

НАНОЭЛЕКТРОНИКА И НЕЙРОМОРФНЫЕ ВЫЧИСЛИТЕЛЬНЫЕ СИСТЕМЫ

УДК 621.38-022.532

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

© 2021 г. М. Н. Коряжкина¹, Д. О. Филатов¹, С. В. Тихов¹, А. И. Белов¹, Д. С. Королев¹,
А. В. Круглов¹, Р. Н. Крюков¹, С. Ю. Зубков¹, В. А. Воронцов¹, Д. А. Павлов¹,
Д. И. Тетельбаум¹, А. Н. Михайлов^{1,*}, С. Ким²

¹ Нижегородский государственный университет им. Н.И. Лобачевского, Нижний Новгород, Россия

² 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 привлекают значительный 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” (КМОП) 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 оксид кремния. Изучены электрофизические характеристики и РП мемристоров на основе тонких пленок SiO_x , сформированных на подложках SOI. Исследуемые мемристоры не требовали электроформовки. Впервые показана возможность улучшения параметров резистивного переключения мемристоров на основе SiO_x на подложках SOI с помощью лазерной и термической обработок.

DOI: 10.1134/S1992722321060108

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” (МДП), являются в совокупности недостаточная для стохастического применения воспроизводимость (стохастичность) параметров резистивного переключения (РП), высокие значения напряжений РП и сложность интеграции в стандартный КМОП-процесс. 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_x , TaO_x , ZrO_x), а также SiO_x и GeO_x . Исследования мемристивных структур на основе SiO_x представляют значительный интерес в связи с их совместимостью со стандартной технологией создания современных интегральных схем. Кроме того, использование диэлектрических пленок SiO_x имеет ряд практических преимуществ. Например, в [21] проведено всестороннее сравнение параметров РП структур на основе HfO_x и SiO_x и показано, что сопротивление в разных состояниях мемристоров на основе SiO_x имеет меньшую вариативность.

Использование полупроводника в качестве одного из электродов мемристивной структуры также актуально с точки зрения интеграции мемристоров в стандартный КМОП-процесс [22–24]. В указанных работах использовались подложки объемного кремния. Однако при производстве большинства полупроводниковых приборов и микросхем предпочтение отдается подложкам “кремний-на-изоляторе” (англ.: “silicon-on-insulator”, **SOI**) за счет ряда важнейших преимуществ по сравнению с объемным кремнием: меньшая потребляемая мощность, большее быстродействие и плотность элементов [25]. Поэтому с практической точки зрения является целесообразной реализация мемристивных структур именно на подложках **SOI**. Несмотря на имеющееся 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, имеет значительный теоретический и практический интерес. Однако в литературе такие данные практически отсутствуют. Имеется несколько отдельных работ по использованию **SOI** в мемристивных устройствах (например, [26–29]).

Несмотря на практические преимущества использования полупроводника в качестве электрода мемристивной структуры, не стоит забывать о нежелательном с точки зрения создания мемристивных структур наличии поверхностных состояний (**ПС**) на границе раздела диэлектрик/полупроводник, которые вносят значительный вклад в сопротивление структуры и тем самым увеличивают напряжения **РП**. Широко используемым методом борьбы с такими дефектами является термическая обработка (**ТО**). Для тех же целей может быть использована лазерная обработка (**ЛО**). В последнем случае эффект достигается за счет разогрева подложки вследствие поглощения лазерного излучения в ней. Кроме того, **ЛО** используется для модификации зарядового состояния диэлектрика во **Flash**-памяти, что применяется для полного удаления информации с элементов памяти [30]. Поэтому **ЛО** и **ТО** могут быть эффективно использованы для изменения электрофизических характеристик мемристивных структур.

В настоящей работе предлагается всесторонний подход к возможности улучшения параметров **РП**, а именно, увеличения отношения сопротивлений в крайних резистивных состояниях и снижения величины напряжений **РП** мемристивных структур на основе перспективных и доступных диэлектрических слоев – SiO_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** и **ТО**, повсеместно используемых в микроэлектронной промышленности для управления электрофизическими параметрами устройств. Кроме того, реализованное в 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 [31].

Насколько известно, комплексного исследования мемристивных структур на основе пленок SiO_x на **SOI**-подложках, в том числе выявления влияния **ЛО** и **ТО** на их электрофизические характеристики (определяющие параметры **РП**), проведено не было.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Пленки SiO_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 SiH_4/N_2 (160 стандартных $\text{см}^3/\text{мин}$), N_2O (1500 стандартных $\text{см}^3/\text{мин}$) и N_2 (240 стандартных $\text{см}^3/\text{мин}$) при давлении 550 мТорр и высокочастотной (**ВЧ**) мощности 60 Вт со скоростью осаждения 200 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. Изменяли вольт-амперные характеристики (**ВАХ**) и малосигнальные $C-f$, $G-f$ и $R-f$ характеристики мемристоров в параллельной и последовательной схемах замещения конденсатора [32] в интервале частот $10^3-2 \times 10^6$ Гц. Определяли величины параллельной емкости (C_p), параллельной проводимости, приведенной к круговой частоте, (G_p/ω), 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 эк-

вивалентной схемы – сопротивлением электродов и переходного слоя между электродом и диэлектриком [32].

Информация о релаксационных процессах в диэлектрике получена с помощью анализа диаграмм Коула–Коула – зависимостей G_p/ω от C_p , которые вычислялись из соответствующих частотных зависимостей мемристивных структур [33]. Полученные диаграммы представляли собой одну дугу окружности. Таким образом, спектр ПС на границе раздела диэлектрик/полупроводник был непрерывен. Анализ диаграмм Коула–Коула позволяет оценить эффективную плотность ПС на уровне Ферми (N_{ss}). В случае непрерывного спектра ПС для такой оценки использовали уравнение [34]:

$$N_{ss} = \frac{[G_p/\omega]_{\max}}{0.4q^2S}, \quad (1)$$

где $[G_p/\omega]_{\max}$ – максимальное значение параллельной проводимости, приведенной к круговой частоте, q – заряд электрона, S – площадь структуры (т.е. площадь верхнего электрода).

Кроме того, проводили измерения вольт-фарадных и вольт-симменсных характеристик в параллельной схеме замещения конденсатора на разных частотах малого тестирующего сигнала 10 и 100 кГц.

Отметим, что исследованные мемристивные структуры не требовали проведения электроформовки, так как исходно они имели проводящее состояние. Исследования электрофизических характеристик мемристивных структур проводили в исходном состоянии (англ.: initial state, **IS**), в состоянии с высоким сопротивлением (англ.: high-resistance state, **HRS**) и низким сопротивлением (англ.: low-resistance state, **LRS**).

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. Верхние электроды из Au толщиной 20 нм являлись полупрозрачными для используемой длины волны лазерного излучения [35]. Также отметим, что при воздействии лазерного излучения происходил разогрев структуры до ~473 К.

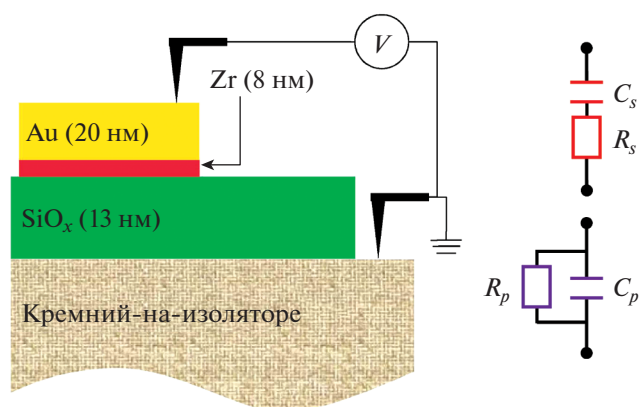


Рис. 1. Схематическое изображение мемристивных на основе SiO_x и простейшая эквивалентная RC-схема конденсатора.

Метод ТО является широко используемым методом изменения плотности ПС на границе раздела диэлектрик/электрод. Поэтому с целью улучшения состояния этой границы часть мемристивных структур подвергали ТО. Для этого мемристивные структуры помещали в герметично закрытый металлический термостат, который медленно нагревали со скоростью 13.5 К/мин с помощью электронагревателя или охлаждали жидким азотом. Исследования электрофизических характеристик проводили в интервале температур 77–600 К в осушенной с помощью силикагеля атмосфере. Температура поддерживалась с точностью до 1 К.

Структурные исследования пленок SiO_x и мемристивных структур на их основе в данной работе были выполнены методами атомно-силовой микроскопии (АСМ), рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС) и просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ).

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

По данным АСМ среднеквадратичная шероховатость пленки SiO_x составляла 1.8 нм.

На рис. 2 приведены данные РФЭС исходных и отожженных при 550 К пленок SiO_x . Показано, что стехиометрические индексы исходных и отожженных пленок SiO_x практически не различаются и составляют $x \approx 1.8$. Следует обратить внимание на наличие переходного слоя на границе SiO_x/SOI , толщина которого составляет ~15 нм.

На рис. 3 приведены ПЭМ-изображения поперечного среза мемристивных структур на основе SiO_x после ЛО и ТО. Пленка SiO_x согласно рис. 3 имеет аморфную структуру. В то же время внутри аморфного SiO_x выявлено наличие нанокристаллитов Si (участок 4). В подслое Zr и на границе раздела с диэлектриком обнаружены нанокри-

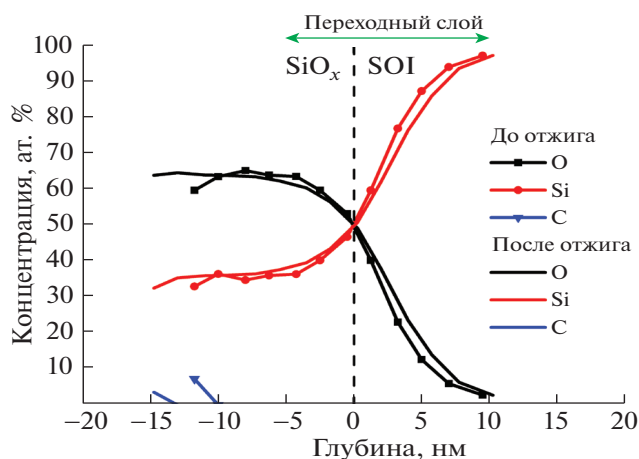


Рис. 2. Профили распределения элементов по глубине в исходных и отожженных пленках SiO_x. Начало координат по оси абсцисс совмещено с границей раздела SiO_x/SOI.

сталлиты ZrO (участки 1 и 3) и ZrO₂ (участок 2). Структуру обнаруженных нанокристаллитов определяли путем сравнения межплоскостных расстояний на ПЭМ-изображениях с литературными данными.

Как сказано выше, мемристивные структуры на основе SiO_x до ЛО и ТО имеют исходно проводящее состояние (рис. 4а, кривая 1). При приложении напряжения -6 В происходит переключение мемристивной структуры из LRS в HRS (рис. 4а, кривая 2). Последующее приложение напряжения +6 В не приводит к переключению структуры (рис. 4а, кривая 3).

Частотные зависимости параметров эквивалентной схемы мемристивных структур в IS (т.е. после кривой 1 на рис. 4а) и HRS (т.е. после кривой 2 на рис. 4а) представлены на рис. 5. В IS структура характеризовалась большими омическими потерями на низких частотах (рис. 5, кривые 2, 3) и низким параллельным сопротивлением R_p, шунтирующим структуру (рис. 5, кривая 5).

После переключения в HRS потери уменьшались на 3 порядка величины (рис. 5, кривые 7, 8), а величина R_p, соответственно, увеличивалась на 3 порядка (рис. 5, кривая 10). Отметим, что значения относительной диэлектрической проницаемости пленок SiO_x, рассчитываемых из величины C_p по формуле для плоского конденсатора на частоте 1 кГц, практически не изменяются при РП, в то время как величина tgδ изменяется на 3 порядка величины. Такое поведение малосигнальных ВЧ-параметров свидетельствует о филаментарном механизме РП [36]. В этом случае активная часть импеданса пленки меняется локально, т.е. на малой (по сравнению с общей площадью электрода) площади мемристора, тогда как сопротивление, а также диэлектрические потери материала остальной части пленки под электродом остаются практически неизменными.

Зависимости C_p и G_p/ω от V (рис. 6) показали, что полупроводник соответствует n-типу, так как емкость на частоте 100 кГц (вставка на рис. 6б) имела вид ступеньки с возрастанием в сторону напряжения V > 0 [34]. Значение концентрации равновесных электронов в кремниевом электроде может быть оценено с помощью уравнения [37]:

$$N_D = \frac{2 \left(2\phi_0 - \frac{kT}{q} \right)}{\epsilon_s \epsilon_0 q} \left(\frac{C_{ox} - 1}{C_{min} C_{ox}} \right)^{-2},$$

где N_D — концентрация доноров в полупроводнике, φ₀ — высота потенциального барьера на границе диэлектрик/полупроводник, k — постоянная Больцмана, T — температура, ε_s — относительная диэлектрическая проницаемость полупроводника, ε₀ — абсолютная диэлектрическая проницаемость вакуума, C_{ox} — емкость оксида, равная максимальной емкости на рис. 6б в темноте, C_{min} — минимальная емкость на рис. 6б в темноте. Полученная величина варьировалась в диапазоне ~ 3 × 10¹⁹–3 × 10²⁰ см⁻³. Такой разброс связан с силь-

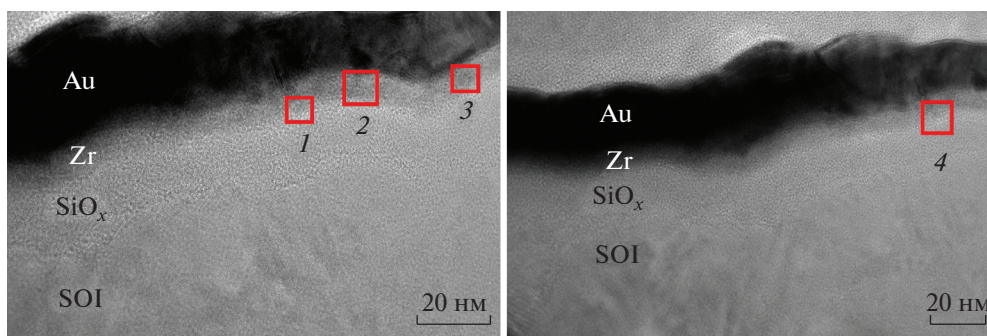


Рис. 3. ПЭМ-изображения высокого разрешения двух участков поперечного среза мемристивной структуры на основе SiO_x после ЛО и ТО.

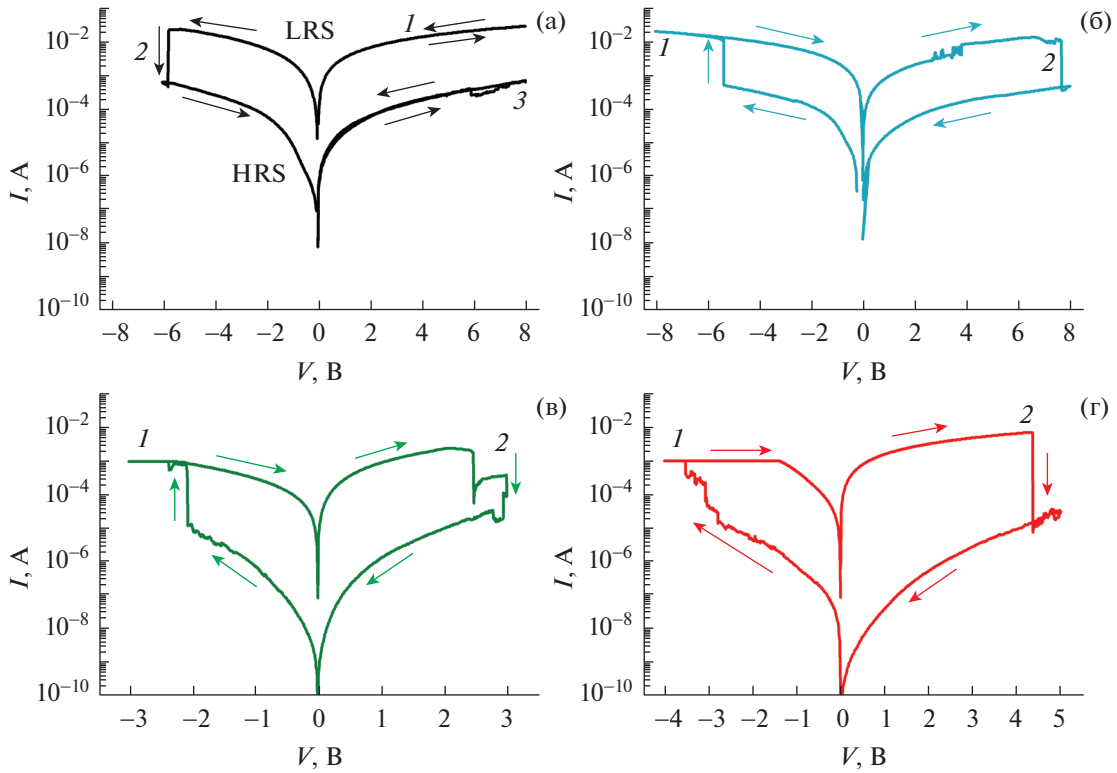


Рис. 4. ВАХ мемристивной структуры на основе SiO_x до ЛО и ТО (а), после ЛО (б), ТО (в) и многократного РП (г). Направление развертки напряжения показано стрелками.

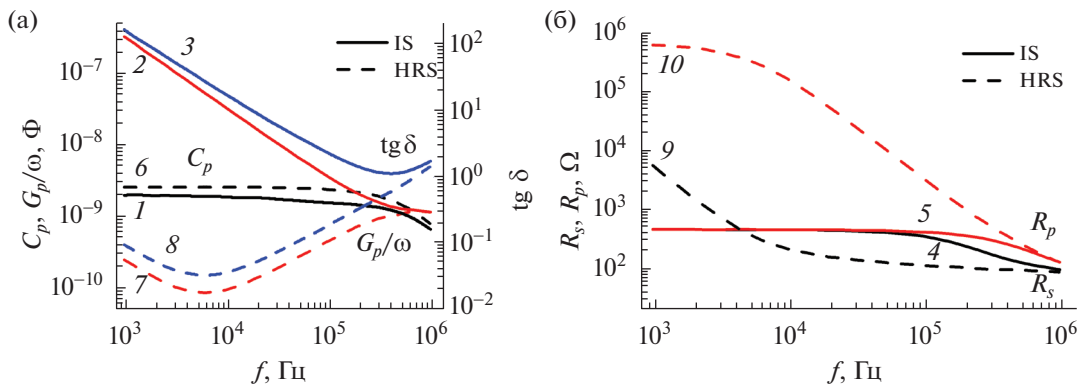


Рис. 5. Частотные зависимости C_p (1, 6), G_p/ω (2, 7), $\text{tg}\delta$ (3, 8), R_s (4, 9) и R_p (5, 10), полученные для мемристивной структуры в IS (1, 2, 3, 4, 5) и HRS (6, 7, 8, 9, 10).

ными флуктуациями емкости вследствие неоднородного распределения примеси по толщине кремниевого электрода. Максимумы на зависимостях G_p/ω (рис. 6а, кривая 4 и рис. 6б, кривые 3 и 4) от V в теории МДП-структур обычно связывают с ПС на границе раздела диэлектрик/полупроводник. В предположении квазинепрерывного распределения ПС значение N_{ss} может быть оценено с помощью уравнения (1). Величина N_{ss} составляет: в условиях освещения лазером –

$3.6 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ (на частоте 10 кГц) и $1.1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ (на частоте 100 кГц), а в условиях темноты – $1 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ (на частоте 100 кГц). Таким образом, плотность ПС на проводящем электроде из Si велика и увеличивается с уменьшением частоты и при освещении. Захват на эти состояния должен уменьшать быстродействие мемристоров так же, как и большое последовательное сопротивление.

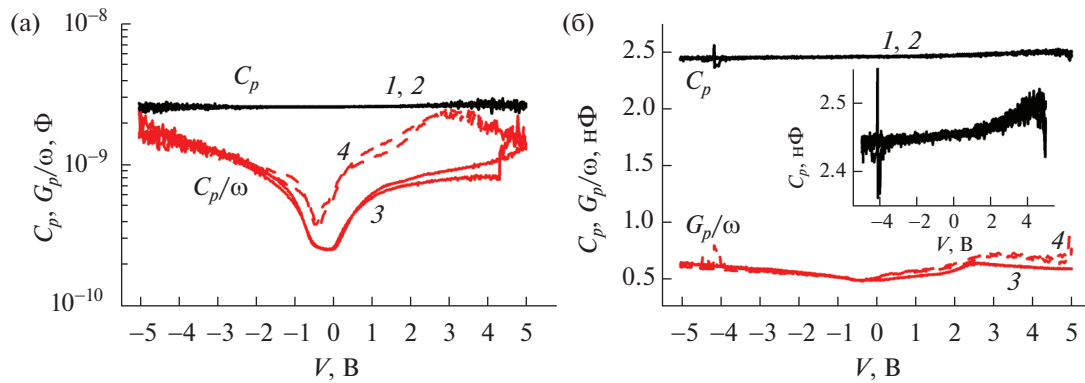


Рис. 6. Зависимости C_p (1, 2) и G_p/ω (3, 4) от V мемристовой структуры на частоте малого тестирующего сигнала 10 (а) и 100 кГц (б), полученные в темноте (1, 3) и при освещении лазером (2, 4). Развертка по напряжению от -5 В до $+5$ В и обратно.

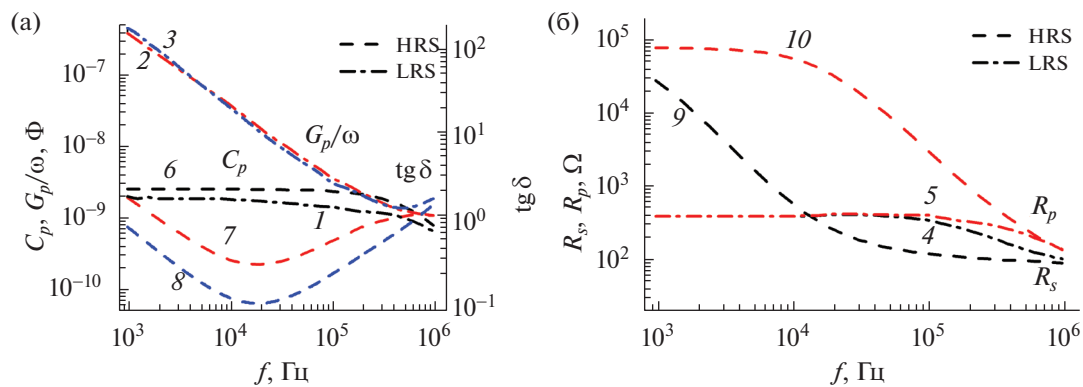


Рис. 7. Частотные зависимости C_p (1, 6), G_p/ω (2, 7), $\text{tg}\delta$ (3, 8), R_s (4, 9) и R_p (5, 10), полученные после ЛО мемристовой структуры в LRS (1, 2, 3, 4, 5) и HRS (6, 7, 8, 9, 10).

На рис. 4б показаны ВАХ мемристовой структуры после ЛО. Видно, что ЛО приводит к изменению полярности РП: приложение отрицательного напряжения приводит к переключению структуры в LRS, а положительного – в HRS. Аналогичное поведение наблюдалось в [38]. Эффект может быть объяснен с точки зрения влияния обоих активных электродов структуры на формирование филамента, однако это требует дополнительных исследований. Полученные ВАХ демонстрируют отношение токов в LRS и HRS более двух порядков величины.

Результаты влияния ЛО на электрофизические характеристики мемристовой структуры представлены на рис. 7. Показаны частотные зависимости параметров эквивалентной схемы структуры в LRS (после кривой 1 на рис. 4б) и HRS (после кривой 2 на рис. 4б). Эти данные также свидетельствуют об изменении полярности резистивных переключений после ЛО и о практически неизменном значении сопротивления нижнего полупроводникового электрода ($\sim 100 \Omega$). Кроме

того, более высокие значения $\text{tg}\delta$ в HRS на низкой частоте по сравнению со структурами до ЛО (рис. 5а) свидетельствуют о неполном выключении филаментов.

Термическая обработка в осушенной атмосфере при 540 К в герметичном термостате также изменяла электрофизические характеристики мемристовых структур на основе SiO_x . Об этом свидетельствуют частотные зависимости параметров эквивалентной схемы (рис. 8). Обращает на себя внимание нестандартное поведение диэлектрических потерь и величины параллельного сопротивления при повышении температуры от 77 до 540 К: обычно с ростом температуры в диэлектрике увеличивается концентрация свободных носителей, поэтому значения $\text{tg}\delta$ растут, а R_p – падают. Но в рассматриваемом случае эти величины проявляют обратную тенденцию. Наблюдаемое необычное для диэлектриков поведение вероятно связано с необратимым изменением свойств диэлектрика после ТО. Полярность

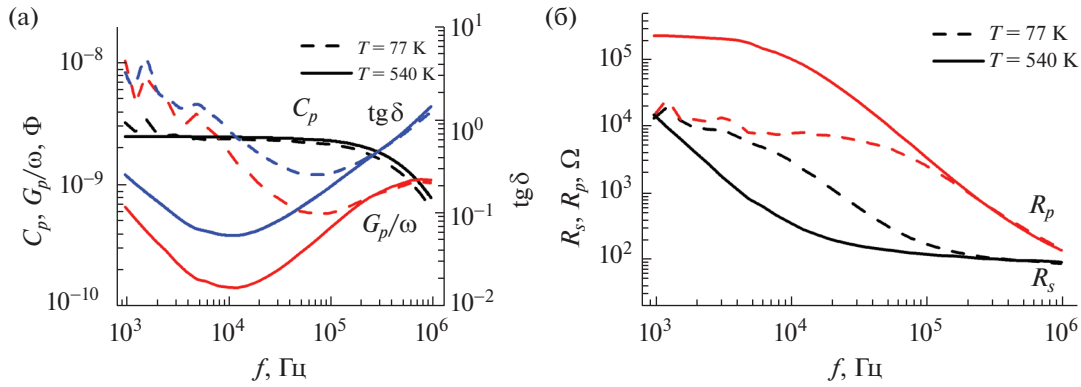


Рис. 8. Частотные зависимости C_p , G_p/ω , $\text{tg } \delta$, R_s и R_p мемристивной структуры в HRS, полученные при температуре 77 (пунктирная линия) и 540 К (сплошная линия).

резистивного переключения после ТО соответствует полярности после ЛО (рис. 4в). Следует отметить уменьшение напряжений РП после термической обработки структур.

На рис. 9 показаны результаты исследования стабильности параметров эквивалентной схемы и РП мемристивных структур после ТО при многократном переключении в режиме ВАХ (рис. 4в). Опыт проводили следующим образом. После переключения структуры в LRS (после кривой 1 на рис. 4в) измеряли частотные зависимости параметров эквивалентной схемы. Далее после переключения структуры в HRS (после кривой 2 на рис. 4в) снова измеряли частотные зависимости параметров эквивалентной схемы. Таким образом, происходило многократное (в течение ~ 2 ч) переключение мемристивной структуры из LRS в HRS и обратно с последовательным измерением параметров эквивалентной схемы. Времена, за которые проводились измерения частотных зависимостей, были существенно меньше промежутков времени между переключениями, поэтому изменения параметров за время тестирования структур можно было пренебречь. Таким образом, наблюдаемые изменения параметров эквивалентной схемы происходят либо за счет стохастичности процессов РП, либо, что менее вероятно, из-за изменения структур в промежутках между переключениями. Из рис. 9а и 9б видно, что после переключения в HRS параметры являются относительно воспроизводимыми по сравнению с параметрами, полученными после переключения в LRS, на это указывает слабая временная зависимость C_{p0} , R_{p0} и $\text{tg } \delta_0$ (рис. 9а и 9б, кривые 2, 4, 6). При переключении в LRS временные зависимости C_{p0} , R_{p0} и $\text{tg } \delta_0$ характеризуются немонотонным поведением, что отражается в значительных (для R_{p0} и $\text{tg } \delta_0$ более чем на 2 порядка величины) хаотичных изменениях (рис. 9а и 9б, кривые 1, 3, 5). Последний результат можно

интерпретировать следующим образом. Выбранный режим переключения в HRS позволяет каждый раз разрушать работающий филамент, а каждое переключение в LRS приводит к образованию разных (по форме и месторасположению) филаментов. Отметим, что при многократном переключении независимо от знака переключающего напряжения и состояния мемристивной структуры наблюдалось монотонное уменьшение последовательного сопротивления $R_{s\infty}$ от ~ 650 до ~ 160 Ω (рис. 9б, кривая 7), значение которого определяется сопротивлением полупроводникового электрода. Такое поведение свидетельствует о протекании электрохимических реакций на полупроводниковом электроде и накоплении на его поверхности положительного заряда в процессе перезарядки мемристивной структуры.

На рис. 9в и 9г представлены результаты статистического исследования для десяти ВАХ мемристивных структур после ТО. Видно, что токи через структуру в LRS и HRS различаются минимум на 1 порядок величины (рис. 9в), а напряжения для процессов RESET (переключение из LRS в HRS) и SET (переключение из HRS в LRS) имеют значение в выделенном диапазоне (рис. 9г).

На рис. 4г представлены ВАХ мемристивных структур после многократного РП. Видно увеличение значений напряжения процессов RESET и SET, что свидетельствует о значительном изменении электрофизических характеристик структуры в ходе многократного РП.

Частотные зависимости параметров эквивалентной схемы, полученные для мемристивной структуры в HRS (после кривой 2 на рис. 4г) после многократного РП, показаны на рис. 10. В отличие от приведенных выше зависимостей эти данные свидетельствуют о полном выключении филаментов при переключении структуры в HRS. Этот факт виден, в частности, из сравнения низкочастотных значений $\text{tg } \delta$ в HRS (сравнение па-

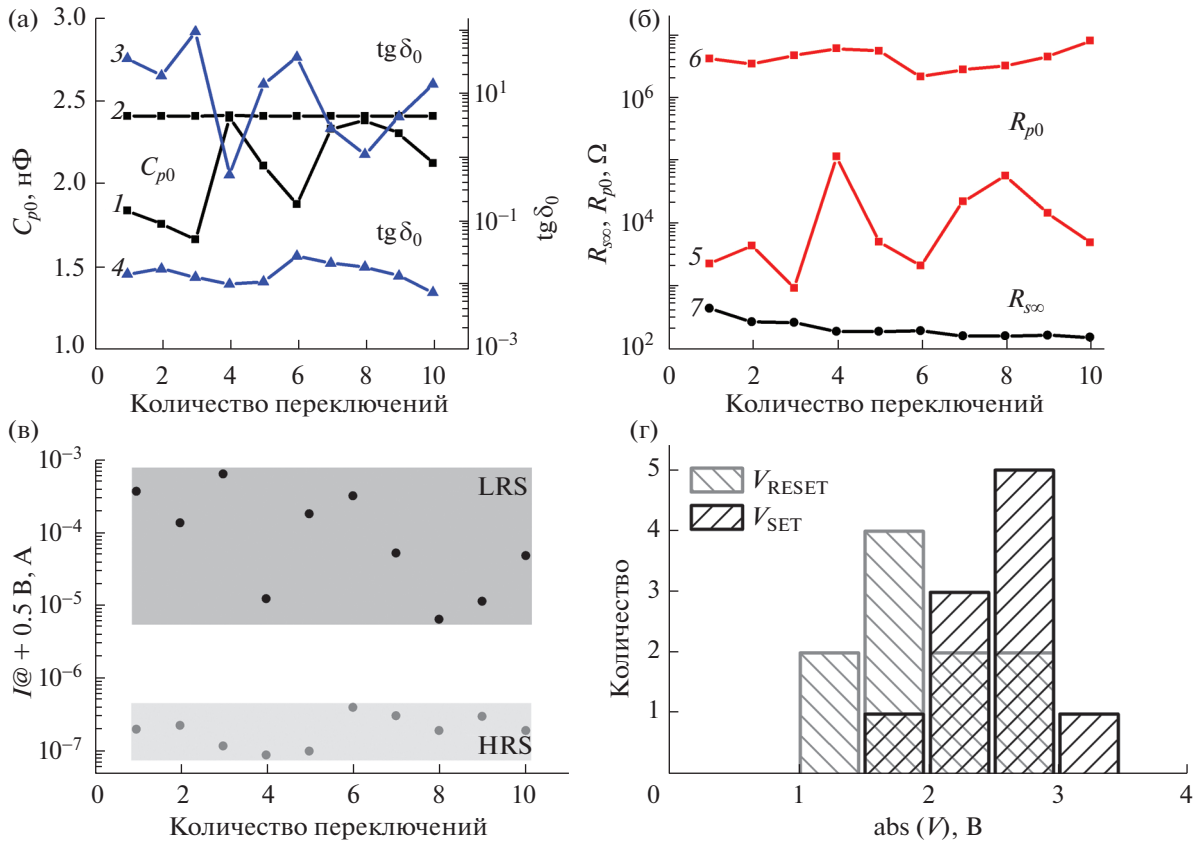


Рис. 9. Параметры эквивалентной схемы мемристинной структуры после ТО и переключения в LRS (1, 3, 5) и HRS (2, 4, 6), полученные на частоте малого тестирующего сигнала 1 кГц (C_{p0} , $\text{tg}\delta_0$, R_{p0}) и 2 МГц (R_{ssc}) (а, б). Зависимости токов (при напряжении чтения +0.5 В) мемристинной структуры в LRS (черный) и HRS (серый) после ТО от числа циклов РП (в). Распределение напряжений процессов SET (черный) и RESET (серый) мемристинной структуры после ТО (г).

раметров эквивалентной схемы, полученных на частоте 1 кГц для мемристинной структуры в разных резистивных состояниях, в табл. 1). Обнаруженное возрастание $\text{tg}\delta$ и G_p/ω структур (рис. 10а) может быть объяснено практическим отсутствием шунтирования мемристора величиной R_p и ре-

ализацией последовательного соединения емкости C_p и электродов мемристора. В этом случае потери на низких частотах малы, параллельная емкость равна последовательной, а последовательное сопротивление определяется сопротивлением полупроводникового электрода ($\sim 170 \Omega$).

Таблица 1. Параметры эквивалентной схемы

Обработки	Резистивное состояние	C_p , нФ	G_p/ω , Ф	$\text{tg}\delta$	R_s , Ω	R_p , Ω
До	IS	2.1	3.3×10^{-7}	1.6×10^2	4.8×10^2	4.8×10^2
До	HRS	2.7	2.6×10^{-10}	0.1	5.7×10^3	6.2×10^5
После ЛО	LRS	2.1	3.9×10^{-7}	1.9×10^2	4.1×10^2	4.1×10^2
После ЛО	HRS	2.6	2.0×10^{-9}	0.7	2.9×10^4	8.0×10^4
После ТО	HRS ($T = 77 \text{ K}$)	3.2	1.1×10^{-8}	3.2	1.4×10^4	1.5×10^4
После ТО	HRS ($T = 540 \text{ K}$)	2.5	6.6×10^{-10}	0.3	1.5×10^4	2.4×10^5
После десяти циклов РП	HRS	2.4	1.9×10^{-11}	8.0×10^{-3}	5.3×10^2	8.3×10^6

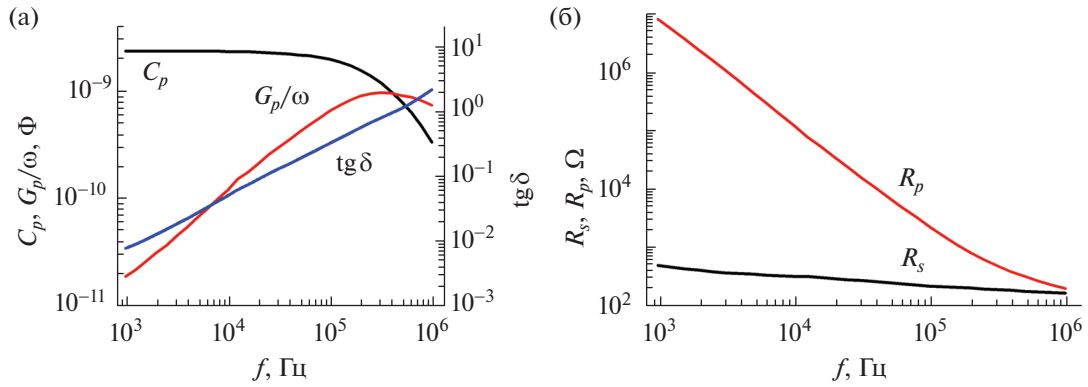


Рис. 10. Частотные зависимости C_p , G_p/ω , $\text{tg } \delta$, R_s и R_p мемристивной структуры в HRS после многократного РП.

На рис. 11 представлены диаграммы Коула–Коула, полученные для мемристивных структур на основе SiO_x в HRS. Данные получены из частотных зависимостей G_p/ω и C_p мемристивной структуры до ЛО и ТО (рис. 5а), после ЛО (рис. 7а), а также после ТО и многократного РП (рис. 10а). Видно, что все диаграммы имеют форму одной дуги окружности, т.е. спектр ПС на полупроводниковом электроде непрерывен во всех случаях. Значения N_{ss} были оценены с использованием уравнения (1) и составляют 1.9×10^{12} , 1.8×10^{12} и $1.5 \times 10^{12} \text{ см}^{-2} \text{ эВ}^{-1}$ соответственно.

Таким образом, одной только ЛО мемристивных структур $\text{Au/Zr/SiO}_x/\text{SOI}$ не достаточно для существенного изменения величины плотности ПС. Дополнительное использование ТО привело к уменьшению этой величины в ~ 1.3 раза. Тем не менее суммарное воздействие ЛО и ТО на мемристивные структуры $\text{Au/Zr/SiO}_x/\text{SOI}$ привело к уменьшению практически в 2 раза значений на-

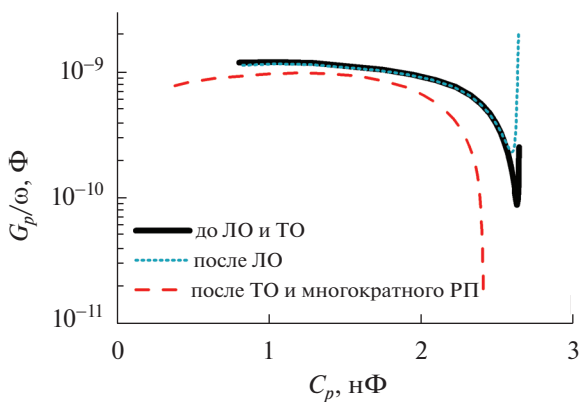


Рис. 11. Диаграммы Коула–Коула, полученные для мемристивных структур на основе SiO_x в HRS. Данные получены до ЛО и ТО, после ЛО, а также после ТО и многократного РП.

пряжений РП. Эффект, вероятно, связан с отжигом ПС, приводящим, в свою очередь, к уменьшению сопротивления структуры. Согласно модели [39] возникновение ПС связано с разупорядочением приповерхностного слоя кремния вблизи границы раздела с диэлектриком. С этой точки зрения отжиг способствует уменьшению плотности ПС за счет релаксации этой разупорядоченности. Однако следует иметь в виду, что отжиг может приводить к изменению концентрации электрически активных примесей как в полупроводнике, так и в диэлектрике. В результате этого уровень Ферми на границе раздела диэлектрик/полупроводник может сдвинуться в сторону меньшей плотности состояний.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Продемонстрирован мемристивный эффект в структурах на основе перспективных и доступных диэлектрических слоев SiO_x , сформированных на КМОП-совместимых подложках SOI.

Показано, что одной только лазерной обработки мемристивных структур $\text{Au/Zr/SiO}_x/\text{SOI}$ не достаточно для существенного изменения величины плотности поверхностных состояний. Дополнительное использование термической обработки привело к уменьшению этой величины в ~ 1.3 раза. Тем не менее суммарное воздействие лазерной и термической обработок на мемристивные структуры $\text{Au/Zr/SiO}_x/\text{SOI}$ привело к уменьшению практически в 2 раза значений напряжений резистивного переключения. Эффект, вероятно, связан с отжигом поверхностных состояний, приводящим, в свою очередь, к уменьшению сопротивления структуры.

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. // *Physica 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 Networks.* 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. 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>
16. 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>
17. Ntinis V., Rubio A., Sirakoulis G.C. et al. // *IEEE Trans. Circuits Systems II: Express Briefs.* 2021. V. 68. P. 1378. <https://doi.org/10.1109/TCSII.2020.3026950>
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. Ambrosi E., Bricalli A., Laudato M., Ielmini D. // *Faraday Discussions.* 2019. V. 213. P. 87. <https://doi.org/10.1039/c8fd00106e>
22. 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>
23. Islamov D.R., Gritsenko V.A., Chin A. // *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing.* 2017. V. 53. P. 184. <https://doi.org/10.3103/S8756699017020121>
24. 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>
25. Popov V.P., Antonova A.I., Frantsuzov A.A. et al. // *Semiconductors.* 2001. V. 35. P. 1030. <https://doi.org/10.1134/1.1403567>
26. Hoessbacher C., Fedoryshyn Y., Emboras A. et al. // *Optica.* 2014. V. 1. P. 198. <https://doi.org/10.1364/optica.1.000198>
27. 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>
28. Li C., Han L., Jiang H. et al. // *Nature Commun.* 2017. V. 8. P. 1. <https://doi.org/10.1038/ncomms15666>
29. Pragnya P., Pinkowitz A., Hull R., Gall D. // *APL Mater.* 2019. V. 7. P. 101121. <https://doi.org/10.1063/1.5110889>
30. Skorobogatov S. // *IEEE International Workshop on Hardware-Oriented Security and Trust (HOST 2009).* 2009. P. 1. <https://doi.org/10.1109/HST.2009.5225028>
31. Kärkkänen I., Shkabko A., Heikkilä M. et al. // *Phys. Status Solidi. A.* 2015. V. 212. P. 751. <https://doi.org/10.1002/pssa.201431489>
32. Энштейн С.Л. Измерение характеристик конденсаторов. М.; Л.: Энергия, 1965. 236 с.

33. *Орешкин П.Т.* Физика полупроводников и диэлектриков. М.: Высшая школа, 1977. 448 с.
34. *Овсяк В.Н.* Электронные процессы в полупроводниках с областями пространственного заряда. Новосибирск: Наука (Сибирское отделение), 1984. 254 с.
35. *Antipov A., Arakelian S., Vartanyan T. et al.* // Opt. Spectrosc. 2016. V. 121. P. 765.
<https://doi.org/10.1134/S0030400X16110035>
36. *Gorshkov O.N., Mikhaylov A.N., Kasatkin A.P. et al.* // J. Phys.: Conf. Ser. 2016. V. 741. P. 012174.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/741/1/012174>
37. *Гуртов В.А.* Твердотельная электроника. М.: Техносфера, 2008. 512 с.
38. *Ismail M., Kim S.* // Appl. Surf. Sci. 2020. V. 530. P. 147284.
<https://doi.org/10.1016/j.apsusc.2020.147284>
39. *Hasegawa H., Sawada T.* // Thin Solid Films. 1983. V. 103. P. 119.
[https://doi.org/10.1016/0040-6090\(83\)90430-3](https://doi.org/10.1016/0040-6090(83)90430-3)