



С. Н. Шевырталов, Д. А. Коива, А. Ю. Гойхман

**РЕЗИСТИВНОЕ БИПОЛЯРНОЕ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЕ  
В ТОНКОПЛЕНОЧНЫХ МЕМРИСТИВНЫХ СТРУКТУРАХ  
НА ОСНОВЕ Si-Ag**

Исследованы поверхностные и электрофизические свойства тонкопленочных многослойных структур мемристоров на основе Si/Ag, выращенных методом ионно-плазменного напыления. Разработан и оптимизирован метод формирования структур, представляющих собой равномерно распределенные кластеры Ag в матрице кремния. На полученных структурах были сняты вольт-амперные характеристики, демонстрирующие резистивное переключение.

*In this work were investigated surface and electrophysical properties of multilayer thin film structures based on Si/Ag, grown by Ion-Plasma Deposition method. There were developed and optimized method of structure formation, which consist of silver clusters in silicon medium. Current-voltage curves were observed on prepared structures and demonstrate resistive switching behavior.*

**Ключевые слова:** резистивное переключение, мемристор, атомно-силовая микроскопия, вольт-амперные характеристики.

**Key words:** resistive switching, memristor, atomic force microscopy, I-V characteristics.

Традиционная электроника состоит из трех базовых элементов цепи — резистора, конденсатора и катушки индуктивности. Они охарактеризованы связью двух из четырех фундаментальных переменных — током, напряжением, зарядом и потоком. В 1971 г. Леон Чуа, исходя из фундаментальных аргументов симметрии, обосновал теоретически возможное существование четвертого базового элемента — мемристора (память и сопротивление), описываемого связью между зарядом и магнитным потоком [1]. Спустя 37 лет в 2008 г. группа исследователей под руководством С. Уильямса предложила модель двухэлектродного устройства, основанного на принципах, описанных Чуа [2]. Явление резистивного переключения послужило предпосылкой создания совершенно нового класса устройств с функциональными свойствами, недоступными в традиционной электронике. Разработка наноразмерной ячейки памяти для памяти типа NVRAM (энергонезависимая память произвольного доступа) или RRAM (резистивная память произвольного доступа) являются лишь некоторыми возможными примерами использования мемристора [3; 4]

В данной работе проводилось исследование поверхностных и электрофизических свойств тонкопленочных многослойных структур мемристоров на основе Si/Ag, выращенных методом ионно-плазменного напыления.



Мемристор представляет собой пассивный элемент, состояние проводимости которого зависит от величины проходящего через него заряда. Пока величина заряда остается неизменной, мемристор ведет себя подобно резистору и демонстрирует линейные вольт-амперные характеристики. В зависимости от величины проходящего заряда или времени его прохождения мемристор может переходить из состояния с высокой проводимостью в состояние с низкой и наоборот, то есть демонстрировать резистивное переключение. Данное свойство называется мемристивностью и указывает на способность мемристора запоминать свое состояние после отключения напряжения [5].

Исследуемые в данной работе структуры приготавливались путем осаждения кластеров серебра в матрице кремния на поверхность кремниевых подложек, предварительно закрытых слоем платины (30 нм) методом ионно-плазменного напыления в одном вакуумном цикле. Последовательность процессов при этом следующая: в вакуумной камере, заранее откачанной криовакуумным насосом до рабочего давления  $3,3 \cdot 10^{-5}$  Па, расположены источник ионов кауфмановского типа [6], держатели мишеней и подложек; в процессе столкновительной или ударной ионизации в ионном источнике формируется плазма, при этом нейтрализатор, расположенный в камере источника, испускает электроны, балансируя количество и заряд ионов, которые покидают источник; поток частиц, преимущественно нейтрального заряда, вылетающих из источника с энергией 1000 eV, бомбардируют поверхность мишени напыляемого материала, выбивая атомы материала мишени в виде потока в сторону держателя подложек. В вакуумной камере предусмотрена возможность переключения мишеней с держателем до трех штук. Более подробно особенности данного метода роста наноразмерных структур описаны в работе [7]. Структуры выращены послойно, то есть, чередуя мишени Si и Ag, на подложке было сформировано многослойное покрытие, состоящее из 10 слоев кремния и 10 слоев серебра. При этом рост осуществлялся таким образом, что после каждого сплошного слоя кремния, толщиной порядка 1 нм, осаждались кластеры серебра. Средний размер этих кластеров составлял порядка 2,5 нм. Сверху на структуру был нанесен тонкий слой серебра ( $\approx 6$  нм), после чего через маску наносились платиновые контакты толщиной 30 нм с размерами  $15 \times 15$  мкм (рис. 1). Суммарная толщина структуры без контактов составила 27 нм. Состав конечного устройства был следующим от подложки: Si(KЭС)/Pt(30 нм)/Si-Ag(27 нм)/Ag(6 нм)/Pt(30 нм).

Для исследования состояния поверхности контактов был применен метод атомно-силовой микроскопии. В полуконтактном режиме сканировалась область с размерами  $70 \times 70$  мкм, после чего полученный скан обрабатывался в программном комплексе Gwyddion [8].

Сформированные контакты являются равномерными однородными и не соприкасаются друг с другом (рис. 2, 3).

Вольт-амперные характеристики также были получены методом атомно-силовой микроскопии в контактном режиме с использованием кантилеверов с проводящим покрытием Ti/Pt. На один из верхних контактов устанавливался зонд, на который подавалось напряжение. Нижний контакт при этом был заземлен (рис. 4).

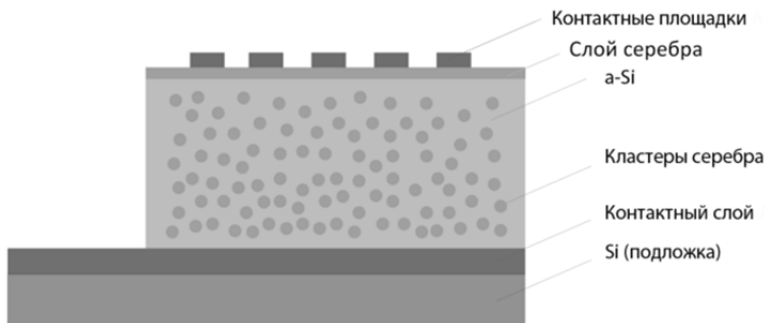


Рис. 1. Схематическое изображение мемристовой структуры

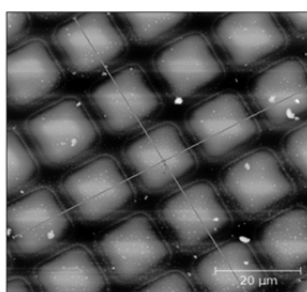


Рис. 2. Изображение контактов на поверхности структуры, полученное на атомно-силовом микроскопе (размер скана —  $70 \times 70$  мкм)

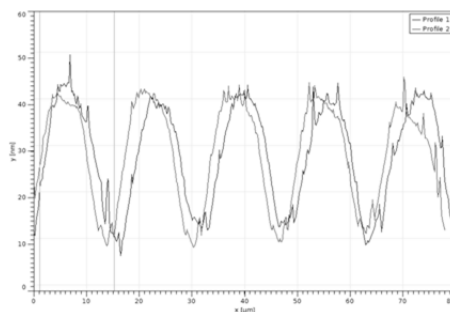


Рис. 3. Профиль, снятый с поверхности контактов

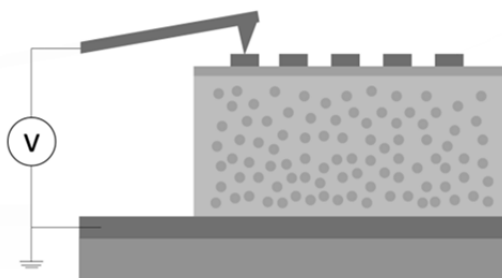


Рис. 4. Схема измерения вольт-амперных характеристик

Приложение постоянного напряжения в таком устройстве приводит к движению ионов серебра от верхнего слоя серебра через матрицу Si-Ag. В данном случае нанокластеры серебра в матрице кремния играют роль так называемых звеньев в формировании проводящих каналов.

На рисунке 5 изображены типичные вольт-амперные характеристики (ВАХ) исследуемой структуры, которые снимались при напряже-



нии от 2 В до -2 В, а токи были ограничены 10 нА, так как при больших токах проводящее покрытие зонда может выгореть. Первое включение наблюдается при напряжении 1,1 В, то есть устройство переходит из состояния с низкой проводимостью в состояние с высокой. В дальнейшем наблюдается линейная ВАХ. Выключение происходит при -1,3 В, при этом устройство показывает выпрямительную ВАХ. Оно демонстрирует стабильное биполярное переключение и хорошую повторяемость при малых напряжениях включения и выключения.

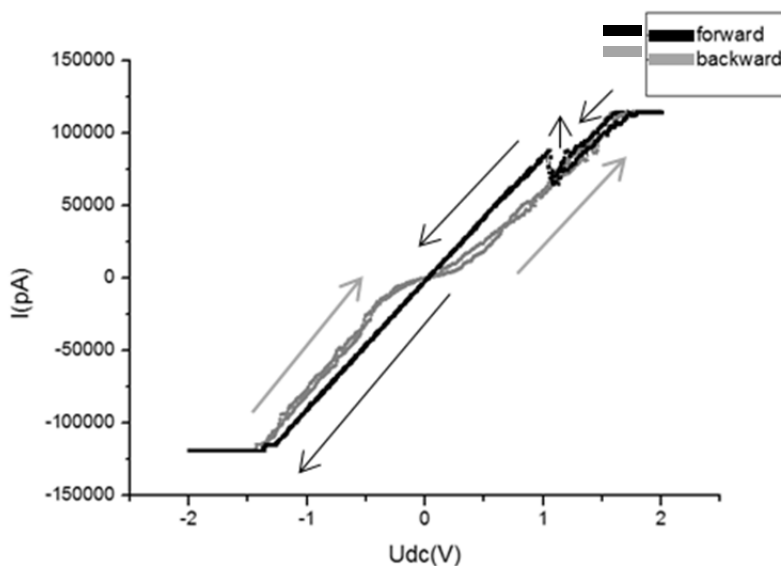


Рис. 5. Экспериментально полученные вольт-амперные характеристики мемристивной структуры, демонстрирующие резистивное переключение.

На рисунке изображен 1-й и 20-й цикл включения / выключения.

Черным цветом отмечен прямой проход, серым — обратный

В результате проведенных исследований было показано, что разработанная методика на основе метода ионно-плазменного напыления является подходящей для создания мемристивных структур с нанометровыми толщинами в одном вакуумном цикле благодаря возможности установки нескольких мишеней, а также гибкой настройке параметров роста. Атомно-силовая микроскопия служит мощным инструментом для комплексного анализа мемристивных структур, в частности для исследования поверхности и снятия вольт-амперных характеристик.

*Авторы выражают благодарность за помощь в формировании тематики, плодотворные дискуссии и продуктивное взаимодействие кандидату физико-математических наук А.В. Зенкевичу, кандидату физико-математических наук Ю.А. Матвееву. Работа выполнена в Балтийском федеральном университете им. И. Канта в рамках*



реализации проектов по Постановлениям Правительства №218 (договор с Минобрнауки 02.G25.31.0086 от 23.05.2013) и №220.

### Список литературы

1. Chua L. O. Memristor – the missing circuit element // IEEE Trans Circuit Theory 18. 1971. P. 507–519.
2. Strukov D.B., Snider G.S., Stewart D.R., Williams R.S. The missing memristor found // Nature. 2008. Vol. 453. P. 80–83.
3. Szot K. et al. Switching the electrical resistance of individual dislocations in single-crystalline SrTiO<sub>3</sub> // Nature Mater. 2006. Vol. 5. P. 312–320.
4. Aono M. et al. Quantized conductance atomic switch // Nature. 2005. Vol. 433. P. 47–50.
5. Strukov D. et al. The Missing Memristor Found // Nature. 2008. Vol. 453. P. 80–83.
6. Браун. Я. Физика и технология источников ионов. М., 1998.
7. Goikhman A., Sheludyakov S., Bogdanov E. Ion beam assisted deposition of novel thin film materials and coatings // Materials Science Forum. 2011. Vol. 674. P. 195.
8. Gwyddion – Free SPM (AFM, SNOM/NSOM, STM, MFM) data analysis software. URL: gwyddion.net (дата обращения: 07.02.2014).

28

### Об авторах

Сергей Николаевич Шевырталов – асп., инженер научно-образовательного центра «Функциональные наноматериалы», Балтийской федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: SShevyrtalov@innopark.kantiana.ru

Дарья Александровна Коива – инженер научно-образовательного центра «Функциональные наноматериалы», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: DKoiva@innopark.kantiana.ru

Александр Юрьевич Гойхман – канд. физ.-мат. наук, директор научно-образовательного центра «Функциональные наноматериалы», Балтийский федеральный университет им. И. Канта, Калининград.

E-mail: AGoikhman@innopark.kantiana.ru

### About the authors

Sergey Shevyrtalov – PhD student, engineer of Research and Education Centre «Functional Nanomaterials», I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: SShevyrtalov@innopark.kantiana.ru

Daria Koiva – engineer of Research and Education Centre «Functional Nanomaterials», I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: DKoiva@innopark.kantiana.ru

Alexander Goikhman – PhD, director of Research and Education Centre «Functional Nanomaterials» I. Kant Baltic Federal University, Kaliningrad.

E-mail: AGoikhman@innopark.kantiana.ru