

Исследование влияния ионизирующего излучения на характеристики резистивного переключения мемристивных устройств на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ в составе матрицы кросс-бар 1Т1М

В.А. Пикарь¹, А.В. Тетеревков¹, Н.О. Бартев¹, Н.Г. Данченко¹, А.В. Силаев¹,
В.Н. Леонтьев¹, М.Л. Сметанин¹, М.Н. Коряжкина², В.И. Лукоянов²,
А.И. Белов², Г.Д. Жарков², Е.Г. Грязнов², А.А. Сушков², Д.А. Павлов²,
А.Н. Михайлов²

¹Российский федеральный ядерный центр – Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики, Саров, Нижегородская область, Россия

²Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

Аннотация

В данной работе представлены результаты исследования воздействия ионизирующего излучения на параметры резистивного переключения КМОП-интегрированных мемристивных структур на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$, входящих в состав матрицы кросс-бар размером 32×8 . Исследования проводились с помощью программно-аппаратного комплекса, позволяющего исследовать параметры резистивного переключения. Выбор мемристивных устройств на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ обоснован их высокой устойчивостью к многократному резистивному переключению (не менее $3 \cdot 10^6$). Установлено, что мемристивные устройства сохраняют работоспособность после воздействия тормозного излучения с суммарной экспозиционной дозой не менее 3,4 МР без существенного изменения параметров резистивного переключения.

Ключевые слова: мемристор, резистивная память, резистивное переключение, ионизирующее излучение, тормозное излучение, стабилизированный диоксид циркония

Введение

В ближайшей перспективе качественное развитие электроники связывают с исследованием и разработкой мемристоров (или мемристивных устройств) – элементов, способных изменять свое резистивное состояние в зависимости от приложенного электрического воздействия и сохранять его длительное время [1]. Мемристоры физически представляют собой структуры металл-диэлектрик-металл. Изменение резистивного состояния в них реализуется вследствие наличия локальных проводящих областей (филаментов) внутри диэлектрической пленки [2]. При воздействии напряжения определенной полярности и величины происходит частичное разрушение/восстановление филаментов, за счет чего изменяется электронная проводимость диэлектрической пленки.

Изначально мемристоры рассматривались как перспективная основа устройств цифровой памяти, поскольку при разработке новых поколений традиционной памяти, работающей на основе сохранения заряда, всё чаще сталкивались с фундаментальными и инженерными трудностями. Но в последнее время, благодаря аналоговому способу работы, мемристоры рассматриваются и в качестве элементов, способных в естественной форме реализовать так называемые «вычисления в памяти» [3]. Устройства на основе этого принципа открывают дорогу к широкому ряду применений: от робототехники и искусственных нейронных сетей [4, 5] до электронной кожи и нейропротезирования [6, 7].

Более того, мемристорам приписывают ряд преимуществ по сравнению с современными технологиями памяти (высокую скорость работы, низкое энергопотребление, масштабируемость устройства и др. [8]).

В последнее десятилетие активно исследуется радиационная стойкость мемристоров в связи с разработкой интегральных мемристивных устройств в виде микросхем, включенных в различные функциональные блоки [9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16]. Исследование таких микросхем в условиях воздействия ионизирующего излучения является актуальной задачей в связи с возможностью разработки электрорадиоизделий в радиационно-стойком исполнении с целью их применения в составе устройств, эксплуатируемых в условиях повышенного радиационного фона, например, в космической или атомной отрасли. Несмотря на перспективность исследований, отсутствуют работы, посвященные влиянию тормозного излучения на параметры резистивного переключения мемристивных устройств.

В данной работе представлены результаты исследования интегрированных в стандартный процесс изготовления комплементарных структур «металл-оксид-полупроводник» (КМОП) мемристивных структур на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ в условиях воздействия тормозного излучения. Измерения выполнялись с использованием разработанного программно-аппаратного комплекса.

Материалы и методы

В данной работе в качестве объектов исследования использованы КМОП-интегрированные мемристивные структуры на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$, входящие в состав матрицы размером 32×8 в архитектуре кросс-бар. Одно мемристивное устройство представляло собой мемристивную структуру, нижний Pt электрод которой соединен со стоком транзистора NMOS (см. рисунок 1), изготовленного в рамках базового технологического процесса КМОП КНИ с проектными нормами 350 нм.

Мемристивные структуры имели следующие слои в своем составе: Au(40 нм)/Ta(40 нм)/ ZrO_2 (12 мол. % Y_2O_3)(20 нм)/Pt(40 нм)/Ti(10 нм). Детальную информацию о технологии изготовления мемристивных структур можно найти в [17]. Активная площадь мемристивного устройства составляла 10×10 мкм².

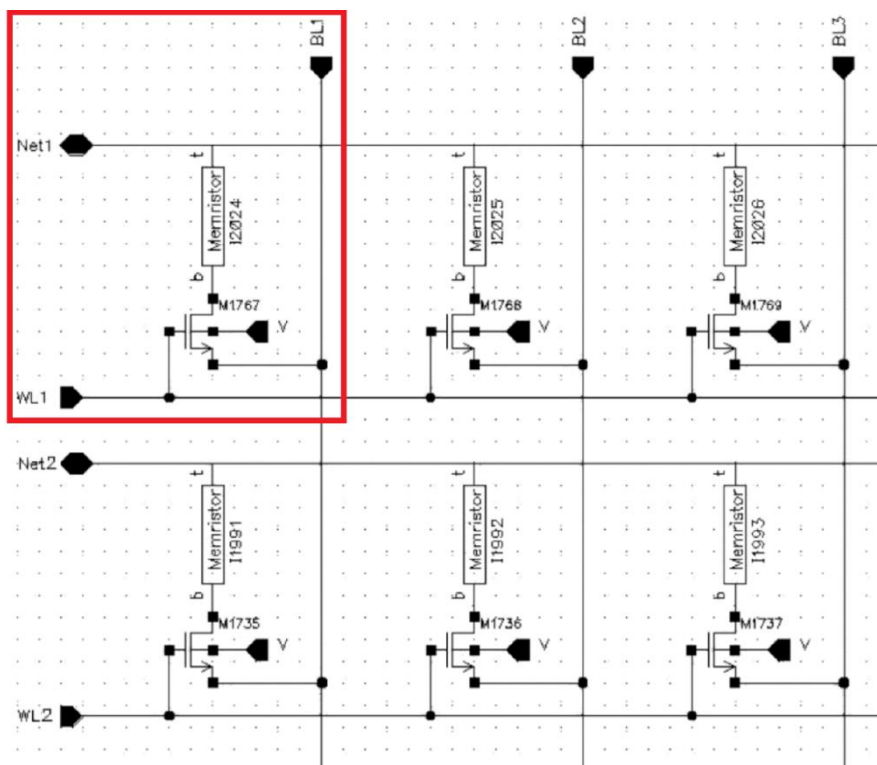


Рисунок 1. Электрическая схема одного мемристивного устройства (в красном квадрате) в составе матрицы кросс-бар 1T1M

Исследование поперечного среза мемристовой структуры выполнено с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM-2100F. Изготовление поперечного среза выполнено по методике, основанной на технологии, описанной в работе [18].

Исследование выносливости мемристовых устройств к многократному резистивному переключению (РП) в низкотокном режиме проводилось с использованием многофункционального устройства сбора данных. Схематическое изображение экспериментальной установки можно найти в [17].

Перед воздействием проведены исследования параметров РП мемристовых устройств в высокотокном режиме с использованием программно-аппаратного комплекса (ПАК) на базе многофункционального устройства сбора данных и среды графического проектирования и автоматизированного управления приборами. Исследования проводились в двух режимах: аналоговом (регистрация вольт-амперных и вольт-резистивных характеристик) и импульсном (запись резистивного состояния и последующее его чтение).

В аналоговом режиме ПАК реализован на основе трех источников питания - двух управляющих и одном гальванически изолированном, предназначенном для переключения транзистора мемристового устройства в открытое состояние.

В импульсном режиме – на основе аналогового коммутатора 1:4 и четырех регулируемых источников напряжения (рисунок 2), два из которых обеспечивали формирование импульсов записи состояния с низким (СНС) и высоким (СВС) сопротивлением и один – для формирования импульсов чтения. Длительность и амплитуда импульсов записи выбирались экспериментально таким образом, чтобы обеспечивалась стабильная работа мемристового устройства. Резистивное состояние мемристового устройства после приложения каждого импульса записи определялось путём регистрации падения напряжения на нем с использованием схемы с последовательно включенным нагрузочным сопротивлением (номиналом 200 Ом). В режиме реального времени записанное падение напряжения пересчитывалось в сопротивление мемристового устройства. Затем ПАК в автоматическом режиме визуализировал полученные результаты, а именно зависимости сопротивлений в СНС и СВС от времени в двух временных шкалах (краткосрочной и за весь сеанс) и соответствующих распределений. Это позволяло в реальном времени оценивать стабильность работы мемристового устройства и фиксировать динамику изменения параметров его РП. ПАК также визуализировал максимальные и минимальные значения сопротивлений в СНС и СВС за сеанс и количество циклов РП до перекрытия сопротивлений в СНС и СВС.

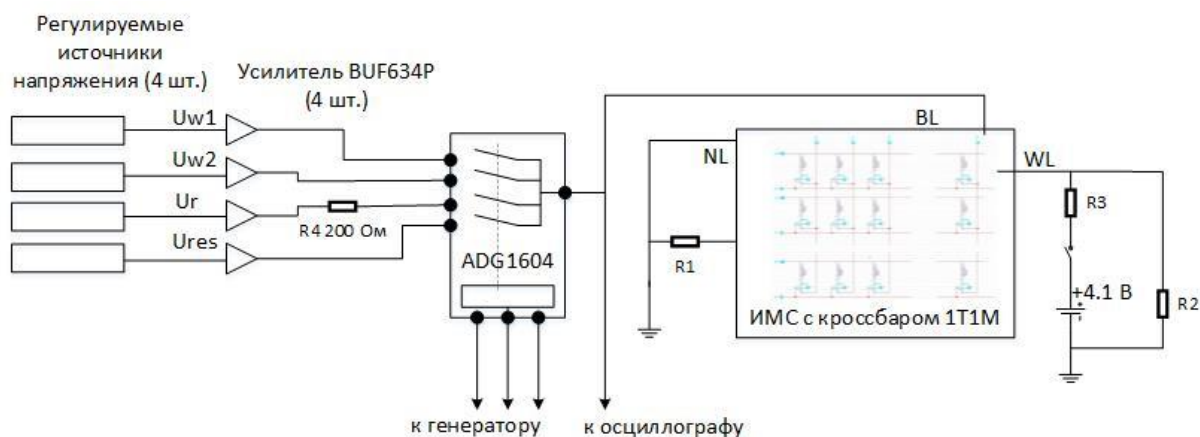


Рисунок 2. Схема разработанного ПАК для исследования параметров РП мемристовых устройств в высокотокном импульсном режиме

Во всех исследованиях знак напряжения на мемристовом устройстве соответствовал потенциалу нижнего P_t электрода относительно потенциала верхнего T_a электрода. В такой схеме переключение мемристового устройства из СНС в СВС осуществлялось путем приложения напряжения положительной полярности, а обратно (из СВС в СНС) – путем приложения напряжения отрицательной полярности.

Исследования воздействия тормозного излучения на параметры РП данных мемристовых устройств выполнены с использованием разработанного ПАК и ускорителя электронов ЛУ-10-20[19,20,21]. Схема эксперимента представлена на рисунке 3.

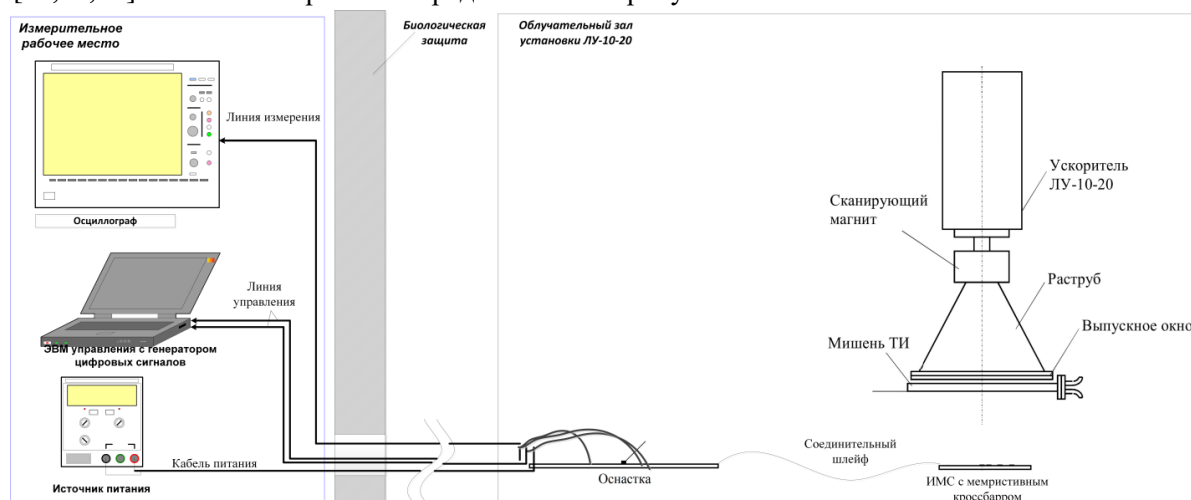


Рисунок 3. Схематическое представление исследования воздействия тормозного излучения на параметры РП мемристовых устройств

Результаты и обсуждение

С помощью метода ПЭМ обнаружено, что пленки, из которых состоит мемристовая структура, демонстрируют ярко выраженную зернистость (рисунок 4). Слои мемристовой структуры Au, $ZrO_2(Y_2O_3)$ и Pt, а также слои металлизации под мемристовой структурой TiN и Ti имеют поликристаллическую структуру, а Ta – аморфную. Обнаружено обогащение слоя Ta кислородом, особенно в области границы раздела Ta/ $ZrO_2(Y_2O_3)$, которое играет важную роль в процессах РП (разрушения-восстановления проводящих филаментов в $ZrO_2(Y_2O_3)$) [22].

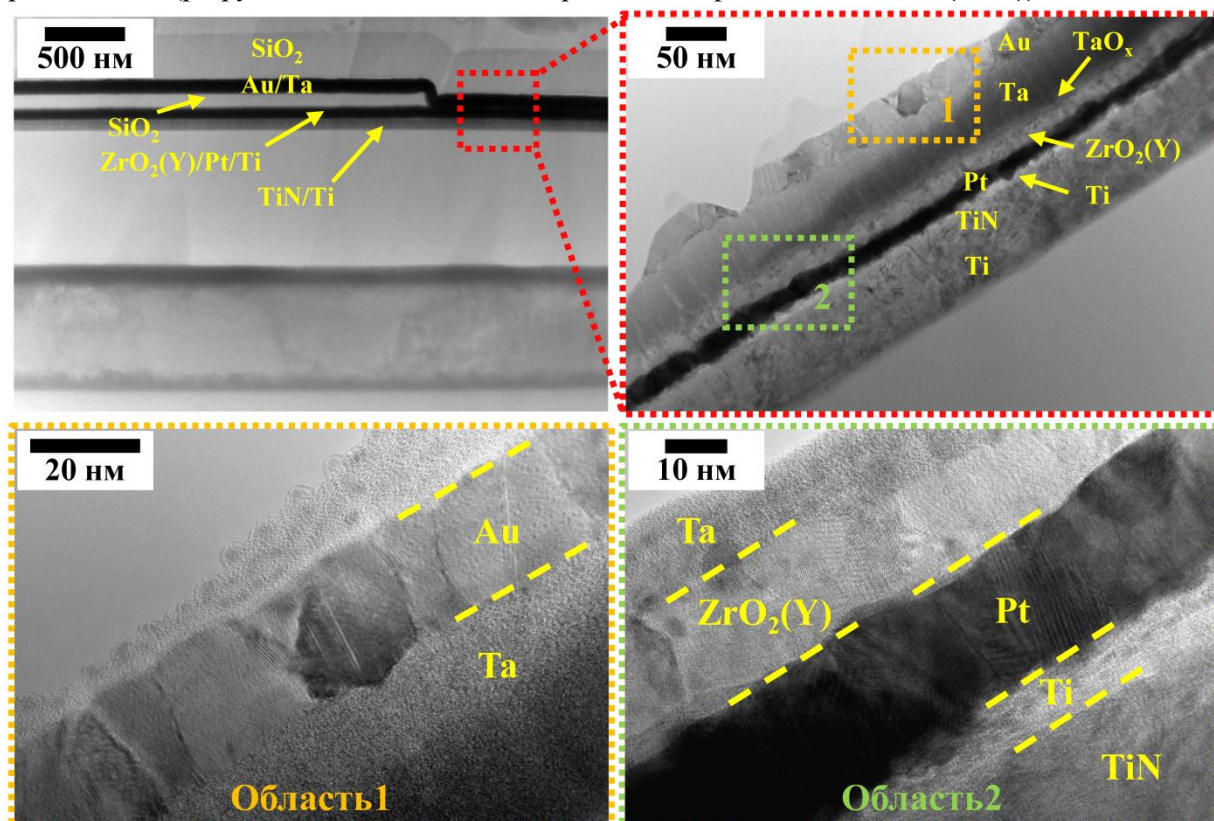


Рисунок 4. Изображения поперечного среза мемристового устройства, полученные методом ПЭМ

Исследованные мемристивные устройства в низкотокковом режиме демонстрировали не менее $3 \cdot 10^6$ циклов РП без существенной деградации (рисунок 5).

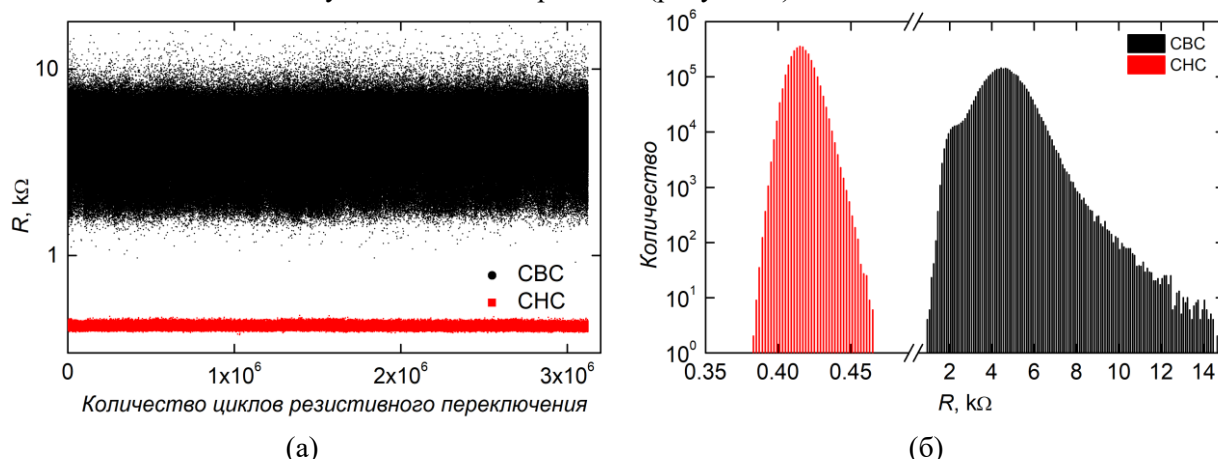


Рисунок 5. Выносливость к многократному РП мемристивного устройства (а) и соответствующие распределения резистивных состояний (б). Данные получены в низкотокковом режиме при использовании импульсов со следующими параметрами: длительность импульсов записи и чтения составляла 12 мкс; амплитуды импульсов записи составляли -1 В и +1,15 В для записи CHC и CBC, соответственно; амплитуда импульсов чтения составляла +0,3 В

На рисунке 6 приведены типичные вольт-амперные и вольт-резистивные характеристики мемристивного устройства, полученные в высокотокковом режиме с использованием разработанного ПАК.

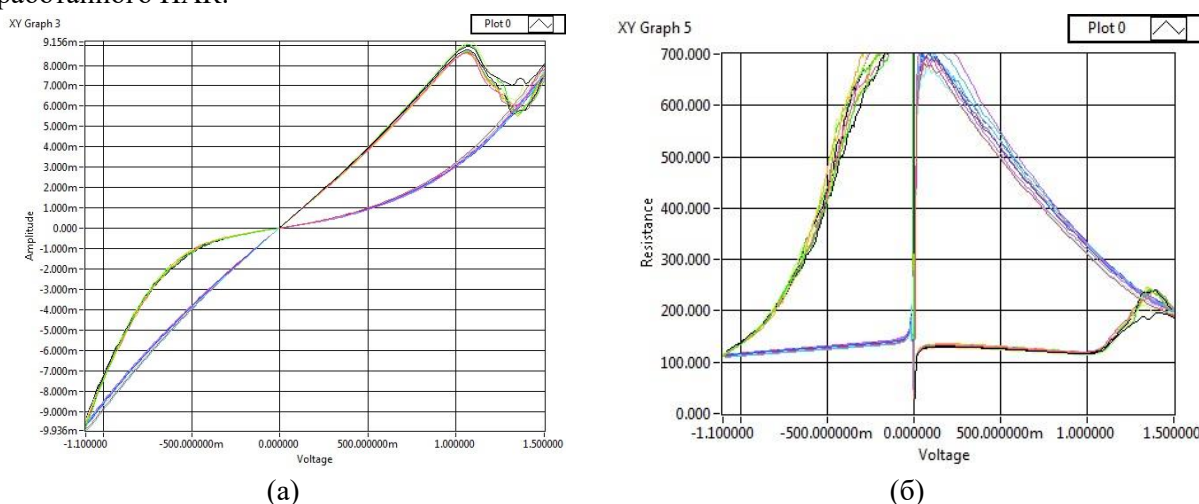


Рисунок 6. Типичные вольт-амперные (а) и вольт-резистивные (б) характеристики мемристивного устройства, полученные в высокотокковом режиме

Установлено, что исследование РП в режиме непрерывной развертки существенно сокращает ресурс работы устройства. Для сохранения ресурса работы при продолжительном времени исследования использован импульсный режим, в котором запись и чтение состояния мемристивного устройства производились кратковременными импульсами напряжения необходимой амплитуды.

С помощью ПАК проведены исследования влияния длительности и амплитуды импульсов записи на параметры РП в высокотокковом режиме. Различий в параметрах РП между исследованиями в аналоговом и импульсном режимах в случае длительности импульсов записи, равной ~ 1 мс не обнаружено. В то же время при уменьшении длительности до ~ 1 мкс для реализации РП требовались большие напряжения (в среднем на **0,2 – 0,6 В** больше по сравнению с аналоговым режимом).

Установлено, что мемристивное устройство демонстрирует более $5 \cdot 10^7$ циклов РП в высокотокковом режиме (рисунок 7). Перекрытия СНС и СВС наблюдаются редко. Надёжность записи требуемого резистивного состояния улучшается повторной записью.

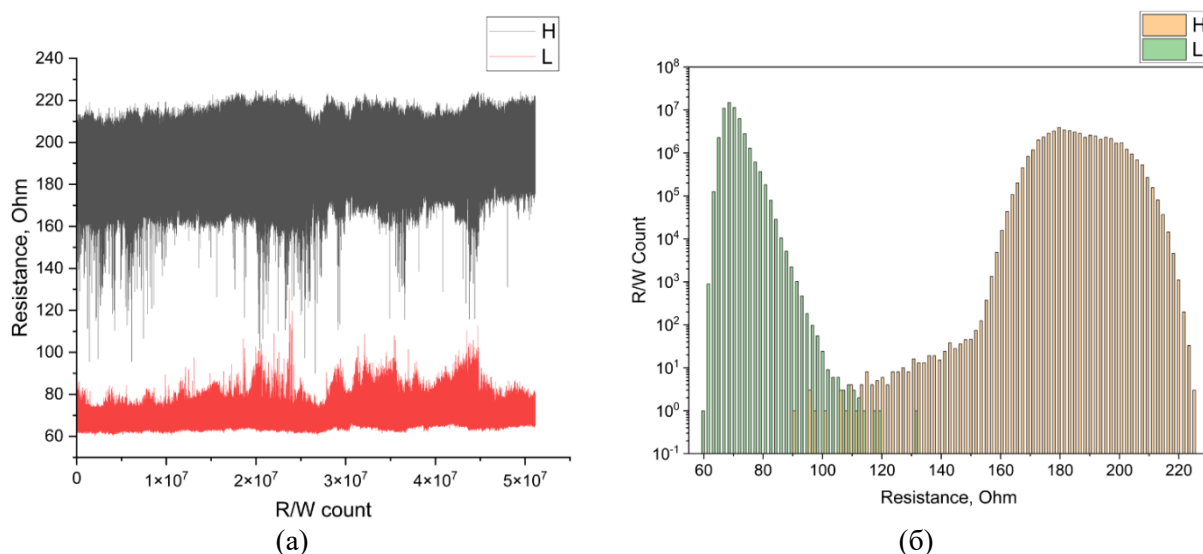


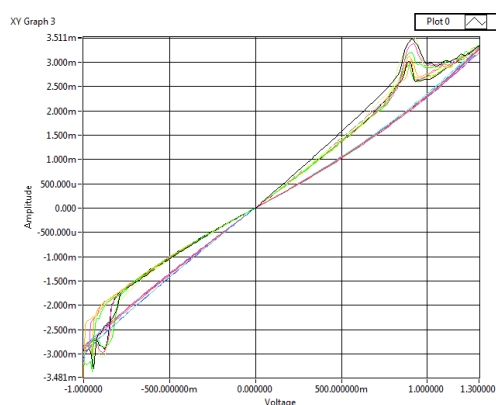
Рисунок 7. Выносливость к многократному РП мемристивного устройства (слева) и соответствующие распределения резистивных состояний (справа). Данные получены в высокотокковом режиме при использовании импульсов со следующими параметрами: длительность импульсов записи и чтений составляла 1 мкс; амплитуды импульсов записи составляли **-1,55 и +1,8 В** для записи СНС и СВС, соответственно; амплитуда импульсов чтения составляла +0,4 В

Исследование воздействия тормозного излучения на параметры РП данных мемристивных устройств выполнены в высокотокковом аналоговом режиме.

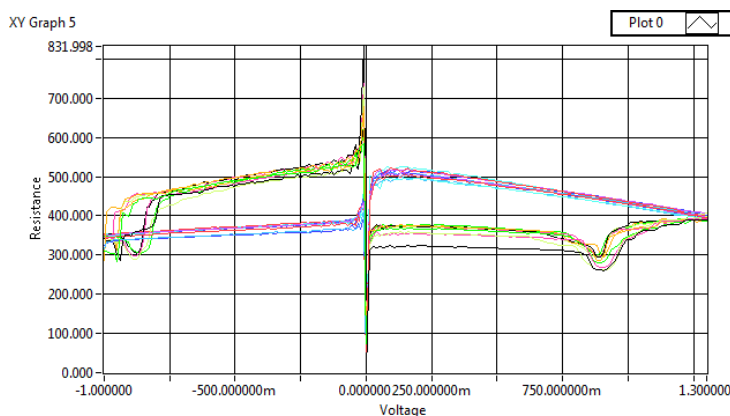
Воздействие излучением проводилось в три сеанса. В ходе первого сеанса исследовалось влияние воздействия излучения на параметры РП мемристивного устройства № 1, а в ходе второго и третьего сеансов – на параметры РП мемристивного устройства № 2. При этом оба мемристивных устройства во время всего эксперимента находились в поле тормозного излучения.

Во время начала воздействия ионизирующего излучения в ходе первого сеанса обнаружено «запирание транзистора» (отсутствие протекания тока через мемристивное устройство), что сделало невозможным исследование параметров РП в процессе воздействия. При этом после прекращения воздействия работоспособность транзистора восстанавливалась. Данный эффект, вероятнее всего, обусловлен стеканием заряда с затвора под воздействием ионизирующего излучения. Для минимизации влияния данного эффекта в рамках второго и третьего сеансов сопротивление ограничительного резистора уменьшено с 200 кОм до 10 кОм, что привело к сохранению транзистором открытого состояния во время воздействия ионизирующего излучения в ходе этих сеансов.

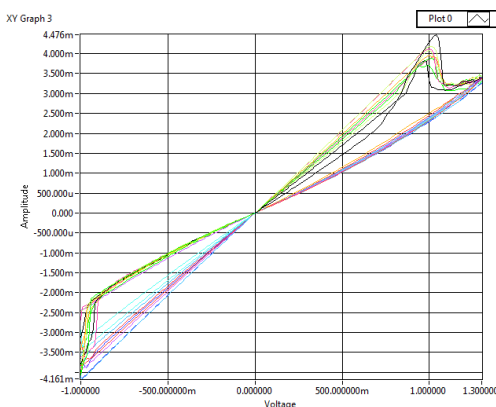
Результаты, полученные после первого сеанса воздействия ионизирующего излучения, приведены на рисунке 8. Суммарная экспозиционная доза на поверхности мемристивного устройства за первый сеанс составила $(12 \pm 4) \cdot 10^2$ кР, а средняя мощность дозы – $\sim 0,31$ кР/с. Установлено отсутствие значительных изменений величины сопротивления в резистивных состояниях мемристивного устройства № 1, что подтверждает сохранность работоспособности устройства после вышеуказанного воздействия.



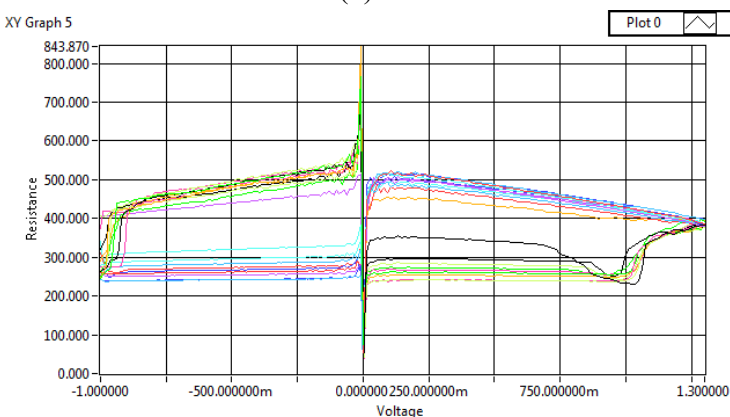
(a)



(б)



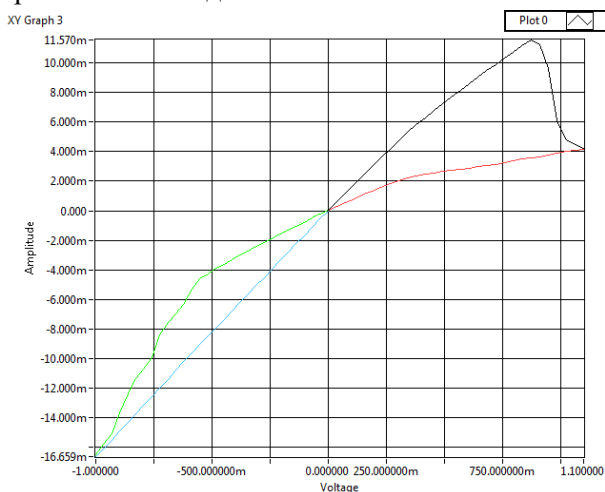
(в)



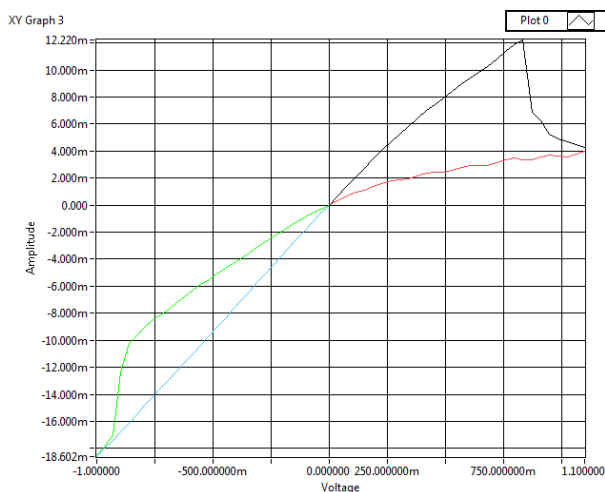
(г)

Рисунок 8. Вольт-амперные (а, в) и вольт-резистивные (б, г) характеристики мемристивного устройства № 1, полученные до (а, б) и после (в, г) воздействия излучения за первый сеанс

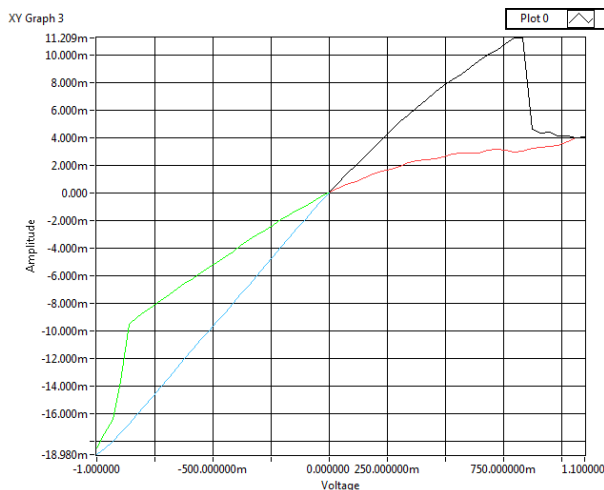
Результаты, полученные в ходе второго сеанса воздействия, приведены на рисунке 9. Суммарная экспозиционная доза на поверхности мемристивного устройства за первый и второй сеансы составила $(21 \pm 8) \cdot 10^2$ кР, а средняя мощность дозы в ходе второго сеанса – $\sim 0,31$ кР/с. Вольт-амперные характеристики, полученные в ходе и после воздействия излучения, демонстрируют пониженные значения сопротивлений как в СНС, так и в СВС. Тем не менее, обнаруженный эффект вероятно связан с разбросом параметров РП от цикла к циклу. В процессе воздействия не обнаружено изменения величин напряжений переключения. Отсутствие изменений в параметрах РП мемристивного устройства № 2 подтверждает сохранность работоспособности устройства после второго сеанса воздействия.



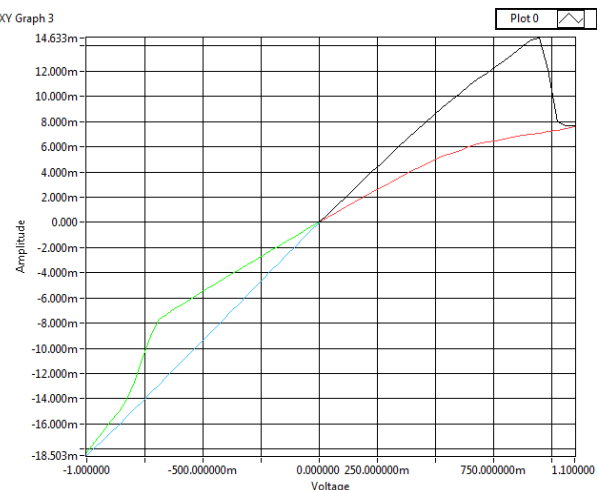
(a)



(б)



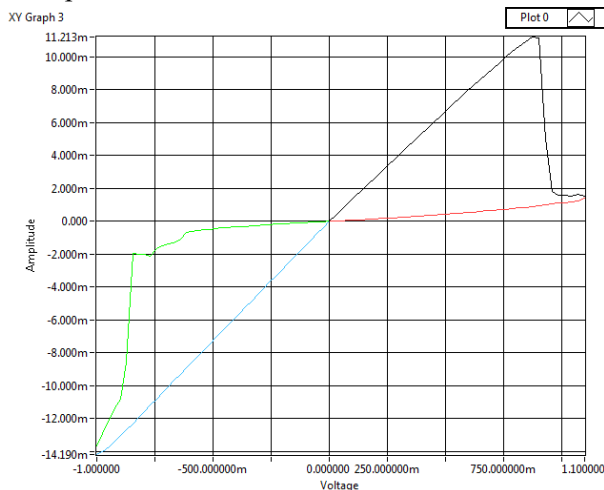
(b)



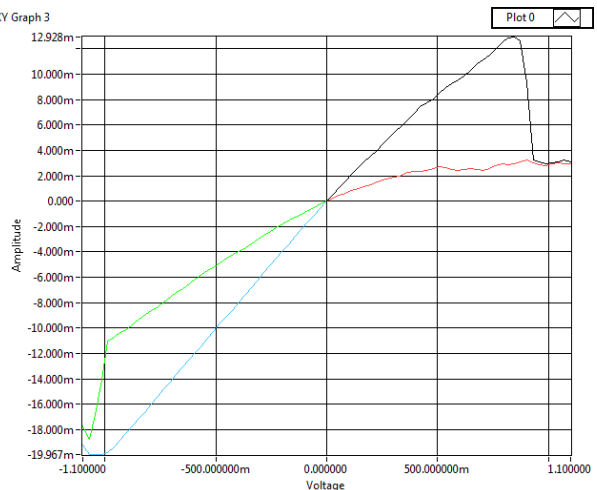
(г)

Рисунок 9. Вольт-амперные характеристики мемристивного устройства № 2, полученные до воздействия излучения (а), а также после 20 минут (б), 40 минут (в) и 50 минут (г) от начала второго сеанса. Последние результаты соответствуют характеристикам, полученным после воздействия излучения

Результаты, полученные в ходе третьего сеанса воздействия, приведены на рисунке 10. Суммарная экспозиционная доза на поверхности мемристивного устройства за первый, второй и третий сеансы составила $(3,4 \pm 1,4)$ МР, а средняя мощность дозы в ходе третьего сеанса – $\sim 0,35$ кР/с. Наблюдаемое отличие параметров РП и вида вольт-амперных характеристик, полученных после второго сеанса и перед третьим сеансом, вероятно связано со стеканием заряда, накопленного в процессе воздействия, в период простоя между сеансами. Обнаружено, что воздействие излучения привело к существенному уменьшению сопротивлений в резистивных состояниях мемристивного устройства № 2 и увеличению напряжений РП с сохранением эффекта резистивного переключения после третьего сеанса воздействия.



(a)



(б)

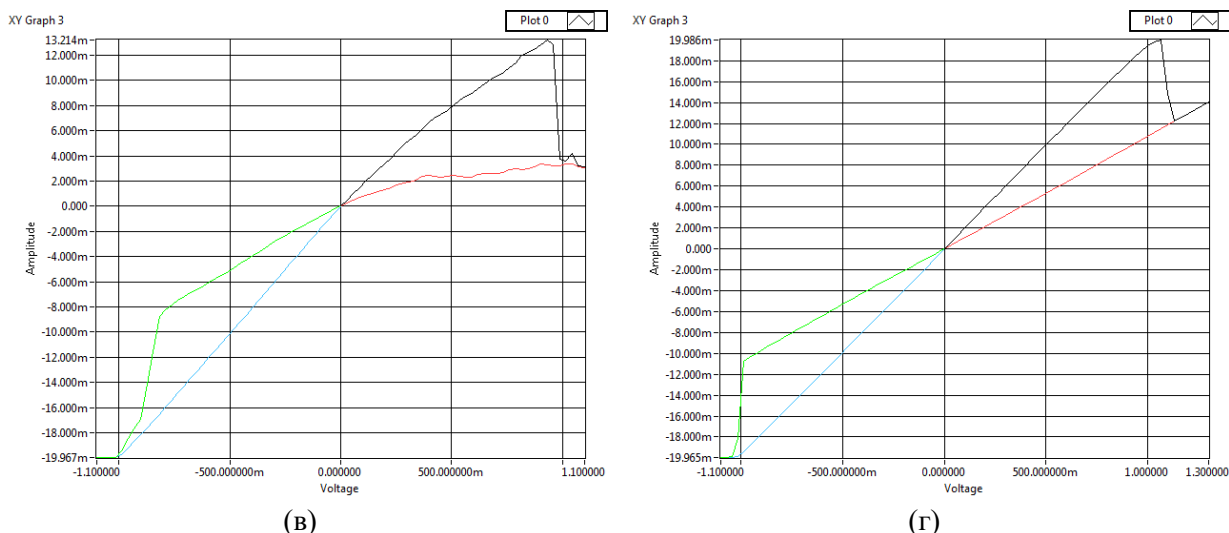


Рисунок 10. Вольт-амперные характеристики мемристивного устройства № 2, полученные до воздействия излучения (а), а также после 30 минут (б), 50 минут (в) и 60 минут (г) от начала третьего сеанса. Последние результаты соответствуют характеристикам, полученным после воздействия излучения

С целью оценки стойкости исследованных мемристивных структур к воздействию излучения и её сравнения с достижениями других научных групп, проведено вычисление реализованной поглощённой дозы в материалах этой структуры. Численное моделирование взаимодействия ионизирующего излучения с веществом проведено методом Монте-Карло по программе расчёта переноса ионизирующего излучения в трехмерной геометрии СМК, разработанной в РФЯЦ-ВНИИЭФ [23].

С помощью созданной расчетной модели, состоящей из упрощённой модели источника ионизирующего излучения и мемристивной структуры, получены результаты воздействия излучения, а именно: величина энерговыделения в слоях, значение эффективности воздействия и величина реализованной поглощённой дозы в процессе ионизации в различных слоях мемристивной структуры. В таблице приведены материальный состав и толщина слоёв, а также полученная величина реализованной поглощённой дозы от ионизирующего излучения по ионизационным процессам.

Таблица. Материальный состав расчетной модели и вычисленная величина реализованной поглощённой дозы.

№	Материал слоя мемристивной структуры	Толщина слоя мемристивной структуры	Плотность материала, г/см ³	Полная реализованная поглощённая доза, кГр
1	Au	40 нм	19,3	55,9
2	Ta	40 нм	16,6	51,3
3	ZrO ₂ (12 мол. % Y ₂ O ₃)	20 нм	5,9	33,3
4	Pt	40 нм	21,5	55,0
5	Ti	10 нм	4,5	30,3
6	SiO ₂	1,1 мм	2,2	не вычислялась

Вычисленные дозы свидетельствуют о стойкости исследованных мемристивных устройств, сравнимой с таковой, полученной другими научными группами [24].

Заключение

В работе представлены результаты измерений в режиме реального времени параметров резистивного переключения мемристивных устройств на основе ZrO₂(Y₂O₃) в составе матрицы

кросс-бар 1T1M в условиях воздействия ионизирующего излучения с помощью разработанного программно-аппаратного комплекса.

Мемристивные устройства демонстрируют высокую устойчивость к многократному резистивному переключению (не менее $3 \cdot 10^6$ в низкотокковом и не менее $5 \cdot 10^7$ в высокотокковом режимах).

Показано, что мемристивные устройства сохраняют свою работоспособность (экспериментально не установлено перекрытие СНС и СВС) после воздействия тормозного излучения с суммарной экспозиционной дозой не менее 3,4 МР, что в единицах полной реализованной поглощённой дозы соответствует величине, равной $\sim 1,5$ кГр. Таким образом стойкость исследованных мемристивных устройств не уступает показателям, полученным другими научными группами [24].

Благодарности

Исследование выполнено в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах». Мемристивные устройства изготовлены в Лаборатории мемристорной наноэлектроники Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского (гос. задание № FSWR-2025-0006).

Конфликт интересов

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

Список литературы

-
- [1] Lee J.S., Lee S., Noh T.W. / Resistive switching phenomena: A review of statistical physics approaches // Applied Physics Reviews. – 2015. – V. 2. – P. 031303. DOI: [10.1063/1.4929512](https://doi.org/10.1063/1.4929512)
 - [2] Yang Y., Gao P., Gaba S., Chang T., Pan X., Lu W. / Observation of conducting filament growth in nanoscale resistive memories // Nature Communications. – 2012. – V. 3. – P. 732. DOI: [10.1038/ncomms1737](https://doi.org/10.1038/ncomms1737)
 - [3] Sebastian A., Le Gallo M., Khaddam-Aljameh R., Eleftheriou E. / Memory devices and applications for in-memory computing // Nature Nanotechnology. – 2020. – V. 15. – P. 529–544. DOI: [10.1038/s41565-020-0655-z](https://doi.org/10.1038/s41565-020-0655-z)
 - [4] Chen B., Yang H., Song B., Meng D., Yan X., Li Y., Wang Y., Hu P., Ou T.-H., Barnell M., Wu Q., Wang H., Wu W. / A memristor-based hybrid analog-digital computing platform for mobile robotics // Science Robotics. – 2020. – V. 5. – P. eabb6938. DOI: [10.1126/scirobotics.abb6938](https://doi.org/10.1126/scirobotics.abb6938)
 - [5] Xu W., Wang J., Yan X. / Advances in Memristor-Based Neural Networks // Frontiers in Nanotechnology. – 2021. – V. 3. – P. 645995. DOI: [10.3389/fnano.2021.645995](https://doi.org/10.3389/fnano.2021.645995)
 - [6] Dias C., Castro D., Aroso M., Ventura J., Aguiar P. / Memristor-Based Neuromodulation Device for Real-Time Monitoring and Adaptive Control of Neuronal Populations // ACS Applied Electronic Materials. – 2022. – V. 4. – P. 2380–2387. DOI: [10.1021/acsaelm.2c00198](https://doi.org/10.1021/acsaelm.2c00198)
 - [7] Yang C., Wang H., Cao Z., Chen X., Zhou G., Zhao H., Wu Z., Zhao Y., Sun B. / Memristor-Based Bionic Tactile Devices: Opening the Door for Next-Generation Artificial Intelligence // Small. – 2024. – V. 20. – P. 2308918. DOI: [10.1002/smll.202308918](https://doi.org/10.1002/smll.202308918)
 - [8] Mohammad B., Jaoude M.A., Kumar V., Al Homouz D.M., Nahla H.A., Al-Qutayri M., Christoforou N. / State of the art of metal oxide memristor devices // Nanotechnology Reviews. – 2016. – V. 5. – P. 311–329. DOI: [10.1515/ntrev-2015-0029](https://doi.org/10.1515/ntrev-2015-0029)
 - [9] Gonzalez-Velo Y., Barnaby H.J., Kozicki M.N. / Review of radiation effects on ReRAM devices and technology // Semiconductor Science and Technology. – 2017. – V. 32. – P. 083002. DOI: [10.1088/1361-6641/AA6124](https://doi.org/10.1088/1361-6641/AA6124)

-
- [10] Mikhaylov A.N., Belov A.I., Korolev D.S., Gerasimova S.A., Antonov I.N., Okulich E.V., Shuiskiy R.A., Tetelbaum D.I. / Effect of ion irradiation on resistive switching in metal-oxide memristive nanostructures // *Journal of Physics: Conference Series*. – 2019. – V. 1410. – P. 012245. DOI: [10.1088/1742-6596/1410/1/012245](https://doi.org/10.1088/1742-6596/1410/1/012245)
- [11] Okulich E.V., Koryazhkina M.N., Korolev D.S., Belov A.I., Shenina M.E., Mikhaylov A.N., Tetelbaum D.I., Antonov I.N., Dudin Yu.A. / The Effect of Irradiation with Si^+ Ions on Resistive Switching in Memristive Structures Based on Yttria-Stabilized Zirconia // *Technical Physics Letters*. – 2019. – V. 45. – P. 690–693. DOI: [10.1134/S1063785019070253](https://doi.org/10.1134/S1063785019070253)
- [12] Tao Y., Li X., Wang Z., Li G., Xu H., Zhao X., Lin Y., Liu Y. / Neutron irradiation-induced effects on the reliability performance of electrochemical metallization memory devices // *Journal of Semiconductors*. – 2021. – V. 42. – P. 014103. DOI: [10.1088/1674-4926/42/1/014103](https://doi.org/10.1088/1674-4926/42/1/014103)
- [13] Xie Q., Pan X., Luo W., Shuai Y., Wu C., Wang J., Huang S., Luo W., Zhang W. / Effects of Ar^+ irradiation on the performance of memristor based on single-crystalline LiNbO_3 thin film // *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*. – 2021. – V. 32. – P. 20817–20826. DOI: [10.1007/s10854-021-06595-x](https://doi.org/10.1007/s10854-021-06595-x)
- [14] Zhang Y., Tang G., Feng P., Kang K., Tang X., Li M., Hu W. / Neutron radiation-resistant aluminum nitride memristor // *Applied Physics Letters*. – 2022. – V. 121. – P. 163502. DOI: [10.1063/5.0107956/2834552](https://doi.org/10.1063/5.0107956/2834552)
- [15] Pattnaik D.P., Andrews C., Cropper M.D., Gabbitas A., Balanov A.G., Savel'ev S., Borisov P. / Gamma radiation-induced nanodefects in diffusive memristors and artificial neurons // *Nanoscale*. – 2023. – V. 15. – P. 15665–15674. DOI: [10.1039/D3NR01853A](https://doi.org/10.1039/D3NR01853A)
- [16] Maldonado D., Cantudo A., Guseinov D.V., Koryazhkina M.N., Okulich E.V., Tetelbaum D.I., Bartevo N.O., Danchenko N.G., Pikar V.A., Teterevko A.V., Jiménez-Molinos F., Mikhaylov A.N., Roldán J.B. / A statistical and modeling study on the effects of radiation on $\text{Au/Ta/ZrO}_2(\text{Y})/\text{Pt/Ti}$ memristive devices // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2025. – V. 191. – P. 115909. DOI: [10.1016/j.chaos.2024.115909](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.115909)
- [17] Koryazhkina M.N., Filatov D.O., Shishmakova V.A., Shenina M.E., Belov A.I., Antonov I.N., Kotomina V.E., Mikhaylov A.N., Gorshkov O.N., Agudov N.V., Guarcello C., Carollo A., Spagnolo B. / Resistive state relaxation time in $\text{ZrO}_2(\text{Y})$ -based memristive devices under the influence of external noise // *Chaos, Solitons & Fractals*. – 2022. – V. 162. – P. 112459. DOI: [10.1016/j.chaos.2022.112459](https://doi.org/10.1016/j.chaos.2022.112459)
- [18] A.V. Telnov, N.V. Zavyalov, Ju.A. Khokhlov, M.L. Smetanin, D.N. Shadrin, N.P. Tarantasov, N.V. Zavyalov, A. G. Liakumovich, F.K. Miryasova et al. Radiation degradation of spent butyl rubbers/ *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 63, Numbers 3-6, March 2002, P.245-248.
- [19] Zavyalov N.V., Khokhlov Yu.A., Telnov A.V. et al. Electron Linear Accelerator LU-10-20// XVIII International Linac Conference, Compendium of Scientific Linacs.- Geneva.- 26-30 aug.- 1996.- p.159.
- [20] Завьялов Н.В., Тельнов А.В., Хохлов Ю.А. и др. Промышленный линейный ускоритель электронов ЛУ-10-20// *Материалы XV Всесоюзного семинара по линейным ускорителям заряженных частиц*. -ВАНИТ.-Сер. Ядерно-физические исследования.-Вып.2,3(29,30), 1997, С.39-41.
- [21] Sushkov A.A., Pavlov D.A., Andrianov A.I., Shengurov V.G., Denisov S.A., Chalkov V.Yu., Kriukov R.N., Baidus N.V., Yurasov D.V., Rykov A.V. / Comparison of III–V Heterostructures Grown on Ge/Si, Ge/SOI, and GaAs // *Semiconductors*. – 2022. – V. 56. – P. 122–133. DOI: [10.1134/S1063782622010171](https://doi.org/10.1134/S1063782622010171)
- [22] Круглов А.В., Серов Д.А., Белов А.И., Коряжкина М.Н., Антонов И.Н., Зубков С.Ю., Крюков Р.Н., Михайлов А.Н., Филатов Д.О., Горшков О.Н. / Мемристоры для энергонезависимой резистивной памяти на основе двухслойного диэлектрика $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{ZrO}_2(\text{Y})$ // *Журнал технической физики*. – 2024. – Т. 94. – С. 1833–1842. DOI: [10.61011/JTF.2024.11.59100.204-24](https://doi.org/10.61011/JTF.2024.11.59100.204-24)
- [23] Житник А.К., Донской Е.Н., Огнев С.П., Горбунов А.В., Залялов А.Н., Иванов Н.В., Малькин А.Г., Рослов В.И., Семенова Т.В., Субботин А.Н. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ СМК № 2011610500. ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ» // Зарегистрировано в реестре программ для ЭВМ 11 января 2011 г.

[24] Петров А.Г., Швецов-Шиловский И.И., Шмаков С.Б., Уланова А.В., Боруздина А.Б. Сравнительный анализ стойкости резистивной и других видов энергонезависимой памяти к воздействию ионизирующего излучения космического пространства. // Безопасность информационных технологий. –IT Security, том 29, № 2, 2022, С.100-111.