
ДОКЛАДЫ БГУИР

Выходит два раза в квартал

Научный журнал издается с января 2003 года

Главный редактор **В.А. Богущ**

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, М.М. Татур

Редакционный совет:

И.И. Абрамов, В.Е. Агабеков, И.С. Азаров, В.В. Баранов, А.И. Белоус, И.В. Боднарь,
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,
С.П. Кундас, В.А. Куренев, В.И. Курмашев, Н.И. Листопад, С.В. Лукьянец, В.Е. Матюшков,
Л.И. Минченко, Ф.И. Пантелеенко, В.А. Пилипенко, С.Л. Прищепа, А.М. Русецкий, Н.К. Толочко,
А.А. Хмыль, 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

Завадский С.А., Юрцев О.А. Влияние взаимодействия между излучателями на параметры выпуклой антенной решетки с двойной кривизной.....	5
Олизарович Е.В., Бражук А.И. Концептуальные основы анализа моделей информационной безопасности облачных систем класса «Инфраструктура как услуга»	12
Краснопрошин В.В., Родченко В.Г. Классификация на основе пространств решений	20
Кураев А.А., Матвеев В.В. Движение релятивистского электрона в скрещенных электрических и магнитных полях.....	26
Гурбо А.Д., Клименко А.В., Бондаренко В.П. Формирование слоев пористого кремния на сильнолегированных монокристаллах кремния дырочного типа проводимости	31
Лапко А.В., Дедков А.И. Методика субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации элементов фотошаблона на просвет.....	38
Виничук О.Н. Веб-приложение для обработки изображений большого объема	44
Гусинский А.В. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн	50
Гурский А.Л., Крейдич А.В., Машедо Н.В., Никоненко С.В. Пространственные и цветовые характеристики излучения светодиодных ламп	55

Татур М.М., Лукашевич М.М., Перцев Д.Ю., Искра Н.А. Интеллектуальный анализ данных и облачные вычисления	62
Чебаков С.В., Серебряная Л.В. Определение структуры оптимального подмножества в задаче о ранце	72
Смоляк Д.С., Петров С.Н., Пулко Т.А. Мониторинг техногенных объектов, доступных из сети Интернет	80
Волочко А.Т., Зеленин В.А., Нарушко Е.О., Скилондь А.В., Марков Г.В. Модель пропускания света в диапазоне 400–700 нм многослойными электропроводящими покрытиями системы Cu-ZrO ₂	87
Боднарь И.В., Чан Бинь Тхан. Магнитные свойства монокристаллов твердых растворов (MnIn ₂ S ₄) _{1-x} (AgIn ₅ S ₈) _x	95
Абдулхади Х.Д.А., Прудник А.М. Экранирующие свойства ячеистых структур с углеродсодержащим материалом и фольгированным вспененным полиэтиленом.....	100
Лушпа Н.В., Динь Х.Т. Контактный локальный нагрев алюминиевой основы с нанопористым оксидом алюминия линейным источником тепла для использования в термометрии	105

Корректор А.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн и верстка О.В. БОЙПРАВ

Подписано в печать 30.09.2019. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 13,25. Уч.-изд. л. 11,3. Тираж 100 экз. Заказ 317.

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», 2019

DOKLADY BGUIR

Published twice quarterly

The journal has been published since January, 2003

Editor-In-Chief V. A. Bogush

Address of editorial office: P. Brovka Str., 6, Room 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

Zavadski S.A., Yurtsev O.A. Mutual coupling influence on parameters of convex doubly curved antenna array.....	5
Olizarovich E.V., Brazhuk A.I. Conceptual framework of analysis of information security models of cloud systems of the class «Infrastructure as a Service»	12
Krasnoproshin V.V., Rodchanka V.G. Classification based on decision spaces.....	20
Kurayev A.A., Matveyenko V.V. Movement of a relativistic electron in crossed electric and magnetic fields	26
Hurbo A.D., Klimenka A.V., Bondarenko V.P. Formation of porous silicon on a highly doped <i>p</i> -type monocrystalline silicon.....	31
Lapko A.V., Dedkov A.I. Method of subpixel processing of high resolution edge during clearance photoshop registration	38
Vinichuk O.N. Web application for processing images of large size	44
Gusinsky A.V. Measuring complex of testing and calibration of power meters in the millimeter range of waves length	50
Gurskiĭ A.L., Kreidich A.V., Masheda M.V., Nikonenko S.V. Spatial and color characteristics of LED lamps emission	55
Tatur M.M., Lukashovich M.M., Pertsev D.Y., Iskra N.A. Intelligent data analysis and cloud computing.....	62
Chebakov S.V., Serebryanaya L.V. Finding of optimal subset structure in the knapsack problem.....	72
Smoliak D.S., Petrov S.N., Pulko T.A. Monitoring of internet-facing technogenic objects	80

Volochko A.T., Zelenin V.A., Narushko E.O., Skilondz A.V., Markov G.V. Model of transmission of multilayer coatings based on the Cu-ZrO ₂ system in the optical wavelength range.....	87
Bodnar I.V., Chan Bin Tkhan. Magnetic properties of single crystals (MnIn ₂ S ₄) _{1-x} (AgIn ₅ S ₈) _x solid solutions.....	95
Abdulhadi H.D.A., Prudnik A.M. Shielding properties of the cellular structures with carbon-containing materials and foiled foam polyethylene	100
Lushpa N.V., Dinh H.T. Contact local heating of an aluminum base with nanoporous alumina by a linear heatsource for use in thermometry	105



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-5-11>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.396.677.49

ВЛИЯНИЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ МЕЖДУ ИЗЛУЧАТЕЛЯМИ НА ПАРАМЕТРЫ ВЫПУКЛОЙ АНТЕННОЙ РЕШЕТКИ С ДВОЙНОЙ КРИВИЗНОЙ

ЗАВАДСКИЙ С.А., ЮРЦЕВ О.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 15 апреля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В статье исследуется влияние взаимодействия между излучателями на электрические параметры выпуклой антенной решетки с двойной кривизной поверхности размещения излучателей. В качестве излучателей решетки использованы директорные антенны. Применен метод интегральных уравнений.

Ключевые слова: выпуклая антенная решетка, двойная кривизна, директорная антенна, взаимодействие излучателей, метод интегральных уравнений.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Завадский С.А., Юрцев О.А. Влияние взаимодействия между излучателями на параметры выпуклой антенной решетки с двойной кривизной. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 5-11.

MUTUAL COUPLING INFLUENCE ON PARAMETERS OF CONVEX DOUBLY CURVED ANTENNA ARRAY

ZAVADSKI S.A., YURTSEV O.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 15 April 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. In the article the mutual coupling between radiators influence on electrical parameters of convex antenna array with doubly curved radiators placement surface is investigated. Yagi-Uda antennas are used as radiators. The integral equations method is incorporated.

Keywords: convex antenna array, doubly curved, Yagi-Uda antenna, mutual coupling between radiators, integral equations method.

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

For citation. Zavadski S.A., Yurtsev O.A. Mutual coupling influence on parameters of convex doubly curved antenna array. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 5-11.

Введение

Выпуклые антенные решетки используются как решетки с конформным сканированием. Это цилиндрические, конические, сферические антенные решетки [1]. Выпуклые антенные решетки используются также как решетки, в которых поверхность размещения излучателей повторяет форму поверхности объекта, на котором они размещены. В этом случае в решетках используется фазовое сканирование. Несмотря на большое количество публикаций по выпуклым решеткам (см. список литературы в работе [1]), влияние взаимодействия между излучателями рассмотрено частично в отдельных работах, например, в работе [2]. В настоящей статье излагаются результаты исследования взаимодействия излучателей в выпуклых антенных решетках с двойной кривизной поверхности. В качестве излучателей используются директорные малоэлементные антенны. Численный анализ выполнен с использованием интегрального уравнения для тока в тонких проводниках. Для его решения применен метод Галеркина с импульсными функциями в качестве базисных и весовых [3]. Сделана оценка влияния взаимодействия между излучателями на распределение тока на входах излучателей, входное сопротивление ($Z = R + iX$) и коэффициент стоячей волны (КСВ) на входах излучателей, диаграмму направленности решетки и уровень поля излучения по кроссполаризации.

Результаты численного моделирования

Моделируемая решетка показана на рис. 1, *a*. Излучатели – директорные антенны с линейным вибратором, линейным рефлектором и одним линейным директором. На вибраторе маленьким кружком обозначена точка возбуждения излучателя – его вход. Излучатели занумерованы. Ряды излучателей в плоскости XZ (E -плоскости) – строки решетки, ряды излучателей в плоскости YZ (H -плоскости) – столбцы решетки. Число излучателей в строке – N_x , шаг расположения D_x . Число излучателей в столбце и шаг расположения – N_y , D_y . Радиусы кривизны поверхности расположения излучателей в этих плоскостях – R_x , R_y . Амплитудно-фазовое распределение (АФР) возбуждения излучателей – равномерное.

Геометрия излучателя подобрана на частоте 300 МГц так, чтобы без учета взаимодействия в составе решетки он был согласован с линией передачи, имеющей волновое сопротивление 50 Ом, и имел минимально возможное заднее излучение (параметр F/B): длина рефлектора (R) $L_r = 490$ мм, вибратора (V) – $L_v = 465$ мм, директора (D) – $L_d = 400$ мм; расстояния: $RV = 250$ мм, $VD = 180$ мм; диаметр проводника элементов – 10 мм. При этих параметрах численное моделирование дало результаты: входное сопротивление излучателя на частоте 300 МГц $Z = R + iX = 49,63 + i0,37$ (Ом), $F/B = 17$ дБ. Диаграмма направленности (ДН) излучателя в плоскости E и H показана на рис. 1, *b*.

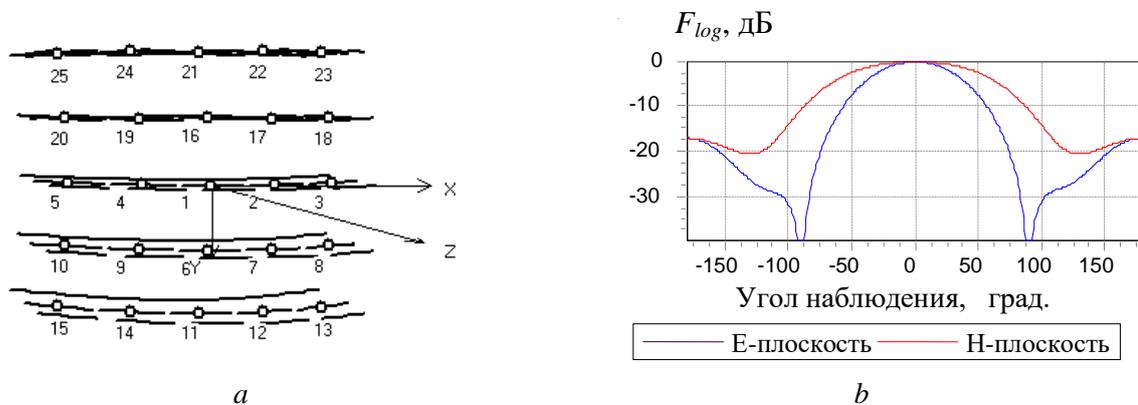


Рис. 1. Антенная решетка (*a*) и ДН отдельного излучателя (*b*)
Fig. 1. Antenna array (*a*) and the radiation pattern of the individual emitter (*b*)

Численное моделирование выполнено при различных геометрических параметрах решетки, но результаты исследования ниже демонстрируются для решетки с параметрами:

$N_x = N_y = 5$, $D_x = D_y = 0,5\lambda = 500$ мм и $0,7\lambda = 700$ мм (λ – длина волны); радиусы кривизны решетки $R_x = R_y = 4\lambda$.

На рис. 2 показано распределение амплитуды тока на входах излучателей при равномерном АФР в выпуклой решетке и, для сравнения, в плоской решетке с такими же геометрическими параметрами. Все излучатели возбуждаются напряжением 1 В. При этом без учета взаимодействия между излучателями в составе решетки амплитуда тока на входе равна 20 мА.

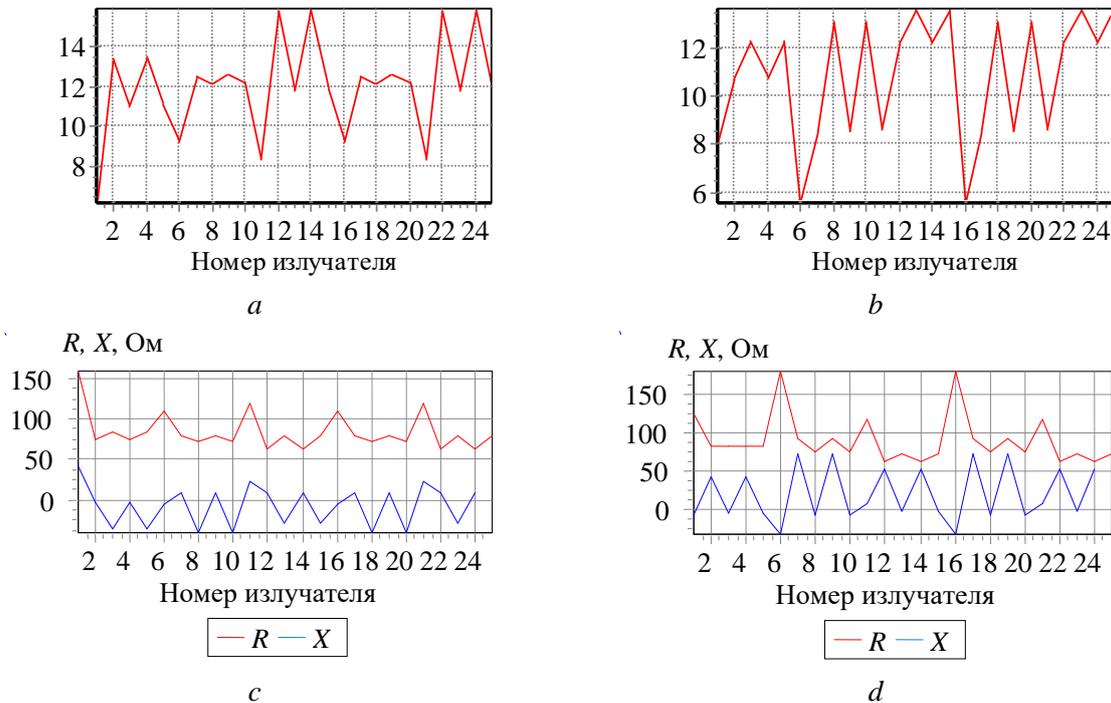


Рис. 2. Распределение тока на входах излучателей и входное сопротивление для выпуклой решетки (a, c) и для плоской решетки (b, d) при равномерном АФР возбуждения излучателей

Fig. 2. The current distribution at the inputs of the emitters and the input impedance for the convex grid (a, c) and for the flat grid (b, d) with uniform amplitude and phase distribution of the emitters excitation

На рис. 3 изображены ДН. Сравнение рис. 1 с рис. 2 и 3 позволяет сделать следующие выводы.

1. При равномерном АФР возбуждения излучателей распределение тока на входах излучателей существенно неравномерно. Максимальная амплитуда тока – в верхней и нижней строках решетки, а в каждой строке – в излучателях, соседних с центральным излучателем. Эта неравномерность возрастает с уменьшением радиусов кривизны решетки и с уменьшением шага расположения излучателей в решетке.

2. В выпуклой решетке взаимодействие между излучателями приводит к меньшим изменениям во входном сопротивлении, чем в плоской решетке (рис. 2). Это объясняется тем, что в выпуклой решетке оси излучателей не параллельны, и это приводит к уменьшению степени взаимодействия между ними.

3. Уровень поля по кроссполаризации в плоской решетке равен нулю и увеличивается с уменьшением радиусов кривизны выпуклой решетки, хотя степень взаимодействия между излучателями при этом уменьшается (рис. 3, c, d).

4. При уменьшении радиусов кривизны угол между осями смежных излучателей растет, и это приводит к некоторому росту бокового и заднего излучения (рис. 3, a, b).

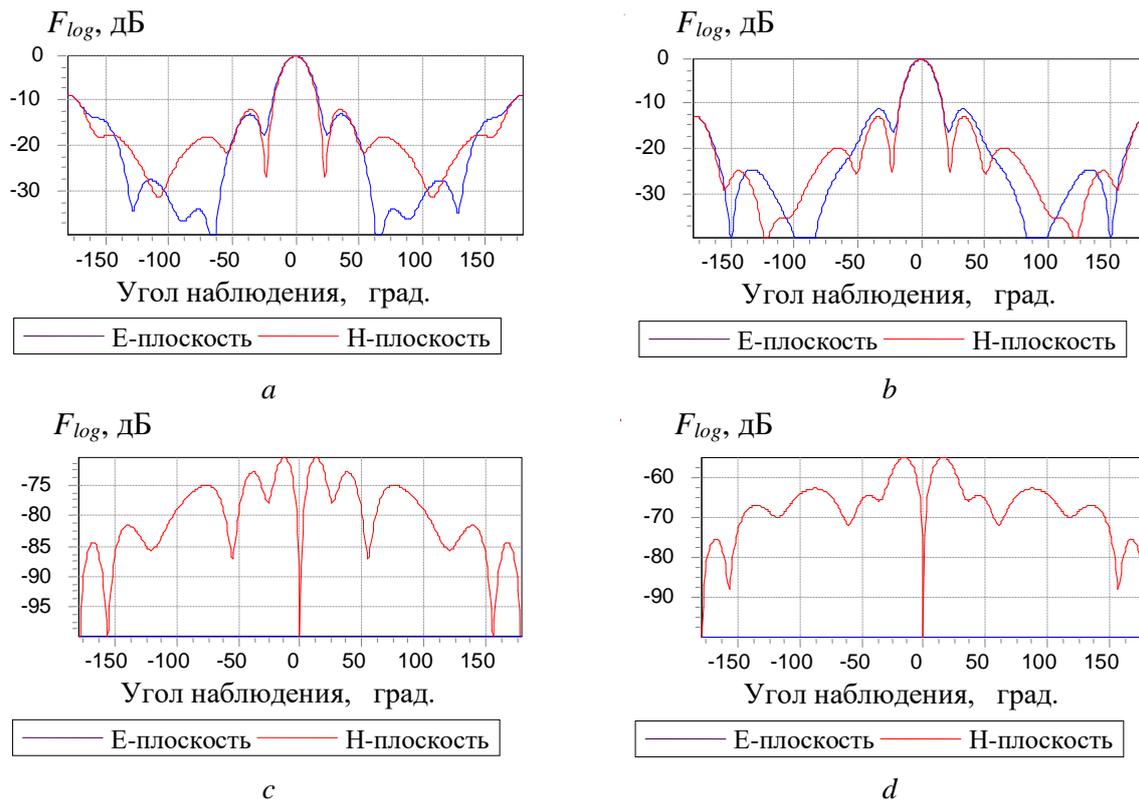


Рис. 3. Диаграмма направленности: выпуклой решетки по основной поляризации (а), плоской решетки по основной поляризации (b), выпуклой решетки с радиусами кривизны $R_x = R_y = 4\lambda$ по кроссполяризации (c), выпуклой решетки с радиусами кривизны $R_x = R_y = 2\lambda$ по кроссполяризации (d)

Fig. 3. Radiation pattern: the convex grid in the main polarization (a), the planar grid in the main polarization (b), the convex grid with curvature radius $R_x = R_y = 4\lambda$ in the cross polarization (c), the convex grid with curvature radius $R_x = R_y = 2\lambda$ in the cross polarization (d)

Влияние на указанные выше электрические параметры шага размещения излучателей в строках и в столбцах иллюстрирует рис. 4, на котором показаны зависимости входного сопротивления и ДН выпуклой решетки при нескольких значениях шага. При этом надо учесть, что с ростом шага и при сохранении всех других геометрических параметров решетки увеличивается апертура решетки, уменьшается степень взаимодействия излучателей, амплитудное распределение токов на входах излучателей становится ближе к задаваемому амплитудному распределению возбуждения излучателей. Но одновременно растет угол между осями смежных излучателей, в результате чего амплитудное распределение поля на эквивалентном плоском раскрыве становится все более спадающим к концам решетки. Это ведет к уменьшению уровня первых боковых лепестков и росту уровня дальних боковых лепестков ДН в тех направлениях, в которые ориентированы оси крайних излучателей.

Уровень ближних и дальних боковых лепестков практически не зависит от амплитудного распределения (АР) возбуждения излучателей. Для иллюстрации этого на рис. 5 приведена ДН решетки в двух главных плоскостях для выпуклой решетки (a) и для плоской решетки (b) при АР, уменьшающемся по закону косинуса от максимума в центре строки до 10 % от максимума в крайних излучателях строки. В столбцах АР – равномерное. Шаг расположения излучателей в решетке $D_x = D_y = \lambda$. Из сравнения рис. 5, a и рис. 4, d следует, что уровень боковых лепестков (УБЛ) не очень снизился за счет влияния АР. Это объясняется влиянием взаимосвязи на распределение тока в зависимости от номера излучателя. Для сравнения, в плоской решетке с теми же параметрами без учета взаимосвязи уровень первых боковых лепестков при указанном выше АР снижается до значения -34 дБ.

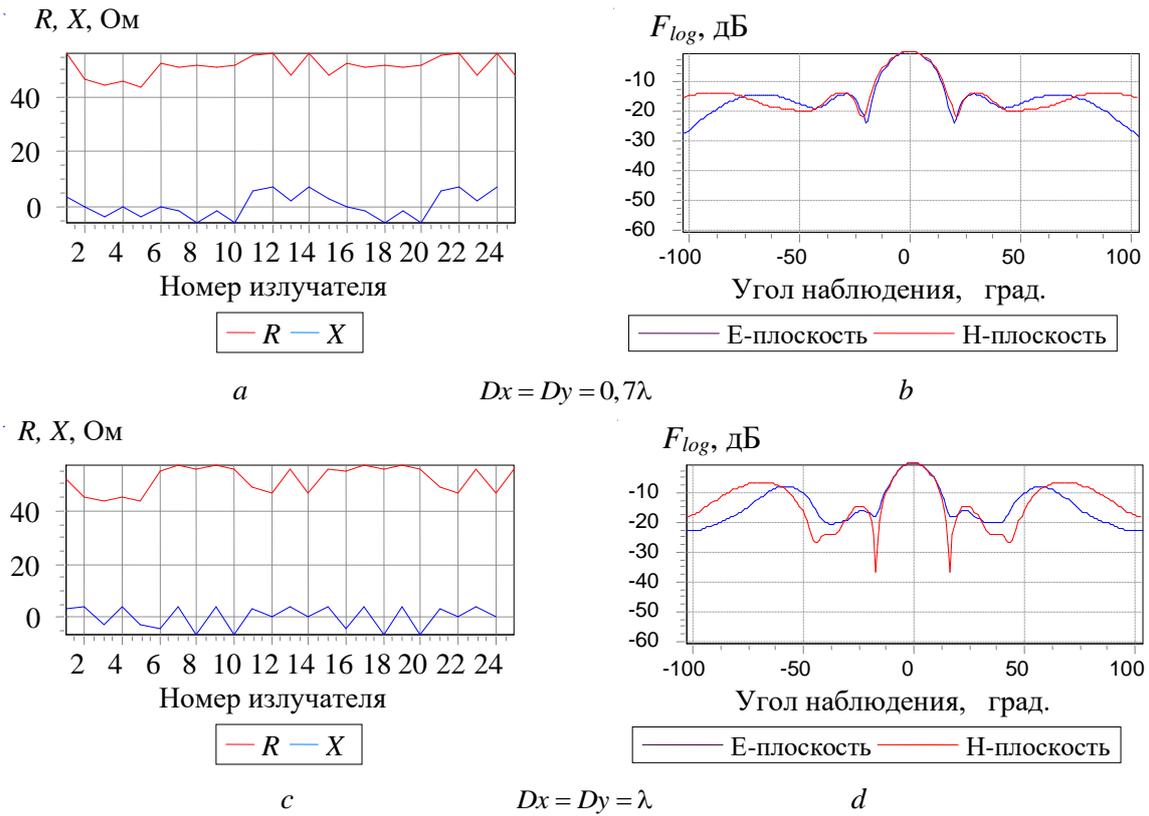


Рис. 4. Входное сопротивление излучателей и ДН выпуклой антенной решетки при разных значениях шага размещения излучателей
Fig. 4. The input impedance of the emitters and radiation pattern of the convex antenna array for different values of the pitch

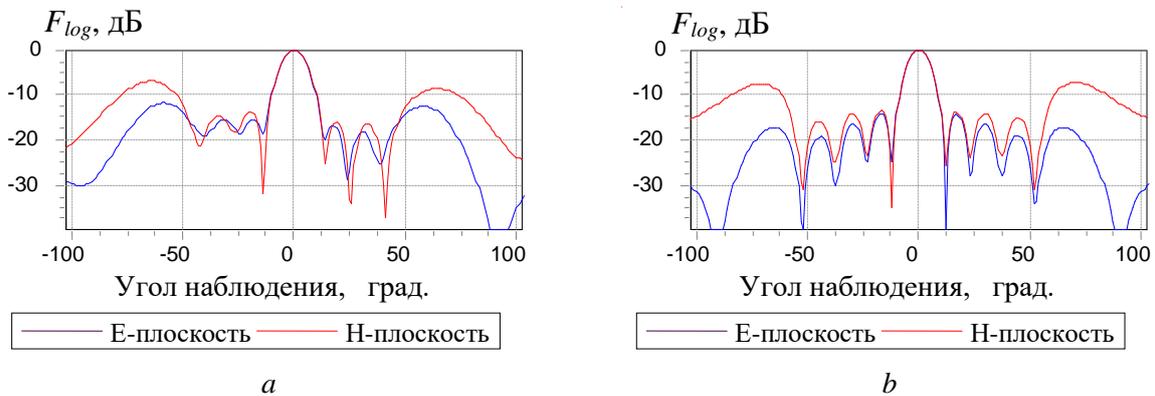


Рис. 5. ДН решетки в двух главных плоскостях для спадающего к концам строк амплитудного распределения возбуждения: для выпуклой решетки (а), для плоской решетки (b)
Fig. 5. Radiation pattern lattice in two principal planes for the amplitude distribution of excitation falling to the ends of the rows: for a convex lattice (a), for a planar lattice (b)

Необходимо отметить еще одну особенность выпуклой решетки с двойной кривизной (рис. 1, а). Это зависимость ДН в плоскости строк от числа строк, чего нет, как известно, в плоской решетке с прямоугольной схемой расположения излучателей и разделяющимся по координатам АФР возбуждения излучателей. На рис. 6 для иллюстрации этого свойства показана ДН в главных плоскостях для решетки с числом излучателей в строке $N_x = 3$ (в E -плоскости), шагом размещения излучателей $Dx = Dy = \lambda$ и числом строк: $N_y = 1 - (a)$ и $N_y = 7 - (b)$. Этот эффект выражается сильнее с увеличением углового сектора, занятого решеткой, по отношению к центрам кривизны поверхности решетки в главных плоскостях.

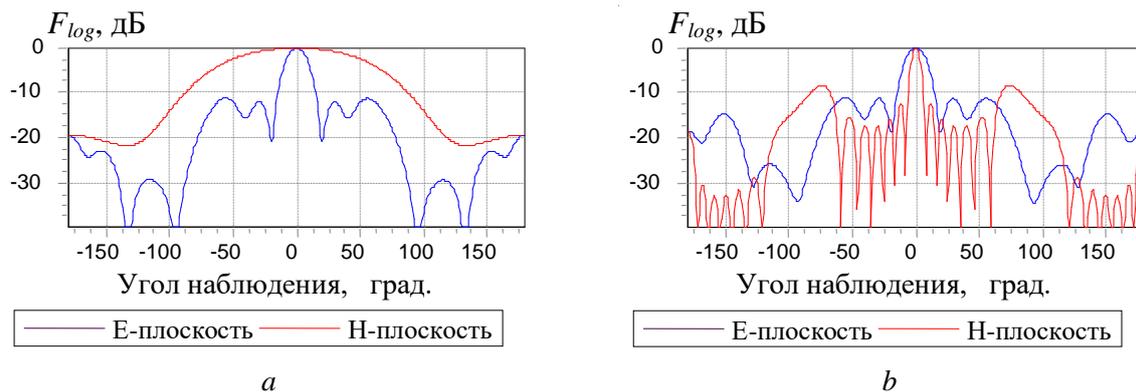


Рис. 6. ДН в главных плоскостях для решетки с числом излучателей в строке $N_x = 3$, шагом размещения излучателей $D_x = D_y = \lambda$ и числом строк $N_y = 1$ (a) и $N_y = 7$ (b)

Fig. 6. Radiation pattern lattice in two principal planes for the grid with the number of emitters per row $N_x = 3$, pitch of emitters $D_x = D_y = \lambda$ and the number of rows $N_y = 1$ (a) and $N_y = 7$ (b)

Заключение

Проведен численный анализ влияния взаимодействия между излучателями на параметры выпуклой антенной решетки с двойной кривизной. Показано, что при равномерном АР возбуждения излучателей распределение тока на их входах существенно неравномерно. Это приводит к изменению параметров ДН и входного сопротивления излучателей. В выпуклой решетке взаимодействие между излучателями приводит к меньшим изменениям во входном сопротивлении, чем в плоской решетке. Это объясняется тем, что в выпуклой решетке оси излучателей не параллельны, и это приводит к уменьшению степени взаимодействия между излучателями.

Список литературы

1. Воскресенский Д.И., Пономарев Л.И. Выпуклые сканирующие антенны. М.: Сов. радио, 1977. 207 с.
2. Юрцев О.А., Завадский С.А. Влияние взаимодействия между излучателями на характеристики дуговых вибраторных антенных решеток // Доклады ТУСУР. 2018. Т. 21, № 1. С. 17–21.
3. Вычислительные методы в электродинамике: перевод с англ. / под ред. Р. Митры. М.: Мир, 1977. 243 с.

References

1. Voskresenskij D.I., Ponomarev L.I. Vypuklye skanirujushhie anteny. M.: Sov. radio, 1977. 207 s. (in Russ.)
2. Jurcev O.A., Zavadskij S.A. Vlijanie vzaimodejstvija mezhdru izluchateljami na harakteristiki dugovyh vibratoryh antennyh reshetok // Doklady TUSUR. 2018. T. 21, № 1. S. 17–21. (in Russ.)
3. Vychislitel'nye metody v jelektrodinamike: perevod s angl. / pod red. R. Mityr. M.: Mir, 1977. 243 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Завадский С.А., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Юрцев О.А. (1933–2019), д.т.н., профессор, заслуженный деятель науки и техники БССР.

Information about the authors

Zavadski S.A., PG student of information radiotechnologies department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Yurtsev O.A. (1933–2019), D.Sci, professor, Honored worker of science and technology of BSSR.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-43;
e-mail: z_serhio@tut.by
Завадский Сергей Анатольевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarussian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-43;
e-mail: z_serhio@tut.by
Zavadski Sergey Anatolyevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-12-20>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.75

КОНЦЕПТУАЛЬНЫЕ ОСНОВЫ АНАЛИЗА МОДЕЛЕЙ ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ОБЛАЧНЫХ СИСТЕМ КЛАССА «ИНФРАСТРУКТУРА КАК УСЛУГА»

ОЛИЗАРОВИЧ Е.В., БРАЖУК А.И.

Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 3 мая 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Описан основанный на ролевом подходе процесс синтеза моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем на основе прикладных моделей системы и угроз; результатом является модель защиты, выраженная, например, в рекомендациях по улучшению информационной безопасности или содержащая элементы конфигурации средств защиты. Предложена архитектура системы анализа моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем, которая включает подсистему анализа и моделирования, базу знаний и подсистему интеграции с внешними источниками знаний. Система является ориентированной на модели (детальные, высокоуровневые, прикладные, синтезируемые) и предполагает автоматическую обработку знаний в сфере управления уязвимостями и настройки программного обеспечения. Предложен подход к решению задачи построения иерархий моделей архитектур и моделей угроз, реализующий комбинированный анализ функций и компонентов.

Ключевые слова: облачные компьютерные системы, инфраструктура как услуга, модель информационной безопасности.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Олизарович Е.В., Бражук А.И. Концептуальные основы анализа моделей информационной безопасности облачных систем класса «Инфраструктура как услуга». Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 12-20.

CONCEPTUAL FRAMEWORK OF ANALYSIS OF INFORMATION SECURITY MODELS OF CLOUD SYSTEMS OF THE CLASS «INFRASTRUCTURE AS A SERVICE»

OLIZAROVICH E.V., BRAZHUK A.I.

Grodno State University named after Yanka Kupala, Republic of Belarus

Submitted 3 May 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. A process based on the role approach for the synthesis of information security models of cloud computing systems based on applied system and threat models is described; the result is a security model, expressed, for example, in recommendations for improving information security or containing elements

of the security configuration. The architecture of the system for analyzing models of information security of cloud computing systems is proposed. It includes a subsystem of analysis and modeling, a knowledge base and a subsystem of integration with external sources of knowledge. The system is model-oriented (detailed, high-level, applied, synthesized) and involves automatic processing of knowledge in the field of vulnerability management and software configuration. It is proposed an approach to solve the problem of constructing hierarchies of architectures models and threat models, realizing a combined analysis of functions and components.

Keywords: cloud computing systems, Infrastructure as a Service, IaaS, information security model.

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

For citation. Olizarovich E.V., Brazhuk A.I. Conceptual framework of analysis of information security models of cloud systems of the class «Infrastructure as a Service». Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 12-20.

Введение

В настоящее время осуществляется активный переход предприятий с традиционной модели организации ИТ-инфраструктуры к облачной. Современные трансформации ИТ порождают множество проблем информационной безопасности, вызванных: потерей контроля над данными и использованием сети Интернет для их передачи; развитием мобильных систем и приложений, широким распространением вредоносного программного обеспечения и атак на основе социальной инженерии («спам», «фишинг», троянские программы); сложностью облачных систем, большим количеством их компонентов, различным административным подчинением компонентов и т. п.

Уровень «Инфраструктура как услуга» (Infrastructure as a Service – IaaS) является системообразующим для облачной инфраструктуры. Его технологическую основу составляют системы виртуализации, программно-определяемые сети (Software Defined Network – SDN) и хранилища (Software Defined Storage – SDS), а также современные модели использования ресурсов. Системообразующий характер и технологическая сложность требуют пристального исследования проблем информационной безопасности систем данного уровня [1]. Целью данной работы является разработка решений для анализа моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем IaaS. Полученные результаты могут использоваться при проектировании систем защиты и анализе защищенности современных корпоративных информационных систем.

Основные определения

В рамках комплексного подхода обеспечение информационной безопасности должно осуществляться на организационном, процедурном и программно-техническом уровнях. При этом, независимо от уровня рассмотрения, основными инструментами описания предметной области являются архитектурные описания (архитектуры информационной безопасности, предметно-ориентированные модели защиты, архитектуры и модели средств защиты), а также модели процессов информационной безопасности (организационные процессы, документированные процедуры, автоматизированные и автоматические процессы).

Согласно [2], архитектуру системы составляют основные понятия и свойства системы в окружающей среде, воплощенные в ее элементах, отношениях и конкретных принципах ее развития. В общем виде разработка архитектуры системы связана с многоуровневой декомпозицией рассматриваемой проблемы и построением иерархической структуры системы.

Для управляемого использования архитектуры применяется комплексный рабочий продукт, который называется описанием архитектуры, основанный на точках зрения заинтересованных сторон и отражающий то или иное архитектурное представление. Наличие связей, определяющих отношения между компонентами, позволяет поддерживать все представления в согласованном состоянии и обеспечить целостность описания архитектуры.

Общепринятый подход к описанию процессов информационной безопасности базируется на защите активов (сущностей, имеющих субъективную ценность) [3]. Предполагается, что источники угроз (нарушители) хотят злоупотребить или нанести вред активам, порождая угрозы. Владельцы активов оценивают возможные угрозы и стремятся минимизировать риски информационной безопасности путем принятия определенных контрмер. Управление рисками обеспечивает идентификацию требований к защите информации в организации и создание эффективной системы менеджмента информационной безопасности.

Таким образом, основное предназначение предметно-ориентированных моделей информационной безопасности заключается в расширении и детализации риск-ориентированных моделей процессов обеспечения информационной безопасности при решении задач синтеза систем защиты и анализа защищенности облачных компьютерных систем. При этом рассматриваемые модели должны быть архитектурными моделями в терминах архитектурного описания, что обеспечивает их соответствие принципам, практикам и методологиям системной инженерии и архитектурного проектирования. Также модели должны быть совместимы с интерпретацией и терминологией, используемой в стандартах, литературе и реализациях средств информационной безопасности.

Архитектура системы анализа информационной безопасности

Обобщенный процесс синтеза модели защиты облачной компьютерной системы показан на рис. 1. Исходными данными являются прикладные модели: ролевые модели системы и модели угроз информационной безопасности. Каждая пара моделей (модель системы и модель угроз) создана данным потребителем (провайдер, разработчик, пользователь и т. п.) и отражает его точку зрения на проблему информационной безопасности целевой системы. Система анализа моделей информационной безопасности предназначена для дополнения («расширения») прикладных моделей до детального унифицированного представления, пригодного для автоматической обработки, а также для синтеза моделей защиты системы, соответствующих точкам зрения различных потребителей. На выходе данный потребитель получает модель защиты, которая отражает его представления и может быть выражена, например, в рекомендациях по улучшению системы защиты или элементах конфигурации компонентов облачной системы или средств защиты.

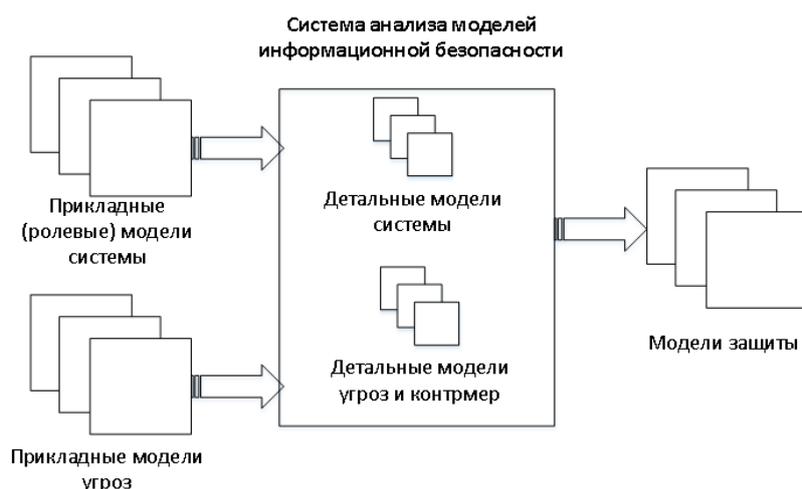


Рис. 1. Синтез модели информационной безопасности компьютерной системы
Fig. 1. Synthesis of a computer system information security model

Обобщенная архитектура системы анализа моделей информационной безопасности, показанная на рис. 2, включает три основных подсистемы: систему анализа и моделирования, базу знаний и подсистему интеграции с внешними источниками знаний.

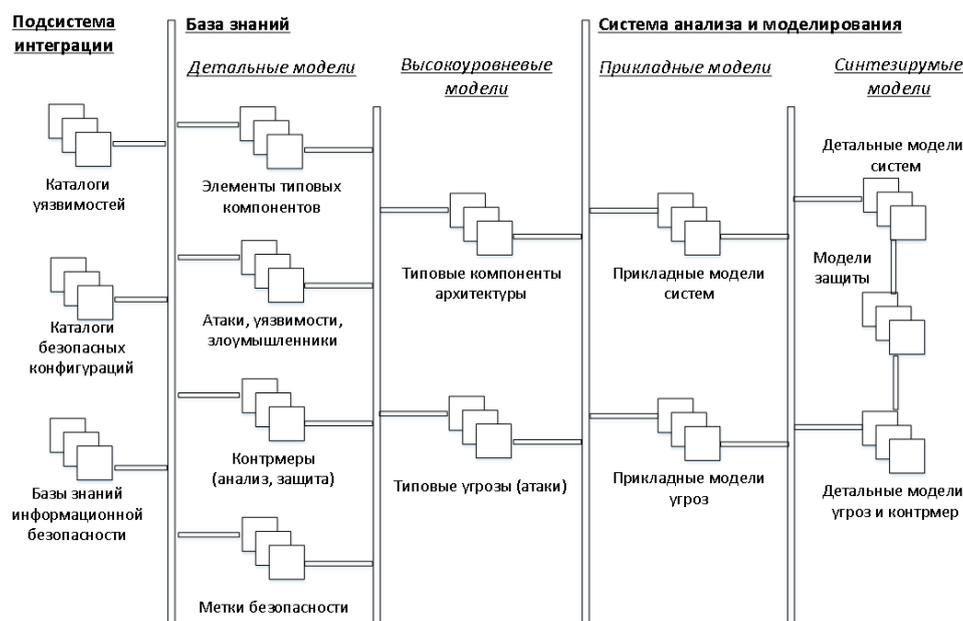


Рис. 2. Структура системы анализа моделей информационной безопасности

Fig. 2. The structure of the information security models analysis system

База знаний обеспечивает представление и обработку знаний предметной области и содержит два типа моделей.

1. Высокоуровневые модели. Представляют типовые компоненты и связи между ними, а также шаблоны архитектур компьютерных систем и атак (угроз), из которых потребители могут создавать прикладные модели, описывающие целевые системы.

2. Детальные модели. Включают списки и описания функциональных и структурных элементов типовых компонентов, атак, уязвимостей и злоумышленников, контрмер, которые обеспечивают анализ защищенности и непосредственно защиту. Используют метки безопасности, которые позволяют разделить понятия предметной области на большие классы (например, в соответствии с качественными характеристиками ущерба – конфиденциальность, целостность, доступность), что обеспечивает связь между моделями системы, а также предоставляет потребителю простые критерии оценки угроз.

Система анализа и моделирования оперирует двумя видами моделей.

1. Прикладные модели. Создаются потребителем на основе высокоуровневых моделей и служат исходными данными для моделирования.

2. Синтезируемые модели. Получаются путем анализа прикладных, высокоуровневых и детальных моделей; содержат детальные модели архитектур, а также угроз и контрмер для исследуемых систем; служат для синтеза моделей защиты.

Подсистема интеграции с внешними источниками знаний обеспечивает синхронизацию внешних баз знаний с базой знаний системы анализа. Эффективность данной подсистемы во многом определяет эффективность всей системы анализа, так как информационная безопасность является динамической сферой, и скорость получения и обработки новых знаний критически важна для ее обеспечения.

Предложенная архитектура, во-первых, является ориентированной на модели (т. е. оперирует формализованными представлениями архитектур, структур и процессов); во-вторых, предполагает функции автоматизированной и автоматической обработки знаний в области информационной безопасности. При этом основными проблемами реализации представленной системы анализа моделей информационной безопасности являются построение иерархий моделей архитектур (типичные компоненты – элементы типовых компонентов) и моделей угроз (типичные угрозы – атаки, уязвимости, злоумышленники, контрмеры, метки безопасности).

Моделирование облачных систем

Вопросы построения формальных моделей облачных компьютерных систем (в частности систем классов «Инфраструктура как услуга» и «Платформа как услуга») рассмотрены в исследованиях унифицированной онтологии облачных систем [4], построения онтологий для выбора облачных ресурсов [5], общей архитектуры облачной инфраструктуры на основе сервис-ориентированного подхода [6], унифицированной таксономии и архитектуры облачной среды [7], безопасных облачных технологий для критической инфраструктуры (проект SECRCIT, 2013 г.) [8]. Среди методов и технологий, которые могут быть использованы для формального описания, следует выделить методологию графического структурного анализа на основе диаграмм потоков данных DFD (Data Flow Diagram) [9], язык описания инфраструктуры и сети INDL (Infrastructure and Network Description Language) [10], а также подход, реализованный в общей информационной модели CIM (Common Information Model) [11].

Анализ вышеуказанных источников позволил сформулировать основные требования к исследуемым моделям. Формальная модель облачной компьютерной системы должна обеспечивать ее представление в виде набора программных компонентов и связей между этими компонентами. Абстракции компонентов и связей должны отражать существенные для задач обеспечения информационной безопасности особенности реальных элементов и способов их взаимодействия, а также поддерживать методы и технологии автоматической обработки данных и знаний. Однако следует отметить, что построение модели облачной системы затруднено ввиду архитектурных различий конкретных реализаций и недостатка информации о внутренней организации коммерческих систем [12].

В этих условиях предлагается использовать комбинированный подход, включающий следующее.

1. Анализ функций системы. Направлен на отражение уникальных особенностей и базируется на двухуровневой декомпозиции: выделение больших функциональных блоков системы и определение функций, связанных с каждым блоком.

2. Анализ компонентов системы. Определяет типовые особенности системы, что позволяет использовать для обеспечения информационной безопасности существующие теоретические и практические наработки. Компонент – некий типовой элемент архитектуры, который не отражает ее функционального назначения (например, современные информационные системы, независимо от их назначения, используют веб-приложения для взаимодействия с пользователями и СУБД для хранения и обработки данных).

Таким образом, процесс построения иерархии архитектурных моделей системы начинается с декомпозиции системы на относительно большие блоки (рис. 3), обособленные как с точки зрения выполняемых функций, так и по составу компонентов. Далее каждый блок подвергается анализу на предмет выполняемых функций и компонентного состава. Анализ функций дает перечень (модель) функций для каждого блока, а анализ компонентов – перечень типовых компонентов. Входными данными для построения модели являются сведения об архитектурах различных облачных систем (описания структуры, состава, взаимосвязей и т. п.).

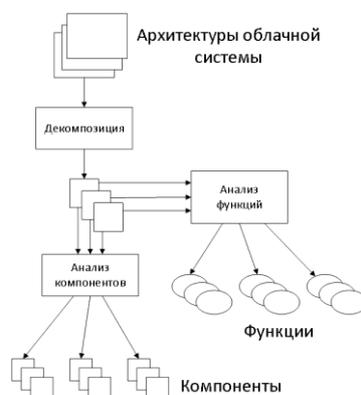


Рис. 3. Процесс построения иерархии архитектурных моделей
Fig. 3. The process of building a hierarchy of architectural models

Моделирование угроз облачных систем

Вопросы моделирования угроз облачных компьютерных систем (в частности систем класса IaaS) рассмотрены в исследованиях модели рисков для облачных технологий [13], численной модели влияния и оценки рисков облачной безопасности [14], эталонной онтологии операционной информации по кибербезопасности [15], а также в рамках проекта SECURIT и др.

Анализ существующих моделей угроз облачных систем показал, что большинство моделей в той или иной степени реализуют классификационный подход, заключающийся в категоризации угроз информационной безопасности (по целям, источникам, уязвимостям, ущербам от реализации), информации (по важности, уровню конфиденциальности) и средств защиты (по функциональности). Данный подход широко используется на практике ввиду относительной простоты создания классификационной модели. При этом основным недостатком данного подхода является то, что результаты синтеза, как правило, сильно обобщены (не содержат рекомендации технического характера) и представляют совокупность средств защиты, а не целостную систему.

Реалистичная модель угроз облачной системы должна базироваться на моделях угроз (атак) компонентов, входящих в состав системы, причем декомпозиция функций системы позволяет выделить уникальные особенности системы с точки зрения информационной безопасности, декомпозиция компонентов – определить типовые элементы. Входными данными для построения типовых моделей угроз является совокупность возможных функциональных элементов и компонентов облачной системы. Типовая модель угроз соответствующего элемента включает перечень возможных угроз и их классификацию. Для связи с угрозами информационной безопасности, рассматриваемыми с точки зрения потребителя, элементы детальной классификации угроз должны быть снабжены «метками» соответствующих моделей.

Для построения актуальных моделей угроз необходима интеграция с внешними источниками знаний. С учетом больших объемов информации и необходимости высокой скорости ее обработки важное значение имеет автоматизация обработки данных в направлениях управления уязвимостями ПО и безопасной настройкой компонентов системы. Среди подходов, позволяющих обеспечить автоматизацию вышеуказанных процессов и автоматическую обработку данных следует выделить протокол автоматизации контента безопасности SCAP (Security Content Automation Protocol) института NIST (США) [16]. Протокол SCAP разработан для организации, представления и измерения информации по вопросам информационной безопасности. Он может использоваться для поддержания безопасности корпоративных систем, в частности, автоматической проверки установки обновлений, мониторинга настроек безопасности, анализа систем на признаки проникновения и т. п. Основу SCAP составляет язык OVAL (Open vulnerability and Assessment Language), который стандартизирует способы подачи информации, процесс анализа системы и формат выдаваемого результата.

Наиболее успешным элементом SCAP является словарь уязвимостей CVE (Common Vulnerabilities and Exposures), описывающий известные уязвимости в публично выпускаемом ПО. На основе CVE функционирует национальная база уязвимостей NVD (National Vulnerability Database), которая совместно со словарем программных продуктов CPE (Common Platform Enumeration) и системой оценок уязвимостей CVSS (Common Vulnerability Scoring System) составляет базис большинства средств управления уязвимостями, таких как CVEsearch.com, Vulners.com, OpenVAS, Nessus.

Управление безопасностью конфигураций в SCAP обеспечивается расширяемым форматом описания контрольных листов настроек EXCCDF (Extensible Configuration Checklist Description Format), который позволяет формальные требования стандартов привязать к конкретным проверкам на защищаемой системе, описываемых OVAL. Однако данное направление проработано недостаточно, в частности, отсутствуют централизованная база безопасных настроек и средства анализа интеграции знаний в данной предметной области, что обуславливает исследовательский интерес к нему.

Заключение

Данная работа посвящена описанию концептуальных основ анализа моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем класса IaaS. Полученные модели могут быть использованы при решении задач анализа защищенности облачных компьютерных систем, а также синтеза систем защиты.

В работе описан процесс синтеза моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем на основе прикладных моделей системы и угроз, реализующий ролевой подход, а также предложена архитектура системы анализа моделей информационной безопасности облачных компьютерных систем. Структура системы включает подсистему анализа и моделирования, базу знаний и подсистему интеграции с внешними источниками знаний.

Основными преимуществами разработанной архитектуры являются: ориентация на модели (детальные модели, высокоуровневые модели, прикладные модели, синтезируемые модели), что позволяет применять широкий спектр методов и средств реализации моделей (семантический подход, имитационное моделирование, машинное обучение); включение функций автоматической обработки знаний по управлению уязвимостями и безопасными конфигурациями, что обеспечивает актуальность системы защиты.

Основными проблемами реализации представленной системы анализа моделей информационной безопасности являются построение иерархий моделей архитектур (типовые компоненты – элементы типовых компонентов) и моделей угроз (типовые угрозы – атаки, уязвимости, злоумышленники, контрмеры, метки безопасности). В рамках решения данных проблем предложен подход, реализующий комбинированный анализ функций и компонентов, а также приведен пример декомпозиции облачной системы класса IaaS.

Список литературы

1. Листопад Н.И., Олизарович Е.В., Бражук А.И. Практические аспекты внедрения облачных технологий в учреждении образования // Информатизация образования. 2014. № 2 (74). С. 55–65.
2. ГОСТ Р 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010:2011. Системная и программная инженерия. Описание архитектуры.
3. СТБ 34.101.1-2014. Информационные технологии и безопасность. Критерии оценки безопасности информационных технологий. Ч. 1. Введение и общая модель.
4. Toward a unified ontology of cloud computing. / L. Youseff [et al.] // Grid Computing Environments Workshop. 2008. P. 1–10.
5. Moscato F., Di Martino B., Aversa R. Enabling model driven engineering of cloud services by using mosaic ontology // Scalable Computing: Practice and Experience. 2011. Vol. 13. №. 1. P. 29–44.
6. Intercloud architecture for interoperability and integration / Y. Demchenko [et al.] // Cloud Computing Technology and Science. 2012. P. 666–674.
7. Dukaric R., Juric M. Towards a unified taxonomy and architecture of cloud frameworks // Future Generation Computer Systems. 2013. Т. 29. №. 5. P. 1196–1210.
8. SEcure Cloud computing for CRITICAL infrastructure IT [Electronic resource]. URL: <https://www.seccrit.eu/>. (date of access: 20.04.2018).
9. Scandariato R., Wuyts K., Joosen W. A descriptive study of Microsoft's threat modeling technique // Requirements Engineering. 2015. Т. 20, №. 2. P. 163–180.
10. A semantic-web approach for modeling computing infrastructures / M. Ghijsen [et al.] // Computers & Electrical Engineering. 2013. № 39 (8). P. 2553–2565.
11. Common Information Model [Electronic resource]. / DMTF. URL: <https://www.dmtf.org/standards/cim>. (date of access: 20.04.2018).
12. Управление программным обеспечением и архитектура отказоустойчивого IaaS-облака на основе универсальных узлов. / Ю.И. Воротницкий [и др.] // Электроника ИНФО. 2013. № 9. С. 21–24.
13. Cloud Computing Risk Assessment [Electronic resource]. / ENISA, 2009. URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/cloud-computing-risk-assessment/at_download/fullReport. (date of access: 20.04.2018).
14. Saripalli P., Walters B. Quirc: A quantitative impact and risk assessment framework for cloud security // 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing. 2010. P. 280–288.
15. Takahashi T., Kadobayashi Y. Reference ontology for cybersecurity operational information // The Computer Journal. 2014. Vol. 58, № 10. P. 2297–2312.
16. Security Content Automation Protocol [Electronic resource] / NIST. URL: <https://csrc.nist.gov/projects/security-content-automation-protocol>. (date of access: 20.04.2018).

References

1. Listopad N.I., Olizarovich E.V., Brazhuk A.I. Prakticheskie aspekty vnedrenija oblachnyh tehnologij v uchrezhdenii obrazovanija // Informatizacija obrazovanija. 2014. № 2 (74). S. 55–65. (in Russ.)
2. GOST R 57100-2016/ISO/IEC/IEEE 42010:2011. Sistemnaja i programmaja inzhenerija. Opisanie arhitektury. (in Russ.)
3. STB 34.101.1-2014. Informacionnye tehnologii i bezopasnost'. Kriterii ocenki bezopasnosti informacionnyh tehnologij. Ch. 1. Vvedenie i obshhaja model'. (in Russ.)
4. Toward a unified ontology of cloud computing. / L. Youseff [et al.] // Grid Computing Environments Workshop. 2008. P. 1–10.
5. Moscato F., Di Martino B., Aversa R. Enabling model driven engineering of cloud services by using mosaic ontology // Scalable Computing: Practice and Experience. 2011. Vol. 13. №. 1. P. 29–44.
6. Intercloud architecture for interoperability and integration / Y. Demchenko [et al.] // Cloud Computing Technology and Science. 2012. P. 666–674.
7. Dukaric R., Juric M. Towards a unified taxonomy and architecture of cloud frameworks // Future Generation Computer Systems. 2013. T. 29. №. 5. P. 1196–1210.
8. SEcure Cloud computing for CRITICAL infrastructure IT [Electronic resource]. URL: <https://www.secrit.eu/>. (date of access: 20.04.2018).
9. Scandariato R., Wuyts K., Joosen W. A descriptive study of Microsoft's threat modeling technique // Requirements Engineering. 2015. T. 20, №. 2. P. 163–180.
10. A semantic-web approach for modeling computing infrastructures / M. Ghijsen [et al.] // Computers & Electrical Engineering. 2013. № 39 (8). P. 2553–2565.
11. Common Information Model [Electronic resource]. / DMTF. URL: <https://www.dmtf.org/standards/cim>. (date of access: 20.04.2018).
12. Upravlenie programmym obespecheniem i arhitektura otkazoustojchivogo IaaS-oblaka na osnove universal'nyh uzlov. / Ju.I. Vorotnickij [i dr.] // Jelektronika INFO. 2013. № 9. S. 21–24. (in Russ.)
13. Cloud Computing Risk Assessment [Electronic resource]. / ENISA, 2009. URL: https://www.enisa.europa.eu/publications/cloud-computing-risk-assessment/at_download/fullReport. (date of access: 20.04.2018).
14. Saripalli P., Walters B. Quirc: A quantitative impact and risk assessment framework for cloud security // 2010 IEEE 3rd International Conference on Cloud Computing. 2010. P. 280–288.
15. Takahashi T., Kadobayashi Y. Reference ontology for cybersecurity operational information // The Computer Journal. 2014. Vol. 58, № 10. P. 2297–2312.
16. Security Content Automation Protocol [Electronic resource] / NIST. URL: <https://csrc.nist.gov/projects/security-content-automation-protocol>. (date of access: 20.04.2018).

Сведения об авторах

Олизарович Е.В., к.т.н., доцент, начальник Информационно-аналитического центра Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Бражук А.И., ведущий инженер-программист Информационно-аналитического центра Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Адрес для корреспонденции

230023, Республика Беларусь,
г. Гродно, ул. Ожешко, 22
Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы
тел: +375-152-72-01-44;
e-mail: brazhuk@grsu.by
Бражук Андрей Иосифович

Information about the authors

Olizarovich E.V., PhD, associate professor, head of the Information and Analytical Center of Grodno State University named after Yanka Kupala.

Brazhuk A.I., senior software engineer of the Information and Analytical Center of Grodno State University named after Yanka Kupala.

Address for correspondence

230023, Republic of Belarus,
Grodno, Ozheshko str., 22
Grodno State University
named after Yanka Kupala
tel.: +375-152-72-01-44;
e-mail: brazhuk@grsu.by
Brazhuk Andrei Iosifovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-20-25>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.855.5

КЛАССИФИКАЦИЯ НА ОСНОВЕ ПРОСТРАНСТВ РЕШЕНИЙ

КРАСНОПРОШИН В.В.¹, РОДЧЕНКО В.Г.²

¹Белорусский государственный университет, Республика Беларусь

²Гродненский государственный университет имени Янки Купалы, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 18 июня 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В работе предложен метод классификации, основанный на анализе свойств признаков подпространств. Описана процедура автоматического выявления пространств, в которых классы не пересекаются, и показана возможность их использования для автоматического построения классификаторов.

Ключевые слова: машинное обучение, интеллектуальный анализ данных, обучение по прецедентам, классификация.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Краснопрошин В.В., Родченко В.Г. Классификация на основе пространств решений. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 20-25.

CLASSIFICATION BASED ON DECISION SPACES

KRASNOPROSHIN V.V.¹, RODCHANKA V.G.²

¹Belarusian State University, Republic of Belarus

²Grodno State University named after Yanka Kupala, Republic of Belarus

Submitted 18 June 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. It's proposed a classification method based on the analysis of the feature subspaces properties. A procedure of automatic space identification where classes do not intersect is described. It's presented a possibility to use these spaces for automatic construction of classifiers.

Keywords: machine learning, data mining, learning by precedents, classification.

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

For citation. Krasnoproshin V.V., Rodchanka V.G. Classification based on decision spaces. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 20-25.

Введение

Развитие моделей, методов и технологий эффективного использования больших массивов накопленных, вновь появляющихся структурированных и слабоструктурированных данных является одной из центральных задач информатики. Наиболее перспективными в области обработки данных являются разделы искусственного интеллекта, называемые машинным обучением (Machine Learning) и интеллектуальным анализом данных (Data Mining) [1, 2].

В настоящее время Machine Learning ассоциируется с индуктивным обучением, фактически представляющим собой обучение по прецедентам. В результате обучения строится алгоритм, приближающий неизвестную целевую зависимость для объектов как обучающей выборки, так и всего исходного множества [3, 4]. Методы и средства интеллектуального анализа данных подразумевают обнаружение ранее неизвестных, практически полезных и доступных интерпретации закономерностей, которые необходимы для принятия решений в прикладных задачах [5, 6].

Определяющим этапом машинного обучения и интеллектуального анализа данных является обучение по прецедентам, реализуемое на основе анализа содержимого обучающей выборки. Однако если в Machine Learning процесс обучения направлен на построение алгоритма, то в Data Mining такой подход будет являться методологической ошибкой, поскольку искомый алгоритм представляет собой «черный ящик», который практически не поддается интерпретации.

В статье для интеллектуального анализа данных обучение по прецедентам предложено реализовать в рамках поиска признаков подпространств – пространств решений, в которых классы не пересекаются. Описан оригинальный метод, который базируется на исследовании свойств сочетаний признаков, выявлении и использовании пространств решений для автоматического построения классификаторов.

Метод выявления пространств решений

Машинное обучение – раздел искусственного интеллекта, нацеленный на изучение алгоритмов, способных обучаться. Обучение основано на анализе частных эмпирических данных, задаваемых прецедентами, и на практике оно выполняется в рамках решения задачи классификации.

Постановка задачи классификации следующая.

Пусть X – множество описаний объектов, Y – множество номеров (наименований) классов. Существует неизвестная целевая зависимость $y^*: X \rightarrow Y$, значения которой известны только на объектах конечной обучающей выборки $X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$. Требуется построить алгоритм $a: X \rightarrow Y$, который приближал бы эту целевую зависимость для любого объекта из исходного множества X [7].

Традиционный подход к решению задачи предусматривает следующую последовательность действий. Вначале выбирается некоторая модель алгоритмов $A = \{a: X \rightarrow Y\}$; вводится функция потерь $L(y, y')$ – измерение отклонения алгоритма ($y = a(x)$) для произвольного $x \in X$ от правильного значения ($y' = y^*(x)$); вводится функционал качества

$$Q(a, X^m) = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m L(a(x_i), y^*(x_i))$$
 – величина средней ошибки алгоритма a на объектах выборки X^m . Затем в модели A строится алгоритм, обеспечивающий минимальное значение средней ошибки на всей выборке X^m , $a = \arg \min_{a \in A} Q(a, X^m)$.

С практической точки зрения слабыми местами такого подхода, в частности, являются следующие:

1) проблема выбора модели алгоритмов, функции потерь и функционала качества относится к разряду нетривиальных. Причем реально такой выбор выполняется в ручном режиме;

2) результатом решения задачи является алгоритм, но интерпретируемых знаний (в аспекте интеллектуального анализа данных) извлечь не получается.

Интеллектуальный анализ данных представляет собой процесс обнаружения в наблюдаемых эмпирических данных ранее неизвестных, практически полезных и доступных интерпретации знаний, необходимых для принятия обоснованных решений [8]. Фактическим результатом такого процесса будут являться, во-первых, выявленные знания, обладающие указанными выше свойствами, и, во-вторых, алгоритмы принятия обоснованных решений, которые строятся на основе выявленных знаний.

Процедура обнаружения знаний представляет собой «обучение с учителем» и реализуется путем решения задачи в следующей постановке.

Пусть X – множество описаний, Y – множество допустимых ответов. Существует неизвестная целевая зависимость – отображение $y^*: X \rightarrow Y$, значения которой известны на объектах обучающей выборки $X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$. Требуется найти признаковые подпространства – пространства решений, в которых классы не пересекаются [9].

Предположим, что имеются множество описаний объектов X , множество допустимых ответов Y , обучающая выборка $X^m = \{(x_1, y_1), \dots, (x_m, y_m)\}$, сформированная на основе словаря признаков $F = \{f_1, \dots, f_n\}$. Обозначим через $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ множество всех непустых подмножеств, образованных всевозможными сочетаниями признаков из F . Очевидно, что множество V состоит из $q = \sum_{i=1}^n C_n^i = 2^n - 1$ подмножеств.

Выявление среди множества $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ признаков подпространств – пространств решений, в которых образы классов, построенные на объектах обучающей выборки, не пересекаются, предлагается провести следующим образом:

выбираем очередное сочетание v_i (где $i = \overline{1, q}$) и на основе всех его признаков определяем соответствующее признаковое подпространство;

в этом признаковом подпространстве строим образы классов и проводим оценку их взаимного размещения;

сочетание признаков v_i включаем в результирующее множество V^* только в том случае, когда образы классов не пересекаются.

В результате анализа всех элементов $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ будет построено множество $V^* = \{v_1^*, \dots, v_t^*\}$, где $0 \leq t \leq q$. Если множество V^* оказывается пустым, то необходимо сформировать новый вариант априорного словаря признаков и искать решение в рамках этого словаря.

Для каждого отдельного подмножества признаков $v_i^* \in V^*$ формулируем ранее неизвестную и выявленную эмпирическим путем закономерность: «в пространстве признаков подмножества v_i^* классы не пересекаются». Отметим, что в рамках конкретной прикладной задачи каждое сочетание признаков v_i^* из V^* может быть проинтерпретировано, а значит, и все выявленные закономерности могут быть проинтерпретированы.

Каждое сочетание признаков $v_i^* \in V^*$ определяет пространство решений, в котором классы не пересекаются, т. е. для паттернов классов внутри таких пространств подтверждается гипотеза компактности, а потому построение классификаторов (алгоритмов классификации) принципиальных затруднений не вызывает.

Построение классификатора на основе пространств решений

Пусть X – множество описаний объектов, $Y = \{y_1, \dots, y_k\}$ – алфавит классов, $F = \{f_1, \dots, f_n\}$ – словарь признаков, где признаком является результат измерения некоторой характеристики объекта.

Признак представляет собой отображение $f: X \rightarrow D_f$, где D_f – множество допустимых значений признака. Вектор $(f_1(x), \dots, f_n(x))$ – описание объекта $x \in X = D_{f_1} \times \dots \times D_{f_n}$. Совокупность признаков описаний всех объектов образует обучающую выборку $X^m = (x_1, \dots, x_m)$, которая

представляет собой матрицу $Z = \begin{pmatrix} f_1(x_1), \dots, f_n(x_n) \\ \dots \\ f_1(x_m), \dots, f_n(x_m) \end{pmatrix}$ размерности $m \times n$.

Обозначим через $Z_i^{m_i}$ матрицу размерности $m_i \times n$, образованную на основе всех объектов i -го класса (m_i – количество объектов i -го класса, $i = \overline{1, k}$, k – количество классов, n – количество признаков, $Z = \bigcup_{i=1}^k Z_i^{m_i}$), а через $V = \{v_1, \dots, v_q\}$ множество всевозможных сочетаний признаков, полученных на основе словаря F , где $q = \sum_{i=1}^n C_n^i = 2^n - 1$.

Алгоритм поиска пространств решений должен предусматривать выполнение последовательности следующих трех шагов:

Шаг 1. Берем очередное сочетание признаков $v_i \in V$ (где $i = \overline{1, q}$).

Шаг 2. В матрицах $Z_l^{m_l}$ (где $l = \overline{1, k}$) исключаем все столбцы с данными о тех признаках, которые не входят в сочетание v_i , и получаем множество матриц $W_1^{m_1}, \dots, W_k^{m_k}$.

Шаг 3. Проверяем выполнение условия $\bigcup_{i=1}^k (W_i^{m_i} \cap W_j^{m_j}) = \emptyset, \forall i \neq j: j = \overline{1, k}$.

Если условие выполняется, то сочетание v_i включаем в множество V^* и переходим к шагу 1, а иначе просто возвращаемся к шагу 1.

Результатом работы алгоритма является множество $V^* = \{v_1^*, \dots, v_t^*\}$, где $0 \leq t \leq q$. Если это множество оказывается непустым, то переходим к построению классификатора, а иначе необходимо перейти к формированию нового варианта априорного словаря признаков и далее искать решение в рамках этого словаря.

Классификатор будет представлять собой алгоритм, предусматривающий выполнение следующей последовательности шагов:

Шаг 1. Из непустого множества $V^* = \{v_1^*, \dots, v_t^*\}$ последовательно, начиная с $i = 1$, выбираем сочетание признаков v_i^* .

Шаг 2. В матрицах $Z_l^{m_l}$ (где $l = \overline{1, k}$) исключаем все столбцы с данными о признаках, не входящих в сочетание v_i^* , и получаем матрицы $W_1^{*m_1}, \dots, W_k^{*m_k}$.

Шаг 3. В признаковом пространстве, сформированном на основе v_i^* , строим кластерные структуры $C_1^{v_i}, \dots, C_k^{v_i}$ [10].

Шаг 4. Если $i < t$, то переходим к шагу 1, а иначе – к следующему.

Шаг 5. Берем классифицируемый объект.

Шаг 6. Последовательно, начиная с $i = 1$, выбираем очередное сочетание признаков v_i^* и в рамках соответствующего признакового пространства находим и присваиваем d_i либо номер кластерной структуры из множества $C_1^{v_i}, \dots, C_k^{v_i}$, в которую попал объект, либо присваиваем d_i ноль, если объект не попал ни в одну из кластерных структур. Итогом выполнения этого шага будет d_i – номер класса, к которому был отнесен классифицируемый объект.

Шаг 7. Если $i < t$, то переходим к шагу 1, а иначе – к следующему.

Шаг 8. Из сформированного в результате выполнения шагов 6 и 7 множества $D = \{d_1, \dots, d_t\}$ по правилу большинства голосов находим номер класса y^* (где $0 \leq y^* \leq k$) классифицируемого объекта.

Отметим, что если $y^* = 0$, то это означает, что классифицируемый объект не является представителем ни одного из заявленных классов, и говорят, что он относится к джокер-классу.

Применение метода для решения задачи классификации

В настоящее время машинное обучение и интеллектуальный анализ данных относятся к числу наиболее перспективных подразделов искусственного интеллекта, связанных с изучением методов построения алгоритмов, обладающих способностью обучаться.

Решаемые методами Machine Learning и Data Mining задачи принято разделять на описательные и предсказательные. Целью описательных задач является выявление и наглядное представление ранее неизвестных скрытых внутри данных закономерностей, например, проблема поиска паттернов. В предсказательных задачах центральным моментом является проблема поиска ответа на вопрос о возможности предсказания закономерностей на основе данных, которые появятся позже. Ярким примером в данном случае являются задачи классификации.

В отличие от классического подхода для решения задачи классификации предлагается воспользоваться описанным выше методом выявления пространств решений. Сначала на основе данных обучающей выборки фактически решить описательную задачу, т. е. отыскать пространства решений, в которых паттерны классов не пересекаются. А затем построение классификатора реализовать на основе выявленных пространств решений.

Отличительной чертой предложенного метода решения задачи классификации является возможность автоматической классификации, когда на вход подаются данные обучающей выборки и без всяких внешних вмешательств на выходе формируется результат классификации исследуемого объекта.

Заключение

В статье предложен метод классификации, который базируется на исследовании и использовании свойств сочетаний признаков исходного словаря. На основе анализа данных обучающей выборки выявляются пространства решений, в которых классы не пересекаются. Показано, что на основе свойств этих пространств удастся не только выявлять скрытые закономерности и проводить их интерпретацию в терминах предметной области, но и проводить автоматическое построение классификаторов.

Описаны метод выявления пространств решений, алгоритм поиска таких пространств и алгоритм автоматического построения классификаторов. Показана возможность использования разработанных метода и алгоритмов для решения задач классификации.

Список литературы

1. Плас Дж.В. Python для сложных задач: наука о данных и машинное обучение. СПб.: Питер, 2018. 576 с.
2. Силен В., Мейсман А., Али М. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных. СПб.: Питер, 2017. 336 с.
3. Краснопрошин В.В., Образцов В.А. Проблема принятия решений по прецедентности: разрешимость и выбор алгоритмов // Выбр. навуц. працы Беларус. дзярж. ун-та. 2001. Т. 6. Матэматыка. С. 285–311.
4. Абламейко С.В., Краснопрошин В.В., Образцов В.А. Модели и технологии распознавания образов с приложением в интеллектуальном анализе данных // Вестник БГУ. Сер. 1. № 3. 2011. С. 62–72.
5. Технологии анализа данных: Data Mining, Text Mining, Visual Mining, OLAP / А.А. Барсегян [и др.]. СПб.: БХВ-Петербург, 2007. 384 с.
6. Флах П. Машинное обучение. Наука и искусство построения алгоритмов, которые извлекают знания из данных. М.: ДМК Пресс, 2015. 402 с.
7. Машинное обучение / Профессиональный информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных [Электронный ресурс]. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Machine_Learning (дата обращения: 05.04.2018).
8. Интеллектуальный анализ данных / Профессиональный информационно-аналитический ресурс, посвященный машинному обучению, распознаванию образов и интеллектуальному анализу данных [Электронный ресурс]. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Интеллектуальный_анализ_данных (дата обращения: 05.04.2018).
9. Краснопрошин В.В., Родченко В.Г. Обучение по прецедентам на основе анализа свойств признаков // Доклады БГУИР. 2017. № 6 (108). С. 35–41.
10. Краснопрошин В.В., Родченко В.Г. Кластерные структуры и их применение в интеллектуальном анализе данных // Информатика. № 2. 2016. С. 71–77.

References

1. Plas Dzh.V. Python dlja slozhnyh zadach: nauka o dannyh i mashinnoe obuchenie. SPb.: Piter, 2018. 576 s. (in Russ.)
2. Silen V., Mejsman A., Ali M. Osnovy Data Science i Big Data. Python i nauka o dannyh. SPb.: Piter, 2017. 336 s. (in Russ.)
3. Krasnoproshin V.V., Obrazcov V.A. Problema prinjatija reshenij po precedentnosti: razreshimost' i vybor algoritmov // Vybr. navuk. pracy Belarus. dzjarzh. un-ta. 2001. T. 6. Matjematyka. S. 285–311. (in Russ.)
4. Ablamejko S.V., Krasnoproshin V.V., Obrazcov V.A. Modeli i tehnologii raspoznavanija obrazov s prilozheniem v intellektual'nom analize dannyh // Vestnik BGU. Ser. 1. № 3. 2011. S. 62–72. (in Russ.)
5. Tehnologii analiza dannyh: Data Mining, Text Mining, Visual Mining, OLAP / A.A. Barsegjan [i dr.]. SPb.: BHV-Peterburg, 2007. 384 s. (in Russ.)
6. Flah P. Mashinnoe obuchenie. Nauka i iskusstvo postroenija algoritmov, kotorye izvlekajut znaniya iz dannyh. M.: DMK Press, 2015. 402 s. (in Russ.)
7. Mashinnoe obuchenie / Professional'nyj informacionno-analiticheskij resurs, posvjashhennyj mashinnomu obucheniju, raspoznavaniju obrazov i intellektual'nomu analizu dannyh [Electronic resource]. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Machine_Learning (date of access: 05.04.2018). (in Russ.)
8. Intellektual'nyj analiz dannyh / Professional'nyj informacionno-analiticheskij resurs, posvjashhennyj mashinnomu obucheniju, raspoznavaniju obrazov i intellektual'nomu analizu dannyh [Electronic resource]. URL: http://www.machinelearning.ru/wiki/index.php?title=Intellektual'nyj_analiz_dannyh (date of access: 05.04.2018). (in Russ.)
9. Krasnoproshin V.V., Rodchenko V.G. Obuchenie po precedentam na osnove analiza svojstv priznakov // Doklady BGUIR. 2017. № 6 (108). S. 35–41. (in Russ.)
10. Krasnoproshin V.V., Rodchenko V.G. Klasternye struktury i ih primenenie v intellektual'nom analize dannyh // Informatika. № 2. 2016. S. 71–77. (in Russ.)

Сведения об авторах

Краснопрошин В.В., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой информационных систем управления Белорусского государственного университета.

Родченко В.Г., к.т.н., доцент, доцент кафедры современных технологий программирования Гродненского государственного университета имени Янки Купалы.

Information about the authors

Krasnoproshin V.V., D.Sci, professor, head of the department of management information systems of Belarusian State University.

Rodchanka V.G., PhD, associate professor, associate professor of the Modern Programming Technologies Department of Grodno State University named after Yanka Kupala.

Адрес для корреспонденции

230023, Республика Беларусь,
г. Гродно, ул. Ожешко, 22,
Гродненский государственный
университет имени Янки Купалы
тел. +375-29-786-98-48;
e-mail: rovar@mail.ru
Родченко Вадим Григорьевич

Address for correspondence

230023, Republic of Belarus,
Grodno, Ozheshko str., 22,
Grodno State University
named after Yanka Kupala
tel. +375-29-786-98-48;
e-mail: rovar@mail.ru
Rodchanka Vadzim Rygoravich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-26-30>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.384

ДВИЖЕНИЕ РЕЛЯТИВИСТСКОГО ЭЛЕКТРОНА В СКРЕЩЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ПОЛЯХ

КУРАЕВ А.А., МАТВЕЕНКО В.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 сентября 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Показано, что существующие в современной литературе представления о движении электрона в скрещенных полях неверны. В случае релятивистских скоростей движение электрона нельзя представить как наложение дрейфа со скоростью $u = E_0/B_0$ и вращения с частотой $\Omega = eB_0/m$ (e , m – заряд и релятивистская масса электрона). В релятивистском случае эти движения не разделяются, а мгновенная частота вращения электрона Ω в неподвижной относительно E_0 , B_0 системе координат непостоянна: Ω зависит от m , которая при вращении меняется в значительных пределах.

Ключевые слова: релятивистский электрон, скрещенные поля, колебания угловой скорости вращения.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Кураев А.А., Матвеев В.В. Движение релятивистского электрона в скрещенных электрических и магнитных полях. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 26-30.

MOVEMENT OF A RELATIVISTIC ELECTRON IN CROSSED ELECTRIC AND MAGNETIC FIELDS

KURAYEV A.A., MATVEYENKO V.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 4 September 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. It is shown that the ideas about the electron motion into electric and magnetic crossed fields existing in the modern literature are incorrect. For relativistic velocity case the electron motion can't be imagined by the superposition of the drift with velocity $u = E_0/B_0$ and the rotation with frequency $\Omega = eB_0/m$ (e , m is charge and mass of relativistic electron). In the relativistic case these motions are not separated, moreover the instantaneous rotation frequency Ω of relativistic electron is unstable for fixed coordinate system (E_0 , B_0): Ω depends on m , which varies considerably during rotation.

Keywords: relativistic electron, crossed fields, angular velocity speed instability.

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

For citation. Kurayev A.A., Matveyenko V.V. Movement of a relativistic electron in crossed electric and magnetic fields. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 26-30.

Введение

Движение заряженных частиц в скрещенных полях используется во многих физических приборах. Среди них наиболее широко распространены электровакуумные приборы СВЧ со скрещенными полями, или приборы М-типа: магнетроны, амплитроны, платинотроны, митроны, планотроны, ниготроны, ЛБВ и ЛОВ [1...4]. В приведенных работах рассматривается нерелятивистский случай, когда возможно галилеево сложение скоростей и, следовательно, разделение движения электрона на дрейфовое и вращательное. Это, конечно, допустимо при низких анодных напряжениях, когда полная скорость электрона v значительно ниже скорости света в пустоте c . Однако в последние десятилетия появились обращенно-коаксиальные релятивистские магнетроны. Например, в [4] сообщается о релятивистском импульсном магнетроне с мощностью 1 ГВт при длительности импульса 30 нс и анодном напряжении 600 кВ.

Таким образом, исследование движения релятивистского электрона в скрещенных полях представляет определенный интерес. В трудах по теоретической физике подобные исследования представлены в общей форме, но выводы не вполне корректны. Обратимся к монографии [5, с. 152]. Здесь рассматривается переход от неподвижной системы K к K' ,

движущейся со скоростью дрейфа электрона в скрещенных полях \vec{E}_0 и \vec{B}_0 $\vec{u} = c \frac{\vec{E}_0 \times \vec{B}_0}{B_0^2}$ (в [5]

принята система СГС). Тогда в системе K' : $\vec{E}' = 0$, $\vec{B}'_{\parallel} = 0$, $\vec{B}'_{\perp} = \vec{B}_0 \frac{1}{\gamma}$, $\gamma = (1 - u^2/c^2)^{-\frac{1}{2}}$. Далее

делается неверное заключение: движение электрона складывается из дрейфа со скоростью u и вращения с постоянной угловой скоростью $\Omega = eB_0/\gamma m_0$. Однако дрейф имеет место в системе K , а вращение – в системе K' . Галилеево сложение в релятивистском случае невозможно, и для описания полного движения электрона в K нужно Лоренцово преобразование вращательного движения электрона в системе K' в систему K , где вращательное движение существенно (при больших γ) изменится.

В настоящей статье приводится строгое численное решение уравнения движения релятивистского электрона в скрещенных полях и обсуждаются его результаты.

Уравнение движения релятивистского электрона в скрещенных полях

Воспользуемся следующей формой релятивистского уравнения движения, приведенной в [6] (уравнение (2.77)):

$$\frac{d\vec{v}}{dt} = -\frac{e}{m_0} \left(1 - \vec{v} \cdot \vec{v} / c^2\right)^{\frac{1}{2}} \left\{ \vec{E} + [\vec{v}, \vec{B}] - \vec{v} / c^2 (\vec{v} \cdot \vec{E}) \right\}, \quad (1)$$

$$\frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{v}; \quad e, m_0 - \text{заряд и масса покоя электрона.}$$

Изберем прямоугольную систему координат x, y, z и положим:

$$\vec{E} = -\vec{x}_0 E_0, \quad \vec{B} = -\vec{z}_0 B_0. \quad (2)$$

Введем следующие безразмерные переменные:

$$\vec{\beta} = \vec{v}/c, \quad \vec{\beta} = \bar{x}_0\beta_x + \bar{y}_0\beta_y, \quad T = \omega_H t, \quad \omega_H = \frac{e}{m_0} B_0, \quad \vec{R} = \bar{x}_0 x + \bar{y}_0 y = \bar{r} \frac{\omega_H}{c}, \quad \vec{\beta}_0 = \bar{x}_0 k, \quad k = \frac{E_0}{cB_0}.$$

При введенных переменных уравнение (1) с учетом (2) преобразуется к виду

$$\frac{d\vec{\beta}}{dT} = -(1-\beta^2)^{1/2} \left\{ -x_0 k + [\vec{\beta}, \vec{z}_0] - \vec{\beta}(\beta_x k) \right\}, \quad \frac{d\vec{R}}{dT} = \vec{\beta}. \quad (3)$$

Изберем начальные условия k (3) исходя из схемы, представленной на рис. 1

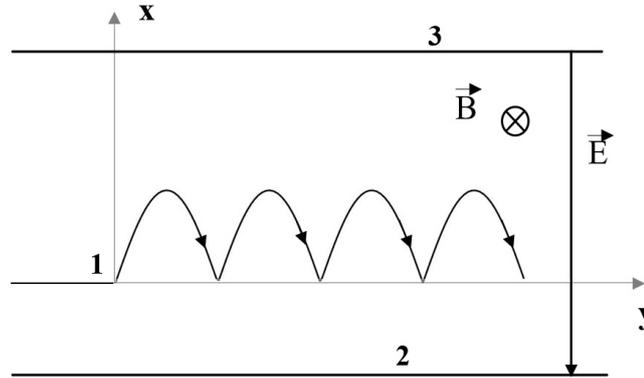


Рис. 1. Схема движения релятивистского электрона в скрещенных полях
Fig. 1. The scheme of motion of a relativistic electron in crossed fields

На рис. 1 1 – источник электронов с нулевой начальной скоростью; здесь же начало координат x, y, z . Напряженность поля $\vec{x}_0 E_0$ создается разностью потенциалов на пластинах 2, 3. Магнитное поле нормально плоскости движения x, y : $\vec{B} = -\vec{z}_0 B_0$. 4 – траектория электрона. При этом начальные условия имеют вид:

$$\beta_x(0) = 0, \quad \beta_y(0) = 0, \quad x(0) = 0, \quad y(0) = 0. \quad (4)$$

Результаты расчета $\beta, \beta_x, 1/\gamma$ электрона

Расчет по уравнению (3) проводился при следующих значениях k : 0,05; 0,1; 0,3; 0,6. Эти значения соответствуют нерелятивистской относительной скорости дрейфа электрона в направлении \vec{y}_0 .

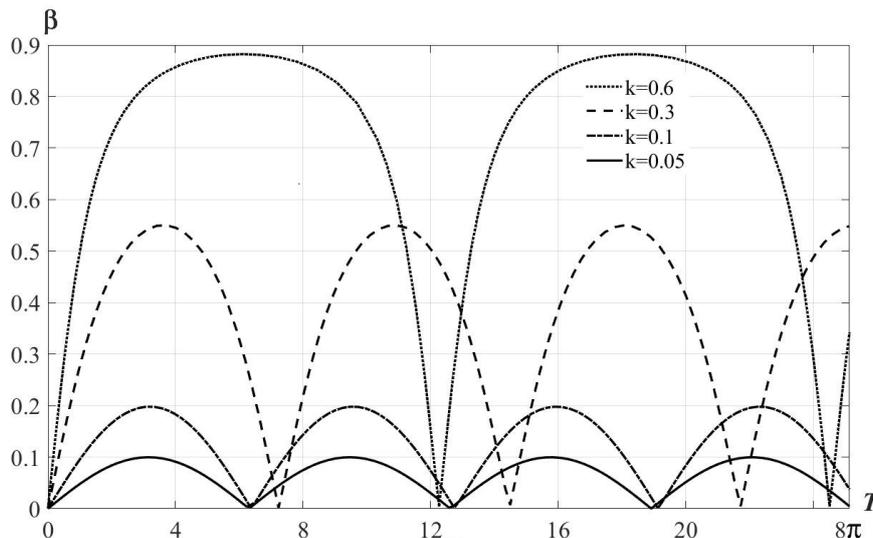


Рис. 2. Зависимости $\beta(T)$ для перечисленных значений k
Fig. 2. Dependences $\beta(T)$ for the listed values of k

На рис. 2 изображены зависимости $\beta(T)$ для различных k . Из этих зависимостей следует, что характер движения электрона близок к нерелятивистскому при $k = 0,05$ и $k = 0,1$ в максимумах $\beta_{\max} = 2k$, т. е. траектория соответствует циклоиде. Но уже при $k = 0,3$ $\beta_{\max} < 0,6$, что говорит о деформации траектории. При $k = 0,6$ $\beta_{\max} < 0,9$ (по нерелятивистским оценкам должно быть $\beta_{\max} = 1,2$, что, естественно, абсурдно).

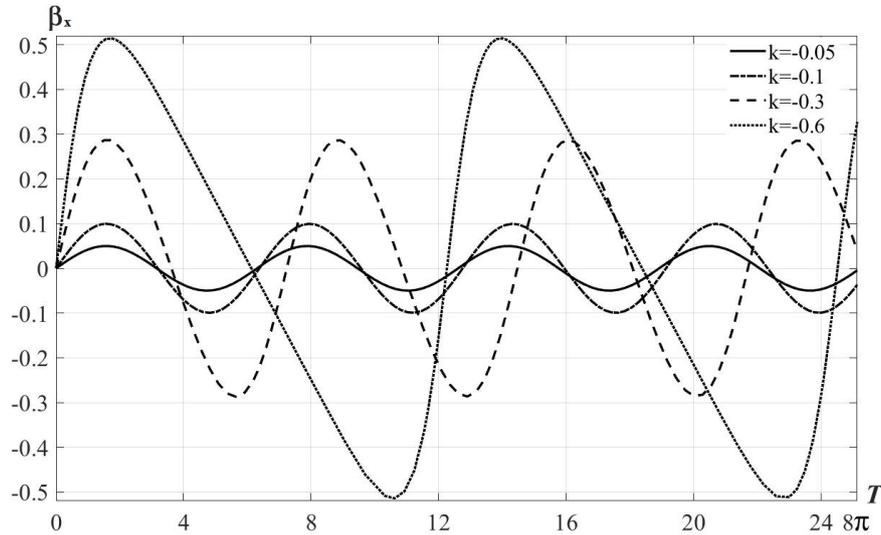


Рис. 3. Зависимости $\beta_x(T)$ для перечисленных значений k
Fig. 3. Dependences $\beta_x(T)$ for the listed values of k

На рис. 3 представлены зависимости $\beta_x(T)$ для различных k . Опять видно, что при $k = 0,05; 0,1$ эта зависимость на каждом обороте электрона симметрична, что соответствует нерелятивистским представлениям. При $k = 0,3; 0,6$ асимметрия вращения электрона весьма сильно проявляется.

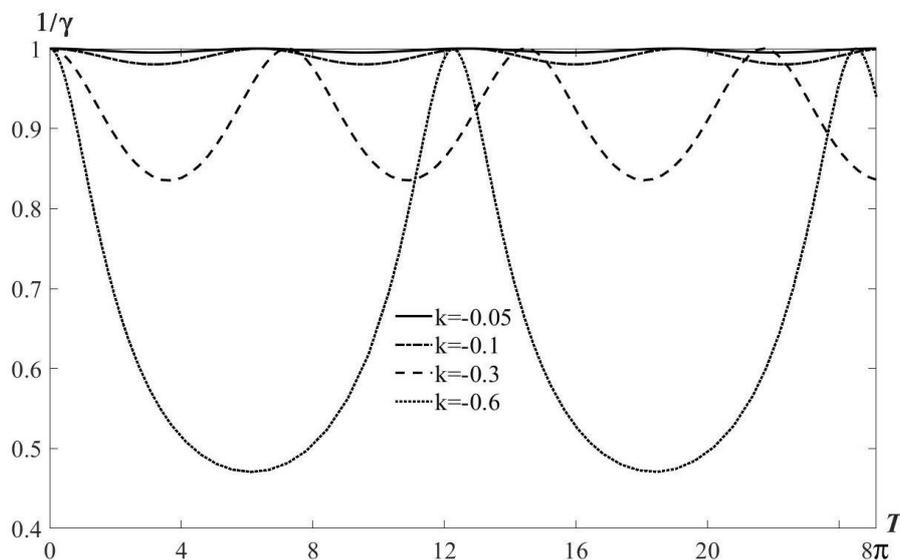


Рис. 4. Зависимости $\gamma^{-1}(T)$ при разных значениях k
Fig. 4. Dependences $\gamma^{-1}(T)$ for different values of k

На рис. 4 представлены зависимости $\gamma^{-1}(T)$ для различных k . При $k \leq 0,1$ величина $\gamma^{-1}(T)$ близка к 1, при $k = 0,3; 0,6$ в экстремуме траектории $\gamma^{-1}(T)$ значительно меньше 1. Поскольку мгновенная угловая частота вращения электрона $\Omega(T) = \gamma^{-1}(T)\omega_n$, очевидно, что на периоде вращения она значительно меняется, т. е. вращение электрона неравномерно. Иначе говоря, на статической траектории в скрещенных полях релятивистский электрон-осциллятор является ангармоничным, что может быть полезно использовано в электронике СВЧ.

Заклучение

Как показал приведенный анализ, использование нерелятивистского приближения для стационарных траекторий электрона в скрещенных полях (в частности, в теории приборов М-типа) допустимо до $k \sim 0,1$ и $\beta \sim 0,2$, что соответствует анодным напряжениям порядка 10 кВ.

Список литературы

1. Стальмахов В.С. Основы электроники СВЧ приборов со скрещенными полями. М.: Сов. радио. 1967. 366 с.
2. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т. II. М.: Высш. школа. 1972. 376 с.
3. Гайдук В.И., Палатов К.И., Петров Д.М. Физические основы электроники СВЧ. М.: Сов. радио. 1972. 600 с.
4. Шлиферг Э.Д. Электровакуумные приборы СВЧ М-типа. Итоги науки и техники. Электроника. Т.17. М.: Сов. радио, 1985.
5. Джексон Дж. Классическая электродинамика. М.: Мир, 1965. 702 с.
6. Кураев А.А., Байбурун В.Б., Ильин Е.М. Математические модели и методы оптимального проектирования СВЧ приборов. Минск: Наука и техника. 1990. 392 с.

References

1. Stal'mahov V.S. Osnovy jelektroniki SVCh priborov so skreshhennymi poljami. M.: Sov. radio. 1967. 366 s. (in Russ.)
2. Lebedev I.V. Tehnika i pribory SVCh. T. II. M.: Vyssh. shkola. 1972. 376 s. (in Russ.)
3. Gajduk V.I., Palatov K.I., Petrov D.M. Fizicheskie osnovy jelektroniki SVCh. M.: Sov. radio. 1972. 600 s. (in Russ.)
4. Shliferg Je.D. Jelektrovakuumnye pribory SVCh M-tipa. Itogi nauki i tehnik. Jelektronika. T.17. M.: Sov. radio, 1985. (in Russ.)
5. Dzhekson Dzh. Klassicheskaja jelektrodinamika. M.: Mir, 1965. 702 s. (in Russ.)
6. Kuraev A.A., Bajburin V.B., Il'in E.M. Matematicheskie modeli i metody optimal'nogo proektirovaniya SVCh priborov. Minsk: Nauka i tehnika. 1990. 392 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Кураев А.А., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Матвееенко В.В., к.ф.-м.н., доцент, доцент кафедры вычислительных методов и программирования Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Kurayev A.A., D.Sci., professor, professor of information radiotechnologies department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Matveyenka V.V., PhD., associate professor, associate professor of computational methods and programming department of 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. +375-17-293-89-56;
e-mail: vladimir66@bsuir.by
Матвееенко Владимир Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-56;
e-mail: vladimir66@bsuir.by
Matveyenka Vladimir Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-31-37>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.592

ФОРМИРОВАНИЕ СЛОЕВ ПОРИСТОГО КРЕМНИЯ НА СИЛЬНОЛЕГИРОВАННЫХ МОНОКРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ ДЫРОЧНОГО ТИПА ПРОВОДИМОСТИ

ГУРБО А.Д., КЛИМЕНКО А.В., БОНДАРЕНКО В.П.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 17 сентября 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Методом электрохимического анодирования на кремниевых подложках дырочного типа проводимости получены слои пористого кремния. Изучены закономерности роста слоев и зависимость их пористости от длительности анодирования и плотности анодного тока. Получена математическая модель роста слоев пористого кремния.

Ключевые слова: пористый кремний, электрохимическое анодирование, кремниевые структуры.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гурбо А.Д., Клименко А.В., Бондаренко В.П. Формирование слоев пористого кремния на сильнолегированных монокристаллах кремния дырочного типа проводимости. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 31-37.

FORMATION OF POROUS SILICON ON A HIGHLY DOPED P-TYPE MONOCRYSTALLINE SILICON

HURBO A.D., KLIMENKA A.V., BONDARENKO V.P.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 17 September 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. Porous silicon layers were formed on a *p*-type silicon wafers by electrochemical anodisation. Dependencies of thickness and porosity of porous silicon layers as well as effective valence of silicon dissolution versus anodizing time and current density were obtained and analysed. A mathematical model for growth of layers of porous silicon was developed.

Keywords: porous silicon, electrochemical anodisation, silicon structures.

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

For citation. Hurbo A.D., Klimenka A.V., Bondarenko V.P. Formation of porous silicon on a highly doped p-type monocrystalline silicon. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 31-37.

Введение

В 1956 году в ходе исследований электрохимической полировки кремния [1] был открыт пористый кремний, который представляет собой области кремния, пронизанные каналами пор, направленными от поверхности вглубь кристалла. Пористый кремний сохраняет кристаллическую структуру кремния, но благодаря пористой структуре демонстрирует уникальные физико-химические свойства, которыми не обладает монокристаллический кремний. Основным способом формирования пористого кремния является метод электрохимического анодирования. Основные свойства пористого кремния (пористость, толщина, диаметр пор и микроструктура) зависят от режимов анодирования и состава электролита, а также от удельного сопротивления исходных кремниевых пластин. При изменении этих факторов микроструктура пористых слоев получается различной, что оказывает существенное влияние на их свойства [2].

К настоящему времени опубликовано большое количество статей, посвященных формированию пористого кремния и изучению его свойств. Однако до сих пор не были получены математические модели, описывающие кинетику роста слоев пористого кремния на сильнолегированных монокристаллах кремния дырочного типа проводимости.

Целью данной работы являлось исследование кинетики роста слоев пористого кремния на монокристаллических подложках кремния дырочного типа проводимости и получение математической модели роста пористого кремния в диапазоне плотностей анодного тока от 5 до 30 мА/см².

Методика проведения эксперимента

В ходе проведения экспериментов были использованы пластины монокристаллического кремния дырочного типа проводимости (КДБ), с кристаллографической ориентацией (111), удельным сопротивлением 0,03 Ом см.

Перед проведением электрохимического анодирования пластины кремния подвергались химической обработке в дихромате калия (K₂Cr₂O₇). После чего пластины промывались в дистиллированной воде. Далее с поверхности пластин удалялся слой естественного оксида кремния в 4,5 % растворе плавиковой кислоты (HF). Электрохимическое анодирование кремниевых пластин проводилось при освещении в зоне проведения эксперимента в электрохимической ячейке, изготовленной из фторопласта. Электролит для анодирования состоял из концентрированной (45 %) плавиковой кислоты (HF), дистиллированной воды и изопропилового спирта (C₃H₈O), используемых в соотношении 1:1:1. Площадь зоны анодирования составляла 2 см². Электрохимическое анодирование проводилось в гальваностатическом режиме, при котором анодный ток через образец остается неизменным. В качестве источника постоянного тока для реализации гальваностатического режима использовался потенциогальваностат Metrohm Autolab PGSTAT 302N. Анодирование проводилось при плотностях тока от 5 до 30 мА/см². Измерение толщины полученных слоев проводилось с помощью микроскопа МИИ-4. После измерения необходимых параметров проводили травление слоя пористого кремния в концентрированном растворе едкого калия (KOH).

В ходе выполнения экспериментов с помощью микроаналитических весов Sartorius были проведены следующие измерения: масса подложки до анодирования m_1 , масса подложки после анодирования m_2 , масса подложки после травливания пористого слоя m_3 . По экспериментальным значениям масс гравиметрическим методом были получены следующие параметры: толщина (T_m) (далее будем называть ее весовой) и потеря массы (Δm).

Структура образцов пористого кремния изучалась с помощью сканирующего электронного микроскопа (СЭМ) Hitachi S4800, обеспечивающего разрешение 1 нм.

Графики экспериментальных кинетических зависимостей толщины и потери массы образцов и их последующая линеаризация были получены с помощью программы Origin Pro. Погрешности, полученные в результате линеаризации, имели пренебрежимо малые значения и, следовательно, причиной нелинейности были погрешности измерений. По значениям данных, полученных в результате линеаризации, были рассчитаны необходимые параметры: скорость роста слоя пористого кремния (v), пористость (P) и эффективная валентность растворения кремния (n).

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены СЭМ-изображения поверхности и сколов образцов пористого кремния, полученных при различных плотностях тока. Как видно из СЭМ-изображений, размеры пор на поверхности пористого кремния зависят от величины плотности тока.

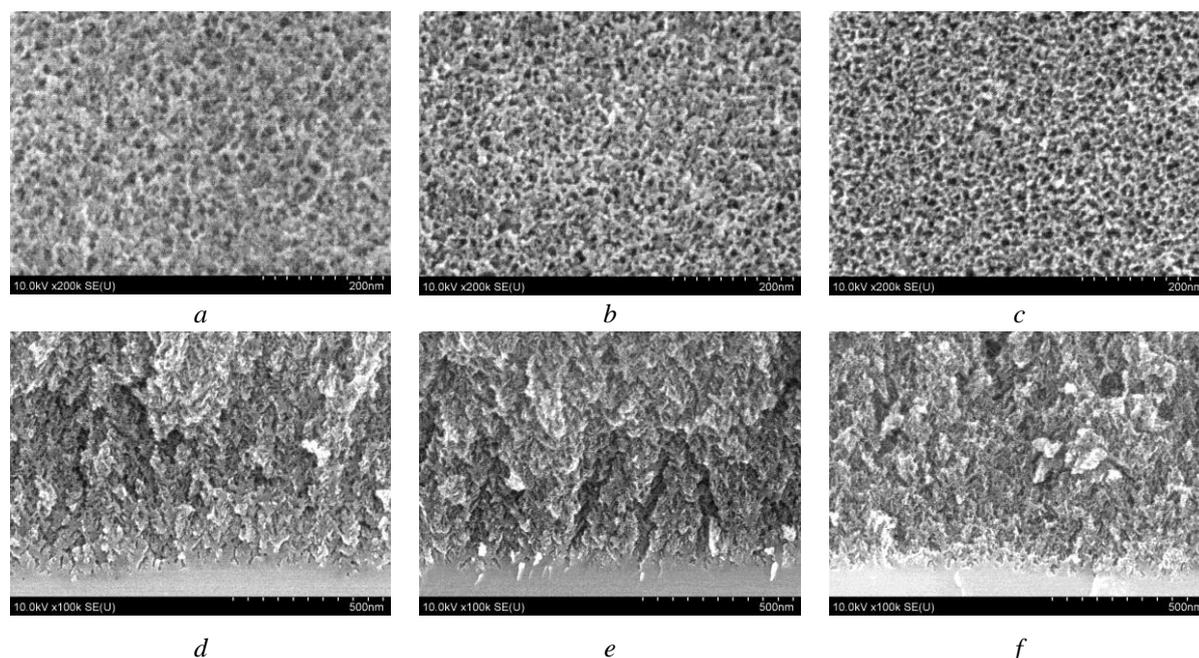


Рис. 1. СЭМ-изображения поверхности (*a, b, c*) и сколов (*d, e, f*) образцов пористого кремния, полученных при плотностях тока: *a, d* – 15 мА/см², *b, e* – 20 мА/см², *c, f* – 30 мА/см²

Fig. 1. SEM images of the surface (*a, b, c*) and chips (*d, e, f*) of porous silicon samples obtained at current densities: *a, d* – 15 mA/cm², *b, e* – 20 mA/cm², *c, f* – 30 mA/cm²

Анализ микрофотографий, представленных на рис. 1, с помощью программы статистического графического анализа изображений ImageJ позволил определить площадь пор, рассчитать их эквивалентный диаметр и распределение пор по эквивалентным диаметрам, определить количество пор на 1 см² поверхности образца (плотность пор). Эквивалентные диаметры определяли из значений площади входных отверстий каналов пор при допущении, что отверстия каналов пор на поверхности имеют форму круга [3]. Результаты анализа показаны на рис. 2. На рис. 3 представлена гистограмма распределения пор для образца пористого кремния, полученного в течение 10 минут при плотности тока 20 мА/см², по эквивалентным диаметрам. Распределение пор по эквивалентным диаметрам имеет колоколообразную форму. Из рис. 2 видно, что плотность пор увеличивается с увеличением плотности тока, следовательно, количество пор растет при увеличении плотности тока. Увеличение эквивалентного диаметра и количества пор при увеличении плотности анодного тока приводит к уменьшению толщины скелета. Морфология и форма пор не изменяются при изменении плотности тока.

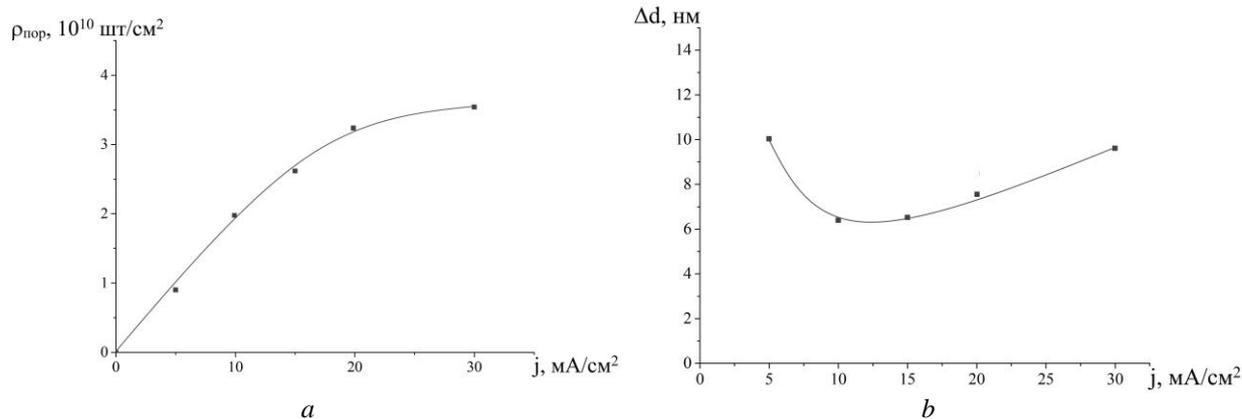


Рис. 2. Зависимость плотности (а) и среднего эквивалентного диаметра пор (b) от плотности анодного тока
Fig. 2. The dependence of the density (a) and the average equivalent pore diameter (b) on the density of the anode current

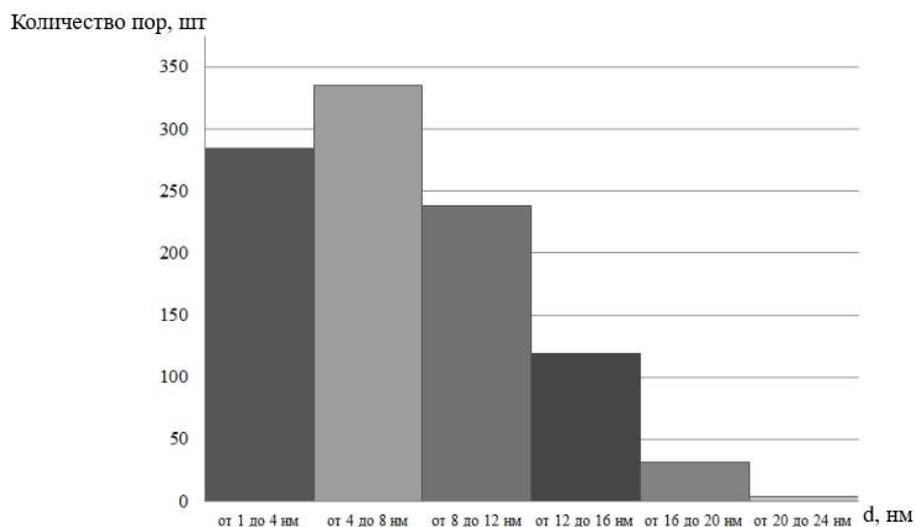


Рис. 3. Гистограмма распределения пор по эквивалентным диаметрам
Fig. 3. Histogram of the distribution of pore equivalent diameters

На рис. 4 показаны зависимости толщины a и весовой толщины b слоев пористого кремния от времени анодирования при плотностях анодного тока от 5 до 30 mA/cm^2 .

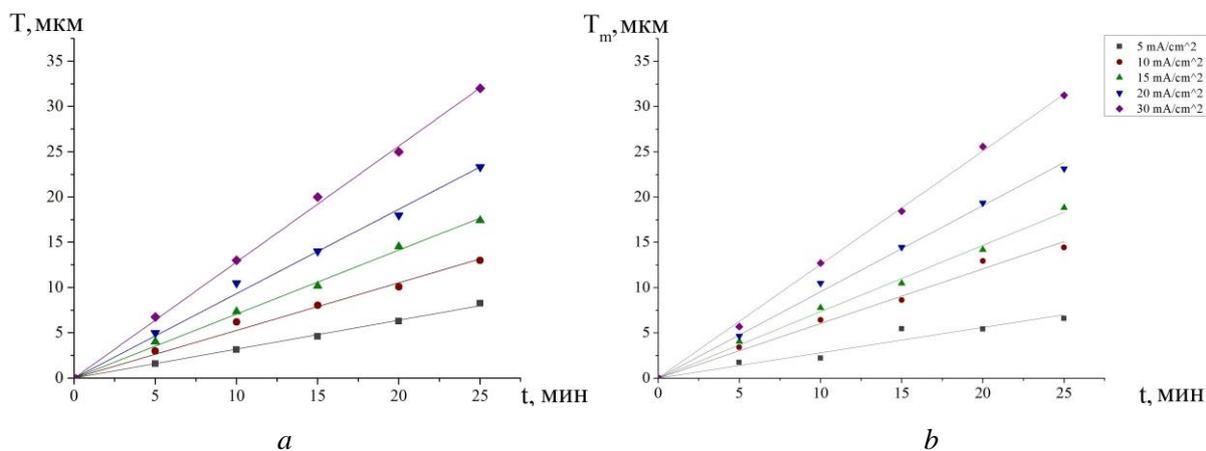


Рис. 4. Зависимость толщины (а) и весовой толщины (b) от времени анодирования при различных значениях плотности тока
Fig. 4. Dependence of thickness (a) and weight thickness (b) on anodizing time at various current densities

Значения толщины (оптической и весовой) линейно возрастают с увеличением времени. Линейность зависимости толщины слоя пористого кремния от времени анодирования означает, что при постоянной плотности анодного тока скорость роста пористого кремния в рамках проведенного эксперимента не изменялась [3]. На рис. 5 представлена зависимость скорости роста пористого кремния от плотности тока. Из рис. 5 видно, что скорость роста пористого кремния возрастает с увеличением плотности тока.

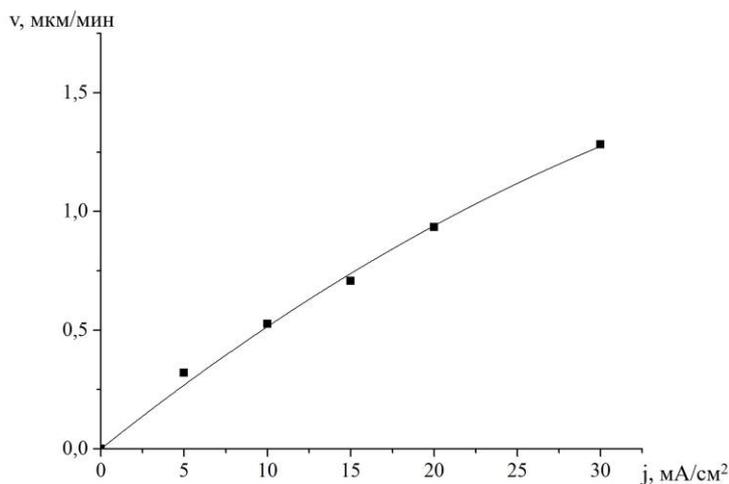


Рис. 5. Зависимость скорости роста слоя пористого кремния от плотности тока
Fig. 5. The dependence of the growth rate of the layer of porous silicon on the current density

Из зависимостей, представленных на рис. 4, была получена математическая модель, которая позволяет оценить, какая толщина слоя будет получена при выборе определенных параметров электрохимического анодирования. Функция зависимости толщины слоя пористого кремния от времени анодирования и плотности анодного тока имеет вид:

$$T(t; j) = (-4,52532 \cdot 10^{-4} \cdot j^2 + 0,05606 \cdot j) \cdot t.$$

График зависимости потери массы от времени анодирования при плотностях тока от 5 до 30 mA/cm² представлен на рис. 6.

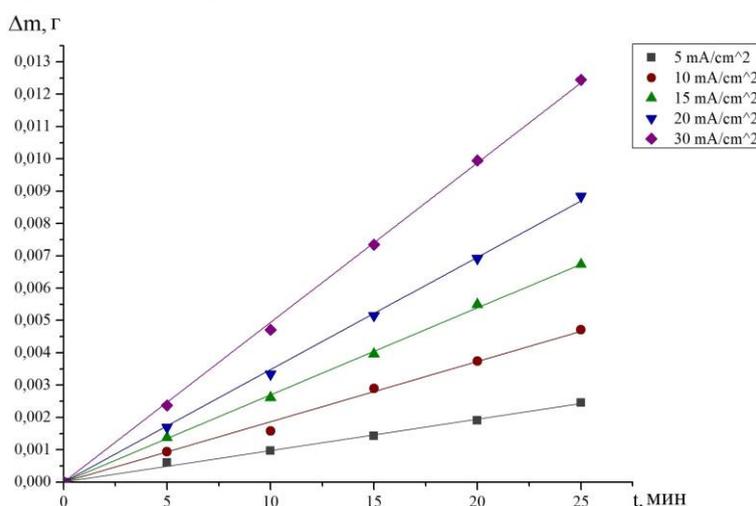


Рис. 6. Зависимости потери массы от времени анодирования при различных значениях плотности тока
Fig. 6. Dependences of the mass loss on the time of anodizing at various values of current density

Из рис. 6 видно, что при увеличении длительности анодирования потеря массы линейно возрастает. Из этого следует, что при постоянной плотности анодного тока скорость растворения кремния остается неизменной [3].

Зависимость пористости полученных слоев от времени анодирования при плотностях тока от 5 до 30 мА/см² представлены на рис. 7. В областях низких плотностей токов наблюдается рост пористости, что соответствует теоретической зависимости.

Эффективная валентность растворения показывает, какое количество единичных электрических зарядов необходимо для удаления с поверхности образца одного иона (атома) кремния. На рис. 8 представлена зависимость эффективной валентности от плотности тока. Значения эффективной валентности постоянны для каждого значения плотности тока и увеличиваются с увеличением плотности тока.

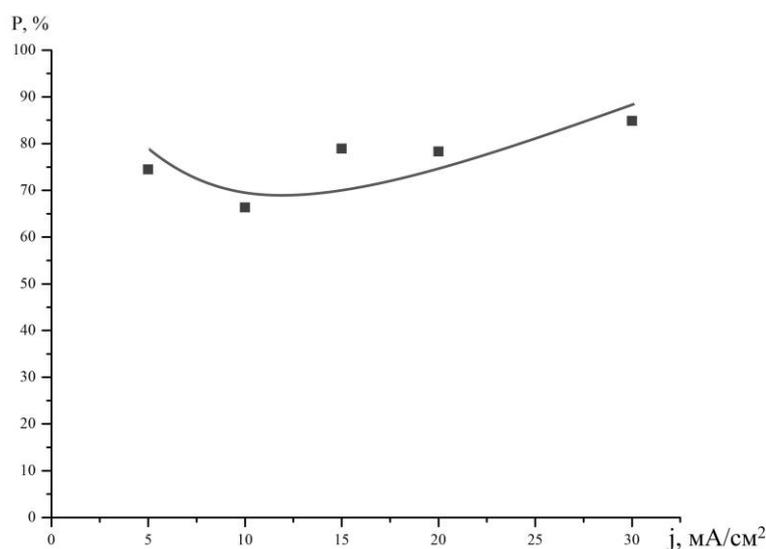


Рис. 7. Зависимость пористости от плотности тока
Fig. 7. The dependence of porosity on current density

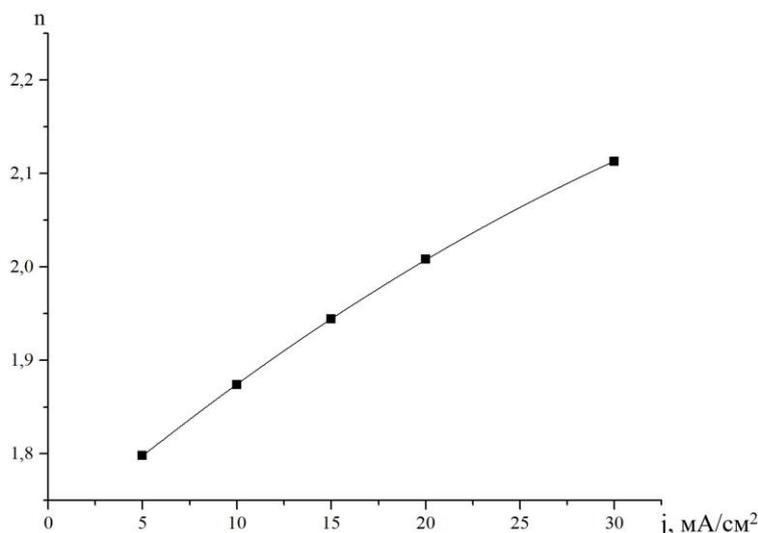


Рис. 8. Зависимость эффективной валентности от плотности тока
Fig. 8. The dependence of the effective valency on the current density

Закключение

В ходе работы на сильнолегированных кремниевых пластинах дырочного типа проводимости были получены слои пористого кремния методом электрохимического анодирования при плотностях тока от 5 до 30 мА/см². Исследованы кинетические зависимости толщины и пористости пористого кремния и зависимости структурных параметров от времени анодирования и плотности анодного тока. Была получена математическая модель,

описывающая зависимость толщины слоя пористого кремния от времени анодирования и плотности анодного тока. Полученная математическая модель кинетики роста пористого кремния позволяет спрогнозировать толщину слоев пористого кремния при заданных параметрах. Данная математическая модель может применяться для определенных параметров, используемых в рамках данного эксперимента. Для получения моделей, описывающих рост пористого кремния при других параметрах, необходимо провести дополнительные исследования.

Список литературы

1. Uhlir A. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon // Bell System Technical Journal. 1956. doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x
2. Меликджанян Г.А., Мартиросян Х.С. Анализ характеристик пленок пористого кремния, полученного на монокристаллическом кремнии *p*-типа // Изв. НАН Армении, сер. Физика. 2012. Т. 47, № 3. С. 201–206.
3. Формирование и структура мезопористого кремния / Н.И. Каргин [и др.] // Материалы электронной техники. 2013. № 4. С. 4–6.
4. Бондаренко В.П. Исследование процесса формирования пористого кремния и разработка на его основе межкомпонентной изоляции полупроводниковых интегральных микросхем: дисс. ... канд. техн. наук. Минск, 1980.

References

1. Uhlir A. Electrolytic Shaping of Germanium and Silicon // Bell System Technical Journal. 1956. doi.org/10.1002/j.1538-7305.1956.tb02385.x
2. Melikdzhanjan G.A., Martirosjan H.S. Analiz harakteristik plenok poristogo kremnija, poluchennogo na monokristallicheskom kremnii *p*-tipa // Izv. NAN Armenii, ser. Fizika. 2012. T. 47, № 3. S. 201–206. (in Russ.)
3. Formirovanie i struktura mezoporistogo kremnija / N.I. Kargin [i dr.] // Materialy jelektronnoj tehniky. 2013. № 4. S. 4–6. (in Russ.)
4. Bondarenko V.P. Issledovanie processa formirovanija poristogo kremnija i razrabotka na ego osnove mezhkomponentnoj izoljicii poluprovodnikovyh integral'nyh mikroshem: diss. ... kand. tehn. nauk. Minsk, 1980. (in Russ.)

Сведения об авторах

Гурбо А.Д., студентка кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Клименко А.В., студент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бондаренко В.П., к.т.н., доцент, заведующий НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Hurbo A.D., student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Klimenka A.V., student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bondarenko V.P., PhD, associate professor, head of SRL 4.3 R&D Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375299012800;
e-mail: alexandragurbo@gmail.com
Гурбо Александра Дмитриевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375299012800;
e-mail: alexandragurbo@gmail.com
Hurbo Aliaksandra Dzmitryeuna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-38-43>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.932.2

МЕТОДИКА СУБПИКСЕЛЬНОЙ ОБРАБОТКИ ПОЛОЖЕНИЯ КРАЯ ПОВЫШЕННОГО РАЗРЕШЕНИЯ ПРИ РЕГИСТРАЦИИ ЭЛЕМЕНТОВ ФОТОШАБЛОНА НА ПРОСВЕТ

ЛАПКО А.В.¹, ДЕДКОВ А.И.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь
²ОАО «КБТЭМ-ОМО», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 19 сентября 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Предложена методика субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации объекта на просвет. Осуществлено имитационное моделирование результатов субпиксельной регистрации на примере идеальной системы регистрации. Установлены ограничения работы системы в условиях высокой и низкой освещенности, сформулированы условия стабильной работы системы. Исследовано поведение системы при регистрации полупрозрачных объектов, осуществлена оценка значения среднеквадратичного отклонения σ_{sub} для результатов моделирования работы идеальной системы регистрации на 8-битовой ПЗС-линейке. Проведены оценочные расчеты среднеквадратичного отклонения σ_{sub} для 12-битовой ПЗС-линейки.

Ключевые слова: субпиксельная обработка, положение края, пиксель, интенсивность света.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лапко А.В., Дедков А.И. Методика субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации объекта на просвет. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 38-43.

METHOD OF SUBPIXEL PROCESSING OF HIGH RESOLUTION EDGE DURING CLEARANCE PHOTOSHOP REGISTRATION

LAPKO A.V.¹, DEDKOV A.I.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus
²OJSC KBTEM-OMO, Republic of Belarus

Submitted 19 September 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The technique of subpixel processing of the position of the edge with increased resolution when the object is registered for lumen is proposed. Simulation modeling of the results of subpixel registration is carried out on the example of an ideal registration system. The limitations of the system operation in high

and low light conditions are established, the conditions of stable operation of the system are formulated. The behavior of the system in the registration of translucent objects is studied, the value of the standard deviation σ_{sub} is estimated for the results of modeling the ideal registration system on the 8-bit CCD-line. The estimated calculations of the standard deviation σ_{sub} for the 12-bit CCD-line are carried out.

Keywords: subpixel processing, periphery location, pixel, luminous intensity.

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

For citation. Lapko A.V., Dedkov A.I. Method of subpixel processing of high resolution edge during clearance object registration. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 38-43.

Введение

Получение цифрового изображения высокого разрешения – актуальная задача для многих сфер применения компьютерного зрения. При этом наименьшая физическая величина цифрового изображения – пиксель. Однако не всегда край изображения попадает на край пикселя. В таких случаях необходимо применение алгоритмов субпиксельной регистрации, повышающих разрешающую способность используемых приборов. Существующие алгоритмы повышения разрешающей способности регистрирующих приборов и увеличивающие четкость изображения [1–6] имеют целью корректировку отраженного от объекта изображения. Ведутся исследования по субпиксельной обработке изображений для ПЗС (прибор с зарядовой связью) матриц с нетрадиционной формой и взаимным расположением пикселей [7], а также по применению нейронных сетей для субпиксельной обработки изображений [8]. Авторы [9] рассматривают способы расчета погрешностей при субпиксельной регистрации.

Целью настоящего исследования явилась разработка методики субпиксельной обработки положения края повышенного разрешения при регистрации элементов фотошаблона на просвет и имитационное моделирование для оценки результата этой обработки.

Методика эксперимента

Методика субпиксельной обработки разрабатывалась для случая регистрации элементов фотошаблона с помощью цифрового приемника: ПЗС-линейки. Рассмотрен вариант регистрации фотошаблона на просвет, то есть регистрации тени фотошаблона. В этом случае схема идеальной системы регистрации фотошаблона изображена на рис. 1.

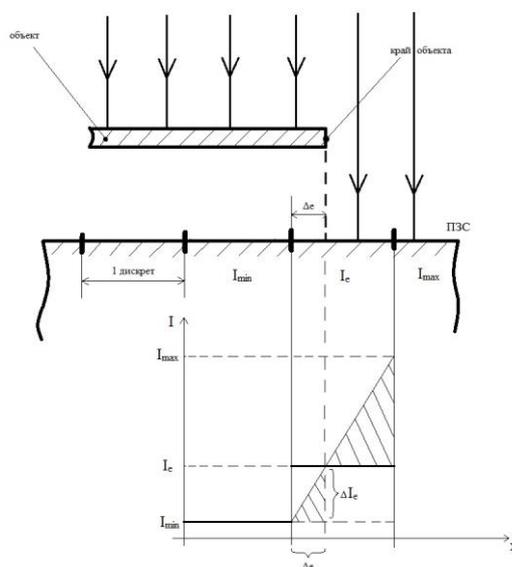


Рис. 1. Идеальная система регистрации объекта
Fig. 1. Ideal registration system

Край элемента фотошаблона перекрывает площадь пиксела ПЗС-линейки частично, причем чем больше перекрытие, тем меньшая интенсивность света I приходит на сам элемент. Зависимость линейная (рис. 1). Таким образом, будут выполняться следующие уравнения:

$$\begin{aligned} \Delta_e &= \frac{1}{I_{\max} - I_{\min}}, \\ \Delta_e &= \frac{I_e - I_{\min}}{I_{\max} - I_{\min}}. \end{aligned} \quad (1)$$

Реальное перекрытие краем пиксела ПЗС-линейки соответственно:

$$\begin{aligned} \Delta_{sub} &= 1 - \Delta_e; \\ \Delta_{sub} &= \frac{I_{\max} - I_e}{I_{\max} - I_{\min}}. \end{aligned} \quad (2)$$

Таким образом, используя уравнение (2), можно вычислить положение края элемента фотошаблона с точностью, превышающей дискрет ПЗС-линейки (или определить процент затененной площади пиксела).

Проверка формул осуществлялась при помощи имитационного моделирования в Matlab. Исследовалась выборка из 500 испытаний с использованием модели равномерного шума с $\sigma_n = 0,25$, т. е. регистрация интенсивности в модели проходила с точностью, равной 1. Отклонения были заданы с использованием функции `random()`. Имитационное моделирование осуществлялось при следующих исходных данных: $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$. Значения интенсивности света I приняты в условных единицах. При этом $I = 0$ – это минимальная интенсивность света или нижний порог чувствительности ПЗС-линейки, а $I = 256$ – верхний порог чувствительности.

Кроме того, путем расчетов были оценены факторы, влияющие на точность вычислений: интенсивность света выше порога чувствительности ПЗС-линейки, интенсивность света ниже порога чувствительности ПЗС-линейки.

Результаты и обсуждение

Результаты имитационного моделирования представлены на рис. 2. Расчетная среднеквадратичная ошибка $\sigma_{sub} = 0,0023$.

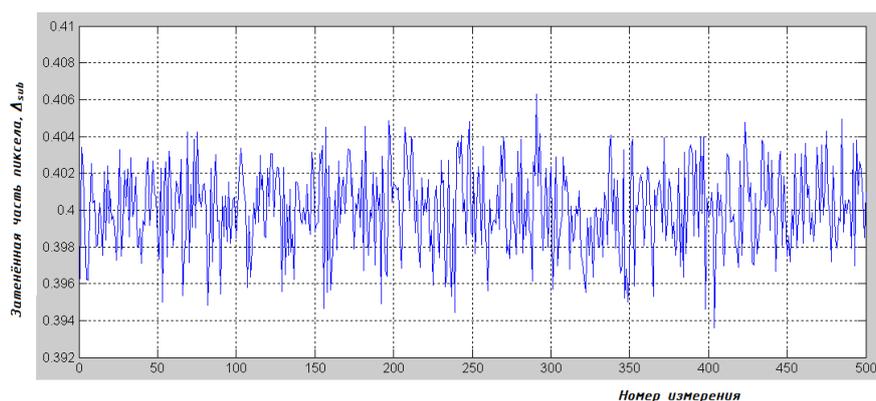


Рис. 2. Результаты имитационного моделирования при $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$
 Fig. 2. The results of simulation modeling at $I_e = 140$; $I_{\min} = 50$; $I_{\max} = 200$

ПЗС-линейка является дискретной квантованной системой регистрации интенсивности оптического излучения. В случае 8-битового АЦП получаем 256 градаций квантования интенсивности. Предположим, что уровень темного – 50 условных единиц, уровень светлого – 200 условных единиц. Нормальная случайная величина принимает

значения, отклоняющиеся от ее математического ожидания не более чем на 3 сигма. Тогда положение края на рассматриваемой системе можно рассчитать с точностью:

$$3\sigma_{sub} = \frac{1}{I_{max} - I_{min}};$$

$$\sigma_{sub} = \frac{1}{3(I_{max} - I_{min})}. \quad (3)$$

Подставляя конкретные значения, получим:

$$3\sigma_{sub} = \frac{1}{200 - 50} = \frac{1}{150} = 0,0067;$$

$$\sigma_{sub} = 0,0022.$$

Таким образом, можно видеть, что результаты имитационного моделирования согласуются с расчетом по формуле (3).

Проанализируем поведение идеальной системы регистрации при работе в условиях избыточной и недостаточной интенсивности света I .

При слишком высоком уровне освещенности 8-битовая ПЗС-линейка все интенсивности выше порога чувствительности будет воспринимать как максимальную интенсивность и выдавать на выход уровень 255. Это приведет к ошибочному расчету положения края. Рассмотрим пример: $I_e = 140$; $I_{min} = 50$; $I_{max} = 270$. Расчет по формуле (2) даст в результате $\Delta_{sub} = 0,59$. Однако в случае, если максимальная интенсивность будет зарегистрирована как уровень 255, то мы получим $\Delta_{sub} = 0,56$, что не соответствует действительности.

С другой стороны, при недостатке освещенности 8-битовая ПЗС-линейка все интенсивности ниже нижнего порога чувствительности будет воспринимать как минимальную интенсивность и выдавать на выход уровень 0. Это тоже приведет к ошибочному расчету положения края. Рассмотрим следующий пример: $I_e = 140$; $I_{min} = -50$; $I_{max} = 200$. Расчет по формуле (2) даст $\Delta_{sub} = 0,24$. Однако в случае, если минимальная интенсивность будет зарегистрирована как уровень 0, то мы получим $\Delta_{sub} = 0,30$, что также не соответствует действительности.

Таким образом, диапазон чувствительности системы для минимизации ошибки пространственного положения D_I должен удовлетворять следующее условие ($D_{MIN_I} < I_{min} - 3\sigma_I$) и ($D_{MAX_I} > I_{max} + 3\sigma_I$), где σ_I – среднеквадратичная ошибка регистрации интенсивности.

Рассмотрим свойства самого фотошаблона. Предположим, что фотошаблон пропускает некоторую часть света. В таком случае диапазон регистрируемых значений интенсивности уменьшается. При этом среднеквадратичная ошибка регистрации интенсивности света остается неизменной, так как это характеристика системы, а не фотошаблона (в нашем случае 1). На рис. 3 представлены результаты имитационного моделирования при разных степенях пропускания фотошаблона: динамический диапазон $I_{max} - I_{min}$ принимает значения от 40 до 240 условных единиц с шагом 40, а расчетное значение среднеквадратичного отклонения σ_{sub} при этом снижается от 0,0092 до 0,0014. Зависимость носит гиперболический характер.

На рис. 4 представлены результаты расчета при разных степенях пропускания фотошаблона: динамический диапазон $I_{max} - I_{min}$, как и в случае имитационного моделирования, принимает значения от 40 до 240 условных единиц с шагом 40, а рассчитанное по формуле (3) значение среднеквадратичного отклонения σ_{sub} при этом снижается от $5,21 \cdot 10^{-4}$ до $0,87 \cdot 10^{-4}$. Зависимость носит гиперболический характер. Отметим, что значение среднеквадратичного отклонения уменьшилось на порядок при переходе к ПЗС-линейке в 12 разрядов.

Результаты расчетов говорят о том, что при регистрации на просвет слабоконтрастных фотошаблонов для снижения значения ошибки определения уровня освещенности целесообразнее применять ПЗС с большим количеством (12–16 и более) разрядов АЦП.

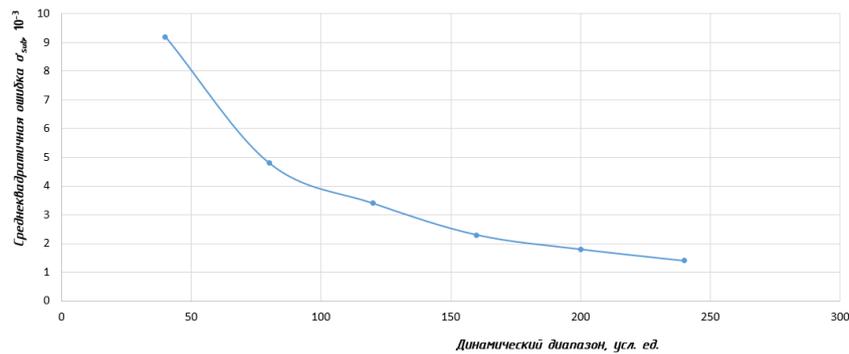


Рис. 3. Зависимость среднеквадратичной ошибки от динамического диапазона по результатам имитационного моделирования для 8-битовой ПЗС-линейки
Fig. 3. The dependence of the mean square error on the dynamic range according to the results of simulation for an 8-bit CCD-line

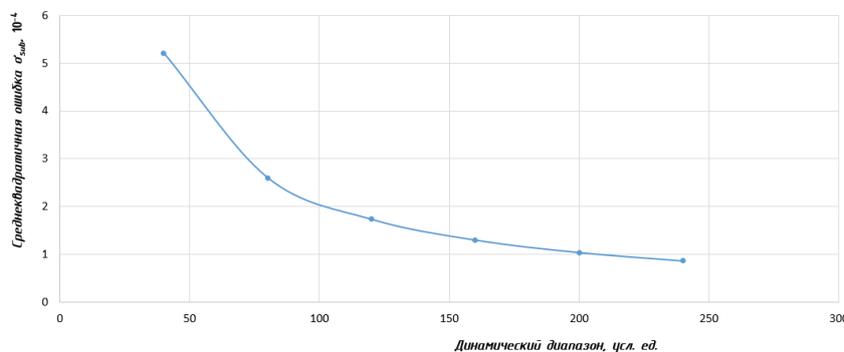


Рис. 4. Зависимость среднеквадратичной ошибки от динамического диапазона по результатам расчетов для 12-битовой ПЗС-линейки
Fig. 4. The dependence of the standard error on the dynamic range according to the results of calculations for a 12-bit CCD-line

Заключение

Сформулированы требования к уровню интенсивности света для обеспечения точности при субпиксельной регистрации элементов фотошаблона в идеальных условиях. Уровень интенсивности света I и диапазон чувствительности D_I системы регистрации должны удовлетворять следующее условие ($D_{MIN_I} < I_{\min} - 3\sigma_I$) и ($D_{MAX_I} > I_{\max} + 3\sigma_I$).

Показано, что при изменении динамического диапазона регистрации от 40 до 240 условных единиц и постоянной ошибке регистрации среднеквадратичная ошибка субпиксельных измерений изменяется от 0,0092 до 0,0014 по закону гиперболы. Следовательно, для слабоконтрастных фотошаблонов целесообразнее применять ПЗС с большим количеством (12 или 16) разрядов АЦП.

Список литературы / References

1. Lin Z., Shum H.Y. Fundamental limits of reconstruction-based superresolution algorithms under local translation // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2004. № 26 (1). P. 83–97.
2. Farsiu S., Elad M., Milanfar P. Multiframe demosaicing and super-resolution of color images // IEEE Transactions on Image Processing. 2006. № 15 (1). P. 141–159.
3. Evangelidis G.D., Psarakis E.Z. Parametric image alignment using enhanced correlation coefficient maximization // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2008. № 30 (10). P. 1858–1865.
4. Baker S., Kanade T. Limits on super-resolution and how to break them // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2002. № 24 (9). P. 1167–1183.

5. Ben-Ezra M., Zomet A., Nayar S.K. Video super-resolution using controlled subpixel detector shifts // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2005. № 27(6). P. 977–987.
6. Ben-Ezra M., Lin Z., Wilburn B., Zhang W. Penrose pixels for super-resolution // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2001. № 33(7). P. 1370–1383.
7. Sub-Pixel Layout for Super-Resolution with Images in the Octic Group / Boxin Shi [et al.] // ECCV. 2014. № 1. P. 250–264.
8. Real-Time Single Image and Video Super-Resolution Using an Efficient Sub-Pixel Convolutional Neural Network / Wenzhe Shi [et al.] // 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR). 2017. P. 105–114.
9. Haralick R.M., Shapiro L.G. Computer and Robot Vision. Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc. Boston, MA, USA, 1992.

Сведения об авторах

Дедков А.И., начальник сектора программного обеспечения оптико-механического и контрольно-измерительного оборудования ОАО «КБТЭМ-ОМО».

Лапко А.В., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
+375 29 376 25 19;
e-mail: alexander.lapko@tut.by
Лапко Александр Владимирович

Information about the authors

Dedkov A.I., head of optical-mechanical and inspection equipment software section of OJSC «KBTEM-OMO».

Lapko A.V., PG student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375 29 376 25 19;
e-mail: alexander.lapko@tut.by
Lapko Aleksandr Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-44-49>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.452

ВЕБ-ПРИЛОЖЕНИЕ ДЛЯ ОБРАБОТКИ ИЗОБРАЖЕНИЙ БОЛЬШОГО ОБЪЕМА

ВИНИЧУК О.Н.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 13 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Разработано веб-приложение, которое позволяет обрабатывать изображения большого объема, затрагивая минимальные временные характеристики. Представлены блок-схемы реализации логики разработанного приложения.

Ключевые слова: обработка изображений, фоторедактор, библиотека EaselJS.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Виничук О.Н. Веб-приложение для обработки изображений большого объема. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 44-49.

WEB APPLICATION FOR PROCESSING IMAGES OF LARGE SIZE

VINICHUK O.N.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 13 December 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. It was developed the web application allowing to process large-volume images, affecting the minimum temporal characteristics. The flowcharts for implementing of the application logic are presented.

Keywords: image processing, photo editor, EaselJS library.

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

For citation. Vinichuk O.N. Web application for processing images of large size. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 44-49.

Введение

На сегодняшний день достаточно проблематично выбрать фоторедактор, который позволял бы качественно обрабатывать изображения большого объема. Существуют различные способы установок от десктоп-версий до онлайн версий. Каждые по-своему удобные и одновременно нет. Обработка изображений хорошего качества может затрагивать как временные характеристики, так и память компьютера. Поэтому при разработке данного веб-приложения в первую очередь ставилась задача ускорения процесса обработки изображений хорошего качества, а именно изображений большого объема.

Были выбраны следующие основные технологии, которые использовались при написании веб-редактора: HTML5, CSS3, JavaScript, JQuery, EaselJS.

HTML5, CSS3, JavaScript и библиотека JQuery – базовый набор «инструментов» при создании любого веб-приложения.

Технология HTML5

Технология HTML состоит в обработке управляющих символов, в результате чего получается веб-страница. Язык HTML до 5-й версии определялся как приложение SGML (стандартного общедоступного языка разметки по стандарту ISO 8879). Спецификация HTML5 формулируется в терминах DOM (объектной модели документа) [1].

Язык HTML5 имеет широкую сферу применения и обладает новыми возможностями. Во-первых, упрощенная структура веб-документа, которая реализована посредством появления семантических блоков контента. Во-вторых, новые возможности позволяют сделать код HTML-документа на порядок чище, чем ранее. Ввод данных в HTML5 становится более упрощенным, чем в предыдущих версиях. Посредством HTML5 информацию можно проверить еще до ее опубликования. В более ранних версиях HTML валидацию форм необходимо было реализовывать либо посредством языка программирования JavaScript, либо посредством языка программирования PHP. Функция Canvas, которая также впервые появилась в HTML5, позволяет создавать пользовательские интерфейсы абсолютно на новом уровне.

Еще одним из нововведений HTML5 является возможность размещения анимации непосредственно внутри самого браузера. Предыдущая версия языка для этого требовала установки различных дополнительных программ.

Спецификация CSS3

Стилистическое оформление веб-редактора реализовывалось посредством каскадных таблиц стилей (CSS). Стили являются удобным, практичным и эффективным инструментом при верстке веб-страниц и оформления текста, ссылок, изображений и других элементов. С помощью стилей можно определить вид веб-страницы для разных устройств вывода: монитора, принтера, смартфона, планшета и др. На сегодняшний день актуальной версией CSS является версия CSS3, которая максимально расширена по сравнению с предыдущими версиями. CSS3 включают эффекты теней, а также скругленные углы у блоков. В CSS3 появилась возможность устанавливать изображения в качестве фона и использовать их как границы.

Язык программирования JavaScript

Все действия пользователя, связанные, например, с нажатием или перетаскиванием элемента реализованы посредством скриптового языка программирования JavaScript и библиотеки JQuery. Одно из ключевых преимуществ JavaScript – это поддержка практически всеми известными и самыми популярными браузерами [1]. С помощью данного скриптового языка доступны к исполнению следующие функции:

- возможность изменения страницы браузеров;

- добавление или удаление тегов;
- изменение стилей страницы;
- размещение информации о действиях пользователя на странице;
- запрос доступа к случайной части исходного кода страницы;
- внесение изменений в код;
- выполнение действия с cookie-файлами.

То есть можно сказать, что основная идея языка JavaScript – создание динамической веб-страницы. JavaScript объединяет объектно-ориентированный и функциональный подходы, что обусловлено высочайшей гибкостью данного языка.

При помощи языка JavaScript веб-страницы становятся более живыми и удобными для пользователей. Но реализовывать все эти эффекты вручную на JavaScript достаточно сложно и требует больших временных затрат. В настоящее время существует множество библиотек, которые позволяют одной строкой кода реализовать такие возможности, на описание которых JavaScript понадобились бы десятки строк. Самой распространенной и удобной среди них является библиотека JQuery, которая представляет собой кроссплатформенную библиотеку, созданную для взаимодействия JavaScript и HTML. При помощи библиотеки JQuery написание кода занимает намного меньше времени, что упрощает реализацию кода и делает его более читабельным. Библиотека JQuery призвана упростить использование JavaScript настолько, насколько это возможно, а также сделать программирование на нем более легким и доступным.

Язык HTML5 делает акцент на упрощении разметки, необходимой для создания соответствующих W3C-стандартам страниц и объединения всего требуемого CSS и JavaScript-кода [2].

Веб-приложение для обработки изображений

Основной функционал, который отвечает за обработку изображений, хранится в библиотеке EaselJS. Библиотека EaselJS была выбрана не случайно, она облегчает работу с элементом Canvas – элементом HTML5, предназначенным для создания растрового двухмерного изображения при помощи JavaScript. Данная библиотека состоит из полного иерархического дисплейного списка, а именно набора векторов, используемых для построения изображения на экране, базовой модели взаимодействия и вспомогательных классов для значительного облегчения работы с Canvas. Работать с библиотекой EaselJS достаточно просто: необходимо определить элемент Canvas в HTML и сослаться на него в JavaScript. EaselJS использует концепцию Stage, которая является Container высшего уровня для дисплейного списка (сценой будет элемент Canvas). На рис. 1 представлена блок-схема, которая поможет подключить и настроить библиотеку EaselJS.

У библиотеки EaselJS имеется класс Graphics, который предоставляет легкий в использовании API (программный интерфейс приложения) для создания инструкций векторного рисунка и прорисовывания их на указанный контекст. Команды очень похожи на те, что используются в обычном Canvas HTML5. Вместе с тем в EaselJS имеются и некоторые собственные команды для работы с Canvas.

В приложении реализованы функции по обработке изображений – фильтры, реализованные посредством класса Filter. Класс Filter – это базовый класс, от которого наследуются свойства всех остальных фильтров. Фильтры применяются к объектам, которые были помещены в кэш компьютера при помощи метода кэширования – cache. Если объект изменяется, необходимо будет поместить данный объект в кэш снова или использовать updateCache(). Необходимо отметить, что фильтры должны быть применены перед помещением изображения в кэш. EaselJS предоставляет ряд предварительно созданных фильтров. Вышеописанный процесс представлен на рис. 2.

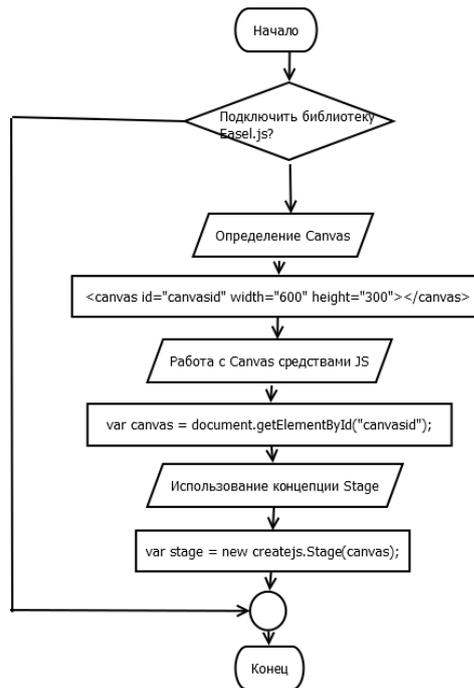


Рис. 1. Подключение библиотеки EaselJS.js
Fig. 1. Connecting the EaselJS.js library

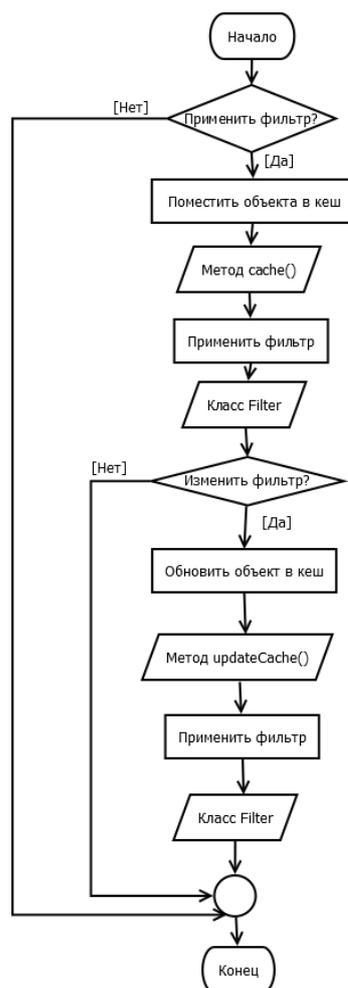


Рис. 2. Процесс применения фильтра к изображению
Fig. 2. The process of applying a filter to an image

Интерфейс веб-приложения состоит из меню и рабочей области (рис. 3). Справа, при добавлении изображений, отображаются слои (рис. 4). Если на страницу добавлено сразу несколько слоев, для удобства работы реализованы функции:

- переименовать слой;
- скрыть/показать слой;
- удалить слой.

С помощью веб-приложения можно легко настроить цвет, размер, яркость изображения. В меню представлены следующие функции трансформирования и обработки изображения:

- Scale – изменение размера слоя/изображения;
- Rotate – поворот слоя/изображения на 2D-плоскости;
- Skew – искажение слоя/изображения;
- Flip vertically – отражение слоя/изображения по вертикали;
- Flip horizontally – отражение слоя/изображения по горизонтали;
- Brightness – изменение яркости изображения;
- Colorify – окрашивание изображения;
- Blur – размытие изображения;
- Gaussian Blur – Гауссовское размытие;
- Emboss – тиснение;
- Sharpen – резкость.

В разработанном веб-приложении встроены самые необходимые функции и методы.



Рис. 3. Интерфейс веб-приложения
Fig. 3. Web application interface

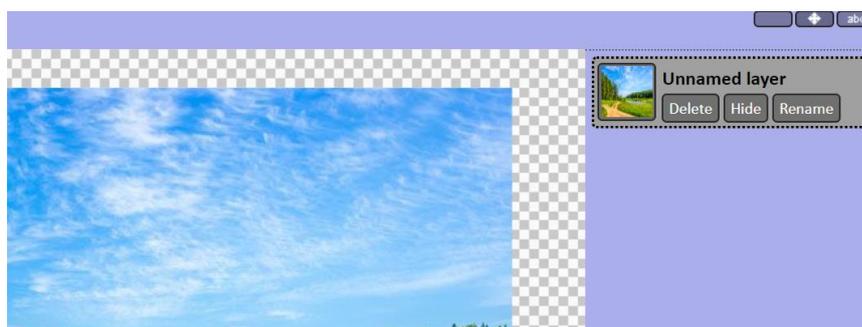


Рис. 4. Отображение слоев
Fig. 4. Layers display

Заключение

Разработано оригинальное веб-приложение для редактирования изображений, которое по своим функциональным возможностям сравнимо с Adobe Photoshop и которому по сравнению с аналогами требуется меньше ресурсов. Уменьшение ресурсной

базы происходит из-за того, что в представленной разработке встроены наиболее часто встречающиеся функции и методы обработки изображений, такие как изменение размера, поворот, искажение, отражение, изменение яркости, размытие, тиснение.

Список литературы

1. Флэнаган Д. JavaScript. Подробное руководство. СПб: Символ-Плюс, 2008. 992 с.
2. Прохоренок Н.А. HTML, JavaScript, PHP и MySQL. Джентльменский набор Web-мастера. СПб.: БХВ-Петербург, 2010. 912 с.

References

1. Flanagan D. JavaScript. Podrobnoe rukovodstvo. SPb: Simvol-Pljus, 2008. 992 s. (in Russ.)
2. Prohorenok, N. A. HTML, JavaScript, PHP i MySQL. Dzhentl'menskij nabor Web-mastera. SPb.: BHV-Peterburg, 2010. 912 s. (in Russ.)

Сведения об авторах

Виничук О.Н., аспирант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Vinichuk O.N., PG student of the information radiotechnologies department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный
университет информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-341-04-17;
e-mail: memory1703@gmail.com
Виничук Ольга Николаевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-341-04-17;
e-mail: memory1703@gmail.com
Vinichuk Olga Nikolaevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-50-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.3

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

ГУСИНСКИЙ А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 14 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Приведена структура построения измерительного комплекса поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Рассмотрена возможность коррекции одной из доминирующих составляющих погрешности измерения мощности – погрешности рассогласования при использовании векторного анализатора цепей.

Ключевые слова: измеритель мощности, миллиметровый диапазон длин волн, калибровка, погрешность рассогласования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гусинский А.В. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 50-54.

MEASURING COMPLEX OF TESTING AND CALIBRATION OF POWER METERS IN THE MILLIMETER RANGE OF WAVES LENGTH

GUSINSKY A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 14 December 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The structure of the construction of the calibration measuring complex and calibration of the power meters in the millimeter wavelength range is given. The possibility of correcting one of the dominant components of the power measurement error, the mismatch error when using a vector network analyzer, is considered.

Keywords: power meter, millimeter wavelength range, calibration, error of mismatch.

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

For citation. Gusinsky A.V. Measuring complex of testing and calibration of power meters in the millimeter range of waves length. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 50-54.

Конструктивно приборы для измерения СВЧ мощности – СВЧ ваттметры – выполняются в виде двух отдельных узлов: приемного преобразователя (или комплекта таких преобразователей) и измерительного блока [1]. К наиболее эффективным методам измерения мощности, которые можно использовать в миллиметровом диапазоне длин волн (МДДВ), относятся методы с использованием диодных, термоэлектрических и калориметрических преобразователей, при этом калориметрические преобразователи характеризуются следующими достоинствами: большим динамическим и широким частотным диапазонами, а также возможностью обеспечения высокой точности измерения мощности – до $\pm (0,51,0) \%$ без учета погрешности из-за рассогласования [2–4].

К характеристикам, определяющим качество приемных преобразователей (ПП), относят коэффициент преобразования $K_{\text{п}}$ и коэффициент эффективности $K_{\text{э}}$. На практике наиболее употребим коэффициент эффективности $K_{\text{э}}$, который является безразмерной величиной, в основном, зависит от частоты и определяется из отношения

$$K_{\text{э}} = P_{\text{зам}} / P_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{зам}}$ – замещающая мощность на постоянном токе или переменном токе на низкой частоте;
 $P_{\text{и}}$ – мощность на входе ПП.

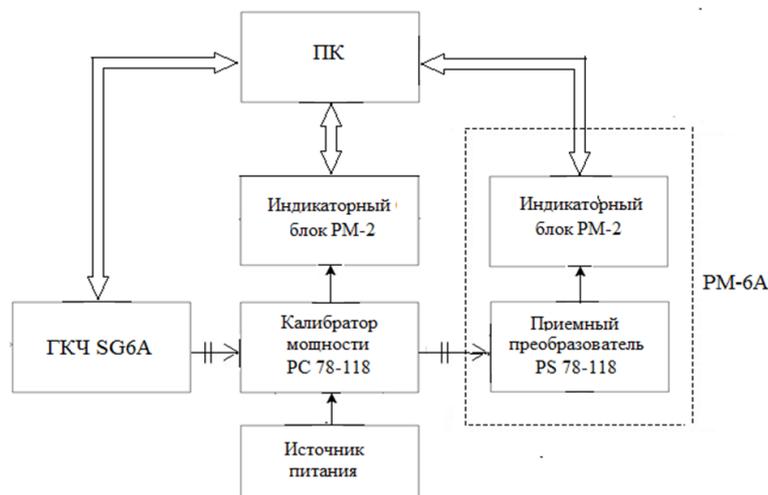
Тогда измеряемую мощность определяют как

$$P_{\text{и}} = P_{\text{зам}} / K_{\text{э}} = P_{\text{в}} / K_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{в}}$ – показание ваттметра СВЧ.

В МДДВ для калориметрических преобразователей проявляется сильная зависимость значений коэффициента эффективности от частоты.

Автором был разработан измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в МДДВ. В качестве примера приведена структура построения измерительного комплекса для поддиапазона частот 78,33–118,1 ГГц (рисунок) в случае калибровки измерителя мощности РМ-6А [5].



Структура построения измерительного комплекса для калибровки измерителя мощности РМ-6А
Structure of the construction of the measuring complex for calibration of the power meter RM-6A

Калибратор мощности РС78-118, с одной стороны, соединен с индикаторным блоком РМ-2, а с другой – с ПП PS78-118. Калибратор обеспечивает:

– измерение мощности на волновом выходе с отображением результата: в Вт, мВт, мкВт; в децибелах относительно уровня мощности 1 мВт (дБм); в децибелах относительно заданного уровня мощности (дБ);

- ручное, автоматическое или дистанционное управление работой калибратора;
- автоматическое переключение пределов измерения;
- возможность предварительной записи в память калибратора его калибровочных коэффициентов с целью использования их в процессе измерения для автоматической коррекции результатов измерения;
- расчет и отображение статистической информации по проведенным измерениям;
- обмен информацией с внешними устройствами через интерфейсы;
- возможность установки опорного уровня мощности при отображении результатов измерения в дБ;
- компенсацию смещения нуля в автоматическом или ручном режимах.

Принцип действия калибратора основан на разделении входного СВЧ сигнала на два сигнала, один из которых подается на вход калибруемого измерителя мощности. Второй сигнал, получающийся путем ответвления с помощью направленного ответвителя части мощности входного СВЧ сигнала, преобразуется в напряжение, пропорциональное мощности входного СВЧ сигнала, которое измеряется при использовании второго индикаторного блока РМ-2.

Частотная характеристика калибратора, зависящая от параметров направленного ответвителя, снимается предварительно при использовании векторного анализатора цепей и заносится во внутреннюю энергонезависимую память.

Благодаря подключению к персональному компьютеру с помощью интерфейсов измерительных блоков РМ-2 удается полностью автоматизировать процесс проведения калибровки.

Программное обеспечение комплекса позволяет:

- указывать частотные точки в пределах рабочего диапазона частот калибруемого измерителя мощности, в которых необходимо определить калибровочные коэффициенты;
- устанавливать на генераторе качающейся частоты необходимые частоты и снимать показания мощности на выходах первого и второго индикаторных блоков;
- вычислять коэффициент эффективности калибруемого измерителя мощности.

Одной из доминирующих составляющих погрешности при измерении мощности в СВЧ диапазоне является погрешность из-за отличия волновых сопротивлений измерительного тракта (ИТ) и ПП (погрешность рассогласования). В общем случае с учетом комплексных коэффициентов отражения ПП $\Gamma_{пп}$ и ИТ со стороны генератора $\Gamma_{ит}$ связь между действительным P и измеренным P_i следующая [6]:

$$P = P_i \frac{|1 - \Gamma_{пп} \Gamma_{ит}|^2}{(1 - |\Gamma_{пп}|^2)}. \quad (3)$$

Тогда относительная систематическая погрешность из-за рассогласования может быть оценена по формуле

$$\delta_{sp} = -\frac{P_i - P}{P} = \frac{(1 - |\Gamma_{пп}|^2)}{|1 - \Gamma_{пп} \Gamma_{ит}|^2} - 1. \quad (4)$$

В формуле (4) можно выделить две составляющие погрешности. Запишем их с учетом того, что можно пренебречь погрешностями 2-го порядка малости:

$$\delta_{sp} \approx -|\Gamma_{пп}|^2 + 2|\Gamma_{пп}| |\Gamma_{ит}| \cos \alpha, \quad (5)$$

где α – фазовый сдвиг между комплексными величинами $\Gamma_{пп}$ и $\Gamma_{ит}$.

С учетом возможных значений модулей коэффициентов отражений ПП и ИТ в МДДВ (эти значения соответствуют $K_{сти} = (1,2-1,5)$), систематическая погрешность из-за рассогласования в МДДВ может составлять от ± 3 до ± 12 %.

Для уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования можно использовать либо определение скалярной величины $|\Gamma_{пп}|$ с помощью скалярного анализатора

цепей (САЦ), либо определение векторных величин $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) и применение соответствующих поправочных множителей.

В общем случае

$$P = P_{\text{и}} \mu, \quad (6)$$

где μ – поправочный множитель.

В случае использования САЦ поправочный множитель μ_1 , используемый для уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования, имеет вид

$$\mu_1 = \frac{1}{(1 - |\Gamma_{\text{пп}}|^2)}. \quad (7)$$

Тогда предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности из-за рассогласования составляет значения от 2 до 8 % (погрешностью из-за использования САЦ для коррекции как погрешностью второго порядка малости можно пренебречь), т. е. погрешность рассогласования уменьшается вдвое.

Для случая использования ВАЦ поправочный множитель μ_2 имеет вид

$$\mu_2 = \frac{|1 - \Gamma_{\text{пп}} \cdot \Gamma_{\text{ит}}|^2}{(1 - |\Gamma_{\text{пп}}|^2)}. \quad (8)$$

Обозначив через $\Gamma_{\text{ппс}}$, $\Gamma_{\text{ппс}}$ и $\Gamma_{\text{итс}}$, $\Gamma_{\text{итс}}$ измеренные с помощью ВАЦ действительные и мнимые составляющие комплексных величин $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$, получаем

$$\mu_2 = \frac{(1 - \Gamma_{\text{ппс}} \cdot \Gamma_{\text{итс}} + \Gamma_{\text{ппс}} \Gamma_{\text{итс}})^2 + (\Gamma_{\text{ппс}} \cdot \Gamma_{\text{итс}} + \Gamma_{\text{ппс}} \Gamma_{\text{итс}})^2}{1 - \Gamma_{\text{ппс}}^2 - \Gamma_{\text{итс}}^2}. \quad (9)$$

При использовании поправочного множителя μ_2 предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности из-за рассогласования можно оценить, исходя из точности определения комплексных значений $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ (предельные значения погрешностей можно принять не более $\pm 5,0$ %). Тогда предельные значения погрешностей из-за рассогласования составляют не более от $\pm 0,15$ до $\pm 0,6$ %.

Таким образом, применение ВАЦ и учет комплексных параметров $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ в поправочном множителе μ_2 позволяет снизить погрешность рассогласования более чем на порядок и сделать ее соизмеримой со всеми другими составляющими погрешностями при измерении мощности в МДДВ.

Разработан измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в МДДВ с использованием калориметрических преобразователей с сухой нагрузкой и автокомпенсационным транзисторным преобразователем, которые вместе с направленным ответвителем образуют калибраторы мощности для различных поддиапазонов частот. Повышение точности при воспроизведении единицы мощности в комплексе и ее измерении можно добиться при коррекции с помощью поправочных коэффициентов доминирующей составляющей погрешности, обусловленной рассогласованиями в измерительном СВЧ тракте. Оценка этой составляющей погрешности, когда коррекция не производится, показывает, что ее значение может достигать от ± 3 до ± 12 %. Использование скалярных анализаторов цепей и соответствующего поправочного множителя позволяет уменьшить эту составляющую погрешности до уровня от ± 2 до ± 8 %, а применение ВАЦ и соответствующего поправочного множителя – уменьшить уровень до долей процента.

Список литературы

1. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. М.: Радио и связь. 1986. 168 с.
2. Clark R. Microcalorimeter as a national microwave standard // Proc. IEEE. Jan. 1986. Vol. 74, № 1. P. 102–104.

3. Akhiezer A., Senko A., Seredniy V. Millimeter wave power standards // IEEE Trans. Instr. Meas. Apr. 1997. Vol. 46, № 2. P. 495–498.
4. Создание эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц на базе белорусских радиоизмерительных приборов / А.В. Гусинский [и др.] // Метрология и приборостроение. 2010. № 3. С. 12–20.
5. Калибратор для поверки ваттметров малой мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц / А.В. Гусинский [и др.] // Тез. докл. XVI Международной крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». 2006. С. 809–810.
6. Juroshek J.A. A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch // Microwave J. 1997. P. 106–118.

References

1. Bil'ko M.I., Tomashevskij A.K. Izmerenie moshhnosti na SVCh. M.: Radio i svjaz'. 1986. 168 s. (in Russ.)
2. Clark R. Microcalorimeter as a national microwave standard // Proc. IEEE. Jan. 1986. Vol. 74, № 1. P. 102–104.
3. Akhiezer A., Senko A., Seredniy V. Millimeter wave power standards // IEEE Trans. Instr. Meas. Apr. 1997. Vol. 46, № 2. P. 495–498.
4. Sozdanie jetalona edinicuy moshhnosti v diapazone chastot 37,5–178,6 GGc na baze belorusskih radioizmeritel'nyh priborov / A.V. Gusinskij [i dr.] // Metrologija i priborostroenie. 2010. № 3. S. 12–20. (in Russ.)
5. Kalibrator dlja poverki vattmetrov maloj moshhnosti v diapazone chastot 37,5–178,6 GGc / A.V. Gusinskij [i dr.] // Tez. dokl. XVI Mezhdunarodnoj krymskoj konferencii «SVCh tehnika i telekommunikacionnye tehnologii». 2006. S. 809–810. (in Russ.)
6. Juroshek J.A. A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch // Microwave J. 1997. P. 106–118.

Сведения об авторах

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, начальник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Gusinsky A.V., PhD, associate professor, head of Center 1.9 of R&D Department of Belarussian 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. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Гусинский Александр Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Gusinsky Alexander Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-55-61>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 628.981

ПРОСТРАНСТВЕННЫЕ И ЦВЕТОВЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИЗЛУЧЕНИЯ СВЕТОДИОДНЫХ ЛАМП

ГУРСКИЙ А.Л.¹, КРЕЙДИЧ А.В.², МАШЕДО Н.В.³, НИКОНЕНКО С.В.²

¹Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

²Институт физики НАН Беларуси, Республика Беларусь

³ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС», Республика Беларусь

Поступила в редакцию 21 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Приведены результаты исследования пространственного распределения силы света и цветовых характеристик светодиодных ламп различной конструкции. Показано, что измерение углового распределения силы света более точно отражает характеристики излучения светодиодных ламп, чем измеренное значение силы света вдоль направления их механической оси. Установлено, что заявленные производителями цветовые характеристики исследованных светодиодных ламп отличаются от норм, установленных действующими техническими нормативными правовыми актами.

Ключевые слова: колориметрия, гониофотометрия, пространственное распределение силы света, светодиодные лампы.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гурский А.Л., Крейдич А.В., Машедо Н.В., Никоненко С.В. Пространственные и цветовые характеристики излучения светодиодных ламп. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 55-61.

SPATIAL AND COLOR CHARACTERISTICS OF LED LAMPS EMISSION

GURSKII A.L.¹, KREIDICH A.V.², MASHEDA M.V.³, NIKONENKO S.V.²

¹Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

²Institute of Physics of NAS of Belarus, Republic of Belarus

³OJSC «Testing and Certification of Household and Industrial Products BELLIS», Republic of Belarus

Submitted 21 December 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The results of investigation of luminous intensity distribution and color quantities of LED lamps of different design are presented. It is demonstrated that measurement of angular luminous intensity distribution is more accurately indicates characteristics of LED lamp emission than measured luminous intensity value alongside its mechanical axis. It is established that color quantities of investigated LED lamps declared by manufacturer are different from values defined by applicable normative documents.

Keywords: colorimetry, goniophotometry, light distribution, LED lamps.

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

For citation. Gurskii A.L., Kreidich A.V., Masheda M.V., Nikonenko S.V. Spatial and color characteristics of LED lamps emission. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 55-61.

Введение

Интенсивное развитие светодиодных технологий обусловило широкое распространение различных светотехнических изделий на основе светоизлучающих диодов (СИД), постепенно вытесняя с рынка не только традиционные лампы накаливания, но и компактные энергосберегающие лампы [1]. В силу этого стали актуальными задачи корректного измерения параметров их излучения и оценки степени его опасности для человека (фотобиологической безопасности). Проблема вызвана тем, что для измерения характеристик СИД и изделий на их основе долгое время применяли фотометрические методы измерений, разработанные в рамках классической фотометрии, когда тела накаливания были основным типом источников излучения. Как следствие, эти методы не учитывают характерных особенностей излучения светодиодов, в частности, их сильные отличия от ламбертовских излучателей. Например, пространственные распределения мощности излучения различных СИД могут иметь значимые отличия, что оказывает влияние на оценку их фотометрических характеристик излучения [2]. СИД-лампы конструктивно являются более сложными изделиями, в которых могут использоваться десятки СИД-чипов. Для обеспечения качества и безопасности в применении СИД-ламп необходимо точно, а главное, корректно измерять их оптические характеристики, что особенно важно при конструировании, производстве и техническом обслуживании светотехнических изделий на основе СИД. Данная работа посвящена исследованию пространственного распределения силы света и цветовых характеристик СИД-ламп различной конструкции.

Экспериментальные образцы СИД-ламп

Для экспериментальных исследований были отобраны серийно выпускаемые СИД-лампы различной конструкции, которые представлены на рынке в Беларуси: № 1 – LED G45 3,5W E14 4800K (H.E.H.I Co., Ltd); № 2 – GLD-MR16-3-230-GU10-6 (General lighting Co., Ltd); № 3 – SGL5E27 (Industrial CO, Ltd,); № 4 – GLD-MR16-2-230-GU5.3-6500 (General lighting Co., Ltd); № 5 – G4-3W-220V (Geniled). Основные характеристики ламп, заявленные изготовителями, приведены в табл. 1. Внешний вид отобранных для исследований ламп представлен на рис. 1.

Таблица 1. Основные характеристики СИД-ламп

Table 1. Main characteristics of LED lamps

№ СИД-ламп	Напряжение питания, В	Потребляемая мощность, Вт	Световой поток, лм	Тип цоколя
1	220	3	210	G4
2	100–240	2	150	GU5.3
3	100–240	3	220	GU10
4	220	3,5	280	E14
5	220–240	5	468	E27

Основные конструктивные особенности ламп следующие: в лампах № 1 – 4 СИД-чипы расположены перпендикулярно механической оси ламп, а в лампе № 5 они расположены вдоль. Рассеиватели ламп № 1 и 3 имеют молочное матовое покрытие. Рассеиватели ламп № 2 и 4 имеют полупрозрачное матовое покрытие. Колба лампы № 5 прозрачная. Лампы так называемого филаментного типа в работе не изучались.



Рис. 1. Внешний вид исследуемых светодиодных ламп различной конструкции
Fig. 1. The appearance of the investigated LED lamps of various designs

Пространственное распределение силы света светодиодных ламп

Измерение пространственного распределения силы света СИД-ламп проводилось на установке «Простор ЛД-СИД» [3]. Установка включает: гониометрическую систему, фотометрический блок, блок системы питания, контроля температуры СИД. Основные метрологические характеристики «Простор ЛД-СИД»: спектральный диапазон измерения мощности излучения от 350 до 1100 нм; диапазон воспроизведения угла поворота от -110° до $+110^\circ$; относительная расширенная неопределенность ($k = 2$) воспроизведения угла поворота 0,08 %; относительная расширенная неопределенность ($k = 2$) воспроизведения расстояния от источника до входной апертуры приемника 0,04 %; диапазон измерения силы света от 0,01 до 60 кд; относительная суммарная стандартная неопределенность измерений пространственного распределения силы света равна 1,04 %.

При подготовке измерений каждую СИД-лампу устанавливали на специальный держатель, который, в свою очередь, закреплялся на гониометре. Исследуемая лампа располагалась в горизонтальной плоскости вдоль оптической оси установки «Простор ЛД-СИД» таким образом, чтобы оптическая ось проходила через центр излучающей поверхности лампы (типы 1–4) либо совпадала с осью симметрии лампы (тип 5). Фотометрическая головка устанавливалась на расстоянии 1,5 м от лампы. Перед измерениями лампы выдерживались в течение 30 мин при номинальных параметрах электропитания для выхода на стационарный температурный и электрический режим. Измерение пространственного распределения излучения СИД-ламп проводилось с шагом 2° и повторялось в каждой точке 10 раз. Число полных циклов измерения для каждой лампы было выбрано равным 5. Затем исследуемая лампа смещалась на 30° в вертикальной плоскости перпендикулярно оптической оси, и измерения повторялись. Питание ламп осуществлялось от обычной сети питания 230 В. Условия проведения измерений соответствовали рекомендациям [4, 5].

Результаты измерений представлены на рис. 2 для ламп № 1, 2, 4, 5. Из рисунка видно, что пространственное распределение силы света имеет неоднородный характер в заданных плоскостях измерений для всех типов СИД-ламп. Для лампы № 1 со сплошным матовым покрытием рассеивателя максимальное относительное отклонение силы света при угле 30° относительно оптической оси составило 9,5 %. Для ламп № 2 и 4 с полупрозрачным матовым покрытием рассеивателя максимальное относительное отклонение силы света при угле относительно оптической оси 30° составило 2,7 и 3,4 % соответственно. Для лампы № 5 наблюдается существенное отклонение индикатрис силы света между собой в заданных плоскостях измерения, при этом максимальное относительное отклонение силы света при угле относительно оптической оси 75° составило 37,7 %.

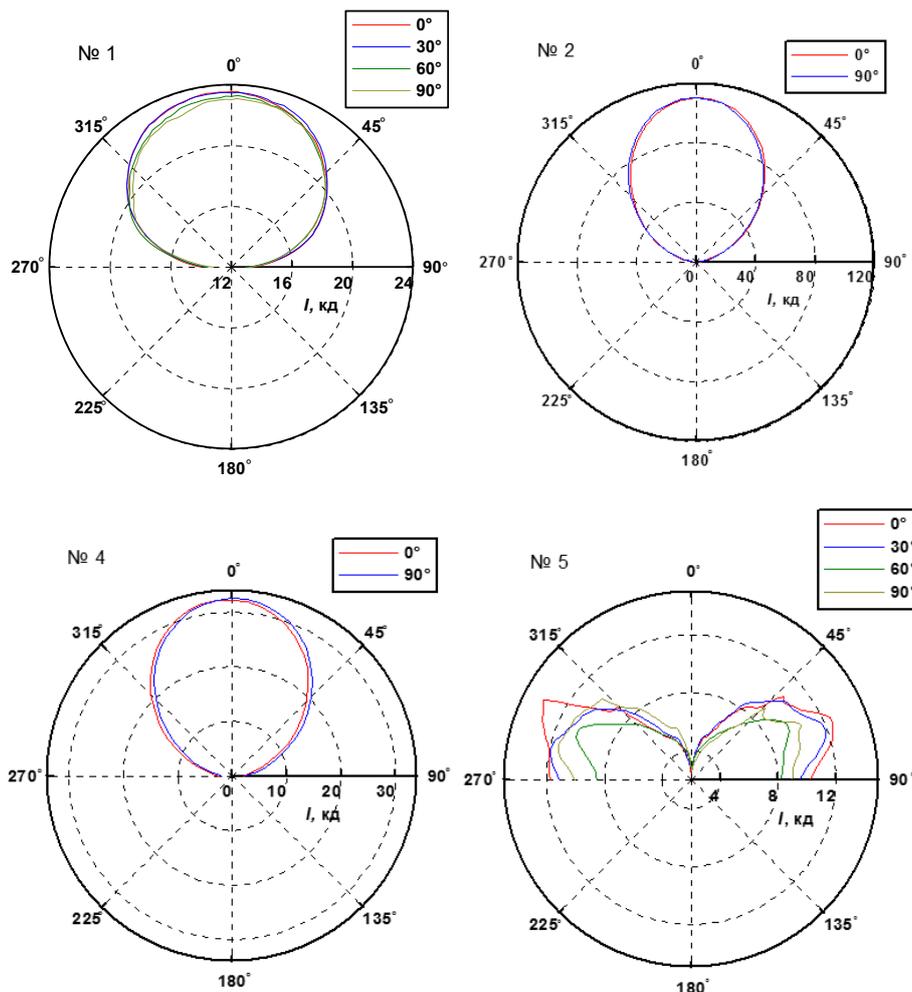


Рис. 2. Пространственные распределения силы света СИД-ламп № 1, 2, 4 и 5 для различных углов между осью фотоприемника и осью симметрии лампы

Fig. 2. Spatial distribution of light intensity of LED lamps No. 1, 2, 4 and 5 for various angles between the axis of the photodetector and the axis of symmetry of the lamp

Полученные результаты позволяют сделать следующие выводы:

– относительно равномерное пространственное распределение излучения ламп № 1 – 4 по сравнению с лампой № 5 обусловлено в первую очередь наличием матового рассеивателя лампы;

– более значимое отклонение силы света, при угле 30° для лампы № 1 по сравнению с лампами № 2 и 4, обусловлено влиянием формы рассеивателя;

– существенные отличия в индикатрисах силы света лампы № 5 обусловлено влиянием пространственной неточностью посадки светодиодных кристаллов и дефектов колбы лампы;

– учет пространственного распределения силы света позволит более точно судить о характеристиках излучения СИД-ламп, чем сила света, измеренная вдоль направления механической оси СИД-ламп, как того требуют некоторые нормативные документы.

– прямая замена ламп накаливания на светодиодные, имеющие конструкцию, сходную с таковой у лампы № 5, в оптических элементах, рассчитанных под лампы накаливания, (например, на транспорте) может дать отрицательный результат. Это особенно важно в системах индикации и сигнализации, применяемых на транспорте, а также в случаях, когда требуется равномерность освещенности, например, рабочего места. К сожалению, в настоящее время отсутствует нормативная база, ограничивающая возможности такой замены.

Цветовые характеристики светодиодных ламп

Измерение цветовых характеристик СИД-ламп проводилось с использованием установки, созданной на базе оборудования производства фирмы Bentham Instruments Ltd., включающей: интегрирующую двойную спектрорадиометрическую систему IDR300, интегрирующую сферу IS1800, источник питания Extech 6720, измеритель мощности Yokogawa WT210, эталонную лампу TSRF–1800–250 W. Все оборудование имело актуальные сертификаты о калибровке. При проведении измерений координат цветности (x , y), коррелированной цветовой температуры (CCT) и индекса цветопередачи (Ra) применялись методы измерений, основанные на использовании интегрирующей сферы, рекомендованные в [6–9]. При подготовке к измерениям, каждый образец СИД-ламп устанавливали на специальный держатель внутри интегрирующей сферы IS1800 и выдерживали в течение 30 мин при номинальных параметрах электропитания. Результаты измерений представлены в табл. 2.

Согласно требованиям [9], для СИД-ламп общего назначения рекомендован ряд следующих значений CCT в Кельвинах с соответствующими координатами цветности: CCT = 6400, $x = 0,313$, $y = 0,337$; CCT = 5000, $x = 0,346$, $y = 0,359$; CCT = 4040, $x = 0,380$, $y = 0,380$; CCT = 3450, $x = 0,409$, $y = 0,394$; CCT = 2940, $x = 0,440$, $y = 0,403$; CCT = 2720, $x = 0,463$, $y = 0,420$. Индекс цветопередачи может иметь отклонение не более $\pm 3\%$ от заявленного изготовителем. Согласно [7], CCT СИД-ламп не должна превышать $\pm 10\%$ от установленного номинала, а Ra не должен иметь значений менее 80 %.

Таблица 2. Результаты измерений цветовых характеристик
Table 2. Color measurement results

Номер СИД-лампы		x	y	CCT, К	Ra, %
3W G4 (№ 5)	Ном. ¹⁾	– ³⁾	– ³⁾	– ³⁾	– ³⁾
	№ 1	0,3503	0,3592	4837	70,8
	№ 2	0,3693	0,3793	4332	67,9
	№ 3	0,3512	0,3568	4784	70,6
3.5W E14 (№ 1)	Ном. ¹⁾	– ³⁾	– ³⁾	4800	> 85
	№ 1	0,3733	0,3645	4112	70,9
	№ 2	0,3697	0,3600	4190	71,6
	№ 3	0,3719	0,3628	4143	71,5
5W E27 (№ 3)	Ном. ¹⁾	– ³⁾	– ³⁾	4300	– ³⁾
	№ 1	0,3663	0,3637	4324	68,7
	№ 2	0,3142	0,3199	6491	70,3
	№ 3	0,3141	0,3203	6495	70,5
3W GU10 (№ 2)	Ном. ¹⁾	0,313 ²⁾	0,337 ²⁾	6500	– ³⁾
	№ 1	0,3151	0,3333	6347	70,6
	№ 2	0,3163	0,3337	6284	70,7
	№ 3	0,3167	0,3348	6258	70,6
2W GU5.3 (№ 4)	Ном. ¹⁾	0,313 ²⁾	0,337 ²⁾	6500	– ³⁾
	№ 1	0,3258	0,3416	5800	71,1
	№ 2	0,3333	0,3539	5468	70,5
	№ 3	0,3302	0,3487	5599	70,6

¹⁾ Номинальное значение, заявленное изготовителем.

²⁾ Данные координаты цветности соответствуют CCT = 6500 К в соответствии с Приложением D стандарта IEC 60081 [6], для других значений CCT в силу их нестандартных величин таких значений нет, и нет возможности их оценить.

³⁾ Данные параметры не заявлены изготовителем.

Из данных табл. 2 видно, что цветовые характеристики исследованных СИД-ламп не удовлетворяют рекомендациям действующих технических нормативных правовых актов (ТНПА) [6–9], регламентирующих эксплуатационные характеристики излучателей на основе СИД, даже с учетом того, что не все характеристики заявлены изготовителем. Это требует разработки и внедрения более жестких процедур контроля СИД-ламп, поступающих на рынок Республики Беларусь, с целью защиты населения от возможных последствий применения некачественной продукции.

Заклучение

Таким образом, в результате проведенных исследований было установлено, что конструктивное исполнение, в частности, покрытие и форма рассеивателя ламп, использующих планарные СИД-чипы, а также схема расположения СИД-чипов в лампе существенно влияют на пространственное распределение интенсивности их излучения. Показано, что измерение углового распределения силы света позволяет более точно судить о характеристиках излучения СИД-ламп, чем измеренное значение силы света вдоль направления их механической оси, как того требуют традиционные методы. Прямая замена ламп накаливания на светодиодные, имеющие сложную диаграмму направленности, в оптических элементах, не рассчитанных для светодиодных ламп, может дать отрицательный результат, поэтому целесообразна разработка ТНПА, ограничивающих такую практику. Установлено, что заявленные производителями цветовые характеристики исследованных образцов СИД-ламп не соответствуют нормам, установленным действующими ТНПА, что требует совершенствования процедур подтверждения соответствия СИД-ламп, поступающих на рынок Республики Беларусь, действующим нормам.

Список литературы

1. Blattner P. Polarization effects in mirror type goniophotometers // Proc. 28th Session of the CIE. Manchester, June 28–July 4. Vol. 1. Part 1. P. 1794.
2. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on result of measurement of their photometric and radiometric properties / S. Nikanenka [et al.] // Proc. 28th Session of the CIE. Manchester, June 28–July 4, 2015. Vol. 1. Part 1. P. 1389–1395.
3. Установка для измерения пространственного распределения излучения лазерных диодов и силы света светодиодов и светодиодных осветителей / С.В. Никоненко [и др.] // Доклады БГУИР. 2011. Т. 9, № 4. С. 101–109.
4. CIE 127:2007. Vienna, CIE Central Bureau, 2007. 32 p.
5. Лешхорн Г. Проблемы современной стандартизации в световых измерениях изделий со светодиодами // Светотехника. 2015. № 4. С. 23–27.
6. IEC 60081:2007 + A1:2000 + A2:2003 + A3:2005 + A4:2010 + A5:2013. Geneva, IEC, 2013. 191 p.
7. Commission Regulation (EU) No 1194/2012 of 12 December 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for directional lamps, light emitting diode lamps and related equipment. Official Journal of the European Union. – 2012. – L 342.
8. Commission Regulation (EC) No 244/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for non-directional household lamps. Official Journal of the European Union. – 2009. – L 76.
9. IEC 62612:2013 Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements. Geneva, IEC, 2013. 92 p.

References

1. Blattner P. Polarization effects in mirror type goniophotometers // Proc. 28th Session of the CIE. Manchester, June 28–July 4. Vol. 1. Part 1. P. 908.
2. Influence of spatial characteristics of solid state light sources on result of measurement of their photometric and radiometric properties / S. Nikanenka [et al.] // Proc. 28th Session of the CIE. Manchester, June 28–July 4, 2015. Vol. 1. Part 1. P. 1389–1395.
3. Ustanovka dlja izmerenija prostranstvennogo raspredelenija izluchenija lazernyh diodov i sily sveta svetodiodov i svetodiodnyh osvetitelej / S.V. Nikonenko [i dr.] // Doklady BGUIR. 2011. T. 9, № 4. S. 101–109. (in Russ.)
4. CIE 127:2007. Vienna, CIE Central Bureau, 2007. 32 p.
5. Leshhorn G. Problemy sovremennoj standartizacii v svetovyh izmerenijah izdelij so svetodiodami // Svetotehnika. 2015. № 4. S. 23–27.
6. IEC 60081:2007 + A1:2000 + A2:2003 + A3:2005 + A4:2010 + A5:2013. Geneva, IEC, 2013. 191 p.
7. Commission Regulation (EU) No 1194/2012 of 12 December 2012 implementing Directive 2009/125/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for directional lamps, light emitting diode lamps and related equipment. Official Journal of the European Union. 2012. L 342.

8. Commission Regulation (EC) No 244/2009 of 18 March 2009 implementing Directive 2005/32/EC of the European Parliament and of the Council with regard to ecodesign requirements for non-directional household lamps. Official Journal of the European Union. – 2009. – L 76.
9. IEC 62612:2013 Self-ballasted LED lamps for general lighting services with supply voltages > 50 V – Performance requirements. Geneva, IEC, 2013. 92 p.

Сведения об авторах

Гурский А.Л., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Машедо Н.В., заместитель начальника АИЛ ОАО «Испытания и сертификация бытовой и промышленной продукции «БЕЛЛИС».

Никоненко С.В., с.н.с. Института физики НАН Беларуси.

Крейдич А.В., м.н.с. Института физики НАН Беларуси.

Information about the authors

Gurskii A.L., D.Sci, professor, professor of information protection department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Masheda M.V., deputy manager ATL of OJSC «Testing and Certification of Household and Industrial Products BELLIS».

Nikanenka S.V., senior researcher of Institute of Physics of NAS of Belarus.

Kreidich A.V., junior researcher of Institute of Physics of NAS of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел.: + 375-17-293-23-17;
e-mail: gurskii@bsuir.by
Гурский Александр Леонидович

Address for correspondence

220072, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki st., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel.: + 375-17-293-23-17;
e-mail: gurskii@bsuir.by
Gurskii Alexander Leonidovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-62-71>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.684.6;004.021

ИНТЕЛЛЕКТУАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ДАННЫХ И ОБЛАЧНЫЕ ВЫЧИСЛЕНИЯ

ТАТУР М.М., ЛУКАШЕВИЧ М.М., ПЕРЦЕВ Д.Ю., ИСКРА Н.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 февраля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В работе рассматривается понятие «интеллектуальный анализ данных», описывается концепция облачных вычислений. В качестве примера реализации интеллектуального анализа в виде облачных вычислений рассматривается система, разработанная и развернутая на вычислительном кластере кафедры ЭВМ БГУИР. Приводятся некоторые результаты проведения исследований при помощи данной системы.

Ключевые слова: интеллектуальный анализ данных, облачные вычисления, частное облако, вычислительный кластер, алгоритм k -средних, сегментация изображений, аннотирование изображений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Татур М.М., Лукашевич М.М., Перцев Д.Ю., Искра Н.А. Интеллектуальный анализ данных и облачные вычисления. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 62-71.

INTELLIGENT DATA ANALYSIS AND CLOUD COMPUTING

TATUR M.M., LUKASHEVICH M.M., PERTSEV D.Y., ISKRA N.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 11 February 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. In this paper the term of «intelligent data analysis» is discussed, the cloud computing concept is described. The system developed and deployed on the computer cluster by ECM department of BSUIR is shown as an example of the intelligent data analysis by means of cloud computing. Some results of research with the help of this system are given.

Keywords: intelligent data analysis, cloud computing, private cloud, computer cluster, k -means, image segmentation, image captioning.

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

For citation. Tatur M.M., Lukashevich M.M., Pertsev D.Y., Iskra N.A. Intelligent data analysis and cloud computing. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 62-71.

Введение

«Интеллектуальный анализ данных» – это современное научное направление, которое исследует и решает проблемы, связанные с поиском неочевидных закономерностей и причинно-следственных связей в системах, процессах и явлениях. По сути, это получение первичной информации, которая в дальнейшем используется для принятия технических, управленческих и других решений. Близкими к термину «Интеллектуальный анализ данных» являются англоязычные «Data Mining & Knowledge Discovery» и более общее «Machine Learning». Можно считать, что данное направление является составной частью более широкого понятия – «Искусственный интеллект». Онтологию научных направлений можно представить в виде мнемосхемы на рис. 1.

Как видно из рис. 1, область искусственного интеллекта наряду с интеллектуальной обработкой данных включает Логический (в том числе Нечеткий) вывод, Семантическую обработку знаний, оперирующую информацией более высокого уровня, и ряд других направлений.

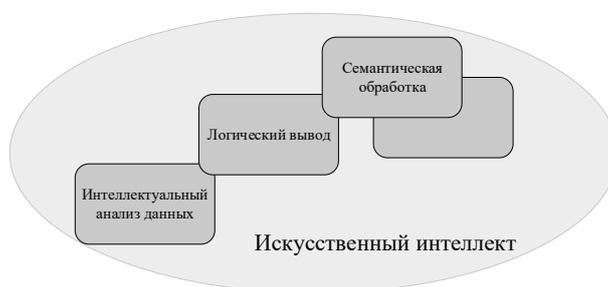


Рис. 1. Направления исследований в области искусственного интеллекта
Fig. 1. Directions of research in the field of artificial intelligence

Примерами прикладных задач, решаемых в рамках аппарата интеллектуального анализа данных могут служить: распознавание изображений (например, лиц, отпечатков пальцев), автоматическая индексация (разметка) изображений, прогнозирование погоды, котировок курсов валют, анализ причин роста или спада продаж и т. п. В работах [1–3] описаны решения некоторых из них. Все задачи подобного рода сопряжены с анализом большого объема эмпирических данных. Поэтому это направление тесно связывают с понятиями «Big Data» и «Data Analysis». Как показано в работах [4–6], вычислительная сложность алгоритмов интеллектуального анализа возрастает экспоненциально, в зависимости от объема данных. Это приводит к необходимости применения вычислительных средств с параллельной архитектурой.

На кафедре ЭВМ БГУИР активно ведутся научно-исследовательские работы в отмеченных направлениях. Развернута лаборатория высокопроизводительных вычислений с удаленным доступом пользователей. По сути, организовано облако, в котором реализована оригинальная система интеллектуального анализа данных. Система используется в учебно-исследовательских целях и позволяет клиентам с минимальными трудозатратами решать практические задачи интеллектуального анализа данных. В настоящей работе изложены теоретические основы и практические принципы построения рассматриваемой системы, а также приведены примеры решения некоторых прикладных задач, что представляет собой комплексный результат труда коллектива кафедры ЭВМ за последнее пятилетие.

Методология интеллектуального анализа данных

Решение прикладных задач интеллектуального анализа данных в общем случае сводится к последовательности действий, показанных на рис. 2 [7–9]. Математическую основу, или ядро системы, образуют формальные алгоритмы обработки (например, сравнение, сопоставление) упорядоченных наборов данных. В литературе такие данные также называют вектором информативных признаков или образом (англ. pattern). Сами алгоритмы в достаточной степени известны и реализованы в различных библиотеках и фреймворках,

о чем более детально будет сказано ниже. Все остальные блоки (предобработка, постобработка и обучение) в той или иной степени обеспечивают функционирование ядра.

При решении прикладной задачи исследователю предстоит выполнить следующие действия: определить, какие исходные данные использовать, как их нормализовать и взвешивать, какие формальные алгоритмы анализа данных применять и в какой последовательности, а также оценить качество и достоверность полученного результата. В целом задача интеллектуального анализа данных остается неформальной, а роль исследователя состоит в обучении системы, т. е. корректировке всех параметров в зависимости от качества получаемых результатов. В некоторых частных случаях прикладная задача, решенная с участием разработчика в заданных ограничениях, может в дальнейшем тиражироваться с автоматическим обучением. При этом создается ошибочное впечатление о полном исключении исследователя из процесса анализа данных.

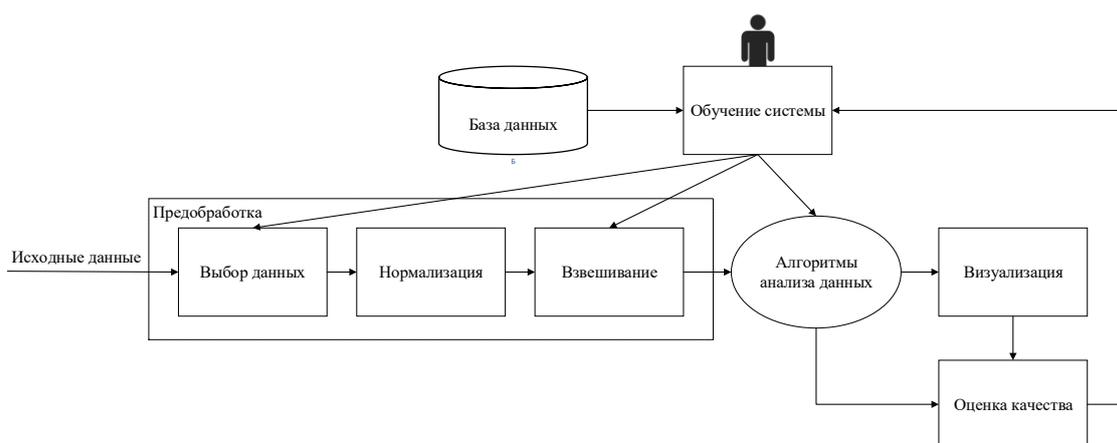


Рис. 2. Обобщенная функциональная схема интеллектуального анализа данных
Fig. 2. Generalized functional diagram of data mining

Таким образом, изначально, решение прикладной задачи в области интеллектуального анализа данных – это процесс проведения исследования с итеративной постановкой экспериментов, связанных с выдвижением и проверкой гипотез. При этом анонсируемая система представляет собой инструментальное средство для проведения исследований, призванное повысить качество создаваемых интеллектуальных систем и сократить сроки их разработки.

Понятие облачных вычислений

Традиционная модель организации вычислений предполагает создание инфраструктуры (установку и настройку серверов, организацию хранилища данных, организацию локальной сети, связывающей всю инфраструктуру в единую сеть), установку и настройку операционной системы, необходимых системных приложений (например, драйверов, платформы .NET, Java, сторонних системных библиотек) и, наконец, установку необходимого прикладного программного обеспечения (рис. 3), с которым будет взаимодействовать конечный пользователь. Очевидно, что, следуя данной модели, необходимо выделить бюджет для приобретения в собственность оборудования, программного обеспечения, оплатить работу специалистов и далее поддерживать все это в актуальном состоянии.

Альтернативой традиционному подходу является модель облачных вычислений (англ. cloud computing), которая состоит в организации удаленного доступа к некоторому общему фонду конфигурируемых вычислительных ресурсов, которые могут быть оперативно предоставлены с минимальными эксплуатационными затратами [10, 11]. Данная модель предполагает существование организации-провайдера, который предоставляет услуги, связанные с выделением необходимой инфраструктуры, поддержанием ее в актуальном состоянии и, возможно, установкой необходимого программного обеспечения.

Облачные вычисления принято классифицировать по двум основаниям [12]: в соответствии с моделью предоставления услуг; в соответствии с моделью развертывания.

В соответствии с моделью предоставления услуг выделяются следующие подходы:

- инфраструктура как сервис (Infrastructure as a Service, IaaS);
- платформа как сервис (Platform as a Service, PaaS);
- программное обеспечение как сервис (Software as a Service, SaaS).



Рис. 3. Традиционная модель организации вычислений
Fig. 3. The traditional model of computing

Различия между указанными моделями заключается в предоставляемом уровне сервисов и услуг (рис. 4).

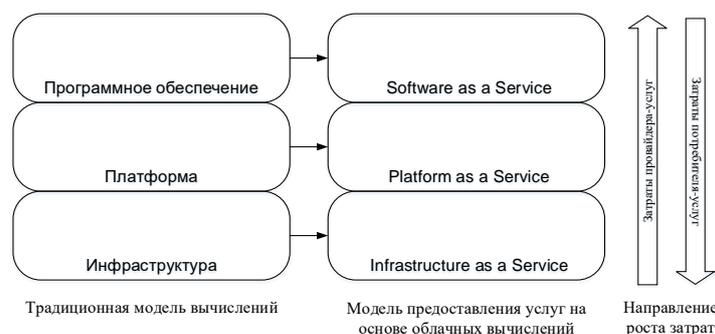


Рис. 4. Соответствие традиционной модели вычислений и услуг, предоставляемых на основе облачных вычислений

Fig. 4. Compliance with the traditional cloud computing model and services

Модель IaaS предполагает предоставление только вычислительных ресурсов в соответствии с запросами потребителя. В дальнейшем пользователь вправе использовать предоставленные ресурсы так, как он считает нужным. Модель PaaS совершенствует подход, предлагаемый в IaaS, и включает уже установленную и подготовленную к работе операционную систему. Модель SaaS является наиболее трудоемкой для провайдера услуг и предполагает создание собственных сервисов и предоставление к ним постоянного одновременного доступа для множества клиентов.

В соответствии с моделью развертывания выделяются следующие подходы: частное облако; публичное облако; гибридное облако.

Ввиду своей открытости, публичное облако предоставляет максимальный спектр возможностей. Однако для организации облака такого уровня требуются существенные вложения в вычислительные ресурсы, которые будут распределяться между множеством клиентов, и решение вопросов, связанных с безопасностью (например, хакерские атаки, изоляция пользовательских данных и т. п.).

Частное облако, как правило, разворачивается организацией для собственных нужд и не предполагает полноценный доступ к системе всем желающим. В случае необходимости организация доступа к облаку, территориально располагаемому за пределами организации, как правило, формируется через закрытую и недоступную извне сеть. Основными преимуществами данного подхода являются пониженные требования к организации защиты доступа, пониженные требования к инфраструктуре.

Гибридное облако является объединением идеологий частного и публичного облаков. С одной стороны, предполагается наличие собственного частного облака. При этом из-за нехватки вычислительных ресурсов или из-за необходимости получения доступа к сторонним ресурсам, организация дополнительно арендует услуги, предоставляемые сторонними публичными облаками. Как правило, в этом случае вся имеющаяся инфраструктура (собственная и арендуемая) объединяется в единую.

Вычислительный кластер БГУИР как провайдер услуг облачных вычислений

В результате модернизации системы в 2019 году вычислительный кластер БГУИР будет являться частным облаком, построенным на основе модели SaaS и включающем 7 Blade-серверов, один из которых выделен как управляющий и 6 в качестве вычислительных, соединенных по шине InfiniBand 4x QDR (40 Gbps). На каждом вычислительном модуле установлено два Intel Xeon E5-2650, 32 Gb RAM стандарта DDR3 и две NVIDIA Tesla M2075 6 Gb RAM.

В качестве услуг, к которым в ближайшей перспективе планируется предоставить доступ, выбраны учебно-исследовательская система интеллектуального анализа данных, разрабатываемая сотрудниками кафедры ЭВМ и НИЛ 3.6 [13–15], а также Apache Zeppelin [16].

Основными преимуществами использования собственного вычислительного кластера БГУИР в качестве вычислительного облака являются:

- независимость от внешних организаций;
- подключение к локальной сети БГУИР, что позволяет использовать кластер студентами и исследователями, в том числе магистрантами и аспирантами, на любой кафедре при получении логина и пароля. В перспективе имеется возможность организации доступа через Интернет, что позволит подключать к системе любого желающего;
- достаточные вычислительные ресурсы для того, чтобы справиться с серьезной вычислительной нагрузкой, в том числе длительной.

Сервисы, предоставляемые на базе вычислительного кластера БГУИР

Учебно-исследовательская система интеллектуального анализа данных. Разрабатываемая система представляет собой комплекс микросервисов, взаимодействующих между собой (рис. 5): уровень сервисов, включающий библиотеки алгоритмов; уровень алгоритмов анализа данных; Web-сайт (интерфейс пользователя).

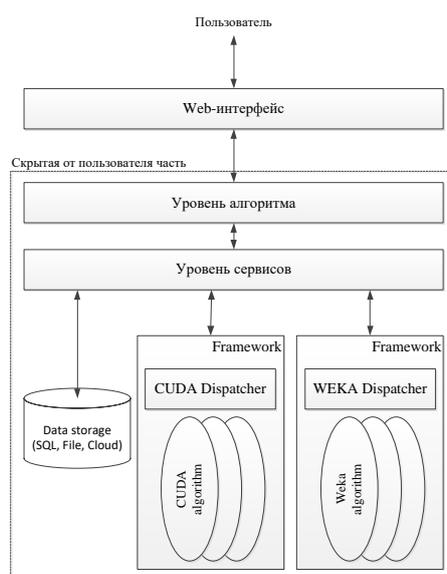


Рис. 5. Структурная схема системы интеллектуального анализа данных

Fig. 5. Block diagram of a data mining system

Уровень сервисов. Существует множество различных библиотек, реализующих алгоритмы интеллектуального анализа данных. Наиболее известные из них: scikit-learn [17], MLlib [18], Theano [19], Weka [20].

Каждая из представленных библиотек (англ. framework) предоставляет собственный интерфейс доступа, поддерживает разные языки программирования. При этом каждый из перечисленных framework'ов эффективно справляется с определенной задачей. В случае если программисту необходимо использовать алгоритмы из разных библиотек, это становится затруднительным и требует высокой квалификации разработчика. Для решения поставленной задачи был разработан первый уровень – уровень сервисов.

Основными задачами уровня сервисов являются:

- подключение запрашиваемой библиотеки либо информирование о неполадках в настройках;
- проверка корректности входных параметров;
- вызов необходимых алгоритмов и обработка исключений;
- предоставление информации об исполнении алгоритмов, в том числе о возникших ошибках.

Уровень алгоритмов анализа данных. Вышележащий уровень – прослойка для организации доступа к сервисам. Его основными задачами являются:

- хранение информации о подключенных библиотеках алгоритмов;
- хранение информации о поддерживаемых алгоритмах в рамках каждой из подключенных библиотек;
- обобщение и систематизация полученной информации;
- взаимодействие с Web-сайтом.

Web-сайт. Конечный уровень – Web-сайт, развернутый на сервере на базе кафедры ЭВМ БГУИР.

Его основными задачами являются:

- удобный доступ к поддерживаемым алгоритмам интеллектуального анализа данных;
- формирование цепочки алгоритмов с необходимыми настройками для решения конкретных задач;
- предоставление полученных результатов работы;
- контроль прав доступа.

Apache Zeppelin. Проект Apache Zeppelin – полностью открытый проект, построенный по принципу Web-блокнотов и созданный для интерактивного анализа данных.

Основным преимуществом данного проекта является полноценная поддержка сложной инфраструктуры, создаваемой для облачных вычислений. На базе вычислительного кластера БГУИР и сервиса Apache Zeppelin предоставляется полноценный доступ через Web-интерфейс к таким языкам программирования, как Python и R. Кроме того, поддерживаются технологии Apache Spark и TensorFlow, созданные для анализа данных и работы с нейронными сетями соответственно.

Примеры решения учебных и прикладных задач

Задача кластеризации алгоритмом k -средних. В качестве простой тестовой задачи для учебно-исследовательской системы анализа данных использовался алгоритм кластеризации k -средних [22]. Аппаратная реализация – вычислительный кластер БГУИР.

Для проведения эксперимента генерировался тестовый набор из 10^7 образов на 100 признаков (координат) с заданным числом кластеров. Из данного набора создавались подмножества с меньшим числом объектов, кратным 10^6 , для исследования зависимости времени от объема обрабатываемых данных.

Ниже представлены полученные зависимости среднего времени обработки от числа узлов кластера (рис. 6, *a*) и от числа объектов (образов) для кластеризации при числе вычислительных узлов – 7 (рис. 6, *b*).

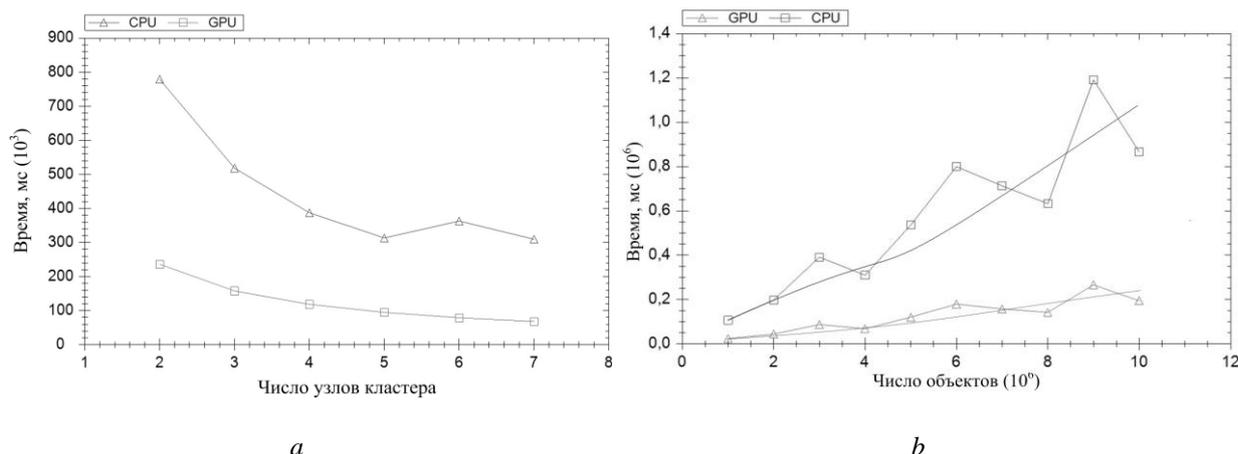


Рис. 6. Зависимости времени обработки от *a* – числа узлов кластера; *b* – числа объектов
Fig. 6. Processing time dependencies *a* – is the number of cluster nodes; *b* – number of objects

Сегментация медицинских изображений. Сегментация изображений – это процесс разделения изображения на составляющие части или объекты. Автоматизированная сегментация медицинских изображений является сложной задачей из-за большого разнообразия форм и размеров объектов предметной области [22].

Сверточная сеть Unet [23] была разработана с учетом особенностей обработки медицинских изображений. Она позволяет достичь высокой точности и использует небольшой набор данных для обучения.

На основе датасета с медицинскими изображениями, который предоставлялся в рамках конкурса «Data Science Bowl 2018», обучалась сеть с Unet-архитектурой. Для анализа работы сети были проведены эксперименты с изменением алгоритмов оптимизации, предоставляемых сервисом Apache Zeppelin. Результаты экспериментов приводятся на рис. 7.

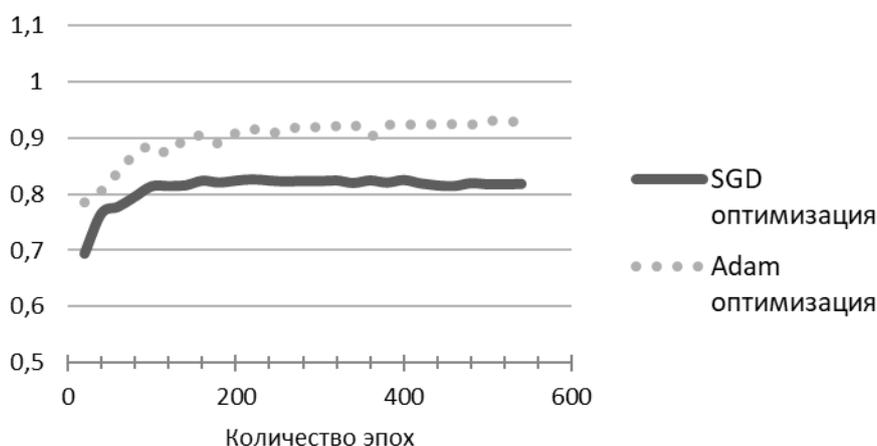


Рис. 7. Изменение коэффициента Жаккара при различных видах оптимизации
Fig. 7. Change in the Jacquard coefficient for various types of optimization

Аннотирование изображений. Решение задачи понимания и интерпретации изображений требует, с одной стороны, точной и быстрой детекции объектов на изображении, а с другой – построения семантического описания изображения на ограниченном естественном языке. Таким образом, ставится задача аннотирования изображений (англ. Image Captioning) – получения словесного описания содержания изображения.

В рамках совместного исследования кафедры ЭВМ и кафедры ИИТ БГУИР [24] был рассмотрен подход к семантическому анализу изображений на основе интеграции модели,

использующей сверточные нейронные сети, и средств представления и обработки информации в рамках открытой семантической технологии проектирования интеллектуальных систем.

При помощи сервиса Apache Zeppelin можно построить цепочки алгоритмов обработки данных. Для решения задачи аннотирования изображений была предложена последовательность обработки с обратными связями, представленная на рис. 8.

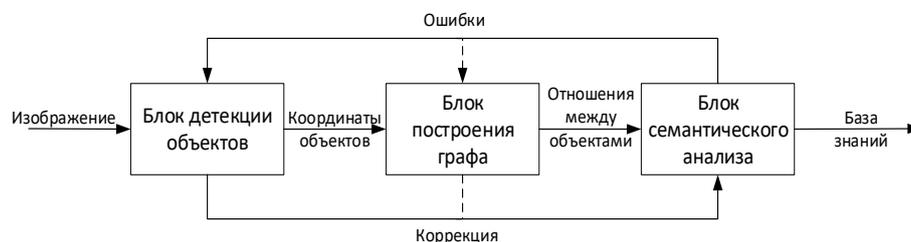


Рис. 8. Архитектура обработки изображения для аннотирования
Fig. 8. Image processing architecture for annotation

Блок детекции построен на основе архитектуры Faster R-CNN [25], реализация внутренних алгоритмов которой предоставляется через Apache Zeppelin, взаимодействующей с алгоритмами TensorFlow. Результаты детекции передаются в блок построения графа, который учитывает координаты расположения выделенных объектов. Далее отношения между связанными объектами уточняются. Блок семантического анализа, построенный в виде OSTIS-системы, на основании характера выделенных объектов определяет контекст изображения. Данный блок определяет возможные ошибки либо в детекции объектов, либо в отношениях. Блок детекции (или блок построения графа, в зависимости от характера ошибки) перепроверяет результаты для «подозрительных» регионов, модель корректируется. По скорректированной модели, принимая во внимания языковые отношения «субъект-объект», обозначения отношений заменяются подходящими языковыми конструкциями. Результаты в дальнейшем могут интегрироваться в базу знаний и использоваться для последующего улучшения семантического анализа.

Заключение

В представленной работе обобщены основные результаты научно-исследовательской деятельности в контексте интеллектуального анализа данных и облачных вычислений. Представлена обновленная версия вычислительного кластера БГУИР с открывающимися новыми возможностями по предоставлению услуг по анализу и обработке больших объемов данных, в том числе по обработке изображений.

Учебно-исследовательская система интеллектуального анализа данных создавалась при финансовой поддержке в рамках государственной программы научных исследований «Информатика, космос и безопасность», подпрограмма 1 «Информатика и космические исследования» (задание 1.6.04 «Разработка интеллектуальной вычислительной системы обработки больших объемов данных»).

Список литературы

1. Поиск, визуализация скрытых зависимостей и прогнозирования развития ситуаций на базе технологий Data Mining & Knowledge Discovery / М.М. Татур [и др.] // Сб. матер. конф. «BIG DATA and Advanced Analytics». Минск, 2016. С. 194–196.
2. Живицкая Е.Н., Пархименко В.А., Татур М.М. Технологии Data Mining & Knowledge Discovery в принятии решений в области маркетинга, менеджмента и логистики // Сб. матер. конф. «Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, теле-комунікацій та інформаційних технологій». Запоріжжє, 2016. С. 326–329.
3. Применение методов DataMining и Knowledge Discovery в оперативно-розыскной деятельности / С.Н. Нефедов [и др.] // Сб. матер. конф. «Актуальные проблемы оперативно-розыскной деятельности». Минск, 2017. С. 70–72.
4. Татур М.М. Особенности построения вычислителей интеллектуальной обработки данных //

- Информатика. 2015. № 1 (45). С. 39–44.
5. К вопросу о подготовке данных для решения задач Data Mining / Е. Н. Живицкая [и др.] // Сб. матер. конф. «BIG DATA and Advanced Analytics». Минск, 2017. С. 288–292.
 6. Интеллектуальный анализ данных: trend или application? / М.М. Татур [и др.] // Сб. матер. конф. «Информационные технологии и системы». Минск, 2017. С. 10–12.
 7. Tatur M.M., Iskra N.A. Intelligent Data Analysis: From Theory to Practice // Сб. матер. конф. «Открытые семантические технологии проектирования интеллектуальных систем». Минск, 2018. С. 171–175.
 8. Мюллер А., Гвидо С. Введение в машинное обучение с помощью Python: руководство для специалистов по работе с данными. М., 2017. 393 с.
 9. Силен Д., Мейсман А., Али М. Основы Data Science и Big Data. Python и наука о данных. СПб.: Питер, 2017. 336 с.
 10. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing / Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST, 2011.
 11. Marinescu D.C. Cloud Computing: Theory and Practice. Morgan Kaufmann, 2017. 588 p.
 12. Bhowmik S. Cloud Computing. Cambridge University Press, 2017. 426 p.
 13. Демидчук А.И., Перцев Д.Ю., Самаль Д.И. Учебно-исследовательская система обработки больших данных // BIG DATA and Advanced Analytics. Минск: БГУИР, 2017. С. 170–173.
 14. Система обработки больших данных на основе вычислительного кластера БГУИР / Д. И. Самаль [и др.] // Сб. матер. конф. «BIG DATA Advanced Analytics». Минск, 2018. С. 220–256.
 15. Интеллектуальная обработка больших объемов данных на основе технологий MPI и CUDA. Лабораторный практикум : пособие / А. И. Демидчук [и др.]. Минск : БГУИР, 2017. 60 с.
 16. Zeppelin [Электронный ресурс]. URL: <http://zeppelin.apache.org/> (дата обращения: 20.01.2019).
 17. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Электронный ресурс]. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (дата обращения: 20.01.2019).
 18. MLlib Apache Spark [Электронный ресурс]. URL: <https://spark.apache.org/mllib/> (дата обращения: 20.01.2019).
 19. Theano 1.0.0 documentation [Электронный ресурс]. URL: <http://deeplearning.net/software/theano/> (дата обращения: 20.01.2019).
 20. Weka 3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java [Электронный ресурс]. URL: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (дата обращения: 20.01.2019).
 21. Проявление закона Амдала–Густавсона на примере реализации алгоритма k-средних / А. И. Демидчук [и др.] // Сб. матер. конф. «BIG DATA and Predictive Analytics». Минск, 2015. С. 151–154.
 22. Лукашевич М.М., Старовойтов В.В. Методика подсчета числа ядер клеток на медицинских гистологических изображениях // Системный анализ и прикладная информатика. 2016. № 2. С. 38–42.
 23. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2015. P. 234–241.
 24. Семантическая модель представления и обработки баз знаний / В.В. Голенков [и др.]. // Аналитика и управление данными в областях с интенсивным использованием данных. 2017. С. 412–419.
 25. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / Shaoqing R. [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. P. 1137–1149.

References

1. Poisk, vizualizacija skrytyh zavisimostej i prognozirovanija razvitija situacij na baze tehnologij Data Mining & Knowledge Discovery / М.М. Татур [и др.] // Sb. mater. konf. «BIG DATA and Advanced Analytics». Minsk, 2016. S. 194–196. (in Russ.)
2. Zhivickaja E.N., Parhimenko V.A., Tatur M.M. Tehnologii Data Mining & Knowledge Discovery v prinjatii reshenij v oblasti marketinga, menedzhmenta i logistiki // Sb. mater. konf. «Suchasni problemi i dosjagnennja v galuzi radiotekhniki, tele-komunikacij ta informacijnih tehnologij». Zaporozh'e, 2016. S. 326–329. (in Russ.)
3. Primenenie metodov DataMining i Knowledge Discovery v operativno-rozysknoj dejatel'nosti / S.N. Nefedov [I dr.] // Sb. mater. konf. «Aktual'nye problemy operativno-rozysknoj dejatel'nosti». Minsk, 2017. S. 70–72. (in Russ.)
4. Tatur M.M. Osobennosti postroenija vychislitelej intellektual'noj obrabotki dannyh // Informatika. 2015. № 1 (45). S. 39–44. (in Russ.)
5. K voprosu o podgotovke dannyh dlja reshenija zadach Data Mining / E. N. Zhivickaja [i dr.] // Sb. mater. konf. «BIG DATA and Advanced Analytics». Minsk, 2017. S. 288–292. (in Russ.)
6. Intellektual'nyj analiz dannyh: trend ili application? / M.M. Tatur [i dr.] // Sb. mater. konf. «Informacionnye tehnologii i sistemy». Minsk, 2017. S. 10–12. (in Russ.)
7. Tatur M.M., Iskra N.A. Intelligent Data Analysis: From Theory to Practice // Sb. mater. konf. «Otkrytye semanticheskie tehnologii proektirovanija intellektual'nyh sistem». Minsk, 2018. S. 171–175.

8. Mjuller A., Gvido S. Vvedenie v mashinnoe obuchenie s pomoshh'ju Python: Rukovodstvo dlja specialistov po rabote s dannymi. M., 2017. 393 s. (in Russ.)
9. Silen D., Mejsman A., Ali M. Osnovy Data Science i Big Data. Python i nauka o dannyh. SPb.: Piter, 2017. 336 s. (in Russ.)
10. Mell P., Grance T. The NIST Definition of Cloud Computing / Recommendations of the National Institute of Standards and Technology. NIST, 2011.
11. Marinescu D.C. Cloud Computing: Theory and Practice. Morgan Kaufmann, 2017. 588 p.
12. Bhowmik S. Cloud Computing. Cambridge University Press, 2017. 426 p.
13. Demidchuk A.I., Percev D.Ju., Samal' D.I. Uchebno-issledovatel'skaja sistema obrabotki bol'shikh dannyh // BIG DATA and Advanced Analytics. Minsk: BGUIR, 2017. S. 170–173. (in Russ.)
14. Sistema obrabotki bol'shikh dannyh na osnove vychislitel'nogo klastera BGUIR / D.I. Samal' [i dr.] // Sb. mater. konf. «BIG DATA Advanced Analytics». Minsk, 2018. S. 220–256. (in Russ.)
15. Intellektual'naja obrabotka bol'shikh ob'emov dannyh na osnove tehnologij MPI i CUDA. Laboratornyj praktikum: posobie / A. I. Demidchuk [i dr.]. Minsk: BGUIR, 2017. 60 s. (in Russ.)
16. Zeppelin [Electronic resource]. URL: <http://zeppelin.apache.org/> (data obrashhenija: 20.01.2019).
17. Scikit-learn: Machine Learning in Python [Electronic resource]. URL: <https://scikit-learn.org/stable/> (date of access: 20.01.2019).
18. MLlib Apache Spark [Electronic resource]. URL: <https://spark.apache.org/mllib/> (date of access: 20.01.2019).
19. Theano 1.0.0 documentation [Electronic resource]. URL: <http://deeplearning.net/software/theano/> (date of access: 20.01.2019).
20. Weka 3 – Data Mining with Open Source Machine Learning Software in Java [Electronic resource]. URL: <https://www.cs.waikato.ac.nz/ml/weka/> (date of access: 20.01.2019).
21. Projavlenie zakona Amdala-Gustavsona na primere realizacii algoritma k-srednih / A.I. Demidchuk [i dr.] // Sb. mater. konf. «BIG DATA and Predictive Analytics». Minsk, 2015. S. 151–154. (in Russ.)
22. Lukashevich M.M., Starovojtov V.V. Metodika podscheta chisla jader kletok na medicinskih gistologicheskikh izobrazhenijah // Sistemnyj analiz i prikladnaja informatika. 2016. № 2. S. 38–42. (in Russ.)
23. Ronneberger O., Fischer P., Brox T. U-Net: Convolutional Networks for Biomedical Image Segmentation / Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention, 2015. P. 234–241. (in Russ.)
24. Semanticheskaja model' predstavlenija i obrabotki baz znaniy / V.V. Golenkov [i dr.]. // Analitika i upravlenie dannymi v oblastjakh s intensivnym ispol'zovaniem dannyh. 2017. S. 412–419. (in Russ.)
25. Faster R-CNN: Towards Real-Time Object Detection with Region Proposal Networks / Shaoqing R. [et al.] // IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence. 2017. P. 1137–1149.

Сведения об авторах

Татур М.М., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лукашевич М.М., к.т.н., доцент, декан факультета компьютерных систем и сетей Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Перцев Д.Ю., научный сотрудник НИЛ 3.6 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Искра Н.А., старший преподаватель кафедры электронных вычислительных машин Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-586-93-52;
e-mail: niskra@bsuir.by
Искра Наталья Александровна

Information about the authors

Tatur M.M., D.Sci, professor of the department of electronic computing machines of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lukashevich M.M., PhD, associate professor, dean of the faculty of computer systems and networks of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Pertsev D.Y., researcher of SRL 3.6 of R&D department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Iskra N.A., senior lecturer of the department of electronic computing machines of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka, st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-586-93-52;
e-mail: niskra@bsuir.by
Iskra Natalia Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-72-79>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 519.87

ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТРУКТУРЫ ОПТИМАЛЬНОГО ПОДМНОЖЕСТВА В ЗАДАЧЕ О РАНЦЕ

ЧЕБАКОВ С.В.¹, СЕРЕБРЯНАЯ Л.В.²

¹*Объединенный институт проблем информатики НАН Беларуси, Республика Беларусь*

²*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

Поступила в редакцию 25 февраля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Рассматривается алгоритм решения задачи о ранце на основе предлагаемой многокритериальной модели. Реализация алгоритма позволяет определить структуру оптимального подмножества в виде объединения определенных элементов группы паретовских слоев, на которые разбивается множество начальных данных. Первым таким слоем является множество Парето. Определение структуры оптимального подмножества позволяет найти такое подмножество начальных данных, элементы которого не могут войти в оптимальное подмножество. Наиболее трудоемкими являются задачи о ранце с большим набором начальных данных. В статье показано, что при небольшом значении объема ранца число элементов, требуемых для нахождения оптимального подмножества, значительно меньше их общего числа в исходном множестве, что может привести к существенному уменьшению общего времени решения комбинаторной задачи.

Ключевые слова: задача о ранце, многокритериальная модель, множество Парето, оптимальное подмножество, паретовские слои.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Чебаков С.В., Серебряная Л.В. Определение структуры оптимального подмножества в задаче о ранце. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 72-79.

FINDING OF OPTIMAL SUBSET STRUCTURE IN THE KNAPSACK PROBLEM

CHEBAKOV S.V.¹, SEREBRYANAYA L.V.²

¹*United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus, Republic of Belarus*

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

Submitted 25 February 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. An algorithm for solving the knapsack problem based on the proposed multi-criteria model is considered. The implementation of this algorithm allows to define the structure of the optimal subset as a union of certain elements of a Pareto layers group into which a initial data set is divided. The first such layer

is the Pareto set. The optimal subset allows to find a specific subset of the initial data. Its elements as a result of belonging to the Pareto layers with large numbers cannot enter the optimal subset. The most expensive in terms of the number of operations required are knapsack problems, in which the number of elements in the set of initial data is quite large. The article shows that with a relatively small value of the knapsack volume, the number of elements required to find the optimal subset is significantly less than their total number in the original set. It can lead to a significant decrease in the total time to solve the combinatorial problem.

Keywords: the knapsack problem, two-criterial optimization, Pareto subset, optimal subset, pareto layers.

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

For citation. Chebakov S.V., Serebryanaya L.V. Finding of optimal subset structure in the knapsack problem. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 72-79.

Введение

Задача о ранце относится к классическим задачам дискретной оптимизации. Она получила широкое применение в различных прикладных областях: планировании и управлении производственными процессами, логистике, криптографии и др. Многие из перечисленных задач относятся к классу комбинаторных, математические модели для которых создаются на основе задачи о ранце. В работе представлен метод решения оптимизационной задачи, которая формулируется следующим образом. Пусть альтернативному варианту достижения цели n_i из множества начальных данных N соответствуют две характеристики – время достижения цели t_i и вероятность ее достижения w_i . Суммарное время достижения цели при последовательном выполнении альтернативных вариантов из множества N ограничено величиной T , время выполнения каждого варианта меньше либо равно T . При достижении заданной цели хотя бы одним элементом из N решение задачи считается найденным. Рассматриваемая задача представляет собой задачу поиска при ограничениях на ресурсы [1]. В задачах поиска, как правило, считается, что цель обязательно должна быть достигнута одним из альтернативных вариантов, т. е. сумма вероятностей всех вариантов из заданного начального множества N равна единице. Допустимым будет такое подмножество вариантов из N , чье суммарное время выполнения не превосходит величину T . Среди допустимых подмножеств требуется найти оптимальное подмножество Q с максимальной суммарной вероятностью достижения цели. Пусть число элементов в множестве N равно r . Тогда математическую модель для ее решения можно представить следующим образом: $f(x) = \sum_{i=1}^r w_i x_i \rightarrow \max, \sum_{i=1}^r t_i x_i, x_i \in \{0, 1\}, x = (x_1, x_2, \dots, x_r), w_i > 0,$

$0 < t_i \leq T, i = 1, \dots, r$. Модель показывает, что рассматриваемая задача представляет собой оптимизационную задачу о ранце с множеством объектов N и заданным объемом ранца T [2]. Методы ее решения представлены, например, в [2, 3] и основаны на различных способах перебора элементов множества начальных данных. В работе [4] между любой парой элементов из N введено двухкритериальное транзитивное отношение предпочтения. Доминирующим является элемент, имеющий меньшее время выполнения и большую вероятность достижения цели.

В статье разработан метод решения задачи о ранце с заданным множеством начальных данных N . Введение транзитивного двухкритериального пространства предпочтений на конечном множестве и разработка на этой основе алгоритма формирования допустимых подмножеств позволили определить структуру оптимального допустимого подмножества. Оно представляет собой объединение некоторых подмножеств первых паретовских слоев, на которые разбивается множество начальных данных в введенном двухкритериальном пространстве. Для построения паретовских слоев в таких пространствах не требуется применять алгоритмы перебора с элементами начального множества. Представленный способ решения задачи о ранце позволяет рассматривать при построении допустимых подмножеств только элементы определенного количества первых слоев, число которых может быть существенно меньше их общего количества. Это значительно сокращает число операций, требуемых для нахождения решения оптимизационной задачи.

Построение допустимого подмножества в задаче о ранце

Пусть введено предложенное двухкритериальное транзитивное отношение предпочтения между элементами начального множества N и требуется сформировать допустимое подмножество D . Будем последовательно включать в него элементы начального множества до тех пор, пока суммарное время их выполнения не превысит заданную величину T . Предположим, на множестве N нет двух элементов с совпадающими значениями хотя бы одной координаты. Пусть определены первые элементы g_1, g_2, \dots, g_k допустимого подмножества D . На каждом шаге после включения очередного элемента g_i требуется найти значение ресурса времени, соответствующее следующему шагу, в виде $T_{i+1} = T_i - 1 + t_i$, где t_i – время выполнения элемента g_i . Будем считать, что каждый элемент может войти в формируемое допустимое подмножество только один раз.

Утверждение 1. Предположим, на каждом шаге формирования допустимого подмножества D множество начальных данных N можно представить в виде объединения двух подмножеств A_i и B_i . Подмножество B_i содержит в себе элементы из N , которые не могут на последующих шагах войти в D , а подмножество A_i содержит все остальные элементы множества N . Тогда на каждом шаге выбор очередного элемента g_i подмножества D осуществляется только из паретовских элементов множества A_i .

Доказательство. Пусть Y_i – множество паретовских элементов на A_i . По предположению, любой элемент множества начальных данных N может включаться в подмножество D только один раз. Тогда подмножество B_i должно включать в себя все уже входящие в D элементы g_1, g_2, \dots, g_{i-1} . Кроме того, подмножество B_i содержит также элементы, время выполнения которых будет больше текущего и всех последующих значений ресурса времени T_i . Очевидно, для каждого элемента из A_i , не входящего в Y_i , в последнем существует хотя бы один элемент доминирующий его.

Рассмотрим два способа построения допустимого подмножества D . Первый способ заключается в том, что на каждом шаге в D включается доминируемый на множестве A_i элемент d_i . Во втором способе в D включается доминирующий его элемент f_i из Y_i .

По предположению, множество N не содержит двух элементов с совпадающими значениями хотя бы одной координаты. Тогда все неравенства, выражающие отношения доминированности между элементами по каждому из двух критериев, являются строгими, и элемент f_i имеет меньшее время выполнения и большую вероятность достижения цели, чем элемент d_i . Следовательно, значения ресурса времени T_i при втором способе формирования допустимого подмножества D будут меньше, чем при первом способе. Процесс построения двух допустимых подмножеств продолжается до тех пор, пока не исчерпан весь первоначальный ресурс времени T . При втором способе построения подмножества D ресурс времени T не может исчерпаться ранее, чем при его построении первым способом, а суммарная вероятность в ходе реализации второго способа построения окажется больше. Таким образом, для любого допустимого подмножества, сформированного только из доминируемых элементов на множестве A_i , существует допустимое подмножество, имеющее большую суммарную вероятность. Аналогичным образом такой же результат получается, если включение доминируемых элементов происходит только на некоторых шагах формирования подмножества D . Решение рассматриваемой задачи о ранце представляет собой подмножество с максимальной суммарной вероятностью достижения цели. Следовательно, построение допустимых подмножеств, включающих в себя элементы, не входящие в паретовское множество Y_i , не имеет смысла для нахождения оптимального подмножества Q . Утверждение доказано.

Таким образом, для нахождения допустимого подмножества D требуется разработать алгоритм построения множеств B_i и Y_i . Построение множества Y_i опирается на определение паретовского слоя. Множество Парето включает в себя все недоминируемые элементы и является первым паретовским слоем. Паретовский слой с номером m представляет собой совокупность паретовских элементов на той части множества начальных данных, которая остается после удаления элементов, принадлежащих всем предыдущим паретовским слоям. Следовательно, для каждого элемента, входящего во второй и последующие паретовские слои, существует хотя бы один элемент из предыдущего слоя, который его доминирует. Отметим,

что элемент слоя с номером m может либо доминироваться любым элементом предыдущего слоя $m-1$, либо находиться с ним в отношении Парето. Исходя из алгоритма построения, разбиение на паретовские слои множества начальных данных N представляет собой определенное упорядочивание его элементов по отношению доминирования, что и позволяет формировать подмножества Y_i .

Элементы множества Парето в двухкритериальном пространстве отвечают следующему факту из теории многокритериальной оптимизации [5]. Если элементы множества Парето упорядочить по возрастанию значения по предпочтению одного из критериев, то по второму критерию эти же элементы будут следовать друг за другом уже в порядке убывания их предпочтения. Следовательно, для построения множества Парето и любого паретовского слоя в двухкритериальном пространстве достаточно использовать алгоритмы поиска в упорядоченных структурах данных. Таким образом, для их построения не применяются алгоритмы перебора элементов начального множества N .

Определение 1. Верхней критериальной границей некоторого паретовского слоя P_m является вектор L_m^+ , чьи координаты представляют собой максимум по предпочтению в каждой координате среди всех элементов, образующих этот паретовский слой.

Определение 2. Нижней критериальной границей паретовского слоя P_m является вектор L_m^- , чьи координаты представляют собой минимум по предпочтению в каждой координате среди всех элементов данного паретовского слоя.

Из способа построения векторов L_m^+ , L_m^- следует, что вектор L_m^+ доминирует все альтернативы паретовского слоя P_m , а вектор L_m^- доминируется каждым его элементом.

Утверждение 2. Верхняя критериальная граница любого паретовского слоя P_i доминирует верхние критериальные границы всех последующих слоев $P_{i+1}, P_{i+2}, \dots, P_v$.

Доказательство. Пусть P_i и P_{i+1} представляют собой соседние паретовские слои, а векторы L_i^+ и L_{i+1}^+ – их верхние критериальные границы. Покажем, что вектор L_i^+ доминирует вектор L_{i+1}^+ . Предположим противное, что эти два вектора либо находятся между собой в отношении Парето, либо L_{i+1}^+ доминирует L_i^+ . Тогда по определению верхних критериальных границ существует элемент в слое P_{i+1} , который хотя бы по одной координате доминирует все элементы предыдущего слоя P_i . Это противоречит тому факту, что для каждого элемента из P_{i+1} в предыдущем слое P_i существует хотя бы один доминирующий элемент. Из транзитивности введенного отношения предпочтения следует, что вектор L_i^+ доминирует вектор L_{i+2}^+ , доминирующий вектор L_{i+3}^+ . Тогда L_i^+ доминирует и вектор L_{i+3}^+ . Аналогичным образом можно доказать, что вектор L_i^+ доминирует верхние критериальные оценки L_{i+4}^+, \dots, L_v^+ всех последующих паретовских слоев. Утверждение доказано.

Таким образом, на первом шаге построения допустимого подмножества D множество Y_1 совпадает с множеством Парето на всем множестве начальных данных N , а множество B_1 является пустым множеством. Для нахождения B_i и Y_i на последующих шагах требуется выполнить следующие операции. Все элементы множества Парето упорядочиваются по убыванию предпочтения значения критерия времени выполнения. Первый элемент данной последовательности, обозначим ее через X_1 , будет иметь наибольшее время выполнения. По свойству упорядочивания элементов паретовских множеств в двухкритериальных пространствах его второй критерий имеет максимальное значение вероятности достижения цели. Приоритетность первого критерия возрастает с уменьшением его значения. Следовательно, время выполнения каждого следующего элемента в данной упорядоченной последовательности будет меньше предыдущего. Среди упорядоченных по уменьшению времени выполнения элементов последовательности X_1 осуществляется поиск первого элемента g_1 , время выполнения которого меньше либо равно T .

Пусть требуемый элемент g_1 существует и включен в формируемое допустимое

подмножество D . Величина ресурса времени корректируется $T_1 = T - q_1$, где q_1 – время выполнения элемента g_1 , и следующий элемент g_2 подмножества D должен иметь время выполнения, меньшее либо равное T_1 .

Утверждение 3. Номер следующего элемента g_2 подмножества D , имеющий время выполнения, меньшее либо равное величине T_1 , должен быть больше номера предыдущего элемента g_1 .

Доказательство. Предположим противное, что существует элемент с меньшим номером, чем номер элемента g_1 , который имеет время выполнения, меньшее либо равное величине T_1 . Элемент g_1 по построению является первым элементом из X_1 , чье время выполнения меньше либо равно T . Тогда все остальные элементы с меньшими номерами имеют время выполнения больше T . Вместе с тем очевидно, что величина $T_1 < T$. Следовательно, все элементы последовательности с меньшими номерами, чем номер g_1 , имеют время выполнения больше, чем значение величины T_1 . Утверждение доказано.

Пусть значение величины $T_1 > 0$. Среди элементов, имеющих больший номер в X_1 , чем номер элемента g_1 , определен первый элемент g_2 , чье время выполнения меньше либо равно T_1 . Элемент g_2 включается в допустимое подмножество D . Корректируется величина ресурса времени $T_2 = T_1 - q_2$. Построение D продолжается до тех пор, пока не исчерпан ресурс времени T либо не будет включен в D последний элемент последовательности X_1 .

Утверждение 4. Подмножество B_i будет включать в себя все ранее рассмотренные элементы упорядоченной последовательности X_1 с номерами, меньшими, чем у последнего элемента из D .

Доказательство. На первом шаге алгоритма построения подмножества D определяется элемент в последовательности $X_1 \leq T$. Тогда все элементы с номерами, меньшими, чем номер первого элемента g_1 , если таковые существуют, имеют время выполнения больше T . Очевидно, что последовательность величин T_i монотонно убывающая. Тогда рассмотренные на первом шаге и не вошедшие в D элементы последовательности X_1 не могут войти в D и на всех последующих шагах. Поэтому они должны быть включены в B_1 . Номер второго элемента g_2 , по утверждению 4, больше номера первого элемента. Если между элементами g_1 и g_2 имеются еще элементы последовательности X_1 , то их время выполнения будет больше как величины T_2 , так и всех последующих T_i . Заключаем, что они не могут попасть в D . Аналогичным образом на последующих шагах все элементы X_1 , не вошедшие в D , не могут быть включены в формируемое допустимое подмножество. По предположению, любой элемент может попасть в подмножество D только один раз. Тогда элементы из X_1 , уже вошедшие в D , также включаются в B_1 . Утверждение доказано.

Множества Y_i , по определению, включают в себя паретовские элементы из подмножеств A_i , которые содержат все элементы множества начальных данных N , кроме тех, которые входят в B_i . Следовательно, на каждом шаге формирования допустимого подмножества D множество Y_i содержит все оставшиеся элементы множества Парето из последовательности X_1 . Покажем, что и элементы второго паретовского слоя на каждом шаге могут войти в множество Y_i . Из алгоритма формирования паретовских слоев следует, что каждый элемент второго паретовского слоя имеет в множестве Парето хотя бы один элемент, его доминирующий. Предположим, что элемент z_1 второго паретовского слоя доминируется некоторыми элементами множества Парето (обозначим их через R) и не доминируется остальными его элементами. Пусть после реализации некоторого шага было получено, что все элементы из R уже включены в D . Тогда элемент z_1 включается в соответствующее множество Y_i . Таким образом, после каждого включения в подмножество D очередного элемента из X_1 возможно включение в следующее Y_i элементов второго паретовского слоя.

Утверждение 5. Номер элемента z_1 в последовательности X_1 будет больше, чем номер последнего элемента из группы R , который был включен в D .

Справедливость этого утверждения следует из того факта, что элементы последовательности X_1 упорядочены по убыванию вероятности, и элемент z_1 доминируется всеми элементами из группы R . Действительно, по предположению у элементов из множества начальных данных N нет совпадающих значений координат. Тогда z_1 имеет меньшее значение вероятности, чем последний включенный в D элемент из R , а следовательно, и больший номер в последовательности X_1 .

Утверждение 6. Пусть при поиске очередного g_i получено, что ни один последующий элемент X_1 не удовлетворяет условию, что их время выполнения меньше либо равно последнему значению T_i . Тогда ни один элемент из последующих паретовских слоев также не может войти в D .

Доказательство данного утверждения аналогично доказательству утверждения 3. Очевидно, что при выполнении условий утверждения 6 построение подмножества D закончено.

Предположим, что последний элемент последовательности X_1 имеет время выполнения меньшее либо равное T_i . Тогда он включается в подмножество D , и рассмотрение элементов последовательности X_1 закончено. Пусть вычисленное очередное значение величины T_i оказалось больше нуля. Дальнейшее формирование множеств Y_i будет осуществляться следующим образом. Если величина T_i превосходит значение соответствующей координаты верхней критериальной границы второго паретовского слоя, то время выполнения любого из элементов последующих паретовских слоев превосходит величину T , и формирование допустимого подмножества D закончено. В противном случае новое паретовское подмножество Y_i формируется из элементов второго и, возможно, третьего паретовских слоев. Очевидно, что подмножество B_i после включения в D последнего элемента X_1 содержит в себе все элементы этой последовательности. Необходимость последовательного рассмотрения паретовских слоев при построении множеств Y_i следует из утверждения 1 и определения паретовских слоев.

Элементы нового паретовского подмножества Y_i упорядочиваются по убыванию критерия времени выполнения. Дальнейшее построение допустимого подмножества D выполняется с ресурсом времени, равным последнему значению величины T_i . При этом последовательно рассматриваются элементы новой упорядоченной последовательности X_2 . Если последний элемент X_2 вошел в допустимое подмножество и величина $T_i > 0$, то осуществляется переход к построению упорядоченной последовательности X_3 из элементов следующих паретовских слоев. Этот процесс продолжается до тех пор, пока не исчерпан весь ресурс времени T . Как следует из вышеописанного алгоритма, перед началом формирования допустимого подмножества D требуется построение первых двух паретовских слоев. Остальные слои формируются по мере необходимости в зависимости от значений величин T_i .

Определение паретовских слоев, входящих в оптимальное подмножество

Первым множеством Y_1 , с элементов которого начинается построение допустимого подмножества D , является множество Парето на всем наборе начальных данных N . Как следует из вышеприведенного алгоритма, на каждом шаге формирования D находится первый из возможных элементов последовательности X_1 , время выполнения которого меньше либо равно значению величины T . Из способа построения X_1 следует, что может существовать группа элементов, каждый из которых меньше либо равен значению величины T . Любой из таких элементов может порождать новое допустимое подмножество и соответствующие ему паретовские подмножества Y_i . Весь набор допустимых подмножеств, каждый из которых содержит в себе хотя бы один элемент из множества Парето, будет обозначен через W . На каждом шаге построения допустимых подмножеств из W выбор происходит из соответствующего паретовского множества Y_i . Из доказательства утверждения 1 видно, что для любого допустимого подмножества, содержащего хотя бы один элемент, не входящий в Y_i , можно построить допустимое подмножество, принадлежащее W и имеющее большую суммарную вероятность входящих в него элементов. Значит, и оптимальное подмножество Q с максимальной суммарной вероятностью принадлежит группе допустимых подмножеств W . Выше было показано, что в зависимости от значения величины T и при выполнении условий утверждения 6 построение допустимых подмножеств может быть закончено некоторым элементом первой упорядоченной последовательности X_1 . Если условия этого утверждения не выполняются, то требуется построение следующей упорядоченной последовательности X_2 , содержащей элементы второго и третьего паретовских слоев. Этот процесс для каждого допустимого подмножества D_i из W продолжается, пока не будет исчерпан ресурс времени T . Получаем, для каждого отдельного подмножества D_i последним его элементом будет элемент паретовского слоя с некоторым номером, на основе которого сформирована последняя упорядоченная последовательность X_i . Все приведенные рассуждения дают возможность

сформулировать следующее утверждение.

Утверждение 7. Оптимальное подмножество Q , представляющее собой допустимое подмножество с максимальной суммарной вероятностью, имеет следующую структуру:

$$Q = \bigcup_{i=1}^m P_i,$$
 где P_i представляет собой подмножество элементов из множества Парето

во введенном двухкритериальном пространстве; P_i – подмножества элементов, принадлежащих i -му паретовскому слою.

Для построения любого паретовского слоя в двухкритериальных пространствах используется алгоритм поиска в упорядоченных структурах данных, не требующий операций перебора, и сложность этого алгоритма оценивается величиной $O(n^2 \log_2 n)$. Все допустимые подмножества из группы W , которые содержат в себе оптимальное подмножество Q , определяются при помощи операций перебора с элементами только первых ν паретовских слоев. Алгоритм построения всех допустимых подмножеств из W требует отдельного рассмотрения и в данной работе не рассматривается. Из алгоритма построения допустимых подмножеств следует, что при увеличении (уменьшении) значения ресурса T число паретовских слоев ν , из элементов которых формируются допустимые подмножества из W , также может увеличиться (уменьшится). Таким образом, при использовании предлагаемой математической модели определение того, какие элементы могут входить в оптимальное подмножество Q , а какие исключаются из дальнейшего рассмотрения, зависит от значения величины T и не зависит от величины элементов в множестве N .

Область эффективного применения предлагаемого метода для решения задачи о ранце может быть определена следующим образом. Как уже отмечалось, методы решения задачи о ранце представляют собой различные способы перебора всех элементов множества начальных данных N . Предложенный метод будет тем эффективнее, чем меньше число элементов из N потребуется для нахождения оптимального подмножества. При уменьшении значения ресурса T число паретовских слоев ν также уменьшается. Однако важно в этом случае уменьшение числа ν относительно общего количества паретовских слоев, полученных после разбиения на слои множества N . Пусть $F = T/Z$, где Z представляет собой сумму времени выполнения всех элементов начального множества N . Если $F \geq 1$, что означает, что размер ранца больше либо равен времени выполнения всех элементов начального множества N , то N представляет собой единственное допустимое подмножество, и постановка оптимизационной задачи о ранце теряет смысл. Будем полагать, что $F < 1$. Тогда F с определенной степенью точности можно интерпретировать как величину, показывающую, какую часть от общего числа паретовских слоев покрывает заданный размер ранца T . Пусть величина F в рассматриваемой задаче о ранце имеет значение, достаточно близкое к нулю. Тогда число паретовских слоев, а следовательно, и требуемых для построения оптимального подмножества элементов может быть существенно меньше их количества на множестве N . В этом случае применение предлагаемого метода становится наиболее эффективным.

При проведении всех предыдущих рассуждений предполагалось, что у элементов начального множества N нет совпадающих значений отдельных координат в двухкритериальном пространстве. Рассмотрим два случая совпадения координат. Первый вариант: существует элемент из множества Парето, который доминирует некоторый элемент из второго паретовского слоя и имеет с ним одинаковое время выполнения. Тогда значение его второй координаты (вероятности достижения цели) будет больше, чем значение вероятности у доминируемого элемента. Поэтому необходимость приоритетного выбора доминирующего элемента для включения в формируемое допустимое подмножество очевидна. Второй вариант: доминирующий и доминируемый элемент имеют одинаковые вероятности, но разное время выполнения. Пусть для включения в подмножество D выбирается доминируемый элемент с большим значением времени выполнения. Несмотря на то, что на всех шагах остальные элементы выбирались в соответствии с утверждением 1, общее время их выполнения может оказаться больше ресурса времени T . Тогда суммарная вероятность будет одинаковая в двух способах построения допустимого подмножества. Однако при выборе доминируемого элемента полученное подмножество может не быть допустимым. Тогда и во втором случае требуется выбирать доминирующий элемент из соответствующего паретовского подмножества Y_i .

Заклучение

В работе представлен способ решения оптимизационной задачи о ранце на основе предложенной многокритериальной математической модели. Введение транзитивного двухкритериального пространства предпочтений на множестве начальных данных N позволило определить структуру оптимального подмножества Q как объединение групп подмножеств, принадлежащих первым m паретовским слоям, на которые разбивается множество начальных данных N . Предложенный в работе способ позволяет не рассматривать при построении допустимых подмножеств элементы из N , входящие во все последующие паретовские слои с номерами, большими, чем m . Тогда общее число операций, требуемых для решения рассматриваемой задачи в значительной степени зависит от значения величины T , а не от числа элементов в множестве N .

Список литературы

1. Альсведе Р., Вегенер И. Задачи поиска. М.: Мир, 1982. 367 с.
2. Посыпкин М.А. Комбинированный параллельный алгоритм решения задачи о ранце // Труды IV Междунар. конф. «Параллельные вычисления и задачи управления». Москва, 27–29 октября 2008 г. С. 177–189.
3. Martello S., Toth P. Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations. N.Y.: John Wiley&Sons, 1990. 308 p.
4. Чебаков С.В. Двухкритериальная модель построения оптимального подмножества альтернатив с максимальной суммарной вероятностью достижения цели // Вести НАН Беларуси. Сер. физ.-мат. наук. 2005. № 2. С. 112–118.
5. Kung H.F., Preparata F.P. On finding the maxima of a set of vectors // Journal of the Association for Computing Machinery. 1975. Vol. 22. P. 469–476.

References

1. Al'svede R., Vegener I. Zadachi poiska. M.: Mir, 1982. 367 s. (in Russ.)
2. Posypkin M.A. Kombinirovannyj parallel'nyj algoritm reshenija zadachi o rance // Trudy IV Mezhdunar. konf. «Parallelnye vychislenija i zadachi upravlenija». Moskva, 27–29 oktjabrja 2008 g. S. 177–189. (in Russ.)
3. Martello S., Toth P. Knapsack Problems: Algorithms and Computer Implementations. N.Y.: John Wiley&Sons, 1990. 308 p.
4. Chebakov S.V. Dvuhkriterial'naja model' postroenija optimal'nogo podmnozhestva al'ternativ s maksimal'noj summarnoj verojatnost'ju dostizhenija celi // Vesti NAN Belarusi. Ser. fiz.-mat. nauk. 2005. № 2. S. 112–118. (in Russ.)
5. Kung H.F., Preparata F.P. On finding the maxima of a set of vectors // Journal of the Association for Computing Machinery. 1975. Vol. 22. P. 469–476.

Информация об авторах

Чебаков С.В., к.ф.-м.н., с.н.с. Объединенного института проблем информатики НАН Беларуси.

Серебряная Л.В., к.ф.-м.н., доцент кафедры программного обеспечения информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Chebakov S.V., PhD, senior researcher of the United Institute of Informatics Problems of NAS of Belarus.

Serebryanaya L.V., PhD, associate professor of the information technology software department of 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. +375297739509;
e-mail: l_silver@mail.ru
Серебряная Лия Валентиновна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-773-95-09;
e-mail: l_silver@mail.ru
Serebryanaya Liya Valentinovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-80-86>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.75

МОНИТОРИНГ ТЕХНОГЕННЫХ ОБЪЕКТОВ, ДОСТУПНЫХ ИЗ СЕТИ ИНТЕРНЕТ

СМОЛЯК Д.С., ПЕТРОВ С.Н., ПУЛКО Т.А.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 11 марта 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Исследована возможность обнаружения и мониторинга техногенных объектов Республики Беларусь, доступных из сети Интернет. Предложен метод обнаружения, основанный на анализе данных публичных сервисов Shodan и Censys. Разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать мониторинг.

Ключевые слова: автоматизированная система управления технологическим процессом, Интернет вещей, мониторинг, информационная безопасность.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Смоляк Д.С., Петров С.Н., Пулко Т.А. Мониторинг техногенных объектов, доступных из сети Интернет. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 80-86.

MONITORING OF INTERNET-FACING TECHNOGENIC OBJECTS

SMOLIAK D.S., PETROV S.N., PULKO T.A.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 11 March 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The approach to detection and monitoring of Internet-facing technogenic objects has been described. The method of analysis of public services Shodan and Censys has been proposed. The automation monitoring software has been developed.

Keywords: supervisory control and data acquisition, Internet of Things, monitoring, information security.

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

For citation. Smoliak D.S., Petrov S.N., Pulko T.A. Monitoring of Internet-facing technogenic objects. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 80-86.

Введение

Информационные системы техногенных объектов содержат элементы традиционных информационных систем, такие как серверы приложений, базы данных, сетевые устройства, и специфические элементы, относящиеся к промышленным сетям, программируемые логические контроллеры (Programmable Logic Controller, PLC), распределенные системы управления (Distributed Control System, DCS), системы управления зданиями (building management systems, BMS). Повышение сложности системы увеличивает риски возникновения ошибок и, как следствие, компрометации информационной системы. В случае с техногенными объектами последствия компрометации могут быть катастрофическими. Одним из векторов компрометации информационных систем является небезопасная настройка. Умышленные и случайные ошибки в настройке средств защиты информации и прикладного программного обеспечения могут привести к тому, что элементы информационных систем техногенных объектов станут доступны из сети Интернет.

В данной статье предложен метод обнаружения элементов промышленных сетей техногенных объектов Республики Беларусь, доступных из сети Интернет, основанный на анализе открытых данных, содержащих результаты сканирования всего диапазона адресов протокола IP версии 4. Авторами разработано программное обеспечение, позволяющее автоматизировать поисковые запросы и агрегировать их результаты, что дает возможность своевременно обнаружить доступные из сети Интернет устройства и принять меры по снижению или устранению рисков компрометации информационной системы техногенного объекта.

Теоретический анализ

Вопросы информационной безопасности техногенных объектов являются критически важными для государств ввиду тяжести возможных последствий от успешной реализации угроз информационной безопасности. В качестве примера можно привести взлом системы управления водоснабжением США, произошедший в 2011 году [1]. Данной атакой были затронуты программируемые логические контроллеры, управляющие водоснабжением. Также показательным примером является атака с помощью вредоносного программного обеспечения BlackEnergy на энергетическую систему Украины, результатом которой были сбои в электроснабжении отдельных населенных пунктов [2]. Таким образом, техногенные объекты требуют пристального внимания в отношении вопросов информационной безопасности.

В качестве мер по предупреждению инцидентов и повышению осведомленности государственные регуляторы в области информационной безопасности выпускают различные требования и рекомендации по обеспечению информационной безопасности критически важных объектов, к которым относятся техногенные объекты. В частности, Национальный институт стандартов и технологий США (The National Institute of Standards and Technology, NIST) в рамках серии публикаций, посвященных информационной безопасности, выпустил руководство по обеспечению безопасности промышленных систем управления [3]. Руководство содержит ряд мер, направленных на повышение защищенности промышленных систем управления. Одной из мер, рассматриваемой в политике межсетевое экранирования, является явный запрет на подключение промышленных сетей к сети Интернет.

Тем не менее из сети Интернет доступно огромное количество устройств, являющихся частью промышленных сетей предприятий, что ставит под угрозу безопасность информационных систем, частью которых они являются [4–6].

В связи с этим возникает необходимость в мониторинге и своевременном обнаружении доступных из сети Интернет промышленных устройств и принятию мер по предотвращению угроз, связанных с их возможной компрометацией.

Методы обнаружения промышленных устройств

Для того чтобы получить информацию о подключенных к сети Интернет устройствах, можно осуществить сканирование диапазона IP-адресов на наличие открытых портов, определить сервисы, работающие на открытых портах. Трудоемкость этой задачи зависит от диапазона сканируемых IP-адресов, и как следствие, большие диапазоны адресов требуют большого времени сканирования. Более эффективным методом является использование готовых результатов сканирования всего диапазона адресов протокола IP версии 4. Такие результаты предоставляют сервисы Shodan и Censys.

Сервисы Shodan и Censys агрегируют результаты сканирования и предоставляют доступ к ним с помощью поисковых запросов. Каждый из сервисов обладает собственным набором ключевых слов для осуществления поисковых запросов. Таким образом, для поиска одинаковой информации необходимо использовать уникальные для каждого сервиса поисковые запросы.

Сервис Shodan поддерживает полнотекстовый поиск, фильтры и метки. Полнотекстовый поиск позволяет получать результаты в случае отсутствия точных параметров запроса, фильтры позволяют задать точные параметры запроса, метки позволяют осуществлять поиск по заданным разработчиками категориям.

Для поиска промышленных устройств в сервисе Shodan авторы выделили следующие методы, представленные в табл. 1.

Таблица 1. Методы поиска в Shodan
Table 1. Search methods in Shodan

Метод поиска	Ключевые слова запроса	Примечания
Поиск по меткам	scada ics plc	
Поиск по номеру порта протокола промышленной сети	port:502 port:102 port:1911,4911 port:20000 port:47808 port:44818 port:18245,18246 port:5094 port:1962 port:5006,5007 port:9600 port:789 port:2455 port:2404 port:20547	протокол Modbus протокол Siemens S7 протокол Fox протокол DNP3 протокол BACNET протокол EtherNet/IP протокол GE-SRTP протокол HART IP протокол PCWorx протокол MELSEC-Q протокол FINS протокол Red Lion протокол CODESYS протокол IEC 60870-5-104 протокол ProConOS

Пример поискового запроса для протокола Modbus в сервисе Shodan представлен на рис. 1.

Сервис Censys, так же как и Shodan, поддерживает полнотекстовый поиск, фильтры и метки. Кроме того, поддерживаются логические операторы, такие как «AND», «OR». Для фильтрации выдачи можно перечислить порт, протокол, метод, диапазон IP-адресов, географическое положение или ограничения по дате. Censys осуществляет еженедельное сканирование всего диапазона адресов протокола IP версии 4 для промышленных протоколов Siemens S7, MODBUS, Niagara Fox, DNP3, BACnet.

Для поиска промышленных устройств в сервисе Censys авторы выделили следующие методы, представленные в табл. 2.

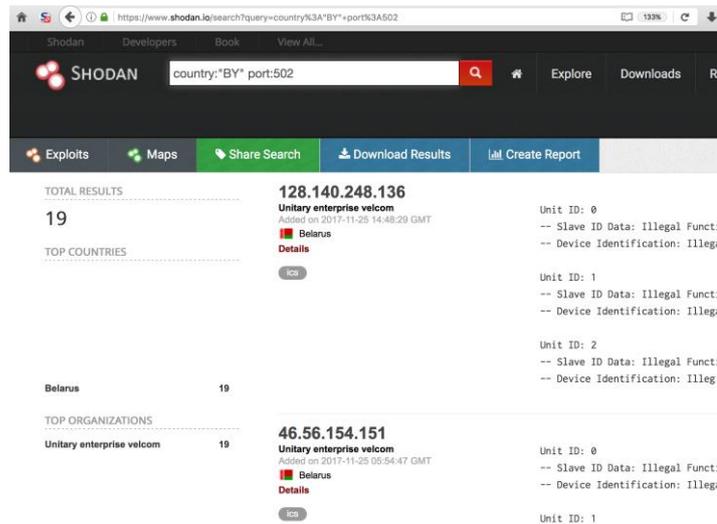


Рис. 1. Поисковой запрос Shodan – Modbus
Fig. 1. Search query Shodan – Modbus

Таблица 2. Методы поиска в Censys
Table 2. Censys Search Methods

Метод поиска	Ключевые слова запроса	Примечания
Поиск по меткам	scada scada server scada router building control modbus bacnet fox	
Поиск по номеру порта протокола промышленной сети	protocols:"502/modbus" protocols:"102/s7" protocols:"1911/fox" protocols:"20000/dnp3" protocols:"47808/bacnet"	протокол Modbus протокол Siemens S7 протокол Fox протокол DNP3 протокол BACNET

Пример поискового запроса для протокола Modbus в сервисе Censys представлен на рис. 2.

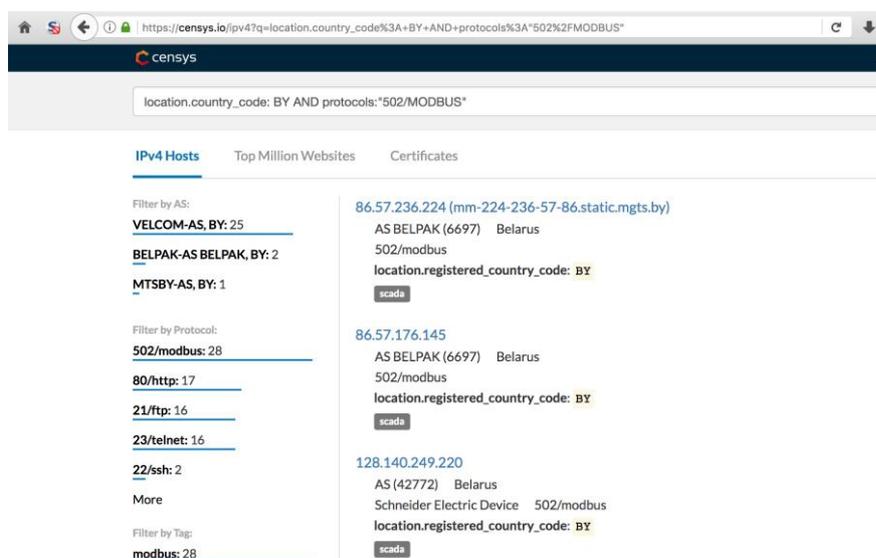


Рис. 2. Поисковой запрос Censys – Modbus
Fig. 2. Search query Censys – Modbus

Таким образом, сервисы Shodan и Censys могут быть использованы для получения информации о доступных из Интернет промышленных устройствах, являющихся частью информационных систем техногенных объектов.

Автоматизированный мониторинг промышленных устройств

Сервисы Shodan и Censys обладают интерфейсами прикладного программирования (Application Programming Interface, API). Это позволяет осуществлять поисковые запросы к сервисам из разработанных сторонними разработчиками приложений. Эта возможность использовалась авторами для создания программного обеспечения автоматизации мониторинга scadamonitor.py (рис. 3).

```
root@kali:~# scadamonitor.py --help
usage: scadamonitor.py [-h] [--country COUNTRY] [--tag TAG] [--engine ENGINE]
                    [--output OUTPUT] [--proto PROTO]

optional arguments:
  -h, --help            show this help message and exit
  --country COUNTRY     Select 2-digit country region. Default = "by"
  --tag TAG             Select search tag. Default = "scada"
  --engine ENGINE       Select search engine (shodan,censys,all). Default = "all"
  --output OUTPUT       Select output format (json, csv, screen, all). Default =
                        "screen"
  --proto PROTO        Select search protocols (S7, modbus, bacnet, fox, all).
                        Default = "all"
```

Рис. 3. Программное обеспечение scadamonitor.py
Fig. 3. Scadamonitor.ru software

Разработанное программное обеспечение scadamonitor.py позволяет автоматизировать поиск информации в сервисах Shodan и Censys, агрегировать результаты поиска, осуществлять экспорт результатов поиска в форматах CSV и JSON. В качестве языка программирования использовался Python ввиду удобства его использования.

Пример автоматизации поисковых запросов для IP-адресов, относящихся к диапазону Республики Беларусь, приведен на рис. 4.

```
root@kali:~# scadamonitor.py

===== Task params =====
Country: BY
Tags: scada
Engine: all
Output: screen
Protocols: all

===== Shodan search started =====
0 results found
===== Shodan search finished =====

===== Censys search started =====
37 results found

===== Censys results =====
86.57.236.224 - 502/modbus
37.17.110.182 - 102/s7
86.57.176.145 - 502/modbus
46.56.155.3 - 502/modbus
37.17.96.124 - 502/modbus
37.212.17.70 - 47808/bacnet
128.140.249.220 - 502/modbus
178.163.162.131 - 502/modbus
128.140.249.7 - 502/modbus
128.140.249.155 - 502/modbus
128.140.249.156 - 502/modbus
46.56.148.121 - 502/modbus
128.140.249.6 - 502/modbus
86.57.167.80 - 502/modbus
```

Рис. 4. Пример работы программного обеспечения мониторинга
Fig. 4. Example of monitoring software

Описание параметров, используемых программным обеспечением, приведено в табл. 3.

Таблица 3. Входные параметры scadamonitor.py
Table 3. Input parameters of scadamonitor.ru

Параметр	Значение	Значение по умолчанию	Описание
--help	–	–	получение справочной информации
--country	by	by	выбор географического диапазона IP-адресов
--tag	scada, ics, plc	scada	используемая метка поиска
--engine	shodan, censys, all	all	используемый сервис поиска, значение all означает поиск во всех сервисах
--output	json, csv, screen, all	screen	формат вывода результатов поиска, screen означает вывод результатов на экран, CSV – вывод в файл в формате CSV, JSON – вывод в файл в формате JSON
--proto	S7, modbus, bacnet, fox, all	all	поддерживаемые протоколы, значение all означает поиск по всем протоколам (s7, modbus, bacnet, fox)

Заключение

Рассмотрена возможность обнаружения техногенных объектов, доступных из сети Интернет. Проанализирована возможность использования общедоступных сервисов, содержащих информацию о результатах сканирования всего диапазона адресов протокола IP версии 4. В результате поиска обнаружены промышленные устройства, подключенные к сети Интернет. Разработано программное обеспечение, позволяющее осуществлять мониторинг в сервисах Shodan и Censys по ключевым словам и протоколам.

Список литературы / References

1. SCADA-based water system hacked [Electronic resource]. URL: <https://www.scmagazineuk.com/scada-based-water-system-hacked/article/547552> (date of access: 11.02.2019).
2. Cyber-Attack Against Ukrainian Critical Infrastructure [Electronic resource]. URL: <https://ics-cert.us-cert.gov/alerts/IR-ALERT-H-16-056-01> (date of access: 11.01.2019).
3. Guide to Industrial Control Systems (ICS) Security [Electronic resource]. URL: <http://nvlpubs.nist.gov/nistpubs/SpecialPublications/NIST.SP.800-82r2.pdf> (date of access: 12.01.2019).
4. Traffic light controls – Shodan finds the Internet's most dangerous spots [Electronic resource]. URL: <http://money.cnn.com/gallery/technology/security/2013/05/01/shodan-most-dangerous-internet-searches/index.html> (date of access: 11.01.2019).
5. Project SHINE: 1,000,000 Internet-Connected SCADA and ICS Systems and Counting [Electronic resource]. – URL: <http://www.tofinosecurity.com/blog/project-shine-1000000-internet-connected-scada-and-ics-systems-and-counting> (date of access: 11.01.2019).
6. SCADA cybersecurity in the age of the Internet of Things [Electronic resource]. URL: <https://www.controleng.com/single-article/scada-cybersecurity-in-the-age-of-the-internet-of-things/94eccaddb83842690e375274395e629e.html> (date of access: 21.01.2019).
7. Shodan [Electronic resource]. URL: <https://www.shodan.io> (date of access: 20.02.2019).
8. Censys [Electronic resource]. URL: <https://censys.io> (date of access: 20.02.2019).

Сведения об авторах

Смоляк Д.С., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Smoliak D.S., postgraduate student of information security department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Петров С.Н., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Petrov S.N., PhD, associate professor, associate professor of information security department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Пулко Т.А., к.т.н., доцент, доцент кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Pulko T.A., PhD, associate professor, associate professor of information security department of 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. +375-17-293-85-58;
e-mail: smoliakd@gmail.com
Смоляк Дмитрий Сергеевич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-58;
e-mail: smoliakd@gmail.com
Smoliak Dmitry Sergeevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-87-94>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.216:546.824-31

МОДЕЛЬ ПРОПУСКАНИЯ СВЕТА В ДИАПАЗОНЕ 400–700 НМ МНОГОСЛОЙНЫМИ ЭЛЕКТРОПРОВОДЯЩИМИ ПОКРЫТИЯМИ СИСТЕМЫ Cu-ZrO₂

ВОЛОЧКО А.Т.¹, ЗЕЛЕНИН В.А.¹, НАРУШКО Е.О.¹, СКИЛОНДЬ А.В.², МАРКОВ Г.В.¹

¹Физико-технический институт НАН Беларуси, Республика Беларусь

²Институт тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 4 июля 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Разработана модель пропускания в оптическом диапазоне длин волн многослойными покрытиями, состоящими из чередующихся слоев меди и диоксида циркония, нанесенными на подложки из стекла марки К8. В основу модели положены законы интерференции света. Показано, что пропускание в оптическом диапазоне слоя Cu толщиной 60 нм при поверхностном сопротивлении $\rho = 10$ Ом/кв составляет 4–5 %, а пропускание покрытия ZrO₂/Cu/ZrO₂/Cu/К8, полученного разделением слоя меди толщиной 60 нм на два подслоя по 30 нм с нанесением на них просветляющих слоев ZrO₂, при $\rho = 1,2$ Ом/кв достигает 25 %. Рассчитаны толщины и количество слоев системы Cu-ZrO₂, обеспечивающих пропускание в диапазоне длин волн 400–700 нм не менее 45 %. Определена допустимая толщина слоев Cu (≥ 20 нм), ниже которой, вследствие их островковой структуры и частичного окисления с образованием Cu₂O, резко снижается электропроводность многослойного покрытия ($\rho \geq 100$ Ом/кв).

Ключевые слова: многослойные покрытия, пропускание света, островковая структура, электропроводность, экранирование электромагнитных излучений.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Волочко А.Т., Зеленин В.А., Нарушко Е.О., Скилондь А.В., Марков Г.В. Модель пропускания света в диапазоне 400–700 нм многослойными электропроводящими покрытиями системы Cu-ZrO₂. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 87-94.

MODEL OF TRANSMISSION OF MULTILAYER COATINGS BASED ON THE Cu-ZrO₂ SYSTEM IN THE OPTICAL WAVELENGTH RANGE

VOLOCHKO A.T.¹, ZELENIN V.A.¹, NARUSHKO E.O.¹, SKILONDZ A.V.², MARKOV G. V.¹

¹Institute of Physics and Technology of NAS of Belarus, Republic of Belarus

²Institute of Heat and Mass Transfer Named after A.V. Lykov of NAS of Belarus, Republic of Belarus

Submitted 4 July 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The transmission model for optical diapason was developed for multilayer coatings consisting of alternating layers of copper and zirconium dioxide deposited on K8 glass substrates. The model is based

on the laws of light interference. It was shown that the transmission in the optical range of a 60 nm thick Cu layer with a surface resistance $\rho = 1 \text{ Ohm/sq}$ is 4–5 %, and the transmission of the $\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{K8}$ coating obtained by dividing a 60 nm thick copper layer into two sublayers at 30 nm with the application of antireflection layers of ZrO_2 on them, at $\rho = 1.2 \text{ Ohm/sq}$ it reaches 25 %. The thicknesses and the number of layers of the Cu-ZrO₂ system were calculated, which ensure a transmission in the wavelength range of 400–700 nm of at least 45 %. The permissible thickness of Cu layers ($\geq 20 \text{ nm}$) was determined, below which, due to their insular structure and partial oxidation with the formation of Cu_2O , the electrical conductivity of the multilayer coating sharply decreases ($\rho \geq 100 \text{ Ohm/sq}$).

Keywords: multilayer coatings, light transmission, island structure, electrical conductivity, shielding of electromagnetic radiation.

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

For citation. Volochko A.T., Zelenin V.A., Narushko E.O., Skilondz A.V., Markov G. V. Model of transmission of multilayer coatings based on the Cu-ZrO₂ system in the optical wavelength range. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 87-94.

Введение

Защиту изделий электронной техники от электромагнитных излучений (ЭМИ) осуществляют их экранированием металлическими листами, фольгами, сетками и наносимыми на защищаемые объекты покрытиями, например, токопроводящими красками на основе коллоидного серебра, или гальваническими покрытиями. Использование для защиты от ЭМИ тонкоплёночных вакуумных покрытий, сочетающих металлические и оксидные слои, является одним из малоизученных и перспективных направлений. Актуальность работы обусловлена как требованиями к помехозащищенности электронных устройств, так и необходимостью обеспечения высокой оптической прозрачности покрытий при защите экранов мониторов.

Ввиду высокой плотности свободных электронов ($\sim 10^{22} \text{ см}^{-3}$), даже тонкие (150 нм) металлические покрытия отражают большую часть света, а оставшуюся часть поглощают. Например, плёнка Ag толщиной 200 нм практически полностью отражает электромагнитное излучение (ЭМИ) в видимом диапазоне длин волн. Слои с более низкой электропроводностью, например, Co, при толщине 100 нм отражают 40–50 %, поглощают 50–40 %, а их пропускание составляет до 10 % [1]. Таким образом, чем ниже электрическое сопротивление покрытия, тем выше отражение ЭМИ в видимом диапазоне длин волн, что справедливо также и для радиочастотного диапазона и может быть использовано при проектировании защитных экранов ЭМИ.

Особую сложность представляет формирование экранирующих ЭМИ радиочастотного диапазона покрытий на экранах мониторов, поскольку необходимо, чтобы они были оптически прозрачными. В настоящее время для этих целей чаще всего применяют покрытия на основе оксидов $\text{In}_2\text{O}_3+\text{SnO}_2$ (Indium tin oxide или ИТО) [1,2].

ИТО-покрытие имеет высокое светопропускание (около 90 %), но оно не способно защитить электронный объект при частотах ЭМИ до 100 кГц ввиду достаточно высокого поверхностного электросопротивления, свойственного полупроводникам (10 Ом/кв и более). В связи с этим была поставлена задача повысить эффективность экранирования ЭМИ в широком диапазоне частот при обеспечении высокого светопропускания ($\geq 50 \%$). В работах [3–6] показано, что для этих целей лучше всего подходят многослойные, состоящие из чередующихся слоев металла и диэлектрика, покрытия.

Разработка модели пропускания света многослойными структурами

Нанесенное на стекло марки K8 покрытие из меди уже при толщине слоя 60 нм пропускает только 4–5 % света. При нанесении поверх Cu слоя ZrO_2 толщиной 75 нм, соответствующей условию просветления, пропускание структуры $\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{K8}$ увеличивается до 8–9 %. Требуемое для нанесения на экран монитора пропускание света ($\geq 50 \%$) достигается при толщинах слоя меди в структурах $\text{ZrO}_2/\text{Cu}/\text{K8}$ $h_m \leq 35 \text{ нм}$ (рис. 1). Выбор в качестве материала просветляющего слоя ZrO_2 был сделан ввиду его высокой твёрдости и стабильности свойств, сохраняющих высокое качество поверхности экрана при эксплуатации [7, 8].

Принимая, что пропускание многослойного покрытия на основе повторяющейся пары Cu-ZrO₂ аналогично пропусканию двухслойного покрытия Cu-ZrO₂ с учетом поправочного коэффициента (рис.1), который учитывает изменение пропускания на границе материалов при переходе от двухслойного покрытия к многослойному, была записана модель наложения поглощений двухслойных покрытий:

$$\varepsilon_{T\Sigma}(n) = (A)^{n-1} (\varepsilon_{T,n=1})^n, \quad (1)$$

где $\varepsilon_{T\Sigma}(n)$ – коэффициент пропускания многослойного покрытия, n – число слоев покрытия, $\varepsilon_{T,n=1}$ пропускание двухслойного покрытия Cu-ZrO₂, полученного экспериментально.

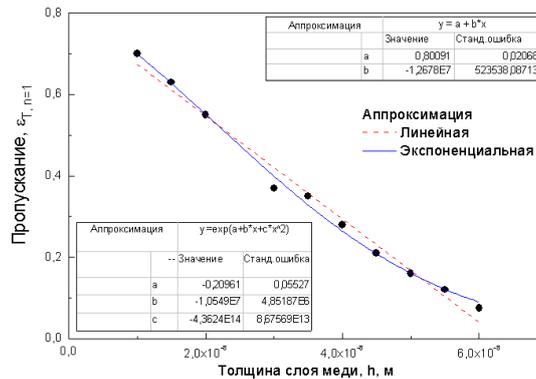


Рис. 1. Зависимости пропускания покрытия Cu-ZrO₂ для одного слоя толщиной h м с указанием возможных аппроксимаций

Fig. 1. Transmission dependences of the Cu-ZrO₂ coating for a single layer of thickness h m with an indication of possible approximations

Схематическое изображение хода лучей в структурах Cu/K8 и ZrO₂/Cu/K8 представлено на рис. 2. Случаи разделения слоя Cu на 2 и на 3 подслоя с просветлением слоями ZrO₂ представлены на рис. 3.

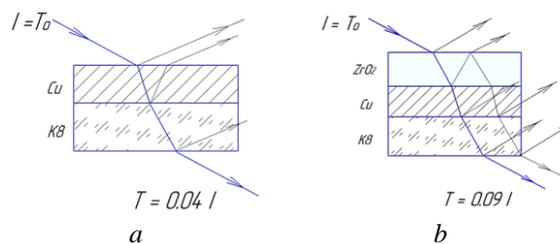


Рис. 2. Схематическое изображение хода лучей в структурах Cu/K8 и ZrO₂/Cu/K8: a – без ZrO₂; b – с просветляющим слоем

Fig. 2. Schematic representation of the ray path in structures Cu/K8 and ZrO₂/Cu/K8: a – without ZrO₂; b – with antireflection layer

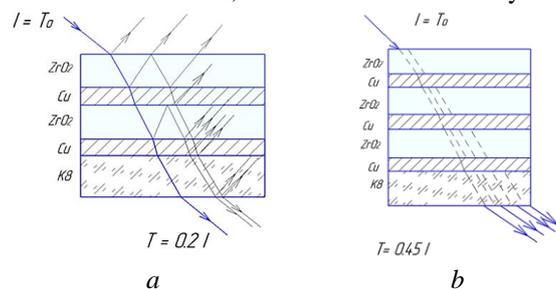


Рис. 3. Схематическое изображение хода лучей: a – с разделением слоя Cu на 2 подслоя с просветлением; b – с разделением слоя Cu на 3 подслоя с просветлением

Fig. 3. Schematic representation of the ray path: a – with the separation of the Cu layer into 2 sublayers with antireflection layer; b – with separation of the Cu layer into 3 sublayers with antireflection layer

При увеличении пар слоев Cu-ZrO₂, если сумма толщин подслоев Cu остается равной 60 нм, эквивалентное пропускание света увеличивается. Это связано с увеличением количества границ раздела, на которых происходит многократное отражение луча света и, как следствие, – увеличение его интенсивности на выходе из многослойной структуры. Подбирая коэффициент A таким образом, чтобы зависимость $\varepsilon_{T\Sigma}(n)$ проходила через экспериментальные точки при $n = 1$ и $n=2$, находим значение $A = 1,37$.

Хотя представляется логичным возможность аппроксимировать систему с поглощением простой экспоненциальной зависимостью, подобно закону Ламберта-Бера, зависимость $\varepsilon_{T,n=1}$ от толщины слоя меди плохо аппроксимируется функцией вида e^{-xh} . Поэтому для аппроксимации выбрана линейная функция и квадратичная экспоненциальная, как указано на рис.1. В случае применения линейной аппроксимации $\varepsilon_{T,n=1}(n)$ имеет следующий вид:

$$\varepsilon_{T,n=1}(n) = 0,8009 - 1,268 \cdot 10^7 \cdot \frac{H}{n}. \quad (2)$$

Логично предположить, что первый член формулы (2), который не зависит от толщины слоя меди, представляет собой пропускание всех элементов покрытия и подложки, но не учитывает поглощение света медью. Второй член $-1,268 \cdot 10^7 h$ отвечает за поглощение света в слое меди.

Применяем для описания пропускания света однослойным покрытием аппроксимирующую формулу

$$\varepsilon_{T,n=1}(h) = 0,8009 \cdot e^{-1,055 \cdot 10^7 h} \cdot e^{-4,3624 \cdot 10^{14} h^2}, \quad (3)$$

где величина 0,8109 не зависит от толщины слоя меди и представляет собой пропускание всех элементов покрытия и подложки, но не учитывает поглощение света медью; $e^{-1,055 \cdot 10^7 h} e^{-4,3624 \cdot 10^{14} h^2}$ отвечает за поглощение в одном слое меди однослойного покрытия. Часть $e^{-1,055 \cdot 10^7 h}$ описывает поглощение, которое возникает вследствие взаимодействия света со свободными электронами. Такой характер влияния члена $e^{-1,055 \cdot 10^7 h}$ можно предположить исходя из определения закона поглощения Ламберта-Бера, а также учитывая характер зависимости $\varepsilon_{T,n=1}$ от удельной электропроводности. При $n > 2$ значение $\sigma(n)$ резко уменьшается, уменьшается и вклад поглощения за счет взаимодействия света со свободными электронами. Полагая, что $e^{-1,055 \cdot 10^7 h} = 1$ при $n > 2$, подставляем полученную функцию $\varepsilon_{T,n=1}(h)$ в формулу (3). Упрощенный вид полученной зависимости для $\varepsilon_{T\Sigma}(n)$ примет вид:

$$\varepsilon_{T\Sigma}(n) = \begin{cases} 0,8109 e^{-4,3624 \cdot 10^{14} nh^2} e^{-1,055 \cdot 10^7 hn}, & n < 2 \\ 0,8109 e^{-4,3624 \cdot 10^{14} nh^2}, & n > 2 \end{cases}. \quad (4)$$

Такая модель учитывает общие принципы и законы поглощения света, избегая прямого учета величин поглощения и пропускания, но основывается на полученных экспериментальных данных.

Методика эксперимента

В качестве метода нанесения слоев многослойного покрытия был выбран электронно-лучевой. Процесс электронно-лучевого испарения является наиболее приемлемым, так как позволяет получать слои Cu и ZrO₂ с высокой адгезией к основе и к нижележащим слоям без разгерметизации вакуумной камеры. Качество получаемых покрытий соответствует требованиям, предъявляемым, например, к просветляющим слоям изделий оптической

промышленности. В качестве подложек для нанесения покрытий использовали пластины из стекла марки К8 размерами $45 \times 90 \times 2$ мм³.

Для контроля оптических характеристик покрытий была использована система контроля на базе спектрометра EOS45 серии IRIS, встроенная в вакуумную установку ВУ - 1А. Обсолютная погрешность измерения составляла не более 1 %.

Измерения поверхностного сопротивления покрытий осуществляли четырёхзондовым методом. Толщину слоёв меди контролировали по пропусканию света на длине волны 560 нм с погрешностью до 3 нм. Нанесение ZrO_2 на слои меди проводили со скоростью 0,5 нм/с при температуре 120 °С, давлении напускаемого в камеру кислорода $2 \cdot 10^{-2}$ Па и контролировали по отражению света. Для измерения поверхностного сопротивления многослойных покрытий с верхним слоем из оксида циркония перед его нанесением контактные площадки закрывали маской.

Результаты и их обсуждение

Результаты исследования влияния толщины пленки меди на пропускание ЭМИ в видимом диапазоне длин волн до и после нанесения на нее просветляющего слоя ZrO_2 , а также влияния количества пар слоев Cu/ZrO_2 на пропускание света многослойными структурами системы $Cu-ZrO_2$ приведены на рис. 1. Установлено, что при неизменной суммарной толщине подслоев меди, равной 60 нм, пропускание многокомпонентного покрытия тем выше, чем больше в нем пар слоев (рис. 4).

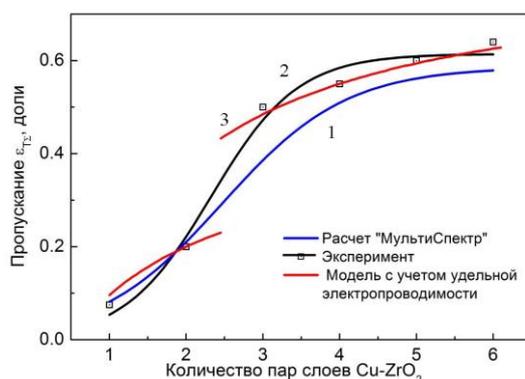


Рис. 4. Зависимости пропускания света структурами $Cu-ZrO_2$ от количества подслоев N
Fig. 4. The dependence of the transmission light structures $Cu-ZrO_2$ from the number of sublayers N

Установлено также, что при скорости осаждения 0,2 нм/с полученные электронно-лучевым испарением меди марки М0 при температуре подложки из стекла К8 120 °С и давлении в вакуумной камере $5 \cdot 10^{-3}$ Па пленки меди толщиной 60 нм имеют поверхностное сопротивление 1–1,2 Ом/кв. Пленки толщиной 30, 20, 15 и 10 нм имеют поверхностное сопротивление 2,5, 4,5, 20 и 100 Ом/кв соответственно (рис. 5).

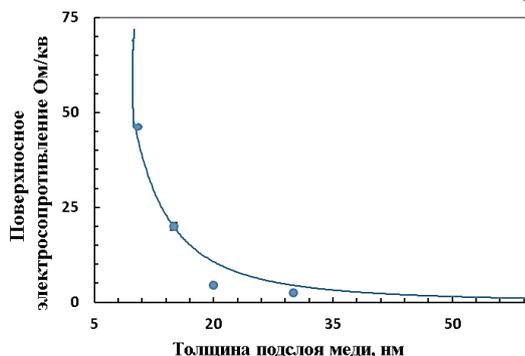


Рис. 5. Зависимость поверхностного сопротивления слоев меди от толщины
Fig. 5. The dependence of surface resistance layers from the thickness of copper

С целью установления причин столь резкого повышения поверхностного сопротивления пленок меди со снижением их толщины были проведены исследования их структуры и фазового состава.

Результаты исследования структуры пленок меди толщиной 15, 20 и 30 нм, нанесенных на скол по плоскости (100) монокристалла NaCl, приведены на рис. 6. При толщине 15 нм (рис. 6, *a*) пленка меди имеет островковую структуру. Это повышает пропускание в видимом диапазоне длин волн, но значительно снижает их электропроводность и эффективность экранирования ими ЭМИ в радиочастотном диапазоне.

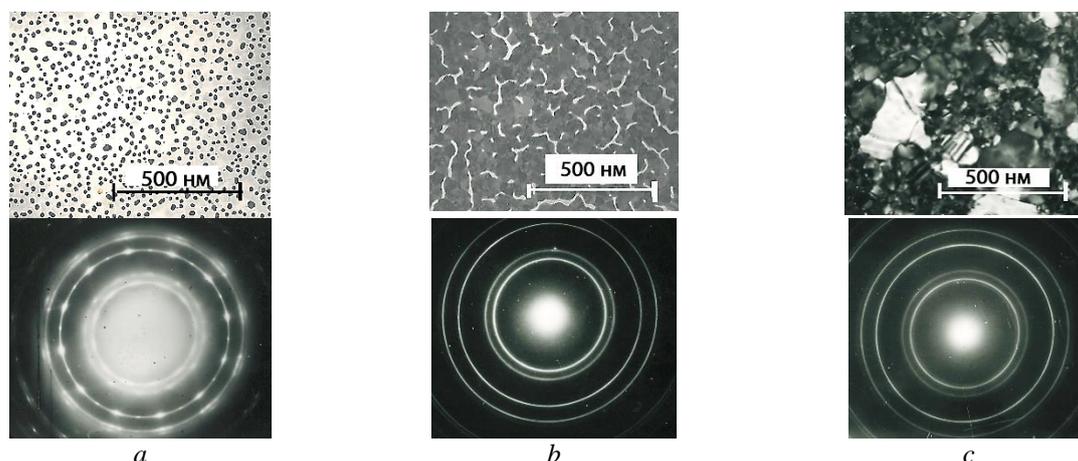


Рис. 6. Структура покрытий из меди марки М0 и их электронограммы различной толщины:

a – 15 нм; *b* – 20 нм; *c* – 30 нм

Fig. 6. The structure of the coatings of copper mark M0 of various thickness:

a – 15 nm; *b* – 20 nm; *c* – 30 nm

Из рис. 6, *a* видно, что пленки меди на начальных стадиях кристаллизации состоят из отдельных разрозненных островков, ориентированных, судя по точечным рефлексам на электронограмме, плоскостью (111) Cu || (100) NaCl. Островковая структура пленок и является причиной их высокого поверхностного сопротивления. С увеличением толщины происходит слияние отдельных островков с образованием сетчатых, а затем и сплошных пленок. На электронограммах это проявляется в виде формирования сплошных сначала более размытых, а затем более тонких кольцевых рефлексов от систем плоскостей {111}, {200} и др. кристаллитов меди с высокой интенсивностью (рис. 5 *b, c*). Это обуславливает резкое снижение поверхностного сопротивления пленок.

Наряду с кольцевыми рефлексами от меди, на электронограммах были обнаружены менее интенсивные кольцевые рефлексы плоскостей {111}, {200} закиси меди (Cu₂O). Исследование пленки меди толщиной 100 нм, выдержанной в течение 240 с при условиях, соответствующих режимам нанесения на нее пленки ZrO₂ (температура 120 °С, давление кислорода 2·10⁻² Па), показало наличие на ее поверхности зародышей закиси меди (рис. 7). Частичное окисление слоев меди при формировании многослойных покрытий системы Cu-ZrO₂, в свою очередь, может увеличивать эквивалентное пропускание покрытия в видимом диапазоне длин волн, но одновременно повышать его поверхностное сопротивление.



Рис. 7. Микрорельеф поверхности покрытия из меди толщиной 100 нм с зародышами Cu₂O (×4000)

Fig. 7. Microrelief of the surface of a coating of copper with a thickness of 100 nm with nuclei Cu₂O (×4000)

Таким образом, установлено, что многослойные покрытия, полученные последовательным нанесением слоев Cu и ZrO₂ при толщине слоев меди 30, 20 и 15 нм (количестве пар Cu/ZrO₂ 2, 3 и 4), пропускают 20, 45 и 60 % света соответственно, что хорошо согласуется с результатами расчетов по разработанной модели. Показано, что вследствие островковой структуры и частичного окисления при формировании слоев ZrO₂ поверхностное сопротивление пленок меди толщиной 15 нм составляет более 20 Ом/кв, что снижает эффективность экранирования покрытиями с толщиной слоев Cu < 20 нм ЭМИ в радиочастотном диапазоне длин волн.

Заключение

Разработана модель пропускания в оптическом диапазоне длин волн многослойными покрытиями, состоящими из чередующихся слоев меди и диоксида циркония, нанесенными на подложки из стекла марки К8. Рассчитаны толщины и количество слоев покрытия системы Cu-ZrO₂, обеспечивающих пропускание в диапазоне длин волн 400–700 нм не менее 50 % и эффективность экранирования в диапазоне частот 0,7–17 ГГц на уровне 30–40 дБ. Определена допустимая толщина слоев Cu (≥ 20 нм), ниже которой, вследствие островковой структуры и частичного окисления с образованием Cu₂O, резко снижается электропроводность многослойного покрытия ($\rho \geq 20$ Ом/кв).

Список литературы

1. Основы теории электромагнитного экранирования / Д.Н. Шапиро [и др.]. Л.: Энергия, 1975. 112 с.
2. Титомир А. К., Сушков В. Я., Духопельников Д. В. Способ нанесения проводящего прозрачного покрытия / Патент на изобретение RU 2112076.
3. Антиотражающее покрытие с металлическими наночастицами / С.Г. Моисеев [и др.] // Изв. Самарского научного центра Российской академии наук. 2013. Т. 15, № 4–3. С. 749–754.
4. Крылова Т. Н. Интерференционные покрытия. Л.: Машиностроение, 1973. 224 с.
5. Волочко А.Т., Зеленин В.А., Нарушко Е.О. Многослойные покрытия на элементах компьютера как средство технической защиты информации // Матер. II МНПК «Проблемы информационной безопасности» Симферополь, 25–27 февраля 2016. С. 16–19.
6. Оптически прозрачные электромагнитные экраны / А.Т. Волочко [и др.] // Доклады БГУИР. 2015. № 3. С. 53–57.
7. Сивухин Д.В. Общий курс физики. Т. IV. Оптика. М., 1980. 433 с.
8. Димитров В. И. Простая кинетика. Новосибирск: Наука, 1982. 382 с.
9. Риттер Э. Пленочные диэлектрические материалы для оптических применений: в кн. Физика тонких пленок Т. 8. М.: Мир, 1978. С. 7–60.
10. Яковлев П.П., Чешков Б.Б. Проектирование интерференционных покрытий. М.: Машиностроение, 1987. 192 с.
11. Старцев В.В. Разработка программного комплекса для расчета оптических констант покрытий // Молодой ученый. 2016. № 10. С. 315–321.

References

1. Osnovy teorii jelektromagnitnogo jekranirovaniya / D.N. Shapiro [i dr.]. L.: Jenergija, 1975. 112 s. (in Russ.)
2. Titomir A. K., Sushkov V. Ja., Duhopel'nikov D. V. Sposob nanesenija provodjashhego prozrachnogo pokrytija / Patent na izobrenenie RU 2112076. (in Russ.)
3. Antiotrazhajushhee pokrytie s metallichesкими nanochasticami / S.G. Moiseev [i dr.] // Izv. Samarskogo nauchnogo centra Rossijskoj akademii nauk. 2013. T. 15, № 4–3. S. 749–754. (in Russ.)
4. Krylova T. N. Interferencionnye pokrytija. L.: Mashinostroenie, 1973. 224 s. (in Russ.)
5. Volochko A.T., Zelenin V.A., Narushko E.O. Mnogoslojnye pokrytija na jelementah komp'jutera kak sredstvo tehnikeskoj zashhity informacii // Mater. II MNPK «Problemy informacionnoj bezopasnosti» Simferopol', 25–27 fevralja 2016. S. 16–19. (in Russ.)
6. Opticheski prozrachnye jelektromagnitnye jekrany / A.T. Volochko [i dr.] // Doklady BGUIR. 2015. № 3. S. 53–57. (in Russ.)
7. Sivuhin D.V. Obshhij kurs fiziki. T. IV. Optika. M., 1980. 433 s. (in Russ.)
8. Dimitrov V. I. Prostaja kinetika. Novosibirsk: Nauka, 1982. 382 s. (in Russ.)
9. Ritter Je. Plenochnye dijelektricheskie materialy dlja opticheskikh primenenij v kn.: Fizika tonkih plenok. T. 8. M.: Mir, 1978. S. 7–60. (in Russ.)

10. Jakovlev P.P., Cheshkov V.B. Proektirovanie interferencionnyh pokrytij. M.: Mashinostroenie, 1987. 192 s. (in Russ.)
11. Starcev V.V. Razrabotka programmnogo kompleksa dlja rascheta opticheskikh konstant pokrytij // Molodoj uchenyj. 2016. № 10. S. 315–321. (in Russ.)

Сведения об авторах

Волочко А.Т., д.т.н., профессор, заведующий лабораторией Физико-технического института НАН Беларуси.

Зеленин В.А., д.т.н., доцент, г.н.с. Физико-технического института НАН Беларуси.

Нарушко Е.О., м.н.с. Физико-технического института НАН Беларуси.

Скилондь А.В., научный сотрудник Института тепло- и массообмена им. А.В. Лыкова НАН Беларуси.

Марков Г.В., к.т.н., с.н.с. Физико-технического института НАН Беларуси.

Адрес для корреспонденции

220141, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Купревича, 10
Физико-технический институт
НАН Беларуси
тел. +375-29-345-86-72;
e-mail: lena-narushko@mail.ru
Нарушко Елена Олеговна

Information about the authors

Volochko A.T., D.Sci, professor, head of the laboratory of Institute of Physics and Technology of NAS of Belarus.

Zelenin V.A., D.Sci, associate professor, senior scientific researcher of Institute of Physics and Technology of NAS of Belarus.

Narushko E.O., junior researcher of Institute of Physics and Technology of NAS of Belarus.

Skilandz A.V., researcher of Institute of Heat and Mass Transfer Named after A.V. Lykov of NAS of Belarus.

Markov G.V. PhD, leader researcher of Institute of Physics and Technology of NAS of Belarus.

Address for correspondence

220141, Republic of Belarus,
Minsk, Kuprevicha str., 10.
Institute of Physics and Technology
of NAS of Belarus
tel. +375-29-345-86-72;
e-mail: lena-narushko@mail.ru
Narushko Elena Olegovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-95-99>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 539.21

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА МОНОКРИСТАЛЛОВ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$

БОДНАРЬ И.В., ЧАН БИНЬ ТХАН

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 12 июня 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Методом Бриджмена (вертикальный вариант) выращены монокристаллы твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ во всем интервале концентраций. Определен состав и структура выращенных монокристаллов. Проведены исследования магнитных свойств указанных монокристаллов в интервале температур 2–300 К и магнитных полях до 10 Тл. Показано, что исследуемые монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале, удельный магнитный момент монотонно возрастает с увеличением температуры.

Ключевые слова: метод Бриджмена, твердые растворы, монокристаллы, удельный магнитный момент, парамагнетика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Боднар И.В., Чан Бинь Тхан. Магнитные свойства монокристаллов твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 95-99.

MAGNETIC PROPERTIES OF SINGLE CRYSTALS $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ SOLID SOLUTIONS

BODNAR I.V., CHAN BIN TKHAN

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 12 June 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. Single crystals of solid solutions $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ have been grown with the Bridgeman method in the whole range of temperatures. The crystals structure and composition were determined. The study of the given single crystals in the temperature range 2–300 K and magnetic fields to 10 T was carried out. It is set that the given crystals are paramagnetic in the whole studied range. The specific magnetic moment increases with the temperature.

Keywords: Bridgman method, solid solutions, single crystals, specific magnetic moment, paramagnets.

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

For citation. Bodnar I.V., Chan Bin Tkhan. Magnetic properties of single crystals $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ solid solutions. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 95-99.

Введение

Тройное соединение MnIn_2S_4 относится к классу магнитных полупроводников, AgIn_5S_8 – к дефектным полупроводникам с концентрацией вакансий в катионной подрешетке ~ 25 %. Указанные соединения кристаллизуются в кубической структуре шпинели и являются перспективными материалами для создания на их основе различных приборов микро- и нанoeлектроники [1–12]. Ранее авторами были исследованы физико-химические, оптические и теплофизические свойства твердых растворов на основе тройных соединений MnIn_2S_4 и AgIn_5S_8 [13–15]. В настоящей работе впервые представлены результаты исследования магнитных твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$.

Методика эксперимента

Монокристаллы соединений MnIn_2S_4 , AgIn_5S_8 и твердых растворов на их основе выращивали методом Бриджмена из предварительно синтезированных двухтемпературным методом поликристаллических слитков. Методики синтеза и выращивания монокристаллов указанных материалов представлены в работах [13–15]. Исследования удельного магнитного момента были выполнены с помощью универсальной высокополевой измерительной системы (Liquid Helium Free High Field Measurement System by Cryogenic Ltd, London, UK) в интервале температур 4–300 К и в полях 1 и 10 Тл. Указанные измерения проводились на монокристаллических образцах, вырезанных из полученных слитков со средними размерами 2×3×5 мм. Были выполнены измерения в зависимости от температуры в разных полях в режиме отогрева после охлаждения без поля (ZFC) и в поле (FC). Измерения удельного магнитного момента в режиме полевого охлаждения (FC) проводили в прямом и обратном направлении изменения температуры.

Результаты и их обсуждение

На рис. 1 представлены результаты магнитных измерений монокристаллов тройного соединения MnIn_2S_4 .

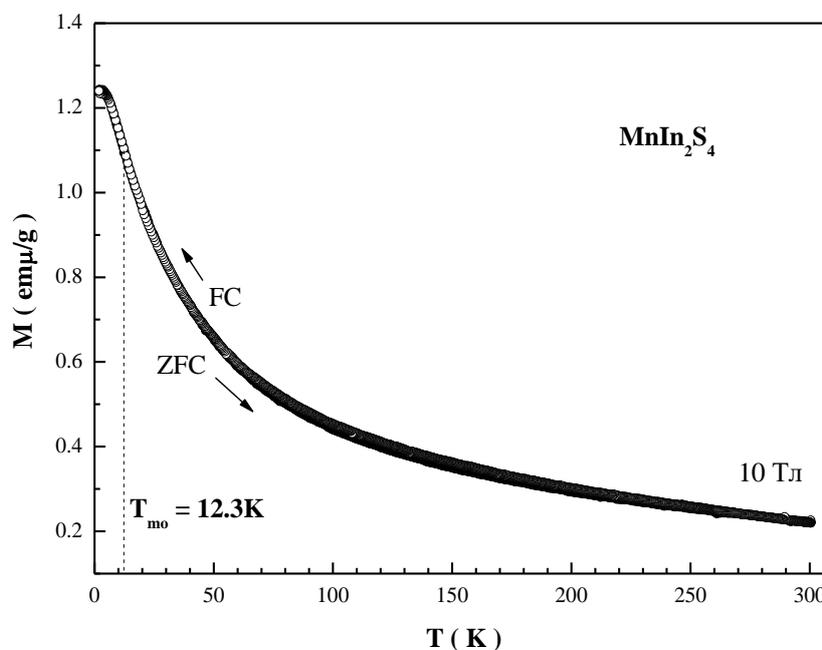


Рис. 1. Температурная зависимость ZFC (черные символы) и FC (светлые символы) удельного магнитного момента в поле 10 Тл для MnIn_2S_4

Fig. 1. Temperature dependence of ZFC (black symbols) and FC (light symbols) of the specific magnetic moment in a field of 10 T for MnIn_2S_4

Видно, что удельный магнитный момент кристаллов монотонно возрастает с уменьшением температуры. Во внешнем магнитном поле 10 Тл температура магнитного упорядочения $T_{\text{упор.}}$ составляет $\sim 12,3$ К. Установлено отсутствие различий при измерении ФС-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, что наблюдается при магнитных переходах II рода. Ниже 4 К магнитный момент достигает насыщения.

Для выяснения природы низкотемпературного магнитного фазового состояния были выполнены измерения полевых зависимостей удельного магнитного момента (рис. 2). Видно, что вплоть до температуры 2 К полевые зависимости почти линейны, что характерно для парамагнитного состояния. При температуре 2 К атомный магнитный момент (σ) во внешнем магнитном поле 10 Тл составляет от $0,91 \mu_B/\text{f.u.}$. Даже в таком поле атомный магнитный момент не достигает максимально возможной для катиона Mn^{2+} величины в случае 100 % спиновой поляризации и составляет $\sim 5 \mu_B$. В низкотемпературной области (< 12 К) наблюдается ненулевое значение спонтанного атомного магнитного момента, что свойственно наличию ферромагнитных корреляций ближнего порядка. Такое поведение не соответствует однородному антиферромагнитному состоянию. При 2 К спонтанный атомный магнитный момент (σ_s) равен $\sim 0,11 \mu_B/\text{f.u.}$

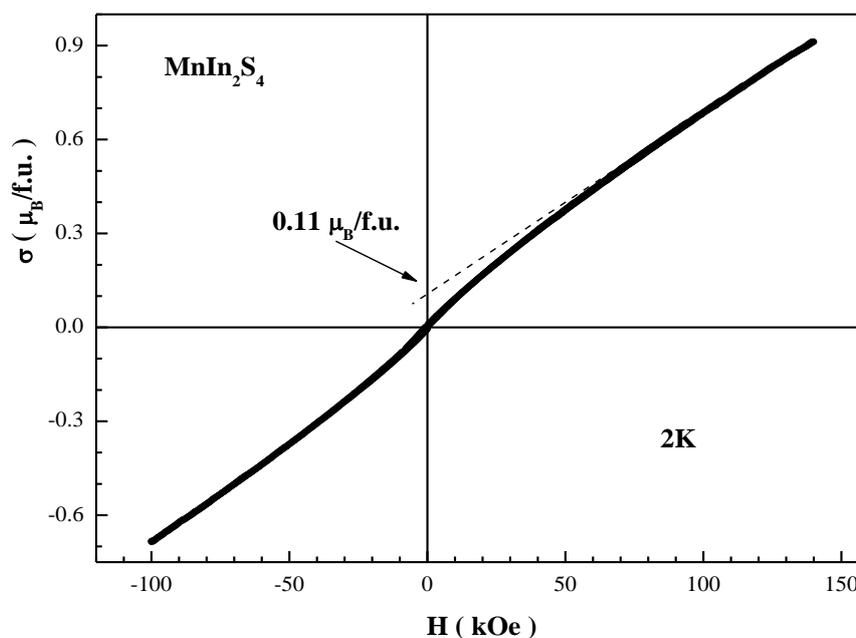


Рис. 2. Полевая зависимость атомного магнитного момента при $T = 2$ К
Fig. 2. Field dependence of the atomic magnetic moment when $T = 2$ K

Аналогичные измерения были проведены и для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ (рис. 3). Результаты измерений показали, что исследуемые кристаллы твердых растворов являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Из рис. 3 видно, что температурные зависимости удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл для твердых растворов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ как для ZFC, так и для FC кривых уменьшаются с понижением температуры. При измерении FC-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, какие-либо различия отсутствуют, что наблюдается при магнитных переходах II рода.

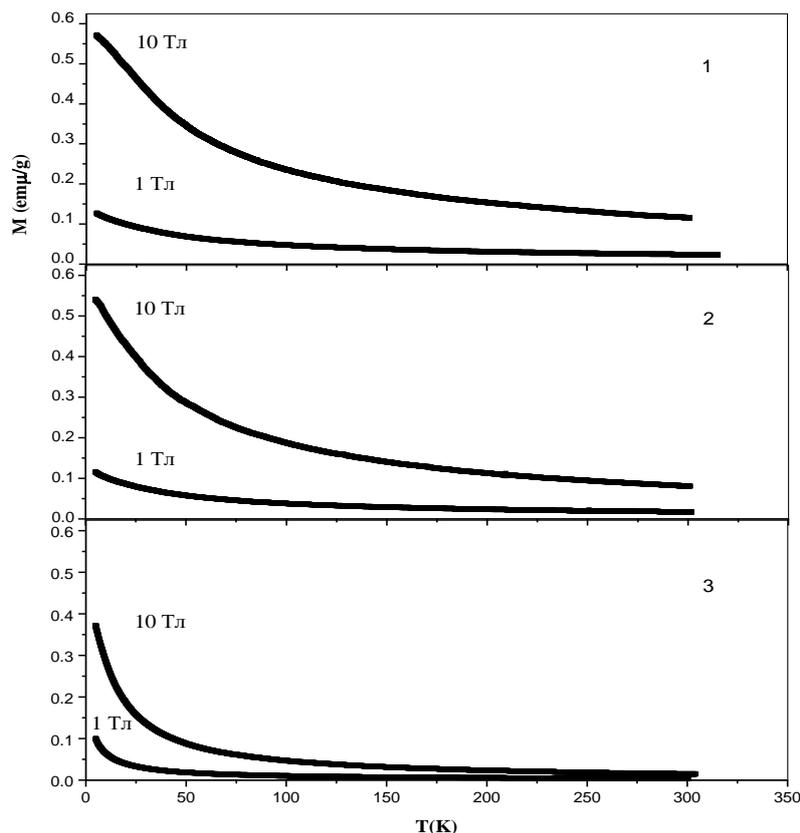


Рис. 3. Температурная зависимость удельного магнитного момента в полях 1 и 10 Тл монокристаллов $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$: 1 – $\text{Mn}_{0.9}\text{Ag}_{0.1}\text{In}_2\text{S}_4$; 2 – $\text{Mn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{In}_2\text{S}_4$; 3 – $\text{Mn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{In}_2\text{S}_4$

Fig. 3. Temperature dependence of the specific magnetic moment in the fields of 1 and 10 T of single crystals $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$: 1 – $\text{Mn}_{0.9}\text{Ag}_{0.1}\text{In}_2\text{S}_4$; 2 – $\text{Mn}_{0.7}\text{Ag}_{0.3}\text{In}_2\text{S}_4$; 3 – $\text{Mn}_{0.2}\text{Ag}_{0.8}\text{In}_2\text{S}_4$

Заключение

На монокристаллах тройного соединения MnIn_2S_4 и твердых растворах $(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}(\text{AgIn}_5\text{S}_8)_x$ в интервале температур 4–300 К и полях до 10 Тл измерены магнитные свойства. Измерения проводились на монокристаллических образцах со средними размерами $2 \times 3 \times 5$ мм. Установлено, что исследуемые монокристаллы являются парамагнетиками во всем исследованном интервале температур. Показано, что при измерении ФС-кривых в прямом и обратном направлении изменения температуры, какие-либо различия отсутствуют, что наблюдается при магнитных переходах II рода.

Список литературы

1. Magnetic and Crystallographic Studies of MIn_2S_4 ($\text{M} = \text{Mn, Fe, Co and Ni}$) / T. Kanomata [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. 1973. Vol. 34, № 2. P. 554–555.
2. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
3. Метфессель З., Маттиас Д. Магнитные полупроводники М., Мир, 1972. 405 с.
4. Нифтиев Н.Н. Термостимулированные токи в монокристаллах MnIn_2S_4 // ФТП. Т. 36, № 7. С. 836–837.
5. Боднарь И.В., Рудь В.Ю., Рудь Ю.В. Фоточувствительные структуры на основе монокристаллов MnIn_2S_4 // ФТП. 2009. Т. 43, № 11. С. 1549–1552.
6. Нифтиев Н.Н., Тагиев О.Б. Вольт-амперные характеристики монокристаллов MnIn_2S_4 и MnGa_2S_4 // ФТП. 2004. Т. 38, № 2. С. 164–165.
7. Обнаружение твердых растворов $(\text{In}_2\text{S}_3)_x(\text{MnIn}_2\text{S}_4)_{1-x}$ и создание фоточувствительных структур на их основе / И.В. Боднарь [и др.] // ФТП. 2010. Т. 44, № 1. С. 48–52.
8. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
9. Lattice constants of vacancy-defects type silver and copper sulfide spinel compounds by Bridgman

- technique / O. Yoko [et al.] // Sci. Eng. Rev. Doshisha Univ. 1993. Vol. 34, № 2. P. 135–142.
10. Физические свойства монокристаллов $Cu_xAg_{1-x}In_5S_8$ и поверхностно-барьерных структур на их основе / И.В. Боднар [и др.] // ФТП. 1998. Т. 32, № 9. С. 1043–1046.
 11. Получение и исследование гетеропереходов $AgIn_5S_8 / (InSe, GaSe)$ / И.В. Боднар [и др.] // ФТП. 1999. Т. 33, № 7. С. 805–809.
 12. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Монокристаллы $Mn_{0.1}Ag_{0.9}In_{4.7}S_{7.6}$: кристаллическая структура, ширина запрещенной зоны и тепловое расширение // ФТП. 2017. Т. 51, № 8. С. 1071–1074.
 13. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Кристаллическая структура и ширина запрещенной зоны твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // ФТП. 2018. Т. 52, № 8. С. 958–962.
 14. Боднар, И. В., Тхан Ч. Б. Исследование системы $MnIn_2S_4-AgIn_5S_8$ // Доклады БГУИР. 2018. № 1. С. 57–64.
 15. Боднар И. В., Тхан Ч. Б. Тепловое расширение твердых растворов $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // Доклады БГУИР. 2019. № 1 (119). С. 32–37.

References

1. Magnetic and Crystallographic Studies of MIn_2S_4 (M = Mn, Fe, Co and Ni) / T. Kanomata [et al.] // J. Phys. Soc. Jpn. 1973. Vol. 34, № 2. P. 554–555.
2. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
3. Metfessel' Z., Mattias D. Magnitnye poluprovodniki M., Mir, 1972. 405 s. (in Russ.)
4. Niftiev N.N. Termostimulirovannye toki v monokristallah $MnIn_2S_4$ // FTP. Т. 36, № 7. S. 836–837. (in Russ.)
5. Bodnar' I.V., Rud' V.Ju., Rud' Ju.V. Fotochuvstvitel'nye struktury na osnove monokristallov $MnIn_2S_4$ // FTP. 2009. Т. 43, № 11. S. 1549–1552. (in Russ.)
6. Niftiev N.N., Tagiev O.B. Vol't-ampernye karakteristiki monokristallov $MnIn_2S_4$ i $MnGa_2S_4$ // FTP. 2004. Т. 38, № 2. S. 164–165. (in Russ.)
7. Obnaruzhenie tverdyh rastvorov $(In_2S_3)_x(MnIn_2S_4)_{1-x}$ i sozdanie fotochuvstvitel'nyh struktur na ih osnove / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 2010. Т. 44, № 1. S. 48–52. (in Russ.)
8. Electric-field control of ferromagnetism / H. Ohno [et al.] // Nature. 2000. Vol. 408, № 6815. P. 944–950.
9. Lattice constants of vacancy defects type silver and copper sulfide spinel compounds by Bridgman technique / O. Yoko [et al.] // Sci. Eng. Rev. Doshisha Univ. 1993. Vol. 34, № 2. P. 135–142.
10. Fizicheskie svojstva monokristallov $Cu_xAg_{1-x}In_5S_8$ i poverhnostno-bar'ernyh struktur na ih osnove / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 1998. Т. 32, № 9. S. 1043–1046. (in Russ.)
11. Poluchenie i issledovanie geteroperehodov $AgIn_5S_8 / (InSe, GaSe)$ / I.V. Bodnar' [i dr.] // FTP. 1999. Т. 33, № 7. S. 805–809. (in Russ.)
12. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Monokristally $Mn_{0.1}Ag_{0.9}In_{4.7}S_{7.6}$: kristallicheskaja struktura, shirina zapreshhennoj zony i teplovoe rasshirenie // FTP. 2017. Т. 51, № 8. S. 1071–1074. (in Russ.)
13. Bodnar' I. V., Than Ch. B. Kristallicheskaja struktura i shirina zapreshhennoj zony tverdyh rastvorov $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // FTP. 2018. Т. 52, № 8. S. 958–962. (in Russ.)
14. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Issledovanie sistemy $MnIn_2S_4-AgIn_5S_8$ // Doklady BGUIR. 2018. № 1. S. 57–64. (in Russ.)
15. Bodnar' I.V., Than Ch.B. Teplovoe rasshirenie tverdyh rastvorov $(MnIn_2S_4)_{1-x}(AgIn_5S_8)_x$ // Doklady BGUIR. 2019. № 1 (119). S. 32–37. (in Russ.)

Информация об авторах

Боднар И.В., д.х.н., профессор, профессор кафедры проектирования информационно-компьютерных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чан Бинь Тхан, аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-20-76;
e-mail: chemzav@bsuir.by
Боднар Иван Васильевич

Information about the authors

Bodnar I.V., D. Sci, professor, professor of Computer Information Systems Design Department of Belarussian state university of informatics and radioelectronics.

Tran Binh Than, PG student of Information Security Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-20-76;
e-mail chemzav@bsuir.by
Bodnar' Ivan Vasil'evich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-100-104>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.4/.61

ЭКРАНИРУЮЩИЕ СВОЙСТВА ЯЧЕЙСТЫХ СТРУКТУР С УГЛЕРОДСОДЕРЖАЩИМ МАТЕРИАЛОМ И ФОЛЬГИРОВАННЫМ ВСПЕНЕННЫМ ПОЛИЭТИЛЕНОМ

АБДУЛХАДИ Х.Д.А., ПРУДНИК А.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Предложен способ создания экранов электромагнитного излучения с применением нетканого иглопробивного полотна, содержащего углеродные добавки, и вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой. Для повышения коэффициентов отражения и поглощения предлагается создание ячейистой структуры, содержащей фрагменты обоих видов материалов с длиной от 20 до 40 мм и шириной от 5 до 8 мм. Измерение экранирующих характеристик проводилось на автоматизированном измерителе модуля коэффициентов передачи и отражения SNA 0.01–18 в диапазоне частот 0,7...17,0 ГГц. Показано, что значения коэффициентов отражения в диапазоне частот составили –0,5...–4,5 дБ при значениях коэффициента передачи ЭМИ –4,0...–25,0 дБ.

Ключевые слова: электромагнитное излучение, экранирование, иглопробивное полотно, углеродная добавка, вспененный полиэтилен, экранирующая характеристика.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Абдулхадиди Х.Д.А., Прудник А.М. Экранирующие свойства ячейистых структур с углеродсодержащим материалом и фольгированным вспененным полиэтиленом. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 100-104.

SHIELDING PROPERTIES OF THE CELLULAR STRUCTURES WITH CARBON-CONTAINING MATERIALS AND FOILED FOAM POLYETHYLENE

HAITHAM D.A. ABDULHADI, ALEKSANDER M. PRUDNIK

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 23 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The method to produce electromagnetic radiation shields using a non-woven needle-punched fabric containing carbon additives and foamed polyethylene coated with aluminum foil is proposed. To increase the reflection and absorption coefficients, it is proposed to create a cellular structure containing fragments

of both types of materials with length from 20 to 40 mm and width from 5 to 8 mm. The measurement of the shielding characteristics was carried out on the automated meter of the transmission and reflection coefficient SNA 0.01–18 in the frequency range 0.7...17.0 GHz. It is shown that the values of the reflection coefficients in the frequency range 0.7...17.0 GHz were $-0.5...-4.5$ dB and the values of the transmission coefficient of electromagnetic radiation were $-4.0...-25.0$ dB.

Keywords: electromagnetic radiation, shielding, needle-punched fabric, carbon additive, foamed polyethylene, shielding characteristic.

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

For citation. Abdulhadi H.D.A., Prudnik A.M. Shielding properties of the cellular structures with carbon-containing materials and foiled foam polyethylene. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 100-104.

Введение

В последние десятилетия возрастает количество процессов и производств, технологический цикл которых предполагает использование источников излучения диапазона СВЧ. Наличие источников излучения данного диапазона вынуждает искать решение проблем, связанных с обеспечением электромагнитной совместимости радиоэлектронной аппаратуры, а также с защитой организма человека от этого излучения. В связи с этим актуализируется необходимость создания материалов для экранирования компонентов и узлов радиоэлектронной аппаратуры, а также изготовления средств индивидуальной защиты. Такого рода материалы характеризуются свойствами отражения и ослабления энергии электромагнитного излучения [1–3].

В части создания материалов для экранирования компонентов и узлов радиоэлектронной аппаратуры основным требованием обычно является низкое значение коэффициента передачи энергии электромагнитного излучения (ЭМИ), а в части изготовления средств индивидуальной защиты организма человека – высокое значение коэффициента отражения энергии ЭМИ. В качестве основ для изготовления экранирующих материалов часто применяются текстильные материалы, как тканые, так и нетканые.

Методика проведения эксперимента

Предложена ячеистая структура, содержащая фрагменты иглопробивного углеродсодержащего нетканого материала и вспененного полиэтилена, имеющего закрытоячеистую структуру и покрытого алюминиевой фольгой толщиной 20 мкм. Иглопробивной углеродсодержащий нетканый материал вырабатывался на производственной линии, состоящей из чесальной машины, преобразователя прочеса и иглопробивной машины. В состав этого материала входили полиэфир (70 %), полипропилен (20 %) и угольные волокна УГЦВ-1-Р (10 %). Толщина материала составляла 6 мм, а его поверхностная плотность – 250 г/м^2 [4].

Длина фрагментов материалов, использованных для изготовления структуры, составляла от 20 до 40 мм, ширина – от 5 до 8 мм. Эти фрагменты размещались в объеме структуры в случайном друг относительно друга порядке. Размер ячеек структуры – $5 \times 5 \text{ см}^2$, что может обуславливать множественное переотражение взаимодействующих с нею электромагнитных волн.

Для анализа коэффициентов отражения и передачи ЭМИ изготовленной структуры выполнялось сравнение значений напряженности электрического поля в одной и той же точке пространства при ее наличии и отсутствии [5]. При этом использовался измеритель коэффициентов передачи и отражения, работающий по принципу выделения и детектирования уровней падающей и отраженной волн, по методике, описанной в [6]. Используемая измерительная установка состоит из следующих элементов: блок обработки измерительных сигналов, генератор качающейся частоты, блок преобразования и обработки прошедшей волны (В), а также блок преобразования и обработки падающей/отраженной волны (А/Р) (рис. 1).

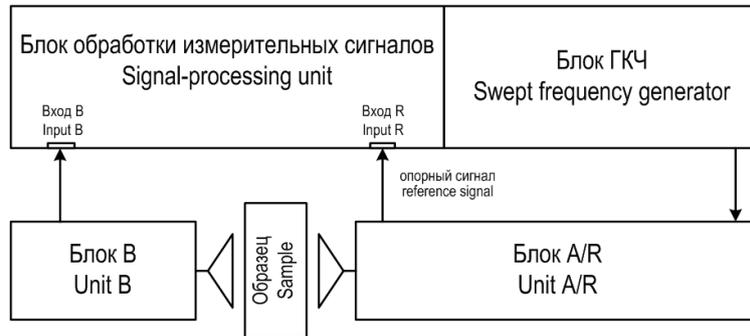


Рис. 1. Структурная схема измерительной установки
Fig. 1. Block diagram of the measurement setup

Результаты и их обсуждение

В результате измерений показано, что в диапазоне частот 0,7...17 ГГц значения коэффициента отражения ЭМИ предложенной ячеистой структуры составили $-0,5...-1,5$ дБ в режиме холостого хода и $-0,5...-4,5$ дБ в режиме короткого замыкания (рис. 2, *a*), в то время, как в диапазоне частот 2...17 ГГц их значения составили $-2,5...-17$ дБ в режиме холостого хода и $-2...-20$ дБ в режиме короткого замыкания (рис. 2, *b*).

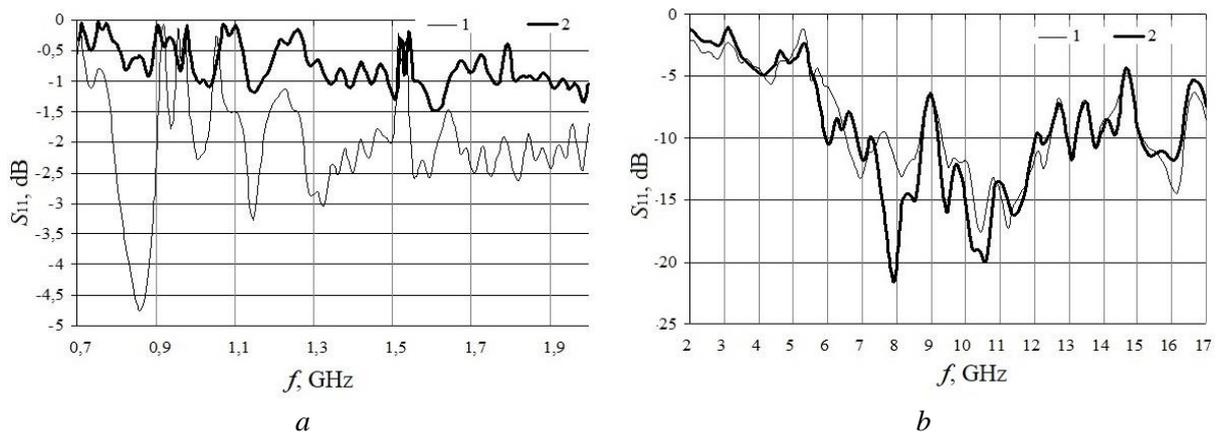


Рис. 2. Частотные зависимости коэффициента отражения ЭМИ предложенной ячеистой структуры:
a – в диапазоне частот 0,7...2 ГГц; *b* – в диапазоне частот 2...17 ГГц
(1 – режим холостого хода; 2 – режим короткого замыкания)

Fig. 2. The frequency dependencies of EMR reflection coefficient of the proposed cell structure:
a – in the range 0,7...2 GHz; *b* – in the range 2...17 GHz (1 – the idle mode; 2 – the short circuit mode)

Получены также значения коэффициента передачи ЭМИ, которые в диапазоне частот 0,7...2 ГГц (рис. 3, *a*) составили $-10...-25$ дБ, в то время, как в диапазоне частот 2...17 ГГц (рис. 3, *b*) они составили $-4...-12$ дБ.

На основе результатов сравнительного анализа экранирующих характеристик предложенной ячеистой структуры с фрагментами иглопробивного углеродсодержащего материала и фольгированного вспененного полиэтилена с экранирующими характеристиками сплошного углеродсодержащего иглопробивного материала можно сделать вывод о том, что экранирующие свойства изготовленных структур не уступают экранирующим свойствам углеродсодержащего иглопробивного материала. Так, для сравнения, значения коэффициента отражения ЭМИ сплошного углеродсодержащего иглопробивного материала варьируются в диапазоне $-2,0...-29$ дБ в зависимости от процентного содержания углерода, а коэффициента передачи ЭМИ – в диапазоне $-6,0...-12,6$ дБ [7].

Также необходимо обратить внимание, что угольные волокна являются относительно дорогостоящим материалом, что делает нецелесообразным их использование для изготовления экранирующих материалов в условиях крупносерийного производства.

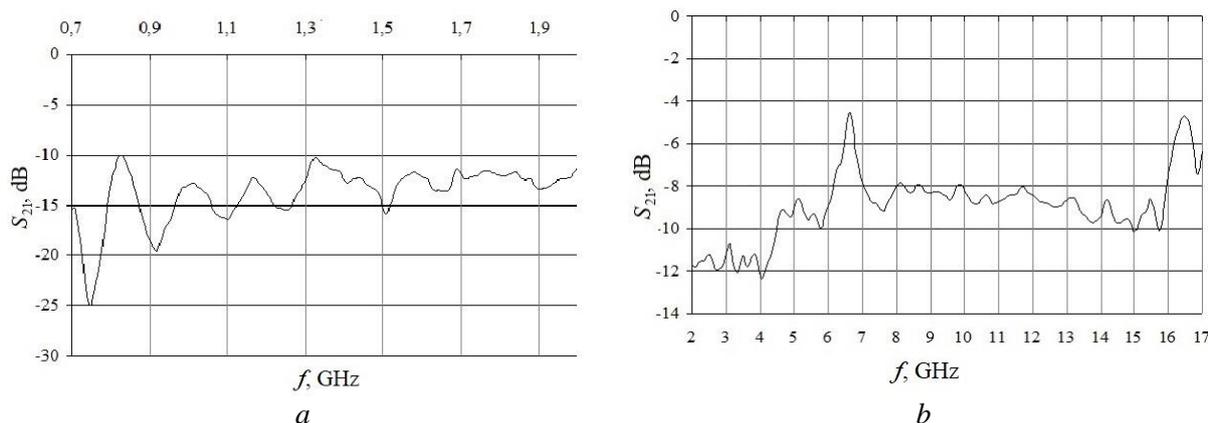


Рис. 3. Частотные зависимости коэффициента передачи ЭМИ предложенной ячеистой структуры:
a – в диапазоне частот 0,7–2 ГГц; *b* – в диапазоне частот 2–17 ГГц

Fig. 3. The frequency dependencies of the transmission coefficients of the proposed cell structure:
a – in the range 0,7–2 GHz; *b* – in the range 2–17 GHz

Заклучение

Получены частотные зависимости коэффициентов отражения и передачи ЭМИ ячеистых структур с фрагментами иглопробивного углеродсодержащего нетканого материала и вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой толщиной 20 мкм. Показано, что значения коэффициента отражения ЭМИ указанных структур находятся в диапазоне $-0,5 \dots -4,5$ дБ, а значения коэффициента передачи – в диапазоне $-4,0 \dots -25,0$ дБ (при условии, что для изготовления структуры использованы фрагменты материалов с длиной от 20 до 40 мм и шириной от 5 до 8 мм, а размер ячеек структуры – 5×5 см²).

Установлено, что путем варьирования процентного содержания углерода в иглопробивном нетканом материале и геометрических размеров фрагментов вспененного полиэтилена, покрытого алюминиевой фольгой, можно подобрать не только оптимальные электромагнитные свойства изготавливаемых на основе указанных материалов структур и экранов ЭМИ, но и добиться существенного снижения их стоимости. Например, при повышении содержания углерода можно существенно увеличить коэффициент отражения, при этом массогабаритные параметры существенно не изменятся. Величина содержания проводящих включений будет определяться требованиями к диапазону частот, в котором должно обеспечиваться необходимое значение коэффициентов отражения и передачи ЭМИ. Такие структуры и экраны ЭМИ не будут нуждаться в транспортной упаковке, что является еще одним фактором, позволяющим добиваться снижения их стоимости.

Таким образом, полученные результаты показывают, что предложенные и исследованные ячеистые структуры с фрагментами нетканого иглопробивного полотна, содержащего углеродные добавки, и вспененного полиэтилена могут использоваться при производстве радиопоглощающих материалов для экранирования ЭМИ в диапазоне частот 0,7–17,0 ГГц. При производстве изделий конечного потребления предложенные структуры могут быть использованы для создания укрывных материалов со свободным формообразованием.

Список литературы

1. Экраны электромагнитного излучения на основе магнитных материалов. Технологии. Конструкции. Применения / В.А. Богущ [и др.]. Минск: Бестпринт, 2016. 223 с.
2. Комбинированные материалы для имитации естественных сред в видимом и инфракрасном диапазонах длин волн для систем защиты информации / Л.М. Лыньков [и др.]. Минск: Бестпринт, 2014. 159 с.
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.

4. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives / A. Prudnik [et al.] // Electromagnetic disturbances EMD 2017: proc. of the 24th International conference. Poland, Belostok, 20–22 September 2017. P. 108–111.
5. Гибкие экраны электромагнитного излучения на основе углеродосодержащих клеевых составов / Е.С. Белоусова [и др.] // Докл. БГУИР. 2017. № 8 (110). С. 73–78.
6. Механические и электромагнитные свойства экранов на основе иглопробивного материала с проводящими и диэлектрическими покрытиями / Х.Д.А. Абдулхади [и др.] // Весці НАН Беларусі. Сер. фізіка-тэхнічных навук. 2019. Т. 64, № 1. С. 44–50.
7. Электромагнитные характеристики углеродсодержащего нетканого материала с геометрическими неоднородностями / Х.Д.А. Абдулхади [и др.] // Докл. БГУИР. 2017. № 1 (95). С. 87–90.

References

1. Jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove magnitnyh materialov. Tehnologii. Konstrukcii. Primenenija / V.A. Bogush [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2016. 223 s. (in Russ.)
2. Kombinirovannye materialy dlja imitacii estestvennyh sred v vidimom i infrakrasnom diapazonah dlin voln dlja sistem zashhity informacii / L.M. Lyn'kov [i dr.]. Minsk: Bestprint, 2014. 159 s. (in Russ.)
3. Shielding Properties of Electromagnetic Radiation Absorbers with Geometrical and Structure Heterogeneities / L.M. Lyn'kov [et al.] // Eng. & Tech. J. Part A. 2014. Vol. 32, № 12. P. 2891–2903.
4. Production technology and shielding properties of the needle-punched non-woven fabrics with carbon additives / A. Prudnik [et al.] // Electromagnetic disturbances EMD 2017: proc. of the 24th International conference. Poland, Belostok, 20–22 September 2017. P. 108–111.
5. Gibkie jekrany jelektromagnitnogo izluchenija na osnove uglerodosoderzhashhih kleevyh sostavov / E.S. Belousova [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2017. № 8 (110). S. 73–78. (in Russ.)
6. Mehanicheskie i jelektromagnitnye svojstva jekranov na osnove igloprobivnogo materiala s provodjashhimi i dijelektricheskimimi pokrytjiami / H.D.A. Abdulhadi [i dr.] // Vesci NAN Belarusi. Ser. fizika-tjehnichnyh navuk. 2019. T. 64, № 1. S. 44–50. (in Russ.)
7. Jelektromagnitnye harakteristiki uglerodosoderzhashhego netkanogo materiala s geometricheskimi neodnorodnostjami / H.D.A. Abdulhadi [i dr.] // Dokl. BGUIR. 2017. № 1 (95). S. 87–90. (in Russ.)

Сведения об авторах

Абдулхади Х.Д.А., аспирант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Прудник А.М., кандидат технических наук, доцент, доцент кафедры инженерной психологии и эргономики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Abdulhadi H.D.A., PG student of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Prudnik A.M., associate professor of the Engineering Psychology and Ergonomics Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-88-24;
e-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Прудник Александр Михайлович

Address for correspondence

220013, Belarus,
Minsk, P. Brouki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-88-24;
E-mail: aleksander.prudnik@bsuir.by
Prudnik Aleksander Mikhailovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-105-109>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 536.2.02

КОНТАКТНЫЙ ЛОКАЛЬНЫЙ НАГРЕВ АЛЮМИНИЕВОЙ ОСНОВЫ С НАНОПОРИСТЫМ ОКСИДОМ АЛЮМИНИЯ ЛИНЕЙНЫМ ИСТОЧНИКОМ ТЕПЛА ДЛЯ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ В ТЕРМОМЕТРИИ

ЛУШПА Н.В., ДИНЬ Х.Т.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 23 сентября 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. В работе представлены результаты тепловых исследований для образца из алюминия с нанопористым оксидом алюминия, выполненных с использованием тепловизионных измерений. В качестве элемента нагрева применялась углеродная нить на основе вискозной технической нити. На основе результатов исследований показано, что локальный нагрев поверхности образца контактным способом с использованием линейного источника тепла может быть использован в термометрии для оценки теплопроводности твердых многокомпонентных диэлектрических материалов.

Ключевые слова: локальный нагрев, линейный источник тепла, углеродная нить, алюминий, нанопористый оксид алюминия, термометрия.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Лушпа Н.В., Динь Х.Т. Контактный локальный нагрев алюминиевой основы с нанопористым оксидом алюминия линейным источником тепла для использования в термометрии. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 105-109.

CONTACT LOCAL HEATING OF AN ALUMINUM BASE WITH NANOPOROUS ALUMINA BY A LINEAR HEAT SOURCE FOR USE IN THERMOMETRY

N. V. LUSHPA, H. T. DINH

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

Submitted 23 September 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The paper presents the results of thermal studies for a sample of aluminum with nanoporous alumina using thermal imaging measurements. As a heating element, a carbon thread based on a viscose technical thread was used. On the base of results, it was established that local heating of the sample surface by the contact method using a linear heat source can be used in thermometry to determine the thermal conductivity of solid multicomponent dielectric materials.

Keywords: local heating, linear heat source, carbon filament, aluminum, nanoporous alumina, thermometry.

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

For citation. Lushpa N.V., Dinh H.T. Contact local heating of an aluminum base with nanoporous alumina by a linear heat source for use in thermometry. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 105-109.

Для использования печатных плат на алюминиевой основе в устройствах с повышенным выделением тепла важно знать их тепловые характеристики и, в первую очередь, характеристики диэлектрического слоя, отделяющего активные полупроводниковые элементы от поверхности алюминия. Благодаря высокой теплопроводности алюминия и малой толщине диэлектрического слоя, для генерации тепловых потоков и проведения тепловых исследований может использоваться линейный источник тепла на поверхности платы из алюминия [1–3]. Задачей линейного источника тепла при проведении тепловых измерений в условиях быстропотекающего режима нагрева (нестационарный режим) является обеспечение высокого уровня линейной мощности нагрева. Современные методы термометрии позволяют контролировать температуру поверхности исследуемого материала. Одним из методов, используемых для регистрации температуры на поверхности различных материалов, являются оптические и, в частности, тепловизионные методы. С их помощью можно визуализировать процессы изменения температуры во времени на поверхности образца и затем оценить ее тепловые характеристики. Достоинством применения такого метода является относительная простота подготовки эксперимента и возможность регистрации профиля распределения температуры на большой площади. В данной работе представлены результаты тепловых исследований образца из алюминия с нанопористым оксидом алюминия, основанных на использовании тепловизионных измерений.

В исследованиях использовались образцы из алюминия со слоем нанопористого оксида алюминия, на поверхности которых размещался линейный источник тепла. В качестве такого элемента нагрева использовалась углеродная нить на основе вискозной технической нити. Форма нити имела один изгиб для исключения локального повышения плотности тока в местах с высокой кривизной. После инициирования работы нагревательного элемента с интервалом в 5 с проводилась съемка термограмм лицевой поверхности образца из алюминия с нанопористым оксидом алюминия.

С помощью анализа СЭМ-изображений анодных пленок было исследовано влияние напряжения анодирования (диапазон от 10 до 40 В) на параметры формируемой микроструктуры (межпористое расстояние и диаметр пор (d_{pore})) нанопористых пленок при анодировании алюминия в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты. Результаты исследований позволили установить, что при увеличении напряжения от 10 до 30 В значения межпористого расстояния и диаметра пор анодных пленок, полученных в растворе щавелевой кислоты, увеличивались линейно, а коэффициент формовки роста диаметра пор (d_{pore}/U) уменьшался. При напряжениях анодирования выше 30 В наблюдались резкое увеличение диаметра пор и стабилизация коэффициента формовки роста диаметра пор, что свидетельствовало об усилении процессов растворения оксида в порах анодной пленки из-за роста скорости реакции растворения оксида алюминия вследствие нагрева электролита в процессе окисления алюминия (рис. 1).

Состав пленок Al_2O_3 , полученных анодированием алюминия в растворе щавелевой кислоты при напряжении 40 В, определялся с помощью энергодисперсного спектрометра (ЭДС). Результаты анализа элементного состава оксидной пленки приведены в таблице.

На исследуемом участке образца, кроме элементов оксида алюминия (кислорода и алюминия), обнаружен углерод. Присутствие углерода объясняется внедрением анионов электролита или продуктов их окисления в оксидную пленку в процессе анодирования. Данные ЭДС микроанализа показывают, что состав анодного оксида алюминия (АОА) практически соответствует формуле Al_2O_3 .

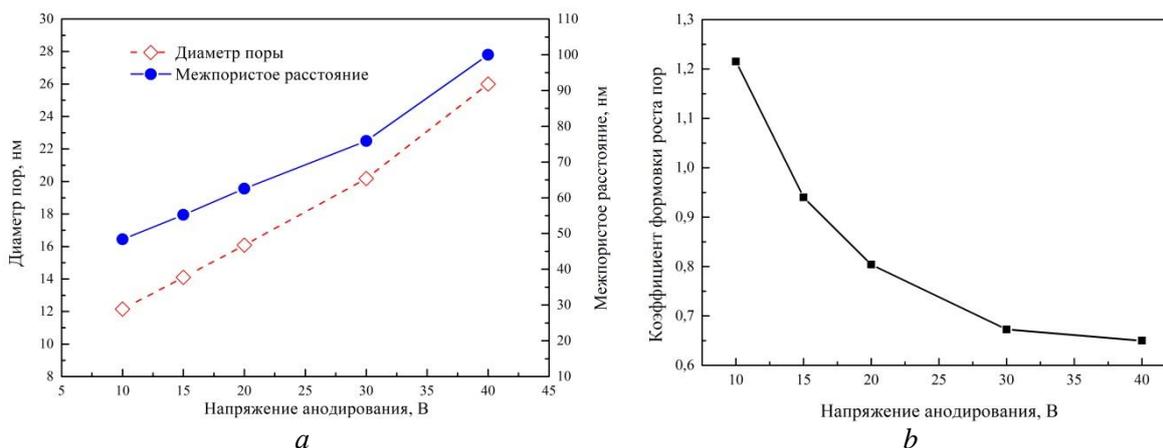


Рис. 1. Изменение диаметра пор, расстояния между центрами пор (a) и коэффициента формовки роста пор (b) с ростом напряжения анодирования
Fig. 1. Change in pore diameter, the distance between the centers of the pores (a) and the molding coefficient of pore growth (b) with increasing anodizing voltage

Элементный состав пористого анодного оксида алюминия, полученного в электролите на основе щавелевой кислоты при 40 В
The elemental composition of the porous anodic alumina, obtained in an oxalic acid-based electrolyte at 40 V

Химический элемент	Массовые проценты	Атомные проценты
C	4,0	6,0
O	45,4	56,5
Al	50,6	37,5

Для определения тепловых характеристик образца из алюминия со слоем нанопористого АОА при тепловых измерениях использовалось термостатирование нижней стороны платы с помощью мощного радиатора из алюминия. Рис. 2 иллюстрирует равномерное распределение теплового поля на поверхности алюминиевой платы с нанопористым оксидом алюминия для случая термостатирования нижней стороны с помощью радиатора.

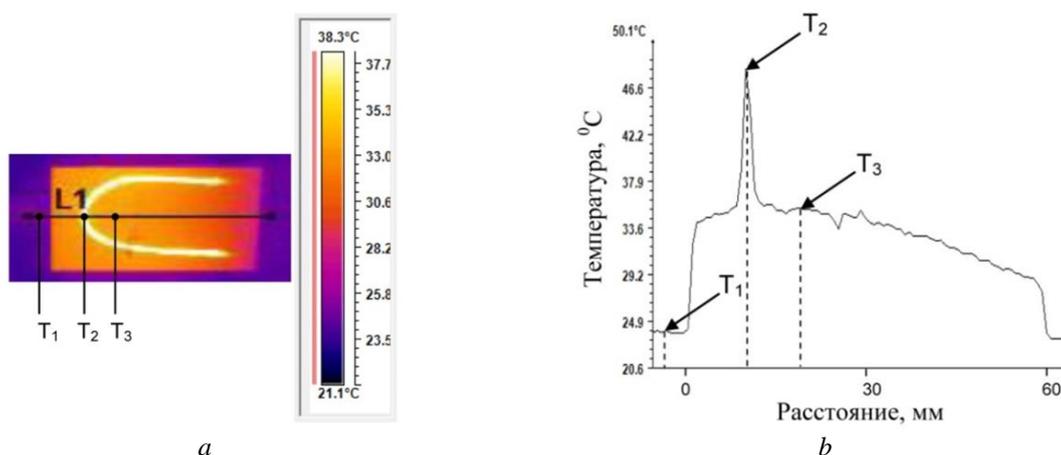


Рис. 2. Изображение платы из алюминия с слоем АОА и нагревательным элементом в тепловизионной камере (a), профиль распределения температуры через 25 с вдоль заданной линии L1 (b) с контрольными точками (T_1 – T_3) при мощности нагрева 3,4 Вт: L1 – заданная линия с контрольными точками T_1 , T_2 , T_3 ;
 T_1 – поверхность радиатора; T_2 – углеродная нить; T_3 – поверхность платы

Fig. 2. Image of a board made of aluminum with a layer of alumina and a heating element in the thermal imaging camera (a), temperature distribution profile after 25 s along a given line L1 (b) with control points (T_1 – T_3) at a heating power of 3.4 W: L1 is a given line with control points T_1 , T_2 , T_3 ;
 T_1 – the surface of the radiator; T_2 – carbon thread; T_3 – board surface

Результаты исследования показали, что значения температуры на верхней и нижней стороне образца из алюминия отличались незначительно, в то время как значения температуры на поверхности алюминиевой платы и алюминиевого радиатора различались существенно. На основе этого был сделан вывод о большом тепловом сопротивлении контакта алюминиевая плата – радиатор, поэтому данные о разности температур поверхности алюминиевой платы и радиатора не могут быть использованы для вычисления теплопроводности. В то же время результаты измерения профиля температуры на поверхности алюминиевой платы на границе с нагревательным элементом позволяют рассчитать теплопроводность слоя нанопористого АОА при термостатировании нижней стороны платы с учетом изотропности распространения теплового потока от нагревателя по формуле (1). Это означает, что профиль температуры будет иметь точки перегиба (рис. 3), соответствующие температуре поверхности слоя нанопористого АОА на границе с нагревателем (T_1), температуре слоя нанопористого анодного оксида алюминия на границе с алюминием (T_2) и равновесной температуре алюминия (T_3).

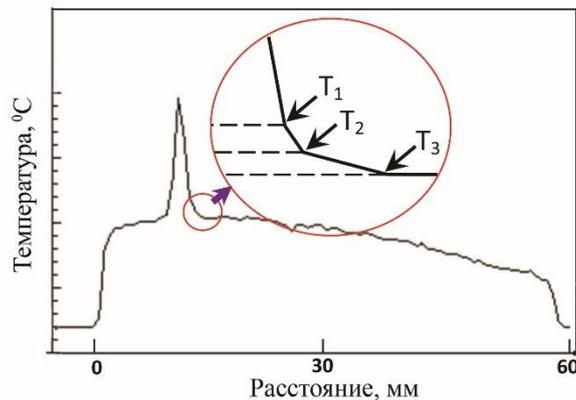


Рис. 3. Схема определения температуры слоя АОА на границе с нагревательным элементом (T_1), со слоем алюминия (T_2) и равновесной температуры слоя алюминия (T_3) на профиле температуры вдоль поверхности образца

Fig. 3. Scheme for determining the temperature of the layer of alumina at the boundary with the heating element (T_1), with the aluminum layer (T_2) and the equilibrium temperature of the aluminum layer (T_3) on the temperature profile along the sample surface

Для случая, когда тепловой поток, проходящий через слой нанопористого АОА и слой алюминия одинаков, можно записать следующее уравнение для теплопроводности слоя нанопористого АОА:

$$\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3} = \lambda_{\text{Al}} \frac{d_{\text{Al}_2\text{O}_3} (T_2 - T_3)}{d_{\text{Al}} (T_1 - T_2)}, \quad (1)$$

где $\lambda_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – теплопроводность слоя нанопористого оксида алюминия; λ_{Al} – теплопроводность слоя алюминия; $d_{\text{Al}_2\text{O}_3}$ – толщина слоя нанопористого оксида алюминия; T_1 , T_2 – температура слоя нанопористого оксида алюминия на границе с нагревателем и на границе с алюминием; T_3 – равновесная температура слоя алюминия; d_{Al} – толщина слоя алюминия.

Анализ термограмм и профиля температуры на границе с линейным источником тепла на 55-й секунде нагрева позволил определить следующие параметры: $T_1 = 38,3^\circ\text{C}$, $T_2 = 37,0^\circ\text{C}$ и $T_3 = 36,7^\circ\text{C}$.

Вычисленное значение теплопроводности слоя нанопористого анодного оксида алюминия на 55-й секунде нагрева с использованием уравнения (1) составило $1,56 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$. Использовались следующие исходные данные: толщина слоя Al_2O_3 – 30 мкм, толщина слоя Al – 0,8 мм, теплопроводность сплава АА3003 – $180 \text{ Вт}/(\text{м}\cdot^\circ\text{C})$.

Таким образом, наноразмерные углеродсодержащие включения в слое нанопористого оксида алюминия с содержанием углерода около 6 ат. %, полученные при анодировании алюминия в 0,3 М водном растворе щавелевой кислоты, позволили увеличить

теплопроводность пленок в 1,5 раза по сравнению с пленками АОО, сформированными в растворе серной кислоты. Полученный результат хорошо согласуется с данными для теплопроводности пористого анодного оксида алюминия 1,4–1,8 Вт/(м·°С), представленными в [4, 5].

Заключение

Показано, что локальный нагрев поверхности образца контактным способом с использованием линейного источника тепла (встроенная в конструкцию углеродная нить диаметром до 50 мкм) и регистрация перегрева источника тепла могут быть использованы в термометрии для оценки теплопроводности твердых многокомпонентных диэлектрических материалов.

Список литературы / References

1. Nakamura S., Mukai T., Senoh M. Candela class high brightness InGaN/AlGaIn double – heterostructure blue – light – emitting diodes // Applied Physics Letters. 1994. Vol. 64, iss. 13. P. 1687–1689.
2. Wahab J.A. Derman M.N., Daud Z.C. The effect of electrolyte temperature on formation of porous aluminium oxide films in anodising process // AENSI Journals Advances in Environmental Biology. 2013. Vol. 7, iss. 12. P. 3708–3712.
3. Improvement of the thermal characteristics of the electric heater in the architecture with aluminum, nanoporous alumina and resistive component of carbon fiber / I. Vrublevsky [et al.] // Nanoscience & Nanotechnology – Nanostructured materials application and innovation transfer. 2016. Vol. 16, iss. 1. P. 1–2.
4. Heat dissipation performance of metal-core printed circuit board prepared by anodic oxidation and electroless deposition / J. Lee [et al.] // Thermochemica Acta. 2014. Vol. 589, iss. 10. P. 278–283.
5. Abad B., Maiz J., Martin-Gonzalez M. Rules to determine thermal conductivity and density of anodic aluminum oxide (AAO) membranes // The Journal of Physical Chemistry. 2016. Vol. 120, iss. 10. P. 5361–5370.

Сведения об авторах

Динь Х.Т., аспирант кафедры защиты информации Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Лушпа Н.В., младший научный сотрудник Центра 9.1 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Dinh H.T., PG student of Security Information Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Lushpa N.V., junior researcher of Center 9.1 of R&D Department of 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. +37529-888-08-66;
e-mail: taidh75@gmail.com
Динь Хыу Тай

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk. P. Brovki st., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +37529-888-08-66;
e-mail: taidh75@gmail.com
Dinh Huu Tai

