
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

*Журнал зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь,
свидетельство о регистрации № 1087 от 23.01.2010 г.*

Входит в Перечень научных изданий Республики Беларусь
для опубликования результатов диссертационных исследований,
включен в базу данных Российского индекса научного цитирования (РИНЦ)

Главный редактор

Вадим Анатольевич Богуш

Ректор Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники, Минск, Беларусь

Редакционная коллегия:

Л.М. Лыньков (зам. главного редактора),
А.Н. Осипов (зам. главного редактора),
Т.В. Борботько (ответственный секретарь),
М.П. Батура, В.Е. Борисенко, А.Л. Гурский, С.Е. Карпович,
В.К. Конопелько, А.П. Кузнецов, А.А. Кураев, В.А. Лабунов,
В.В. Муравьев, Писецкий Ю.В., Сигов А.С., М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус,
И.В. Боднар, С.В. Бордусов, С.В. Гапоненко, Н.В. Гапоненко, В.В. Голенков,
В.Ф. Голиков, Л.И. Гурский, А.П. Достанко, В.А. Емельянов, А.А. Иванюк,
В.М. Колешко, Ф.Ф. Комаров, Ф.П. Коршунов, В.А. Куренев, В.И. Курмашев,
Н.И. Листопад, В.Е. Матюшков, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа,
А.М. Русецкий, Н.К. Толочко, А.А. Хмель, В.Ю. Цветков,
В.В. Цегельник, Г.П. Яблонский, В.Н. Ярмолик

Адрес редакции: ул. П. Бровки, 6, к. 326, г. Минск, 220013, Беларусь

Телефон редакции: +375-17-293-88-41

Web-сайт: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

СОДЕРЖАНИЕ

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Кравцов А.Г., Румянцев Д.М., Гриб К.В. Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловых труб.....	5
Овсянников А.В., Козел В.М. Фильтрация гистограммной оценки плотности вероятности на основе нечеткой принадлежности интервалу группирования.....	13
Митюхин А.И., Пикиреня И.И. Метод обработки изображения, полученного на основе аэрокосмического мониторинга.....	21

Щербина Н.В. Регуляция функционального состояния машинистов локомотивных бригад с применением БОС-тренинга: факторный анализ экспериментальных данных	28
Пикуза М.О., Михневич С.Ю. Тестирование аппаратного генератора случайных чисел при помощи набора статистических тестов NIST	37
Ярмолик В.Н., Мрозек И., Леванцевич В.А., Деменковец Д.В. Неразрушающее тестирование запоминающих устройств на базе двойных адресных последовательностей	43
Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Галкин Я.Д., Прокопенко Н.Н. Влияние проникающей радиации на параметры аналоговых компонентов базового матричного кристалла МН2ХА030	52
Нгуен А.Т., Цветков В.Ю. Разделение изображений на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости пикселей	61
Богущ Р.П., Адамовский Е.Р., Денисенко С.Ф. Обработка и анализ изображений микроструктуры металлов для определения балла зерна	70
Тусупов А.Д., Тохметов А.Т., Листопад Н.И. Схема поляризационного разнесения для масштабирования сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием полупроводниковых оптических усилителей на квантовых точках	80
Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., Толочко Н.К. Формирование и исследование характеристик терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия	85
Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н., Черепица С.В. Информационная система учета и контроля ядерного материала	94
Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Шестовский Д.В. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки	103

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА

Компьютерный дизайн О.В. БОЙПРАВ, Т.В. МИРОНЕНКО

Подписано в печать 23.06.2021. Формат 60×84 ¼. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,2. Тираж 100 экз. Заказ 84.

Индекс для индивидуальной подписки 00787.

Индекс для ведомственной подписки 007872.

Издатель: учреждение образования «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники».
Свидетельство о государственной регистрации средства массовой информации № 1087 от 23.01.2010.

Отпечатано в БГУИР. ЛП № 02330/264 от 14.04.2014. 220013, г. Минск, ул. П. Бровки, 6.

© УО «Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники», 2021

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

The journal was registered on January 23, 2010 by the Ministry of Information of the Republic of Belarus in the State Registry of Mass Media, reg. No. 1087.

The journal included in the List of Scientific Editions for Publication of the Results of Dissertation Researches in the Republic of Belarus and in the Database of Russian Science Citation Index (RSCI)

Editor-In-Chief

Vadim Anatol'evich Bogush

Rector of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Belarus

Address of editorial office: P. Brovka str., 6, rm 326, Minsk, 220013, Belarus

Phone number of editorial office: +375-17-293-88-41

Web-site: www.doklady.bsuir.by; e-mail: doklady@bsuir.by

CONTENTS

ELECTRONICS, RADIOPHYSICS, RADIOENGINEERING, INFORMATICS

Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Kravtsov A.G., Rumiantsev D.M., Hryb K.V. Research of the process of obtaining capillary-porous materials from metal powders for heat pipes.....	5
Ausiannikau A.V., Kozel V.M. Filtration of histogram evaluation of probability density based on fuzzy data accessibility to a grouping interval.....	13
Mitsiukhin A.I., Pikirenya I.I. Image processing method based on aerospace monitoring...	21
Shcherbina N.V. Regulation of the functional state of locomotive crew drivers using biofeedback training: factor analysis of experimental data	28
Pikuza M.O., Mikhnevich S.Yu. Testing a hardware random number generator using NIST statistical test suite	37
Yarmolik V.N., Mrozek I., Levantsevich V.A., Demenkovets D.V. Transparent memory testing based on dual address sequences.....	43
Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Galkin Y.D., Prokopenko N.N. Ionizing radiation influence on parameters of analog components of the master slice array MH2XA030	52
Nguyen A.T., Tsviatkou V.Yu. Division of images into areas of local extrema with a monotonic change in pixel brightness.....	61
Bohush R.P., Adamousky Y.R., Denisenak S.F. Processing and analysis of images of microstructure metals for determining the grain point.....	70

Tussupov A.D., Tokhmetov A.T., Listopad N.I. Polarization diversity scheme for reach extension of WDM/TDM gigabit passive optical network up to 60 km using quantum dot semiconductor optical amplifiers	80
Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., Tolochko N.K. Formation and investigation of characteristics of thermoresistive structures based on vanadium oxide films.....	85
Sytova S.N., Dunets A.P., Kavalenka A.N., Charapitsa S.V. Information system for nuclear material accounting and control	94
Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Shestovski D.V. Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal treatment.....	103



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-5-12>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.762.2

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ПОЛУЧЕНИЯ КАПИЛЛЯРНО-ПОРИСТЫХ МАТЕРИАЛОВ ИЗ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОРОШКОВ ДЛЯ ТЕПЛОВЫХ ТРУБ

Л.П. ПИЛИНЕВИЧ¹, М.В. ТУМИЛОВИЧ¹, А.Г. КРАВЦОВ², Д.М. РУМЯНЦЕВ¹, К.В. ГРИБ¹

¹*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

²*Отделение физико-технических наук Президиума Национальной академии наук Беларуси
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 9 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Тепловые трубы предназначены для эффективного отвода тепла от нагреваемых элементов и позволяют снижать температуру различных приборов. Тепловые трубы с капиллярными пористыми структурами предназначены для работы в условиях неблагоприятного действия сил тяжести. Основными их достоинствами являются высокая теплопередающая способность, а также способность удержания теплоносителя в капиллярно-пористой структуре при динамических силовых нагрузках. Цель работы – исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловых труб с повышенной эффективностью с использованием метода вибрационного формования. В статье обоснована актуальность создания тепловых труб из металлических порошков, приведены сведения о влиянии краевого угла смачивания, поверхностного натяжения и капиллярного давления на теплопередающую способность тепловой трубы. Показано, что для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую капиллярную структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Удовлетворить вышеуказанные требования возможно созданием капиллярной структуры методами порошковой металлургии путем оптимизации распределения размеров пор. При этом наиболее перспективным представляется способ формования при наложении на форму с порошком вибрационных колебаний. Получить необходимое порораспределение данным способом можно путем правильного выбора размеров частиц, формы, а также параметров вибрации. Это позволяет обеспечить заданную укладку частиц по размерам, определяющую плотность их укладки, размер пор, извилистость и длину поровых каналов. Исследовано распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации. В результате разработан процесс получения капиллярных структур методом вибрационного формования металлических порошков в зависимости от размеров частиц порошка, амплитуды и частоты вибрации. Показано, что данным методом можно обеспечить заданное порораспределение капиллярной структуры для тепловых труб, что позволяет повысить их теплопередающую способность.

Ключевые слова: тепловая труба, капиллярная структура, теплопередающая способность, вибрационное формование, параметры вибрации, размеры пор.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пилиневич Л.П., Тумилович М.В., Кравцов А.Г., Румянцев Д.М., Гриб К.В. Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловых труб. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 5-12.

RESEARCH OF THE PROCESS OF OBTAINING CAPILLARY-POROUS MATERIALS FROM METAL POWDERS FOR HEAT PIPES

LEANID P. PILINIVICH¹, MIRASLAU V. TUMILOVICH¹, ALIAKSANDAR G. KRAVTSOV²,
DMITRIY M. RUMIANTSAV¹, KANSTANTIN V. HRYB¹

¹*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Technical Department of Sciences of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 9 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Heat pipes are designed to effectively removing heat from heating elements and reducing the temperature of various devices. Heat pipes with capillary porous structures are designed to operate under conditions of unfavorable gravity forces. Their main advantages are their high heat transfer capacity, as well as the ability to retain the coolant in a capillary-porous structure under dynamic power loads. The purpose of this work is to study the process of obtaining capillary-porous materials from metal powders for heat pipes with increased efficiency of using the vibration molding method. The article substantiates the relevance of creating heat pipes from metal powders. The information about the influence of the contact angle, surface tension and capillary pressure on the heat transfer capacity of a heat pipe is provided. It is shown that for the efficient operation of the heat pipe it is necessary to create such a capillary structure of the porous material, which could simultaneously provide a high speed of movement of the coolant and its rise to a given height. The above requirements can be satisfied by creating a capillary structure using powder metallurgy methods by optimizing the distribution of pore sizes. In this case, the most promising method seems to be the method of molding when applying a vibration to a mold with a powder. It is possible to obtain the required pore distribution in this way by choosing the correct particle size, shape and vibration parameters. This makes it possible to ensure the packing of particles in size, which affects their packing density, pore size, tortuosity and length of pore channels. The distribution of the maximum pore sizes over the thickness of the samples obtained from powders of various granulometric composition with the use of vibration has been investigated. As a result, a process was developed for obtaining capillary structures by the method of vibration molding of metal powders, depending on the size of the powder particles, the amplitude and frequency of vibration. It is shown that this method can provide a given pore distribution of the capillary structure for heat pipes, which makes it possible to increase their heat transfer capacity.

Keywords: heat pipe, capillary structure, heat transfer capacity, vibration molding, vibration parameters, pore sizes.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pilinevich L.P., Tumilovich M.V., Kravtsov A.G., Rumiantsev D.M., Hryb K.V. Research of the process of obtaining capillary-porous materials from metal powders for heat pipes. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 5-12.

Введение

Тепловые трубы предназначены для эффективного отвода тепла от нагреваемых элементов и позволяют снижать температуру различных приборов и устройств. Тепловые трубы с капиллярными пористыми структурами предназначены для работы в условиях неблагоприятного действия сил тяжести. Их основными достоинствами являются высокая теплопередающая способность, а также способность удержания теплоносителя в капиллярно-пористой структуре при динамических силовых нагрузках. Применение тепловых труб позволяет упростить отвод и передачу тепла, уменьшить габариты и улучшить технические и эргономические характеристики приборов и устройств. Тепловые трубы обладают высокой теплопроводностью, на 2-3 порядка превосходящей теплопроводность лучших металлических проводников тепла. Высокие теплотехнические характеристики тепловых труб позволяют

создавать на их основе технически совершенные конструктивные элементы для систем охлаждения различных приборов и устройств радио- и электронной аппаратуры, шкафов ЧПУ и др. Наиболее широкое применение тепловые трубы нашли в системах естественно-конвективного и принудительно-конвективного воздушного охлаждения силовых полупроводниковых приборов с токовой нагрузкой до 2000 А, например, для выравнивания рабочих температур полупроводниковых лазеров.

Тепловая труба – пассивное двухфазное теплопередающее устройство, способное передавать большие количества тепла при минимальном перепаде [1]. Она представляет собой конструкцию, состоящую из трех взаимосвязанных подсистем: зоны испарения, транспортной зоны и зоны конденсации. В зоне испарения, к которой подводится тепло, теплоноситель за счет повышенной температуры испаряется. Образующийся пар за счет перепада давления между зоной испарения и зоной конденсации поступает в последнюю, где за счет фазового перехода происходит конденсация пара в жидкость, которая по расположенной на внутренней поверхности герметичного корпуса тепловой трубы капиллярной структуре под действием капиллярных сил возвращается в зону испарения [2].

Анализ информационных и патентных источников позволил установить, что для капиллярных структур тепловых труб перспективными материалами являются пористые структуры, полученные из металлических порошков. Такие пористые материалы имеют высокую испарительную способность, проницаемость и механическую прочность, широкий диапазон изменения пористости, способны к работе в обширном диапазоне температур, а также обладают высокой коррозионной стойкостью [3]. Вместе с тем используемые в настоящее время способы изготовления капиллярных структур тепловых труб, заключающиеся в предварительном прессовании металлического порошка и его спекании в капиллярную структуру в виде втулки заданных геометрических размеров, образование в ней канавок и запрессовку в герметичный корпус, имеют ряд недостатков. Они не позволяют создавать тепловые трубы с повышенной мощностью из-за технологических сложностей, связанных с трудностями при запрессовке высокопористой капиллярной структуры в виде втулки в корпус без нарушения его герметичности. Кроме того, при получении канавок на наружной поверхности структуры в виде втулки в процессе ее запрессовки внутренняя поверхность корпуса часто не полностью заполняется пористым материалом капиллярной структуры. Это приводит к преждевременному осушению капиллярной структуры за счет увеличения плотности теплового потока. В связи с вышеизложенным более перспективными представляются те способы, которые позволяют производить формование и спекание капиллярных структур прямо в корпусе тепловой трубы. В этом случае тепловой контакт обеспечивается по всей зоне между корпусом тепловой трубы и капиллярной структурой [2, 4].

Исследование процесса получения капиллярно-пористых материалов из металлических порошков для тепловой трубы

Главным требованием, которому должна отвечать капиллярная структура тепловой трубы, является ее способность обеспечивать возвратно-поступательное перемещение теплоносителя, причем заполнение капилляров и их освобождение от теплоносителя должно протекать непрерывно во взаимно противоположных направлениях.

Капиллярный транспорт – это многооперационный технологический процесс, различные варианты которого основаны на многих физических явлениях и закономерностях, таких как смачивание, поверхностное натяжение, капиллярное давление, испарение, капиллярная конденсация и др. Необходимо отметить, что некоторые из данных явлений или характеристик зависят от температуры. Так, например, согласно работе [5] при увеличении температуры поверхностное натяжение σ уменьшается почти по линейному закону. Поверхностное натяжение также зависит от плотности жидкости и определяется следующей зависимостью:

$$\sigma = k(Q_{\text{ж}} - Q_{\text{п}})^4, \quad (1)$$

где k – постоянная величина; $Q_{\text{ж}}$ – плотность жидкости; $Q_{\text{п}}$ – плотность насыщенного пара.

С поверхностным натяжением связана явление смачивания, т. е. проявление

взаимодействия молекул веществ на трехфазной границе твердой, жидкой и газообразной фаз.

На смачивание ($\cos \theta$) существенное влияние оказывает состояние поверхности, например, окисление поверхности материалов из металлов, микрорельеф поверхности материала. Именно смачивание и поверхностное натяжение входят в выражение для определения капиллярного давления P_k , которое является определяющим для процесса заполнения теплоносителем поровых каналов пористого тела:

$$P_k = \frac{2\sigma \cdot \cos\theta}{R}, \quad (2)$$

где R – радиус порового канала.

Гидродинамика теплоносителя при его движении в поровых каналах определяется системой дифференциальных уравнений Навье – Стокса, которая приводит к следующему уравнению Пуазеля для средней скорости течения жидкости или газа, например, в цилиндрическом канале:

$$V_{CP} = \frac{\Delta P}{l} \cdot \frac{R^2}{8\mu}, \quad (3)$$

где ΔP – перепад давления на длине поры l , μ – сдвиговая вязкость жидкости (теплоносителя) при заданной температуре.

Вышеуказанная зависимость (3) показывает, что наибольшее влияние на гидродинамику теплоносителя оказывают размеры и длина поровых каналов капиллярной структуры тепловой трубы. В связи с тем, что тепловые трубы часто эксплуатируются в поле силы тяжести при расположении испарителя выше конденсатора, капиллярная структура должна обеспечивать подъем теплоносителя на высоту, равную максимальному расстоянию превышения испарителя над конденсатором. Кроме того, поровая структура должна обеспечивать необходимое капиллярное давление, т. е. иметь небольшие размеры пор, а также обеспечивать необходимый расход теплоносителя, который определяется также размером пор, причем поры должны быть больших размеров. Таким образом, для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую поровую структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Удовлетворить вышеуказанные требования возможно созданием капиллярной структуры методами порошковой металлургии путем оптимизации распределения размеров пор.

Среди разнообразных технологических способов и приемов получения пористых материалов с заданным распределением пор можно выделить метод виброформования, заключающийся в наложении вибрационных колебаний на форму с порошком [6]. Получить необходимое распределение пор таким методом можно при грамотном выборе размеров частиц, их формы, а также параметров вибрационных колебаний. Это позволит достичь необходимой укладки частиц по размерам (плотности укладки), размера пор, извилистости и длины поровых каналов. Исследования влияния вибрационных колебаний на распределение размеров пор по толщине образца проводились с применением вибрационного стенда ВЭДС 10-А, представленного на рис. 1 [7].

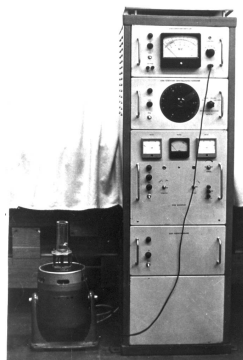


Рис. 1. Вибрационный стенд ВЭДС-10А
Fig. 1. Vibration stand VEDS-10A

Стенд содержит вибростол, усилитель и пульт управления. В основу работы вибратора положена электродинамическая приводная система, состоящая из электромагнита с кольцевым воздушным зазором и подвижной системы, подвешенной на двух упругих мембранах. От блока подмагничивания по катушке подмагничивания пропускается постоянный ток. Переменный ток, частота и величина которого определяется параметрами испытаний и задается пультом управления, течет от вибратора через подвижную катушку и усилитель. Ток подвижной катушки взаимодействует с постоянным полем электромагнита и создает толкающую силу, которая приводит в действие вибростол с испытуемым образцом. Основные технические характеристики вибрационного стенда: максимальное виброускорение – 160 м/с²; рабочий диапазон частот – 5–5000 Гц [6, 7].

Для уяснения процесса формирования заданного распределения размеров пор по толщине капиллярной структуры, которая определяется размерами частиц порошкового материала путем их разделения по размерам при вибрационном формировании капиллярной структуры, авторами проведены эксперименты по определению параметров вибрации, при которых происходит разделение частиц по размерам. Эксперименты показали, что сегрегация частиц по размерам наблюдается в определенном диапазоне значений параметров частоты и ускорения колебаний, а также их сочетаний. Так, на рис. 2 показаны три области состояния порошковой смеси в зависимости от параметров вибрации. В области I разделение частиц по размерам не наблюдается, а происходит только уплотнение порошков. В области II происходит разделение частиц по размерам, причем границы области не зависят от соотношения размеров мелких и крупных частиц. В области III происходит перемешивание смеси порошков различных размеров. Естественно, для технологии получения капиллярных структур с заданным распределением размеров пор по толщине наибольший интерес представляет область II, в которой наблюдается классификация частиц по размерам.

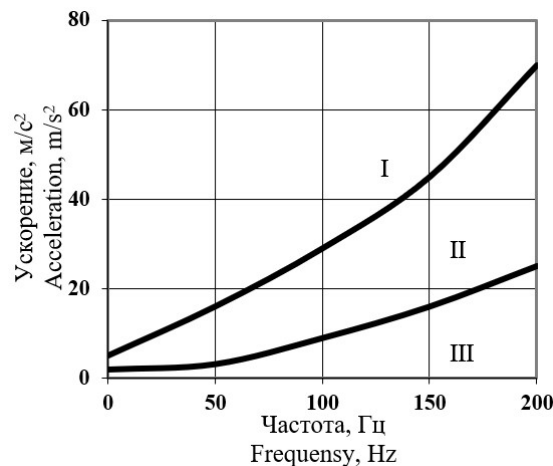


Рис. 2. Состояние частиц порошка в зависимости от параметров вибрации: I – уплотнение частиц; II – разделение частиц по размерам; III – перемешивание частиц

Fig. 2. State of powder particles depending on vibration parameters: I – compaction of particles; II – separation of particles by size; III – mixing of particles

Математической обработкой кривых, представленных на рис. 2, получены следующие регрессионные зависимости диапазона параметров колебаний, при которых происходит разделение частиц по размерам:

$$3,96 \cdot \exp 0,01f \leq a \leq 8,78 \cdot \exp 0,012f, \quad (4)$$

где a – ускорение вибрации, м/с²; f – частота вибрации, Гц.

Для определения распределения размеров пор по толщине пористого образца, изготовленного методом формования с помощью вибраций, изготовлены образцы из металлического медного порошка различного гранулометрического состава. Распределение размеров пор по толщине образцов h , полученных из медного порошка различного гранулометрического состава с применением вибрации, соответствующей области II, представлено на рис. 3.

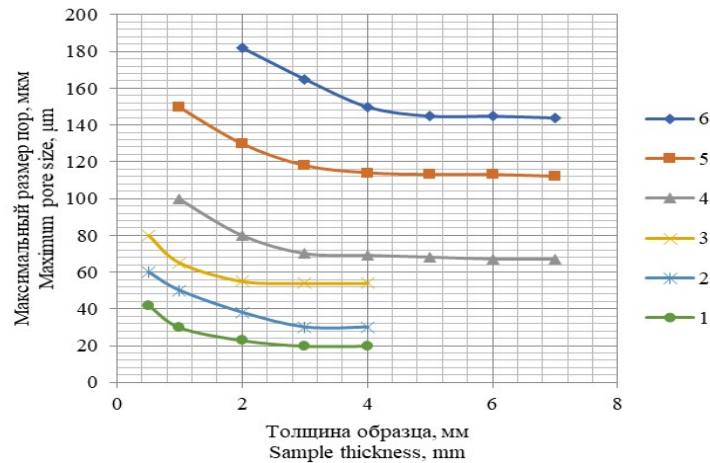


Рис. 3. Распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации (размер частиц: 1 – (–0,063 ... +0,04); 2 – (–0,1 ... +0,063); 3 – (–0,16 ... +0,1); 4 – (–0,2 ... +0,16); 5 – (–0,315 ... +0,2); 6 – (–0,4 ... +0,315) мм)

Fig. 3. Distribution of maximum pore sizes over the thickness of samples obtained from powders of various granulometric composition using vibration (particle size: 1 – (–0.063 ... + 0.04); 2 – (–0.1 ... + 0.063); 3 – (–0.16 ... + 0.1); 4 – (–0.2 ... + 0.16); 5 – (–0.315 ... + 0.2); 6 – (–0.4 ... + 0.315) mm)

Анализ полученных результатов показывает, что с помощью вибрации, путем подбора металлического порошка определенного гранулометрического состава можно получать капиллярные структуры тепловых труб с заданным распределением пор в направлении нормали к поверхности стенки тепловой трубы. Пример изготовления капиллярной структуры тепловой трубы для работы при угле наклона 90° к горизонту с размерами: длина 300 мм, длина зоны испарения 90 мм, внешний диаметр корпуса 16 мм, толщина стенки корпуса 1 мм. Для изготовления капиллярной структуры выбран медный порошок марки ПМС-Н с размерами частиц 0,063–0,315 мм, который засыпался в емкость и в течение двух минут подвергался воздействию вибрации с частотой 50 Гц и величиной ускорения 10 м/с^2 . Затем в сформованный порошок вертикально вводили корпус тепловой трубы с закрепленным в нем формующим элементом. Для обеспечения погружения корпуса тепловой трубы с формующим элементом в сформованный слой порошка и заполнения его свободного объема, корпус подвергался воздействиям вибрации с частотой 20 Гц и величиной ускорения 3 м/с^2 . Вибрационное формирование капиллярной структуры тепловой трубы позволяет повысить ее теплопередающие характеристики. Это обеспечивается тем, что размер пор изменяется монотонно по длине тепловой трубы, т. е. капилляр или пору можно рассматривать как конус, большое основание которого находится в зоне конденсации, а меньшее – в зоне испарения тепловой трубы, тем самым повышается проницаемость капиллярной структуры при высоком капиллярном давлении, которое обеспечивают мелкие поры в зоне испарения. Результаты испытаний тепловой трубы, изготовленной по вышеуказанной технологии, показали, что ее теплопередающая способность составляет 405 Вт. На рис. 4 показана фотография шлифа капиллярной структуры тепловой трубы, полученной методом вибрационного формования.



Рис. 4. Фотография шлифа капиллярной структуры тепловой трубы, полученной методом вибрационного формования

Fig. 4. Photo of a thin section of the capillary structure of a heat pipe obtained by vibration molding

Заклучение

Обоснована актуальность создания тепловых труб из металлических порошков, приведены сведения о влиянии краевого угла смачивания, поверхностного натяжения и капиллярного давления на теплопередающую способность тепловой трубы. Показано, что для эффективной работы тепловой трубы необходимо создать такую капиллярную структуру пористого материала, которая одновременно могла бы обеспечить высокую скорость движения теплоносителя и его подъем на заданную высоту. Исследовано распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава с применением вибрации. В результате разработан процесс получения капиллярных структур методом вибрационного формования металлических порошков в зависимости от размеров частиц порошка, амплитуды и частоты вибрации. Показано, что данным методом можно обеспечить заданное порораспределение капиллярной структуры для тепловых труб, что позволяет повысить их теплопередающую способность.

Список литературы

1. Peterson G.P. *An introduction to heat pipes – Modelling, testing and application*. New-York: John Wiley and Sons;1994.
2. Агеенко А.В., Витязь П.А., Мазюк В.В. Способ получения порошковых капиллярных структур контурных тепловых труб с перевернутым мениском. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2011;2:5-9.
3. Мазюк В.В., Анчевский П.С., Автух А.А. Алиофобные капиллярно-пористые порошковые материалы для интенсификации процесса конденсации в тепловых трубах. *Пористые проницаемые материалы и изделия на их основе: материалы 5-го Международного симпозиума, Минск, 30-31 окт. 2014 г.* Минск: Беларуская навука; 2014: 283-290.
4. Мазюк В.В., Анчевский П.С. Композиционные порошковые капиллярные структуры на основе титана для контурных тепловых труб с перевернутым мениском. *Порошковая металлургия: инженерия поверхности, новые порошковые композиционные материалы. Сварка. Сборник докладов 11-го Международного симпозиума*. Минск: Белорусская наука; 2019: 549-556.
5. Бретштайдер С.Т. *Свойства газов и жидкостей*. Москва – Ленинград: Химия; 1966.
6. Пилиневич Л.П., Мазюк В.В., Савич В.В., Тумилович М.В. *Пористые порошковые материалы с анизотропной структурой: методы получения*. Минск: Тонпик; 2006.
7. Пилиневич Л.П. Исследование процесса разделения твердых частиц по размерам, форме, массе под воздействием вибрации. *Доклады БГУИР*. 2015;6(92):84-89.

References

1. Peterson G.P. *An introduction to heat pipes – Modelling, testing and application*. New-York: John Wiley and Sons;1994.
2. Ageenko A.V., Vityaz P.A., Mazyuk V.V. [A method of obtaining powder capillary structures of contour heat pipes with an inverted meniscus]. *Izvestiya Natsional'noy akademii nauk Belarusi. Seriya fiziko-tekhnicheskikh nauk*. 2011;2:5-9. (In Russ.)
3. Mazyuk V.V., Anchevsky PS, Avtukh A.A. [Aliophobic capillary-porous powder materials for intensifying the condensation process in heat pipes]. *Poristyye pronitsayemye materialy i izdeliya na ikh osnove: materialy 5 Mezhdunarodnogo simpoziuma*, Minsk, October 30-31, 2014. Minsk: Belarusian Navuka; 2014. (In Russ.)
4. Mazyuk V.V., Anchevsky P.S. [Composite powder capillary structures based on titanium for contour heat pipes with an inverted meniscus]. *Poroshkovaya metallurgiya: inzheneriya poverkhnosti, novyye poroshkovyye kompozitsionnyye materialy. Svarka. Sbornik dokladov 11 Mezhdunarodnogo simpoziuma*. Minsk: Belarusian Science; 2019: 549-556. (In Russ.)
5. Bretshneider S.T. [*Properties of gases and liquids*]. Moscow – Leningrad: Chemistry; 1966. (In Russ.)
6. Pilinevich L.P., Mazyuk V.V., Savich V.V., Tumilovich M.V. [*Porous powder materials with anisotropic structure: production methods*]. Minsk: Tonpik; 2006. (In Russ.)
7. Pilinevich L.P. [Investigation of the process of separating solid particles by size, shape, mass under the influence of vibration]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2015;6(92):84-89. (In Russ.)

Вклад авторов

Пилиневич Л.П. провел теоретический анализ исследуемой проблемы.

Тумилович М.В. сформулировал цель и задачи исследований, экспериментально исследовал распределение максимальных размеров пор по толщине образцов, полученных из порошков различного гранулометрического состава.

Кравцов А.Г. написал введение, заключение, выполнил анализ полученных результатов.

Румянцев Д.М. и Гриб К.В. провели экспериментальные исследования влияния параметров вибрации на состояние частиц порошка, выполнили обработку полученных данных.

Authors' contribution

Pilinevich L.P. carried out a theoretical analysis of the problem under study.

Tumilovich M.V. formulated the goal and objectives of research, experimentally investigated the effect of powder particle size on pore size and permeability coefficient.

Kravtsov A.G., wrote an introduction, a conclusion, analyzed the results.

Rumiantsev D.M. and Hryb K.V. conducted experimental studies of the effect of the particle size of the powder and the thickness of the PPM on the level of noise suppression, carried out the processing of the data obtained.

Сведения об авторах

Пилиневич Л.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тумилович М.В., д.т.н., доцент, начальник управления подготовки научных кадров высшей квалификации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кравцов А.Г., д.т.н., профессор, заместитель академика-секретаря Отделения физико-технических наук Президиума НАН Беларуси.

Румянцев Д.М., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Гриб К.В., аспирант кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Pilinevich L.P., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tumilovich M.V., D.Sc., Associate Professor, Head of the Department for the Training of Scientific Personnel of the Highest Qualification of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kravtsov A.G., D.Sc., Professor, Deputy Academician-Secretary of the Physical and Technical Department of Sciences of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus.

Rumiantsev D.M., Postgraduate student at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Hryb K.V., Postgraduate student at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 4, к. 422,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.+375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by
Тумилович Мирослав Викторович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 4, room 422,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-17-293-88-83;
e-mail: tumilovich@bsuir.by,
Tumilovich Miraslau Viktaravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-13-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.2

ФИЛЬТРАЦИЯ ГИСТОГРАММНОЙ ОЦЕНКИ ПЛОТНОСТИ ВЕРОЯТНОСТИ НА ОСНОВЕ НЕЧЕТКОЙ ПРИНАДЛЕЖНОСТИ ДАННЫХ ИНТЕРВАЛУ ГРУППИРОВАНИЯ

А.В. ОВСЯННИКОВ¹, В.М. КОЗЕЛ²

¹Белорусский государственный университет (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 2 октября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. В работе предложена гистограммная оценка плотности вероятности на основе нечеткой принадлежности данных интервалу группирования. Приведена методика построения гистограммной оценки с применением гистограммного сглаживающего фильтра. Описана методика построения такого фильтра. Установлен основной параметр фильтра – коэффициент статистической взаимосвязи между количеством данных, попавших в интервал группирования при единичной функции включения и при подходе с использованием функции принадлежности. Применение итерационной процедуры для гистограммного фильтра позволяет обеспечить большую «сглаженность» гистограммы. Результаты моделирования показывают эффективность применения гистограммного фильтра для разных объемов данных. При этом становится не критичным выбор числа интервалов группирования для «правильного» распознавания плотности вероятности. Гистограммный фильтр является простым инструментом, который легко может быть встроен в любой алгоритм построения гистограммных оценок.

Ключевые слова: плотность вероятности, нечеткая принадлежность, взвешенная гистограммная оценка, гистограммный фильтр.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Овсянников А.В., Козел В.М. Фильтрация гистограммной оценки плотности вероятности на основе нечеткой принадлежности интервалу группирования. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 13-20.

FILTRATION OF HISTOGRAM EVALUATION OF PROBABILITY DENSITY BASED ON FUZZY DATA ACCESSIBILITY TO A GROUPING INTERVAL

ANDREI V. AUSIANNIKAU¹, VICTOR M. KOZEL²

¹Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)

²Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 2 October 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The paper proposes a histogram estimate of the probability density based on fuzzy data belonging to a grouping interval. A methodology for constructing a histogram estimate using a histogram smoothing filter

is presented. The technique of constructing such a filter is described. The main filter parameter is established – the coefficient of the statistical relationship between the amount of data falling into the grouping interval for a single inclusion function and when approaching to use the membership function. The use of an iterative procedure for a histogram filter allows for a greater “smoothness” of the histogram. The simulation results show the effectiveness of using a histogram filter for different data volumes. At the same time, the choice of the number of grouping intervals for the “correct” recognition of probability density becomes not critical. The histogram filter is a simple tool that can easily be built into any algorithm for constructing histogram estimates.

Keywords: probability density, fuzzy membership, weighted histogram estimate, histogram filter.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Ausiannikau A.V., Kozel V.M. Filtration of histogram evaluation of probability density based on fuzzy data accessibility to a grouping interval. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 13-20.

Введение

Гистограммная оценка плотности распределения вероятности (ПВ) – одна из самых распространенных, исторически первых и общепринятых процедур описательной, прикладной статистики, в частности, в сфере статистической радиотехники, задачах электромагнитной совместимости. Проблематика, связанная с гистограммной оценкой в прикладной статистике (ГОСТ Р 50.1.033-2001 Прикладная статистика), также хорошо известна [1, 2]. В стационарном случае, при исследовании стационарных временных рядов, эффективность гистограммной оценки связана лишь с наличием достаточного времени для ее получения. Если же исследуется нестационарный объект или нестационарный временной ряд и требуется более точное распознавание момента времени, когда состояние объекта или динамика ряда, характеризуемая распределением, значительно изменились, то построение простой, быстрой (на малых объемах данных) и эффективной гистограммной оценки ПВ является актуальной задачей.

Развитие непараметрических методов [3] и общая направленность тематики работ в области непараметрических процедур оценивания ПВ (ядерная, проекционная, сплайн и др.) [4] не исключают применения гистограммных оценок: например, переменных, к числу которых относятся и полиграммные. Одной из проблем «правильного» распознавания ПВ, наряду с выбором количества интервалов группирования данных, является возможная «изрезанность» гистограммы, что особенно характерно при относительно небольших наборах данных. Решение этой проблемы заключается в применении гистограммных фильтров, например, усредняющего, медианного, гауссовского и др. [5–10]. Однако их применение интуитивно и исходит в основном из практической целесообразности. В представляемой работе предлагается теоретически обоснованная методика построения гистограммного фильтра, учитывающая следующие соображения.

Во-первых, можно отказаться от строгой единичной функции включения данных в конкретный интервал группирования. Данные могут находиться вблизи границ интервала и при изменении числа интервалов оказаться в другом интервале. Расположение данных на интервале группирования (близость или удаленность от границ интервала) может интерпретироваться как нечеткая принадлежность данных конкретному интервалу.

Во-вторых, введение понятия нечеткой принадлежности данных интервалу группирования позволяет за счет весовых функций перегруппировать эти данные так, чтобы уменьшилась «изрезанность» гистограммы и тем самым обеспечивалась ее сглаженность.

Таким образом, цель статьи – получить методику построения простого и эффективного гистограммного фильтра, обеспечивающего получение при относительно небольших объемах данных сглаженной гистограммной оценки ПВ на основе нечеткой принадлежности данных интервалу группирования. В статье рассматривается одномерная задача построения гистограммного фильтра на примере гистограммной оценки ПВ.

Общая методика построения гистограммной оценки на основе нечеткой принадлежности данных интервалу группирования

В самом общем виде построение гистограммной оценки неизвестной, непрерывной ПВ состоит в следующем. Пусть имеется выборка случайных данных $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$, и пусть определено разбиение числовой прямой на m непересекающихся и примыкающих друг к другу интервалов A_j , $j = \overline{1, m}$, равной длины $\Delta_x = X_{j+1} - X_j = (x_{\max} - x_{\min}) / m$, $X_{m+1} = x_{\max} = \max_i x_i$, $X_1 = x_{\min} = \min_i x_i$, где X_j – границы интервалов. Тогда нормализованная гистограммная оценка ПВ будет определяться вектором $\{g_j = v_j / \Delta_x n\}$, где $v_j = \sum_{x_i \in A_j} I_j(x_i)$ – целое число данных,

попавших в A_j интервал, $\sum_j v_j = n$, $I_j(x_i) = \begin{cases} 1, & \text{если } x_i \in A_j, \\ 0, & \text{если } x_i \notin A_j. \end{cases}$ – индикаторная функция.

Заменим индикаторную функцию $I_j(x_i)$ (единичную функцию включения) весовой функцией $\mu_j(x_i)$, $0 \leq \mu_j(x) \leq 1$, которая будет характеризовать нечеткую принадлежность данных $\{x_i\}$, $i = \overline{1, n}$, интервалу группирования A_j . Заметим, что если область определения отдельной j -й индикаторной функции составляет величину Δ_x , то область определения весовой функции может быть значительно шире $\Delta_\mu > \Delta_x$ и зависит от ее конкретного выбора. Для конкретизации этого значения и из практических соображений будем полагать, что $\Delta_\mu = x_{j+1} - x_{j-1}$, где x_{j-1} , x_{j+1} – точки середины интервалов группирования $x_j = (X_{j+1} - X_j) / 2$.

Статистическим эквивалентом числа v_j будет, в общем случае, вещественное число, равное

$$u_j = \sum_i \mu_j(x_i) = \sum_{x_i \in A_{j-1}} \mu_j(x_i) + \sum_{x_i \in A_j} \mu_j(x_i) + \sum_{x_i \in A_{j+1}} \mu_j(x_i), \quad j = \overline{1, m}. \quad (1)$$

Формула (1) учитывает вес некоторого числа данных, принадлежащих соседним с A_j участкам: A_{j-1} и A_{j+1} . Очевидно, что всегда выполняется неравенство $v_j \geq u_j = \sum_{x_i \in A_j} \mu_j(x_i)$, где

знак равенства будет соответствовать предельному случаю равенства весовой и индикаторной функций.

Для выполнения общих условий нормировки необходимо выполнение соотношений:

$$1) \sum_j \mu_j(x) = 1, \quad 2) \sum_j \sum_i \mu_j(x_i) = \sum_j u_j = n, \quad 3) 0 \leq \mu_j(x) \leq 1, \quad (2)$$

определяющих специальный вид функций $\mu_j(x)$. Так, в частности, первое условие системы (2) указывает на их взаимную симметрию на соприкасающихся интервалах и взаимозависимость, а также особый вид для конечных интервалов A_1 и A_m . Таким образом, гистограммная оценка ПВ с весовой функцией, характеризующей нечеткую принадлежность данных интервалу группирования, будет следующей:

$$f_j^* = u_j / \Delta_x n, \quad j = \overline{1, m}. \quad (3)$$

На основании приведенных соображений дадим общее определение введенной гистограммной оценки (3).

Определение. Гистограммную оценку ПВ (3) будем называть *взвешенной гистограммной оценкой* (ВГО), полученной с использованием специальных весовых функций $\mu_j(x)$, характеризующих нечеткую принадлежность данных j -му интервалу группирования и для которых выполняются условия (2). Сделаем замечание. Оценка (3) рассматривается в статье только в контексте ее применения в гистограммном фильтре, поскольку сама по себе она не является асимптотически сходящейся по вероятности при $n \rightarrow \infty$ к истинной.

Реализация гистограммного фильтра

Для построения гистограммного сглаживающего фильтра определим коэффициент статистической взаимосвязи между числом v_j и числом $u_{Aj} = \sum_{x_i \in A_j} \mu_j(x_i)$, которое соответствует взвешенному числу данных, попавших в j -й интервал:

$$k = \frac{\bar{u}_{Aj}}{\bar{v}_j} = \frac{1}{\Delta_x} \int_{\Delta_x} \mu_j(x) dx. \quad (4)$$

Черта над символами в формуле (4) означает, что их отношение устойчиво для исследуемой выборки данных. Тот же результат можно получить в общем случае, используя усреднение функции принадлежности $k = \int_{\Delta_x} \mu f dx / \int_{\Delta_x} f dx$. Ограничиваясь первым членом разложения в ряд Тейлора ПВ в точке середины интервала группирования x_j , получим результат, совпадающий с (4). Формула (4) справедлива для внутренних интервалов гистограммы ($j = \overline{2, m-1}$). Для конечных интервалов $j = 1, m$, исходя из условий нормировки (2) и в том случае, если $\Delta_\mu = x_{j+1} - x_{j-1}$, получим

$$k_e = \Delta_x^{-1} \left(\int_{\Delta_x/2} 1(x) dx + \int_{\Delta_x/2} \mu(x) dx \right) = (1+k)/2. \quad (5)$$

С учетом определенных формулами (1), (4), (5) коэффициентов k, k_e можем записать соотношение между числами \bar{v}_j и \bar{u}_j , которое будет представлять собой гистограммный фильтр нулевого порядка (априорные данные о предполагаемой ПВ отсутствуют) в одномерном случае:

$$\begin{cases} \bar{u}_j = \alpha \bar{v}_{j-1} + k \bar{v}_j + \alpha \bar{v}_{j+1}, & j = \overline{2, m-1}, \\ \alpha = \bar{u}_{Aj-1} / \bar{v}_{j-1} = \bar{u}_{Aj+1} / \bar{v}_{j+1} = (1-k)/2, \\ \bar{u}_1 = k_e \bar{v}_1 + (1-k_e) \bar{v}_2, & \bar{u}_m = (1-k_e) \bar{v}_{m-1} + k_e \bar{v}_m. \end{cases} \quad (6)$$

Заменой переменных \bar{v}_j, \bar{u}_j на $g_j = v_j / \Delta_x n$ и f_j^* получим гистограммный фильтр относительно значений ПВ на интервале группирования данных:

$$\begin{cases} f_j^* = \alpha g_{j-1} + k g_j + \alpha g_{j+1}, & j = \overline{2, m-1} \\ f_1^* = k_e g_1 + (1-k_e) g_2, & f_m^* = (1-k_e) g_{m-1} + k_e g_m. \end{cases} \quad (7)$$

Если в формуле $k = \int_{\Delta_x} \mu f dx / \int_{\Delta_x} f dx$ не ограничиваться первым членом разложения в ряд Тейлора ПВ, можем получить гистограммные фильтры высших порядков, требующих априорных знаний о предполагаемой ПВ. В данной работе рассматривается только гистограммный фильтр нулевого порядка. Введением итеративной процедуры для формул (6), (7) можно добиться большей степени сглаживания:

$$\begin{cases} \bar{u}_j^{q+1} = \alpha \bar{u}_{j-1}^q + k \bar{u}_j^q + \alpha \bar{u}_{j+1}^q, & j = \overline{2, m-1} \\ \bar{u}_1^{q+1} = k_e \bar{u}_1^q + (1-k_e) \bar{u}_2^q, & \bar{u}_m^{q+1} = (1-k_e) \bar{u}_{m-1}^q + k_e \bar{u}_m^q, \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} f_j^{*q+1} = \alpha f_{j-1}^q + k f_j^{*q} + \alpha f_{j+1}^{*q}, & j = \overline{2, m-1} \\ f_1^{*q+1} = k_e f_1^{*q} + (1-k_e) f_2^{*q}, & f_m^{*q+1} = (1-k_e) f_{m-1}^{*q} + k_e f_m^{*q}, \end{cases} \quad (9)$$

где q – порядковый номер итерации, $q = 1$ соответствует процедуре (6), (7). Заметим, что используя аналогичный подход в фильтрации многомерных данных, в частности, гистограмм изображений, получаем теоретически обоснованные результаты [5–9].

Перейдем к определению значения коэффициента k . При отсутствии априорных данных о предполагаемом виде ПВ, можно воспользоваться «информационным подходом» и показать, что оптимальным значением весовых коэффициентов фильтра будет $k = 1/3$. Это следует из условия максимизации энтропии $-\sum_{i=j-1}^{j+1} K_i \log(K_i) \rightarrow \max_k$, где K_i – информационный вклад (весовой коэффициент) i -го интервала: $K_i = \alpha = (1-k)/2$ для $i = j-1, j+1$ и $K_j = k$, $0 \leq K_i \leq 1$, $\sum_{i=j-1}^{j+1} K_i = 1$.

С другой стороны, для упрощения решения задачи и последующего моделирования, функции $\mu_j(x)$ можно выбрать ступенчатыми и симметричными. В этом случае, на основании формулы (4), коэффициент k для каждого внутреннего интервала группирования ($j = \overline{2, m-1}$) будет постоянен и одинаков: $\mu_j(x) = \{k, \text{ для } A_j; \alpha \text{ для } A_{j-1}, A_{j+1}\}$, а для конечных интервалов соответственно $\mu_1(x) = \{k_e \text{ для } A_1; \alpha \text{ для } A_2\}$ и $\mu_m(x) = \{k_e \text{ для } A_m; \alpha \text{ для } A_{m-1}\}$.

Рассмотрим теперь основные свойства выборочной статистики $\chi_{Aj}^2 = \sum_{j=1}^m [\bar{u}_{Aj} - np_j]^2 / np_j$ по отношению к стандартной величине $\chi^2 = \sum_{j=1}^m [\bar{v}_j - np_j]^2 / np_j$ с $m-1$ степенями свободы, плотностью вероятности $f(x) = \left[2^{\frac{m-1}{2}} \Gamma\left(\frac{m-1}{2}\right) \right]^{-1} x^{\frac{m-3}{2}} e^{-\frac{x}{2}}$, $x > 0$, параметрами математического ожидания $\mathbf{M}\chi^2 = m-1$ и дисперсии $\mathbf{D}\chi^2 = 2\mathbf{M}\chi^2 = 2(m-1)$.

Теорема. В условиях нормального распределения выборочной совокупности при $n \rightarrow \infty$ распределение величины χ_{Aj}^2 определяется ПВ:

$$f_{Aj}(x) = \left[2^{\frac{m-1}{2}} k_2 \Gamma\left(\frac{m-1}{2}\right) \right]^{-1} \left(\frac{x-C}{k^2} \right)^{\frac{m-3}{2}} e^{-\frac{x-C}{2k^2}}, \quad C = n(1-k)^2, \quad x > 0 \quad (10)$$

с параметрами математического ожидания и дисперсии, равными

$$\mathbf{M}\chi_{Aj}^2 = k^2(m-1) + 2n(1-k)^2, \quad \mathbf{D}\chi_{Aj}^2 = k^4\mathbf{D}\chi = 2k^4(m-1). \quad (11)$$

Доказательство. Подставим $\bar{u}_{Aj} = k\bar{v}_j$ в выражение для статистики χ_{Aj}^2 . Получим $\chi_{Aj}^2 = \sum_{j=1}^m [k\bar{v}_j - np_j]^2 / np_j = k^2 \sum_{j=1}^m \bar{v}_j^2 / np_j - n(2k-1)$. Поскольку $\mathbf{M} \sum_{j=1}^m \bar{v}_j^2 / np_j = n+m-1$, то математическое ожидание статистики χ_{Aj}^2 получается следующим:

$$\mathbf{M}\chi_{Aj}^2 = k^2\mathbf{M}\chi^2 + n(1-k)^2. \quad (12)$$

Линейное преобразование случайной величины χ^2 приводит к ПВ величины χ_{Aj}^2 следующего вида: $f_{Aj}(x) = f((x-C)/k^2)/k^2$, что соответствует формуле (10) с параметрами математического ожидания и дисперсии, определяемыми формулами (11). Таким образом, теорема доказана.

Следствие. Линейная зависимость статистик (12) позволяет определить значение параметра k_{Aj} , при котором значение $\mathbf{M}\chi_{Aj}^2$ стремится к минимуму: $k_{Aj} = [1 + (m-1)/n]^{-1}$. При этом значении коэффициента k_{Aj} математическое ожидание статистики χ_{Aj}^2 равно $\mathbf{M}\chi_{Aj}^2 = \mathbf{M}\chi^2 / 2$, т. е. качество, уверенность «правильного распознавания» неизвестной ПВ возрастает вдвое.

Моделирование гистограммного фильтра

Далее приведены примеры некоторых результатов моделирования и применения гистограммного фильтра ($k = 1/3$) к генерируемым случайным данным (число выборок 5),

распределенным с нормальной плотностью $f(x) = (2\pi\sigma_x^2)^{-1/2} \exp(-x^2 / 2\sigma_x^2)$, $\sigma_x^2 = 1$.

Сравнивались критерии: χ^2 – стандартный и $\chi_{\text{ВГО}}^2 = \sum_{j=1}^m [\bar{u}_{Aj} - np_j]^2 / np_j$ (см. табл. 1, 2).

В табл. 1, 2 также приведены вероятности возможного превышения полученного значения статистики при истинности нулевой гипотезы Pv и Pu . Гипотезу о согласии не следует отвергать, если $Pv(\chi_{\text{кр}}^2 > \chi^2) > \alpha^*$, $Pu(\chi_{\text{кр}}^2 > \chi_{\text{ВГО}}^2) > \alpha^*$, где $\alpha^* = 0,05$ – заданный уровень значимости, $\chi_{\text{кр}}^2$ – критическое значение при заданном уровне значимости.

Для сопоставления результатов моделирования с коэффициентом $k = 1/3$ вычислялись выборочные коэффициенты, использующие априорные сведения о теоретических вероятностях: $k_{\text{выб}} = 1 + 2 \left[\sum_{j=1}^m \bar{V}_j^2 / np_j \right]^{-1} \left[\sum_{j=1}^m (\bar{v}_j - np_j) \bar{V}_j / np_j \right]$ (второй столбец табл. 1 и табл. 2),

найденные из условия $\chi_{\text{ВГО}}^2 \rightarrow \min_k$. Значения величин, входящих в формулу:

$\bar{V}_j = \bar{v}_{j-1} - 2\bar{v}_j + \bar{v}_{j+1}$ для $j = \overline{2, m-1}$ и $\bar{V}_1 = -\bar{v}_1 + \bar{v}_2$, $\bar{V}_m = -\bar{v}_m + \bar{v}_{m-1}$. Вычисляемые в результате

моделирования коэффициенты $k_{\text{выб}}$ оказываются меньше единицы, а не равны ей, как при стандартном подходе построения гистограммы. Этот эффект свидетельствует о возможности применения гистограммного фильтра (формулы (6)–(9)) при относительно небольших объемах выборок. Многочисленные результаты моделирования показывают, что с увеличением объема выборки коэффициент $k_{\text{выб}}$ стремится к единице, и применение гистограммного фильтра становится нецелесообразным.

В табл. 1 приведены результаты моделирования, полученные при $n = 300$, $m = 11$. На рис. 1 приведены столбцовые гистограммы векторов v (рис. 1, а) и u (рис. 1, б), полученные в результате моделирования (строка № 3 табл. 1).

В табл. 2 приведены результаты моделирования, полученные при $n = 1000$, $m = 19$. На рис. 2 приведены столбцовые гистограммы векторов v (рис. 2, а) и u (рис. 2, б), полученные в результате моделирования (строка № 1 табл. 2).

Таблица 1. Статистики и вероятности при $n = 300$, $m = 11$
Table 1. Statistics and probabilities for $n = 300$, $m = 11$

№	$k_{\text{выб}}$	$\chi_{\text{кр}}^2$	χ^2	$\chi_{\text{ВГО}}^2$	Pv	Pu
1	0,547	18,307	19,98	12,91	0,029	0,228
2	0,5857		10,97	5,36	0,359	0,865
3	0,541		22,85	13,87	0,011	0,178
4	0,498		6,56	1,12	0,766	0,999
5	0,767		19,75	17,45	0,031	0,064

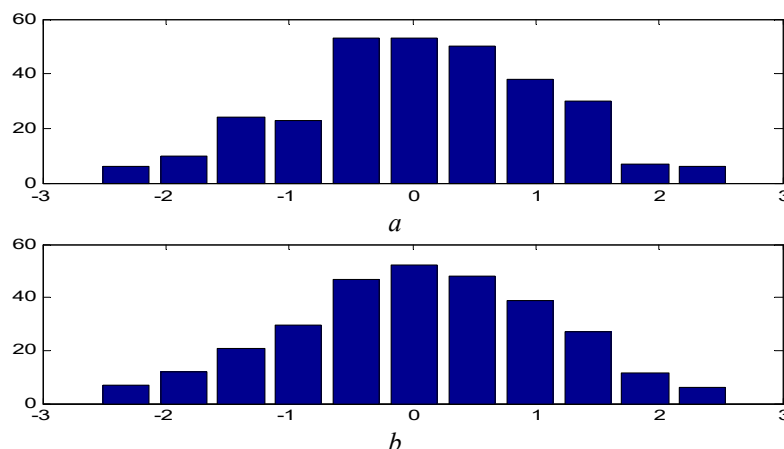


Рис. 1. Столбцовые гистограммы векторов v (а) и u (б), полученные в результате моделирования (строка № 3 табл. 1)

Fig. 1. Column histograms of vectors (a) and (b) obtained as a result of modeling (line No. 3 of table 1)

Таблица 2. Статистики и вероятности при $n = 1000, m = 19$
Table 2. Statistics and probabilities for $n = 1000, m = 19$

№	$k_{\text{выб}}$	$\chi_{\text{сп}}^2$	χ^2	$\chi_{\text{ВГО}}^2$	Pv	Pu
1	0,389	28,869	37,87	15,38	0,004	0,635
2	0,458		20,75	9,20	0,291	0,954
3	0,431		8,21	3,74	0,975	0,999
4	0,411		21,20	8,68	0,269	0,966
5	0,546		30,74	20,82	0,031	0,288

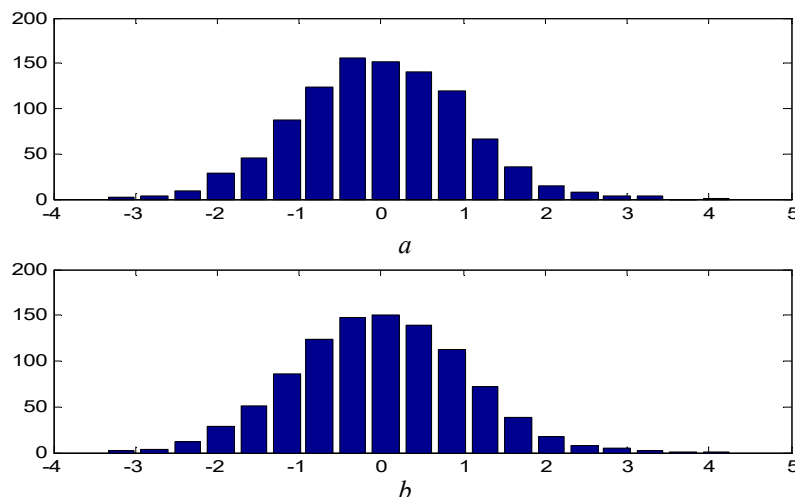


Рис. 2. Столбцовые гистограммы векторов v (a) и u (b), полученные в результате моделирования (строка № 1 табл. 2).

Fig. 2. Column histograms of vectors (a) and (b) obtained as a result of modeling (line No. 1 of table 2)

Заключение

Рассмотренная в работе методика построения и применения одномерного гистограммного фильтра является простым и вместе с тем эффективным инструментом статистического анализа данных при относительно небольших их объемах, что подтверждается результатами моделирования. Из анализа табл. 1, 2 можно сделать вывод, что $\chi_{\text{КР}}^2 > \chi_{\text{ВГО}}^2$ и $\chi^2 > \chi_{\text{ВГО}}^2$ во всех пяти экспериментах, в то время как стандартная статистика может «ошибаться» (строки № 1, 3, 5 табл. 1 и строки № 1, 5 табл. 2).

Гистограммный фильтр является простым инструментом, который легко может быть встроен в любой алгоритм построения гистограммных оценок.

Список литературы

1. Орлов Ю.Н. Оптимальное разбиение гистограммы для оценивания выборочной плотности функции распределения нестационарного временного ряда. *Препринты ИПМ им. М.В. Келдыша*. 2013;14:26.
2. Chong Gu, Yongho Jeon and Yi Lin. Nonparametric density estimation in high-dimensions. *Statistica Sinica*. 2013;23:1131-1153.
3. Орлов А.И. Новая парадигма прикладной статистики. *Заводская лаборатория. Диагностика материалов*. 2012;78(11).
4. Devroye L. and Györfi L. *Nonparametric Density Estimation: The L1 View*. New York: John Wiley Sons; 1985.
5. Gonzalez R. *Digital Image Processing*, 3rd. Pearson Hall; 2008.
6. Solomon C.J., Breckon T.P. *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab*. Wiley-Blackwell; 2010. DOI:10.1002/9780470689776.
7. Gonzalez R. *Digital image processing*. New York, NY: Pearson; 2018.
8. Овсянников А.В. *Применение стохастических формирующих фильтров*. Germany, KG, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co; 2017.
9. Bernd J. *Digital Image Processing* (6 ed.). Springer Berlin Heidelberg New York; 2005.
10. Chakravorty Pragnan. What is a Signal? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine*. 35 (5):175-177. DOI: 10.1109/MSP.2018.2832195.

References

1. Orlov Yu.N. [Optimal histogram partitioning for estimating the sample density of the distribution function of an unsteady time series]. *Preprinty IPM im. M.V. Keldysha = Preprints of the Institute of Applied Mathematics M.V. Keldysh RAS.* 2013;14:26. (in Russ.)
2. Chong Gu, Yongho Jeon and Yi Lin. Nonparametric density estimation in high-dimensions. *Statistica Sinica.* 2013;23:1131-1153.
3. Orlov A.I. [The new paradigm of applied statistics]. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov = Industrial Laboratory. Diagnostics of Materials.* 2012;78(11). (in Russ.)
4. Devroye L. and Györfi L. *Nonparametric Density Estimation: The L1 View.* New York: John Wiley Sons; 1985.
5. Gonzalez R. *Digital Image Processing,* 3rd. Pearson Hall; 2008.
6. Solomon C.J., Breckon T.P. *Fundamentals of Digital Image Processing: A Practical Approach with Examples in Matlab.* Wiley-Blackwell; 2010. DOI:10.1002/9780470689776.
7. Gonzalez R. *Digital image processing.* New York, NY: Pearson; 2018.
8. Ovsyannikov A.V. [The use of stochastic shaping filters]. Germany, KG, Saarbrücken: LAP LAMBERT Academic Publishing, OmniScriptum GmbH & Co; 2017. (in Russ.)
9. Bernd J. *Digital Image Processing* (6 ed.). Springer Berlin Heidelberg New York; 2005.
10. Chakravorty Pragnan. What is a Signal? [Lecture Notes]. *IEEE Signal Processing Magazine.* 35 (5):175-177. DOI: 10.1109/MSP.2018.2832195.

Вклад авторов

Овсянников А.В. разработал общую методику построения гистограммной оценки на основе нечеткой принадлежности данных интервалу группирования, предложил алгоритм гистограммной фильтрации данных.

Козел В.М. выполнил моделирование работы гистограммного фильтра.

Authors' contribution

Ausiannikau A.V. developed a general methodology for constructing a histogram estimate based on fuzzy data belonging to the grouping interval, proposed an algorithm for histogram data filtering.

Kozel V.M. performed modeling of the histogram filter.

Сведения об авторах

Овсянников А.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных технологий Белорусского государственного университета.

Козел В.М., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Ausiannikau A.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Information Technologies Department of Belarusian State University.

Kozel V.M., PhD, Associate Professor, Associate Professor at the Information Radiotechnologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220030, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 4,
Белорусский государственный университет;
тел. +375-17-209-58-94;
e-mail: andovs@mail.ru
Овсянников Андрей Витальевич

Address for correspondence

220030, Republic of Belarus,
Minsk, Nezavisimosti ave., 4,
Belarusian State University;
tel. +375-17-209-58-94;
e-mail: andovs@mail.ru
Ausiannikau Andrei Vital'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-21-27>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.395

МЕТОД ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЯ, ПОЛУЧЕННОГО НА ОСНОВЕ РЕЗУЛЬТАТОВ АЭРОКОСМИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА

А.И. МИТЮХИН¹, И.И. ПИКИРЕНЯ²

¹Институт информационных технологий Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Республика Беларусь)

²Белорусская медицинская академия последипломного образования (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 11 декабря 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассматривается метод обработки цифрового изображения, обеспечивающий эффективную передачу, перераспределение и хранение видеографической информации аэрокосмического экологического мониторинга. Требование повышения эффективности мониторинга при необходимости выполнения регулярного контроля изменений в поле изображений наблюдаемого объекта особенно актуально при описании пространственно совмещенных наборов изображений, полученных после многозональной, многовременной и многополяризационной съемки. Во многих приложениях дистанционного зондирования эффективность обработки отражает степень снижения объемов передаваемой, описываемой, анализируемой и хранимой видеографической информации. Представляется вычислительный процесс обработки цифровых снимков на основе координатной схемы съемки. Метод может применяться для выполнения процедуры дешифрации снимков с целью решения задачи классификации объектов интереса, анализа изображений. В качестве дешифровочных признаков использовались такие характеристики бинарных объектов, как пространственная граница и контур. Эти признаки позволяют описать форму объекта, его геометрические параметры, осуществить поиск изображений с определенными пространственными структурами. Метод обработки реализуется путем выполнения эффективных алгоритмов кодирования изображения на дискретной сетке посредством цепного кода и спектрального кодирования на основе быстрого дискретного преобразования Хартли. Результат обработки сводится к минимизации количества таких базовых вычислительных операций, как умножение, сложение, пересылка, а также к уменьшению временной и емкостной сложности программы, снижению избыточности исходных данных. Приводится пример эффективного представления и описания сегментированного изображения объекта. Предложенный метод позволяет расширить технические возможности более эффективной передачи и обработки изображений для решения задач в области дистанционного зондирования.

Ключевые слова: экология, алгоритм, эффективность, изображение, спектр, энтропия, преобразование, избыточность, длина кода.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Митюхин А.И., Пикирениа И.И. Метод обработки изображения, полученного на основе аэрокосмического мониторинга. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 21-27.

IMAGE PROCESSING METHOD BASED ON AEROSPACE MONITORING

ANATOL I. MITSUKHIN¹, IVAN I. PIKIRENYA²

¹*Institute of Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
(Minsk, Republic of Belarus)*

²*Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 11 December 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The paper considers a digital image processing method that provides efficient transmission, redistribution and storage of aerospace environmental monitoring videographic information. The requirement to increase the monitoring efficiency, if necessary, to carry out regular monitoring of changes in the image field of the observed object is especially relevant when describing spatially aligned sets of images obtained after multi-zone, multi-time and multi-polarization shooting. In many remote sensing applications, the processing efficiency reflects the degree of reduction in the volume of transmitted, described, analyzed and stored videographic information. The computational processing of digital images based on the coordinate survey scheme is presented. The method can be used to perform the procedure for decoding images in order to solve the problem of classifying objects of interest, analyzing images. Such characteristics of binary objects as a spatial boundary and a contour were used as deciphering signs. These features make it possible to describe the shape of an object, its geometric parameters and search for images with specific spatial structures. The processing method is realized by executing efficient algorithms for coding an image on a discrete grid by means of a chain code and spectral coding based on the fast discrete Hartley transform. The result of processing comes down to minimizing the number of such basic computational operations as multiplication, addition, transferring, as well as reducing the time and capacitive complexity of the program, and reducing the redundancy of the initial data. An example of an effective representation and description of a segmented image of an object is given. The proposed method makes it possible to expand the technical capabilities of more efficient transmission and processing of images for solving problems in the field of remote sensing.

Keywords: ecology, algorithm, efficiency, image, spectrum, entropy, conversion, redundancy, code length.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Mitsukhin A.I., Pikirenya I.I. Image processing method based on aerospace monitoring. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 21-27.

Введение

Современное решение задач экологического контроля окружающего пространства, изучение качественного состояния почвенных земельных ресурсов и их количественный учет, химический анализ водной среды рек, озер, болот и пр. основывается на широком использовании аэрокосмического наблюдения как в видимом диапазоне спектра, так и в мультиспектральных диапазонах электромагнитного излучения. Всесезонный аэрокосмический мониторинг лесных массивов, областей с залежами торфяников, крупных экологически опасных промышленных объектов с целью как можно более раннего обнаружения очагов возгорания требует постоянного обновления данных наблюдения. При получении фотоснимков, регистрации изображений после мультиспектрального сканирования актуальными задачами являются: обеспечение эффективной передачи, перераспределения и хранения видеографической информации, хранящейся в базе данных изображений; быстрая обработка и обслуживание (поиск) цифровых данных, отображающих изображения интереса. Повышение эффективности аэрокосмических методов контроля напрямую связано с исследованием, разработкой и использованием новых более эффективных алгоритмов цифровой обработки изображений (ЦОИ), уменьшающих объем данных, подлежащих передаче по имеющимся каналам с заданной пропускной способностью. В статье

предлагается к рассмотрению вычислительный алгоритм, позволяющий решать задачи ЦОИ, связанные с анализом характерных признаков наблюдаемого 2D-объекта, его эффективным представлением и описанием. Рассматриваемый алгоритм обработки предназначен для решения реальных задач обработки данных, полученных после этапа сегментации.

Теоретические принципы

Рассматривается подход к обработке сегментированных изображений, включающий в себя два последовательных вычислительных процесса (этапа). На первом этапе цифровой обработки 2D-данных осуществляется их эффективное кодирование в пространственной области. На втором этапе осуществляется эффективное кодирование (преобразование) кодовых последовательностей в спектральной области. Результатом интегрированного процесса 2-кратного кодирования являются данные, снижающее избыточность исходного изображения. Следствием этого является упрощение анализа изображения и выявление его основных отличительных признаков.

В качестве данных из изображений рассматривались 2D-бинарные (яркость пикселя равна единице) однородные в визуальном плане объекты: границы $g(x, y)$ некоторой области изображения $f(x, y) \in Z^2$, где (x, y) – значения координат декартова произведения Z^2 . Все пиксели изображения $g(x, y)$ находятся на краю области объекта наблюдения. В этом случае граница g представляется последовательностью целых чисел $g = ((x_0, y_0), (x_1, y_1), \dots, (x_{n-1}, y_{n-1}))$, где n обозначает длину границы. Пиксели (x_i, y_i) и (x_{i+1}, y_{i+1}) являются смежными. Описание последовательности g требует использовать $L = 2n$ целых десятичных чисел. Для передачи (хранения) последовательности g в двоичном виде длина последовательности возрастает до величины $L' = Lk$, где k – размерность кода, определяет число информационных символов. Реальные значения k находятся в диапазоне $8 \div 10$. Требование высокой достоверности передачи данных по радиоканалам систем аэрокосмического наблюдения приводит к необходимости применения помехоустойчивого кодирования $[N, k, d]$ -кодом со скоростью

$R = \frac{k}{N}$, где N – значность кода, $d \geq 2t + 1$ – минимальное расстояние кода, t – корректирующая способность кода [1]. Известные высокоскоростные помехоустойчивые коды со сравнительно малой корректирующей способностью $t = 1 \div 4$ приводят к увеличению длины кодовой последовательности до значения

$$L'' = 2nRN. \quad (1)$$

Величину L'' (1) существенно можно уменьшить, применяя кодирование последовательности g цепным кодом [2]. Наибольшая эффективность представления данных этим кодом достигается для изображений, когда взаимосвязь между соседними пикселями отвечает смежности и нет соседей пикселей, принадлежащих области $f(x, y) \in Z^2$. Это условие выполняется, когда обеспечивается высокая точность выполненной сегментации [3]. Если использовать алгоритм кодирования 8-связным кодом, исходная g 2D-последовательность преобразуется в одномерное кодовое слово g^c длиной $L''' = n$. Каждому десятичному символу одномерной последовательности g^c соответствует двоичное информационное значение $k = 3$. Таким образом, уже на первом этапе кодирования уменьшается размер входа обработки почти в три раза. В сравнении с матричным представлением 2D-объекта на множестве Z^2 формируется 1D-вектор, который является полным представлением границы области интереса или ее формы.

На основе информационного подхода последовательность g^c определим как формируемую на выходе дискретного источника без памяти [4] $G^c = (g_0^c, g_1^c, \dots, g_{n-1}^c)$, $g_i^c \in \{0, 1, \dots, 7\}$. Каждый i -й одиночный символ источника G^c появляется

на выходе с вероятностью p_i . Статистические характеристики источника G^c задаются множеством $P = \{p_0, p_1, \dots, p_7\}$. Имея конкретное изображение, формируемое источником, можно оценить его информационное содержание посредством вычисления энтропии H . Сравнивая вычисленное значение энтропии с максимально возможным H_0 (когда источник описывается полной неопределенностью), можно показать, что реальные последовательности g^c обладают кодовой избыточностью $r = 1 - H/H_0$. Для устранения кодовой избыточности применяют методы энтропийного и универсального кодирования [5]. Однако эффективность этих методов относительно невысокая.

Другой способ представления случайного процесса источника состоит в вычислении корреляционной или ковариационной функции последовательности g^c . Высокая степень корреляции между символами позволяет реализовать второй этап эффективного кодирования посредством спектрального преобразования. В качестве преобразования рассматривается действительное дискретное преобразование Хартли (ДПХ). В сравнении с комплексным ДПФ, где требуется использовать $2B$ действительных значений, преобразование Хартли выполняется над B действительными значениями [6]. Кроме того, в сравнении с дискретным косинусным преобразованием и ДПФ, прямое и обратное ДПХ совпадают, что также уменьшает сложность ЦОИ. Длина преобразования определяется значением N_c .

Для сокращения длины преобразования выполним лексикографическое преобразование по столбцам вектора g^c в матрицу G^c . Пусть индексы строк и столбцов матрицы G^c обозначаются традиционно как m и n , а новую длину преобразования обозначим N_c^l . Прямое дискретное 2D-преобразование Хартли в матричной форме имеет вид [7]

$$\hat{G}^c = \mathbf{H} \mathbf{G}^c \mathbf{H}, \quad (2)$$

где \hat{G}^c – матрица коэффициентов преобразования, G^c – матрица кодовой последовательности g^c , \mathbf{H} – матрица дискретных функций Хартли

$$\cos\left(\frac{2\pi m v}{N_c^l}\right), \quad (3)$$

где v – частотный индекс функции m – пространственный индекс функции, m и v изменяются в пределах от 0 до $N_c^l - 1$. Обратное 2D-ДПХ определяется как

$$\tilde{G}^c = \frac{1}{N_c^{l2}} \mathbf{H} \hat{G}^c \mathbf{H}. \quad (4)$$

После перехода в спектральную область (2) выполняется отбор (фильтрация) коэффициентов преобразования. В работе рассматривался алгоритм адаптивной фильтрации с использованием порогового критерия. Эффективность обработки оценивалась отношением $K = \frac{D}{M}$, где D – затраты на передачу изображения объекта без кодирования, M – затраты на передачу изображения с использованием кодирования. Ниже приводится пример применения рассматриваемого метода 2-этапного кодирования.

Пример. На рис. 1 показан аэрофотоснимок морского залива (кадр видео <https://vimeo.com/103608554>). Требуется эффективно представить и описать границу залива с нулевым значением среднеквадратической ошибки $\varepsilon = \sqrt{\frac{1}{N_c^{l2}} \sum_m \sum_n ((\tilde{g}_c(m, n) - g_c(m, n))^2)}$,

где $\tilde{g}_c(m, n)$ – значения матрицы \tilde{G}^c восстановленного изображения.

После процессов цифрового представления изображения сегментации и бинаризации граница состоит из 64 пикселей. Для их описания требуется подмножество из 128 десятичных чисел, принадлежащих множеству Z^2 . Кодирование цепным кодом порождает кодовое слово, которое описывается матрицей (5).



Рис. 1. Аэрофотоснимок залива
Fig. 1. Aerial view of the bay

$$\mathbf{G}^c = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 7 & 0 & 0 & 7 & 0 & 0 \\ 7 & 7 & 6 & 7 & 6 & 6 & 6 & 4 \\ 4 & 4 & 5 & 4 & 4 & 6 & 6 & 5 \\ 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 & 4 \\ 3 & 3 & 4 & 4 & 6 & 6 & 4 & 4 \\ 2 & 1 & 2 & 4 & 3 & 4 & 2 & 2 \\ 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 2 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (5)$$

Используя выражение (2), вычисляются спектральные коэффициенты Хартли. Ядро ДПХ образуется дискретными функциями (3). Структура матрицы \mathbf{H} имеет вид

$$\mathbf{H} = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1,4142 & 1 & 0 & -1 & -1,4142 & -1 & 0 \\ 1 & 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 \\ 1 & 0 & -1 & 1,4142 & -1 & 0 & 1 & -1,4142 \\ 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 & 1 & -1 \\ 1 & -1,4142 & 1 & 0 & -1 & 1,4142 & -1 & 0 \\ 1 & -1 & -1 & 1 & 1 & -1 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & -1 & -1,4142 & -1 & 0 & 1 & 1,4142 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Результат адаптивной фильтрации коэффициентов Хартли отражается матрицей

$$\tilde{\mathbf{G}}^c = \begin{pmatrix} 194 & -13,38 & 0 & 0 & 0 & 23,39 & -14 & -13,48 \\ 55,01 & 0 & 0 & 0 & 0 & 13,73 & -22,24 & 0 \\ 40 & -12,56 & 0 & 0 & 0 & 18,56 & -12 & -20,66 \\ -12,99 & 0 & 0 & 0 & 0 & 9,59 & -14,24 & 0 \\ -14 & -11,73 & 0 & -17,49 & 0 & 13,73 & 22 & 0 \\ 27,01 & -11,73 & 0 & -12,66 & 0 & 24,07 & -13,73 & 0 \\ 28 & 0 & 0 & -16,66 & 0 & 16,9 & 0 & 0 \\ -95,01 & 12,41 & 0 & 0 & 0 & 15,24 & 0 & 0 \end{pmatrix}. \quad (7)$$

Подставляя в (4) значения матрицы (7), получаем восстановленные значения коэффициентов в спектральной области. При этом величина среднеквадратической ошибки

близка к нулевому значению, $\varepsilon = 0,125$. Затраты на передачу изображения с использованием кодирования составили величину $M = 32$. Эффективность обработки оценивается значением $K = \frac{128}{32} = 4$.

С учетом выигрыша в обработке на первом этапе кодирования, размер входа обработки уменьшился почти в $\approx (3 + 4) \approx 7$ раз. При исходном значении $k = 8$ бит на пиксел метод 2-этапного кодирования позволяет иметь затраты величиной 1,14 бит на пиксел.

Экспериментальные исследования

Экспериментальные исследования, связанные с оценкой эффективности рассмотренного метода обработки сегментированных изображений, проводились с использованием операционной среды MATLAB. Моделировался замкнутый путь по границе (бинарному контуру) в виде упорядоченной (неповторяющейся) последовательности пикселей, начиная с любого назначенного отправного пикселя и в виде последовательности (неупорядоченной), значения которой могут встречаться несколько раз по пути границы. Неупорядоченная последовательность пикселей описывала более сложный объект со связанными контурами. При условии соблюдения текущего направления отрезков связанных контуров (с возвратом к отправному пикселу) оценивалась эффективность описания и для такого изображения границы. Основные исследования проведены для границ с плавной характеристикой формы и границ, имеющих как плавные, так и резкие очертания. Представление границы формировалось на 4-связных и 8-связных отрезках. Соответственно строились 4-связные и 8-связные цепные коды, с помощью которых осуществлялось пространственное описание границы. Спектральное описание выполнялось с помощью типовых средств программирования MATLAB.

Заключение

Успешное и эффективное применение систем аэрокосмического зондирования земной поверхности для решения разнообразных задач в этой предметной области требует внедрения современных более производительных методов ЦОИ. В этом направлении был описан подход, позволяющий с меньшими временными и вычислительными затратами решать задачи, связанные с анализом пространственных структур объектов, их реконструкции на основе анализа их сегментированных изображений границ, контуров и линий. Проведенные расчеты и экспериментальные исследования позволяют сделать следующие выводы:

- рассматриваемый метод не требует использования сложных структур для записи исходных данных, описываемых цепным кодом. Привычная форма представления изображения в виде матрицы цепного кода позволяет легко и эффективно выполнять обработку на евклидовой сетке с использованием многих современных языков программирования;

- не имеет значения, состоит ли изображение лишь из несколько строк или представляет сложную сцену – объем требуемой памяти остается постоянным и зависит только от размера изображения;

- с минимальными вычислительными затратами можно получать количественные оценки геометрических параметров, таких как длина границы (контура), площадь, периметр формы;

- как и для любых неоднородных изображений, степень эффективности обработки зависит от статистических характеристик источника. Исследования показали, что наличие резких локальных изменений очертания границы (контура) снижает эффективность обработки для условия, при котором значение ошибки восстановления изображения стремится к нулю.

Подход может использоваться и в медицине, в частности – для анализа изображений раневых поверхностей с целью оценки эффективности лечения, поиска характерных контуров в области анализа медицинских изображений.

Список литературы

1. Ipatov V. *Spread Spektrum and CDMA. Principles and Application*. John Wiley & Sons, Ltd; 2005.
2. Burger W., Burg M.J. *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin-Heidelberg: Springer; 2005, 2006.
3. Яне Б. *Цифровая обработка изображений*. Москва: Техносфера; 2007.
4. Чисар И., Кернер Я. *Теория информации*. Москва: Мир; 1985.
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
6. Mitsiukhin A. Segmentation of Dynamical Images by Means of Discrete Hartley Transform. *Proceedings 56. International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2011; id 1100: 1-4.
7. Mitsiukhin A., Karcheuski A. Filtration of Videographic Data by Means of Hartley Discrete Transform. *Proceedings 53 International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2008: 365-366.

References

1. Ipatov V. *Spread Spektrum and CDMA. Principles and Application*. John Wiley & Sons, Ltd; 2005.
2. Burger W., Burg M.J. *Digitale Bildverarbeitung*. Berlin-Heidelberg: Springer; 2005, 2006.
3. Jähne B. [*Digital Image Processing*]. Moscow: Technosphere; 2007. (in Russ.)
4. Chisar I, Kerner J. [*Information Theory*]. Moscow: World; 1985. (in Russ.)
5. Gonzalez R.C., Woods R.E. *Digital Image Processing*. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
6. Mitsiukhin A. Segmentation of Dynamical Images by Means of Discrete Hartley Transform. *Proceedings 56. International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2011; id 1100: 1-4.
7. Mitsiukhin A., Karcheuski A. Filtration of Videographic Data by Means of Hartley Discrete Transform. *Proceedings 53 International Scientific Colloquium*. Technische Universität Ilmenau, DE. 2008: 365-366.

Вклад авторов / Authors' contribution

Вклад каждого из авторов в работу оценивается в равной мере.

The contribution of each of the authors to the work is assessed equally.

Сведения об авторах

Митюхин А.И., доцент, доцент кафедры физико-математических дисциплин Института информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Пикиреня И.И., к.м.н., доцент, заведующий кафедрой трансплантологии Белорусской медицинской академии последипломного образования.

Information about the authors

Mitsiukhin A.I, Associate Professor, Associate Professor of Physics and Mathematics Department of the Institute of Information Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pikirenya I.I, PhD, Associate Professor, Head of the Department of Transplantology of the Belarusian Medical Academy of Postgraduate Education.

Адрес для корреспонденции

220037, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Козлова, 28,
Институт информационных технологий
Белорусского государственного университета
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-111-20-57;
e-mail: mityuhin@bsuir.by
Митюхин Анатолий Иванович

Address for correspondence

220037, Republic of Belarus,
Minsk, Kozlova str., 28,
Institute of Information Technologies
of the Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
тел. +375-29-111-20-57;
e-mail: mityuhin@bsuir.by
Mitsiukhin Anatol Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-28-36>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 159.9.072+159.9.078+612.821

РЕГУЛЯЦИЯ ФУНКЦИОНАЛЬНОГО СОСТОЯНИЯ МАШИНИСТОВ ЛОКОМОТИВНЫХ БРИГАД С ПРИМЕНЕНИЕМ БОС-ТРЕНИНГА: ФАКТОРНЫЙ АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Н.В. ЩЕРБИНА

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 22 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Используется биологическая обратная связь на основе электродермальной активности кожи как метод оптимизации функционального состояния машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад. Качественный межрейсовый отдых машинистов локомотивных бригад обеспечивает сохранение здоровья, охрану труда и более высокие показатели профессионально важных психофизиологических качеств, необходимых для успешного выполнения деятельности по управлению локомотивом. Целью данной работы является определение характера зависимости между релаксационными способностями машинистов локомотивных бригад и их профессионально важными психофизиологическими и личностными качествами. Эксперимент проведен на базе кабинета психологической службы Моторвагонного депо города Минска. В качестве оборудования для БОС-тренинга был использован персональный компьютер и аппаратно-программный комплекс NeuroDog. Выполнен факторный анализ первичных эмпирических данных испытуемых, которые успешно выработали навык релаксации. Факторный анализ проведен с помощью метода главных компонент и метода Варимакс исходных в пакете Statistica 10.0. Результаты выполненного анализа позволили определить структуру психофизиологических и личностных качеств машинистов локомотивных бригад, а также степень их влияния на успешную выработку навыка релаксации. Полученные результаты в дальнейшем будут использованы для разработки методики обучения машинистов навыкам релаксации в соответствии с их индивидуальными характеристиками и алгоритмами ее реализации в контексте аппаратно-программного комплекса УПДК-МК, используемого психологической службой Белорусской железной дороги для мониторинга текущего состояния функциональных систем машинистов локомотивных бригад.

Ключевые слова: биологическая обратная связь, электродермальная активность кожи, саморегуляция, выработка навыка релаксации, функциональное состояние, факторный анализ.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Щербина Н.В. Регуляция функционального состояния машинистов локомотивных бригад с применением БОС-тренинга: факторный анализ экспериментальных данных. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 28-36.

REGULATION OF THE FUNCTIONAL STATE OF LOCOMOTIVE CREW DRIVERS USING BIOFEEDBACK TRAINING: FACTOR ANALYSIS OF EXPERIMENTAL DATA

NATALIA V. SHCHERBINA

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 22 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Biofeedback based on electrodermal activity of the skin is used as a method for optimizing the functional state of drivers and assistant drivers of locomotive crews. High-quality inter-trip rest of locomotive crew drivers ensures the preservation of health, labor protection and higher indicators of professionally important psychophysiological qualities necessary for the successful performance of locomotive management activities. The purpose of this work is to determine the nature of the relationship between the relaxation abilities of locomotive crew drivers and their professionally important psychophysiological and personal qualities. The experiment was conducted on the basis of the office of the psychological service of the Motor Car depot in Minsk. A personal computer and the NeuroDog hardware and software complex were used as the equipment for the biofeedback training. A factor analysis of the primary empirical data of subjects who successfully developed the relaxation skill was performed. Factor analysis was carried out using the principal component method and the Varimax method available in the Statistica 10.0 package. The results of the analysis allowed us to determine the structure of psychophysiological and personal qualities of locomotive crew drivers, as well as the degree of their influence on the successful development of relaxation skills. The results obtained will later be used to develop a methodology for training drivers in relaxation skills in accordance with their individual characteristics and algorithms for its implementation in the context of the UPDK-MK hardware and software complex, used by the psychological service of the Belarusian railway to monitor the current state of functional systems of locomotive crew drivers.

Keywords: biofeedback, skin electrodermal activity, self-regulation, relaxation skill development, functional state, factor analysis.

Conflict of interests. The author declare no conflict of interests.

For citation. Shcherbina N.V. Regulation of the functional state of locomotive crew drivers using biofeedback training: factor analysis of experimental data. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 28-36.

Введение

Изучение функционального состояния человека-оператора привлекает все большее внимание исследователей. Повышенный интерес проявляется к обучению человека управлению своим функциональным состоянием, поскольку в системе «человек – машина – среда» именно ошибка оператора нередко приводит к нарушению работоспособности системы или ее элементов (техники и человека), отказу системы, человеческим жертвам.

Проводится исследование по управлению функциональным состоянием машинистов и помощников машинистов локомотивных бригад (далее – машинистов локомотивных бригад) с использованием биологической обратной связи на основе электродермальной активности кожи. Выбранный метод адаптивного биологического управления с обратной связью является одним из совершенных приемов регуляции функционального состояния [1, 2]. Преимуществом является неинвазивность метода, отсутствие противопоказаний, индивидуальность и активное участие человека в оптимизации собственного функционального состояния.

На базе кабинета психологической службы Моторвагонного депо г. Минска непосредственно во время периодических обязательных переосвидетельствований машинистов

(с использованием УПДК-МК¹) в соответствии с утвержденным графиком проведено исследование по выработке навыка релаксации с использованием аппаратно-программного комплекса NeuroDog² (далее – АПК) [3]. Использование АПК NeuroDog позволяет оценить текущий уровень бодрствования испытуемого путем измерения электродермальной активности кожи (ЭДА) с помощью датчика регистрации. Изменения ЭДА отображаются для испытуемого анимированными ассоциативными изображениями с помощью «виртуального щенка», таким образом организовывая семантическую биологическую обратную связь (БОС).

Актуальность настоящей работы обусловлена важностью и актуальностью процесса расслабления как одного из условий качественного межрейсового отдыха машинистов локомотивных бригад, сохранения здоровья, охраны труда и поддержания «качественной» работоспособности машинистов на протяжении длительного времени. На функциональное состояние машинистов оказывают влияние неблагоприятные производственные факторы (шум, вибрация, психоэмоциональное напряжение, сменный график – работа в ночные смены); факторы окружающей обстановки, с которыми работники сталкиваются в нерабочее время, а также текущее физиологическое состояние и «тренды» психофизиологических функций. Бытовая неустроенность, коммуникативные проблемы, чередование ночных и дневных смен, отсутствие полноценного межсменного отдыха постепенно ухудшают психологическое состояние человека, что может привести к психологическому перенапряжению, эмоциональным срывам, развитию патологических изменений личности.

Цель работы – на основании полученных результатов исследования определить факторную модель, определяющую способность машинистов локомотивных бригад к успешной выработке навыка релаксации. Полагаем, что способность машинистов локомотивных бригад к успешной выработке навыка релаксации определяется профессионально важными психофизиологическими и личностными качествами.

Методика проведения исследования, факторный анализ эмпирических данных

В исследовании приняли участие 106 машинистов локомотивных бригад Моторвагонного депо г. Минска в возрасте от 18 до 65 лет, средний возраст по выборке составил $32 \pm 11,4$ года. Пол испытуемых – мужчины. Стаж работы участников эксперимента – в диапазоне от 1 до 36 полных лет. Средний по выборке стаж работы – $8,7 \pm 8,1$ лет. Сеансы БОС-тренинга на выработку навыка релаксации осуществлялись с использованием АПК NeuroDog. Количество БОС-сеансов – 10. Продолжительность каждого сеанса – 15–20 мин. По результатам БОС-тренинга (по параметрам КГР) автор разбил испытуемых на три группы [3] (успешная, среднеуспешная, неуспешная). Факторный анализ выполнен для успешных групп.

Полученная база эмпирических данных УПДК-МК (данные периодических освидетельствований машинистов локомотивных бригад) и АПК NeuroDog (данные исследования по выработке навыка релаксации на примере машинистов локомотивных бригад) явилась исходным материалом для факторного анализа с использованием пакета Statistica 10.0.

Для решения поставленной задачи, для выделения факторов, используем метод главных компонент. Суть метода – коррелируемые между собой переменные объединяются в один фактор. Факторному анализу подвергнуты данные по отобранным переменным в количестве 64 признаков (данные УПДК-МК для успешных групп испытуемых, отобранных по результатам исследований на АПК NeuroDog) (табл. 1). Для вращения факторных нагрузок переменных был использован метод Варимакс исходных, цель которого в максимизации дисперсии (изменчивости) «новой» переменной (фактора) и минимизации разброса вокруг нее.

¹ Комплекс универсальный психодиагностический УПДК-МК для профессионального психофизиологического отбора работников локомотивных бригад, диспетчеров [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://neurocom.ru/ru2/rail/updk_mk_rail.html – Дата доступа: 22.01.2021.

² Биоадаптивная игрушка NeuroDog. Руководство по эксплуатации (с приложением). – М.: ЗАО «Нейроком»; 2009: 36.

Таблица 1. Перечень переменных УПДК-МК, отобранных по результатам БОС-тренинга
Table 1. List of UPDC-MC variables selected based on the results of the biofeedback training

№	Переменная Variable	Обозначение Designation
1	Число неправильных нажатий (методика оценки бдительности)	x1
2	Число пропущенных сигналов с предупреждением (оценка бдительности)	x2
3	Число пропущенных сигналов без предупреждения (оценка бдительности)	x3
4	Среднее время реакции на сигналы с предупреждением (оценка бдительности)	x4
5	Среднее время реакции на сигналы без предупреждения (оценка бдительности)	x5
6	Бдительность	x6
7	Время выполнения первого задания (оценка скорости переключения внимания)	x7
8	Время выполнения второго задания (оценка скорости переключения внимания)	x8
9	Время выполнения третьего задания (оценка скорости переключения внимания)	x9
10	Скорость переключения внимания	x10
11	Количество ошибок (оценка эмоциональной устойчивости)	x11
12	Время выполнения задания (оценка эмоциональной устойчивости)	x12
13	Эмоциональная устойчивость	x13
14	Количество ошибок (оценка объема внимания)	x14
15	Объем внимания, количество знаков (корректирующая проба)	x15
16	Концентрация, количество ошибок (корректирующая проба)	x16
17	Объем внимания, количество символов (воспроизведение фигуры по памяти)	x17
18	Среднее время простой двигатель. реакции (оценка скорости зритель.-мотор. реакции)	x18
19	Среднеквадратическое отклонение времени простой двигательной реакции	x19
20	Количество ошибок в простой двигательной реакции	x20
21	Среднее время сложной двигательной реакции	x21
22	Среднеквадратическое отклонение времени сложной двигательной реакции	x22
23	Количество ошибок в сложной двигательной реакции	x23
24	Среднее время реакции на движущийся объект	x24
25	Среднеквадратическое отклонение времени реакции на движущийся объект	x25
26	Сред. арифмет. чувство времени (оценка восприятия короткого интервала времени)	x26
27	Среднеквадратическое отклонение чувства времени	x27
28	Средняя критическая частота слияния световых мельканий	x28
29	Психологическое утомление (по цветовому тесту М. Люшера)	x29
30	Психологическое напряжение (по цветовому тесту М. Люшера)	x30
31	Тревожность (по цветовому тесту М. Люшера)	x31
32	Эмоциональный стресс (по цветовому тесту М. Люшера)	x32
33	Вегетативный коэффициент (по цветовому тесту М. Люшера)	x33
34	Суммарное отклонение от аутогенной нормы (по цветовому тесту М. Люшера)	x34
35	Доминирование реальный «Я» (межличностные отношения) (тест Т. Лири)	x35
36	Дружелюбие реальный «Я» (межличностные отношения) (тест Т. Лири)	x36
37	Доминирование идеальный «Я» (внутриличностные отношения) (тест Т. Лири)	x37
38	Дружелюбие идеальный «Я» (внутриличностные отношения) (тест Т. Лири)	x38
39	Фактор А: замкнутость-общительность (опросник Р. Кеттелла)	x39
40	Фактор В: конкретное-абстрактное мышление (опросник Р. Кеттелла)	x40
41	Фактор С: эмоциональная неустойчивость-стабильность (опросник Р. Кеттелла)	x41
42	Фактор Е: податливость-независимость (опросник Р. Кеттелла)	x42
43	Фактор F: сдержанность-экспрессивность (опросник Р. Кеттелла)	x43
44	Фактор G: низкая-высокая нормативность поведения (опросник Р. Кеттелла)	x44
45	Фактор H: робость-смелость (опросник Р. Кеттелла)	x45
46	Фактор I: реализм-чувствительность (опросник Р. Кеттелла)	x46
47	Фактор L: доверчивость-подозрительность (опросник Р. Кеттелла)	x47

Окончание таблицы 1

End of table 1

48	Фактор М: практичность-мечтательность (опросник Р. Кеттелла)	x48
49	Фактор N: прямолинейность-дипломатичность (опросник Р. Кеттелла)	x49
50	Фактор O: спокойная самоуверенность-склонность к чувству вины (Р. Кеттелла)	x50
51	Фактор Q1: консерватизм-радикализм (опросник Р. Кеттелла)	x51
52	Фактор Q2: зависимость от группы-самостоятельность (опросник Р. Кеттелла)	x52
53	Фактор Q3: низкий-высокий самоконтроль (опросник Р. Кеттелла)	x53
54	Фактор Q4: внутренняя расслабленность-напряженность (опросник Р. Кеттелла)	x54
55	MMPI, 1 – шкала ипохондрии	x55
56	MMPI, 2 – шкала депрессии	x56
57	MMPI, 3 – шкала истерии	x57
58	MMPI, 4 – шкала психопатии	x58
59	MMPI, 5 – шкала мужественности-женственности	x59
60	MMPI, 6 – шкала паранойальности	x60
61	MMPI, 7 – шкала психастении	x61
62	MMPI, 8 – шкала шизоидности	x62
63	MMPI, 9 – шкала гипомании	x63
64	MMPI, 0 – шкала социальной интроверсия	x64

В результате все переменные объединились в 13 (тринадцать) факторов, объясняющие 60,23 % общей дисперсии переменных. Это продемонстрировало структуру психофизиологических и личностных качеств личности машинистов локомотивных бригад. Таким образом, первый фактор объясняет 9,95 % суммарной дисперсии; второй – 7,22 %; третий – 6,45 %; четвертый – 4,87 %; пятый – 4,83 %; шестой – 4,26 %; седьмой – 3,99 %; восьмой – 3,67 %; девятый – 3,41 %; десятый – 3,24 %; одиннадцатый – 2,96 %; двенадцатый – 2,84 %; тринадцатый – 2,54 %.

Матрица факторных нагрузок показателей индивидуальных психофизиологических и личностных характеристик машинистов, отображающая успешность выработки навыка релаксации, представлена в табл. 2. Полужирным шрифтом отмечены факторные нагрузки более 0,40. Из табл. 2 удалены переменные (x20, x25, x28, x30, x32, x33, x47), которые показали факторные нагрузки менее 0,40.

Таблица 2. Матрица факторных нагрузок

Table 2. The matrix of factor loadings

Факторные нагрузки (Var. исходный) Выделение: Главные компоненты (Отмечены нагрузки >, 400000) Factor loadings (Varimax source) Selection: Main components (Marked loads >, 400000)													
Перем. Var.	Фактор Fac. 1	Фактор Fac. 2	Фактор Fac. 3	Фактор Fac. 4	Фактор Fac. 5	Фактор Fac. 6	Фактор Fac. 7	Фактор Fac. 8	Фактор Fac. 9	Фактор Fac. 10	Фактор Fac. 11	Фактор Fac. 12	Фактор Fac. 13
x1	0,07	0,17	-0,05	-0,10	0,06	0,08	-0,05	0,21	-0,59	0,16	-0,11	0,02	-0,08
x2	0,18	0,06	-0,11	0,10	0,60	0,03	-0,13	0,18	-0,15	-0,08	0,19	-0,06	0,03
x3	0,10	0,18	-0,08	-0,09	0,66	-0,02	-0,00	0,31	0,01	-0,03	0,14	0,25	-0,01
x4	-0,26	-0,02	0,07	0,01	0,86	-0,01	0,10	-0,09	-0,03	0,01	-0,06	-0,02	-0,15
x5	-0,17	0,03	0,04	0,08	0,84	0,05	0,02	-0,10	0,03	0,09	-0,01	0,06	0,13
x6	0,22	0,10	-0,07	0,13	-0,20	0,11	-0,14	-0,02	0,13	0,14	0,08	0,16	0,52
x7	-0,74	0,02	0,07	0,04	0,14	0,07	0,01	0,01	0,10	0,22	-0,12	-0,01	0,07
x8	-0,66	-0,00	0,08	0,14	-0,17	0,06	0,11	0,05	0,17	0,31	0,02	0,04	-0,04
x9	-0,86	-0,03	0,11	-0,01	0,23	-0,21	-0,06	0,02	-0,09	-0,04	0,04	0,06	0,04
x10	-0,50	-0,12	0,10	-0,11	0,31	-0,37	-0,15	-0,11	-0,28	-0,29	0,07	0,02	0,07
x11	-0,17	0,07	0,19	-0,18	-0,10	-0,69	0,08	-0,21	-0,13	0,02	-0,11	-0,11	-0,10
x12	-0,78	0,01	0,08	-0,05	0,17	0,07	-0,03	0,11	-0,05	0,09	0,04	0,01	-0,34
x13	-0,13	0,06	0,05	-0,02	-0,06	0,10	0,07	0,04	-0,07	0,17	0,02	-0,08	-0,73
x14	0,16	0,03	0,47	0,09	-0,18	-0,44	-0,13	-0,06	0,12	0,03	0,04	0,27	0,01
x15	0,34	0,02	-0,02	0,03	-0,05	0,23	0,05	0,02	-0,38	-0,43	0,03	0,10	-0,02
x16	-0,18	-0,01	0,10	0,34	-0,20	-0,00	0,02	0,33	0,02	-0,00	0,42	-0,09	-0,02

Окончание таблицы 2
End of table 2

x17	0,35	0,12	-0,10	-0,06	-0,10	-0,13	-0,20	0,01	0,09	-0,43	0,12	0,09	0,10
x18	-0,16	0,14	0,29	-0,16	0,46	0,07	0,01	0,02	0,10	0,32	-0,07	-0,10	0,17
x19	0,01	-0,15	0,17	-0,40	0,34	0,13	-0,07	0,06	-0,19	0,21	0,12	-0,20	0,26
x21	-0,28	-0,05	-0,05	-0,13	0,59	-0,22	0,03	0,15	0,16	0,37	-0,09	-0,29	-0,03
x22	-0,25	-0,13	-0,10	-0,05	0,32	-0,02	-0,08	0,16	0,05	0,63	0,18	-0,23	-0,16
x23	0,01	0,02	-0,24	0,03	-0,04	0,09	-0,08	-0,08	-0,16	0,64	0,02	0,08	-0,37
x24	-0,17	0,13	0,08	0,13	0,12	-0,22	0,20	-0,18	-0,06	0,63	-0,03	0,16	0,22
x26	0,19	0,08	-0,14	0,07	-0,16	-0,64	-0,12	0,07	0,34	-0,06	-0,00	-0,03	0,09
x27	-0,19	-0,02	-0,11	-0,07	0,22	-0,75	0,05	0,03	0,02	0,12	0,04	-0,17	0,07
x29	-0,06	-0,18	0,09	-0,56	0,07	0,02	0,06	-0,01	0,15	0,07	-0,10	-0,23	-0,21
x31	-0,01	0,17	-0,12	-0,75	-0,07	-0,11	-0,11	0,10	0,02	-0,03	0,02	0,04	0,04
x34	0,01	0,05	-0,09	-0,83	-0,03	-0,05	0,14	0,01	-0,04	-0,05	0,01	-0,13	-0,08
x35	0,12	0,06	-0,61	0,01	0,01	0,19	-0,04	0,03	0,25	0,05	0,15	-0,25	0,12
x36	0,02	-0,10	0,18	0,08	0,05	0,11	-0,06	-0,01	0,07	-0,06	0,02	0,75	-0,04
x37	0,21	0,05	-0,56	-0,09	-0,14	0,14	-0,08	0,04	0,20	0,13	0,10	-0,21	0,06
x38	-0,13	-0,11	-0,07	0,27	-0,00	0,13	-0,00	-0,02	0,08	-0,02	0,09	0,70	0,11
x39	0,24	-0,14	0,00	0,08	0,02	-0,22	0,18	-0,12	-0,09	0,07	0,65	0,10	-0,04
x40	0,15	0,05	0,09	0,08	0,03	-0,17	0,03	0,13	-0,09	0,00	-0,71	-0,04	0,02
x41	0,26	-0,16	-0,49	-0,19	0,10	0,04	0,31	-0,13	-0,02	-0,08	0,13	0,29	0,04
x42	-0,02	0,04	0,12	-0,11	-0,04	0,04	0,49	-0,20	0,17	-0,08	0,13	-0,35	-0,07
x43	0,25	0,03	-0,00	0,08	0,13	-0,25	0,50	0,17	-0,20	0,16	-0,10	-0,05	0,17
x44	-0,15	-0,10	-0,14	-0,33	0,13	0,23	0,49	-0,21	0,16	-0,19	0,06	0,08	-0,13
x45	0,06	-0,01	-0,19	0,04	0,03	-0,03	0,70	0,05	0,11	0,05	0,02	-0,08	-0,07
x46	-0,03	0,04	0,41	0,17	0,14	-0,01	0,25	0,38	0,10	0,13	-0,19	-0,18	-0,01
x48	-0,03	0,06	-0,03	0,22	-0,05	0,01	0,15	0,24	-0,17	-0,15	-0,37	-0,26	0,49
x49	-0,09	-0,06	0,09	-0,16	0,01	0,29	0,46	-0,07	-0,23	0,04	0,14	0,40	0,00
x50	-0,26	0,03	0,56	0,09	0,04	0,20	-0,24	0,14	-0,06	-0,09	0,06	0,14	0,05
x51	0,09	0,29	-0,27	0,10	0,10	0,02	0,06	0,24	0,12	-0,24	0,06	-0,47	0,01
x52	0,12	0,26	0,43	-0,13	-0,03	0,02	0,05	-0,29	-0,13	-0,25	0,04	-0,12	0,02
x53	0,13	0,01	-0,09	-0,16	0,12	-0,05	0,31	-0,04	0,55	-0,04	0,06	0,22	0,13
x54	-0,25	0,09	0,71	0,09	0,04	0,15	-0,03	0,07	0,12	0,03	0,07	-0,05	0,05
x55	0,00	-0,63	-0,13	-0,01	-0,03	0,11	-0,15	0,02	0,10	0,16	0,13	0,14	0,15
x56	0,04	-0,61	0,36	-0,05	0,04	-0,08	-0,15	-0,05	0,03	-0,09	0,26	0,15	-0,08
x57	0,09	-0,71	-0,15	0,04	-0,01	-0,01	0,13	0,41	0,00	0,08	0,01	-0,08	-0,06
x59	0,21	-0,41	0,12	-0,09	0,14	0,07	-0,24	0,26	0,30	0,27	0,06	0,02	0,02
x60	0,07	-0,35	0,03	0,10	-0,02	-0,06	0,02	-0,71	0,05	0,04	0,19	-0,03	-0,06
x61	0,06	-0,67	0,12	-0,11	0,05	-0,12	-0,04	-0,36	-0,11	-0,08	0,15	0,13	-0,03
x62	-0,07	-0,81	-0,09	0,07	-0,10	0,13	0,13	-0,09	0,09	-0,02	-0,08	0,04	0,05
x63	0,40	0,14	-0,20	0,14	-0,04	-0,05	0,10	-0,58	0,22	0,10	0,04	0,13	0,08
x64	0,09	-0,01	0,49	0,03	0,09	0,06	-0,27	-0,31	0,14	-0,13	0,36	0,02	-0,13
Общ. дис.	4,40	3,82	3,56	2,68	3,84	2,87	2,65	2,55	2,19	2,70	2,28	2,87	2,13
Доля общ	0,07	0,06	0,06	0,04	0,06	0,04	0,04	0,04	0,03	0,04	0,04	0,04	0,03

В первый полученный фактор, собственное значение которого 6,37, вошли следующие переменные (перечислены в порядке уменьшения величины по модулю их факторных нагрузок): $x9$ (-0,86), $x12$ (-0,78), $x7$ (-0,74), $x8$ (-0,66) и $x10$ (-0,50). Данный фактор получил наименование «Переключения внимания». Учитывая, что переменные входят в данный фактор со своими низкими значениями (имеют отрицательные факторные нагрузки), делаем вывод, что основной психофизиологической характеристикой хорошо релаксирующих машинистов локомотивных бригад является высокая скорость переключение внимания.

В фактор два (4,62) вошли переменные $x62$ (-0,81), $x57$ (-0,71), $x61$ (-0,67), $x58$ (-0,66), $x55$ (-0,63), $x56$ (-0,61) и $x59$ (-0,41). Переменные вошли в фактор с отрицательными факторными нагрузками, делаем вывод, что описываемый фактор определяет ослабление

личностных черт (по упомянутым шкалам опросника). Успешные в плане достижения релаксации машинисты отличаются простотой мыслей и суждений, доходящей до банальности, и проявляют тенденцию поступать, как все. Они не страдают от излишней тревожности и повышенного чувства вины, не волнуются по мелочам, уверены в себе и не робеют во взаимодействии с людьми. Это может порой проявляться в отсутствии осторожности в поступках, щепетильности в вопросах чести и совести, эгоцентризме. Для описываемых испытуемых характерно повышение порогов чувствительности и, как следствие, эмоциональной стабильности, их поведение не демонстративно и не направлено на непререкаемое признание и завоевание окружения. Это в некотором роде конформные, несамостоятельные личности, всегда следующие установленным нормам. У них не наблюдается признаков пессимизма и депрессии, они в целом довольны собой и окружением, достаточно энергичны, инициативны и общительны, с преимущественно ровным, хорошим настроением, понятны для окружения. Они ориентированы на следование традиционному образу мужественности, просты и даже грубоваты в общении, в характере могут наблюдаться жесткость и черствость. Фактор получил наименование «Адаптивность».

Фактор три (4,13) состоит из следующих переменных: x_{54} (0,71), x_{35} (-0,61), x_{37} (-0,56), x_{50} (0,56), x_{41} (-0,49), x_{64} (0,49), x_{14} (0,47), x_{52} (0,43) и x_{46} (0,41). Машинистам присущи напряженная собранность, энергетическая заряженность, повышенная мотивация, вызванные, возможно, обеспокоенностью, озабоченностью. Они могут быть эмоционально неустойчивыми, переменчивыми в настроении и подверженными ему (отсюда, по всей вероятности, увеличение количества ошибок при выполнении психофизиологического теста на эмоциональную устойчивость). Чувствительны, впечатлительны, порой ранимы, легко расстраиваются, в то же время чутки по отношению к другим людям. Демонстрируют тенденцию к подчинению, отказу от позиции лидера. Характеризуются большей обращенностью интересов в мир внутренних переживаний, чем во вне, сниженной степенью включенности в социальную среду. Отличаются стремлением иметь собственное мнение, независимостью суждений, самостоятельностью при принятии решений, находчивостью и изобретательностью. Фактор назван «Мотивация».

Четвертый фактор (3,11) образован следующими переменными: x_{34} (-0,83), x_{31} (-0,75), x_{29} (-0,56), x_{19} (-0,40). Фактор получил наименование «Психоэмоциональное состояние». Содержание четвертого фактора можно трактовать следующим образом: чем меньше у машиниста (с хорошими навыками релаксации) отклонение от аутогенной (психоэмоциональной) нормы, которая является индикатором психологического благополучия, меньше психологическое утомление и ниже тревожность, тем более устойчиво время его простой двигательной реакции.

Фактор пять (3,09) представлен: x_4 (0,86), x_5 (0,84), x_3 (0,66), x_2 (0,60), x_{21} (0,59), x_{18} (0,46). Данный фактор объединяет в себе показатели, определяемые двумя психофизиологическими тестами. Пятый фактор назван «Скорость реакции в ситуации принятия решения по выбору». Поскольку переменные, имея положительные факторные нагрузки, входят в него со своими высокими значениями, можно сделать вывод о том, что фактор увеличивает время перечисленных выше психофизиологических реакций и тем самым «ухудшает» соответствующие психофизиологические показатели.

В шестом факторе (2,73), со значимыми факторными нагрузками, были обнаружены такие переменные, как: x_{27} (-0,75), x_{11} (-0,69), x_{26} (-0,64), x_{14} (-0,44). Шестой фактор получил наименование «Чувство времени». Следует отметить, что на фоне относительно устойчивого чувства времени (малое среднеквадратическое отклонение) и склонности к недооценке временных интервалов как показателя преобладания процесса возбуждения (низкое среднее арифметическое чувства времени) снижается количество ошибок, допускаемых испытуемыми при выполнении методик «Переключение внимания» и «Эмоциональная устойчивость».

Седьмой фактор оказался третьим в факторной структуре личностным фактором (2,56). В нем обнаружены следующие переменные: x_{45} (0,70), x_{43} (0,50), x_{42} (0,49), x_{44} (0,49), x_{49} (0,46). В данном факторе сочетаются смелость индивида, его готовность к риску, к действию в незнакомых ситуациях, способность принимать самостоятельные, неординарные решения, предприимчивость с лидерскими качествами. Эти свойства, несомненно, присущи

человеку, социальные контакты которого, его отношения с людьми имеют выраженную, даже яркую эмоциональную окраску, а общение с окружающими отличается высокой динамичностью. Все это может способствовать установлению эмоционального лидерства данного человека. В то же время в описании присутствуют позитивные моменты. Это – добросовестность, развитое чувство долга и ответственности, осознанное соблюдение моральных норм, а также разумность, деловая направленность, настойчивость в достижении цели. Среди положительных качеств следует указать также умение вести себя в обществе, дипломатичность в общении, проницательность и осторожность, умение находить выход из сложных ситуаций. На основании всего вышесказанного седьмому фактору дано наименование «Предприимчивость».

Восьмой фактор (2,35) является четвертым личностным фактором в описываемой факторной структуре. В нем представлены x_{60} (-0,71), x_{63} (-0,58), x_{57} (0,41). Полученный фактор определяет возможность у машинистов, хорошо справляющихся с задачей релаксации, такого свойства, как быстрое угасание и деактуализация ранящих личность переживаний. Иначе говоря, такие индивиды необидчивы и незлопамятны, доверчивы и уступчивы, добродушны. Тем не менее они иногда могут быть безвольными и ленивыми, недостаточно упорны, легко истощаются в работе. В их деятельности часто отсутствует система, прослеживается несформированность цели, они не всегда уверены в целесообразности своей деятельности или ее успехе. Они не отличаются особым оптимизмом и чаще полагаются на волю случая или действия других людей. Для описываемых испытуемых характерно снижение порогов чувствительности и, как следствие, эмоциональная лабильность. Они неустойчивы к стрессу, в их поведении наблюдаются признаки эгоцентризма, демонстративности. Восьмой фактор получил наименование «Податливость».

В девятом факторе (2,18) находятся две переменные: x_1 (-0,59), x_{53} (0,55). На этом основании делаем вывод, что количество ошибочных действий, совершаемых испытуемым при изучении у него бдительности, уменьшается при наличии у него умения контролировать свои эмоции и поведение, силы воли. Девятый фактор может получить наименование «Бдительность».

Десятый фактор (2,07) составлен из переменных, соответствующих ряду психофизиологических характеристик машинистов: x_{23} (0,64), x_{22} (0,63), x_{24} (0,63), x_{15} (-0,43), x_{17} (-0,43). Больше количество ошибок, допускаемых испытуемыми при демонстрации ими сложной двигательной реакции, нарастание неустойчивости времени данной реакции, увеличение числа запаздывающих реакций на движущийся объект (т. е. преобладание тормозного процесса) сопряжено с уменьшением количества правильно вычеркнутых встречающихся знаков на тестовом бланке и уменьшением количества правильно воспроизведенных испытуемыми по памяти знаков при изучении у них внимания, т. е. с уменьшением (сужением) у испытуемых объема внимания. Десятый фактор назван «Внимание».

В одиннадцатом факторе (1,89) оказались три переменные: x_{40} (-0,71), x_{39} (0,65) и x_{16} (0,42). Из этого следует, что конкретность и некоторая ригидность мышления, затруднения в решении абстрактных задач, сниженная оперативность мышления, а также общительность, открытость, непринужденность, приспособляемость, готовность идти на поводу, возможно, определяют у машинистов с высокой успешностью релаксации увеличение количества совершаемых ошибок при изучении у них концентрации внимания, т. е. ухудшение данного свойства. Одиннадцатый фактор получил наименование «Мышление».

В фактор двенадцать (1,82) вошли следующие переменные: x_{36} (0,75), x_{38} (0,70), x_{51} (-0,47), x_{49} (0,40). Машинисты консервативны, предпочитают следовать традициям, испытывают сомнения относительно новых идей и могут сопротивляться переменам; склонны к морализации; проявляют узость интеллектуальных интересов и ориентированы на конкретную реальную деятельность; эмоционально выдержаны и дипломатичны в общении, в то же время проницательны и осторожны. Двенадцатый фактор получил наименование «Дружелюбие».

В факторе тринадцать (1,63) присутствуют три переменные: x_{13} (-0,73), x_6 (0,52), x_{48} (0,49). Исходя из содержания фактора, можно заключить, что машинисты, обладающие высокой эмоциональной устойчивостью и невысоким уровнем бдительности (значение показателя бдительности находится в пределах нормы, но при этом присутствует значительная

разница между временем реакции на сигналы с предупреждением и без предупреждения), имеют богатое воображение, ориентированы на свой внутренний мир и поглощены собственными идеями, мечтательны. Тринадцатый фактор получил наименование «Эмоциональная устойчивость».

Заключение

В результате анализа получена факторная структура переменных исследования. Факторный анализ позволил: сократить объем анализируемых и интерпретируемых результатов; выявить структуру связей между переменными, обусловленных существованием латентных факторов; понять, какие факторы влияют на успешную выработку навыка релаксации и в какой степени. В результате анализа выявлено тринадцать факторов, отражающих структуру саморегуляции функционального состояния машинистов локомотивных бригад. Таким образом, можно сделать вывод о том, способность машинистов локомотивных бригад к успешной выработке навыка релаксации определяется профессионально важными психофизиологическими и личностными качествами.

Список литературы

1. Гедранович Ю.А., Савченко В.В., Яшин К.Д., Щербина Н.В. Обзор и сравнительный анализ методов и систем для развития навыков релаксации. *Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики*. 2016;1(77);62-69.
2. Гедранович Ю.А., Савченко В.В., Яшин К.Д., Щербина Н.В. Обзор и сравнительный анализ методов и систем для развития навыков релаксации. *Человеческий фактор: проблемы психологии и эргономики*. 2016;2(78);44-50.
3. Щербина Н. В., Савченко В.В., Яшин К.Д. Исследование метода выработки навыка на релаксацию с биологической обратной связью по параметрам электродермальной активности. *Новости медико-биологических наук*. 2019;1;65-73.

References

1. Gedranovich Yu.A., Savchenko V.V., Yashin K.D., Shcherbina N.V. [Review and comparative analysis of methods and systems for the development of relaxation skills]. *Chelovecheskiy faktor: problemy psikhologii i ergonomiki = Human factor: problems of psychology and ergonomics*. 2016;1(77);62-69. (in Russ.)
2. Gedranovich Yu.A., Savchenko V.V., Yashin K.D., Shcherbina N.V. [Review and comparative analysis of methods and systems for the development of relaxation skills]. *Chelovecheskiy faktor: problemy psikhologii i ergonomiki = Human factor: problems of psychology and ergonomics*. 2016;2(78);44-50. (in Russ.)
3. Shcherbina N.V., Savchenko V.V., Yashin K.D. [Research of the method of developing a skill for relaxation with biological feedback on the parameters of electrodermal activity]. *Novosti mediko-biologicheskikh nauk = News of medical and biological Sciences*. 2019;1;65-73. (in Russ.)

Сведения об авторе

Щербина Н.В., старший преподаватель кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Shcherbina N.V., Senior Lecturer at the Department of Engineering Psychology and Ergonomics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел.: +375-29-755-92-70;
e-mail: shcherbina@bsuir.by
Щербина Наталья Витальевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel.: +375-29-755-92-70;
e-mail: shcherbina@bsuir.by
Shcherbina Natalia Vitalievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-37-42>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.382.2/.3

ТЕСТИРОВАНИЕ АППАРАТНОГО ГЕНЕРАТОРА СЛУЧАЙНЫХ ЧИСЕЛ ПРИ ПОМОЩИ НАБОРА СТАТИСТИЧЕСКИХ ТЕСТОВ NIST

М.О. ПИКУЗА, С.Ю. МИХНЕВИЧ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 28 января 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Генераторы случайных чисел необходимы для работы систем криптографической защиты информации. В сфере защиты информации для корректного применения генератора необходимо, чтобы его выходная последовательность была неотличима от равномерно распределенной случайной последовательности. Для того чтобы в этом убедиться, необходимо провести тестирование выходной последовательности генератора с помощью различных наборов статистических тестов, таких как Diehard и NIST. Целью данной работы является тестирование опытного образца аппаратного генератора случайных чисел. Генератор построен на основе шумового диода ND103L и на выходе имеет случайную цифровую последовательность двоичных чисел. В опытном образце присутствует возможность регулирования величины обратного тока через шумовой диод, а также задания периода снятия данных, т. е. частоты генерации данных. В ходе работы с генератора был снят ряд последовательностей случайных чисел при различных значениях обратного тока через шумовой диод, периода снятия данных и температуры окружающей среды. Полученные последовательности были протестированы с помощью набора статистических тестов NIST. После анализа результатов тестирования был сделан вывод, что генератор относительно стабильно работает в некотором диапазоне исходных параметров, при этом ухудшение качества работы генератора за пределами этого диапазона связано с техническими характеристиками шумового диода. Также был сделан вывод, что исследуемый генератор применим в определенных приложениях, и для улучшения стабильности работы можно осуществить его доработку как в аппаратной части, так и программной. Результаты данной работы могут быть полезны разработчикам аппаратных генераторов случайных чисел, построенных по схожей схеме.

Ключевые слова: аппаратный генератор случайных чисел, шумовой диод, тестирование генератора случайных чисел, набор статистических тестов NIST.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Пикуза М.О., Михневич С.Ю. Тестирование аппаратного генератора случайных чисел при помощи набора статистических тестов NIST. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 37-42.

TESTING A HARDWARE RANDOM NUMBER GENERATOR USING NIST STATISTICAL TEST SUITE

MAKSIM O. PIKUZA, SVETLANA YU. MIKHNEVICH

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 28 January 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Random number generators are required for the operation of cryptographic information protection systems. For a correct application of the generator in the field of information security, it is necessary that its output sequence to be indistinguishable from a uniformly distributed random sequence. To verify this, it is necessary to test the generator output sequence using various statistical test suites such as Dihard and NIST. The purpose of this work is to test a prototype hardware random number generator. The generator is built on the basis of the ND103L noise diode and has a random digital sequence of binary numbers at the output. In the prototype there is a possibility of regulating the amount of reverse current through the noise diode, as well as setting the data acquisition period, i.e. data generation frequency. In the course of operation, a number of sequences of random numbers were removed from the generator at various values of the reverse current through the noise diode, the period of data acquisition and the ambient temperature. The resulting sequences were tested using the NIST statistical test suite. After analyzing the test results, it was concluded that the generator operates relatively stably in a certain range of initial parameters, while the deterioration in the quality of the generator's operation outside this range is associated with the technical characteristics of the noise diode. It was also concluded that the generator under study is applicable in certain applications and to improve the stability of its operation, it can be improved both in hardware and software. The results of this work can be useful to developers of hardware random number generators built according to a similar scheme.

Keywords: hardware random number generator, noise diode, random number generator testing, NIST statistical test suite.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Pikuza M.O., Mikhnevich S.Yu. Testing a hardware random number generator using NIST statistical test suite. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 37-42.

Введение

Потребность в случайных числах возникает во многих криптографических приложениях: в криптографических системах используются ключи, которые должны генерироваться случайным образом, а в криптографических протоколах случайные числа применяются для генерации цифровых подписей или создания задач при аутентификации [1].

В качестве источника случайных чисел используются аппаратные, программные или программно-аппаратные генераторы случайных чисел (ГСЧ). Генерация последовательности случайных чисел в аппаратных ГСЧ осуществляется на основе физических процессов, параметры которых меняются хаотически (например, тепловой или квантовый шум). Теоретически такие процессы абсолютно непредсказуемы, однако на практике на хаотические процессы могут влиять окружающая среда и измеряющая аппаратура, поэтому для обеспечения надежности полученные с помощью аппаратного ГСЧ случайные числа рекомендуется проверять специальными статистическими тестами [2].

При разработке аппаратного ГСЧ требуется правильно выбрать режим работы электрических компонентов генератора, позволяющий получать статистически случайные последовательности чисел. Для того чтобы выявить влияние на выходную последовательность ГСЧ различных параметров работы генератора, было проведено тестирование опытного образца аппаратного ГСЧ, построенного на основе шумового диода ND103L [3].

Методика тестирования аппаратного генератора случайных чисел

В качестве аппаратного ГСЧ для тестирования был взят опытный образец генератора случайных чисел, который построен на основе шумового диода ND103L. Структурная схема этого генератора представлена на рис. 1.

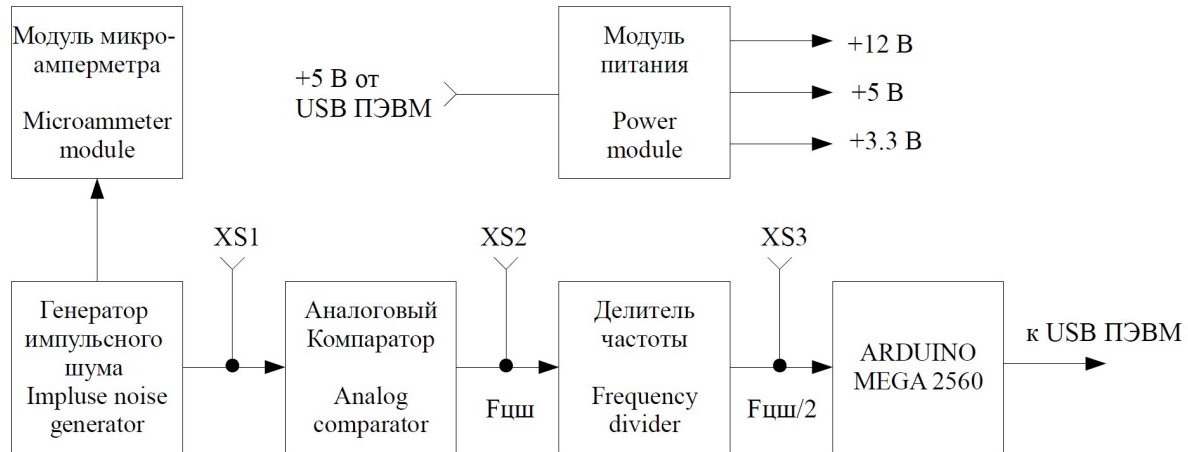


Рис. 1. Структурная схема опытного образца аппаратного ГСЧ на шумовом диоде ND103L

Fig. 1. Structural circuit of a hardware RNG prototype based on a noise diode ND103L

Основным элементом данного генератора является шумовой диод ND103L производства Республики Беларусь, который, согласно документации (URL.: https://integral.by/sites/default/files/diodi_generatori_shuma.pdf), имеет следующие технические характеристики:

- постоянное напряжение шума (при токе 100 мкА) – 6–9 В;
- граничная частота (при токе 50 мкА) – не менее 1 МГц;
- спектральная плотность напряжения шума (при токе 50 мкА) – не менее 30 мкВ/МГц;
- неравномерность спектральной плотности напряжения шума (при токе 50 мкА) – не более 3 дБ.

В начальной стадии лавинного пробоя, возникающего при превышении обратного тока смещения значения пробоя, процесс ударной ионизации носителей заряда оказывается неустойчивым. В результате неравномерности генерации новых носителей заряда возникающие шумы случайны для определенного диапазона токов. Эти шумы и являются источником энтропии для ГСЧ.

Тестируемый ГСЧ работает следующим образом. На шумовой диод подается обратное напряжение выше напряжения пробоя (≥ 9 В). Величина обратного тока, протекающего через диод, регулируется с помощью потенциометра и отображается на микроамперметре. Интенсивность электрических флуктуаций пропорциональна величине обратного тока. В результате лавинного пробоя на выходе конденсатора появляется случайный шумовой импульсный сигнал, который с помощью компаратора и делителя частоты преобразуется в двухуровневый случайный цифровой шум. С помощью цифрового осциллографа BORDO можно наблюдать и измерять основные электрические параметры в контрольных точках. Модуль ARDUINO на основе микроконтроллера ATmega 2560 преобразует двухуровневый случайный цифровой шумовой сигнал в последовательность 0 и 1, которая передается на ПЭВМ и записывается в файл.

Для проверки любых генераторов случайных чисел используются различные наборы тестов, такие как NIST (Национального института стандартов и технологий США) и Diehard. Для аппаратных ГСЧ используют также тесты, анализирующие сам источник энтропии [4].

Тестирование аппаратного генератора проводилось с использованием тестов NIST, позволяющих исследовать различные типы отклонения от случайности, которые могут существовать в последовательности. В основе тестов NIST лежит понятие нулевой гипотезы, т. е. предположения, что между двумя фактами отсутствует какая-либо взаимосвязь. В рамках

нулевой гипотезы элементы последовательности встречаются равновероятно и независимо друг от друга, т. е. последовательность является истинно случайной и ГСЧ производит «хорошие» случайные числа. При интерпретации результатов тестирования статистика последовательности, снятой с генератора, сравнивается с эталонной, и если отклонение больше заданной погрешности p , то делается вывод, что нулевая гипотеза не верна с большей надежностью. Чем больше выбирается значение погрешности p , тем менее достоверным является результат тестирования последовательности [1].

Порядок снятия данных с аппаратного генератора и их тестирования следующий. Вначале с генератора был снят ряд наборов двоичных данных при различных значениях исходных параметров: T_c – период снятия значений, $I_{обр}$ – обратный ток шумового диода, $t_{окр}$ – температура окружающей среды. Смена исходных параметров происходила следующим образом: сначала снимались данные при постоянных значениях температуры $t_{окр}$ и периода T_c и разных значениях тока $I_{обр}$, далее снимались данные при постоянных значениях температуры $t_{окр}$ и тока $I_{обр}$ и разных значениях периода T_c , после чего снимались данные при постоянных значениях периода T_c и тока $I_{обр}$ и разных значениях температуры $t_{окр}$.

На каждом этапе было получено 55 последовательностей длиной 1 000 000 бит, снятых с периодом T_c при токе $I_{обр}$ и температуре $t_{окр}$. Для тестирования алгоритмами NIST использовалось значение погрешности $p = 0,01$, которое применяется для криптографических целей [1]. Полученные последовательности двоичных данных при заданном значении погрешности были протестированы при помощи следующих тестов NIST: 1) частотный блочный тест; 2) тест на последовательность одинаковых битов; 3) тест на самую длинную последовательность единиц в блоке; 4) тест рангов бинарных матриц; 5) спектральный тест; 6) тест на совпадение неперекрывающихся шаблонов; 7) тест на совпадение перекрывающихся шаблонов; 8) универсальный статистический тест Маурера; 9) тест приближительной энтропии; 10) тест на периодичность; 11) тест на линейную сложность [1].

Результаты тестирования аппаратного генератора случайных чисел

Результаты тестирования последовательностей, снятых с аппаратного ГСЧ при разных исходных параметрах, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Результаты тестирования аппаратного ГСЧ
Table 1. Hardware RNG test results

№	Параметры / Результаты Parameters / Results	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Σ
1	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 30 \text{ мкА}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	10
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 40 \text{ мкА}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 50 \text{ мкА}$	+		+	+	+	+	+	+	+		+	9
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 60 \text{ мкА}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 70 \text{ мкА}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+		+	10
	$t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 80 \text{ мкА}$				+	+			+			+	4
2	$t_{окр} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $T_c = 15 \text{ мкс}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$t_{окр} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $T_c = 30 \text{ мкс}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$t_{окр} = 23 \text{ }^\circ\text{C}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $T_c = 45 \text{ мкс}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
3	$T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $t_{окр} = 12 \text{ }^\circ\text{C}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $t_{окр} = 24 \text{ }^\circ\text{C}$	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	11
	$T_c = 15 \text{ мкс}$, $I_{обр} = 20 \text{ мкА}$, $t_{окр} = 48 \text{ }^\circ\text{C}$	+		+	+	+			+			+	6

В табл. 1 указаны результаты трех экспериментов, в ходе которых снимались и тестировались данные при изменении одного из параметров генератора. Успешно пройденные тесты отмечены символом «+» в соответствующих столбцах 1–11. В последнем столбце указана сумма всех успешно пройденных тестов при заданных исходных параметрах.

Обсуждение результатов тестирования аппаратного генератора случайных чисел

Из результатов тестирования можно сделать следующие выводы:

- генератор относительно стабильно работает в диапазоне обратного тока через шумовой диод 20–70 мкА, проходя большинство тестов, а при дальнейшем увеличении тока количество пройденных тестов уменьшается, что говорит о увеличении неравномерности спектральной плотности напряжения шума с увеличением обратного тока через шумовой диод;
- при изменении периода снятия значений количество пройденных тестов и соответственно стабильность работы генератора не изменяются. Это обусловлено тем, что частота выборки не превышает пределы граничной частоты равномерности спектра шумового диода;
- при увеличении температуры окружающей среды уменьшается число пройденных тестов и соответственно стабильность генератора, так как с увеличением температуры напряжение пробоя диода возрастает. Это происходит потому, что длина свободного пробега носителей заряда уменьшается, а следовательно, уменьшается энергия, которую носитель может приобрести на этом расстоянии в электрическом поле [5].

Полученные результаты говорят о том, что тестируемый аппаратный ГСЧ в широком диапазоне исходных параметров можно использовать в определенных приложениях. Для улучшения стабильности работы можно осуществить его доработку: усовершенствовать и более тщательно настроить аппаратную часть, а также добавить программную реализацию алгоритмов постобработки данных, которая улучшит статистические характеристики потока двоичных данных.

Список литературы

1. Rukhin A., Soto J., Nechvatal J., Smid M., Barker E., Leigh S., Levenson M., Vangel M., Heckert A., Dray J., Vo S. *A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2010.
2. Будько М.Б., Будько М.Ю., Гирик А.В., Грозов В.А. *Методы генерации и тестирования случайных последовательностей*. СПб.: Университет ИТМО; 2019.
3. Буслюк В.В., Ворончук С.И., Лешкевич И.В. Режимы применения кремниевых генераторных диодов для создания широкополосного шума. *5-я Международная научная конференция «Материалы и структуры современной электроники»*. 2012;1:24-27.
4. Herrero-Collantes M., Garcia-Escartin J.C. Quantum Random Number Generators. *Reviews of Modern Physics*. 2017;89(1).
5. Буслюк В.В., Нерода И.Ю., Петлицкий А.Н., Просолович В.С., Янковский Ю.Н., Лановский Р.А. Электрофизические параметры генераторных диодов для создания широкополосного шума. *Журнал Белорусского государственного университета. Физика*. 2017;1:95-99.

References

1. Rukhin A., Soto J., Nechvatal J., Smid M., Barker E., Leigh S., Levenson M., Vangel M., Heckert A., Dray J., Vo S. *A Statistical Test Suite for Random and Pseudorandom Number Generators for Cryptographic Applications*. Gaithersburg: National Institute of Standards and Technology; 2010.
2. Budko M.B., Budko M.Yu., Girik A.V., Grozov V.A. [Methods for generating and testing random sequences]. St. Petersburg: ITMO University; 2019. (in Russ.)
3. Buslyuk V.V., Voronchuk S.I., Leshkevich I.V. [Modes of using silicon oscillator diodes to create wideband noise]. *Pyataya Mezhdunarodnaya nauchnaya konferenciya «Materialy i struktury sovremennoj elektroniki» = 5th International Scientific Conference “Materials and Structures of Modern Electronics”*. 2012;1:24-27. (in Russ.)

4. Herrero-Collantes M., Garcia-Escartin J.C. Quantum Random Number Generators. *Reviews of Modern Physics*. 2017;89(1).
5. Busliuk V.V., Neroda I.Y., Pyatlitski A.N., Prasalovich U.S., Yankouski Y.N., Lanouski R.A. [Electrophysical parameters of the diodes for broadband noise generation]. *ZHurnal Belorusskogo gosudarstvennogo universiteta. Fizika = Journal of the Belarusian State University. Physics*. 2017;1:95-99. (in Russ.)

Вклад авторов

Пикуза М.О. получил ряд наборов данных с генератора при разных исходных параметрах, протестировал их с помощью тестов от NIST и сделал выводы.

Михневич С.Ю. выполнила постановку задачи, научное руководство.

Authors' contribution

Pikuza M.O. got a number of datasets from the generator with different initial parameters, tested them using tests from NIST and made conclusions.

Mikhnevich S.Yu. set out the problems and acted as a scientific advisor.

Сведения об авторах

Пикуза М.О., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Михневич С.Ю., к.ф.-м.н, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Pikuza M.O., Postgraduate student at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mikhnevich S.Yu., PhD, Associate Professor at the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-33-650-31-78;
e-mail: maksimpikuza@gmail.com
Пикуза Максим Олегович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-33-650-31-78;
e-mail: maksimpikuza@gmail.com
Pikuza Maksim Olegovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-43-51>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.33.054

НЕРАЗРУШАЮЩЕЕ ТЕСТИРОВАНИЕ ЗАПОМИНАЮЩИХ УСТРОЙСТВ НА БАЗЕ ДВОЙНЫХ АДРЕСНЫХ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЕЙ

В.Н. ЯРМОЛИК¹, И. МРОЗЕК², В.А. ЛЕВАНЦЕВИЧ¹, Д.В. ДЕМЕНКОВЕЦ¹

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²Белостоцкий технический университет (г. Белосток, Республика Польша)

Поступила в редакцию 3 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Анализируется эффективность применения классических неразрушающих тестов для тестирования запоминающих устройств (ЗУ) и их основные недостатки, среди которых выделяют большую временную сложность и низкую диагностическую способность. Определяется понятие двойной адресной последовательности 2A и приводятся примеры их формирования на базе счетчиковых адресных последовательностей и последовательностей кода Грея. Синтезируется базовый элемент неразрушающих тестов с применением двойных адресных последовательностей и исследуются его обнаруживающая и диагностическая способности для различных неисправностей ЗУ. Приводятся два новых неразрушающих теста ЗУ *March_2A_1* и *March_2A_2*, для которых оценивается их временная сложность и эффективность обнаружения неисправностей ЗУ. Показывается существенно меньшая временная сложность предложенных тестов и высокая диагностическая способность по сравнению с классическими неразрушающими тестами.

Ключевые слова: тестирование вычислительных систем, запоминающие устройства, маршевые тесты памяти, многократное тестирование, неразрушающее тестирование.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ярмолик В.Н., Мрозек И., Леванцевич В.А., Деменковец Д.В. Неразрушающее тестирование запоминающих устройств на базе двойных адресных последовательностей. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 43-51.

TRANSPARENT MEMORY TESTING BASED ON DUAL ADDRESS SEQUENCES

VYACHESLAV N. YARMOLIK¹, IRENEUSZ MROZEK², VLADIMIR A. LEVANTSEVICH¹,
DENIS V. DEMENKOVETS¹

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²Bialystok University of Technology (Bialystok, Poland)

Submitted 3 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. An effectiveness of the application of classical non-destructive tests for testing storage devices and their main disadvantages, among which there are great time complexity and low diagnostic ability, are analysed. The concept of double address sequence $2A$ is defined and the examples of their formation based on counter address sequences and Gray code are provided. The basic element of non-destructive tests with the use of double address sequences is synthesized and its detecting and diagnostic abilities for different storage devices defects are explored. There are two new non-destructive tests of memory devices *March_2A_1* and *March_2A_2* and an estimation of their time complexity and efficiency of failure detection are given. A significantly lower time complexity of the proposed tests and their high diagnostic ability in comparison with classical non-destructive tests are shown.

Keywords: testing of computing systems, storage devices, march memory tests, repeated testing, transparent testing.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interest.

For citation. Yarmolik V.N., Mrozek I., Levantsevich V.A., Demenkovets D.V. Transparent memory testing based on dual address sequences. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 43-51.

Введение

Важным достижением в развитии функционального диагностирования запоминающих устройств (ЗУ) является разработка и применение методов неразрушающего тестирования [1–3]. Основное свойство данных методов заключается в сохранении данных, хранимых в памяти, после проведения процедуры тестирования. Первые системы неразрушающего периодического тестирования ЗУ использовали резервные модули ЗУ для временного хранения данных, что требовало больших временных затрат на перезаписывание содержимого ЗУ. Приведенные ограничения привели к появлению новых подходов к реализации неразрушающего тестирования ЗУ. Одной из первых является предложенная Б. Конеманом технология, основанная на применении сигнатурного анализа, что приводило к маскированию некоторых, в том числе и простейших, неисправностей [1]. Развитием неразрушающего тестирования ЗУ стала методика, предложенная М. Николаидисом (M. Nicolaidis), которая основывается на применении классических маршевых тестов [3, 4]. Однако реализация подобных неразрушающих тестов требует существенного увеличения их временной сложности, которое достигает 40–50%. Кроме того, данная методика из-за эффекта маскирования не позволяет получить 100% покрывающую способность даже для однократных неисправностей и имеет невысокую диагностическую способность из-за сложности получения информации о виде и месте возникшей неисправности ЗУ [1, 5].

Представленная статья посвящена новому подходу к построению неразрушающих тестов, основанному на применении адресных последовательностей с двукратным повторением адресов.

Анализ эффективности тестов запоминающих устройств

Следует выделить две особенности неразрушающих тестов. Во-первых, неразрушающие тесты строятся на базе классических маршевых тестов в силу того, что только в случае маршевых тестов достигается приемлемая временная сложность процедуры тестирования [1, 2]. Во-вторых, все существующие тесты, в том числе и неразрушающие, рассматриваются для ЗУ, содержащих N однобитных запоминающих элементов (ЗЭ), где $N = 2^m$.

В общем случае маршевый тест включает в себя коллекцию маршевых элементов, которые называются фазами теста [4]. Так, например, тест *March Y*: $\{\uparrow\downarrow(w0); \uparrow(r0, w1, r1); \downarrow(r1, w0, r0); \uparrow\downarrow(r0)\}$ состоит из четырех фаз.

Для формального описания неисправных состояний ЗУ используются математические модели их неисправностей, отражающие реальные физические дефекты ЗУ [2–4, 8, 9]. Наиболее сложными моделями неисправностей, обнаруживаемых маршевыми тестами и покрывающих более простые неисправности, являются кодочувствительные неисправности – *PSFk* (pattern sensitive faults) и их модификации в виде граничных кодочувствительных неисправностей *NPSFk*, в которых могут участвовать любые $k \leq 9$ из N ячеек ЗУ. Среди неисправностей *NPSFk* выделяют пассивные *NPSFk* (*PNPSFk*), в которых содержимое базовой ячейки нельзя изменить в зависимости от определенного набора в любых k из N ячеек [3, 4].

Число всевозможных *PNPSFk* для памяти емкостью N бит определяется согласно выражению [3]

$$Q_{TN}(PNPSFk) = k \cdot 2^k \cdot \binom{N}{k}. \quad (1)$$

А максимально возможное число $Q_{MAX}(PNPSFk)$ обнаруживаемых неисправностей *PNPSFk* при применении однократного маршевого теста равняется [3]

$$Q_{MAX}(PNPSFk) = (8 \cdot (k - 2) + 2 \cdot 4) \times \binom{N}{k} = 8 \cdot (k - 1) \cdot \binom{N}{k}. \quad (2)$$

Соответственно, однократные маршевые тесты не могут превосходить максимально возможную полноту покрытия *PNPSFk* неисправностей, определяемую выражением [3]

$$FC_{MAX}(PNPSFk) = \frac{Q_{MAX}(PNPSFk)}{Q_{TN}(PNPSFk)} \cdot 100 \% = \frac{k - 1}{k \cdot 2^{k-3}} 100 \%. \quad (3)$$

Последнее соотношение показывает предельные возможности классических маршевых тестов в части обнаружения сложных кодочувствительных неисправностей *PNPSFk*.

На примере теста *March Y* рассмотрим эффективность его оригинальной реализации и неразрушающей модификации по методике Николаидиса, приведенной в табл. 1 [3, 4].

Таблица 1. Две версии реализации теста *March Y*
Table 1. Transparent *March Y* test implementation

Описание теста Test description	Тест Test	Сложность теста The complexity of the test
Неразрушающий тест Transparent test	$\{\uparrow(rb, r\bar{b}); \downarrow(r\bar{b}, rb); \uparrow\downarrow(rb)\}$ $\{\uparrow(rb, w\bar{b}, r\bar{b}); \downarrow(r\bar{b}, wb, rb); \uparrow\downarrow(rb)\}$	12N

В описании неразрушающего теста, представленного в табл. 1, b принимает произвольное значение 0 или 1, а \bar{b} инверсное по отношению к b значение. Сам тест состоит из двух частей, а именно, *начального неразрушающего теста* $\{\uparrow(rb, r\bar{b}); \downarrow(r\bar{b}, rb); \uparrow\downarrow(rb)\}$, необходимого для получения эталонной сигнатуры S_F , и *базового неразрушающего теста* $\{\uparrow(rb, w\bar{b}, r\bar{b}); \downarrow(r\bar{b}, wb, rb); \uparrow\downarrow(rb)\}$ [1, 2]. После реализации базового теста формируется реальная сигнатура S_R , которая сравнивается с ранее полученной эталонной S_F . По результату сравнения принимается решение о наличии либо отсутствии неисправности в ЗУ. Несовпадение реальной сигнатуры S_R с ее эталонным значением S_F свидетельствует лишь о неисправном состоянии

памяти. Получение уточняющей информации о неисправности требует дополнительных временных затрат [2].

Для классической реализации теста *March Y* была показана 100 % полнота покрытия относительно простейших неисправностей типа *SAF* и *TF* [1, 2]. Однако для неисправности взаимного влияния *CFid* обнаруживаемыми являются только четыре из восьми их видов, а именно: $\langle \uparrow, 0 \rangle$, $\langle \downarrow, 0 \rangle$, $\langle 1, \uparrow \rangle$, $\langle 1, \downarrow \rangle$, что составляет только 50 % полноты покрытия неисправностей *CFid*. Еще меньшая полнота покрытия теста *March Y* достигается в классе сложных кодочувствительных неисправностей. Обнаруживаемыми неисправностями *PNPSFk* являются только два их вида: $\langle 0, 0, 0, \dots, 0, \uparrow, 1, 1, 1, \dots, 1 \rangle$ и $\langle 0, 0, 0, \dots, 0, \downarrow, 1, 1, 1, \dots, 1 \rangle$. Например, при $k = 3$ тест *March Y* обнаруживает $\langle 0, 0, \uparrow \rangle$, $\langle 0, \uparrow, 1 \rangle$, $\langle \uparrow, 1, 1 \rangle$, $\langle \downarrow, 1, 1 \rangle$, $\langle 0, \downarrow, 1 \rangle$ и $\langle 0, 0, \downarrow \rangle$, что составляет 6 из $k \cdot 2^k = 3 \cdot 2^3 = 24$ неисправностей в k произвольных ячейках ЗУ. В процентном исчислении, полнота покрытия *PNPSF3* составляет только 25 %. Для произвольного k полнота покрытия неисправностей *PNPSFk* определяется выражением

$$FC_{March Y}(PNPSFk) = \frac{Q_{March Y}(PNPSFk)}{Q_{TN}(PNPSFk)} \cdot 100 \% = \frac{1}{2^{k-1}} \cdot 100 \% \quad (4)$$

Количественно эффективность обнаружения неисправностей *PNPSFk* неразрушающей версией теста *March Y* также оценивается выражением (4). Однако в отличие от классической реализации будут обнаруживаться *PNPSFk* неисправности вида $\langle b, b, b, \dots, b, \downarrow, \bar{b}, \bar{b}, \bar{b}, \dots, \bar{b} \rangle$ и $\langle \bar{b}, \bar{b}, \bar{b}, \dots, \bar{b}, \uparrow, b, b, b, \dots, b \rangle$, где символ \downarrow означает инвертирование текущего значения b ячейки ЗУ. Аналогичное утверждение справедливо и для неисправностей взаимного влияния *CF*, однако и в первом, и во втором случае возможно необнаружение указанных неисправностей из-за их отображения в конфигурации многократных ошибок, которые могут быть замаскированы при получении реальной сигнатуры [5].

Неразрушающие маршевые тесты на базе двойных адресных последовательностей

Для повышения эффективности применения маршевого теста используют подход, при котором тест повторяется несколько раз, но с разной последовательностью адресов на каждой итерации маршевого теста [11]. Использование различных адресных последовательностей исследовалось в рамках многократных тестов [2, 3, 11]. Основное внимание уделялось выбору вида адресных последовательностей и различных их модификаций [3, 11]. В настоящей работе предлагается использование модифицированных адресных последовательностей для построения нового класса неразрушающих тестов ЗУ, а также повышения эффективности неразрушающего тестирования ЗУ. Первоначально рассмотрим общие свойства адресных последовательностей и их модификацию для реализации неразрушающих тестов. Под счетчиковой адресной последовательностью $A_c = A_c(0)A_c(1)A_c(2)\dots A_c(N-2)A_c(N-1)$, где $A_c(j) \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$, $j \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$ и $N = 2^m$, понимают последовательность, в которой адреса $A_c = c_{m-1}c_{m-2}\dots c_2c_1c_0$, $c_i \in \{0, 1\}$, $i \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$, формируются по правилам функционирования m -разрядного двоичного суммирующего счетчика [3].

Следует отметить, что в произвольной адресной последовательности $A = a_{m-1}a_{m-2}\dots a_2a_1a_0$, где $a_i \in \{0, 1\}$, $i \in \{0, 1, 2, \dots, m-1\}$, количество двоичных неповторяющихся комбинаций $a_{m-1}a_{m-2}\dots a_{i+1}a_{i-1}\dots a_2a_1a_0$ при $a_i = 0$ и количество комбинаций $a_{m-1}a_{m-2}\dots a_{i+1}a_{i-1}\dots a_2a_1a_0$ при $a_i = 1$ одинаково и равно 2^{m-1} [3].

Данное свойство можно обобщить в виде следующего утверждения.

Утверждение 1. Произвольная совокупность любых $m-1$ разрядов $a_{m-1}a_{m-2}\dots a_{i+1}a_{i-1}\dots a_2a_1a_0$ из m разрядов $a_{m-1}a_{m-2}\dots a_2a_1a_0$ исходной адресной последовательности A формирует адресную последовательность, в которой каждый $m-1$ разрядный адрес генерируется дважды.

В качестве примера в табл. 2 приведены подобные адресные последовательности для случая исходной счетчиковой последовательности $A_C = c_3c_2c_1c_0$ и последовательности кода Грея $A_G = g_3g_2g_1g_0$ для $m = 4$.

Таблица 2. Адресные последовательности A_C и A_G , и их $2A_C$ и $2A_G$ модификации
Table 2. Address sequences A_C and A_G , and their $2A_C$ and $2A_G$ modifications

$A_C =$ $= c_3c_2c_1c_0$	$2A_C =$ $= c_3c_2c_1$	$2A_C =$ $= c_3c_2c_0$	$2A_C =$ $= c_3c_1c_0$	$2A_C =$ $= c_2c_1c_0$	$A_G =$ $= g_3g_2g_1g_0$	$2A_G =$ $= g_3g_2g_1$	$2A_G =$ $= g_3g_2g_0$	$2A_G =$ $= g_3g_1g_0$	$2A_G =$ $= g_2g_1g_0$
0000 (0)	000 (0)	000 (0)	000 (0)	000 (0)	0000 (0)	000 (0)	000 (0)	000 (0)	000 (0)
0001 (1)	000 (0)	001 (1)	001 (1)	001 (1)	0001 (1)	000 (0)	001 (1)	001 (1)	001 (1)
0010 (2)	001 (1)	000 (0)	010 (2)	010 (2)	0011 (3)	001 (1)	001 (1)	011 (3)	011 (3)
0011 (3)	001 (1)	001 (1)	011 (3)	011 (3)	0010 (2)	001 (1)	000 (0)	010 (2)	010 (2)
0100 (4)	010 (2)	010 (2)	000 (0)	100 (4)	0110 (6)	011 (3)	010 (2)	010 (2)	110 (6)
0101 (5)	010 (2)	011 (3)	001 (1)	101 (5)	0111 (7)	011 (3)	011 (3)	011 (3)	111 (7)
0110 (6)	011 (3)	010 (2)	010 (2)	110 (6)	0101 (5)	010 (2)	011 (3)	001 (1)	101 (5)
0111 (7)	011 (3)	011 (3)	011 (3)	111 (7)	0100 (4)	010 (2)	010 (2)	000 (0)	100 (4)
1000 (8)	100 (4)	100 (4)	100 (4)	000 (0)	1100 (12)	110 (6)	110 (6)	100 (4)	100 (4)
1001 (9)	100 (4)	101 (5)	101 (5)	001 (1)	1101 (13)	110 (6)	111 (7)	101 (5)	101 (5)
1010 (10)	101 (5)	100 (4)	110 (6)	010 (2)	1111 (15)	111 (7)	111 (7)	111 (7)	111 (7)
1011 (11)	101 (5)	101 (5)	111 (7)	011 (3)	1110 (14)	111 (7)	110 (6)	110 (6)	110 (6)
1100 (12)	110 (6)	110 (6)	100 (4)	100 (4)	1010 (10)	101 (5)	100 (4)	110 (6)	010 (2)
1101 (13)	110 (6)	111 (7)	101 (5)	101 (5)	1011 (11)	101 (5)	101 (5)	111 (7)	011 (3)
1110 (14)	111 (7)	110 (6)	110 (6)	110 (6)	1001 (9)	100 (4)	101 (5)	101 (5)	001 (1)
1111 (15)	111 (7)	111 (7)	111 (7)	111 (7)	1000 (8)	100 (4)	100 (4)	100 (4)	000 (0)

В дальнейшем подобные адресные последовательности будем называть двойными адресными последовательностями ($2A$) в силу того, что каждый адрес, как это видно из табл. 2, формируется дважды. Возрастающую последовательность подобных адресов обозначим как $2\uparrow$, а убывающую – как $2\downarrow$. Для каждой адресной последовательности в табл. 2 приведены бинарные значения адресов и десятичные эквиваленты, представленные в скобках. Вид двойной адресной последовательности зависит как от выбранных разрядов исходной адресной последовательности A , так и от их перестановок, и, соответственно, общее количество последовательностей $2A$, полученных из исходной последовательности A , равняется $m!$. Очевидно, что число подобных последовательностей для реальных значений m велико, также как и разнообразие их свойств.

Основная идея неразрушающих маршевых тестов на базе двойных адресных последовательностей основана на том, что при двукратном инвертировании содержимого ячейки ЗУ его значение останется прежним. В соответствии с этим простейшим свойством операции инвертирования построим базовый элемент неразрушающего маршевого теста на базе двойной адресной последовательности $2A$. Так же, как и в классических неразрушающих тестах, маршевый элемент должен начинаться с операции чтения rb содержимого b текущей ячейки ЗУ. Это необходимо для однозначных действий с текущей ячейкой ЗУ, которые основываются на знании значения ее содержимого. Следующей операцией должна быть операция записи инверсного значения \bar{b} по отношению к только что прочитанному содержимому b , так как подобная операция является необходимым условием активизации неисправностей ЗУ. За операцией записи следует операция чтения этой же текущей ячейки ЗУ для проверки правильности выполнения операции инвертирования ее содержимого. Далее переходят к следующему запоминающему элементу, который соответствует следующему адресу адресной последовательности. Использование двойных адресных последовательностей $2A$ обеспечивает повторное инвертирование каждой ячейки ЗУ, сохраняя в итоге его исходное состояние. Таким образом, базовый элемент имеет следующий вид:

$$2 \uparrow (rb, \bar{wb}, rb). \tag{5}$$

Отметим, что использование в базовом элементе двойной адресной последовательности ($2\uparrow$) приводит к тому, что каждая ячейка ЗУ последовательно выполнит два перехода из b в \bar{b} , и наоборот, из \bar{b} в b , сохранив, таким образом, свое начальное значение. Правильность выполнения обоих переходов (\uparrow) и (\downarrow), а также операций чтения нулевых и единичных

значений обеспечивает вторая операция чтения rb базового элемента (5). Для иллюстрации реализации базового элемента (5), рассмотрим его применение для процедуры тестирования ЗУ, содержащего $N = 8$ запоминающих элементов с исходным содержимым $0\ 1\ 1\ 1\ 0\ 1\ 0\ 0$. В качестве двойной адресной последовательности используются последовательности адресов $2A_C = c_3c_1c_0$ и $2A_G = g_3g_1g_0$, приведенные в табл. 2. Пошаговое изменение содержимого ЗУ для обоих случаев двойной адресации приведено в табл. 3. На каждом шаге реализации базового элемента только одна запоминающая ячейка (выделена жирным шрифтом и курсивом) изменяет свое состояние на противоположное. После выполнения базового элемента (5) начальное состояние ЗУ осталось неизменным.

Базовый элемент на основе двойных адресных последовательностей позволяет синтезировать два неразрушающих маршевых теста (6).

$$\begin{aligned} \text{March}_{2A_1} &: \{\uparrow\downarrow(rb); 2\uparrow(rb, \overline{wb}, rb); \uparrow\downarrow(rb)\}, (8N); \\ \text{March}_{2A_2} &: \{\uparrow\downarrow(rb); 2\uparrow(rb, \overline{wb}, rb); 2\downarrow(rb, \overline{wb}, rb) \uparrow\downarrow(rb)\}, (14N); \end{aligned} \quad (6)$$

Таблица 3. Процедура реализации базового элемента (5) неразрушающего теста для двух видов адресации
Table 3. The procedure for implementing the basic element (5) of a transparent test for two types of addressing

ЗУ	Адреса Addresses	0	1	2	3	4	5	6	7	ЗУ	Адреса Addresses	0	1	2	3	4	5	6	7
	Содержимое Content	0	1	1	1	0	1	0	0		Содержимое Content	0	1	1	1	0	1	0	0
$2A_C =$ $= c_3c_1c_0$	000 (0)	1	1	1	1	0	1	0	0	$2A_G =$ $= g_3g_1g_0$	000 (0)	1	1	1	1	0	1	0	0
	001 (1)	1	0	1	1	0	1	0	0		001 (1)	1	0	1	1	0	1	0	0
	010 (2)	1	0	0	1	0	1	0	0		011 (3)	1	0	1	0	0	1	0	0
	011 (3)	1	0	0	0	0	1	0	0		010 (2)	1	0	0	0	0	1	0	0
	000 (0)	0	0	0	0	0	1	0	0		010 (2)	1	0	1	0	0	1	0	0
	001 (1)	0	1	0	0	0	1	0	0		011 (3)	1	0	1	1	0	1	0	0
	010 (2)	0	1	1	0	0	1	0	0		001 (1)	1	1	1	1	0	1	0	0
	011 (3)	0	1	1	1	0	1	0	0		000 (0)	0	1	1	1	0	1	0	0
	100 (4)	0	1	1	1	1	1	0	0		100 (4)	0	1	1	1	1	1	0	0
	101 (5)	0	1	1	1	1	0	0	0		101 (5)	0	1	1	1	1	0	0	0
	110 (6)	0	1	1	1	1	0	1	0		111 (7)	0	1	1	1	1	0	0	1
	111 (7)	0	1	1	1	1	0	1	1		110 (6)	0	1	1	1	1	0	1	1
100 (4)	0	1	1	1	0	0	1	1	110 (6)	0	1	1	1	1	0	0	1		
101 (5)	0	1	1	1	0	1	1	1	111 (7)	0	1	1	1	1	0	0	0		
110 (6)	0	1	1	1	0	1	0	1	101 (5)	0	1	1	1	1	1	0	0		
111 (7)	0	1	1	1	0	1	0	0	100 (4)	0	1	1	1	0	1	0	0		

В обоих тестах произвольный порядок адресов $\uparrow\downarrow$ для первой и последней операций чтения должен быть одинаков, возрастающий либо убывающий. Это связано с тем, что первая фаза тестов $March_{2A_1}$ и $March_{2A_2}$ используется для сжатия исходного состояния ЗУ и получения эталонной сигнатуры S_F , а их последняя фаза – для получения реального значения сигнатуры S_R после выполнения предыдущих базовых элементов. В случае проявления неисправностей в ходе выполнения базовых элементов их наличие будет определяться выполнением неравенства $S_F \neq S_R$.

Анализ эффективности неразрушающих тестов $March_{2A_1}$ и $March_{2A_2}$

При допущении, что при реализации теста $March_{2A_1}$ исходное содержимое ЗУ нулевое, т. е. для всех ячеек $b = 0$, а базовый элемент $2\uparrow(rb, \overline{wb}, rb)$ представляется двумя последовательными элементами $\uparrow(rb, \overline{wb}, rb)$ и $\downarrow(rb, \overline{wb}, rb)$, можно заключить об эквивалентности тестов $March_{2A_1}$ и $March_Y$. Их эквивалентность заключается как во временной сложности, равной $8N$, так и в покрывающей способности различных типов неисправностей.

Как уже отмечалось ранее, базовый элемент (5) обеспечивает активизацию и обнаружение всех простейших неисправностей типа SAF и TF . Операция записи \overline{wb} и двойная адресация $2A$ обеспечивают условие активизации данных неисправностей, а их обнаружение

обеспечивает вторая операция чтения rb . Таким образом, для простейших неисправностей предложенный тест $March_2A_1$, в отличие от известных неразрушающих тестов, имеет максимальную диагностическую способность.

Аналогично максимально возможная диагностическая способность теста $March_2A_1$ достигается и для случая сложных кодочувствительных неисправностей $PNPSFk$. Выполнение базового элемента в случае $PNPSFk$ позволяет идентифицировать адрес базовой ячейки, которая не может выполнить один из переходов в этой ячейке для конкретного содержимого в соседних ячейках. Кроме того, тест $March_2A_1$ позволяет достичь такого же значения полноты покрытия для $PNPSFk$, как и тест $March_Y$. И в данном случае обнаруживаются только два их вида $\langle u, u, u, \dots, u, \uparrow, u, u, u, \dots, u \rangle$ и $\langle d, d, d, \dots, d, \downarrow, d, d, d, \dots, d \rangle$, где $u, d \in \{0, 1\}$. Значения содержимого соседних ячеек u и d зависят как от их начального состояния, так и от вида последовательности адресов $2A$. Например, для случая ЗУ с 8 ячейками и неисправностей $PNPSF3$ в ячейках с адресами 1, 3 и 5, применив адресную последовательность $2AC = c3c1c0$, базовый элемент (5) позволяет обнаруживать следующие неисправности: $\langle 1, 0, \uparrow \rangle$, $\langle 1, 1, \downarrow \rangle$, $\langle 1, \uparrow, 1 \rangle$, $\langle 1, \downarrow, 0 \rangle$, $\langle \uparrow, 1, 1 \rangle$ и $\langle \downarrow, 1, 1 \rangle$ (см. табл. 3). При тех же условиях изменение двойной адресной последовательности $2AC = c3c1c0$ на $2AG = g3g1g0$ приводит к обнаружению уже другого множества $PNPSF3$: $\langle 1, 1, \uparrow \rangle$, $\langle 1, 1, \downarrow \rangle$, $\langle 1, \uparrow, 0 \rangle$, $\langle 1, \downarrow, 0 \rangle$, $\langle \uparrow, 1, 1 \rangle$ и $\langle \downarrow, 1, 1 \rangle$ (см. табл. 3). Таким образом, однократное применение теста $March_2A_1$ позволяет достичь полноты покрытия, равной 25 %, для $PNPSF3$.

Для обнаружения неисправностей взаимного влияния необходимо выполнить анализ состояния ячейки-жертвы после активизации конкретной неисправности, что невозможно в рамках базового элемента (5). Поэтому данные неисправности обнаруживаются по факту изменения четного количества инвертирования содержимого ячейки-жертвы базовым элементом (5) на нечетное количество. Это приводит к тому, что конечное состояние ЗУ будет отличаться от его исходного состояния, что приведет к выполнению неравенства $SF \neq SR$. Количественно полнота покрытия тестом $March_2A_1$ таких неисправностей равняется полноте покрытия теста $March_Y$, как это видно, например, для $CFid$ из экспериментальных данных, приведенных в табл. 4.

Таблица 4. Полнота покрытия неисправностей $CFid$ тестом $March_2A_1$ в процентах (%)
Table 4. Faults coverage of $CFid$ faults by $March_2A_1$ test in percent (%)

$CFid$	$2Ac_0$	$2Ac_1$	$2Ac_2$	$2Ac_3$	$2Ac_4$	$2Ac_5$	$2Ac_6$	$2Ac_7$	$2Ac_8$
$(0, \uparrow)$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$(1, \uparrow)$	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
$(0, \downarrow)$	0,00	0,39	1,18	2,75	5,88	12,16	24,71	49,80	100,00
$(1, \downarrow)$	100,00	99,61	98,82	97,25	94,12	87,84	75,29	50,20	0,00
$(\uparrow, 0)$	0,00	0,39	1,18	2,75	5,88	12,16	24,71	49,80	100,00
$(\uparrow, 1)$	100,00	99,61	98,82	97,25	94,12	87,84	75,29	50,20	0,00
$(\downarrow, 0)$	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
$(\downarrow, 1)$	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
<i>Total</i>	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00	50,00

Как видно из приведенной таблицы, для памяти емкостью $N = 256$ общее (*Total*) количество обнаруживаемых неисправностей тестом $March_2A_1$, независимо от адресной последовательности $2A$, всегда равняется 50 %.

Неразрушающий маршевый тест $March_2A_2$ отличается от $March_2A_1$ наличием второго базового элемента с обратным порядком адресов $2A$, что расширяет его возможности обнаруживать сложные неисправности, сохраняя эффективность $March_2A_1$ для более простых неисправностей. Действительно, для случая $PNPSFk$, дополнительно к $2k$ неисправностям вида $\langle u, u, u, \dots, u, \uparrow, u, u, u, \dots, u \rangle$ и $\langle d, d, d, \dots, d, \downarrow, d, d, d, \dots, d \rangle$, где $u, d \in \{0, 1\}$, тест $March_2A_2$ в пределе будет обнаруживать еще $2k$ неисправностей вида $\langle u, u, u, \dots, u, \downarrow, u, u, u, \dots, u \rangle$ и $\langle d, d, d, \dots, d, \uparrow, d, d, d, \dots, d \rangle$. Например, тест $March_2A_1$ с адресной последовательности $2Ac = c3c1c0$ обнаруживает $PNPSF3$: $\langle 1, 1, \uparrow \rangle$, $\langle 0, 0, \downarrow \rangle$, $\langle 0, \uparrow, 0 \rangle$, $\langle 1, \downarrow, 1 \rangle$, $\langle \uparrow, 1, 0 \rangle$ и $\langle \downarrow, 0, 1 \rangle$ для запоминающих ячеек 5, 6 и 7 (см. табл. 3). В то же время первый базовый элемент теста $March_2A_2$ обнаруживает те же $PNPSF3$, а второй базовый элемент дополнительно

обеспечивает обнаружение следующих неисправностей: $\langle 0,0,\uparrow \rangle$, $\langle 1,1,\downarrow \rangle$, $\langle 1,\uparrow,1 \rangle$, $\langle 0,\downarrow,0 \rangle$, $\langle \uparrow,0,1 \rangle$ и $\langle \downarrow,1,0 \rangle$. Отметим, что удвоение обнаруживаемых тестом *March_2A_2* неисправностей *PNPSFk* достижимо только для случая, когда первый базовый элемент обнаруживает такие неисправности $\langle u,u,u,\dots, u,\uparrow,u,u,u,\dots,u \rangle$ и $\langle d,d,d,\dots,d,\downarrow,d,d,d,\dots,d \rangle$, для которых состояния соседних ячеек различны. В противном случае второй базовый элемент будет обнаруживать те же две неисправности $\langle u,u,u,\dots, u,\uparrow,u,u,u,\dots,u \rangle$ и $\langle d,d,d,\dots,d,\downarrow,d,d,d,\dots,d \rangle$, но в обратной последовательности. В то же время при увеличении значения k вероятность совпадения состояний ячеек – соседей в неисправностях $\langle u,u,u,\dots,u,\uparrow,u,u, u,\dots,u \rangle$ и $\langle d,d,d,\dots,d,\downarrow,d,d,d,\dots,d \rangle$ заметно уменьшается, что позволяет констатировать близость полноты покрытия *PNPSFk* к 50 %.

Заключение

Приведенный выше анализ свидетельствует о высокой покрывающей способности новых неразрушающих тестов, которая сравнима с покрывающей способностью *March Y* для *March_2A_1* и эффективностью двукратного теста *March Y* по отношению к *March_2A_2*. Кроме того, наличие базового элемента (5) в обоих тестах обеспечивает максимальную диагностическую способность, достижимую в рамках маршевых тестов для неисправностей *SAF*, *TF* и *PNPSFk*. Третьим несомненным достоинством предложенных маршевых тестов является их невысокая временная сложность.

Список литературы

1. Nicolaidis M. Theory of transparent BIST for RAMs. *IEEE Transactions on Computers*. 1996;45(10):1141-1156.
2. Ярмолик В.Н., Мурашко И.А., Куммерт А., Иванюк А.А. *Неразрушающее тестирование запоминающих устройств*. Минск: Бестпринт; 2005.
3. Ярмолик С.В., Занкович А.П., Иванюк А.А. *Маршевые тесты для самотестирования ОЗУ*. Минск: Бестпринт; 2009.
4. Goor A.J. *Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice*. Chichester, UK: John Wiley & Sons; 1991.
5. Yarmolik V.N., Nicolaidis M., Kebichi O. Aliasing-Free Signature Analysis for RAM BIST. *IEEE International Test Conference*. 1994:368-377.
6. Bushnell M.L., Agrawal V.D. *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits*. N.Y., USA: Kluwer Academic Publishers; 2000.
7. Goor A.J., Al-Ars Z. Functional Memory Faults: A Formal Notation and a Taxonomy. *IEEE VLSI Test Symposium (VTS'00)*. 2000:281-289.
8. Hamdioui S., Wadsworth R., Reyes J.D., Goor A.J. Memory Fault Modeling Trends: A Case Study. *Journal of Electronic Testing*. 2004;20(3):245-255.
9. Иванюк А.А. Моделирование функциональных неисправностей цифровых устройств средствами языка VHDL. *Информатика*. 2007;1:30-39.
10. Mrozek I., Yarmolik V.N. Multiple Control Random Testing. *Fundamenta Informaticae*. 2019;144(1):23-43.

References

1. Nicolaidis M. Theory of transparent BIST for RAMs. *IEEE Transactions on Computers*. 1996;45(10):1141-1156.
2. Yarmolik V.N., Murashko I.A., Kummert A., Ivaniuk A.A. [Transparent Memory Testing]. Minsk: Bestprint; 2005. (in Russ.)
3. Yarmolik V.N., Zankovich A.P., Ivaniuk A.A. [RAM Self-Test March Tests]. Minsk: Bestprint; 2009. (in Russ.)
4. Goor A.J. *Testing Semiconductor Memories: Theory and Practice*. Chichester, UK: John Wiley & Sons; 1991.
5. Yarmolik V.N., Nicolaidis M., Kebichi O. Aliasing-Free Signature Analysis for RAM BIST. *IEEE International Test Conference*. 1994:368-377.
6. Bushnell M.L., Agrawal V.D. *Essentials of Electronic Testing for Digital, Memory & Mixed-Signal VLSI Circuits*. N.Y., USA: Kluwer Academic Publishers; 2000.
7. Goor A.J., Al-Ars Z. Functional Memory Faults: A Formal Notation and a Taxonomy. *IEEE VLSI Test Symposium (VTS'00)*. 2000:281-289.
8. Hamdioui S., Wadsworth R., Reyes J.D., Goor A.J. Memory Fault Modeling Trends: A Case Study. *Journal of Electronic Testing*. 2004;20(3):245-255.

9. Ivaniuk A.A. [Modeling functional faults of digital devices using VHDL]. *Informatika = Informatics*. 2007;1:30-39. (in Russ.).
10. Mrozek I., Yarmolik V.N. Multiple Control Random Testing. *Fundamenta Informaticae*. 2019;144(1):23-43.

Вклад авторов

Ярмолик В.Н. сформулировал идею неразрушающих тестов на базе двойных адресных последовательностей.

Леванцевич В.А. и Деменковец Д.В. принимали участие в обобщении и анализе результатов.

Мрозек И. провел экспериментальные исследования.

Authors' contribution

Yarmolik V.N. formulated the idea of non-destructive tests based on double address sequences. Levantsevich V.A. and Demenkovets D.V. took part in the synthesis and analysis of the results. Mrozek I. conducted the experimental research.

Сведения об авторах

Ярмолик В.Н., д.т.н, профессор, профессор кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мрозек И., доктор, адъюнкт, адъюнкт Белостокского технического университета.

Леванцевич В.А., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Деменковец Д.В., магистр технических наук, старший преподаватель кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Yarmolik V.N., D.Sc., Professor, Professor at the Department of Information Technology Software of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Mrozek I., D.Sc., Adjunct, Adjunct of the Bialystok University of Technology.

Levantsevich V.A., M.Sc., Senior Lecture at the Department of Information Technology Software of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Demenkovets D.V., M.Sc., Senior Lecture at the Department of Information Technology Software of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-29-769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Ярмолик Вячеслав Николаевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-769-96-77;
e-mail: yarmolik10ru@yahoo.com
Yarmolik Vyacheslav Nikolaevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-52-60>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375, 681.782.52

ВЛИЯНИЕ ПРОНИКАЮЩЕЙ РАДИАЦИИ НА ПАРАМЕТРЫ АНАЛОГОВЫХ КОМПОНЕНТОВ БАЗОВОГО МАТРИЧНОГО КРИСТАЛЛА МН2ХА030

О.В. ДВОРНИКОВ¹, В.А. ЧЕХОВСКИЙ², В.Л. ДЯТЛОВ², Я.Д. ГАЛКИН^{2,3}, Н.Н. ПРОКОПЕНКО⁴

¹Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (г. Минск Республика Беларусь)

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета
(г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

⁴Донской государственный технический университет (г. Ростов-на-Дону, Российская Федерация)

Поступила в редакцию 8 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Для уменьшения стоимости, времени проектирования и испытаний радиационно-стойких аналоговых интегральных микросхем часто применяют базовые структурные и базовые матричные кристаллы. Одним из таких базовых матричных кристаллов является МН2ХА030, использующий в качестве активных элементов биполярные и полевые транзисторы, управляемые *p-n*-переходом. Целью статьи является оценка влияния проникающей радиации на статические параметры операционного усилителя OАmp2 и компараторов АDComp1 и АDComp3, изготовленных на базовом матричном кристалле МН2ХА030. Приведены результаты измерений основных параметров аналоговых компонентов после воздействия гамма-квантов ⁶⁰Со с поглощенной дозой до 700 крад и флюенса быстрых электронов до $2,9 \cdot 10^{15}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. Как следует из результатов измерений, операционный усилитель OАmp2 обеспечивает удовлетворительный уровень основных статических параметров (входной ток, напряжение смещения нуля, коэффициент усиления напряжения) при флюенсе быстрых электронов до $3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. При флюенсе быстрых электронов больше 10^{15} эл./см² происходит спад коэффициента усиления напряжения и рост напряжения смещения нуля. Последнее может быть вызвано уменьшением эффективности встроенной в операционный усилитель обратной связи по синфазному сигналу при значительном спаде коэффициента усиления базового тока биполярных транзисторов. Все изученные аналоговые компоненты обеспечивают удовлетворительный уровень основных статических параметров при флюенсе быстрых электронов до $3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ и поглощенной дозе гамма-квантов ⁶⁰Со не менее 700 крад. Предполагается, что стойкость OАmp2, АDComp1, АDComp3 к воздействию гамма-квантов ⁶⁰Со существенно выше и требует дальнейшего изучения. Разработанные аналоговые компоненты могут найти применение в устройствах считывания сигналов, необходимых в аналоговых интерфейсах датчиков космического приборостроения и ядерной электроники.

Ключевые слова: операционный усилитель, компаратор, базовый матричный кристалл, радиационная стойкость.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Галкин Я.Д., Прокопенко Н.Н. Влияние проникающей радиации на параметры аналоговых компонентов базового матричного кристалла МН2ХА030. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 52-60.

IONIZING RADIATION INFLUENCE ON PARAMETERS OF ANALOG COMPONENTS OF THE MASTER SLICE ARRAY MH2XA030

OLEG V. DVORNIKOV¹, VLADIMIR A. TCHEKHOVSKI², VALIANTSIN L. DZIATLAU²,
YAROSLAV D. GALKIN^{2,3}, NIKOLAY N. PROKOPENKO⁴

¹*Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC) (Minsk, Republic of Belarus)*

²*Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University (Minsk, Republic of Belarus)*

³*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

⁴*Don State Technical University (Rostov-on-Don, Russia)*

Submitted 8 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Structured arrays and master slice arrays are often used to reduce cost, design and test time for radiation hardened analog integrated circuits. One of such master slice arrays is MH2XA030, which uses bipolar and junction field-effect transistors. The purpose of this article is to estimate the effect of ionizing radiation on the parameters of the operational amplifier OAmpl2 and comparators ADComp1 and ADComp3 created on the MH2XA030 master slice array. The results of measurements of analog components after exposure to ⁶⁰Co gamma quanta with an absorbed dose of up to 700 krad and a fast electron fluence of up to $2.9 \cdot 10^{15}$ el./cm² with an energy of 6 MeV are presented. The OAmpl2 operational amplifier provides a satisfactory level of basic static parameters (input current, offset voltage, voltage gain) at a fast electron fluence of up to $3.7 \cdot 10^{14}$ el./cm² with an energy of 6 MeV. There are a decrease in the voltage gain and an increase in the offset voltage at electron fluence of greater than 10^{15} el./cm². The latter can be caused by a decrease in the efficiency of the common-mode signal feedback integrated into operational amplifier with a significant drop in current gain of bipolar transistors. All considered analog components provide a satisfactory level of basic static parameters at a fast electron fluence of up to $3.7 \cdot 10^{14}$ el./cm² with an energy of 6 MeV and an absorbed dose of ⁶⁰Co gamma quanta of at least 700 krad. It is assumed that resistance of OAmpl2, ADComp1, ADComp3 to the action of ⁶⁰Co gamma quanta is significantly higher and requires further research. The developed analog components can be used in signal reading devices required in front-end of sensors for space instrumentation and nuclear electronics.

Keywords: operational amplifier, comparator, master slice array, radiation hardiness.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Galkin Y.D., Prokopenko N.N. Ionizing radiation influence on parameters of analog components of the master slice array MH2XA030. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 52-60.

Введение

Специализированные аналоговые интегральные микросхемы (ИМС), сохраняющие свою работоспособность при воздействии проникающей радиации, необходимы в ряде областей науки и техники. Однако их разработка, изготовление и особенно сертификация требуют больших временных и материальных затрат. Для устранения данных недостатков рационально разрабатывать такие ИМС на базовых матричных кристаллах (БМК) и базовых структурных кристаллах (БСК). Основные элементы БМК и БСК проходят ряд испытаний на этапе разработки, включая испытания на стойкость к воздействию проникающей радиации, положительные результаты которых распространяются на все изделия, создаваемые на этих базовых кристаллах.

В связи с вышеперечисленным был разработан БСК МН2ХА010 [1–3], позволяющий создавать аналоговые микроэлектронные устройства, у которых при воздействии проникающей радиации, а именно гамма-квантов ⁶⁰Со с поглощенной дозой до 3 Мрад и флюенса быстрых электронов до $3 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 4 МэВ, основные параметры остаются в пределах норм,

установленных для диапазона рабочих температур [4, 5], т.е. такие изделия являются радиационно-стойкими.

Однако при апробации ряда аналоговых ИМС, выполненных на БСК МН2ХА010, были выявлены особенности, затрудняющие его применение, а именно: высокое напряжение смещения нуля (V_{OFF}) операционного усилителя (ОУ), не превышающее 5 мВ в нормальных условиях; избыточное быстродействие ОУ (частота единичного усиления около 200 МГц) и компаратора (задержка менее 5 нс), обусловленное, в том числе, большим током потребления (I_{CC}).

Для устранения указанных ограничений был создан БМК МН2ХА030. В этом БМК конструкции интегральных элементов и технологический маршрут их изготовления такой же, как в БСК МН2ХА010, но площади эмиттерных переходов транзисторов почти в 2 раза меньше, схемы аналоговых компонентов модифицированы и существенно уменьшен ток потребления [6, 7].

Целью статьи является рассмотрение изменения статических параметров ОУ ОАmp2, компараторов напряжений АDComp1 и АDComp3, созданных на БМК МН2ХА030, при воздействии проникающей радиации и их сравнение с параметрами компонентов БСК МН2ХА010.

Методика проведения эксперимента

Электрические схемы ОУ ОАmp2, компараторов АDComp1, АDComp3, а также их функционирование и особенности выбора режима работы подробно рассмотрены в [4–7]. Обратим внимание на то, что при анализе результатов радиационных исследований необходимо учитывать следующие отличия ОАmp2, АDComp1, АDComp3 от ОУ и компараторов БСК:

- рабочие токи транзисторов в ОАmp2 почти в 2 раза меньше, чем в ОУ БСК, хотя плотность эмиттерного тока осталась без изменений. Кроме того, ОАmp2 имеет парафазный выход и дифференциальный каскад (ДК), осуществляющий отрицательную обратную связь (ОС) по синфазному сигналу для уменьшения влияния технологического разброса параметров интегральных элементов и внешних воздействующих факторов на V_{OFF} ;

- оба компаратора реализованы на полупроводниковых резисторах и *n-p-n*-транзисторах БМК, имеющих высокую радиационную стойкость. Компараторы включают три ДК, причем выходной ДК имеет «открытый» коллектор;

- уменьшение потребляемой мощности в АDComp1, АDComp3 обеспечено снижением минимально допустимого напряжения питания до ± 3 В благодаря замене сдвига уровня на стабилитронах на цепи последовательно соединенных прямосмещенных *p-n*-переходов и уменьшению эмиттерных токов всех транзисторов;

- в АDComp1, АDComp3 предусмотрена возможность регулировки внешним резистором максимального выходного тока;

- ток потребления АDComp3 существенно уменьшен по сравнению с АDComp1.

Полупроводниковые пластины с экспериментальными образцами БМК были изготовлены в ОАО «Интеграл», кристаллы собраны в 48-выводные метало-керамические корпуса Н16.48-1ВН.

Облучение образцов гамма-квантами ^{60}Co осуществлялось на установке «Исследователь» [8] при температуре около 300 К, электронами – на установке У003 со следующими характеристиками: номинальная энергия электронов 6 МэВ, плотность потока электронов $(2\div 8) \cdot 10^{11}$ эл·см⁻²·с⁻¹. Все образцы при воздействии проникающей радиации были с закороченными выводами.

Воздействие быстрых электронов на кремниевые биполярные транзисторы приводит главным образом к образованию дефектов смещения, а генерация положительного заряда в окисле незначительна. Поэтому воздействие быстрых электронов целесообразно описывать величиной флюенса электронов (F_E) с указанием их энергии (E_E). Используя разработанный метод прогнозирования радиационной стойкости ИМС [9], по результатам, полученным для быстрых электронов, можно оценить стойкость биполярных транзисторов и схем к нейтронам

и протонам. Так, флюенс электронов с $E_E = 6$ МэВ вызовет в биполярных транзисторах такие же дефекты смещения, как флюенс нейтронов $F_N = 0,378 \cdot F_E$ с энергией $E_N = 1,5$ МэВ.

Схемы включения ОУ и компараторов, выражения для определения параметров приведены на рис. 1, а, б, в.

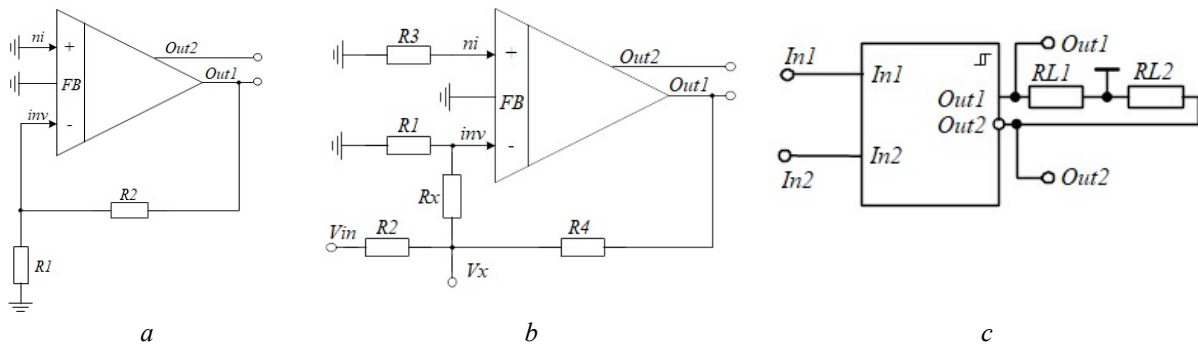


Рис. 1. Схемы включения: а – ОУ при определении I_{CC} и V_{OFF} . $R1 = 100$ Ом, $R2 = 30$ кОм, $V_{OFF} = -V_{OUT1}/(R2/R1+1)$; б – ОУ при определении K_V , $R1 = R3 = 100$ Ом, $R2 = R4 = 10$ кОм, $R_x = 20$ кОм, $K_V = (R_x/R1) \cdot (V_{OUT1}/V_x)$; в – компараторы при измерениях. $RL1 = RL2 = 100$ Ом

Fig. 1. Connection diagrams: а – op-amp when defining I_{CC} and V_{OFF} . $R1 = 100$ Ohm, $R2 = 30$ kOhm, $V_{OFF} = -V_{OUT1}/(R2/R1+1)$; б – op-amp when determining K_V , $R1 = R3 = 100$ Ohm, $R2 = R4 = 10$ kOhm, $R_x = 20$ kOhm, $K_V = (R_x/R1) \cdot (V_{OUT1}/V_x)$; в – comparators for measurements, $RL1 = RL2 = 100$ Ohm

Измерения компараторов проводились по схеме включения, показанной на рис. 1, в, следующим образом:

1. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ и регистрируют ток потребления I_{CC} по выводу V_{CC} мультиметром Agilent 34401A.

2. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ и регистрируют мультиметром Agilent 34401A токи, протекающие через входы $In1$ (I_{IH}) и $In2$ (I_{IL}). Подают напряжение $V_{IN1} = 100$ мВ и $V_{IN2} = 300$ мВ и регистрируют токи, протекающие через входы $In1$ (I_{IH}) и $In2$ (I_{IL}). Рассчитывают входной ток по входу $In1$ как $I_{INP1} = 0,5(I_{IH}+I_{IL})$, по входу $In2$ – как $I_{INP2} = 0,5(I_{IH}+I_{IL})$.

3. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = 300$ мВ и $V_{IN2} = 100$ мВ, регистрируют мультиметром Agilent 34401A напряжение V_{OUT1} и рассчитывают $I_{OMAX1} = -V_{OUT1}/RL1$, затем подают $V_{IN1} = 100$ мВ и $V_{IN2} = 300$ мВ, регистрируют напряжение V_{OUT2} и рассчитывают $I_{OMAX2} = -V_{OUT2}/RL2$.

4. От прибора Agilent 33250A подают напряжение $V_{IN1} = V_{CM} = 100$ мВ и импульс прямоугольного напряжения V_{IN2} с базовой линией $V_B = V_{CM} - 100$ мВ и амплитудой $V_A = V_{OD} + 100$ мВ. Изменяя параметр сигнала V_{OD} , регистрируют осциллографом Agilent MSO 6052A появление выходного импульса V_{OUT2} . Чувствительность компаратора $S = V_{OD}$ при появлении выходного импульса V_{OUT2} .

Результаты и их обсуждение

Основные результаты измерений приведены на рис. 2–10. Зависимости для компаратора ADComp1 ниже не показаны. Качественно они подобны таким же зависимостям для ADComp3, а так как эмиттерные токи транзисторов ADComp1 больше, то радиационное изменение его параметров меньше.

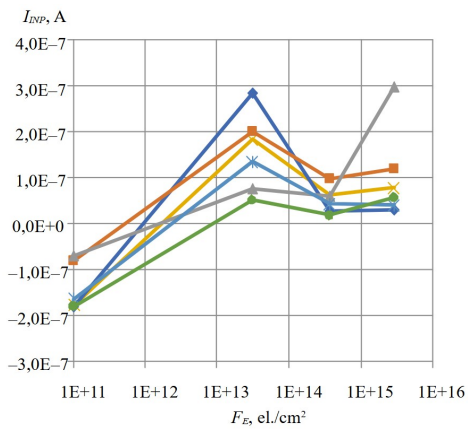


Рис. 2. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 2. Dependence of the input current I_{INP} of different OAmP2 samples on the electron fluence

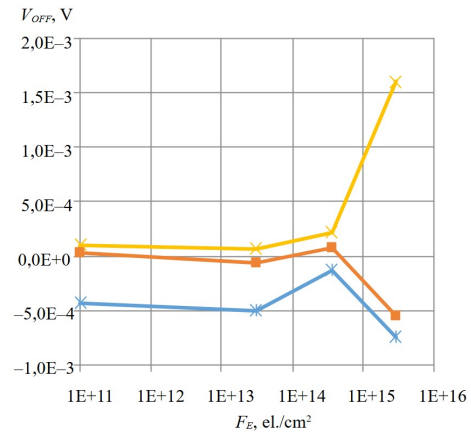


Рис. 3. Зависимость напряжения смещения нуля V_{OFF} разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 3. The dependence of the offset voltage V_{OFF} of different OAmP2 samples on the electron fluence

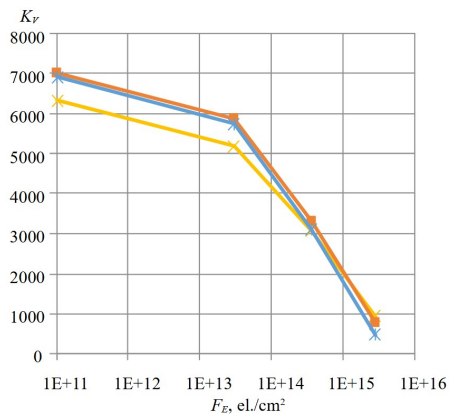


Рис. 4. Зависимость коэффициента усиления напряжения K_V разных образцов OAmP2 от флюенса электронов
Fig. 4. Dependence of the voltage gain K_V of different OAmP2 samples on the electron fluence

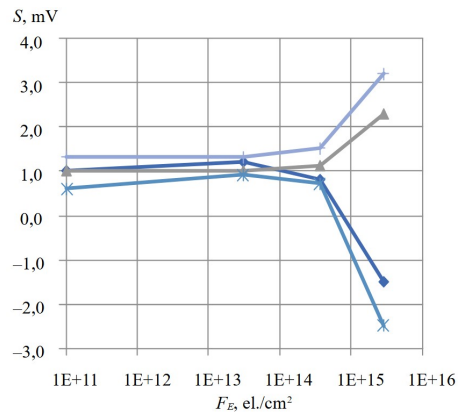


Рис. 5. Зависимость чувствительности S разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 5. Dependence of the sensitivity S (minimum input overdrive voltage) of different ADComp3 samples on the electron fluence

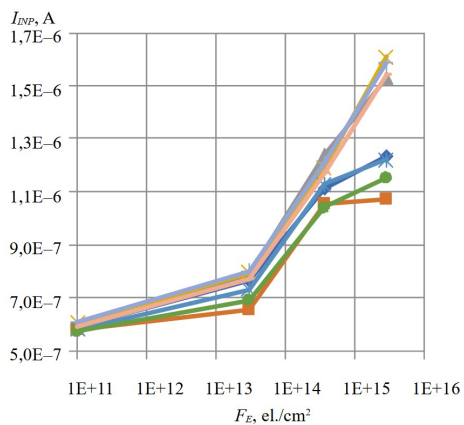


Рис. 6. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 6. Dependence of the input current I_{INP} of different ADComp3 samples on the electron fluence

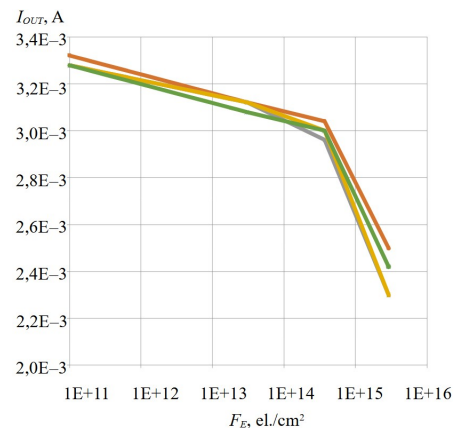


Рис. 7. Зависимость максимального выходного тока разных образцов ADComp3 от флюенса электронов
Fig. 7. Dependence of the maximum output current of different ADComp3 samples on the electron fluence

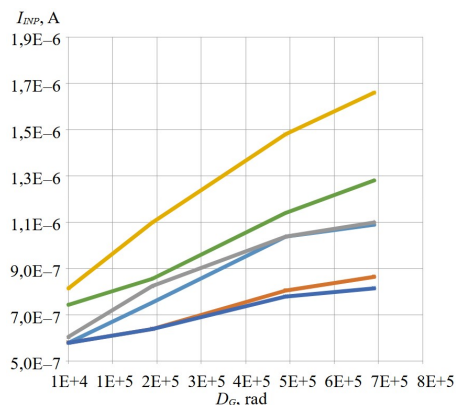


Рис. 8. Зависимость входного тока I_{INP} разных образцов ADCComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 8. Dependence of the input current I_{INP} of different ADCComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

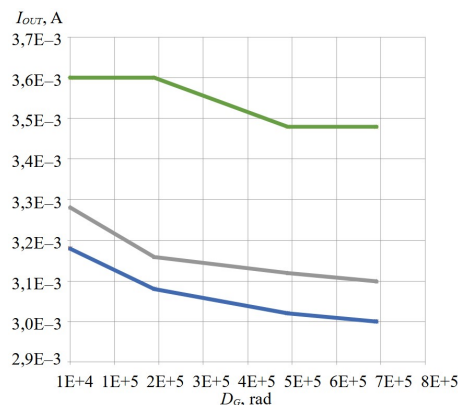


Рис. 9. Зависимость максимального выходного тока разных образцов ADCComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 9. Dependence of the maximum output current of different ADCComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

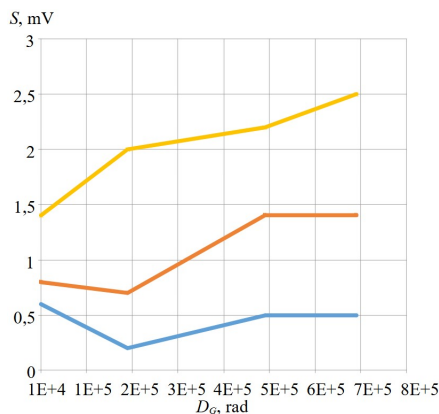


Рис. 10. Зависимость чувствительности S разных образцов ADCComp3 от поглощенной дозы гамма-квантов

Fig. 10. Dependence of the sensitivity S (minimum input overdrive voltage) of different ADCComp3 samples on the absorbed dose of gamma quanta

Анализ экспериментальных данных и рис. 4–10 позволяет сделать следующие выводы:

1. Ток потребления OАmp2 меньше, чем у ОУ БСК в 1,74 раза. Произведение коэффициента усиления на полосу пропускания (*Gain Bandwidth Product, GBP*) для OАmp2 – $GBP \approx 27$ МГц, что в 7,4 раза меньше чем у ОУ БСК ($GBP \approx 200$ МГц). Относительно высокое быстродействие ОУ БСК обусловлено тем, что он не полностью частотно компенсирован и работает без самовозбуждения при усилении больше 10. OАmp2 является более универсальным ОУ и работает без самовозбуждения при усилении, равном 2 и более, а его $GBP \approx 27$ МГц вполне достаточно для большинства аналоговых устройств.

2. Топология ОУ БСК разработана с учетом правил проектирования полностью заказных аналоговых ИМС [10].

ОУ OАmp2 реализован на БМК. Топология макроячейки БМК имеет универсальный характер и не предназначена для минимизации напряжения смещения нуля. Однако проведенные измерения показали малое напряжение смещения нуля OАmp2 и, следовательно, высокую эффективность работы ОС по синфазному сигналу. Для ОУ БСК среднее значение $V_{OFF} = -1,21$ мВ при существующем разбросе от минус 1,67 мВ до 0,21 мВ. Для ОУ OАmp2 среднее значение $V_{OFF} = 0,11$ мВ.

3. Меньшие эмиттерные токи транзисторов OАmp2 и приблизительное равенство коэффициентов усиления базового тока β *n-p-n*- и *p-n-p*-транзисторов в микрорежиме обеспечивают существенно меньшее среднее значение входного тока $I_{INP} = -1,125$ мкА по сравнению с ОУ БСК ($I_{INP} = 4,65$ мкА).

4. Компаратор ADComp3 имеет чувствительность в 3 раза лучше и входной ток почти в 2 раза меньше, чем компаратор БСК, хотя задержка распространения сигнала ADComp3 существенно больше.

5. ОУ OAmpl2 обеспечивает удовлетворительный уровень основных статических параметров (I_{INP} , V_{OFF} , K_V) при флюенсе быстрых электронов $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ. При $F_E > 10^{15}$ эл./см² происходит спад K_V и рост V_{OFF} . Последнее может быть вызвано уменьшением эффективности ОС по синфазному сигналу при значительном спаде β биполярных транзисторов. Радиационное изменение I_{INP} , V_{OFF} , K_V OAmpl2 не хуже, чем ОУ БСК.

6. Чувствительность компаратора ADComp3 при $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² и $D_G < 700$ крад слабо зависит от уровня ПР.

7. Зависимости входного и выходного тока от F_E и D_G у ADComp3 и компаратора БСК схожи. Преимуществом ADComp3 является возможность увеличения I_{OMAX} за счет изменения сопротивления внешнего резистора. Следовательно, компаратор ADComp3 является радиационно-стойким при $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² и $D_G < 700$ крад.

Заключение

Для создания радиационно-стойких микросхем на БМК МН2ХА030 разработаны ОУ OAmpl2 и компараторы ADComp1, ADComp3. Преимуществом OAmpl2 по сравнению с ОУ типовых базовых матричных кристаллов является парафазный выходной сигнал и малое напряжение смещения нуля, обеспечиваемое встроенной ОС по синфазному сигналу.

К особенностям ADComp1, ADComp3 можно отнести высокую чувствительность и возможность изменения максимального выходного тока внешним резистором.

Все созданные аналоговые компоненты обеспечивают удовлетворительный уровень основных статических параметров при флюенсе быстрых электронов $F_E < 3,7 \cdot 10^{14}$ эл./см² с энергией 6 МэВ и поглощенной дозе гамма-квантов ⁶⁰Со не менее 700 крад.

С точки зрения авторов, стойкость OAmpl2, ADComp1, ADComp3 к воздействию гамма-квантов ⁶⁰Со существенно выше и требует дальнейшего изучения.

Список литературы

1. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Перспективы применения новых микросхем базового матричного и базового структурного кристаллов в датчиковых системах. *Труды СПИИРАН*. 2016;2(45):157-171.
2. Дворников О.В., Прокопенко Н.Н., Пахомов И.В., Бутырлагин Н.В., Бугакова А.В. Проектирование радиационно-стойких аналоговых процессоров и преобразователей сигналов датчиков на основе базового структурного кристалла МН2ХА010. *Радиотехника*. 2016;2:107-113.
3. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017;62(10):1193-1199. DOI: 10.1134/S1064226917090078.
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dziatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
5. Дворников О.В., Дятлов В. Л., Прокопенко Н. Н., Чеховский В. А., Пахомов И.В., Бугакова А.В. Статические параметры компараторов и зарядочувствительных усилителей базового структурного кристалла МН2ХА010 при воздействии гамма-излучения. *Глобальная ядерная безопасность*. 2017;2(23):38-46.
6. Дворников О.В., Чеховский В.А., Дятлов В.Л., Прокопенко Н.Н., Будяков П.С. Проектирование компараторов напряжений на базе элементов радиационно-стойкого низкотемпературного BiJFET базового матричного кристалла МН2ХА030. *Проблемы разработки перспективных микро- и нанoeлектронных систем*. 2018;4:10-16. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-4-10-16.
7. Dvornikov O.V., Dziatlau V.L., Tchekhovski V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip МН2ХА030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EexPolytech)*. 2018;13-17. DOI: 10.1109/EExPolytech.2018.8564415.

8. Бельков М.В., Бушева С.В., ред.: Шумилина А.Г. *Справочник центров коллективного пользования уникальным научным оборудованием и приборами*. № 7. Минск: БелИСА; 2017.
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev YU.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. 2013;2:925-927.
10. Абрамов И.И., Дворников О.В. *Проектирование аналоговых микросхем для прецизионных измерительных систем*. Минск: Академия управления при Президенте Республики Беларусь; 2006.

References

1. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. [Prospects for the use of new microcircuits of the master slice and base structural array in sensor systems]. *Trudy SPIIRAN*. 2016;2(45):157-171. (In Russ.)
2. Dvornikov O.V., Prokopenko N.N., Pahomov I.V., Butyrlagin N.V., Bugakova A.V. [Design of radiation-hardened analog processors and sensor signal converters based on the master slice array MH2XA010]. *Radiotekhnika*. 2016;2:107-113. (In Russ.)
3. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chekhovskii V.A. Configurable Structured Array for Fabrication of Radiation-Hardened Analog Interfaces. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2017;62(10):1193-1199. DOI: 10.1134/S1064226917090078.
4. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Dzatlau V.L., Prokopenko N.N. Influence of Ionizing Radiation on the Parameters of an Operational Amplifier Based on Complementary Bipolar Transistors. *Russian Microelectronics*. 2016;45(1):54-62. DOI: 10.1134/S1063739716010030.
5. Dvornikov O.V., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Chehovskiy V.A., Pahomov I.V., Bugakova A.V. [Static parameters of comparators and charge-sensitive amplifiers of the master slice array MH2XA010 when gamma radiation exposed to]. *Globalnaya yadernaya bezopasnost*. 2017;2(23):38-46. (In Russ.)
6. Dvornikov O.V., Chehovskiy V.A., Dyatlov V.L., Prokopenko N.N., Budyakov P.S. [Design of voltage comparators based on elements of radiation-hardened low-temperature BiJFET master slice array MH2XA030]. *Problemy razrabotki perspektivnykh mikro- i nanoelektronnykh sistem*. 2018;4:10-16. DOI: 10.31114/2078-7707-2018-4-10-16. (In Russ.)
7. Dvornikov O.V., Dzatlau V.L., Tchekhovskii V.A., Prokopenko N.N., Bugakova A.V. BiJFet Array Chip MH2XA030 – a Design Tool for Radiation-Hardened and Cryogenic Analog Integrated Circuits. *2018 IEEE International Conference on Electrical Engineering and Photonics (EexPolytech)*. 2018;13-17. DOI: 10.1109/EEExPolytech.2018.8564415.
8. Belkov M.V., Busheva S.V., red.: Shumilina A.G. [Directory of centers for the collective use of unique scientific equipment and instruments]. № 7. Minsk: BelISA; 2017. (In Russ.)
9. Dvornikov O.V., Tchekhovski V.A., Diatlov V.L., Bogatyrev YU.V., Lastovski S.B. Forecasting of bipolar integrated circuits hardness for various kinds of penetrating radiations. *2013 23rd International Crimean Conference "Microwave & Telecommunication Technology"*. 2013;2:925-927.
10. Abramov I.I., Dvornikov O.V. [Designing analog microcircuits for precision measuring systems]. Minsk: Academy of Public Administration under the aegis of the President of the Republic of Belarus; 2006. (In Russ.)

Вклад авторов

Дворников О.В. выполнил анализ современного состояния проблемы по теме работы, сформулировал цель и задачи исследований, осуществлял научное руководство.

Чеховский В.А. участвовал в разработке методик измерений параметров.

Дятлов В.Л. выполнил измерение параметров.

Галкин Я.Д. участвовал в разработке операционного усилителя и компараторов на базовом матричном кристалле MH2XA030, выполнял измерение параметров и анализ полученных результатов.

Прокопенко Н.Н. участвовал в разработке схемы операционного усилителя.

Authors' contribution

Dvornikov O.V. analyzed the current state of the problem, formulated the goals and objectives of the research and acted as a scientific supervision.

Tchekhovski V.A. participated in the development of methods for measuring parameters.

Dziatlau V.L. performed measurement of parameters.

Galkin Ya.D. participated in the development of an operational amplifier and comparators on the MH2XA030 master slice array, carried out measurement of parameters and analysis of the results obtained.

Prokopenko N.N. participated in the development of the operational amplifier circuit.

Сведения об авторах

Дворников О.В., д.т.н., доцент, главный научный сотрудник ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт».

Чеховский В.А., исполняющий обязанности заведующего лабораторией «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Дятлов В.Л., научный сотрудник лаборатории «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Галкин Я.Д., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники, младший научный сотрудник лаборатории «Электронные методы и средства эксперимента» НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Прокопенко Н.Н., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем и радиотехники Донского государственного технического университета.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-25-725-07-75;
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Галкин Ярослав Денисович

Information about the authors

Dvornikov O.V., D.Sc., Associate Professor, Chief Research Scientist of Minsk Research Instrument-Making Institute JSC (MNIPI JSC).

Tchekhovski V.A., Acting Laboratory Manager at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Dziatlau V.L., Research Scientist at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Galkin Y.D., Postgraduate student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Junior Researcher at the “Electronic methods and experiment means” Laboratory of Research Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Prokopenko N.N., D.Sc., Professor, Head of Information Systems and Radioelectronics Department of Don State Technical University.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-25-725-07-75;
e-mail: galkinyaroslav@gmail.com
Galkin Yaroslav Denisovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-61-69>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932

РАЗДЕЛЕНИЕ ИЗОБРАЖЕНИЙ НА ОБЛАСТИ ЛОКАЛЬНЫХ ЭКСТРЕМУМОВ С МОНОТОННЫМ ИЗМЕНЕНИЕМ ЯРКОСТИ ПИКСЕЛЕЙ

А.Т. НГУЕН, В.Ю. ЦВЕТКОВ

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 15 февраля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Рассматривается задача сегментации полутоновых изображений, при которой выделяются области локальных максимумов и минимумов (экстремумов) с монотонным изменением яркости пикселей от локальных экстремумов к границам областей. Для решения данной задачи предложена математическая модель и разработан алгоритм сегментации на основе встречного волнового выращивания областей локальных экстремумов. Разработанный алгоритм отличается от известных алгоритмов сегментации использованием множества порогов яркости (по числу областей), изменяющихся на единицу в каждом цикле, начиная от значений локальных экстремумов, с учетом увеличения или уменьшения яркости для выбора смежных пикселей, присоединяемых к областям, образованным от этих локальных экстремумов. Алгоритм обеспечивает большее отклонение яркостей пикселей от среднего значения в пределах области по сравнению с известными алгоритмами сегментации. Это не позволяет оценивать его эффективность с помощью известных показателей, основанных на дисперсии яркости в пределах области. В этой связи предложены оценки монотонности изменения яркости областей на основе кратчайших расстояний от каждого пикселя области до соответствующего локального экстремума по маршрутам, определяемым максимальным увеличением (для области локального максимума) или уменьшением (для области локального минимума) яркости пикселей, и учета количества пикселей, прерывающих монотонность изменения яркости сегмента. С помощью данных оценок показано, что предложенный алгоритм обеспечивает сегментацию искусственных и естественных полутоновых изображений с монотонным изменением яркости пикселей в областях локальных экстремумов. Данные свойства позволяют рассматривать разработанный алгоритм в качестве основы для выделения на изображениях текселей, пятен, малоконтрастных объектов.

Ключевые слова: сегментация изображений, встречное волновое выращивание областей, локальные экстремумы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Нгуен А.Т., Цветков В.Ю. Разделение изображений на области локальных экстремумов с монотонным изменением яркости пикселей. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 61-69.

DIVISION OF IMAGES INTO AREAS OF LOCAL EXTREMA WITH A MONOTONIC CHANGE IN PIXEL BRIGHTNESS

ANH TUAN NGUYEN, VIKTAR YU. TSVIATKOU

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 15 February 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. In this paper, the problem of segmentation of halftone images is considered, in which areas of local maxima and minima (extrema) are distinguished with a monotonic change in the brightness of pixels from local extrema to the boundaries of areas. To solve this problem, a mathematical model is proposed and a segmentation algorithm is developed on the basis of counter-wave growing of local extremum regions. The developed algorithm differs from the known segmentation algorithms by using a set of brightness thresholds (by the number of regions), varying by one in each cycle, starting from the values of local extrema, taking into account the increase or decrease in brightness to select adjacent pixels that are attached to the regions formed from these local extrema. The algorithm provides a greater deviation of pixel brightness from the average value within the region compared to known segmentation algorithms. This does not allow evaluating its efficiency using known indicators based on the variance of the brightness within the region. In this regard, estimates of the monotonicity of changes in the brightness of regions are proposed based on *a*) the shortest distances from each pixel of the region to the corresponding local extremum along the routes determined by the maximum increase (for the region of the local maximum) or decrease (for the region of the local minimum) the brightness of pixels and *b*) taking into account the number pixels that break the monotony of the segment brightness change. Using these estimates, it is shown that the proposed algorithm provides segmentation of artificial and natural grayscale images with a monotonic change in the brightness of pixels in the areas of local extrema. These properties allow us to consider the developed algorithm as a basis for the selection of texels, spots, low-contrast objects in images.

Keywords: image segmentation, counter-wave growing, local extrema.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Nguyen A.T., Tsviatkou V.Yu. Division of images into areas of local extrema with a monotonic change in pixel brightness. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 61-69.

Введение

В простейшем случае сегментация разделяет изображение на неперекрывающиеся области, объединяющие пиксели со схожими значениями яркости (цвета). Такая сегментация является базовой (суперпиксельной) для более сложной (безызыточной) сегментации: текстурной, семантической и объектной. Известны методы базовой сегментации изображений, основанные на взвешивании значений пикселей относительно порога [1], выращивании областей [2], разделении и слиянии областей [3], разделении изображения по линиям водораздела [4]. Многочисленные алгоритмы, развивающие данные методы, имеют различную вычислительную сложность и выделяют на одном и том же изображении, как правило, различное число областей. Относительная оценка качества сегментации этими алгоритмами имеет смысл только с привязкой к конкретной задаче, устанавливающей определенные требования к выделяемым областям. В данной работе рассматривается задача сегментации изображений, обеспечивающей монотонное изменение яркостей областей локальных максимумов и минимумов (экстремумов). Такая сегментация может использоваться для выделения на изображениях текселей, пятен, малоконтрастных объектов.

Для поиска локальных экстремумов применяются алгоритмы блочного и морфологического поиска. В блочных алгоритмах поиск экстремумов осуществляется в пределах перекрывающихся блоков. Они имеют низкую вычислительную сложность, но выделяют

без ошибок только строгие (однопиксельные) максимумы и минимумы, пропуская нестрогие экстремумы. Морфологические алгоритмы, имея относительно большую вычислительную сложность, дают более точные результаты, выделяя как строгие экстремумы, так и экстремальные области, образованные нестрогими экстремумами.

Для выделения сегментов относительно локальных максимумов и минимумов наиболее эффективны алгоритмы волнового выращивания областей (пороговая сегментация не учитывает локализацию пикселей и положение начальных точек роста [1]; обычное выращивание областей не контролирует направление роста области, что приводит к пересегментации [2]; разделение и слияние областей не учитывает положение начальных точек роста [3]; границы водораздела формируются в областях локальных экстремумов [4]). Общая модель волнового выращивания области основана на морфологической (полутоновой, цветной) дилатации. В простейшем волновом алгоритме SRG (Seeded Region Growing) смежные пиксели присоединяются к области, если имеют значения, близкие к средней яркости этой области [5]. Модификации SRG направлены на: обеспечение независимости формы области от порядка выборки пикселей; повышение точности определения границ сегментов в условиях шума и низкого контраста [6]; упрощение и уточнение процедуры выбора начальных точек роста [7]; распараллеливание процесса сегментации и аппаратную реализацию [7]; исключение пересегментации и работу в различных цветовых пространствах [7]. Известны градиентные волновые алгоритмы, учитывающие изменение значений пикселей относительно распространения фронта волны и модели физического распространения колебаний или жидкостей [8].

Для присоединения пикселя к области на каждой итерации рассмотренные алгоритмы используют критерии на основе средней яркости сегмента или значений граничных пикселей. Использование этих критериев позволяет уменьшить разброс значений яркости пикселей относительно среднего в пределах области, но не обеспечивает разделение изображения на области с монотонным изменением яркостей. Наиболее близкие задачи исследуются в [6–8], где базовый алгоритм SRG дополнен предварительным выделением границ, условиями присоединения пикселей к области при низком локальном контрасте, контролем скорости роста областей. Отдельной задачей является выбор критерия оценки качества сегментации в рассматриваемом случае.

Таким образом, целью работы является сегментация изображений, обеспечивающая монотонность изменения значений яркости областей локальных максимумов и минимумов.

Постановка задачи

Сегментация матрицы пикселей $M_P = \|m_P(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ ($m_P(y, x) \in [0, 2^B - 1]$, где B – разрядность пикселей) размером $Y \times X$ приводит к формированию матрицы сегментации $M_S = \|m_S(y, x)\|_{(y=0, Y-1, x=0, X-1)}$ такого же размера, значения элементов которой указывают на номера сегментов n_S , которым они принадлежат ($n_S \in [1, N_S]$, где N_S – число сегментов). Волновое выращивание областей SRG [5] использует предварительное определение начальных точек (функция F_{SP}) и цикл волнового роста областей по n_S , в который вложены выращивание области (функция F_{RG}) и выделение пикселей новой волны (функция F_{NW}):

$$M_S \Leftarrow F_{SP}(N_S, Y_S, X_S) \rightarrow (\mapsto^{n_S} F_{RG}(Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S), M_S, M_P, \Delta q), F_{NW}(Y_S, X_S, p_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)) \Leftarrow^{n_S}), \quad (1)$$

где $Y_S = \|y_S(p_S)\|_{(p_S=1, N_S)}$ и $X_S = \|x_S(p_S)\|_{(p_S=1, N_S)}$ – стеки y - и x -координат смежных пикселей (изначально хранят координаты начальных пикселей роста); p_S – указатель стеков Y_S и X_S ; \mapsto^{n_S} , \Leftarrow^{n_S} – символы начала и окончания цикла по областям (пока $\exists n_S (p_C(n_S) > 0)$);

$\{Y_C(n_S) = \|y_C(n_S, p_C(n_S))\|_{(p_C(n_S)=0, p_C(n_S)-1)}\}_{(n_S=1, N_S)}$, $\{X_C(n_S) = \|x_C(n_S, p_C(n_S))\|_{(p_C(n_S)=0, p_C(n_S)-1)}\}_{(n_S=1, N_S)}$ – множества

стеков y - и x -координат смежных пикселей; $P_C = \left| p_C(n_s) \right|_{(n_s=\overline{1, N_s})}$ – множество указателей; Δq – константа, ограничивающая условие присоединения пикселей к области. При инициализации модели (1) $m_s(y, x) \leftarrow 0$ при $y = \overline{0, Y-1}$, $x = \overline{0, X-1}$; в стеки Y_s и X_s записываются координаты N_s начальных пикселей роста.

Функция F_{SP} определяется выражениями:

$$m_s(y_s(n_s), x_s(n_s)) \leftarrow n_s; y_c(n_s, 0) \leftarrow y_s(n_s); x_c(n_s, 0) \leftarrow x_s(n_s); p_c(n_s) \leftarrow 1 \quad (2)$$

при $n_s = \overline{1, N_s}$.

Функция F_{RG} выполняется, пока $p_c(n_s) > 0$ (при инициализации функции $p_s \leftarrow 0$), и определяется выражениями:

$$\begin{aligned} p_c(n_s) &\leftarrow p_c(n_s) - 1; y \leftarrow y_c(n_s, p_c(n_s)); x \leftarrow x_c(n_s, p_c(n_s)); \\ \forall j \forall i (m_s(y+j, x+i) = 0) \wedge \left(\left| \overline{R(n_s)} - m_p(y+j, x+i) \right| \leq \Delta q \right) &\Rightarrow \\ \{ m_s(y+j, x+i) &\leftarrow m_s(y, x); y_s(p_s) \leftarrow y+j; x_s(p_s) \leftarrow x+i; p_s \leftarrow p_s + 1 \end{aligned} \quad (3)$$

при $j \in \{-1, 0, 1\}$, $i \in \{-1, 0, 1\}$, $|j| + |i| \neq 0$,

где $\overline{M(n_s)}$ – средняя яркость n_s -й области (пересчитывается с присоединением очередного пикселя).

Функция F_{NW} определяется выражениями:

$$y_c(n_s, p_c(n_s)) \leftarrow y_s(p_c(n_s)); x_c(n_s, p_c(n_s)) \leftarrow x_s(p_c(n_s)) \quad (4)$$

при $p_c(n_s) = \overline{0, p_s - 1}$.

Из (1) – (4) следует, что: а) не учитывается знак разности яркости присоединяемого пикселя и средней яркости области, что исключает возможность формирования сегментов с монотонным изменением яркости относительно локальных экстремумов; б) при $\Delta q > 1$ повышается скорость сегментации, но снижается точность определения границ сегментов, а использование малого значения Δq при большом локальном контрасте может привести к недостаточной сегментации и необходимости дополнительного перераспределения оставшихся пикселей по областям с учетом близости их значений к значениям $\overline{M(n_s)}$. Следовательно, основными требованиями к более эффективной сегментации являются: а) выращивание области с учетом типа локального экстремума (максимум или минимум) и уменьшения или увеличения яркости присоединяемых пикселей соответственно; б) использование универсального условия присоединения пикселя к области, обеспечивающего полную сегментацию изображения при любом локальном контрасте.

Предлагаемые математическая модель и алгоритм

Для сегментации изображений с монотонным изменением яркостей областей локальных максимумов и минимумов предлагается математическая модель встречного волнового выращивания областей локальных экстремумов CLERG (Convergent Local Extreme Region Growing) на основе модификации модели SRG [5]. Сущность модели CLERG состоит в использовании множества порогов яркости (по числу областей), изменяющихся на единицу в каждом цикле, начиная от значений локальных экстремумов, с учетом увеличения или уменьшения яркости для выбора смежных пикселей, присоединяемых к областям, образованным от этих локальных экстремумов. В отличие от SRG [5], в предлагаемой модели дополнительно используются: вектор $S_E = \left\| s_E(n_s) \right\|_{(n_s=\overline{1, N_s})}$ знаков локальных экстремумов, элементы которого принимают значения 1 для локальных максимумов и минус 1 для локальных

минимумов; цикл по уровням яркости q ($q = \overline{0, 2^B - 1}$); вектора $Y_B = \|y_B(p_B)\|_{(p_B=1, N_S)}$ и $X_B = \|x_B(p_B)\|_{(p_B=1, N_S)}$ координат начальных пикселей роста:

$$M_S \leftarrow F_{SP}(N_S, Y_B, X_B) \rightarrow (\mapsto^q \mapsto^{n_S} F_{RG}(n_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S), M_S, M_P, q, Y_B, X_B, S_E), F_{NW}(Y_S, X_S, p_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)) \lrcorner^{n_S} \lrcorner^q), \quad (5)$$

где \mapsto^q , \lrcorner^q – символы начала и окончания цикла по уровням яркости.

Функция F_{SP} определяется выражениями:

$$m_S(y_B(n_S), x_B(n_S)) \leftarrow n_S; y_C(n_S, 0) \leftarrow y_B(n_S); x_C(n_S, 0) \leftarrow x_B(n_S); p_C(n_S) \leftarrow 1 \quad (6)$$

при $n_S = \overline{1, N_S}$.

Функция F_{RG} выполняется, пока $p_C(n_S) > 0$ (при инициализации функции $p_S \leftarrow 0$), и определяется выражениями:

$$p_C(n_S) \leftarrow p_C(n_S) - 1; y \leftarrow y_C(n_S, p_C(n_S)); x \leftarrow x_C(n_S, p_C(n_S)); \\ \forall j \forall i (m_S(y+j, x+i) = 0) \wedge (m_P(y+j, x+i) = t(n_S, q)) \Rightarrow \\ \{m_S(y+j, x+i) \leftarrow m_S(y, x); y_S(p_S) \leftarrow y+j; x_S(p_S) \leftarrow x+i; p_S \leftarrow p_S + 1 \\ \text{при } j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j| + |i| \neq 0\}, \quad (7)$$

где $t(n_S, q) = m_P(y_B(n_S), x_B(n_S)) - q \cdot S_E(n_S)$ – значение порога яркости для n_S -й области на q -й итерации.

Функция F_{NW} определяется выражениями:

$$y_C(n_S, p_C(n_S)) \leftarrow y_S(p_C(n_S)); x_C(n_S, p_C(n_S)) \leftarrow x_S(p_C(n_S)) \quad (8)$$

при $p_C(n_S) = \overline{0, p_S - 1}$.

В выражении (5) после цикла по областям n_S значение уровня яркости q увеличивается на единицу, если выполняется условие

$$\forall n_S \forall p ((m_S(y+j, x+i) = 0) \Rightarrow (m_P(y+j, x+i) \neq t(n_S, q))) \quad (9)$$

при $j \in \{-1, 0, 1\}, i \in \{-1, 0, 1\}, |j| + |i| \neq 0$,

где $y = y_C(n_S, p)$; $x = x_C(n_S, p)$; $n_S = \overline{1, N_S}$; $p = \overline{0, p_C(n_S)}$. Если условие (9) не выполняется (существует область n_S , в окрестности которой есть несегментированные пиксели, равные порогу $t(n_S, q)$), то цикл по областям повторяется для текущего значения уровня яркости q .

Алгоритм встречного волнового выращивания областей локальных экстремумов CLERG, основанный на выражениях (5) – (9), имеет следующую структуру.

Вход: M_P ; N_S ; Y_B ; X_B ; S_E .

Инициализация: $M_S = 0$; $\{M_S, Y_C, X_C, P_C\} \leftarrow F_{SP}(N_S, Y_B, X_B)$; $q = 0$.

Цикл 1 (пока $q < 2^B$)

$n_S = 0$.

Цикл 2 (пока $n_S \leq N_S$)

$\{M_S, Y_S, X_S, p_S, p_C(n_S)\} \leftarrow F_{RG}(n_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S), M_S, M_P, q, Y_B, X_B, S_E)$.

$\{Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S)\} \leftarrow F_{NW}(Y_S, X_S, p_S, Y_C(n_S), X_C(n_S), p_C(n_S))$.

$n_S = n_S + 1$.

Конец цикла 2.

Если условие (9) выполняется, то $q = q + 1$.

Конец цикла 1.

Выход: M_S .

Если в результате выполнения данного алгоритма $\exists y \exists x (m_s(y, x) = 0)$, то поиск экстремумов и сегментация повторяются для соответствующих пикселей.

Оценка эффективности волнового выращивания областей

Для оценки качества сегментации изображений широко используются оценки однородности областей, например, D и F [9], а также индекс структурного сходства $SSIM$ [10], вычисляемые с помощью выражений:

$$D = \frac{1}{N_S} \times \sum_{n_s=1}^{N_S} \frac{S(n_s)}{YX} e(n_s), \quad (10)$$

$$F = \sqrt{N_S} \times \sum_{n_s=1}^{N_S} e(n_s) / \sqrt{S(n_s)}, \quad (11)$$

$$SSIM(M_P, \hat{M}_S) = \frac{(2\mu(M_P)\mu(\hat{M}_S) + C_1)(2\sigma(M_P, \hat{M}_S) + C_2)}{(\mu(M_P)^2 + \mu(\hat{M}_S)^2 + C_1)(\sigma(M_P)^2 + (\hat{M}_S)^2 + C_2)}, \quad (12)$$

где $S(n_s)$ – площадь (число пикселей) n_s -го сегмента; $e(n_s) = \sum_{(y,x) \in R(n_s)} (m_p(y,x) - \overline{M(n_s)})^2$ – квадратичная разность средней яркости $\overline{M(n_s)}$ n_s -й области сегментированного изображения и яркостей соответствующих пикселей $m_p(y, x)$ исходного изображения M_P ; $\mu(M_P)$, $\mu(\hat{M}_S)$ – средние значения яркостей исходного изображения M_P и восстановленного из матрицы сегментации M_S на основе средних яркостей сегментов изображения \hat{M}_S ; $\sigma(M_P)$, $\sigma(\hat{M}_S)$ – дисперсии изображений M_P и \hat{M}_S ; $\sigma(M_P, \hat{M}_S)$ – ковариация изображений M_P и \hat{M}_S ; $C_1 = (k_1L)^2$, $C_2 = (k_2L)^2$ – коэффициенты, определяющие динамический диапазон яркости; $L = 255$, $k_1 = 0,01$, $k_2 = 0,03$ – экспериментально определенные константы.

Чем меньше значения D и F и чем больше значение $SSIM$, тем лучше результат сегментации. Однако эти показатели чувствительны к дисперсии яркости сегментов и поэтому в рассматриваемом случае не подходят для оценки результатов сегментации монотонного изменения яркостей областей локальных максимумов и минимумов. Для оценки монотонности предлагается использовать: а) взвешенную сумму D_{SLE} кратчайших расстояний $l(n_s, k)$ от каждого пикселя k с координатами $(y(n_s, k), x(n_s, k))$ в области n_s до соответствующего локального экстремума с координатами $(y_E(n_s), x_E(n_s))$ по маршрутам $k = \overline{1, S(n_s)}$, определяемым максимальным увеличением (для области локального максимума) или уменьшением (для области локального минимума) яркости пикселей; б) взвешенное число N_{MIP} пикселей, прерывающих монотонность изменения яркости сегмента. Значения D_{SLE} и N_{MIP} :

$$D_{SLE} = \frac{1}{N_S} \sum_{n_s=1}^{N_S} \left(\frac{1}{S(n_s)^2} \sum_k^{S(n_s)} l(n_s, k) \right), \quad (13)$$

$$N_{MIP} = \frac{1}{N_S} \sum_{n_s=1}^{N_S} \frac{1}{S(n_s)} \sum_{k=0}^{S(n_s)-1} n_{MIP}(n_s, k), \quad (14)$$

где $l(n_s, k) < S(n_s)$, если координаты $(y_F(n_s, k), x_F(n_s, k))$ последнего пикселя в k -м маршруте совпадают с координатами локального экстремума: $(y_F(n_s, k) = y_E(n_s)) \wedge (x_F(n_s, k) = x_E(n_s))$;

$l(n_s, k) = S(n_s)$, если $(y_F(n_s, k) \neq y_E(n_s)) \vee (x_F(n_s, k) \neq x_E(n_s))$; $n_{MIP}(n_s, k)$ – индикатор монотонности изменения яркости сегмента, принимающий значение 0 (или 1), если существует (или не существует) маршрут от пикселя с координатами $(y(n_s, k), x(n_s, k))$ до локального экстремума с координатами $(y_E(n_s), x_E(n_s))$, проходящий через пиксели с большими или равными значениями (для области локального максимума), или через пиксели с меньшими или равными значениями (для области локального минимума). Чем меньше значение D_{SLE} , тем более монотонно изменяются яркости областей локальных максимумов и минимумов. Значение $N_{MIP} > 0$ свидетельствует о нарушении монотонности изменения яркости сегмента.

На рис. 1 приведены тестовые изображения T1 – T8 и выделенные на них экстремумы. В табл. 1 приведены оценки результатов сегментации изображений T1 – T8 с помощью различных алгоритмов: предложенного CLERG; базового OSRG (Original SRG) [5]; SSRG (Stabilized SRG) [6]; RSRG (Regular SRG) [7]; LSSRG (Level Set based SRG) [8]. Из табл. 1 следует, что по показателям D , F , $SSIM$ предложенный алгоритм уступает аналогам, так как результаты его сегментации имеют большее отклонение яркости пикселей в пределах сегмента. При этом, по оценкам D_{SLE} и N_{MIP} , предложенный алгоритм обеспечивает более монотонное изменение яркости по областям локальных экстремумов.

В табл. 2 приведены средние значения оценок D_{SLE} и N_{MIP} для трех типов полутоновых изображений из тестовой базы Berkeley (усреднение по 60 изображениям каждого типа) [11], отличающихся размерами $S(n_s)$ сегментов ($n_s = \overline{1, N_s}$) и содержащих преимущественно: крупные области ($S(n_s) \geq 15$); мелкие области ($S(n_s) \leq 5$); области среднего размера ($6 \leq S(n_s) \leq 14$). Из табл. 2 следует, что по сравнению с алгоритмами OSRG, SSRG, RSRG и LSSRG предложенные математическая модель и алгоритм CLERG обеспечивают монотонное изменение яркости областей локальных экстремумов (выигрыш по показателю монотонности D_{SLE} составляет в среднем по изображениям 104, 102, 78, 56 раз по сравнению с алгоритмами OSRG, SSRG, RSRG и LSSRG соответственно). Реализация предложенного алгоритма CLERG в среде MATLAB (R2015a) на платформе Intel Core i3 3,1 ГГц с 6 ГБ ОЗУ обеспечивает в 1,2–4,3 раза большую скорость работы по сравнению с алгоритмами OSRG, SSRG, RSRG и LSSRG.

Тестовые изображения (test images)	T1	T2	T3	T4
Локальные экстремумы (local extrema)				
Тестовые изображения (test images)	T5	T6	T7	T8
Локальные экстремумы (local extrema)				

Рис. 1. Тестовые изображения T1 – T8 и их локальные экстремумы
Fig. 1. Segmentation results of test images T1 – T8 and its local extrema

Таблица 1. Значения оценок качества сегментации тестовых изображений
Table 1. Values of quality estimates for segmentation of test images

Тестовые изображения (test images)		T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8
<i>D</i>	CLERG	$12,45 \times 10^5$	$13,14 \times 10^5$	$13,36 \times 10^5$	$14,06 \times 10^5$	2,2026	0,4452	6,0292	2,9777
	OSRG	$12,32 \times 10^5$	$12,72 \times 10^5$	$12,51 \times 10^5$	$13,19 \times 10^5$	1,3215	0,4566	7,8666	2,8107
	SSRG	$12,32 \times 10^5$	$12,72 \times 10^5$	$12,51 \times 10^5$	$13,19 \times 10^5$	1,1392	0,4653	6,7485	2,7724
	RSRG	$12,32 \times 10^5$	$12,72 \times 10^5$	$12,51 \times 10^5$	$13,19 \times 10^5$	1,2299	0,3088	0,7451	0,9318
	LSSRG	$12,32 \times 10^5$	$12,72 \times 10^5$	$12,51 \times 10^5$	$13,19 \times 10^5$	1,7715	0,3350	3,3206	2,0245
<i>F</i>	CLERG	$1,69 \times 10^5$	$1,79 \times 10^5$	$1,82 \times 10^5$	$1,91 \times 10^5$	$15,73 \times 10^5$	$36,39 \times 10^5$	$83,20 \times 10^5$	$201,84 \times 10^5$
	OSRG	$1,22 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$1,27 \times 10^5$	$1,37 \times 10^5$	$7,36 \times 10^5$	$17,05 \times 10^5$	$41,52 \times 10^5$	$68,59 \times 10^5$
	SSRG	$1,22 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$1,27 \times 10^5$	$1,37 \times 10^5$	$7,38 \times 10^5$	$17,23 \times 10^5$	$42,20 \times 10^5$	$68,11 \times 10^5$
	RSRG	$1,22 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$1,27 \times 10^5$	$1,37 \times 10^5$	$7,51 \times 10^5$	$28,28 \times 10^5$	$46,88 \times 10^5$	$77,39 \times 10^5$
	LSSRG	$1,22 \times 10^5$	$1,26 \times 10^5$	$1,27 \times 10^5$	$1,37 \times 10^5$	$13,35 \times 10^5$	$34,66 \times 10^5$	$51,58 \times 10^5$	$81,86 \times 10^5$
<i>SSIM</i>	CLERG	0,258	0,2579	0,2578	0,2582	0,7204	0,8846	0,8096	0,8863
	OSRG	0,3917	0,4157	0,4187	0,4127	0,9013	0,9438	0,8751	0,9489
	SSRG	0,3917	0,4157	0,4187	0,4127	0,9069	0,9434	0,8514	0,9490
	RSRG	0,3917	0,4157	0,4187	0,4127	0,9002	0,8686	0,7451	0,9318
	LSSRG	0,3917	0,4157	0,4187	0,4127	0,6218	0,8333	0,7088	0,9224
D_{SLE} / N_{MP}	CLERG	0,0120/ 0	0,0112/ 0	0,0113/ 0	0,0106/ 0	$8,33 \times 10^{-4}$ / 0	$0,39 \times 10^{-4}$ / 0	$4,57 \times 10^{-4}$ / 0	$1,12 \times 10^{-4}$ / 0
	OSRG	0,0480/ 0	0,0463/ 0	0,0473/ 0	0,0455/ 0	0,0791/ 0,0759	0,0461/ 0,0385	0,1187/ 0,0633	0,0517/ 0,0447
	SSRG	0,0480/ 0	0,0463/ 0	0,0473/ 0	0,0455/ 0	0,0772/ 0,0745	0,0471/ 0,0395	0,0659/ 0,0630	0,0474/ 0,0441
	RSRG	0,0480/ 0	0,0463/ 0	0,0473/ 0	0,0455/ 0	0,0764/ 0,0739	0,0230/ 0,0208	0,0565/ 0,0555	0,0537/ 0,0388
	LSSRG	0,0480/ 0	0,0463/ 0	0,0473/ 0	0,0455/ 0	0,0485/ 0,0472	0,0162/ 0,0162	0,0478/ 0,0470	0,0324/ 0,0322

Таблица 2. Оценка качества сегментации изображений базы Berkeley
Table 2. Estimation of local extrema based segmentation of Berkeley dataset images

Изображения (Images)	Среднее значение D_{SLE} / N_{MP} (Mean D_{SLE} / N_{MP})				
	CLERG	OSRG	SSRG	RSRG	LSSRG
Тип 1 (type 1)	$3,22 \times 10^{-4}$ / 0	0,0799/ 0,0653	0,0774/ 0,0652	0,0668/ 0,0593	0,0408/ 0,0385
Тип 2 (type 2)	$1,41 \times 10^{-4}$ / 0	0,0640/ 0,0582	0,0641/ 0,0583	0,0439/ 0,0411	0,0389/ 0,0368
Тип 3 (type 3)	$2,53 \times 10^{-4}$ / 0	0,0786/ 0,0663	0,0783/ 0,0660	0,0576/ 0,0535	0,0408/ 0,0386

Заключение

Предложены математическая модель и алгоритм сегментации изображений на основе встречного волнового выращивания областей, обеспечивающие монотонность изменения яркости в областях локальных экстремумов за счет: а) использования множества порогов яркости, изменяющихся на единицу в каждом цикле, начиная от значений локальных экстремумов; б) учета изменения яркости для выбора смежных пикселей, присоединяемых к областям локальных экстремумов. При большем отклонении яркостей пикселей от среднего значения в пределах области разработанный алгоритм сегментации по сравнению с известными алгоритмами обеспечивает меньшую сумму кратчайших расстояний от каждого пикселя области до соответствующего локального экстремума по маршрутам, определяемым максимальным увеличением или уменьшением яркости пикселей, и отсутствие пикселей, прерывающих монотонность изменения яркости сегмента. Это позволяет использовать предложенный алгоритм для выделения на изображениях текселей, пятен, малоконтрастных объектов.

Список литературы / References

1. Otsu N. A threshold selection method from gray-level histograms. *IEEE transactions on systems, man, and cybernetics*. 1979;9:62-66. DOI:10.1109/TSMC.1979.4310076.
2. Haralick R.M., Shapiro L.G. Image segmentation techniques. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1985;29(1):100-132.
3. Horowitz S.L., Pavlidis T. Picture segmentation by a tree traversal algorithm. *Journal of the ACM*. 1976;23(2):368-388. DOI: 10.1145/321941.321956.
4. Meyer F. Topographic distance and watershed lines. *Signal Processing*. 1994;38(1):113-125. DOI: 10.1016/0165-1684(94)90060-4.
5. Adams R., Bischof L. Seeded region growing. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*. 1994;16(6):641-647.
6. Fan M., Lee T.C.M. Variants of seeded region growing. *Image Processing IET*. 2015;9(6):478-485.
7. Fan J., Zeng G., Body M., Hacid M.S. Seeded region growing: an extensive and comparative study. *Pattern Recognition Letters*. 2005;26(8):1139-1156.
8. Porikli F.M. Automatic image segmentation by Wave Propagation. *International Society for Optics and Photonics*. 2004;5298:536-543.
9. Zhang H., Fritts J.E., Goldman S.A. Image segmentation evaluation: A survey of unsupervised methods. *Computer Vision and Image Understanding*. 2008;110(2):260-280.
10. Wang Z., Bovik A.C., Sheikh H.R., Simoncelli E.P. Image Quality Assessment: From Error Visibility to Structural Similarity. *IEEE Transactions on Image Processing*. 2004;13(4):600-612.
11. Berkeley Segmentation Dataset and Benchmark. Mode of access: <https://www2.eecs.berkeley.edu/Research/Projects/CS/vision/bsds/BSDS300/html/dataset/images.html> – Date of access: 07.10.2020.

Вклад авторов

Цветков В.Ю. поставил задачу исследования и определил методику оценки его результатов.

Нгуен А.Т. разработал математическую модель, алгоритм и программные средства сегментации изображений, оценил их эффективность, обобщил результаты исследования.

Authors' contribution

Tsviatkou V.Yu. set a research task and defined a methodology for assessing its results.

Nguyen A.T. developed a mathematical model, algorithm and software for image segmentation, assessed their effectiveness, summarized the research results.

Сведения об авторах

Нгуен А.Т., аспирант кафедры инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Цветков В.Ю., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой инфокоммуникационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Nguyen A.T., Postgraduate student at the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tsviatkou V.Yu., D.Sc., Associate Professor, Head of the Department of Infocommunication Technologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Цветков Виктор Юрьевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-017-293-84-08;
e-mail: vtsvet@bsuir.by
Tsviatkou Viktor Yur'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2012-19-4-70-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932

ОБРАБОТКА И АНАЛИЗ ИЗОБРАЖЕНИЙ МИКРОСТРУКТУРЫ МЕТАЛЛОВ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БАЛЛА ЗЕРНА

Р.П. БОГУШ, Е.Р. АДАМОВСКИЙ, С.Ф. ДЕНИСЁНОК

Полоцкий государственный университет (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 10 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Представлено алгоритмическое обеспечение для предварительной обработки и дальнейшего анализа изображений микроструктуры металлов, реализующее металлографические методы: сравнение с эталонными шкалами; подсчет зерен на микрошлифе, который используется только для равноосных зерен; подсчет пересечения границ зерен, свободный от данного ограничения; измерения хорд. В качестве исходных данных может использоваться заданное количество цифровых изображений шлифа. Предварительная обработка применяется для удаления шума, выравнивания яркости, улучшения контраста с использованием алгоритма адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контрастности, который позволяет улучшить результативность дальнейшего анализа. Далее выполняется сегментация зерен. Для этого используется комбинация методов адаптивной бинаризации, дистанционного преобразования и водораздела. Предусмотрена фильтрация бинарных изображений на основе операций математической морфологии. Для определения границ зерен используется контурный анализ. Представлены результаты исследований, которые проведены на изображениях эталонных шкал, отображающих весь диапазон размеров зерен, и на реальных изображениях микрошлифов. Эксперименты подтвердили высокую результативность работы алгоритмического обеспечения. На основе предложенных алгоритмов разработано программное обеспечение, которое имеет следующие основные функциональные возможности: калибровка для возможности получения реальных размеров зерен; предварительная обработка изображений в автоматическом или ручном режимах; анализ для определения балла зерна; сохранение результатов в виде отчета в формате jpg. Пакетная обработка предоставляет возможность загрузки последовательности изображений для обработки однотипным алгоритмом.

Ключевые слова: цифровая обработка изображений, сегментация частиц, автоматический анализ структур.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Богуш Р.П., Адамовский Е.Р., Денисёнок С.Ф. Обработка и анализ изображений микроструктуры металлов для определения балла зерна. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 70-79.

PROCESSING AND ANALYSIS OF IMAGES OF MICROSTRUCTURE METALS FOR DETERMINING THE GRAIN POINT

RYKHARD P. BOHUSH, YAGOR R. ADAMOUSKY, SIARGEY F. DENISENAK

Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)

Submitted 10 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. An algorithmic support for metallographic images preprocessing and analysis is presented. The software product implements metallographic methods for the grain size determination by comparison of rating scales, counting beans, calculation of grain boundaries intersections for equiaxed and elongated grains, measuring a chords length. Multiple digital images can be used as initial data. Pre-processing is used to remove noise, sharpen and improve contrast using Adaptive Contrast-Limiting Histogram Equalization (CLAHE). The next step is grain segmentation. A combination of distance transform and adaptive watershed binarization is used. Binary images filtration based on the operations of mathematical morphology is provided. Contour analysis is used to determine grain boundaries. The study's results of the entire rating scales and on the real metallographic images are presented. High efficiency of an algorithmic support is confirmed by the experiments. The software implementation has the following main features: the ability to calibrate the actual grain size, automatic or manual image preprocessing, grain size analysis with saving the results as a report in jpg format. Batch processing provides the ability to download images for processing with the same type of algorithm.

Keywords: digital image processing, particle segmentation, automatic analysis of structures.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Bohush R.P., Adamousky Y.R., Denisenak S.F. Processing and analysis of images of microstructure metals for determining the grain point. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 70-79.

Введение

Металлографические исследования применяются во многих областях промышленности: металлургия, автомобилестроение, атомная промышленность, энергетика, аэрокосмическая промышленность, научно-исследовательские, изыскательские работы в различных исследовательских и научных центрах, университетах, лабораториях [1]. В качестве исходных данных используется микрошлиф, имеющий особо подготовленную поверхность (выявляется структура при помощи травления, среза) для микроанализа, который в настоящее время представляется в виде цифрового изображения. Проведение анализа изображений металлов требует значительных временных затрат специалиста, поэтому разрабатываются и используются специальные алгоритмы обработки цифровых изображений и программные средства [2–4]. Задача автоматического количественного анализа микроструктуры металлов требует сегментации зерен на изображении шлифа и сводится к выделению на нем замкнутых областей, соответствующих границам зерен. Существующие программные системы требуют достаточно хорошего качества подготовки поверхности микрошлифа, однако применение даже современных автоматических станков не позволяет получить поверхность микрошлифа с полным отсутствием мешающих факторов, наличие которых из-за плохой подготовки образца или неравномерности освещения приводит к снижению точности анализа на сложной микроструктуре изображения [5, 6]. Целью статьи является повышение достоверности определения балла зерна за счет развития алгоритмического обеспечения для обработки и анализа изображений микроструктуры металлов.

Теоретический анализ

При металлографическом анализе используется ГОСТ 5639-82 «Стали и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна», который содержит следующие методы: определение величины зерна сравнением с эталонными шкалами; подсчет количества зерен; подсчет пересечений границ зерен; измерения длин хорд. Метод определения величины зерна сравнением с эталонными шкалами основан на визуальном сопоставлении целевого изображения и набора эталонов, которые приведены в ГОСТ 5639-82. Метод подсчета зерен, приходящихся на единицу поверхности шлифа, заключается в подсчете всех визуально различимых n зерен на шлифе, при этом алгоритм автоматической обработки должен учитывать необходимость разделения зерен по критерию пересечения границ изображения на внутренние n_1 и граничные n_2 , т. е. пересекающие границы изображения. Метод подсчета пересечений границ равноосных зерен отрезками прямых с определением среднего условного диаметра предполагает измерение путем построения двух перпендикулярных линий на характерном месте изображения шлифа и разбиением их на отрезки, ограниченные контурами обнаруженных зерен. Далее необходим подсчет среднего арифметического длин полученных отрезков с последующим сравнением с табличным параметром среднего условного диаметра. Метод подсчета пересечений границ неравноосных зерен отрезками прямых с определением количества зерен в 1 мм^3 отличается от метода, предназначенного для равноосных зерен, необходимостью использования дополнительного изображения, полученного поперек главной оси симметрии. Анализ производится путем вычисления количества пересеченных зерен линией в пересчете на ее длину, равную 1 мм , что позволяет вычислить их число на единицу объема и сравнить результат с параметром, который ставит в соответствие среднее количество зерен на 1 мм^3 и определенный балл зерна в ГОСТ 5639-82.

В работе [4] описан алгоритм сегментации на основе выделения контура зерна по признаку перепада яркости смежных пикселей и обходе найденной границы по кругу. В качестве предобработки производится свертка входного изображения с ядром, позволяющим выделить контуры объектов, в данном случае – оператор Лапласа (также могут быть применены операторы Собеля или Кэнни). Результирующее изображение подвергается бинаризации. Автор отмечает, что возможны ситуации, когда вследствие дефектов шлифа граница зерна не является замкнутой, а возникающие разрывы будут достаточно большими. Это может привести к тому, что одно зерно будет определено как несколько объектов. В [5] представлен подход для предварительной обработки с использованием бинаризации методом Отсу, применением операций замыкания и размыкания для фильтрации бинарного изображения и дальнейшего выделения на нем контуров. В работе [7] представлена общая схема обработки изображения микроструктуры с применением алгоритма «жука» для выделения контуров на изображении. Методы из [5, 7] не позволяют обеспечить качественное выделение контуров на реальных изображениях, что приведет к ухудшению качества анализа. Следовательно, требуется разработка алгоритмического обеспечения, которое за счет улучшенной предварительной обработки входного изображения и применения более эффективных подходов при сегментации зерен позволит повысить точность определения балла зерна.

Алгоритм обработки и анализа изображений микроструктуры металлов

С учетом поставленной задачи повышения достоверности определения балла зерна при металлографическом анализе разработан алгоритм (рис. 1), который для удаления гауссова и импульсного шума применяет двумерную фильтрацию в пространственной области с соответствующими типами фильтров. Известно, что одними из наиболее часто встречаемых дефектов, кроме шумов, являются неоднородная яркость и низкий контраст [5]. В существующих системах определения балла зерна используется метод выравнивания гистограммы. При неоднородности распределения яркостей на входном изображении, например, одна половина его темнее (рис. 2, а), алгоритм выравнивания гистограммы работает недостаточно хорошо, так как на результирующем изображении после данного шага будет наблюдаться улучшение контраста, но одна часть будет темнее, причем перепад яркости может

быть даже более выраженным (рис. 2, *b*). Поэтому предлагается для улучшения результата предварительной обработки использование алгоритма адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контраста (CLAHE) [8]. При таком подходе изображение обрабатывается не целиком, а по фрагментам, которые после коррекции объединяются с помощью билинейной интерполяции для подавления резких границ перехода между фрагментами. Сравнение рис. 2, *b* и 2, *c* показывает, что при использовании алгоритма CLAHE неравномерность освещенности на выходном изображении практически отсутствует, в отличие от изображения, полученного на основе выравнивания гистограммы.

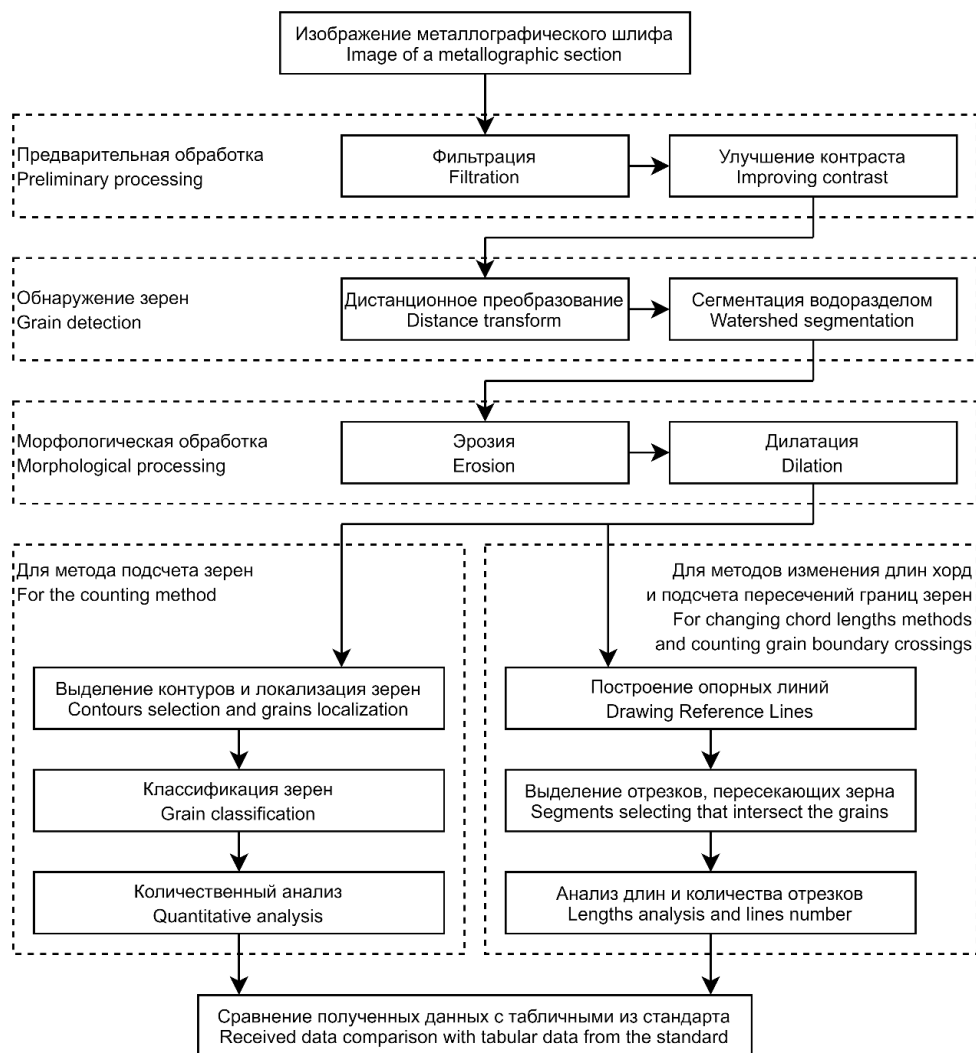


Рис. 1. Общая схема алгоритма обработки и анализа цифровых изображений микрошлифов
Fig. 1. Scheme of algorithm for processing and analyzing digital microsection images

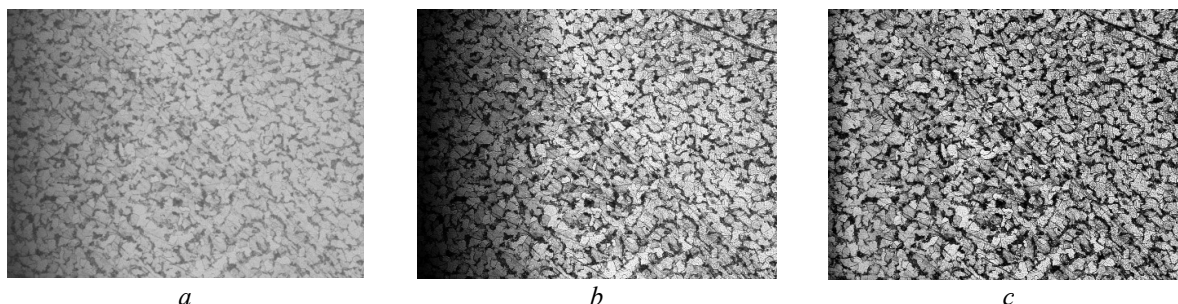


Рис. 2. Примеры улучшения контраста: *a* – исходное изображение; *b* – методом выравнивания гистограммы; *c* – методом адаптивной эквализации гистограммы с ограничением контраста
Fig. 2. Examples of contrast enhancement: *a* – the original image; *b* – based on adaptive histogram equalization; *c* – by contrast limited adaptive histogram equalization

Для обнаружения областей на изображении, которые соответствуют зернам, применяется сегментация водоразделом к результату дистанционного преобразования, полученному после адаптивной бинаризации. Адаптивная бинаризация позволяет уменьшить влияние остаточной неравномерности яркости изображения после предыдущего этапа на результат сегментации. Дистанционное преобразование вычисляет на бинарном изображении расстояние до ближайшего пикселя фона для каждого элемента и возвращает результат в виде изображения в градациях серого, где уровень яркости соответствует вычисленному расстоянию, затем применяется сегментация водоразделом. Такой подход позволяет в значительной мере минимизировать слияние объектов при их взаимном пересечении, что очень важно для повышения точности дальнейшего количественного анализа. Для удаления мелких объектов на полученном бинарном изображении, которые не являются зернами по критерию размера, применяется фильтрация на основе операций математической морфологии. На последнем этапе анализ выполняется в соответствии с применяемыми методами.

Для метода подсчета зерен каждое обнаруженное зерно описывается координатами и площадью, определяется количество n_1 и n_2 , вычисляется общее значение n с последующим его приведением к числу зерен на единицу площади. Полученный результат сравнивается с параметром m из ГОСТ 5639-82, который ставит в соответствие диапазон значений среднего числа зерен на 1 мм^2 и определенный балл зерна.

Для методов измерения длин хорд и подсчета пересечений границ зерен выполняется построение опорных линий, из которых выделяются отрезки в областях их пересечения с зернами с последующим анализом длины. Для метода измерения длин хорд и при подсчете пересечений границ равноосных зерен вычисляется средняя длина отрезков, для неравноосных зерен подсчитывается количество отрезков. Полученные значения сравниваются с табличными параметрами из ГОСТ 5639-82.

Результаты экспериментов и обсуждение

На основе рассмотренного алгоритмического обеспечения разработано программное приложение MGSoft. В приложении реализованы одиночная и пакетная обработка изображений, их автоматизированный анализ, вывод отчетов и калибровка данных. Анализ изображений может выполняться с участием оператора на всех этапах обработки и анализа либо только на этапе предварительной обработки, либо без участия оператора. На рис. 3 представлена форма отчета анализа с помощью метода подсчета зерен.

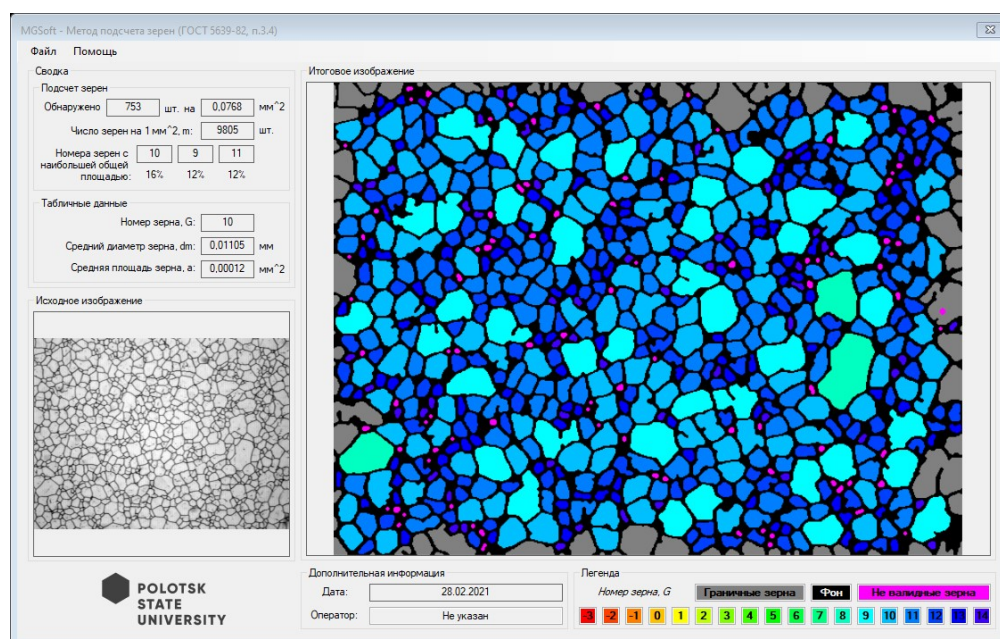


Рис. 3. Форма отчета метода подсчета зерен
Fig. 3. Grain counting method report form

Для проверки алгоритмической и программной реализации методов анализа выполнено тестирование измерения размеров зерен на базовых шкалах приложения 2 ГОСТ 5639-82 в испытательно-исследовательском центре при учреждении образования «Полоцкий государственный университет», сотрудники которого выполняют исследования по комплексному техническому диагностированию технологического оборудования производственных предприятий. Табл. 1 содержит результаты анализа 18 эталонных изображений, каждое из которых содержит структуру, соответствующую одному из номеров зерен, примеры которых показаны на рис. 4. В связи с тем, что в реализации методов по п. 3.5.3 и п. 3.6 ГОСТ 5639-82 используется генератор случайных чисел, измерения с их помощью проведены десять раз, а результаты усреднены. Анализ табл. 1 показывает, что реализованный автоматизированный метод подсчета количества зерен позволяет вычислять практически на всех тестовых изображениях корректный балл зерна. В работе [3] представлены корректные результаты для эталонных шкал для ограниченного диапазона $G = 1..10$, т. е. представленный подход позволяет улучшить результативность определения балльности зерна. Метод подсчета количества пересечений при недостаточно большом числе объектов на изображении завышает или занижает номер зерна на один пункт на граничных размерах, что допустимо в соответствии с ГОСТ. Некорректное определение балла зерна происходит в случаях, когда на изображении присутствует малое количество зерен, или размеры объектов находятся на границе определенного стандартом диапазона ($G_{-3..-2}, G_{13..14}$), что приводит к невозможности идентифицировать часть из них, следовательно, уменьшается количество данных для оценки.

Таблица 1. Результаты анализа изображений базовых шкал
Table 1. Results of analysis of images of basic scales

Номер зерна (Grain size), G	Результаты анализа (Analysis results), G		
	По методу подсчета количества зерен (For the counting method)	По методу пересечения границ зерен (For method of crossing grain boundaries)	По методу измерения длин хорд (For method of changing chord lengths)
-3	—	-1	-2
-2	-2	-1	-1
-1	-1	0	-1
0	0	1	0
1	1	2	1
2	2	3	2
3	3	4	4
4	4	4	4
5	5	5	5
6	6	6	6
7	7	7	7
8	8	8	8
9	9	9	9
10	10	10	10
11	11	11	10
12	12	12	11
13	13	12	12
14	14	13	13

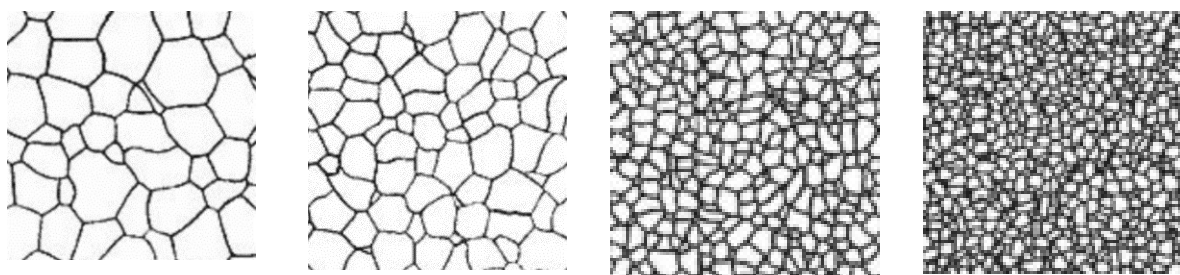


Рис. 4. Примеры тестовых изображений
Fig. 4. Test image examples

В табл. 2 представлены результаты экспериментов для реальных изображений, имеющих различные размеры и форму зерен, структуры их распределения (см. рис. 5). Каждое изображение обрабатывалось при трех различных разрешениях с шагом в 4 балла зерна. В качестве опорного метода применен визуальный анализ.

Таблица 2. Результаты анализа реальных изображений микрошлифов
Table 2. Results of analysis of real metals microstructure images

Изображение (Image)	Разрешение (Resolution), мкм/пик (µm/px)	Номера зерен по результатам анализа (Grain size based on analysis results), G			
		п. 3.3	п. 3.4	п. 3.5.3	п.3.6
рис. 5, a	1	6	6	6	6
	0,25	10	10	10	10
	0,06	14	14	13	14
рис. 5, b	3	5	5	5	5
	0,8	9	9	9	9
	0,2	13	13	12	12
рис. 5, c	3,5	4	4	4	4
	0,9	8	8	8	8
	0,2	12	12	12	12
рис. 5, d	3,5	3	3	3	3
	0,9	7	7	7	7
	0,25	11	11	11	10
рис. 5, e	8	2	2	2	2
	2	6	6	6	6
	0,5	10	10	10	10
рис. 5, f	5	1	1	1	1
	1,25	5	5	6	6
	0,35	9	9	9	9
рис. 5, g	6	0	0	1	1
	1,3	4	4	5	5
	0,3	8	8	8	8
рис. 5, h	9	-1	-2	0	-1
	2	3	2	3	4
	0,5	7	6	7	7
рис. 5, i	11	-2	-2	-2	-1
	3,5	2	2	3	2
	0,95	6	6	6	6
рис. 5, j	16	-3	-3	-3	-2
	4	1	1	1	1
	1	5	5	5	5

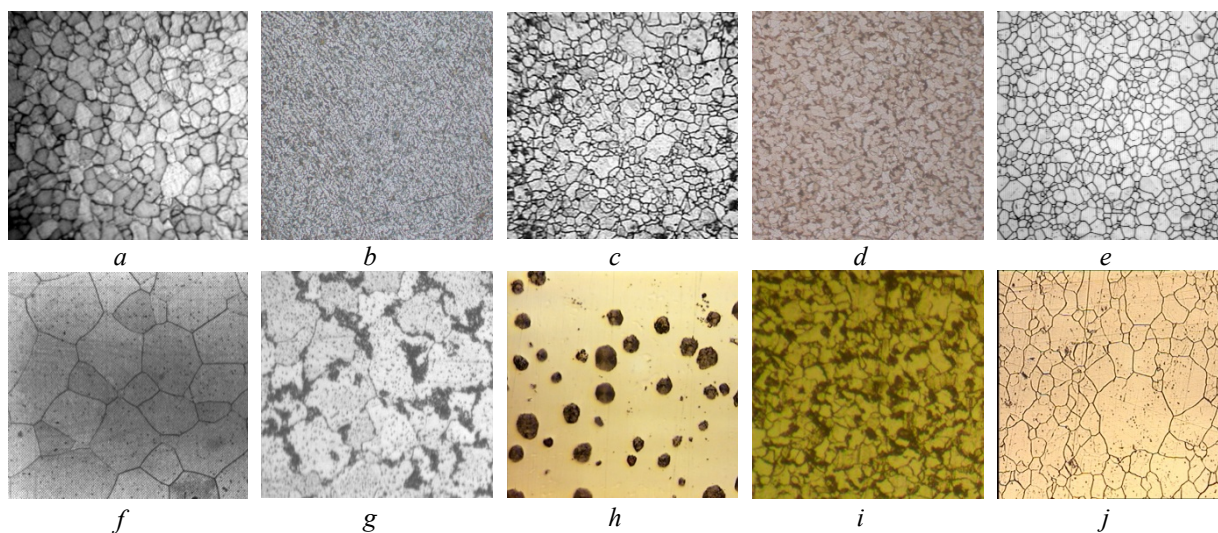


Рис. 5. Изображения для проверки методов анализа
Fig. 5. Microstructure images of metal

Анализ табл. 2 показывает, что на качество вычисления балла зерна предложенным алгоритмическим обеспечением влияет несколько факторов. Согласно стандарту, зерна металлов – это кристаллы, разделенные смежными поверхностями, т. е. толщина границы между ними принимается минимально возможной. Следовательно, при наличии свободного пространства между объектами (рис. 5, *h*) балл зерна может быть вычислен неточно методом подсчета зерен. В соответствии с методом пересечения границ зерен для анализа необходимо использовать изображение, на котором должно присутствовать не менее 50 зерен (рис. 5, *f, g, h*). Следовательно, если на изображении алгоритмом обнаружено меньшее количество зерен и присутствуют значительные шумовые области, то это приводит к дополнительной погрешности. Наличие на изображении зерен с баллом зерна $G > 11$ или $G < 0$ приводит к ошибкам при автоматической классификации, вследствие чего вычисленное значение может быть меньше и больше реального.

Сравнение результатов работы предложенного алгоритма с существующими (см. табл. 3.) на реальных изображениях подтверждает повышение точности и повторяемости результатов анализа различными методами.

Таблица 3. Сравнение алгоритмов обработки изображений для анализа
Table 3. Comparison of image processing algorithms for analysis

Алгоритм обработки (Processing algorithm)	Метод анализа (Analysis method)			Размер зерна (Grain size)	
	п. 3.3	п. 3.4	п. 3.5.3	Среднее (Mean)	Известный (Known)
Предложенный	8	8	8	8	8
Алгоритм из [5]	8	8	8	8	
Алгоритм из [3]	8	7	7	7,7	
Предложенный	7	7	7	7	7
Алгоритм из [5]	7	7	8	7,3	
Алгоритм из [3]	7	6	6	6,6	
Предложенный	5	5	5	5	5
Алгоритм из [5]	5	5	6	5,3	
Алгоритм из [3]	5	4	5	4,7	
Предложенный	3	3	3	3	3
Алгоритм из [5]	3	2	3	2,7	
Алгоритм из [3]	3	3	3	2,7	
Предложенный	1	1	2	1,3	1
Алгоритм из [5]	1	0	1	0,7	
Алгоритм из [3]	1	0	1	0,7	

Адекватность результатов определения номера зерна с использованием предложенного алгоритмического обеспечения подтверждается успешным прохождением программного обеспечения MGSoft, разработанного на его основе, межлабораторных сличений среди аккредитованных лабораторий в туре проверки квалификации BelGIM-PT-T-28-3-2020/2020 (определение величины зерна), проводимом научно-исследовательский отделом межлабораторных сличений Республиканского унитарного предприятия «Белорусский государственный институт метрологии».

Заключение

Представлено алгоритмическое обеспечение для анализа изображений микроструктуры металлов, реализующее металлографические методы: определения величины зерна сравнением с эталонными шкалами; подсчета зерен на микрошлифе, который используется только для равноосных зерен; подсчета пересечения границ зерен, свободного от данного ограничения; измерения хорд. Для обнаружения зерен на изображении используется адаптивная эквализация гистограммы с ограничением контраста на этапе предварительной обработки, затем применяется адаптивная бинаризация, дистанционное преобразование и алгоритм водораздела с последующей морфологической обработкой для фильтрации объектов, размеры которых не могут соответствовать размерам зерен. Сравнение результатов работы предложенного

алгоритма с существующими и на эталонных, и на реальных изображениях подтверждает повышение точности и повторяемости результатов анализа различными методами.

На основе представленного алгоритма разработано программное обеспечение, реализующее указанные методы анализа, которое также предоставляет возможности: калибровки для возможности получения реальных размеров зерен; предварительной обработки изображений в автоматическом или ручном режимах; сохранения результатов в виде отчета в формате jpg. Пакетная обработка предоставляет возможность загрузки последовательности изображений для обработки однотипным алгоритмом.

Список литературы

1. Анисович А.Г. Современная металлография – основа литейного материаловедения. *Литье и металлургия*. 2019;3:99-108. DOI:10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.
2. Чичко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г., Соболев, В.Ф., Веденеев, А.В. Алгоритм и программное обеспечение для обработки изображений микроструктур перлитных сталей. *Известия Национальной академии наук Беларуси. Серия физико-технических наук*. 2010;3:14–21.
3. Анисович А.Г., Румянцева И.Н., Бислюк Л.В. Определение балла зерна стали компьютерными методами. *Литье и металлургия*. 2010;3(57):100-104. DOI: 10.21122/1683-6065-2010-3-100-104.
4. Шарыбин С.И., Столбов В.Ю., Гитман М.Б., Барышников М.П. Разработка интеллектуальной системы распознавания сложных микроструктур на шлифах металлов и сплавов. *Нейрокомпьютеры, разработка, применение*. 2014;12:50-56.
5. Стародубов Д.Н. Алгоритмы предварительной обработки изображений микроструктур. *Алгоритмы, методы и системы обработки данных*. 2010;15:179-185.
6. Сивкова Т., Губарев С., Каменин И. Автоматизированный анализ микроструктуры материалов. Анализ изображений с наличием дефектов пробоподготовки. *Труды международной конференции по компьютерной графике и зрению «ГРАФИКОН2020»*. 2020; 1:15-26. DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-15-26.
7. Чичко А.Н., Сачек О.А., Ганжа В.А., Гашникова О.П. Алгоритмы для автоматизации обработки изображений макро- и микроструктуры сплавов. *Литье и металлургия*. 2008;1(45):79-84.
8. Pizer S. M., Amburn E. P., Austin J. D., Cromartie R., Geselowitz A., Greer T., Romeny B.H., Zimmerman J. B., Zuiderveld K. Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987;39(3):355-368.

References

1. Anisovich A.G. [Modern metallography – the basis of foundry material science]. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy)*. 2019;(2):99-108. (In Russ.). DOI:10.21122/1683-6065-2019-2-99-108.
2. Сніснко А.Н., Сачек О.А., Лихоузов С.Г., Соболев В.Ф., Веденеев А.В. [Algorithm and software for processing of images of pearlitic steels microstructures]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus. Physical-Technical Series*. 2010;3:14-21. (In Russ.)
3. Anisovich A.G., Romyantseva I.N., Bisluk L.V. [Determination of steel grain grade by computer methods]. *Litiyo i Metallurgiya (Foundry production and metallurgy)*. 2010;(3):100-104. (In Russ.). DOI: 10.21122/1683-6065-2010-3-100-104.
4. Sharybin S.I., Stolbov V.Yu., Gitman M.B., Baryshnikov M.P. [Developing of an intellectual system of complex microstructures analysis and classification on thin metal sections]. *Neurocomputers*. 2014;12:50-56.
5. Starodubov D.N. [Algoritmy predvaritel'noy obrabotki izobrazheniy mikrostruktur]. *Algoritmy, metody i sistemy obrabotki dannykh*. 2010;15:179-185. (In Russ.)
6. Sivkova T., Gubarev S., Kamenin I. [Avtomatizirovanny analiz mikrostruktury materialov. Analiz izobrazheniy s nalichiyem defektov probopodgotovki]. *Processing of International Conference on Computer Graphics and Vision "GraphiCon 2020"*. 2019;29:255-259. (In Russ.). DOI: 10.51130/graphicon-2020-1-15-26.
7. Chichko A.N., Sachek O.A., Ganzha V.A., Gashnikova O.P. [Algoritmy dlya avtomatizatsii obrabotki izobrazheniy makro- i mikrostruktury splavov]. *Lit'ye i metallurgiya*. 2008;1(45):79-84. (In Russ.)
8. Pizer S.M., Amburn E.P., Austin J.D., Cromartie R., Geselowitz A., Greer T., Romeny B.H., Zimmerman J.B., Zuiderveld K. Adaptive Histogram Equalization and Its Variations. *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*. 1987;39(3):355-368.

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors contributed equally to the writing of the paper.

Сведения об авторах

Богущ Р.П., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета.

Адамовский Е.Р., аспирант кафедры вычислительных систем и сетей Полоцкого государственного университета.

Денисенко С.Ф. начальник испытательно-исследовательского центра Полоцкого государственного университета.

Information about the authors

Bohush R.P, PhD, Associate professor, Head of Computer Systems and Networks Department of Polotsk State University.

Adamousky Y.R, Postgraduate student of Computer Systems and Networks Department of Polotsk State University.

Denisenak S.F., Head of Test and Research Center of Polotsk State University.

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29,
Полоцкий государственный университет;
тел. +375-214-42-30-31;
e-mail: r.bogush@psu.by
Богущ Рихард Петрович

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Vitebsk region, Novopolotsk, Blokhina str., 29,
Polotsk State University;
tel. +375-214-42-30-31;
e-mail: r.bogush@psu.by
Bohush Rykhard Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-80-84>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.39+004.77

СХЕМА ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО РАЗНЕСЕНИЯ ДЛЯ МАСШТАБИРОВАНИЯ СЕТИ WDM/TDM GPON ДО 60 КМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ОПТИЧЕСКИХ УСИЛИТЕЛЕЙ НА КВАНТОВЫХ ТОЧКАХ

А.Д. ТУСУПОВ¹, А.Т. ТОХМЕТОВ¹, Н.И. ЛИСТОПАД²

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева (г. Нур-Султан, Республика Казахстан)

²Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 19 марта 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Гигабитные пассивные оптические сети (GPON) являются наиболее передовой технологией: скорость передачи данных составляет 2,5 Гбит/с для нисходящих и 1,25 Гбит/с для восходящих потоков. Но данная архитектура сети имеет ограниченную физическую длину сети – примерно в 20 км. Это связано с высокими бюджетными потерями сети. Такое ограничение доступа делает сеть труднодоступной для абонентов, расположенных далеко от объектов телеком-оператора, а покрытие удаленных населенных пунктов является достаточно затратным (стоимость проектных работ, волокна, прокладки оптического кабеля), что усложняет устранение цифрового неравенства между городом, пригородом и сельской местностью. Для решения данной проблемы предлагается использование оптических усилителей с активной областью на квантовых точках (ППОУ-КТ), которые расширят зону досягаемости GPON до 60 км, что является пределом для логической длины по текущим протоколам. Одним из недостатков ППОУ-КТ является их поляризационная чувствительность. Для изменения состояния поляризации вышеназванных усилителей в данной работе предлагается схема поляризационного разнесения.

Ключевые слова: гигабитные пассивные оптические сети, оптические усилители с активной областью на квантовых точках, поляризационная чувствительность, схема поляризационного разнесения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Тусупов А.Д., Тохметов А.Т., Листопад Н.И. Схема поляризационного разнесения для масштабирования сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием полупроводниковых оптических усилителей на квантовых точках. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 80-84.

POLARIZATION DIVERSITY SCHEME FOR REACH EXTENSION OF WDM/TDM GIGABIT PASSIVE OPTICAL NETWORK UP TO 60 KM USING QUANTUM DOT SEMICONDUCTOR OPTICAL AMPLIFIERS

AXMET D. TUSSUPOV¹, AKILBEK T. TOKHMETOV¹, NIKOLAI I. LISTOPAD²

¹*L.N. Gumilyov Eurasian National University (Nur-Sultan, Republic of Kazakhstan)*

²*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 19 March 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Gigabit passive optical networks (GPON) are the most advanced technology. The data transfer rate is 2.5 Gbps for downstream and 1.25 Gbps for upstreams. But this network architecture has a limited physical network length of 20 km. This is due to the high budgetary losses of the network. This restriction of access makes the network difficult to access for subscribers located far from the facilities of the telecom operator, and coverage of remote settlements is quite costly (cost of design work, fiber, laying of fiber-optic cable), thereby complicating the elimination of the digital divide between the city, the suburbs and the countryside. To solve this problem, it is proposed to use quantum dot semiconductor optical amplifiers (QD-SOA), which will expand the GPON reach up to 60 km, which is the limit for the logical length under the current protocols. Quantum dot semiconductor optical amplifiers are promising devices for optical communication technology, but for commercial use they have one disadvantage. They are polarization sensitive. In this paper the authors constructed a polarization diversity scheme to avoid polarization sensitivity of QD-SOAs.

Keywords: gigabit passive optical networks, quantum dot semiconductor optical amplifiers, polarization sensitivity, polarization diversity scheme.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Tussupov A.D., Tokhmetov A.T., Listopad N.I. Polarization diversity scheme for reach extension of WDM/TDM gigabit passive optical network up to 60 km using quantum dot semiconductor optical amplifiers. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 80-84.

Введение

В публикации [1] впервые была продемонстрирована характеристика полупроводниковых оптических усилителей с активной областью на квантовых точках (ППОУ-КТ) для масштабирования сети оптического доступа WDM/TDM GPON до 60 км. Четыре нисходящих канала передают информацию со скоростью 2,5 Гбит/с, при этом в каждом канале сигнал усиливается с помощью ППОУ-КТ в диапазоне длин волн 1,5 мкм, обеспечивая низкое энергопотребление. В восходящем направлении два канала передают данные со скоростью 622 Мбит/с, и каждый канал усиливает сигнал также с помощью ППОУ-КТ в диапазоне длин волн 1,3 мкм. Вместе с тем продемонстрированное в экспериментальной работе [1] масштабирование сети WDM/TDM GPON до 60 км с использованием ППОУ-КТ имеет один недостаток – это чувствительность усилителей данного типа к изменению состояния поляризации. Необходимо констатировать, что оптические усилители типа ППОУ-КТ имеют поляризационную чувствительность около 10 дБ [1]. Таким образом, при эксплуатации усилителей данного типа требуется контроль состояния поляризации передаваемых сигналов. В данной работе предлагается одно из возможных решений проблем поляризации в ППОУ-КТ с помощью схемы поляризационного разнесения.

Схема поляризационного разнесения

ППОУ-КТ имеют локализацию носителей в нольмерном пространстве. При этом квантовые точки (КТ) реализуются как когерентно напряженные, бездефектные островки при

самоорганизованном эпитаксиальном выращивании гетероструктур несогласованных полупроводников [2]. Известно, что в оптических усилителях типа ППОУ-КТ временная характеристика может быть 1000 раз быстрее, чем у полупроводниковых оптических усилителей с активной областью на квантовых ямах. Это делает данный тип усилителей перспективным для использования в технологиях со скоростью 1 Тбит/с [2]. Среда усиления в квантовых точках показывает следующие уникальные свойства:

- сверхбыстрое восстановление усиления в порядке (~ 1 пс) [3];
- достаточно широкая спектральная ширина усиления (~ 120 нм) [4];
- достаточно высокий коэффициент усиления (более 25 дБ) [5];
- достаточно низкий коэффициент шума (~ 5 дБ) [6];
- большой динамический диапазон для входных мощностей (ДДВМ);
- высокая устойчивость для пульсирующего трафика [8].

Схема экспериментальной установки изображена на рис. 1.

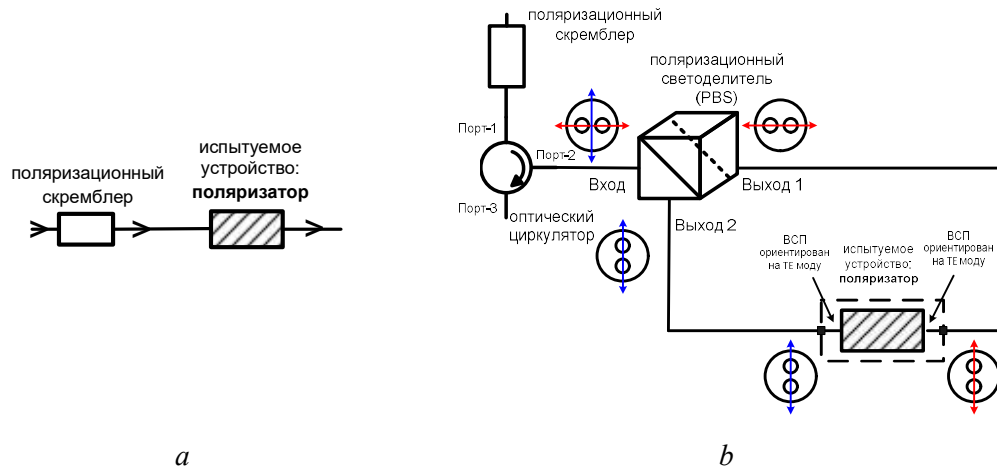


Рис. 1. Схема экспериментальной установки
Fig. 1. Experimental research scheme

На рис. 1, *a* изображена экспериментальная установка прямого соединения, которая включает в себя поляризационный скремблер и поляризатор. На рис. 1, *b* представлена схема поляризационного разнесения, состоящая из оптического циркулятора, поляризационного светоделителя (PBS) и испытываемого устройства (поляризатора), которые соединены волокном, сохраняющим состояние поляризации. Волокно, сохраняющее состояние поляризации (ВСП) – это вид оптического волокна, где поляризация линейно-поляризованной световой волны сохраняется в процессе распространения. Волокно работает, обеспечивая двойное лучепреломление в пределах сердцевины волокна. Двойное лучепреломление возникает в ВСП за счет постоянного напряжения и нарушает круговую симметрию, создавая тем самым две оси передачи, известные как быстрые и медленные оси (рис. 2). В схеме поляризационного разнесения при проведении экспериментальных исследований было использовано волокно, сохраняющее поляризацию типа ВСП PANDA. Волокно имеет стержни напряжения на сердцевине волокна, а также упомянутые выше быструю и медленную оси.

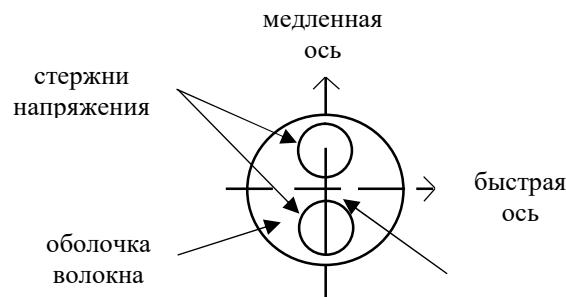


Рис. 2. Поперечное сечение волокна, сохраняющего состояние поляризации (ВСП PANDA)
Fig. 2. Cross-sectional polarization retaining fiber (PANDA VSP)

Принцип работы схемы поляризационного разнесения (рис. 1, *b*) следующий: световая волна вводится в порт-1 оптического циркулятора и переправляется в направлении порта-2. Из порта-2 световая волна передается по ВСП по быстрым и медленным осям. В ВСП световая волна разделяется на две ортогональные поляризации. Горизонтально поляризованный свет передается через поляризационный светоделитель (PBS) и вводится в медленную ось ВСП. Вертикально поляризованный свет отражается в поляризационном светоделителе и вводится в медленную ось ВСП. На двух концах испытуемого устройства в ВСП сигнал передается в виде поперечной электрической моды. Поляризатор – устройство, очень чувствительное к изменению поляризации – используется как испытуемое устройство (вместо усилителя типа ППОУ-КТ). Поляризованный свет (сигнал) проходит через испытуемое устройство и заново поступает в поляризационный светоделитель. Затем свет выходит из порта-3 оптического циркулятора. Результаты использования схемы поляризационного разнесения представлены на рис. 3 в виде глазковой диаграммы.

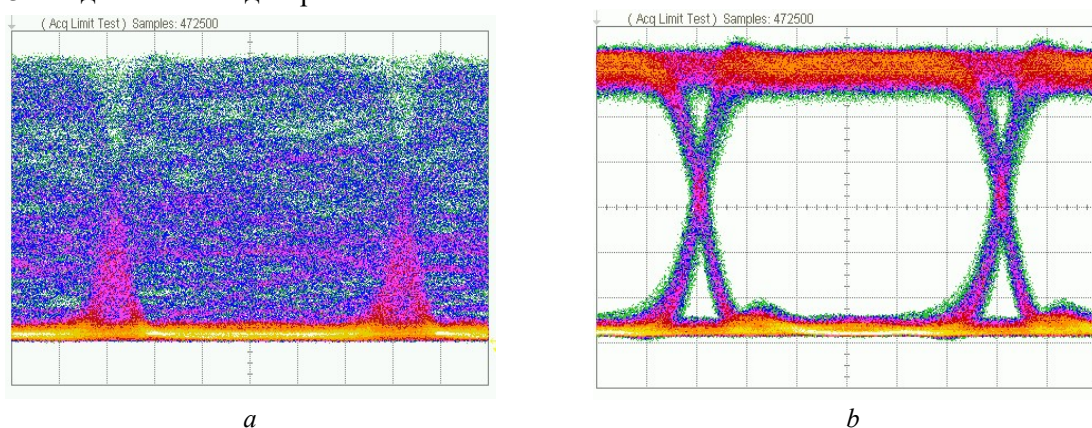


Рис. 3. Глазковая диаграмма
Fig. 3. Eye diagram

На рис. 3, *a* представлена глазковая диаграмма при прямом соединении скремблера и поляризатора в соответствии со схемой, изображенной на рис.1, *a*, а на рисунке 3, *b* показана диаграмма при поляризационном разнесении – схема, рис.1, *b*. Из представленных на рис. 3 диаграмм следует, что глазковая диаграмма при прямом соединении, при случайном изменении состояния поляризации, показывает сильную поляризационную зависимость из-за передачи световой волны через поляризатор (рис. 3, *a*). Глазковая диаграмма при поляризационном разнесении (рис. 1, *b*) открыта и не изменяется при случайном изменении состояния поляризации (рис. 3, *b*). В первом и втором случае при проведении экспериментальных исследований поляризация света изменялась путем использования поляризационного скремблера. Как видно из представленных диаграмм, разнесенная схема подавляет поляризационную чувствительность.

Заключение

В работе была экспериментально продемонстрирована схема поляризационного разнесения для изменения состояния поляризации в оптическом усилителе типа ППОУ-КТ. Показано, что использование схемы поляризационного разнесения подавляет поляризационную чувствительность ППОУ-КТ в GPON с расширенной зоной досягаемости. Одним из преимуществ предложенной схемы является то, что она состоит только из пассивных элементов. Таким образом, контроль состояния поляризации решает проблему чувствительности оптических усилителей к изменению состояния поляризации, тем самым масштабирует сеть WDM/TDM GPON до 60 км с использованием оптических усилителей типа ППОУ-КТ.

Список литературы / References

1. Bonk R., Brenot R., Meuer C., Vallaitis T., Tussupov A., Rode J. C., Sygletos S., Vorreau P., Lelarge F., Duan G.H., Krimmel H.-G., Pfeiffer Th., Bimberg D., Freude W., Leuthold J. 1.3/ 1.5 μm QD-SOAs for WDM/TDM GPON with Extended Reach and Large Upstream/Downstream Dynamic Range. *The Proc. of*

- the Optical Fiber Communication Conference (OFC'09)*. San Diego, USA; OWQ1, accepted for publication.
2. Bhattacharya P., Bimberg D., Arakawa Y. Special Issue on Optoelectronic Devices Based on Quantum Dots. *IEEE*. Sep. 2007;95(9):1718-1722.
 3. Vallaitis T., Koos C., Bonk R., Freude W., Laemmlin M., Meuer C., Bimberg D., Leuthold J. Slow and fast dynamics of gain and phase in a quantum dot semiconductor optical amplifier. *Opt. Express*. 2008;16(1):170-178.
 4. Brenot R., Lelarge F., Legouezigou O., Pommereau F., Poingt F., Legouezigou L., Derouin E., Drisse O., Rousseau B., Martin F., Duan G.H. Quantum Dots Semiconductor Optical Amplifier with a -3 dB Bandwidth of up to 120 nm in Semi-Cooled Operation. *The Proc. of the Optical Fiber Communication Conference, 24-28 Febr. 2008*. San Diego, CA, USA: paper OTuC1.
 5. Akiyama T., Sugawara M., Arakawa Y. Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifiers. *IEEE*. 2007;95(9):1757-1766.
 6. Bimberg D. Quantum dot based nanophotonics and nanoelectronics. *Electr. Letters*. 2008;44(iss. 3):168.
 7. Wang H., Aw E.T., Xia M., Thompson M.G., Penty R.V., White I.H. Temperature Independent Optical Amplification in Uncooled Quantum Dot Optical Amplifiers. *OFC, OSA Technical Digest (CD), 24-28 Febr. 2008*. San Diego, CA, USA: paper OTuC2.
 8. Bonk R., Meuer C., Vallaitis T., Sygletos S., Vorreau P., Ben-Ezra S., Tsadka S., Kovsh A.R., Krestnikov I.L., Laemmlin M., Bimberg D., Freude W., Leuthold J. Single and Multiple Channel Operation Dynamics of Linear Quantum-Dot Semiconductor Optical Amplifier. *ECOC'08*. Sept. 2008. Brüssel: paper Th1.C2.

Вклад авторов

Тусупов А.Д. разработал схему экспериментальных исследований, проводил измерения прохождения сигнала по оптоволокну, построил глазковые диаграммы, принимал участие в обсуждении полученных результатов и выводов.

Тохметов А.Т. сформулировал основную идею построения схемы поляризационного разнесения, обосновал выбор оптического усилителя.

Листопад Н.И. обосновал методику проведения экспериментальных исследований, оценил эффективность предложенного метода поляризационного разнесения.

Authors' contribution

Tussupov A.D. developed a scheme of experimental research, measured the signal transmission through optical fiber, built eye diagrams, took part in the discussion of the results and conclusions.

Tokhmetov A.T. formulated the main idea of constructing a polarization diversity scheme, substantiated the choice of an optical amplifier.

Listopad N.I. substantiated the methodology for conducting experimental studies, assessed the effectiveness of the proposed method of polarization diversity.

Сведения об авторах

Тусупов А.Ж., докторант НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева».

Тохметов А.К., к.ф.-м.н., доцент кафедры информационных систем НАО «Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева».

Листопад Н.И., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tussupov A.D., Doctoral Candidate of L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Tokhmetov A.T., PhD, Associate Professor at the Department of Information Systems of L.N. Gumilyov Eurasian National University.

Listopad N.I., D.Sc., Professor, Head of the Department of Information Radiotechnologies of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
тел. +375-17-239-23-04;
e-mail: Listopad@bsuir.by
Листопад Николай Измаилович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel.: 375-17-239-23-04;
e-mail: Listopad@bsuir.by
Listopad Nikolai Izmailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-85-93>

Оригинальная статья
Original paper

УДК621.3.049.77: 621.793

ФОРМИРОВАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕРМОРЕЗИСТИВНЫХ СТРУКТУР НА ОСНОВЕ ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ

Т.Д. НГУЕН¹, А.И. ЗАНЬКО², Д.А. ГОЛОСОВ¹, С.М. ЗАВАДСКИЙ¹, С.Н. МЕЛЬНИКОВ¹,
В.В. КОЛОС², Н.К. ТОЛОЧКО³

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники
(г. Минск, Республика Беларусь)

²ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

³Белорусский государственный аграрный технический университет (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Исследованы процессы реактивного магнетронного распыления V мишени в среде Ar/O₂ газов. Установлено, что при использовании для распыления импульсного тока и давления в камере менее 0,06 Па интенсивности линий излучения ванадия 437,922 нм, аргона 750,386 нм и кислорода 777,417 нм при изменении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов (f_{O_2}) не имеют гистерезиса и однозначно зависят от параметров процесса распыления, что позволяет стабилизировать процесс без использования систем обратной связи. При контроле процесса распыления методом оптической эмиссионной спектроскопии и нанесении пленок на вращающуюся подложку диаметром 100 мм получены пленки оксида ванадия (VO_x) с неравномерностью толщины менее ±2,4 % и неравномерностью поверхностного сопротивления менее ±2,5 %. Исследования методом длинной линии влияния параметров процесса реактивного распыления и последующего отжига при давлении O₂ 0,04 Па на характеристики терморезистивных структур на основе пленок VO_x показали, что при нанесении контактов без ионной очистки вольт-амперные характеристики (ВАХ) и зависимости сопротивления от длины резисторов $R(L)$ нелинейны, что свидетельствует о наличии в контактах потенциального барьера. Предварительная ионная очистка позволяет значительно улучшить линейность ВАХ. Наиболее линейные ВАХ получены для Ti контактов. Однако удельное контактное сопротивление контакта VO_x/Ti увеличивается при увеличении степени окисления пленок VO_x и достигает $\rho_c = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}^2$ при удельном сопротивлении оксида ванадия $\rho = 0,1 \text{ Ом} \cdot \text{м}$. Анализ зависимостей температурного коэффициента сопротивления (ТКС) и ρ пленок VO_x от температуры отжига показал, что при отжиге ρ и ТКС незначительно снижаются, т. е. происходит частичное восстановление пленок. Однако, в отличие от отжига при атмосферном давлении, отсутствуют области температур, при которых происходит резкое снижение удельного сопротивления и ТКС.

Ключевые слова: оксид ванадия, микроболометр, терморезистивная структура, реактивное магнетронное распыление, отжиг, контактное сопротивление.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., Толочко Н.К. Формирование и исследование характеристик терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 85-93.

FORMATION AND INVESTIGATION OF CHARACTERISTICS OF THERMORESISTIVE STRUCTURES BASED ON VANADIUM OXIDE FILMS

TUYEN D. NGUYEN¹, ANDREY I. ZANKO², DMITRIY A. GOLOSOV¹, SERGEY M. ZAVADSKI¹, SERGEY N. MELNIKOV¹, VLADIMIR V. KOLOS², N.K. TOLOCHKO³

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Republic of Belarus)

²JSC "Integral" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

³Belarusian State Agrarian Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. The processes of reactive magnetron sputtering of a V target in Ar/O₂ gas mixture are investigated. It was found that when using a pulsed current for sputtering and a pressure in the chamber less than 0.06 Pa, the intensities of the emission lines of vanadium at 437.922 nm, argon at 750.386 nm, and oxygen at 777.417 nm with a change in the oxygen concentration in Ar/O₂ gas mixtures (f_{O_2}) have no hysteresis and unambiguously depend on the parameters of the sputtering process, which makes it possible to stabilize the process without using feedback systems. By monitoring the sputtering process by optical emission spectroscopy and depositing films on a rotating substrate of diameter 100 mm, vanadium oxide (VO_x) films with nonuniformity thickness less than ±2.4 % and surface resistance less than ±2.5 % were obtained. Studies by transmission line method of the influence of the parameters of the reactive magnetron sputtering and subsequent annealing at O₂ pressure of 0.04 Pa on the characteristics of thermoresistive structures based on VO_x films showed that when the contacts are deposited without ion cleaning, the current-voltage characteristics (IV) and the dependence of the resistance on the length of resistors $R(L)$ are nonlinear, which indicates the presence of a potential barrier in the contacts. Preliminary ion cleaning can significantly improve the linearity of the IV characteristic. The most linear IV characteristics were obtained for Ti contacts. However, the specific contact resistance of the VO_x/Ti contact increases with an increase in the oxidation state of the VO_x films and reaches $\rho_c = 0.1 \text{ Ohm}\cdot\text{m}^2$ at the specific resistance of vanadium oxide $\rho = 0.1 \text{ Ohm}\cdot\text{m}$. The analysis of the dependences of the temperature coefficient of resistance (TCR) and ρ of VO_x films on the annealing temperature showed that, upon annealing, ρ and TCR slightly decrease, i. e. there occurs a partial deoxidation of the films. However, unlike annealing at atmospheric pressure, there are no temperature regions at which a sharp decrease in the resistivity and TCR occurs.

Keywords: vanadium oxide, microbolometer, thermoresistive structure, reactive magnetron sputtering, annealing, contact resistance.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., Tolochko N.K. Formation and investigation of characteristics of thermoresistive structures based on vanadium oxide films. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 85-93.

Введение

В последние годы интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку неохлаждаемых микроболометрических матриц инфракрасного диапазона, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. В таких устройствах в качестве термочувствительного материала могут использоваться пленки некоторых металлов, аморфного гидрогенизированного кремния Si:H, поликристаллического SiGe и оксида ванадия VO_x. Из данных материалов оксид ванадия обладает наилучшим сочетанием показателей: сравнительно высоким температурным коэффициентом сопротивления (ТКС), низким удельным сопротивлением и низкой способностью к созданию помех [2]. Однако главной проблемой использования VO_x является его поливалентная природа. Оксид ванадия имеет ряд оксидных состояний, а его электрофизические свойства имеют сильную зависимость

от структуры и фазового состава [3]. Поэтому для воспроизводимого формирования пленок VO_x необходимо точно контролировать параметры процесса нанесения и последующего отжига. При этом к процессу нанесения пленок предъявляется ряд требований. Метод нанесения должен обеспечивать формирование пленок с высокой равномерностью толщины и свойств по площади подложки на Si пластинах диаметром до 200 мм. При этом процессы нанесения и последующего отжига должны быть стабильными и обеспечивать высокую воспроизводимость электрофизических свойств пленок не только в партии подложек, обрабатываемых в едином цикле, но и от процесса к процессу.

Второй проблемой является полупроводниковый характер пленок VO_x , что может приводить к формированию потенциального барьера на контакте оксид ванадия – металл, и величина формируемого барьера зависит не только от используемого металла, но и от характеристик пленок оксида ванадия. Наличие барьера на границе металл – полупроводник приводит к тому, что возможно явление выпрямления переменного тока, а вольт-амперная характеристика (ВАХ) для постоянного тока будет несимметричной. Однако на настоящий момент технология формирования омических контактов к оксидным проводникам гораздо менее развита, чем к кремнию. Поэтому проблема формирования качественных омических контактов к пленкам оксида ванадия является актуальной. Таким образом, целью работы было исследование процессов нанесения и отжига пленок VO_x и процессов формирования контактов к пленкам оксида ванадия с целью определения возможности воспроизводимого формирования терморезистивных структур с требуемыми свойствами.

Методика проведения эксперимента

Для измерения характеристик пленок VO_x и контактов оксид ванадия – металл в работе использовался метод длинной линии (Transmission line method или TLM) [4]. Метод TLM обеспечивает измерение удельного сопротивления пленочного резистора, удельного сопротивления контакта и учитывает токи растекания под контактом по объему полупроводниковой пленки [5]. Тестовая терморезистивная структура представляла собой плоский резистор из оксида ванадия размером 8×32 мм с рядом контактов шириной 2 мм и длиной 10 мм, расположенных на расстоянии 1, 2, 4 и 8 мм друг от друга (рис. 1).

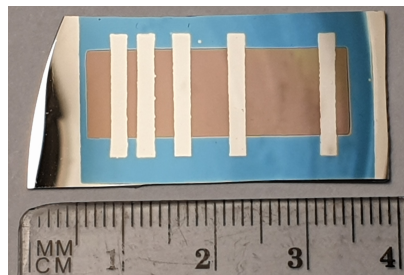


Рис. 1. Тестовая структура для измерения характеристик терморезистивных структур методом TLM
Fig. 1. Test structure for measuring the characteristics of thermoresistive structures by the TLM method

Тестовые структуры формировались на Si подложках, покрытых слоем Si_3N_4 (100 нм). Первоначально формировалось тело резистора. Для этого методом высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления V мишени (чистота 99,96 %) в среде Ag/O_2 рабочих газов через маску наносились пленка VO_x . Описание схемы установки магнетронного нанесения и методика нанесения пленок приведены в статьях [6, 7]. Пленки VO_x наносились на вращающуюся подложку, которая располагалась на расстоянии 120 мм от мишени магнетрона. При этом ось вращения подложки была смещена относительно оси магнетрона на расстояние 100 мм. Скорость вращения подложки 24,5 об/мин. Для питания магнетрона использовался биполярный асимметричный импульсный ток (частота импульсов 10 кГц, напряжение и длительность положительного импульса $U^+ = 25$ В, $\tau = 3$ мкс соответственно). Ток разряда магнетрона поддерживался постоянным и составлял $I_t = 1,5$ А. Концентрация кислорода в Ag/O_2 смеси газов Γ_{O_2} изменялась от 12,5 до 25,0 % при общем давлении в камере

0,06 Па. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалась временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Для анализа и контроля процесса реактивного магнетронного распыления использовался метод оптической эмиссионной спектроскопии (ОЭС). Спектры оптического излучения плазмы магнетронного разряда в диапазоне длин волн 250 – 1000 нм получены с использованием оптического эмиссионного спектрометра видимого и ближнего ИК излучения SL 40-2-2048 ISA. Время накопления спектра составляло 500 мс. После нанесения пленки VO_x подвергались отжигу при пониженном давлении. Отжиг производился на вакуумной установке ВУ-1Б, оборудованной нагревательным столиком. При отжиге образцы устанавливались на столик, камера установки откачивалась до остаточного давления 10⁻³ Па, и в камеру подавался кислород до давления 0,04 Па. Образцы разогревались со скоростью 10 °С/мин до требуемой температуры и выдерживались от 60 мин. Температура отжига изменялась от 200 до 400 °С. После окончания отжига образцы охлаждались до температуры 60 °С со скоростью 7,5 °С/мин. Затем методом магнетронного распыления через вторую маску наносились контакты. В качестве материала контактов использовались Al, Ti, Ni, V, TiN (30 нм)/Ti. Толщина слоя металлизации составляла 150 нм. В некоторых экспериментах перед нанесением материала контактов производилась ионная очистка поверхности пленки VO_x. Для этого использовался ионный источник на основе ускорителя с анодным слоем. Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Поверхностное сопротивление пленок VO_x измерялось с помощью прибора измерения удельного поверхностного сопротивления ИУС-3. Для определения электрофизических характеристик пленок VO_x и контактов оксид ванадия – металл, на полученных структурах измерялось полное сопротивление резисторов между каждой парой ближайших контактов. При измерениях подавался стабильный ток 100 мкА и измерялось падение напряжения между контактами. Затем строился график зависимости сопротивления R от расстояния между контактами L и производилась линейная аппроксимация экспериментальных данных уравнением типа $y=ax+b$. Из графика зависимости полного сопротивления от расстояния между электродами $R(L)$ извлекались два параметра: поверхностное сопротивление пленки (r_s), сопротивление контакта (R_c). Удельное сопротивление контакта определялось как сопротивление контакта R_c приведенное к единице площади контакта S_c :

$$\rho_c = R_c S_c. \quad (1)$$

Удельное сопротивление пленок VO_x определялось исходя из r_s и толщины пленки. При измерениях ТКС температура терморезисторов изменялась от комнатной до 90 °С и обратно со скоростью 4 °С/мин. Для подтверждения омического поведения контактов также проводились измерения ВАХ тестовых структур. Вольт-амперные характеристики получены с помощью измерителя иммитанса E7-20. При измерениях использовалась развертка по напряжению от минус 40 до 40 В и регистрировался ток.

Результаты и их обсуждение

С целью определения режимов воспроизводимого нанесения пленок VO_x проведены исследования плазмы магнетронного разряда при распылении V мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. На рис. 2 представлен типичный спектр ОЭС плазмы магнетронного разряда. На полученных спектрах наиболее интенсивные линии излучения возбужденных атомов (VI) и ионов (VII) ванадия находились в диапазоне длин волн 300 – 500 нм. Были зафиксированы группы пиков на длинах волн 304 – 313, 317 – 321, 380 – 390, 408 – 413, 432 – 441, 457 – 460 и 482 – 489 нм. Наиболее интенсивный пик VI наблюдался на длине волны 318,04 нм. Линии ионов ванадия имели очень низкую интенсивность. Линии Ag находились в диапазоне длин волн 700 – 950 нм. Наиболее интенсивные линии на длинах волн 750,39, 762,4, 811,0 нм принадлежали возбужденным атомам аргона (ArI). Линий ионов аргона (ArII) не было зафиксировано. В спектре также были идентифицированы тройные линии возбужденных атомов кислорода (OI) в диапазонах длин волн 777,1 – 777,6 нм и 844,63 – 844,64 нм, парные линии в диапазоне 926,5 – 926,6 нм и линия на длине волны 557,73 нм. Линий ионов кислорода

(OI) в спектре также не наблюдалось. Это позволяет сделать вывод, что при магнетронном распылении ванадия распыленный поток состоит из нейтральных атомов. На основе анализа полученных эмиссионных спектров плазмы магнетронного разряда были определены интенсивные линии ванадия VI (437,922 нм), аргона ArI (750,386 нм) и кислорода OI (777,417 нм), которые в дальнейшем использовались для контроля состава плазмы при управлении процессом реактивного магнетронного распыления. Наиболее интенсивная линия ванадия VI (318,04 нм) не использовалась для контроля состава плазмы, поскольку было установлено, что в процессе нанесения пленок продукты распыления попадают на входное окно спектрометра. Пленки VO_x имеют высокое оптическое поглощение в диапазоне длин волн до 300 – 400 нм, что приводит к погрешности измерения ее интенсивности. По данной причине в качестве контрольной была выбрана линия VI (437,92 нм), имеющая более низкую интенсивность, но не попадающая в диапазон длин волн оптического поглощения пленок VO_x .

С целью определения эффективности использования процесса высоковакуумного импульсного реактивного магнетронного распыления для контролируемого нанесения пленок оксида ванадия исследовано изменение интенсивности контрольных линий излучения плазмы при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов (рис. 3). Установлено, что при увеличении концентрации кислорода до $\Gamma_{O_2} = 17\%$ интенсивность линии VI практически не изменялась. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} интенсивность линии начинала уменьшаться и снижалась практически до нуля при $\Gamma_{O_2} = 40\%$. Линия ArI при увеличении Γ_{O_2} уменьшалась практически пропорционально содержанию Ar в камере. Линия OI при низких концентрациях кислорода (до 7%) практически не наблюдалась. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} линия OI увеличивалась практически пропорционально концентрации кислорода. При увеличении и уменьшении расхода газов интенсивности линий ванадия, кислорода и аргона однозначно зависели от концентрации кислорода, гистерезис при увеличении и уменьшении Γ_{O_2} отсутствовал. На основе этих данных сделан вывод, что эмиссионные линии VI (437,92 нм), OI (777,41 нм) и ArI (750,39 нм) идентично отражают изменения, происходящие в системе распыления, и могут эффективно использоваться для контроля процесса распыления при нанесении пленок оксида ванадия.

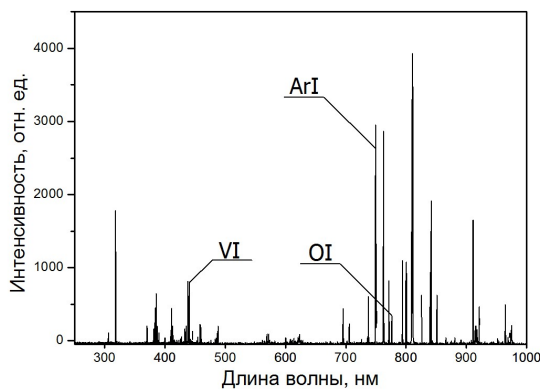


Рис. 2. Оптический эмиссионный спектр излучения плазмы при распылении V мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов ($\Gamma_{O_2} = 16,67\%$)

Fig. 2. Optical emission spectrum of plasma radiation upon sputtering of a V target in an Ar/O₂ gas mixture ($\Gamma_{O_2} = 16.67\%$)

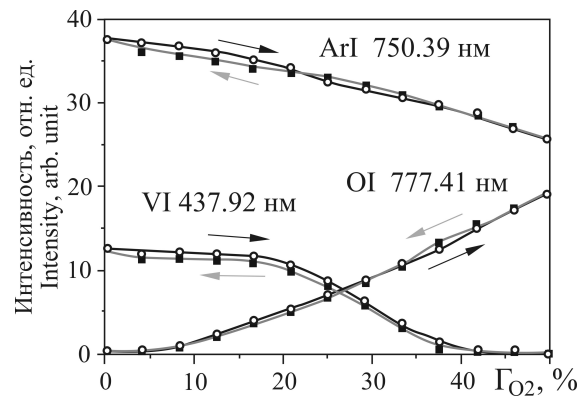


Рис. 3. Изменение интенсивности линий VI, OI и ArI при увеличении и уменьшении концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig. 3. Changing the intensities of the lines VI, OI and ArI with increasing and decreasing the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

Проведены исследования равномерности распределения толщины пленок VO_x при нанесении на вращающуюся подложку (рис. 4). Пленки наносилась при следующих режимах: $\Gamma_{O_2} = 25,0\%$, ток и напряжение разряда соответственно $I_t = 1,5$ А, $U_t = 538$ В, время нанесения 455 с. Установлено, что неравномерность толщины пленок VO_x на подложках диаметром 100 и 200 мм не превышала $\pm 2,4\%$. Для измерения неравномерности распределения поверхностного сопротивления r_s на подложку диаметром 100 мм были нанесены пленки VO_x со сравнительно низким удельным сопротивлением при $\Gamma_{O_2} = 12,5\%$. Измерения r_s пленок по поверхности подложки проводились по двум взаимно перпендикулярным осям с шагом 5 мм. Поверхностное

сопротивление пленок на подложке диаметром 100 мм изменялось от 415 до 435 Ом/□. Относительное изменение поверхностного сопротивления пленок не превышало $\pm 2,5\%$ (рис. 5).

Также проведены исследования влияния параметров процесса реактивного магнетронного распыления и последующего отжига в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па на электрофизические характеристики терморезистивных структур. На рис. 6, 7 представлены ВАХ и зависимости $R(L)$ терморезисторов с Ti контактами, нанесенными без предварительной ионной очистки пленки VO_x . Пленки VO_x наносились при $\Gamma_{O_2} = 25\%$ и затем отжигались в атмосфере кислорода при давлении в камере 0,04 Па. Время отжига составляло 60 мин.

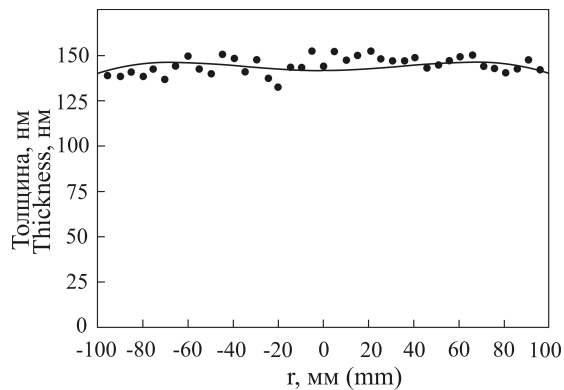


Рис. 4. Распределение толщины пленки VO_x на подложке диаметром 200 мм ($\Gamma_{O_2} = 25,0\%$)
Fig. 4. Distribution of the VO_x film thickness of diameter 200 mm substrate ($\Gamma_{O_2} = 25.0\%$)

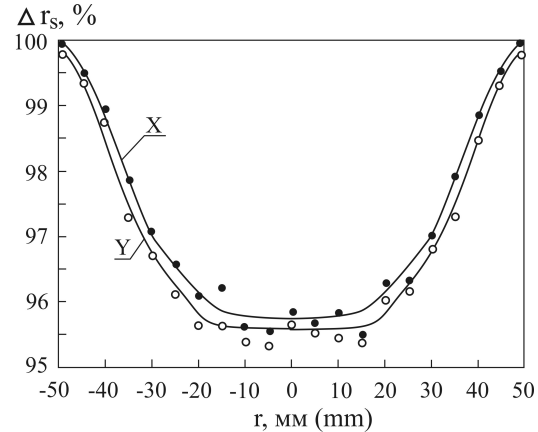


Рис. 5. Относительное распределение поверхностного сопротивления пленок VO_x на подложке диаметром 100 мм
Fig. 5. Relative distribution of the surface resistance of VO_x films on a substrate of diameter 100 mm

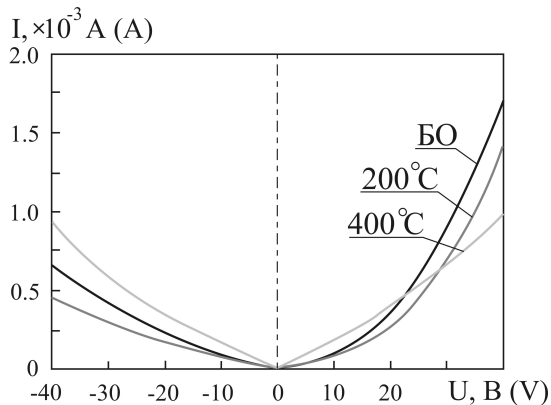


Рис. 6. ВАХ VO_x резисторов с Ti контактами, нанесенными без предварительной ионной очистки. Пленки VO_x отожжены при различной температуре
Fig. 6. IV characteristic of VO_x resistors with Ti contacts, deposited without preliminary ion cleaning. VO_x films annealed at different temperatures

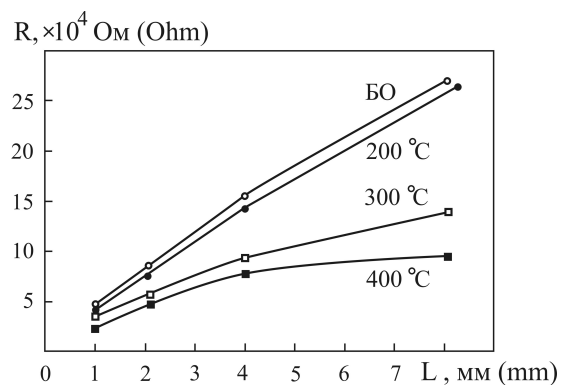


Рис. 7. Зависимость сопротивления от длины VO_x резисторов, отожженных при различной температуре ($P_{O_2} = 0,04$ Па, $t_{an} = 60$ мин)
Fig. 7. Dependence of resistance on the length VO_x of resistors annealed at different temperatures ($P_{O_2} = 0,04$ Па, $t_{an} = 60$ мин)

Установлено, что при нанесении Al, Ti, Ni, V, TiN/Ti контактов без предварительной ионной очистки ВАХ полученных структур были нелинейными и несимметричными. При приложении напряжений разной полярности пропускаемые токи могли отличаться более чем на порядок. Характер ВАХ и зависимостей $R(L)$ свидетельствовали о наличии в контактах барьеров Шоттки. Причем этот эффект наиболее сильно проявлялся для контактов с пленками VO_x , имеющих высокую степень окисления (высокое удельное сопротивление).

Аналогичные результаты были получены при использовании контактов из Al, Ni, V и TiN/Ti, наносимых без предварительной ионной очистки. Была обнаружена общая тенденция, что при увеличении удельного сопротивления пленок оксида ванадия ВАХ и зависимости $R(L)$ терморезистивных структур становились более нелинейными. При этом увеличивалась вентильность (разность проводимости в разных направлениях протекания тока). Для получения

омического контакта было предложено использовать предварительную ионно-лучевую очистку пленки VO_x перед нанесением металлических контактов. Ионная очистка позволяет устранить адсорбированные на поверхности пленки атомы кислорода и молекулы воды, а также частично восстановить поверхностный слой оксида ванадия. Ионная очистка производилась непосредственно перед нанесением металлизации в режиме вращения подложкодержателя при следующих параметрах: напряжение и ток разряда ионного источника соответственно $U_a = 2,0$ кВ, $I_a = 50$ мА. Время очистки 10 мин. Анализ ВАХ резистивных структур, полученных с использованием предварительной очистки, показал, что ионная очистка позволила значительно улучшить линейность ВАХ. Наиболее линейные ВАХ были получены для Ti контактов (рис. 8). Однако даже после ионной очистки пленки VO_x ВАХ терморезистивных структур имели некоторую вентильность. Также следует отметить, что удельное сопротивление контакта имело сильную зависимость от Γ_{O_2} (удельного сопротивления пленок VO_x) (рис. 9). При концентрации кислорода более 20–25 %, когда формируются пленки с высокими значениями ТКС и требуемым удельным сопротивлением ($10^{-2} - 10^{-1}$ Ом·м), ρ_c достигало значений 0,1 Ом·м². Наиболее нелинейные ВАХ с большой вентильностью были получены для контактов VO_x/Al . Контакты пленки VO_x с Ni, V и TiN/Ti имели сравнительно малую вентильность, но ВАХ также были нелинейными.

Анализ полученных результатов показал, что наилучший контакт получен для металла с наименьшей работой выхода $A_{Ti} = 3,95$ эВ. Для сравнения, работа выхода для Al, Ni и V составляет соответственно $A_{Al} = 4,25$ эВ, $A_V = 4,12$ эВ, $A_{Ni} = 4,5$ эВ. Поскольку оксид ванадия можно отнести к полупроводникам *n*-типа, то невыпрямляющие омические контакты для такого полупроводника могут быть реализованы в случае, когда работа выхода полупроводника больше работы выхода металла. Поэтому, по-видимому, для формирования омического контакта к пленке VO_x с низким удельным сопротивлением желательно использовать металлы с низким значением работы выхода.

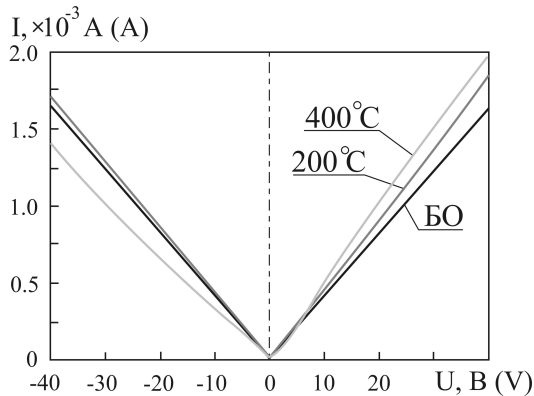


Рис. 8. ВАХ терморезистивных структур с Ti контактами, нанесенными с предварительной ионной очисткой

Fig. 8. IV characteristics of thermoresistive structures with Ti contacts deposited with preliminary ion cleaning

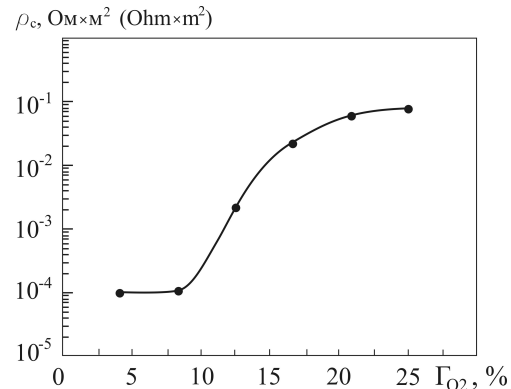


Рис. 9. Зависимость удельного сопротивления контакта Ti/ VO_x от концентрации кислорода в Ar/ O_2 смеси газов в процессе нанесения пленок VO_x (Ti контакты с ионной очисткой)

Fig. 9. Dependence of the resistivity of the Ti/ VO_x contact on the oxygen concentration in the Ar/ O_2 gas mixture during the deposition of VO_x films (Ti contacts with ion cleaning)

Анализ зависимостей удельного сопротивления и ТКС пленок оксида ванадия от температуры отжига (рис. 10) показал, что при отжиге в атмосфере O_2 при пониженном давлении, ρ и ТКС пленок VO_x снижаются, т. е. происходит частичное восстановление пленок. Однако, в отличие от отжига при атмосферном давлении [8], снижение ρ и ТКС происходит практически линейно. Отсутствуют области температур, при которых происходит резкое падение удельного сопротивления.

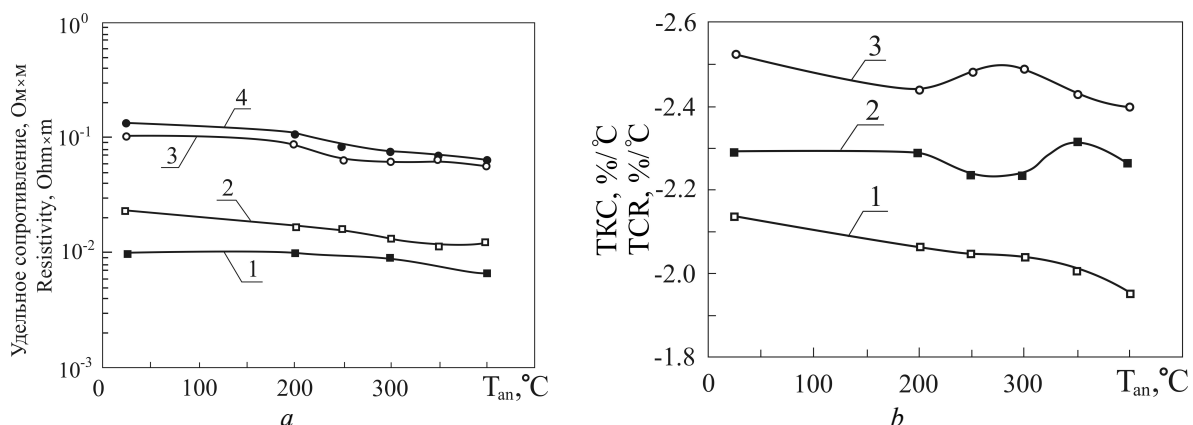


Рис. 10. Зависимость удельного сопротивления (а) и ТКС (б) от температуры отжига пленок VO_x , нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O_2 смеси газов: 1 – 22,5 %, 2 – 23,3 %, 3 – 24,2 %, 4 – 25,0 %
Fig. 10. Dependence of resistivity (a) and TCR (b) on the annealing temperature of VO_x films deposited at various oxygen concentrations in an Ar/O_2 gas mixture: 1 – 22.5 %, 2 – 23.3 %, 3 – 24.2 %, 4 – 25.0 %

Заключение

Проведены исследования процессов формирования терморезистивных структур на основе пленок оксида ванадия. Установлено, что при контроле процесса реактивного распыления методом ОЭС и нанесении пленок на вращающуюся подложку диаметром 100 мм получены пленки VO_x с неравномерностью толщины менее $\pm 2,4\%$ и неравномерностью поверхностного сопротивления менее $\pm 2,5\%$. При отжиге пленок оксида ванадия в атмосфере O_2 при давлении 0,04 Па ρ и ТКС пленок VO_x снижаются, однако снижение происходит практически линейно. Установлено, что предварительная ионная очистка пленок оксида ванадия и последующее нанесение Ti контактов позволяет формировать терморезистивные структуры с линейными ВАХ. Однако даже после ионной очистки пленки оксида ванадия ВАХ терморезистивных структур VO_x/Ti имеют некоторую вентильность.

Список литературы

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A., Julien C.M. Review V_2O_5 thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401.
3. Morosan E., Natelson D., Nevidomskyy A.H., Si Q. Strongly correlated materials *Adv. Mater.* 2012;24(36):4896-4923.
4. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong S. Circular test structure for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics*. 2017;30(3):313-326.
5. Кудрик Я.Я. Удельное сопротивление омических контактов в структурах металл – полупроводник. *Петербургский журнал электроники*. 2010;1:25-40.
6. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. *Доклады БГУИР*. 2020;18(6):94-102.
7. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Структурно-фазовые характеристики пленок оксида ванадия. *Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого*. 2021;1:33-41.
8. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В., То Т.К. Влияние отжига на структурно-фазовые и электрофизические свойства пленок оксида ванадия. *Доклады БГУИР*. 2021;19(3):22-30.

References

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Mauger A., Julien C.M. Review V_2O_5 thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401.

3. Morosan E., Natelson D., Nevidomskyy A.H., Si Q. Strongly correlated materials *Adv. Mater.* 2012;24(36):4896-4923.
4. Holland A.S., Pan Y., Alnassar M.S.N., Luong S. Circular test structure for determining the specific contact resistance of ohmic contacts. *Facta Universitatis. Series: Electronics and Energetics.* 2017;30(3):313-326.
5. Кудрик Я.Я. [Udel'noe soprotivlenie omicheskikh kontaktov v strukturah metall – poluprovodnik]. *Petersburg Electronics Journal.* 2010;1:25-40. (In Russ.)
6. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V. [Electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by reactive magnetron sputtering]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2020;18(6):94-102. (In Russ.)
7. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. [Structural and phase characteristics of vanadium oxide films]. *Bulletin of Sukhoi State Technical University of Gomel.* 2021;1:33-41. (In Russ.)
8. Nguyen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V., To T.Q. [Influence of annealing on structure, phase and electrophysical properties of vanadium oxide films]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR.* 2021;19(3):22-30. (In Russ.)

Вклад авторов / Authors' contribution

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.
All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

Нгуен Т.Д., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Зацько А.И., инженер-технолог ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Голосов Д.А., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Завадский С.М., к.т.н., доцент, начальник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мельников С.Н., к.т.н., ведущий научный сотрудник Центра 9.1. НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Колос В.В., заместитель заведующего отраслевой лаборатории новых технологий и материалов ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Толочко Н.К., д.ф.-м.н., профессор кафедры технологий и организации технического сервиса Белорусского государственного аграрного технического университета.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники;
Тел. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Голосов Дмитрий Анатольевич

Information about the authors

Nguyen T.D., Postgraduate student at the Electronic Technique and Technology Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zanko A.I., Process Engineer of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Golosov D.A., PhD, Associate Professor, Leader Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Zavadski S.M., PhD, Associate Professor, Head of the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Melnikov S.N., PhD, Leader Researcher at the Center 9.1 of R&D Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kolos V.V., Deputy Head of the Industry Laboratory of New Technologies and Materials of JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Tolochko N.K., D.Sc., Professor of the Department of Technologies and Organization of Technical Service of the Belarusian State Agrarian Technical University.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics;
tel. +375-29-671-35-43;
e-mail: golosov@bsuir.by
Golosov Dmitriy Anatol'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-94-102>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.039:004.6

ИНФОРМАЦИОННАЯ СИСТЕМА УЧЕТА И КОНТРОЛЯ ЯДЕРНОГО МАТЕРИАЛА

С.Н. СЫТОВА, А.П. ДУНЕЦ, А.Н. КОВАЛЕНКО, С.В. ЧЕРЕПИЦА

*Научно-исследовательское учреждение «Институт ядерных проблем»
Белорусского государственного университета (г. Минск, Республика Беларусь)*

Поступила в редакцию 6 мая 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Дается краткое описание информационной системы учета ядерного материала, разработанной для национального регулятора в области ядерной и радиационной безопасности – Департамента по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госатомнадзор). Информационная система является частью Интеллектуальной информационной системы сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности, разработанной на основе свободного программного обеспечения. Система внедрена в Госатомнадзоре, и в настоящее время в Республике Беларусь весь учет ядерного материала с отчетностью перед МАГАТЭ ведется с ее помощью. Система в полном соответствии с требованиями МАГАТЭ обеспечивает автоматическую генерацию со всеми необходимыми расчетами на основании вводимых данных следующих отчетных документов: отчета о фактически наличном количестве материала; отчета об изменениях инвентарного количества материала; материально-балансового отчета; текстового отчета; главного журнала учета (General Ledger). Все отчеты полностью согласованы между собой. Разработан эффективный механизм импорта и экспорта данных из / в систему по требуемым МАГАТЭ форматам фиксированного и маркированного Кода 10. Все журналы системы, описывающие отчеты, содержат поле «Утвержден МАГАТЭ» (да / нет). При выборе значения «да» они закрываются для редактирования и корректировки. Разработан специальный инструмент внесения корректировок в данные документы в соответствии с правилами МАГАТЭ. Система содержит полностью заполненные справочники (небольшие журналы, на которые ссылаются все основные журналы базы данных) с необходимыми справочными данными в соответствии с типовым Кодом 10. Информационная система удовлетворяет всем требованиям МАГАТЭ для таких систем национальных регуляторов в области учета, контроля и надзора за ядерным материалом, может быть легко переведена на другие языки и адаптирована под нужды учета и контроля ядерного материала в эксплуатирующих организациях.

Ключевые слова: информационная система, базы данных, свободное программное обеспечение, ядерный материал, Код 10.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Авторы выражают благодарность начальнику Госатомнадзора О.М. Луговской и первому заместителю начальника Госатомнадзора Л.Ф. Дедулю за многочисленные конструктивные предложения по развитию Интеллектуальной информационной системы сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности.

Для цитирования. Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н., Черепица С.В. Информационная система учета и контроля ядерного материала. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 94-102.

INFORMATION SYSTEM FOR NUCLEAR MATERIAL ACCOUNTING AND CONTROL

SVETLANA N. SYTOVA, ANDREY P. DUNETS, ANTON N. KAVALENKA,
SIARHEI V. CHARAPITSA

*Research Institution "Institute for Nuclear Problems" of Belarusian State University
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 6 May 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. A brief description of information system for nuclear material accounting developed for the national regulator in the field of nuclear and radiation safety - the Department for Nuclear and Radiation Safety of the Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus (Gosatomnadzor) is given. The information system is a part of the Intellectual information system of a Gosatomnadzor employee to ensure control (supervision) in the field of nuclear and radiation safety. It is developed on the basis of free software. The system has been implemented in Gosatomnadzor and at present in the Republic of Belarus all nuclear material accounting with reporting to the IAEA is carried out with its help. The system, in full compliance with the IAEA requirements, provides automatic generation with all the necessary calculations based on the input data of the following reporting documents: physical inventory listing, inventory change report, material balance report, textual report, General Ledger. All reports are fully consistent each with other. An efficient mechanism has been developed for importing and exporting data from / to the system according to formats of fixed and labelled Code 10 required by the IAEA. All logs of the system describing reports contain a field "IAEA approved" (yes / no). If it set to "yes", they are closed for editing and correction. A special tool has been developed for making adjustments to these documents in accordance with the IAEA rules. The system contains fully completed reference books (small journals referenced by all major journals in the database) with the necessary reference data in accordance with Code 10. The information system meets all the IAEA requirements for such systems of national regulators in the field of accounting, control and supervision of nuclear material. It can be easily translated into other languages and adapted for the needs of accounting and control of nuclear material in operating organizations.

Keywords: information system, databases, free software, nuclear material, Code 10.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

Gratitude. The authors are grateful to the Head of Gosatomnadzor O.M. Lugovskaya and the First Deputy Head of Gosatomnadzor L.F. Dedul for numerous constructive proposals for the development of the Intellectual information system of a Gosatomnadzor employee to ensure control (supervision) in the field of nuclear and radiation safety.

For citation. Sytova S.N., Dunets A.P., Kavalenka A.N., Charapitsa S.V. Information system for nuclear material accounting and control. Doklady BGUIR. 2021; 19(4): 94-102.

Введение

Согласно Соглашению INFCIRC/495 от 14 апреля 1995 года между Республикой Беларусь и Международным агентством по атомной энергии (МАГАТЭ) о применении гарантий в связи с Договором о нераспространении ядерного оружия в Государственной системе учета и контроля ядерных материалов Республики Беларусь учету и контролю подлежит ядерный материал (ЯМ) массой более 0 грамм плутония, урана (обедненного, обогащенного, природного) и тория. Данные элементы широко используются не только в различных ядерных установках и реакторах эксплуатирующих организаций (ЭО), таких как Белорусская АЭС, ГНУ "ОИЭЯИ – Сосны" НАН Беларуси, но и в небольших количествах в различных приборах медицинской техники, транспортных контейнерах, в составе контрольно-измерительной аппаратуры, радиоизотопных дымовых извещателях и т. д.,

используемых на предприятиях и организациях страны. Такие организации называются организациями с ЯМ малых количеств.

В современном мире учет ЯМ должен вестись с использованием современных информационных технологий. К сожалению, до сих пор зачастую он ведется просто в виде документации, которая набирается силами сотрудников организации в офисных приложениях Microsoft Office, и, как показывает практика, может сохраняться в организации просто в распечатанном на бумаге виде.

В МАГАТЭ разработаны подробные требования по правилам учета и контроля ЯМ, которые содержатся в так называемом типовом Коде 10 (IAEA SG-FM-1172 “Contents, format and structure of reports to the Agency”, IAEA NG-T-6.7 STI/PUB/1494 “Nuclear material accounting handbook”). Полный обзор требований учета и контроля приведен, например, в [1].

Программного обеспечения и информационных систем организации учета и контроля ЯМ национальных регуляторов и ЭО, используемого в мире, достаточно много [2–4]. Зачастую они именуется информационно-аналитическими системами либо автоматизированными информационными системами учета и контроля. В состав любой из этих систем входят операционная система (ОС), система управления базами данных (СУБД), базы данных (БД) и прикладное программное обеспечение. Согласно информации, доступной в открытой печати, в большей части автоматизированных систем учета и контроля ядерных материалов, используемых на предприятиях Росатома, используется программное обеспечение, разработанное под ОС Windows, например, системы Accord-2005 [5].

Согласно требованиям МАГАТЭ, информационная система учета и контроля ядерных материалов ЭО должна обеспечивать информационную поддержку процессов обращения с ЯМ на всех этапах жизненного цикла и предусматривать:

- учет количества ядерных материалов во всех зонах баланса материалов (ЗБМ);
- учет местонахождения каждой учетной единицы (УЕ) на всех этапах ее использования и операций с УЕ, а также оперативный поиск их местонахождения;
- построение и печать картограмм хранилищ;
- автоматизированное построение рабочих графиков перегрузки ядерного топлива;
- составление, регистрация и ведение учетных и отчетных документов;
- предоставление в установленном порядке отчетных документов в регулирующие органы.

Для организаций с ЯМ малых количеств состав функций информационной системы должен содержать меньше опций, обеспечивая учет количества ядерных материалов в организации, учет местонахождения каждой учетной единицы на всех этапах ее использования, а также ведение учетных и отчетных документов, предоставление последних в установленном порядке в регулирующие органы.

На уровне национального ядерного регулятора объем информации также отличается. Он формируется на основании отчетных документов и данных, поступивших от ЭО и организаций с ЯМ малых количеств, обеспечивая ведение учета партий ЯМ по всем ЗБМ страны. Также должна обеспечиваться проверка поступивших отчетных документов, контрольные функции, а также предоставление всех требуемых отчетов в МАГАТЭ.

Программное обеспечение для учета ядерного материала

В 2016–2020 гг. создана Интеллектуальная информационная система сотрудника Госатомнадзора для обеспечения контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности (далее – ИИСН ГАН) [6]. Система внедрена в Департаменте по ядерной и радиационной безопасности Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь (Госатомнадзор). Она разрабатывалась на основе фреймворка eLab [7, 8], являющегося системой клиент-серверной архитектуры, работающей под ОС Windows и Linux, класса лабораторная информационная система с элементами электронного документооборота на основе свободного программного обеспечения: Debian GNU/Linux, Web-server Apache, сервер баз данных Firebird, сервер приложений PHP. Работа осуществляется через Web-интерфейс в многопользовательском режиме с разделением прав доступа посредством любых браузеров:

Mozilla Firefox, Google Chrome, Microsoft Edge и др. На компьютерах пользователей ничего дополнительно не устанавливается. Достаточно наличия стандартного браузера.

Работа пользователей возможна как во внутрикорпоративной сети, так и через Интернет. В последнем случае в системе обеспечен доступ по протоколу HTTPS (англ. HyperText Transfer Protocol Secure), поддерживающем дополнительное шифрование. Также организован удаленный доступ сотрудников к рабочему месту по технологии, позволяющей обеспечить безопасные с использованием средств криптографии сетевые соединения поверх другой сети – Интернета. Это доступ через VPN (англ. *Virtual Private Network* – виртуальная частная сеть).

В рамках фреймворка eLab удачно использованы современные информационные технологии с целью создания удобной, быстрой и надежной системы, легко модифицируемой и адаптируемой под условия проекта.

ИИСН ГАН включает: Модуль № 1 контроля (надзора) за обеспечением безопасности при сооружении и вводе в эксплуатацию Белорусской АЭС, включая контроль (надзор) за оборудованием, системами и элементами энергоблоков № 1, 2 Белорусской АЭС; Модуль № 2 контроля (надзора) за радиационной безопасностью источников ионизирующего излучения; Модуль № 3 учета и контроля ЯМ, радиоактивных отходов (РАО) и отработавшего ядерного топлива (ОЯТ). В настоящее время с помощью ИИСН ГАН в Республике Беларусь на уровне регулирующего органа ведется весь учет источников ионизирующего излучения, учет ядерного материала с отчетностью перед МАГАТЭ, надзор за строительством БелАЭС.

Основные принципы работы в системе:

1. Заполнить все справочники – небольшие журналы, на которые идут ссылки из основных журналов.
2. Создать запись в редакторе записей основного журнала, заполнить ее и сохранить.
3. При необходимости подгрузить файлы в запись.
4. Заполнить записи во вспомогательных журналах, информация из которых аккумулируется и высвечивается в основном журнале с помощью “view” – «представлений».
5. При наличии дополнительных данных (в файлах типа xlsx Microsoft Office или text10 – для маркированного Кода 10), импортировать их в журнал.
6. Сформировать отчетный документ с помощью доступных шаблонов отчетов.
7. При необходимости сформировать дополнительный шаблон отчета (типа docx или xlsx), создать для него запись и подгрузить его в систему.
8. По мере необходимости экспортировать данные в файлы типа xlsx или text10.

Файл с расширением text10 – текстовый файл, содержащий отчеты в маркированном Коде 10. ИИСН ГАН также поддерживает работу с файлами в форматах LibreOffice под ОС Linux.

Учет ядерного материала с помощью ИИСН ГАН

Целью разработки Модуля № 3 является создание инструмента для эффективного выполнения функций Госатомнадзором в части учета и контроля ЯМ, РАО и ОЯТ для обеспечения быстрого доступа к необходимой информации, упрощения создания, ускорения получения и повышения сохранности информации и данных по контролю (надзору) в области ядерной и радиационной безопасности, создания условий для обмена, накопления и сохранения информации, данных и знаний на уровне, обеспечивающем безопасное, устойчивое и эффективное развитие атомной отрасли Республики Беларусь.

Модуль № 3 обеспечивает информационную поддержку Госатомнадзора для осуществления им функций по учету, контролю и надзору в соответствии с международными обязательствами Республики Беларусь за оборотом и использованием ЯМ, РАО и ОЯТ, лицензированием деятельности в области использования ЯМ, разрешительной деятельностью, учетом ЯМ вне ядерных установок.

Функционирование Модуля № 3 базируется на принятых методах сбора, учета, хранения и анализа информации по наработкам, дефектам, повреждениям, отказам и нарушениям в области ядерной и радиационной безопасности, опирается на существующие

и используемые Госатомнадзором базы данных в области ядерной и радиационной безопасности. Модуль № 3 ИИСН ГАН обеспечивает формирование всей необходимой отчетности на республиканском уровне по требуемым МАГАТЭ формам.

Система содержит справочники со всей необходимой информацией о ЯМ согласно требованиям МАГАТЭ, в том числе справочники «Код элемента», «Характеристики ЯМ», «Код изотопа», «Коды изменения инвентарного количества ЯМ», «Коды описания материала» (физическая форма, химическая форма, способ сохранения, состояние и качество облучения), «Контейнеры для хранения, классифицируемые по объему», «База измерений», «Страны», «Известные ЗБМ», «Типы учетных отчетов».

В Модуле № 3 возможен автоматический импорт готовых отчетов, присланных в Госатомнадзор ЭО (Белорусской АЭС и ГНУ «ОИЭЯИ – Сосны» НАН Беларуси). Также здесь заложен следующий алгоритм формирования записей в БД по учету ЯМ на основании партий ЯМ.

1. В журнале «Партии ЯМ» (см. рис. 1) следует сформировать на основе данных, пришедших из организаций, записи для каждой партии по следующим полям данных: Код КТИ (ключевой точки измерения); Наименование партии; Организация; Номера устройств; Описание материала; Элемент; Код изотопа; Стоит на учете; Примечания. Поле «Стоит на учете» имеет два значения: да / нет. Значение «нет» выбирается в случае вывода партии из-под гарантий либо ее ликвидации. Значения в поле «Список отчетов» формируются автоматически по упоминаниям партии во всех отчетах ICR, P1L, MBR. Система предупреждает о случайном невыборе одного или нескольких значений в полях «Описание материала» либо «Элемент» специальным сообщением в соответствующей позиции в записи журнала.

2. С целью облегчения отслеживания истории партии создан вспомогательный не редактируемый журнал «Сведения о партиях ЯМ», который содержит следующие поля, формируемые в журнале «Партии ЯМ»: Код КТИ; Наименование партии; Организация; Номера устройств; Описание материала; Элемент; Код изотопа; Стоит на учете; Список отчетов; Примечания.

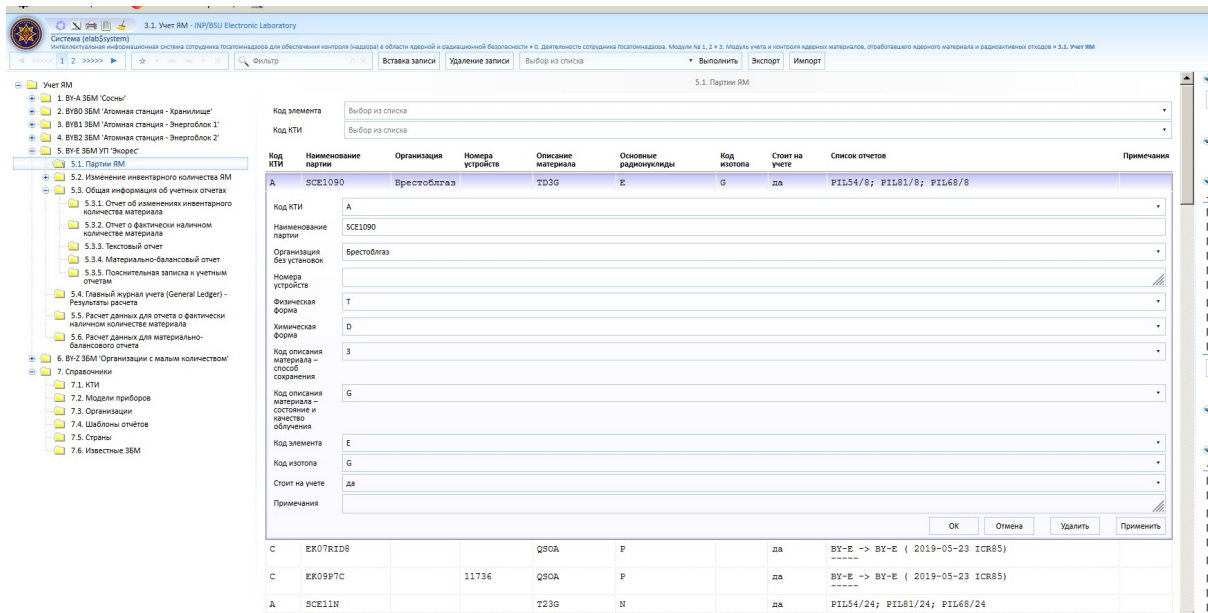


Рис. 1. Копия экрана Модуля № 3: Редактор журнала «Партии ЯМ»

Fig. 1. Screenshot of Module No. 3: Editor of the log “Batches of NM”

3. В журнале «Изменение инвентарного количества ЯМ» формируются данные об изменении инвентарного количества на основе партий по полям, которые, как и выше, полностью соответствуют полям соответствующих отчетов типового Кода 10, здесь, в частности, отчета ICR. Для ускорения ввода данных в редакторе заданы предустановленные значения, которые с вероятностью больше 50 % будут правильными для конкретной записи.

4. В журнале «Отчет об изменениях инвентарного количества материала» формируются данные по требуемым полям отчета ICR. Данный журнал может быть

автоматически сформирован на основании журнала «Изменение инвентарного количества ЯМ», либо данные могут быть импортированы извне из готовых отчетов ЭО, либо заданы с помощью редактора записи.

5. После формирования отчета ICR все данные автоматически попадают в архив – журнал «Данные отчетов об изменении инвентарного количества ЯМ». В дальнейшем эти данные изменению не подлежат – только корректировке в соответствии с процедурами МАГАТЭ.

6. Журнал «Общая информация об учетных отчетах» должен быть заполнен для каждого нового отчета, который создается в системе, со следующими полями: Зона баланса материалов; Тип отчета; Номер отчета; Дата начала; Дата окончания; ФИО составителя; Количество страниц; Дата представления; Пояснительная записка к учетным отчетам; Примечания.

При автоматическом импорте всех типов отчетов в формате фиксированного или маркированного Кода 10 в системе автоматически создаются «шапки» (записи) отчетов в журналах «Общая информация об учетных отчетах». Поле «Утвержден МАГАТЭ» (да/нет) при значении «да» закрывает отчет для редактирования.

7. Записи журнала «Отчеты о фактически наличном количестве материала» формируются на основании данных физической инвентаризации по полям, которые соответствуют полям отчета PИL типового Кода 10.

8. Журнал «Материально-балансовый отчет» содержит все необходимые поля для ввода отчета MBR согласно Коду 10.

9. Журнал «Главный журнал учета (General Ledger) – Результаты расчета» (см. рис. 2) для каждого элемента автоматически рассчитывается на основании данных отчетов ICR, PИL, MBR, выдавая данные в следующие поля: Номер отчета; Номер строки; Дата; Ссылка на документ; Вид изменения инвентарного количества ЯМ; Единицы измерения (кг, г); Элемент; Кол-во УЕ; Прибавления; Уменьшения; Текущее инвентарное количество (баланс); Прибавления изотопа; Уменьшения изотопа; Масса делящегося изотопа (только для урана); Итого: Кол-во УЕ. Последняя строка в журнале содержит итоговые данные.

Сверху над журналом находится селектор (раскрывающийся список), позволяющий отфильтровать данные для конкретного элемента. В случае элементов D, N, P, T, U в колонке «Масса делящегося изотопа (только для урана)» будут стоять нулевые значения, а колонки «Прибавления изотопа», «Уменьшения изотопа» будут пустыми.

10. В системе может быть сформирован текстовый отчет в соответствующем журнале со следующими полями: Номер записи; Зона баланса материалов; Тип ссылки; Отчет, на который идет ссылка; Запись, на которую идет ссылка; Текст (не более 2000 символов латинского алфавита). Также может быть сформирована пояснительная записка (CN – Concise Note) в соответствии с фиксированным Кодом 10, содержащая в каждой строке (записи) не более 67 символов информации.

Номер отчета	Номер строки	Дата	Ссылка на документ	Вид изменения инвентарного количества ЯМ	Единицы измерения (кг, г)	Элемент	Кол-во УЕ	Прибавления	Уменьшения	Текущее инвентарное количество (баланс)	Прибавления изотопа	Уменьшения изотопа	Масса делящегося изотопа (только для урана)	Итого: Кол-во УЕ
-2000	1	170322	PIL		kg	D	168			4362.480			0.000	168
-2000	2	170328	ICR 57	RD	kg	D	1	14.000		4376.480			0.000	169
-2000	3	170525	ICR 58	RD	kg	D	2	6.000		4382.480			0.000	171
-2000	4	170526	ICR 58	RD	kg	D	1	14.000		4396.480			0.000	172
-2000	5	170526	ICR 58	RD	kg	D	1	391.560		4788.040			0.000	173

Рис. 2. Копия экрана Модуля № 3: «Главный журнал учета (General Ledger) – Результаты расчета»
Fig. 2. Screenshot Module No. 3: “General Ledger – Calculation Results”

Предварительный расчет данных для отчета о фактически наличном количестве материала может быть проведен по журналу «Расчет данных для отчета о фактически наличном количестве материала», в котором автоматически на основании данных отчета ICR формируются данные на текущую дату. Предварительный расчет данных может быть проведен по журналу «Расчет данных для материально-балансового отчета». Исходными данными являются, по крайней мере, два отчета PИL и несколько промежуточных отчетов ICR.

В системе реализован процесс корректировки записи в соответствии с правилами МАГАТЭ. Запись, на которую повлияет корректировка, выделяется на экране жирным шрифтом.

Журнал «Оперативный журнал. ЯМ в организации» обеспечивает возможность определения в любой момент времени наличного количества ЯМ в местах их нахождения, включая ЯМ, выведенные из-под гарантий. Также в журнале «Партии ЯМ, выведенные из-под гарантий МАГАТЭ» дополнительно выводятся для каждой организации партии, выведенные из-под гарантий.

Сверху над большей частью журналов находятся селекторы – раскрывающиеся списки, в которых для удобства пользователей, в том числе для уменьшения объема данных, выводимых на экран, следует выбирать необходимые параметры. Для удобства работы во всех раскрывающихся списках предлагаются к выбору только отчеты, относящиеся к данной ЗБМ.

В системе создан «Журнал изменений БД», в который помещаются все изменения, произведенные пользователем, в журналах «Общая информация об учетных отчетах», «Материально-балансовый отчет», «Отчет о фактически наличном количестве материала», «Отчет об изменениях инвентарного количества материала», «Текстовый отчет».

Импорт со специальной настройкой набора данных обеспечивается специальными командами в системных файлах типа ini. Такой режим импорта требуется при дополнительной обработке данных из ячеек Excel или файла формата маркированного Кода 10 с расширением .text10. Способ обработки импортируемых данных позволяет разделить одну ячейку электронных таблиц в несколько полей БД, а также позволяет сверить вводимые значения со справочными. При отсутствии результата поиска в справочниках в данное поле вставляется пустое значение. Именно поэтому перед импортом необходимо аккуратно заполнить все справочники, включая, например, список стран и известные ЗБМ.

Шаблоны отчетов сформированы разработчиками и содержат все необходимые шаблоны отчетов для их генерации по типовому Коду 10 (фиксированному и маркированному). Пользователь может внести в данный раздел дополнительные шаблоны, принципы разработки которых описаны в Общем руководстве пользователя ИИСН ГАН. Шаблоны отчетов доступны для выбора и генерации с помощью кнопки «Выполнить», расположенной в правом верхнем углу экрана.

Результат вывода отчета ICR в файл маркированного Кода 10 (тип файла – text10) приведен на рис. 3.

```
001:OI/BY;2#002:1/4#003:20190409#006:BELKOV, BB#010:1#015:20190201/20190301#207:BYB-#307:BYB0#309:N# 370:Z#  
372:BY/BYB0#407:1#411:RF#412:20190205#430:B/V/2/F#446:N4372 15459#469:N#470:1# 630:469940.000G# 670:20490.000G#  
001:OI/BY;2#002:2/4#003:20190409#006:BELKOV, BB#010:1#015:20190201/20190301#207:BYB-#307:BYB0#309:N# 370:Z#  
372:BY/BYB0#407:1#411:RF#412:20190205#430:B/V/2/F#446:N4372 15462#469:N#470:1#630:470211.000G# 670:20502.300G#  
001:OI/BY;2#002:3/4#003:20190409#006:BELKOV, BB#010:1#015:20190201/20190301#207:BYB-#307:BYB0#309:N# 370:Z#  
372:BY/BYB0#407:1#411:RF#412:20190205#430:B/Q/2/F#446:N2400 15361#469:N#470:1#630:469160.000G# 670:11277.600G#  
001:OI/BY;2#002:4/4#003:20190409#006:BELKOV, BB#010:1#015:20190201/20190301#207:BYB-#307:BYB0#309:N# 370:Z#  
372:BY/BYB0#407:1#411:RF#412:20190205#430:B/Q/2/F#446:N2400 15362#469:N#470:1#630:469068.000G#  
670:11275.500G#
```

Рис. 3. Сгенерированный отчет ICR в маркированном Коде 10

Fig. 3. Generated ICR in labeled Code 10

Следует отметить, что метки с пустыми значениями не выводятся. Поэтому следует внимательно отнестись к заполнению общей информации об отчетах. Если, например, в общей информации о соответствующем отчете (его шапке) не будет задано ФИО составителя, то в сгенерированном отчете в маркированном Коде 10 метка 006, описывающая это ФИО, будет отсутствовать.

Заключение

Модуль № 3 ИИСН ГАН полностью реализует все требуемые МАГАТЭ функции учета и контроля ЯМ на уровне регулирующего органа. Система позволяет автоматически перекодировать все типы отчетов из формата фиксированного Кода 10 в формат маркированного Кода 10 и наоборот. Обеспечено ведение учета ЯМ на основании информации

о партиях ЯМ с полными автоматическими расчетами, а также перепроверка с необходимыми вычислениями поступивших отчетных документов эксплуатирующих организаций.

Поскольку фреймворк eLab является легко адаптируемой настраиваемой под нужды пользователя информационной системой, то ИИСН ГАН может быть легко настроена для обеспечения учета ЯМ в эксплуатирующей организации и организации с ЯМ малых количеств, а также переведена на другие языки.

Список литературы

1. Stoiber C., Baer A., Pelzer N., Tonhauser W. *Handbook on nuclear law*. Vienna: IAEA; 2003.
2. Siegel J., Steinbruner J., Gallagher N. *Comprehensive nuclear material accounting. A proposal to reduce global nuclear risk*. Maryland: University of Maryland; 2014.
3. Shugart N., Johnson B., King J., Newman A. Optimizing Nuclear Material Accounting and Measurement Systems. *Nuclear Technology*. 2018,204(3):1-23. DOI:10.1080/00295450.2018.1478056.
4. Mohammedi B., Saadi S., Ail-Mohamed S. SARS: Safeguards Accounting and Reporting Software. *J. Appl. Sci.* 2008;8:1435-1443.
5. Анищенко А.А., Иванов К.В. Разграничение доступа в автоматизированных системах учета и контроля ядерных материалов. *ВАНТ. Серия Математическое моделирование физических процессов*. 2008;2:66-70.
6. Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н., Мазаник А.Л., Сидорович Т.П., Черепица С.В. Белорусское программное обеспечение для автоматизации процессов контроля (надзора) в области ядерной и радиационной безопасности. *Вестник Университета гражданской защиты МЧС Беларуси*. 2017;1(3):260-270.
7. Сытова С.Н., Дунец А.П., Коваленко А.Н., Мазаник А.Л., Сидорович Т.П., Черепица С.В. Информационная система eLab для аккредитованных испытательных лабораторий. *Информатика*. 2017;55:49-61.
8. Sytova S. Information tool for multifarious scientific and practical research. *Springer Proceedings in Physics*. 2019;227:281-292.

References

1. Stoiber C., Baer A., Pelzer N., Tonhauser W. *Handbook on nuclear law*. Vienna: IAEA; 2003.
2. Siegel J., Steinbruner J., Gallagher N. *Comprehensive nuclear material accounting. A proposal to reduce global nuclear risk*. Maryland: University of Maryland; 2014.
3. Shugart N., Johnson B., King J., Newman A. Optimizing Nuclear Material Accounting and Measurement Systems. *Nuclear Technology*. 2018,204(3):1-23. DOI:10.1080/00295450.2018.1478056.
4. Mohammedi B., Saadi S., Ail-Mohamed S. SARS: Safeguards Accounting and Reporting Software. *J. Appl. Sci.* 2008;8:1435-1443.
5. Anischenko A.A., Ivanov K.V. [Differentiation of access in automated systems for accounting and control of nuclear materials]. *VANT. Seriya Matematicheskoe modelirovanie fizicheskikh processov = VANT. Series "Mathematical Modeling of Physical Processes"*. 2008;2:66-70. (In Russ.)
6. Sytova S.N., Dunets A.P., Kovalenko A.N., Mazanik A.L., Sidorovich T.P., Charapitsa S.V. [Belarusian software for automation of processes of control (supervision) in the field of nuclear and radiation safety]. *Vestnik Universiteta grazhdanskoy zaschityi MChS Belarusi = Journal of Civil Protection*. 2017;1(3): 260-270. (In Russ.)
7. Sytova S.N., Dunets A.P., Kovalenko A.N., Mazanik A.L., Sidorovich T.P., Charapitsa S.V. [Information system eLab for accredited testing laboratories]. *Informatika = Informatics*. 2017;55:49-61. (In Russ.)
8. Sytova S. Information tool for multifarious scientific and practical research. *Springer Proceedings in Physics*. 2019;227:281-292.

Вклад авторов

Сытова С.Н. осуществила постановку задачи, разработала структуру журналов системы, проводила отладку и тестирование ПО, подготовила рукопись статьи.

Дунец А.П. реализовал механизм автоматической генерации отчетных документов со всеми необходимыми расчетами на основании вводимых данных, разработал большую часть журналов ИИСН ГАН.

Коваленко А.Н. разработал большую часть журналов ИИСН ГАН, осуществляет системное администрирование ИИСН ГАН.

Черепица С.В. является инициатором создания фреймворка eLab, участвовал в разработке технического задания, документации, тестировал ПО.

Authors' contribution

Sytova S.N. set the general formulation of the problem, developed the database log structure, tested software, prepared the manuscript.

Dunets A.P. implemented the mechanism of automatic generation of reporting documents with all necessary calculations based on input data, developed most of the database logs.

Kovalenka A.N. developed most of the database logs, carries out system administration.

Charapitsa S.V. initiated the creation of framework eLab, participated in development of technical specifications, tested software.

Сведения об авторах

Сытова С.Н., к.ф.-м.н., заведующий лабораторией аналитических исследований НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Дунец А.П., старший научный сотрудник лаборатории аналитических исследований НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Коваленко А.Н., старший научный сотрудник лаборатории аналитических исследований НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Черепица С.В., к.ф.-м.н., ведущий научный сотрудник лаборатории аналитических исследований НИУ «Институт ядерных проблем» Белорусского государственного университета.

Адрес для корреспонденции

220006, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Бобруйская, 11,
Институт ядерных проблем Белорусского
государственного университета;
тел. +375-17-242-47-39;
e-mail: sytova@inp.bsu.by
Сытова Светлана Николаевна

Information about the authors

Sytova S.N., PhD., Head of the Laboratory of Analytical Research of the Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Dunets A.P., Senior Researcher at the Laboratory of Analytical Research of the Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Kavalenka A.N., Senior Researcher at the Laboratory of Analytical Research of the Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Charapitsa S.V., Leading Researcher at the Laboratory of Analytical Research of the Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University.

Address for correspondence

220006, Republic of Belarus,
Minsk, Bobruiskaya str., 11,
Institute for Nuclear Problems
of Belarusian State University;
tel. +375-17-242-47-39;
e-mail: sytova@inp.bsu.by
Sytova Svetlana Nikolaevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2021-19-4-103-112>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.383:539.1.43

ФОРМИРОВАНИЕ ПОДЗАТВОРНОГО ДИЭЛЕКТРИКА НАНОМЕТРОВОЙ ТОЛЩИНЫ МЕТОДОМ БЫСТРОЙ ТЕРМООБРАБОТКИ

Н.С. КОВАЛЬЧУК, А.А. ОМЕЛЬЧЕНКО, В.А. ПИЛИПЕНКО,
В.А. СОЛОДУХА, Д.В. ШЕСТОВСКИЙ

ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20 апреля 2021

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2021

Аннотация. Проведены исследования толщины и оптических характеристик тонких пленок SiO₂, полученных одно-, двух- или трехстадийным процессом быстрой термической обработки (БТО) при атмосферном давлении, импульсами длительностью 6, 12 и 20 с. Для получения тонких пленок SiO₂ методом БТО в качестве исходных образцов использовали пластины кремния КЭФ4,5 (100). Предварительно образцы окислялись при 1000 °С во влажном кислороде (толщина полученного SiO₂ $d = 100$ нм), затем в растворе плавиковой кислоты проводилось полное снятие оксида кремния, после пластины подвергались химической очистке по технологии Radio Corporation of America (RCA). Окисление в стационарной атмосфере кислорода производилось в одну или две стадии при нагреве пластин импульсом света разной мощности до максимальных температур 1035 – 1250 °С, а также трехстадийным процессом, где заключительным этапом был отжиг в атмосфере азота либо в формовочном газе (N₂ 97 % + H₂ 3 %). Были проведены исследования характеристик азотированных в N₂ барьерных структур SiO₂-Si, полученных процессом БТО световыми потоками импульсами секундной длительности для улучшения электрофизических параметров оксидов затвора методом БТО, что представляет интерес для интегральных микросхем (ИС) с большой плотностью расположения активных областей приборов.

Ключевые слова: окисление кремния, толщина оксида кремния, фотодиссоциация, равномерность оксида кремния, прямое азотирование, показатель преломления, концентрация азота.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Ковальчук Н.С., Омельченко А.А., Пилипенко В.А., Солодуха В.А., Шестовский Д.В. Формирование подзатворного диэлектрика нанометровой толщины методом быстрой термообработки. Доклады БГУИР. 2021; 19(4): 103-112.

FORMATION OF A GATE DIELECTRIC OF NANOMETER THICKNESS BY RAPID THERMAL TREATMENT

NATALLIA S. KOVALCHUK, ANNA A. OMELCHENKO, VLADIMIR A. PILIPENKO,
VITALY A. SOLODUKHA, DMITRY V. SHESTOVSKI

JSC "Integral" – "INTEGRAL" Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 20 April 2021

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2021

Abstract. Investigations of the thickness and optical characteristics of thin SiO₂ films obtained by one-, two-, or three-stage rapid thermal processing (RTP) at atmospheric pressure, pulses of 6, 12, and 20 s duration have been carried out. To obtain thin SiO₂ films by the RTP method, N-type:Ph 4.5 Ohm/□ (100) silicon wafers were used as initial samples. The samples were preliminarily oxidized at 1000 °C of the obtained wet oxygen (SiO₂ $d = 100$ nm), then the silicon oxide was completely removed in a solution of hydrofluoric acid, after which the wafers were subjected to chemical cleaning using the Radio Corporation of America (RCA) technology. Oxidation in a stationary oxygen atmosphere was carried out in one or two stages by heating the plates with a light pulse of different power up to maximum temperatures of 1035 – 1250 °C, as well as a three-stage process, where the final stage was annealing in a nitrogen atmosphere or in a forming gas (N₂ 97% + H₂ 3%). The characteristics of SiO₂-Si barrier structures nitrified in N₂, obtained by the RTP process by light fluxes with pulses of a second duration, were studied to improve the electrophysical parameters of gate oxides by the RTP method. It is of interest for integrated circuits (ICS) with a high density of the active regions of devices.

Keywords: silicon oxidation, silicon oxide thickness, photodissociation, silicon oxide uniformity, direct nitriding, refractive index, nitrogen concentration.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Kovalchuk N.S., Omelchenko A.A., Pilipenko V.A., Solodukha V.A., Shestovski D.V. Formation of a gate dielectric of nanometer thickness by rapid thermal treatment. Doklady BGUIR. 19(4): 103-112.

Введение

В связи с ростом степени интеграции все более и более высокие требования предъявляются к параметрам управляющих МОП транзисторов [1], которые напрямую зависят от электрофизических свойств оксида затвора [2]. Электрическая прочность диэлектрика, его сопротивление, а также воздействие зарядовых кулоновских центров в системе Si-SiO₂ на эксплуатационные параметры МОП-транзисторов является определяющим при увеличении степени интеграции [2, 3]. Одним из способов улучшения электрофизических параметров оксида затвора и его границ является азотирование SiO₂ [3]. Азотирование методом БТО в атмосфере N₂ является менее затратным ввиду невысокой стоимости N₂ высокой чистоты по сравнению с N₂O, NO, NH₃, в связи с чем равновесное прямое азотирование в атмосфере N₂ является более привлекательным для применения в техпроцессах.

Получение оксидов затвора методом БТО представляет интерес для интегральных микросхем (ИС) с большой плотностью расположения активных областей приборов в силу малого термобюджета такого процесса [4]. В работе [5] путем окисления Si методом БТО, по сравнению с параметрами оксида кремния, полученного в термодиффузионных печах, были получены диэлектрики с улучшенными характеристиками, такими как: заряд пробоя диэлектрика, плотность фиксированного заряда в оксиде кремния и плотность поверхностных состояний.

Типовым является двух- либо трехступенчатый процесс быстрого окисления кремния, на первой стадии которого в течении 30 – 50 с с предварительным нагревом камеры до 600 – 780 °C с целью получения более точной температуры, избегания ее флуктуаций

при проведении последующих этапов формирования оксида [4, 5]. В целом такой процесс окисления занимает 60–170 с. Следует отметить, что получение тонких пленок SiO₂ с требуемыми электрофизическими параметрами при проведении групповых операций в термодиффузионных печах [6] является менее затратным, более быстрым и эргономичным процессом. В связи с этим на сегодняшний день является актуальной задача оптимизации технологического процесса формирования оксида кремния с использованием БТО путем сокращения времени обработки.

Методика проведения эксперимента

Формирование тонких оксидов БТО проводилось системой As-Master в стационарной атмосфере кислорода при атмосферном давлении. Облучение пластин производилось 20 галогеновыми лампами с непланарной стороны световыми потоками длительностью 6, 12 и 20 с в режиме теплового баланса. Оксид формировался на пластинах кремния, легированных фосфором с $\rho = 4,5 \text{ Ом}\cdot\text{см}$ ориентацией (100). Предварительно пластины кремния окислялись при 1000 °С во влажном кислороде (толщина полученного SiO₂ $d = 100 \text{ нм}$), затем в растворе плавиковой кислоты проводилось полное снятие оксида кремния, после пластины подвергались химической очистке по технологии RCA согласно методике приведенной в [6]. Для двух- и трехэтапного процесса БТО после каждой стадии пластины охлаждались до комнатной температуры, последующие этапы отжига проходили без извлечения пластины из реактора. Контроль температуры производился по пирометру, расположенному над центром планарной стороны пластины. Показатель преломления и толщина полученного SiO₂ измерялись на длине волны $\lambda = 632,8 \text{ нм}$ с использованием спектрального эллипсометра UVISEL 2 (ф. Horiba, Франция).

На рис.1 приведена зависимость толщины оксида от максимальной температуры БТО световыми потоками длительностью 6 с, 12 с и 20 с.

Общая тенденция увеличения толщины формируемого оксида кремния с возрастанием мощности светового потока прослеживается как при получении ультратонких слоев диэлектрика (3,2 нм – 5 нм), так и с возрастанием толщины получаемого оксида до 8 нм. Как видно из рис. 1, толщина пленки SiO₂, сформированной фотонной обработкой длительностью 6 с при нагреве до 1150 °С, в 1,2 раза больше толщины пленки SiO₂, полученной за 20 с для одностадийного процесса с той же максимальной температурой.

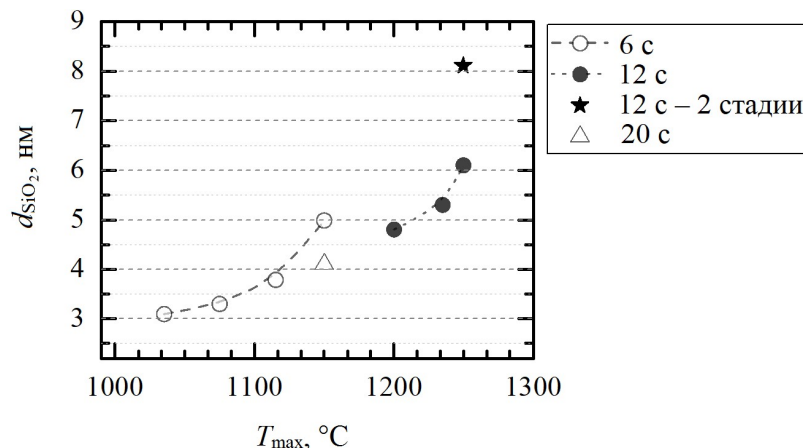


Рис. 1. Зависимость толщины оксида, полученного методом БТО световыми потоком длительностью 6, 12, 20 с от максимальной температуры одностадийной или двухстадийной обработки
Fig. 1. Dependence of the oxide thickness obtained by the RTP method with a light flux duration of 6, 12, 20 s on the maximum temperature of one-stage or two-stage processing

Анализ результатов, приведенных на рис.1, показал, что толщина SiO₂, полученного при проведении двух последовательных процессов БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\text{max}} = 1250 \text{ °C}$ несколько меньше, чем удвоенная толщина оксида кремния, полученного при одностадийном процессе окисления. Это указывает на снижение скорости повторного окисления кремния с тонким слоем SiO₂ при высоких температурах. Очевидно это связано

с уплотнением кремниевых слоев в приповерхностной области пластины под оксидным слоем, возникшим после первой стадии процесса. Основным механизмом уплотнения Si является уменьшение толщины нарушенного слоя, образовавшегося в процессе полировки пластин, вследствие движения границы раздела Si-SiO₂ вглубь Si по нормали к поверхности пластины. На структуру приповерхностных слоев Si также оказывают влияние процессы инжекции из подложки и генерации собственных междоузельных атомов на границе Si-SiO₂ в процессе окисления. По мере роста толщины пленки коэффициент диффузии кислорода в приповерхностных уплотненных слоях уменьшается, и скорость процесса окисления Si также снижается. Такое изменение скорости существенно только на начальных этапах процесса окисления. Наблюдаемая нами значительная разница толщины оксидов кремния обусловлена спецификой формирования более толстых слоев SiO₂, где может наблюдаться не линейная, а параболическая скорость роста оксида. Это в целом соответствует результатам многочисленных исследований процессов получения тонких пленок SiO₂ методом БТО [4, 7, 8]. Хотя скорость роста в процессе БТО варьируется между исследователями, но большинство из них сообщает о точке разрыва между начальным быстрым ростом и более медленным продолжающимся ростом с увеличением толщины оксидной пленки. Процесс окисления методом БТО может быть определен двумя линейными режимами и параболической областью: начальный быстрый рост, за которым следует более медленный рост и, наконец, переход к параболическому росту для более толстых пленок.

Известно, что при температурах 1035 – 1250 °С молекулы кислорода являются стабильными, под действием высоких температур при 2300 °С лишь около 1 % молекул кислорода диссоциирует, в связи с этим возможным механизмом распада молекул при БТО являются фотодиссоциация под действием потока фотонов. Энергия диссоциации молекулы кислорода 5 эВ, что соответствует $\lambda = 0,25$ мкм. В нашем случае спектр излучения галогенной лампы системы БТО находится в диапазоне длин волн 0,5 – 2 мкм, максимум спектра $\lambda_{\text{maxBTO}} \sim 1$ мкм. Одним из возможных механизмов увеличения скорости роста оксида кремния на начальных этапах процесса окисления будет двухфотонная фотодиссоциация под воздействием мощного светового потока. При этом маловероятным будет процесс ионизации атомов кислорода вследствие поглощения сразу нескольких фотонов, так как минимальная длина волны при однофотонной ионизации атома кислорода 94 нм (13,6 эВ).

Диссоциация молекулы кислорода будет вносить вклад в увеличение скорости роста оксида кремния для недлительных процессов ввиду распада молекул практически сразу после включения ламп, что подтверждается данными, полученными в работе [7], где наблюдался рост средней скорости окисления для процессов с длительностью фотонной обработки до 8 с. Также полученные данные подтверждаются результатами [8], где после блока химической очистки при температуре 700 °С в процессе БТО световыми импульсами длительностью 10, 20, 40, 80 и 160 с в атмосфере N₂:O₂ (4:3) формировались оксиды разной толщины. Для импульсов длительностью от 40 до 160 с скорость роста оксида кремния была практически постоянной и составила 0,0025 нм/с, однако для процессов с фотонной обработкой в течении 10 с наблюдается возрастание до 0,12 нм/с [8], что также указывает на ускорение роста оксида кремния для процессов с малой длительностью.

В работе [9] предложена модель увеличения скорости реакции окисления в процессе БТО на начальных этапах, где ускоренный рост связан с фотостимулированной реакцией окисления. Ширина запрещенной зоны кремния составляет 1,12 эВ и микроволновое (1–2 мкм) излучение галогенных ламп эффективно поглощается кремниевой подложкой, в результате фотоинжекции будет происходить образование области вблизи границы раздела Si-SiO₂, обогащенной неравновесными носителями заряда. В связи с этим будет возникать разность потенциалов по обеим границам раздела. Электрическое поле способствует переносу заряда через слой оксида и распаду молекулярного кислорода на отрицательно заряженный ион O⁻ и атом O: процесс такого распада имеет значительно меньшую энергии активации, чем фотодиссоциация O₂ на два атома. Импульсы светового потока большей мощности вызовут усиление поля, что, в свою очередь, ускоряет рост толщины оксида. Энергетический барьер между кремнием и растущим окислом при малой толщине слоя SiO₂ составляет 1–2 эВ на начальной стадии окисления и не препятствует инжекции электронов из кремния.

Скорость окисления при этом возрастает за счет увеличения концентрации атомов и ионов окислителя и является, как правило, линейной. Далее, при утолщении пленки оксида кремния и росте барьера уменьшается число распавшихся молекул кислорода.

Импульсы светового потока большей мощности при одностадийном процессе вызвали более эффективное фотостимулированное окисление, что сказалось на толщине пленки оксида кремния. Более длительное окисление при облучении световым потоком меньшей мощности показывает снижение скорости и переход к описаному моделью Дила – Гроува процессу линейно-параболического роста, что может быть связано также с уплотнением верхних слоев кремния и особенно проявляется в случае многостадийных процессов.

На рис. 2 приведены топограммы толщин и показателей преломления тонких пленок SiO₂, полученных окислением в термодиффузионной печи, а также двух- либо трехстадийными процессами БТО. Для термического слоя SiO₂ неравномерность толщины составила 32 %, что больше, чем для оксида кремния, полученного двухэтапным процессом БТО (26 %). Полученные результаты указывают на лучшую для процесса БТО равномерность облучения и нагрева пластины.

При сравнении образцов SiO₂, полученных трехстадийной БТО (две обработки в O₂, а третья в формовочном газе), с оксидами двухстадийной БТО световыми потоками длительностью 12 с, $T_{\max} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере O₂, наблюдается увеличение равномерности оксида кремния на 4 % и небольшое уменьшение его толщины, что является следствием уплотнения оксида кремния в ходе третьей стадии БТО (получение более упорядоченной структуры вследствие ее перестройки). Увеличение равномерности толщины SiO₂ происходит из-за миграции атомов кислорода и кремния по поверхности SiO₂ и его границе с Si, релаксации упругих напряжений и компенсации оборванных связей в оксиде Si с частичной либо полной ликвидацией микропор диаметром 0,5–1,0 нм, присущих SiO₂.

Снижение толщины тонких оксидов кремния может быть обусловлено протеканием реакции разложения SiO₂:



В работе [10] показано, что после обработки оксида кремния толщиной 1,6 нм методом БТО при 1250 °C наблюдается полное испарение SiO₂ с образованием на поверхности нитрида кремния, а при температурах БТО 1150 °C – 1200 °C в N₂ световым импульсом длительностью 60 с после обработки пленок SiO₂ толщиной 2,5 и 1,6 нм наблюдается образование оксинитрида. Из данных, приведенных в табл. 1, видно, что для тонких пленок SiO₂, полученных в процессе БТО под действием фотонного потока длительностью 6 с, $T_{\max} = 1175\text{ }^{\circ}\text{C}$ в атмосфере O₂, значение показателя преломления выше, чем для тонких пленок SiO₂, полученных двухстадийным методом БТО световым импульсом длительностью 12 с в O₂ $T_{\max} = 1250\text{ }^{\circ}\text{C}$, что является следствием получения оксида кремния с лучшими оптическими характеристиками из-за облучения потоком фотонов большей мощности в процессе БТО.

Согласно табл. 1, для пленок оксида кремния, полученных трехстадийным процессом БТО с итоговой обработкой в атмосфере N₂, показатель преломления выше, чем для пленок SiO₂ с завершающей обработкой в формовочном газе. Это обусловлено слабым разупорядочением структуры оксида кремния из-за включения атомов водорода: образование одновалентных -ОН групп приводит к разрыву связей Si-O с участием мостикового кислорода и дополнительному возникновению некомпенсированных связей атомов Si [11].

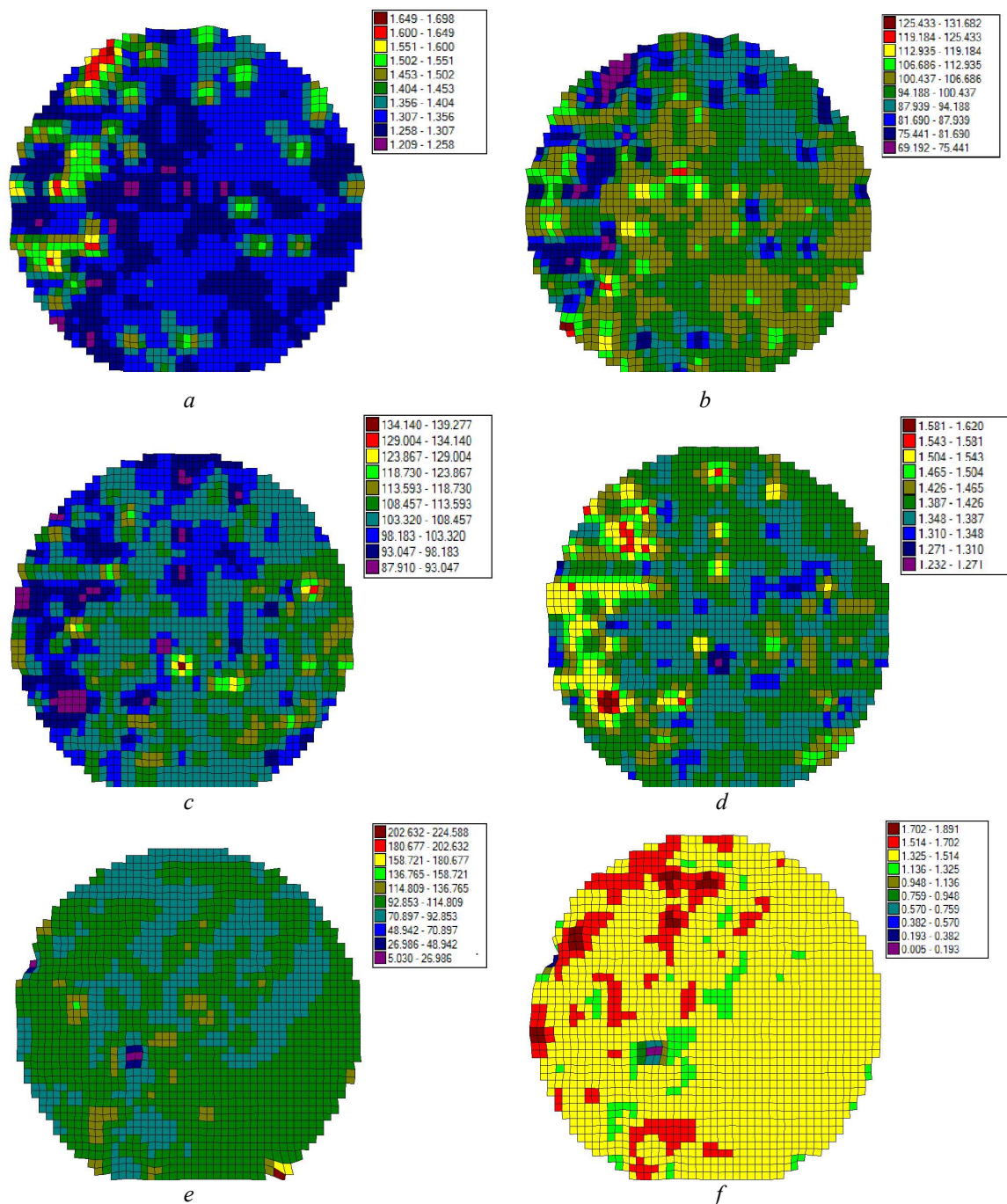


Рис. 2. Топограммы толщин (*a, c, e*) в единицах \AA и показателей преломления (*b, d, f*) термического оксида, полученного при $900\text{ }^\circ\text{C}$ в течении 30 мин, $\langle d \rangle = 9,7\text{ нм}$ (*a, b*) и SiO_2 , полученных методом БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\text{max}} = 1250\text{ }^\circ\text{C}$: двухстадийным процессом в O_2 $\langle d \rangle = 10,5\text{ нм}$ (*c, d*); трехстадийным процессом (две обработки в атмосфере O_2 , третья в формовочном газе) $\langle d \rangle = 9,7\text{ нм}$ (*e, f*)

Fig. 2. Topograms of thicknesses (*a, c, e*) at \AA units and refractive indices (*b, d, f*) of thermal oxide at $900\text{ }^\circ\text{C}$, $\langle d \rangle = 9,7\text{ nm}$ (*a, b*); and SiO_2 obtained by the RTP method with a luminous flux of 12 s duration $T_{\text{max}} = 1250\text{ }^\circ\text{C}$: two-stage process in O_2 $\langle d \rangle = 10.5\text{ nm}$ (*c, d*); a three-stage process (two treatments in an O_2 atmosphere, the third in a forming gas) $\langle d \rangle = 9.7\text{ nm}$ (*e, f*)

Таблица 1. Показатель преломления оксидов, полученных разными обработками
Table 1. Refractive index of oxides obtained by different treatment

Режимы отжига / Annealing regime			SiO ₂
T_{\max} , °C	τ , с	Атмосфера отжига Annealing atmosphere	n
900	1800	O ₂	1,32
1175	6	O ₂	1,4
1250	12	O ₂	1,35
1250	12	O ₂	
1250	12	O ₂	1,48
1250	12	O ₂	
1250	12	формовочный газ	
1250	12	O ₂	1,51
1250	12	O ₂	
1250	12	N ₂	

Показатель преломления для SiO₂, полученного при длительном термическом отжиге, составляет $n = 1,32$. Для оксида кремния, полученного трехэтапным процессом БТО, показатель преломления возрастает, что указывает на процессы включения атомов азота в структуру SiO₂. Возможным механизмом азотирования оксида является встраивание атомов азота из азотсодержащей среды (N₂ или формовочный газ) в формируемый слой диэлектрика на последнем этапе БТО. Известно, что азот применяется в качестве химически инертной среды в технологических процессах микроэлектроники, однако при отжиге в атмосфере N₂ в температурном диапазоне 1100 – 1300 °C будет происходить реакция прямого азотирования взаимодействие азота с образованием нитрида кремния:



При наличии оксида на поверхности пластины протекание этой реакции будет затруднено. Тем не менее, в работе [10] производился процесс БТО оксидов кремния толщиной 5; 2,5; 1,6 нм в атмосфере N₂ при 1150 – 1250 °C длительностью 60 с. Для пленок SiO₂ толщиной 2,5 нм во всем диапазоне температур происходит увеличение доли азота в структуре Si_xO_yN_z, полученном БТО. При температуре 1250 °C для оксида кремния толщиной 1,6 нм будет происходить полное испарение SiO₂ с поверхности пластины и образование нитрида кремния, но при 1150 °C и 1200 °C формируется оксинитрид, как и в случае обработки оксида кремния толщиной 2,5 нм. При отжиге пластины с пленкой SiO₂ толщиной 5 нм формирование оксинитрида происходит не будет, однако, по мнению авторов [10], возможным является азотирование границы раздела Si-SiO₂. Авторами [12] приведена зависимость показателя преломления при $\lambda = 632,8$ нм Si_xO_yN_z от стехиометрического состава оксинитрида, где было показано, что с увеличением доли азота происходит рост показателя преломления – именно это и получено в ходе исследований для образцов, подвергнутых БТО в формовочном газе либо атмосфере азота. Показатель преломления у оксинитрида толщиной 6,8 нм, азотированного методом имплантации N⁺ дозой $1 \cdot 10^{15}$ см⁻², составил $n = 1,627$ при $\lambda = 632$ нм.

Согласно [12] индекс y в Si_xO_yN_z связан с показателем преломления зависимостью:

$$0,11y^2 - 0,47y + 1,96 = n \quad (3)$$

Структура оксинитрида состоит не из кластеров SiO₂ и Si₃N₄, а из тетраэдров SiO_iN_j, где $i + j = 4$. С учетом валентностей атомов кремния, кислорода и азота согласно правилу Мотта коэффициенты нестехиометрического Si_xO_yN_z связаны соотношением:

$$4x - 2y - 3z = 0 \quad (4)$$

Толщина SiO₂, сформированного одноэтапным процессом БТО световым потоком длительностью 20 с, на 20 % меньше толщины, полученной в течение шестисекундной длительности обработки при той же $T_{\max} = 1150$ °C. При сравнении разностадийных обработок, проводимых световыми импульсами одинаковой длительности установлено, что процесс

окисления кремния на его начальной стадии заметно ускоряется при увеличении мощности облучения. Эти результаты можно связать с протеканием фотостимулированной реакции окисления кремния вследствие диссоциации молекул кислорода. При получении тонких диэлектрических пленок с использованием процесса азотирования методом БТО путем трехстадийного импульсного облучения наблюдается улучшение равномерности толщины слоя на 4 % по сравнению с тонкими пленками SiO₂, полученными при использовании двухстадийного облучения без процесса азотирования. Это является следствием уплотнения оксида кремния в ходе дополнительных стадий отжига и обусловлено процессами релаксации и компенсации связей, ликвидацией микропор. Процессы азотирования оксида кремния или его границы раздела также способствуют улучшению структуры диэлектрика. Прямым азотированием слоя SiO₂ (толщиной ~10 нм) методом БТО в атмосфере N₂ либо в формовочном газе получены диэлектрические пленки с массовой долей азота 4 – 8 %.

Установлено, что для оксидов Si кремния, полученных трехстадийным процессом БТО световым потоком длительностью 12 с, $T_{\max} = 1250$ °C (две стадии в O₂, третья в формовочном газе) расчетное соотношение атомов в полученном слое SiO_{1,72}N_{0,18}, что соответствует 4 % массовой доли азота. Тонкие диэлектрические пленки, полученные методом БТО такой же фотонной обработкой (две стадии в O₂, но третья в N₂) атомы соотносятся как SiO_{1,47}N_{0,35} (8 % массовой доли азота).

Заключение

Установлено, что скорость окисления кремния в процессе БТО потоком фотонов длительностью 6, 12 и 20 с в атмосфере кислорода сильно зависит от мощности излучения. Так, толщина слоя SiO₂, полученного в процессе БТО световым импульсом длительностью 6 с, в 1,2 раза больше, чем оксида кремния, полученного импульсом длительностью 20 с для одной и той же максимальной температуры процесса 1150 °C. Это является следствием протекания фотостимулированной реакции окисления кремния под воздействием мощного излучения, причем фотодиссоциация молекул кислорода будут происходить практически сразу после включения ламп. Возможными механизмами увеличения скорости на начальных стадиях окисления кремния являются двухфотонная диссоциация в газовой фазе и распад молекул кислорода на атомы и отрицательно заряженные ионы под действием электрического поля в слое изолятора, созданного надбарьерной инжекцией носителей заряда, образующегося в кремнии при фотонной обработке.

Для тонкого слоя SiO₂, полученного окислением в термодиффузионной печи, неравномерность толщины оксида кремния ($\langle d \rangle = 9,7$ нм) по поверхности пластины составила 32 %, что больше, чем для тонкого слоя SiO₂, полученного двухэтапным процессом БТО ($\langle d \rangle = 10,5$ нм) (26 %), это указывает на лучшую равномерность нагрева пластин при БТО. Для трехэтапной обработки неравномерность полученного оксида диэлектрика ($\langle d \rangle = 9,7$ нм) составила 22 %. Небольшое уменьшение толщины и увеличение равномерности может являться следствием уплотнения слоя оксида кремния в ходе третьей стадии фотонной обработки как из-за миграции и перераспределения атомов кислорода и кремния по границам раздела SiO₂, так и за счет релаксации и компенсации связей в оксиде, а также ликвидации микропор. Другим механизмом улучшения структуры SiO₂ является азотирование его и границы раздела с кремнием.

Установлено, что при фотонной обработке в процессе БТО одним световым импульсом длительностью 12 с и нагревом пластины до $T_{\max} = 1250$ °C в атмосфере азота либо формовочного газа тонких (~10 нм) оксидов кремния, полученных методом БТО, будет происходить процесс прямого азотирования SiO₂. Расчетное соотношение массовой доли атомов азота в полученном слое тонкой диэлектрической пленки составило 8 % после процесса БТО оксида кремния в N₂ и 4 % после процесса БТО в формовочном газе (N₂ 97 % + H₂ 3 %). Концентрация атомов азота в полученном диэлектрике определялась по правилу Мотта на основании измеренных значений показателя преломления.

References

1. Ahopelto J., Ardila G., Baldi, L. Balestra F., Belot D. NanoElectronics roadmap for Europe: From nanodevices and innovative materials to system integration. *Solid-State Electronics*. Elsevier. 2019;155:7-19. DOI: 10.1016/j.sse.2019.03.014
2. Deleonibus, S. *Electronic Devices Architectures for the NANO-CMOS Era*. Boca Raton: CRC Press; 2019.
3. Krasnikov G.Ya. [*Design and technological features of submicron MOS transistors*]. Tekhnosfera = Technosphere, 2011. (in Russ.)
4. Borisenko V.E. Hesketh P.J. *Rapid Thermal Processing of Semiconductors*. New York: Springer Science+Business Media; 1997.
5. Fair R.B. *Rapid thermal processing: science and technology*. Boston: Academic Press; 1993.
6. Nishi Y. Doering R. *Handbook of semiconductor manufacturing technology*. Boca Raton: CRC press; 2008.
7. Pilipenko V.A. [Thermal oxidation model of silicon during rapid heat treatment] *Bulletin of BSU. Series 1, Physics. Maths. Computer science = Vestnik BGU. Seriya 1, Fizika. Matematika. Informatika*. Minsk: Izd. centr BGU;2006;(2):35-39. (in Russ.)
8. Christiano V., Filho S.G. dos Santos. Physical characterization of ultrathin silicon oxynitrides grown by Rapid Thermal Processing aiming to MOS tunnel devices. *Rio de Janeiro: IOP Conference Series. Materials Science and Engineering. IOP Publishing*. 2015;76:01200.
9. Svetlichny A.M., Shlyakhovoy D.A. [Estimation of the effect of IR radiation on the growth rate of silicon dioxide]. *Izvestiya Yuzhnogo federal'nogo universiteta. Tekhnicheskiye nauki = Bulletin of the Southern Federal University. Technical science*. 2000;17(3). (in Russ.)
10. Lu Z.H. Growth of ultrathin nitride on Si (100) by rapid thermal N₂ treatment. *Rapid Thermal and Other Short-time Processing Technologies: Proceedings of international symposium*. 2000;(9): 223-229.
11. Korolev M. A., Krupkina T. Y., Reveleva M.A. [Technology, designs and methods of modeling silicon integrated circuits]. Moscow: Binom. Knowledge laboratory; 2015. (in Russ.)
12. Gritsenko V.A. [Atomic structure of amorphous nonstoichiometric silicon oxides and nitrides]. *Uspekhi fizicheskikh nauk = Physics-Uspekhi* 2008;178(7):727-737. (in Russ.)
13. Diniz J.A. Formation of Ultra-Thin Silicon Oxynitride Films by Low-Energy Nitrogen Implantation. *MRS Online Proceedings Library Archive*. 1995;396:249-254. DOI: 10.1557/PROC-396-249.

Вклад авторов

Ковальчук Н.С., Пилипенко В.А., Солодуха В.А. осуществили постановку задачи для проведения исследования, участвовали в обсуждении результатов.

Омельченко А.А. провела измерения оптических характеристик полученных образцов, принимала участие в обсуждении результатов.

Шестовский Д.В. выполнил изготовление образцов, подготовил аналитический обзор по тематике, провел анализ и систематизацию полученных результатов, подготовил рукопись этой статьи.

Authors' contribution

Kovalchuk N.S., Pilipenko V.A., Solodukha V.A. carried out the formulation of the research problem, took part in the discussion of the results.

Omelchenko A.A. carried out measurements of the optical characteristics of the obtained samples, took part in the discussion of the results.

Shestovski D.V. completed the obtaining of samples, produced an analytical review on the subject, analyzed and systematized the results, prepared the article.

Сведения об авторах

Ковальчук Н.С., к.т.н, доцент, первый заместитель главного инженера ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Омельченко А.А., инженер Государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл».

Пилипенко В.А., д.т.н., профессор, член-корр. НАН Беларуси, зам. директора по научному развитию Государственного центра «Белмикрoанализ» ОАО «Интеграл».

Солодуха В.И., д.т.н., ген. директор ОАО «Интеграл» – управляющая компания холдинга «Интеграл».

Шестовский Д.В., инженер-технолог отдела перспективных технологических процессов ОАО «Интеграл».

Адрес для корреспонденции

220108, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Казинца, 121А,
ОАО «Интеграл» – управляющая компания
холдинга ОАО «Интеграл»
тел. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Пилипенко Владимир Александрович

Information about the authors

Kovalchuk N.S., PhD, Associate Professor; First Deputy Chief Engineer of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Omelchenko A.A., Engineer of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “Integral”.

Pilipenko V.A., D.Sc., Professor, Corresponding Member of the NAS of Belarus, Deputy Director for Scientific Development of the «Belmicroanalysis» State Center of the JSC “Integral”.

Solodukha V.A., D.Sc., General Director of the JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company.

Shestovski D.V., Engineer-Technologist of the Advanced Technological Processes Department of the JSC “Integral”.

Address for correspondence

220108, Republic of Belarus,
Minsk, Kazintsa str., 121A,
JSC «Integral» – «Integral» Holding Managing
Company
tel. +375-17-212-37-41;
e-mail: office@bms.by
Pilipenko Vladimir Aleksandrovich