

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

ФИЗИКА
PHYSICS

УДК 538.958
<https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-23-31>

Поступило в редакцию 09.12.2024
Received 09.12.2024

**И. А. Романов¹, Н. С. Ковальчук², Л. А. Власукова¹, И. Н. Пархоменко¹,
академик Ф. Ф. Комаров³, С. А. Демидович²**

¹Белорусский государственный университет, Минск, Республика Беларусь

²ОАО «Интеграл», Минск, Республика Беларусь

³Институт прикладных физических проблем имени А. Н. Севченко
Белорусского государственного университета, Минск, Республика Беларусь

**МЕХАНИЗМЫ РЕЗИСТИВНОГО ПЕРЕКЛЮЧЕНИЯ В МЕМРИСТОРАХ
НА ОСНОВЕ СЛОЕВ НЕСТЕХИОМЕТРИЧЕСКОГО НИТРИДА КРЕМНИЯ**

Аннотация. Исследованы электрофизические свойства и эффект резистивного переключения мемристорной структуры Ni/SiN_x/p⁺Si/Ni. Пленки нитрида кремния толщиной ~40–60 нм осаждались в индуктивно-связанной плазме из смеси SiH₄–N₂–Ar при соотношениях [SiH₄]/[N₂], равных 2,19 и 2,55, что обеспечивало получение SiN_x с избытком кремния в сравнении со стехиометрией. Для оценки воздействия термоотжига на резистивные свойства SiN_x одна из пластин с нитридной пленкой проходила быструю термообработку (БТО, 1200 °С, 3 мин в Ar). Эффект резистивного переключения наблюдался при приложении напряжения от –4 до +10 В для тестовых структур на основе нитридных пленок, характеризующихся показателями преломления 2,34 и 2,5. Показано, что проводимость и механизм транспорта заряда в пленках с резистивными свойствами зависят от условий осаждения и последующей термообработки нитридной пленки. Обсуждаются возможные механизмы резистивного переключения.

Ключевые слова: нитрид кремния, показатель преломления, вольт-амперные характеристики, мемристор, перенос заряда

Для цитирования. Механизмы резистивного переключения в мемристорах на основе слоев нестехиометрического нитрида кремния / И. А. Романов, Н. С. Ковальчук, Л. А. Власукова [и др.] // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 2025. – Т. 69, № 1. – С. 23–31. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-23-31>

**Ivan A. Romanov¹, Natalia S. Kovalchuk², Liudmila A. Vlasukova¹, Irina N. Parkhomenko¹,
Academician Fadei F. Komarov³, Sergey A. Demidovich²**

¹Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

²Joint Stock Company “Integral”, Minsk, Republic of Belarus

³A. N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of the Belarusian State University, Minsk, Republic of Belarus

**RESISTIVE SWITCHING MECHANISMS IN MEMRISTOR STRUCTURES BASED
ON NONSTOICHIOMETRIC SILICON NITRIDE LAYERS**

Abstract. The electrophysical properties and the resistive switching effect of the Ni/SiN_x/p⁺Si/Ni memristor structure are investigated. Silicon nitride films with a thickness of ~40–60 nm were deposited in inductively coupled plasma from a SiH₄–N₂–Ar mixture at [SiH₄]/[N₂] ratios of 2.19 and 2.55, which ensured the formation of SiN_x with an excess of Si compared to stoichiometry. To investigate the effect of thermal annealing on the resistive properties of SiN_x, one of the wafers with a nitride film was annealed using rapid thermal annealing (RTA, 1200 °C, 3 minutes in Ar). The resistive switching effect was observed when applying a voltage from –4 to +10 V for test structures based on nitride films with refractive indices of 2.34 and 2.5. It is shown that the conductivity and charge transport mechanism in SiN_x films with resistive properties depend on the deposition conditions and subsequent heat treatment. Possible mechanisms of resistive switching are discussed.

Keywords: silicon nitride, memristor, current-voltage characteristics, charge transport

For citation. Romanov I. A., Kovalchuk N. S., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., Komarov F. F., Demidovich S. A. Resistive switching mechanisms in memristor structures based on nonstoichiometric silicon nitride layers. *Doklady Natsional'noi akademii nauk Belarusi = Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*, 2025, vol. 69, no. 1, pp. 23–31 (in Russian). <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2025-69-1-23-31>

Введение. Современные информационные технологии активно развиваются, требуя новых, более эффективных решений для хранения и обработки данных. В последние годы мемристоры как элементы с возможностью изменения сопротивления в зависимости от прошедшего тока, благодаря их способности реализовывать функции памяти и логических операций в одном устройстве привлекают внимание ученых. Одним из перспективных направлений является разработка мемристоров на основе аморфных пленок нитрида кремния, обладающего высокой термической стабильностью, коррозионной стойкостью, изменяющимися проводящими характеристиками и совместимостью с современными технологическими процессами.

Механизмы резистивного переключения и транспорта заряда в нитриде кремния пока однозначно не установлены и могут существенно различаться в зависимости от структуры материала, наличия водорода и дефектов, что, в свою очередь, определяется технологией получения пленок [1] и постобработки [2]. Резистивное переключение (мемристивный эффект) в нитриде кремния – материале, обладающем высокой концентрацией ловушек, связывают чаще всего с дефектами [1; 3; 4]. Под действием электрического поля дефекты (азотные вакансии, оборванные связи Si) в пленке нитрида кремния могут генерироваться или, наоборот, разрушаться, изменяя таким образом проводимость материала. В некоторых случаях может происходить перемещение ионов азота [5] с формированием высокопроводящих участков (филаментов), изменяющих сопротивление материала. За резистивное переключение в нитриде кремния могут быть также ответственны избыточные атомы кремния, образующие проводящие каналы под воздействием электрического поля [2; 4; 6; 7]. Один из распространенных механизмов мемристивного переключения в нитриде кремния связан с ионным переносом из материала электрода в слой нитрида, сопровождающимся формированием квазиметаллических филаментов [5; 8]. Изучение и детализация этих механизмов позволит лучше понять, как контролировать и оптимизировать мемристивные свойства нитрида кремния.

Цель работы – исследование механизмов резистивного переключения в мемристорах на основе пленок нитрида кремния с избытком кремния, полученных методом химического вакуумного осаждения в индуктивно-связанной плазме (ICP CVD). В работе будет продемонстрировано, что механизм возникновения проводящего канала при резистивном переключении зависит не только от содержания избыточного кремния, но и от концентрации дефектов. Полученные результаты позволят предложить рекомендации по оптимизации технологических процессов для улучшения мемристивных свойств пленок нитрида кремния и их дальнейшего использования в устройствах памяти и нейроморфных системах.

Материалы и методы исследования. Пленки нитрида кремния осаждались методом химического вакуумного осаждения в индуктивно-связанной плазме (Inductive-Coupled Plasma – ICP) на установке STE ICP200D (SemiTEq, Санкт-Петербург) на кремниевые подложки КДБ 0,03 диаметром 100 мм. Температура подложкодержателя при осаждении составляла 300 °С, рабочая мощность ICP-электрода составляла 600 Вт при частоте 13,56 МГц, давление в рабочей камере поддерживалось на уровне 2,5 Па. Расход газа-носителя (Ar) составлял 150 см³/мин (sccm), расход азота (N₂) поддерживался равным 5,5 см³/мин (sccm). Для оценки влияния соотношения реагирующих газов на резистивные свойства пленок осаждение проводилось при расходах моносилана (SiH₄), равных 12 и 14 см³/мин (sccm), при этом соотношение расходов реагирующих газов $R = [\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$ составляло 2,19 и 2,55 соответственно и обеспечивало получение нитридных пленок с избыточным содержанием Si в сравнении со стехиометрией. Как показано ранее, при значениях $R > 2,0$ пленки SiN_x, полученные методом ICP CVD в похожих режимах, характеризуются избытком кремния [9]. Пленки SiN_x с избытком кремния отличаются высоким уровнем содержания дефектов типа азотных вакансий и атомов кремния с оборванными связями, которые играют ключевую роль в проводимости слоев SiN_x [2; 3]. Для оценки воздействия термоотжига на резистивные свойства SiN_x одна из пластин с нитридной пленкой проходила быструю термообработку (БТО) при 1200 °С в течение 3 мин в Ar в установке AS Master (AnnealSys, Франция).

Для создания контактных площадок на поверхность нитридных слоев напылялась пленка Ni толщиной 200 нм, из которой методом фотолитографии формировались массивы электродов с диаметрами от 60 до 500 мкм. Для формирования омического контакта к кремнию на обрат-

ную сторону пластин также напылялась сплошная пленка Ni толщиной 200 нм. В результате формировались структуры типа «металл–изолятор–полупроводник–металл».

Толщина нитридных пленок и Ni-электродов контролировалась методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе Hitachi S-4800. Показатель преломления слоев SiN_x определялся на лазерном эллипсометре ЛЭФ-3М1. Вольт-амперные характеристики (ВАХ) измерялись на анализаторе параметров полупроводниковых приборов Agilent B1500A (Santa Rosa, CA, США). Напряжение смещения подавалось на верхний электрод, в то время как нижний оставался заземленным. Вид тестовых структур представлен на рис. 1.

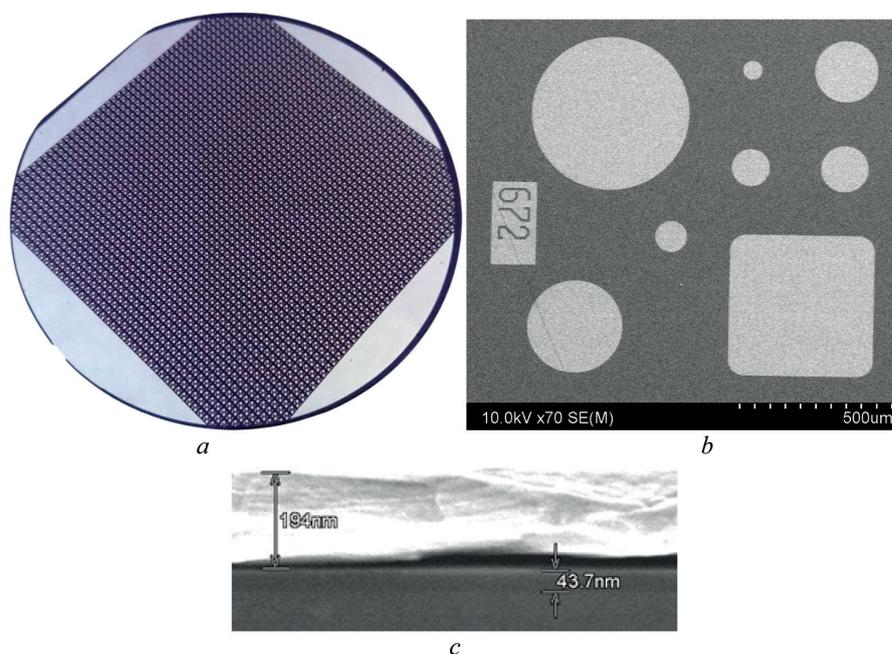


Рис. 1. Изображение тестовой структуры с Ni-электродами на поверхности (a), СЭМ изображение Ni-электродов (b), СЭМ изображение поперечного сечения мемристорной ячейки (c)

Fig. 1. Image of test structure with Ni electrodes on the surface (a), SEM image of Ni electrodes (b), SEM image of cross-section of memristor cell (c)

Результаты и их обсуждение. В таблице приведены соотношения реагентов при осаждении, а также результаты измерений толщины и показателя преломления нитридных пленок тестовых структур N1–N3.

Соотношение реагентов при осаждении, толщина и показатель преломления пленок SiN_x

Reagent ratio during deposition, thickness and refractive index of SiN_x films

Номер структуры Number of the structure	[SiH ₄]/[N ₂]	Толщина, нм Thickness, nm		Показатель преломления <i>n</i> Refractive index <i>n</i>	
		До БТО Before RTA	После БТО After RTA	До БТО Before RTA	После БТО After RTA
N1	2,19	61	53	2,18	2,50
N2	2,19	61	Отжиг не проводился	2,18	Отжиг не проводился
N3	2,55	44	Отжиг не проводился	2,34	Отжиг не проводился

Химический состав нитрида кремния можно качественно оценить по значению показателя преломления (*n*). Для стехиометрического материала $n = 2,02 \pm 0,02$. Более высокие значения *n* соответствуют обогащению пленки кремнием, значения ниже – обогащению пленки азотом. Как видно из таблицы, пленки SiN_x, полученные в нашем эксперименте, характеризовались высокими показателями преломления, характерными для материала с избытком кремния, причем *n* воз-

растал с ростом соотношения $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$. Следует также отметить, что БТО привел к существенному возрастанию показателя преломления и уменьшению толщины нитрида (образец N1). Эффект уменьшения толщины пленки после высокотемпературной обработки наблюдался нами ранее для пленок ICP CVD- SiN_x [10] и может быть объяснен уплотнением микроструктуры.

Как показали электрические измерения, резистивное переключение наблюдалось для тестовой структуры N1, подвергнутой БТО, и структуры N3 и не наблюдалось в случае структуры N2. Как видно из таблицы, нитридная пленка в случае структуры N2 формировалась при меньшем соотношении $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$ и характеризовалась минимальным значением показателя преломления. Предварительно можно сделать вывод, что проявления резистивного эффекта можно ожидать для пленок SiN_x со значительным избытком кремния в сравнении со стехиометрией.

Далее рассмотрим особенности гистерезиса ВАХ в случае структур N1 и N3.

На рис. 2 приведены вольт-амперные характеристики, полученные для мемристорных ячеек тестовой структуры N1.

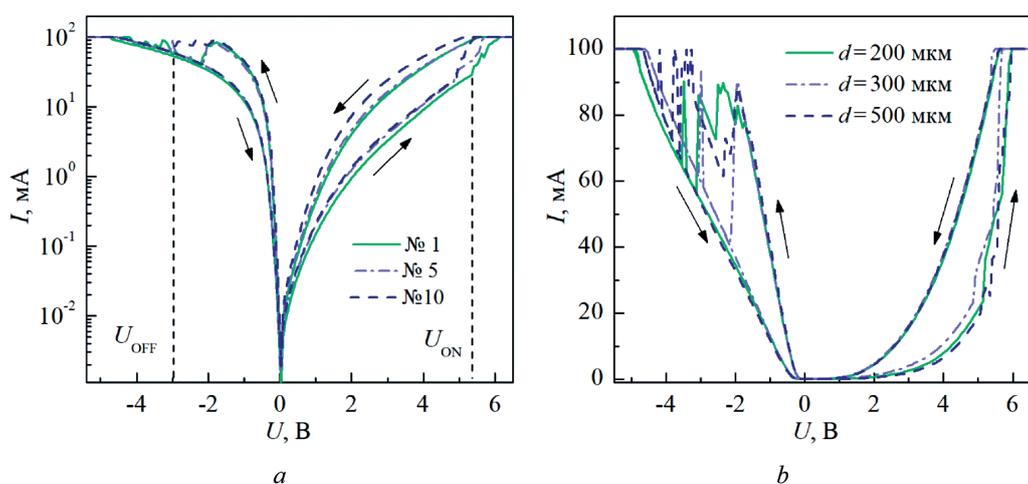


Рис. 2. 1-й, 5-й и 10-й циклы ВАХ мемристорных ячеек структуры N1 с диаметром электрода 200 мкм (a); циклы ВАХ, полученные в процессе 5-го измерения на электродах с диаметрами 200, 300 и 500 мкм (b)

Fig. 2. The 1st, 5th and 10th cycles of the I-V characteristics of the memristor cells of the N1 structure with an electrode diameter of 200 μm (a); the I-V characteristic cycles obtained during the 5th measurement on electrodes with diameters of 200, 300 and 500 μm (b)

На рис. 2, a изображены три цикла ВАХ мемристорной ячейки из структуры N1 с диаметром электрода 200 мкм. Вольт-амперные характеристики измерялись в диапазоне напряжений от -6 до $+7$ В с ограничением по току 100 мА. Прямой ветви ВАХ соответствует положительный потенциал на Ni-электроде относительно кремниевой подложки. Стрелками указано направление измерения. Напряжению включения (U_{on}) соответствует переход из состояния с высоким сопротивлением (СВС) в состояние с низким сопротивлением (СНС), напряжению выключения (U_{off}) – переход из СНС в СВС. Путем измерения 50 циклов ВАХ на ячейках с различными диаметрами электродов установлено, что значения напряжения U_{on} находятся в диапазоне 5–6 В, а значения напряжения U_{off} в диапазоне $-2\dots-4$ В. Следует отметить, что в процессе 10-го измерения в области прямой ветви ВАХ наблюдается увеличение тока на 25 %.

Для интерпретации механизмов проводимости проведено сравнение ВАХ ячеек с различными диаметрами электродов (рис. 2, b). Как видно из рисунка, ВАХ ячеек с различной площадью электродов для образца N1 практически идентичны. Обратные ветви ВАХ в СВС- и в СНС-состояниях характеризуются линейной зависимостью. Сопротивление, определенное по обратной ветви ВАХ в состоянии с низким сопротивлением, составило ~ 20 Ом, в состоянии с высоким сопротивлением ~ 50 Ом. Сравнение представленных на рис. 2, a характеристик позволило сделать вывод, что проводимость мемристорных ячеек в случае образца N1 характеризуется физическими свойствами проводящего филамента и не зависит от электрофизических свойств матри-

цы нитрида кремния. Низкое сопротивление (20 Ом в СНС) позволяет предположить, что проводящие филаменты формируются из материала верхнего электрода путем дрейфа высокоподвижных катионов Ni^{+} [8]. Процесс переключения в СНС происходит при положительном потенциале смещения на Ni электроде и включает в себя следующие этапы:

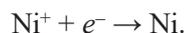
1. Анодное растворение Ni по реакции:



где Ni^{+} – катионы никеля в тонкой пленке твердого электролита (нитрида кремния);

2. Миграция катионов Ni^{+} через тонкую пленку нитрида кремния под действием электрического поля в направлении к Si -подложке;

3. Восстановление и электрокристаллизация Ni на поверхности кремниевого электрода по реакции катодного осаждения



При изменении полярности приложенного напряжения происходит частичное электрохимическое растворение проводящих филаментов, что возвращает систему в состояние с высоким сопротивлением. В СВС значительное влияние на проводимость оказывает промежуточный диэлектрический слой, расположенный между электродом и нерастворенной частью филамента. При толщине диэлектрического слоя менее 5 нм проводимость обеспечивается за счет квантово-механического туннелирования и имеет омический характер.

Асимметрия ВАХ (рис. 2, *b*), по-видимому, обусловлена формированием барьера Шоттки на границе «металлический филамент–кремний» [11]. При контакте кремния p -типа с металлическим филаментом на границе двух материалов возникает потенциальный барьер, препятствующий диффузии электронов из кремния в металл. Увеличение напряжения на Ni -электроде приводит к увеличению высоты потенциального барьера на границе «филамент–кремний» и уменьшению проводимости структуры, поэтому прямая ветвь ВАХ имеет нелинейную форму. При отрицательном потенциале на Ni -электроде (обратная ветвь ВАХ) потенциальный барьер практически исчезает, вследствие чего возрастает проводимость структуры.

На рис. 3, *a* показано шесть циклов ВАХ мемристорной ячейки из структуры N3 с диаметром Ni -электрода 200 мкм. Измерения ВАХ проводились в диапазоне напряжений от -6 до $+10$ В с ограничением по току 2 мА. В отличие от структуры N1 переключение в СНС происходит при отрицательном напряжении на Ni -электроде, при этом значения напряжения U_{on} находятся в диапазоне $-3 \dots -4$ В. Для структуры N3 обнаружено влияние площади электрода на плотность тока: увеличение площади электрода приводит к пропорциональному увеличению плотности тока.

Как видно из рис. 3, *a*, каждый последующий цикл измерения ВАХ приводит к увеличению проводимости структуры в СВС. За счет постепенного переключения в состояние с высоким сопротивлением прямые ветви ВАХ имеют вид N-характеристик. Наличие области отрицательного дифференциального сопротивления наблюдалось ранее на ВАХ мемристоров на основе оксидов переходных металлов (TaO_x , HfO_x , NbO_x , $LiNbO_x$) [8; 11; 12]. Проводимость мемристоров на основе этих материалов описывается моделями переноса носителей заряда с участием ловушек. Основными электронными и дырочными ловушками в оксидах металлов и полупроводников являются кислородные вакансии. В слоях SiN_x , обогащенных кремнием, в роли электронных и дырочных ловушек могут выступать азотные вакансии, трехкоординированные атомы кремния ($\equiv Si\cdot$), двухкоординированные атомы азота ($=N\cdot$) и $Si-Si$ связи [6; 13]. Варьирование соотношения потоков реагирующих газов в ходе осаждения слоев SiN_x , а также температуры и длительности последующих термообработок позволяет управлять концентрацией дефектов и шириной запрещенной зоны и тем самым влиять на электрофизические свойства слоев нитрида кремния.

На рис. 3, *b* изображены ВАХ структур N1 и N3. Как видно из рисунка, проводимость SiN_x , отожженного при температуре 1200 °С, превышает проводимость нитрида, не прошедшего термообработку, на 2–3 порядка величины во всем исследуемом диапазоне напряжений. Поскольку при осаждении SiN_x в качестве источника кремния используется моносилан, высвобождающийся при его разложении водород частично встраивается в растущую пленку с образованием связей

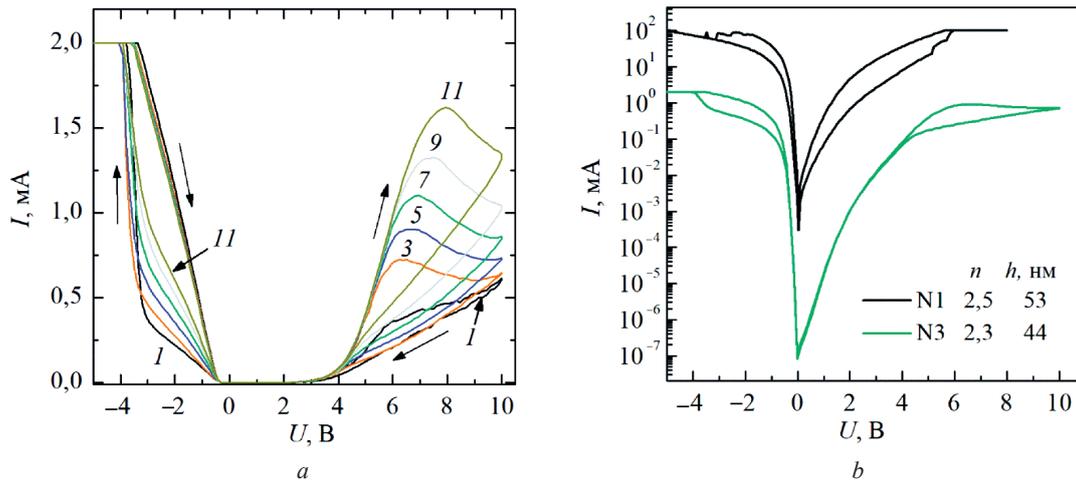


Рис. 3. I – II циклы ВАХ мемристорной ячейки из структуры N3 с диаметром электрода 200 мкм (а); ВАХ ячеек из структур N1 и N3, изображенные в полулогарифмических координатах (б)

Fig. 3. I – II cycles of the I–V characteristic of the memristor cell from N3 structure with an electrode diameter of 200 μm (a); I–V characteristics of cells from N1 and N3 structures, shown in semi-logarithmic coordinates (b)

Si–H и N–H. Известно, что термообработка нитрида кремния при высоких температурах приводит к диссоциации связей с участием водорода и образованию дефектов типа $\equiv\text{Si}\cdot$ и $=\text{N}\cdot$ [14]. С выделением молекулярного водорода и уплотнением микроструктуры нитрида, по-видимому, связано увеличение показателя преломления SiN_x от 2,18 до 2,50 после термообработки пластины N1 [15]. Таким образом, нитрид кремния в структуре N1 характеризуется большей концентрацией атомов с оборванными связями и благодаря этому обладает более высокой проводимостью по сравнению с нитридом, не прошедшим термообработку.

Вольт-амперные характеристики структур N1 и N3 в СНС имеют схожую форму: обратные ветви характеризуются линейной зависимостью, а пологая форма прямых ветвей ВАХ обусловлена наличием обедненного слоя в приповерхностной области кремния. Сопротивление структуры N3, определенное по обратной ветви ВАХ, в СНС составляет $\sim 1,7$ кОм. Для состояния с высоким сопротивлением обратные ветви ВАХ в диапазоне $-0,3 \dots -3,0$ В также имеют линейную зависимость и характеризуются сопротивлением 3,2–8,3 кОм. Высокие значения сопротивления в состоянии с низким сопротивлением позволяют предположить, что в случае образца N3 проводящие каналы формируются из дефектов структуры нитрида кремния, таких, как атомы $\equiv\text{Si}\cdot$ и азотные вакансии [2; 4; 6]. В случае высокой концентрации ловушек ($\sim 10^{20} \text{ см}^{-3}$) их потенциалы перекрываются и носители заряда перемещаются по механизму прыжковой проводимости между соседними локализованными состояниями. В области слабых электрических полей проводимость диэлектрика не зависит от напряженности электрического поля и описывается выражением [4]

$$\sigma = \frac{e^2 W}{ah kT} \exp\left(-\frac{W}{kT}\right), \quad (1)$$

где e – заряд электрона; W – энергия активации процесса прыжковой проводимости; a – расстояние между ловушками; $N = a^{-3}$ – концентрация ловушек; h – постоянная Планка; k – постоянная Больцмана; T – температура.

Путем аппроксимации обратных ветвей ВАХ структуры N3 установлено, что удельная проводимость в СВС варьируется в диапазоне $(1,5 \cdot 10^{-6}) \dots (4,0 \cdot 10^{-6}) \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. В СНС этот параметр составляет $7,3 \cdot 10^{-6} \text{ Ом}^{-1}\text{см}^{-1}$. По формуле (1), принимая значение энергии активации $W = 0,5$ эВ, проведена оценка концентрации ловушек в состояниях с низким и высоким сопротивлением. Минимальное значение концентрации ловушек в СВС составило $5 \cdot 10^{17} \text{ см}^{-3}$, максимальное – $1 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Значение концентрации ловушек в СНС составило $6 \cdot 10^{19} \text{ см}^{-3}$. Проведенные расчеты показывают, что пропускание заряда через слой SiN_x приводит к перестройке дефектной структуры и увеличению концентрации локализованных состояний более, чем на 2 порядка.

Переключение между состояниями с высоким и низким сопротивлением может происходить за счет процессов генерации и пассивации участвующих в проводимости дефектов. В [2] предложена модель переключения сопротивления в структурах $\text{Al}/\text{SiN}_x/\text{H}/\text{Si}$, согласно которой переключение из СВС в СНС происходит за счет диссоциации Si–H связей с образованием оборванных связей $\equiv\text{Si}\cdot$, формирующих проводящие каналы. Переход в СНС происходил при положительном потенциале на Al-электроде. Ионы водорода, образующиеся в процессе ударной ионизации Si–H связей, за счет электростатического притяжения перемещались в направлении кремниевой подложки. При приложении отрицательного напряжения к Al-электроду ионы H^+ могут мигрировать в обратном направлении и пассивировать оборванные связи, что приводит к уменьшению концентрации дефектов $\equiv\text{Si}\cdot$ и снижению проводимости структуры.

В нашем эксперименте в случае структуры N3 генерация дефектов, участвующих в процессах переноса носителей заряда, может происходить при отрицательном смещении Ni-электрода. При этом ионы водорода, образующиеся при разрыве Si–H связей, перемещаются к Ni-электроду. При положительном потенциале на Ni-электроде ионы водорода мигрируют в обратном направлении и пассивируют трехкоординированные атомы кремния. Так как подвижность ионов значительно меньше подвижности электронов, скорость переключения в СВС ниже скорости переключения в СНС. Это объясняет появление участка с отрицательным дифференциальным сопротивлением при переключении СНС→СВС. Увеличение проводимости структуры в СВС при каждом последующем цикле измерения можно объяснить тем, что концентрация восстановленных Si–H связей значительно ниже концентрации образовавшихся дефектов $\equiv\text{Si}\cdot$.

Заключение. Проведены измерения и анализ вольт-амперных характеристик мемристорных структур $\text{Ni}/\text{SiN}_x/\text{p}^+\text{Si}/\text{Ni}$ на основе пленок нитрида кремния толщиной 40–60 нм, полученных осаждением из смеси $\text{SiH}_4\text{--N}_2\text{--Ar}$ в индуктивно-связанной плазме при различных соотношениях $[\text{SiH}_4]/[\text{N}_2]$. Для структур на основе нитридных пленок, характеризующихся существенным избытком кремния в сравнении со стехиометрией (показатели преломления 2,34 и 2,50), наблюдается эффект резистивного переключения при приложении напряжения от –4 до +10 В.

Показано, что толщина, показатель преломления и проводимость пленки SiN_x зависят от условий осаждения и последующей термообработки. БТО структуры SiN_x/Si привело к увеличению показателя преломления с 2,18 до 2,50 и уменьшению толщины пленки SiN_x с 61 до 53 нм. Проводимость SiN_x , прошедшего БТО (тестовая структура N1), превышает проводимость нитрида, не прошедшего термообработку (структура N3), на 2–3 порядка величины во всем исследуемом диапазоне напряжений.

Показано, что природа проводящих филаментов различна для слоев SiN_x , прошедших высокотемпературную термообработку, и слоев SiN_x без термообработки.

ВАХ мемристорных структур со слоем SiN_x , прошедшим БТО, не зависит от площади Ni-электрода и определяется электрофизическими свойствами самого проводящего филамента, а не свойствами матрицы SiN_x . Переключение в состояние с низким сопротивлением происходит при положительном напряжении на верхнем электроде. Низкое сопротивление в СНС (20 Ом) и линейная зависимость обратных ветвей ВАХ позволяют предположить, что проводящие филаменты в этом случае формируются из материала верхнего электрода путем дрейфа высокоподвижных катионов Ni^+ . Приложение отрицательного смещения к Ni-электроду в диапазоне –2...–4 В приводит к частичному разрушению филамента и переходу в СВС.

В случае с SiN_x , не прошедшем отжиг (структура N3), переключение в СНС происходит при отрицательном напряжении на Ni-электроде. Зависимость тока от площади электродов свидетельствует о том, что резистивный эффект в этом случае определяется электрофизическими свойствами матрицы SiN_x . Высокое значение сопротивления в СНС (~1,7 кОм) позволяет предположить, что проводящие филаменты формируются из дефектов в нитриде кремния, таких как атомы $\equiv\text{Si}\cdot$, Si–Si связи и азотные вакансии. Генерация дефектов такого типа может происходить за счет диссоциации Si–H связей. Перенос носителей заряда в области слабых электрических полей в таких структурах осуществляется по механизму туннелирования носителей заряда между ловушками, а сопротивление нитридного слоя определяется концентрацией и глубиной залегания дефектов.

Полученные результаты могут быть использованы при прогнозировании условий формирования нестехиометрических пленок SiN_x в качестве активной среды мемристоров с улучшенными параметрами.

Благодарности. Работа выполнена при поддержке Государственной программы научных исследований «Фотоника и электроника для инноваций» (грант 3.8.1, № ГР20212595).

Acknowledgments. This work was supported by the Belarusian state program of scientific research “Photonics and electronic for innovations” (projects 3.8.1, SR No. 20212595).

Список использованных источников

1. Гриценко, В. А. Запоминающие свойства мемристоров на основе оксида и нитрида кремния / В. А. Гриценко, А. А. Гисматулин, О. М. Орлов // Российские нанотехнологии. – 2021. – Т. 16, № 6. – С. 751–760. <https://doi.org/10.1134/s1992722321060078>
2. a- SiN_x :H-based ultra-low power resistive random access memory with tunable Si dangling bond conduction paths / X. Jiang, Z. Ma, J. Xu [et al.] // *Scientific Reports*. – 2015. – Vol. 5. – Art. 15762. <https://doi.org/10.1038/srep15762>
3. Yen, T. J. High performance all nonmetal SiN_x resistive random access memory with strong process dependence / T. J. Yen, A. Chin, V. Gritsenko // *Scientific Reports*. – 2020. – Vol. 10. – Art. 2807. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59838-y>
4. Charge transport mechanism in the forming-free memristor based on PECVD silicon oxynitride / A. A. Gismatulin, G. N. Kamaev, V. A. Volodin, V. A. Gritsenko // *Electronics*. – 2023. – Vol. 12, N 3. – Art. 598. <https://doi.org/10.3390/electronics12030598>
5. Understanding the role of defects in Silicon Nitride-based resistive switching memories through oxygen doping / N. Vasileiadis, P. Karakolis, P. Mandylas [et al.] // *IEEE Transactions on Nanotechnology*. – 2021. – Vol. 20. – P. 356–364. <https://doi.org/10.1109/tnano.2021.3072974>
6. Nature of traps responsible for the memory effect in silicon nitride / V. A. Gritsenko, T. V. Perevalov, O. M. Orlov, G. Ya. Krasnikov // *Applied Physics Letters*. – 2016. – Vol. 109, N 6. – Art. 062904. <https://doi.org/10.1063/1.4959830>
7. Memory properties and short-range order in silicon oxynitride-based memristors / Yu. N. Novikov, G. N. Kamaev, I. P. Prosvirin, V. A. Gritsenko // *Applied Physics Letters*. – 2023. – Vol. 122, N 23. – Art. 232903. <https://doi.org/10.1063/5.0151211>
8. Redox-based resistive switching memories – nanoionic mechanisms, prospects, and challenges / R. Waser, R. Dittmann, G. Staikov, K. Szot // *Advanced Materials*. – 2009. – Vol. 21, N 25–26. – P. 2632–2663. <https://doi.org/10.1002/adma.200900375>
9. Механические напряжения в пленках SiN_x при химическом осаждении из газовой фазы в плазме высокой плотности / Н. С. Ковальчук, С. А. Демидович, Л. А. Власукова [и др.] // *Неорганические материалы*. – 2022. – Т. 58, № 9. – С. 938–944. <https://doi.org/10.31857/s0002337x2209007x>
10. Effect of rapid thermal annealing on Si-based dielectric films grown by ICP-CVD / I. Parkhomenko, L. Vlasukova, F. Komarov [et al.] // *ACS Omega*. – 2023. – Vol. 8, N 33. – P. 30768–30775. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04997>
11. Voltage-programmable negative differential resistance in memristor of single-crystalline lithium niobate thin film / J. Wang, X. Pan, W. Luo [et al.] // *Applied Physics Letters*. – 2022. – Vol. 120, N 3. – Art. 032901. <https://doi.org/10.1063/5.0070132>
12. A deep study of resistance switching phenomena in TaO_x ReRAM cells: system-theoretic dynamic route map analysis and experimental verification / A. Ascoli, S. Menzel, V. Rana [et al.] // *Advanced Electronic Materials*. – 2022. – Vol. 8, N 8. – Art. 2200182. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200182>
13. Electron trap level of hydrogen incorporated nitrogen vacancies in silicon nitride / K. Sonoda, E. Tsukuda, M. Tanizawa, Y. Yamaguchi // *Journal of Applied Physics*. – 2015. – Vol. 117, N 10. – Art. 104501. <https://doi.org/10.1063/1.4914163>
14. Creation and properties of nitrogen dangling bond defects in silicon nitride thin films / W. L. Warren, C. H. Seager, J. Robertson [et al.] // *Journal of the Electrochemical Society*. – 1996. – Vol. 143, N 11. – P. 3685–3691. <https://doi.org/10.1149/1.1837272>
15. Васильев, В. Ю. Технология получения тонких пленок нитрида кремния для микроэлектроники и микросистемной техники. Ч. 8: Влияние водорода в пленках на их свойства / В. Ю. Васильев // *Нано- и микросистемная техника*. – 2019. – Т. 21, № 6. – С. 352–367.

References

1. Gritsenko V. A., Gismatulin A. A., Orlov O. M. Memory properties of SiO_x and SiN_x -based memristors. *Nanobiotechnology Reports*, 2021, vol. 16, no. 6, pp. 722–731. <https://doi.org/10.1134/s2635167621060070>
2. Jiang X., Ma Z., Xu J., Chen K., Xu L., Li W., Huang X., Feng D. a- SiN_x :H-based ultra-low power resistive random access memory with tunable Si dangling bond conduction paths. *Scientific Reports*, 2015, vol. 5, art. 15762. <https://doi.org/10.1038/srep15762>
3. Yen T. J., Chin A., Gritsenko V. High performance all nonmetal SiN_x resistive random access memory with strong process dependence. *Scientific Reports*, 2020, vol. 10, art. 2807. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-59838-y>
4. Gismatulin A. A., Kamaev G. N., Volodin V. A., Gritsenko V. A. Charge transport mechanism in the forming-free memristor based on PECVD silicon oxynitride. *Electronics*, 2023, vol. 12, no. 3, art. 598. <https://doi.org/10.3390/electronics12030598>

5. Vasileiadis N., Karakolis P., Mandylas P., Ioannou-Sougleridis V., Normand P., Perego M., Komninou P., Ntinis V., Fyrigos I.-A., Karafyllidis I. G., Sirakoulis G. Ch., Dimitrakis P. Understanding the role of defects in Silicon Nitride-based resistive switching memories through oxygen doping. *IEEE Transactions on Nanotechnology*, 2021, vol. 20, pp. 356–364. <https://doi.org/10.1109/tnano.2021.3072974>
6. Gritsenko V. A., Perevalov T. V., Orlov O. M., Krasnikov G. Ya. Nature of traps responsible for the memory effect in silicon nitride. *Applied Physics Letters*, 2016, vol. 109, no. 6, art. 062904. <https://doi.org/10.1063/1.4959830>
7. Novikov Yu. N., Kamaev G. N., Prosvirin I. P., Gritsenko V. A. Memory properties and short-range order in silicon oxynitride-based memristors. *Applied Physics Letters*, 2023, vol. 122, no. 23, art. 232903. <https://doi.org/10.1063/5.0151211>
8. Waser R., Dittmann R., Staikov G., Szot K. Redox-based resistive switching memories – nanoionic mechanisms, prospects, and challenges. *Advanced Materials*, 2009, vol. 21, no. 25–26, pp. 2632–2663. <https://doi.org/10.1002/adma.200900375>
9. Koval'chuk N. S., Demidovich S. A., Vlasukova L. A., Parkhomenko I. N., Komarov F. F. Mechanical stress in SiN_x films grown by high density plasma enhanced chemical vapor deposition. *Inorganic Materials*, 2022, vol. 58, no. 9, pp. 906–911. <https://doi.org/10.1134/s0020168522090072>
10. Parkhomenko I., Vlasukova L., Komarov F., Kovalchuk N., Demidovich S., Zhussupbekova A., Zhussupbekov K., Shvets I. V., Milchanin O., Zhigulin D., Romanov I. Effect of rapid thermal annealing on Si-based dielectric films grown by ICP-CVD. *ACS Omega*, 2023, vol. 8, no. 33, pp. 30768–30775. <https://doi.org/10.1021/acsomega.3c04997>
11. Wang J., Pan X., Luo W., Shuai Y., Zeng H., Xie Q., Huang S., Wu C., Zhang W. Voltage-programmable negative differential resistance in memristor of single-crystalline lithium niobate thin film. *Applied Physics Letters*, 2022, vol. 120, no. 3, art. 032901. <https://doi.org/10.1063/5.0070132>
12. Ascoli A., Menzel S., Rana V., Kempen T., Messaris I., Demirkol A. S., Schulten M., Siemon A., Tetzlaff R. A deep study of resistance switching phenomena in TaO_x ReRAM cells: system-theoretic dynamic route map analysis and experimental verification. *Advanced Electronic Materials*, 2022, vol. 8, no. 8, art. 2200182. <https://doi.org/10.1002/aelm.202200182>
13. Sonoda K., Tsukuda E., Tanizawa M., Yamaguchi Y. Electron trap level of hydrogen incorporated nitrogen vacancies in silicon nitride. *Journal of Applied Physics*, 2015, vol. 117, no. 10, art. 104501. <https://doi.org/10.1063/1.4914163>
14. Warren W. L., Seager C. H., Robertson J., Kanicki J., Poindexter E. H. Creation and properties of nitrogen dangling bond defects in silicon nitride thin films. *Journal of the Electrochemical Society*, 1996, vol. 143, no. 11, pp. 3685–3691. <https://doi.org/10.1149/1.1837272>
15. Vasilyev V. Yu. Silicon nitride thin film deposition for microelectronics and microsystems technologies. Part 8: Hydrogen influence on basic film properties. *Nano- i mikrosistemnaya tekhnika = Nano and Microsystems technology*, 2019, vol. 21, no. 6, pp. 352–367 (in Russian).

Информация об авторах

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

Ковальчук Наталья Станиславовна – канд. техн. наук, заместитель генерального директора–главный инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: nkovalchuk@integral.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.

Комаров Фадей Фадеевич – академик, 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.

Демидович Сергей Александрович – ведущий инженер. ОАО «Интеграл» (ул. Казинца, 121А, 220108, Минск, Республика Беларусь). E-mail: sdemidovich@integral.by.

Information about the authors

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

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

Komarov Fadei F. – Academician, 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.

Demidovich Sergey A. – Leading Engineer. Joint Stock Company “Integral” (121A, Kazinets Str., 220108, Minsk, Republic of Belarus). E-mail: sdemidovich@integral.by.