CC BY

http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-47-53

УДК 539.216.2:546.24

МНОГОСЛОЙНЫЕ ЭЛЕМЕНТЫ ПАМЯТИ Al-Al_2Te_3-SnTe-TeO_2-SnTe-Me

Е. Ф. ТРОЯН[1], А. Г. СМИРНОВ[1], А. А. СТЕПАНОВ[1], С. Ю. ХАРЬКОВ[1], Е. Ю. КОРОЛЕВА[2], А. В. ФИЛИМОНОВ[3]

[1]Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (Минск, Республика Беларусь)
[2]Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе (Санкт-Петербург, Российская Федерация)
[3]Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого (Санкт-Петербург, Российская Федерация)

Аннотация. В статье представлено исследование физических процессов на границе раздела в тонкопленочных структурах на основе двух- и трехкомпонентных халькогенидов, определяющих механизмы фазовых переходов и памяти. Предложена альтернативная концепция резистивного порогового переключения на границах раздела двух- и трехкомпонентных халькогенидных полупроводниковых материалов с формированием метастабильных дихалькогенидных соединений. Рассмотрены методы структурной стабилизации таких соединений.

Ключевые слова: тонкие пленки, халькогенидные соединения, эффекты переключения и памяти, дихалькогениды переходных металлов.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Многослойные элементы памяти Al-Al_2Te_3-SnTe-TeO_2-SnTe-Me / Е. Ф. Троян [и др.] // Доклады БГУИР. 2026. Т. 24, № 4. С. 47–53. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-47-53.

MULTILAYER MEMORY ELEMENTS Al-Al_2Te_3-SnTe-TeO_2-SnTe-Me

YEVGENY TROYAN[1], ALECSANDR SMIRNOV[1], ANDREI STEPANOV[1], SERGEI KHARKOV[1], ELENA KOROLEVA[2], ALECSEI FILIMONOV[3]

[1]Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)
[2]A. F. Ioffe Physical-Technical Institute (Saint Petersburg, Russian Federation)
[3]Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University (Saint Petersburg, Russian Federation)

Abstract. This article presents a study of the physical processes at the interface in thin-film structures based on two- and three-component chalcogenides, which determine the mechanisms of phase transitions and memory. An alternative concept for resistive threshold switching at the interfaces of two- and three-component chalcogenide semiconductor materials is proposed, resulting in the formation of metastable dichalcogenide compounds. Methods for the structural stabilization of such compounds are discussed.

Keywords: thin films, chalcogenide compounds, switching and memory effects, transition metal dichalcogenides.

Conflict of interests. The authors declare that there is no conflict of interests.

For citation. Troyan Ye., Smirnov A., Stepanov A., Kharkov S., Koroleva E., Filimonov A. (2026) Multilayer Memory Elements Al-Al_2Te_3-SnTe-TeO_2-SnTe-Me. *Doklady BGUIR*. 24 (4), 47–53. http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2026-24-4-47-53 (in Russian).

Введение

Анализ исследований в области мемристорных структур показывает, что классические механизмы резистивного переключения, основанные на электроформировании проводящих участков или на фазовых переходах между аморфным и кристаллическим состояниями, достигли пределов своих технологических возможностей с точки зрения энергопотребления, масштабирования и стабильности характеристик. В связи с этим актуальной научно-технической задачей является поиск альтернативных механизмов переключения, которые могли бы обеспечить рекордные времена записи/стирания информации, низкие пороговые напряжения и длительное время хранения данных.

Материалы с изменением фазы (phase change materials, PCM) используются в PC-RAM, начиная с 2017 г. [1]. Несмотря на интенсивные исследования кристаллической структуры и химического состава PCM, научные взгляды ученых на природу механизмов резистивного переключения в этих соединениях во многом не схожи.

PCM-материалы представляют собой аморфные халькогенидные стекла на основе теллура [1], которые переключаются из состояния с высоким сопротивлением (ВЫКЛ, или OFF-state) в состояние с низким сопротивлением (ВКЛ, или ON-state) при высоком электрическом пороговом напряжении $U_{пор}$. Этот эффект резистивного переключения подразделяется на два типа: пороговое переключение (i) и переключение с памятью (ii). Устройство, где наблюдается пороговое переключение, возвращается в выключенное состояние сразу после снятия приложенного напряжения, тогда как запоминающее устройство сохраняет включенное состояние даже после снятия приложенного напряжения. Например, при подаче внешнего напряжения $U \geq U_{пор}$ в аморфных тонкопленочных халькогенидных полупроводниках SiTeAsGe (STAG) наблюдается скачкообразное уменьшение сопротивления (ON-state). Если $U \leq U_{уд}$ (где $U_{уд}$ – напряжение удержания элемента в низкоомном состоянии, ON-state), то образец скачкообразно возвращается в исходное состояние с высоким сопротивлением (OFF-state). В таких аморфных тонкопленочных халькогенидных полупроводниках, как GeTeSb (GTS) [1], наблюдается ситуация, где низкоомное состояние ON-state сохраняется при отсутствии внешнего напряжения, а скачкообразный переход в высокоомное состояние OFF-state происходит при подаче достаточно большого импульса тока ($I \geq I_{пор}$).

Согласно [1], из-за высоких электрических полей между электродами формируется хорошо проводящий канал проводимости – так называемый шнур проводимости. Высокие электрические поля приводят к большим токам, которые, в свою очередь, повышают температуру внутри нити. Поэтому эффекты памяти в GTS обычно объясняют тепловыми процессами, т. е. связывают с плавлением и кристаллизацией аморфного состояния, тогда как эффекты переключения в STAG – с различными электронными моделями, например, пространственными зарядами, эффектом Пула – Френкеля и т. д. Следует отметить, что существующие модели не объясняют факт одновременного наблюдения эффектов памяти и переключения в одинаковых по составу аморфных халькогенидных соединениях и зависимости наблюдаемых резистивных эффектов от полярности приложенного напряжения [2, 3].

В [2] отмечается, что эффекты переключения и памяти, наблюдаемые как в аморфных PCM типов GTS и STAG, так и на интерфейсах других устройств резистивного переключения (например, i-PCM, Al-Al_2O_3-Te и т. д.) [4], имеют общую мемристорную природу, т. е. связаны с процессами электромиграции ионов основных компонентов PCM, что приводит к формированию локальных областей 2D-дихалькогенидов, образующих шнур проводимости. Например, эффект памяти в халькогенидных пленках GTS и i-PCM связан с электромиграцией под действием внешнего электрического поля катионов Ge^+ и Sb^+ с формированием локальных областей 2D-дихалькогенидов $GeTe_2$ и $SbTe_2$, а эффект порогового переключения в пленках теллура (Te) с примесями алюминия (Al) и кислорода (O_2) также обусловлен процессами электромиграции ионов алюминия Al^+ с образованием либо на поверхности Te, либо на границе раздела Al-Al_2O_3-Te метастабильных высокопроводящих полуметаллических кластеров 2D-дихалькогенидов $AlTe_2$ с метавалентными направленными связями (bond alignment) [4]. Дихалькогениды $SbTe_2$ и $AlTe_2$ в природе сами по себе существовать не могут. Но эксперименты показали, что данные метастабильные кластеры 2D-дихалькогенидов с метавалентными направленными связями можно удержать в стабильном высокопроводящем состоянии либо под действием внешнего напряжения $U_{уд}$, либо индуцированным внутренним полем $U_{инд}$ пленок сегнетоэлектриков SnTe или GeTe [5].

Методика проведения эксперимента и результаты исследований

С целью проверки альтернативной концепции был изготовлен и исследован многослойный элемент памяти со структурой Al-$(Al_2Te_3/SnTe)_n$-TeO_2-SnTe-Me, в которой Me – это Ni, Cr или Mo. В результате получили стабильно работающий тонкопленочный энергонезависимый элемент памяти с рекордно низким временем переключения $t_{пер} \leq 0{,}1$ мкс. Для анализа границы раздела Al_2Te_3/SnTe на разных этапах проводились исследования частотных зависимостей коэффициента диэлектрических потерь ε″, ядерного магнитного резонанса (ЯМР) [5] и мёссбауэровской спектроскопии (метод ядерного гамма-резонанса) специально подготовленных для этого образцов элементов памяти, находящихся в состояниях OFF-state и ON-state. Частотные зависимости ε″ были получены для состояний OFF-state и ON-state элемента памяти с помощью широкополосного спектрометра Nanocontrol BDS-80. ^{119}Sn мёссбауэровская спектроскопия снималась на спектрометре ЯГРС-4М. В качестве источника гамма-излучения использовался $BaSnO_3$. Ядерный гамма-резонанс исследовался при $T = 293$ К. Для того чтобы результаты ЯМР- и мёссбауэровской спектроскопии отражали процессы на границах раздела, пленки Al_2Te_3 и SnTe толщиной $d = 2{,}5$–$3{,}0$ нм последовательно напылялись из ячеек Кнудсена на алюминиевую фольгу диаметрами 15,0 и 0,1 мм, прозрачную для гамма-излучения, что позволило создать не менее 250 интерфейсов $(Al_2Te_3/SnTe)_n$, где n – число интерфейсов. Толщины и скорости осаждения пленок в самом начале определялись кварцевым измерителем толщин и скоростей осаждения, калиброванным по ступеньке на МИ-11, а для очень малых толщин пленок – временем их осаждения. Для увеличения активной площади для ЯМР- и мёссбауэровской спектроскопии в качестве верхнего электрода использовался прижимной контакт. Процесс осаждения пленок и измерения проводились при $T = 293$ К. Вольт-амперные характеристики полученных образцов снимались на специально разработанном характериографе, в котором использовался генератор тока с большим выходным сопротивлением. Конструкции данных энергонезависимых элементов памяти отражены в [6].

В [5] по результатам ЯМР-спектроскопии установлено, что во время фазового перехода (переключения из состояния OFF-state в ON-state) атомы Al претерпевают обратимые тетраэдрическо-октаэдрические перегруппировки. Аналогичные результаты ЯМР-спектроскопии в соединениях Al_2Te_3 получили и другие исследователи [7, 8]. Согласно [9], октаэдрическая координация атомов переходных металлов является характерной чертой полиморфных структур 1T, 1T’, Td, наблюдающихся в дихалькогенидах $MoTe_2$, WTe_2, $PtTe_2$, VTe_2 и др. В таких 2D-дихалькогенидах участки переходных металлов имеют октаэдрическую координацию, что приводит к частичному заполнению двух из трех вырожденных орбиталей d_{xy}, d_{xz} и d_{yz}. Это обуславливает металлическое поведение метастабильных полиморфных фаз 1T, 1T’, Td [9].

Полученные при проведении исследований ЯМР-спектры косвенно подтверждают существование дихалькогенидных кластеров типа $AlTe_2$ в тонкопленочной структуре Al-$(Al_2Te_3/SnTe)_n$-TeO_2-SnTe-Me (где Me – это Ta, Ni, Cr, C), находящейся в низкоомном ON-state. Такие метастабильные кластеры принимают участие в формировании кристаллической фазы (шнура проводимости) на границе раздела слоев Al_2Te_3/SnTe элементов памяти под воздействием сильного внешнего электрического поля. Существование кластеров $AlTe_2$ с октаэдрической координацией атомов Al в шнуре проводимости можно объяснить известным методом формирования формальной электронной оболочки [4, 8]. Для проверки этого предположения была проведена ^{119}Sn мёссбауэровская спектроскопия образцов элементов памяти Al-$(Al_2Te_3/SnTe)_n$-TeO_2-SnTe-Me (рис. 1).

На мёссбауэровских спектрах многокомпонентных структур в OFF-state (рис. 1, *а*) наблюдается линия, отвечающая двухвалентному олову, которая характеризуется следующими параметрами: изомерный сдвиг $\delta = 3{,}48$ мм/с относительно SnO_2; ширина линии $\Gamma = 0{,}75$ мм/с; квадрупольное расщепление $E = 0{,}2$ мм/с. Эти параметры обычно характерны для соединения SnTe с кубической структурой [10]. На мёссбауэровских спектрах структур после переключения в ON-state (рис. 1, *b*) появляется линия с изомерным сдвигом $\delta = 3{,}39$ мм/с, которая представляет собой наложение двух уширенных линий, что приводит к значительному уширению спектральной линии. Причем для линии с $\delta = 3{,}39$ мм/с характерно появление квадрупольного дуплета с близким значением изомерных сдвигов, но с различающимися величинами квадрупольных расщеплений. Наблюдающееся уменьшение изомерного сдвига $\delta_2 = 3{,}39$ мм/с по сравнению с изомерным сдвигом для эталонного образца ($\delta = 3{,}47$ мм/с), а также появление квадрупольного дуплета характери-

зуют ромбоэдрическое искажение кубической решетки SnTe типа NaCl [10]. Искаженная ромбоэдрическая фаза с метавалентными связями всегда полярна [11]. Поэтому наличие такой фазы можно связать с индуцированием внутреннего поля $U_{инд}$ в пленке сегнетоэлектрика SnTe. Появление линии с изомерным сдвигом δ = 3,39 мм/с также указывает на присутствие искаженных октаэдрических комплексов в многокомпонентных структурах [10], что, как отмечалось ранее, является характерным признаком дихалькогенидов. Поэтому можно предполажить, что на границе раздела пленок Al_2Te_3/SnTe при переключении элемента памяти в ON-state к 2D-дихалькогениду $AlTe_2$ со своим вектором поляризации еще дополнительно формируется 2D-дихалькогенид $SnTe_2$ с зеркальной хиральностью, т. е. с противоположно направленным вектором поляризации. Зеркальная хиральность свойственна наногетероструктурам на основе 2D-дихалькогенидов с искаженными кристаллическими октоэдрическими решетками, которые разделены на атомном уровне Ван-дер-Ваальсовой щелью (vdW-gap) [12]. Таким образом, можно предположить, что некоторая часть границы раздела пленок Al_2Te_3/SnTe под действием внешнего напряжения изменяется на упорядоченную, стабильную, многослойную сверхструктуру – шнур проводимости $SnAlTe_4$, отвечающую за низкоомное состояние ON-state элемента памяти [2].

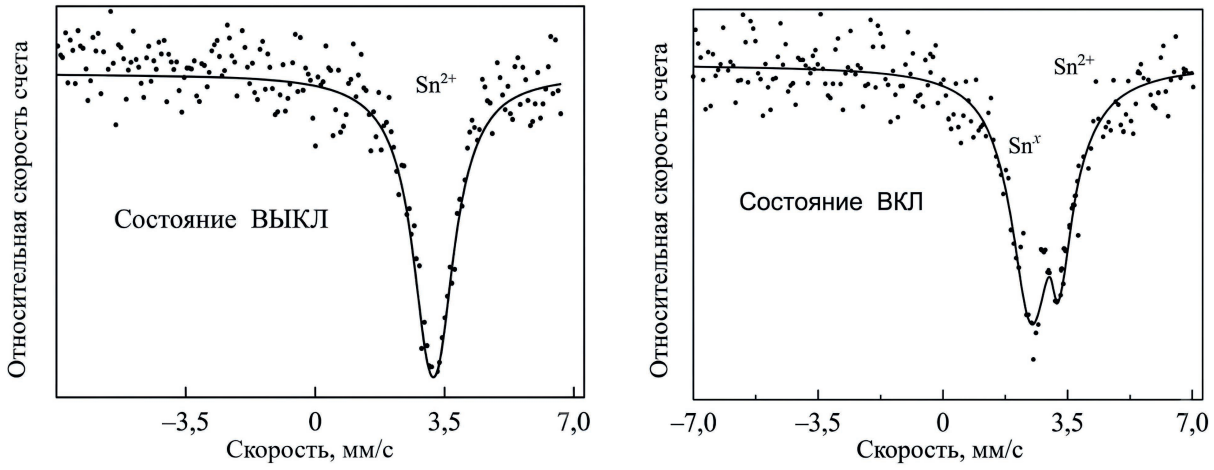
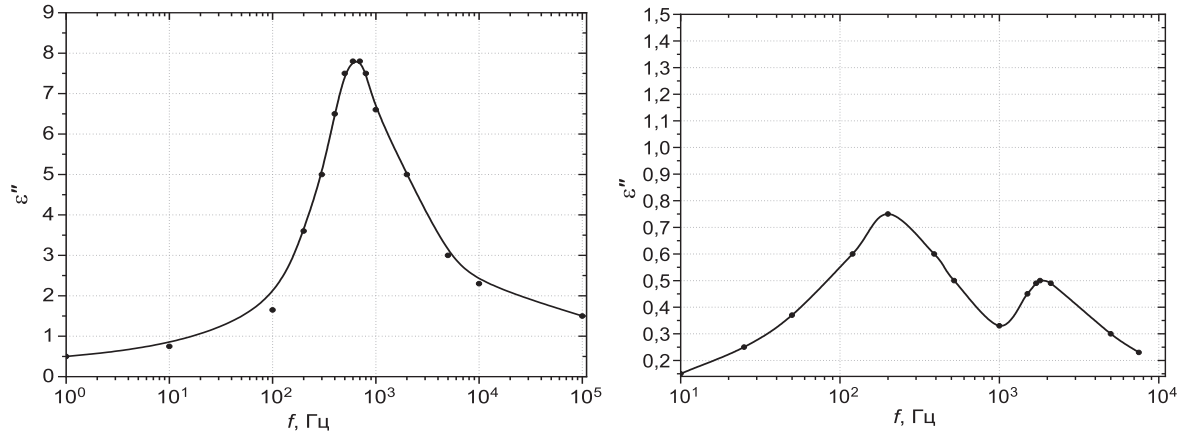


Рис. 1. ^{119}Sn мёссбауэровская спектроскопия Al-$(Al_2Te_3/SnTe)_nTeO_2$-SnTe-Me элементов памяти в состоянии: *a* – ВЫКЛ; *b* – ВКЛ

Fig. 1. ^{119}Sn Mössbauer spectroscopy of Al-$(Al_2Te_3/SnTe)_nTeO_2$-SnTe-Me memory elements in the following states: *a* – OFF; *b* – ON

Также были проведены исследования частотных зависимостей коэффициента диэлектрических потерь ε″. Если электрические параметры рассматриваемого элемента памяти изучены достаточно подробно, то их диэлектрические свойства представляют определенный практический интерес, так как 2D-дихалькогенидам свойственно наличие дипольной поляризации [13]. Частотные зависимости коэффициента диэлектрических потерь ε″ получали как для высокоомного OFF-state, так и для низкоомного ON-state состояний элемента памяти (рис. 2).

Из рис. 2, *a* видно, что для OFF-state на частотной зависимости коэффициента ε″ наблюдается один низкочастотный интенсивный максимум при частоте f = 600 Гц, характерный для ярко выраженной дипольной поляризации [14]. Для ON-state (рис. 2, *b*) наблюдаются два слабовыраженных пика на частотах 200 и 1800 Гц, связанных с «тяжелыми» ($SnTe_2$) и «легкими» ($AlTe_2$) октаэдрическими фрагментами соответственно. Эти фрагменты, скорее всего, образуются на границе раздела пленок Al_2Te_3/SnTe в результате электромиграционных мемристорных процессов. В данных фрагментах асимметрично направленные связи обуславливают наличие дипольной поляризации [14], поскольку относительное смещение атомов переходных металлов и атомов теллура под действием внешнего напряжения $U \geq U_{пор}$ лежит в основе так называемой скользящей внеплоскостной поляризации, наблюдаемой в таких полиморфах, как 1T, 1T’ и Td 2D-дихалькогенидов [13]. То есть направления векторов поляризаций двух разных фрагментов взаимно компенсируют друг друга. Кроме того, направление вектора поляризации «тяжелого» октаэдрического фрагмента $SnTe_2$ удерживает в стабильном высокопроводящем состоянии «легкий» октаэдрический фрагмент $AlTe_2$, что и обеспечивает эффект энергонезависимой памяти [5].



a *b*

Рис. 2. Частотная зависимость коэффициента диэлектрических потерь ε″ в состоянии: *a* – ВЫКЛ; *b* – ВКЛ

Fig. 2. Frequency dependence of the dielectric loss coefficient ε″ in the state: *a* – OFF; *b* – ON

Заключение

1. Установлено, что природа эффектов резистивного переключения на границах раздела халькогенидных пленок на основе теллура обусловлена электростимулированными мемристорными процессами с образованием метастабильной фазы дихалькогенида $AlTe_2$. Полученные метастабильные октаэдрические кластеры $AlTe_2$ с высокопроводящим типом проводимости могут быть «удержаны» и зафиксированы как структурные образования при комнатной температуре не только внешним (эффект порогового переключения), но и внутренним полем (эффект энергонезависимой памяти) той же или большей величины и с противоположно направленным вектором.

2. Предложена оригинальная структура с дополнительными сегнетоэлектрическими слоями для достижения рекордных характеристик элементов памяти.

3. С помощью ядерного магнитного резонанса и мёссбауэровской спектроскопии обнаружены обратимые тетраэдрическо-октаэдрические перегруппировки атомов Al и Sn под действием внешнего напряжения. В результате процесса полярной электромиграции компонентов под воздействием внешнего напряжения при $U \geq U_{пор}$ некоторая часть границы раздела пленок Al_2Te_3/SnTe изменяется на упорядоченную, стабильную, многослойную сверхструктуру – шнур проводимости $SnAlTe_4$. Многослойная сверхструктура $SnAlTe_4$ состоит из двух 2D-дихалькогенидных строительных блоков $SnTe_2$ и $AlTe_2$, разделенных Ван-дер-Ваальсовой щелью. Направление вектора поляризации октаэдрического фрагмента $SnTe_2$ удерживает в стабильном высокопроводящем состоянии внеплоскостную поляризацию октаэдрического фрагмента $AlTe_2$, что и обеспечивает эффект энергонезависимой памяти.

4. Научная новизна проведенного исследования заключается в выявлении роли сегнетоэлектрических полей в стабилизации и удержании в статике этого состояния – так называемый эффект фиксированной индуцированной поляризации.

5. Работа выполнена в рамках договора с Белорусским республиканским фондом фундаментальных исследований от 02.05.2025 № Т25МЭ-030 и ГБЦ от 24.04.2026 № 26-3057.

Список литературы

1. Колобов, А. В. Халькогенидные стеклообразные полупроводники в устройствах памяти и обработки информации / А. В. Колобов, П. И. Лазаренко // Физика и техника полупроводников. 2025. Т. 59, вып. 9. С. 511–539.
2. Troyan, E. Change of GeTe/Sb_2Te_3 Thin-Film Memory Elements Resistance R_{ON} Under External Pressure / E. Troyan, A. Doronin // Comprehensible Science. 2021. 427–433.
3. Nanoscale Electrolytic Switching in Phase-Change Chalcogenide Films / R. Pandian [et al.] // Advanced Materials. 2007. Vol. 19, No 24. P. 4431–4437. DOI: 10.1002/adma.200700904.
4. Колосницын, Б. С. Эффекты переключения и памяти в тонкопленочных неупорядоченных халькогенидных полупроводниках / Б. С. Колосницын, Е. Ф. Троян // Доклады БГУИР. 2017. № 2. С. 25–30.

5. Процессы памяти и переключения в тонкопленочных структурах на основе двух- и трехкомпонентных халькогенидов / Е. Ф. Троян [и др.] // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2024. Т. XIV, № 3. С. 11–14.
6. Pat. US 9,865,811, Jan. 9, 2018; Pat. RF 2618959, 2017; Pat. EP 3151294, 2019 / E. F. Troyan.
7. Aluminum-Centered Tetrahedron-Octahedron Transition in Advancing Al-Sb-Te Phase Change Properties / Xia Mengjiao [et al.] // Scientific Reports. 2015. Vol. 5, No 1.
8. Pumlianmunga, R. K. Electrical Switching, Local Structure and Thermal Crystallization in Al-Te Glasses / R. K. Pumlianmunga // Materials Research Bulletin. 2017. Vol. 86. P. 88–94.
9. Emerging Two-Dimensional Tellurides / S. Siddique [et al.] // Materials Today. 2021. P. 1–23.
10. Структура ближнего порядка и антиструктурные дефекты олова в пленках аморфного и кристаллического $Ge_2Sb_2Te_5$ / А. В. Марченко [и др.] // Физика и техника полупроводников. 2021. Т. 55, вып. 1. С. 3–8.
11. Growth of Textured Chalcogenide Thin Films and Their Functionalization Through Confinement / P. Kerres [et al.] // Physica Status Solidi, A. 2024. Vol. 221, Is. 22. DOI: 10.1002/pssa.202300921.
12. Chirality in Transition Metal Dichalcogenide Nanostructures / L. Branzi [et al.] // Chemistry: A European Journal. 2025. Vol. 31, Iss. 35. P. 1–27.
13. Xue, L. Ferroelectric Properties of Van der Waals Chalcogenides: A Density Functional Theory Perspective / L. Xue, G. J. McHugh, V. I. Fal'ko // Academia Nano: Science, Materials, Technology. 2025. Vol. 2. P. 1–9.
14. Dielectric Relaxation in Amorphous and Crystalline Sb_2Te_3 Thin Films / A. A. Kononov [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Electronics. 2021. Vol. 32. P. 14072–14078.

Поступила 27.04.2026 Принята в печать 15.05.2026

References

1. Kolobov A. V., Lazarenko P. I. (2025) Chalcogenide Glassy Semiconductors in Memory and Information Processing Devices. *Physics and Technology of Semiconductors*. 59 (9), 511–539 (in Russian).
2. Troyan E., Doronin A. (2021) Change of GeTe/Sb_2Te_3 Thin-Film Memory Elements Resistance R_{ON} Under External Pressure. *Comprehensible Science.* 427–433.
3. Pandian R., Kooi B. J., Palasantzas G., De Hosson J. T. M., Pauza A. (2007) Nanoscale Electrolytic Switching in Phase-Change Chalcogenide Films. *Advanced Materials*. 19 (24), 4431–4437. DOI: 10.1002/adma.200700904.
4. Kolosnitcin B. S., Troyan E. F. (2017) Switching and Memory Effects in Thin Film Disoder Chalcoginide Semiconductors. *Doklady BGUIR*. (2), 25–30 (in Russian).
5. Troyan E. F., Smirnov A. G., Stepanov A. A., Zhovnerik N. V., Sun Hiao Wei, Liu Zhengbia (2024) Memory and Switching Processes in Thin-Film Structures Based on Two- and Three-Component Chalcogenides. *Proceedings of the Kabardino-Balkarian State University*. XIV (3), 11–14.
6. Troyan E. F. *Patent US 9,865,811, Jan.9, 2018, Patent RF2618959, 2017; Patent EP3151294, 2019.*
7. Xia Mengjiao, Ding Keyuan, Rao Feng, Li Xianbin, Wu Liangcai, Song Zhitang (2015) Aluminum-Centered Tetrahedron-Octahedron Transition in Advancing Al-Sb-Te Phase Change Properties. *Scientific Reports*. 5 (1).
8. Pumlianmunga R. K. (2017) Electrical Switching, Local Structure and Thermal Crystallization in Al-Te Glasses. *Materials Research Bulletin*. 86, 88–94.
9. Siddique S., Gowda Ch. Ch., Demiss S., Tromer R., Paul S., Sadasivuni K. K., et al. (2021) Emerging Two-Dimensional Tellurides. *Materials Today*. 1–23.
10. Marchenko A. V., Terukov E. I., Nasredinov F. S., Petrushin Yu. A., Seregin P. P. (2021) Local Structure of Germanium Atoms and Anti-Structur Defects of Tin in Amorphous and Crystalline $Ge_2Sb_2Te_5$ Films. *Physics and Technology of Semiconductors*. 55 (1), 3–8 (in Russian).
11. Kerres P., Mazzarello R., Cojocaru-Mirédin O., Wuttig M. (2024) Growth of Textured Chalcogenide Thin Films. *Physica Status Solidi, A*. 221 (22). DOI: 10.1002/pssa.202300921.
12. Branzi L., Martyn J., Fitzsimmons L., Gun'ko Y. K. (2025) Chirality in Transition Metal Dichalcogenide Nanostructures. *Chemistry: A European Journal.* 31 (35), 1–27.
13. Li Xue, McHugh G. J., Fal'ko V. I. (2025) Ferroelectric Properties of Van der Waals Chalcogenides: A Density Functional Theory Perspective. *Academia Nano: Science, Materials, Technology*. 2, 1–9.
14. Kononov A. A., Gastro R. A., Saito Yu., Fons P., Bordovsky G., Anisimova N. I., et al. (2021) Dielectric Relaxation in Amorphous and Crystalline Sb_2Te_3 Thin Films. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. 32, 14072–14078.

Received: 27 April 2026 Accepted: 15 May 2026

Вклад авторов

Троян Е. Ф. разработал физическую модель эффектов памяти и порогового переключения в халькогенидные стекла на основе теллура.

Смирнов А. Г., Степанов А. А. провели исследования с помощью ядерного магнитного резонанса и мёссбауэровской спектроскопии образцов элементов памяти.

Харьков С. Ю. подготовил для исследования образцы элементов памяти.

Королева Е. Ю., Филимонов А. В. измерили частотные зависимости коэффициента диэлектрических потерь как для высокоомного OFF-state, так и для низкоомного ON-state состояний элемента памяти.

Authors' contribution

Troyan E. developed a physical model of memory effects and threshold switching in tellurium-based chalcogenide glasses.

Smirnov A., Stepanov A. conducted studies using nuclear magnetic resonance and Mцssbauer spectroscopy of memory element samples.

Kharkov S. prepared samples of memory elements for research.

Koroleva E., Filimonov A. measured the frequency dependences of the dielectric loss coefficient for both the high-impedance OFF-state and the low-impedance ON-state states of the memory element.

Сведения об авторах

Троян Е. Ф., канд. техн. наук, доц. каф. микро- и наноэлектроники, Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (БГУИР)

Смирнов А. Г., д-р техн. наук, Почет. проф., зав. лаб. «Устройства обработки и отображения информации», БГУИР

Степанов А. А., канд. техн. наук, доц. каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

Харьков С. Ю., асп. каф. микро- и наноэлектроники, БГУИР

Королева Е. Ю., канд. физ.-мат. наук, ст. н. с., Физико-технический институт имени А. Ф. Иоффе

Филимонов А. В., д-р физ.-мат. наук, проф., Санкт-Петербургский политехнический университет имени Петра Великого

Information about the authors

Troyan Ye., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (BSUIR)

Smirnov A., Dr. Sci. (Tech.), Honorary Professor, Head of the Laboratory of Information Processing and Display Devices, BSUIR

Stepanov A., Cand. Sci. (Tech.), Associate Professor of the Department of Micro- and Nanoelectronics, BSUIR

Kharkov S., Postgraduate of Micro- and Nanoelectronics Department, BSUIR

Koroleva E., Cand. Sci. (Phys. and Math.), Senior Researcher, A. F. Ioffe Physical-Technical Institute

Filimonov A., Dr. Sci. (Phys. and Math.), Professor, Peter the Great St. Petersburg Polytechnic University

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
Тел.: +375 29 757-78-01
E-mail: troevfe@gmail.com
Троян Евгений Федорович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki St., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
Tel.: +375 29 757-78-01
E-mail: troevfe@gmail.com
Troyan Yevgeny