

# ИССЛЕДОВАНИЕ СТОЙКОСТИ МЕМРИСТОРНЫХ СТРУКТУР К ИОНИЗИРУЮЩЕМУ И ДЕФЕКТООБРАЗУЮЩЕМУ ОБЛУЧЕНИЮ

Д.С. Королев, А.Н. Михайлов, А.И. Белов, Д.В. Гусейнов, Е.В. Окулич, И.Н. Антонов,  
В.К. Васильев, О.Н. Горшков, А.П. Касаткин, Д.И. Тетельбаум  
Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского,  
пр. Гагарина, 23/3, Нижний Новгород, 603950, Россия, dmkorolev@phys.unn.ru,  
mian@nifti.unn.ru, belov@nifti.unn.ru, guseinov@phys.unn.ru, jenuha@ya.ru, ivant@nifti.unn.ru,  
vvk@nifti.unn.ru, gorshkov@nifti.unn.ru, kasatkin@nifti.unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

Для структур Au/SiO<sub>x</sub>/TiN, проявляющих эффект резистивного переключения, рассчитаны режимы облучения ионами средних энергий, которые обеспечивают имитацию ионизирующего и дефектообразующего облучения при облучении космическими протонами и реакторными нейтронами. Предварительные эксперименты показали, что исследуемые мемристоры демонстрируют высокую стойкость параметров резистивного переключения к ионному облучению.

## Введение

В настоящее время актуальной является задача создания нового поколения перепрограммируемых постоянных запоминающих устройств, принцип действия которых основан на использовании двух устойчивых состояний материала (чаще всего диэлектрика): состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС), многократное переключение между которыми осуществляется путем приложения внешних импульсов напряжения определенной полярности.

Зарубежным аналогом таких элементов энергонезависимой резистивной памяти являются устройства RRAM (Resistive Random Access Memory) или так называемые мемристоры [1]. Ожидается, что в ближайшее время память на основе мемристоров может заменить всю иерархию используемой компьютерной памяти. В то же время, важной задачей является создание таких устройств с повышенной спецстойкостью, в частности, стойкостью к космическому и реакторному облучению.

В общем случае выделяют два вида радиационного воздействия – дефектообразующее (преобладающее при реакторном облучении быстрыми нейтронами) и ионизирующее (преобладающее в случае протонного и гамма-облучения). В данной работе рассмотрены характеристики резистивного переключения (РП) при облучении ионами средних энергий в режимах, обеспечивающих имитацию облучения космическими протонами с энергией 10 МэВ или быстрыми реакторными нейтронами с энергией ~ 1 МэВ структур металл-диэлектрик-металл (МДМ) на основе оксида кремния.

## Основная часть

Исследуемая тонкопленочная структура формировалась на промышленной подложке TiN (25 нм) / Ti (25 нм) / SiO<sub>2</sub> (500 нм) / Si. Пленки SiO<sub>x</sub> толщиной 10, 40 и 60 нм осаждалась методом ВЧ-магнетронного распыления мишени из плавленого кварца на установке MagSputt 3G-2 (Torr International). Верхние электроды Au (40 нм) наносились через жесткую маску методом магнетронного распыления на постоянном токе.

Исследуемые мемристорные структуры демонстрируют воспроизводимый эффект резистивного переключения между СНС и СВС (рис. 1).

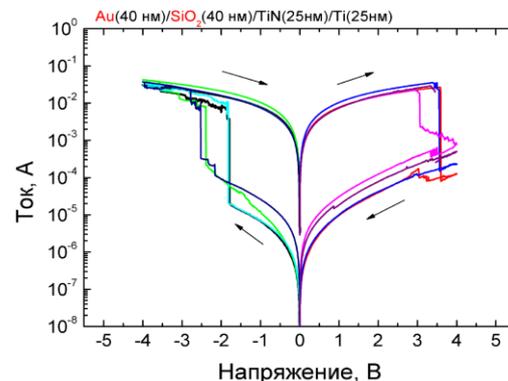


Рис. 1. ВАХ структур Au/SiO<sub>x</sub> (40 нм)/TiN.

Для имитации ионизирующего облучения космическими протонами с энергией 10 МэВ использовано облучение ионами H<sup>+</sup> с энергией 150 кэВ. При этом необходимо было рассчитать дозу ионов H<sup>+</sup>, при которой в оксиде реализуются ионизационные потери энергии на единицу пути такие же, как при облучении космическими протонами. Для расчетов потерь энергии была использована программа SRIM ([www.srim.org](http://www.srim.org)). Затем проводилось сравнение этих потерь, и определялись дозы ионов H<sup>+</sup>, при которых в рабочем слое оксида суммарные потери такие же, как при заданной дозе космических протонов.

Важным обстоятельством для возможности ионно-лучевой имитации стойкости тонкопленочных наноструктур к нейтронному облучению является то, что типичные размеры каскадов смещения при нейтронном (реакторном) облучении оказываются сравнимыми с размерами элементов наноструктуры. Так, в случае облучения кремния для нейтронов с энергией порядка 1 МэВ средняя энергия, переданная атомам отдачи кремния, составляет ~ 100 кэВ; пробег атома отдачи с такой энергией в кремнии составляет ~ 100 нм, а типичный поперечный размер каскада смещения – 10 нм. В случае многокомпонентно-

сти слоев структуры надо учитывать атомы каждого сорта с учетом химического состава слоев.

Поскольку при облучении нейтронами радиационные дефекты образуются за счет атомов отдачи с энергиями порядка 100 кэВ, для имитации нейтронного облучения ионным пучком наиболее целесообразно применять облучение ионами средних энергий [2]. Так как нас интересовало радиационное повреждение рабочего слоя оксида, в качестве имитирующих ионов взяты ионы входящих в оксид элементов. Поэтому для имитации нейтронного облучения выбраны ионы  $\text{Si}^+$  и  $\text{O}^+$  с энергией 150 кэВ.

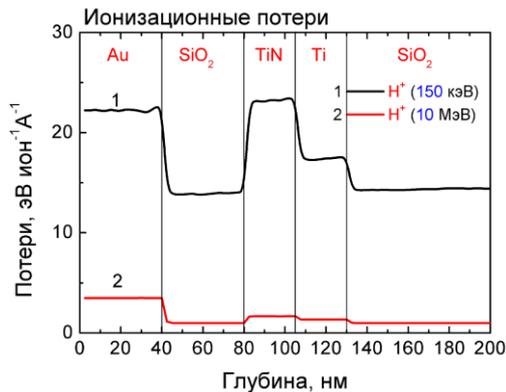


Рис. 2. Ионизационные потери при облучении структур Au/SiO<sub>x</sub> (40 нм)/TiN протонами с энергией 150 кэВ и космическими протонами со средней энергией 10 МэВ.

На рис. 2 приведены рассчитанные по программе SRIM распределения ионизационных потерь при облучении протонами с энергией 10 МэВ и ионами водорода с энергией 150 кэВ. Установлено, что для протонов с энергией 10 МэВ в середине оксидного слоя ионизационные потери в 14 раз меньше, чем потери ионов  $\text{H}^+$  с энергией 150 кэВ. Отсюда следует, что для имитации воздействия космических протонов с флюенсом  $1 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  достаточно доз ионного облучения ( $\text{H}^+$ , 150 кэВ) в диапазоне  $7.2 \cdot 10^{11} - 7.2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-2}$ .

На рис. 3 приведены рассчитанные распределения вакансий при облучении ионами  $\text{Si}^+$  и  $\text{O}^+$  с энергией 150 кэВ. Там же горизонтальными отрезками обозначены расчетные концентрации вакансий при облучении нейтронами с флюенсом в диапазоне  $10^{15} - 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Дозы ионов выбраны так, чтобы концентрации созданных ими вакансий

на глубине, соответствующей середине рабочего слоя оксида совпадали с концентрацией вакансий при нейтронном облучении с каждой из указанных доз.

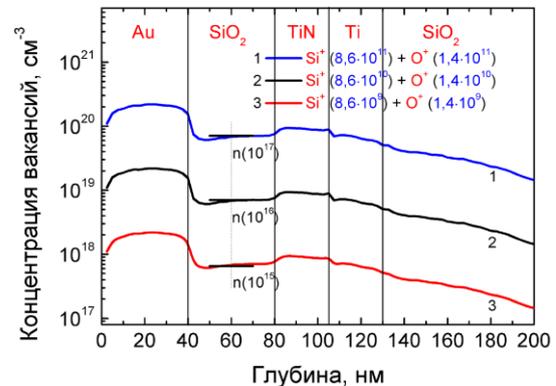


Рис. 3. Распределение концентрации вакансий в структуре Au/SiO<sub>x</sub> (40 нм)/TiN, облученных  $\text{Si}^+$  и  $\text{O}^+$ .

Предварительные результаты по облучению структур МДМ ионами  $\text{H}^+$ ,  $\text{O}^+$  и  $\text{Si}^+$  показали, что РП сохраняется при облучении в режимах, соответствующих выбранным условиям космического и нейтронного облучения.

## Заключение

Сравнительный анализ результатов компьютерного расчета позволил выбрать режимы облучения (энергия и доза) протонами ( $\text{H}^+$ ) и ионами ( $\text{Si}^+$ ,  $\text{O}^+$ ) средних энергий, которые обеспечивают имитацию дефектообразования при воздействии на МДМ-структуры соответственно космических протонов с флюенсом  $1 \cdot 10^{13} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$  и быстрых нейтронов с флюенсом  $1 \cdot 10^{15} - 1 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-2}$ . Результаты предварительных экспериментов подтвердили стойкость параметров изготовленных структур к радиационному воздействию.

Исследование поддержано Минобрнауки РФ (RFMEFI57514X0029).

## Список литературы

1. Chua L. // IEEE Trans. Circuit Theory. 1971. №18. P. 507.
2. Tetelbaum D.I., Guseinov D.V., Vasiliev V.K. et al. // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2014. V. 326. P. 41-44.

## STUDY OF TOLERANCE OF MEMRISTOR STRUCTURES TO IONIZING RADIATION AND DISPLACEMENT DAMAGE

Dmitry Korolev, Alexey Mikhaylov, Alexey Belov, Davud Guseinov, Eugenia Okulich, Ivan Antonov, Valeriy Vasiliev, Oleg Gorshkov, Alexandr Kasatkin, David Tetelbaum  
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23/3, Gagarin avenue, Nizhny Novgorod, Russia, 603950,  
dmkorolev@phys.unn.ru, mian@nifti.unn.ru, belov@nifti.unn.ru, guseinov@phys.unn.ru, jenuha@ya.ru,  
ivant@nifti.unn.ru, vvk@nifti.unn.ru, gorshkov@nifti.unn.ru, kasatkin@nifti.unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru

For the Au/SiO<sub>x</sub>/TiN memristor structures, the regimes of irradiation with medium-energy ions were calculated. These regimes provide a simulation of ionizing and displacement damage after irradiation by cosmic protons and reactor neutrons. The preliminary experiments have shown that the studied structures demonstrate high tolerance of the resistive switching parameters to ion irradiation.