



РФЯЦ-ВНИИЭФ
РОСАТОМ

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

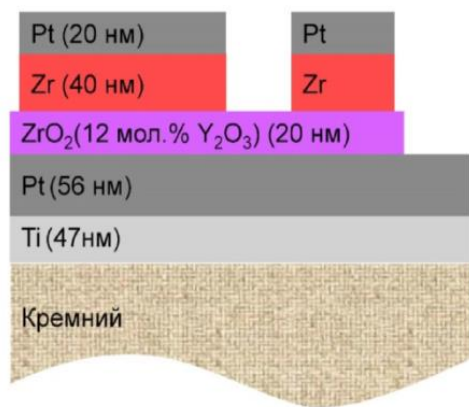
¹ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

²Нижегородский государственный университет
им. Н.И. Лобачевского

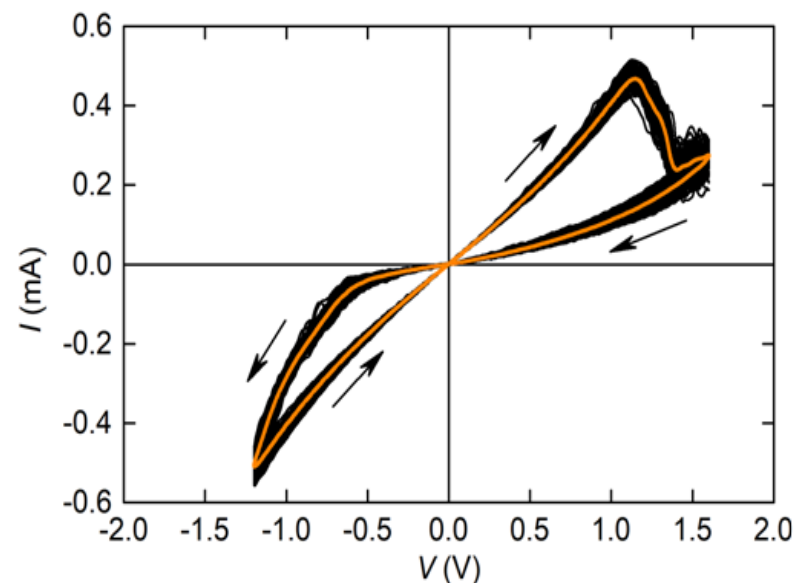
г. Снежинск
2025

В данной работе представлены результаты исследования влияния ионизирующего излучения интегрированных в стандартный процесс изготовления КМОП мемристивных структур на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$.

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). Активная площадь мемристивного устройства составляла $10 \times 10 \text{ мкм}^2$.

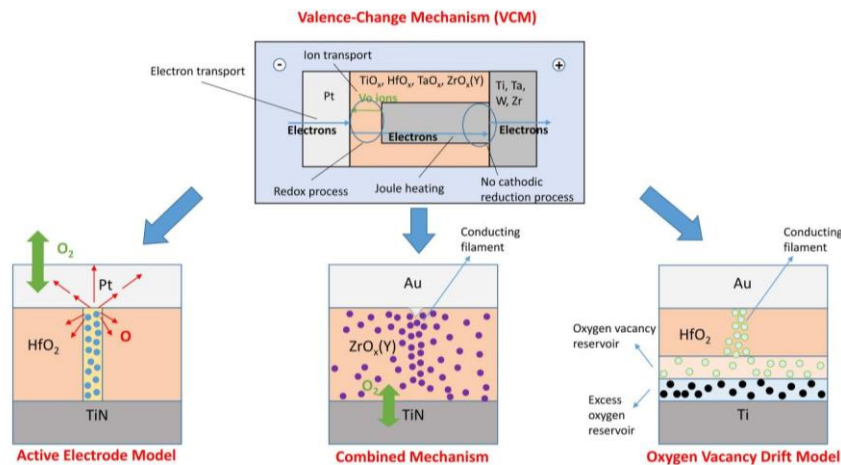


Структура мемристивных устройств

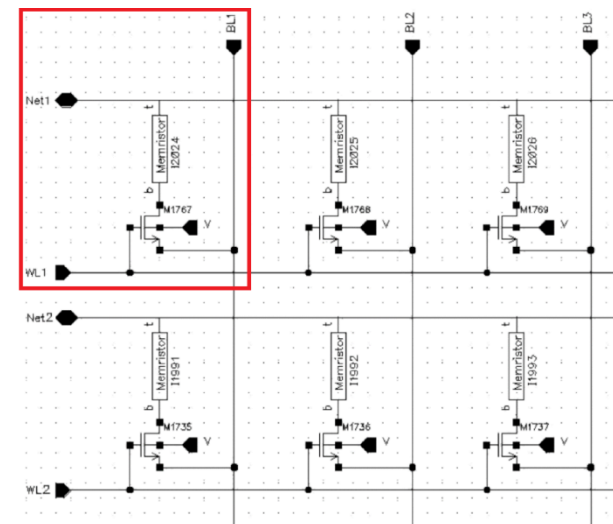


Типичные ВАХ (черный цвет)
тонкопленочных структур MOM на основе
 $\text{ZrO}_2(\text{Y})$, полученные в схеме без
ограничителя тока, и усредненная по 100 ВАХ
кривая (оранжевый цвет)

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 изготовленного в рамках базового технологического процесса КМОП КНИ с проектными нормами 350 нм.



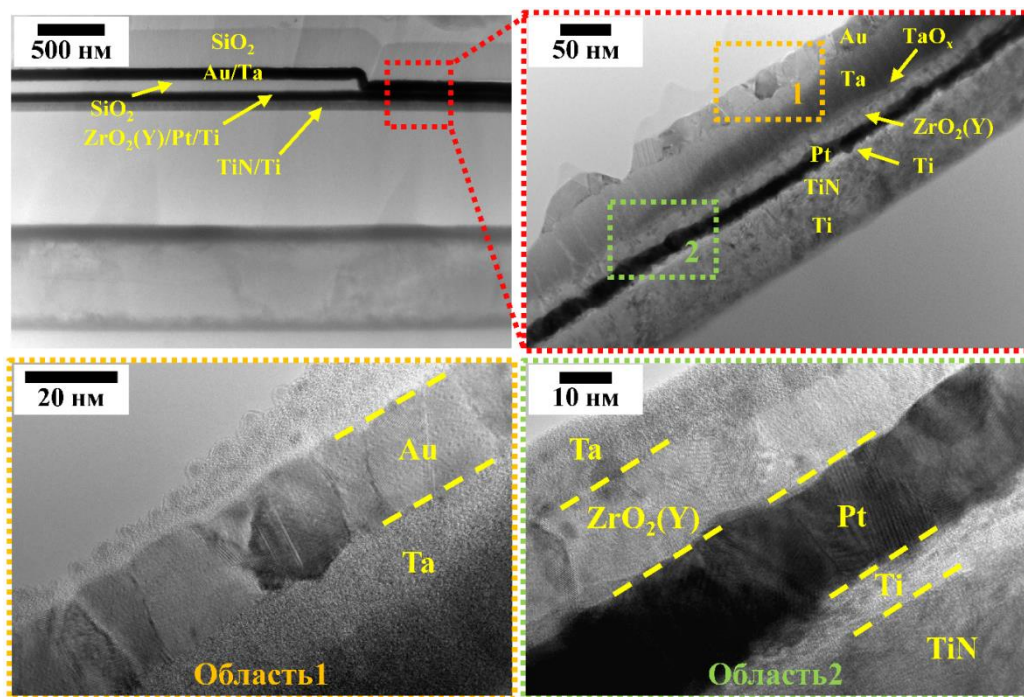
Схематическое изображение основных процессов, ответственных за РП типа VCM



Электрическая схема одного мемристивного устройства (в красном квадрате) в составе матрицы кросс-бар 1Т1М

Исследование поперечного среза мемристивной структуры выполнено с использованием просвечивающего электронного микроскопа (ПЭМ) JEOL JEM-2100F.

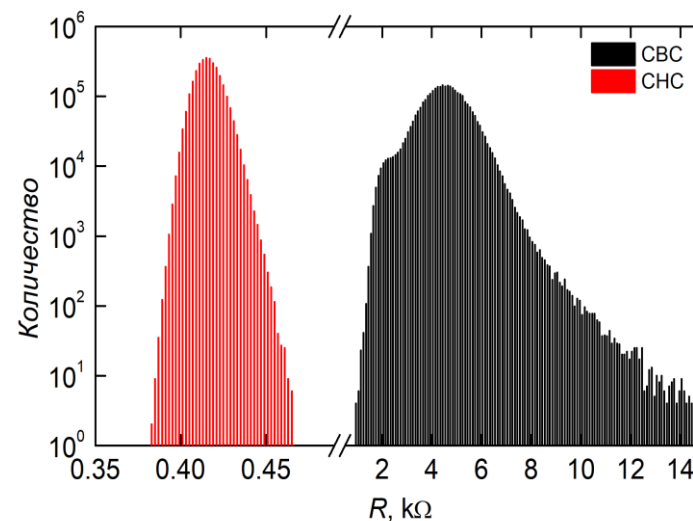
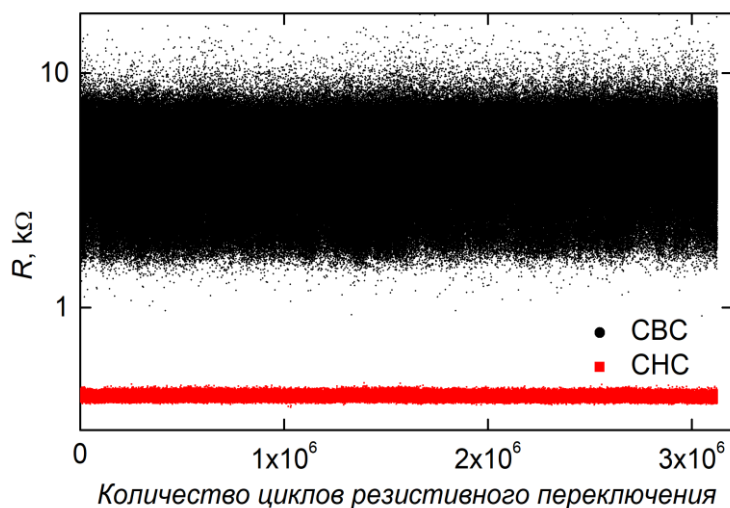
Обнаружено обогащение слоя Ta кислородом, особенно в области границы раздела Ta/ZrO₂(Y₂O₃), которое играет важную роль в процессах РП.



Изображения поперечного среза мемристивного устройства, полученные методом ПЭМ

Исследование выносливости мемристивных устройств к многократному резистивному переключению (РП) в низкотоковом режиме проводилось с использованием многофункционального устройства сбора данных.

Исследованные мемристивные устройства в низкотоковом режиме демонстрировали не менее $3 \cdot 10^6$ циклов РП без существенной деградации.



Выносливость к многократному РП мемристивного устройства (а) и соответствующие распределения резистивных состояний (б). Данные получены в низкотоковом 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 СНС и СВС, соответственно; амплитуда импульсов чтения составляла +0,3 В

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

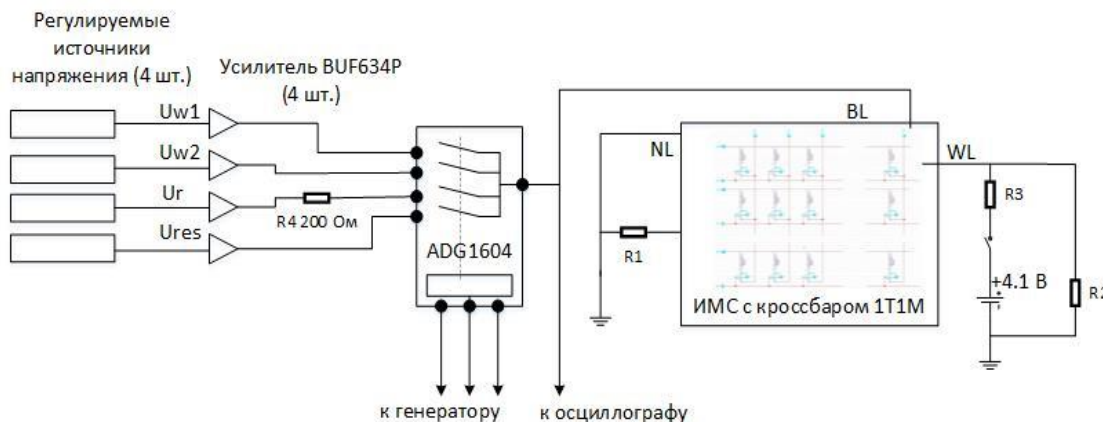
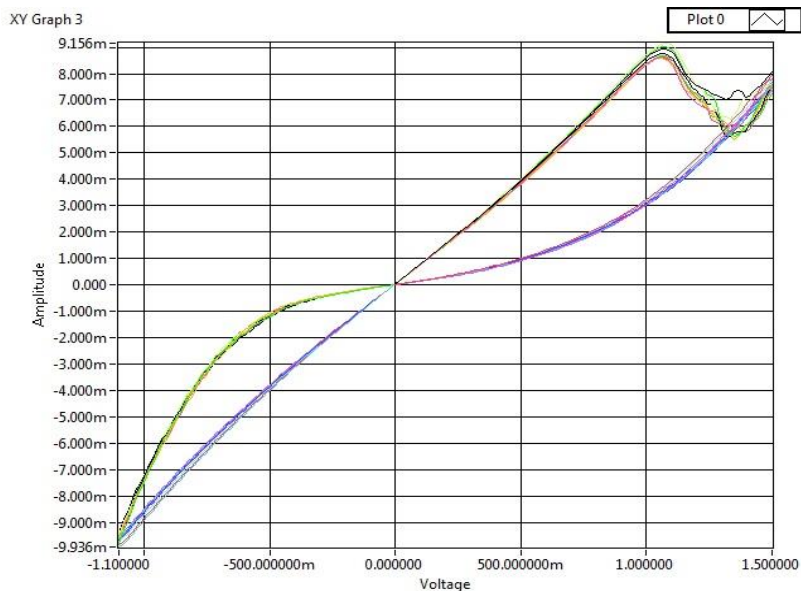
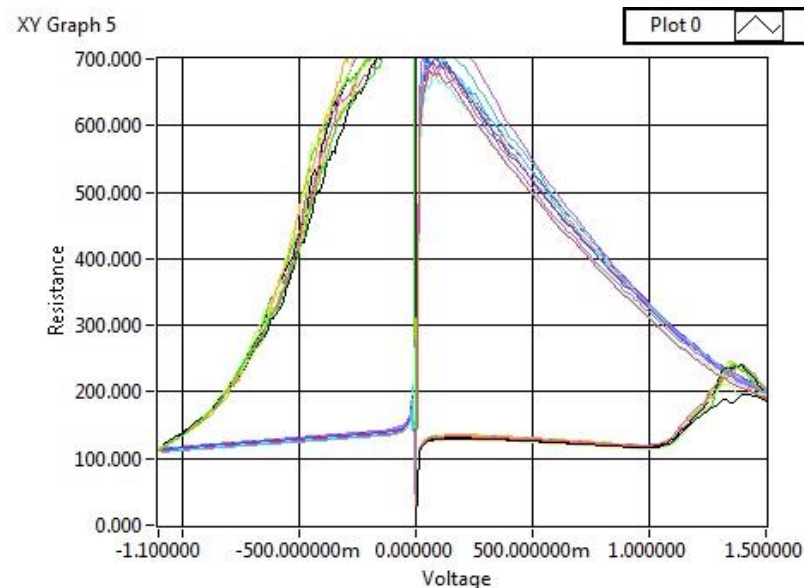


Схема разработанного ПАК для исследования параметров РП мемристивных устройств в высокотоковом импульсном режиме

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



(а)

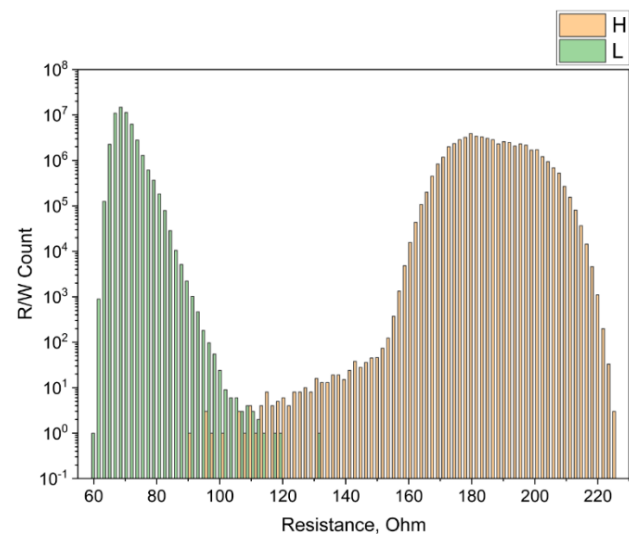
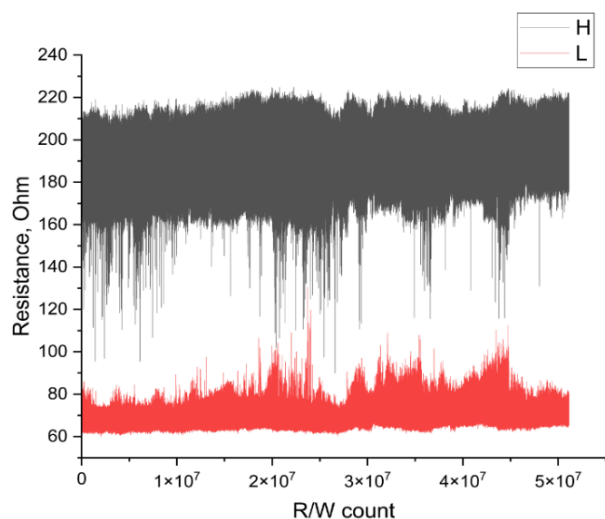


(б)

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

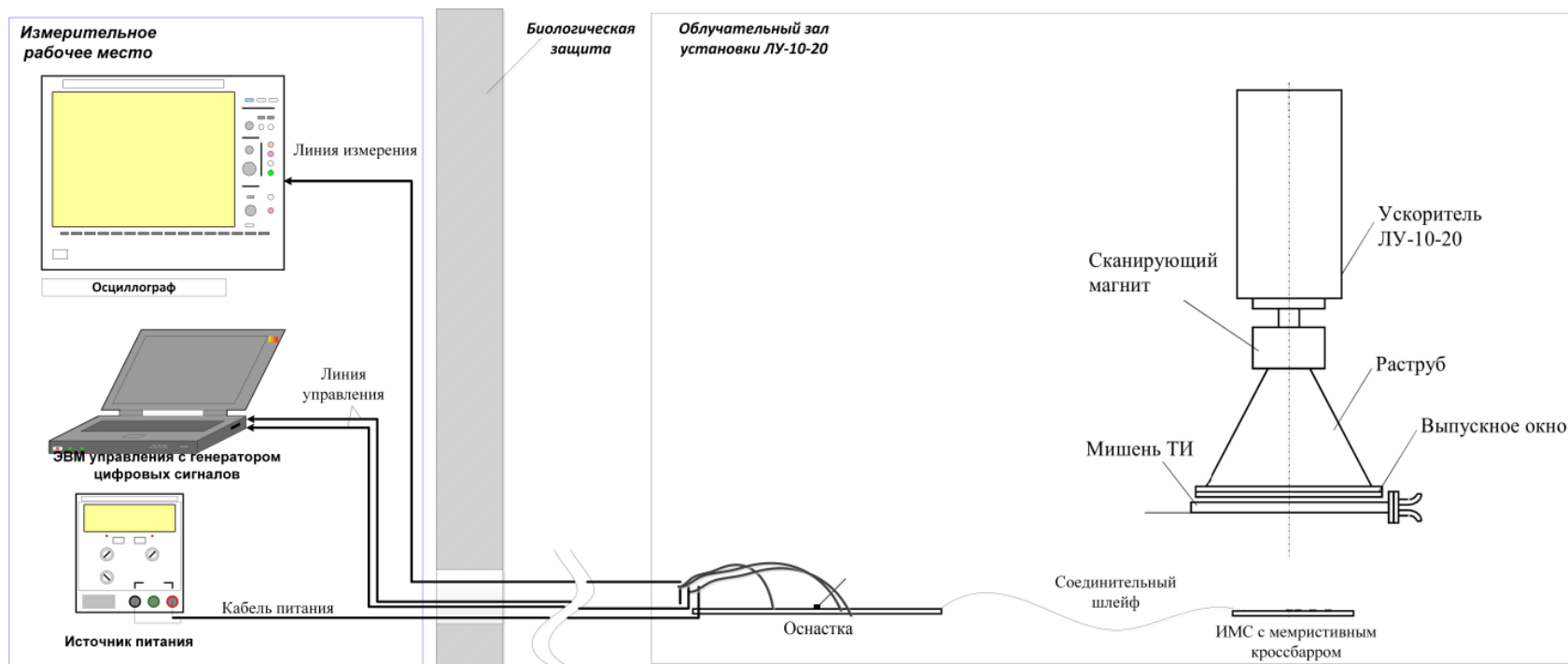
Проведены исследования влияния длительности и амплитуды импульсов записи на параметры РП в высокотокковом режиме.

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



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

Проведено исследование воздействия тормозного излучения на параметры РП мемристивных устройств, выполненные с использованием разработанного ПАК и ускорителя электронов ЛУ-10-20.



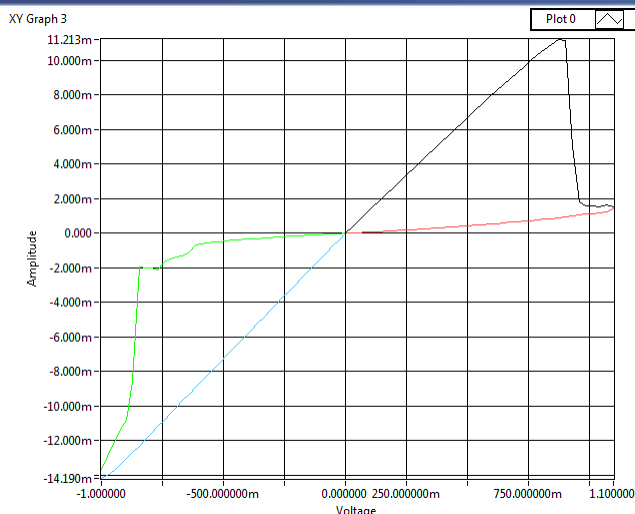
Схематическое представление исследования воздействия тормозного излучения на параметры РП мемристивных устройств

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

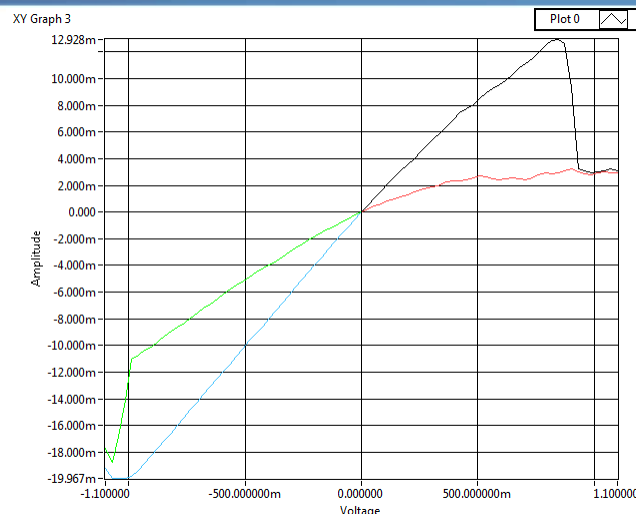
Воздействие излучением проводилось в три сеанса. В ходе первого сеанса исследовалось влияние воздействия излучения на параметры РП мемристивного устройства № 1, а ходе второго и третьего сеансов – на параметры РП мемристивного устройства № 2. При этом оба мемристивных устройства во время всего эксперимента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

Сеанс	Реализованная экспозиционная доза, кР	Средняя мощность экспозиционной дозы, кР/с	Суммарная реализованная экспозиционная доза, кР
1	$(12 \pm 4) \cdot 10^2$	0,31	$(12 \pm 4) \cdot 10^2$
2	$(9,2 \pm 1,4) \cdot 10^2$	0,31	$(21 \pm 8) \cdot 10^2$
3	$(12,7 \pm 1,5) \cdot 10^2$	0,35	$(3,4 \pm 1,4) \cdot 10^3$

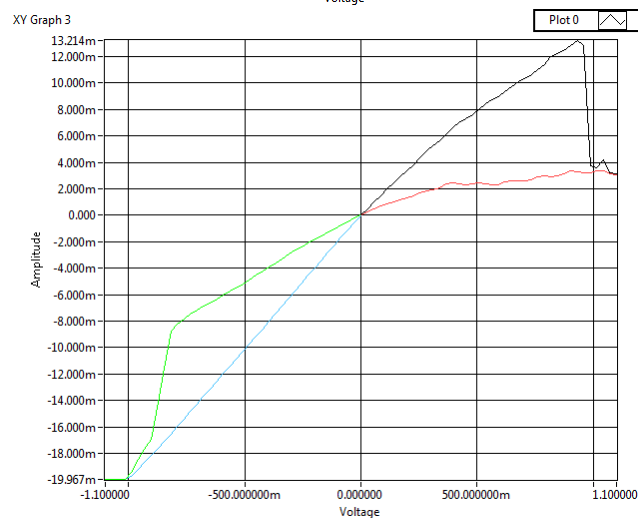
(а)



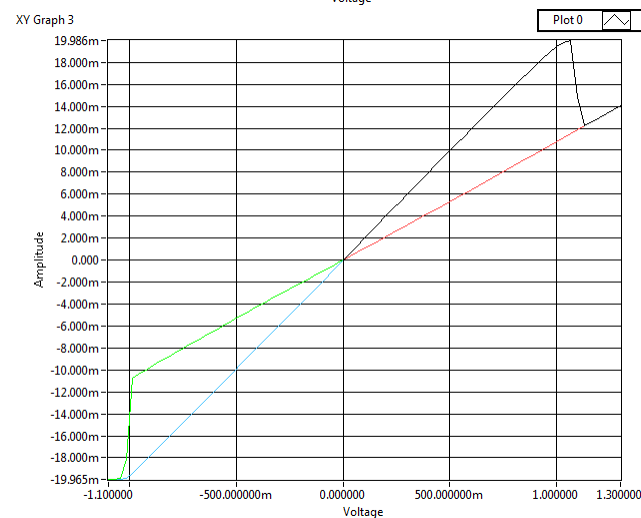
(б)



(в)



(г)



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

С целью оценки стойкости исследованных мемристивных структур к воздействию излучения 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.

№	Материал слоя мемристивной структуры	Толщина слоя мемристивной структуры	Плотность материала, г/см ³	Полная реализованная поглощённая доза, кДж/кг (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	5,95	33,3
4	Pt	40 нм	21,45	55,0
5	Ti	10 нм	4,5	30,3
6	SiO ₂	1,1 мм	2,2	не вычислялась

Представленный в данной работе программно-аппаратный комплекс использован для определения и визуализации изменений в режиме реального времени параметров резистивного переключения мемристивных устройств на основе $\text{ZrO}_2(\text{Y}_2\text{O}_3)$ в составе матрицы кросс-бар 1Т1М, в том числе в условиях воздействия ионизирующего излучения.

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

Установлено, что мемристивные устройства сохраняют свою работоспособность после воздействия тормозного излучения с суммарной экспозиционной дозой не менее 3,4 МР без существенного изменения параметров резистивного переключения, что в единицах полной реализованной поглощённой дозы соответствует величине, равной ~ 33 кГр. Таким образом стойкость исследованных мемристивных устройств не уступает показателям, полученным другими научными группами.

Спасибо за внимание!