

## НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.38-022.532

### ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕМРИСТОРОВ НА ОСНОВЕ НИТРИДА КРЕМНИЯ НА ПОДЛОЖКАХ “КРЕМНИЙ-НА-ИЗОЛЯТОРЕ”

© 2022 г. М. Н. Коряжкина<sup>1</sup>, Д. О. Филатов<sup>1</sup>, С. В. Тихов<sup>1</sup>, А. И. Белов<sup>1</sup>, Д. С. Королев<sup>1</sup>,  
А. В. Круглов<sup>1</sup>, Р. Н. Крюков<sup>1</sup>, С. Ю. Зубков<sup>1</sup>, В. А. Воронцов<sup>1</sup>, Д. А. Павлов<sup>1</sup>,  
Д. И. Тетельбаум<sup>1</sup>, А. Н. Михайлов<sup>1,\*</sup>, С. Ким<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

<sup>2</sup> Отделение электроники и электротехники, Университет Донгук, Сеул, Южная Корея

\*E-mail: mian@nifti.unn.ru

Поступила в редакцию 07.07.2021 г.

После доработки 16.07.2021 г.

Принята к публикации 30.07.2021 г.

Мемристоры вызывают особый интерес исследователей и инженеров в связи с перспективами создания новых информационно-вычислительных систем на их основе. В первую очередь это относится к мемристивным устройствам на основе эффекта резистивного переключения (РП), которые в большинстве случаев изготавливаются в виде структур “металл–диэлектрик–металл”. В то же время требование совместимости с базовым технологическим процессом изготовления комплементарных структур “металл–оксид–полупроводник” делает весьма привлекательным изготовление мемристивных устройств непосредственно на подложке кремния или подложке “кремний-на-изоляторе” (англ.: “silicon-on-insulator”, SOI) с применением стандартных диэлектрических слоев, таких как нитрид кремния. Изучены электрофизические характеристики и РП мемристоров на основе тонких пленок SiN<sub>x</sub>, сформированных на подложках SOI. Исследуемые мемристоры не требовали электроформовки и демонстрировали “синаптический” характер РП. Впервые показана возможность улучшения параметров РП мемристоров на основе SiN<sub>x</sub> на подложках SOI с помощью лазерной обработки.

DOI: 10.56304/S199272232106011X

#### ВВЕДЕНИЕ

Мемристор – двухэлектродный элемент наноэлектроники, который изменяет и запоминает свое сопротивление в зависимости от приложенного напряжения и протекшего через него заряда. Его основным отличием от полупроводниковых элементов памяти, реализующих двоичный код и два устойчивых состояния, является многоуровневый синаптический характер переключения проводимости [1]. Считается, что это позволит создавать на основе мемристоров компьютеры нового поколения (с архитектурой, отличной от фон Неймановской), а также нейроморфные системы искусственного интеллекта [2–4]. Основными недостатками мемристоров, созданных как в виде структур “металл–диэлектрик–металл”, так и в виде структур “металл–диэлектрик–полупроводник”, являются в совокупности недостаточная для практического применения воспроизводимость (стохастичность) параметров резистивного переключения (РП), высокие значения напряжений РП и сложность интеграции в стандартный процесс изготовления комплементар-

ных структур “металл–оксид–полупроводник” (КМОП). В настоящее время развивается ряд подходов к решению этих проблем: применение новых материалов и различных интерфейсов [5–8], применение переключающих сигналов специальной формы [9, 10], использование оптического излучения [11–13] или шума [14–17] в качестве параметров, управляющих динамикой переключения, программированием величин и длительностей переключающих импульсов [18–20] и др.

Перспективными диэлектрическими материалами считаются оксиды переходных металлов (например, HfO<sub>x</sub>, TaO<sub>x</sub>, ZrO<sub>x</sub>), а также SiO<sub>x</sub> и GeO<sub>x</sub>. Также интенсивно ведутся исследования мемристивных структур на основе SiN<sub>x</sub> [21–25], что представляет практический интерес в связи с их совместимостью со стандартной технологией создания современных интегральных схем.

Использование полупроводника в качестве одного из электродов мемристивной структуры актуально и с точки зрения интеграции мемристоров в стандартный КМОП-процесс [26–28]. В указанных работах использовались подложки

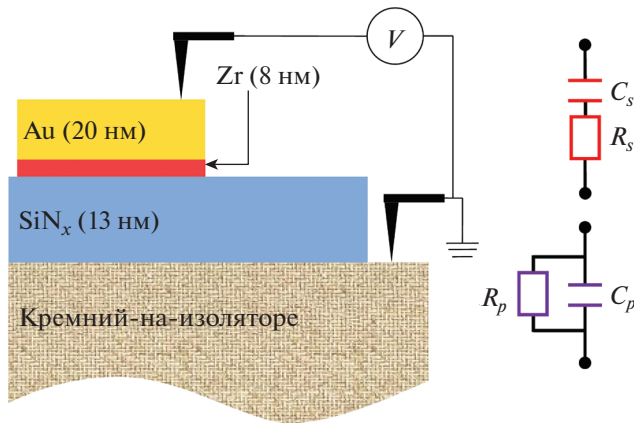


Рис. 1. Схематическое изображение мемристоров на основе  $\text{SiN}_x$  и простейшая эквивалентная RC-схема конденсатора.

объемного кремния. Однако при производстве большинства полупроводниковых приборов и микросхем предпочтение отдается подложкам “кремний-на-изоляторе” (“silicon-on-insulator”, SOI) за счет ряда важнейших преимуществ по сравнению с объемным кремнием: меньшая потребляемая мощность, большее быстродействие и плотность элементов [29]. Поэтому наиболее целесообразной является реализация мемристивных структур именно на подложках SOI. Несмотря на значительное количество опубликованных исследований мемристивных структур с электродом из объемного кремния, структуры на подложках SOI необходимо изучать самостоятельно из-за особенностей морфологии и структуры последних. Таким образом, разработка и исследование мемристивных структур, в которых подложка SOI выступает в качестве электрода, имеют значительный теоретический и практический интерес. Однако в литературе такие данные практически отсутствуют. Имеется несколько работ по использованию SOI в мемристивных устройствах (например, [30–33]).

Несмотря на практические преимущества использования полупроводника в качестве электрода мемристивной структуры, не стоит забывать о нежелательном наличии поверхностных состояний (ПС) на границе раздела диэлектрик/полупроводник, которые вносят значительный вклад в сопротивление структуры и тем самым увеличивают напряжения РП. Лазерная обработка (ЛО) может быть использована в качестве метода борьбы с такими дефектами. Эффект достигается за счет разогрева подложки вследствие поглощения в ней лазерного излучения. Кроме того, ЛО используется для модификации зарядового состояния диэлектрика во Flash-памяти, что применяется для полного удаления информации с элементов памяти [34]. Поэтому ЛО может быть

эффективно использована для изменения электрофизических характеристик мемристивных структур.

В настоящей работе предлагается подход по улучшению параметров РП, а именно, увеличения отношения сопротивлений в крайних резистивных состояниях мемристивных структур на основе перспективных и доступных диэлектрических слоев —  $\text{SiN}_x$ , сформированных в промышленных условиях на КМОП-совместимых подложках SOI. Данный подход основан не только на использовании стандартных для КМОП-процесса материалов, но и на применении ЛО, используемой в микроэлектронной промышленности для управления электрофизическими параметрами устройств. Кроме того, проведенное в данной работе исследование частотных зависимостей электрофизических характеристик мемристивных структур позволяет получить необходимую детальную информацию о процессах, происходящих в диэлектрической пленке, и о состоянии границ раздела диэлектрик/электрод в разных резистивных состояниях [35].

Насколько известно, комплексного исследования мемристивных структур на основе пленок  $\text{SiN}_x$  на SOI-подложках, в том числе выявления влияния ЛО на их электрофизические характеристики (определяющие параметры РП), проведено не было.

## МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки  $\text{SiN}_x$  (номинальной толщиной 13 нм) наносили на коммерческие подложки SOI с толщиной приборного слоя 360 нм методом плазмоактивированного химического осаждения из паровой фазы (Plasma-Enhanced Chemical Vapor Deposition) с использованием 5%-ной  $\text{SiH}_4/\text{N}_2$  (800 стандартных  $\text{см}^3/\text{мин}$ ),  $\text{NH}_3$  (10 стандартных  $\text{см}^3/\text{мин}$ ) и  $\text{N}_2$  (1200 стандартных  $\text{см}^3/\text{мин}$ ) при давлении 580 мТорр, высокочастотной мощности 60 Вт со скоростью осаждения 100 Å/мин. На поверхность пленки методом магнетронного распыления при температуре 473 К наносили верхние электроды из Au (20 нм) с подслоем Zr (8 нм) площадью  $S \sim 10^{-2} \text{ см}^2$ . Схематическое изображение полученных структур представлено на рис. 1.

Электрофизические характеристики измеряли на анализаторе полупроводниковых приборов Agilent B1500A. Знак напряжения на структурах соответствовал потенциалу верхнего электрода относительно потенциала нижнего электрода. Для исследований использовали прижимные электроды из фосфористой бронзы. Измеряли вольт-амперные характеристики (ВАХ) и малосигнальные  $C-f$ ,  $G-f$  и  $R-f$ -характеристики мемристоров в параллельной и последовательной схемах замещения конденсатора [36] в интервале

частот  $10^3 \dots 2 \times 10^6$  Гц. Определяли величины параллельной емкости ( $C_p$ ), параллельной проводимости, приведенной к круговой частоте, ( $G_p/\omega$ ), тангенса угла диэлектрических потерь ( $\text{tg}\delta$ ), последовательного ( $R_s$ ) и параллельного ( $R_p$ ) сопротивления. Параметры параллельной эквивалентной схемы определяются электронными явлениями в диэлектрике, а параметры последовательной эквивалентной схемы – сопротивлением электродов и переходного слоя между электродом и диэлектриком [36]. Кроме того, проводили измерения вольт-фарадных характеристик в параллельной схеме замещения конденсатора на частоте малого тестирующего сигнала 100 кГц.

Как было сказано выше, ЛО может быть использована с целью изменения электрофизических характеристик мемристивных структур, определяющих параметры РП. Предполагается, что ЛО позволит уменьшить величину встроенного заряда в диэлектрических пленках и понизить плотность ПС на границе раздела диэлектрик/полупроводник в мемристивных структурах. Поэтому часть мемристивных структур подвергали ЛО. Для этого использовали полупроводниковый лазер непрерывного излучения мощностью 1.5 Вт с длиной волны излучения 460 нм, что соответствует энергии фотона 2.7 эВ. Облучение проводили через верхний электрод в течение 10 мин. Отметим, что верхние электроды из Au толщиной 20 нм являлись полупрозрачными для используемой длины волны лазерного излучения [37]. Также отметим, что при воздействии лазерного излучения происходил разогрев структуры до  $\sim 473$  К.

Структурные исследования пленок  $\text{SiN}_x$  и мемристивных структур на их основе в данной работе выполнены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

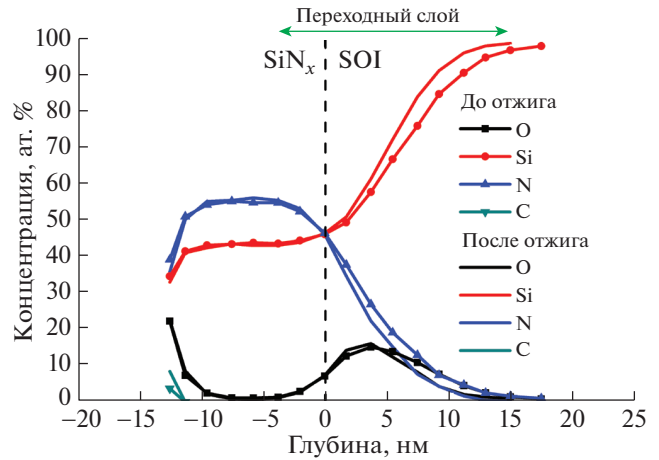


Рис. 2. Профили распределения элементов по глубине в исходных и отожженных пленках  $\text{SiN}_x$ . Начало координат по оси абсцисс совмещено с границей раздела  $\text{SiN}_x/\text{SOI}$ .

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным АСМ среднеквадратичная шероховатость пленки  $\text{SiN}_x$  составляла 1.9 нм.

На рис. 2 приведены данные РФЭС исходных и отожженных при 550 К пленок  $\text{SiN}_x$ . Показано, что стехиометрические индексы исходных и отожженных пленок  $\text{SiN}_x$  практически не различаются и составляют  $x \approx 1.25$ . Следует обратить внимание на наличие переходного слоя на границе  $\text{SiN}_x/\text{SOI}$ , толщина которого составляет  $\sim 18$  нм.

На рис. 3 приведены ПЭМ-изображения поперечного среза мемристивных структур на основе  $\text{SiN}_x$  после ЛО. Пленка  $\text{SiN}_x$ , согласно рис. 3, имеет аморфную структуру. В то же время внутри аморфного  $\text{SiN}_x$  выявлено наличие нанокристаллитов ZrN (участки 1, 3, 5–7) и Si (участок 4). В подслое Zr и на границе раздела с диэлектриком обнаружены нанокристаллиты  $\text{ZrO}_2$  (участок 2), ZrO (участок 8) и ZrN (участок 9). Следует также

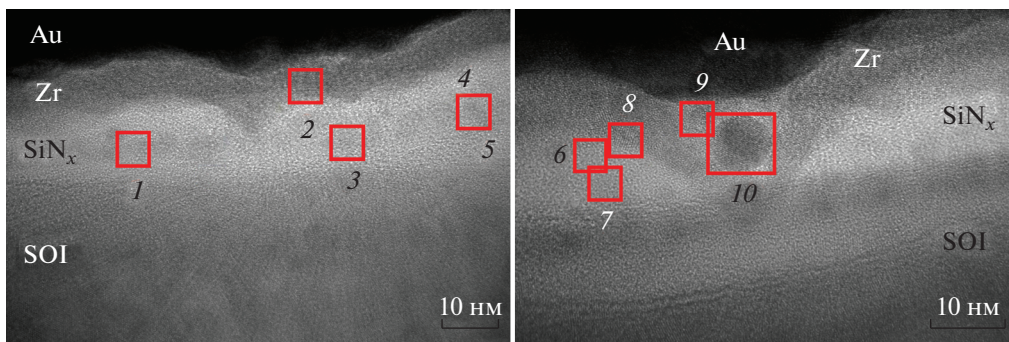
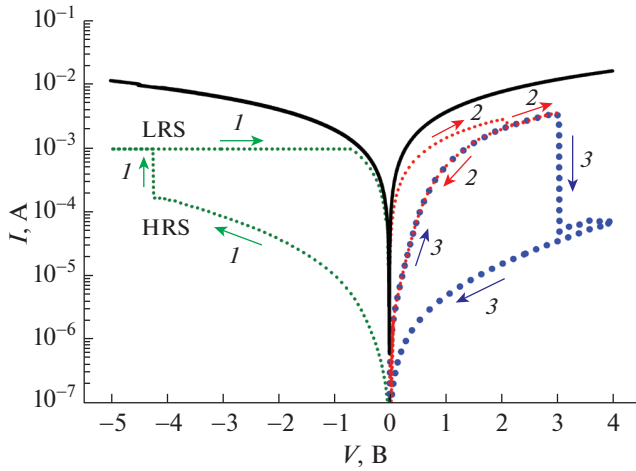


Рис. 3. ПЭМ-изображения высокого разрешения двух участков поперечного среза мемристивной структуры на основе  $\text{SiN}_x$  после ЛО.



**Рис. 4.** ВАХ мемристивной структуры на основе  $\text{SiN}_x$  до (сплошная линия) и после (точечная линия) ЛО. Направление развертки напряжения показано стрелками. Цифрами показана последовательность приложения напряжения при измерении ВАХ структур после ЛО.

отметить наличие нанокристаллитов  $\text{Si}_3\text{N}_4$  (участок 10). Структуру обнаруженных нанокристаллитов определяли путем сравнения межплоскостных расстояний на ПЭМ-изображениях с литературными данными.

Структуры на основе  $\text{SiN}_x$  имеют исходно проводящее состояние и изначально (до ЛО) не демонстрируют РП (рис. 4).

На рис. 5 приведены частотные зависимости параметров эквивалентной схемы мемристивной структуры до ЛО. Последовательное сопротивление в структуре на высокой частоте, определяющееся сопротивлением электродов мемристора, составляет  $\sim 110 \Omega$ .

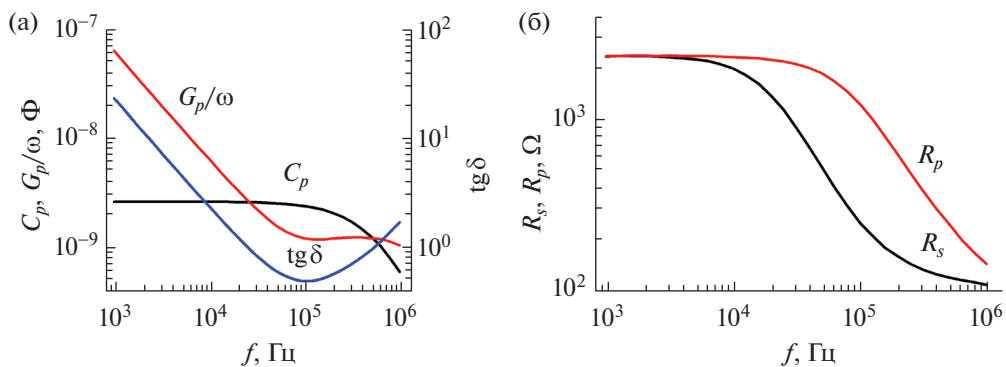
Значение  $1/C^2$  (рис. 6) увеличивается с ростом отрицательного напряжения (по модулю), что свидетельствует об *n*-типе проводимости полу-

проводниковой пленки Si. Нелинейность этой зависимости может быть следствием ее неоднородного легирования. Значение оценочной концентрации доноров ( $N_D$ ) может быть получено с помощью угла наклона прямой, экстраполирующей данные на рис. 6, с использованием уравнения [38]:

$$N_D = \frac{2}{\epsilon_s \epsilon_0 q S^2} \frac{\Delta V}{\Delta \frac{1}{C^2}},$$

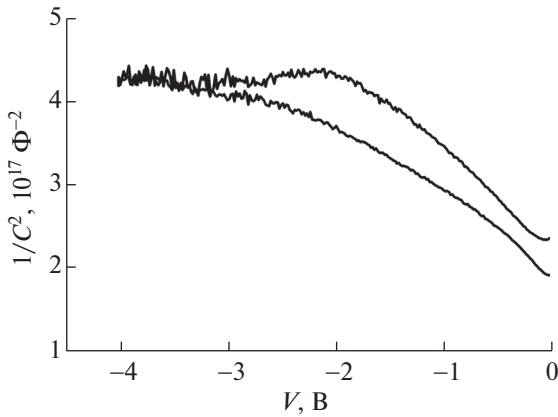
где  $\epsilon_s$  — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника,  $\epsilon_0$  — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума,  $q$  — заряд электрона,  $S$  — площадь структуры (т.е. площадь верхнего электрода). Полученное значение  $N_D$  равно  $\sim 5 \times 10^{18} \text{ см}^{-3}$ . Отметим, что полученное значение, вероятно, занижено вследствие наличия горизонтальных участков на зависимости.

Частотные зависимости параметров эквивалентной схемы практически не обнаруживали изменений при измерениях в темноте и кратковременном освещении лазером, что говорит о наличии обогащенного электронами слоя на границе раздела диэлектрик/полупроводник. Поэтому мемристивные структуры были подвергнуты ЛО на воздухе с целью изменения зарядового состояния ловушек в  $\text{SiN}_x$ . На рис. 4 представлены ВАХ, демонстрирующие значительное увеличение петли гистерезиса (изменение величины токов на  $\sim 3$  порядка величины) после проведения ЛО структур. Отметим, что структуры также проявляли синаптический характер переключения (кривые 2 и 3 на рис. 4). Мемристивные структуры, прошедшие ЛО, демонстрировали увеличенное значение относительной диэлектрической проницаемости (до ЛО оно составляло 4, а после — 4.85). Это значение было рассчитано по формуле для плоского конденсатора на частоте 1 кГц. Такое поведение свидетельствует о вкладе области пространственного заряда в полупроводниковом электроде в емкость конденсатора до ЛО.



**Рис. 5.** Частотные зависимости  $C_p$ ,  $G_p/\omega$  и  $\text{tg} \delta$  (а),  $R_s$  и  $R_p$  (б), полученные для мемристивной структуры до ЛО.





**Рис. 6.** Зависимость неравновесной емкости от напряжения в координатах  $1/C^2 - V$ , полученная для мемристивной структуры до ЛО.

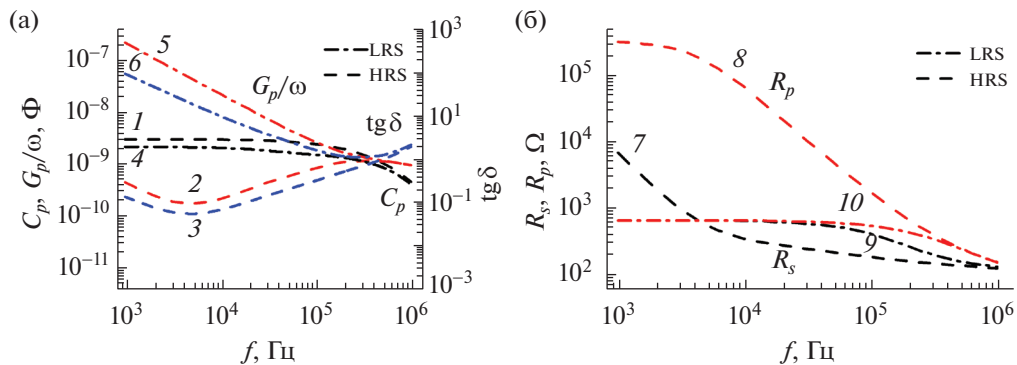
Результаты влияния ЛО на электрофизические характеристики мемристивной структуры также представлены на рис. 7. Показаны частотные зависимости параметров эквивалентной схемы структуры, прошедшей ЛО и находящейся в состоянии с низким (low-resistance state, **LRS**) (т.е. после кривой 1 на рис. 4) и с высоким сопротивлением (high-resistance state, **HRS**) (после кривой 3 на рис. 4). Следует отметить наличие больших потерь в структурах после переключения в LRS напряжением  $-5$  В, что, вероятно, связано с наличием филаментов; в то же время потери в структуре значительно уменьшаются (на низкой частоте до 2 порядков величины) после переключения в HRS напряжением  $+4$  В. Однако полного выключения филаментов не происходит, так как на частоте  $< 10^4$  Гц наблюдаются потери, характерные для потерь сквозной проводимости на низких частотах [39]. Также на низкой частоте в HRS увеличивается параллельное сопротивление

(до 2 порядков величины), шунтирующее конденсатор. При этом практически не изменяется сопротивление кремниевого электрода. Оно остается почти таким же, как и до ЛО.

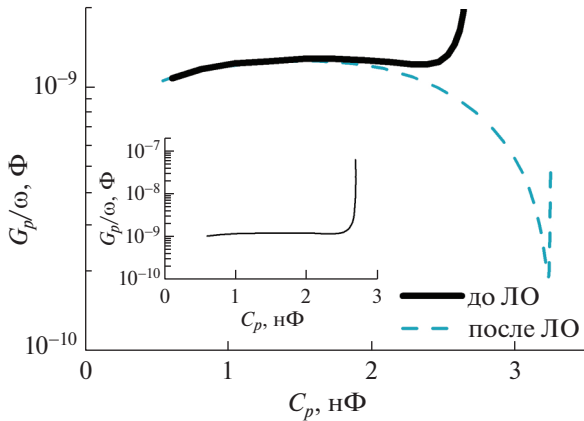
Информация о релаксационных процессах в диэлектрике была получена с помощью анализа диаграмм Коула–Коула [39] (рис. 8). Данные получены из частотных зависимостей  $G_p/\omega$  и  $C_p$  мемристивной структуры до ЛО (рис. 5а) и после ЛО (рис. 7а). Следует обратить внимание, что мемристивная структура не демонстрировала резистивного переключения до ЛО, поэтому диаграмма в этом случае была получена в исходном высоко проводящем состоянии мемристивной структуры. В то же время после ЛО стали различимы два резистивных состояния мемристивной структуры, поэтому диаграмма во втором случае была получена в условиях HRS мемристивной структуры. В первом случае (до ЛО) диаграмма имеет форму одной дуги окружности, что указывает на равномерный спектр ПС на границе раздела диэлектрик/полупроводник. Анализ диаграмм Коула–Коула позволяет оценить эффективную плотность ПС на уровне Ферми ( $N_{ss}$ ). В случае непрерывного спектра ПС для такой оценки использовали уравнение [38]:

$$N_{ss} = \frac{[G_p/\omega]_{\max}}{0.4q^2S},$$

где  $[G_p/\omega]_{\max}$  – максимальное значение параллельной проводимости, приведенной к круговой частоте. Значение  $N_{ss}$  до ЛО структур равно  $1.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ . Поверхностные состояния с таким высоким значением плотности могут снижать быстроедействие и препятствовать постоянству значений напряжения РП. Резкий рост  $G_p/\omega$  в области высоких значений  $C_p$  обусловлен наличием каналов проводимости (вставка на рис. 8). Во втором случае (после ЛО) форма диаграммы близка к полуокружности, что свидетельствует о



**Рис. 7.** Частотные зависимости  $C_p$  (1, 4),  $G_p/\omega$  (2, 5) и  $\text{tg}\delta$  (3, 6) (а),  $R_s$  (7, 9) и  $R_p$  (8, 10) (б), полученные после ЛО мемристивной структуры после переключения в LRS напряжением  $-5$  В (4, 5, 6, 9, 10) и после переключения в HRS напряжением  $+4$  В (1, 2, 3, 7, 8).



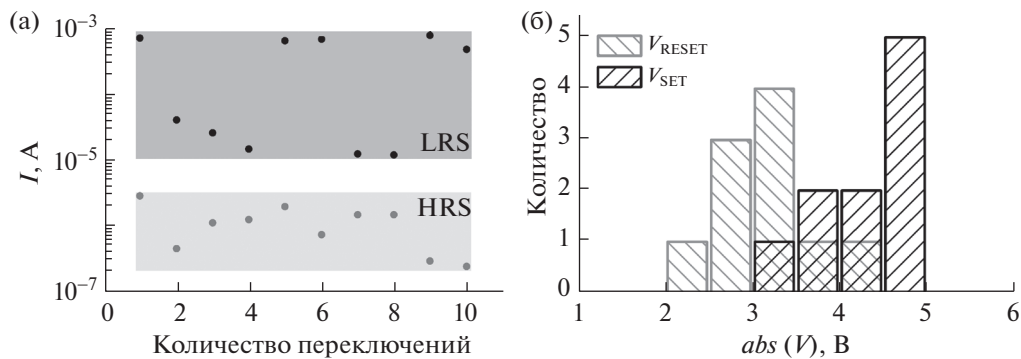
**Рис. 8.** Диаграммы Коула–Коула, полученные для мемристных структур на основе SiN<sub>x</sub>. Данные получены до и после ЛО. На вставке та же диаграмма Коула–Коула, что и до ЛО, но в полном масштабе.

наличии моноуровня ПС. В случае моноуровня ПС для оценки величины  $N_{ss}$  использовали уравнение [38]:

$$N_{ss} = \frac{8kT [G_p/\omega]_{\max}}{q^2 S},$$

где  $k$  – постоянная Больцмана,  $T$  – температура. Значение  $N_{ss}$  после ЛО структур составило  $1.5 \times 10^{11} \text{ см}^{-2}$ , что на порядок меньше, чем до ЛО.

На рис. 9 представлены результаты статистического исследования для десяти ВАХ мемристных структур после ЛО. Видно, что токи через структуру в LRS и HRS различаются минимум в 8 раз (рис. 9а), а напряжения для процессов RESET (переключение из LRS в HRS) и SET (переключение из HRS в LRS) имеют значение в выделенных диапазонах (рис. 9б).



**Рис. 9.** Зависимости токов (при напряжении чтения  $-0.5 \text{ В}$ ) мемристной структуры в LRS (черным) и HRS (серым) после ЛО от числа циклов РП (а). Распределение напряжений процессов SET (черным) и RESET (серым) мемристной структуры после ЛО (б).

Следовательно, ЛО приводит к изменению спектра ПС на границе SiN<sub>x</sub>/SOI. Вероятно, это связано с существенным влиянием ЛО на зарядовое состояние ловушек в SiN<sub>x</sub>, определяющих его проводимость с оптической энергией активации (для SiN<sub>x < 4/3</sub> это значение составляет 2.6 эВ [40]). В [41] сообщалось, что эти ловушки способны оказывать определяющее влияние на восстановление и разрыв филаментов при переключениях в мемристорах на основе SiN<sub>x</sub>. Поэтому ЛО является эффективным методом изменения параметров РП в мемристных структурах металл/SiN<sub>x</sub>/полупроводник.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован мемристный эффект в структурах на основе перспективных и доступных диэлектрических слоев SiN<sub>x</sub>, сформированных на КМОП-совместимых подложках SOI.

Показано, что лазерная обработка приводит к существенному уширению петли гистерезиса на вольт-амперных характеристиках мемристных структур Au/Zr/SiN<sub>x</sub>/SOI. Эффект достигается за счет положительной зарядки ловушек в диэлектрике и понижения величины плотности поверхностных состояний на границе раздела диэлектрик/полупроводник (на порядок величины).

Работа выполнена при частичной поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (грант № 18-29-23001) и Правительства РФ (Соглашение № 074-02-2018-330 (2)). Исследования выполнены с использованием оборудования Центра коллективного пользования Научно-образовательного центра “Физика твердотельных наноструктур” Нижегородского государственного университета им. Н.И. Лобачевского.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Zhang W., Gao B., Tang J. et al.* // Phys. Status Solidi – Rapid Res. Lett. 2019. V. 13. P. 1900204.  
<https://doi.org/10.1002/pssr.201900204>
2. *Emelyanov A.V., Nikiruy K.E., Demin V.A. et al.* // Microelectron. Eng. 2019. V. 215. P. 110988.  
<https://doi.org/10.1016/J.MEE.2019.110988>
3. *Mehonic A., Sebastian A., Rajendran B. et al.* // Adv. Intell. Syst. 2020. V. 2. P. 2000085.  
<https://doi.org/10.1002/aisy.202000085>
4. *Demin V.A., Nekhaev D.V., Surazhevsky I.A. et al.* // Neural Netw. 2021. V. 134. P. 64.  
<https://doi.org/10.1016/J.NEUNET.2020.11.005>
5. *Mikhaylov A., Belov A., Korolev D. et al.* // Adv. Mater. Technol. 2020. V. 5. P. 1900607.  
<https://doi.org/10.1002/admt.201900607>
6. *Nikiruy K.E., Iliasov A.I., Emelyanov A.V. et al.* // Phys. Solid State. 2020. V. 62. P. 1732.  
<https://doi.org/10.1134/S1063783420090218>
7. *Matsukatova A.N., Emelyanov A.V., Minnekhanov A.A. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2020. V. 46. P. 73.  
<https://doi.org/10.1134/S1063785020010277>
8. *Sun K., Chen J., Yan X.* // Adv. Funct. Mater. 2021. V. 31. P. 2006773.  
<https://doi.org/10.1002/adfm.202006773>
9. *La Torre C., Fleck K., Starschich S. et al.* // Phys. Status Solidi. A. 2016. V. 213. P. 316.  
<https://doi.org/10.1002/pssa.201532375>
10. *Ryabova M.A., Filatov D.O., Koriazhkina M.N. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2021. V. 1851. P. 012003.  
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/1851/1/012003>
11. *Ungureanu M., Zazpe R., Golmar F. et al.* // Adv. Mater. 2012. V. 24. P. 2496.  
<https://doi.org/10.1002/adma.201200382>
12. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Koryazhkina M.N. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2016. V. 42. P. 536.  
<https://doi.org/10.1134/S1063785016050308>
13. *Mehonic A., Gerard T., Kenyon A.J.* // Appl. Phys. Lett. 2017. V. 111. P. 233502.  
<https://doi.org/10.1063/1.5009069>
14. *Patterson G.A., Fierens P.I., Grosz D.F.* // Appl. Phys. Lett. 2013. V. 103. P. 074102.  
<https://doi.org/10.1063/1.4819018>
15. *Ntinas V., Rubio A., Sirakoulis G.C. et al.* // IEEE Transactions on Circuits and Systems II: Express Briefs. 2021. V. 68. P. 1378.  
<https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3026950>
16. *Mikhaylov A.N., Guseinov D.V., Belov A.I. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 144. P. 110723.  
<https://doi.org/10.1016/j.chaos.2021.110723>
17. *Surazhevsky I.A., Demin V.A., Ilyasov A.I. et al.* // Chaos, Solitons Fractals. 2021. V. 146. P. 110890.  
<https://doi.org/10.1016/J.CHAOS.2021.110890>
18. *Ielmini D., Nardi F., Cagli C.* // Appl. Phys. Lett. 2010. V. 96. P. 053503.  
<https://doi.org/10.1063/1.3304167>
19. *Mikhaylov A.N., Belov A.I., Guseinov D.V. et al.* // Mater. Sci. Eng. B. 2015. V. 194. P. 48.  
<https://doi.org/10.1016/j.mseb.2014.12.029>
20. *Marchewka A., Waser R., Menzel S.* // International Conference on Simulation of Semiconductor Processes and Devices (SISPAD). 2015. P. 297.  
<https://doi.org/10.1109/SISPAD.2015.7292318>
21. *Kim S., Kim H., Hwang S. et al.* // ACS Appl. Mater. Interfaces. 2017. V. 9. P. 40420.  
<https://doi.org/10.1021/acsami.7b11191>
22. *Tikhov S.V., Mikhaylov A.N., Belov A.I. et al.* // Microelectron. Eng. 2018. V. 187–188. P. 134.  
<https://doi.org/10.1016/j.mee.2017.11.002>
23. *Vasileiadis N., Karakolis P., Mandylas P. et al.* // IEEE Trans. Nanotechnol. 2021. V. 20. P. 356.  
<https://doi.org/10.1109/tnano.2021.3072974>
24. *Vasileiadis N., Ntinas V., Fyrigos I.-A. et al.* // IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS). 2021. P. 1.  
<https://doi.org/10.1109/ISCAS51556.2021.9401586>
25. *Yen T.J., Chin A., Gritsenko V.* // Nanomaterials. 2021. V. 11. P. 1401.  
<https://doi.org/10.3390/nano11061401>
26. *Tikhov S.V., Gorshkov O.N., Antonov I.N. et al.* // Tech. Phys. Lett. 2014. V. 40. P. 837.  
<https://doi.org/10.1134/S1063785014100137>
27. *Islamov D.R., Gritsenko V.A., Chin A.* // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. 2017. V. 53. P. 184.  
<https://doi.org/10.3103/S8756699017020121>
28. *Gismatulin A.A., Orlov O.M., Gritsenko V.A. et al.* // Appl. Phys. Lett. 2020. V. 116. P. 203502.  
<https://doi.org/10.1063/5.0001950>
29. *Popov V.P., Antonova A.I., Frantsuzov A.A. et al.* // Semiconductors. 2001. V. 35. P. 1030.  
<https://doi.org/10.1134/1.1403567>
30. *Hoessbacher C., Fedoryshyn Y., Emboras A. et al.* // Optica. 2014. V. 1. P. 198.  
<https://doi.org/10.1364/optica.1.000198>
31. *Puppo F., Doucey M.A., Di Ventra M. et al.* // IEEE International Symposium on Circuits and Systems. 2014. P. 2257.  
<https://doi.org/10.1109/ISCAS.2014.6865620>
32. *Li C., Han L., Jiang H. et al.* // Nature Commun. 2017. V. 8. P. 1.  
<https://doi.org/10.1038/ncomms15666>
33. *Pragnya P., Pinkowitz A., Hull R., Gall D.* // APL Mater. 2019. V. 7. P. 101121.  
<https://doi.org/10.1063/1.5110889>
34. *Skorobogatov S.* // IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2009). 2009. P. 1.  
<https://doi.org/10.1109/HST.2009.5225028>
35. *Kärkkäinen I., Shkabko A., Heikkilä M. et al.* // Phys. Status Solidi. A. 2015. V. 212. P. 751.  
<https://doi.org/10.1002/pssa.201431489>
36. *Энштейн С.Л.* Измерение характеристик конденсаторов. М.; Л.: Энергия, 1965. 236 с.

37. *Antipov A., Arakelian S., Vartanyan T. et al.* // Opt. Spectrosc. 2016. V. 121. P. 765.  
<https://doi.org/10.1134/S0030400X16110035>
38. *Овсяк В.Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1984. 254 с.
39. *Орешкин П.Т.* Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
40. *Nasyrov K.A., Shaymeev S.S., Gritsenko V.A. et al.* // J. Exp. Theor. Phys. 2006. V. 102. P. 810.  
<https://doi.org/10.1134/S106377610605013X>
41. *Gismatulin A.A., Gritsenko V.A., Yen T.J., Chin A.* // Appl. Phys. Lett. 2019. V. 115. P. 253502.  
<https://doi.org/10.1063/1.5127039>