

ISSN 1561-8323 (Print)  
ISSN 2524-2431 (Online)

УДК 538.958  
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-403-410>

Поступило в редакцию 06.04.2020  
Received 06.04.2020

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

<sup>1</sup>Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

<sup>4</sup>ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

## МЕМРИСТОРНАЯ СТРУКТУРА С ЭФФЕКТОМ ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ СОПРОТИВЛЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТОНКИХ ПЛЕНОК НИТРИДА КРЕМНИЯ

**Аннотация.** Исследованы электрофизические свойства и эффект резистивного переключения мемристорной структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si. Пленка нитрида кремния толщиной ~200 нм с изменяющимся по глубине соотношением Si/N нанесена методом химического осаждения из газовой фазы при низком давлении. Концентрация избыточных атомов кремния в пленке SiN<sub>x</sub> определенная методом обратного резерфордского рассеяния, увеличивается от 9 до 44 % по мере продвижения в глубь образца. Результаты исследования вольт-амперных характеристик структур ITO/SiN<sub>x</sub>/Si-p показали, что механизм проводимости в состоянии с высоким сопротивлением определяется свойствами нитридной пленки и описывается моделью Пула–Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками. Переключение в состояние с низким сопротивлением, вероятно, вызвано миграцией ионов индия или олова из контакта ITO в слой SiN<sub>x</sub>. После переключения в состояние с низким сопротивлением проводимость структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si определяется комбинацией механизмов инжекции носителей заряда из контакта и механизмов переноса носителей заряда через диэлектрический слой. Изменение полярности приложенного к структуре напряжения приводит к разрушению проводящего канала и переключению структуры в состояние с высоким сопротивлением. Для структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si обнаружен эффект фотопереключения, что открывает новые возможности использования мемристоров в системах кремниевой оптоэлектроники.

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

**Для цитирования:** Мемристорная структура с эффектом переключения сопротивления на основе тонких пленок нитрида кремния / Ф. Ф. Комаров [и др.] // Докл. Нац. акад. наук Беларуси. – 2020. – Т. 64, № 4. – С. 403–410. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-403-410>

Corresponding Member Fadei F. Komarov<sup>1</sup>, Ivan A. Romanov<sup>2</sup>, Liudmila A. Vlasukova<sup>2</sup>, Irina N. Parkhomenko<sup>2</sup>,  
Alexey A. Tsivako<sup>3</sup>, Natalia S. Kovalchuk<sup>3</sup>

<sup>1</sup>A. N. Sevchenko Institute of Applied Physics Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

<sup>3</sup>Joint Stock Company “Integral”, Minsk, Republic of Belarus

## MEMRISTOR STRUCTURE WITH THE EFFECT OF SWITCHING RESISTANCE BASED ON SILICON NITRIDE THIN LAYERS

**Abstract.** The electrophysical properties and the resistive switching effect of the ITO/SiN<sub>x</sub>/Si memristor structure were studied. A silicon nitride film with a thickness of ~200 nm with an inhomogeneous element depth distribution was deposited by low-pressure chemical vapor deposition. Based on the Rutherford backscattering data, it was shown that the concentration of excess silicon atoms in the SiN<sub>x</sub> film increases from 9 to 44 % when approaching the Si substrate. The analysis of the current-voltage characteristics of ITO/SiN<sub>x</sub>/Si structures revealed that the conduction mechanism in the high-resistance state is determined by the nitride film properties and is described by the Poole–Frenkel model taking into account the hopping model of electron transport between traps. Switching to the low-resistance state is probably caused by the migration of indium or tin ions from the ITO contact to the SiN<sub>x</sub> layer. The conduction of the ITO/SiN<sub>x</sub>/Si structure in the low-resistance state is determined by both the mechanisms of charge-carrier injection from the contact and charge-carrier transport through the dielectric layer. Reverse polarity results in destructing the conductive channel and switching the structure to the high-resistance state. The photo-switching effect was found for the ITO/SiN<sub>x</sub>/Si structure, which opens up new possibilities of using memristors in silicon optoelectronic systems.

**Keywords:** silicon nitride, silicon excess, memristor, current-voltage characteristics, conduction mechanisms

**For citation:** Komarov F. F., Romanov I. A., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., Tsivako A. A., Kovalchuk N. S. Memristor structure with the effect of switching resistance based on silicon nitride thin layers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2020, vol. 64, no. 4, pp. 403–410 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2020-64-4-403-410>

**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 мемристоров основан на использовании двух устойчивых состояний материала: состояние с высоким сопротивлением (СВС) и состояние с низким сопротивлением (СНС). Благодаря ряду преимуществ, таких как высокое быстродействие, отсутствие энергопотребления в режиме ожидания, прекрасная масштабируемость, мемристивная память является первым кандидатом на замену существующей флеш памяти. Теоретически создание мемристора было предсказано еще в 1971 г. [1], тогда как первая тестовая структура была продемонстрирована лишь в 2008 г. исследователями из фирмы Hewlett-Packard [2]. В предложенной ими тестовой структуре в качестве «переключающего слоя» использовалась тонкая двухслойная пленка диоксида титана, один из слоев которой был слегка обеднен кислородом. К настоящему времени сформировались общие представления о механизмах резистивного переключения (РП) в таких диэлектриках, как  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{HfO}_2$ ,  $\text{TaO}_x$ . Использование оксида и нитрида кремния в качестве диэлектрика, обладающего свойствами резистивного переключения, позволяет решить проблему совместимости мемристоров с традиционной кремниевой микроэлектронной технологией.

Нитрид кремния применяется в микроэлектронике на протяжении десятилетий в качестве пассивирующих и изолирующих слоев, подзатворного диэлектрика, а также в качестве запоминающей среды в приборах флеш памяти [3]. В последнее время интерес к пленкам нитрида кремния с избытком кремния обусловлен его светоизлучающими свойствами и возможностью применения в качестве активной среды для элементов резистивной памяти. Эффект РП, а также механизмы переноса носителей заряда в мемристорах на основе нитрида кремния, обогащенного кремнием, исследуются в [4–7]. Туннелирование электронов между ловушками рассматривается как наиболее вероятный механизм переноса носителей заряда в обогащенных кремнием пленках  $\text{SiN}_x$  [4; 5]. Известно, что незначительное увеличение концентрации избыточного кремния в нитриде может привести к увеличению проводимости диэлектрика на несколько порядков [5]. Варьирование соотношения Si/N в слое  $\text{SiN}_x$  позволяет управлять не только сопротивлением диэлектрического слоя, но и его светоизлучающими свойствами [8]. Недавно эффект РП был обнаружен и изучен в светоизлучающих структурах на основе нитрида кремния Cr/Si/SiN<sub>x</sub>/Si/ITO [9]. Работа [10] посвящена созданию и исследованию модулятора оптического сигнала на основе кремниевого мемристора. В [11] исследованы механизмы переключения полностью оптического мемристора. Эти исследования могут послужить началом развития нового направления кремниевой оптоэлектроники, задачей которого будет решение проблемы ультрабыстрого доступа к памяти по оптическому каналу.

В настоящей работе представлены результаты исследования электрофизических свойств структур ITO/SiN<sub>x</sub>/Si, обладающих эффектом резистивного переключения. 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.** Исходные структуры SiN<sub>x</sub>/Si были изготовлены на кремниевых подложках марки КДБ-10 с кристаллографической ориентацией (100). Пленка нитрида кремния наносилась методом химического осаждения из газовой фазы в реакторе пониженного давления (метод LPCVD) из смеси азота (N<sub>2</sub>) и моносилана (SiH<sub>4</sub>) при температуре подложки 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 при температуре 1200 °С в атмосфере Ar в течение 3 мин.

Для создания структур ITO/SiN<sub>x</sub>/Si на исходные и отожженные образцы SiN<sub>x</sub>/Si методом реактивного магнетронного распыления при температуре 290 °С наносились пленки ITO с поверхностным сопротивлением 60 Ом/□. Нанесение пленок ITO выполнялось на промышленной уста-

новке непрерывного действия «Плазма ЛНД» с автоматическим поддержанием постоянного тока разряда. Использовалась мишень состава (In-85 %, Sn-15 %). Методом фотолитографии на образцах были сформированы квадратные площадки из оксида индия-олова размером  $300 \times 300$  мкм.

Толщины пленки  $\text{SiN}_x$  и нанесенного контакта ИТО измерялись на сколе методом растровой электронной микроскопии (РЭМ). Для анализа распределения элементов по глубине образца  $\text{SiN}_x/\text{Si}$  использовался метод резерфордского обратного рассеяния (РОР). Моделирование профиля распределения элементов по глубине на основе данных РОР проводилось в программе SIMNRA 7.0, измерение вольт-амперных характеристик (ВАХ) – на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500 при комнатной температуре.

**Результаты и их обсуждение.** На рис. 1, *a* представлен профиль распределения элементов по глубине пленки нитрида кремния в отожженном образце  $\text{SiN}_x/\text{Si}$ . Известно, что концентрация атомов кремния в стехиометрической пленке  $\text{Si}_3\text{N}_4$  составляет  $\sim 43$  %. Как видно из рис. 1, *a*, пленка  $\text{SiN}_x$  характеризуется неоднородным составом по глубине и содержит избыточный кремний от 9 до 44 % по сравнению со стехиометрическим  $\text{Si}_3\text{N}_4$ . Пленку нитрида кремния можно условно разделить на два слоя. В верхнем слое толщиной  $8 \cdot 10^{17}$  ат/см<sup>2</sup> наблюдается незначительное увеличение концентрации кремния от 52 до 57 % по мере продвижения в глубь образца. Нижний слой, локализованный на глубине  $8 \cdot 10^{17}$ – $1,6 \cdot 10^{18}$  ат/см<sup>2</sup>, характеризуется существенным увеличением концентрации кремния от 57 до 87 %. Средняя концентрация избыточных атомов кремния в верхнем и нижнем слое составляет 11,5 и 29 % соответственно.

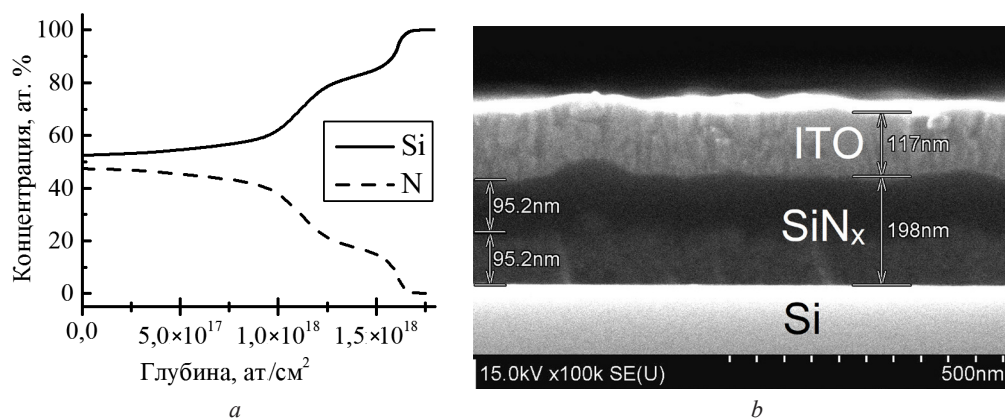


Рис. 1. Профиль распределения элементов по глубине нитридного слоя образца  $\text{SiN}_x/\text{Si}$  (*a*) и снимок РЭМ поперечного сечения структуры ИТО/ $\text{SiN}_x/\text{Si}$  (*b*)

Fig. 1. The depth distribution of Si and N for silicon nitride layer (*a*) and SEM image of ITO/ $\text{SiN}_x/\text{Si}$  structure (*b*)

На рис. 1, *b* представлена РЭМ-фотография поперечного сечения изготовленной структуры ИТО/ $\text{SiN}_x/\text{Si}$ . Как видно из рисунка, толщина верхнего электрода ИТО составляет  $\sim 120$  нм. Общая толщина нитридного слоя варьируется в диапазоне 190–220 нм. На микрофотографии наблюдается различие в контрасте верхнего и нижнего слоев  $\text{SiN}_x$ , однако четкой границы между этими слоями нет.

На рис. 2, *a* представлены вольт-амперные характеристики элемента памяти ИТО/ $\text{SiN}_x/\text{Si}$ . Весь цикл измерения ВАХ показан стрелками. Прямой ветви ВАХ соответствует положительное смещение верхнего электрода ИТО относительно кремниевой подложки. При таком смещении в приповерхностном слое кремния вблизи границы Si– $\text{SiN}_x$  образуется область, обедненная основными носителями (дырками). В начальный момент времени структура находилась в состоянии с высоким сопротивлением. Увеличение напряжения на верхнем электроде до  $\sim 20$  В приводит к переключению в состояние с низким сопротивлением (показано стрелкой 1 на рис. 2, *a*) за счет образования токопроводящего канала (филамента) внутри диэлектрического слоя. Переключение в СНС приводит к увеличению проводимости образца на 2–3 порядка. Переключение в СВС наблюдается при изменении полярности приложенного к структуре напряжения (переход показан стрелкой 2 на обратной ветви ВАХ). В этот момент происходит разрушение токопроводящего

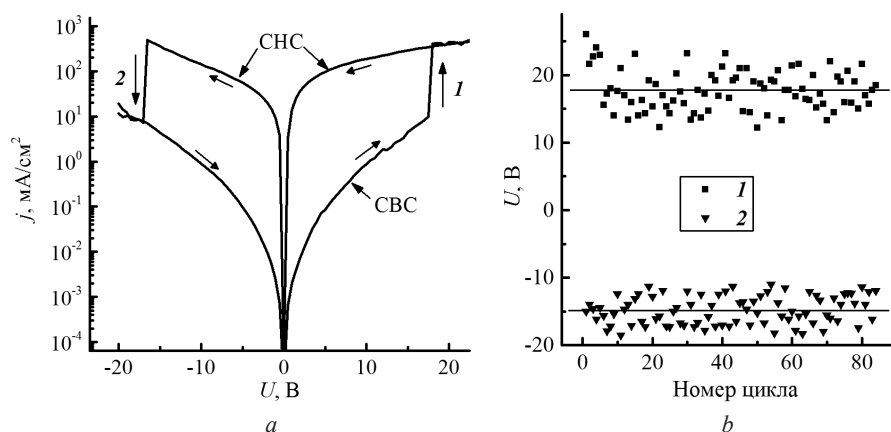


Рис. 2. Вольт-амперные характеристики структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si-*p* (а). Стрелками показан цикл переключения. Зависимость напряжения переключения от номера эксперимента для элемента памяти ITO/SiN<sub>x</sub>/Si-*p* (б)

Fig. 2. Current-voltage characteristics of ITO/SiN<sub>x</sub>/Si-*p* structure (а). The arrows indicate the measurement cycle. The dependence of the switching voltage on the experiment number for memory element ITO/SiN<sub>x</sub>/Si-*p* (б)

канала. Переключение из СВС в СНС в мемристорах на основе диэлектрических пленок за счет формирования токопроводящих филаментов подтверждено многочисленными исследованиями [4; 6; 7; 10; 12; 13]. В качестве проводящих каналов могут выступать цепочки из точечных дефектов (оборванные связи, кислородные и азотные вакансии) [4; 12], кремниевые кластеры [6; 7], цепочки из частиц материала одного из электродов [10; 13].

На рис. 2, б представлена зависимость напряжения переключения из одного устойчивого состояния в другое для 84 циклов. Разброс значений напряжения переключения для перехода СВС → СНС составляет 12 В, для перехода СНС → СВС – 8 В. Отклонение напряжения переключения от среднего значения может достигать 35 %. Такое большое отклонение параметров, по-видимому, обусловлено большой неравномерностью распределения электрического поля в слое SiN<sub>x</sub>, вызванной неравномерной толщиной и неоднородным составом диэлектрического слоя, а также изменениями структуры нитрида кремния после переключения из одного состояния в другое.

Известно, что пленки нитрида кремния имеют высокую плотность ловушек (более 10<sup>19</sup> см<sup>-3</sup>) [5]. Для описания механизмов переноса носителей заряда через слой нитрида кремния применяют модели, учитывающие ионизацию ловушек. В слабых электрических полях процесс переноса описывается механизмом Пула–Френкеля, который заключается в снижении высоты потенциального кулоновского барьера для электронов, находящихся на дефектных уровнях, под действием электрического поля. В результате некоторые электроны способны преодолеть притяжение ловушечного центра и выйти в зону проводимости. Когда концентрация ловушек велика и расстояние между ними мало, электрон может туннелировать между ловушками без выхода в зону проводимости. Вид вольт-амперных характеристик, представленных на рис. 2, а, в состоянии с высоким сопротивлением практически не зависит от полярности приложенного напряжения. Следовательно, проводимость элемента памяти в СВС определяется свойствами нитрида кремния и не зависит от материала контактов. Однако полученные вольт-амперные характеристики в СВС не согласуются с классической моделью Пула–Френкеля [7] и моделью прыжковой проводимости между фонно-связанными ловушками [4]. Установлено, что экспериментальные ВАХ структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si хорошо согласуются с модифицированной моделью Пула–Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между соседними кулоновскими центрами [14]. В простейшей одномерной модели плотность тока определяется выражением

$$j = \frac{e}{s^2} \frac{W}{h} \exp\left(-\frac{W - \beta_{\text{PF}} \sqrt{F}}{kT}\right) \text{th}\left(\frac{eFs}{2kT}\right), \quad \beta_{\text{PF}} = \sqrt{\frac{e^3}{\pi \epsilon_{\infty} \epsilon_0}},$$

где  $e$  – заряд электрона;  $s$  – среднее расстояние между ловушками;  $N = s^{-3}$  – концентрация ловушек;  $W$  – энергия ионизации ловушки;  $h$  – постоянная Планка;  $\beta_{\text{PF}}$  – константа Френкеля;  $F$  –

электрическое поле;  $k$  – постоянная Больцмана;  $T$  – температура. В этой модели мы пренебрегли неоднородным распределением электрического поля в диэлектрике. Хорошее согласие с экспериментом получено при  $W = 0,85$  эВ,  $\epsilon_\infty = 8$  и концентрации ловушек  $N \approx 2 \cdot 10^{19}$  см<sup>-3</sup>.

В состоянии с низким сопротивлением проводимость слоев SiN<sub>x</sub>, обогащенных кремнием, описывается механизмом прыжковой проводимости между фононно-связанными ловушками [4]. Согласно [4], ВАХ в СНС можно аппроксимировать соотношением

$$j \sim \text{sh}\left(\frac{eFs}{2kT}\right). \quad (1)$$

После аппроксимации прямой ветви ВАХ выражением (1) получена аномально большая концентрация ловушек  $N \approx 10^{22}$  см<sup>-3</sup>. На основании модели переноса, предложенной в [4], при концентрации ловушек, превышающей  $5 \cdot 10^{21}$  см<sup>-3</sup>, наблюдается металлический тип проводимости. Как видно из рис. 3, а, линейная зависимость  $j \sim F$  прямой ветви ВАХ соблюдается практически во всем измеряемом диапазоне напряжений. В отличие от прямой ветви ВАХ обратная ветвь имеет форму, близкую к экспоненциальной. Аппроксимация обратной ветви ВАХ в СНС соотношением (1) дает концентрацию ловушек  $N \approx 3 \cdot 10^{20}$  см<sup>-3</sup>. Большое различие концентраций ловушек, а также асимметрия прямой и обратной ветви ВАХ позволяют сделать вывод, что проводимость структуры ITO/SiN<sub>x</sub>/Si в СНС определяется комбинацией механизмов инжекции носителей заряда из контакта и механизмов переноса носителей заряда, инжектированных в слой SiN<sub>x</sub>.

Установлено, что засветка структуры Si/SiN<sub>x</sub>/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 кремнии) засветка не влияет на изменение тока. На рис. 3, а представлены вольт-амперные характеристики, измеренные в темноте и при засветке образца. В режиме обеднения в структуре ITO/SiN<sub>x</sub>/Si приложенное напряжение делится между диэлектриком и неравновесным слоем обеднения. Ток инжекции неосновных носителей заряда сравним с темпом генерации их в кремнии. Подсветка приводит к увеличению темпа генерации неосновных носителей в кремнии, к сужению толщины обедненного слоя, уменьшению падения напряжения на нем, увеличению падения напряжения на диэлектрике и, следовательно, к возрастанию протекающего тока. Таким образом, поведение ВАХ в данном режиме указывает на то, что при положительном потенциале на контакте ITO основной вклад в проводимость диэлектрика дает инжекция электронов из кремния [15]. Если предположить, что при переключении в СНС проводящий канал образуется путем миграции ионов индия или олова в слой SiN<sub>x</sub>, то линейную зависимость  $j \sim F$  прямой ветви ВАХ можно объяснить металли-

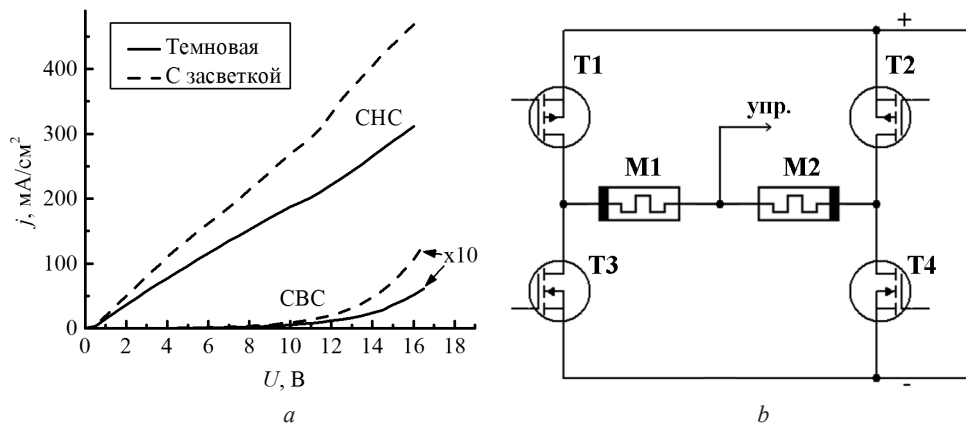


Рис. 3. Вольт-амперные характеристики структуры в режиме обеднения (а), измеренные в темноте (сплошными линиями) и при засветке образца галогенной лампой (пунктирные линии). Схема ячейки памяти, демонстрирующая эффект фотопереключения между двумя устойчивыми состояниями (б)

Fig. 3. Current-voltage characteristics of the structure in the depletion mode (a) measured in the dark (solid lines) and under illumination by halogen lamp (dashed lines). Scheme of a memory cell based on the effect of photo-switching between two stable states (b)

ческой проводимостью филамента. В этом случае протекающий через образец ток определяется преимущественно концентрацией инжектируемых из кремния неосновных носителей (электронов) и сопротивлением филамента. При отрицательном потенциале на ИТО, в режиме обогащения, все приложенное напряжение падает на диэлектрике. Естественно предположить, что перенос заряда в этом случае осуществляется электронами, инжектированными из ИТО, а также дырками, инжектированными из кремния. Нелинейную зависимость  $j(F)$  в режиме обогащения в СНС можно объяснить наличием потенциальных барьеров со стороны слоя  $\text{SiN}_x$  для электронов, инжектируемых из ИТО, и дырок, инжектируемых из кремния. При увеличении обратного тока происходит ионизация атомов, образующих филамент, и отток ионов металла к катоду [10; 13]. Такой процесс приводит к разрыву токопроводящего канала и переходу СНС  $\rightarrow$  СВС.

Эффект резистивного переключения в сочетании с фотовосприимчивостью в структурах на основе нитрида кремния может послужить началом разработки элементов постоянного запоминающего устройства, перепрограммируемых световым импульсом. На рис. 3, *b* представлена схема, демонстрирующая функцию оптического переключения из одного устойчивого состояния в другое. Предположим, что в начальный момент времени транзисторы Т1 и Т4 открыты, а транзисторы Т2 и Т3 закрыты, мемристор М1 находится в состоянии с высоким сопротивлением (закрыт), а элемент М2 – в состоянии с низким сопротивлением (открыт), напряжение питания схемы меньше порогового напряжения переключения в СНС ( $E < U_{\text{ON}}$ ). В этом состоянии потенциал на управляющем выводе близок к потенциалу земли. Засветка элемента М1 световым импульсом приводит к увеличению тока прямой ветви ВАХ в СВС (рис. 3, *a*) и переключению элемента в СНС. Переключение элемента М1 в СНС приведет к уменьшению напряжения на нем и к увеличению напряжения на элементе М2. Переключение М2 в СВС произойдет в том случае, если величина обратного напряжения на нем будет не менее напряжения переключения  $U_{\text{OFF}}$ . Для этого должно выполняться условие  $IR_{\text{OBR}} > U_{\text{OFF}}$ , где  $I$  – ток, протекающий через элементы М1 и М2;  $R_{\text{OBR}}$  – сопротивление мемристора при обратном включении. После переключения М2 в СВС напряжение на управляющем выводе увеличится до напряжения питания. Скачок напряжения на управляющем выводе приведет к переключению состояния транзисторов: Т1 и Т4 закроются, а Т2 и Т3 откроются. Это приведет к смене полярности напряжения на элементах М1 и М2, схема перейдет из одного устойчивого состояния в другое. Воздействие импульса света на элемент М2 приведет к переключению схемы в исходное состояние.

**Закключение.** Обнаружен и исследован эффект переключения электросопротивления в структуре ИТО/ $\text{SiN}_x$ /Si-*p*, в которой «запоминающий» слой представляет собой отожженную двухслойную пленку нитрида кремния, обогащенную кремнием. Толщина каждого из этих слоев, измеренная методом РЭМ, составила  $\sim 100$  нм. Концентрация избыточных атомов кремния, определенная методом РОР, в верхнем и нижнем слоях составила 11,5 и 29 % соответственно. Анализ вольтамперных характеристик структур ИТО/ $\text{SiN}_x$ /Si-*p* позволил сделать вывод, что механизм проводимости в состоянии с высоким сопротивлением определяется свойствами нитридной пленки и описывается моделью Пула–Френкеля, учитывающей перескоковый характер движения электронов между ловушками. Применение этой модели позволило определить концентрацию ловушек в пленке  $\text{SiN}_x$  в СВС, которая составила  $2 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$ . Переключение в состояние с низким сопротивлением, по-видимому, вызвано миграцией ионов индия или олова из контакта ИТО в слой  $\text{SiN}_x$  с последующим образованием металлического филамента. Омический характер проводимости в СНС подтверждает это предположение. В состоянии с низким сопротивлением проводимость структуры ИТО/ $\text{SiN}_x$ /Si определяется комбинацией механизмов инжекции носителей заряда из контакта и механизмов переноса инжектированных в диэлектрический слой носителей заряда. Изменение полярности приложенного к структуре напряжения приводит к разрушению филамента и переключению структуры в состояние с высоким сопротивлением. Для структуры ИТО/ $\text{SiN}_x$ /Si обнаружен эффект фотопереключения. Предложена схема ячейки памяти с двумя устойчивыми состояниями, переключаемая оптическим импульсом.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Chua, L. O. Memristor – the missing circuit element / L. O. Chua // *IEEE Trans. Circuit Theory*. – 1971. – Vol. 18, N 5. – P. 507–519. <https://doi.org/10.1109/tct.1971.1083337>
2. The missing memristor found / D. B. Strukov [et al.] // *Nature*. – 2008. – Vol. 453, N 7191. – P. 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
3. Investigation of electron and hole lateral migration in silicon nitride and data pattern effects on  $V_t$  retention loss in multilevel charge trap flash memory / Y.-H. Liu [et al.] // *IEEE Transactions on Electron Devices*. – 2019. – Vol. 66, N 12. – P. 5155–5161. <https://doi.org/10.1109/ted.2019.2949251>
4. Charge transport mechanism in  $\text{SiN}_x$ -based memristor / A. A. Gismatulin [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2019. – Vol. 115, N 25. – P. 253502 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.5127039>
5. Nasyrov, K. A. Charge transport in dielectrics via tunneling between traps / K. A. Nasyrov, V. A. Gritsenko // *J. Appl. Phys.* – 2011. – Vol. 109, N 9. – P. 093705 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.3587452>
6. Nanocrystalline Si pathway induced unipolar resistive switching behavior from annealed Si-rich  $\text{SiN}_x/\text{SiN}_y$  multilayers / X. Jiang [et al.] // *J. Appl. Phys.* – 2014. – Vol. 116, N 12. – P. 123705 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4896552>
7. 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 // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10, N 1. – P. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59838-y>
8. Origin of visible photoluminescence from Si-rich and N-rich silicon nitride films / I. Parkhomenko [et al.] // *Thin Solid Films*. – 2017. – Vol. 626. – P. 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.027>
9. Electroformed silicon nitride based light emitting memory device / T. Anutgan [et al.] // *Appl. Phys. Lett.* – 2017. – Vol. 111, N 5. – P. 053502 (4 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4997029>
10. Nanoscale plasmonic memristor with optical readout functionality / A. Emboras [et al.] // *Nano Letters*. – 2013. – Vol. 13, N 12. – P. 6151–6155. <https://doi.org/10.1021/nl403486x>
11. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory / C. Ríos [et al.] // *Nature Photonics*. – 2015. – Vol. 9, N 11. – P. 725–732. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.182>
12. Bipolar resistive switching and charge transport in silicon oxide memristor / A. N. Mikhaylov [et al.] // *Materials Science and Engineering: B*. – 2015. – Vol. 194. – P. 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.12.029>
13. Valov, I. Cation-based resistance change memory / I. Valov, M. N. Kozicki // *Journal of Physics D: Applied Physics*. – 2013. – Vol. 46, N 7. – P. 074005 (14 p.). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/7/074005>
14. Boon, M. R. The Poole–Frenkel pre-exponential factor / M. R. Boon // *Thin Solid Films*. – 1972. – Vol. 11, N 1. – P. 183–185. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(72\)90357-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(72)90357-4)
15. Two-band conduction in  $\text{TiO}_2$  / D. V. Gritsenko [et al.] // *Physics of the Solid State*. – 2006. – Vol. 48, N 2. – P. 224–228. <https://doi.org/10.1134/s1063783406020053>

## References

1. Chua L. O. Memristor – the missing circuit element. *IEEE Transactions on Circuit Theory*, 1971, vol. 18, no. 5, pp. 507–519. <https://doi.org/10.1109/tct.1971.1083337>
2. Strukov D. B., Snider G. S., Stewart D. R., Williams R. S. The missing memristor found. *Nature*, 2008, vol. 453, no. 7191, pp. 80–83. <https://doi.org/10.1038/nature06932>
3. Liu Y.-H., Zhan T.-C., Wang T., Tsai W.-J., Lu T.-C., Chen K.-C., Lu C.-Y. Investigation of electron and hole lateral migration in silicon nitride and data pattern effects on  $V_t$  retention loss in multilevel charge trap flash memory. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2019, vol. 66, no. 12, pp. 5155–5161. <https://doi.org/10.1109/ted.2019.2949251>
4. Gismatulin A. A., Gritsenko V. A., Yen T.-J., Chin A. Charge transport mechanism in  $\text{SiN}_x$ -based memristor. *Applied Physics Letters*, 2019, vol. 115, no. 25, pp. 253502 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.5127039>
5. Nasyrov K. A., Gritsenko V. A. Charge transport in dielectrics via tunneling between traps. *Journal of Applied Physics*, 2011, vol. 109, no. 9, pp. 093705 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.3587452>
6. Jiang X., Ma Z., Yang H., Yu J., Wang W., Zhang W., Li W., Xu J., Xu L., Chen K., Huang X., Feng D. Nanocrystalline Si pathway induced unipolar resistive switching behavior from annealed Si-rich  $\text{SiN}_x/\text{SiN}_y$  multilayers. *Journal of Applied Physics*, 2014, vol. 116, no. 12, pp. 123705 (5 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4896552>
7. Yen T. J., Chin A., Gritsenko V. High performance all nonmetal  $\text{SiN}_x$  resistive random access memory with strong process dependence. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, no. 1, pp. 1–9. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59838-y>
8. Parkhomenko I., Vlasukova L., Komarov F., Milchanin O., Makhavikou M., Mudryi A., Zhivulko V., Žuk J., Kopyciński P., Murzalinov D. Origin of visible photoluminescence from Si-rich and N-rich silicon nitride films. *Thin Solid Films*, 2017, vol. 626, pp. 70–75. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.02.027>
9. Anutgan T., Anutgan M., Atilgan I., Katircioglu B. Electroformed silicon nitride based light emitting memory device. *Applied Physics Letters*, 2017, vol. 111, no. 5, pp. 053502 (4 p.). <https://doi.org/10.1063/1.4997029>
10. Emboras A., Goykhman I., Desiatov B., Mazurski N., Stern L., Shappir J., Levy U. Nanoscale plasmonic memristor with optical readout functionality. *Nano Letters*, 2013, vol. 13, no. 12, pp. 6151–6155. <https://doi.org/10.1021/nl403486x>
11. Ríos C., Stegmaier M., Hosseini P., Wang D., Scherer T., Wright C. D., Bhaskaran H., Pernice W. H. P. Integrated all-photonic non-volatile multi-level memory. *Nature Photonics*, 2015, vol. 9, no. 11, pp. 725–732. <https://doi.org/10.1038/nphoton.2015.182>
12. Mikhaylov A. N., Belov A. I., Guseinov D. V., Korolev D. S., Antonov I. N., Efimovych D. V., Tikhov S. V., Kasatkin A. P., Gorshkov O. N., Tetelbaum D. I., Bobrov A. I., Malekhonova N. V., Pavlov D. A., Gryaznov E. G., Yatmanov A. P. Bipolar

lar resistive switching and charge transport in silicon oxide memristor. *Materials Science and Engineering: B*, 2015, vol. 194, pp. 48–54. <https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.12.029>

13. Valov I., Kozicki M. N. Cation-based resistance change memory. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2013, vol. 46, no. 7, pp. 074005 (14 p.). <https://doi.org/10.1088/0022-3727/46/7/074005>

14. Boon M. R. The Poole–Frenkel pre-exponential factor. *Thin Solid Films*, 1972, vol. 11, no. 1, pp. 183–185. [https://doi.org/10.1016/0040-6090\(72\)90357-4](https://doi.org/10.1016/0040-6090(72)90357-4)

15. Gritsenko D. V., Shaimeev S. S., Atuchin V. V., Grigor'eva T. I., Pokrovskii L. D., Pchelyakov O. P., Gritsenko V. A., Aseev A. L., Lifshits V. G. Two-band conduction in  $\text{TiO}_2$ . *Physics of the Solid State*, 2006, vol. 48, no. 2, pp. 224–228. <https://doi.org/10.1134/s1063783406020053>

### Информация об авторах

*Комаров Фадей Фадеевич* – член-корреспондент, д-р физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Институт прикладных физических проблем им. А. Н. Севченко БГУ (ул. Курчатова, 7, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: komarovf@bsu.by.

*Романов Иван Александрович* – мл. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: romivan@bsu.by.

*Власукова Людмила Александровна* – канд. физ.-мат. наук, заведующий лабораторией. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: vlasukova@bsu.by.

*Пархоменко Ирина Николаевна* – канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник. Белорусский государственный университет (ул. Курчатова, 5, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: parkhomenko@bsu.by.

*Цивако Алексей Александрович* – начальник производства. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: atsivako@integral.by.

*Ковальчук Наталья Станиславовна* – канд. техн. наук, заместитель главного инженера. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nkovalchuk@integral.by.

### Information about the authors

*Komarov Fadei F.* – Corresponding Member, D. Sc. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems (7, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: komarovf@bsu.by.

*Romanov Ivan A.* – Junior researcher. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: romivan@bsu.by.

*Vlasukova Liudmila A.* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Head of the Laboratory. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: vlasukova@bsu.by.

*Parkhomenko Irina N.* – Ph. D. (Physics and Mathematics), Leading researcher. Belarusian State University (5, Kurchatov Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: parkhomenko@bsu.by.

*Tsivako Alexey A.* – Production manager. Joint Stock Company “Integral” (121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: atsivako@integral.by.

*Kovalchuk Natalia S.* – Ph. D. (Engineering), Deputy Chief Engineer. Joint Stock Company “Integral” (121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: nkovalchuk@integral.by.