

9. Ageev O.A., Kolomiytsev A.S., Mikhaylichenko A.V. i dr. Poluchenie nanorazmernykh struktur na osnove nanotekhnologicheskogo kompleksa NANOFAB NTK-9 [Obtaining nanoscale structures based on nanotechnology NANOFAB NTC-9], *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskie nauki* [Izvestiya SFedU. Engineering Sciences], 2011, No. 1 (114), pp. 109-116.
10. Konoplev B.G., Ageev O.A., Smirnov V.A. i dr. Modifikatsiya zondov dlya skaniruyushchey zondovoy mikroskopii metodom fokusirovannykh ionnykh puchkov [Modification of probes for scanning probe microscopy focused ion beams], *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2012, Vol. 41, No. 1, pp. 47-56.

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

Гусев Евгений Юрьевич – Южный федеральный университет; e-mail: eyugusev@sfedu.ru; 347928, ГСП 17А, пер. Некрасовский, 44, корп. «Е»; тел.: +78643371611; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; доцент.

Гамалеев Владислав Анатольевич – e-mail: vlad.gamaleev@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Михно Александр Сергеевич – e-mail: mikhnoas@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирант.

Житяева Юлия Юрьевна – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; кафедра нанотехнологий и микросистемной техники; аспирантка.

Быков Александр Викторович – Закрытое акционерное общество «Нанотехнология МДТ»; e-mail: bykov@ntmdt.ru; 124482, г. Москва, Зеленоград, корпус 100; тел.: +74997357777; ведущий научный сотрудник.

Gusev Evgeny Yurievich – Southern Federal University; e-mail: eyugusev@sfedu.ru; 44, Nekrasovsky, building E, Taganrog, GSP 17A, 347928, Russia; phone: +78643371611; the department of nanotechnology and microsystem technics; associate professor.

Gamaleev Vladislav Anatolyevich – e-mail: vlad.gamaleev@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Mikhno Alexander Sergeevich – e-mail: mikhnoas@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Jityaeva Juliya Yurievna – e-mail: julia.jityaeva@gmail.com; the department of nanotechnology and microsystem technics; postgraduate student.

Bykov Alexander Victorovich – NT-MDT Co (Molecular Devices and Tools for NanoTehnology); e-mail: bykov@ntmdt.ru; Building 100, Zelenograd, Moscow, 124482, Russia; phone: +74997357777; chief researcher.

УДК 536.416:539.377

А.С. Исаева, Е.А. Рындин

МОДЕЛИРОВАНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПЛНОЧНЫХ СЕНСОРАХ*

Рассматривается зависимость между напряженным состоянием нагружаемого объекта мониторинга, представляющего собой алюминиевую пластину, содержащую поверхностный дефект (разрез ненулевой толщины), и напряженным состоянием пленки чувствительного элемента, представляющего собой тонкую пленку меди, нанесенную на пленку полиимида (обес-

* Работа выполнена при финансовой поддержке Минобрнауки РФ (проекты 213.01-11/2014-12 и 14.575.21.0045), а также РФФИ (грант № 13-07-00274).

печивающего диэлектрическую изоляцию), расположенного на поверхности объекта, для целей разработки сенсора мониторинга трещин. Получено решение двумерной симметричной задачи одноосного упругого растяжения образца с поверхностной трещиной, раскрывающейся под воздействием нагружения, перпендикулярного трещине, и пленкой чувствительного элемента, выполненное с использованием программного комплекса ANSYS. Анализируется погрешность, вносимая в модель пренебрежением механическими свойствами пленки диэлектрика (полиимида). Результаты моделирования показывают возможность определения поверхностных дефектов типа трещин при условии подбора оптимальной толщины пленки чувствительного элемента и учета свойств пленки диэлектрика.

Напряженное состояние; одноосное растяжение; моделирование.

A.S. Isaeva, E.A. Ryndin

MODELING OF MECHANICAL STRESSES IN FILM SENSORS

The dependence between the stress state of the loaded object monitoring, representing as the aluminum plate containing formal defect (section nonzero thickness) and the stress state of the film sensing element, representing as a thin film of copper deposited on the polyimide film (providing dielectric isolation) located on the surface of the object, for the purpose of developing a sensor monitoring cracks is considered. The solution of two-dimensional symmetric problem uniaxial elastic tension of the sample with a surface crack, opening under the influence of loading perpendicular to the crack and the film sensing element executed using software package ANSYS is received. The error introducing into the model by neglect mechanical properties dielectric film (polyimide) is analyzed. The modeling results show the possibility of detection surface defects like cracks on condition the selection optimum film thickness sensor and taking into account properties of dielectric film.

Stress-strain state; uniaxial tensile; modeling.

Введение. Несмотря на использование специализированных программ моделирования и расчета напряженных состояний на этапе разработки и проведения планового неразрушающего контроля в процессе эксплуатации, проблема своевременного обнаружения поверхностных дефектов конструкций (несущих опор зданий и мостов, критических элементов и узлов авиационной техники, и т.д.) остается актуальной. Число циклов нагружений, предшествующих разрушению, рассчитывается зачастую для каждого узла или элемента в отдельности и не проверяется на готовой конструкции [1]. Разработка датчиков мониторинга, позволяющих определять поверхностные дефекты без значительных дополнительных затрат времени на контроль, что может быть достигнуто обеспечением их автономной работы в процессе эксплуатации объекта, позволит повысить безопасность [2].

В работах [3, 4] предлагается использовать распределенные пленочные датчики (с использованием электроимпедансной томографии и сетки коммутируемых симисторами пленочных проводников), принцип работы которых заключается в изменении физических свойств тонких пленок, а именно, проводимости, при их повреждении. Структурные схемы пленочных датчиков представлены на рис. 1.

Результаты моделирования, полученные при исследовании методов, позволяют сделать вывод о том, что неоднородности материала пленки, появляющиеся на этапе производства, транспортировки или монтажа датчиков, не приводят к заметному снижению эффективности обнаружения дефектов [6].

Необходимым этапом разработки подобных систем является установление зависимости между напряженным состоянием нагружаемого материала объекта мониторинга, содержащего дефект, и напряженным состоянием пленки чувствительного элемента (ЧЭ). При этом важно показать, что напряженное состояние, возникающее в образце, вызовет механические напряжения в тонкой пленке над дефектом, достаточные для его регистрации.

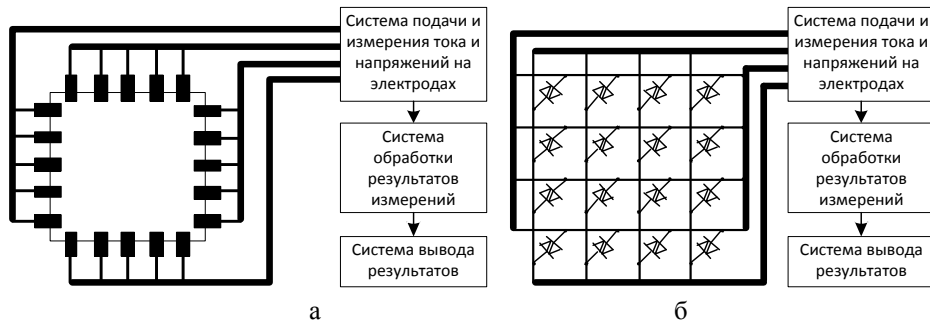


Рис. 1. Структурные схемы датчиков мониторинга поверхностных дефектов с использованием электроимпедансной томографии (а) и сетки коммутируемых пленочных проводников (распределенный датчик трещин [5]) (б)

Постановка задачи. Для этой цели в данной работе рассмотрена двумерная задача напряженного состояния прямоугольного образца с краевой трещиной и пленкой ЧЭ, изолированной от поверхности объекта мониторинга тонким диэлектрическим слоем, при одноосном растяжении. Численное решение задачи выполнялось с использованием программного комплекса ANSYS в предположении идеальной адгезии пленки ЧЭ к поверхности образца и без учета механических свойств изолирующего диэлектрического слоя [7, 8]. Задача решена для формы сечения пленки ЧЭ, представленной на рис. 2.

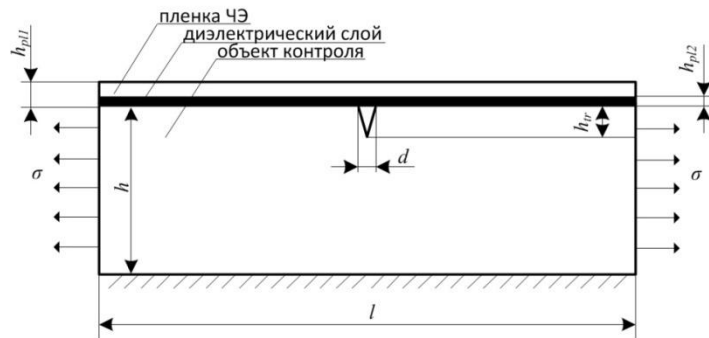


Рис. 2. Сечение объекта контроля и пленки чувствительного элемента

Чувствительный элемент датчика поверхностных дефектов представляет собой пленку постоянной толщины. Задача решена для следующих значений геометрических размеров модели и нагрузки: $l = 20$ мм, $h = 15$ мм, $d = 0,1$ мм, $h_{p1} = 0,5$ мм, $h_{p11} = 160$ мкм, $h_{p12} = 70$ мкм, $\sigma = 1$ МПа.

Обсуждение результатов моделирования. На рис. 3 представлены результаты моделирования для формы сечения пленки ЧЭ, соответствующей датчику мониторинга поверхностных дефектов с использованием электроимпедансной томографии.

Можно видеть, что максимальные механические напряжения сосредоточены в материале образца в области основания трещины (надреза), которое является концентратором напряжений. В материале ЧЭ максимальные напряжения сосредоточены в области над трещиной (надрезом), и объясняются раскрытием трещины при растяжении (или уменьшением величины раскрытия трещины при сжатии), что полностью

согласуется с требованиями к ЧЭ в отношении точности локализации дефекта. Естественно, изменение толщины пленки ЧЭ влияет на величину максимальных напряжений в ней. Так, в данном случае, уменьшение толщины пленки h_{pl} в 2 раза приводит к увеличению значений максимальных напряжений в ней с 0,55 до 1,01 ГПа.

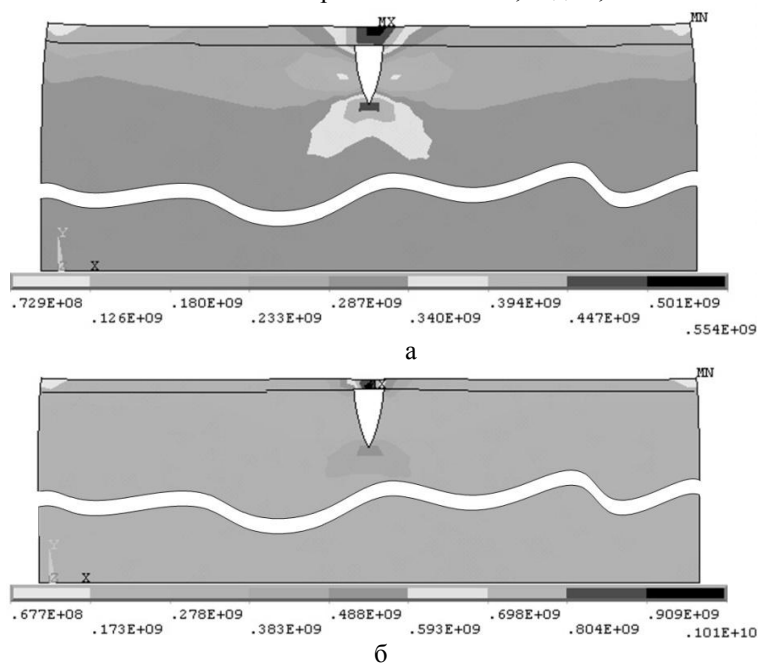


Рис. 3. Распределение механических напряжений по Мизесу в материале объекта контроля и ЧЭ для толщины пленки ЧЭ h_{pl1} (а) и $h_{pl1}/2$ (б) (материал объекта контроля – алюминий, материал пленки ЧЭ – медь)

Представляется полезным внести в модель дополнения, позволяющие учесть влияние на напряженное состояние пленки ЧЭ слоя диэлектрика, выполняющего функции изоляции и механического соединения проводящих поверхностей объекта контроля и пленки ЧЭ. На рис. 4 представлены результаты моделирования с учетом свойств диэлектрической пленки полиимида, обладающего хорошими прочностными и диэлектрическими свойствами (усилие отслаивания полоски меди толщиной 3 мм от полиимида составляет не менее 38 Н, причем эта прочность сохраняется в широком диапазоне температур [9]). Для моделирования выбраны значения толщин пленок меди и полиимида 70 и 90 мкм, 35 и 90 мкм, 18 и 65 мкм соответственно, равные номинальным толщинам, установленным в ГОСТ 26246.12-89 (механические свойства адгезива не учитывались, толщина слоя полиимида увеличивалась на толщину адгезионного слоя) [10].

Результаты моделирования, приведенные на рис. 4, показывают, что учет свойств диэлектрического слоя важен при разработке датчиков подобного типа.

Из сравнения результатов, приведенных на рис. 3,а и 4,а можно видеть, что максимальные напряжения в пленке ЧЭ увеличились на 45,5 %. Рис. 4,б,в показывают результаты моделирования для сочетаний толщин пленок меди и полиимида 35 и 90 мкм, и 18 и 65 мкм соответственно, также установленных в [10]. Можно отметить, что для всех исследованных сочетаний толщин пленок полиимида и меди, максимальные напряжения в структуре находятся в пленке меди, что отвечает цели разработки. В силу своих механических характеристик, пленка полиимида выполняет изоляционные функции в рабочем режиме сенсора.

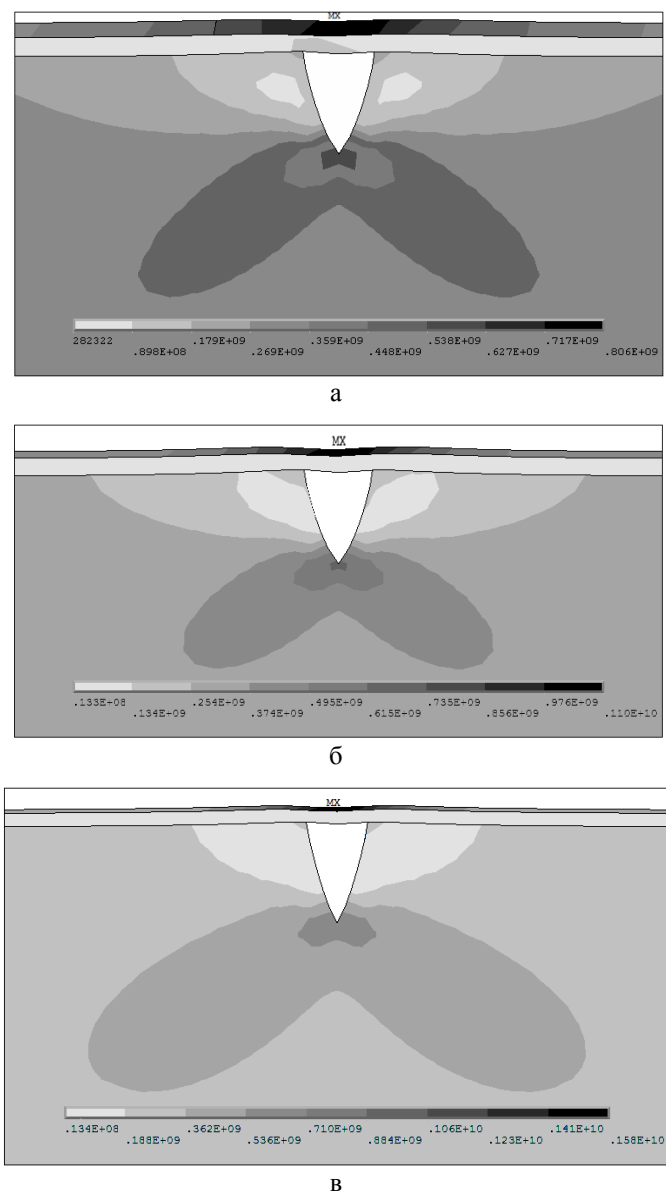


Рис. 4. Распределение механических напряжений по Мизесу в материале объекта контроля и ЧЭ для толщин пленок меди и полиимида 70 и 90 мкм (а), 35 и 90 мкм (б), 18 и 65 мкм (в)

Заключение. В целом результаты моделирования показывают возможность определения поверхностных дефектов типа трещин (надрезов), раскрывающихся при одноосном растяжении, с учетом свойств диэлектрической пленки при условии подбора оптимальной толщины пленки ЧЭ, хорошей адгезии проводящей пленки к диэлектрику, а пленки диэлектрика – к поверхности объекта контроля. Представляет также практическую ценность учет свойств адгезива, отслаивания пленок при усталостных нагрузках и возможность учета отслаивания пленки меди без ее разрыва, что является целью дальнейших исследований.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Пестриков В.М., Морозов Е.М.* Механика разрушения твердых тел: курс лекций. – СПб.: Профессия, 2002. – 320 с.
2. *Малютов Р.Р.* Концентрация напряжений в элементах авиационных конструкций. – М.: Наука, 1981. – 141 с.
3. *Рындин Е.А., Исаева А.С.* Метод анализа дефектов поверхности конструкций с использованием электроимпедансной томографии // Вестник Южного научного центра РАН. – 2013. – Т. 9, № 1. – С. 17-21.
4. *Исаева А.С.* Метод регистрации трещин на основе распределенного сенсора // Международная научно-техническая конференция «Нанотехнологии-2012»: тезисы докл. – Таганрог: ТТИ ЮФУ, 2012. – С. 120-121.
5. *Рындин Е.А., Исаева А.С.* Распределенный сенсор трещин, способ регистрации их возникновения и определения локализации // Патент РФ № 2520948. 2014.
6. *Рындин Е.А., Исаева А.С.* Показатель эффективности реконструкций изображения дефектов // Международная научно-техническая конференция INTERMATIC-2013.
7. *Морозов Е.М., Муйземнек А.Ю., Шадский А.С.* ANSYS в руках инженера: Механика разрушения. – М.: ЛЕНАНД, 2010. – 456 с.
8. *Левин В.А., Калинин В.В., Зингерман К.М., Вершинин А.В.* Развитие дефектов при конечных деформациях. – М.: Физматлит, 2007. – 392 с.
9. *Борисов А., Любимов А., Тимкин В.* Плоские электромагнитные компоненты на фольгированном полиимиде // Элементная база электроники. – 2012. – № 2. – С. 72-75.
10. ГОСТ 26246.12-89. Пленка полиимидная фольгированная общего назначения для гибких печатных плат.

REFERENCES

1. *Pestrikov V.M., Morozov E.M.* Mekhanika razrusheniya tverdykh tel: kurs lektsiy [Fracture mechanics of solids: lectures]. St. Petersburg: Professiya, 2002, 320 p.
2. *Malyutov R.R.* Kotsentratsiya napryazheniy v elementakh aviatsionnykh konstruksiy [The concentration of stresses in the elements of aircraft structures]. Moscow: Nauka, 1981, 141 p.
3. *Ryndin E.A., Isaeva A.S.* Metod analiza defektov poverkhnosti konstruksiy s ispol'zovaniem elektroimpedansnoy tomografii [The method of analysis of surface defects structures using electrical impedance tomography], *Vestnik Yuzhnogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the South scientific center of RAS], 2013, Vol. 9, No. 1, pp. 17-21.
4. *Isaeva A.S.* Metod registratsii treshchin na osnove raspredelennogo sensora [Method of registration of cracks based on distributed sensor], *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya «Nanotekhnologii-2012»: tezisyy dokladov* [International scientific-technical conference "Nanotechnology-2012: abstracts of reports]. Taganrog: TTI YuFU, 2012, pp. 120-121.
5. *Ryndin E.A., Isaeva A.S.* Raspredelennyy sensor treshchin, sposob registratsii ikh vozniknoveniya i opredeleniya lokalizatsii [Distributed sensor cracks, a method of registering their occurrence and localization], Patent RF, No. 2520948, 2014.
6. *Ryndin E.A., Isaeva A.S.* Pokazatel' effektivnosti rekonstruksiy izobrazheniya defektov [Performance indicator reconstructions of image defects], *Mezhdunarodnaya nauchno-tehnicheskaya konferentsiya INTERMATIC-2013* [International scientific-technical conference INTERMATIC-2013].
7. *Morozov E.M., Muzyemnek A.Yu., Shadskiy A.S.* ANSYS v rukakh inzhenera: Mekhanika razrusheniya [ANSYS in the hands of the engineer: fracture Mechanics]. Moscow: LENAND, 2010, 456 p.
8. *Levin V.A., Kalinin V.V., Zingerman K.M., Vershinin A.V.* Razvitie defektov pri konechnykh deformatsiyakh [The development of defects at finite strains]. Moscow: Fizmatlit, 2007, 392 p.
9. *Borisov A., Lyubimov A., Timkin V.* Ploskie elektromagnitnye komponenty na fol'girovannom poliimide [Plane electromagnetic components on polyimide foil], *Elementnaya baza elektroniki* [Element Base Electronics], 2012, No. 2, pp. 72-75.
10. GOST 26246.12-89. Plenka poliimidnaya fol'girovannaya obshchego naznacheniya dlya gibkikh pechatnykh plat [State Standard 26246.12-89. Film polyimide foil for General purpose flexible printed circuit boards].

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

Рындин Евгений Адальбертович – Южный федеральный университет; e-mail: rynenator@gmail.com; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634311584; кафедра конструирования электронных средств; д.т.н.; профессор.

Исаева Алина Сергеевна – email: isaevaas@gmail.com; тел.: +79889972166; к.т.н.; научный сотрудник.

Ryndin Evgeniy Adalbertovich – Southern Federal University; e-mail: rynenator@gmail.com; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928, Russia; phone: +78634311584; the department of electronic apparatuses design; dr. of eng. sc.; professor.

Isaeva Alina Sergeevna – e-mail: isaevaas@gmail.com; phone: +79889972166; cand. of eng. sc.; research associate.

УДК 681.2

В.В. Петров, Е.В. Воробьев, К.К. Арутюнов

РАЗРАБОТКА ТЕХНОЛОГИИ ИЗГОТОВЛЕНИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ*

В современной электронике наряду с привычными нам RLC-цепями и транзисторами применяются и другие функциональные элементы электронной техники. Примером таких элементов являются разрабатываемые в настоящий момент мемристоры, пассивные элементы микро- и нанoeлектроники, способные менять свое сопротивление в зависимости от воздействующих на них факторов. Сейчас активно ведется разработка и изготовление подобных функциональных элементов на основе новых материалов. Одними из таких материалов являются полимеры. На основе полимеров одного типа можно изготавливать функциональные элементы для различных целей: датчики, сигнализаторы, а также вышеуказанные мемристоры. С целью создания газочувствительных материалов для сенсора газов была разработана методика лабораторного синтеза. Методика подразумевает одновременное нанесение и формирование полимерного материала на основе пиррола с добавлением хлорида кобальта. Изготовлены лабораторные образцы сенсоров на основе кобальтсодержащего полипиррола, обладающие чувствительностью к диоксиду азота. Тонкие пленки полипиррола содержащего кобальт были изучены при помощи пленоксканирующего электронного микроскопа LEO 1560, в синхротронном центре BESSY II. Приведены графики откликов образцов на диоксид азота. Сделаны предположения о механизме взаимодействия молекулы газа оксида азота (IV) с поверхностью кобальтсодержащего полипиррола. В конце приведены теоретические предположения об изменениях, которые протекают в полипирроле с кобальтом на электронном уровне.

Сенсор газа; газочувствительные полимерные материалы; тонкопленочные материалы; полипиррол; загрязнение окружающей среды; диоксид азота.

V.V. Petrov, E.V. Vorobyov, K.K. Arutyunov

PRODUCTION ENGINEERING OF ELECTRICAL FUNCTIONAL ELEMENTS

Contemporaneous electronic engineering implements other electrical functional elements, parallel with traditional RLC circuits and transistors, as exemplified by memristors being passive micro and nanoelectronics elements presently under development. Memristors can change resistance depending on the affecting factors. The development and production of new material-oriented functional elements is in progress today. Polymer is one such material. Polymers of the same type serve as the basis of functional elements for different purposes, namely, sensors, indicators, and above-named memristors. The labora-

* Работа выполнена в рамках базовой части государственного задания Минобрнауки РФ (тема № 213.01-11/2014-14).