

элементов для радиочастотных безэховых камер, обеспечивающих высокоточное тестирование работоспособности радиолокационных и телекоммуникационных систем, построения диаграмм эффективной площади рассеяния наземных, летательных и космических объектов, проведения испытаний на электромагнитную совместимость электронных устройств.



Рисунок 2 – Аппаратно-программный комплекс для измерения параметров материалов на базе векторного анализатора цепей N5290A фирмы Keysight Technologies (США)

Исследование процессов взаимодействия электромагнитного излучения с радиопоглощающими материалами проводилось в диапазоне от 14 ГГц до 50 ГГц с использованием векторного анализатора цепей (рис. 2). Для перекрытия частотной полосы был использован метод исследований с использованием антенной линии передач. Выходными параметрами выступали отношения амплитуд отраженной электромагнитной волны к падающей, а также прошедшей к падающей и выраженные в децибелах. В качестве объекта сравнения выступал промышленно выпускаемый РПМ. Демонстрируемый уровень безэховости не уступает существующим промышленным образцам, а низкая концентрация

добавки МУНТ незначительно увеличивает массу образцов, а также благоприятно сказывается на сохранении исходных эластичных свойств пенополиуретановой матрицы. За счет дополнительного использования пирамидальных поглотителей с увеличенными размерами, планируется расширение частотного диапазона до 1 ГГц и создание на основе комбинированных пирамидальных РПМ передвижной миниатюрной безэховой камеры.

#### Литература

1. Латыпова, А. Ф. Анализ перспективных поглощающих материалов / А. Ф. Латыпова, Ю. Е. Калинин // Воронежский государственный университет. – 2012. – С. 70–76.
2. Attenuation of electromagnetic waves by carbon nanotube composites / B. Hornbostel [et al.] // Physica E. – 2008. – Vol. 40, № 7. – P. 2425–2429.
3. Carbon nanotubes filled with ferromagnetic alloy nanowires: Lightweight and wide-band microwave absorber / L. V. Ruitao [et al.] // Applied Physics Letters. – 2008. – Vol. 93, № 22. – P. 223105 (1–3).
4. Островский, О. С. Защитные экраны и поглотители электромагнитных волн / О. С. Островский, Е. Н. Одаренко, А. А. Шматько // Физическая Инженерия Поверхности. – 2003. – Т 1, № 2. – С. 161–173.
5. Ослабление электромагнитного излучения СВЧ-диапазона бумагой из углеродных нанотрубок / Комаров Ф. Ф. [и др.] // Журнал технической физики. – 2011. – Т. 81, № 11. – С. 140–145.
6. Мицмахер, М. Ю. Безэховые камеры СВЧ / М. Ю. Мицмахер, Торганов В. А. – М.: Радио и связь, 1982. – 128 с.
7. Структурная оптимизация радиопоглощающих покрытий пирамидального типа / А. Г. Будай [и др.] // Прикладные проблемы оптики, информатики, радиофизики и физики конденсированного состояния : материалы междунар. науч.-практ. конф., 27–28 февраля 2013 г. – Минск: НИИ ПФП имени А. Н. Севченко, 2013. – С. 130–132.

УДК 538.915

#### МЕМРИСТОРНАЯ СТРУКТУРА НА ОСНОВЕ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ

Комаров Ф.Ф.<sup>1</sup>, Романов И.А.<sup>2</sup>, Власукова Л.А.<sup>2</sup>, Пархоменко И.Н.<sup>2</sup>, Моховиков М.А.<sup>1</sup>,  
Цивако А.А.<sup>3</sup>, Ковальчук Н.С.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>НИУ «Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко» БГУ

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет

<sup>3</sup>ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Исследованы электрофизические свойства и эффект резистивного переключения мемристорной структуры  $\text{ITO}/\text{SiN}_x/\text{Si}$ . Концентрация избыточных атомов кремния в пленке  $\text{SiN}_x$ , толщиной ~200 нм, увеличивалась от 16 до 77 % по мере продвижения вглубь образца. Обсуждаются эффект переключения сопротивления и механизмы проводимости в состояниях с высоким и низким сопротивлением. Для данной структуры также обнаружен эффект фотопереключения.

**Ключевые слова:** нитрид кремния, избыток кремния, мемристор, вольт-амперные характеристики, механизмы проводимости.

## MEMRISTOR STRUCTURE BASED ON NONSTOICHIOMETRIC SILICON NITRIDE

Komarov F.<sup>1</sup>, Romanov I.<sup>2</sup>, Vlasukova L.<sup>2</sup>, Parkhomenko I.<sup>2</sup>, Mikhovikov M., Tsvako A.<sup>3</sup>, Kovalchuk N.<sup>3</sup>

<sup>1</sup>A.N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of BSU

<sup>2</sup>Belarusian State University

<sup>3</sup>JSC "INTEGRAL" – Holding Management Company  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The electrophysical properties and the resistive switching effect of the ITO/SiN<sub>x</sub>/Si memristor structure have been studied. Concentration of excess silicon atoms in the SiN<sub>x</sub> film with a thickness of ~200 nm increases from 16 to 77 % when approaching the Si substrate. The resistive switching effect and conduction mechanism at high and low resistance states are discussed. The photo-switching effect was also found for that structure.

**Key words:** silicon nitride, silicon excess, memristor, current-voltage characteristics, conduction mechanisms.

Адрес для переписки: Комаров Ф.Ф., ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Республика Беларусь  
e-mail: komarovf@bsu.by

**Введение.** В связи с повышением требований вычислительных систем к характеристикам запоминающих устройств в настоящее время активно разрабатывается новый тип полупроводниковой энергонезависимой памяти – мемристоры, принцип работы которых основан на использовании двух устойчивых состояний материала: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС). В качестве активного слоя мемристора обычно используют диэлектрики на основе оксидов таких, как TiO<sub>2</sub>, HfO<sub>2</sub>, TaO<sub>x</sub>, SiO<sub>2</sub>. Однако в последнее время особый интерес привлекают пленки нитрида кремния с избытком кремния, преимуществом которых является полная совместимость с традиционной кремниевой микроэлектронной технологией [1, 2]. В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических свойств структур на основе пленки нитрида кремния SiN<sub>x</sub>, с неоднородным по глубине стехиометрическим составом. Обсуждаются возможные механизмы переноса носителей заряда в структурах ITO/SiN<sub>x</sub>/Si в состояниях с низким и высоким сопротивлением.

**Материалы и методы исследования.** Пленка SiN<sub>x</sub> (200 нм) наносилась методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе пониженного давления из смеси азота и моносилана при температуре Si подложки (КДБ-10) 800 °С. Для получения неоднородного состава по глубине соотношение реагирующих газов SiH<sub>4</sub>/N<sub>2</sub> варьировалось в процессе осаждения. Далее образцы проходили быстрый термический отжиг (1200 °С, 3 мин) в Ar. Пленки ITO с поверхностным сопротивлением 60 Ом/□ наносились в качестве верхнего контакта методом реактивного магнетронного распыления. Фотолитографией на образцах были сформированы квадратные площадки 300×300 мкм из ITO. На обратную сторону тестовых структур наносилась алюминий-галлиевая паста.

Для структурного и элементного анализа использовались методы растровой электронной микроскопии (РЭМ) и резерфордовского обратного рассеяния (РОР). Измерение вольт-амперных

характеристик (ВАХ) проводилось на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 при комнатной температуре.

**Результаты и обсуждение.** Методом РОР и РЭМ показано, пленка SiN<sub>x</sub> характеризуется градиентом стехиометрического состава по глубине: в приповерхностном слое нитрида уровень обогащения кремнием в сравнении со стехиометрией существенно ниже в сравнении со слоем, прилегающим к границе «нитрид/кремний». Толщина каждого из этих слоев, составила ~100 нм. Усредненная концентрация избыточных атомов кремния, определенная методом РОР, в верхнем и нижнем нитридных слоях составила 19 % и 58 % соответственно.

На рис. 1, а представлены вольт-амперные характеристики элемента памяти ITO/SiN<sub>x</sub>/Si. Весь цикл измерения ВАХ показан стрелками. Прямой ветви ВАХ соответствует положительное смещение верхнего электрода ITO относительно Si подложки. В начальный момент времени структура находилась в СВС. Увеличение напряжения на верхнем электроде до ~20 В приводит к переключению в СНС (стрелка 1) (проводимость увеличивается на 2–3 порядка). Переключение в СВС наблюдается при изменении полярности приложенного к структуре напряжения (стрелка 2) в результате разрушения токопроводящего канала. Анализ ВАХ показал, что механизм проводимости в СВС определяется свойствами пленки SiN<sub>x</sub> и описывается моделью Пула-Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками. Переключение в СНС, по видимому, вызвано миграцией ионов In или Sn из контакта ITO в слой SiN<sub>x</sub> с последующим образованием металлического филамента. Омический характер проводимости в СНС подтверждает это предположение.

На рис. 1, б представлена зависимость напряжения переключения из одного устойчивого состояния в другое для 84-х циклов. Разброс значений напряжения переключения для перехода СВС→СНС составляет 12 В, для перехода СНС→СВС – 8 В. Отклонение напряжения пере-

ключения от среднего значения может достигать 35 %. Такое большое отклонение параметров, по-видимому, обусловлено большой неравномерностью распределения электрического поля в слое  $\text{SiN}_x$ , вызванное его неравномерной толщиной и неоднородным составом, а также изменениями структуры нитрида после переключений.

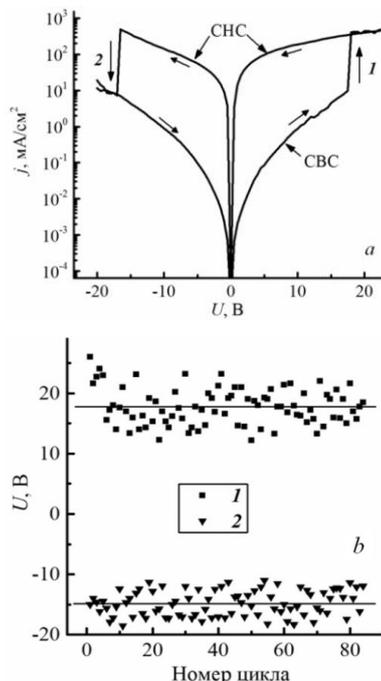


Рисунок 1 – ВАХ (а) и зависимость напряжения переключения от номера эксперимента для элемента памяти  $\text{ITO}/\text{SiN}_x/\text{Si-p}$  (б)

Установлено, что засветка структуры  $\text{Si}/\text{SiN}_x/\text{ITO}$  галогенной лампой приводит к увеличению тока прямой ветви ВАХ как в состоянии с высоким, так и в состоянии с низким сопротивлением. В режиме обогащения (положительный потенциал на Si) засветка не влияет на изменение тока.

**Закключение.** Обнаружен и исследован эффект резистивного переключения в структуре  $\text{ITO}/\text{SiN}_x/\text{Si-p}$ , в которой «запоминающий» слой представляет собой пленку  $\text{SiN}_x$  с градиентом соотношения  $\text{Si}/\text{N}$  по глубине. В CBC механизм проводимости описывается моделью Пула-Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками в  $\text{SiN}_x$ , тогда как CHC, по-видимому, обусловлено миграцией ионов In или Sn из контакта ITO в слой  $\text{SiN}_x$  – формированием металлического филамента. Для структуры  $\text{ITO}/\text{SiN}_x/\text{Si}$  также обнаружен эффект фотопереключения, который в сочетании с резистивным переключением может послужить началом разработки элементов ПЗУ, перепрограммируемых световым импульсом в структурах на основе нитрида кремния.

#### Литература

1. Charge transport mechanism in  $\text{SiN}_x$ -based memristor / A. A. Gismatulin [et al.] // Appl. Phys. Lett. – 2019. – Vol. 115, № 25. – P. 253502.
2. Yen, T.J. High performance all nonmetal  $\text{SiN}_x$  resistive random access memory with strong process dependence / T. J. Yen, A. Chin, V. Gritsenko // Sci. Rep. – 2020. – Vol. 10, № 1. – P. 1–9.

УДК 621.317

### ПРИМЕНЕНИЕ БОЛОМЕТРОВ ДЛЯ ТОЧНОГО ИЗМЕРЕНИЯ ТЕМПЕРАТУР В ШИРОКОМ ДИАПАЗОНЕ

Коробко Ю.С., Кравченко А.А.

Белорусский национальный технический университет  
Минск, Республика Беларусь

**Аннотация.** Рассмотрены вопросы использования металлических болометров в качестве чувствительных элементов терморезисторных термометров в целях расширения общего диапазона измерения температур и повышения точности измерений. Предложены методы измерений температуры. Даны рекомендации по проведению калибровки болометрических термометров и организации рабочего места калибровщика.

**Ключевые слова:** температура, измерение, терморезистор, болометр, диапазон измерения, метод измерения, погрешность измерения.

### APPLICATION OF BOLOMETERS FOR ACCURATE TEMPERATURE MEASUREMENT WIDE RANGE

Korobko Yu., Kravchenko A.

Belarusian National Technical University  
Minsk, Belarus

**Abstract.** The issues of using metal bolometers as sensitive elements of thermistor thermometers in order to expand the overall temperature measurement range and increase the measurement accuracy are considered. Methods for measuring temperature are proposed. Recommendations for the calibration of bolometric thermometers and the organization of the workplace of the calibrator are given.