

玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管

郭立强 陶剑 温娟 程广贵 袁宁一 丁建宁

Corn starch solid electrolyte gated proton/electron hybrid synaptic transistor

Guo Li-Qiang Tao Jian Wen Juan Cheng Guang-Gui Yuan Ning-Yi Ding Jian-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, **66**, 168501 (2017) DOI: 10.7498/aps.66.168501

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.66.168501>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2017/V66/I16>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高功率微波作用下高电子迁移率晶体管的损伤机理

High power microwave damage mechanism on high electron mobility transistor

物理学报.2016, 65(16): 168501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.168501>

镉锌氧化物薄膜晶体管局域态分布的提取方法

Extraction of density of localized states in indium zinc oxide thin film transistor

物理学报.2016, 65(12): 128501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.128501>

退火温度和 Ga 含量对溶液法制备 InGaZnO 薄膜晶体管性能的影响

Effects of annealing temperature and Ga content on properties of solution-processed InGaZnO thin film

物理学报.2016, 65(12): 128502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.128502>

AlGa_N/Ga_N 双异质结 F 注入增强型高电子迁移率晶体管

Enhancement mode AlGa_N/Ga_N double heterostructure high electron mobility transistor with F plasma treatment

物理学报.2016, 65(3): 038501 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.65.038501>

内嵌 CuO 薄膜对并五苯薄膜晶体管性能的改善

Analysis of improved characteristics of pentacene thin-film transistor with an embedded copper oxide layer

物理学报.2015, 64(22): 228502 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.228502>

玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管*

郭立强¹⁾²⁾ 陶剑^{1)†} 温娟¹⁾ 程广贵¹⁾ 袁宁一¹⁾²⁾ 丁建宁¹⁾²⁾

1)(江苏大学微纳米科学技术研究中心, 镇江 212013)

2)(常州大学, 江苏省光伏科学与工程协同创新中心, 常州 213164)

(2017年4月23日收到; 2017年5月16日收到修改稿)

随绿色可持续发展观念的深入人心, 研究人员致力于寻找天然有机材料应用于功能性电子器件. 淀粉以其低廉的价格、丰富的来源和优异的机械性能进入了科研人员的视野. 淀粉可由玉米、马铃薯、甘薯和葛根等含淀粉的物质中提取而得, 一般不溶于水, 在水加热至一定温度时, 则糊化成胶状溶液. 本文通过旋涂法将玉米淀粉的胶状溶液旋涂至氧化铟锡玻璃表面, 然后在 30 °C 恒温环境中晾干制备成固态胶合状薄膜. 以此薄膜作为固态电解质制备了氧化铟锡突触晶体管, 并实现了生物神经突触的双脉冲易化、学习记忆能力、高通滤波等可塑性行为的仿真. 本研究以玉米淀粉固态胶合薄膜作为电解质大大降低了氧化物薄膜晶体管固态电解质的成本, 且该电解质无毒性、来源丰富, 将为人工神经网络的开发提供一种可选择的元件.

关键词: 玉米淀粉固态电解质, 双脉冲易化特性, 突触晶体管, 高通滤波特性

PACS: 85.30.Tv, 77.55.D-, 73.61.-r

DOI: 10.7498/aps.66.168501

1 引言

生物神经网络以神经元为基本信息处理单元, 并依靠神经元之间的神经突触实现信息的传递与整合, 这种信息传递与整合的工作方式利用冯·诺依曼计算机已很难进行模拟^[1]. 为进一步模拟人脑生物神经网络的形象思维方式, 研究人员从模拟人脑生物神经网络的信息存储、加工处理机制入手, 并在实物方面设计了许多种具有人类思维特点的微电子元件, 新材料体系的氧化物薄膜突触晶体管就是其中之一^[2-6]. 新材料体系的氧化物薄膜突触晶体管依据其所采用铁电材料 Pr(Zr, Ti)O₃(PZT)/SrRuO₃ 和离子/电子混合材料等作为栅介质, 分别利用铁电材料 Pr(Zr, Ti)O₃(PZT)/SrRuO₃ 在电场中产生极化和离子/电子混合材料中离子/电子在电场作用下迁移等特性实现神经突触可塑性行为的仿生. 近年来, 研究发现采用有机/无机质子导体薄膜作为栅介质的双电

层薄膜晶体管, 在栅极施加正偏压的情况下, 栅介质中的质子将向远离栅极的方向输运, 最终在靠近沟道层的栅介质表面形成质子积累层^[7]. 栅电极施加正向较小、较少脉冲的刺激时, 质子将迁移到质子导体膜和半导体沟道层之间的界面, 并在临近半导体沟道层下诱导产生电子层, 最终形成双电层而保持其工作状态. 栅电极施加正向较大、较多脉冲的刺激时, 质子将迅速迁移到质子导体膜和半导体沟道层之间的界面, 并因短时间内质子获得足够大的能量而跃迁进入半导体沟道层, 与半导体沟道层的元素发生电化学反应, 最终形成永久记忆状态. 双电层薄膜晶体管的电学特性取决于质子导体膜或固态电解质的电容和质子传导等特性. 聚合物电解质通常是由无机盐溶于高分子聚合物中制备成的一种固态电解质, 固态聚合物电解质栅介质具有成本低、易制备等优点. 其中聚环氧乙烷(PEO)/高氯酸盐(AClO₄, A = Li, K)是最早也是最常见的一类聚合物电解质^[8]. 聚合物电解质的离子在聚合

* 国家自然科学基金(批准号: 51402321)、国家自然科学基金重大研究计划培育项目(批准号: 91648109)、江苏省博士后科研资助计划(批准号: 1402071B)和江苏省普通高校专业学位论文研究生创新计划项目(批准号: SJLX16_0437)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: 2221603047@stmail.ujs.edu.cn

物矩阵内迁移速度较快,这决定了器件响应时间较慢,所以基于聚合物电解质为栅介质的双电层晶体管应该避免用于高频工作领域.为了克服聚合物电解质作为晶体管栅介质对器件开关速度和工作频率的限制,研究人员研制了高离子电导率的电解质材料——离子液,由于离子液具有不易挥发、化学稳定和高离子电导率等优点,广泛应用于各种电化学器件,如锂离子电池、低压双电层晶体管^[9-12].以N,N-二乙基-N-甲基-N-乙基(2-甲氧基)季胺二(三氟甲基磺酰)亚胺盐(DEME-TFSI)为例,Yuan等^[13]将聚合物电解质和离子液作为双电层晶体管的栅介质,由于阳离子和阴离子可在离子液内几乎无障碍地自由迁移,离子液作为栅介质的晶体管的开关速度明显快于聚合物电解质材料为栅介质的晶体管.与聚合物电解质和离子液相比,固态电解质表现出了优异的化学稳定性和离子电导特性,其开关速度介于两者之间.近年来,Wan等^[14]制备了多孔SiO₂、多孔Al₂O₃和分子筛等无机固态电解质材料,例如,在室温下采用等离子体化学气相沉积法制备得到的多孔SiO₂纳米颗粒膜中发现了巨大的双电层电容(约2 μF/cm², f = 1 Hz).随着科技进步和环境保护的要求日益提高,研究人员更致力于选择环保型固态电解质材料来制备氧化物薄膜突触晶体管器件^[15,16].

淀粉不仅作为食物在人类的生活中不可或缺,还作为一种重要的工业原料广泛用于纺织、医药和造纸等行业^[17,18].淀粉一般呈颗粒状,主要由直链淀粉和支链淀粉两种聚合物混合而成^[19].淀粉可由玉米、马铃薯、甘薯和小麦等含淀粉的物质中提取而得,一般不溶于水,在水加热至一定温度时,则糊化成胶体溶液.本文通过旋涂法将有机玉米淀粉的胶体溶液旋涂至氧化铟锡(ITO)玻璃表面,然后在30 °C恒温环境中晾干制备成固态胶合薄膜.以此薄膜作为固态电解质制备氧化铟锌(IZO)突触晶体管.该突触晶体管展现出优异的电学特性,其工作电压低于1.5 V,开关比为1 × 10⁷,且器件稳定性良好,并实现了生物神经突触的双脉冲易化、长短程记忆及高通滤波等特性的仿真.

2 实验

首先取120 mL去离子水加热至100 °C,再取15 g玉米淀粉浸入在去离子水中,同时不停地快速搅拌,使淀粉充分溶解在去离子水中,直至透明

胶状液体,如图1(a)所示;将获得的透明胶状液体旋涂至ITO玻璃衬底上,随后在烘干台上烘烤12 h,烘干温度为30 °C,从而获得玉米淀粉固态电解质薄膜.室温下,通过一次掩膜自组装技术,以氩气作为保护气体,控制溅射压强为0.5 Pa、氩气流量为14 sccm,采用IZO靶材(质量分数为90%的In₂O₃和10%的ZnO),15 min后在玉米淀粉固态电解质薄膜上沉积了一层IZO薄膜.由于溅射时使用的掩模板与栅介质薄膜之间存在的间隙,根据溅射的衍射原理,可在源、漏电极之间形成一个厚约为30 nm、长和宽分别为80 μm和1000 μm的沟道层^[20,21],如图1(b)所示.

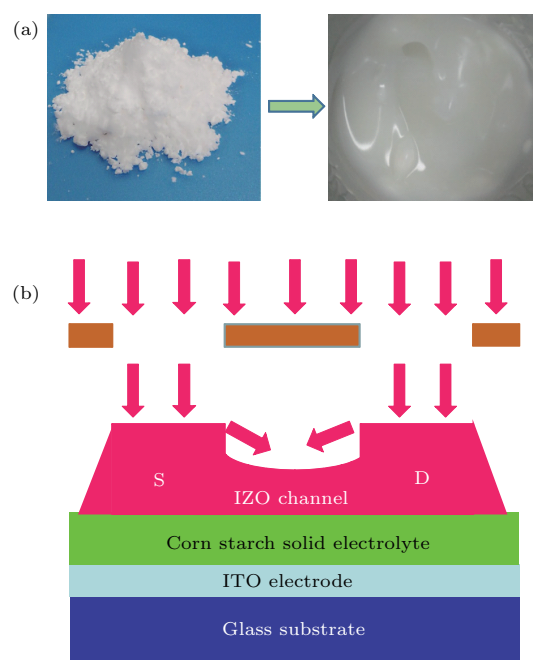


图1 (网刊彩色) (a) 玉米淀粉在热水中糊化图; (b) 基于玉米淀粉固态电解质为栅介质的质子/电子杂化突触晶体管结构示意图

Fig. 1. (color online) (a) The image of corn starch is gelatinized in boiling water; (b) the schematic image of proton/electron hybrid IZO film synaptic transistors gated by corn starch solid electrolyte structure.

3 结果与分析

图2(a)插图是淀粉固态电解质的分子式以及水合作用反应式.当玉米淀粉浸入沸水时,淀粉颗粒会发生不可逆的膨胀即糊化反应,其本质是体系中水分子获得足够能量进入淀粉分子内部与其争夺氢键,造成氢键破坏,使得淀粉分子微晶束的状态由原来的紧密结合变得疏松,淀粉分子充分伸展,淀粉糊体系混乱度增加,淀粉分子失去了平行

排列取向的可能, 其氢键与水分子发生了高度的水合作用, 这有利于水分子在淀粉分子中的运输和存储 [22]. 以糊化后的玉米淀粉溶液制备了胶合薄膜, 该薄膜具有大量的疏松孔洞和间隙, 疏松孔洞与间隙的存在为水分子存储及离子迁移提供了良好的条件 [23]. 由于淀粉分子中含有大量亲水性基团 (-OH), 在糊化时淀粉分子和水分子会发生高度的水合作用, 这也会产生一定的离子导电性 [24-26]. 淀粉固态电解质中质子的迁移机制类似于其他固态聚合物电解质 [27,28]. 图 2 (a) 为玉米淀粉固态电解质的电容-频率特性曲线, 由图可见, 随着频率逐渐降低, 质子响应时间增长, 大量氢质子向玉米淀粉固态电解质与沟道层界面处迁移并累积, 形成了双电层 [29-31]. 当频率降为 1 Hz 时, 其形成的双电层电容约为 $1.2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. 图 2 (b) 为以玉米淀粉固态电解质为栅介质的质子\电子杂化突触晶体管的转移特性曲线. 转移特性曲线中存在一个明显的涸滞窗口, 约为 0.5 V, 这可能是由玉米淀粉固态电解质中质子迁移滞纳所致. 当栅电压 V_{gs} 从 1.5 V 逐渐降低至 -1.5 V 时, 在淀粉固态电解质层与沟道

层接触面的氢质子受沟道层中电子层的吸引作用从而缓慢返回平衡位置, 因此产生了涸滞现象. 根据转移特性曲线, 可以计算出器件的开关比约为 1×10^7 . 亚阈值摆幅 S 可由 (1) 式估算:

$$S = \frac{dV_{\text{gs}}}{d(\log_{10} I_{\text{ds}})}, \quad (1)$$

式中 V_{gs} 为栅电压, I_{ds} 为源漏电流, 经计算约为 156.8 mV/dec. 器件的阈值电压 V_{th} 可通过 $I_{\text{ds}}^{1/2}$ - V_{gs} 曲线的拟合直线在 X 轴的截距得到, 约为 0.2 V. 因而饱和区 ($V_{\text{ds}} > V_{\text{gs}} - V_{\text{th}}$) 的场效应迁移率 μ 可由 (2) 式获得:

$$I_{\text{ds}} = \mu \frac{C_i W}{2L} (V_{\text{gs}} - V_{\text{th}})^2, \quad (2)$$

式中 L 为沟道长度, $L = 80 \mu\text{m}$, W 为沟道宽度, $W = 1000 \mu\text{m}$, C_i 为玉米淀粉固态电解质单位面积电容, $C_i = 1.2 \mu\text{F}/\text{cm}^2$. 经过计算可得饱和区的场效应迁移率 μ 约为 $18.7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$. 图 2 (c) 为该器件的输出特性曲线, 栅电压 V_{gs} 从 -0.6 V 依次增加到 1.2 V, 每次增幅 0.3 V. 由图可见, 源漏

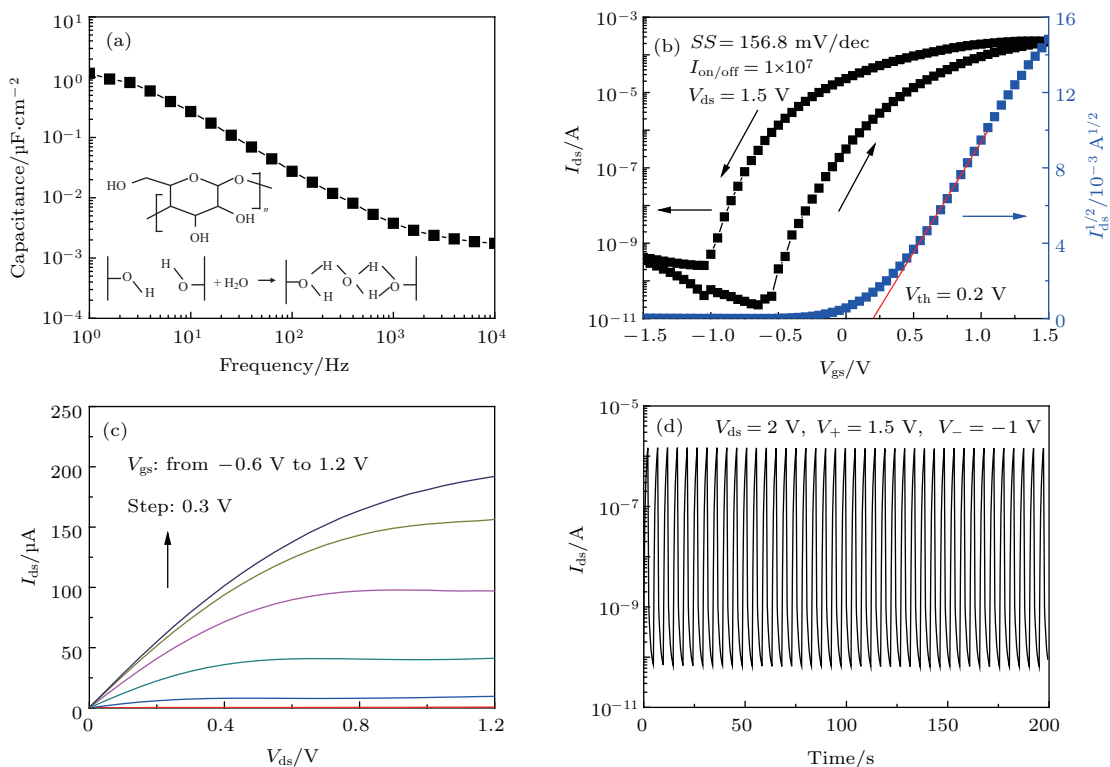


图 2 (网刊彩色) (a) 玉米淀粉固态电解质的电容-频率特性曲线, 插图为淀粉分子的结构式以及水合作用反应式; (b) 器件的转移特性曲线; (c) 器件的输出特性曲线; (d) 器件的脉冲响应特性曲线

Fig. 2. (color online) (a) Frequency-dependent specific capacitance of corn starch solid electrolyte Insert: Molecular formula of corn starch solid electrolyte and the equation of hydration; (b) transfer characteristics of device; (c) output characteristics of the device; (d) time response of the device of pulse square-shaped.

电压 V_{ds} 较低时, 器件具有明显的线性区域, 表明器件的欧姆接触良好; 而在源漏电压 V_{ds} 较高时, 器件又表现出了良好的饱和特性; 当源漏电压 V_{ds} 为 1.2 V、栅电压 V_{gs} 为 1.2 V 时, 器件的饱和电流达到最大约为 192 μ A. 图 2 (d) 给出了该器件的脉冲响应特性曲线, 源漏电压 V_{ds} 为 2 V, 在栅电极施加交替栅电压 V_{gs} 分别为 1.5 V 和 -1.0 V. 经过 40 次循环后, 电流无明显损失, 且开关比保持稳定, 这表明玉米淀粉固态电解质和 IZO 沟道层之间没有发生明显的电学掺杂, 器件具有良好的稳定性.

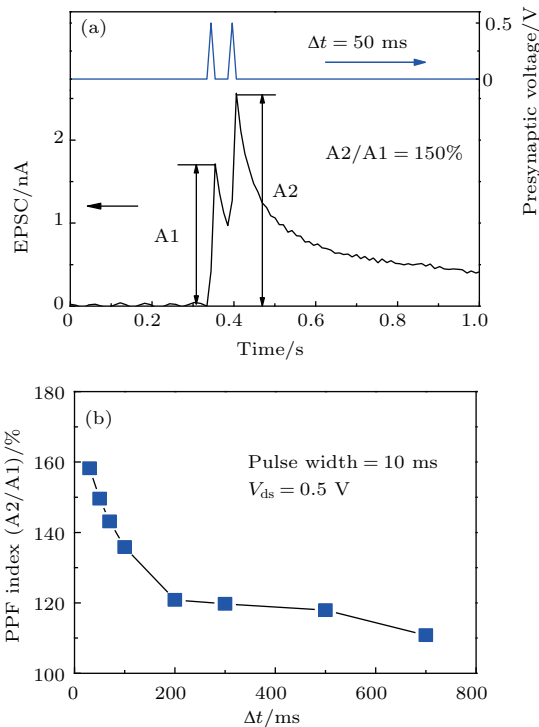


图 3 (网刊彩色) (a) 间隔时间为 50 ms 的连续刺激作用下的双脉冲易化特性曲线; (b) 两个连续刺激引起的双脉冲易化峰值之比 (A_2/A_1) 随着刺激间隔时间的变化

Fig. 3. (color online) (a) Paired-pulse facilitation, a pair of pre-synaptic spikes and the triggered EPSC under an inter-spike interval of 50 ms; (b) PPF index, defined as the ratio of A_2/A_1 , plotted as function of inter-spike interval, between the two succeed spikes.

利用玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管, 本文进一步仿生研究了生物神经突触的可塑性行为. 图 3 (a) 给出了仿生生物神经突触的双脉冲易化 (paired-pulse facilitation, PPF) 特性曲线. 在栅极上施加两个间隔的脉冲刺激, 间隔时间 Δt 为 50 ms, 脉冲振幅为 0.5 V. 由图可见, 所得到的兴奋性后突触电流 (excitatory postsynaptic current, EPSC) 的峰值有着明显的增加, 两次

EPSC 尖峰峰值之比为 150%. 这说明第一次脉冲刺激后, 所激发的氢质子没有全部扩散, 并产生了一定的累积; 由于两次刺激间隔时间较短, 当第二次脉冲刺激时, 再次诱导出氢质子, 使质子数量再次累加, 导致 EPSC 增大, 最终实现了类似于神经突触的双脉冲易化特性. 为进一步实现类神经突触的双脉冲易化特性的可控性, 可通过改变脉冲刺激的间隔时间 Δt , 如图 3 (b) 所示. 其易化指数随着间隔时间的增加而逐渐减少. 间隔时间越长, 所诱导在界面处的质子扩散至平衡位置的数量越多, 质子累积的优势逐渐消失导致 EPSC 增幅也就越小.

图 4 (a) 给出了连续施加 10 个脉冲所获得的兴奋性后突触电流特性曲线, 其中脉冲振幅、脉冲宽度和脉冲间隔分别为 0.5 V, 10 ms 和 50 ms. 由图可见, 每一次脉冲刺激均使 EPSC 的峰值得到提高, 但在连续脉冲刺激的情况下, 增长比值逐渐减小, 这表明在连续的脉冲刺激下, 玉米淀粉固态电解质中质子被激发的数量逐渐达到饱和. 连续脉冲刺激完成之后, 随玉米淀粉固态电解质中质子逐渐扩散, EPSC 逐渐减小, 这一现象非常类似于神经突触学习记忆的衰减特性. 图 4 (a) 插图给出了不同数目脉冲刺激之后的 EPSC 的衰减特性曲线, 其中所施加的脉冲振幅、脉冲宽度和脉冲间隔分别为 0.5 V, 10 ms 和 50 ms, 脉冲数目分别为 5, 10, 20, 40, 80. 由图可见, 随脉冲数量的增加, 在相同时间内 EPSC 衰减的比例逐渐增大, 这表明玉米淀粉固态电解质中激发质子扩散的比例逐渐上升. 图 4 (b) 是不同数量脉冲连续刺激后获得的记忆保持曲线, 其脉冲参数与衰减特性曲线设定一致. 其记忆保持指数 ΔW 由 (3) 式得出:

$$\Delta W = (W_2 - W_1)/W_1 \times 100\%, \quad (3)$$

式中 W_1 为刺激前源漏电流值, W_2 为刺激后不同时间点的源漏电流值. 如图所示, 给予不同数量的脉冲刺激, 在刺激后 1 s 时, 刺激数为 80 的记忆保持指数 ΔW 远大于其他刺激数的记忆保持指数, 且随着时间推移, 记忆保持指数逐渐减小, 但减小趋势放缓. 这类似生物记忆的短时记忆向长时记忆的转变, 通过重复刺激记忆得到巩固. 伴随刺激数目增加, 玉米淀粉固态电解质中激发质子数也增加, 刺激结束后激发质子开始扩散. 刺激脉冲数量越大, 质子的累积效应越明显, 因此质子扩散所需要的时间越长, 记忆保持指数 ΔW 也就越大.

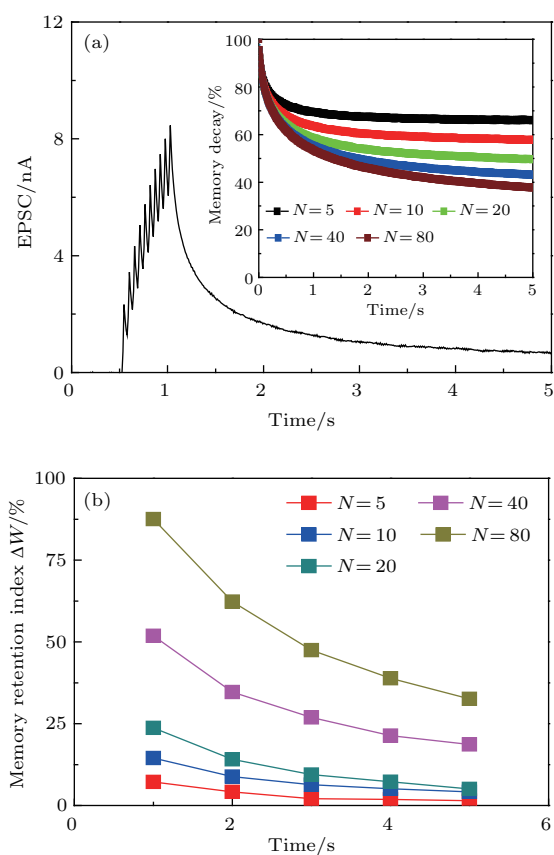


图4 (网刊彩色) (a) 连续刺激下兴奋性后突触电流变化曲线(脉冲振幅、脉冲宽度、脉冲间隔时间分别为0.5 V, 10 ms, 50 ms), 插图为不同数目脉冲刺激之后的兴奋性后突触电流的衰减特性曲线; (b) 不同刺激数量的记忆保持指数随时间的变化

Fig. 4. (color online) (a) Time dependent created channel current (EPSC) by ten gate pulse (0.5 V, 10 ms) with interval time of 50 ms, insert is numbers of gate pulses dependent memory decay ratio; (b) change of the memory retention index is plotted as a function of the time, after different numbers spike.

为进一步研究质子在玉米淀粉固态电解质中的滤波特性, 本文通过改变刺激的脉冲频率对突触晶体管进行了一系列连续的刺激, 其中脉冲的频率为1—50 Hz, 脉冲数量、脉冲宽度和脉冲振幅分别为5, 10 ms和0.5 V, 如图5(a)所示. 当刺激频率为1 Hz时, 第五个EPSC的峰值约为3.05 nA, 这接近第一个EPSC的峰值. 随着刺激频率的增加, EPSC的值有着明显的增强. EPSC的增益定义为第五个EPSC尖峰(A5)的绝对振幅与第一个尖峰(A1)的比值. 图5(a)给出了在不同刺激频率下的EPSC增幅. 图5(b)给出了频率相关的EPSC的增益变化, 随着频率的增高, 第五个EPSC(A5)和第一个EPSC(A1)之间的峰值之比呈递增趋势. 当频率为1和50 Hz时, A5/A1分别为121%和217%,

这表明高频刺激后给予激发质子扩散的时间越短, 质子累积效应越明显, 引起的EPSC的峰值也就越高. 这反映出在神经形态系统中, 短时间内连续的突触刺激可以促进或抑制突触响应, 短期促进或抑制分别有助于高通滤波和低通滤波, 因此该玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管可根据信号的频率用作于信息传输的动态滤波器.

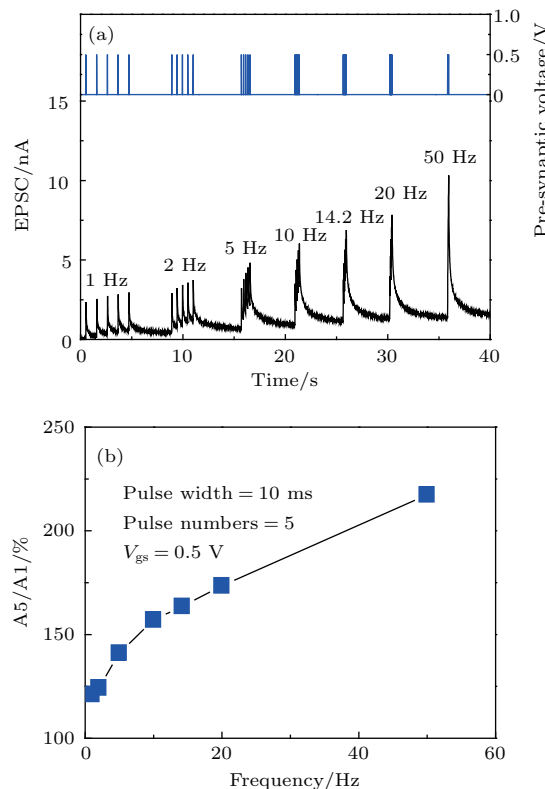


图5 (网刊彩色) (a) 兴奋性后突触电流在不同频率下随时间变化; (b) 兴奋性后突触电流增益(A5/A1)随频率变化

Fig. 5. (color online) (a) EPSCs recorded in response to the stimulus train with different frequencies; (b) EPSCs amplitude gain (A5/A1) plotted as function of pre-synaptic spike frequency.

4 结 论

本文以玉米淀粉作为试剂, 根据玉米淀粉遇热水糊化的原理, 配置成玉米淀粉胶状溶液. 利用旋涂技术将玉米淀粉胶状溶液制备在ITO玻璃表面, 以此作为固态电解质, 制备了玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管. 研究发现, 玉米淀粉固态电解质质子\电子杂化突触晶体管展现出良好的电学特性, 其工作电压、开关比、亚阈值摆幅分别为1.5 V, 1×10^7 , 156.8 mV/dec.. 由于玉米淀粉固态电解质中明显的质子累积效应, 作为栅介质所制

备的质子/电子杂化突触晶体管可实现生物神经突触的双脉冲易化、学习记忆能力、高通滤波等可塑性行为的仿真。因此, 本研究的器件大大降低了氧化物薄膜突触晶体管的制备成本, 在环保型微电子器件领域具有潜在的应用价值。

参考文献

- [1] Aram Z, Jafari Z, Mab J, Sprott J C, Zendehrouh S, Pham V T 2017 *Commun. Nonlinear Sci. Numer. Simulat.* **44** 449
- [2] Zhang S J, Ding D, Wei G L, Liu Y, Alsaadi F E 2017 *Neurocomputing* **260** 257
- [3] Borders W A, Akima H, Fukami S, Moriya S, Horio Y, Sato S, Ohno H 2017 *Appl. Phys. Express* **10** 013007
- [4] Borghetti J, Snider G S, Kuekes P J, Yang J J, Stewart D R, Williams S T 2010 *Nature* **464** 873
- [5] Li Y H, Yang Y C, Gao X M, Yuan J L, Zhu G X, Zhang Z Y, Wang Y J 2016 *IEEE Electron Dev. Lett.* **37** 1434
- [6] Kim H, Park J, Kwon M W, Lee J H, Park B G 2016 *IEEE Electron Dev. Lett.* **37** 249
- [7] Yuan H, Shimotani H, Tsukazaki A, Ohtomo A 2010 *J. Am. Chem. Soc.* **132** 6672
- [8] Rocco A M, Fonseca C P D, Pereira R P 2002 *Polymer* **43** 3601
- [9] Ni'Mah Y L, Cheng M Y, Cheng J H, Rick J, Hwang B J 2015 *J. Power Sources* **278** 375
- [10] Goodenough J B, Park K S 2013 *J. Am. Chem. Soc.* **135** 1167
- [11] Liu Y H, Zhu L Q, Shi Y, Wan Q 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 133504
- [12] Zhu D M, Men C L, Cao M, Wu G D 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 117305 (in Chinese) [朱德明, 门传玲, 曹敏, 吴国栋 2013 物理学报 **62** 117305]
- [13] Yuan H, Shimotani H, Tsukazaki A, Ohtomo A, Kawasaki M, Lwasa Y 2009 *Adv. Funct. Mater.* **19** 1046
- [14] Lu A X, Sun J, Jiang J, Wan Q 2009 *Appl. Phys. Lett.* **95** 222905
- [15] Wu G, Feng P, Wan X, Zhu L, Shi Y, Wan Q 2016 *Sci. Rep.* **6** 23578
- [16] Wu G, Zhang J, Wan X, Yang Y, Jiang S 2014 *J. Mater. Chem. C* **2** 6249
- [17] Gomes M E, Ribeiro A S, Malafaya P B, Reis R L, Cunha A M 2001 *Biomaterials* **22** 883
- [18] Ohkita T, Lee S H 2004 *J. Appl. Polym. Sci.* **97** 1107
- [19] Finkenstadt V L, Willett J L 2004 *J. Polym. Environ.* **12** 43
- [20] Lu A X, Sun J, Jiang J, Wan Q 2010 *IEEE Electron Dev. Lett.* **31** 1137
- [21] Wu G D, Zhou J M, Zhang H L, Zhu L Q, Wan Q 2012 *IEEE Electron Dev. Lett.* **33** 1720
- [22] Stute R 1992 *Starch-Starke* **44** 205
- [23] Ramesh S, Liew C W, Arof A K 2011 *J. Non-Cryst. Solids* **357** 3654
- [24] Raeishosseini N, Lee J S 2016 *ACS Appl. Mat. Interfaces* **8** 7326
- [25] And D T, Söderman O 2002 *J. Phys. Chem. B* **106** 11887
- [26] Zhitenev N B, Sidorenko A, Tennant D M, Cirelli R A 2007 *Nat. Nanotechnol.* **2** 237
- [27] Teoh K H, Lim C S, Liew C W, Ramesh S 2015 *Ionics* **21** 2061
- [28] Liew C W, Ramesh S, Ramesh K, Arof A K 2012 *J. Solid State Electrochem.* **16** 1869
- [29] Wee G, Larsson O, Srinivasan M, Berggren M, Crispin X, Mhaisalkar S 2010 *Adv. Funct. Mater.* **20** 4344
- [30] Guo L Q, Wen J, Cheng G G, Yuan N Y, Ding J N 2016 *Acta Phys. Sin.* **65** 178501 (in Chinese) [郭立强, 温娟, 程广贵, 袁宁一, 丁建宁 2016 物理学报 **65** 178501]
- [31] Zhao K S, Xuan R J, Han X, Zhang G M 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 197201 (in Chinese) [赵孔胜, 轩瑞杰, 韩笑, 张耕铭 2012 物理学报 **61** 197201]

Corn starch solid electrolyte gated proton/electron hybrid synaptic transistor*

Guo Li-Qiang¹⁾²⁾ Tao Jian^{1)†} Wen Juan¹⁾ Cheng Guang-Gui¹⁾
Yuan Ning-Yi¹⁾²⁾ Ding Jian-Ning¹⁾²⁾

1) (*Micro/Nano Science and Technology Center, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China*)

2) (*Jiangsu Collaborative Innovation Center of Photovoltaic Science and Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China*)

(Received 23 April 2017; revised manuscript received 16 May 2017)

Abstract

A human brain is a high-density neural network, which has $\sim 10^{11}$ neurons and $\sim 10^{15}$ synapses. Neuron as a basic information processing unit builds the biological neural network, and the realization of information transmission and integration depends on the synaptic connection between neurons. This information transfer and integration work is difficult to realize by relying on von Neumann computer, due to the computer only works according to the well-defined programs. To further simulate the imagery thinking of human brain neural network, the researchers begin with the information memory and processing mechanism of human brain neural network. A large number of microelectronic devices with human thinking characteristics are designed, such as memristor, atomic switch, phase change memory, and transistors. The oxide-based thin film transistor under the new material system is one of these devices, and has attracted the attention of researchers. The transistors working as the biological synapses, the gate electrode is regard as presynaptic input terminal, and the channel current is measured as postsynaptic output. Utilizing the proton gating behaviors, a series of synaptic behaviors, such as short-term and long-term memory, paired-pulse facilitation, and spike timing-dependent plasticity is mimicked successfully in these synaptic transistors.

With the progressing of science and technology, and the increasing of requirements for environmental protection, researchers pay more attention to the environmentally friendly solid electrolyte materials to fabricate oxide-based thin film synaptic transistor. Researchers have a major interest in starch, due to the low price, rich source, and excellent mechanical properties. Starch can be extracted from corn, potato, sweet potato and other starch-containing substances, and is generally insoluble in cold water, and gelatinized in boiling water. In this study, corn starch solid electrolyte is prepared on ITO glass by spin coating progress, and dried at a constant temperature at 30 °C. The electrical performances of protonic/electronic hybrid IZO synaptic transistor gated by corn starch solid electrolyte are excellent, operation voltage, $I_{\text{on/off}}$ ratio, field-effect mobility and subthreshold swing are 1.5 V, 1×10^7 , $18.7 \text{ cm}^2 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ and 156.8 mV/dec., respectively. Due to the mobile proton migrating in corn starch solid electrolyte, the paired-pulse facilitation, learning and memory behaviors and high-pass filter of biological neural synaptic plasticity are realized successfully. The synaptic transistors have potential applications in the field of environment-friendly microelectronic devices to reduce the production costs. Therefore, the corn starch solid electrolyte gated proton/electron hybrid synaptic transistor as an artificial synapse can offer a suitable option to building the neural network.

Keywords: corn starch solid electrolyte, paired-pulse facilitation, synaptic transistors, high-pass filter

PACS: 85.30.Tv, 77.55.D-, 73.61.-r

DOI: 10.7498/aps.66.168501

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51402321), the Major Cultivation Program of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 91648109), Postdoctoral Research Funding Plan of Jiangsu Province of China (Grant No. 1402071B) and Graduate Student Research and Innovation Program in Jiangsu Province of China (Grant No. SJLX16_0437).

† Corresponding author. E-mail: 2221603047@stmail.ujs.edu.cn