

ВЛИЯНИЕ ИОННО-ЛУЧЕВОЙ ОБРАБОТКИ НА ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕКТРОФОРМОВКИ И РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ МЕМРИСТИВНЫХ НАНОСТРУКТУР

Д.С. Королев, Е.В. Окулич, Р.А. Шуйский, В.И. Окулич, А.И. Белов, И.Н. Антонов,
В.К. Васильев, О.Н. Горшков, Д.И. Тетельбаум, А.Н. Михайлов
Нижегородский государственный университет имени Н.И. Лобачевского,
пр. Гагарина 23/3, 603950 Нижний Новгород, Россия, dmkorolev@phys.unn.ru, jenuha@ya.ru,
ryslan.shuyski@mail.ru, victorokulich@mail.ru, belov@nifti.unn.ru, ivant@nifti.unn.ru,
vvk@nifti.unn.ru, gorshkov@nifti.unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru, mian@nifti.unn.ru

Проанализированы закономерности и механизмы влияния ионного облучения (Xe^+ , 5 кэВ) на электрофизические параметры мемристивных наноструктур на основе пленок SiO_2 . Установлено, что облучение пленок оптимальной дозой (менее 10^{12} см^{-2}) снижает степень разброса параметров электроформовки и резистивного переключения, что достигается за счет создания определенной концентрации неоднородностей (скопления точечных дефектов) на границах раздела оксидной пленки с электродами, служащих «зародышами» для формирования проводящих каналов (филаментов), с разрывом и восстановлением которых связано резистивное переключение. Характером неоднородностей, их концентрацией и размерами можно управлять путем выбора массы иона, дозы и энергии.

Введение

Активное исследование мемристивных структур типа «металл-диэлектрик-металл», проявляющих эффект резистивного переключения и памяти, показало, что они могут обнаруживать свойства биологических синапсов: синаптическая пластичность, кратковременная и долговременная фасилитация/депрессия, STDP (spike-timing-dependent plasticity). Совместно с уже разработанными генераторами нейроноподобной активности, такие структуры могут быть использованы для построения искусственных нейронных сетей. При этом материалы и технологии, используемые для создания мемристивных структур, должны быть совместимы со стандартной КМОП-технологией.

Принцип действия мемристивных структур основан на использовании различных стабильных состояний материала: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС), многократное резистивное переключение (РП) между которыми осуществляется путем приложения внешних импульсов напряжения определенной полярности. При этом между этими устойчивыми состояниями существует большое количество промежуточных, что важно с точки зрения использования таких устройств в качестве аналога синаптического соединения нервных клеток. За процесс РП в оксидных материалах чаще всего ответственны процессы окисления и восстановления, происходящие в наноразмерных областях проводящих каналов (филаментов), примыкающих к одному из электродов структуры. По причине стохастической природы процессов зарождения и перестройки структуры филаментов под действием электрического поля и джоулевого нагрева в процессе РП может наблюдаться значительный разброс параметров, что ограничивает практическое использование мемристивных наноструктур.

В настоящей работе исследована возможность управления параметрами мемристивных наноструктур с применением ионного облучения для повышения стабильности и воспроизводимости характеристик резистивного переключения.

Основная часть

Для исследований были выбраны мемристивные структуры на основе пленок SiO_2 (40 нм), полученных на окисленных подложках кремния со стандартной металлизацией (TiN (25 нм)/ Ti (25 нм)/ SiO_2 (970 нм)/ Si) методом высокочастотного магнетронного распыления мишени из плавленого кварца. Верхние электроды Au (40 нм) наносились через маску методом магнетронного распыления на постоянном токе в атмосфере аргона при температуре подложки 200°C . Площадь электродов составляла $1 \cdot 10^{-3}$ и $1 \cdot 10^{-2} \text{ см}^2$.

Для контролируемого внесения мест потенциального формирования филаментов в рабочем оксиде SiO_2 с целью снижения разбросов параметров РП, связанного со случайным неконтролируемым характером зарождения филаментов, использовалась низкоэнергетическая имплантация ионов Xe^+ (5 кэВ). Предварительно были выполнены расчеты с использованием программы SRIM (www.srim.org) пространственного распределения вакансий в каскадах атомных смещений в рабочем диэлектрике SiO_2 при таком облучении. Эти расчеты (с построением изоконцентрационных профилей вакансий) позволили определить дозы облучения, при которых каскады в среднем отстоят друг от друга на заданные расстояния и не перекрываются. Так, максимальный латеральный радиус каскада, соответствующий уменьшению средней концентрации кислородных вакансий в 100 раз, составил 4,6 нм. Максимальная доза рассчитывалась из условия, что среднее расстояние между каскадами равно удвоенному радиусу зародышей, и составила $1 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$. При указанной энергии ионов они генерируют каскады смещения (скопления дефектов) в приповерхностном слое SiO_2 на глубинах до 9 нм.

Имплантация в рабочий диэлектрик SiO_2 ионов Xe^+ (5 кэВ) и рассчитанными дозами в интервале ($1 \cdot 10^{11} - 1 \cdot 10^{14}$) см^{-2} проводилась на ионно-лучевой установке ИЛУ-200 до нанесения верхних электродов. Измерение вольтамперных характеристик (ВАХ) проводилось на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A в режиме развертки напряжения.

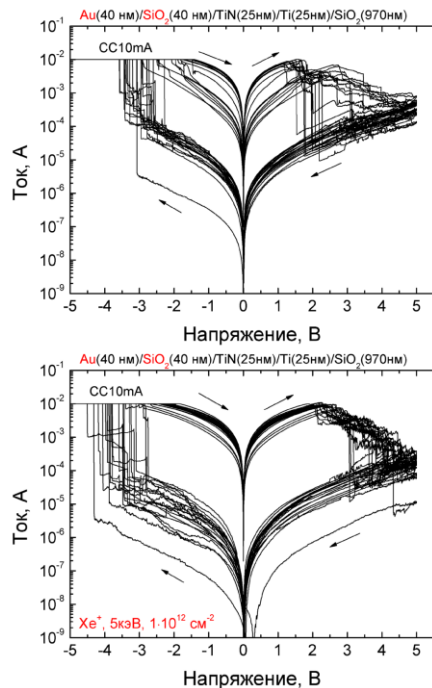


Рис. 1. Типичные ВАХ мемристивных структур на основе пленок SiO₂, необлученных и облученных He⁺

При исследовании электроформовки структур, которая реализуется при первых развертках по напряжению в отрицательной области, было установлено, что среднее значение напряжения формовки не изменяется, однако разброс по напряжению существенно снижается (среднее напряжение формовки -2.9 ± 0.4 В по сравнению со значением -3.0 ± 1.6 без облучения) за счет того, что снижается фактор неконтролируемого зарождения филаментов и создаются практически одинаковые условия для процесса формовки.

На рисунке 1 приведены примеры ВАХ в режиме последующего циклического РП с характерным разбросом параметров для мемристивной структуры на основе SiO₂ без облучения и после облучения ионами Хе с дозой $1 \cdot 10^{12}$ см⁻².

Видно, что в среднем напряжения переключения между СНС и СВС, отношение сопротивлений в этих состояниях практически не зависит от ионного облучения, однако уменьшается разброс низкоомных резистивных состояний, который определяется параметрами проводящих филаментов. Возможно, это связано с тем, что ионное облучение оказывает влияние не только на процесс зарождения филаментов, но и на их исходную структуру и геометрию, хотя в целом процесс РП между состояниями продолжает носить стохастический характер, который необходимо учитывать при использовании мемристивных структур в качестве весовых коэффициентов традиционных нейронных сетей. Аналогичные ВАХ наблюдаются и для остальных образцов, облученных ионами Хе в исследуемом интервале доз.

Заключение

Таким образом, низкоэнергетическая имплантация ионов Хе уменьшает разброс значений напряжения электроформовки за счет того, что формируемые каскады смещения снижают роль случайного, неконтролируемого процесса зарождения филаментов и создают приблизительно одинаковые начальные условия для роста филаментов. Однако в процессе последующего резистивного переключения определенный разброс параметров сохраняется. Это обусловлено тем, что образовавшиеся в каскадах смещения дефекты влияют в основном лишь на процесс формовки, который определяет исходные параметры филаментов, а последующие акты переключения из низкоомного в высокоомное состояние по-прежнему сохраняют случайный стохастический характер. Это в значительной степени может быть обусловлено флуктуациями состава пленок оксида вблизи филамента. Чтобы уменьшить влияние этого фактора, можно использовать ионную имплантацию атомов (Si и O) в изготовленные пленки.

Исследование поддержано Российским научным фондом (16-19-00144).

EFFECT OF ION-BEAM PROCESSING ON THE PARAMETERS OF ELECTROFORMING AND RESISTIVE SWITCHING OF MEMRISTIVE NANOSTRUCTURES

Dmitry Korolev, Eugenia Okulich, Ruslan Shuyski, Victor Okulich, Alexey Belov, Ivan Antonov, Valeriy Vasiliev, Oleg Gorshkov, David Tetelbaum, Alexey Mikhaylov
Lobachevsky State University of Nizhny Novgorod, 23/3 Gagarin avenue, 603950 Nizhny Novgorod, Russia,
dmkorolev@phys.unn.ru, jenuha@ya.ru, rylsan.shuyski@mail.ru, victorokulich@mail.ru, belov@nifti.unn.ru,
ivant@nifti.unn.ru, vvk@nifti.unn.ru, gorshkov@nifti.unn.ru, tetelbaum@phys.unn.ru, mian@nifti.unn.ru

The regularities and mechanisms of the ion irradiation (Xe⁺, 5 keV) effect on electrophysical parameters of memristive nanostructures based on SiO₂ films have been analyzed. It is found that irradiation of films with optimum dose (less than 10^{12} cm⁻²) reduces the variability of electroforming and resistive switching parameters. This is achieved by creating a certain concentration of inhomogeneities (clusters of point defects) at the interface between oxide film and electrodes serving as "nucleus" for conductive channels (filaments), which are responsible for resistive switching. It is shown that the nature of the irregularities, their concentration and size can be controlled by selecting the ion mass, dose and energy.