

**НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОМОРФНЫЕ
ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ**

УДК 621.315.592

**ПОЛИМЕРНЫЕ И ПЕРОВСКИТНЫЕ КОМПОЗИТНЫЕ
МЕМРИСТОРНЫЕ МАТЕРИАЛЫ И УСТРОЙСТВА
ДЛЯ НЕЙРОМОРФНЫХ ПРИЛОЖЕНИЙ**

© 2022 г. А. Н. Алешин^{1,*}

¹ Физико-технический институт им. А.Ф. Иоффе, Санкт-Петербург, Россия

*E-mail: aleshin@transport.ioffe.ru

Поступила в редакцию 29.06.2021 г.

После доработки 12.07.2021 г.

Принята к публикации 26.07.2021 г.

Синаптические материалы и устройства, имитирующие биологические синапсы, являются важными строительными блоками для нейроморфных вычислительных операций. Полимерные, перовскитные и композитные (органика–неорганика) оптоэлектронные синаптические устройства для нейроморфных операций на основе мемристорных структур рассмотрены в качестве электронных аналогов синапса в электронных сетях. Прогресс в области оптоэлектроники показал, что электрическое смещение и свет могут быть составными элементами синаптических устройств. С помощью таких оптоэлектронных синаптических устройств можно моделировать ряд важных биологических синаптических функций, таких как краткосрочная пластичность, долговременная пластичность, пластичность, зависящая от времени спайков и спайк-рейтинга. Моделирование синапсов возможно с помощью мемристорных устройств и материалов с эффектом резистивного переключения сопротивления под действием электрического поля и света. Описаны результаты исследований эффекта резистивного переключения в полимерных, металлоорганических перовскитных композитных (органика–неорганика) мемристорных материалах и устройствах на их основе. Показано, что включение в матрицы полимеров и металлоорганических перовскитов частиц графена и оксида графена приводит к эффекту переключения и памяти в таких мемристорных материалах и устройствах, что открывает возможности их использования в качестве оптоэлектронных синаптических устройств в нейроморфных операциях.

DOI: 10.56304/S1992722321060029

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в мире активно разрабатываются проекты, предполагающие развитие технологий нейроинтерфейсов (*brain-computer interface*), являющихся набором программно-аппаратных комплексов, позволяющих управлять внешними устройствами напрямую с помощью электрических сигналов мозга, которые трансформируются в команды управления благодаря технологиям искусственного интеллекта. Разрабатываются интерфейсы, обеспечивающие самостоятельное формирование целей, оценку ситуаций, прогнозирование их развития и принятие решений. Мировой рынок нейроинтерфейсов в 2019 г. составил \$1.2–1.3 млрд и до 2027 г. этот сегмент будет расти в среднем на 15% в год. США за 7 лет инвестировали в технологии “*brain-computer interface*” более \$1.2 млрд. (общий планируемый объем вложений – \$6 млрд.), на Китайский “*China Brain Project*” выделено финансирование не менее \$3 млрд. Все эти факты подтверждают

актуальность и важность рассматриваемого направления исследований.

Нейроморфные вычисления имеют большой потенциал при реализации энергосберегающих процессов самоадаптивного обучения и параллельных вычислений. При этом синаптические материалы и устройства, имитирующие биологические синапсы, являются важными строительными блоками для нейроморфных вычислительных операций [1, 2]. Полимерные, перовскитные и композитные (органика–неорганика) оптоэлектронные синаптические устройства для нейроморфных операций на основе мемристорных структур рассматриваются в качестве электронных аналогов синапса в электронных сетях. Большинство работ в этой области посвящено использованию мемристоров на основе неорганических материалов, что объясняется наличием существующих технологий производства таких устройств. Полимерные, перовскитные и композитные (органика–неорганика) мемристорные устройства представляют собой особый класс электронных



Рис. 1. Схема построения запоминающих устройств из полимерных и перовскитных композитных материалов, служащих базовой единицей для моделирования искусственных синапсов.

элементов для имитации свойств синапса и создания нейроморфных систем. Преимуществами органических и перовскитных материалов являются: низкая себестоимость производства, малый вес, низкое энергопотребление, возможность реализации гибких схем, а также их способность формировать 3D-сети методом самоорганизации. Прогресс в области оптоэлектроники показал, что электрическое смещение и свет могут быть составными элементами синаптических устройств. С помощью таких оптоэлектронных синаптических устройств можно моделировать ряд важных биологических синаптических функций, таких как краткосрочная пластичность, долговременная пластичность, пластичность, зависящая от времени спайков и спайк-рейтинга [3–5]. Большое внимание уделяется моделированию синапсов с помощью мемристорных устройств и органических материалов с эффектом резистивного переключения под действием электрического поля и света [4–8]. Резистивная память с произвольным доступом (Resistive random access memory – **RRAM**) является новой высокопроизводительной платформой для хранения данных и моделирования синапсов, так как такие устройства отличаются хорошей масштабируемостью, высокой скоростью работы и малой энергоемкостью [9]. В то же время механизм резистивного переключения как в неорганических, так и в органических ячейках RRAM до сих пор до конца не выяснен и является предметом интенсивных исследований [10]. Металлоорганические галогенидные перовскиты [11] совмещают в себе преимущества неор-

ганических и органических резистивных материалов, что делает их перспективными для применения в ячейках RRAM и синаптических устройствах [12–14]. На рис. 1 представлена схема построения запоминающих устройств (ячеек RRAM и полевых транзисторов) из полимерных и перовскитных композитных материалов; такое запоминающее устройство будет служить базовой единицей для моделирования искусственных синапсов. Ячейки RRAM на основе металлоорганических перовскитов были исследованы в [12, 13], где отмечались их стабильность и многоцветный характер операций запись–стирание. Оптоэлектронные мемристоры для нейроморфных операций на основе пленок металлоорганических перовскитов, работающие в импульсном режиме, были продемонстрированы в 2021 г. [14]. Однако мемристоры на основе композитных пленок – перовскит–частицы графена и оксида графена – не были исследованы до настоящего времени.

Целью настоящей работы является исследование эффектов резистивного переключения в полимерных и металлоорганических перовскитных композитных (органика–неорганика) мемристорных материалах и устройствах с точки зрения их использования в качестве оптоэлектронных синаптических устройств в нейроморфных операциях. Показано, что включение в матрицы полимеров и металлоорганических перовскитов частиц графена и оксида графена приводит к эффекту переключения и памяти в таких мемристорных материалах и устройствах.

МЕТОДЫ

В качестве материалов для изготовления полимерных и композитных ячеек RRAM, предназначенных для моделирования синапсов, выбраны растворимые в органических растворителях полифункциональные полимеры: poly(9vinylcarbazole) (**PVK** – $(C_{14}H_{11}N)_n$), молекулярная масса $M_w \sim 1.1 \times 10^6$, ширина запрещенной зоны $E_g \sim 3.6$ эВ; poly(9,9dindodecylfluorenyl2,7diyl) (**PFD** – $(C_{31}H_{44}B_2O_5)_n$, $M_w \sim 5.18 \times 10^2$, $E_g = 3.36$ эВ; polyvinylchloride (**PVC** – $(C_2H_3Cl)_n$, $M_w \sim 4 \times 10^4$ – 1.45×10^5 , $E_g = 4.86$ эВ; и их композиты с частицами графена (**Gr**) диаметром от 200 до 300 нм (высокотемпературный восстановленный графен (**HTRG**)) и частицами оксида графена (**GO**) диаметром от 400 до 500 нм. Концентрация частиц Gr и GO в матрице полимеров варьировалась в пределах 1–3 мас. %. Полимеры PVK, PFD и подложки ИТО/ПЭТ были приобретены в SigmaAldrich, PVC – ФГУП ВНИИСВ (г. Тверь), частицы Gr и GO (ООО АкКоЛаб (г. Москва)) использовались без дополнительной обработки.

Для приготовления ячеек RRAM на основе металлоорганических перовскитов использовали порошки металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3$ с $E_g \sim 2.3$ эВ и $CH_3NH_3PbI_3$ с $E_g \sim 1.55$ эВ (обозначаются как $MAPbBr_3$ и $MAPbI_3$ соответственно), приобретенные в Xi'an Polymer Light Technology Corp., применявшиеся без дополнительной обработки. В качестве второго компонента композитов были выбраны частицы GO (ООО АкКоЛаб). При изготовлении образцов сэндвич-структур для ячеек RRAM использовали стеклянные и полимерные (**PET**) подложки со слоем ИТО ($(In_2O_3)_{0.9}(SnO_2)_{0.1}$), водную дисперсию проводящего полимера (poly(3,4-ethylenedioxythiophene)-polystyrene sulfonate) (PEDOT:PSS) с массовой долей PEDOT:PSS = 0.013, а также производные фуллеренов: [6, 6]-Phenyl C_{61} butyric acid methyl ester, [60] PCBM, $(C_{72}H_{14}O_2)$, $M_w \sim 9.1 \times 10^2$ (все Sigma Aldrich). Порошки перовскитов и частицы Gr и GO соответственно растворяли и диспергировали в DMF (N,N-Dimethylformamide, C_3H_7NO) или DMA (N,N-Dimethylacetamide, C_4H_9NO). Полученные растворы смешивали в разных массовых пропорциях (например, 9.7:0.3), затем смеси диспергировали ультразвуком в течение 10 мин с помощью ультразвуковой мешалки Bandelin Sonopuls HD 2070 на частоте 20 кГц. Полученные растворы в объеме 20 мл наносили в виде пленок на стеклянные подложки с проводящими ИТО-электродами с помощью центрифугирования со скоростью 500–2000 об./мин. Далее образцы высушивали при температуре 100°C в течение 15 мин для удаления растворителя. На полученные образцы наносили пленки [60] PCBM (20 мл раствора [60] PCBM в

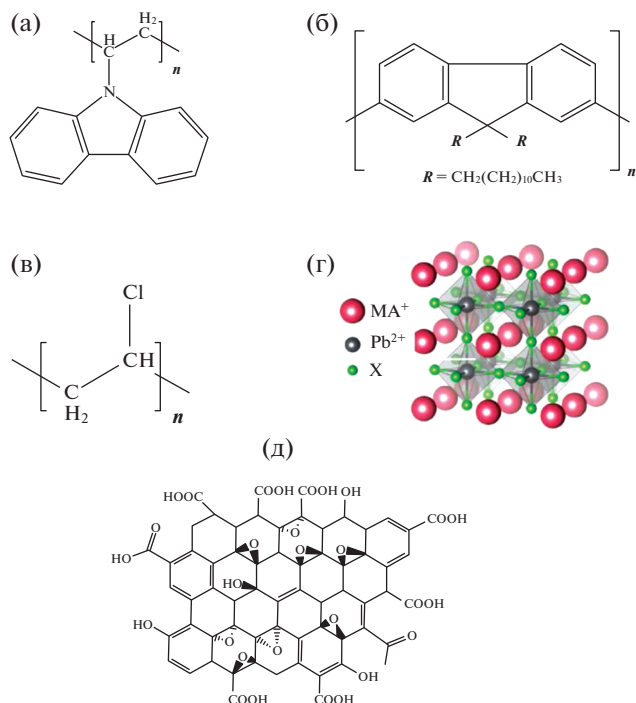


Рис. 2. Структуры молекул полимеров PVK (а), PFD (б), PVC (в), а также металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3(I_3)$ (г) и оксида графена (д).

хлороформе) по технологии, аналогичной технологии нанесения растворов перовскитов с частицами GO. Толщина рабочего слоя полученных ячеек RRAM составляла 300–400 нм. На рис. 2 показаны структуры молекул полимеров: PVK (а), PFD (б), PVC (в), а также металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3(I_3)$ (г) и оксида графена (д). На рис. 3 представлены структуры ячеек RRAM на основе Al/PVK:Gr(GO)/ITO/PET (а) и металлоорганических перовскитов MA^+PbX^- , где $MA^+ = CH_3NH_3$, $X^- = Br_3$ или I_3 (б).

Спектры поглощения композитных полимерных пленок с частицами Gr и GO, а также пленок металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3:GO$ и $CH_3NH_3PbI_3:GO$ со слоем [60] PCBM (толщина ~1 мкм), нанесенных на кварцевые подложки, исследовали на спектрометре Cary-50 (Varian) (190–1100 нм, спектральное разрешение – 0.1 нм). Вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) образцов измеряли в сэндвич-геометрии на постоянном токе и при подаче импульсного смещения по двухзондовой схеме при 290 К в темноте и при облучении имитатором солнечного света с использованием автоматизированной измерительной установки на основе пикоамперметра Keithley 6487. Напряжение на контактах сэндвич-структур варьировали в пределах от –1.5 до 1.5 В с переменным шагом. ВАХ композитных пленок в импульсном режиме измеряли при 300 К на установ-

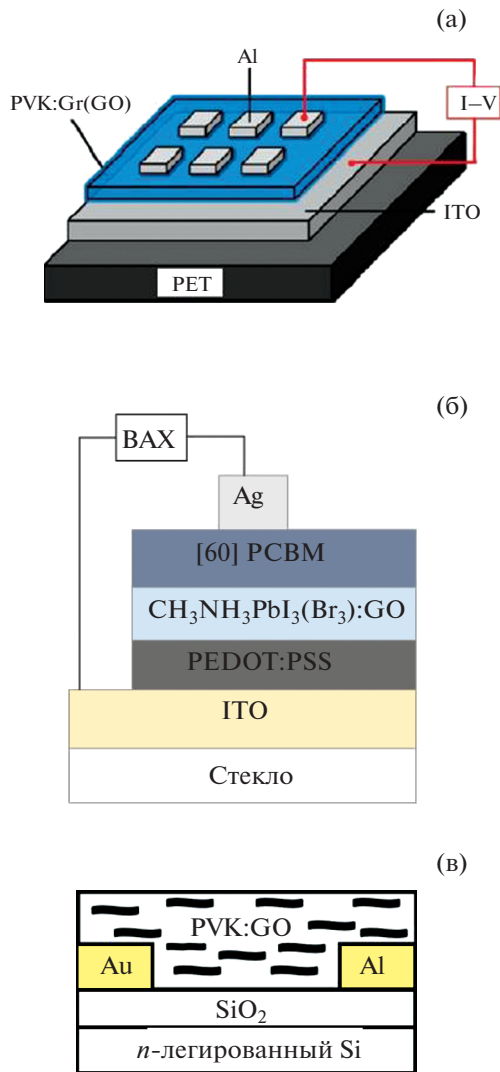


Рис. 3. Структуры ячеек RRAM на основе Al/PVK:Gr(GO)/ITO/PET (а) и металлоорганических перовскитов MA^+PbX^- , где $MA^+ = CH_3NH_3$, $X^- = Br_3$ или I_3 (б), а также полевого транзистора на основе PVK:GO (в).

ке с генератором тока PCG10A. При этом на образец и последовательно соединенное с ним сопротивление нагрузки с генератора подавали импульсное напряжение длительностью 2 мс треугольной формы, максимальное значение тока составило 100 мкА, период тактовой частоты — 4 мкс. В качестве нижнего электрода образцов выступал слой ITO, в качестве верхнего — золотой прижимной контакт площадью $S = 10^{-4}$ см². Измерение напряжения проводили с помощью двухканального осциллографа PS500. Контакты к электродам при измерении BAX на постоянном токе выполняли серебряной проволокой с использованием углеродной и серебряной паст (SPI).

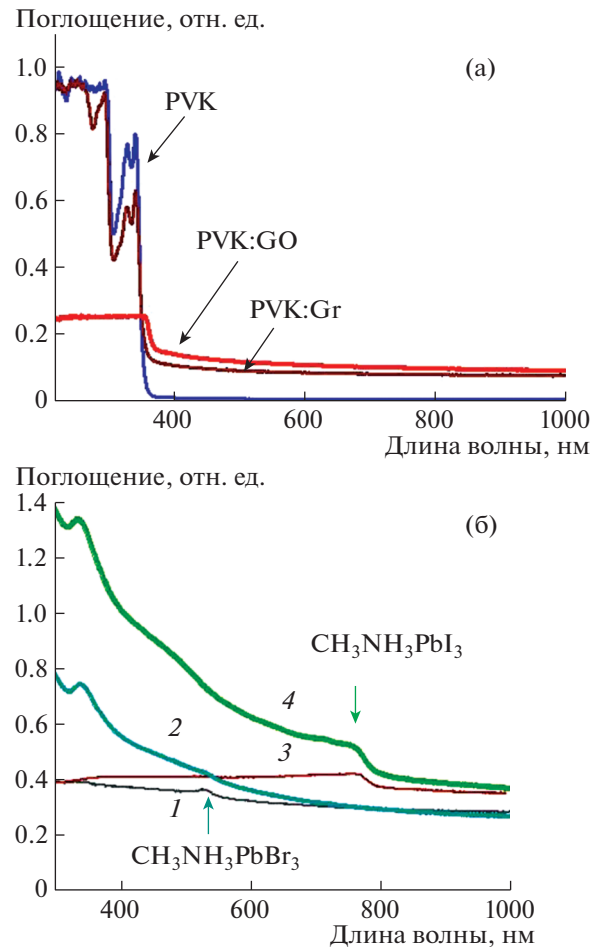


Рис. 4. Спектры поглощения пленок PVK, PVK:Gr, PVK:GO (GO и Gr ~ 2–3 мас. %) (а); спектры поглощения пленок металлоорганических перовскитов $CH_3NH_3PbBr_3$ (1) и $CH_3NH_3PbI_3$ (3) и этих же пленок со слоем [60] PCBM (2, 4 соответственно) (б). Стрелки показывают край поглощения исследованных металлоорганических перовскитов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты исследований спектров поглощения пленок PVK, PVK:Gr, PVK:GO показаны на рис. 4а. Из приведенных данных видно, что край поглощения чистого PVK-полимера лежит в спектральной области ~350 нм. Внедрение частиц Gr и GO при их концентрации ~2–3 мас. % приводит к уменьшению интенсивности поглощения на 20 и 40% соответственно в диапазоне 350–380 нм, а также к появлению “хвостов” спектров поглощения в спектральном диапазоне выше 380–1100 нм. Такой характер спектров поглощения аналогичен поглощению в композитных пленках на основе других полимерных полупроводников с частицами Gr и GO.

На рис. 4б показаны спектры поглощения пленок металлоорганических перовскитов

$\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ (кривые 1 и 3 соответственно), а также спектры поглощения этих пленок, покрытых слоем [60] PCBM (кривые 2 и 4 соответственно) на кварцевых подложках. Стрелки показывают край поглощения исследованных металлоорганических перовскитов. Как видно из рис. 4б, край поглощения металлоорганического перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ находится в спектральной области ~ 540 нм ($E_g \sim 2.3$ эВ), а $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ — в спектральной области ~ 800 нм ($E_g \sim 1.55$ эВ). Как следует из рис. 4б, нанесение слоя [60] PCBM на пленки металлоорганических перовскитов приводит к значительному увеличению поглощения в таких структурах (кривые 2 и 4), что широко используется при изготовлении как полимерных, так и перовскитных солнечных элементов.

Композитные пленки, описанные выше, были применены для исследования энергонезависимого эффекта **WORM** (write once read many) — памяти, при этом полимеры PVK, PFD и PVC использовались в качестве матриц для частиц Gr и GO, являющихся ловушками для носителей заряда. Экспериментальные ВАХ таких структур приведены на рис. 5а. Как видно из рис. 5а–5в, эффект памяти для структур вида Al/PVK(PFD):GO(Gr)/ITO/PET заключается в переключении проводимости композитной пленки из низко- в высокопроводящее состояние при подаче смещения ~ 0.1 – 0.2 В на Al-ITO-электроды, что соответствует напряженности электрического поля $E \sim 3$ – 4×10^4 В/см. При этом, как видно из представленных результатов, ВАХ образцов следуют линейному (омическому) закону как в исходном, так и в конечном состоянии, а отношение конечного и начального тока через образец (j_2/j_1) варьировалось в пределах ~ 2 – 200 . Аналогичные результаты были получены для ряда других образцов композитных пленок PVK:Gr, PVK:GO, PFD:Gr, PVC:GO с содержанием Gr и GO в пределах 1–3 мас. % [15, 16]. Отметим, что величины напряжений переключения в структурах вида Al/PVK(PFD):GO(Gr)/ITO/PET оказались значительно ниже пороговых напряжений для композитов полимер–неорганические наночастицы и полимер–графен, известных из литературы. Для всех исследованных в настоящей работе образцов при эффекте переключения наблюдается резкое, на 1–2 порядка, увеличение тока через структуру, что указывает на переход из состояния “выключено” в состояние “включено” (процесс “записи”). Образец остается во “включенном” состоянии и при обратном направлении сканирования по напряжению, а также при многократном сканировании как при положительном, так и при отрицательном смещении на электродах. В ряде случаев наблюдался эффект обратного переключения пленок Al/PVK:GO(Gr)/ITO/PET в относительно низкопроводящее состояние.

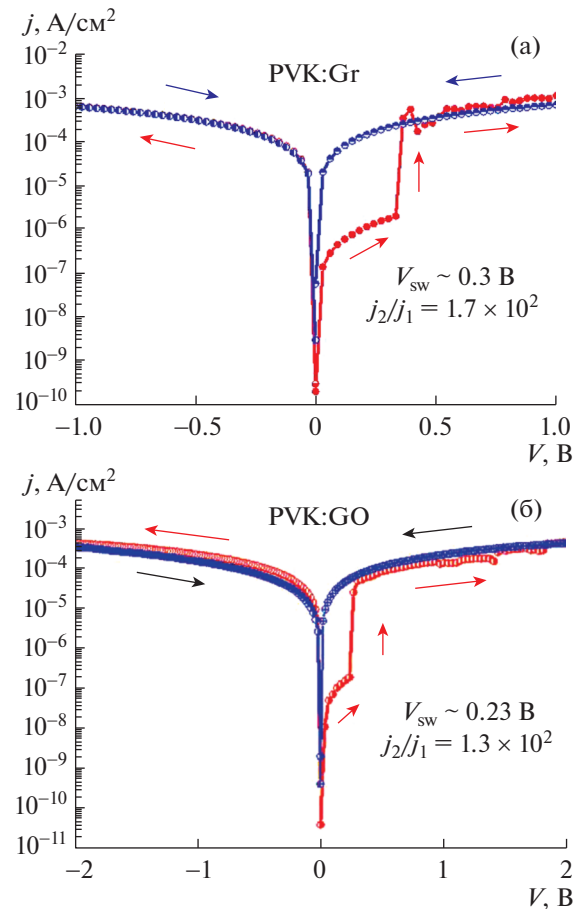


Рис. 5. ВАХ композитных пленок: Al/PVK:Gr/ITO/PET, Al/PVK:GO/ITO/PET, (а, б, в), пленок Ag/[60] PCBM/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$:GO/PEDOT:PSS/ITO/glass в темноте (г, д) и Ag/[60] PCBM/ $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:GO/PEDOT:PSS/ITO/glass при освещении имитатором солнечного света (е, ж, з) с эффектами резистивного переключения.

Аналогичное поведение ВАХ наблюдалось в пленках металлоорганических перовскитов с частицами GO: $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$ (I_3):GO в темноте (рис. 5г, 5д) и при освещении имитатором солнечного света (рис. 5е–5з). Как видно из этих результатов, в обоих типах образцов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$:GO и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$:GO наблюдается эффект переключения из низкопроводящего в относительно высокопроводящее состояние при подаче как положительного, так и отрицательного смещения ~ 0.1 – 1.0 В на Ag- и ITO-электроды, что соответствует напряженности электрического поля $E \sim 10^5$ – 10^6 В/см как в темноте, так и при освещении имитатором солнечного света. Наиболее отчетливо переключение тока наблюдалось в пленках $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$:GO при приложении смещения ~ 0.2 В (рис. 5г). При этом, как видно из рис. 5д, ВАХ образцов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$:GO следуют

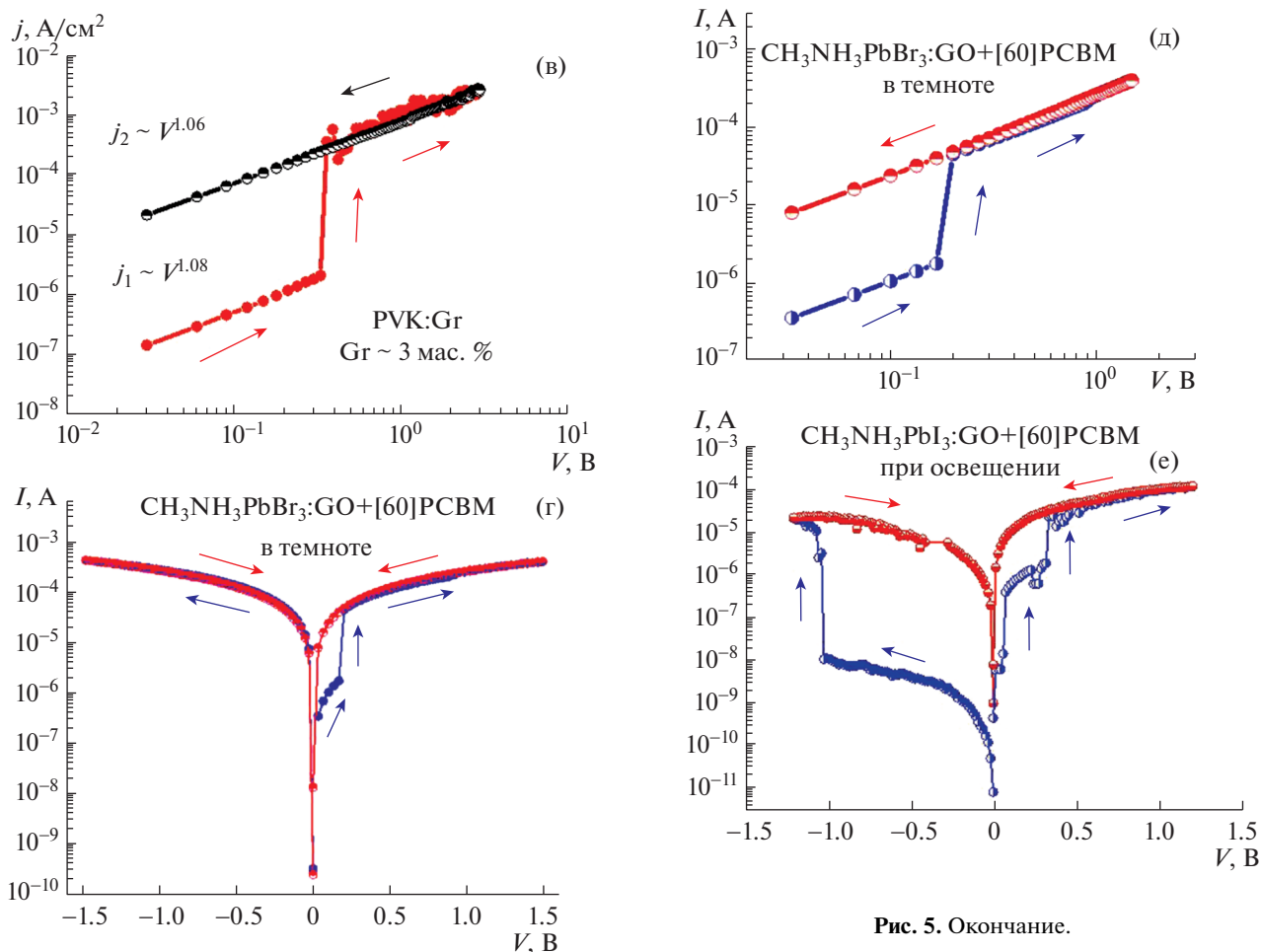


Рис. 5. Окончание.

линейному (омическому) закону как в исходном, так и в конечном состоянии, а отношение токов через эти образцы до и после переключения достигает $\sim 10^2$. Большинство образцов $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$ оставалось во “включенном” состоянии и при обратном направлении сканирования по напряжению, а также при многократном сканировании как при положительном, так и при отрицательном смещении на электродах без существенного гистерезиса ВАХ, что указывает на тип переключения, характерный для односторонней RRAM – WORM-памяти. Аналогичные результаты были получены и для других образцов композитных пленок $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(\text{I}_3):\text{GO}$ с содержанием GO в пределах 1–3 мас. %. Отметим, что многократный эффект переключения в пленках металлоорганических перовскитов наблюдался как на постоянном токе [13], так и в импульсном режиме [14], при этом отмечались хорошая стабильность на воздухе и повторяемость результатов. В настоящее время нами также проводятся исследования многократного эффекта переключе-

ния в мемристорных устройствах на основе композитов металлоорганических перовскитов с частицами GO, что позволяет достигать многократной записи информации в таких структурах. Эффект переключения в пленках $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3:\text{GO}$ во многом напоминает характер переключения в композитных пленках полимеров (PVK, PFD и PVC) с частицами оксида графена, исследованных в [15]. Что касается композитных пленок на основе другого, более узкозонного металлоорганического перовскита и частиц GO ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$), то в таких структурах эффект переключения также наблюдался в темноте. Однако, как видно из рис. 5e–5з, при освещении имитатором солнечного света ВАХ пленок $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$ демонстрируют ярко выраженный эффект фотоиндуцированного переключения с отношением токов $\sim 3 \times 10^3$ при обратном смещении и эффект каскадного переключения при прямом смещении. Наблюдаемые различия в характере эффекта переключения могут быть связаны с меньшей шириной запрещенной зоны металлоорганического перовскита $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3$ по сравнению с $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3$, что приводит к большей фоточувствительности и к эффекту фотоиндуцированно-

Рис. 5. Окончание.

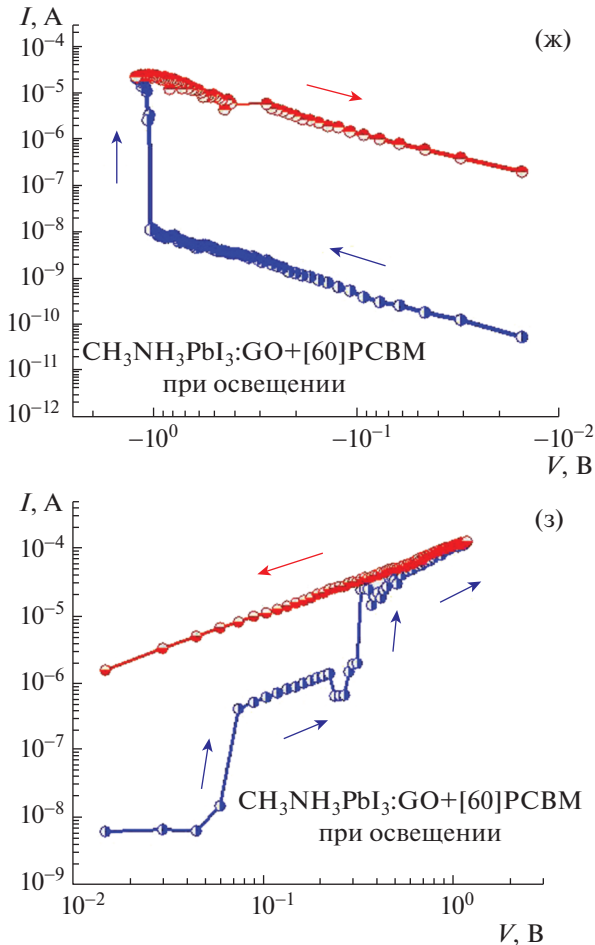


Рис. 5. Окончание.

го переключения в таких пленках. В ряде исследованных образцов также наблюдался эффект обратного переключения пленок $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbI}_3:\text{GO}$ в относительно низкопроводящее состояние.

Как известно, возбуждение синапсов, как и их моделирование мемристорными устройствами, носит импульсный характер. В этой связи интересным представляется понимание реакции описанных выше композитных пленок на импульсное возбуждение. На рис. 6 показаны ВАХ композитных пленок $\text{Au}/\text{PVK}:\text{Gr}/\text{ITO}/\text{PET}$, $\text{Au}/\text{PFD}:\text{Gr}/\text{ITO}/\text{PET}$ (вставка на рис. 6) при подаче треугольного импульсного напряжения на ИТО- Au -электроды [16]. Как видно из рис. 6, для всех исследованных образцов ВАХ при увеличении напряжения имеют S -образный вид. Переход из низко- в высокопроводящее состояние происходит при пороговых напряжениях V_T , различающихся по величине для различных типов полимерных пленок, при этом во всех случаях наблюдается резкое падение напряжения на образцах без существенного изменения протекающего через них тока, что может быть связано с эффектом

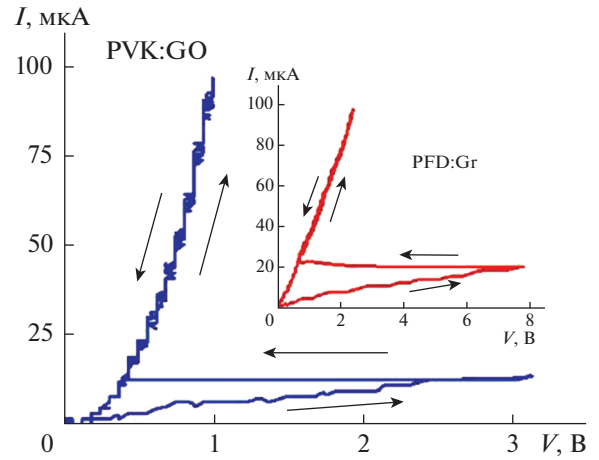


Рис. 6. ВАХ композитных пленок $\text{Au}/\text{PVK}:\text{Gr}/\text{ITO}/\text{PET}$. На вставке: $\text{Au}/\text{PFD}:\text{Gr}/\text{ITO}/\text{PET}$ при подаче треугольного импульса на ИТО- Au -электроды.

шнурования тока. Пороговые напряжения переключения V_T составляют $\sim 3\text{--}3.5$, $\sim 7\text{--}8$ и $\sim 15\text{--}16$ В для композитных пленок $\text{PVK}:\text{Gr}$, $\text{PFD}:\text{Gr}$ и $\text{PVC}:\text{GO}$ соответственно. Сопротивление пленок после переключения меняется на порядок (т.е. в низкопроводящем состоянии $\sim 200\text{--}500$ кОм, а в высокопроводящем состоянии $\sim 20\text{--}40$ кОм). При уменьшении напряжения образцы, как правило, не возвращаются в низкопроводящее состояние, а остаются в состоянии с высокой проводимостью. Как видно из рис. 6, ВАХ пленки $\text{PVK}:\text{Gr}$, находящейся в высокопроводящем состоянии, имеет сверхлинейную зависимость в отличие от пленок $\text{PFD}:\text{Gr}$ и $\text{PVC}:\text{GO}$, где наблюдаются линейные ВАХ. Изменения тока при переключении составляют ~ 0.2 мкА для образца $\text{PFD}:\text{Gr}$ и ~ 5 мкА для образца $\text{PVC}:\text{GO}$, в то время как для пленки $\text{PVK}:\text{Gr}$ изменение тока равно нулю. Наблюдаемые различия связаны с различными временами переключения образцов, которые составляют ~ 20 , ~ 30 и ~ 4 мкс для пленок $\text{PFD}:\text{Gr}$, $\text{PVC}:\text{GO}$ и $\text{PVK}:\text{Gr}$ соответственно. Время переключения пленки $\text{PVK}:\text{Gr}$ при периоде тактовой частоты счетчика 1 мкс составило ~ 1 мкс, что совпадает с выбранным периодом тактовой частоты счетчика. Повторная подача импульсов той же или обратной полярности на образцы не приводит к обратному переключению в низкопроводящее состояние, поэтому в исследованных композитных пленках наблюдается эффект одноразовой WORM -памяти.

Неустойчивости с S -образной ВАХ, наблюдаемые в пленках $\text{PVK}:\text{Gr}$ и др., напоминают по своим характеристикам эффекты переключения, которые наблюдаются в халькогенидных стеклообразных полупроводниках (ХСП) [17]. Согласно модели [18] в случае ХСП эффект неустойчивости

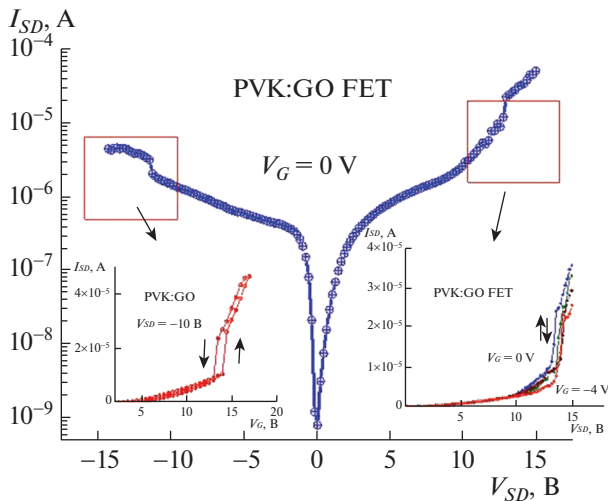


Рис. 7. Эффект переключения в ВАХ полевого транзистора на основе PVK:GO при $V_G = 0$ В. Вставка 1 – гистерезис ВАХ полевого транзистора на основе PVK:GO при $V_G = 0$ В; вставка 2 – I_{SD} от V_{SD} при различных значениях V_G при $V_{SD} > 10$ В.

тока обусловлен электронно-тепловыми явлениями, протекающими в пленке в сильных электрических полях. При этом для возникновения неустойчивости с S-образной ВАХ необходима положительная обратная связь, которая устанавливается между процессами нагрева и увеличения тока в материале с активационной температурной зависимостью.

Эффекты переключения, аналогичные описанным выше эффектам переключения в сэндвич-структурах, наблюдались в полевых транзисторных структурах на основе PVK:GO в планарной геометрии (рис. 3в, 7) [19], а также в полевых транзисторных структурах на основе металлоорганических перовскитов с частицами GO ($\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3\text{:GO}$) и в транзисторах на основе неорганических перовскитных нанокристаллов CsPbI_3 . Как следует из рис. 7, результаты, полученные для таких структур, воспроизводимы и обратимы по напряжению, что позволяет реализовывать имитацию синапсов такими ячейками на основе композитных полевых транзисторных структур.

В дополнение к ВАХ на постоянном и импульсном токе были исследованы циклические ВАХ пленок PVK:Gr(GO) [20]. Установлено, что потенциал окислительно-восстановительного перехода Gr/(GO) соответствует интервалу напряжений, при которых происходит процесс переключения в композиционных PVK:Gr(GO)/ITO/PET-пленках с эффектом резистивного переключения (рис. 8а). При этом для чистого полимера PVK (без Gr и GO) таких особенностей ВАХ не наблю-

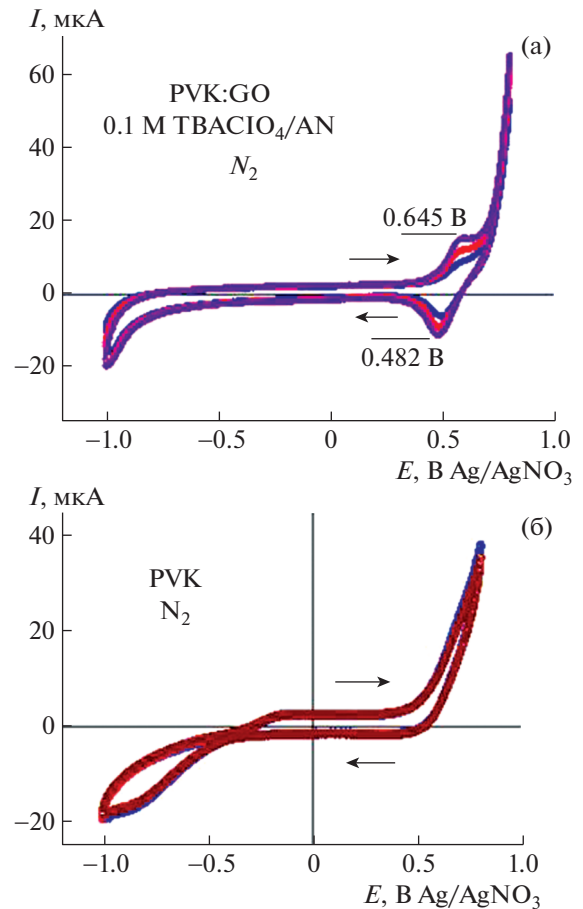


Рис. 8. Циклические ВАХ PVK:GO/ITO/PET в растворе 0.1 М TBAClO₄/AN в атмосфере N₂ при скорости сканирования 50 мВ/с (а); для PVK/ITO/PET в растворе 0.1 М TBAClO₄/AN в атмосфере N₂ (б).

дается (рис. 8б). Это дает основание полагать, что возможный механизм резистивного переключения в исследованных композитных пленках связан именно с окислительно-восстановительными процессами в PVK:Gr(GO), а также с процессами захвата и накопления носителей заряда в частицах Gr(GO), введенных в матрицу полимера PVK. Можно предположить, что этот вывод справедлив и для композитных пленок полупроводниковых полимеров с другими оксидными материалами, например с ZnO.

По-видимому, моделирование синапсов возможно также с использованием фото- и светоизлучающих полевых транзисторов на основе композитных пленок полимеров, перовскитов и наночастиц оксидных материалов (GO, ZnO, CsPbBr₃) [21, 22]. Такие структуры перспективны для моделирования и передачи синаптических сигналов в искусственных нейронных сетях путем трансформации электрических импульсов в оптические и обратно, как было показано в [22]

на примере светоизлучающих полевых транзисторов на основе полимерной матрицы МЕН-PPV с внедренными в нее наночастицами неорганического перовскита CsPbBr_3 (рис. 9). Таким образом, в настоящее время исследование оптоэлектронных синаптических устройств на основе полимерных и перовскитных композитных мемристорных материалов является актуальным и бурно развивающимся направлением.

ОБСУЖДЕНИЕ

Для того чтобы имитировать синаптическую пластичность биологической нервной системы, в идеале синаптическая электроника малого и сверхмалого размера необходима в качестве основного компонента нейроморфных вычислительных систем [1–6]. При этом важнейшей задачей является исследование систем биологической памяти, а также моделирование ее структуры. Нейронная нейроморфная сеть состоит из массива взаимосвязанных пре-нейронов и пост-нейронов, а синаптическая пластичность, вызванная химической передачей сигнала, связана с разнообразием пост-нейронов и пре-нейронов (рис. 10). Химический синапс, состоящий из аксонов, синаптических пространств и дендритов, является функциональным соединителем, который позволяет нейронам передавать нейросигналы соседним нейронам. Синаптическая пластичность является решающим фактором для обретения и функционирования памяти, а также способности к самообучению. По длительности синаптическую пластичность можно разделить на кратковременную (кратковременное усиление и кратковременное торможение) и долговременную (длительное усиление и длительное торможение). Постоянное изменение силы синаптических связей играет жизненно важную роль в консолидации формирования прочной памяти. Создание и развитие искусственных синаптических устройств на основе RRAM имитируют зависимость от активности долговременную контролируемую синаптическую пластичность, что открывает путь к расширенному обмену информации, который будет способствовать дальнейшему развитию высокоинтегрированных маломощных запоминающих устройств. Основная особенность искусственных синаптических материалов – это реализация функций энергонезависимой памяти, включая многоуровневое хранение данных. Как показано в [19–22], с помощью оптоэлектронных синаптических устройств возможно моделирование ряда важных биологических синаптических функций, таких как краткосрочная пластичность, долговременная пластичность, пластичность, зависящая от времени спайков и спайк-рейтинга. Была продемонстрирована возможность моделирования синапсов с помощью мате-

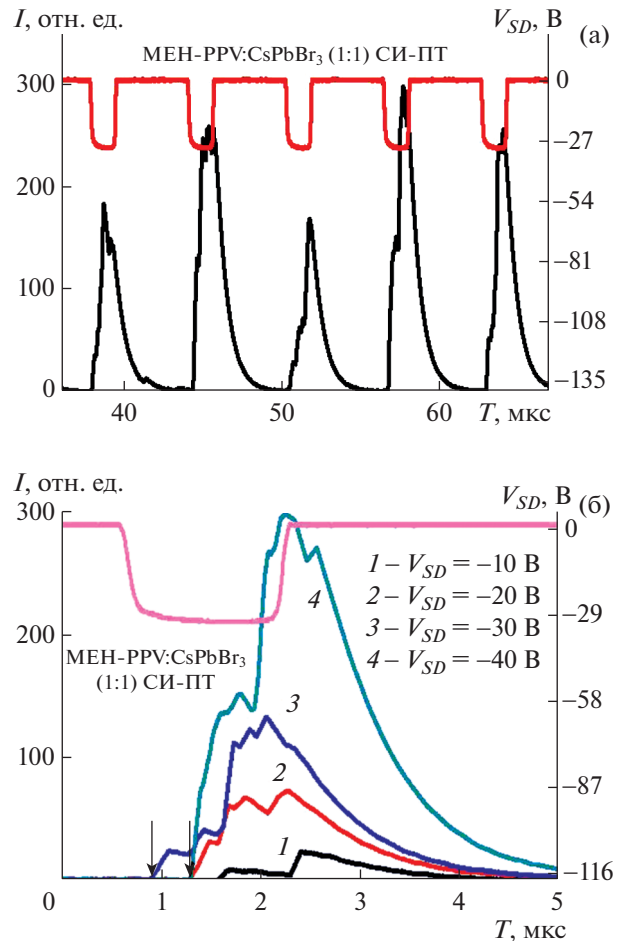


Рис. 9. Зависимость импульсной электролюминесценции от импульсного напряжения для полевого светоизлучающего транзистора на основе МЕН-PPV: CsPbBr_3 НК (1:1) при $f = 1000$ Гц при амплитуде импульсов $V_{SD} = -30$ В и длительности импульсов ~ 2 мкс (а); кинетика электролюминесценции для того же транзистора на основе МЕН-PPV: CsPbBr_3 НК (1:1) композитной пленки при различных напряжениях V_{SD} , В: 1 – -10 , 2 – -20 , 3 – -25 , 4 – -30 (б).

риалов с эффектом резистивного переключения под действием электрического поля и света и мемристорных устройств на их основе. Несмотря на многообразие моделей, описывающих механизм резистивного переключения как в неорганических, так и в органических мемристорных структурах [10], этот механизм в исследованных композитных пленках $\text{PVK}:\text{Gr}(\text{GO})$ и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(\text{I}_3):\text{GO}$, вероятно, связан с окислительно-восстановительными процессами, захватом и накоплением носителей заряда в частицах $\text{Gr}(\text{GO})$, введенных в матрицу полимера PVK [21] или металлоорганического перовскита. Результаты исследований эффектов резистивного переключения в полимерных и металлоорганических перовскитных композитных (полимер–частицы Gr и GO, ме-

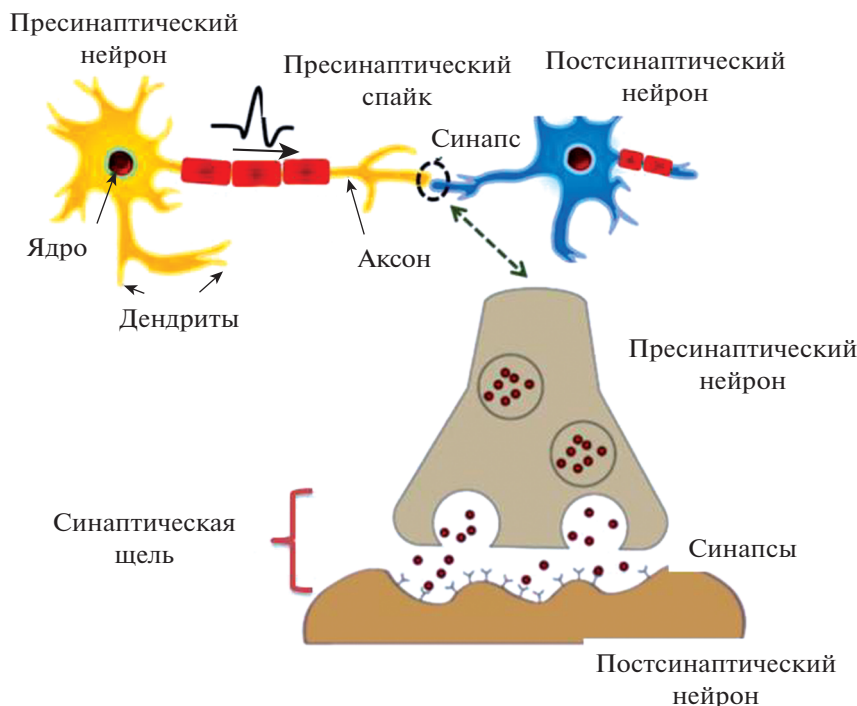


Рис. 10. Схема регулирования синаптической пластичности от пресинаптических нейронов к постсинаптическим нейронам.

таллоорганический перовскит—частицы GO) мемристормых материалах и устройствах на их основе открывают перспективы их использования в качестве оптоэлектронных синаптических устройств в нейроморфных операциях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследованы эффекты резистивного переключения в полимерных и металлоорганических перовскитных композитных (органика—неорганика) мемристормых материалах — пленках PVK (PFD, PVC):GO (Gr) и $\text{CH}_3\text{NH}_3\text{PbBr}_3(\text{I}_3):\text{GO}$. Показано, что включение в матрицы полимеров и металлоорганических перовскитов частиц графена и оксида графена приводит к эффекту переключения и памяти в таких мемристормых материалах и устройствах. Полученные результаты демонстрируют возможности использования таких материалов для создания энергонезависимых ячеек RRAM, а также оптоэлектронных синаптических устройств с электрическим и оптическим стимулированием для осуществления нейроморфных операций. Разработка и исследование свойств таких мемристормых материалов и устройств позволят реализовать крупномасштабное развертывание нейроморфных вычислительных операций в рамках искусственных нейронных сетей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kendall J.D., Kumar S. // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. P. 011305. <https://doi.org/10.1063/1.5129306>
2. Park J. // Electronics. 2020. V. 9. P. 1414. <https://doi.org/10.3390/electronics9091414>
3. Zhao Y., Dai S., Liu D. et al. // Org. Electron. 2020. V. 83. P. 105749. <https://doi.org/10.1016/j.orgel.2020.105749>
4. Zhang H.-T., Panda P., Lin J. et al. // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. P. 011309. <https://doi.org/10.1063/1.5113574>
5. Chakraborty I., Jaiswal A., Saha A.K. et al. // Appl. Phys. Rev. 2020. V. 7. P. 021308. <https://doi.org/10.1063/1.5113536>
6. Xing X., Chen M., Gong Y. et al. // Sci. Technol. Adv. Mater. 2020. V. 21. P. 101. <https://doi.org/10.1080/14686996.2020.1725395>
7. Lapkin D.A., Emelyanov A.V., Demin V.A. et al. // Microelectron. Eng. 2018. V. 185–186. P. 43. <https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.10.017>
8. Erokhin V. // Encyclopedia of Complexity and Systems Science / Ed. Meyers R.A. Springer, 2017. https://doi.org/10.1007/978-3-642-27737-5_703-1
9. Xu X.-X., Luo Q., Gong T.C. et al. // Chin. Phys. B. 2021. V. 30. P. 058702. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/abe0c4>
10. Yang R. // Chin. Phys. B. 2020. V. 29. P. 097305. <https://doi.org/10.1088/1674-1056/aba9c7>

11. *Eames C., Frost J.M., Barnes P.R.F. et al.* // Nature Commun. 2015. V. 6. P. 7497.
<https://doi.org/10.1038/ncomms8497>
12. *Hwang B., Lee J.-S.* // Sci. Rep. 2017. V. 7. P. 673.
<https://doi.org/10.1038/s41598-017-00778-5>
13. *Wu X., Yu H., Cao J.* // AIP Adv. 2020. V. 10. P. 085202.
<https://doi.org/10.1063/1.5130914>
14. *Das U., Sarkar P., Paul B. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2021. V. 118. P. 182103.
<https://doi.org/10.1063/5.0049161>
15. *Крылов П.С., Берестенников А.С., Алешин А.Н. и др.* // ФТТ. 2015. Вып. 57. С. 1639.
<https://doi.org/10.1134/S1063783415080168>
16. *Крылов П.С., Берестенников А.С., Фефелов С.А. и др.* // ФТТ. 2016. Вып. 58. С. 2476.
<https://doi.org/10.1134/S1063783416120155>
17. *Ovshinsky S.R.* // Phys. Rev. Lett. 1968. V. 21. P. 1450.
18. *Цэндин К.Д., Лебедев Э.А., Шмелькин А.Б.* // ФТТ. 2005. Т. 47. С. 427.
19. *Aleshin A.N., Shcherbakov I.P., Komolov A.S. et al.* // Org. Electron. 2015. V. 16. P. 186.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2014.11.006>
20. *Aleshin A.N., Krylov P.S., Berestennikov A.S. et al.* // Synth. Met. 2016. V. 217. P. 7.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2016.03.011>
21. *Aleshin A.N., Shcherbakov I.P., Gushchina E.V. et al.* // Org. Electron. 2017. V. 50. P. 213.
<https://doi.org/10.1016/j.orgel.2017.08.004>
22. *Aleshin A.N., Shcherbakov I.P., Chikalova-Luzina O.P. et al.* // Synth. Met. 2020. V. 260. P. 116291.
<https://doi.org/10.1016/j.synthmet.2020.116291>