说,它们普遍是由氧化物构成的三明治结构,在不同极性组合的外部电场作用下,通过调节离子迁移,对离子进行重新排布可以得出忆阻值^[6,7,32~35],但由于通过忆阻器的导电通路扮演着双重角色,因此在这个两端人工突触上^[36],不能同时进行信号传送和调节的操作.与此相比,晶体管有合适可控的测试参数和明确的器件结构模型^[37],这些保证了晶体管可以应用于复杂的电路.电子型晶体管存储器是为二进制数据存储设计的一个相当普遍的平台,其特征是电荷捕获的平缓过程,可以利用电操作模式中的OFF(ON)状态的弛豫倾向来模拟生物兴奋(抑制)活动.但这并不是严格意义上的实时调节,而是必须预先准备用于随后的兴奋(抑制)响应的OFF(ON)状态的捕获电荷,并且不能忽略抑制活动水平(ON状态)远大于兴奋水平(OFF状态)的实际情况,本质上不同于一般的神经电子性能.场效应晶体管的栅控特性可以对积聚的载流子(离子或电子)进行处理^[10,12,19,36,38],引起可控传导沟道的产生,于是形成了具有可调忆阻特性的晶体管结构,其中传导沟道和栅极作为信号传输和调节模块,类似于生物突触结构如图1(a)^[39]所示.在场效应晶体管结构的器件中,可以很容易地同时监测和操作两个信号的传输和调制过程,这种信息处理方式与突触活动的时间加和性相一致^[36].此外,两/三端离子型原型的忆阻行为对化学计量比的变化和活性层中的缺陷很敏感.通过显微镜观察可以发现丝状生长的位置和方向具有随机特性,迁移和降解速率也是异质的.正如在许多结果中呈现出过的电响应,突变的、波动的导电调制和非均匀操作状态对神经模拟的有效性具有不利影响,因为遵循时间相加性而平稳且逐渐变化是调节神经可塑性的特征.经研究发现,广义的晶体管——平面型结构器件在模拟突触方面正处于主流地位.与生物突触类似,晶体管突触的沟道电流可以

通过调节栅极电压脉冲而被精确地调整. 在栅极施加一个脉冲时会诱发一个瞬时的沟道电流, 这样一个非线性的沟道电流与生物突触中的兴奋性突触后电流(excitatory postsynaptic currents, EPSC)非常类似^[17], 施加在栅极的电压脉冲可以被看作是突触前脉冲或外部刺激, 沟道的传导性可以被看作是突触权重^[4]. 这些晶体管突触可以模拟短时程可塑性(包括双脉冲易化、动态过滤、处理时空关联的脉冲和适应等), 长时程增强和长时程抑制, 短时程记忆到长时程记忆的转变, 放电时间依赖性可塑性, 分流抑制等突触功能. 下面将详细讨论这些突触功能, 以及用晶体管突触模拟它们的方法.

3 突触功能及模拟方法

人类大脑中的信号处理、记忆和学习功能是通过修改神经元和突触中的离子通量而形成的^[29,40]. 突触前神经元中的一个刺激信号能够通过突触来触发一个兴奋性突触后电流(EPSC)或者是抑制性突触后电流(inhibitory postsynaptic currents, IPSC), 它们在神经元中会持续 $1\sim 10^4$ ms^[29]. 通过 $10^3\sim 10^4$ 个突触建立的时空相关的功能^[29,41], 突触后神经元能够整体地处理EPSC或者IPSC.

3.1 短时程突触可塑性

由于神经系统无穷无尽地从外界接受大量的信息, 所以在这些庞大的信息中提取出有用的信息是十分必要的. 在神经系统中, 生物突触中的短时程突触可塑性被视作提取信息的关键^[42]. 短时程可塑性大多由短促活动触发, 输入两个刺激的时间间隔较短, 引起 Ca^{2+} 在突触前膜的暂时聚集, 从而导致调制突触囊泡胞吐作用的生理过程发生改变, 最终改变了神经递质的释放. 短时程突触可塑性一般持续数毫秒到数分钟不等, 往往对输入的短时程适应、短时

程改变行为以及短时程记忆有重要作用^[2,43]. 所以短时程突触可塑性在突触计算以及信息处理过程中扮演着十分重要的角色^[10]. 短时程可塑性功能可以分为短时程增强和短时程抑制. 到目前为止, 已经成功模拟的短时程突触可塑性功能主要包括双脉冲易化(paired-pulse facilitation, PPF), 双脉冲抑制(paired-pulse depression, PPD), 动态过滤(dynamic filter)(高通滤波/低通滤波)、处理时空关联的脉冲、适应(adaptation)等方面^[10]. 其中双脉冲易化和高通滤波是短时程增强的表现形式, 而双脉冲抑制、低通滤波、处理时空关联的脉冲和适应则是短时程抑制的表现形式.

3.1.1 双脉冲易化和双脉冲抑制

由两次强度相同、间隔时间为毫秒级的双脉冲刺激(paired-pulse stimulation, PPS)所诱发的突触强度的改变是一种短时程突触可塑性, 通常用双脉冲比值(paired-pulse ratio, PPR)即刺激2与刺激1所诱发的突触强度的振幅之比来表示突触强度变化的方向和大小, $\text{PPR}>1$ 为PPF, 而 $\text{PPR}<1$ 为PPD^[24].

PPF是神经递质释放的动态增强过程, 它被认为是生物突触对视觉、听觉^[9]信息处理的关键, 并且反映了生物突触在信息处理时对信息的接受能力. 所以在神经形态器件上模拟生物突触的PPF功能是发展人工神经网络关键的一步^[17]. PPF功能表现为当一个生物突触在短时间内先后受到两次突触前脉冲刺激, 第二次刺激的突触后响应会比第一次的大. 减小两次刺激的间隔时间, 可以使PPF功能更为显著^[9,30,44].

Zhou等人^[45]在柔性PET基底上利用铟锌氧化物(indium zinc oxide, IZO)制作出了突触晶体管, 并把栅电极置于该器件的底部, 在这样的一个IZO柔性电突触上成功模拟了PPF功能. 在该器件的底栅电极上先后施加两个突触前刺激(1.2 V, 50 ms). 如图2(a)所示, 脉冲刺激间隔为70 ms时, 第二次脉冲刺激引起

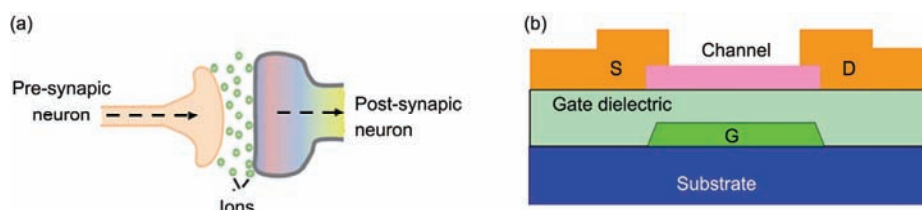


图1 (网络版彩色)突触及常用晶体管结构原理图. (a) 生物突触的结构原理图^[39]; (b) 底栅场效晶体管的结构原理图^[10]

Figure 1 (Color online) Schematic diagrams of the synapse and the common transistor. (a) A schematic diagram of the biological synapse^[39]; (b) a schematic diagram of the traditional field-effect transistor with a bottom-gate structure^[10]

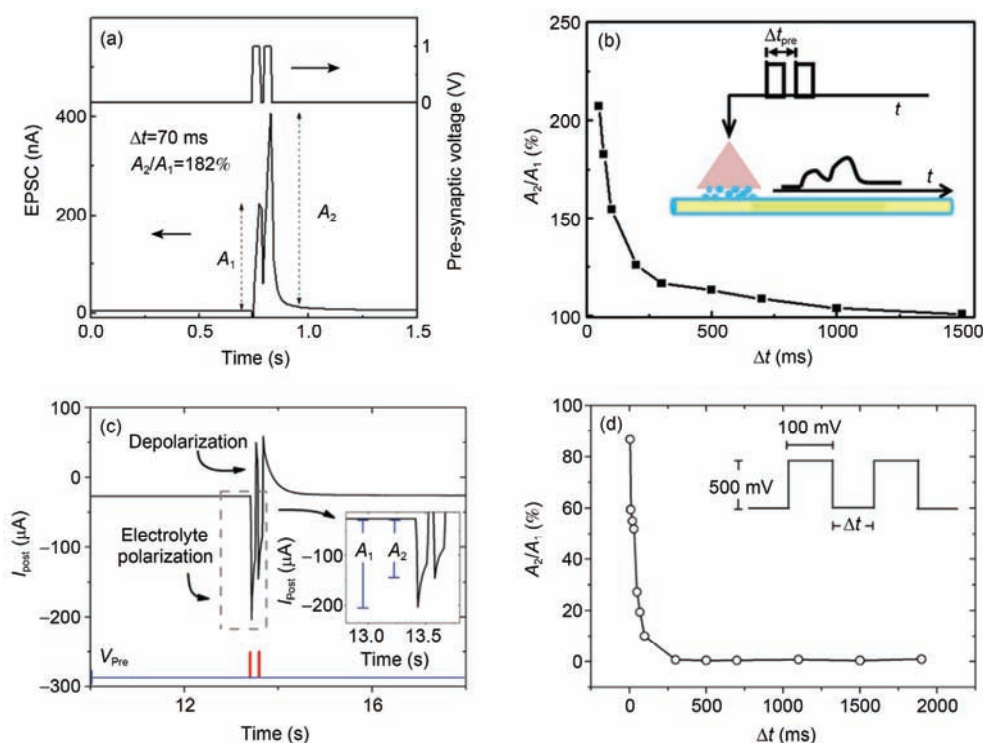


图 2 (网络版彩色)双脉冲易化(PPF). (a) 有一对突触前刺激引发的兴奋性突触后电流, A_1 和 A_2 分别是第 1 次和第 2 次兴奋性突触后电流的幅值; (b) A_2/A_1 值关于两个脉冲刺激间隔 Δt 的函数图像. 内插图: 由一对时间相关的突触前刺激引发的 EPSC 图像^[45]. 双脉冲抑制(PPD): (c) 一对突触前脉冲施加在 OFET 栅电极上, 测量出了突触后漏极电流 (I_{post}), 并绘制成关于时间的曲线. I_{post} 的幅值 A 对应 PPD 行为; (d) A 的抑制百分比, $1-(A_2/A_1)$, 关于 Δt 的函数图像^[1]

Figure 2 (Color online) Paired-pulse facilitation. (a) EPSCs triggered by a pair of presynaptic spikes, A_1 and A_2 are the amplitudes of the first and the second EPSCs, respectively; (b) ratio of A_2/A_1 is plotted as a function of interspike interval, Δt , between the two spikes. Inset: image of the EPSCs triggered by a pair of temporally correlated presynaptic spikes^[45]. Pair-pulsed-depression. (c) A pair of presynaptic pulses (V_{pre}) is applied at the OFET gate electrode and the postsynaptic drain current (I_{post}) is measured as a function of time, the amplitude A of I_{post} exhibits PPD behavior; (d) depression percentage of A, $1-(A_2/A_1)$, as a function of pulse interval Δt ^[1]

的兴奋性突触后电流是第一次的 1.82 倍. PPF 指数被定义为第二次与第一次 EPSC 的电流峰值的幅度之比 (A_2/A_1), 以 Δt 为横坐标, PPF 指数为纵坐标绘制了如图 2(b) 所示的函数图像. A_2/A_1 数值的大小随着脉冲刺激间隔 (Δt) 的增加而减小. 当 Δt 为 50 ms 时, A_2/A_1 数值达到最大值 207%; 当 Δt 足够大时 (比如 $\Delta t = 1.0$ s), A_2/A_1 数值几乎减小到 100%. 这个结果表明时间间隔足够小时, 第二次突触后神经元的响应确实会增大, PPF 功能在此突触晶体管中被成功地模拟了^[45].

Gkoupidenis 等人^[1]利用 PEDOT:PSS 有机电化学晶体管结构, 并在该器件上模拟了双脉冲抑制. 一开始在栅电极上施加一对 V_p 为 500 mV 的脉冲, 时间间隔 Δt 从 1~1900 ms 分布. 通过测量, 在源漏电压 V_{SD} 为 -300 mV 的恒电位下, 漏极出现了偏差. 图 2(c) 给出了 Δt 为 50 ms 时突触后电流 I_{post} 的典型曲线. 在这样一个相当小的间隔情况下, 与突触前输入脉冲对应的

突触后电流振幅 A 减小了 ($A_2 < A_1$). 振幅 A 的抑制百分比表示为 $1-(A_2/A_1)$, 图 2(d) 展示了它关于 Δt 的函数图像. 考虑到脉冲间隔, 晶体管大致是在两个不同的模式下运行. 在一个临界时间 Δt_{cr} (约为 200~250 ms) 之上, 极化反应完全解耦, 而且抑制行为完全消失, $1-(A_2/A_1) \approx 0\%$. 当 $\Delta t > \Delta t_{cr}$ 时, 晶体管处于非处理模式, 意味着在两个脉冲之间信息丢失了. 在非处理模式, 间隔 Δt 足够用于从第一次脉冲喷射出的阳离子在第二次脉冲到达之前返回到电解质中去. 当 $\Delta t < \Delta t_{cr}$ 时, 振幅 A 逐渐衰减, 晶体管处于处理模式. 在这种模式下, 突触后响应耦合 ($1-(A_2/A_1) > 0\%$), 使得信息处理处于短时程抑制状态, 双脉冲抑制在此器件上得以成功地模拟^[18]. 在抑制突触中, 高频重复的突触前刺激会导致后突触的短时程抑制效应. 短时程抑制归因于含神经递质的突触前小泡的释放能力减弱, 从而发送给神经末梢的递质整体减少了,

这样后突触效率就有可能降低. 在神经信号传输中, 抑制突触就像是低通滤波一样阻碍额外发送的突触后脉冲刺激, 在听觉、视觉系统中扮演着很重要的角色. 如图2(d)所示, 这个有机电化学晶体管器件也有低通滤波的功能(下文将详细解释该功能). 高频突触前脉冲被完全抑制, 而低频脉冲引起的后突触电流响应几乎没有减弱.

3.1.2 动态过滤

在神经系统中, 突触效能可以在某一特定的短暂刺激后的数毫秒内增强(突触易化)或减弱(突触抑制)^[46]. 由于短时程突触可塑性的抑制或易化, 突触可以根据信号频率在信息传递时表现为动态过滤^[47]. 短时程突触抑制导致了低通滤波, 短时程突触易化导致了高通滤波^[10]. 高通滤波是一种过滤方式, 在信号传递过程中, 高频信号正常通过, 而低于设定临界值的低频信号则被减弱甚至阻隔. 而低通过滤则是高通滤波的对立, 低频信号能正常通过, 而超过设定临界值的高频信号则被减弱、阻隔. 而两者减弱、阻隔的幅度则会依据不同的频率以及不同的滤波程序(目的)而改变.

Wan等人^[15]对IZO结构的突触晶体管进行改造, 制备出了铟镓锌氧化物(IGZO)的双电子层(EDL)的突触晶体管, 并提出两种连接方式不同的突触晶体管结构, 分别为易化和抑制器件, 如图3(a)和(b)所示. 在这两个突触晶体管上分别进行了高通/低通滤波功能的模拟, 图3(c)和(d)展示了用不同的频率施加100个正向的突触前脉冲刺激(0.5 V, 5.0 ms)后获得的动态过滤特征图. 在这个模拟过程中使用了两种刺激的方式: 固定频率的刺激和泊松脉冲刺激序列, 在图3(c)中, 无论是固定频率的刺激还是泊松脉冲刺激序列, 易化/抑制器件的EPSC的振幅都逐渐增加/减小. 累积的质子需要弛豫时间扩散回来, 因此由较短时间间隔的高频脉冲刺激(100 Hz)产生的易化/抑制效应比低频脉冲刺激(50 Hz)强得多. 图3(d)绘制了标准稳定状态的EPSC幅值关于突触前刺激频率的函数. 频率越高, 获得的易化/抑制效应越强. 所以在该突触晶体管中, 动态过滤的功能可以引起高通滤波和低通滤波. 这些时间层面上的过滤功能对神经体系的选择计算有重要的意义^[15].

皮层神经元经历着一系列从0~200 Hz的动作电位. 输入信号在这样宽的范围内, 高速率的活动可能会抑制信号的变化. 为了处理这个范围内的信号, 皮

层神经元用动态增益来感应不同频率的输入信号, 这种类型的增益控制被视为突触效能的动态调制, 是指从通过增加对低频信号的灵敏度, 同时降低对高频信号的灵敏度从而过滤高频信号来产生动态滤波器的效果, 也就是低通滤波.

Gkoupidenis等人^[18]在PEDOT:PSS有机电化学晶体管器件上施加一连串脉冲间隔为 t_p (1~9 ms)的突触前脉冲 V_{Pre} , 振幅为 V_p , 每次施加脉冲的持续时间 T_p 为10 ms, 测量源漏电压 V_{SD} 为-500 mV时的突触后电流 I_{Post} . 当减小 t_p 时, 脉冲序列的有效性也减小了. 该研究小组为了限制 I_{Post} 的一切刺激行为, 选取了一个较低的振幅($V_p=100$ mV). 对于频率可变的 V_{Pre} , OECT的响应预测如图3(e)所示. 随着突触前刺激的有效性的降低, I_{Post} 增加了并有效地增加了沟道灵敏度. 这表明由于沟道更高的增益而感应到了有效性较小的输入信号. I_{Post} 响应为楼梯状的曲线, 证明了输入不同的脉冲序列会有不一样的效果, 类似于皮层神经元的动态增益功能^[18].

3.1.3 处理时空关联的脉冲

来自不同神经元的时空关联的刺激会诱发突触后神经元建立动态逻辑. 为了模拟时空动态逻辑, Zhu等人^[10]提出了有两个平面内栅极的横向耦合突触晶体管, 如图4(a)所示.

该研究小组在该器件上测量了漏源电压 V_{DS} 恒定为0.5 V时的后突触响应. 当一个突触前脉冲刺激施加在前突触上时, 质子会移动到 SiO_2/IZO 界面并诱发一个EPSC. 施加在前突触1上的突触前刺激(0.5 V, 20 ms)会引发一个振幅为30 nA的EPSC₁, 施加在前突触2上的突触前刺激(1.0 V, 20 ms)会引发一个振幅为50 nA的EPSC₂, 如图4(b)所示. 当两个突触前刺激分别施加在两个前突触上时, 迁移到界面区域的质子会积聚起来, 因而两个EPSC会在后突触叠加. 图4(c)是在 Δt 为0时(在突触1上施加的突触前刺激结束时), EPSC的振幅关于脉冲刺激间隔 $\Delta t_{Pre2-Pre1}$ 的函数. 当 $\Delta t_{Pre2-Pre1}$ 为0时, 由突触前刺激1和2诱发的质子会同时到达界面区域, 这意味着EPSC₁和EPSC₂会同时被诱发, 因而在后突触EPSC的振幅达到了最大值110 nA, 比EPSC₁和EPSC₂单纯的线性加和大, 这说明在这个横向耦合的突触晶体管中, 时间与空间的EPSC加和是超线性加和, 这和海马CA1区锥体神经元中所发现的特性类似. 当 $|\Delta t_{Pre2-Pre1}|$ 增加时, EPSC的振幅会不规则地减小. 当突触1比突触2触发的早

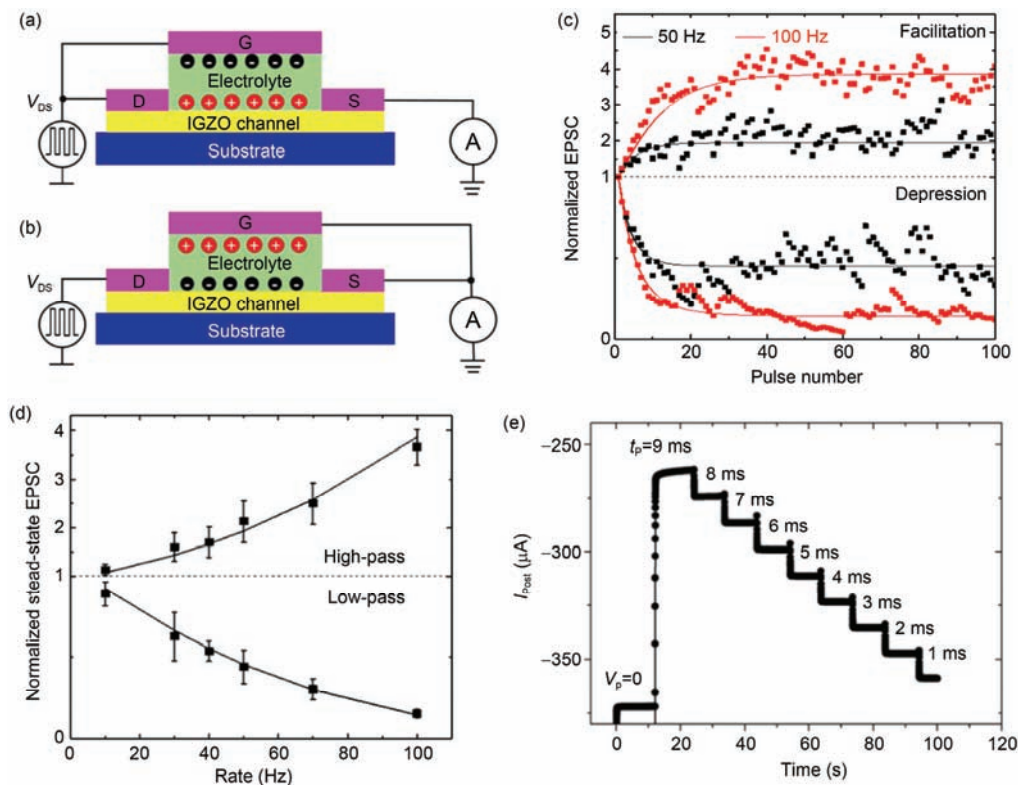


图3 (网络版彩色)动态过滤(高通滤波/低通滤波). (a)和(b)是以离子导电的电子膜层为栅极,基于IGZO的双电子层(EDL)晶体管的原理图. (a)漏极和栅极连在一端; (b)源极和栅极连在一端^[15]; (c)和(d)是动态过滤:模拟高通滤波和低通滤波的特征. 实线代表固定频率的脉冲刺激,点代表泊松脉冲刺激序列. (c)在易化和抑制器件上施加不同频率(50和100 Hz)的100个突触前刺激后引起的EPSC振幅,以第一个EPSC为标准; (d)以第一个EPSC为标准的EPSC幅值随突触前脉冲刺激频率变化的函数图像. 点是泊松脉冲刺激序列从第80~100个EPSC的平均结果^[15]; (e)低通滤波:在栅电极上施加脉冲序列(V_{pre}),脉冲间隔 t_p (1~9 ms),每次脉冲施加的时间 $T_p=10$ ms, $V_p=100$ mV,绘制了 I_{post} 关于时间的函数. 随着有效脉冲频率的减小,沟道的灵敏度增加了^[18]

Figure 3 (Color online) Dynamic filtering (high-pass filtering/low-pass filtering). schematic images of the IGZO-based electric-double-layer (EDL) transistors gated by ion conducting electrolyte films. (a) Drain and gate electrodes are shortly connected as one terminal; (b) source and gate electrodes are shortly connected as one terminal dynamic filter^[15]. (c), (d) are dynamic filters simulation results for both high-pass and low-pass filtering characteristics. The solid curves are for fixed-rate spike trains, and the spots are for Poisson spike trains. (c) Amplitudes of the EPSC by applying 100 pre-synaptic spikes for varied frequency (50 and 100 Hz) for both facilitating and depressing device, normalized by the first EPSC; (d) amplitudes of the EPSC, normalized by the first EPSC and plotted as a function of presynaptic spike frequency (or mean frequency). The spots are the average results of the 80th–100th EPSC for Poisson spike trains^[15]; (e) low-pass filtering: a train of pulses (V_{pre}) is applied at the gate electrode for variable pulse width t_p (1–9 ms), a period $T_p=10$ ms, $V_p=100$ mV, and I_{post} is measured as a function of time. The sensitivity of the channel increases as the effective pulse frequency is decreased^[18]

($\Delta t_{Pre2-Pre1} > 0$)时,前突触刺激2诱发的质子会比前突触刺激1诱发的质子移动的慢,从而在 $\Delta t=0$ 时,EPSC的振幅和EPSC₁的振幅峰值相等.在突触前刺激2结束时,积累在SiO₂/IZO沟道界面的质子会根据浓度梯度逐渐返回到平衡状态.当突触1比突触2触发的晚($\Delta t_{Pre2-Pre1} < 0$)时,由前突触刺激1触发的质子对由前突触2触发的质子起到一个增强的作用.当 $|\Delta t_{Pre2-Pre1}|$ 增大时,越来越多的由前突触刺激2触发的质子会返回到平衡状态.从而积累在界面的质子数会减小.所以在 $\Delta t=0$ 时的EPSC随着 $\Delta t_{Pre2-Pre1}$ 的函数逐渐减小^[10].但在该实验模拟过程中,由于使用了较大的

脉冲持续时间(测量时使用的最大脉冲持续时间为10 ms),突触前和突触后的距离较大, SiO₂电解质的质子传导性较差等原因,测得的时间振幅较大.

3.1.4 适应

突触抑制与感觉适应紧密相连^[48].当一个感官神经元接受到强烈而又持续的刺激时,它在一开始响应并逐渐适应持续的刺激.目前已经发现对于视觉^[49]、听觉和体觉刺激^[50],大脑皮层的反应已呈现出适应功能.适应被视为在编码基本背景时,跟踪快速变化的信息的有效神经编码策略^[51].

上文提到的Gkoupidenis等人^[18]在PEDOT:PSS

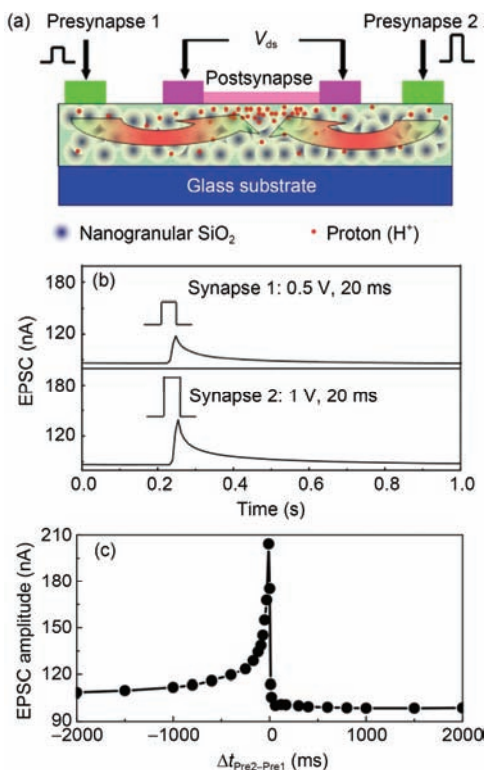


图 4 (网络版彩色)处理时空关联的脉冲. (a) 有两个面内栅极的横向耦合突触晶体管的原理图, 突触前刺激施加在两个面内IZO栅极上, 用恒电压 $V_{DS}=0.5$ V来测量EPSC; (b) 由突触前脉冲 1(0.5 V, 20 ms)和突触后脉冲 2(1.0 V, 20 ms)分别触发的EPSC; (c) EPSC的振幅在 Δt 为0时(在突触1上施加的突触前刺激结束时)关于脉冲刺激间隔 $\Delta t_{Pre2-Pre1}$ 的函数^[10]

Figure 4 (Color online) Spatiotemporally correlated signal processing. (a) Schematic image of the laterally coupled synaptic transistor with two in-plane gates. Presynaptic spikes are applied on two in-plane IZO gates, and a constant $V_{DS}=0.5$ V is used to measure the EPSC. (b) EPSCs triggered by presynaptic spike 1 (0.5 V, 20 ms) and presynaptic spike 2 (1.0 V, 20 ms), respectively; (c) the amplitude of the EPSCs at $t=0$ (when the presynaptic spike applied on the presynapse 1 finished) is plotted as a function of $\Delta t_{Pre2-Pre1}$ between the two presynaptic spikes^[10]

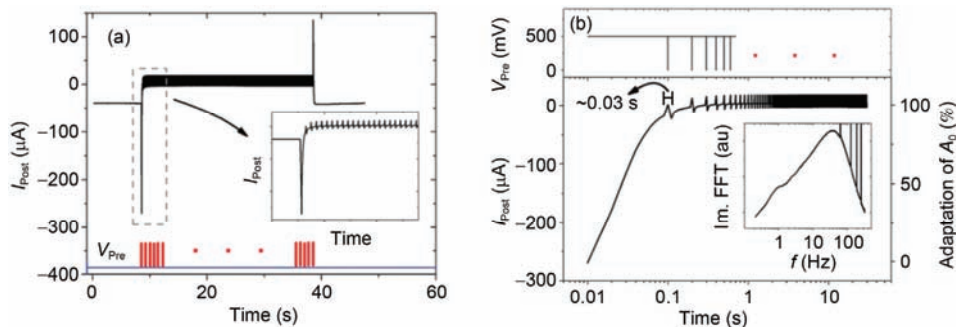


图 5 (网络版彩色)持续强烈的刺激下由响应转变为适应. (a) 一系列的脉冲(V_{Pre})施加在栅电极上, 根据时间的变化测量 I_{Post} . I_{Post} 一开始响应脉冲序列, 随后适应它; (b) 时间归一化的 I_{Post} 函数和 I_{Post} 的振幅, A_0 的适应百分比函数. 插图: I_{Post} 响应的傅里叶变换设想部分^[18]

Figure 5 (Color online) Response turns to adaptation under continuous intense stimulations. (a) A train of pulses (V_{Pre}) is applied at the gate electrode and I_{Post} is measured as a function of time. I_{Post} initially responds to the train of pulses and subsequently adapts to it; (b) time-normalized I_{Post} and adaptation percentage of I_{Post} amplitude A_0 . Inset: imaginary part of the FFT of I_{Post} response^[18]

有机电化学晶体管器件上也进行了适应功能的模拟, 如图5(a)所示, 最初对施加的一系列脉冲产生响应, 随后表现出适应. 当脉冲序列消失时, 系统恢复到最初的突触后电流 I_{Post} 状态, 因此适应是短时程的. 标准的时间适应响应如图5(b)所示. 在施加了几个(3~5个)脉冲后, 可以观察到 I_{Post} 的振幅 A_0 从一开始的输入刺激表现出响应到重复输入刺激表现出完全适应, 而且 I_{Post} 由于电解质持续的极化、去极化反应的循环作用获得了一个振荡/稳定状态. 由于特定脉冲序列的稳定循环($t_p=99\%T_p$, t_p 为两次脉冲施加的间隔时间, T_p 为脉冲施加的持续时间, 和强“处理模式”一致), 电解质的主要响应是因为极化体制(PEDOT:PSS是除掺杂状态), 而且器件在 $I_{Post} \approx 0$ 处上下稳定地振荡. 图5(b)的插图是设想的 I_{Post} 的快速傅里叶变换(Fast Fourier Transform, FFT). 从这个设想图可以得知, 在 $f_{peak} \approx 36$ Hz(或者 $t_{peak}=0.028$ s)处有明显的峰值, 而且有几个高频、有顺序的谐波. 峰值与 I_{Post} 响应的刺激间隔(≈ 0.03 s, 见图5(b))很相近. 由图5(b)可知, 作为时间的函数说明, I_{Post} 整体的响应适应于持久输入的脉冲序列, 因而较少的能量消耗计算方案和 I_{Post} 的振荡体系可以被用于与编码和传输相关的输入信号的信息^[18].

3.2 长时程突触可塑性

长时程突触可塑性是大脑学习和记忆的作用机制^[52,53], 主要分为长时程增强(LTP)和长时程抑制(LTD)两种形式. 一连串外界刺激使得某种神经元的EPSC增强, 以后单个刺激就可以使EPSC幅值增大, 这样的易化现象可以持续几个小时, 甚至几天, 该效

应被称为长时程增强。LTP促使神经环路当中某些节点发生持续性增强, 因此被认为是学习和记忆的分子细胞学基础^[54]。LTD是与LTP相反的突触可塑性, 同样具有重要的生理意义^[2,55]。

Kim等人^[4]利用了CNT突触晶体管器件通过调控突触前和突触后刺激的突触权重, 模拟了突触的长时程可塑性(图6(a))。在该实验中, 通过测量由一个大小为5 V, 持续时间为1 ms的突触前刺激所引发的

EPSC振幅来反映突触权重的变化, 突触权重每两秒测量一次。EPSC振幅的改变通过比较前1000 s和后1000 s的EPSC平均振幅来计算。如图6(b)所示, 在施加了200个突触后刺激的时间间隔 Δt_{post} 为2 ms的大小为5 V, 持续时间为1 ms的突触后刺激后, EPSC振幅增加了, 说明在CNT突触中产生了LTP; 反之在施加了100个刺激间隔 Δt_{pre} 为2 ms的大小为5 V, 持续时间为1 ms的突触前刺激后, EPSC振幅减小了, 说明产生

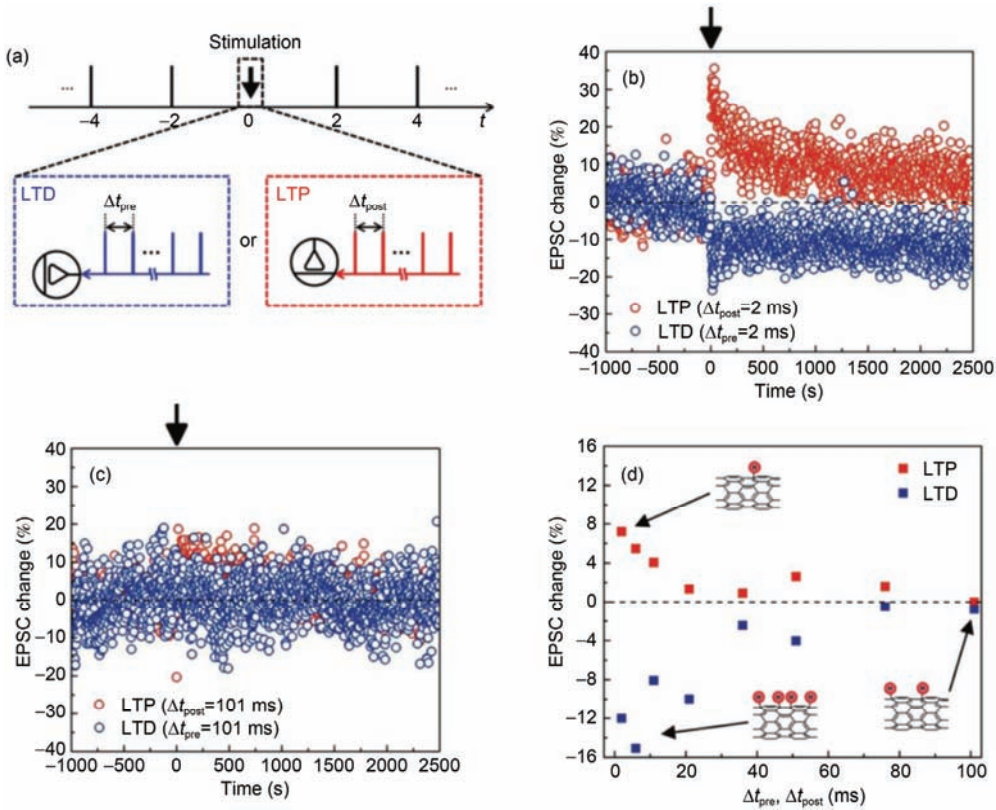


图6 (网络版彩色)长时程突触可塑性(LTM). (a) 触发长时程增强(LTD)和抑制(LTP)的刺激规则. 左边显示了LTD模拟: 施加了一系列刺激间隔固定为 Δt_{pre} 的大小为5 V, 持续时间1 ms的突触前刺激(在 $t=0$ s时开始, 图中用箭头标示出). 右边显示了LTP模拟: 施加了一系列刺激间隔固定为 Δt_{post} 的大小为5 V, 持续时间为1 ms的突触后刺激. 在该CNT突触中, 测量由一个5 V, 1 ms的突触前刺激触发的EPSC振幅, 每2 s测量一次. EPSC振幅的相关改变通过比较前1000 s和后1000 s的EPSC平均振幅来计算; (b) 在 $t=0$ s时(箭头已标出), 分别施加 $\Delta t_{\text{pre}}=2$ ms和 $\Delta t_{\text{post}}=2$ ms的LTP和LTD刺激, 绘制出一条CNT突触的EPSC振幅关于时间的函数; (c) 在 $t=0$ s时(箭头已标出), 分别施加 $\Delta t_{\text{pre}}=101$ ms和 $\Delta t_{\text{post}}=101$ ms的LTP和LTD刺激, 绘制出一条CNT突触的EPSC振幅关于时间的函数. EPSC振幅没有什么明显的改变; (d) 当 Δt_{pre} 和 $\Delta t_{\text{post}} \leq 20$ ms时, EPSC振幅有明显的变化. 在CNT突触上施加LTP和LTD的刺激, 绘制了EPSC振幅的相关变化关于 Δt_{pre} 和 Δt_{post} 的函数^[4]

Figure 6 (Color online) The long-term plasticity of a CNT synapse. (a) The stimulation protocol to induce long-term potentiation (LTP) and depression (LTD). Left hand side shows LTD stimulation: a series of 5 V, 1 ms pre-synaptic spikes with a fixed inter-spike interval, Δt_{pre} , is applied (starting at $t=0$ s, as marked by the arrow). Right hand side shows LTP stimulation: a series of 5 V, 1 ms post-synaptic spikes is applied with a fixed inter-spike interval, Δt_{post} . The synaptic strength of the CNT synapse is tested consecutively every 2 s by measuring the amplitudes of EPSC triggered by the 5 V, 1 ms pre-synaptic spikes. The relative change of the EPSC amplitude was calculated by the average EPSC amplitude of the first 1000 s ($n=500$) before stimulation and the last 1000 s ($n=500$) of experiments, and the statistical significance was tested by the paired sample. (b) The EPSC amplitudes in a CNT synapse are plotted as a function of time when the LTP and the LTD stimulations are applied respectively at $t=0$ s (marked by the arrow) with $\Delta t_{\text{pre}}=2$ ms and $\Delta t_{\text{post}}=2$ ms; (c) the EPSC amplitudes in a CNT synapse are plotted as a function of time when the LTP and the LTD stimulations are applied respectively at $t=0$ s (marked by the arrow) with $\Delta t_{\text{pre}}=101$ ms and $\Delta t_{\text{post}}=101$ ms. There is no significant change in the EPSC amplitude; (d) there was statistically significant change of the EPSC amplitude with Δt_{pre} and $\Delta t_{\text{post}} \leq 20$ ms. The relative changes of EPSC amplitudes in a CNT synapse are plotted versus Δt_{pre} and Δt_{post} under the LTP and the LTD stimulations^[4]

了LTD. 在该CNT突触中, 可以通过施加一系列振幅不同的突触前和突触后刺激来连续而可逆的改变突触权重, 使其达到理想的模拟值. 突触权重的改变速率会随着刺激振幅的增加而增加. 但是当刺激间隔 Δt_{Pre} 和 $\Delta t_{\text{Post}} > 20$ ms的上百个大小为5 V, 持续时间为1 ms的突触前和突触后刺激施加在该器件上时, 观察不到突触权重有什么明显的改变(图6(c)和(d)). 该研究小组之前曾发现一个正向的脉冲(比如: 一个突触前刺激)施加在电化学电池上会导致CNTs之间发生电化学反应, 产生可移动的氢离子, 这些氢离子的出现会引起CNT间的氢化作用和传导率的降低; 一个负向的脉冲(比如: 一个突触后刺激)会引起逆向的电化学反应, 导致CNT间的脱氢作用并增加传导率(图6(d), 插入图)^[56]. 因此一系列累积在CNT突触上的 $\Delta t_{\text{Pre}} \leq 20$ ms的突触前刺激会触发LTD; 一系列累积在CNT突触上的 $\Delta t_{\text{Post}} \leq 20$ ms的突触前刺激会触发LTP. 而当施加一系列 Δt_{Pre} 或 $\Delta t_{\text{Post}} \geq 20$ ms的刺激时, 聚合物里的氢离子会在 Δt_{Pre} 或 Δt_{Post} 时间内返回到它们的平衡位置, 从而CNT突触中就不会出现LTD或LTP现象了^[4].

3.3 短时程记忆向长时程记忆的转化

在神经系统中, 通过重复刺激使得STM向LTM的转化是形成长时程记忆的一种重要方式^[57]. Wu等人^[9]在制作铟锌氧化物(IZO)突触晶体管时利用具有高质子传导率的鸡蛋清薄膜作为介电材料, 并在该器件上成功实现了STM向LTM的转化. 实验中把栅极脉冲电压看成是外界的刺激, 把非易失性沟道电流看成是记忆水平. 图7(a)是施加了持续时间固定为

1000 ms, 但幅值不同的栅极脉冲后的EPSC保留曲线. 当施加2.0 V的栅极脉冲时, 观察不到明显的非易失性沟道电流. 当栅极脉冲从4.0 V增加到8.0 V时, 可以观察到非易失性沟道电流明显的增加, 而且栅极电压越大导致了记忆水平越高. 在栅极电压为8.0 V时, 测量到了101 μA 的保留沟道电流最大值. 图7(b)是施加了固定振幅为6.0 V, 但持续时间不同的栅极脉冲后的EPSC保留曲线. 当脉冲时长从100 ms增加到1000 ms时, EPSC的峰值电流从13.1 μA 增加到145 μA , 保留电流从3.8 μA 增大到39.8 μA . 这样的测试结果表明时程越长的脉冲会导致更高的记忆水平, 这和生物突触十分相似^[9,58].

3.4 放电时间依赖可塑性(spike-timing dependent plasticity, STDP)

突触传递的效能可以通过STDP功能由时间相关的突触前和突触后刺激来改变^[59~61]. 比如说, 如果一个突触后刺激在几毫秒的突触前刺激后瞬间被触发, 突触效能会增强, 导致了长时程增强, 但如果交换时间顺序, 突触效能就会减小, 导致长时程抑制. 突触效能也可以在不同类型的突触中基于STDP功能通过改变极性来调控. 所以STDP是神经网络中必不可少的一种调节大脑学习和记忆的功能^[19,62~66]. STDP已在海马体、体觉皮层、视觉皮层系统中发现. 但是和LTP、LTD类似, 在生物系统中还没有发现STDP工作的全部方式^[67].

Kim等人^[4]利用了CNT突触晶体管器件, 根据神经学实验的测试方案^[68~70]模拟了STDP功能. 在CNT

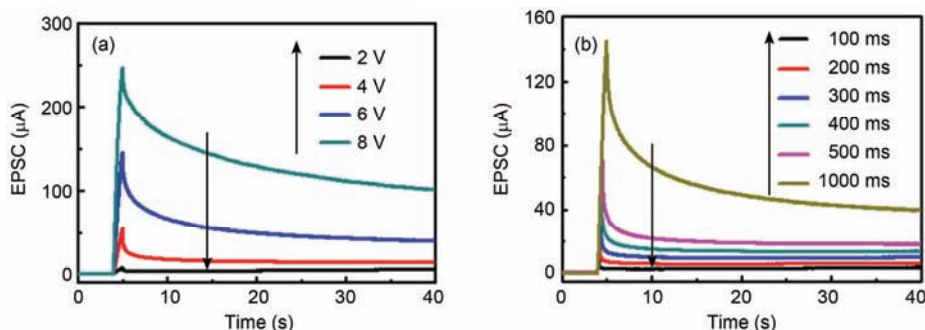


图7 (网络版彩色)STM向LTM转化. (a) 由相同时长为1000 ms但振幅不同的栅极脉冲刺激蛋白-栅极突触晶体管所得的EPSC曲线; (b) 由相同振幅为6 V但不同脉冲时长的栅极脉冲刺激蛋白-栅极突触晶体管所得的EPSC保留曲线^[9]

Figure 7 (Color online) STM to LTM transition. (a) EPSC curves of the albumen-gated synaptic transistor stimulated by gate pulses with the same width of 1000 ms but different amplitudes; (b) EPSC retention curves of the albumen-gated synaptic transistor for gate pulses with the same amplitude of 6.0 V but different pulse widths^[9]

上施加了频率为1 Hz的100对4 V, 1 ms的突触前刺激和5 V, 1 ms的突触后刺激, 并且突触前和突触后刺激间有固定的间隔时长 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$ (图8(a)). 典型的EPSC振幅是关于时间的函数, 该实验在突触前和突触后刺激间间隔时长 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$ 为1 ms的条件下测量EPSC, 如图8(b)所示. CNT突触在经历了成对的脉冲刺激后, 平均EPSC振幅增加了32%. 将 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$ 从-20 ms增加到20 ms, 测量EPSC振幅的变化, 如图8(c)所示. 在CNT突触中发现了类STDP现象: 当突触前刺激在突触后刺激之前施加($\Delta t_{\text{Post-Pre}} > 0$), EPSC振幅增加, 导致了长时程增强(LTP); 当突触前刺激在突触

后刺激之后施加($\Delta t_{\text{Post-Pre}} < 0$), EPSC振幅减小, 导致了长时程抑制(LTD). 图8(c)中的数据点在统计学上是分散的, 在生物突触也有类似的现象^[29,63,69]. 脉冲刺激可以被看作是器件在平衡状态是受到的独立的刺激, 当施加成对的突触前和突触后刺激时, 若 $|\Delta t_{\text{Post-Pre}}| > 20$ ms, 可以观察到突触权重没有显著的改变(图8(c)). $\Delta t_{\text{Post-Pre}} < 20$ ms时, 若突触前刺激在突触后刺激前施加, 正如图8(a)所展示的, 突触前刺激可能会导致氢离子汇聚到CNT表面. 在氢离子返回到平衡状态之前, 突触后刺激会打破氢-CNT键, 导致CNT脱氢和LTP; 若当突触后刺激在突触前刺激之前

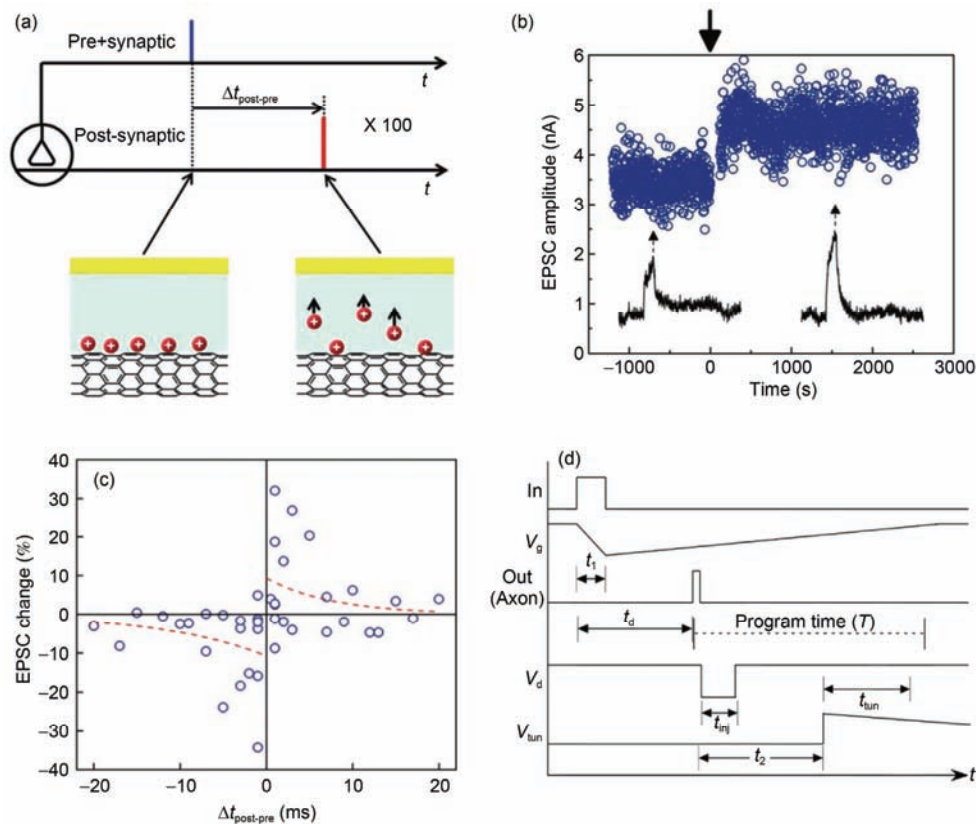


图 8 (网络版彩色)STDP. (a) (顶部)在CNT突触上分别施加了 100 对突触前和突触后刺激, 并且突触前和突触后刺激间有固定的间隔时长 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$. 图中画出了CNT表面(底部, 左侧)的由突触前刺激触发的氢离子(圈)和由突触后刺激(底部, 右侧)引起的CNT脱氢作用. (b) 在 $t=0$ s时施加了 100 对 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}=1$ ms刺激的情况下, 绘制了EPSC振幅关于时间的函数(用箭头标记着). 插图中展示了STDP刺激前后测量出的典型的EPSC. (c) 在脉冲刺激对施加的 20 min之前和 40 min之后测量的EPSC平均幅值的相关改变关于脉冲内间隔时间 $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$ 的函数, 圆圈代表着与虚线拟合的实验数据^[4]. (d) STDP学习规则的施加计划时间图: 使用的计划是一个线性增加的沟道脉冲^[67]. V_{tun} 为隧穿电压, t_{tun} 为隧穿时间, t_{inj} 为注入时间

Figure 8 (Color online) STDP. (a) (Top) 100 pairs of a pre-synaptic spike and a post-synaptic spike are repeatedly applied to a CNT synapse with a fixed inter-spike interval, $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$, in a STDP stimulation. Schemes showing hydrogen ions (circles) induced by the pre-synaptic spike on a CNT surface (bottom, left); and CNT dehydrogenation induced by the post-synaptic spike (bottom, right). (b) EPSC amplitude is plotted as a function of time when the stimulation of 100 spike pairs with $\Delta t_{\text{Post-Pre}}=1$ ms is applied at $t=0$ s (marked by the arrow). Typical EPSCs measured before and after the STDP stimulation are shown in the insets. (c) The relative change of the average EPSC amplitude, measured at 20 min before and 40 min after the stimulation spike pairs is shown as a function of the inter-spike interval, $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$. Open circles represent experimental data fitted by dashed curves^[4]. (d) Timing of the programming algorithm for the STDP learning rule: the algorithm shown here uses a linearly decreasing tunnel voltage^[67]

施加($\Delta t_{\text{Post-Pre}} > -20$ ms), 突触后刺激可能会使碳离子汇聚到CNT表面, 而且随之而来的突触前刺激可能会使氢离子从聚合物转移到CNT表面, 导致CNT氢化作用和LTD. $\Delta t_{\text{Post-Pre}}$ 越小的成对刺激会引发越显著的氢化作用或脱氢作用, 导致越明显的LTD或LTP. 虽然在电子器件中已经观察到了类STDP行为现象, 但还需要更复杂的突触前和突触后刺激的脉冲方案来简化外围电路^[13,19,71,72], 并且需要像生物突触中的突触权重那样可以产生更为灵敏的变化^[73,74]. 在该实验中, 根据波动的电压脉冲方案, 直接在CNT突触上施加突触前和突触后刺激来成功模拟了STDP行为, 这使得CNT突触可以成功地在电路中应用^[4].

Ramakrishnan等人^[67]在浮栅晶体管突触上也模拟了STDP行为, 提出了一个STDP的施加方案, 作用结果与在生物系统中观察到的类似, 并绘制了如图8(d)所示的图像. 在一个突触后刺激出现时, 在沟道输入后按计划施加输入脉冲. 当输入脉冲与输出脉冲的时间间隔 $t_d < 0$ 时, 输入脉冲刺激在输出脉冲刺激之后, 因此栅压在这个输入过程中保持最大可能值. 但是沟道输入与栅极处的部分三角波形有重叠. 为了足够小的负向延迟, 将输入刺激在沟道输入过程中施加, 引起一个穿过沟道氧化物的大电压. 因而对于这些 t_d 的值, 沟道效应有明显的优势并得到一个权重的净负改变. 对于大的 t_d 值, 会存在一个基线沟道导致权重的净负变化. 当 $t_d > 0$ 时, 输入脉冲刺激在输出脉冲刺激之前, 栅压在这个输入过程中保持最小值. 在沟道输入过程中, 栅压增加至初始值, 因而沟道电流按指数形式减小. 因此对于这些 t_d 值, 输入效

应占明显优势, 导致权重的正向改变^[67].

3.5 分流抑制

抑制性突触(inhibitory synapse)是指突触前的兴奋经过传递过程后对突触后的兴奋有抑制作用的突触. 抑制性突触对神经元的输出起着强大的控制作用. 在心理学上, 当抑制和兴奋输入刺激在一起, 去极化电流在到达体细胞之前会泄漏出去. 这样的现象被称为分流抑制. 在Wu等人^[9]提出的突触晶体管结构的器件中, 如图9(a)所示, 正向脉冲被视为兴奋性输入, 负脉冲被视为抑制性输入, 如图9(b)所示. 当兴奋性输入(1.0 V, 20 ms)和抑制性输入(-0.8 V, 20 ms)同时施加的时候, 几乎观察不到电流峰值^[9], 这样的结果与人脑的分流抑制非常相似. 输入输出增益调制对认知和感知功能来说是至关重要的, 分流抑制是增益调制长期和广泛引用的机制^[75].

4 困难与挑战

三端平面晶体管突触虽然在器件机理、材料选择等方面占明显优势, 但是相比于两端结构的忆阻器, 平面晶体管突触能够模拟的功能种类较少且没有实际的应用, 忆阻器目前可以模拟的功能包括短时程可塑性、长时程可塑性、放电时间依赖可塑性、双脉冲易化、“学习—经验”功能、联合性记忆、突触缩放等, 但由上文可知, 晶体管可模拟的功能只是这其中的一小部分, 所以在功能种类这方面平面结构模拟突触是不占优势的. 而且目前制备出的器件还没有统一的可以比较的参数, 并且对器件的集成构架

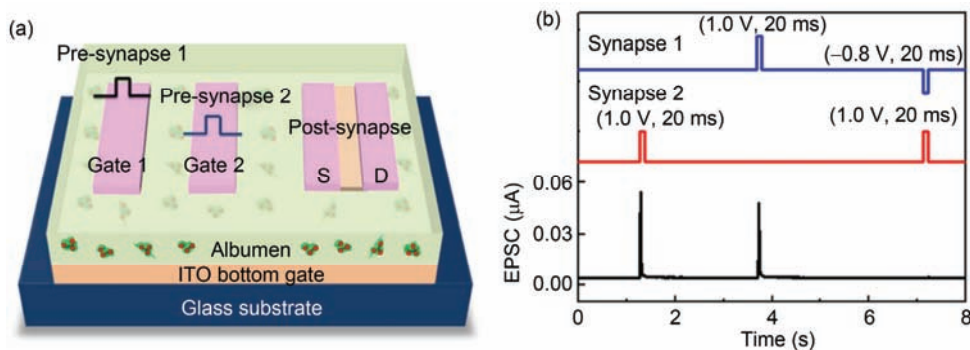


图9 (网络版彩色)分流抑制. (a) 有两个输入端的蛋白栅突触晶体管的原理图; (b) 当抑制和兴奋突触前刺激一起作用时, 几乎观察不到响应电流^[9]

Figure 9 (Color online) Shunting inhibition. (a) A schematic diagram of the albumen-gated synaptic transistor with two input terminals (two in-plane gates); (b) when the inhibitory and excitatory pre-synaptic inputs are stimulated together, almost no response current peak can be observed^[9]

研究较少,当然,器件的尺寸仍然是需要考虑的问题,未来还需在晶体管模拟突触功能方面进行更深入的研究,在全面模拟突触功能的同时,尽可能地缩小器件的尺寸,使之更快地运用到实际当中,在大规模神经形态电路的实现中发挥作用。

5 总结与展望

晶体管因其相对成熟的器件制备工艺和长久的研究历史受到研究人员的广泛支持,其传导沟道和栅极功能作为信号传输和调节模块与生物突触的离子传导和神经递质的释放过程完全对应^[26~28]。在晶体管结构的器件中,可以很容易地同时进行监测和实时操作两个信号的传输和调制过程,这是其他器件完全不能达到的优势。目前所提出的晶体管突触

主要包括包括传统的场效应晶体管、改变栅极位置的晶体管、把三端结构合并为两端结构的具有忆阻效应的晶体管等,这些晶体管结构都可以被称为平面型结构。研究人员在这些已知结构的晶体管上进行掺杂、镀膜等处理和改造,制备出能够模拟生物突触功能的器件。本文中详细地总结了用平面型结构的场效应晶体管模拟的突触功能,主要包括:短时程可塑性(双脉冲刺激、动态过滤、处理时空关联的脉冲、适应)、长时程可塑性、短时程向长时程可塑性的转变、放电时间依赖可塑性及分流抑制等,并且简要分析了目前三端平面结构器件模拟突触面临的挑战。这些模拟为未来在大规模集成电路中内置晶体管突触从而实现类生物突触的信息处理和学习功能提供了可能,为人工智能的发展奠定了基础。

参考文献

- 1 Gkoupidenis P, Schaefer N, Strakosas X, et al. Synaptic plasticity functions in an organic electrochemical transistor. *Appl Phys Lett*, 2015, 107: 263302
- 2 Li H T. The Choice of Materials and Investigation on Mechanism in the Memristive System Based on Oxides (in Chinese). Dissertation for Doctoral Dissertation. Nanjing: Nanjing University, 2011 [李海涛. 氧化物薄膜忆阻器的材料选择与行为机制研究. 博士学位论文. 南京: 南京大学, 2011]
- 3 Backus J. Can programming be liberated from the von neumann style? A functional style and its algebra of programs. *Commun ACM*, 1978, 21: 613–641
- 4 Kim K, Chen C L, Truong Q, et al. A carbon nanotube synapse with dynamic logic and learning. *Adv Mater*, 2013, 25: 1693–1698
- 5 Li Y, Zhong Y, Xu L, et al. Ultrafast synaptic events in a chalcogenide memristor. *Sci Rep*, 2013, 3: 1619
- 6 Prezioso M, Merrih-Bayat F, Hoskins B, et al. Training and operation of an integrated neuromorphic network based on metal-oxide memristors. *Nature*, 2015, 521: 61–64
- 7 Ziegler M, Soni R, Patelczyk T, et al. An electronic version of pavlov's dog. *Adv Func Mater*, 2012, 22: 2744–2749
- 8 Kuzum D, Yu S, Wong H P. Synaptic electronics: Materials, devices and applications. *Nanotechnology*, 2013, 24: 382001
- 9 Wu G, Feng P, Wan X, et al. Artificial synaptic devices based on natural chicken albumen coupled electric-double-layer transistors. *Sci Rep*, 2016, 6: 23578
- 10 Zhu L Q, Wan C J, Guo L Q, et al. Artificial synapse network on inorganic proton conductor for neuromorphic systems. *Nat Commun*, 2014, 5: 3158
- 11 Ramakrishnan S, Hasler P E, Gordon C. Floating gate synapses with spike-time-dependent plasticity. *IEEE Trans Biomed Circuits Syst*, 2011, 5: 244–252
- 12 Alibart F, Pleutin S, Guérin D, et al. An organic nanoparticle transistor behaving as a biological spiking synapse. *Adv Funct Mater*, 2010, 20: 330–337
- 13 Alibart F, Gao L, Hoskins B D, et al. High precision tuning of state for memristive devices by adaptable variation-tolerant algorithm. *Nanotechnology*, 2012, 23: 075201
- 14 Joshi J, Zhang J, Wang C, et al. A biomimetic fabricated carbon nanotube synapse for prosthetic applications. In: *Proceedings of the 2011 IEEE/NIH Life Science Systems and Applications Workshop (LiSSA)*. New York, 2011
- 15 Wan X, Yang Y, Feng P, et al. Short-term plasticity and synaptic filtering emulated in electrolyte-gated igeo transistors. *IEEE Electr Device Lett*, 2016, 37: 299–302
- 16 Zhang L, Lai Q X, Chen Y. Configurable neural phase shifter with spike-timing-dependent plasticity. *IEEE Electr Device Lett*, 2010, 31: 716–718
- 17 Guo L Q, Zhu L Q, Ding J N, et al. Paired-pulse facilitation achieved in protonic/electronic hybrid indium gallium zinc oxide synaptic

- transistors. AIP Adv, 2015, 5: 087112
- 18 Gkoupidenis P, Schaefer N, Garlan B, et al. Neuromorphic functions in PEDOT:PSS organic electrochemical transistors. Adv Mater, 2015, 27: 7176–7180
- 19 Lai Q, Zhang L, Li Z, et al. Ionic/electronic hybrid materials integrated in a synaptic transistor with signal processing and learning functions. Adv Mater, 2010, 22: 2448–2453
- 20 Yang X, Fang Y, Yu Z, et al. Nonassociative learning implementation by a single memristor-based multi-terminal synaptic device. Nanoscale, 2016, 8: 18897–18904
- 21 Wang P, Wang H X, Wang W P. Synaptic plasticity and learning memory (in Chinese). J Brain Nerv Dis, 2008, 16: 194–197 [王佩, 王海祥, 王维平. 突触可塑性与学习记忆. 脑与神经疾病杂志, 2008, 16: 194–197]
- 22 Watanabe Y. Electrical transport through Pb(Zr, Ti)O₃ pn and pp heterostructures modulated by bound charges at a ferroelectric surface: Ferroelectric pn diode. Phys Rev B, 1999, 59: 11257
- 23 Wang L. Memristors and Superconducting Quantum Interference Filters in Rf Systems. Dissertation for Doctoral Degree. Durham: Duke University, 2014
- 24 Jin J H, Jiang X, Wang M Y. Paired-pulse facilitation and depression of excitatory synaptic transmission in spinal cord motoneurons *in vitro* (in Chinese). Acta Acad Med Wannan, 2009, 29: 1–4 [金建慧, 江潇, 汪萌芽. 离体脊髓运动神经元兴奋性突触传递的双脉冲易化和抑制. 皖南医学院学报, 2010, 29: 1–4]
- 25 Chen Y. Neuronal synaptic plasticity, learning and memory (in Chinese). Prog Biochem Biophys, 2008, 35: 610–619 [陈燕. 神经元的突触可塑性与学习和记忆. 生物化学与生物物理进展, 2008, 35: 610–619]
- 26 Kandel E R, Schwartz J H, Jessell T M, et al. Principles of Neural Science. New York: McGraw-Hill, 2000
- 27 Kaczmarek L K, Levitan I B. Neuromodulation: The Biochemical Control of Neuronal Excitability. New York: Oxford University Press, 1987
- 28 Smit A B, Syed N I, Schaap D, et al. A glia-derived acetylcholine-binding protein that modulates synaptic transmission. Nature, 2001, 411: 261–268
- 29 Bi G Q, Poo M M. Synaptic modifications in cultured hippocampal neurons: Dependence on spike timing, synaptic strength, and postsynaptic cell type. J Neurosci, 1998, 18: 10464–10472
- 30 Zucker R S, Regehr W G. Short-term synaptic plasticity. Annu Rev Phys, 2002, 64: 355–405
- 31 Voglis G, Tavernarakis N. The role of synaptic ion channels in synaptic plasticity. EMBO Rep, 2006, 7: 1104–1110
- 32 Li Y, Zhong Y, Zhang J, et al. Activity-dependent synaptic plasticity of a chalcogenide electronic synapse for neuromorphic systems. Sci Rep, 2014, 4: 4906
- 33 Wang Z Q, Xu H Y, Li X H, et al. Synaptic learning and memory functions achieved using oxygen ion migration/diffusion in an amorphous ingazno memristor. Adv Func Mater, 2012, 22: 2759–2765
- 34 Valov I, Linn E, Tappertzhofen S, et al. Nanobatteries in redox-based resistive switches require extension of memristor theory. Nat Commun, 2013, 4: 1771
- 35 Yang Y, Gao P, Gaba S, et al. Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories. Nat Commun, 2012, 3: 732
- 36 Shi J, Ha S D, Zhou Y, et al. A correlated nickelate synaptic transistor. Nat Commun, 2013, 4: 2676
- 37 Riggert C, Ziegler M, Schroeder D, et al. Memflash device: Floating gate transistors as memristive devices for neuromorphic computing. Semicond Sci Tech, 2014, 29: 104011
- 38 Josberger E E, Deng Y, Sun W, et al. Two-terminal protonic devices with synaptic-like short-term depression and device memory. Adv Mater, 2014, 26: 4986–4990
- 39 Wu G D, Zhang J, Wan X, et al. Chitosan-based biopolysaccharide proton conductors for synaptic transistors on paper substrates. J Mater Chem C, 2014, 2: 6249–6255
- 40 Hebb D O. The Organization Of Behavior: A Neuropsychological Theory. Hove: Psychology Press, 2005
- 41 Gerstner W, Kistler W M. Spiking Neuron Models: Single Neurons, Populations, Plasticity. Cambridge: Cambridge University Press, 2002
- 42 Zhang C C, Tai Y T, Shang J, et al. Synaptic plasticity and learning behaviours in flexible artificial synapse based on polymer/viologen system. J Mater Chem C, 2016, 4: 3217–3223
- 43 Xia Y, Liu Z, Wang Y, et al. Conduction behavior change responsible for the resistive switching as investigated by complex impedance spectroscopy. Appl Phys Lett, 2007, 91: 102904
- 44 Buonomano D V. Decoding temporal information: A model based on short-term synaptic plasticity. J Neurosci, 2000, 20: 1129–1141
- 45 Zhou J M, Wan C J, Zhu L Q, et al. Synaptic behaviors mimicked in flexible oxide-based transistors on plastic substrates. IEEE Electr Device Lett, 2013, 34: 1433–1435

- 46 Fortune E S, Rose G J. Short-term synaptic plasticity as a temporal filter. *Trends Neurosci*, 2001, 24: 381–385
- 47 Abbott L, Regehr W G. Synaptic computation. *Nature*, 2004, 431: 796–803
- 48 Chung S, Li X R, Nelson S B. Short-term depression at thalamocortical synapses contributes to rapid adaptation of cortical sensory responses *in vivo*. *Neuron*, 2002, 34: 437–446
- 49 Ohzawa I, Sclar G, Freeman R D. Contrast gain-control in the cat visual-cortex. *Nature*, 1982, 298: 266–268
- 50 Hollins M, Lorenz F, Harper D. Somatosensory coding of roughness: The effect of texture adaptation in direct and indirect touch. *J Neurosci*, 2006, 26: 5582–5588
- 51 Fairhall A L, Lewen G D, Bialek W, et al. Efficiency and ambiguity in an adaptive neural code. *Nature*, 2001, 412: 787–792
- 52 Buonomano D V, Maass W. State-dependent computations: Spatiotemporal processing in cortical networks. *Nat Rev Neurosci*, 2009, 10: 113–125
- 53 Cavus I, Teyler T. Two forms of long-term potentiation in area ca1 activate different signal transduction cascades. *J Neurophysiol*, 1996, 76: 3038–3047
- 54 Gruverman A, Wu D, Lu H, et al. Tunneling electroresistance effect in ferroelectric tunnel junctions at the nanoscale. *Nano Lett*, 2009, 9: 3539–3543
- 55 Velez J P, Duan C G, Belashchenko K D, et al. Effect of ferroelectricity on electron transport in pt/BaTiO₃/pt tunnel junctions. *Phys Rev Lett*, 2007, 98: 137201
- 56 Ahn Y S, Kim K, Park H K, et al. Functionalized carbon nanotube networks with field-tunable bandgaps. *Adv Mater*, 2011, 23: 3075–3079
- 57 Ohno T, Hasegawa T, Tsuruoka T, et al. Short-term plasticity and long-term potentiation mimicked in single inorganic synapses. *Nat Mater*, 2011, 10: 591–595
- 58 Lamprecht R, LeDoux J. Structural plasticity and memory. *Nat Rev Neurosci*, 2004, 5: 45–54
- 59 Bell C C, Han V Z, Sugawara Y, et al. Synaptic plasticity in a cerebellum-like structure depends on temporal order. *Nature*, 1997, 387: 278–281
- 60 Zhang L I, Tao H W, Holt C E, et al. A critical window for cooperation and competition among developing retinotectal synapses. *Nature*, 1998, 395: 37–44
- 61 Dan Y, Poo M M. Spike timing-dependent plasticity of neural circuits. *Neuron*, 2004, 44: 23–30
- 62 Gerstner W, Kempter R, van Hemmen J L, et al. A neuronal learning rule for sub-millisecond temporal coding. *Nature*, 1996, 383: 76–78
- 63 Song S, Miller K D, Abbott L F. Competitive hebbian learning through spike-timing-dependent synaptic plasticity. *Nat Neurosci*, 2000, 3: 919–926
- 64 Bi G q, Poo M M. Synaptic modification by correlated activity: Hebb’s postulate revisited. *Annu Rev Neurosci*, 2001, 24: 139–166
- 65 Lengyel M, Kwag J, Paulsen O, et al. Matching storage and recall: Hippocampal spike timing-dependent plasticity and phase response curves. *Nat Neurosci*, 2005, 8: 1677–1683
- 66 Caporale N, Dan Y. Spike timing-dependent plasticity: A hebbian learning rule. *Annu Rev Neurosci*, 2008, 31: 25–46
- 67 Ramakrishnan S, Hasler P, Gordon C, et al. Floating gate synapses with spike time dependent plasticity. In: *Proceedings of 2010 IEEE International Symposium on Circuits And Systems*. Place Published, 2010. 369–372
- 68 Jerusalinsky D, Kornisiuk E, Izquierdo I. Cholinergic neurotransmission and synaptic plasticity concerning memory processing. *Neurochem Res*, 1997, 22: 507–515
- 69 Froemke R C, Dan Y. Spike-timing-dependent synaptic modification induced by natural spike trains. *Nature*, 2002, 416: 433–438
- 70 Debanne D, Gähwiler B H, Thompson S M. Long-term synaptic plasticity between pairs of individual ca3 pyramidal cells in rat hippocampal slice cultures. *J Phys*, 1998, 507: 237–247
- 71 Kuzum D, Jeyasingh R G, Lee B, et al. Nanoelectronic programmable synapses based on phase change materials for brain-inspired computing. *Nano Lett*, 2011, 12: 2179–2186
- 72 Bichler O, Suri M, Querlioz D, et al. Visual pattern extraction using energy-efficient “2-pcm synapse” neuromorphic architecture. *IEEE Trans Electron Dev*, 2012, 59: 2206–2214
- 73 Seo K, Kim I, Jung S, et al. Analog memory and spike-timing-dependent plasticity characteristics of a nanoscale titanium oxide bilayer resistive switching device. *Nanotechnology*, 2011, 22: 254023
- 74 Jo S H, Chang T, Ebong I, et al. Nanoscale memristor device as synapse in neuromorphic systems. *Nano Lett*, 2010, 10: 1297–1301
- 75 Prescott S A, De Koninck Y. Gain control of firing rate by shunting inhibition: Roles of synaptic noise and dendritic saturation. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2003, 100: 2076–2081

Summary for “基于平面晶体管型器件的突触可塑性模拟”

Emulations of synaptic plasticity in the planar transistor configuration for neuromorphic computing

CHEN Yan^{1†}, ZHANG ChenXi^{1†}, WANG LaiYuan¹, LI TengFei¹, ZHU Ying¹,
YI MingDong^{1*} & HUANG Wei^{1,2*}

¹ Jiangsu National Synergetic Innovation Center for Advanced Materials (SICAM), Key Laboratory for Organic Electronics and Information Displays & Institute of Advanced Materials (IAM), Nanjing University of Posts & Telecommunications (NUPT), Nanjing 210023, China;

² The Synergetic Innovation Center for Advanced Materials (SICAM), Key Laboratory of Flexible Electronics (KLOFE) & Institute of Advanced Materials (IAM), Nanjing Tech University (NanjingTech), Nanjing 211816, China

* Corresponding authors, E-mail: iammdyi@njupt.edu.cn; iamwhuang@njupt.edu.cn

† Equally contributed to this work

Due to the expansion of data information, computers based on the traditional von Neumann architecture have been unable to store or flexibly handle large amounts of information. Compared to this, the highly parallel nonlinear information processing the capability of brain reveals an attractive advantage, which is considered as the target of computing development. The human brain is composed of neuronal networks which are connected by 10^{14} – 10^{15} synapses. Synapses are the connection channels for the exchange of information between neurons, characterized by synaptic plasticity. Synaptic plasticity functions play a crucial role in the transmission of neural signals in the brain and it is the molecular basis of biological learning and memory. In order to emulate neuronal networks, it is essential to design a physical device possessing the functions of biological synapses, so that the neuromorphic circuits which can functionally emulate the brain-like behaviors can be realized. The transdisciplinary researches integrated the novel insights of neuroscience, physics, chemistry, materials science and engineering are performed. Researchers have shown that in the transistor structure with adjustable memristive characteristics, considered as the signal transmission and regulation modules, the conductive channel and gate function are analogous to ionic conduction and neurotransmitter release process in the biological synapse, respectively. In most researches, voltage pulses applied on the gate electrodes are used to simulate the presynaptic spikes or external stimuli, the channel conductance is considered as synaptic weight. So the simulation of biological synapses can be realized in such field effect transistors. Meanwhile, as a considerably popular platform with memory effect, the electron-type transistor memory which is designed for binary data storage is fabricated characterized by gentle process of charge trapping, where the relaxation tendencies of OFF (ON) state in electrical operation mode can be utilized to simulate the biological facilitating (depressing) activities, respectively. So, we can emulate the functions of biological synapses in the electron-type transistor memory, too. In this paper, recent simulations of synaptic plasticity functions in transistor synapses with planar structures are summarized, including short-term synaptic plasticity (such as paired-pulse facilitation and inhibition, dynamic filtering (high-pass filtering/low-pass filtering), spatiotemporally correlated signal processing, adaptation, etc), long-term synaptic plasticity, and the transition between them, spike-timing-dependent plasticity, shunting inhibition, and so on. The characteristics and different simulation methods of these functions are illustrated, the mechanisms and advantages of the planar transistor configuration are explained, current weaknesses and challenges of transistor synapses are pointed out, the future development in this field are also prospected.

planar structure, transistor synapse, artificial synapse, synaptic plasticity, neuromorphic computing

doi: 10.1360/N972016-01359