

Раздел III. Электроника, нанотехнологии и приборостроение

УДК 621.315.592.3

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-116-123

З.Е. Вакулов, Р.В. Томинов, Д.А. Дзюба, В.А. Смирнов

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ МЕМРИСТИВНЫХ ПЛЕНОК ЛЕГИРОВАННОГО ОКСИДА ЦИНКА ДЛЯ СИСТЕМ МАШИННОГО ЗРЕНИЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ КОМПЛЕКСОВ

Представлены результаты исследования влияния режимов синтеза тонких пленок легированного оксида цинка методом импульсного лазерного осаждения на их морфологические и электрофизические характеристики. Проведены экспериментальные исследования влияния размерных эффектов на параметры резистивного переключения мемристорных структур на основе тонких пленок легированного оксида цинка. Установлена связь между морфологическими параметрами пленок, их толщиной и резистивными характеристиками переключения. Получены результаты, показывающие, как толщина, шероховатость поверхности и средний диаметр зерна влияют на соотношение сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях, а также на напряжения переключения U_{set} и U_{res} . Показано, что увеличение толщины пленок оксида цинка, легированного галлием, приводит к увеличению напряжений U_{set} и U_{res} , в то время как зависимость соотношения сопротивлений в высокоомном и низкоомном состояниях имеет комплексный характер, максимум на ней наблюдается при толщине пленок порядка 30 нм. Полученные результаты позволяют оценить степень влияния структурных и морфологических параметров пленок легированного оксида цинка на эффект резистивного переключения в них, а также сформулировать рекомендации по получению данных пленок с требуемыми параметрами резистивного переключения. Установлено, что увеличивая толщину пленок оксида цинка легированного галлием от $11,8 \pm 5,1$ нм до $55,1 \pm 18,4$ нм можно изменять величину концентрации носителей заряда от $(2,84 \pm 0,22) \cdot 10^{19}$ см⁻³ до $(1,42 \pm 0,13) \cdot 10^{20}$ см⁻³, а также подвижность носителей заряда от $54,48 \pm 4,07$ см²/(В·с) до $18,77 \pm 0,83$ см²/(В·с). При этом увеличение толщины пленок оксида цинка, легированного галлием, также приводит к увеличению сопротивления в высокоомном состоянии от $1,38 \pm 0,11$ МОм до $62,59 \pm 5,4$ МОм и сопротивления в низкоомном состоянии от $0,005 \pm 0,001$ МОм до $0,041 \pm 0,002$ МОм. Полученные результаты могут быть использованы при разработке физических принципов создания электронной компонентной базы систем искусственного интеллекта для изготовления новых приборов и устройств нанoeлектроники и адаптивных нейроморфных систем.

Нанотехнологии; наноматериалы; нанoeлектроника; нанокристаллические пленки оксида цинка; эффект резистивного переключения; машинное зрение; нейроморфные структуры; робототехнические системы.

Z.E. Vakulov, R.V. Tominov, D.A. Dzyuba, V.A. Smirnov

FORMATION AND INVESTIGATION OF DOPED ZINC OXIDE MEMRISTIVE FILMS FOR MACHINE VISION SYSTEMS OF ROBOTIC COMPLEXES

The results of investigation of the influence of synthesis modes of doped zinc oxide thin films by pulsed laser deposition on their morphological and electrophysical characteristics are presented. Experimental studies of the influence of dimensional effects on the parameters of resistive switching of memristor structures based on thin films of doped zinc oxide have been carried out. The relationship between the morphological parameters of the films, their thickness and resistive switching characteristics has been established. The results showing how thickness, surface roughness and average grain diameter influence the ratio of resistance in the high-resistance and low-resistance states, as well as the switching voltages U_{set} and U_{res} have been obtained. It is shown that an increase in the thickness of gallium-doped zinc oxide

films leads to an increase in the U_{set} and U_{res} voltages, while the dependence of the resistance ratio in the high-resistance and low-resistance states has a complex character, with a maximum observed at a film thickness of about 30 nm. The obtained results allow us to estimate the degree of influence of structural and morphological parameters of doped zinc oxide films on the resistive switching effect in them, and also to formulate recommendations for obtaining these films with the required resistive switching parameters. It was found that increasing the thickness of gallium-doped zinc oxide films from 11.8 ± 5.1 nm to 55.1 ± 18.4 nm it is possible to change the value of charge carriers concentration from $(2.84 \pm 0.22) \cdot 10^{19} \text{ cm}^{-3}$ to $(1.42 \pm 0.13) \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$, as well as the mobility of charge carriers from $54.48 \pm 4.07 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$ to $18.77 \pm 0.83 \text{ cm}^2/(\text{V}\cdot\text{s})$. At the same time, increasing the thickness of gallium-doped zinc oxide films also leads to an increase in resistance in the high-resistance state from $1.38 \pm 0.11 \text{ M}\Omega$ to $62.59 \pm 5.4 \text{ M}\Omega$ and resistance in the low-resistance state from $0.005 \pm 0.001 \text{ M}\Omega$ to $0.041 \pm 0.002 \text{ M}\Omega$. The results obtained can be used in the development of physical principles of creation of electronic component base of artificial intelligence systems for manufacturing new devices and devices of nanoelectronics and adaptive neuromorphic systems.

Nanotechnology; nanomaterials; nanoelectronics; nanocrystalline zinc oxide films; resistive switching effect; machine vision; neuromorphic structures; robotic systems.

Введение. Современные цифровые вычислительные системы на базе архитектуры фон Неймана обладают рядом преимуществ при решении сложных математических задач [1], однако с ростом информатизации современного общества такие вычислительные системы сталкиваются с большим количеством проблем (высокое энергопотребление, низкая скорость вычислений при работе с большим количеством данных), обусловленных физическим разделением модуля памяти и процессора. Комплексное решение обозначенных проблем требует разработки и создания новой энергоэффективной и производительной вычислительной архитектуры. Следует отметить, что нейросетевая система человеческого мозга характеризуется высокой параллельностью, отказоустойчивостью, эффективностью, реконфигурируемостью и позволяет достичь сверхмалого энергопотребления и высокой эффективности обработки информации. Кроме того, мозг способен обрабатывать большое количество сложной неструктурированной и вероятностной информации, например, при обучении, распознавании образов, понимании языка. Таким образом, разработка методов обработки данных на основе механизмов работы человеческого мозга, а также создание нейроморфных вычислений с функциями автономного обучения [2–8] является одним из наиболее перспективных вариантов решения проблем вычислительных систем, построенных на архитектуре фон Неймана, а также фундаментальной основой для разработки нового поколения компьютеров.

С использованием методов программного моделирования [9] и аппаратной реализации интегральных схем на базе КМОП [10] становится возможным моделирование синаптической функции человеческого мозга, что является начальным этапом для реализации нейроморфных вычислений. Тем не менее, оба упомянутых метода имеют существенные ограничения, связанные с большой площадью, занимаемой элементами на кристалле, а также и высоким энергопотреблением. В рамках развития вычислительной техники более перспективным представляется аппаратная реализация нейроморфных вычислений и синаптической пластичности [11–15]. Учитывая, что биологическая нервная система передает информацию посредством электрических сигналов (потенциалы действия), транслируемых нейронами, большинство научных групп по всему миру концентрировали свое внимание на разработке нейросинаптических устройств на базе транзисторных и мемристивных структур [16–18]. Такой тип устройств, изготовленных с использованием подходов микро- и нанoeлектроники, возможно реализовать с использованием существующих технологий, а также поддается масштабированию и интеграции. Однако компромисс между пропускной способностью и плотностью соединения ограничивает скорость работы таких структур, что может приводить к увеличению задержки и потере мощности.

Качественно новый шаг в области аппаратной реализации систем технического зрения для робототехнических комплексов различной конструкции и назначения, можно сделать за счет использования массивов мемристивных устройств и полностью аналоговой обработки визуальной информации подобно тому, как она обрабатывается в биоло-

гических нейронных сетях без цифро-аналоговых и аналогово-цифровых преобразований [19]. Один из основных способов технологической реализации новой архитектуры заключается в изготовлении интегральных микросхем на основе мемристорных структур, соединенных между собой перекрестными шинами данных (кроссбар архитектура), и обладающими свойствами многоуровневости и синаптической пластичности (STDP) [20]. При этом мемристоры кроссбар структуры имеют высокую степень интеграции, обладают высоким быстродействием и низким энергопотреблением, что позволяет обеспечить массовый параллелизм и вычисления, наблюдаемые в человеческом мозге, в котором нейрон может иметь до 10 000 связей с другими нейронами. Применение мемристорных структур, обладающих синаптической пластичностью, позволит обеспечить эту связность, создавать гибкую настраиваемую архитектуру, существенно увеличить быстродействие, а также понизить потребляющую мощность запоминающих и вычислительных устройств на их основе. Кроме того, использование мемристорных кроссбар структур в качестве ячеек памяти имеет большие перспективы для создания 3D интегральных микросхем.

Таким образом, целью данной работы является исследование закономерностей влияния размерных эффектов на резистивное переключение в тонких пленках легированного оксида цинка для реализации элементов нейроморфных систем машинного зрения на их основе для создания интеллектуальных человекоподобных робототехнических систем.

Эксперимент. Нанокристаллические пленки ZnO:Ga были получены методом импульсного лазерного осаждения на установке Pioneer 180 (Neocera, США). Для абляции вращающейся мишени ZnO:Ga использовался KrF-эксимерный лазер COMPex Pro 102 F (Coherent Inc., Германия) с длиной волны 248 нм. Пленки формировались в среде кислорода при давлении $1 \cdot 10^{-3}$ Торр при частоте следования лазерных импульсов 10 Гц. Морфология полученных пленок исследовалась методом атомно-силовой микроскопии (АСМ) [21]. Электрофизические параметры полученных пленок определялись методом измерения ЭДС Холла на установке Ecoria HMS-3000 (Ecoria Co., Республика Корея). Исследование мемристорных свойств полученных пленок проводилось с использованием анализатора параметров полупроводников Keithley 4200-SCS (Keithley Instruments, США) и субмикронной зондовой системы EM-6070A (Планар, Республика Беларусь).

Результаты и обсуждение. Установлено, что изменяя толщину пленок ZnO:Ga (h) от $11,8 \pm 5,1$ нм до $55,1 \pm 18,4$ нм можно увеличивать концентрацию носителей заряда в пленках ZnO:Ga (N) от $(2,84 \pm 0,22) \cdot 10^{19}$ см $^{-3}$ до $(1,42 \pm 0,13) \cdot 10^{20}$ см $^{-3}$, а также уменьшать подвижность носителей заряда (μ) от $54,48 \pm 4,07$ см 2 /(В·с) до $18,77 \pm 0,83$ см 2 /(В·с) (рис. 1).

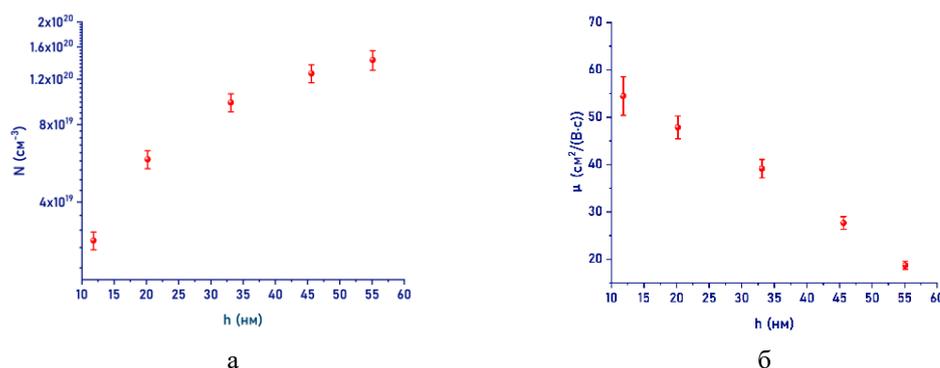


Рис. 1. Зависимости N и μ от толщины пленок ZnO:Ga
(а – концентрация носителей заряда, б – подвижность носителей заряда)

Такой эффект обусловлен взаимосвязью между объемной проводимостью внутри зерен и проводимостью по границам зерен. С увеличением толщины пленки и, как следствие, увеличением среднего размера зерен увеличивается расстояние, которое носители

заряда вынуждены преодолевать внутри зерна двигаясь от одной границы до другой, что приводит к относительному снижению вклада объемной проводимости в общую проводимость пленки [22].

В результате исследования мемристивных свойств пленок ZnO:Ga установлено, что увеличение h приводит к увеличению R_{HRS} от $1,38 \pm 0,11$ МОм до $62,59 \pm 5,4$ МОм и R_{LRS} от $0,005 \pm 0,001$ МОм до $0,041 \pm 0,002$ МОм (рис. 2).

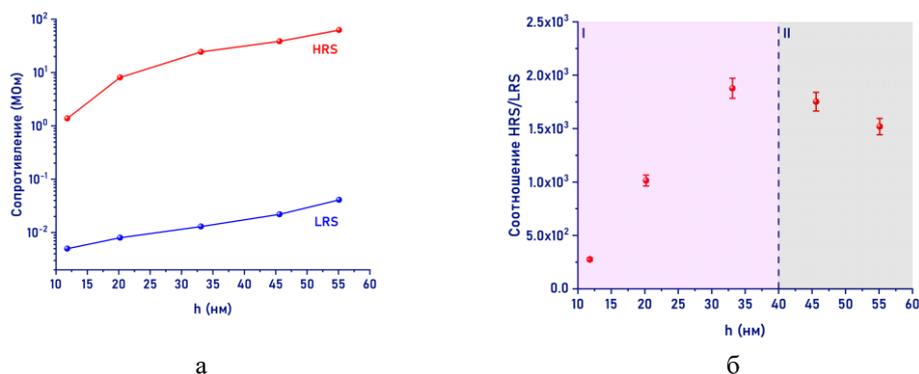


Рис. 2. Мемристивные свойства пленок ZnO:Ga с различной толщиной (а – зависимости HRS и LRS, б – соотношение сопротивлений)

Зависимость отношения R_{HRS}/R_{LRS} от h характеризуется комплексным характером, на графике (рис. 2,б) можно выделить две области: область I, соответствующая толщинам пленок до 40 нм, и область II, характеризующаяся толщинами пленок более 40 нм. В пределах области I наблюдается увеличение соотношения R_{HRS}/R_{LRS} от $276,1 \pm 13,8$ до $1877,7 \pm 93,9$ при увеличении h от $11,8 \pm 0,7$ нм до $33,1 \pm 1,9$ нм. Однако дальнейшее увеличение h до $55,1 \pm 3,3$ нм приводит к снижению отношения R_{HRS}/R_{LRS} до $1519,1 \pm 75,9$. Одним из вероятных объяснений увеличения сопротивления R_{HRS} является увеличение длины наноразмерного проводящего канала с ростом h . Кроме того, установлено, что значение напряжения включения U_{set} возрастает от $0,84 \pm 0,06$ В до $3,55 \pm 0,24$ В по мере увеличения h (рис. 3).

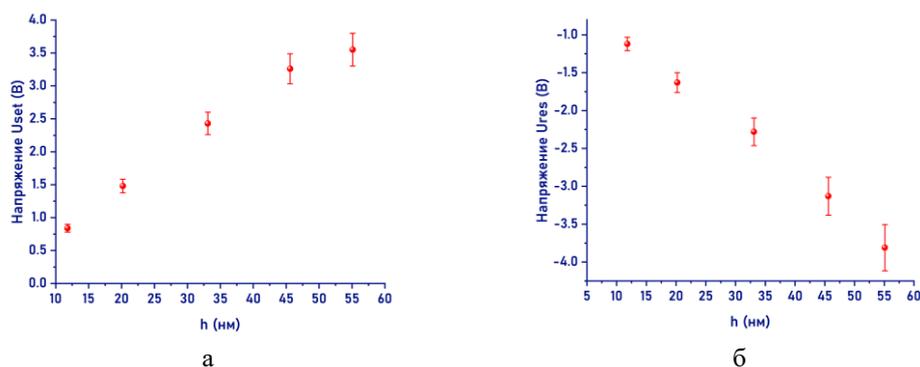


Рис. 3. Результаты исследования влияния толщины пленки на параметры резистивного переключения (а – U_{set} , б – U_{res})

Исследование влияния шероховатости поверхности пленок ZnO:Ga (S) на соотношение R_{HRS}/R_{LRS} и величину напряжений U_{set} и U_{res} (рис. 4) показало, что при увеличении S от $9,6 \pm 0,8$ нм до $66,2 \pm 3,2$ нм соотношение R_{HRS}/R_{LRS} увеличивается от $643,1 \pm 51,5$ до $2125,2 \pm 170,1$.

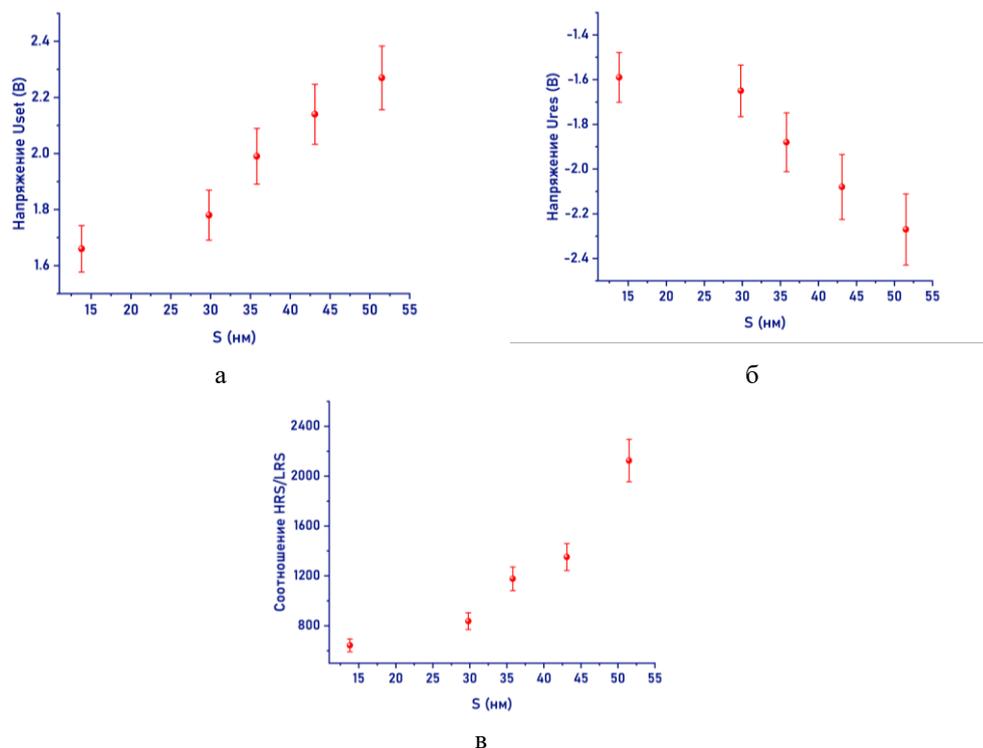


Рис. 4. Результаты исследования влияния шероховатости поверхности пленок ZnO:Ga на параметры резистивного переключения (а – U_{set} , б – U_{res} , в – соотношение R_{HRS}/R_{LRS})

При этом величина U_{set} возрастает от $1,66 \pm 0,1$ В до $2,27 \pm 0,11$ В, а U_{res} изменяется от $-1,59 \pm 0,11$ В до $-2,27 \pm 0,16$ В. Анализ влияния величины среднего диаметра зерна пленок ZnO:Ga на соотношение R_{HRS}/R_{LRS} и величину напряжения U_{set} и U_{res} выявил, что при увеличении диаметра зерна от $18,7 \pm 1,5$ нм до $82,1 \pm 6,5$ нм наблюдаются обратные зависимости соотношения R_{HRS}/R_{LRS} и U_{set} и U_{res} .

Заключение. В результате проведенных исследований установлены закономерности, связывающие толщину пленок ZnO:Ga с их электрофизическими параметрами и мемристивными свойствами. Обнаружено, что изменение толщины пленок в диапазоне от $11,8 \pm 5,1$ нм до $55,1 \pm 18,4$ нм позволяет получать пленки с концентрацией носителей заряда от $(2,84 \pm 0,22) \cdot 10^{19}$ см⁻³ до $(1,42 \pm 0,13) \cdot 10^{20}$ см⁻³ и подвижностью от $54,48 \pm 4,07$ см²/(В·с) до $18,77 \pm 0,83$ см²/(В·с). Было показано, что увеличение толщины пленок ZnO:Ga приводит к росту сопротивления в R_{HRS} от $1,38 \pm 0,11$ МОм до $62,59 \pm 5,4$ МОм и R_{LRS} от $0,005 \pm 0,001$ МОм до $0,041 \pm 0,002$ МОм. Полученные результаты могут быть использованы при разработке физических принципов создания ЭКБ систем искусственного интеллекта для изготовления новых приборов и устройств нанoeлектроники и адаптивных нейроморфных систем.

Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 25-19-00809, <https://rscf.ru/project/25-19-00809/> в Южном федеральном университете (в части экспериментальных исследований влияния морфологических параметров на эффект резистивного переключения), а также в рамках научной программы Национального центра физики и математики, направление № 9 «Искусственный интеллект и большие данные в технических, промышленных, природных и социальных системах» (в части разработки методики получения структур для исследования электрофизических параметров).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Li C., Wang J., Li D., Ilyas N., Yang Z., Chen K. Gu. P., Jiang X., Gu D., Liu F., Jiang Y., Li W. An oxide-based heterojunction optoelectronic synaptic device with wideband and rapid response performance // *Journal of Materials Science & Technology*. – 2022. – Vol. 123. – P. 159-167.
2. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Nanoscale Titanium Oxide Memristive Structures for Neuromorphic Applications: Atomic Force Anodization Techniques, Modeling, Chemical Composition, and Resistive Switching Properties // *Nanomaterials*. – 2025. – Vol. 15, No. 1. – P. 75.
3. Makarov V.A., Lobov S.A., Shchanikov S., Mikhaylov A., Kazantsev V.B. Toward reflective spiking neural networks exploiting memristive devices // *Frontiers in Computational Neuroscience*. – 2022. – Vol. 16. – P. 859874.
4. Томинов Р.В., Варганов В.И., Угрюмов И.С., Вакулов З.Е., Казанцев В.Б., Смирнов В.А. ZnO мемристорные структуры: многоуровневое резистивное переключение и нейроморфные применения // *Наноиндустрия*. – 2024. – Т. 17, № S10-2 (128). – С. 533-537.
5. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Shikhovtsov I.A., Varganov V.I., Kazantsev V.B., Gupta L.R., Prakash Ch., Smirnov V.A. Approaches for Memristive Structures Using Scratching Probe Nanolithography: Towards Neuromorphic Applications // *Nanomaterials*. – 2023. – Vol. 13, No. 10. – P. 1583.
6. Il'ina M.V., Il'in O.I., Osotova O.I., Smirnov V.A., Ageev O.A. Memristors based on strained multi-walled carbon nanotubes // *Diamond and Related Materials*. – 2022. – Vol. 123. – P. 108858.
7. Avilov V., Polupanov N., Tominov R., Solodovnik M., Konoplev B., Smirnov V., Ageev O. Resistive switching of GaAs oxide nanostructures // *Materials*. – 2020. – Vol. 13, No. 16. – P. 3451.
8. Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyabieva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Khakhulin D.A. Ageev O.A. Investigation into the memristor effect in nanocrystalline ZnO films // *Semiconductors*. – 2019. – Vol. 53. – P. 72-77.
9. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation // *Nano Research*. – 2023. – Vol. 16, No. 7. – P. 10222-10233.
10. Mikhaylov A.N., Gryaznov E.G., Koryazhkina M.N., Bordanov I.A., Shchanikov S.A., Telminov O.A., Kazantsev V.B. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives // *Supercomputing Frontiers and Innovations*. – 2023. – Vol. 10, No. 2. – P. 77-103.
11. Tominov R., Vakulov Z., Kazantsev V., Prakash C., Rodriguez D., Smirnov V. Synaptic plasticity in the nanocrystalline ZnO cross-point for neuromorphic systems of AI // *2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. – IEEE, 2024. – P. 235-238.
12. Prakash C. et al. Computing of neuromorphic materials: an emerging approach for bioengineering solutions // *Materials Advances*. – 2023. – Vol. 4, No. 23. – P. 5882-5919.
13. Ryu H., Kim S. Self-rectifying resistive switching and short-term memory characteristics in Pt/HfO₂/TaO_x/TiN artificial synaptic device // *Nanomaterials*. – 2020. – Vol. 10, No. 11. – P. 2159.
14. Raikar A.S. et al. Neuromorphic computing for modeling neurological and psychiatric disorders: Implications for drug development // *Artificial Intelligence Review*. – 2024. – Vol. 57, No. 12. – P. 318.
15. Kim S., Du C., Sheridan P., Ma W., Choi S., Lu W.D. Experimental demonstration of a second-order memristor and its ability to biorealistically implement synaptic plasticity // *Nano letters*. – 2015. – Vol. 15, No. 3. – P. 2203-2211.
16. Stasenko S. V., Mikhaylov A. N., Kazantsev V. B. Control of Network Bursting in a Model Spiking Network Supplied with Memristor—Implemented Plasticity // *Mathematics*. – 2023. – Vol. 11, No. 18. – P. 3888.
17. Song M.K., Kang J.H., Zhang X., Ji W., Ascoli A., Messaris I. et al. Recent advances and future prospects for memristive materials, devices, and systems // *ACS nano*. – 2023. – Vol. 17, No. 13. – P. 11994-12039.
18. Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V. Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage // *Advanced Electronic Materials*. – 2022. – Vol. 8, No. 8. – P. 2200215.
19. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication // *Nanomaterials*. – 2024. – Vol. 14, No. 23. – P. 1901.
20. Tominov R., Vakulov Z., Kazantsev V., Prakash C., Rodriguez D., Smirnov V. Synaptic plasticity in the nanocrystalline ZnO cross-point for neuromorphic systems of AI // *2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. – IEEE, 2024. – P. 235-238.

21. Смирнов В.А., Томинов Р.В., Авилов В.И., Алябьева Н.И., Вакулов З.Е., Замбург Е.Г., Хахулин Д.А., Агеев О.А. Исследование мемристорного эффекта в нанокристаллических пленках ZnO // Физика и техника полупроводников. – 2019. – Т. 53, № 1. – С. 77-82.
22. Rupp J L. M., Infortuna A., Gauckler L.J. Microstrain and self-limited grain growth in nanocrystalline ceria ceramics // Acta materialia. – 2006. – Vol. 54, No. 7. – P. 1721-1730.

REFERENCES

1. Li C., Wang J., Li D., Ilyas N., Yang Z., Chen K. Gu. P., Jiang X., Gu D., Liu F., Jiang Y., Li W. An oxide-based heterojunction optoelectronic synaptic device with wideband and rapid response performance, *Journal of Materials Science & Technology*, 2022, Vol. 123, pp. 159-167.
2. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Rodriguez D.J., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Nanoscale Titanium Oxide Memristive Structures for Neuromorphic Applications: Atomic Force Anodization Techniques, Modeling, Chemical Composition, and Resistive Switching Properties, *Nanomaterials*, 2025, Vol. 15, No. 1, pp. 75.
3. Makarov V.A., Lobov S.A., Shchanikov S., Mikhaylov A., Kazantsev V.B. Toward reflective spiking neural networks exploiting memristive devices, *Frontiers in Computational Neuroscience*, 2022, Vol. 16, pp. 859874.
4. Tominov R.V., Varganov V.I., Ugryumov I.S., Vakulov Z.E., Kazantsev V.B., Smirnov V.A. ZnO мемристорные структуры: многоступенчатое резистивное переключение и нейроморфные применения [ZnO memristor structures: multilevel resistive switching and neuromorphic applications], *Nanoindustriya* [Nanoindustry], 2024, Vol. 17, No. S10-2 (128), pp. 533-537.
5. Tominov R.V., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Shikhovtsov I.A., Varganov V.I., Kazantsev V.B., Gupta L.R., Prakash Ch., Smirnov V.A. Approaches for Memristive Structures Using Scratching Probe Nanolithography: Towards Neuromorphic Applications, *Nanomaterials*, 2023, Vol. 13, No. 10, pp. 1583.
6. Il'ina M.V., Il'in O.I., Osotova O.I., Smirnov V.A., Ageev O.A. Memristors based on strained multi-walled carbon nanotubes, *Diamond and Related Materials*, 2022, Vol. 123, pp. 108858.
7. Avilov V., Polupanov N., Tominov R., Solodovnik M., Konoplev B., Smirnov V., Ageev O. Resistive switching of GaAs oxide nanostructures, *Materials*, 2020, Vol. 13, No. 16, pp. 3451.
8. Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyabieva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Khakhulin D.A., Ageev O.A. Investigation into the memristor effect in nanocrystalline ZnO films, *Semiconductors*, 2019, Vol. 53, pp. 72-77.
9. Avilov V.I., Tominov R.V., Vakulov Z.E., Zhavoronkov L.G., Smirnov V.A. Titanium oxide artificial synaptic device: Nanostructure modeling and synthesis, memristive cross-bar fabrication, and resistive switching investigation, *Nano Research*, 2023, Vol. 16, No. 7, pp. 10222-10233.
10. Mikhaylov A.N., Gryaznov E.G., Koryazhkina M.N., Bordanov I.A., Shchanikov S.A., Telminov O.A., Kazantsev V.B. Neuromorphic computing based on CMOS-integrated memristive arrays: current state and perspectives, *Supercomputing Frontiers and Innovations*, 2023, Vol. 10, No. 2, pp. 77-103.
11. Tominov R., Vakulov Z., Kazantsev V., Prakash C., Rodriguez D., Smirnov V. Synaptic plasticity in the nanocrystalline ZnO cross-point for neuromorphic systems of AI, *2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2024, pp. 235-238.
12. Prakash C. et al. Computing of neuromorphic materials: an emerging approach for bioengineering solutions, *Materials Advances*, 2023, Vol. 4, No. 23, pp. 5882-5919.
13. Ryu H., Kim S. Self-rectifying resistive switching and short-term memory characteristics in Pt/HfO₂/TaO_x/TiN artificial synaptic device, *Nanomaterials*, 2020, Vol. 10, No. 11, pp. 2159.
14. Raikar A.S. et al. Neuromorphic computing for modeling neurological and psychiatric disorders: Implications for drug development, *Artificial Intelligence Review*, 2024, Vol. 57, No. 12, pp. 318.
15. Kim S., Du C., Sheridan P., Ma W., Choi S., Lu W.D. Experimental demonstration of a second-order memristor and its ability to biorealistically implement synaptic plasticity, *Nano letters*, 2015, Vol. 15, No. 3, pp. 2203-2211.
16. Stasenko S. V., Mikhaylov A. N., Kazantsev V. B. Control of Network Bursting in a Model Spiking Network Supplied with Memristor—Implemented Plasticity, *Mathematics*, 2023, Vol. 11, No. 18, pp. 3888.
17. Song M.K., Kang J.H., Zhang X., Ji W., Ascoli A., Messaris I. et al. Recent advances and future prospects for memristive materials, devices, and systems, *ACS nano*, 2023, Vol. 17, No. 13, pp. 11994-12039.
18. Tominov R., Avilov V., Vakulov Z., Khakhulin D., Ageev O., Valov I., Smirnov V. Forming-Free Resistive Switching of Electrochemical Titanium Oxide Localized Nanostructures: Anodization, Chemical Composition, Nanoscale Size Effects, and Memristive Storage, *Advanced Electronic Materials*, 2022, Vol. 8, No. 8, pp. 2200215.

19. Saenko A.V., Tominov R.V., Jityaev I.L., Vakulov Z.E., Avilov V.I., Polupanov N.V., Smirnov V.A. Transparent Zinc Oxide Memristor Structures: Magnetron Sputtering of Thin Films, Resistive Switching Investigation, and Crossbar Array Fabrication, *Nanomaterials*, 2024, Vol. 14, No. 23, pp. 1901.
20. Tominov R., Vakulov Z., Kazantsev V., Prakash C., Rodriguez D., Smirnov V. Synaptic plasticity in the nanocrystalline ZnO cross-point for neuromorphic systems of AI, *2024 8th Scientific School Dynamics of Complex Networks and their Applications (DCNA)*. IEEE, 2024, pp. 235-238.
21. Smirnov V.A., Tominov R.V., Avilov V.I., Alyab'eva N.I., Vakulov Z.E., Zamburg E.G., Khakhulin D.A., Ageev O.A. Issledovanie memristornogo effekta v nanokristallicheskih plenkakh ZnO [Investigation of the memristor effect in nanocrystalline ZnO films], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technology of Semiconductors], 2019, Vol. 53, No. 1, pp. 77-82.
22. Rupp J L. M., Infortuna A., Gauckler L.J. Microstrain and self-limited grain growth in nanocrystalline ceria ceramics, *Acta materialia*, 2006, Vol. 54, No. 7, pp. 1721-1730.

Вакулов Захар Евгеньевич – Южный федеральный университет; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371611; к.т.н.; с.н.с.

Томинов Роман Викторович – Южный федеральный университет; e-mail: tominov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; к.т.н.; доцент.

Дзюба Дмитрий Алексеевич – Южный федеральный университет; e-mail: dmdzyuba@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; аспирант.

Смирнов Владимир Александрович – Южный федеральный университет; e-mail: vasmimov@sfedu.ru; г. Таганрог, Россия; тел.: +78634371629; к.т.н.; доцент; зав. кафедрой.

Vakulov Zakhar Evgenevich – Southern Federal University; e-mail: zvakulov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371611; cand. of eng. sc.; senior researcher.

Tominov Roman Viktorovich – Southern Federal University; e-mail: tominov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; cand. of eng. sc.; associate professor.

Dzyuba Dmitry Alekseevich – Southern Federal University; e-mail: dmdzyuba@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; postgraduate student.

Smirnov Vladimir Aleksandrovich – Southern Federal University; e-mail: vasmirnov@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371629; cand. of eng. sc.; associate professor; head of department.

УДК 621.382

DOI 10.18522/2311-3103-2025-5-123-133

Н.М. Богатов, В.С. Володин, Л.Р. Григорьян, М.С. Коваленко
МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ КРЕМНИЕВОЙ
N-I-P НАНОСТРУКТУРЫ

Распределение ионизованных примесей, электронов, дырок определяет структуру, физические свойства, эксплуатационные характеристики полупроводниковых приборов. Роль поверхностных электронных состояний отрицательна, степень их влияния на характеристики прибора зависит от особенностей структуры. Уменьшение размеров полупроводниковых приборов – современная тенденция совершенствования электроники. Влияние поверхностных состояний на свойства наноразмерных объектов возрастает при уменьшении их размеров. Объектом исследования является электрическое поле кремниевой n-i-p наноструктуры. Цель исследования – анализ влияния поверхностных состояний на внутреннее электрическое поле кремниевой n-i-p наноструктуры. Задачи исследования: 1 – Рассчитать численно с учетом поверхностных состояний потенциал и напряжённость электрического поля, концентрацию доноров и акцепторов в кремниевой n-i-p наноструктуре с диффузионным профилем легирования. 2 – Определить влияние толщины n-i-p наноструктуры и плотности поверхностных состояний на потенциал и напряжённость электрического поля. 3 – Определить состав области пространственного заряда n-i-p наноструктуры с минимизированным влиянием поверхностных состояний. Методика расчёта основана на численном решении уравнения Пуассона с учётом поверхностных состояний и граничными условиями, включающими условие общей электронейтральности образца. В результате получены распределения потенциала и напряжённости электрического поля для различных значений толщины