

**Сыса Артем Владимирович** – e-mail: lostsleep@yandex.ru; кафедра материалов функциональной электроники; аспирант.

**Шевяков Василий Иванович** – e-mail: shev@dsd.miee.ru; кафедра интегральной электроники и микросистем; д.т.н.; профессор.

**Belov Alexey Nikolaevich** – National Research University of Electronic Technology; e-mail: nanointech@mail.ru; 1, Shokin area, Moscow, 124498, Russia; the department of electronics materials functional; dr. of eng. sc.; professor.

**Kislitsin Maxim Valerievich** – e-mail: maks20053@inbox.ru; the department of integrated electronics and microsystems; engineer.

**Stroganov Anton Alexandrovich** – e-mail: rpsl@yandex.ru; cand. of eng. sc.; engineer.

**Sysa Artyom Vladimirovich** – e-mail: lostsleep@yandex.ru; the department of electronics materials functional; postgraduate student.

**Shevyakov Vasily Ivanovich** – e-mail: shev@dsd.miee.ru; the department of integrated electronics and microsystems; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.383.45

**О.А. Агеев, Чон-Гол Юн, Е.Г. Замбург, Ю.Н. Варзарев, В.Н. Джуплин,  
Д.А. Голосов, Д.А. Хахулин**

#### **УФ-СЕНСОР НА ОСНОВЕ НАНОКРИСТАЛЛИЧЕСКИХ ПЛЕНОК ZnO, ПОЛУЧЕННЫХ МЕТОДОМ AACVD\***

*Сенсоры УФ-излучения являются важными элементами многих систем в оборонной, авиакосмической и ряде других областей, что влечет за собой стремление повысить чувствительность и надежность, а также снизить стоимость устройства, за счет использования новых подходов к получению активного слоя сенсора. Представлены результаты исследования по разработке сенсора УФ-излучения на основе нанокристаллических пленок ZnO с высокой фоточувствительностью. В качестве метода получения пленок использовались осаждения из парогазовой фазы с участием аэрозоля (AACVD). С помощью изменения температуры и типа подложки контролировалась кристаллографическая структура пленки ZnO, что отражалось в изменении фоточувствительности. Было изготовлено восемь образцов в диапазоне температур 300–450 °С на аморфном оксиде индия-олова (ITO), монокристаллическом кремнии и монокристаллическом сапфире. Получены рентгеновские дифрактограммы нанокристаллических пленок ZnO. Сделаны выводы о влиянии используемой подложки и параметров процесса осаждения на кристаллографическую структуру пленки. Измерены ВАХ и токовременные характеристики полученных образцов. Обнаружена связь между кристаллической структурой пленки и откликом на УФ-излучение. Предполагаемая причина разницы в изменении сопротивления пленок, полученных при различных температурах, – различия в размере зерен и характере их границ. Полученные результаты позволяют сделать вывод об оптимальных режимах формирования пленки ZnO для сенсора УФ-излучения методом AACVD. Кроме того, проведено сравнение полученного сенсора с устройствами, известными из литературы. Это позволило выделить достоинства полученного УФ-сенсора, а также недостатки, которые необходимо устранить для перехода к промышленному внедрению результатов исследования.*

*Нанотехнологии; ZnO; нанокристаллические пленки; УФ-сенсор; AACVD.*

\* Исследования выполнены при финансовой поддержке РФФИ (Соглашение № 14-08-90010 Бел\_а), БРФФИ в рамках научного проекта № Т14Р-165.

O.A. Ageev, Jong-Gul Yoon, E.G. Zamburg, Yu.N. Varzarev, V.N. Dzhuplin,  
D.A. Golosov, D.A. Khakhulin

### UV SENSORS OBTAINED ON AACVD GROWN NANOCRYSTALLINE ZnO FILMS

*Sensors of UV radiation are important elements of many systems in the defense and aerospace industries. As a result, it is a remarkable goal to improve the basic parameters of these devices. We present the results of a development of a production technology of UV-sensor with high photosensitivity based on nanocrystalline films of ZnO. Films were produced by aerosol assisted chemical vapor deposition. By varying the temperature and the type of substrate we controlled crystallographic structure of ZnO film, and, as a result, photosensitivity. Eight samples were produced: four samples were grown on amorphous ITO under temperatures 300 °C, 350 °C, 400 °C and 450 °C. Investigation of the parameters of these samples showed, that it is necessary to use two temperatures: 300 °C and 420 °C. We produced four more samples: on sapphire under 300°C, on sapphire under 420 °C, on sapphire under 300°C and with introduction of Pt and on Si under 300°C with introduction of Pt. These are sample 5, 6, 7 and 8, respectively. We acquired XRDS of these films. We also measured the current-voltage and current-time characteristics of these samples. At 1 V dark currents for samples 5, 6, 7 and 8 are 0,2 mA, 1,64 mA, 0,02 mA and 0,5 mA, respectively. After 300 seconds of illumination with mercury lamp currents in samples 5, 6, 7 and 8 reached values of 6,6 mA, 1,70 mA, 13,1 mA and 11,3 m. We have found that there is a correlation between crystal structure and photosensitivity. Possible reason for the difference in photoresponse is defects on crystallites' borders. We compared main parameters of the sensor with the results of other studies.*

*ZnO; thin film; nanocrystalline film; UV-sensor; AACVD.*

**Введение.** Ряд прикладных задач в сфере обеспечения безопасности жизнедеятельности, [1] оборонной [2] и авиакосмической [3] отраслях может быть эффективно решен именно с помощью датчиков УФ-излучения. В связи с этим актуальным является вопрос повышения их чувствительности, надежности и понижения стоимости за счет использования новых подходов в вопросе формирования активного слоя датчика [4]. Особый интерес представляет использование наноструктурированных пленок ZnO. Это прямозонный материал с большой энергией связи экситона (60 МэВ при комнатной температуре) и широкой запрещенной зоной, что позволяет эффективно обнаруживать излучение с длиной волны порядка 375 нм [5]. Для получения пленок ZnO может быть использован широкий спектр методов [6, 7], что ведет к разнообразию свойств полученных пленок [8, 9], и, соответственно, к их применению в различных устройствах: от транзистора [10], до газового сенсора [11]. В нашей работе для получения пленок ZnO использовалось химическое осаждение из парогазовой фазы в присутствии аэрозоля (aerosol assisted chemical vapor deposition – AACVD). Этот метод позволяет относительно быстро формировать пленки сложных материалов, точно контролируя стехиометрию пленки, без использования дорогих мишеней и с упрощенной системой ввода в состав пленки примеси [12]. Были исследованы способы повышения эффективности датчика УФ-излучения на основе пленок ZnO. Для этого структурные и электрофизические свойства пленок изменялись путем варьирования температуры осаждения в рамках 300–450 °C и использования различных подложек: аморфного ИТО, монокристаллических Si и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

**Эксперимент.** Рост пленок оксида цинка осуществлялся методом AACVD [13]. В качестве прекурсора использовался цинкаацетат дигидрат [Zn(CH<sub>3</sub>COO)<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O]. Растворителем для прекурсора выступил моноэтиловый эфир этиленгликоля (C<sub>2</sub>H<sub>5</sub>OC<sub>2</sub>H<sub>4</sub>OH). Концентрация прекурсора составляет 0,045 моль, объем раствора 30 мл. Для внедрения платины в пленку в раствор прекурсора добавлялся ацетилацетонат платины (II) [Pt(C<sub>5</sub>H<sub>7</sub>O<sub>2</sub>)<sub>2</sub>]. Для доставки аэрозоля в реакционную ка-

меру применялся аргон. В качестве подложек использовались кремний, стекло, покрытое ITO, и сапфир. Металлизация наносилась на пленки методом термического вакуумного напыления. В качестве металла контакта использовалось золото. Топология датчика представляет собой встречно-гребенчатую структуру.

Измерение вольт-амперных характеристик осуществлялось при помощи программируемого электрометра Keithley 617. Электрометр управляется с персонального компьютера. Контроль за позиционирование зондов электрометра осуществлялся через микроскоп. Освещение образца осуществлялось светодиодами с длиной волны 365 нм и ртутной лампой с длинами волн порядка 360 и 400 нм. Рентгеновские спектрограммы были получены на установке Rigaku Miniflex 600.

**Результаты и их обсуждение.** Для изучения влияния температуры осаждения, подложки и примесей на свойства пленок было получено восемь образцов при температурах от 300 до 450 °С. Параметры образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

**Параметры экспериментальных образцов**

№ образца	Температура роста	Материал подложки	Параметры прекурсора
Образец №1	300 °С	Стекло/ITO	0,165114 г. ацетата цинка объем растворителя 30 мл
Образец №2	350 °С	Стекло/ITO	
Образец №3	400 °С	Стекло/ITO	
Образец №4	450 °С	Стекло/ITO	
Образец №5	300 °С	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,165114 г. ацетата цинка объем растворителя 20 мл
Образец №6	420 °С	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
Образец №7	300 °С	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,165114 г. ацетата цинка 0,0053г. ацетилацетоната платины (II) объем растворителя 20 мл
Образец №8	300 °С	Si	

В первую очередь было исследовано влияние температуры осаждения на кристаллографическую структуру пленок оксида цинка на стекле, покрытом ITO. В работах [14, 15] освещался вопрос влияния температуры подложки на кристаллическую структуру пленки, что позволило выбрать диапазон, в которых будет изменяться температура. На рентгеновской дифрактограмме пленки, полученной при 300 °С, пики, соответствующие кристаллитам с ориентациями (100) и (110) менее интенсивны, по сравнению с дифрактограммой пленки, полученной при 450 °С. С ростом температуры осаждения растет интенсивность пика, соответствующего кристаллитам с ориентацией (002). На рис. 1 приведены рентгенограммы образцов 1–4.

Были получены ВАХ пленок ZnO, выращенных на аморфном ITO. Контакты к пленке представляли собой конденсаторную структуру с верхним и нижним электродами. Для измерений один из зондов устанавливался на точечный золотой контакт на поверхности пленки ZnO, другой – на слой ITO. На рис. 2 приведены ВАХ образцов 1 и 4, полученных при температурах 300°С (а) и 450 °С (б).

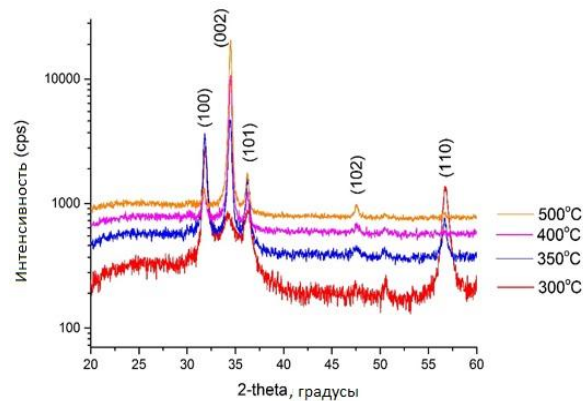


Рис. 1. Рентгенограмма пленки ZnO на стекле, покрытом аморфным ИТО. Температура роста – 300–450 °С, концентрация прекурсора 0,045 моль, объем растворителя 30 мл

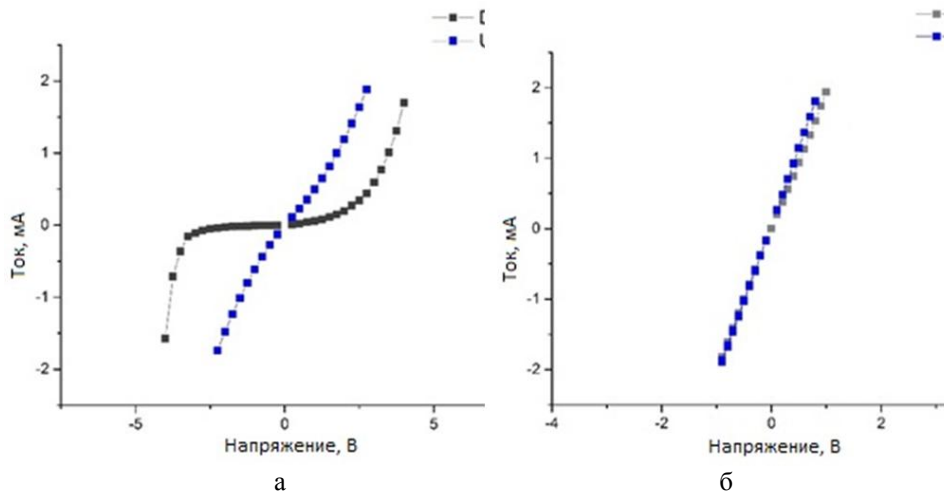


Рис. 2. ВАХ образцов 1 (а) и 4 (б) на аморфном ИТО. Освещение осуществлялось с фронтальной стороны светодиодами

Фоточувствительность сенсора, использующего ZnO, выращенного при температуре 300 °С, при напряжении 0,8 В составляет 89 %, в то время как для сенсора, изготовленного на ZnO, полученном при температуре 420 °С при аналогичном напряжении, составила 15 %.

Далее были исследованы пленки ZnO, полученные на сапфировой и кремниевой подложках (образцы 5–8). На рис. 3,а приведены рентгеновские дифрактограммы пленок, выращенных при 300 °С и 420 °С на сафире (образцы 5 и 6).

В отличие от пленок на стекле, покрытом ИТО, для пленок на сафире интенсивность пика, соответствующего ориентации (002), как при температуре 300 °С, так и 420 °С, одинаково высока, однако в последнем случае, размер кристаллита меньше. Интенсивность пиков, соответствующих кристаллитам с ориентацией (101), (102) и (110) в пленке, выращенной при 300 °С выше, чем в пленке, полученной при 420 °С.

В случае с кремниевой подложкой при температуре роста 300 °С кристаллиты с ориентацией (100), (101) и (110) представлены практически в одинаковой степени. Пик, соответствующий кристаллитам с ориентацией (002) также является самым выраженным, как и в случае с сапфиром. Дифрактограммы пленок приведена на рис. 3,б.

На поверхность полученных пленок была нанесена металлизация, и для полученных образцов были сняты ВАХ и токовременные характеристики.

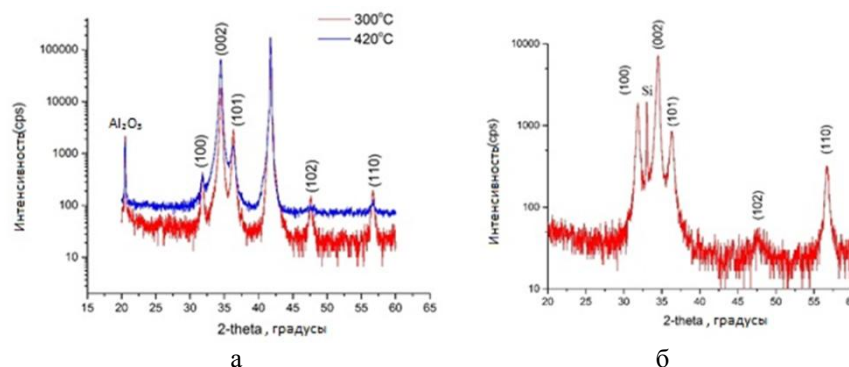


Рис. 3. Рентгеновские дифрактограммы пленок ZnO на сапфировой подложке. Дифрактограммы смещены друг относительно друга на 200 cps для наглядности

При напряжении 1 В темновые токи для образцов 5, 6, 7 и 8 составили 0,2 мА, 1,64 мА, 0,5 мА и 0,02 мА соответственно. Освещение образцов велось 5 минут ртутной лампой, точная спектральная характеристика которой неизвестна, однако известно, что спектр испускания ртутной лампы имеет несколько пиков, из которых на область УФ-излучения приходятся пики, соответствующие 360 нм и 400 нм. За это время ток для образцов 5, 6, 7 и 8 достиг значений: 6,6 мА, 1,70 мА, 13 мА и 11,3 мА, таким образом, он возрос в 33, 0,96, 26 и 565 раз соответственно. При этом достигнутые значения тока не являются пиковыми и уменьшение сопротивления пленок могло продолжаться, в случае освещения их УФ-излучением. Образец №7 с наночастицами платины обладает наибольшим приростом тока: с 0,5 мА до 13 мА, однако при этом темновой ток в образце выше, чем в других пленках, полученных при 300 °С. Наименьшим темновым током обладает образец №8 на кремнии: 0,02 мА. Худшим показал себя образец №6 – прирост тока при освещении минимален: с 1,64 мА до 1,7 мА. Все образцы обладают медленным восстановлением после отключения излучения. За 5 минут спад тока в образцах 5, 6, 7 и 8 составил 6 %, 1 %, 15 % и 20 % соответственно. При этом спад постепенно замедлялся. На рис. 4 представлены сравнение этих измерений для образцов 5–8.

На основе полученных результатов, а также модели, предложенной в работе [16] и результатов работ [17, 18], можно заключить, что существенную роль в механизме генерации и переноса неравновесных носителей заряда играют границы между кристаллитами. Меньший отклик на УФ-излучение пленок, выращенных при 420 °С, можно объяснить тем, что в них меньше кристаллитов с ориентацией (102) и (110), а кристаллиты ориентации (002) меньше по размеру, по сравнению с пленкой, выращенной при 300 °С. Это ведет к уменьшению числа дефектов на границе зерен и плотной упаковке зерен, что, в свою очередь, влияет на высоту барьера на границе зерен. Меньшее число дефектов на границе зерен, и плотная упаковка зерен также затрудняют хемосорбцию молекул из атмосферы, за счет ионизации которых в пленке достигается рост числа неравновесных зарядов.

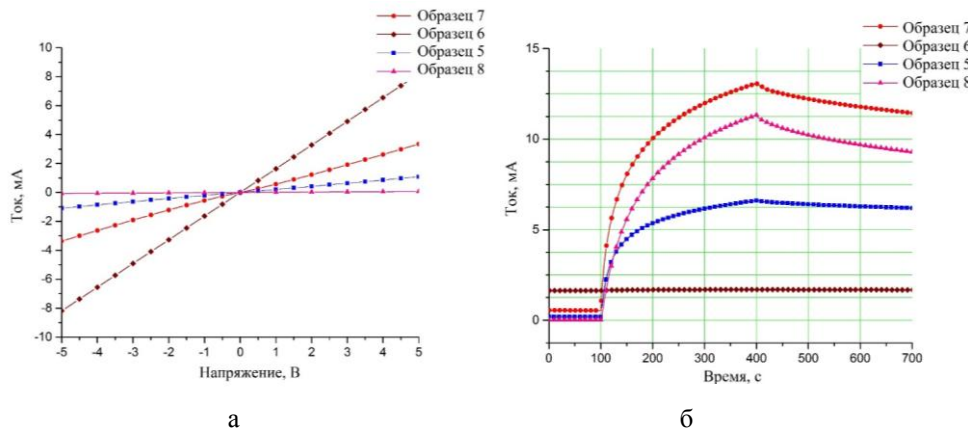


Рис. 4. ВАХ в отсутствии УФ-излучения (а), и токовременная характеристика для образцов 5, 6, 7 и 8. В качестве источника освещения использовалась ртутная лампа

Внедрение платина позволяет повысить световой ток образца практически в два раза – с 6,6 до 13 мА, однако кратно световому току также возрастает и темновой ток.

Было произведено сравнение образца 7 с тремя УФ-сенсорам, описание которых приведено в работах [14, 19, 20] Основные параметры сравниваемых устройств приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры сравнения УФ-сенсоров

Метод получения ZnO	AACVD	Термическое напыление	Спрей-пиролиз	PLD
Источник	Данная работа	[19]	[14]	[20]
$I_C$ , А (1 В)	Пиковое значение тока 13,1 мА, однако рост тока на этом значении не остановился	~1 мкА; при напряжении 30 В ~70мкА	~0,24 мА; ~1,25 мА при напряжении 5 В	~0,15 мА; ~0,92 мА при напряжении 5 В
$I_T$ (1В)	0,54 мА	~1 мкА	~1 мкА	~26 мкА
$\tau_n$	~300 с	~250 с	~35 с	~60 с
$\tau_c$	Спад идет крайне медленно, точное время спада не известно	~300 с	~30 с	~600 с

Сравнение XRD полученного макета и образцов из работ [14] и [19] показало, пленки, полученные спрей-пиролизом при 475 °С имеют схожую кристаллографическую структуру, с пленками, полученными AACVD при 450 °С, однако при этом обладают меньшим темновым током (0,54 мА против 1 мкА) и большим откликом на УФ-излучение (13,1 мА против 1,25 мА). Структура пленок в работе [19] сходна со структурой пленок, полученных при 300 °С, однако использование аморфной подложки стекла негативно сказалось на параметрах устройства. При этом нужно отметить, что устройство в работе [19] способно выдерживать напряжения до 30 В, в то время как в ходе работ с тестовыми образцами, полученными методом AACVD, в некоторых случаях пробой наступал при 5–6 В. Полученное устройство показало худшие результаты по времени нарастания ( $\tau_n$ ) и времени спада ( $\tau_c$ ), по сравнению с другими устройствами. Так, за 300 микросекунд после включения излучения образец так и не вышел на пиковый ток, хотя световой ток достиг значения 13,1 мА, а за 300 микросекунд после прекращения освещения образца падение тока составило около 15 %.

**Заключение.** Таким образом, установлено, что для получения УФ-сенсора предпочтительнее использовать монокристаллические подложки. Кроме того, показано, что пленки, выращенные при температурах порядка 420–450 °С уступают пленкам, полученным при 300 °С при применения в датчике УФ излучения по своей эффективности. Это обусловлено кристаллической структурой пленки, в частности дефектами на границах зерен. Используя монокристаллический сапфир и температуру роста 300 °С, возможно получить УФ-сенсор со световым током  $I_c=6,6$  мА и темновым током  $I_T=0,2$  мА. Введя в пленку платину возможно увеличить световой ток до 13,1 мА, однако при этом также кратно световому току растет и темновой ток. Сенсор на кремнии способен показать еще большую эффективность, но в таком случае конструкция устройства усложняется, поскольку необходимо изолировать активный слой от подложки. Сравнение с другими перспективными УФ-сенсорами на основе ZnO показало, что разработанная технология позволяет изготавливать сенсор, превосходящий некоторые из аналогов по значениям светового и темнового токов, а также по фоточувствительности, однако на данный момент основным недостатком изготовленного сенсора является долгое нарастание тока и низкая скорость восстановления, что серьезно ограничивает промышленное применение разработанного сенсора. Решение этой проблемы позволит перейти к промышленному внедрению полученных результатов.

Результаты получены с использованием оборудования Центра коллективного пользования и научно-образовательного центра "Нанотехнологии" Южного федерального университета [21] и лаборатории кафедры физики университета Сувор.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Craig F. Smith, Vladimir Ryzhikov, Sergei Naydenov, Dennis Wood, Volodymyr Perevertailo.* Ultraviolet radiation detector and dosimeter. Патент США 8829457 B2, 12.03.2012.
2. *Соловьёв А.М.* Использование оптических датчиков видимого, ультрафиолетового и инфракрасного диапазонов для определения ориентации наноспутника // Вопросы электромеханики. – 2011. – Т. 121. – С. 35-38.
3. *Jim Carey.* L-3 Com AVISYS Civil Aviation Self-protection System // Optics and Photonics in Global Homeland Security II, Proc. of SPIE – 2006. – Vol. 6203, 62030E, 0277-786X/06/\$15. doi: 10.1117/12.673685.
4. *Зотов В.Д.* Современные средства детектирования УФ излучений и их применение // Технические и программные средства систем управления, контроля и измерения: сб. тр. 1 науч. конф. – М.: ИПУ РАН, 2010. – С. 533-541.
5. *Семикина Т.В., Комащенко В.Н., Шмырева Л.Н.* Оксидная электроника как одно из направлений прозрачной электроники // Электроника и связь. – 2010. – № 3. – С. 20-28.

6. *Bakin A., Waag A.* ZnO Epitaxial Growth // *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*. – 2011. – P. 368-395.
7. *Otto-Carlsson J., Martin P.M.* Chemical Vapor Deposition // *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*. – 2009. – Cpt. 7. – P. 314-363.
8. *Достанко А.П., Агеев О.А., Голосов Д.А., Завадский С.М., Замбург Е.Г., Вакулов Д.Е., Вакулов З.Е.* Электрические и оптические свойства пленок оксида цинка, нанесенных методом ионно-лучевого распыления оксидной мишени // *Физика и техника полупроводников*. – 2014. – Т. 48, № 9. – С. 1274-1279.
9. *Gusev E.Y., Ageev O.A., Gamaleev V.A., Mikhno A.S., Mironenko O.O., Pronin E.A.* Effect of annealing on conductivity type of nanocrystalline ZnO films fabricated by rf magnetron sputtering // *Advanced Materials Research*. – 2014. – Vol. 893. – С. 539-542.
10. *Ji-Hyuk Choi et al.* Fabrication and characterization of ZnO nanowire transistors with organic polymer as a dielectric layer // *Solid State Communications*. – 2008. – Vol. 148. – P.126-130.
11. *Ageev O.A., Gusev E.Y., Zamburg E.G., Vakulov D.E., Vakulov Z.E., Shumov A.V., Ivonin M.N.* Nanocrystalline ZnO films grown by PLD for NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> sensor // *Applied Mechanics and Materials*. – 2014. – Vol. 475-476. – С. 446-450.
12. *Kwang-Leong Choy, Xianghui Hou.* Processing and Applications of Aerosol-Assisted Chemical Vapor Deposition // *Chemical vapor deposition*. – 2006. – No. 12. – P. 583-596.
13. *Jong-Gul, Hun Kyoo Oh, Young Jik Kwag Yoon.* Structural and Optical Properties of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Composite Films Prepared by Aerosol-Assisted Chemical-Vapor Deposition // *Journal of the Korean Physical Society*. – 1998. – Vol. 33, No. 6. – P. 699-704.
14. *Inamdar S.I., Rajpure K.Y.* High-performance metal–semiconductor–metal UV photodetector based on spray deposited ZnO thin films // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2014. – No. 595. – P. 55-59.
15. *Heerden J.L. van, Swanepoel R.* XRD analysis of ZnO thin films prepared by spray Pyrolysis // *Thin Solid Films*. – 1997. – No. 299. – P. 72-77.
16. *Tansley T.L. Neely D.F.* Adsorption, desorption and conductivity of sputtered zinc oxide thin films // *Thin Solid Films*. – 1984. – No. 121. – P. 95-107.
17. *Zhang D.H., Brodie D.E.* Crystallite orientation and the related photoresponse of hexagonal ZnO films deposited by r.f. sputtering // *Thin Solid Films*. – 1994. – No. 251. – P. 151-156.
18. *Zhang D.H.* Fast photoresponse and the related change of crystallite barriers for ZnO films deposited by r.f. sputtering // *J. Phys. D.: Appl. Phys.* – 1995. – No. 28. – P. 1273-1277.
19. *Panda S.K., Jacob C.* Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices // *Solid-State Electronics*. – 2012. – No. 73. – P. 44-50.
20. *Пташник В.В., Замбург Е.Г., Варзарев Ю.Н., Джуллин В.Н., Шорников П.С.* Фоторезистор ближнего УФ-диапазона на основе нанокристаллических пленок ZnO // *Фундаментальные исследования*. – 2012. – № 5. – С. 1206-1209.
21. *Алексеев А.Н., Соколов И.А., Агеев О.А., Коноплев Б.Г.* Комплексный подход к технологическому оснащению центра прикладных разработок. Опыт реализации в НОЦ «Нанотехнологии» ЮФУ // *Известия ЮФУ. Технические науки*. – 2011. – № 4 (117). – С. 207-210.

#### REFERENCES

1. *Craig F. Smith, Vladimir Ryzhikov, Sergei Naydenov, Dennis Wood, Volodymyr Perevertailo.* Ultraviolet radiation detector and dosimeter. Patent USA, No. 8829457 B2, 12.03.2012.
2. *Solov'ev A.M.* Ispol'zovanie opticheskikh datchikov vidimogo i infrakrasnogo diapazonov dlya opredeleniya orientatsii nanosputnika [The use of optical sensors in the visible, ultraviolet and infrared ranges to determine the orientation of the nanosatellite], *Voprosy elektromekhaniki* [Questions of Electromechanics], 2011, Vol. 121, pp. 35-38.
3. *Jim Carey.* L-3 Com AVISYS Civil Aviation Self-protection System // *Optics and Photonics in Global Homeland Security II, Proc. of SPIE* – 2006, Vol. 6203, 62030E, 0277-786X/06/\$15. doi: 10.1117/12.673685.
4. *Zotov V.D.* Sovremennyye sredstva detektirovaniya UF izlucheniya i ikh primeneniye [Modern means of detecting UV radiation and their applications], *Tekhnicheskie i programmye sredstva sistem upravleniya, kontrolya i izmereniya: sb. tr. 1 nauch. konf.* [Technical and software control systems, control and measurement: proceedings of the 1 scientific conference]. Moscow: IPU RAN, 2010, pp. 533-541.



5. Semikina T.V., Komashchenko V.N., Shmyreva L.N. Oksidnaya elektronika kak odno iz napravleniy prozrachnoy elektroniki [Oxide electronics as one of the areas of transparent electronics], *Elektronika i svyaz'* [Electronics and Communications], 2010, No. 3, pp. 20-28.
6. Bakin A., Waag A. ZnO Epitaxial Growth, *Comprehensive Semiconductor Science and Technology*, 2011, pp. 368-395.
7. Otto-Carlsson J., Martin P.M. Chemical Vapor Deposition, *Handbook of Deposition Technologies for films and coatings*, 2009, Cpt. 7, pp. 314-363.
8. Dostanko A.P., Ageev O.A., Golosov D.A., Zavadskiy S.M., Zamburg E.G., Vakulov D.E., Vakulov Z.E. Elektricheskie i opticheskie svoystva plenok oksida tsinka, nanesennykh metodom ionno-luchevogo raspyleniya oksidnoy misheni [Electrical and optical properties of films of zinc oxide deposited by ion-beam sputtering from an oxide target], *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and Technics of Semiconductors], 2014, Vol. 48, No. 9, pp. 1274-1279.
9. Gusev E.Y., Ageev O.A., Gamaleev V.A., Mikhno A.S., Mironenko O.O., Pronin E.A. Effect of annealing on conductivity type of nanocrystalline ZnO films fabricated by rf magnetron sputtering, *Advanced Materials Research*, 2014, Vol. 893, pp. 539-542.
10. Ji-Hyuk Choi et al. Fabrication and characterization of ZnO nanowire transistors with organic polymer as a dielectric layer, *Solid State Communications*, 2008, Vol. 148, pp.126-130.
11. Ageev O.A., Gusev E.Y., Zamburg E.G., Vakulov D.E., Vakulov Z.E., Shumov A.V., Ivonin M.N. Nanocrystalline ZnO films grown by PLD for NO<sub>2</sub> and NH<sub>3</sub> sensor, *Applied Mechanics and Materials*, 2014, Vol. 475-476, pp. 446-450.
12. Kwang-Leong Choy, Xianghui Hou. Processing and Applications of Aerosol-Assisted Chemical Vapor Deposition, *Chemical vapor deposition*, 2006, No. 12, pp. 583-596.
13. Jong-Gul, Hun Kyoo Oh, Young Jik Kwag Yoon. Structural and Optical Properties of TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> Composite Films Prepared by Aerosol-Assisted Chemical-Vapor Deposition, *Journal of the Korean Physical Society*, 1998, Vol. 33, No. 6, pp. 699-704.
14. Inamdar S.I., Rajpure K.Y. High-performance metal–semiconductor–metal UV photodetector based on spray deposited ZnO thin films, *Journal of Alloys and Compounds*, 2014, No. 595, pp. 55-59.
15. Heerden J.L. van, Swanepoel R. XRD analysis of ZnO thin films prepared by spray Pyrolysis, *Thin Solid Films*, 1997, No. 299, pp. 72-77.
16. Tansley T.L. Neely D.F. Adsorption, desorption and conductivity of sputtered zinc oxide thin films, *Thin Solid Films*, 1984, No. 121, pp. 95-107.
17. Zhang D.H., Brodie D.E. Crystallite orientation and the related photoresponse of hexagonal ZnO films deposited by r.f. sputtering, *Thin Solid Films*, 1994, No. 251, pp. 151-156.
18. Zhang D.H. Fast photoresponse and the related change of crystallite barriers for ZnO films deposited by r.f. sputtering, *J. Phys. D.: Appl. Phys.*, 1995, No. 28, pp. 1273-1277.
19. Panda S.K., Jacob C. Preparation of transparent ZnO thin films and their application in UV sensor devices, *Solid-State Electronics*, 2012, No. 73, pp. 44-50.
20. Ptashnik V.V., Zamburg E.G., Varzarev Yu.N., Dzhuplin V.N., Shornikov R.S. Fotorezistor blizhnego UF-diapazona na osnove nanokristallicheskikh plenok ZnO [Photoresistor near-UV range based on nanocrystalline ZnO films], *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental Research], 2012, No. 5, pp. 1206-1209.
21. Alekseev A.N., Sokolov I.A., Ageev O.A., Konoplev B.G. Kompleksnyy podkhod k tekhnologicheskomu osnashcheniyu tsentra prikladnykh razrabotok. Opyt realizatsii v NOTs «Nanotekhnologii» YuFU [Comprehensive approach to technological equipping for R&D center. The experience in implementing of SEC «Nanotechnology» SFedU], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 4 (117), pp. 207-210.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.А. Лаврентьев.

**Агеев Олег Алексеевич** – Южный федеральный университет; e-mail: ageev@sfedu.ru; 347928, г. Таганрог, ул. Шевченко, 2, корп. Е; тел.: +79185508525; директор Института нанотехнологий и электроники приборостроения; д.т.н.; профессор.

**Варзарев Юрий Николаевич** – e-mail: yu\_varzarev@sfedu.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Джуплин Владимир Николаевич** – e-mail: dzhuplin@mail.ru; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; доцент.

**Замбург Евгений Геннадьевич** – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; к.т.н.; ассистент.

**Хахулин Даниил Александрович** – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

**Чон-Гол Юн** – Университет Суwon; e-mail: jgyoon@suwon.ac.kr; San 2-2, Wau-ri Bonfdam-eup, Hwawsung-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea; кафедра физики; д.т.н.; профессор.

**Голосов Дмитрий Анатольевич** – Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники; e-mail: dmgoosov@gmail.com; 220013, Беларусь, г. Минск, ул. Бровки, 6; кафедра электронной техники и технологии; к.т.н.

**Ageev Oleg Alekseevich** – Southern Federal University; e-mail: ageev@sfnedu.ru; 2, Shevchenko street, build. E, Taganrog, 347928, Russia; phone: +79185508525; director of Institute of Nanotechnology, Electronics, and Electronic Equipment Engineering; dr. of eng. sc.; professor.

**Varzarev Yuriy Nikolaevich** – e-mail: yu\_varzarev@sfnedu.ru; the department of nanotechnology and MEMS; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Dzhuplin Vladimir Nikolaevich** – e-mail: dzhuplin@mail.ru; the department of nanotechnology and MEMS; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Zamburg Evgeny Gennad'evich** – e-mail: zamburg.evgeniy@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystems technology; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Khakhulin Daniil Aleksandrovcih** – e-mail: khakhulin.d.a@gmail.com; the department of nanotechnology and MEMS; postgraduate student.

**Jong-Gul Yoon** – University of Suwon; e-mail: jgyoon@suwon.ac.kr; San 2-2, Wau-ri Bonfdam-eup, Hwawsung-si, Gyeonggi-do 445-743, Korea; the department of physics; dr. of eng. sc.; professor.

**Golosov Dmitry Anatolyevich** – Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics; e-mail: dmgoosov@gmail.com; 6, Browki street, Minsk, 220013, Belarus; the department of electronic engineering and technology; cand. of eng. sc.

УДК 621.38-022.532

**М.В. Ильина, Ю.Ф. Блинов, В.А. Смирнов, А.А. Коньшин, Чинь Ван Мьой**  
**РАЗРАБОТКА ЯЧЕЙКИ ЭНЕРГОНЕЗАВИСИМОЙ ПАМЯТИ НА ОСНОВЕ**  
**МЕМРИСТОРНОЙ СТРУКТУРЫ С ВЕРТИКАЛЬНО**  
**ОРИЕНТИРОВАННОЙ УГЛЕРОДНОЙ НАНОТРУБКОЙ\***

*Одним из приоритетных направлений развития современной наноэлектроники является разработка и создание энергонезависимых элементов памяти с высоким быстродействием и плотностью записи информации. Перспективным направлением в этой области является разработка и исследование наноразмерных мемристорных структур. В работе предложен принцип работы ячейки энергонезависимой памяти на основе мемристорной структуры с вертикально ориентированной углеродной нанотрубкой (ВОУНТ). Показано, что переключение сопротивления мемристорной структуры связано с деформацией ВОУНТ под действием внешнего электрического поля и вандерваальсовым взаимодействием с верхним электродом, отделенным туннельным зазором. Проведены теоретические исследования влияния диаметра, длины и модуля Юнга ВОУНТ, величины туннельного зазора и прикладываемого напряжения на переключение сопротивления структуры на основе ВОУНТ, а также оценены значения возникающих в структуре вандерваальсовых, электростатических и упругих сил. Показано, что структура на основе ВОУНТ с модулем Юнга*

---

\* Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках проектной части госзадания в сфере научной деятельности (задание 16.1154.2014/К).