
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

Козел В.М., Подворная Д.А., Ковалёв К.А. Пик-фактор сигналов систем сухопутной подвижной службы 5G	5
Вышинский Н.В. Исследование свойств растягиваемой ленты в условиях деформации	11
Kanojka A.I. Amplitude modulation of radiation by coupled resonators.....	18
Коренькова С.Ю., Тихонов И.А., Чубенко Е.Б. Синтез и свойства композитных материалов на основе наночастиц оксида цинка в диэлектрической матрице	25
Ivashenko V.P. String processing model for knowledge-driven systems.....	33
Архипенко С.А., Шилин Л.Ю., Навроцкий А.А., Кузнецов А.П. Методика идентификации роботов с учетом типа назначения управления.....	41
Цянь Лунвэй. Онтологический подход к обработке текстов китайского языка	49
Тихон О.И., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Барахоев А.Л., Камлач П.В. Исследование влияния условий подачи озono-воздушной смеси на процесс удаления фоторезиста с поверхности кремниевой пластины	57

Малевич И.Ю., Заяц П.В. Адаптивный широкополосный малошумящий усилитель радиочастоты.....	66
Pevneva N.A., Kopshai A.A., Gurskii A.L. Simulation of electromagnetic field distribution in the measuring cell for determining the dielectric permittivity of materials at microwave frequencies	75
Железняк В.К., Лавров С.В., Филиппович А.Г., Барановский М.М. Синтез измерительного композитного сигнала для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании	81
Belousova E.S., Dumchev B.I., Al-Mahdawi M.S.Kh. Justification of binder material selection for carbon particles incorporation into fibrous electromagnetic radiation absorber	88
Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления	94

Корректурa и верстка Л.В. КОНДАКОВА
Компьютерный дизайн О.В. Бойправ

Подписано в печать 30.09.2020. Формат 60×84 1/8. Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе.

Усл. печ. л. 20,21. Уч.-изд. л. 17,8. Тираж 100 экз. Заказ 395.

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», 2020

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

ЭЛЕКТРОНИКА, РАДИОФИЗИКА, РАДИОТЕХНИКА, ИНФОРМАТИКА

Kozel V.M., Podvornaya D.A., Kovalev K.A. Peel factor of signals of 5G mobile service systems.....	5
Vyshinski N.V. Study on the properties of stretchable belt under deformation.....	11
Kanojka A.I. Amplitude modulation of radiation by coupled resonators.....	18
Karankova S.Y., Chubenko E.B., Tikhonov I.A. Synthesis and properties of composite materials based on zinc oxide nanoparticles in an insulating matrix.....	25
Ivashenko V.P. String processing model for knowledge-driven systems.....	33
Arkhipenka S.A., Shilin L.U., Naurotsky A.A., Kuznetsov A.P. Methodology to identify robots given the type of control designation.....	41
Qian Longwei. Ontological approach to Chinese text processing.....	49
Tsikhhan O.I., Madveika S.I., Bordusau S.V., Barakhoev A.L., Kamlach P.V. Study of the influence of ozone-air mixture supply conditions on the process of the photoresist removal from the silicon wafer surface.....	57
Malevich I.Yu., Zayats P.V. Adaptive broadband low-noise RF amplifier.....	66
Pevneva N.A., Kopshai A.A., Gurskii A.L. Simulation of electromagnetic field distribution in the measuring cell for determining the dielectric permittivity of materials at microwave frequencies.....	75
Zheleznyak V.K., Lavrov S.V., Filipovich A.G., Baranouski M.M. Synthesis of a measuring composite signal for assessing the security of speech signals during discrete-quantized transformation.....	81

Belousova E.S., Dumchev B.I., Al-Mahdawi M.S.Kh. Justification of binder material selection for carbon particles incorporation into fibrous electromagnetic radiation absorber	88
Nguen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V. Electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by reactive magnetron sputtering	94



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-5-10>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.391

ПИК-ФАКТОР СИГНАЛОВ СИСТЕМ СУХОПУТНОЙ ПОДВИЖНОЙ СЛУЖБЫ 5G

КОЗЕЛ В.М., ПОДВОРНАЯ Д.А., КОВАЛЁВ К.А.

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

Поступила в редакцию 7 июня 2019

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В статье рассмотрены вопросы возможных форматов сигналов сетей мобильной связи 5G (NR, IMT-2020): конфигурации числа ресурсных блоков и частотных сдвигов поднесущих, модуляционные схемы, организации физического уровня, а также широкополосность сигналов данных сетей и, как следствие, необходимость в введении запаса на линейность приемо-передающих трактов для исключения искажений или проявления эффектов блокирования при помеховых воздействиях данного сигнала на сторонние средства. Проанализированы характеристики динамического диапазона сигналов систем сухопутной подвижной службы стандарта IMT-2020, сделан вывод о шумоподобности сигналов. Для нахождения отношения максимальной амплитуды к ее среднему значению и данного отношения, не превышаемого с заданной вероятностью, использовались математические модели, реализуемые посредством среды Matlab. Авторами сделан вывод о соответствии закона распределения вероятностей модуля мгновенной амплитуды сигналов системы связи 5-го поколения распределению, характерному для узкополосного радишума. На основании проведенного исследования получены значения пик-фактора сигнала систем сухопутной подвижной службы стандарта IMT-2020 для различных их вариаций и определен достаточный уровень запаса мощности для обеспечения, с высокой вероятностью, прохождения сигналов сетей мобильной связи пятого поколения через радиотракты, исключающий искажения сигналов. Полученные результаты были применены при проведении экспертизы на электромагнитную совместимость радиоэлектронных средств сотовой подвижной связи с действующими и перспективными радиоэлектронными средствами гражданского и специального назначения, а также при исследовании защиты земных станций спутниковой связи от воздействия радиоэлектронных средств сетей сотовой подвижной электросвязи стандарта IMT-2020, размещаемых на приграничных территориях.

Ключевые слова: мобильная связь, телекоммуникационные технологии, 5G, электромагнитная совместимость, сети связи, пик-фактор, динамический диапазон.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Козел В.М., Подворная Д.А., Ковалёв К.А. Пик-фактор сигналов систем сухопутной подвижной службы 5G. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 5-10.

PEAK FACTOR OF SIGNALS OF 5G MOBILE SERVICE SYSTEMS

VICTOR M. KOZEL, DANA A. PODVORNAYA, KONSTANTIN A. KOVALEV

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

Submitted 7 June 2019

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. This article discusses the possible formats of signals of 5G mobile communication networks (NR, IMT-2020): configurations of the number of resource blocks and frequency shifts of subcarriers. modulation schemes, organizations of the physical level, as well as the broadband signals of these networks and, as a result, the need for introducing a margin on the linearity of the transceiver's paths to eliminate distortion or the manifestation of blocking effects when the signal interferes with third-party means. We analyze the characteristics of the dynamic range of the signals from IMT-2020 ground mobile systems and make a conclusion about the noise-like signals. To find the ratio of the maximum amplitude to its average value and a given ratio not exceeded with a given probability, the Matlab mathematical models were used. We infer that the law of probability distribution of the module of the instantaneous amplitude of the 5G signals corresponds to the distribution characteristic of narrow-band radio noise. Based on the study, the peak factor of the signal of the IMT-2020 ground mobile systems for various variations is obtained and a sufficient level of power reserve is provided to ensure, with high probability, the transmission of the 5G signals through radio paths, eliminating signal distortion. The results of this study were applied in the examination of the electromagnetic compatibility of radio electronic devices of cellular mobile communications with existing and promising electronic means of civil and special purposes and in the study of the protection of ground satellite stations from the effects of radio electronic means of IMT-2020 cellular mobile telecommunication networks located at border territories.

Keywords: mobile communication, telecommunication technology, 5G, electromagnetic compatibility, networks, communication networks, peak factor, dynamic range.

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

For citation. Kozel V.M., Podvornaya D.A., Kovalev K.A. Peak factor of signals of 5G mobile service systems. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 5-10.

Введение

Техническими спецификациями новой технологии связи 5G (NR, IMT-2020) определены форматы радиоинтерфейса, предполагающие агностический способ управления пропускной способностью сети связи. В основу положен метод организации множественного доступа к каналам связи на основе технологии OFDM с использованием циклического префикса. При этом предполагается адаптивное изменение модуляционной схемы и шага поднесущих частот в групповом сигнале. Использование большого количества поднесущих частот с различными модуляционными схемами при формировании сигналов технологии связи 5G вызывает предположение о возможно высоком их пик-факторе, что обуславливает предъявление особых требований к верхней границе динамического диапазона соответствующих радиотрактов с целью исключения недопустимых искажений сигнала.

В связи с вышеизложенным представляет интерес определение значения пик-фактора радиосигнала в сетях связи 5G с учетом широкого спектра возможных его структурных вариаций.

Обобщенный формат сигналов сетей связи 5G

Наиболее перспективной для сетей связи ИМТ-2020 на начальной стадии внедрения в Республике Беларусь является полоса частот $n78$ (3300 – 3800 МГц). Схема множественного доступа для физического уровня основана на мультиплексировании с ортогональным частотным разделением (OFDM) с циклическим префиксом (CP). Для поддержки передачи в непарном спектре активируется дуплексный режим с временным разделением (TDD).

Спецификация 3GPP для рассматриваемой полосы частот предусматривает 28 различных конфигураций числа ресурсных блоков и частотных сдвигов поднесущих. Кроме того, каждая конфигурация предусматривает использование пяти модуляционных схем. Таким образом, общая совокупность возможных форматов сигналов составляет 140 вариантов.

Ресурсный блок радиосигнала содержит 12 поднесущих с варьируемым частотным интервалом. На каждой поднесущей поддерживаются следующие схемы модуляции:

- в нисходящем канале, QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM;
- в восходящем канале, QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM для OFDM с CP и $\pi/2$ -BPSK, QPSK, 16QAM, 64QAM и 256QAM для DFT-s-OFDM с CP.

Физический уровень сетей связи пятого поколения предполагает организацию управления пропускной способностью совместным управлением скоростью передачи и организацией очередей (агностический способ управления пропускной способностью), позволяя физическому уровню адаптироваться к различным распределениям спектра.

Возможные варианты конфигурации физического уровня сетей 5G (частотный сдвиг поднесущих, количество ресурсных блоков, полоса частот радиоканала и величина защитного интервала) отражены в табл. 1 и 2.

Таблица 1. Количество ресурсных блоков для различных конфигураций сигнала 5G
Table 1. Number of resource blocks for different 5G signal configurations

Разнос поднесущих, кГц Subcarrier spacing, kHz	Ширина полосы частот радиоканала, МГц Radio channel bandwidth, MHz												
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	25	52	79	106	133	160	216	270	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	11	24	38	51	65	78	106	133	162	189	217	245	273
60	N.A	11	18	24	31	38	51	65	79	93	107	121	135

Таблица 2. Величина защитного интервала для различных конфигураций сигнала 5G
Table 2. The magnitude of the guard interval for different configurations of the 5G signal

Разнос поднесущих, кГц Subcarrier spacing, kHz	Ширина полосы частот радиоканала, МГц Radio channel bandwidth, MHz												
	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	100
	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}	N_{RB}
15	243	313	383	453	523	593	553	693	N.A	N.A	N.A	N.A	N.A
30	505	665	645	805	785	945	905	1045	825	965	925	885	845
60	N.A	1010	990	1330	1310	1290	1610	1570	1530	1490	1450	1410	1370

Методика определения пик-фактора сигналов сетей связи ИМТ-2020

Определение пик-фактора структурно сложных радиосигналов, каковыми являются сигналы, предполагаемые к использованию в сетях связи ИМТ-2020, рационально производить не непосредственно на их физических реализациях, а на математических моделях их комплексной огибающей. Данный подход вполне обосновывается тем, что в реальном оборудовании систем связи ИМТ-2020 сигналы формируются программно-аппаратным способом посредством вычисления необходимых комплексных огибающих OFDM символов с последующим переносом на радиочастоту квадратурным модулятором.

В настоящих исследованиях, комплексная огибающая сигналов ИМТ-2020 формировалась в среде MatLab с использованием приложения «Wireless Waveform Generation» (объем генерации 1000 OFDM символов со случайным информационным заполнением для каждого из возможных форматов радиосигнала).

На рис. 1 приведена характерная гистограмма распределения модуля комплексной амплитуды сигнала сети связи 5G.

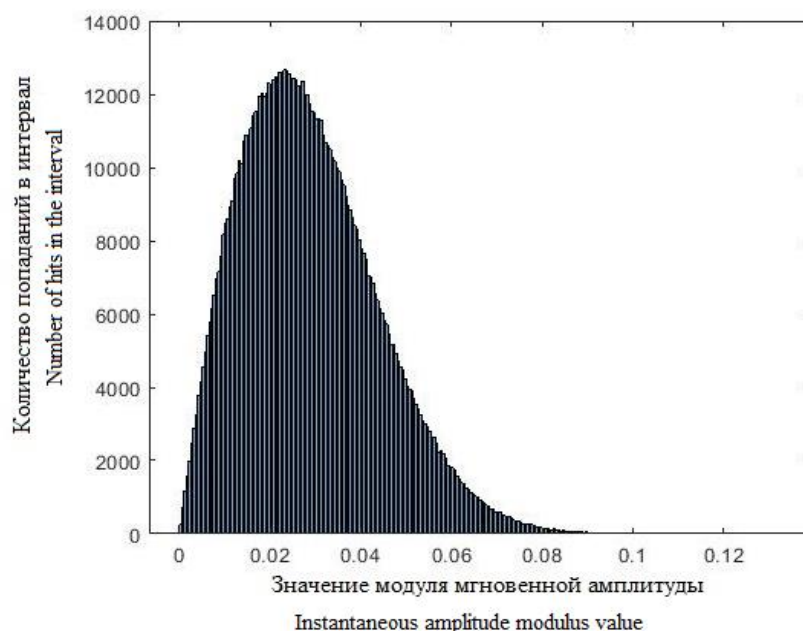


Рис. 1. Типовой вид гистограммы распределения (числа попаданий в заданный интервал значений) модуля мгновенной амплитуды для сигналов системы мобильной связи стандарта 5G

Fig. 1. The typical view of distribution histogram (the number of hits in a given interval of values) of the instantaneous amplitude module for signals of the 5G mobile communication system

Приведенная выше гистограмма соответствует рэлеевскому закону распределения вероятностей, характерному для узкополосного радишума.

Результаты исследования пик-фактора сигналов сетей связи 5G

Ниже в табл. 3 приведены диапазоны значений пик-фактора Π (отношения максимальной амплитуды к ее среднему значению) и пик-фактора, не превышаемого с заданной вероятностью $K_{0,9}$, $K_{0,95}$ и $K_{0,99}$ (отношения квантилей порядка 0,9; 0,95 и 0,99 распределения вероятностей амплитуды к ее среднему значению), полученные в результате анализа смоделированных временных реализаций комплексной огибающей сигналов различной конфигурации сетей связи 5G.

Таблица 3. Пик-фактор сигналов 5G с различной модуляцией поднесущих
Table 3. Peak-factor of 5G signals with different modulated subcarriers

Модуляция поднесущих Subcarriers Modulation	Π	$K_{0,9}$	$K_{0,95}$	$K_{0,99}$
QPSK	3,86–5,48	1,71–1,74	1,93–1,98	2,37–2,60
16-QAM	3,70–4,79	1,63–1,87	1,85–1,98	2,29–2,69
64-QAM	3,75–4,94	1,71–1,79	1,90–1,99	2,31–2,78
256-QAM	3,88–4,94	1,70–1,73	1,90–1,98	2,39–2,58

Анализ данных показывает, что пик-фактор совокупности сигналов, планируемых для использования в сетях 5G, изменяется в пределах 3,7–5,5 (среднее значение 4,3). Вероятностные пик-факторы в пределах 1,6–1,9 (среднее значение 1,7); 1,8–2,0 (среднее значение 1,9) и 2,3–2,8 (среднее значение 2,5) для вероятностей превышения 0,1; 0,05 и 0,01 соответственно.

Заключение

В соответствии с вышеизложенным можно сделать следующие выводы:

– одномерное распределение амплитудных значений радиосигналов сетей связи 5G соответствует рэлеевскому закону распределения вероятностей, характерному для узкополосного радишума;

– полученные в результате моделирования значения пик-фактора для различных вариаций сигналов сетей связи 5G не превышают величины 5,5 (14,8 дБ);

– менее 1 % амплитудных значений радиосигнала превышает в 3 раза (9,5 дБ) его среднее значение;

– верхняя граница динамического диапазона элементов тракта формирования и обработки радиосигналов 5G должна учитывать необходимость обеспечения запаса линейного усиления минимум на 9,5 дБ;

– при анализе степени помехового воздействия излучения оборудования сетей связи 5G на приемные тракты сторонних РЭС необходимо учитывать вероятность их блокирования кратковременными пиковыми значениями амплитуды сигнала 5G и вводить необходимый запас допустимого уровня помехового воздействия на 14,8 дБ.

Список литературы / References

1. Ma Z., Zhang Z.Q., Ding Z.G., et al. Key techniques for 5G wireless communications: network architecture, physical layer, and MAC layer perspectives. *Sci China Inf Sci.* 2015;58:041301(20). DOI: 10.1007/s11432-015-5293.
2. Zi Q.C., Niu H.N., Papathanassiou A.T., et al. 5G network capacity : key elements and technologies. *IEEE Veh Technol Mag.* 2014;9:71-78.
3. Yu X.B., Zhou T.T., Rui Y., et al. Cross-layer design for cooperative MIMO systems with relay selection and imperfect CSI. *Sci China Inf Sci.* 2013;56:022312.

Вклад авторов

Козел В.М. разработал постановку задачи и метод генерации сигналов системы связи 5G. Подворная Д.А. смоделировала временные реализации комплексных огибающих сигналов сетей связи 5G и произвела расчеты пик-факторов.

Ковалёв К.А. выполнил анализ полученных результатов.

Authors' contribution

Kozel V.M. developed a statement of the problem and a method for generating signals of a 5G communication system.

Podvornaya D.A. modeled the temporary implementations of the complex envelopes of the signals of 5G communication networks and calculated the peak factors.

Kovalev K.A. performed an analysis of the results.

Сведения об авторах

Подворная Д.А., магистрант Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

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

Ковалёв К.А., старший научный сотрудник НИЛ 1.12 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Podvornaya D.A., Master Student of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

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

Kovalev K.A., Senior Researcher, SRL 1.12 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. +375-29-892-83-54;
e-mail: podvornaya@bsuir.by
Подворная Дана Александровна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-892-83-54;
e-mail: podvornaya@bsuir.by
Podvornaya Dana Alexandrovna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-11-17>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.85.052

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ РАСТЯГИВАЕМОЙ ЛЕНТЫ В УСЛОВИЯХ ДЕФОРМАЦИИ

ВЫШИНСКИЙ Н.В.

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

Поступила в редакцию 6 февраля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью настоящей работы является теоретическое исследование контактного взаимодействия предварительно натянутой гибкой упруго растяжимой ленты с неподвижным шкивом. Рассматривается случай линейного распределения по длине дуги охвата удельного давления со стороны шкива на ленту. Для этого случая получено выражение для усилия натяжения ленты, распределяющегося по дуге охвата. Показано, что для гибкого звена в виде ленты в пределах дуги охвата присутствуют два вида участков: два симметрично расположенные участки упруго деформируемой ленты, соответствующие дугам скольжения, и расположенный между ними участок недеформируемой ленты. При определенных условиях недеформируемый участок ленты отсутствует, т. е. лента упруго деформируется в пределах всей дуги охвата, которая в этом случае является дугой скольжения. Выполненные теоретические исследования контактного взаимодействия упруго деформируемого гибкого звена с неподвижным шкивом выявили эффект независимости длины дуги скольжения, т. е. деформируемого в зоне охвата участка гибкого звена, от усилия натяжения. Длина этого участка определяется углом охвата и коэффициентом трения для материалов гибкого звена и шкива. Полученные результаты дополняют сведения о механике взаимодействия гибкого звена с ведущим и ведомым звеньями ременной передачи и позволяют получить дополнительные сведения о явлении упругого скольжения, возникающего в этих передачах.

Ключевые слова: гибкое звено, шкив, угол охвата, усилие натяжения, угол скольжения, упругие деформации.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Вышинский Н.В. Исследование свойств растягиваемой ленты в условиях деформации. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 11-17.

STUDY ON THE PROPERTIES OF STRETCHABLE BELT UNDER DEFORMATION

NIKALAI V. VYSHINSKI

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

Submitted 6 February 2020

©, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of this work is to theoretically study the contact interaction of a pre-stretched flexible elastic tensile belt with a fixed pulley. The case of linear distribution of the specific pressure from the pulley on the belt along the length of the coverage arc is considered. For this case, an expression is obtained for the belt tension force distributed along the coverage arc. It is shown that for a flexible link in the form of a tape, there are two types of sections within the coverage arc: two symmetrically arranged sections of an elastically deformable tape corresponding to the sliding arcs, and a section of a non-deformable tape located between them. Under certain conditions, there is no non-deformable section of the tape, i.e. the tape is elastically deformed within the entire coverage arc, which in this case is a sliding arc. Theoretical studies of the contact interaction of an elastically deformable flexible link with a fixed pulley have revealed the effect of independence of the length of the sliding arc, i.e., the flexible link that is deformed in the coverage area, from the tension force. The length of this section is determined by the angle of coverage and the coefficient of friction for the flexible link and pulley materials. The results obtained add to the information about the mechanics of interaction of the flexible link with the leading and driven links of the belt drive and allow you to get additional information about the phenomenon of elastic sliding that occurs in these gears.

Keywords: flexible link, pulley, coverage angle, tension force, sliding angle, elastic deformations.

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

For citation. Vyshinski N.V. Study on the properties of stretchable belt under deformation. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 11-17.

Введение

В механизмах с фрикционным сцеплением гибкого звена с ведущим и ведомым звеньями (шкивами) передача движения осуществляется за счет сил трения, возникающих в зоне контактирования гибкого звена со шкивами. Необходимые значения сил трения, обеспечивающих передачу движения от ведущего шкива к ведомому, достигается натяжением гибкого звена. При работе механизма натяжения в набегающей и сбегаящей ветвях гибкого звена имеют разное значение, что является причиной упругих деформаций его перемещающихся участков. Эти деформации участков гибкого звена в пределах зон его контактирования со шкивами вызывают явление упругого скольжения [1]. На начальном этапе, до начала движения звеньев механизма, гибкое звено под действием усилия натяжения упруго деформируется. Определенный интерес для дальнейшего рассмотрения явления упругого скольжения представляет распределение растягивающих усилий в упруго деформированном гибком звене, контактирующем с неподвижными шкивами.

Теоретический анализ

Для выяснения механизма упругого скольжения начнем рассмотрение распределения усилий натяжения упруго деформированного гибкого звена в зоне его контактирования (охвата) с неподвижными ведущим и ведомым звеньями механизма. Так как при неподвижных ведущем и ведомом звеньях распределения усилий натяжения гибкого звена в зонах

контактирования будут подобными, ограничимся рассмотрением взаимодействия гибкого звена только с неподвижным ведущим шкивом (рис. 1). В этом случае натяжение обеих ветвей гибкого звена вне зоны контакта (охвата) с неподвижным ведущим шкивом будет одинаково и равно предварительному натяжению T_0 , т. е. $T_1 = T_2 = T_0$ (рис. 1).

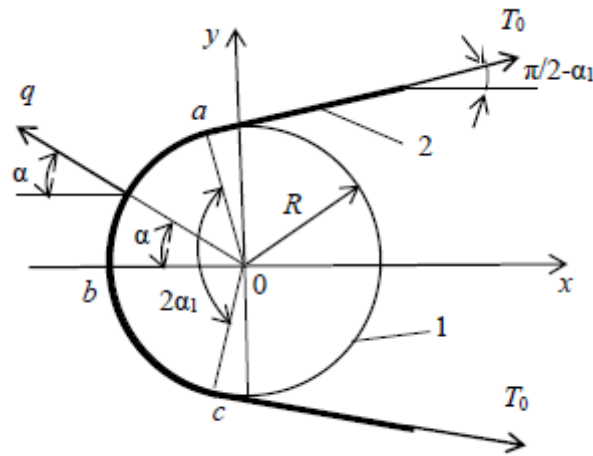


Рис. 1. Схема контактирования гибкого звена с неподвижным ведущим шкивом
Fig. 1. Flexible contact scheme links with a fixed drive pulley

В качестве гибкого звена примем тонкую упруго деформируемую ленту. Пусть угол охвата лентой ведущего шкива равен $2\alpha_1$. В зоне контактирования со шкивом на ленту, кроме растягивающего усилия, будет действовать сила трения. Величина силы трения зависит от величины нормального давления на ленту со стороны шкива и значения коэффициента трения для материалов ленты и шкива. Нормальное давление в пределах дуги охвата будет распределяться неравномерно: от нуля в точках a и c до максимального значения в точке b (рис. 1). Будем считать, что распределение нормального давления q в пределах дуги охвата соответствует линейной зависимости вида

$$q(\alpha) = q_0(1 - \alpha/\alpha_1), \quad (1)$$

где α – текущее значение угла в пределах дуги охвата. Для верхней части дуги охвата гибким звеном шкива значение угла α изменяется от 0 до α_1 .

Выражение для $q_0 = q(0)$ найдем из условия равенства нулю суммы проекций на ось X всех сил, действующих на верхнюю часть гибкого звена (рис. 1):

$$\sum F_{ix} = T_0 \cos(\pi/2 - \alpha_1) - \int_0^{\alpha_1} q(\alpha) \cos \alpha d\alpha = 0. \quad (2)$$

Выполнив интегрирование, из уравнения (2) получим выражение для q_0 в виде

$$q_0 = \frac{T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1}. \quad (3)$$

С учетом (3) выражение (1) для удельного давления запишется в виде

$$q(\alpha) = \frac{T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_1} \right). \quad (4)$$

Для нахождения выражения, определяющего изменение натяжения гибкого звена в зоне его контакта со шкивом, рассмотрим элементарный участок дуги упруго деформированного гибкого звена длиной dL , опирающийся на угол $d\alpha$ (рис. 2).

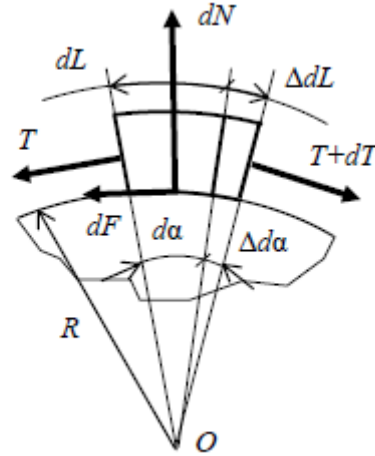


Рис. 2. Силы, действующие на элементарный участок гибкого звена
Fig. 2. Forces acting on elementary section of the flexible link

На элементарный участок упруго деформированного гибкого звена действуют силы натяжения T и $T+dT$, сила трения dF и сила нормального давления dN . Выражение для силы трения запишется в виде

$$dF = \mu dN = \mu q(\alpha) d\alpha, \quad (5)$$

где μ – коэффициент трения для пары материалов гибкого звена и шкива.

Силы, приложенные к элементарному участку гибкого звена длиной dL , вызовут, вследствие упругих деформаций, изменение его длины на величину ΔdL , а значение элементарного угла $d\alpha$ изменится на $\Delta d\alpha$ (рис. 2).

Запишем выражение для суммы элементарных работ, совершаемых на угловом перемещении $\Delta d\alpha$ моментами относительно центра O_1 ведущего шкива, радиус которого равен R_1 , сил, приложенных к элементарному участку гибкого звена: T , $T+dT$ и dF . Сумма всех элементарных работ будет равна нулю:

$$7dA_T + dA_F + dA_{T+dT} = 0. \quad (6)$$

В выражении (6) элементарные работы на угловом перемещении $\Delta d\alpha$ моментов растягивающих усилий T и $T+dT$ запишутся [2] соответственно

$$dA_T = -0,5TR_1\Delta d\alpha, \quad dA_{T+dT} = 0,5(T+dT)R_1\Delta d\alpha,$$

а элементарная работа момента сил трения dF запишется в виде

$$dA_F = -dFR_1\Delta d\alpha = -\mu q(\alpha) d\alpha R_1 \Delta d\alpha.$$

Подставив в уравнение (6) выражения для элементарных работ и выполнив преобразования, получим выражение для приращения усилия натяжения в виде

$$dT = 2\mu q(\alpha) d\alpha. \quad (7)$$

С учетом выражения (4) для удельного давления $q(\alpha)$, выполним интегрирование выражения (7) в интервале значений натяжения гибкого звена от начального T_0 при $\alpha = \alpha_1$, до T , соответствующего текущему значению угла α :

$$\int_T^{T_0} dT = \int_{\alpha_1}^{\alpha} 2\mu \frac{T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(1 - \frac{\alpha}{\alpha_0} \right) d\alpha. \quad (8)$$

Выполнив интегрирование уравнения (8), получим выражение для усилия натяжения гибкого звена в зоне охвата шкива в виде

$$T = T_0 - \frac{\mu T_0 \alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(\alpha_1 - 2\alpha + \frac{\alpha^2}{\alpha_1} \right). \quad (9)$$

На рис. 3 представлены графики распределения относительного усилия натяжения T/T_0 гибкого звена в пределах дуги охвата, равной $2\alpha_1 = \pi$. Если при значении коэффициента трения $\mu = 0,4$ гибкое звено упруго деформируется в пределах всей дуги охвата, то при увеличении значения коэффициента трения длина части дуги охвата, соответствующая упругим деформациям гибкого звена, уменьшается.

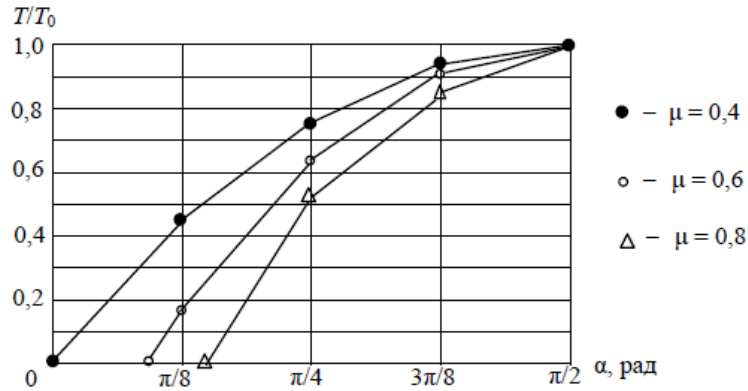


Рис. 3. Распределение относительного усилия натяжения гибкого звена по длине дуги охвата ($2\alpha_1 = \pi$) для трех значений коэффициента трения
Fig. 3. Distribution of the relative tension force of the flexible link along the length of the coverage arc ($2\alpha_1 = \pi$) for three values of the coefficient of friction

Обсуждение результатов

Проанализируем полученное выражение для усилия натяжения гибкого звена в зоне его контактирования с ведущим звеном. Максимальное значение усилия натяжения, равное начальному T_0 усилию натяжения обеих ветвей гибкого звена, будет в начале дуги охвата, т. е. при $\alpha = \alpha_1$ (рис. 1). С увеличением значения угла α будет увеличиваться модуль отрицательной составляющей выражения (9). При некотором значении угла $\alpha = \alpha_0$ модуль отрицательной части выражения (9) станет равным T_0 , а усилие натяжения в зоне контакта гибкого звена со шкивом – равным нулю. Следовательно, перемещения упруго деформируемых участков гибкого звена относительно поверхности шкива будут происходить не по всей длине охвата, а только в пределах, определяемых углами α_1 и α_0 . Назовем дугу, в пределах которой деформируемые участки гибкого звена перемещаются (скользят) относительно поверхности шкива, дугой скольжения. Угол α_c , определяющий дугу скольжения для верхней ветви гибкого звена, будет определяться выражением

$$\alpha_c = \alpha_1 - \alpha_0. \quad (10)$$

Найдем выражение для значения угла α_0 , при котором натяжение гибкого звена в зоне охвата станет равным нулю. При условии, что $T(\alpha_0) = 0$, из выражения (9) получим

$$1 - \frac{\mu\alpha_1 \sin \alpha_1}{1 - \cos \alpha_1} \left(\alpha_1 - 2\alpha_0 + \frac{\alpha_0^2}{\alpha_1} \right) = 0. \quad (11)$$

Разделив выражение (11) на выражение перед скобками, получим

$$\frac{1 - \cos \alpha_1}{\mu\alpha_1 \sin \alpha_1} - \alpha_1 + 2\alpha_0 - \frac{\alpha_0^2}{\alpha_1} = 0, \quad (12)$$

или

$$\alpha_0^2 - 2\alpha_1\alpha_0 + c = 0, \quad (13)$$

$$\text{где } c = \alpha_1^2 - \frac{1 - \cos \alpha_1}{\mu \sin \alpha_1}.$$

Решение уравнения (13) запишется в виде

$$(\alpha_0)_{1,2} = \alpha_1 \pm \sqrt{\alpha_1^2 - c}. \quad (14)$$

Так как $\alpha_0 < \alpha_1$, решение уравнения (14), удовлетворяющее этому условию, запишется, с учетом выражения для c , в виде

$$\alpha_0 = \alpha_1 - \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_1}{\mu \sin \alpha_1}}. \quad (15)$$

С учетом (15) выражение (10) для дуги скольжения примет вид

$$\alpha_c = \sqrt{\frac{1 - \cos \alpha_1}{\mu \sin \alpha_1}}. \quad (16)$$

Из выражения (16) следует, что длина дуги скольжения, т. е. той части дуги охвата гибкого звена, которая упруго деформируется, не зависит от усилия натяжения, а определяется только величиной половины угла охвата α_1 и значением коэффициента трения μ для материалов гибкого звена и шкива.

Это явление, назовем его эффектом независимости длины дуги скольжения от предварительного усилия натяжения гибкого звена, является следствием увеличения значения удельного давления шкива на гибкое звено при увеличении его натяжения. С увеличением удельного давления увеличивается сила трения, препятствующая смещениям относительно шкива упруго деформируемых участков гибкого звена. Если бы величина распределенного по дуге охвата удельного давления не зависела от усилия натяжения гибкого звена, то с изменением усилия натяжения изменялась бы и длина деформируемого в зоне охвата участка гибкого звена.

На рис. 4 представлены зависимости угла α_0 , соответствующего началу недеформируемого участка гибкого звена, от значения коэффициента трения μ для двух значений угла охвата гибким звеном шкива: $2\alpha_1 = \pi$ и $2\alpha_1 = 2\pi/3$.

α_0 , рад.

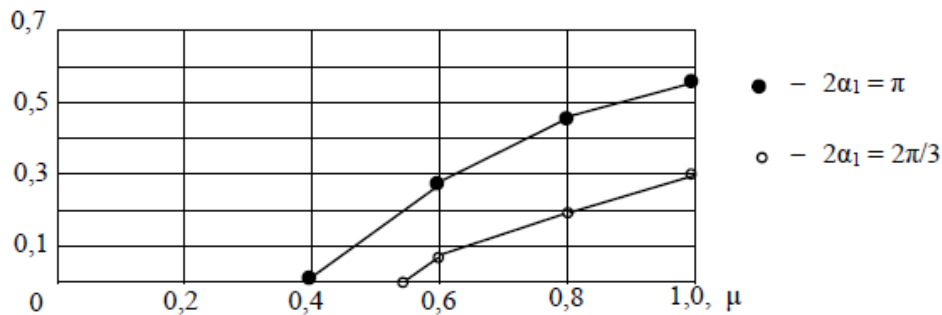


Рис. 4. Зависимость угла α_0 , определяющего недеформируемый участок гибкого звена, от коэффициента трения для двух значений дуги охвата
Fig. 4. Dependence of the angle α_0 that defines the non-deformable section flexible link, from the coefficient of friction for two values

Если в выражении (15) принять значение половины дуги охвата равным $\alpha_1 = \pi/2$, то получим зависимость для α_0 в виде

$$\alpha_0 = \frac{\pi}{2} - \sqrt{\frac{1}{\mu}}. \quad (17)$$

Приняв в выражении (15) $\alpha_0 = 0$, получим значение коэффициента трения μ , при котором гибкое звено будет упруго деформироваться по всей дуге охвата, т. е. дуга скольжения будет равна дуге охвата. Это значение коэффициента трения для угла охвата, равного π , составит $\mu = 4/\pi^2 \approx 0,4$, а для угла охвата, равного $2\pi/3$, – $\mu \approx 0,53$ (рис. 4).

Заклучение

Данная работа посвящена теоретическому исследованию распределения усилий натяжения упруго деформируемого гибкого звена в зоне его контакта с неподвижным шкивом. В качестве гибкого звена взята тонкая упруго растяжимая лента. Для случая линейно изменяющегося в зоне контакта ленты с неподвижным шкивом давления, получено выражение для распределения по дуге охвата усилия натяжения деформируемого гибкого звена. Вместе с деформируемым участком гибкого звена отмечено наличие в пределах дуги охвата и недеформируемого участка.

Выполненные теоретические исследования контактного взаимодействия упруго деформируемого гибкого звена с неподвижным шкивом выявили эффект независимости длины деформируемого в зоне охвата участка гибкого звена от усилия натяжения. Длина упруго деформируемой части гибкого звена в пределах дуги охвата определяется углом охвата и коэффициентом трения для материалов гибкого звена и шкива и не зависит от усилия натяжения гибкого звена.

Список литературы

1. Вышинский Н.В. *Техническая механика*. Минск.: ИВЦ Минфина; 2006.
2. Тимошенко С.П., Гере Дж. *Механика материалов*. Москва : Мир; 1976.

References

1. Vyshinski, N.V. [*Technical mechanics*]. Minsk: IVC Minfina; 2006. (In Russ.)
2. Timoshenko S.P., Dj. Gere. [*Material mechanics*]. Moscow: Mir; 1976. (In Russ.)

Сведения об авторе

Вышинский Н.В., к.т.н., профессор, профессор кафедры инженерной и компьютерной графики Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the author

Vyshinski N.V., PhD, Professor, Professor of the Department of Engineering and Computer Graphics of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-89-73;
e-mail: vyshinski@bsuir.by
Вышинский Николай Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-89-73;
e-mail: vyshinski@bsuir.by
Vyshinski Nikolai Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-18-24>

Original paper

UDC 535.5

AMPLITUDE MODULATION OF RADIATION BY COUPLED RESONATORS

ALEXEY I. KANOJKA

GNPO "Optics, Optoelectronics and Laser Technology" (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 3 March 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. In this paper, we describe a method that allows one to realize highly efficient amplitude modulation of radiation at the output of electro-optical laser switches with two coupled resonators, in which electro-optical elements are located both in two split arms and in every arm of a multipath interferometer with combined channels with a control voltage 2 times lower than in existing laser switches. Moreover, the electro-optical elements located in the two split arms of a multipath interferometer with combined channels, with one passage of the light flux through the electro-optical element, must make the opposite controlled changes in the phase difference of the interfering light beams. Therefore, for such electro-optical switches with two coupled resonators the value of the required electric power will be, respectively, 2 times less than that of the existing ones, which significantly expands their operating frequency range. In this case, a laser switch with electro-optical elements located in the two split arms of a multipath interferometer has an asymmetric dependence of the output radiation intensity on the change in the phase difference of the interfering light beams relative to the zero value of the light intensity. A laser switch with electro-optical elements located on all arms of a multipath interferometer with combined channels has a symmetric dependence of the output radiation intensity on the magnitude of the phase difference of the interfering light beams relative to the zero value of the light intensity. In addition, due to the coherent summation of the amplitudes of the interfering light waves, such laser electro-optical shutters also have amplification of radiation with a resonant wavelength.

Keywords: multipath interference, Fabry – Perot resonator, electro-optical effect, coherence.

Conflict of interests. multipath interference, Fabry – Perot resonator, electro-optical effect, coherence.

For citation. Kanojka A.I. Amplitude modulation of radiation by coupled resonators. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 18-24.

Foreword

Electro-optical shutters, that operate in the visible and near IR region of the spectrum, play a huge part in laser location and data transmission systems. Their function in the near IR region of the spectrum is characterized by a significantly larger control voltage as compared to the visible region. Thus, as a rule, such shutters exercise transverse application of the control electric field. In case of transverse electro-optical effect, intrinsic anisotropy of electro-optical crystals initiates dramatic tightening of the requirements to tolerable thermal instability. Therefore, the transverse electro-optical effect can be applied for modulation purposes only when the crystal is thermostated or temperature compensation circuits of natural birefringent effect are engaged [1, 2].

As the electro-optical medium for the working spectral range of interest, 3 m (lithium niobate – LiNbO₃) and mm² (KTP – KTiOPO₄) crystals can be used. [1, 3, 4]. They are special

for the almost constant electro-optical coefficients in a wide temperature range, which is of no small importance in field conditions. Lithium niobate crystals have a lower radiation strength and electro-optical coefficient than KTP crystals, which hampers their application for modulating the Q-factor of laser resonators. Thus, KTP crystals are of the greatest interest in terms of working spectral range, radiation strength, quantity and thermal stability of electro-optical coefficient.

Due to multiple interaction of light with the electro-optical medium, application of electro-optical phase modulation in multi-path interference devices for amplitude modulation of light allows a significant decrease in the control electrical voltage, which therefore increases the working frequency range of such modulators. [1, 5]. However, today's methods do not comprehensively consider the impact on the efficiency of amplitude modulation of multipath interference device specialties, which imposes substantial limits on the efficiency of such modulators. Present-day amplitude modulators based on multipath interference do not allow one to obtain highly efficient amplitude modulation of light radiation for the presence of big losses when irradiating the Fabry – Perot resonator [1, 6, 7].

This research sets an objective to consider the questions about a drop of control voltage of electro-optical laser switches based on multipath interference and an increase in their efficiency, which enables a dramatic augmentation of light modulation performance and expansion of their working frequency range.

Essence of the method

This method consists in implementing amplitude modulation of a plane polarized radiation based on electro-optical effect and multipath interference by loss-free irradiation of the system that encompasses two coupled resonators with controllable Q-factor, which makes it possible to reach a significantly lower control electrical voltage and at the same time increase the efficiency of modulation.

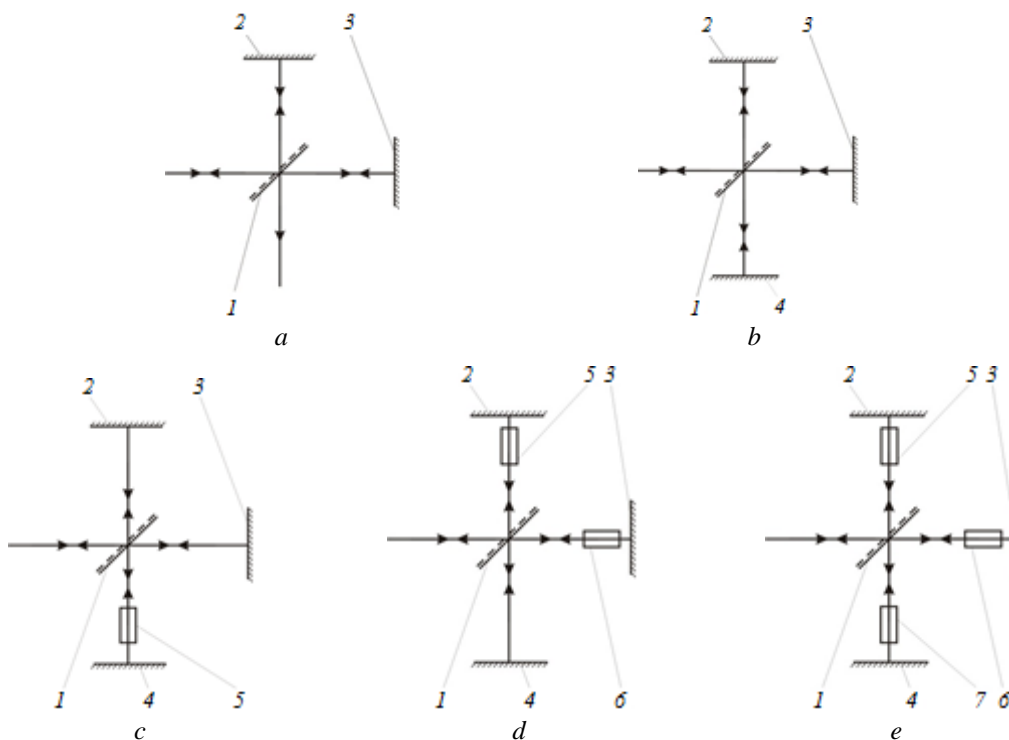


Fig. 1. Optical layouts of Michelson interferometer (a); a multipath interferometer with combined channels (b); a laser switch with an electro-optical element located in the common arm of multi-beam interferometer (c), in two split arms of multipath interferometer (d), in every arm of multipath interferometer (e)

The literature has numerous findings about the two-arm Michelson interferometer (Fig. 1, a) [1, 6, 7]. Should phase electro-optical elements with transverse application of the control field be introduced in both arms of the interferometer, a laser switch is formed with half the control

voltage as compared to the present-day shutters. Its substantial drawback would consist in great light losses on the beam splitter. Should another reflector be introduced in the circuit of the two-arm Michelson interferometer, as shown in Fig. 1, *b*, we obtain the optical system of a two-channel multipath interferometer with combined channels where energy input is almost loss-free. The optical layout of a multipath interferometer with combined channels has one trait – input-output combination, which is what exactly needed for a laser switch. Based on such multipath interferometer, three possible optical layouts of a laser switch can be implemented (see Fig. 1).

Fig. 1, *c* depicts the optical layout of a laser switch with two coupled resonators where the electro-optical element is put in the common arm of the multi-beam interferometer. Fig. 1, *d* and Fig. 1, *e* demonstrate optical layouts of laser switches with two coupled resonators in which electro-optical elements are correspondingly placed in the two split arms and in every arm of the multi-beam interferometer, where 1 – beam splitter; 2, 3, 4 – reflectors; 5, 6, 7 – electro-optical elements. Electro-optical elements can represent electro-optical crystals, e. g. lithium niobate LiNbO_3 or KTP with control electrodes deposited on their lateral faces.

Results and discussion

Consider the fundamental regularities in the function of such multipath interferometer with combined channels and of laser switches that are implementable on its base.

In initial condition, the input of a multipath interferometer under consideration is fed with a monochromatic plane-wavefront light beam with intensity I_0 . Then it is divided by beam splitter 1 into two light beams with equal intensities, i. e., $I_0/2$, and thus their amplitudes will equal

$$E_{0i} = \sqrt{\frac{I_0}{2}}. \quad (1)$$

After being reflected on the first 2nd and the second 3rd reflectors, they repeatedly arrive to the beam splitter that takes one half of radiation out of the optical layout of the laser switch and directs the other half to the third reflector 4th. The radiation from the third reflector goes to the beam splitter where it is divided into two light beams with equal intensities that travel to the first and the second reflectors, etc. Assume $\delta_1 = \delta_2 = \delta_3 = \delta$ – phase difference induced in interferometer's arms; $\Delta\delta$ – controllable variation in phase difference of interfering light beams in case of one passage through the electro-optical element; $T_1 = R_1 = K = 0.5$ – transmission and reflection coefficients of the beam splitter; $R_2 = R_3 = R_4 = R$ – reflection coefficients of the first, second and third reflectors, respectively; then the output of the interferometer would have a light beam with the amplitude of electromagnetic oscillations equal to the total amplitude of re-reflected waves.

Total amplitude of light wave at the output of a multipath interferometer with combined channels can be found from the expression below:

$$E_{\Sigma} = \frac{2E_{0i}K\sqrt{R}}{1 - 2e^{i2(\delta+\Delta\delta)}KR}. \quad (2)$$

Then the expression for total light intensity at the output of a multipath interferometer with combined channels is:

$$I_{out} = E_{\Sigma}E_{\Sigma}^* = \frac{2I_0K^2R}{1 + (2KR)^2 - 4KR\cos 2(\delta + \Delta\delta)}. \quad (3)$$

The provisions reported were compared to the experiment results. The optical layout of the experiment setup is shown in Fig. 2. Composition: laser 1 (LG-207A) that generates constant 1 mW radiation with wavelength $\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$; polarizing isolation unit 2 consisting of polarizing splitter 3, polarization twister 4 and reflector 5, 6, 9, 10 are, respectively, the first, second and third reflectors of coupled resonators; 7 – light radiation power meter (OPHIR meter with NOVA-II display, 3A-SH measurement sensor, Power Accuracy: $\pm 3\%$, Power Noise Level: $2\mu\text{W}$); 8 – beam splitter. Examinations of multipath interferometer with combined channels have proven good correlation of estimated and experimental performance.

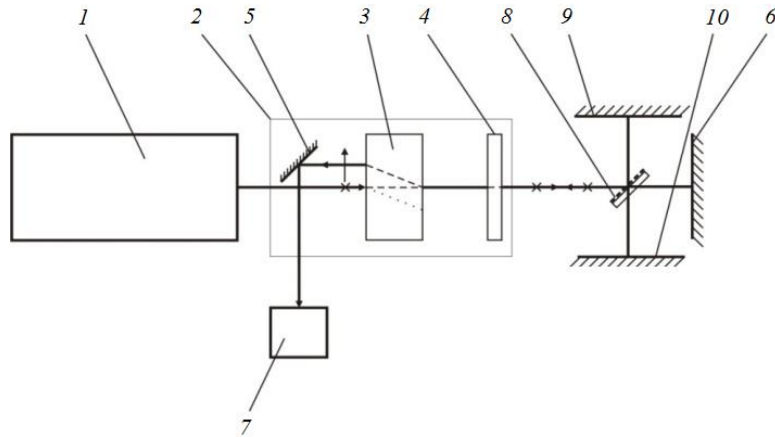


Fig. 2. Optical layout of a laboratory setup for studying coupled resonators

Consider a laser switch with two coupled resonators (see the optical layout in Fig. 1, c) where amplitude modulation is done through variation in the phase difference of interfering light beams in the common arm of a multipath interferometer. This can be achieved by either introducing one electro-optical element to the linear arm or attaching reflector 4 with a piezoelectric drive which ensures enough precision in adjusting optical distance of the common arm, and therefore the difference of phases δ induced therein. combined channels and of laser switches that are implementable on its base.

In initial condition, the input of the laser switch under consideration is fed with a monochromatic plane-wavefront light beam with intensity I_0 . Then the first beam splitter divides it into two light beams with equal intensities, i. e. $I_0/2$, and therefore the amplitudes of their electromagnetic oscillations will be determined by expression (1). After being reflected on the first and the second reflectors, they repeatedly arrive to the beam splitter that takes one half of radiation out of the optical layout of the laser switch and directs the other half to the third reflector. The radiation from the third reflector goes again to the beam splitter to be divided into two light beams with equal intensities that travel to the first and the second reflectors, etc.

Assume that T_5 is the light transmission of the electro-optical element. Then, the output of such laser switch would have a light beam with the amplitude of electromagnetic oscillations equal to the total amplitude of re-reflected waves which can be found from the expression below:

$$E_{\Sigma 1} = \frac{2E_{0i}K\sqrt{R}}{1 - 2e^{i2(\delta+\Delta\delta)}KRT_5}. \quad (4)$$

Then the expression for the total light intensity at the output of the laser switch (see the optical layout in Fig. 1, c) is:

$$I_{out1} = E_{\Sigma 1}E_{\Sigma 1}^* = \frac{2I_0K^2R}{1 + (2KRT_5)^2 - 4KRT_5 \cos 2(\delta + \Delta\delta)}. \quad (5)$$

Fig. 3 (curve 1) demonstrates the dependence of the total light intensity at the output of the laser switch on the variation of $\Delta\delta$ phase differences at the following parametric values: $I_0 = 1$; $K = 0.5$; $R = 0.99$; $T_5 = 0.9$. This dependence clarifies that such laser switch does not have sufficient SNR.

Spectral distribution of the light intensity at the output of such switch is given in Fig. 4, a. The mechanism of amplitude modulation of such laser switch consists in a shift of spectral maximum of radiation intensity in case of corresponding variation in $\Delta\delta$ phase difference. Directions of the shift are illustrated with arrows.

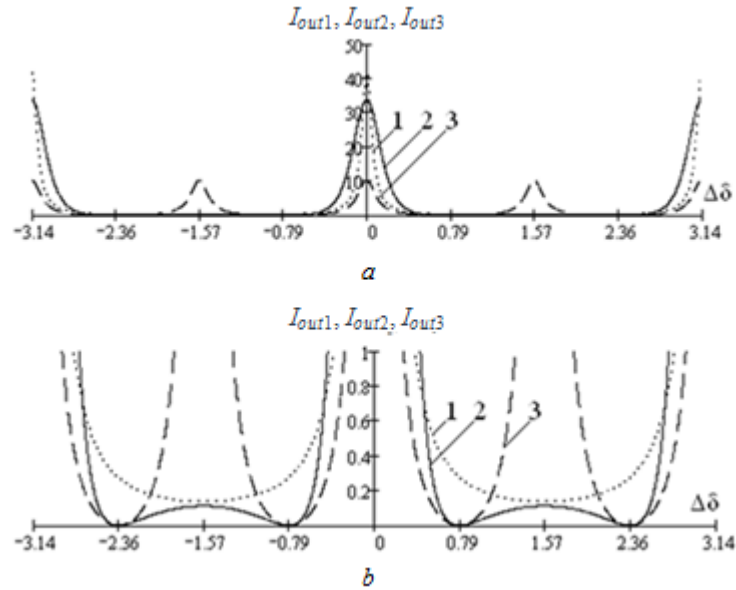


Fig. 3. Dependences of the intensity of the output radiation in the laser switch $I_{out1}, I_{out2}, I_{out3}$ on the magnitude of the variation in the phase difference of the interfering light beams $\Delta\delta$:
 a – general view; b – for values of light intensity not exceeding 1

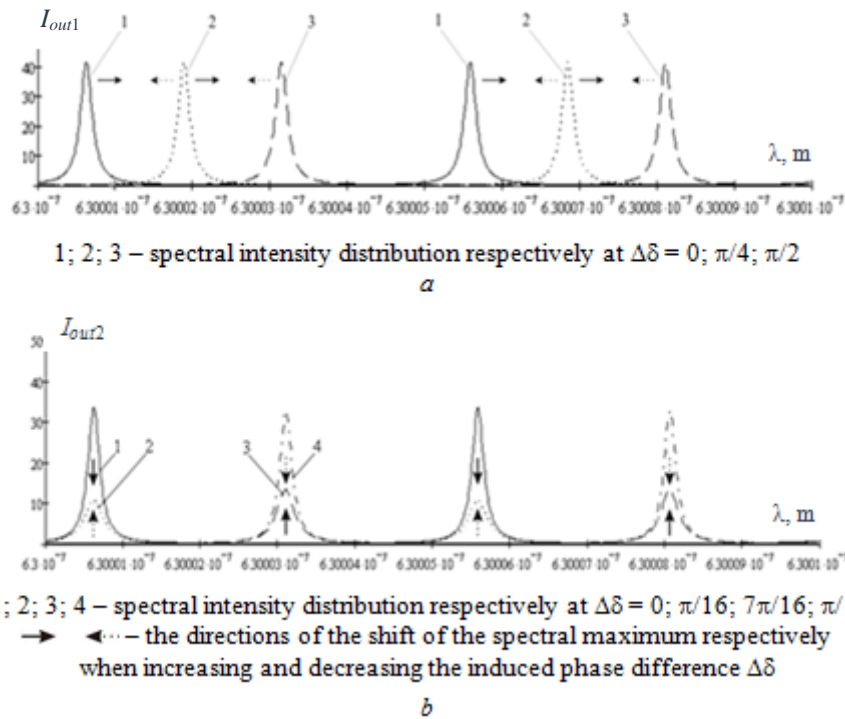


Fig. 4. Spectral distributions of light intensity at the switch output with coupled resonators I_{out1}, I_{out2} when the induced $\Delta\delta$ phase difference variations, respectively, with an electro-optical element located in the common arm (a); with electro-optical elements located in the split arms of a multipath interferometer (b)

The dependence from Fig. 3 (curve 1) demonstrates that the downside of such optical system of a laser switch consists in the impossibility to obtain low control voltage in the first place and low SNR in the second place.

Therefore, the point of interest is to consider the optical system of a laser switch (see Fig. 1, d). Here electro-optical elements lie in the two split arms of a multipath interferometer and initiate opposite controllable variations in the phase difference of interfering light beams in case of one passage through the electro-optical element.

Assume $T_5 = T_6$. Then the total amplitude of light wave at the output of the laser switch where electro-optical elements lie in the two split arms of a multipath interferometer can be found through the expression below:

$$E_{\Sigma 2} = \frac{2E_{0i}KT_5\sqrt{R}\cos 2\Delta\delta}{1-2e^{i2\delta}KRT_5\cos 2\Delta\delta}. \quad (6)$$

Then the expression for total light intensity at the output of such laser switch is:

$$I_{out2} = E_{\Sigma 2}E_{\Sigma 2}^* = \frac{2I_0K^2T_5^2R\cos^2 2\Delta\delta}{1+(2KRT_5\cos 2\Delta\delta)^2 - 4KRT_5\cos 2\delta\cos 2\Delta\delta}; \quad (7)$$

Fig. 3 (curve 2) gives the dependence of total light intensity at the output of the laser switch on the variation in $\Delta\delta$ phase difference. This dependence makes it clear that such laser switch has its first maximum at $\Delta\delta = \pi/4 = 0.79$, which is achieved by applying control voltage $U_{\lambda/8}$.

Fig. 4, *b* demonstrates spectral distribution of light intensity at the output of such switch. The amplitude modulation mechanism of such laser switch consists in shifting the amplitude of the spectral maximum of radiation intensity to zero with further increase at a different wavelength to the maximum in case of varying phase difference $\Delta\delta = \pi/4$. Directions of the shift are illustrated with arrows.

The optical system of the laser switch under consideration benefits for it ensures high modulation efficiency at the control voltage of about $U_{\lambda/8}$, which is two times less than the existent electro-optical shutters have.

The laser switch considered has the dependence of output radiation intensity on the variation value of phase difference of interfering light beams $\Delta\delta$ which is asymmetrical relative to zero light intensity (Fig. 3, curve 2).

Thus, the point of interest is to consider the laser switch with electro-optical elements lying in every arm of a multipath interferometer with its optical layout depicted in Fig. 1, *e*. Here electro-optical elements that lie in the two split arms of a multipath interferometer should initiate opposite controllable variations in the phase difference of interfering light beams in case of one passage through the electro-optical element. The variation in phase difference of interfering light beams in the common arm of a multipath interferometer can match that in one split arm.

Assume $T_5 = T_6 = T_7$. The total amplitude of light wave at the output of such laser switch can be found from the expression below:

$$E_{\Sigma 3} = \frac{2E_{0i}KT_5\sqrt{R}\cos 2\Delta\delta}{1-2e^{i2(\delta+\Delta\delta)}KRT_5^2\cos 2\Delta\delta}. \quad (8)$$

Then the expression for total light intensity at the output of the laser switch is:

$$I_{out3} = E_{\Sigma 3}E_{\Sigma 3}^* = \frac{2I_0K^2T_5^2R\cos^2 2\Delta\delta}{1+(2KRT_5^2\cos 2\Delta\delta)^2 - 4KRT_5^2\cos 2(\delta+\Delta\delta)\cdot\cos 2\Delta\delta}. \quad (9)$$

Fig. 3 (curve 3) shows the dependence of total light intensity at the output of the laser switch on phase difference variation $\Delta\delta$. This dependence makes it clear that such laser switch has the first minimum at $\Delta\delta = \pi/4 = 0.79$, which is achieved by applying control voltage $U_{\lambda/8}$.

The laser switch considered has symmetrical dependence of output radiation intensity on the variation value of the phase difference of interfering light beams $\Delta\delta$ relative to zero light intensity (Fig. 3, curve 3). As in the previous case, the amplitude modulation mechanism of such laser switch consists in shifting the amplitude of the spectral maximum of radiation intensity to zero with further increase at a different wavelength to the maximum in case of varying phase difference $\Delta\delta = \pi/4$.

The optical system of the laser switch under consideration benefits for it ensures high modulation efficiency at the control voltage of about $U_{\lambda/8}$, which is two times less than the existent electro-optical shutters have. The laser switch considered has symmetrical dependence of output

radiation intensity on the variation value of phase difference of interfering light beams $\Delta\delta$ which is asymmetrical relative to zero light intensity (Fig. 3, curve 3).

Conclusion

Therefore, the research completed has demonstrated that one can reach minimum control voltage and maximum efficiency of the amplitude modulation of radiation in electro-optical laser switches with two coupled resonators where electro-optical elements lie both in the two split arms and in every arm of a multipath interferometer with combined channels. Moreover, electro-optical elements in the two split arms of a multipath interferometer with combined channels must initiate opposite controllable variations in the phase difference of interfering light beams in case of one passage through the electro-optical element. The variation in phase difference of interfering light beams in the common arm of a multipath interferometer can match that in one of the split arms. For such laser switches the control voltage will be $U_{\lambda/8}$, which is two times less than the present-day laser switches have, which significantly expands its working frequency range. At the same time, the laser switch with electro-optical elements in the two split arms of a multipath interferometer possesses asymmetrical dependence of output radiation intensity on the variation value of the phase difference of interfering light beams relative to zero light intensity. The laser switch with electro-optical elements in every arm of a multipath interferometer possesses symmetrical dependence of output radiation intensity on the variation value of the phase difference of interfering light beams relative to zero light intensity. Besides, coherent summation of the amplitudes of interfering light waves makes the laser switch capable of enhancing radiation with a resonant wavelength.

References

1. Mustel E.R., Parygin V.N. [*Light modulation and scanning techniques*]. Moscow: Nauka; 1970. (in Russ.)
2. Adrianowa I.I., Zaslavskaja W.R. [Phased electro-optic modulator of non-parsed radiation]. *Optiko-mechanicheskaja promyshlennost = Optical-mechanical industry*. 1978;6:24-26. (in Russ.)
3. Iona F., Schirane D. [*Ferroelectric crystals*]. Moscow: Mir; 1965. (in Russ.)
4. Nai Dzh. [*Physical properties of crystals*]. Moscow: Mir; 1967. (in Russ.)
5. Yariw A., Yuch P. [*Optical waves in crystals*]. Moscow: Mir; 1987. (in Russ.)
6. Nagibina I.M. [*Light interference and diffraction*]. Leningrad: Maschinostroenie; 1985. (in Russ.)
7. Born M., Wolf E. [*Optics fundamentals*]. Moscow: Nauka; 1973. (in Russ.)

Information about the author

Kanojka A.I., PhD, Associate Professor, Senior Researcher of the photoelectronics laboratory of SSPA “Optics, optoelectronics and laser technology”.

Address for correspondence

220090, Republic of Belarus,
Minsk, Logoyskiy tract, 22,
SSPA “Optics, optoelectronics and laser technology”
tel. +375-44-746-63-72;
e-mail: kon54@yandex.by
Kanojka Alexey Ivanovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-25-32>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.315.592.4

СИНТЕЗ И СВОЙСТВА КОМПОЗИТНЫХ МАТЕРИАЛОВ НА ОСНОВЕ НАНОЧАСТИЦ ОКСИДА ЦИНКА В ДИЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАТРИЦЕ

КОРЕНЬКОВА С.Ю., ТИХОНОВ И.А., ЧУБЕНКО Е.Б.

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

Поступила в редакцию 24 апреля 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Получен композитный материал на основе наночастиц оксида цинка, синтезированных химическим гидротермальным методом, и полимерной диэлектрической матрицы силиката натрия. Свободные наночастицы оксида цинка были сформированы при нагреве эквимольного раствора нитрата цинка и гексаметилентетрамина с различными значениями показателя pH (от 3 до 5). Наночастицы были введены в водный раствор силиката натрия и послойно нанесены на кремниевую подложку путем центрифугирования. Методом растровой электронной микроскопии исследована структура и морфология как свободных наночастиц оксида цинка на кремниевой подложке, так и после внесения их в матрицу силиката натрия. Установлено, что полученные частицы обладают гексагональной кристаллической решеткой и имеют бимодальное распределение по размерам. После внесения в матрицу силиката натрия в ней остаются только небольшие наночастицы оксида цинка со средним диаметром 45 нм. Исследование спектров фотолюминесценции композитного материала, включающего наночастицы оксида цинка, полученные при различных значениях pH исходного раствора, показало наличие экситонной и примесной полос фотолюминесценции с максимумами интенсивности, расположенными на длинах волн 383 и 590 нм соответственно. Наночастицы оксида цинка, находящиеся в стабилизирующей матрице силиката натрия, демонстрируют более высокую относительную интенсивность экситонной фотолюминесценции, чем свободные частицы. Наибольшая величина относительной интенсивности экситонной фотолюминесценции достигнута у композитного материала, включающего наночастицы, синтезированные при pH исходного раствора 3,35. Полученные композитные материалы могут найти применение в оптоэлектронных и фотовольтаических приборах, а также в качестве оптической среды безрезонаторных лазеров.

Ключевые слова: оксид цинка, наночастицы, гидротермальный синтез, композитные материалы, фотолюминесценция.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Работа выполнена в рамках задания 2.21 ГПНИ Республики Беларусь «Физическое материаловедение, новые материалы и технологии», подпрограмма «Наноматериалы и нанотехнологии». Авторы выражают свою признательность Жигулину Д.В. за проведение растровой электронной микроскопии образцов.

Для цитирования. Коренькова С.Ю., Тихонов И.А., Чубенко Е.Б. Синтез и свойства композитных материалов на основе наночастиц оксида цинка в диэлектрической матрице. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 25-32.

SYNTHESIS AND PROPERTIES OF COMPOSITE MATERIALS BASED ON ZINC OXIDE NANOPARTICLES IN AN INSULATING MATRIX

SOFIYA Y. KARANKOVA, ILLIA A. TIKHONOV, EUGENE B. CHUBENKO

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

Submitted 24 April 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. A composite material based on zinc oxide nanoparticles synthesized by the chemical hydrothermal method and a polymer insulated matrix of sodium silicate was obtained. Free zinc oxide nanoparticles were formed by heating an equimolar solution of zinc nitrate and hexamethylenetetramine with different pH values (3–5). Nanoparticles were introduced into an aqueous sodium silicate solution and applied on a silicon substrate by centrifugation. Using scanning electron microscopy, we studied the structure and morphology of zinc oxide nanoparticles on a silicon substrate in unbound state and after their introduction into the sodium silicate matrix. It was found that the obtained particles have a hexagonal crystal lattice and a bimodal size distribution. After introduction in the matrix of sodium silicate, only smaller zinc oxide nanoparticles with an average diameter of 45 nm remain in it. Studying of the photoluminescence spectra of a composite material, including zinc oxide nanoparticles obtained at different pH values of the initial solution, showed the presence of exciton and defect-related photoluminescence bands with intensity's maximums located at 383 and 590 nm, respectively. Zinc oxide nanoparticles in the stabilizing matrix of sodium silicate exhibit a higher relative intensity of exciton photoluminescence than unbound particles. The highest value of the relative intensity of exciton photoluminescence was achieved for a composite material including zinc oxide nanoparticles synthesized at pH=3,35 of the initial solution. The resulting composite materials can be used in optoelectronic and photovoltaic devices, and as an optical medium of non-cavity lasers.

Keywords: zinc oxide, nanoparticles, hydrothermal synthesis, composite materials, photoluminescence.

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

Acknowledgments. This work was carried out as part of assignment 2.21 of the State Research Programs of the Republic of Belarus “Physical Materials Science, New Materials and Technologies”, subprogram “Nanomaterials and Nanotechnologies”. The authors also express their gratitude to D.V. Zhigulin for scanning electron microscopy of samples.

For citation. Karankova S.Y., Chubenko E.B., Tikhonov I.A. Synthesis and properties of composite materials based on zinc oxide nanoparticles in an insulating matrix. *Doklady BGUIR*. 2020; 18(6): 25-32.

Введение

Наноструктуры и их сочетания с различными органическими и неорганическими материалами имеют ряд возможных применений: оптоэлектронные приборы, газочувствительные сенсоры, фотокаталитические покрытия [1]. В настоящее время ведутся активные исследования, направленные на поиск различных сочетаний наночастица – стабилизирующая матрица. Один из наиболее актуальных методов стабилизации – внесение наночастиц в полимерную матрицу [2]. Основными достоинствами полимерных материалов являются: простота получения, низкая стоимость, высокие оптические, радио- и электротехнические характеристики, высокая стойкость к агрессивным средам [2]. Поэтому полимеры можно считать универсальной стабилизирующей матрицей благодаря их технологичности и низкой стоимости по сравнению с неорганическими материалами. В качестве стабилизирующей полимерной матрицы интерес представляет жидкое стекло – водный щелочной раствор силиката с формулой $\text{Na}_2\text{O}(\text{SiO}_2)_n$. Его практическое использование связано с возможностью применения жидкого стекла в качестве связующего, проявляющего

высокие адгезионные свойства к подложкам из различных материалов, для склеивания различных материалов, изготовления покрытий [3].

Оксид цинка (ZnO) – это перспективный полупроводниковый материал для оптоэлектронных [4], фотовольтаических и пьезоэлектрических [5] устройств. Широкий энергетический диапазон (3,37 эВ), высокая энергия связи (60 мэВ) и высокая термическая и механическая стабильность при комнатной температуре делают его привлекательным для потенциального использования в электронике, оптоэлектронике и лазерной технике [6, 7]. Данный материал обеспечивает эффективную экситонную эмиссию даже при комнатной температуре. На данный момент известно большое количество методов получения наночастиц ZnO различной морфологии – наноколец, наностержней и нанотрубок, – и одним из них является низкотемпературный метод химического гидротермального синтеза, отличающийся возможностью синтеза при низких температурах, экологичностью и простотой контроля свойств получаемого материала.

Целью данной работы являлось исследование композитных материалов на основе наночастиц ZnO и силиката натрия. Внедрение частиц ZnO в полимерную матрицу силиката натрия способствует увеличению интенсивности экситонной фотолюминесценции, стабилизации их оптических характеристик и получению оптических сред с распределенными частицами люминофора для безрезонаторных лазерных структур.

Методика проведения экспериментов

Гидротермальный синтез проводили путем термического разложения $Zn(NO_3)_2$ при температуре 100 °С в течение 2 ч. Для осаждения ZnO использовали водный раствор, содержащий нитрат цинка $Zn(NO_3)_2$ и гексаметиленetetрамин (ГМТА) $C_6H_{12}N_4$ в эквимолярной концентрации (0,01 М). ГМТА служит источником гидроксид-ионов в реакции осаждения ZnO [8]. Помимо этого, ГМТА влияет на морфологию наночастиц ZnO, стимулируя их упорядоченный рост в направлении полярной кристаллической плоскости (0002). рН приготовленных растворов варьировался в пределах 3–5 путем добавления в раствор концентрированной азотной кислоты HNO_3 .

Процесс гидротермального синтеза оксида цинка проводился в стеклянном автоклаве объемом 50 мл с плотно притертой фторопластовой крышкой, в которой находилось отверстие для установки датчика температуры. Для нагрева автоклава с раствором использовалась лабораторная плитка модели IKA Werke MSC Basic C, оснащенная контактным термодатчиком с обратной связью. Во всех экспериментах раствор нагревался до температуры 100 °С в течение 30–40 мин и выдерживался при данной температуре на протяжении 2 ч. По окончании процесса осаждения полученный осадок промывался деионизованной водой. По истечении суток раствор, состоящий из взвеси частиц ZnO и деионизованной воды, соединялся с водным раствором силиката натрия в пропорции 1:1. Данная суспензия наносилась послойно на поверхность монокристаллической кремниевой подложки путем центрифугирования при скорости 1000 об/мин. Перед нанесением поверхность кремниевых подложек очищалась в насыщенном растворе оксида хрома (VI) в концентрированной серной кислоте, слой оксида кремния удалялся в 4,5 % водном растворе фтористоводородной кислоты (HF) [9].

Аналогично работе [9], морфология осажденных слоев ZnO исследовалась на растровом электронном микроскопе (РЭМ) Hitachi S-4800, работающем при ускоряющем напряжении 15 кВ. Состав осажденных пленок ZnO определялся методом энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии на спектрометре Bruker QUANTAX 200. Спектры фотолюминесценции регистрировались на лазерном спектральном комплексе на основе монохроматора SOLAR MS 7504i. Для возбуждения фотолюминесценции использовалась ксеноновая лампа мощностью 1 кВт. Монохроматические линии из спектра лампы выделялись при помощи двойного монохроматора SOLAR DM 160. Детектором излучения служила цифровая фотокамера Proscan HS101H, оснащенная кремниевой ПЗС матрицей Hamamatsu S7031. Все измерения проводились при комнатной температуре.

Результаты и их обсуждение

Структура и морфология полученных частиц ZnO была исследована методом РЭМ. На рис. 1 (a, b, c) представлены электронные фотографии кристаллов ZnO, сформированных в исходном растворе при pH = 3,35. Для получения данных РЭМ изображений капля водного раствора с кристаллами ZnO была помещена на поверхность подложки монокристаллического кремния и высушена.

На микрофотографиях отчетливо видны конгломераты из крупных (с диаметром от 200 до 550 нм) и мелких (с диаметром от 30 до 60 нм) частиц, то есть, полученные частицы ZnO имеют бимодальное распределение по размерам. Крупные частицы имеют форму вытянутой шестигранной призмы, характерную для кристаллического ZnO с гексагональной кристаллической решеткой типа вюрцита. Более мелкие частицы также имеют форму гексагональных стержней или пластин.

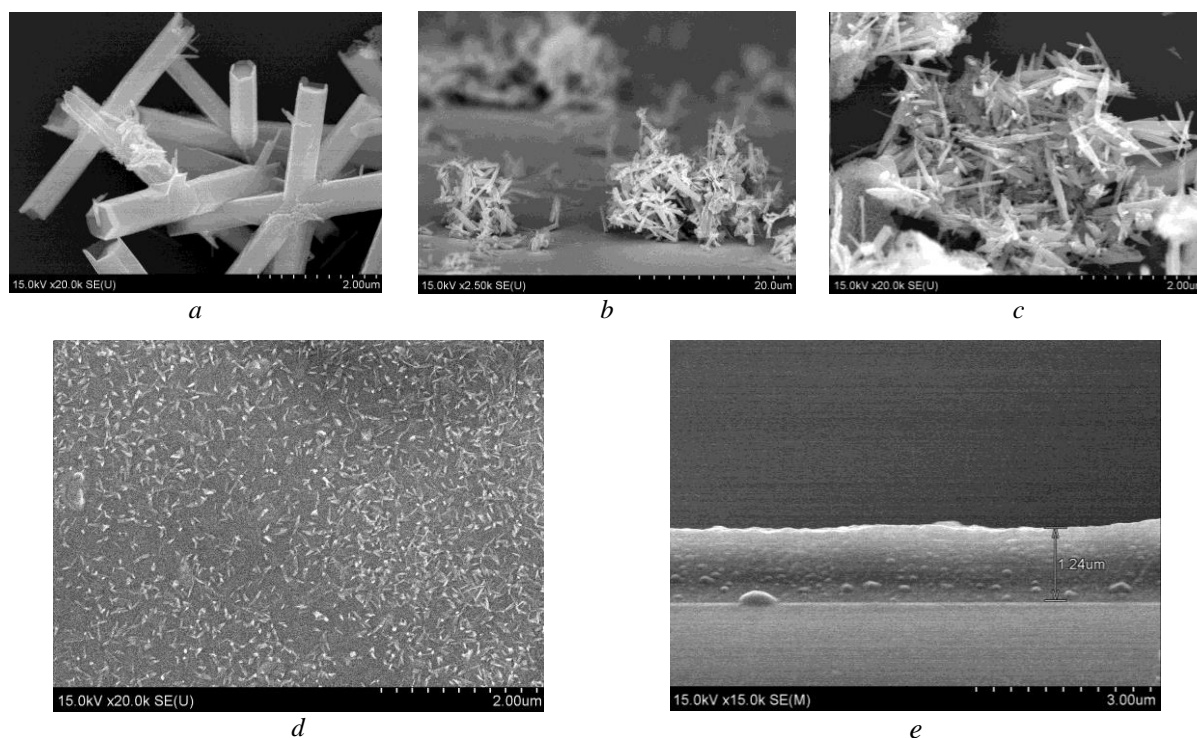


Рис. 1. Электронные фотографии кристаллов ZnO, сформированных гидротермальным методом при pH=3,35, на поверхности монокристаллической кремниевой подложки (a, b, c) и в составе матрицы силиката натрия (d, e)

Fig. 1. SEM images of ZnO crystals formed by hydrothermal synthesis with solution's pH=3,35 and applied on a single-crystal silicon substrate (a, b, c) and as part of a matrix of sodium silicate (d, e)

После введения наночастиц в стабилизирующую матрицу силиката натрия (рис. 1, d) заметно увеличилась упорядоченность конечной структуры, а также плотность распределения наночастиц по поверхности подложки. Слой композита толщиной 1,24 мкм эквивалентен 10 последовательно нанесенным слоям взвеси частиц ZnO в растворе силиката натрия. Диаметры наночастиц ZnO, распределенных в объеме матрицы, варьируются в диапазоне от 30 до 50 нм. Предположительно, пузырьки внутри композитного материала (рис. 1, e) образованы вокруг внедренных нанокристаллов ZnO вследствие попадания воздуха в матрицу силиката натрия во время процесса послойного нанесения.

Спектры фотолюминесценции кристаллов ZnO, сформированных при температуре 100 °С в течение 2 ч в растворах с различным значением показателя pH до и после внесения в матрицу силиката натрия, представлены на рис. 2.

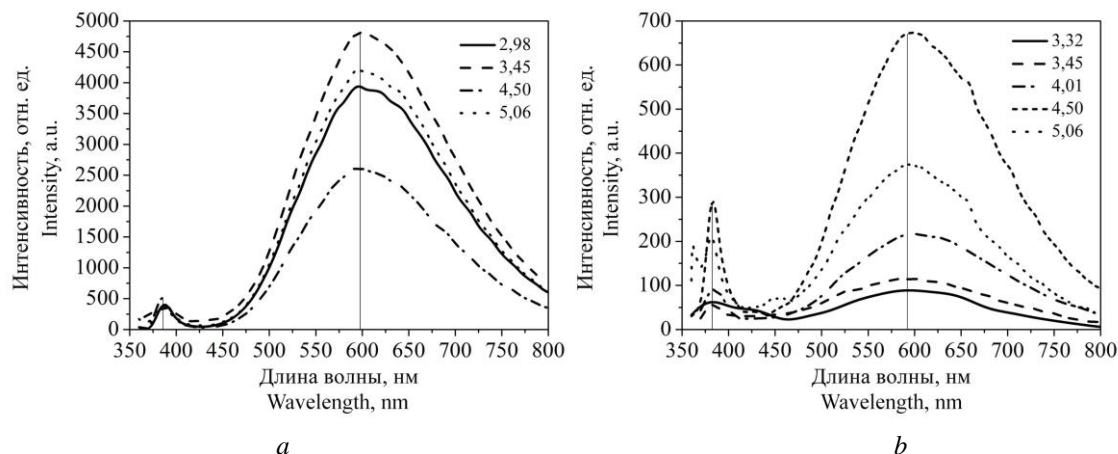


Рис. 2. Спектры фотолюминесценции частиц ZnO, полученных при различных значениях pH раствора, до (a) и после (b) их внесения в матрицу силиката натрия

Fig. 2. Photoluminescence spectra of ZnO with different values of solution's pH before (a) and after (b) introduction of particles into the matrix of sodium silicate

На спектре фотолюминесценции ZnO, полученном при комнатной температуре, присутствуют две полосы с максимумами в ультрафиолетовой (УФ) и видимой области. В УФ области максимум полосы расположен на длине волны $\lambda_{\max 1} = 383$ нм, что соответствует энергии излучательных переходов 3,24 эВ. Такая энергия соответствует экситонной фотолюминесценции ZnO, обусловленной рекомбинацией свободных экситонов в полупроводнике [10]. Широкая полоса фотолюминесценции с максимумом на длине волны $\lambda_{\max 2} = 590$ нм связана с излучательными рекомбинационными процессами, протекающими на глубоких энергетических уровнях в запрещенной зоне, и ее происхождение обусловлено различными типами поверхностных дефектов [1], таких как ионизированные кислородные вакансии V_O и междоузельные атомы кислорода O_i [11]. Для определения приблизительных значений положений энергетических уровней для междоузлий O_i и вакансий кислорода V_O спектр фотолюминесценции полученных наночастиц ZnO был аппроксимирован несколькими симметричными функциями Гаусса (рис. 3, a). Максимумы полос в видимой области спектра приходятся на желтый и красный диапазоны и соответствуют 2,16 эВ (575 нм) для O_i и 1,86 эВ (668 нм) для V_O . По полученным данным была построена схематическая энергетическая зонная диаграмма ZnO (рис. 3, b).

Известно, что соотношение интенсивности экситонной и примесной фотолюминесценции связано с концентрацией примесей и дефектов в ZnO и совершенством его кристаллической структуры [1, 10, 11].

Получение композита из ZnO в матрице силиката натрия, обладающего эффективной фотолюминесценцией, являлось одной из основных задач данной работы. Поэтому для определения качества полученного композита было предложено использовать показатель k , который определяется соотношением интенсивности экситонной и примесной фотолюминесценции.

Графики зависимостей показателя качества k от pH раствора для наноструктурированного ZnO после внесения в матрицу силиката натрия представлены на рис. 4. Внесение частиц ZnO в матрицу существенно увеличивает значение показателя качества k ; для сравнения, при отсутствии матрицы показатель качества k находится в диапазоне от 0,08 до 0,2. Из графика видно, что наиболее качественный ZnO, с наименьшей концентрацией структурных дефектов, удалось получить при pH раствора 3,35.

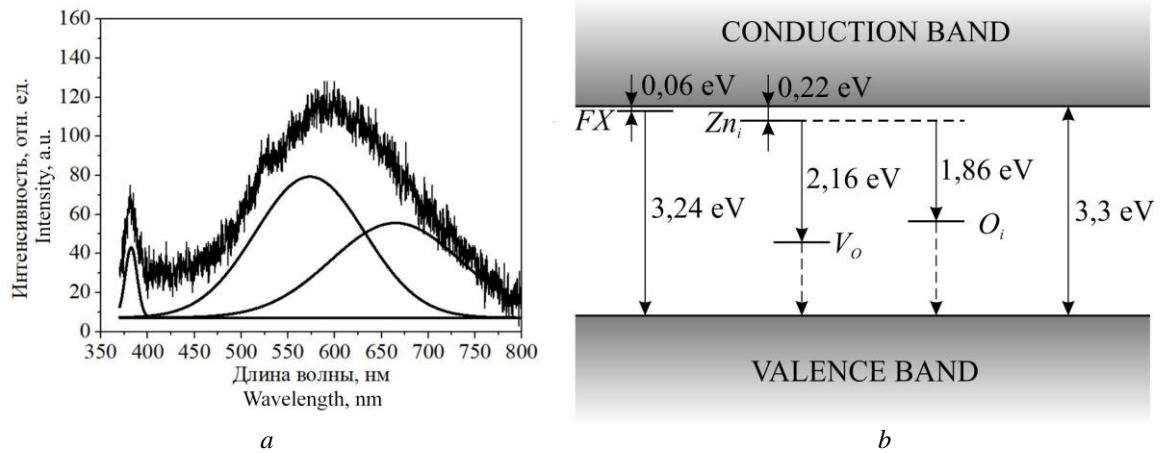


Рис. 3. Спектр фотолюминесценции наночастиц ZnO в матрице силиката натрия, синтезированных при pH раствора 3,45, аппроксимированный симметричными функциями Гаусса (а), и схематическая энергетическая зонная диаграмма ZnO (b). FX на диаграмме обозначен уровень свободных экситонов
Fig. 3. Photoluminescence spectrum of zinc oxide nanoparticles in a sodium silicate matrix synthesized at a solution's pH of 3.45, approximated by Gauss symmetric functions (a), and a schematic energy band diagram of ZnO (b). FX on the diagram is the free exciton level

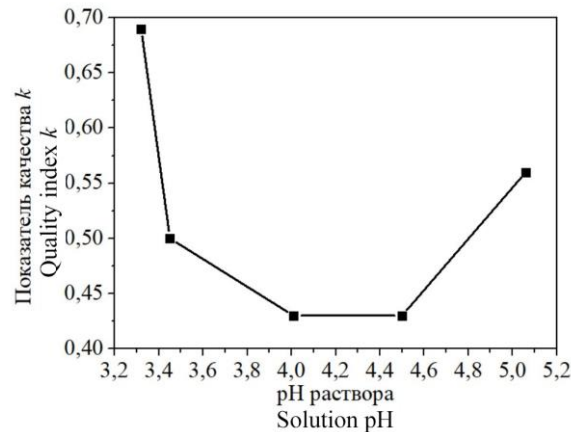


Рис. 4. График зависимости показателя качества k от pH раствора для наноструктурированного ZnO после внесения в матрицу силиката натрия. Точки соединены линией для наглядности
Fig. 4. Graph of dependence of the quality index k on solution's pH for nanostructured ZnO after introduction of particles into the matrix of sodium silicate. The points are connected by a line for better visibility

Полученные данные показывают, что интенсивность фотолюминесценции частиц ZnO, нанесенных на монокристаллическую кремниевую подложку выше, чем у аналогичных частиц, внедренных в матрицу силиката натрия. Это связано с большей концентрацией частиц ZnO на поверхности подложки в сравнении с количеством наночастиц ZnO в матрице.

Однако при внесении частиц в матрицу силиката натрия интенсивность примесной фотолюминесценции, обусловленной ионизированными кислородными вакансиями V_o и междоузельными атомами кислорода O_i , резко уменьшается, а уровень экситонной рекомбинации, в свою очередь, изменялся незначительно, что увеличивает значение показателя качества. Отсюда можно сделать вывод о том, что стабилизирующая матрица оказывает существенное влияние на интенсивность полосы фотолюминесценции, обусловленную рекомбинацией через уровни дефектов кристаллической решетки, сохраняя при этом высокую интенсивность экситонной рекомбинации в УФ области.

Поскольку эмиссионные свойства наночастиц ZnO зависят от кристаллографической ориентации, размера частиц, морфологии и дефектных центров, выявленных в результате экспериментов, то для увеличения интенсивности эмиссии исследуемых наночастиц необходим более точный контроль условий гидротермального синтеза.

Заключение

Наночастицы ZnO были синтезированы методом гидротермального осаждения в 0,01 М эквимольном растворе на основе Zn(NO₃)₂ и ГМТА при температуре 100 °С в течение 2 ч и значениях pH 3 – 5. Результаты сканирующей электронной микроскопии подтвердили, что синтезированные наночастицы ZnO имеют гексагональную кристаллическую структуру типа вюрцита. Размер полученных наночастиц ZnO имеет бимодальное распределение. Кристаллы крупного размера имеют средний диаметр частиц около 375 нм, частицы меньшего размера имеют средний диаметр около 45 нм. Отмечено, что после внедрения наночастиц в стабилизирующую матрицу силиката натрия увеличивается упорядоченность конечной структуры, а также плотность распределения наночастиц по поверхности подложки. В матрице силиката натрия обнаруживаются только кристаллы ZnO небольшого размера. Крупные частицы сепарируют в процессе нанесения композита на подложку методом центрифугирования.

Исследовано влияние значений pH на оптические характеристики наночастиц ZnO. Спектры фотолюминесценции частиц ZnO при комнатной температуре показали, что стабилизирующая матрица оказывает существенное влияние на интенсивность фотолюминесценции композитного материала в видимой области спектра за счет уменьшения количества поверхностных дефектов, сохраняя при этом высокую интенсивность экситонной рекомбинации в УФ области. Введенный показатель качества k полученных наночастиц ZnO позволил определить, что наибольшей относительной интенсивностью экситонной фотолюминесценции обладают образцы композитного материала, полученные при значениях pH раствора для гидротермального синтеза 3,35.

Полученные композитные материалы на основе наночастиц ZnO и силиката натрия, обладающие выраженной фотолюминесценцией в области ближнего УФ, могут быть использованы в светоизлучающих и фотовольтаических устройствах, а также в качестве оптической среды для безрезонаторных лазеров.

Список литературы / References

1. Kim S., Dulanga R.M., Somaratne S., Whitten J.E. Effect of Adsorption on the Photoluminescence of Zinc Oxide Nanoparticles. *Journal of Physical Chemistry C*. 2018;122:18985-18996. DOI:10.1021/acs.jpcc.8b04715.
2. Hanemann T., Szabo D.V. Polymer-Nanoparticle Composites: From Synthesis to Modern Applications. *Journal of Materials*. 2010;3:3468-3472. DOI:10.3390/ma3063468.
3. Figovskiy O.L., Kudryavtsev P.G. Liquid glass and aqueous solutions of silicates as a promising basis for technological processes for the production of new nanocomposite materials. *Ingenerniy Vestnik Dona*. 2014;29:1-42.
4. Davood R. Synthesis and photoluminescence characterization of ZnO nanoparticles. *Journal of Luminescence*. 2013;134:213-218. DOI:10.1016/j.jlumin.2012.08.045.
5. Huige W., Hui W., Yijie X. An overview of lead-free piezoelectric materials and devices. *Journal of Materials Chemistry C*. 2018;6:12448-12462. DOI:10.1039/C8TC04515A.
6. Bacaksiz E. The effect of zinc nitrate, zinc acetate and zinc chloride precursors on investigation of structural and optical properties of ZnO thin films. *Journal of Alloys and Compounds*. 2008;466:447-450. DOI:10.1016/j.jallcom.2007.11.061.
7. Wang J. Synthesis and characterization of multipod, flower-like, and shuttle like ZnO frameworks in ionic liquids. *Materials Letters*. 2005;59:1405-1408. DOI:10.1016/j.matlet.2004.11.062.
8. Baruah S., Dutta J. Hydrothermal growth of ZnO nanostructures. *Science and Technology of Advanced Materials*. 2009;10:3002-3008. DOI:10.1088/1468-6996/10/1/013001.
9. Chubenko E.B. [Hydrothermal deposition of ZnO nanostructures on silicon wafer]s. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2013;2:64-68. (In Russ.)
10. Shinde K.P., Pawar R.C., Sinha B.B., Kim H.S., Oh S.S., Chung K.C. Study of effect of planetary ball milling on ZnO nanopowder synthesized by co-precipitation. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014;617:408-413. DOI:10.1016/j.jallcom.2014.08.030.
11. Lu C.H., Hwang W.J., Godbole S.V. Microwave-hydrothermal synthesis and photoluminescence characteristics of zinc oxide powders. *Journal of Materials Research*. 2005;20:469-473. DOI:10.1557/JMR.2005.0067.

Вклад авторов

Коренькова С.Ю. осуществляла подготовку экспериментальных образцов, участвовала в проведении анализа и систематизации полученных результатов, подготовила рукопись статьи.

Тихонов И.А. участвовал в подготовке экспериментальных образцов, а также в проведении анализа полученных результатов.

Чубенко Е.Б. осуществлял общее руководство работой и подготовку рукописи статьи.

Authors' contribution

Karankova S.Y. prepared the required samples, finalized the analysis and systematization of the results, and prepared a manuscript of the article.

Tikhonov I.A. participated in the preparation of required samples and conducted initial analysis of the results.

Chubenko E.B. provided general guidance and prepared the manuscript.

Сведения об авторах

Коренькова С.Ю., студент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Тихонов И.А., студент кафедры микро- и нанoeлектроники Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Чубенко Е.Б., к.т.н., доцент, ведущий научный сотрудник НИЛ 4.3 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Karankova S.Y., Student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Tikhonov I.A., Student of Micro- and Nanoelectronics Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Chubenko E.B., PhD, Associate Professor, Leading Researcher of R&D Laboratory 4.3 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. +375-44-788-44-49;
e-mail: sofiyushka1999@gmail.com
Коренькова София Юрьевна

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-44-788-44-49;
e-mail: sofiyushka1999@gmail.com
Karankova Sofiya Yurievna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-33-40>

Original paper

UDC 004.043; 004. 048; 004.415.532; 004.422.614; 004.422.63; 004.424.64

STRING PROCESSING MODEL FOR KNOWLEDGE-DRIVEN SYSTEMS

VALERIAN P. IVASHENKO

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

Submitted 24 May 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work is to confirm experimentally theoretical estimates for time complexity of operations of the string processing model linked with the metric space for solving data processing problems in knowledge-driven systems including the research and comparison of the operation characteristics of these operations with the characteristics of similar operations for the most relevant data structures. Integral and unit testing were used to obtain the results of the performed computational experiments and verify their correctness. The C \ C++ implementation of operations of the string processing model was tested. The paper gives definitions of concepts necessary for the calculation of metric features calculated over strings. As a result of the experiments, theoretical estimates of the computational complexity of the implemented operations and the validity of the choice of parameters of the used data structures were confirmed, which ensures near-optimal throughput and operation time indicators of operations. According to the obtained results, the advantage is the ability to guarantee the time complexity of the string processing operations no higher than $O(\ln^k(n) * \sqrt{n})$ at all stages of a life cycle of data structures used to represent strings, from their creation to destruction, which allows for high throughput in data processing and responsiveness of systems built on the basis of the implemented operations. In case of solving particular string processing problems and using more suitable for these cases data structures such as vector or map the implemented operations have disadvantages meaning they are inferior in terms of the amount of data processed per time unit. The string processing model is focused on the application in knowledge-driven systems at the data management level.

Keywords: strings processing, lists processing, string operation, concatenation, string splitting, searching by key.

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

For citation. Ivashenko V.P. String processing model for knowledge-driven systems. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 33-40.

Foreword

Knowledge-driven systems encompass a number of management levels [1], each of them correlated to a set of problems to be solved at this level. The level of data management is responsible for processing data that are presented as per the data representation model in a specified language. The texts in these languages are strings. Thus, the problems of data processing can be reduced to those of string processing¹.

In knowledge-based systems that include knowledge-driven systems, denotation semantics, including model-theoretic semantics in logical knowledge representation models and partially

¹ Smith B. *Methods and algorithms of string computations*. Moscow: OOO "I.D. Williams"; 2006.

operational semantics are expressed through mathematical abstractions, considering such fundamental ones as sets. Moreover, in the theory of formal languages the strings themselves are meant to be sets, and thus such systems that deal with strings as the fundamental form of receiving represented data require implementation of set processing operations at the syntactic and semantic levels. Therefore, it is crucial to consider the general model allowing effective performance of string operations for the sake of effective implementation of set-theoretic knowledge processing operations, including those of metric characteristics.

The presence of such general model has a special demand in the systems oriented at the integration of various types of knowledge and problem-solving models. Efficiency is considered primarily not in terms of performance, but in terms of the maximum delays that occur when performing operations that are closely related to the minimum throughput. Minimization of the delays and increasing minimum throughput in light of scalability of system may be more prominent than total problem time for the systems requiring adaptation to the surrounding medium in real-time close conditions.

String processing problems are solved in compliance with the proposed model². As the primary string processing model, the formal data processing model is considered³, containing the following string processing operations: addition of an element in the string end (push), deletion of an element from the string end (pop), deletion of string elements (popall), concatenation of strings (reduction operation) (concat), string splitting (split), obtaining of a string element by index (valueat), start of iterating (start), iterating by string forward and backward (increment and decrement), break of iterating (break), checking for an empty symbol (over), obtaining of a current string symbol (value), keeping of an element (keep), memorizing by (name) number (memorize), remembering by (name) number (remember), losing by (name) number (lose). A special feature is that the model considers operations of the entire life cycle, including operations that allow destroying data structures.

Software often uses different data structures for different problems and operations that are optimized for these problems. However, when solving problems that require operations for different data structures, which is typical for the systems, focused on knowledge integration, data conversion from one structure to another is inefficient. In addition, the use of multiple data structures in some cases complicates implementation and makes it difficult to analyze. The problem is to create a model for processing strings with operations of the main set with minimal delays, focused on the implementation of set processing. The purpose of the work is to confirm, based on computational experiments, theoretical estimates of the time complexity of operations of the string processing model, considered as elements of the metric space, for solving data processing problems in knowledge-driven systems.

This paper considers a sequential implementation of string processing operations and does not address parallel implementation.

Routine of experiment

As the result of the experiment, it is expected to obtain data to study a dependence of the operation time on the size of the string in order to compare it with the theoretical one. Also, based on experimental data, it is supposed to get the dependencies of the throughput of operations and compare them with the throughput of the corresponding operations for vector/map structures. It is expected that the obtained practical data will correspond to the theoretical dependencies, and the minimum throughput of the implemented operations will exceed that for the vector/map data structures. To estimate throughput, both the string elements and the strings themselves, which are accessible from other strings using link elements, are taken as a unit of data. This nesting of strings makes it possible to implement complex structures of knowledge representation languages at a higher level, including semantic networks.

² Ivashenko V.P., editors: Shilin L.Yu. *Model for processing strings and lists of data for knowledge-driven systems*. Minsk: BSUIR; 2018:106-107.

³ Ivashenko V.P., Belchikov A.S., Ereemeev A.P., editors: Shilin L.Yu. *Models of information processing in intelligent systems based on semantic technologies*. Minsk: BSUIR; 2016: 106-107.

Traditional ways of representing strings (arrays) cannot meet the requirements, so string processing operations are implemented on the basis of memory allocation and reallocation operations [1] and string representation in form of a sequence tree [2], which is a type of B-tree with the structures on its basis used in file systems and various relational DBMS. However, this paper examines the work of not only the operations characteristic of such trees, but also the operations of their connection and separation. The operations of the string processing model were implemented using JavaScript⁴ [a] and C\C++. To verify the implemented operations and conduct computational experiments, Unit [3, 4], regression and integration testing [5] were used. Unit tests were designed to check the correctness of operations, while integration tests implemented fragments of the main scenarios for working with strings. The results of multiple measurements of the integration test running time were averaged and the average values were taken as experimental data.

Results and discussion

The results of computational experiments showed a partial superiority of the implemented operations in comparison with operations on JavaScript arrays. Computational experiments were also performed (Windows 7, AMD A6-3400M APU, 4GB DDR3-666) and some of their results are represented by the graphs in Fig. 1 and 2, which show that in comparison with operations on vector\map structures, the implemented operations of the string processing model on string sizes up to 1000000 elements are close in operation time and provide higher throughput (at least 1000 elements per second). Also, the analysis of graphs demonstrates that the nature of dependencies for push, pop, increment, and keep operations is close to linear, which corresponds to the theoretical estimate of the operating time for a single data element: $O(h(r, q, n) + \log_q(n) \cdot g(n))$ ($g(n) \sim 1$; $q \sim \log(n_{\max}) \cdot \sqrt{n_{\max}}$; $n \leq n_{\max}$; $h(r, q, n) \sim 1$), where n is the string length, q is the number of descendants of the tree node. Some deviations from the linear nature of the dependence can be explained by the influence of memory and cache mechanisms. For graphs of split and concat operations, the nature of the dependence per data unit is close to power-law, which corresponds to the theoretical estimate $O(h(r, q, n) + \log_q(n) \cdot (g(n) + f(n) \cdot q))$ ($f(n) \sim 1$). Similar conclusions can be drawn from the graphs of other operations: $O(h(r, q, n) + \log_q(n) \cdot g(n) + (\log_2^2(n) + \log_q(n) \cdot q) \cdot f(n))$ – theoretical estimate.

All operations are performed on a structure of the same type, i. e. the cost of copying data from one structure to another (from vector to map) and back is eliminated. This allows you to use the proposed implementation to create systems with minimal delays for operating conditions close to real-time modes. The confirmed characteristics allow us to implement sequential destructive operations of intersection and joining of sets with subquadratic time complexity. Further improvement is possible due to parallel processing.

A study was made of the dependence of the operation time for various parameter values (the size of the non-leaf node and the size of the leaf node of the sequence tree) of structures used for data representation. Dependency graphs are shown in Fig. 3. Based on the research results, the parameters were selected that provide the best operating time.

Within the framework of a given string processing model, such tasks as searching for the largest (maximum) common subsequence of two strings, searching for the largest (maximum) common substring [6, 7], calculating the value of metrics on strings [8–11], and others [7] are solved. To calculate metrics and construct a metric space based on a given model, additional concepts are introduced that allow calculating the number of characters that can be changed, rearranged, generated, duplicated, absorbed, and destroyed.

⁴ Ivashenko V. P., editors: Shilin L.Yu. *Model for processing strings and lists of data for knowledge-driven systems*. Minsk: BSUIR; 2018:106-107.

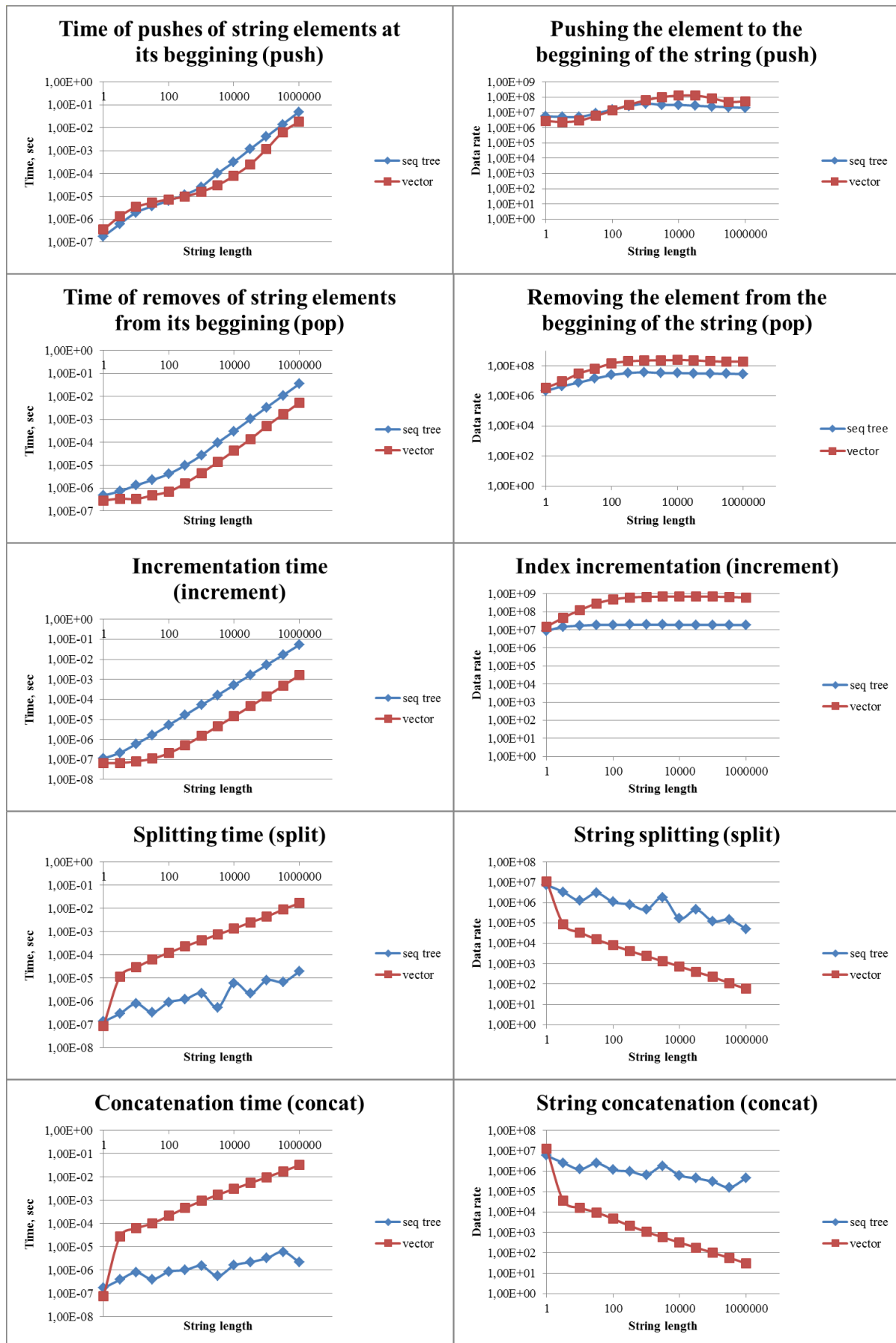


Fig. 1. The results of the computational experiments comparing to vector data structure operations

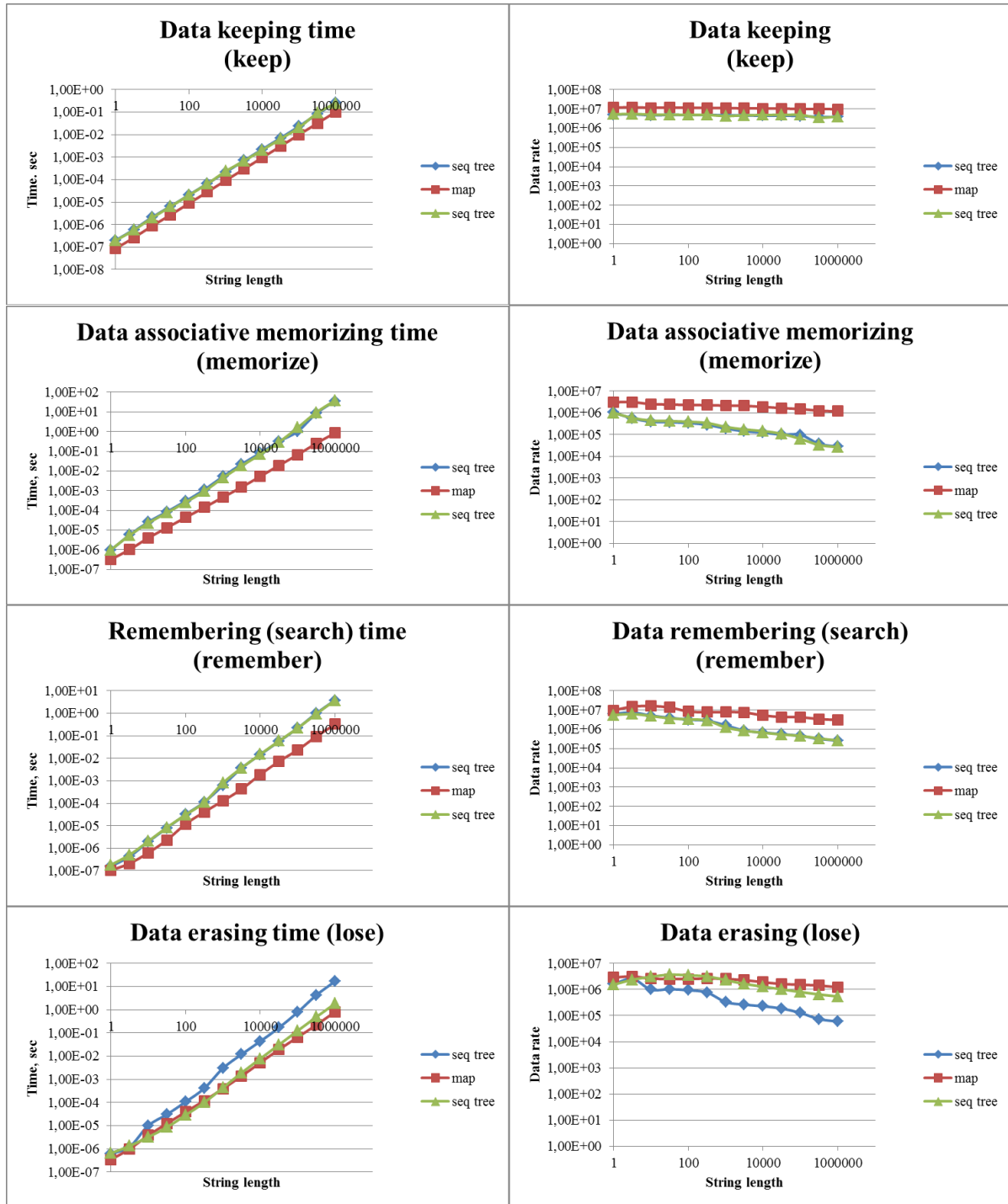


Fig. 2. The results of the computational experiments comparing to map data structure operations

Let the set of string elements χ be:

$$\delta(\chi) = \bigcap_{s \in S^n} s. \quad (1)$$

Assume $\varepsilon(\langle \alpha, \beta \rangle)$ is the editorial prescription (program):

$$\varepsilon(\langle \alpha, \beta \rangle) \in \{M, T, R, I, D\}^{\{i \mid (i \in \mathbb{N} \setminus \{0\}) \wedge (i \leq \max(\{\dim(\alpha)\} \cup \{\dim(\beta)\}))\}}, \quad (2)$$

which matches each occurrence of a component in a string with the command type: M – matching, T – interchanging, R – replacement, I – insertion (adding), D – reduction (deletion), where $\dim(\chi)$ is the χ string length, and the number of corresponding types of commands is:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \lambda \rangle) = \left| \left\{ i \mid \emptyset \subset \left((\{i\} \times \lambda) \cap \varepsilon(\langle \alpha, \beta \rangle) \right) \right\} \right|, \text{ where } \lambda \subseteq \{M, T, R, I, D, X, G, C, P, E, F\}, \quad (3)$$

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{M\} \rangle) = \sigma(\langle \beta, \alpha, \{M\} \rangle). \quad (4)$$

Assume the minimum total multiplicity $\pi(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle)$ of χ occurrence in α and β and multiplicity $\kappa(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle)$ of exceeded occurrence of χ in α as compared to β :

$$\begin{aligned} \pi(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle) &= \min \left(\left\{ \sigma(\langle \alpha, \gamma, \{M\} \rangle) \mid \gamma \in \{\chi\}^{\dim(\alpha)} \right\} \cup \left\{ \sigma(\langle \beta, \gamma, \{M\} \rangle) \mid \gamma \in \{\chi\}^{\dim(\beta)} \right\} \right); \\ \kappa(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle) &= \max \left(\left\{ \sigma(\langle \alpha, \gamma, \{M\} \rangle) \mid \gamma \in \{\chi\}^{\dim(\alpha)} \right\} \right) - \pi(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle). \end{aligned} \quad (5)$$

Then one can find the number of transpositions $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{P\} \rangle)$ as:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{P\} \rangle) = \left(\sum_{\chi}^{\chi \in \delta(\alpha)} \pi(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle) \right) - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M\} \rangle), \quad (6)$$

with

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{P\} \rangle) = \sigma(\langle \beta, \alpha, \{P\} \rangle); \quad \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M, P\} \rangle) = \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M\} \rangle) + \sigma(\langle \alpha, \beta, \{P\} \rangle). \quad (7)$$

The number of exchanges (replacements) $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle)$ can be determined as:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle) = \min \left(\{ \dim(\alpha) \} \cup \{ \dim(\beta) \} \right) - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M, P\} \rangle) \quad (8)$$

with $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{X, M\} \rangle) = \sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle) + \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M\} \rangle)$.

The number of generations $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{G\} \rangle)$ can be determined as:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{G\} \rangle) = \max \left(\{0\} \cup \left\{ |\delta(\alpha) / \delta(\beta)| - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle) \right\} \right). \quad (9)$$

The number of duplications $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{C\} \rangle)$:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{C\} \rangle) = \left(\sum_{\chi}^{\chi \in \delta(\alpha)} \kappa(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle) \right) - \max \left(\{0\} \cup \left\{ \sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle) - |\delta(\alpha) / \delta(\beta)| \right\} \right), \quad (10)$$

with $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{G, C\} \rangle) = \sigma(\langle \alpha, \beta, \{G\} \rangle) + \sigma(\langle \alpha, \beta, \{C\} \rangle)$:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{G, C\} \rangle) = \left(\sum_{\chi}^{\chi \in \delta(\alpha)} \kappa(\langle \alpha, \beta, \chi \rangle) \right) - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle), \quad (11)$$

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{G, C\} \rangle) = \dim(\alpha) - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{M, P\} \rangle) - \sigma(\langle \alpha, \beta, \{X\} \rangle). \quad (12)$$

The number of fusions $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{F\} \rangle)$:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{F\} \rangle) = \sigma(\langle \beta, \alpha, \{C\} \rangle). \quad (13)$$

The number of deletions (destructions) $\sigma(\langle \alpha, \beta, \{E\} \rangle)$ can be determined as:

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{E\} \rangle) = \sigma(\langle \beta, \alpha, \{G\} \rangle); \quad (14)$$

$$\sigma(\langle \alpha, \beta, \{E, F\} \rangle) = \sigma(\langle \beta, \alpha, \{G, C\} \rangle). \quad (15)$$

Then the distance (metrics) ρ_p between strings α and β :

$$\rho_p(\langle \alpha, \beta \rangle) = \rho_p^0(\langle \alpha, \beta \rangle); \quad (16)$$

$$\rho_p^k(\langle\alpha, \beta\rangle) = \begin{cases} 1 & \langle\alpha, \beta\rangle \in A \times A \\ \psi_k^\beta(\rho_p^k(\langle\alpha, \beta\rangle)) & \langle\alpha, \beta\rangle \in (A^{(*)} / A) \times A \\ \psi_k^\alpha(\rho_p^k(\langle\alpha, \beta\rangle)) & \langle\alpha, \beta\rangle \in A \times (A^{(*)} / A) \\ \phi_p^k(\langle\alpha, \beta\rangle) & \langle\alpha, \beta\rangle \in (A^{(*)} / A) \times (A^{(*)} / A) \end{cases}; \quad \psi_k^\lambda(\gamma) = v_k^\lambda * \gamma; \quad (17)$$

$$\phi_p^k(\langle\alpha, \beta\rangle) = \sqrt[p]{\sum_{i=1}^{\dim(\alpha)} \sum_{j=1}^{\dim(\beta)} \omega_{ijk}^{\varepsilon(\langle\alpha, \beta\rangle)(i)} * \left(1_{\{M,R,X,T,P\}}^{\{\varepsilon(\langle\alpha, \beta\rangle)(i)\}} * \left(\rho_p^{k+1}(\langle\alpha_i, \beta_j\rangle) \right)^p + 1_{\{I,D,G,C,E,F\}}^{\{\varepsilon(\langle\alpha, \beta\rangle)(i)\}} \right)}; \quad (18)$$

$$I_\lambda^\gamma = \begin{cases} 0 & \emptyset = (\lambda \cap \gamma) \\ 1 & \emptyset \subset (\lambda \cap \gamma) \end{cases}, \quad (19)$$

where v_k^λ , $\omega_{ijk}^{\varepsilon(\langle\alpha, \beta\rangle)(i)}$ are the weight coefficients.

Estimation for the time complexity of counting the number of transpositions, exchanges, generations, duplications, reductions, and fusions with known $\varepsilon(\langle\alpha, \beta\rangle)$ is expressed as $O((\dim(\alpha) + \dim(\beta)) \cdot f(\dim(\alpha) + \dim(\beta)))$, where $f(\dim(\alpha) + \dim(\beta))$ is the time of access to one string element.

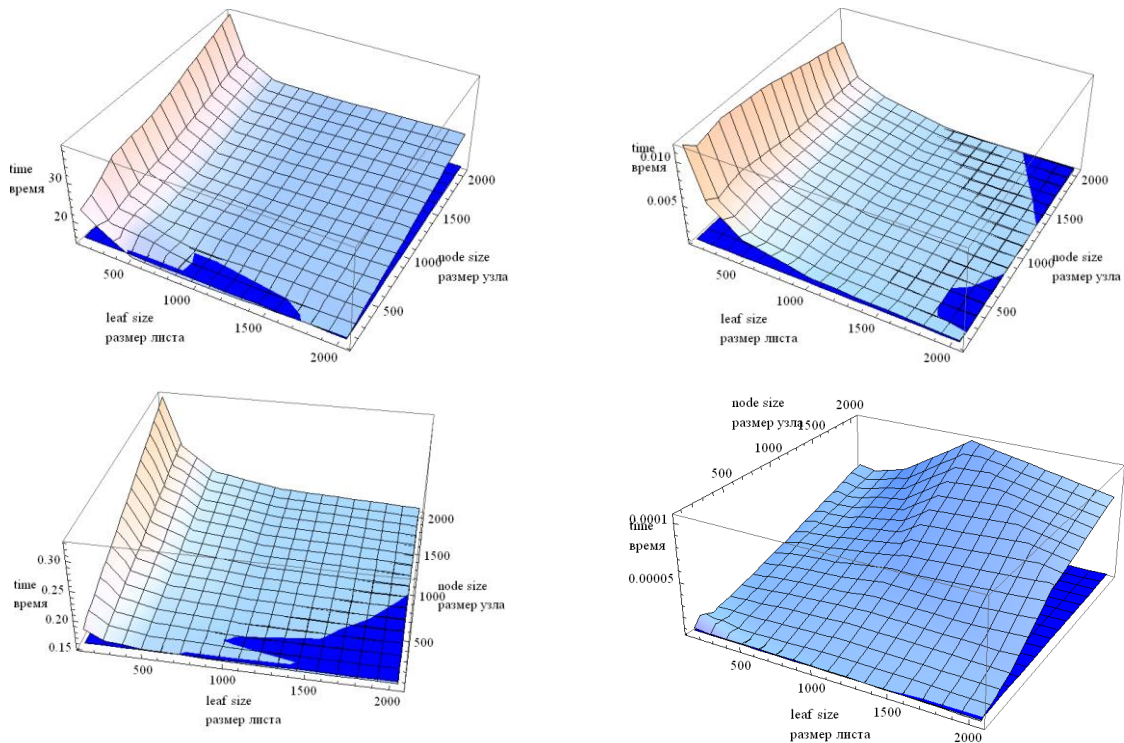


Fig. 3. Operation times (s): search by index, deletion, iteration splitting

Conclusion

Computational experiments have confirmed the theoretical estimates of the time complexity of operations of the model under consideration, which makes it possible to guarantee the time complexity of string processing operations no higher than $O(\ln^k(n) * \sqrt{n})$. Comparison with similar

operations on vector and map structures on strings up to 10^6 showed that the proposed implementation is no more than two orders of magnitude behind in sequential access and is superior to more than four orders of magnitude in the tasks of joining and splitting strings. The investigated model is proposed as a basis for creating technologies for developing intelligent systems that provide a unified representation of knowledge [12], which have compatibility, scalability, and the ability to work in real time.

References

1. Ivashenko V.P., Sintsov S.V. [Operations on management data sets in linear memory]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2016;6(100):86-93. (in Russ.)
2. Bates R. Language Definition in the Schütz Semantic Editor. *JMLC 2003*. 2003;2789:229-240. DOI: 10.1007/978-3-540-45213-3_29.
3. Xie T., Taneja K., Kale Sh., Marinov D. Towards a Framework for Differential Unit Testing of Object-Oriented Programs. *Proceedings – International Conference on Software Engineering*. 2007;1:5-5. DOI:10.1109/AST.2007.15.
4. Cadar C., Koushik S. Symbolic execution for software testing: three decades later. *Communications of the ACM*. 2013;56(2):82-90. DOI: 10.1145/2408776.2408795.
5. Le Traon Y., Jéron T., Jézéquel J.-M., Morel P. Efficient Object-Oriented Integration and Regression Testing. *IEEE Transactions on Reliability*. 2000;49:12-25. DOI: 10.1109/24.855533.
6. Hirschberg D.S. A linear space algorithm for computing maximal common subsequences. *Communications of the ACM*. 1975;18 (6):341-343. DOI: 10.1145/360825.360861.
7. Gusfield D. *Algorithms on Strings, Trees, and Sequences: Computer Science and Computational Biology*. Cambridge: Cambridge University Press; 1997. DOI: 10.1086/420407.
8. Levenshtein V.I. Binary codes capable of correcting deletions, insertions, and reversals. *Soviet Physics Doklady*. 1966;10(8):707-710. (in Russ.)
9. Damerau F.J. A technique for computer detection and correction of spelling errors. *Communications of the ACM*. 1964;7(3):171-176. DOI: 10.1145/363958.363994.
10. Navarro G. A guided tour to approximate string matching. *ACM Computing Surveys*. 2001;33(1):31-88. DOI: 10.1145/375360.375365.
11. Ehrenfeucht A., Haussler D.A New Distance Metric on Strings Computable in Linear Time. *Discrete Applied Mathematics*. 1988;20(3):191-203. DOI:10.1016/0166-218X(88)90076-5.
12. Ivashenko V.P. [Ontological model of space-time relations for events and phenomena in processing of knowledge] *Vestnik BrGTU*. 2017; 5(107):13-17. (in Russ.)

Information about the authors

Ivashenko V.P., PhD, Associate Professor of the Intelligent Information Technologies Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-80-92;
e-mail: ivashenko@bsuir.by
Ivashenko Valerian Petrovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-41-48>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.057.4:007.С2

МЕТОДИКА ИДЕНТИФИКАЦИИ РОБОТОВ С УЧЕТОМ ТИПА НАЗНАЧЕНИЯ УПРАВЛЕНИЯ

АРХИПЕНКО С.А., ШИЛИН Л.Ю., НАВРОЦКИЙ А.А., КУЗНЕЦОВ А.П.

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

Поступила в редакцию 10 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. В настоящее время производители роботов как правило используют закрытые протоколы собственной разработки, что существенно усложняет разработку и интеграцию новых роботов и комплексов. Предлагается использование стандартной последовательности запросов и ответов между управляющим сервером и клиентом (допускается пропуск некоторых шагов). Первый и второй шаги предназначены для проверки доступности оборудования при первом включении системы или во время установки соединения. В случае успешной проверки управляющий сервер переходит к следующему шагу. Третий и четвертый шаги используются для первичного конфигурирования и настройки удаленного управления. На пятом шаге осуществляется передача цифрового управляющего сигнала от сервера управления к роботу. Сигнал передает всю необходимую информацию для управления устройством робота. В качестве ключей используются строковые поля (до 256 символов). На шестом шаге управляющий сервер получает ответ управления – структуру данных, переданных от клиента (робота) для подтверждения факта принятия данных и возврата дополнительных параметров. Для идентификации роботов предложена их классификация по типу и назначению, указаны доступные типы управления. Для детального описания робота используется вся схема инициализации. Предложенная методика предназначена для описания инфраструктурно- и платформо-независимого взаимодействия, что позволяет его использовать в различных типах робототехнических систем.

Ключевые слова: структура данных, управление, робот, блок инициализации, запрос управления, ответ управления.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Архипенко С.А., Шилин Л.Ю., Навроцкий А.А., Кузнецов А.П. Методика идентификации роботов с учетом типа назначения управления. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 41-48.

METHODOLOGY TO IDENTIFY ROBOTS GIVEN THE TYPE OF CONTROL DESIGNATION

SATANISLAU A. ARKHIPENKA, LEONID U. SHILIN, ANATOLY A. NAUROTSKY,
ALEKSANDR P. KUZNETSOV

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

Submitted 10 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Currently, robot manufacturers usually use closed proprietary protocols, which significantly complicates the development and integration of new robots and complexes. We propose to use a standard sequence of requests and responses between the control server and the client (some steps may be skipped). The first and second steps are designed to check the availability of equipment when you first turn on the system or during connection setup. If the verification is successful, the control server proceeds to the next step. The third and fourth steps stand for initial configuration and adjustment of remote control. In the fifth step, the digital control signal is transmitted from the control server to the robot. The signal transmits all the necessary information to control the robot device. The keys are string fields (up to 256 characters). At the sixth step, the control server receives a control response - the structure of the data transmitted from the client (robot) to confirm data acceptance and return of additional parameters. To identify robots, we propose to classify them by type and designation and indicate available types of control. For a detailed description of the robot, the entire initialization scheme is used. The proposed methodology is intended to describe infrastructure and platform independent interaction, which allows it to be used in various types of robotic systems.

Keywords: data structure, control, robot, initialization block, control request, control response.

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

For citation. Arkhipenka S.A., Shilin L.U., Naurotsky A.A., Kuznetsov A.P. Methodology to identify robots given the type of control designation. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 41-48.

Введение

При разработке робототехнических комплексов часто необходима идентификация отдельных роботов. Как правило, производители промышленных роботов и комплексов используют закрытые протоколы собственной разработки, предназначенные для управления одним типом оборудования. Такой подход существенно усложняет разработку и интеграцию новых роботов и комплексов, так как:

- при разработке нового робота или комплекса необходимо одновременно разрабатывать для него протокол удаленного управления;
- при интеграции робота или комплекса в общую систему необходима разработка специального коннектора.

В данной работе предложена методика идентификации роботов, использование которой позволит упростить разработку систем удаленного управления и их интеграцию.

Алгоритм клиент-серверного взаимодействия

Предлагается использование указанной на рис. 1 последовательности запросов и ответов между управляющим сервером и клиентом (контроллером удаленного устройства). Алгоритм допускает пропуск некоторых шагов. Например, для ускорения работы статической системы в закрытом сетевом контуре можно пропустить шаги 1, 2, 3, 4.

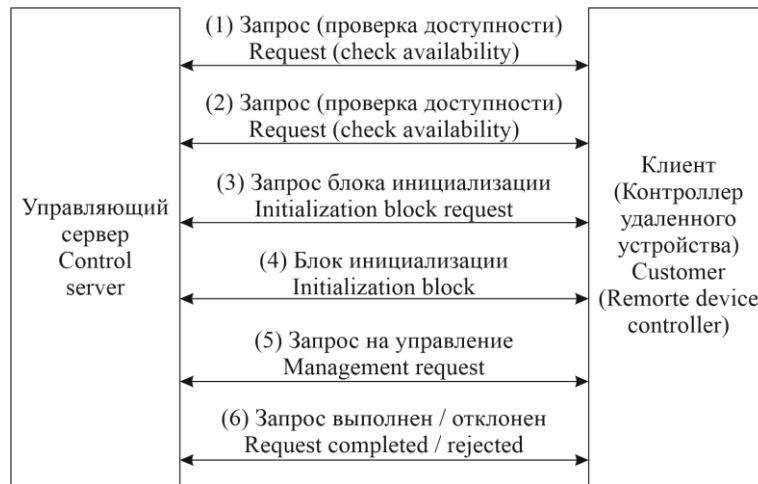


Рис. 1. Последовательность запросов и ответов между управляющим сервером и контроллером удаленного устройства

Fig. 1. The sequence of requests and responses between the control server and the controller of the remote device

Шаги 1 и 2 предназначены для проверки доступности оборудования при первом включении системы или во время установки соединения. В случае успешной проверки управляющий сервер переходит к следующему шагу, иначе выводится сообщение об ошибке и прекращается выполнение программы. Данный шаг не является обязательным (not mandatory).

Шаги 3 и 4 используются для первичного конфигурирования и настройки удаленного управления. Блок инициализации предназначен для предварительной настройки, которая включает:

- проверку типа робота;
- проверку версий устройства и протокола;
- получение информации о доступных функциях и командах;
- получение информации об устройствах робота и методах управления ими.

Блок инициализации (рис. 2) представляет собой структуру данных, описывающую управляемое устройство.

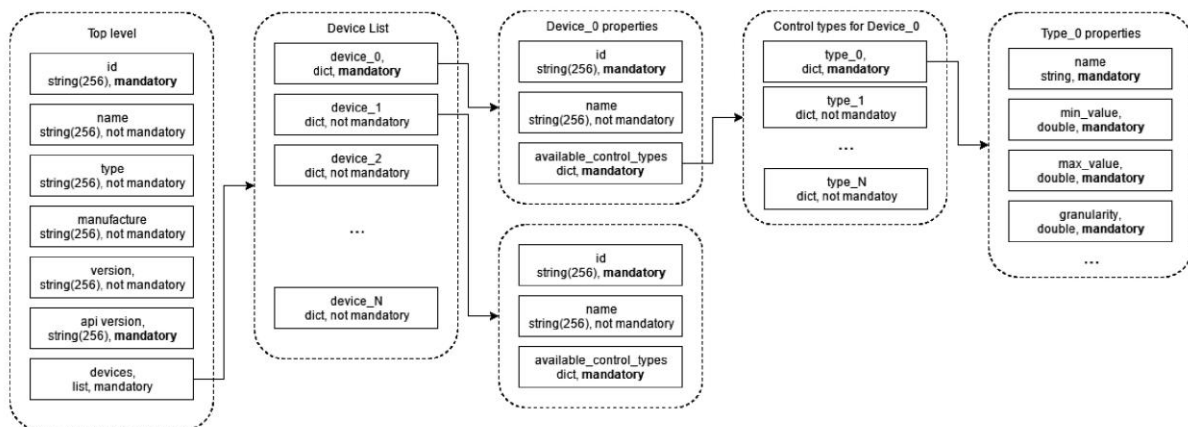


Рис. 2. Пример блока инициализации

Fig. 2. Initialization block example

На верхнем уровне (Top Level) расположены параметры, характеризующие робота:

- Id – уникальный идентификатор (до 256 символов). Обязательное значение, предназначенное для идентификации устройства;
- Name – имя робота (до 256 символов). Необязательный параметр, предназначенный для удобства работы с роботом. Имя не уникально в множестве всех роботов, но уникально в конкретной системе;

– Type – тип робота (до 256 символов). Необязательный параметр, предназначенный для указания типа робота. Список возможных значений устанавливается стандартом для конкретной версии протокола;

– Manufacture – производитель робота (до 256 символов). Содержит информацию о производителе робота;

– Version – версия робота (до 256 символов). Содержит информацию о версии робота;

– Api version – версия используемого протокола управления (до 256 символов). Обязательный параметр, содержащий номер версии протокола URRCР;

– Devices – список устройств робота. Минимальное число устройств – 1, максимальное – 32000.

Параметры, характеризующие устройства робота:

– Id – идентификатор устройства в работе (до 256 символов). Обязательный параметр, уникальный в множестве идентификаторов устройств в заданном роботе;

– Name – имя устройства (до 256 символов). Необязательный параметр, предназначенный для удобства работы с устройством робота;

– Available_control_types – доступные типы управления. Обязательный параметр. Словарь содержит ключи, название типа управления, а значение – список используемых параметров. Список типов управления должен быть стандартизирован.

Параметры типа управления уникальны для каждого устройства. Общие параметры для всех типов управления:

– Name – название типа управления;

– Min_value – минимальное значение, которое может принять устройство при заданном типе управления (число двойной точности);

– Max_value – максимальное значение, которое может принять устройство при заданном типе управления (число двойной точности);

– Granularity – минимальный шаг управляющего воздействия (число двойной точности).

На 5 шаге осуществляется передача цифрового управляющего сигнала от сервера управления к роботу. Сигнал передает всю необходимую информацию для управления устройством робота. В качестве ключей используются следующие строковые поля (до 256 символов):

– Timestamp – точное время отправки данных с сервера, для обеспечения функционирования отложенного запуска команд (используется совместно с ключом time_offset_to_start). Функция отложенного исполнения команды позволяет выполнить предварительно заданную последовательность команд на стороне робота. Для синхронизации работы нескольких роботов предлагается в качестве начальной точки задержки использовать не время получения сигнала, а время отправки сигнала с сервера. Для корректной интерпретации данных предлагается использовать протокол ntp;

– Time_offset_to_start – задержка (в миллисекундах) до начала выполнения команды;

– Device_id – идентификационная строка, указывающая устройство робота, для которого предназначен управляющий сигнал;

– Stop_condition – условие остановки выполнения команды. Используется как механизм обеспечения безопасного функционирования робота в случае аварийного разрыва связи. Например, если с сервера к роботу пришел управляющий сигнал о поддержке скорости 10 м/с, а после этого произошел обрыв связи, то робот будет продолжать поддерживать скорость 10 м/с в течение неопределенного времени. При использовании ключа stop_condition выполнение последней команды будет прекращено через указанный период времени;

– Control_type – тип управления, который должен быть использован для данного устройства. Доступные типы управления для заданного устройства указаны в схеме инициализации. Если указанный тип управления не поддерживается устройством робота, то ответ управления будет содержать информацию об ошибке, а устройство робота перейдет в состояние по умолчанию;

– Control_value – входные параметры для указанного типа управления. Некоторые типы управления могут иметь несколько входных параметров. В этом случае запрос

управления должен содержать дополнительные поля Control_value_2 ... Control_value_N, описывающие дополнительные входные параметры для указанного типа управления.

На 6-м шаге управляющий сервер получает ответ управления – структуру данных, переданных от клиента (робота) для подтверждения факта принятия данных и возврата дополнительных параметров. Ответ управления содержит следующие поля:

- Timestamp – дата и время момента передачи статуса на стороне клиента (робота). Параметр предназначен для корректировки управления с учетом задержки передачи данных и не может применяться для обеспечения синхронности передачи данных, так как данное свойство должно быть обеспечено протоколом по модели OSI;

- Device_id – идентификационная строка, указывающая устройство, которое возвращает статус;

- Status – строка, содержащая информацию о выполненной операции (например, OK, Accepted, Failed и т. д.). Если значение ключа control_type в запросе управления было равно “sensor”, то в случае успешного выполнения операции в поле статус передается текст “Provide”, а в поле status_value – значение сенсора;

- Status_value – информация о выполненной операции. В случае успешного выполнения операции в status_value помещается значение, принятое к исполнению (как правило соответствует полю control_value в запросе управления), иначе – значение None (Null). Если в control_type установлено значение “sensor”, то возвращается значение, полученное с датчика.

Типы роботов в схеме инициализации

Роботы и робототехнические комплексы могут быть классифицированы по множеству различных параметров: геометрии манипулятора, степеням свободы, источникам питания, типам движения, типам управления и т. д. Представленная в табл. 1 классификация позволяет быстро получить информацию о типе и предназначении робота. Для детального описания робота используется вся схема инициализации.

Таблица 1. Возможные значения для поля “Type” на верхнем уровне схемы инициализации
Table 1. Possible values for the “Type” field at the top level of the initialization scheme

№	Значение Value	Описание Description
1	Industrial	Робот, предназначенный для использования в производственном процессе (как правило, манипуляционный робот) A robot intended for use in a manufacturing process (typically a manipulation robot)
2	Transport	Робот, предназначенный для транспортировки грузов (как правило, состоящий из одного или нескольких манипуляторов и ходового устройства) A robot designed to transport goods (usually consisting of one or more manipulators and a walking device)
3	Anthropomorphic	Робот общего назначения. Человеческоподобный робот General purpose robot. Humanoid robot
4	Military	Роботы военного назначения (как правило, для ведения разведки, участия в боевых действиях, разминировании) Military robots (usually for reconnaissance, participation in hostilities, mine clearance)
5	Other	Роботы, для которых назначение не определено, либо не подпадающие ни под одну из вышеуказанных категорий Robots for which no purpose has been defined, or that do not fit into any of the above categories

Доступные типы управления

Параметр «доступные типы управления» (available control types) используется в схеме инициализации (рис. 2) для определения поддерживаемых данным устройством типов управления.

Параметр available_control_types является «словарем», содержащим список пар: ключ – значение. В качестве ключа указывается имя типа управления, а в качестве значения – параметры данного типа управления. Допустимые ключи представлены в табл. 2.

Таблица 2. Доступные типы управления для устройств
Table 2. Available control types for devices

№	Ключ Key	Описание Description
1	position	Управление происходит по положению Position-based control
2	speed	Управление происходит по скорости Speed-based control
3	acceleration	Управление происходит по ускорению Acceleration-based control
4	script	Управление сценарием, позволяющее комбинировать другие типы управления, указывая их последовательность и параметры Script control, which allows you to combine other types of control, specifying their sequence and parameters
5	sensor	Используется для получения данных от датчиков Used to receive data from sensors
6	custom_N	Произвольный тип управления. Как правило, произвольные типы управления используются для организации сложного, высокоскоростного, высокоточного управления с использованием обратной связи по нескольким датчикам Arbitrary type of control. As a rule, arbitrary control types are used to organize complex, high-speed, high-precision control using feedback from several sensors

В табл. 3 представлены переменные, описывающие управление «по положению», «по скорости» и «по ускорению».

Таблица 3. Переменные, описывающие управление по положению
Table 3. Variables describing position control

№	Ключ Key	Описание Description	Тип данных Data type	Обязательный параметр Mandatory parameter
1	min_value	Минимальное значение Minimum value	double	Обязательный Mandatory
2	max_value	Максимальное значение Maximum value	double	Обязательный Mandatory
3	granularity	Гранулярность Granularity	double	Обязательный Mandatory
4	max_error	Максимальная погрешность Maximum error	double	Не обязательный Optional

Min_value – минимальное значение управляющего сигнала, которое может принять устройство (как правило – ноль).

Max_value – максимальный значение управляющего сигнала, который может принять устройство.

Granularity – минимальное значение шага управления.

Max_error – максимальная погрешность по положению, как правило, обусловленная конструктивными особенностями устройства или условиями его эксплуатации.

Тип управления «сценарий» позволяет объединять прочие типы управления в последовательность команд. Такой тип управления полезен для быстрого выполнения сложной последовательности действий, которая потребовала бы большого количества команд, отправляемых для данного конкретного устройства робота. Например, если приводу, управляемому по положению, нужно выполнить следующую последовательность:

- Управление по положению -> Установить положение 45;
- Управление по положению -> Установить положение 0;
- Управление по положению -> Установить положение 45,

то вместо трех команд, описывающих это действие, возможно отправить одну команду «сценарий», в которой будет указана эта последовательность действий.

Тип управления «сценарий» наследует все переменные, описывающие тип управления, который поддерживается в сценарии, а также дополнительно добавляет поле `max_number_of_steps` – максимальное количество шагов сценария.

Тип управления «датчик» (Sensor) является типом управления только формально, поскольку используется не для передачи управляющего сигнала, а в качестве запроса информации с датчика. В табл. 4 представлены статические переменные, описывающие каждое устройство типа «датчик».

Таблица 4. Переменные, описывающие характеристики датчика

Table 4. Variables describing sensor characteristics

№	Ключ Key	Описание Description	Тип данных Data type	Обязательный параметр Mandatory parameter
1	<code>min_value</code>	Минимальное значение Minimum value	double	Обязательный Mandatory
2	<code>max_value</code>	Максимальное значение Maximum value	double	Обязательный Mandatory
4	<code>max_error</code>	Максимальная погрешность Maximum error	double	Не обязательный Optional
5	<code>max_delay</code>	Максимальная задержка Maximum latency	double	Не обязательный Optional

Заключение

Методика идентификации роботов описывает инфраструктурно- и платформо-независимое взаимодействие, поэтому может использоваться в любых системах. В статье намеренно не упоминаются ни модель OSI, ни определенные языки программирования, так как материал является руководством для построения структуры и последовательности взаимодействия систем, а не описанием инфраструктуры и платформы для взаимодействия.

Предложенная в работе методика позволяет описывать сложные, многоуровневые системы с помощью одной структуры, а также использовать единый подход для управления всеми устройствами робота. Структуры запроса и ответа управления являются одновременно и универсальными, и легкими для понимания.

Список литературы

1. Ермолов И.Л., Хрипунов С.П. Формирование обобщенной структурной схемы робототехнических комплексов. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2017;1(14):22-26.
2. Назарова А.В., Рыжова Т.П. Методы и алгоритмы мультиагентного управления робототехнической системой. *Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана*. 2012;6(6):93-105.
3. Казанцев В.Н., Котенев В.Д., Павлов В.А. Состояние и проблемы стандартизации в области робототехники. *Робототехника и техническая кибернетика*. 2014;3(4):17-21.
4. Дж. Янг. *Робототехника*. Москва: Машиностроение; 1979.

References

1. Ermolov I.L., Khripunov S.P. [Formation of a generalized structural diagram of robotic complexes]. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2017;1(14):22-26. (In Russ.)
2. Nazarova A.V., Ryzhova T.P. [Methods and algorithms for multi-agent control of a robotic system]. *Vestnik MGTU im. N.E. Bauman*. 2012;6(6):93-105. (In Russ.)
3. Kazantsev V.N., Kotenev V.D., Pavlov V.A. [State and problems of standardization in the field of robotics]. *Robotics and Technical Cybernetics*. 2014; 3(4):17-21. (In Russ.)
4. J. Young. [*Robotics*]. Moscow: Mechanical engineering; 1979. (In Russ.)

Вклад авторов

Архипенко С.А. выдвинул идею создания новой методики и предложил его конфигурацию.

Шилин Л.Ю. определил цель проведения исследования, обосновал необходимость создания методики.

Навроцкий А.А. систематизировал полученные результаты, подготовил текст статьи.

Кузнецов А.П. участвовал в формировании структуры методики, вносил правки в текст статьи.

Authors' contribution

Arkhipenka S.A. put forward the idea of creating a new technique and proposed its configuration.

Shilin L.U. determined the purpose of the study, substantiated the need to create a methodology.

Naurotsky A.A. systematized the results obtained, prepared the text of the article.

Kuznetsov A.P. participated in the structuring of the methodology, made edits to the text of the article.

Сведения об авторах

Архипенко С.А., магистр технических наук.

Шилин Л.Ю., д.т.н., профессор, декан факультета информационных технологий и управления Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Навроцкий А.А., к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой информационных технологий автоматизированных систем Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Кузнецов А.П., д.т.н., профессор кафедры систем управления 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. +375-44-749-04-66;
e-mail: stanislau.arkhipenka@gmail.com
Архипенко Станислав Александрович

Information about the authors

Arkhipenka S.A., Master of Technical Science.

Shilin L.U., D.Sci, Professor, Dean of the Faculty of Information Technologies and Control of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Naurotsky A.A., PhD, Associate Professor, Head of the Department of Automated Data Processing Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kuznetsov A.P., D.Sci, Professor, Department of Control Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-44-749-04-66;
e-mail: stanislau.arkhipenka@gmail.com
Arkhipenka Stanislau



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-49-56>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.912

ОНТОЛОГИЧЕСКИЙ ПОДХОД К ОБРАБОТКЕ ТЕКСТОВ КИТАЙСКОГО ЯЗЫКА

ЦЯНЬ ЛУНВЭЙ

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

Поступила в редакцию 18 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Для реализации естественно-языкового пользовательского интерфейса и интеллектуального ответа на вопросы на основе знаний в работе предлагается модель обработки китайского языка, основанная на знаниях. В статье рассматриваются существующие методы обработки естественного языка и различные базы знаний, связанные с обработкой естественного языка. На основе анализа данных методов был сделан вывод о том, что в обработке естественного языка база знаний является самой основной и важной частью. База знаний позволяет обеспечить обработку естественного языка, основываясь на изначально описанных знаниях, а также объяснить процесс обработки. На основании анализа различных методов построения баз знаний об английском и китайском языках был предложен онтологический подход к обработке китайского языка. В модели обработки китайского языка можно выделить два основных аспекта исследования: построение базы знаний о китайском языке и разработка решателя задач на основе онтологии. Предложенный подход направлен на разработку семантической модели знаний о китайском языке. Как один из этапов реализации подхода была построена онтология китайского языка, которую можно использовать в дальнейшем для обработки китайского языка. В данной работе рассмотрены первая версия указанной онтологии и принцип построения базы знаний о китайском языке. Для построения онтологии на данном этапе нет единых стандартов и системы оценки. Расширение и улучшение онтологии и оценка ее качества требуют дальнейших исследований.

Ключевые слова: технология OSTIS, онтология, обработка китайского языка, база знаний.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Цянь Лунвэй. Онтологический подход к обработке текстов китайского языка. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 49-56.

ONTOLOGICAL APPROACH TO CHINESE TEXT PROCESSING

QIAN LONGWEI

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

Submitted 18 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. To implement natural language user interface and an intelligent answer to questions, the knowledge-based semantic model for Chinese language processing is proposed. The article gives careful consideration to the existing methods and various knowledge bases for natural language processing. The analysis of these methods has led to the conclusion that in natural language processing, the knowledge base is the most fundamental and crucial part. The knowledge base makes it possible to ensure processing of a natural language based on initially described knowledge and to explain the processing operations. By virtue of the analysis of various methods for constructing knowledge bases about the English and Chinese languages, an ontological approach to the Chinese language processing was proposed. The Chinese language processing model has two main aspects: the design of knowledge base about the Chinese language and the development of ontology-based knowledge processing machine. The proposed approach is aimed at developing a semantic model of knowledge on the Chinese language. As a stage in the implementation of the approach, I designed the ontology of the Chinese language that can be applied for further processing of the language. This paper considers the preliminary version of the ontology and the principle of building a knowledge base about the Chinese language. There are no uniform standards and evaluation system for designing an ontology. Expansion, refinement and evaluation of the ontology require further research.

Keywords: OSTIS technology, ontology, Chinese language processing, knowledge base.

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

For citation. Qian Longwei. Ontological approach to Chinese text processing. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 49-56.

Введение

Обработка естественного языка – один из основных компонентов интеллектуальных систем. Целью обработки естественного языка в таких системах является понимание машиной текстов естественного языка и возврат точной информации пользователям на основе результатов понимания. Из-за разнообразия и открытости естественного языка компьютерная обработка различных естественных языков имеет свои особенности и трудности.

В обработке китайского языка в основном существует две основные особенности [1]:

– в европейских языках, таких как английский, русский, слова в основном пишутся с пробелами. Однако в текстах китайского языка нет пробелов для разделения слов;

– одна и та же часть речи может служить несколькими синтаксическими компонентами без морфологических изменений, то есть в текстах китайского языка независимо от любого синтаксического компонента, обслуживаемого каждой частью речи, ее морфология не изменяется.

Среди современных методов обработки естественного языка выделяют следующие направления:

– методы построения системы логических рассуждений на основе правил;

– методы машинного обучения, основанные на математической статистике и теории информации.

Однако, будь то основанные на правилах или статистические методы, методы и стандарты оценки, используемые при обработке китайского языка, почти полностью заимствованы из методов обработки европейских языков, таких как английский. В процессе обработки не учитываются характерные черты текстов китайского языка [1].

Для реализации глубокого семантического понимания текстов необходима поддержка представления различных сложных видов знаний. Например, лексических баз знаний, которые обеспечивают лексический анализ в текстах естественного языка. Основной целью баз знаний является описание различных сущностей и отношений, существующих в реальном мире. Метод обработки естественного языка на основе базы знаний заключается в следующем: при помощи разработанной базы знаний описываются различные понятия и отношения, существующие в текстах естественного языка. Далее, при помощи решателя задач реализуются глубокие рассуждения и семантическое понимание текстов естественного языка. Для обработки естественного языка основным видом знаний является лингвистическое знание со своими собственными языковыми характеристиками. Кроме лингвистических знаний, важную роль в глубоком семантическом понимании текстов естественного языка также играют «повседневные знания» (англ. commonsense knowledge), или знания о предметной области.

В данной работе рассмотрен онтологический подход к обработке текстов китайского языка, то есть подход, основанный на онтологии, лежащей в основе базы знаний и решателя задач, которые соответствуют лингвистическим характеристикам китайского языка. Онтологический подход предполагает обработку текста с учетом базы знаний, описывающей лингвистические характеристики китайского языка вместо обработки отдельных независимых китайских иероглифов, что может эффективно решить проблему отсутствия морфологических изменений в текстах китайского языка.

Базы знаний для обработки китайского языка

Для решения проблем обработки китайского языка Лю Чиюань из Университета Цинхуа предложил добавить знания в модель обработки китайского языка, основанную на данных, и исследовал такую модель обработки [2]. Кроме баз знаний в области обработки естественного языка, таких как WordNet, VerbNet, ConceptNet, существуют также известные базы знаний для обработки именно китайского языка, такие как GKB [3], Chinese ontology FrameNet [4], HowNet [5] и т. д.

База знаний, построенная для конкретного языка, может содержать характеристики конкретного языка, и обработка текста на основе такой базы знаний позволит получить результаты, существенно лучшие, чем в системах, не использующих базы знаний. Интеллектуальные системы должны эффективно организовывать и управлять различными знаниями и эффективно их обрабатывать. Онтология – это концептуальная модель, которая описывает понятия и их отношения, а также описывает семантику понятий через отношения между ними. Эта статья базируется на базах знаний о китайском языке, упомянутых выше, и предлагает онтологию для обработки китайского языка на основе открытой семантической технологии проектирования интеллектуальных систем (технология OSTIS). Технология OSTIS предназначена для представления и обработки различных видов знаний и ориентирована на разработку компьютерных систем, основанных на знаниях [6].

В рамках технологии OSTIS в качестве основы представления знаний используется SC-код. Это внутренний язык для кодирования знаний в памяти, который обеспечивает унифицированное семантически совместимое представление различных предметных областей и соответствующих им онтологий. SC-код позволяет представлять любые виды знаний, позволяет избежать избыточности и дублирования знаний.

В состав модели предметной области (ПО), представленной в SC-коде, входят постоянно существующие объекты исследования, постоянно существующие связи и структуры. Онтология же трактуется как спецификация предметной области, которая определяет понятия предметной области, отношения между ними и описывает взаимосвязи предметной области с другими сущностями, в том числе с другими предметными областями.

База знаний в рамках технологии OSTIS строится на основе онтологического подхода. Сущность проектирования базы знаний заключается в построении иерархической системы предметных областей и соответствующих им онтологий. В технологии OSTIS формализацию знаний можно рассматривать как формализацию и спецификацию предметной области. Такая модель проектирования базы знаний может минимизировать зависимость компонентов базы

знаний между собой и минимизировать необходимость взаимодействия между разработчиками различных компонентов.

Основанные на онтологическом подходе технологии OSTIS знания китайского языка структурированы для обработки текстов китайского языка. Целью построения базы знаний на основе онтологии является обеспечение общего понимания лингвистических знаний китайского языка, определение общепризнанных понятий. Онтология также содержит основные теории и основные принципы китайского языка, а также методы и правила обработки знаний китайского языка. В технологии OSTIS методы и правила обработки знаний могут быть описаны как sc-агенты. SC-агент – это некоторый объект, который может выполнять действия в семантической памяти, в которой хранится база знаний [7]. Разные правила и методы для обработки китайского языка могут быть реализованы в виде sc-агентов.

Глубокая обработка китайского языка выполняется на основе базы знаний о лингвистике и существующей базы знаний конкретной предметной области. С помощью базы знаний о лингвистике решатель задач преобразует текст китайского языка в семантически эквивалентный фрагмент в базе знаний конкретной предметной области. В сочетании с лингвистическим знанием китайского языка и знанием конкретной предметной области, информация из текстов китайского языка интегрируется в существующую базу знаний конкретной предметной области.

При вводе текстов китайского языка в систему, как показано на рис. 1, процесс используется для глубокой обработки китайского языка.



Рис. 1. Процесс для обработки китайского языка
Fig. 1. Operations for the Chinese language processing

Для реализации процесса обработки и понимания китайского языка можно выделить следующие SC-агенты:

– SC-агент анализа синтаксических структур. На основе синтаксических знаний о китайском языке в виде логических правил данный SC-агент анализирует синтаксические компоненты текстов китайского языка и выделяет такие компоненты, как подлежащее, сказуемое и др.;

– SC-агент анализа семантических структур. На основе семантических знаний о китайском языке данный SC-агент анализирует семантические компоненты текстов китайского языка. В результате обработки выделяются именованные сущности, понятия и отношения между ними. Если текст содержит некоторое действие, то агент также анализирует объект и субъект действия;

– SC-агент сопоставления компонентов текстов китайского языка с семантикой в базе знаний в конкретной предметной области. Задачей этого SC-агента является сопоставление полученных именованных сущностей, понятий и отношений из текстов китайского языка с узлами в базе знаний посредством вычисления семантического сходства.

Таким образом, путем сопоставления текста китайского языка с семантикой в базе знаний выполняется предварительное понимание текстов китайского языка.

Общая структура базы знаний для обработки китайского языка

Предложенный подход заключается в разработке предметных областей китайского языка и обработке специфических знаний, основанных на общей структуре предметных областей о лингвистике. Согласно принципу построения базы знаний, используемому в технологии OSTIS, база знаний о лингвистике китайского языка представляет собой иерархическую систему различных предметных областей лингвистических знаний китайского языка и соответствующих им онтологий.

Различные предметные области описывают различные аспекты соответствующего лингвистического знания китайского языка, а также правила и методы обработки знаний. Онтология предметной области о лингвистике китайского языка строится с помощью повторного использования существующих онтологий и лингвистических знаний, ориентированных на обработку китайского языка. Существующие онтологии имеют важное справочное значение для построения новой лингвистической онтологии. Ниже приведена общая структура предметной области китайского языка, представленной на языке SCn (одном из вариантов внешнего отображения текстов SC-кода) [8].

ПО текстов китайского языка

=> частная ПО*:

- ПО синтаксиса китайского языка
- ПО семантики китайского языка

Предметная область синтаксиса китайского языка описывает характеристики синтаксиса китайского языка, функциональные характеристики синтаксических компонентов. Предметная область семантики китайского языка описывает семантические характеристики, семантические отношения и семантическую структуру в текстах китайского языка. Для глубокой обработки китайского языка необходимо построить семантическую онтологию китайского языка. Предметная область синтаксиса, построенная на основе лингвистических знаний, отражает характеристики синтаксиса китайского языка и может использоваться для анализа синтаксической структуры текстов китайского языка. Предметная область семантики китайского языка используется для поверхностного семантического анализа текста китайского языка. Основное внимание в данном исследовании уделяется предметной области синтаксиса китайского языка, которая будет подробно описана ниже.

В предметной области синтаксиса китайского языка необходимо учитывать синтаксическую информацию о предложениях, словосочетаниях и словах китайского языка. Ниже приведен структурный фрагмент предметной области синтаксиса китайского языка, представленный на языке SCn.

ПО синтаксиса китайского языка

=> частная ПО*:

- ПО предложений китайского языка
- ПО словосочетаний китайского языка
- ПО слов китайского языка
- ПО частей слов
- ПО сокращений
- ПО идиом

Предложения всегда рассматривались в качестве самой маленькой единицы исследования в области обработки естественного языка. Анализ предложений является важной промежуточной стадией, соединяющей анализ всего текста и анализ отдельных слов. Подробное описание знаний о предложениях является важным базовым этапом для обработки естественного языка. Предметная область предложений китайского языка исследует различные типы предложений китайского языка, компоненты предложений и отношения между ними. Семантически полный текст можно разделить на ряд сложных и простых предложений. Простые предложения могут быть составлены из ряда словосочетаний, основанных на различных отношениях. Различные словосочетания, в свою очередь, также имеют свои точные синтаксические и семантические функции в предложении.

Ниже приведена структурная спецификация предметной области предложений китайского языка, представленная на языке SCn.

ПО предложений китайского языка

Э *максимальный класс объектов исследования*:
предложение китайского языка

Э *немаксимальный класс объектов исследования*:

- простое предложение
- сложное предложение

Э *исследуемое отношение*:

- подлежащее*
- сказуемое*
- дополнение*
- определение*
- обстоятельство*
- числительное*
- квантификатор*

простое предложение

=> *включение*:

- предложение с подлежащим и сказуемым
- предложение без подлежащего и сказуемого
- особенное предложение

В предметной области предложений китайского языка описываются исследуемые абсолютные понятия (классы сущностей), исследуемые отношения и другие лингвистические знания о предложениях. На основе этих базовых лингвистических знаний далее могут описываться правила, задающие структуру предложений, и другие знания, в частности, некоторые специфические характеристики предложений китайского языка. Например, в китайском языке числительное и квантификатор строго различаются. Квантификаторы указывают единицу измерения. У китайского языка есть особенные слова для квантификаторов. В предметной области управление знаниями реализуется через иерархическое проектирование. Такой подход к проектированию может уменьшить область поиска путей решения задачи. При обработке конкретных текстов китайского языка необходимые знания для обработки текстов могут быть быстро найдены в рамках соответствующей предметной области.

Структура простого предложения с подлежащим и сказуемым может быть описана в логической онтологии. Например, на рис. 2 указано на языке SCg (одном из вариантов внешнего отображения текстов SC-кода), что предложение с подлежащим и сказуемым может состоять из *существительного словосочетания* и *глагольного словосочетания*, выполняющих соответственно роли *подлежащего* и *сказуемого*. Как показано на рис. 2, предметная область предложений китайского языка содержит описания разных понятий и отношений, таких как «предложение с подлежащим и сказуемым», «подлежащее», «сказуемое» и др. Данный фрагмент базы знаний описывает, что предложение с подлежащим и сказуемым можно рассматривать как последовательность существительного словосочетания и глагольного словосочетания с соответствующими атрибутами. В процессе генерации текстов предложение с подлежащим и сказуемым может генерироваться согласно заданной структуре.

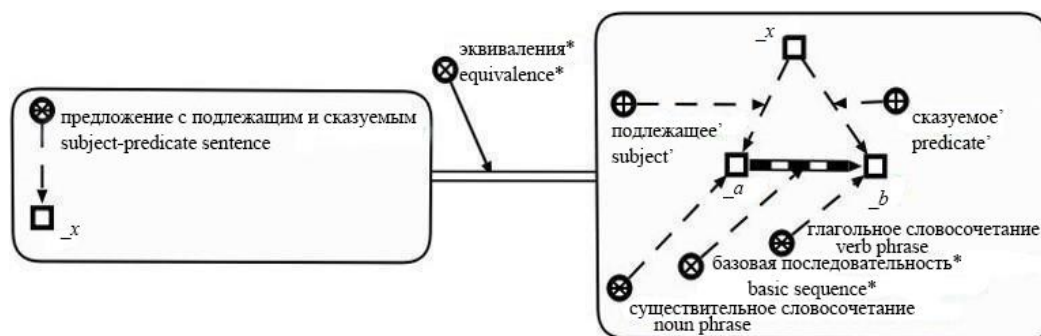


Рис. 2. Логическое утверждение про предложение с подлежащим и сказуемым
Fig. 2. Logical statement about a subject predicate sentence

Анализ словосочетаний может решить большинство проблем, связанных с неоднозначностью обработки отдельно взятых слов. В качестве промежуточного результата анализа предложений, анализ словосочетаний также является основой для более глубокого анализа фрагментов и полного синтаксического анализа. Предметная область словосочетаний исследует типы словосочетаний китайского языка и отношения между внутренними структурами словосочетаний.

Структуры различных основных словосочетаний могут быть описаны онтологией согласно синтаксическим отношениям. Например, на рис. 3 указано на языке SCg, что глагольное словосочетание может состоять из глагола и любого другого базового словосочетания или глагола и существительного в соответствии с отношением сказуемого-дополнения.

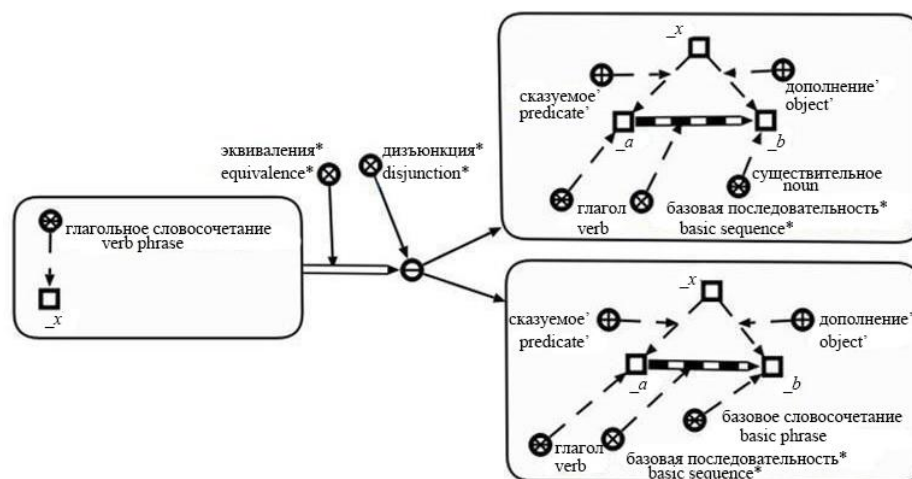


Рис. 3. Логическое утверждение про глагольное словосочетание

Fig. 3. Logical statement about a verb phrase

Из-за проблемы китайских правил письма, определение (выделение) слов в текстах китайского языка является важной теоретической проблемой. В области обработки китайского языка был предложен «Стандарт сегментации слов современного китайского языка, используемый для обработки информации» [9]. В этом стандарте слово представлено «единицей сегментации». Точное определение: «базовая единица для обработки китайского языка с определенными семантическими или грамматическими функциями». В предметной области слов китайского языка исследуются типы, синтаксические и семантические функции китайских слов. В данной предметной области описание слов ориентировано на компьютерную обработку китайского языка и не полностью совпадает с описанием слов в китайской лингвистике.

На основе построенной онтологии синтаксиса китайского языка может быть осуществлен синтаксический анализ текстов китайского языка и генерация текстов китайского языка, которые соответствуют онтологии синтаксиса китайского языка в базе знаний о лингвистике. База знаний делит лингвистические знания китайского языка на различные предметные области, что полезно для управления и применения синтаксических и семантических знаний китайского языка. База знаний о китайском языке может значительно повысить эффективность обработки китайского языка.

Заключение

Онтология используется для построения единой семантической модели лингвистических знаний китайского языка и эффективной организации предметных знаний для обработки текстов китайского языка. Предлагаемый подход выгоден для решения проблемы отсутствия интерпретации лингвистических знаний при обработке китайского языка. Предложенный в данной статье подход является предварительным результатом исследовательской работы по обработке китайского языка на основе онтологий. Эффективная интеграция между семантически эквивалентными фрагментами и базой знаний конкретной предметной области требует более глубокого исследования.

Список литературы / References

1. Zong C.Q., Cao Y.Q., Yu S.W. Sixty Years of Chinese Information Processing. *Applied Linguistics*. 2009;01 (04):53-61. DOI: 10.16499/j.cnki.1003-5397.2009.04.007.
2. Liu Z.Y. Knowledge guided natural language understanding. *Seventh China Conference on Data Mining*. 2018;01:199-206.
3. YU S.W. The Basic Processing of Contemporary Chinese Corpus at Peking University Specification. *Journal of Chinese information processing*. 2002;16(05):49-64.
4. Jia J.Z., Dong G. The Study on Integration of CFN and VerbNet, WordNet. *New Technology of Library and Information Service*. 2008;01(06):06-10.
5. Dong Z.D., Dong Qiang. Theoretical Findings of Hownet. *Journal of Chinese information processing*. 2007;21(04):03-09.
6. Golenkov V.V. Ontology-based Design of Intelligent Systems. *Open semantic technology for intelligent systems*. 2017;02:37-56.
7. Shunkevich D.V. Ontology-based design of knowledge processing machines. *Open semantic technology for intelligent systems*. 2017;02:73-94.
8. Davydenko I.T. Ontology-based knowledge base design. *Open semantic technology for intelligent systems*. 2017;02:57-72.
9. Jie C.Y. Some Key Issues upon Contemporary Chinese Language Word Segmentation Standard Used for Information Processing. *Journal of Chinese information processing*. 1989;03(04): 3-41.

Сведения об авторах

Цянь Лунвэй, аспирант кафедры интеллектуальных информационных технологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Qian Longwei, PG Student of the Department of Intelligent Information Technologies of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220037, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. Платонова, 39,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-29-721-60-63;
e-mail: qianlw1226@gmail.com
Цянь Лунвэй

Address for correspondence

220037, Republic of Belarus,
Minsk, Platonava str., 39,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-29-721-60-63;
e-mail: qianlw1226@gmail.com
Qian Longwei



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-57-65>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.9.047.4

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ УСЛОВИЙ ПОДАЧИ ОЗОНО-ВОЗДУШНОЙ СМЕСИ НА ПРОЦЕСС УДАЛЕНИЯ ФОТОРЕЗИСТА С ПОВЕРХНОСТИ КРЕМНИЕВОЙ ПЛАСТИНЫ

ТИХОН О.И., МАДВЕЙКО С.И., БОРДУСОВ С.В., БАРАХОЕВ А.Л., КАМЛАЧ П.В.

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

Поступила в редакцию 22 июня 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Работа посвящена изучению зависимости результатов обработки фоторезистивных пленок на поверхности кремниевых пластин в среде озона от условий и параметров проведения процесса. Высокий окислительный потенциал озона обосновывает возможность его применения для удаления органических пленок в условиях атмосферного давления. Эксперименты выполнялись с использованием разработанного исследовательского стенда, в котором варьировался режим и способ нагрева пластины, а также способ подачи газа к поверхности фоторезиста. В качестве экспериментальных образцов выступали кремниевые пластины со сформированным слоем фоторезистивной маскирующей пленки толщиной 1,35 мкм. Было установлено, что для обеспечения равномерности нагрева пластины по всей ее поверхности целесообразным является использование керамического инфракрасного нагревателя. При подаче озono-воздушной смеси в центр нагретого образца наблюдалось наличие остатков удаляемого фоторезиста, связанное с перепадом температуры в его приповерхностной области. Для решения данной проблемы были рассчитаны компьютерные модели температурных режимов элементов реакционного объема, которые показали, что рассеяние потока рабочего газа по поверхности кремниевой пластины позволяет значительно увеличить эффективность удаления фоторезиста, а при качественном подборе режима обработки обеспечивает полное снятие фоторезистивного материала. Полученные данные были экспериментально подтверждены путем использования сепаратора потока озono-воздушной смеси. Проведены эксперименты по исследованию влияния расстояния от поверхности пластины до места ввода рабочего газа на скорость удаления фоторезиста, показавшие, что уменьшение расстояния способствует сокращению потерь озона в результате термического разложения и, соответственно, повышению скорости удаления материала.

Ключевые слова: удаление фоторезиста, озон, озono-воздушная смесь, температура пластин.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Тихон О.И., Мадвейко С.И., Бордусов С.В., Барахоев А.Л., Камлач П.В. Исследование влияния условий подачи озono-воздушной смеси на процесс удаления фоторезиста с поверхности кремниевой пластины. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 57-65.

STUDY OF THE INFLUENCE OF OZONE-AIR MIXTURE SUPPLY CONDITIONS ON THE PROCESS OF THE PHOTORESIST REMOVAL FROM THE SILICON WAFER SURFACE

OLEG I. TSIKHAN, SIARHEI I. MADVEIKA, SIARHEI V. BORDUSAU,
ANDREI L. BARAKHOEV, PAVEL V. KAMLACH

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

Submitted 22 June 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The study is devoted to the research of the dependence of the processing results of photoresistive films on the silicon wafers surface in an ozone environment on the conditions and parameters of the process. The high oxidizing potential of ozone justifies the possibility of its use for removing organic films under atmospheric pressure. The experiments were carried out using the developed research bench, in which the mode and method of heating, as well as the method of supplying gas to the surface of the photoresist, were varied. Silicon wafers with a formed 1,35- μm thick masking photoresist film were used as experimental samples. It was found expedient that uniform heating of the plate over its entire surface can be achieved using a ceramic IR heater. When the ozone-air mixture was introduced into the center of the heated sample, the presence of the removed photoresist residues was observed, which was associated with a temperature drop in its surface area. To solve this problem, the computer models of the temperature regimes of the reaction volume elements were calculated. They showed that the scattering of the working gas flow over the surface of the silicon wafer would significantly increase the efficiency of photoresist removal, and with a good selection of the treatment regime it would ensure complete removal of the photoresist. The data obtained were experimentally confirmed by using an ozone-air mixture flow separator. Experiments were carried out to study the effect of the distance from the wafer surface to the working gas inlet on the photoresist removal rate. They showed that a decrease in the distance reduces the ozone loss due to thermal decomposition and, consequently, increases the material removal rate.

Keywords: photoresist removal, ozone, ozone-air mixture, wafers temperature.

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

For citation. Tsikhan O.I., Madveika S.I., Bordusau S.V., Barakhoev A.L., Kamlach P.V. Study of the influence of ozone-air mixture supply conditions on the process of the photoresist removal from the silicon wafer surface. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 57-65.

Введение

Развитие микроэлектроники, рост степени интеграции и масштабов выпуска интегральных микросхем (ИМС) стимулируют процессы разработки и внедрения современных и высокоэффективных методов обработки на всех этапах производства. Уменьшение характерных размеров топологии изготавливаемых ИМС значительно повышает требования к производительности и точности выполнения технологических операций, что необходимо для достижения высоких рабочих характеристик полупроводниковых устройств. В то же время актуальными становятся вопросы сокращения затрат на выпуск готовой продукции, введения комплексных мер для роста энергосбережения производственных комплексов и повышения экологичности производства согласно современным стандартам.

Технология формирования структуры ИМС содержит ряд повторяющихся операций (межоперационная очистка поверхности полупроводниковых пластин от органических загрязнений, удаление фоторезистивных маскирующих пленок), которые реализуются с использованием жидких технологических сред или вакуумно-плазменного оборудования. Процессы жидкостной химической обработки обладают высокой скоростью и селективностью, но в некоторых случаях не позволяют обеспечить необходимый уровень точности, а также

совместимость с процессами «сухой» газовой обработки. Сухие методы обработки также являются более предпочтительными в связи с большей чистотой и экологичностью процесса.

Одним из альтернативных методов удаления органических фоторезистивных маскирующих пленок и загрязнений является обработка полупроводниковых пластин с использованием озона [1]. Эффективность применения озона обоснована его способностью в газовой фазе активно реагировать с органическими молекулами и веществами. Высокий окислительный потенциал позволяет использовать озон в составе рабочих газов при обработке в условиях вакуума или атмосферного давления. Возможность обработки при атмосферном давлении значительно уменьшает затраты, связанные с эксплуатацией вакуумного оборудования, что также может способствовать сокращению времени выполнения операций.

Основными характерными химическими свойствами озона являются его способность к разложению и сильное окислительное действие. Благодаря этим свойствам и осуществляется процесс очистки и удаления фоторезиста, заключающийся в превращении обрабатываемых органических соединений в летучие вещества (H_2O , CO_2 , N). Большинство реакций окисления органических соединений с участием озона проходят по следующему пути [2]:



Два атома кислорода выделяются в виде молекулы O_2 , а один входит в состав продуктов разложения.

Генерация озона (O_3) для формирования рабочей газовой смеси может выполняться с использованием барьерного разряда, электролиза, фотохимического способа и высокочастотного электрического поля [3]. На практике большее применение находит синтез озона в барьерном разряде. Концентрация озона в газе, в большинстве случаев, ограничивается 5–7 объемн. % [2]. Разбавленные газовые смеси озона довольно устойчивы при умеренных температурах. С ростом температуры скорость распада O_3 увеличивается. Согласно [4] увеличение температуры на $50^\circ C$ повышает степень распада O_3 на 40 %, следовательно, повышение температуры вызывает снижение концентрации озона в озono-воздушной смеси.

Применительно к процессу обработки фоторезиста скорость R удаления материала s частицами вещества x может быть описана формулой [5]

$$R_{x(s)} \propto \Gamma_x e^{-1/T_s}, \quad (2)$$

где Γ_x – поток реакционных частиц (в нашем случае озона);

T_s – температура образца.

Поток частиц представляет собой свертку плотности реакционных частиц и скорости их подачи на поверхность. Увеличение плотности реакционных частиц, скорости их потока или обоих факторов приведет к росту скорости удаления материала.

На качество процесса удаления фоторезиста с поверхности кремниевой (Si) пластины в озono-воздушной смеси сильное влияние оказывает равномерность нагрева образца при подаче на его поверхность потока газа, которая может быть обеспечена несколькими способами.

Первый способ заключается в предварительном подогреве рабочей газовой смеси перед подачей в реакционный объем. Подобный процесс теоретически может быть реализован путем применения ленточных нагревателей или нагревательных обмоток, но необходимость поддержания достаточно высокой температуры газовой смеси в условиях атмосферного давления значительно повышает энергетические затраты, а чувствительность озона к температуре [4] может приводить к потерям озono-воздушной смеси до поступления в камеру.

Другим способом является изменение метода подачи рабочего газа. В этом случае равномерность нагрева достигается путем подачи неразогретого газа сразу по всей площади обрабатываемой пластины [6]. Для этого используется специальный сепаратор, имеющий множество распределенных по его поверхности выходных отверстий. Путем строгого согласования расстояния до образца, потока газа и рабочей мощности нагревателя, сепаратор позволяет обеспечить необходимый для обработки уровень температуры.

Ключевыми контролируемыми параметрами при обработке материалов в озono-воздушной смеси, таким образом, являются концентрация озона и значения температуры в рабочем объеме [7]. Особенность, заключающаяся в разложении O_3 при повышенных температурах, обосновывает необходимость локализации нагрева в области обрабатываемого

образца и контроля режимов воздействия газовой смеси на его поверхность. При этом неравномерность распределения температуры по поверхности образца может приводить к снижению скорости и качества выполнения операций. Применительно к задаче разработки технологического процесса удаления фоторезиста в озono-воздушной смеси при атмосферном давлении необходимыми являются поиск и реализация методов обеспечения постоянного значения температурного профиля и распределения газа по всей площади пластины.

Методика проведения экспериментов

Изучение процесса обработки фоторезистивных пленок в среде озона (O_3) проводилось с использованием разработанного исследовательского стенда, структурная схема которого представлена на рис. 1.

Обработка образцов осуществлялась в объеме рабочей камеры, представляющей собой кварцевую трубу диаметром 150 мм и высотой 80 мм. В нижней части камеры располагалось устройство нагрева, на которое помещалась обрабатываемая кремниевая пластина. Верхний и нижний торцы камеры закрывались крышками. В верхней крышке имелись отверстия для подвода питания к нагревателю и ввода контактирующей с поверхностью пластины термопары, а также отверстие для закрепления штуцера, используемого для подачи рабочего газа к образцу. Эксперименты проводились в условиях атмосферного давления.

Для подогрева пластин были использованы два типа нагревателей: соединенные параллельно две кварцевые лампы КГ-220-1000-3 диаметром 11 мм и мощностью 1 кВт каждая, а также керамический инфракрасный (ИК) нагреватель мощностью 450 Вт размером 100×100 мм. Схематическое изображение рабочей камеры представлено на рис. 2. Степень нагрева обрабатываемой пластины контролировалась хромель-алюмелевой термопарой и устанавливалась величиной подаваемого напряжения. Плавная регулировка напряжения выполнялась с помощью лабораторного автотрансформатора.

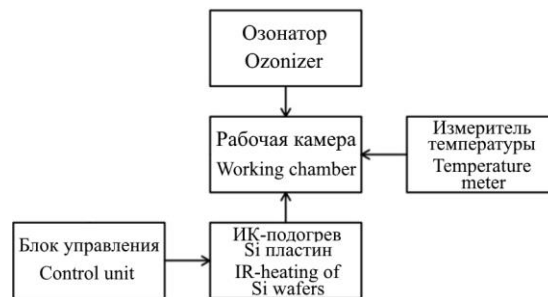


Рис. 1. Структурная схема исследовательского стенда
Fig. 1. The structural diagram of the research bench

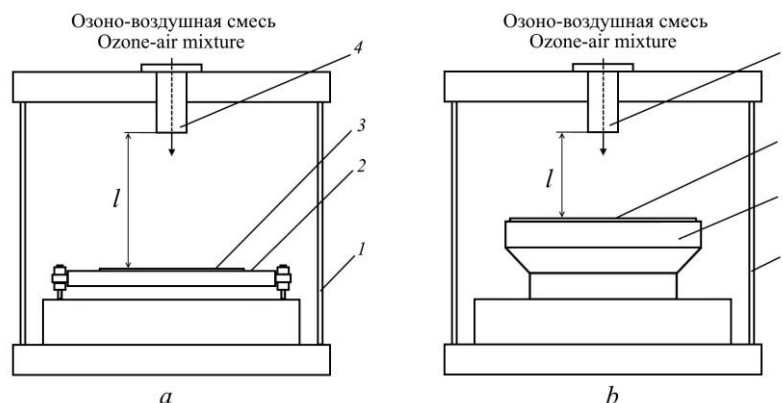


Рис. 2. Схема рабочей камеры для удаления фоторезистивной пленки в условиях атмосферного давления с использованием: галогенных ламп (а); керамического ИК-нагревателя (б)

1 – кварцевая труба; 2 – нагреватель; 3 – Si пластина; 4 – штуцер напуска озono-воздушной смеси

Fig. 2. Drawing of a working chamber for photoresist film removal at atmospheric pressure using:
halogen lamps (a); ceramic IR heater (b)

1 – quartz tube; 2 – heater; 3 – Si wafer; 4 – ozone-air inlet fitting

Перед проведением экспериментов было изучено влияние типа используемого нагревателя на характер разогрева исследуемой пластины со слоем фоторезиста. Использование кварцевых галогенных ламп продемонстрировало неравномерность нагрева, проявляющуюся в изменении цвета фоторезистивного покрытия преимущественно в центральной области пластины. Это объясняется разницей в геометрических размерах нагревателя и пластины, а значит, большим нагревом зоны, непосредственно находящейся в контакте с лампами. Данный результат указал на необходимость использования нагревателя с большей площадью контакта с объектом обработки. Проведенное в аналогичных условиях исследование характера нагрева пластины керамическим ИК нагревателем показало отсутствие зоны с характерно отличными цветами фоторезистивного покрытия, что говорит о повышении равномерности нагрева пластины по всей ее площади. В связи с этим для проведения экспериментов был выбран керамический 450 Вт ИК нагреватель. Однако недостатком подобного типа нагревателя является инерционность нагрева, проявляющаяся в относительно медленном изменении рабочей температуры при подстройке величины подаваемого напряжения, что требует более длительной процедуры подбора режима работы устройства.

Получение озона осуществлялось с помощью генератора «ОЗОН-10». Генератор предназначен для получения озона из осушенного кислорода или воздуха в высоковольтном электрическом разряде. Блок синтеза озона в генераторе представляет собой горизонтальный аппарат типа кожухотрубчатого теплообменника с тремя газоразрядными элементами с барьером на высокопотенциальном электроде. Величина концентрации генерируемого O_3 и производительность устройства определяются значением задаваемого тока питания повышенной частоты и расходом газа, которые устанавливались с помощью органов управления генератором. Для подачи газовой смеси в рабочий объем исследовательского стенда использовался безмасляный компрессор, подключаемый к входу озонатора.

В качестве экспериментальных образцов служили кремниевые пластины диаметром 100 мм. На поверхности пластин имелся сформированный в стандартных для промышленности условиях (нанесение, сушка, экспонирование, задубливание) слой фоторезистивной маскирующей пленки марки S1813G2SP15 толщиной 1,35 мкм.

Для анализа полученных экспериментальных данных и объяснения наблюдаемых эффектов использовалась построенная и рассчитанная компьютерная модель распределения температуры в реакционном объеме. В модели были заданы следующие параметры: диаметр камеры – 140 мм, высота – 50 мм; диаметр пластины – 100 мм; расстояние от отверстия ввода газа до пластины – 7 мм. Пластина в объеме камеры располагалась на условной модели керамического ИК нагревателя. Газ подавался через *Inlet* в верхнем торце камеры.

Для определения скорости удаления фоторезиста с поверхности пластины $v_{уд}$ с помощью электронных лабораторных весов измерялась масса образца до и после обработки в озono-воздушной смеси и вычислялась масса удаленного в единицу времени фоторезиста.

Задача исследования заключалась в определении условий и параметров, обеспечивающих качественный результат удаления фоторезиста с поверхности кремниевой пластины. Исследовалось влияние способа нагрева и метода подачи рабочего газа на процесс обработки материала, а также зависимость скорости удаления фоторезистивной пленки от расстояния l между кремниевой пластиной и местом ввода озono-воздушной смеси.

Результаты и их обсуждение

Установочные эксперименты показали, что условия и способ подачи озono-воздушной смеси к поверхности кремниевой пластины в существенной степени влияют как на скорость, так и на равномерность удаления фоторезистивной пленки. В качестве примера этому на рис. 3 показан результат обработки пластины с фоторезистом при централизованной подаче озono-воздушной смеси из одного отверстия.

Обрабатываемая пластина с фоторезистивной пленкой располагалась на поверхности нагревателя, штуцер подачи озono-воздушной смеси устанавливался на расстоянии 1 см над центром пластины. Пластина обрабатывалась в течение 7 мин после нагрева до температуры 250 °С. При больших значениях температуры происходит термическое

разрушение структуры фоторезиста, что в условиях производства повышает вероятность повреждения уже подготовленных полупроводниковых структур; меньшая величина температуры не позволяет осуществить процесс снятия фоторезистивной пленки в среде озона.

Из результата эксперимента (рис. 3) видно, что на поверхности пластины после обработки сохранились области с неудаленным фоторезистом, занимающие порядка 15 % площади. Наиболее характерная зона располагается в центре пластины на участке под штуцером подачи озono-воздушной смеси. Наблюдаемый эффект уменьшения количества удаляемого материала предположительно связан со снижением температуры данного участка пластины по причине подачи неразогретого рабочего газа. Экспериментальные данные были проанализированы при помощи компьютерной модели, построенной со следующими условиями: диаметр отверстия ввода газа – 8 мм, скорость потока – $U_0 = 10$ м/с. Результат моделирования представлен на рис. 4.

Из представленного на рис. 4 изображения видно, что подача газа в середину пластины перпендикулярно ей ведет к уменьшению температуры в центре на величину около 20 °С.

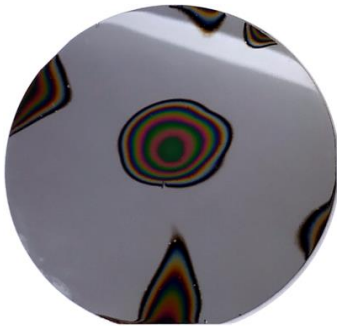


Рис. 3. Результат обработки пластины с фоторезистом при подаче озono-воздушной смеси по центру пластины

Fig. 3. The result of processing of wafer with photoresist when an ozone-air mixture is supplied in the center of the wafer

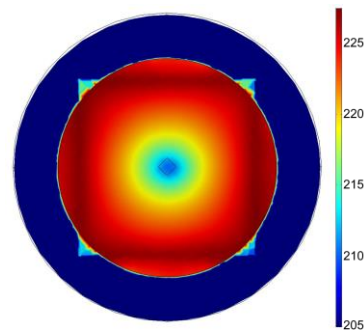


Рис. 4. Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа по центру пластины

Fig. 4. The simulation result of the silicon wafer surface heating when gas is supplied in the center of the wafer

Для анализа качественного совпадения данных моделирования и реально наблюдаемых результатов обработки был проведен эксперимент, при котором штуцер подачи озono-воздушной смеси был установлен на расстоянии 1 см от поверхности пластины под небольшим углом к ней. Пластина обрабатывалась в течение 7 мин после нагрева до температуры 250°С. Результат обработки представлен на рис. 5. Также была рассчитана модель с аналогичной описанной ранее конфигурацией, но со смещенным в направлении оси x на 60° потоком газа с $U_0 = 25$ м/с. Результат моделирования представлен на рис. 6.

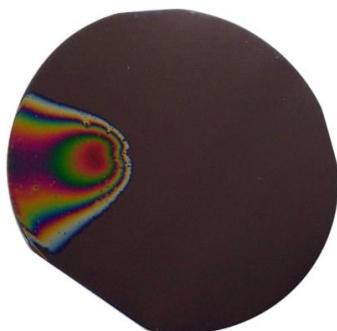


Рис. 5. Результат обработки пластины с фоторезистом при подаче озono-воздушной смеси под углом к поверхности пластины

Fig. 5. The result of processing of wafer with photoresist when an ozone-air mixture is supplied at an angle to the wafer's surface

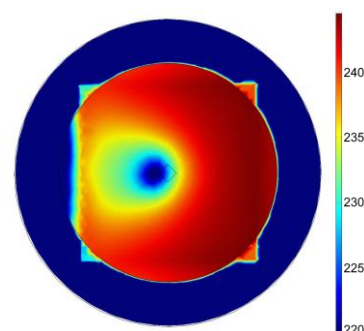


Рис. 6. Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа под углом 60° к ее плоскости

Fig. 6. The simulation result of the silicon wafer surface heating when gas is supplied at an angle of 60° to its plane

На данном изображении показан эффект, аналогичный предыдущей модели. Область на поверхности пластины, смещенная относительно центра из-за изменения направления потока газа, характеризуется меньшим значением поверхностной температуры. Наибольшая разница температур составляет около 25 °С. Данные результаты подтверждают предположение о том, что причиной не полного удаления фоторезиста при обработке разогретой пластины озono-воздушной смесью могут являться перепады температуры на ее поверхности.

Для проверки эффекта влияния на температуру поверхности кремниевой пластины распределенной подачи потока газовой смеси с применением сепаратора была построена компьютерная модель, в которой вместо одного отверстия диаметром 8 мм над поверхностью пластины имелся массив 8×8 отверстий диаметром 4 мм на расстоянии 13 мм друг от друга. Данные отверстия выступали в качестве *Inlet* для подачи газа со скоростью потока $U_0 = 2,4$ м/с. Результат моделирования, представленный на рис. 7, демонстрирует практически равномерное распределение температуры по всей площади 100 мм пластины. Неравномерность, не превышающая 5 °С, наблюдается за пределами и на границе условной модели ИК нагревателя.

Для экспериментальной проверки результатов моделирования пластины с фоторезистивной пленкой помещались на поверхность нагревателя, на расстоянии 1 см над образцом располагался сепаратор потока газа, температура нагрева составляла 250 °С. По результатам эксперимента установлено, что разделение потока газа позволило полностью очистить обрабатываемые пластины от имеющегося фоторезистивного покрытия.

При увеличении расстояния l от места подачи озono-воздушной смеси до поверхности кремниевой пластины характер расположения остатков фоторезистивной пленки существенно не изменялся, в то время как скорость ее удаления уменьшалась. На рис. 8 представлены результаты экспериментов, проведенные при следующих условиях: температура пластины в процессе обработки – 250 °С, время обработки – 8 мин.

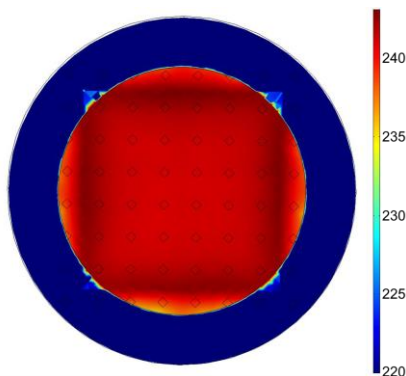


Рис. 7. Результат моделирования нагрева поверхности кремниевой пластины при подаче газа через массив отверстий
Fig. 7. The result of simulation of heating the surface of a silicon wafer when gas is supplied through an array of holes

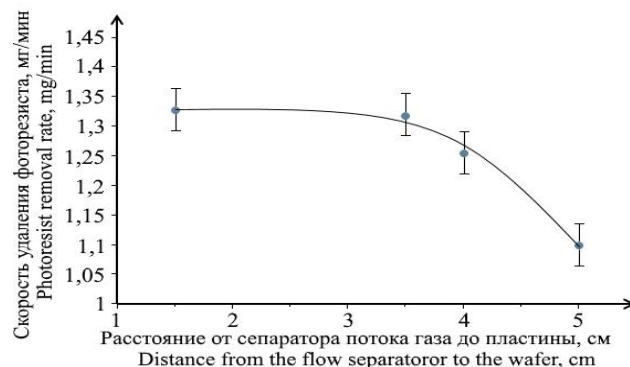


Рис. 8. Зависимость скорости удаления фоторезиста от расстояния l от сепаратора потока газа до пластины
Fig. 8. The dependence of the photoresist removal rate on the distance l from the flow separator to the wafer

Уменьшение расстояния l позволяет потоку озono-воздушной смеси быстрее достигать поверхности разогретой пластины. Это способствует сокращению потерь озона в результате термического разложения в приповерхностном слое до взаимодействия кислорода с молекулами фоторезиста и увеличению объема концентрированного рабочего газа в области обработки экспериментального образца, что приводит к росту скорости удаления материала. Но, как показали эксперименты, при этом существенную роль начинает играть охлаждение поверхности пластины, что приводит к существенной неравномерности скорости удаления материала и наличию остатков фоторезистивной пленки на поверхности пластины.

Заклучение

Одним из основных факторов процесса удаления фоторезиста в озono-воздушной смеси является рабочая температура обрабатываемого образца, которая зависит как от характеристик

нагревателя, так и от режимов и условий подвода к поверхности пластин газовой смеси. Неравномерность распределения температуры по площади поверхности кремниевой пластины приводит к появлению характерных областей, удаление материала с которых происходит со значительно меньшей скоростью. Решение данной проблемы обеспечивается равномерным распределением потока рабочего газа одновременно по всей пластине, что при качественном согласовании скорости потока, расстояния от места ввода в камеру до образца и температуры нагрева, компенсирующей охлаждение пластины, позволяет полностью удалять слой фоторезистивной пленки. Для этого необходимо использовать специальные сепараторы, через которые прогоняется озono-воздушная смесь.

Метод удаления фоторезиста с применением озона при условии его качественной реализации может показать высокую эффективность при использовании в составе технологического процесса изготовления изделий электронной техники. Низкий уровень повреждений образца, относительная простота реализации при интеграции в существующие технологические маршруты изготовления изделий электронной техники делает этот метод непрецизионной обработки полупроводниковых пластин привлекательным для дальнейшей разработки и промышленного применения.

Список литературы

1. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process-induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9(2):353-356. DOI: 10.1116/1.585574.
2. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. *Физическая химия озона*. Москва: Изд-во МГУ; 1998.
3. Разумовский С.Д., Заиков Г.Е. *Озон и его реакции с органическими соединениями (кинетика и механизм)*. Москва: «Наука»; 1974.
4. Драгинский В.Л., Алексеева Л.П., Самойлович В.Г. *Озонирование в процессах очистки воды*. Москва: ДеЛи принт, 2007.
5. West A., Schans M., Xu C., Cooke M., Wagenaars E. Fast, downstream removal of photoresist using reactive oxygen species from the effluent of an atmospheric pressure plasma Jet. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016;25:02LT01. DOI: 10.1088/0963-0252/25/2/02LT01.
6. Miura T., Kekura M., Horibe H., Yamamoto M. Photo-resist Removal using Highly Concentrated Ozone Gas – Removal Characteristics of Various Resists: *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2008;21(2):311-316. DOI: 10.2494/photopolymer.21.311.
7. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15(3):1409-1412. DOI: 10.1116/1.580551.

References

1. Huynh C.K., Mitchener J.C. Plasma versus ozone photoresist ashing: Temperature effects on process-induced mobile ion contamination. *Journal of Vacuum Science & Technology B*. 1991;9(2):353-356. DOI: 10.1116/1.585574.
2. Lunin V.V., Popovich M.P., Tkachenko S.N. [*Physical chemistry of ozone*]. Moscow: Publ. MSU; 1998. (in Russ.)
3. Razumovskij S.D., Zaikov G.E. [*Ozone and its reactions with organic compounds (kinetics and mechanism)*]. Moscow: «Nauka»; 1974. (in Russ.)
4. Draginskij V.L., Alekseeva L.P., Samojlovich V.G. [*Ozonation in water treatment processes*]. Moscow: DeLi print, 2007. (in Russ.)
5. West A., Schans M., Xu C., Cooke M., Wagenaars E. Fast, downstream removal of photoresist using reactive oxygen species from the effluent of an atmospheric pressure plasma Jet. *Plasma Sources Sci. Technol.* 2016;25:02LT01. DOI: 10.1088/0963-0252/25/2/02LT01.
6. Miura T., Kekura M., Horibe H., Yamamoto M. Photo-resist Removal using Highly Concentrated Ozone Gas - Removal Characteristics of Various Resists: *Journal of Photopolymer Science and Technology*. 2008;21(2):311-316. DOI: 10.2494/photopolymer.21.311.
7. Gardner W.L., Baddorf A.P., Holber W.M. Temperature and concentration effects on ozone ashing of photoresist. *Journal of Vacuum Science & Technology A*. 1997;15(3):1409-1412. DOI: 10.1116/1.580551.

Вклад авторов

Тихон О.И. осуществил подготовку и проведение экспериментов, выполнил анализ полученных результатов, оформил рукопись статьи.

Мадвейко С.И. является научным руководителем, поставил цели и задачи исследования

Бордусов С.В. осуществил технический контроль за проведением исследований, участвовал в обобщении и интерпретации результатов, оказал помощь в подготовке текста статьи для опубликования.

Барахоев А.Л. принял участие в проведении экспериментов, оказал помощь в проведении компьютерного моделирования.

Камлач П.В. принял участие в проведении экспериментов, оказал помощь в проведении компьютерного моделирования.

Authors' contribution

Tsikhan O.I. prepared and conducted experiments, analyzed the results, and completed the manuscript of the article.

Madveika S.I. acted as the scientific adviser and set the goals and objectives of the study.

Bordusau S.V. carried out technical monitoring of the research, participated in summarizing and interpretation of the experimental data, assisted in the preparation of the text of the article for publication.

Barakhoev A.L. took part in conducting of experiments, assisted in computer modeling.

Kamlach P.V. took part in conducting of experiments, assisted in computer modeling.

Сведения об авторах

Тихон О.И., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мадвейко С.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Бордусов С.В., д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Барахоев А.Л., аспирант кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Камлач П.В., к.т.н., доцент, доцент кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Tsikhan O.I., PG Student of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Madveika S.I., PhD, Associate Professor, Head of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Bordusau S.V., D.Sci., Professor of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Barakhoev A.L., PG Student of the Electronic Technology and Engineering Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kamlach P.V., PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Electronic Technology and Engineering 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. +375-17-293-85-82;
e-mail: kritgar@bsuir.by
Тихон Олег Игоревич

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-85-82;
e-mail: kritgar@bsuir.by
Tsikhan Oleg Igorevich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-66-74>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.375.029

АДАПТИВНЫЙ ШИРОКОПОЛОСНЫЙ МАЛОШУМЯЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ РАДИОЧАСТОТЫ

МАЛЕВИЧ И.Ю., ЗАЯЦ П.В.

ОАО «КБ Радар» – управляющая компания холдинга «Системы радиолокации»
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 31 августа 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Адаптивные широкополосные малошумящие усилители радиочастоты (АШМУР) находят широкое применение при построении систем защиты радиоприемных трактов от нелинейного поражения в условиях нестационарной электромагнитной обстановки (ЭМО). Одним из перспективных направлений работ по созданию АШМУР является разработка устройств в классе схем с переключаемыми цепями. Создание таких устройств имеет определенные особенности, поскольку, наряду с необходимостью обеспечения малого коэффициента шума и цифрового управления регулировочной характеристикой, требуется обеспечить высокую линейность и большой динамический диапазон (ДД) устройства. В настоящей работе представлены результаты логико-эвристического синтеза АШМУР с адаптивно регулируемым коэффициентом передачи, который изменяется за счет переключения цепей трансформаторной обратной связи. С целью проверки функциональных и технических характеристик синтезированного АШМУР и оптимизации его параметров разработана и исследована модель в программной среде ADS. Предложенное техническое решение АШМУР обеспечивает дискретное (23, 14, 10 и 5 дБ) широкополосное изменение коэффициента передачи, при этом ДД по интермодуляции третьего порядка в пересчете к полосе 1 МГц составляет соответственно 83, 92, 98 и 104 дБ. Ступенчатое изменение коэффициента передачи в цепи трансформаторной отрицательной обратной связи разработанного АШМУР позволяет избежать накопления дополнительных шумов в структуре и обеспечивает низкий коэффициент шума, который не превышает 1 дБ. Технические характеристики АШМУР позволяют адаптивно наращивать перегрузочную способность радиоприемного тракта с пропорциональным расширением его ДД в условиях нестационарной ЭМО и таким образом обеспечить повышение эффективности системы уровневой защиты от нелинейного поражения приемных трактов средств радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

Ключевые слова: адаптивный широкополосный малошумящий усилитель радиочастоты, обратная связь без потерь.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Адаптивный широкополосный малошумящий усилитель радиочастоты. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 66-74.

ADAPTIVE BROADBAND LOW-NOISE RF AMPLIFIER

IGOR Yu. MALEVICH, PAVEL V. ZAYATS

JSC “KB Radar” – Managing Company of “Radar Systems” (Republic of Belarus)

Submitted 31 August 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. Adaptive broadband low-noise radio frequency amplifiers (ABLNRFA) are widely used in the construction of systems for protecting radio receiving paths from nonlinear damage in a non-stationary electromagnetic environment (EME). One of the promising focus areas on the creation of ABLNRFA is the development of devices in the class of circuits with switched networks. The creation of such devices has certain features, since, along with the need to ensure a low noise figure and digital control of the regulation characteristic, it is required to provide high linearity and a large dynamic range (DR) of the device. This paper presents the results of the logical-heuristic synthesis of ABLNRFA with an adaptively adjustable transducer gain, which changes due to switching of transformer feedback circuits. In order to check the functional and technical characteristics of the synthesized ABLNRFA and optimize its parameters, a model was developed and studied in the ADS environment. The proposed ABLNRFA technical solution provides a discrete (23, 14, 10 and 5 dB) wideband change in the transmission coefficient, while the DR for third-order intermodulation in terms of a 1 MHz band is 83, 92, 98 and 104 dB, respectively. A step change in the transducer gain in the circuit of the lossless feedback circuit developed by ABLNRFA avoids the accumulation of additional noise in the structure and provides a low-noise figure that does not exceed 1 dB. The technical characteristics of ABLNRFA allow one to adaptively increase the overload capacity of the radio receiving path with a proportional expansion of its DR in the conditions of non-stationary EME, and thus increase the efficiency of the level protection system against nonlinear damage to the receiving paths of radio communication, radar and radio navigation.

Keywords: adaptive broadband low-noise RF amplifier, lossless feedback.

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

For citation. Malevich I.Yu., Zayats P.V. Adaptive broadband low-noise RF amplifier. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 66-74.

Введение

Современные тенденции обеспечения помехозащищенности радиотехнических систем определяют задачу повышения эффективности адаптивной защиты радиоприемных трактов от нелинейного поражения. В условиях нестационарной электромагнитной обстановки одним из перспективных подходов решения проблемы является использование адаптивных широкополосных малозумящих усилителей радиочастоты (АШМУР), позволяющих посредством оперативного регулирования коэффициента передачи выполнять согласование динамического диапазона (ДД) радиоприемного тракта с динамическим диапазоном регистрируемого группового радиосигнала [1].

К настоящему времени в области проектирования АШМУР накоплен обширный фактологический материал. Основные подходы канализируются в направлениях развития последовательных структур с переключаемыми аттенюаторными секциями [2, 3], с байпасной конфигурацией [1, 4, 5] и с реконфигурируемой структурой [6–8]. Вместе с этим необходимость повышения линейности и минимизации коэффициента шума определяет актуальность новых подходов в разработке технических решений АШМУР.

Синтез АШМУР

Согласно системно-иерархическому подходу АШМУР можно рассматривать как структуру, образованную функциональными звеньями (которые обеспечивают, собственно, усиление сигнала), пассивными соединительными цепями (осуществляющими связи между усилительными звеньями) и коммутационными цепями (выполняющими адаптивное изменение коэффициента передачи системы посредством переключения элементов пассивной подсистемы).

Необходимость реализации малого коэффициента шума, значение которого обычно не должно превышать 2...3 дБ, создает определенные сложности использования глубоких диссипативных обратных связей для получения высокой линейности АШМУР. Анализ технических характеристик малошумящих высоколинейных усилителей радиочастоты показывает, что наиболее перспективной является структура с широкополосным усилительным звеном (K), охваченным реактивной (т. е. без потерь, «бесшумной») отрицательной обратной связью (ООС) (рис.1).

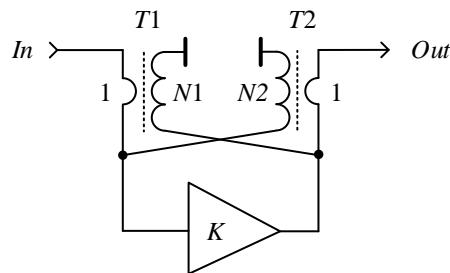


Рис. 1. Схема усилителя радиочастоты с ООС без потерь
Fig. 1. RF amplifier circuit with lossless feedback

Такая схема позволяет за счет изменения передаточных отношений обмоток ($N1$ и $N2$) трансформаторов ($T1$ и $T2$) регулировать коэффициент передачи устройства:

$$G = 20 \lg \left[K / \left(1 + K \left[\frac{2N1 \cdot N2}{4N1^2 \cdot N2^2 + 1 + (N1 - N2)^2} (N1 + N2) \right] \right) \right], \quad (1)$$

обеспечивая G от 4 до 16 дБ.

Использование реактивной цепи ООС исключает появление дополнительных шумов и дает возможность осуществить оптимальное двустороннее согласование структуры с трактом [9]:

$$КСВН = \left[1 + \left| \frac{-N1^2 + N2^2 - 2N1 \cdot N2 + 1}{4N1^2 \cdot N2^2 + 1 + (N1 - N2)^2} \right| \right] / \left[1 - \left| \frac{-N1^2 + N2^2 - 2N1 \cdot N2 + 1}{4N1^2 \cdot N2^2 + 1 + (N1 - N2)^2} \right| \right]. \quad (2)$$

Эффективность линейаризации передаточной характеристики системы выше на 5...10 дБ, чем в устройствах с диссипативными ООС [1], и при оценке по входу АШМУР посредством точки пересечения J -го порядка ($ИПJ$) определяется зависимостью

$$ИПJ_G = ИПJ_K + \frac{J}{(J-1)} \cdot 20 \lg \left[1 + \frac{K \cdot 2 \cdot N1 \cdot N2}{4 \cdot N1^2 \cdot N2^2 + 1 + (N1 - N2)^2} (N1 + N2) \right]. \quad (3)$$

Очевидно, непреложным условием обеспечения высоких качественных показателей при синтезе АШМУР является оптимальный выбор интегрального малошумящего усилителя, выполняемый с учетом коэффициента усиления K , коэффициента шума NF , выходной точки компрессии P_{-1out} и входной точки пересечения третьего порядка $ИПЗ$, характеризующей линейность прибора. Параметры коммерчески доступных малошумящих активных компонентов радиочастотного диапазона приведены в табл. 1.

Таблица 1. Коммерчески доступные радиочастотные интегральные малошумящие усилители
Table 1. Commercially available RF integrated low-noise amplifiers

Модель Model	Фирма-производитель Manufacturer	Частотный диапазон, ГГц Band, GHz	K , дБ	NF , дБ	$P_{-1\ out}$, дБм	$ИПЗ$, дБм
РНА-1+	Mini-Circuits	0,05...6,0	15,7	1,9	22,6	25,4
RFCA8818	Qorvo	0,04...1,0	18	2,3	25	19
HMC8410	Analog Devices	0,01...10	19,5	1,1	21	13,5
TQP3M 9036	Qorvo	0,1...2,0	19,8	0,45	20	16,2
RF3827	Qorvo	0,005...1,5	20	1,1	25,1	18,1
MAAL-010570	Macom	0,1...3,5	22	0,8	22	9,8
MAAL-010704	Macom	0,1...3,5	22	0,8	22	9,8
SPF5043Z	Qorvo	0,05...4,0	23,5	0,65	22,7	7,0
MGA-62563	Broadcom	0,1...3	23,5	0,9	18	11,2
SPF5122Z	Qorvo	0,1...4,0	27	0,42	22,3	6

Приоритетно (при прочих сопоставимых параметрах) выбирается усилительный прибор с наибольшим K и наивысшим параметром $ИПЗ$. Принимая во внимание данные табл. 1 и учитывая необходимость реализации в АШМУР глубокой ООС с управляемыми характеристиками, в качестве усилительного модуля возможно использование MGA-62563.

На рис. 2 приведена схема синтезированного АШМУР с адаптивно изменяемым коэффициентом передачи за счет дискретного изменения глубины трансформаторной ООС, выполняемой посредством переключения обмоток трансформаторов $T1$ и $T2$ коммутаторами $SW1... SW4$.

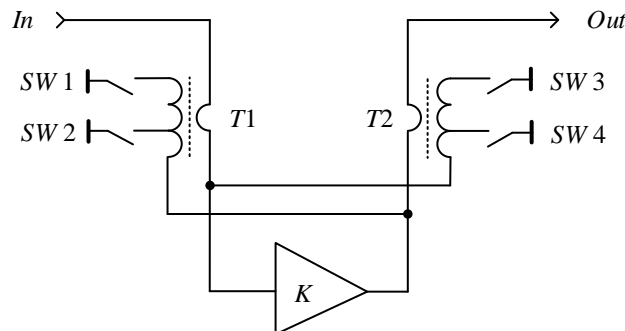


Рис. 2. Схема АШМУР с коммутацией обмоток в цепи трансформаторной ООС
Fig. 2. ABLNRFA circuit with switching windings in the transformer NFB circuit

В спокойной ЭМО ключи $SW1...SW4$ открыты, и входной групповой сигнал масштабируется с коэффициентом передачи $G_{max} \approx K$. При превышении порога перегрузки радиоприемного тракта последовательно включаются бинарные коммутаторы $SW1$; $SW1$ и $SW3$; $SW2$ и $SW4$, устанавливая соответственно режим высокого ($G_B = 14$ дБ), среднего ($G_C = 10$ дБ) и низкого ($G_H = 5$ дБ) коэффициента усиления АШМУР. Таким образом, адаптируя G к текущему состоянию ЭМО, АШМУР обеспечивает пороговую защиту радиоприемного тракта от нелинейного поражения.

Моделирование АШМУР

С целью проверки функциональных и технических характеристик синтезированного АШМУР и оптимизации его параметров разработана модель устройства в среде ADS (рис. 3). Для описания элементов схемы усилительного звена (МИС MGA-62563, $T1$ и $T2$) использованы модели стандартной библиотеки среды моделирования. Модели бинарных коммутаторов $SW1...SW2$ выполненные на дискретных элементах, повторяют структуру прототипов вида HMC194AMS8, HMC221B, HMC574AMS8.

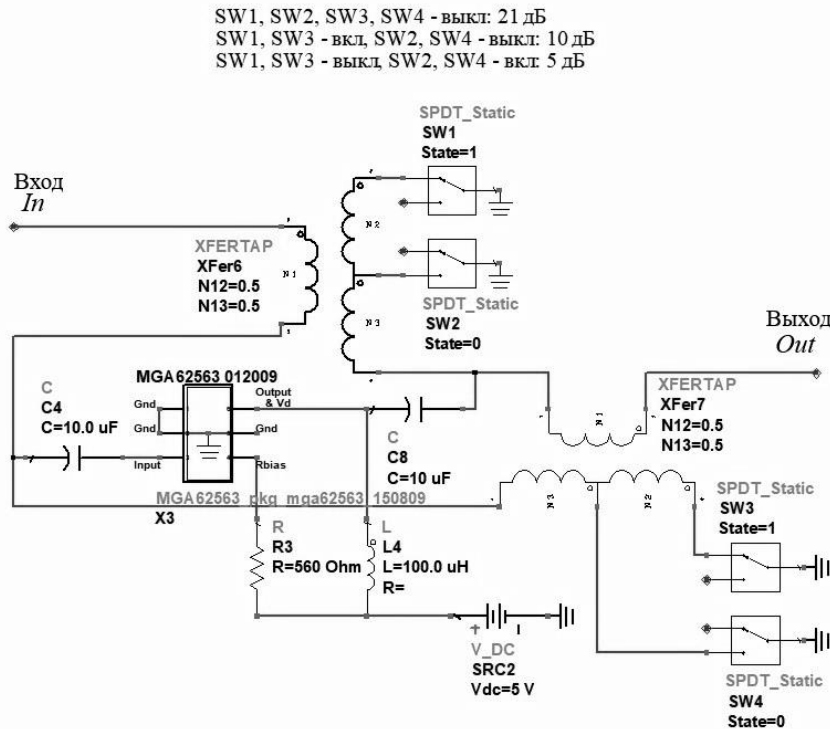


Рис. 3. Модель АШМУР в среде ADS
Fig. 3. ABLNRFA model in ADS environment

На рис. 4, *а, б* представлены соответственно зависимости коэффициента усиления и коэффициента шума АШМУР от частоты для коротковолновой части МВ диапазона.

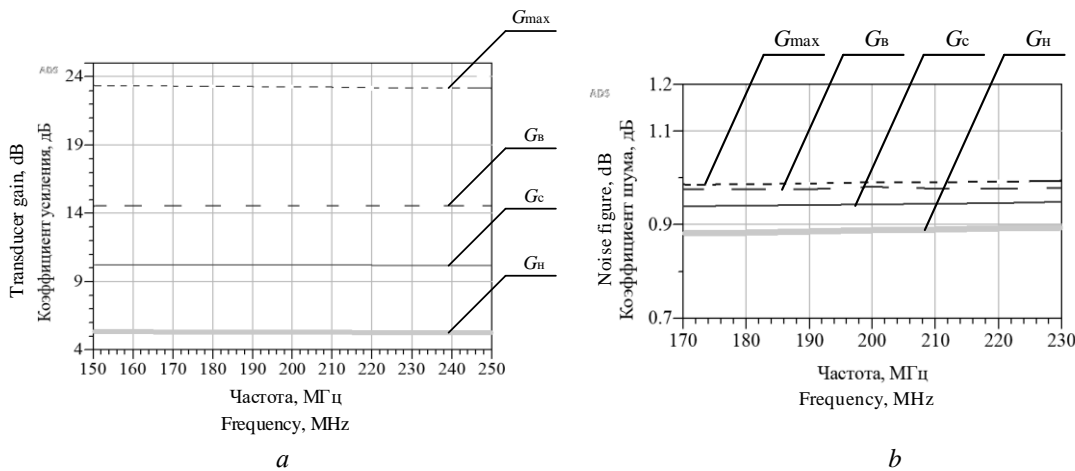


Рис. 4. Зависимости коэффициентов усиления (*а*) и шума (*б*) АШМУР от частоты
Fig. 4. Dependences of the gain (*a*) and noise figure (*b*) of ABLNRFA on frequency

На рис. 5, *а, б, с, d* представлены контуры IMD3 (жирные линии) и коэффициента передачи АШМУР (тонкие линии) в режиме максимального ($G_{\max} = 23$ дБ), высокого ($G_{\text{В}} = 14$ дБ), среднего ($G_{\text{С}} = 10$ дБ) и низкого ($G_{\text{Н}} = 5$ дБ) усиления при воздействии двухтонального тестового сигнала с мощностью каждой компоненты соответственно $-23, -14, -10$ и -5 дБм.

На рис. 6, *а, б, с, d* соответственно для режимов максимального, высокого, среднего и низкого усиления АШМУР представлены зависимости от частоты КСВН входа (тонкая линия) и КСВН выхода (жирная линия) в коротковолновой части МВ диапазона.

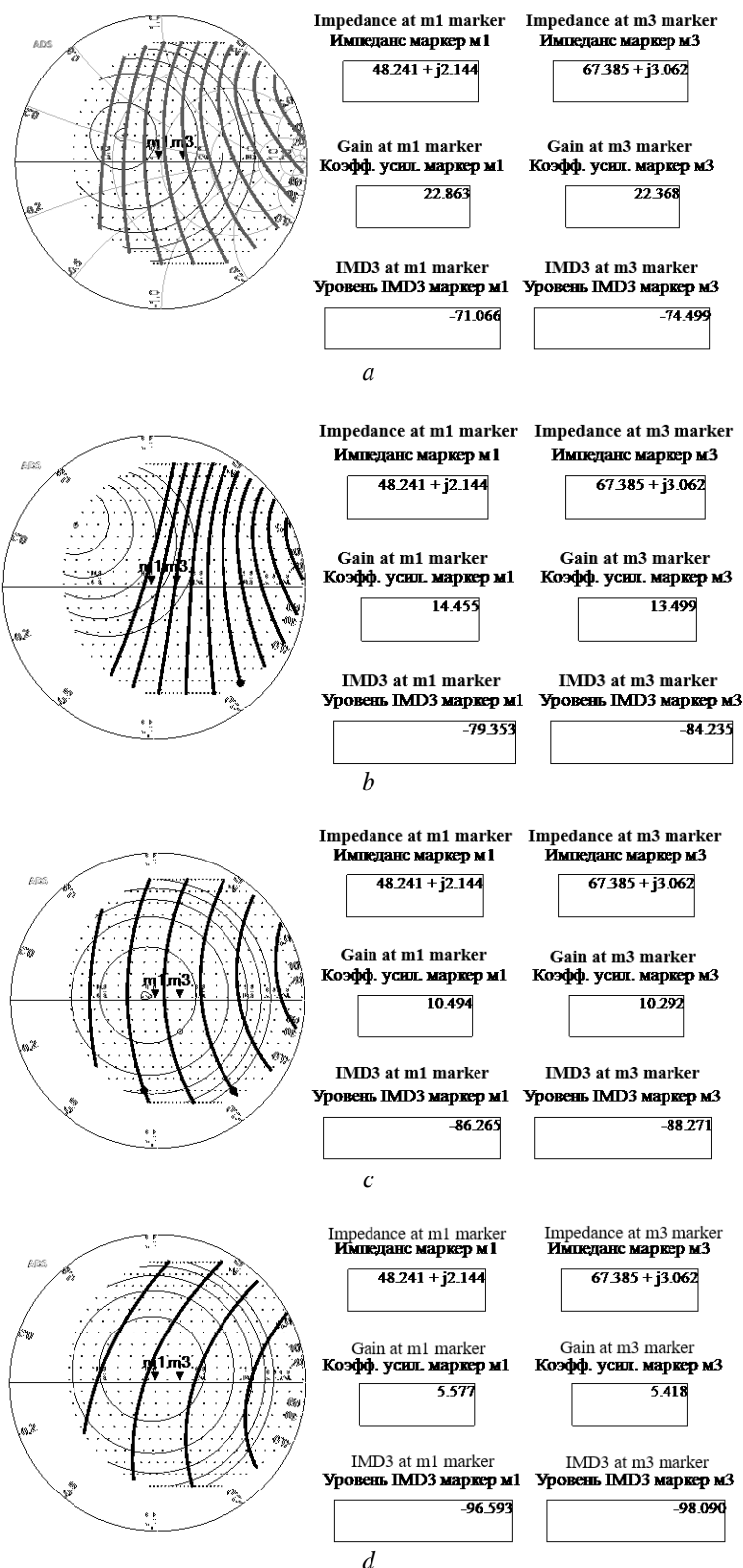


Рис. 5. Контуры $IMD3$ (жирные линии) и коэффициента передачи АШМУР (тонкие линии) в режиме максимального (а), высокого (b), среднего (c) и низкого (d) усиления при воздействии двухтонального тестового сигнала

Fig. 5. Contours of $IMD3$ (bold lines) and ABLNRFA (thin lines) transmission coefficient in the mode of maximum (a), high (b), medium (c) and low (d) gains when exposed to a two-tone test signal

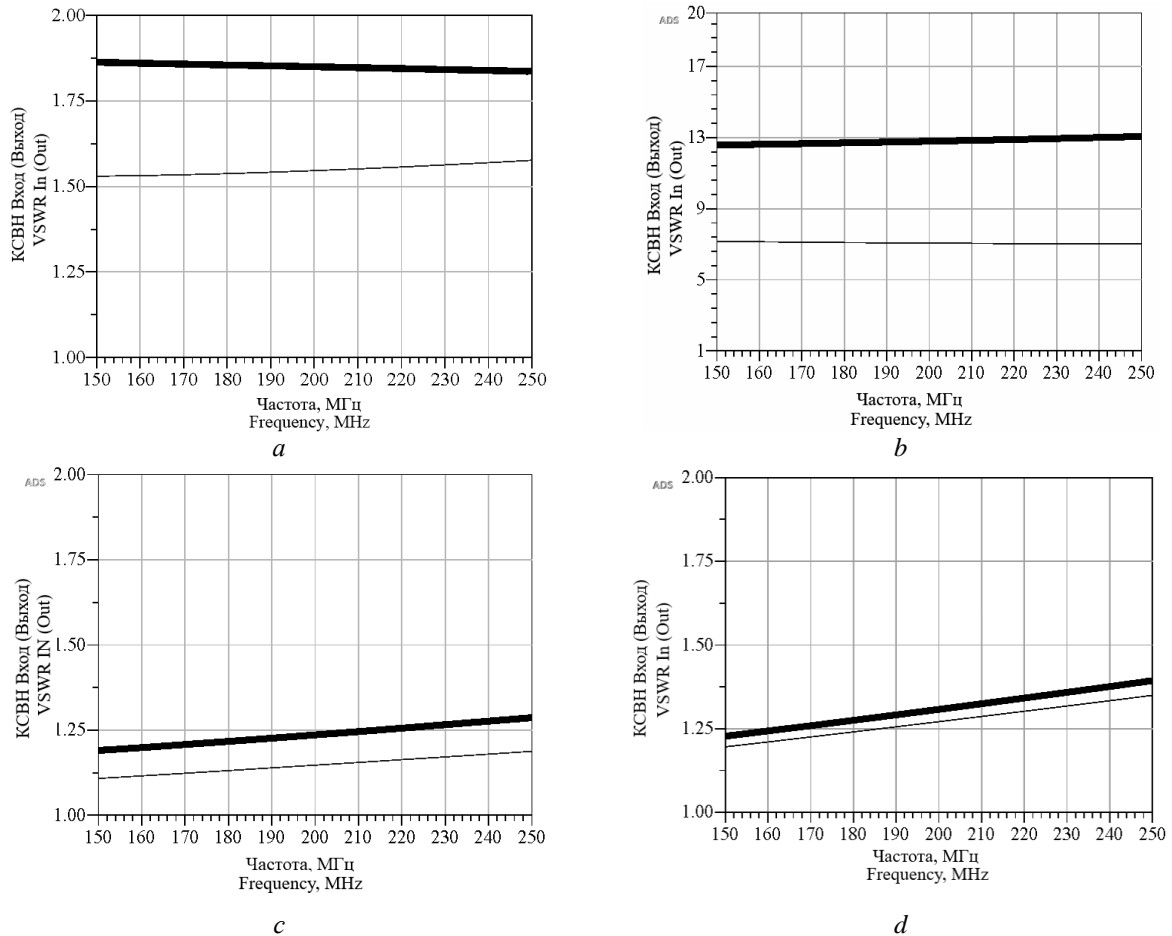


Рис. 6. Зависимости от частоты КСВН входа (тонкая линия) и выхода (жирная линия) АШМУР в режиме максимального (а), высокого (b), среднего (с) и низкого (d) усиления
Fig. 6. VSWR frequency dependences of the input (thin line) and output (bold line) of ABLNRFA in the maximum (a), high (b), medium (c) and low (d) gain modes

Результаты и их обсуждение

Предложенное техническое решение АШМУР обеспечивает дискретное (23, 14, 10 и 5 дБ) широкополосное изменение коэффициента передачи, при этом ДД по интермодуляции третьего (DD_{IM3}) порядка

$$DD_{IM3} = (2/3) \cdot (IIP_3 - 10 \log BW - NF) \quad (4)$$

в пересчете к полосе пропускания радиоприемного тракта $BW = 1,0$ МГц составляет соответственно 83, 92, 98 и 104 дБ.

Ступенчатое изменение коэффициента передачи в цепи трансформаторной ООС разработанного АШМУР позволяет избежать накопления дополнительных шумов в структуре и обеспечивает низкий коэффициент шума, который не превышает 1 дБ и сопоставим с NF используемого усилительного модуля.

При согласованной коммутации в трансформаторных цепях последовательной ООС по напряжению ($T1$) и параллельной ООС по току ($T2$) выполняются условия согласования в присоединительных сечениях АШМУР.

Технические характеристики АШМУР позволяют адаптивно наращивать перегрузочную способность радиоприемного тракта с пропорциональным расширением его ДД в условиях нестационарной ЭМО и таким образом обеспечить повышение эффективности системы уровневой защиты от нелинейного поражения приемных трактов средств радиосвязи, радиолокации и радионавигации.

Заключение

Таким образом, посредством логико-эвристического синтеза разработан адаптивный широкополосный высоколинейный малошумящий усилитель радиочастоты с цифровым переключением цепей трансформаторной обратной связи.

Проведенные исследования технического решения разработанного адаптивного широкополосного малошумящего усилителя радиочастоты в ОВЧ диапазоне показали, что обеспечивается дискретное широкополосное изменение коэффициента передачи с ступенчатым увеличением динамического диапазона устройства при сохранении коэффициента шума на уровне, сопоставимым с шумами активного элемента.

Разработанный адаптивный широкополосный малошумящий усилитель радиочастоты представляет перспективное устройство для использования в составе систем защиты радиоприемных трактов от нелинейного поражения в условиях нестационарной электромагнитной обстановки.

Список литературы

1. Малевич И.Ю. *Методы синтеза широкополосных усилительных трактов с контролируруемыми параметрами динамического диапазона*. Минск: Тонпик; 2004.
2. Perez J.P.A. *Automatic Gain Control. Techniques and Architectures for RF Receivers*. New York: Springer; 2011.
3. Zumbahlen H. *Linear Circuit Design Handbook*. Elsevier-Newnes; 2008.
4. Малевич И.Ю. Система уровневой защиты с переключаемыми усилительными секциями. *Известия Белорусской инженерной академии*. 1997;1(3):125-129.
5. Wu Chun-Pang, Tsao Hen-Wai. A 110-MHz 84-dB CMOS Programmable Gain Amplifier With Integrated RSSI Function. *IEEE Journal. Solid-State Circuits*. 2005;40(6):1249-1258.
6. Малевич И.Ю. *Синтез высоколинейных радиочастотных усилительных трактов*. Минск: Бестпринт; 2009.
7. Малевич И.Ю., Солонович Д.А. Широкополосный усилитель высокой частоты с коммутируемым коэффициентом передачи. *Наука и военная безопасность*. 2017;2(52):25-28.
8. Малевич И.Ю., Заяц П.В. Синтез широкополосного малошумящего усилителя с управляемым ступенчатым коэффициентом передачи. *Вестник Военной академии Республики Беларусь*. 2018;4(61):133-139.
9. Kajfez D. Scattering matrix of a directional coupler with ideal transformers. *IEE Proc Microwaves & Antennas*. 1999;146(8):295.

References

1. Malevich I. Y. [Methods for the synthesis of broadband amplifying paths with controlled parameters of the dynamic range]. Minsk: Tonpik; 2004. (In Russ.)
2. Perez J. P. A. *Automatic Gain Control. Techniques and Architectures for RF Receivers*. New York: Springer; 2011.
3. Zumbahlen H. *Linear Circuit Design Handbook*. Elsevier-Newnes; 2008.
4. Malevich I.Y. [Level protection system with switchable amplifying sections]. *Izvestiya Belorusskoy inzhenernoy akademii*. 1997;1(3):125-129. (In Russ.)
5. Wu Chun-Pang, Tsao Hen-Wai. A 110-MHz 84-dB CMOS Programmable Gain Amplifier With Integrated RSSI Function. *IEEE Journal. Solid-State Circuits*. 2005;40(6):1249-1258.
6. Malevich I.Y. [Synthesis of High-Linear RF Amplifier Paths]. Minsk: Bestprint; 2009. (In Russ.)
7. Malevich I.Y., Solonovich D.A. [High frequency broadband amplifier with switched gain]. *Nauka i voyennaya bezopasnost*. 2017;2(52):25-28. (In Russ.)
8. Malevich I. Y., Zayats P.V. [Synthesis of a wideband low noise amplifier with a controlled step gain]. *Vestnik Voennoy Akademii Respubliki Belarus*. 2018;4(61):133-139. (In Russ.)
9. Kajfez D. Scattering matrix of a directional coupler with ideal transformers. *IEE Proc Microwaves & Antennas*. 1999;146(8):295.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors equally contributed to the writing of the article.

Сведения об авторах

Малевич И.Ю., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник службы фундаментальных и прикладных исследований ОАО «КБ Радар» — управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Заяц П.В., начальник отдела ОАО «КБ Радар» — управляющая компания холдинга «Системы радиолокации».

Адрес для корреспонденции

220026, Республика Беларусь,
г. Минск, Партизанский пр-т, 64 а,
ОАО «КБ Радар» — управляющая компания
холдинга «Системы радиолокации»
тел. +375 (17) 295-30-91;
e-mail: p.zayats@kbradar.by
Заяц Павел Владимирович

Information about the authors

Malevich I.Y., Doctor of Science, Professor, Principal Research Scientist of the Fundamental and Applied Research Division of JSC “KB Radar” — Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Zayats P.V. Head of Department of JSC “KB Radar” — Managing Company of “Radar Systems” Holding.

Address for correspondence

220026, Republic of Belarus,
Minsk, Partizanski ave., 64 a,
JSC “KB Radar” — Managing Company
of “Radar Systems” Holding
tel. +375 (17) 295-30-91;
e-mail: p.zayats@kbradar.by
Zayats Pavel Vladimirovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-75-80>

Original paper

UDC 621.317.335.3

SIMULATION OF ELECTROMAGNETIC FIELD DISTRIBUTION IN THE MEASURING CELL FOR DETERMINING THE DIELECTRIC PERMITTIVITY OF MATERIALS AT MICROWAVE FREQUENCIES

NATALIA A. PEVNEVA, ALEKSEI A. KOPSHAI, ALEXANDER L. GURSKII

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

Submitted 6 July 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. To determine the dielectric permittivity of materials in a wide frequency range with the automation of measurements and the necessary accuracy, measuring cells have been created to ensure the simplicity of the design of the waveguide path. In order to obtain information about the suitability of measuring cells based on irregular SHF waveguides for estimation of dielectric parameters of materials, we simulated the structure of electromagnetic field in the system consisting of two irregular waveguides and waveguide chamber placed between them using a three-dimensional electrodynamic simulation in Ansoft HFSS package environment. The distribution of the electric field was simulated when an empty polyethylene tube, a rod of fluoroplastic and a rod of textolite are placed in the measuring cell. It was demonstrated that high order modes fade out in irregular waveguide and do not affect the precision of obtained results, and significant edge effects were not detected. It allows one to utilize measuring cells based on irregular waveguides together with a scalar or vector network analyzer and using the partial filling of the waveguide method or the modified Nicholson – Ross – Weir method for measurements of dielectric permittivity ϵ of materials. The results of modeling the dependence of the amplitude and phase of the reflection coefficient of the textolite and fluoroplastic on the frequency in Ansoft HFSS environment are given. The simulation results are compared with the results obtained experimentally. The frequency dependencies of ϵ were obtained experimentally for test materials – textolite and fluoroplastic – in the frequency range of 25,95–37,50 GHz. The experimental data are in satisfactory agreement with the results of theoretical calculations and do not go beyond the boundaries specified by the measurement uncertainty.

Keywords: electromagnetic field distribution, measuring cell, dielectric permittivity, reflection coefficient.

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

For citation. Pevneva N.A., Kopshai A.A., Gurskii A.L. Simulation of electromagnetic field distribution in the measuring cell for determining the dielectric permittivity of materials at microwave frequencies. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 75-80.

Foreword

Today one can observe the growth in need for precise and reliable contactless methods and instruments to measure dielectric permittivity ϵ of materials in a wide range of microwave frequencies. Quite a lot of such methods are known [1], but the means of their implementation are insufficiently developed. As a result of the analysis of existing methods and instruments for measuring the dielectric permittivity ϵ of materials, two methods were chosen for constructing measuring instruments: the method of partial filling of the waveguide [2] and the modified Nicholson – Ross – Weir method [3]. They can be used as the basis for measuring the properties ϵ of materials under study

in various aggregate states, provide broadband frequency measurements and automate them, with the necessary measurement accuracy (~5 %); simplicity of the composite waveguide path design and practical implementation of the measurement technique [4–6].

To create advanced measurement tools based on the methods mentioned above, it is necessary to optimize the geometry of the measurement cells (MC) intended for placement in the waveguide system of the sample under study. This requires accurate information about the spatial structure of the electromagnetic field in a cell, given his distortions caused by the configuration of the waveguide and the introduction of the test sample in the form of a rod in the case of solid materials or dielectric tube which is subsequently filled with sample, if liquid or powdered substances. In particular, to improve the accuracy and reliability of measurements using irregular waveguides, it is necessary to minimize the influence of edge effects and higher-order modes. The purpose of this work is to obtain information about the spatial distribution of the electromagnetic field in the measuring cell for determining the permittivity of materials on the microwave, which would minimize the influence of the above effects.

Routine of calculations and experiment

In order to obtain information about the structure of the electromagnetic field inside the MC, a system consisting of two irregular waveguides and one waveguide chamber placed between them was simulated using the Ansoft HFSS (High Frequency Structural Simulator) three-dimensional electrodynamic modeling environment [7].

Taking into account the results of numerical modeling, the MC was manufactured as part of a waveguide system used for further connection to a vector circuit analyzer to measure the permittivity of materials. Experimental measurements were carried out on test samples, which were taken as textolite and fluoroplast, since their parameters are well known. For measurements, the method of partial filling of the waveguide was implemented, for which an installation was assembled based on the vector network analyzer “Meter of complex reflection and transmission coefficients R4-MVM-37”, a waveguide path in the 25.95–37.50 GHz band and an MC optimized based on the results given below. The installation scheme is described in detail in [5], and the measurement method and accuracy assessment were similar to those given in [5] and [8], respectively.

To obtain the most reliable results, the sample's contribution to the field change must be significant while minimizing interfering factors. To make sure that the assumption is correct that the introduction of the test sample into the MC will cause a significant change in the pattern of electric field propagation, the introduction of a fluoroplast rod and a textolite rod into the MC was modeled.

Results and discussion

In the HFSS-modeled system, we obtained and analyzed the electric field distribution (Fig. 1).

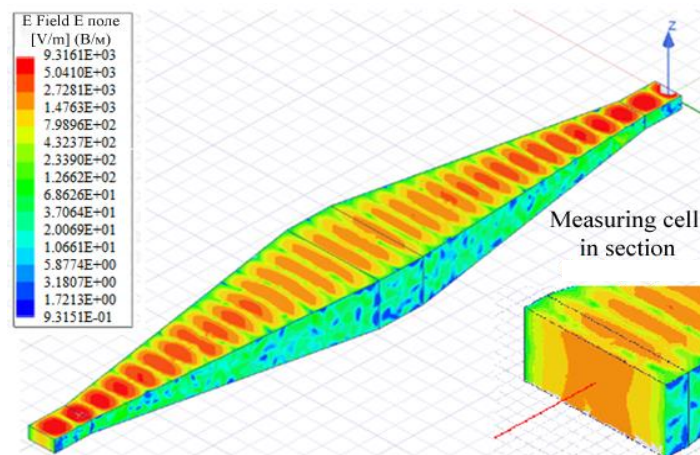


Fig. 1. Scheme of the distribution of the electric field in the simulated measuring cell

To obtain reliable results, it is necessary, in particular, to ensure a sufficient degree of uniformity of the field in the section perpendicular to the waveguide axis at the sample location.

As can be seen in the box in Fig. 1, this condition is met in a sufficiently large area in the central part of the extended section of the waveguide. If the cross-section dimensions ensure the forming of the necessary field structure, then by gradually increasing the waveguide cross-section, this structure can be preserved, and the dimensions of the measuring cell can be increased. At the point of transition from the waveguide to the horn, higher-order modes appear, but with a sufficiently smooth expansion of the waveguide (a small flare angle of the horn), the intensity of these waves is small (Fig. 2). Fig. 2 represents the upper line (non-zero) for the H_{10} wave intensity, and the remaining four lines for the H_{20} , H_{30} , H_{40} , and H_{50} waves are near zero, as shown by the simulation results.

Directional properties in an irregular waveguide made in the form of a horn can be estimated approximately using the Kirchhoff-Huygens method [9]. Because the horn basically retains the same field character as the waveguide, they assume that in an aperture there are two field components E_Y and H_X , the amplitude of which does not depend on Y -coordinates, and changes along the X -coordinate according to the cosine law. However, unlike the surface of the open end of the waveguide, the aperture of the horn cannot be excited in phase, since a cylindrical (in sectorial horns) or close to spherical (in pyramidal horns) wave propagates in the horn.

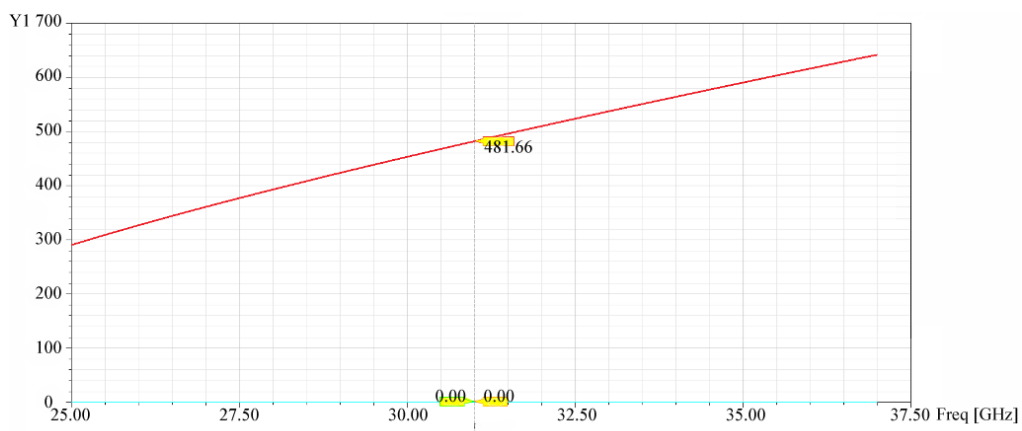


Fig. 2. Frequency dependence of the wave intensities H_{10} , H_{20} , H_{30} , H_{40} , H_{50}

Three cases were modeled for materials with known parameters in order to consider the behavior of the electric field in the MC when a dielectric rod is inserted into it in the HFSS environment. Fig. 3 shows the distribution of the electric field when an empty polyethylene tube is placed in the MC, Fig. 4 demonstrates a rod made of fluoroplast, and Fig. 5 – a rod made of textolite. Fig. 3–5 depict the propagation of the H_{10} wave on the left and the H_{20} wave on the right. Computer simulation determined that higher-order modes are damped in an irregular waveguide and do not affect the accuracy of the results obtained, as well as no significant edge effects were found.

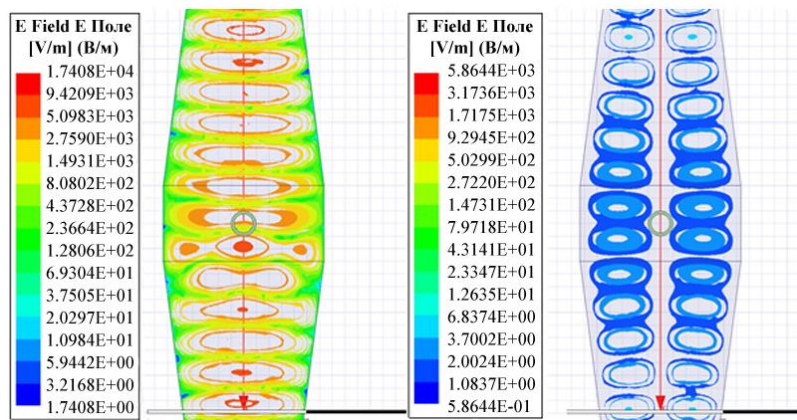


Fig. 3. The distribution of the electric field when an empty polyethylene tube is placed in the measuring cell (on the left wave propagation H_{10} , on the right – H_{20})

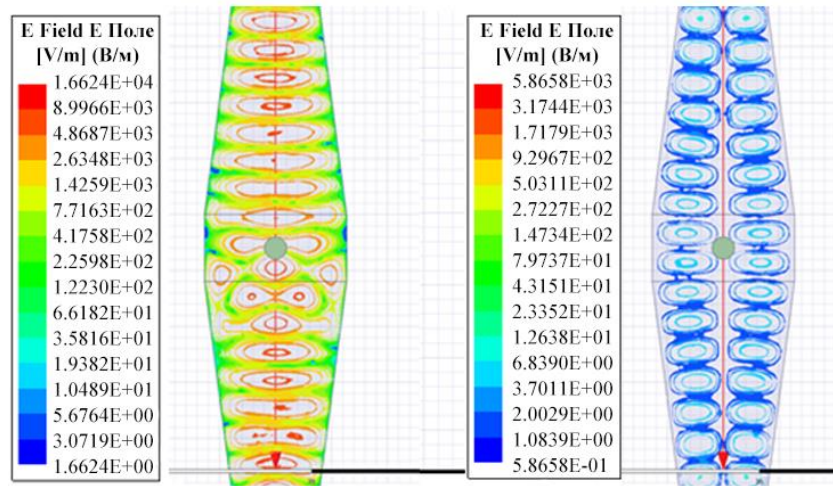


Fig. 4. The distribution of the electric field when the rod of fluoroplastic is placed in the measuring cell (on the left wave propagation H_{10} , on the right – H_{20})

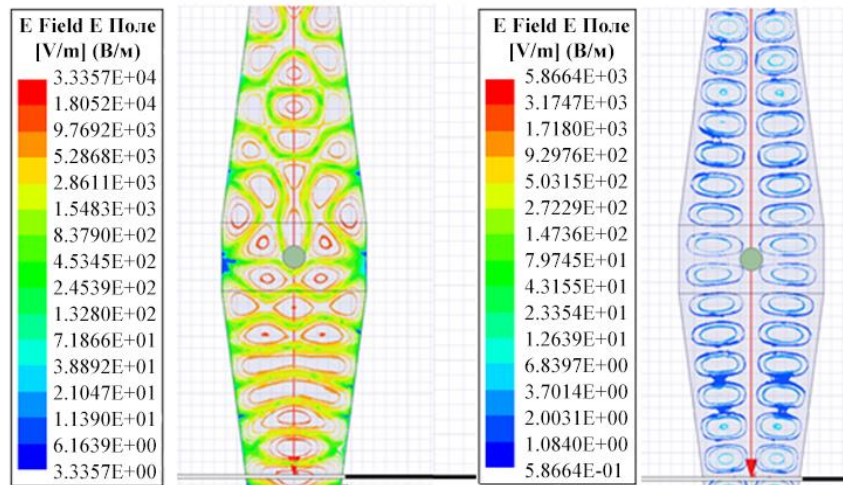


Fig. 5. The distribution of the electric field when the rod of textolite is placed in the measuring cell (on the left wave propagation H_{10} , on the right – H_{20})

Since the method for measuring the permittivity is based on finding the S-parameters, HFSS modeled the propagation of the reflected wave in the measuring cell and obtained a graph of the dependence of S_{11} on the frequency in the frequency range 25.95–37.50 GHz (Fig. 6). Sharp dips in the dependence that occur at a number of frequencies can be eliminated by calibrating the measurement path during measurements.

Based on the results obtained, we optimized the geometric dimensions and shape of a MC made for measuring the dielectric parameters of materials in the frequency range 25.95–37.50 GHz in conjunction with a scalar or vector circuit analyzer. The MC is assembled from two horn antennas and a waveguide chamber placed between them, in which an insert with a hole for rod-shaped samples is placed.

The optimized measurement cell was used in conjunction with a vector circuit analyzer to study the dependence of the amplitude (S_{11}) and phase (φ_{11}) of the reflection coefficient of a number of materials on the frequency f . As an example, Fig. 7 shows the results for fluoroplast (a, b, d) and textolite (b, d, e) in the frequency range 25.95–37.50 GHz. In particular, the experimental (solid lines) and HFSS-modeled (dotted lines) dependences of the amplitude (a, b) and phase (c, d) of the reflection coefficient on frequency are shown, as well as the obtained dependences of ϵ on frequency (d, e).

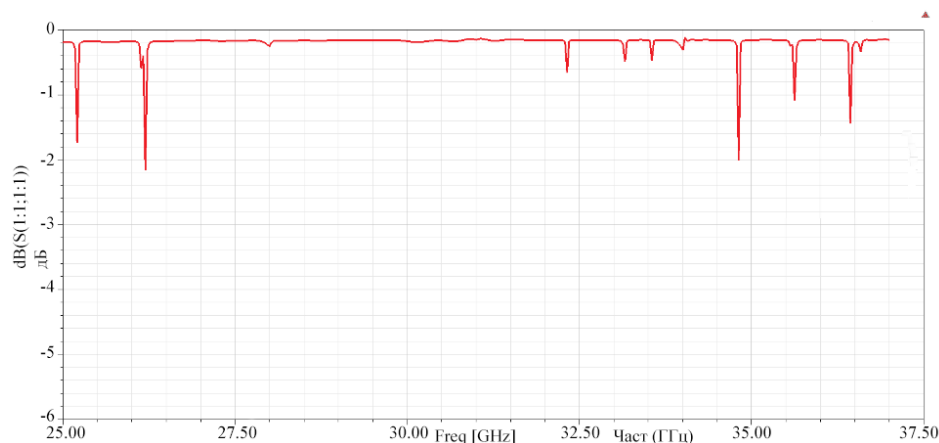


Fig. 6. Dependence of S_{11} on frequency in the frequency range 25.95–37.50 GHz

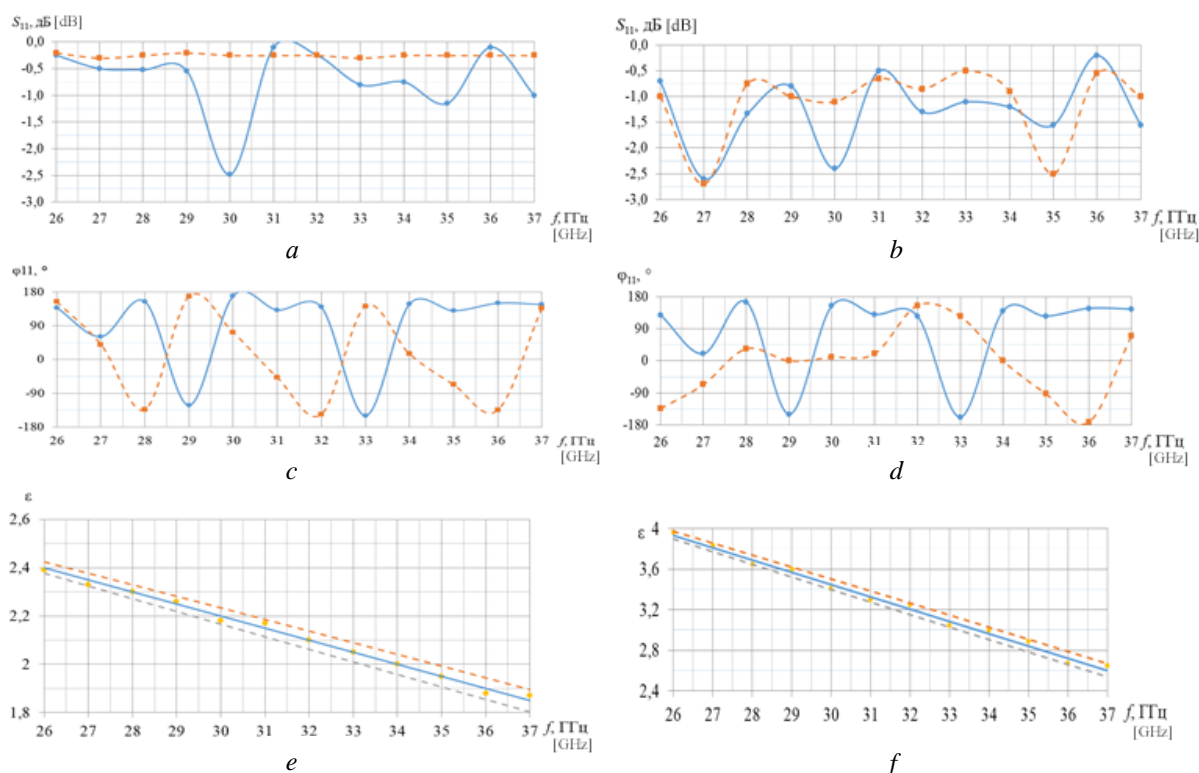


Fig. 7. Experimental (solid lines) and simulated in HFSS (dashed lines) dependences of the amplitude (*a, b*) and phase (*c, d*) of the reflection coefficient on frequency, as well as the obtained dependences of ϵ on frequency (*e, f*) for fluoroplastic (*a, c, e*) and textolite (*b, d, f*) in the frequency range 25.95–37.50 GHz (in Figures (*e*) and (*f*) the dashed lines show the boundaries of the region of uncertainty of the obtained results)

The results of numerical modeling of the amplitude and phase of the reflection coefficient were used as input parameters in the mathematical model for calculating the permittivity and it was found that the permittivity calculated theoretically does not exceed the limits set by the measurement uncertainty.

Conclusion

As a result of numerical modeling and analysis of electric field distribution in the measurement cell of microwave range, consisting of a pair of irregular waveguides with a waveguide chamber in-between, in the absence and presence of the rod-shaped samples of a certain size, we have established that in this system there is a significant impact of the presence of samples on the spatial structure of the field, while the influence of edge effects and higher-order modes is reduced to a negligibly small level in comparison with permissible measurement uncertainty.

Based on the obtained data, measurement cells are developed that are used in the implementation of the method of partial filling of the waveguide and the modified Nicholson – Ross – Weir method, which are the basis for measuring the properties of various materials in liquid and solid states. This ensures broadband frequency measurements, their automation, and the necessary accuracy (~5 %) with a simple design of the composite waveguide path. The experimental data obtained for the test materials are in agreement with the data of theoretical calculations and do not exceed the limits set by the uncertainty of the measurement results.

References

1. Brandt A.A. [*Investigation of dielectrics at microwave frequencies*]. Moscow: FIZMATLIT; 1963. (In Russ.)
2. Radin Yu.P. [On a method for measuring the dielectric constant in the centimeter range]. *Izvestia VUZov. Radiofizika*. 1958;1(5-6):177-179. (In Russ.)
3. Luukkonen O., Maslovski S.I., Tretyakov S.A. A stepwise Nicolson-Ross-Weir-based material parameter extraction method. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2011;10:1295-1298.
4. Pevneva N.A., Gusinsky A. V., Gurskii A. L. [Microwave method for determining the dielectric properties of liquids]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;5(67):46-50. DOI: 10.35596 (In Russ.)
5. Pevneva N. A., Gurskii A. L., Kostrikin A. M. [Using the method of a cylindrical rod and a vector network analyzer to determine the dielectric constant of materials in the microwave range]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;1(119):56-61. DOI: 10.35596 (In Russ.)
6. Pevneva N.A., Gurskii A.L., Kostrikin A.M. [The free space method using a vector network analyzer for determining the permittivity of materials at microwave frequencies]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2019;4(122):32-39. DOI: 10.35596 (In Russ.)
7. Bankov S.E., Kurushin A.A. [*Calculation of antennas and microwave structures using HFSS Ansoft*]. Moscow: ZAO “NPP RODNIK”; 2009. (In Russ.)
8. Pevneva N.A., Gurskii A.L., Kostrikin A.M. [Estimation of the uncertainty of measurements of the dielectric permittivity of materials by the method of a cylindrical rod on a microwave]. *Metrologia i priborostroenie*. 2019;2:30-34. (In Russ.)
9. Frolov O.P. [*Antennas and feeder paths for radio relay communication lines*]. Moscow: Radio i svyaz'; 2001. (In Russ.)

Authors' contribution

Pevneva N.A. – research concept and design, data analysis and interpretation, article preparation for publication, treatment of the obtained experimental results and preparation of the article for publication.

Kopshai A.A. – simulation of the distribution of the electric field and interpretation of the results.

Gurskii A.L. – editing and final approval of the manuscript for publication, its critical review in terms of significant intellectual content.

Information about the author

Pevneva N.A., Researcher of the Center 1.9 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Kopshai A.A., Researcher of the Center 1.9 of R&D Department of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Gurskii A.L., D.Sci., Professor of the Information Protection Department 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. +375-17-293-20-92;
e-mail: saphir-n@mail.ru
Pevneva Natalia Alekseevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-81-87>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 004.056.5; 621.396.21

СИНТЕЗ ИЗМЕРИТЕЛЬНОГО КОМПОЗИТНОГО СИГНАЛА ДЛЯ ОЦЕНКИ ЗАЩИЩЕННОСТИ РЕЧЕВЫХ СИГНАЛОВ ПРИ ДИСКРЕТНО-КВАНТОВАННОМ ПРЕОБРАЗОВАНИИ

ЖЕЛЕЗНЯК В.К.¹, ЛАВРОВ С.В.¹, ФИЛИППОВИЧ А.Г.², БАРАНОВСКИЙ М.М.²

¹Полоцкий государственный университет (г. Новополоцк, Республика Беларусь)

²Оперативно-аналитический центр при Президенте Республики Беларусь
(г. Минск, Республика Беларусь)

Поступила в редакцию 20 августа 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Цель работы – системно проанализировать и обобщить высокоточный измерительный сигнал для оценки защищенности в каналах утечки в шумах высокого уровня дискретно-квантованным представлением речевых сигналов принципами амплитудно-импульсной модуляции. Установлено, что дискретизация по времени и квантование по уровню высокоскоростных высококачественных речевых сигналов для преобразования в цифровую форму являются основными источниками утечки информации. Показано, что для определения степени защищенности информации при высококачественной высокоскоростной передаче в широкополосных каналах передачи информации необходимо использовать сложный измерительный (тестовый) композитный сигнал. Требования к измерительному сигналу определяются особенностями дискретно-квантованного представления речевых сигналов. В качестве измерительного сигнала предложено использовать периодическую импульсную последовательность треугольной формы. Измерительный сигнал треугольной формы имеет преимущество перед гармоническим сигналом в процессе выделения шума квантования, так как позволяет достичь более высокой точности при его обработке. Для оценки защищенности канала, обусловленного амплитудно-импульсной модуляцией, используется гармонический сигнал, сформированный из периодической импульсной последовательности треугольной формы методом преобразования Фурье. Использование предложенного измерительного композитного сигнала позволяет установить его численную зависимость с численным значением сигнала, принятого в качестве нормированного, и сравнить для принятия решения о защищенности речевого сигнала. Представленные в статье материалы являются оригинальными и могут быть использованы при оценке защищенности каналов утечки речевых сигналов, преобразованных в цифровую форму. Кроме того, полученные результаты позволяют проводить дальнейшие исследования защищенности речевых сигналов при их обратном преобразовании из цифровой формы в исходный сигнал.

Ключевые слова: защита информации, канал утечки речевого сигнала, дискретно-квантованный, композитный сигнал.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Железняк В.К., Лавров С.В., Филиппович А.Г., Барановский М.М. Синтез измерительного композитного сигнала для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 81-87.

SYNTHESIS OF A MEASURING COMPOSITE SIGNAL FOR ASSESSING THE SECURITY OF SPEECH SIGNALS DURING DISCRETE-QUANTIZED TRANSFORMATION

VLADIMIR K. ZHELEZNJAK¹, SERGEI V. LAVROV¹, ANDREI G. FILIPOVICH²,
MIKHAIL M. BARANOUSKI²

¹*Polotsk State University (Novopolotsk, Republic of Belarus)*

²*Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus
(Minsk, Republic of Belarus)*

Submitted 20 August 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The purpose of the work is to systematically analyze and generalize a high-precision measuring signal for assessing the security in leakage channels in high-level noise by discrete-quantized representation of speech signals using the principles of amplitude-pulse modulation. It has been established that time sampling and level quantization of high-speed high-quality speech signals for digitalization are the main sources of information leakage. It is shown that to determine the degree of information security for high-quality high-speed transmission in broadband information transmission channels, it is necessary to use a complex measuring (test) composite signal. Requirements for the measuring signal are determined by the features of the discrete-quantized representation of speech signals. It is proposed to use a periodic pulse sequence of a triangular shape as a measuring signal. The triangular measurement signal has an advantage over the harmonic signal in the quantization noise extraction process, since allows you to achieve higher accuracy when processing it. To assess the security of the channel due to pulse-amplitude modulation, a harmonic signal is used, formed from a periodic pulse sequence of a triangular shape by the Fourier transform method. The use of the proposed measuring composite signal makes it possible to establish its numerical dependence with the numerical value of the signal taken as normalized and compare it to make a decision about the security of the speech signal. The materials presented in the article are original and can be used to assess the security of the channels of leakage of speech signals converted into digital form. In addition, the results obtained make it possible to carry out further studies of the security of speech signals during their reverse conversion from digital form to the original signal.

Keywords: information security, speech information leakage channel, discrete-quantized, composite signal.

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

For citation. Zheleznjak V.K., Lavrov S.V., Filipovich A.G., Baranouski M.M. Synthesis of a measuring composite signal for assessing the security of speech signals during discrete-quantized transformation. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 81-87.

Введение

Принципы оценки защищенности информационных систем отличаются назначением, видами сигналов, физическими полями рассеивания, каналами утечки информации (КУИ). Информационные системы (ИС) определяются структурами, их составными элементами, параметрами, взаимосвязями между ними, условиями применения, внешними воздействиями. Это позволяет сформировать обобщенную модель защиты информации (ЗИ), которую реализуют схемно-конструктивными решениями.

Защиту ИС синтезируют с помощью обобщенной модели ЗИ [1] на основании анализа оптимизированных, защищенных от утечки системных элементов и внедрением эмерджентных свойств, что позволяет сформулировать методы, принципы, средства защиты информации и их оценки от утечки информации.

Технической защите от утечки аналоговой речевой информации посвящена работа [2].

Передача дискретно-квантованным представлением высокочастотных речевых сигналов по высокоскоростным широкополосным каналам систем связи обуславливает

необходимость обоснования и практической реализации защищенности их от утечки по техническим каналам.

Цель работы – системно проанализировать и обобщить высокоточный измерительный сигнал для оценки защищенности в каналах утечки в шумах высокого уровня дискретно-квантованным представлением речевых сигналов принципами амплитудно-импульсной модуляции (АИМ), реализующим высокочастотную высокоскоростную передачу по широкополосным каналам систем связи.

В работе [1] разработана обобщенная модель защиты информации, в которой анализируются информационные поля рассеивания, формирующие КУИ информационных систем. Нормативный сигнал защищенности канала утечки речевой информации установлен как гармонический измерительный сигнал по СТБ 34.101.29-2011. Для защиты от утечки информации в [1] перечислены новые решения с использованием:

- сигнала линейно-частотной модуляции с преобразованием Вигнера [3];
- сигнала линейно-частотной модуляции с частотно-временным преобразованием [4];
- меандровой последовательности для оценки защищенности от утечки речевых сигналов, преобразованных в битовую последовательность [5];
- частотно-модулированного сигнала без разрыва фазы для оценки речевых сигналов, преобразованных в цифровую форму [5];
- системы измерительной автоматизированной (СИА), которая осуществляет сбор первичной измерительной информации в КУ речевой информации (акустический, виброакустический, электроакустический, магнитный, электрический, электромагнитного поля, наводок полей рассеивания на цепи управления, питания и заземления), оценивает величину разборчивости речи в КУИ по нормативно-методическим требованиям, обеспечивая полноту оценки защищенности объектов информатизации [2].

В работе [6] предложен гармонический измерительный сигнал для оценки защищенности по высокочастотному КУИ при АИМ-сигнале в широкополосных высокочастотных каналах систем связи из сформированной периодической импульсной последовательности треугольной формы. На основании тонкой структуры АИМ-сигнала выделяют исходный речевой сигнал с помощью оценки отношения «сигнал – шум» гармонического измерительного сигнала при максимальной чувствительности при его обработке.

Требования к измерительным сигналам для оценки защищенности речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании

Дискретно-квантованное представление речевых сигналов осуществляют заменой непрерывной шкалы мгновенных значений непрерывного сигнала дискретной шкалой линейно-ломаной аппроксимации.

Квантующее устройство является основным преобразующим устройством, содержащим линейный и нелинейный элементы [7]. В этой связи квантующее устройство представляет собой совокупность элементов, параметров и связей между ними, исключая избыточные связи, которая обладает эмерджентными свойствами. Идеальным квантирующим устройством является нелинейное устройство с нулевой памятью, передаточная характеристика которой представлена ступенчатой функцией с интервалами квантования входного сигнала Δ , находящимися в однозначных соотношениях с кодирующим входным цифровым сигналом с систематической ошибкой квантования, присущей квантирующему устройству. Она равна $\pm \frac{\Delta}{2}$ при среднем значении, равном нулю. Среднеквадратическое значение $\sigma = \frac{\Delta}{2\sqrt{3}}$, плотность

вероятности систематической ошибки квантования равна $\frac{1}{\Delta}$ [8].

Дискретизация сигнала состоит в замене непрерывного сигнала теми или иными дискретными значениями по времени, по уровню либо по времени и уровню.

Дискретизация по времени соответствует выделению значений сигнала в заранее фиксированные моменты времени T , где T – период периодической последовательности

прямоугольных импульсов [7]. Квантование по уровню соответствует времени сигнала при достижении им заранее достигнутых уровней, отстоящих друг от друга на постоянную величину Δ , где Δ – интервал квантования. Дискретизация сигнала по времени и квантование по уровню соответствуют выделению в заранее фиксированные моменты времени значений непрерывного сигнала, ближайших к фиксированным уровням квантования [7].

Дискретизация по времени заменяет непрерывную функцию решетчатой, которая определяет совокупность выделенных ординат или дискрет [7]. Функция решетчатая – функция, значения которой определены только при дискретных значениях аргумента. Если задана непрерывная функция времени $f(t)$, то ее среднее значение при дискретных значениях аргумента $t = t_n$ преобразуется в решетчатую функцию $f(t_n)$. Разность двух соседних значений аргумента $T_n = t_{n+1} - t_n$ ($t_{n+1} > t_n$) определяет интервал дискретизации (период повторения) по времени, где $n = 1, 2, \dots, m$ [9].

Дискретизация по времени и модуляция осуществляются импульсным модулятором. Входной величиной импульсного модулятора является непрерывная величина входного сигнала, выходной – модулированная последовательность импульсов. При АИМ амплитуды импульсов изменяются по закону модулирующего входного непрерывного сигнала $x(t)$, если на него воздействует периодическая последовательность импульсов [6], на выходе сформирован сигнал решетчатой функции $x(nT)$ при $t = nT$. При подаче на вход гармонического сигнала формируется дискретно-квантованный сигнал [6]. При равномерном квантовании по уровню, из-за нелинейности гармонического сигнала по форме, шум квантования не является равномерным в течение периода гармонического сигнала. Для формирования шума квантования с равномерным периодом повторения линейной амплитудной характеристикой предложено использовать сигнал периодической импульсной последовательности треугольной формы с возможностью оценки мощности сигнала к мощности шума квантования.

Синтез измерительного композитного сигнала

Для формирования измерительного композитного сигнала в качестве исходного сигнала используем периодическую импульсную последовательность прямоугольной формы (рис. 1) с периодом T , равным $1/F_i$, где F_i – средняя частота полосы, равной разборчивости речевого сигнала, $i = \overline{1, n}$, $n = 20$ [10], длительность импульса $\tau = \frac{T}{2}$, $F_i = 250; 500; 650; 800; 950; 1125; 1300; 1500; 1700; 1875; 2050; 2250; 2425; 2725; 3100; 3500; 3850; 4550; 6150; 8600$ Гц.

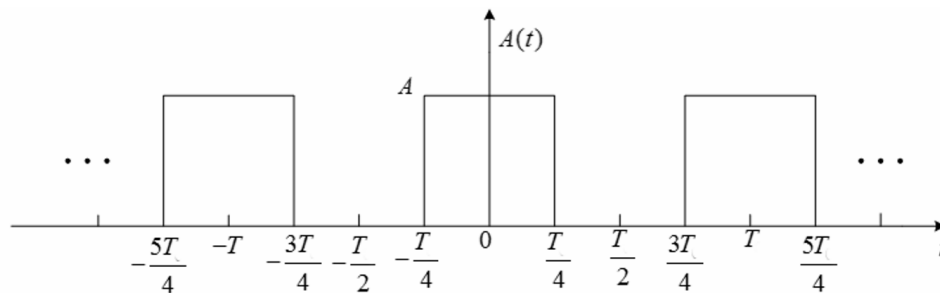


Рис. 1. Последовательность прямоугольных импульсов
Fig. 1. The sequence of rectangular pulses

Разложение периодической последовательности прямоугольных импульсов в ряд Фурье имеет следующий вид [11]:

$$f(t) = \frac{4A}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{\sin k\omega t}{k}, \quad (1)$$

где A – амплитуда сигнала; k – номер гармоники ($k=1,3,5,\dots$); $\omega = \frac{2\pi}{T_{\Pi}}$ – угловая частота сигнала; T_{Π} – период сигнала.

Преобразуем автокорреляционной функцией (АКФ) периодическую импульсную последовательность прямоугольной формы в периодическую импульсную последовательность треугольной формы. В результате преобразования получим необходимый измерительный композитный (от английского composite – составной) сигнал, представленный в виде периодической импульсной последовательности треугольной формы с мощностью $A^2\tau$ и длительностью импульса 2τ [12], где A – амплитуда импульса импульсной последовательности прямоугольной формы и $\tau = 1000; 769; 625; 526; 444; 385; 333; 294; 267; 243; 222; 206; 183; 161; 143; 130; 110; 81; 58$ мкс (рис. 2).

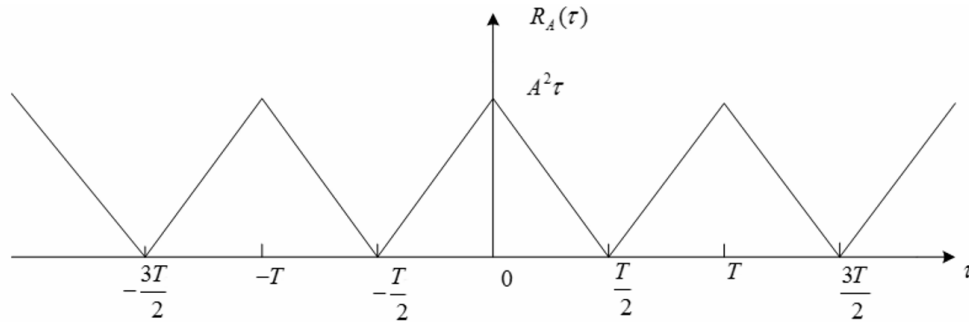


Рис. 2. Автокорреляционная функция
Fig. 2. Autocorrelation function

Разложение периодической импульсной последовательности треугольной формы в ряд Фурье имеет следующий вид [11]:

$$f(t) = \frac{8A}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} (-1)^{\frac{k-1}{2}} \frac{\sin k\omega t}{k^2}. \quad (2)$$

Из формул (1) и (2) видно, что в отличие от периодической последовательности прямоугольных импульсов для периодической импульсной последовательности треугольной формы четные гармоники отсутствуют, а амплитуды нечетных гармоник убывают пропорционально второй степени номеров гармоник, что позволяет производить оценку защищенности по первой (основной) гармонике. Для этого полученный сигнал периодической импульсной последовательности треугольной формы без его искажения вводят в канал передачи речевого сигнала. На выходе канала передачи получают преобразованный сигнал в виде выборки и ошибки квантования, которые обрабатывают в каждой из полос равной разборчивости. Из периодической импульсной последовательности треугольной формы выделяют спектральные составляющие методом преобразования Фурье с получением основной гармоники гармонического сигнала. Оценка защищенности речевого сигнала выполняют сравнением полученного отношения сигнал/шум с нормированным [6].

Заключение

Таким образом, для оценки защищенности канала утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании предложено использование измерительного композитного сигнала. Предложен способ синтеза измерительного композитного сигнала, представленного в виде периодической импульсной последовательности треугольной формы, формируемой из периодической последовательности прямоугольных импульсов путем последовательного автокорреляционного преобразования. Использование предложенного измерительного композитного сигнала позволяет установить его численную зависимость с численным значением сигнала, принятого в качестве нормированного, и сравнить для принятия решения о защищенности речевого сигнала в КУИ. Полученные результаты позволяют проводить дальнейшие исследования защищенности речевых сигналов при их обратном преобразовании из цифровой формы в исходный сигнал.

Список литературы

1. Железняк В.К., Рябенко Д.С., Лавров С.В. Системный подход: защита информации, помехозащищенность, помехоустойчивость. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2016;4:2-7.
2. Железняк В.К. *Защита информации от утечки по техническим каналам*. Санкт-Петербург: ГУАП; 2006.
3. Железняк В.К., Раханов К.Я. Цифровая обработка сигналов с линейно-частотной модуляцией частотно-временным преобразованием Вигнера для оценки разборчивости речи. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2019;4:16-26.
4. Бураченко И.Б., Железняк В.К. Частотно-временные характеристики широкополосных ЛЧМ-сигналов в полосах равной разборчивости. *Вестник Полоцкого государственного университета*. 2015;12:7-11.
5. Железняк В.К., Рябенко Д.С., Бураченко И.Б. Оценка нормативных показателей защищенности речевого сигнала в аналоговой и цифровой форме. *Современные средства связи: материалы XX международной научно-практической конференции*. 2015;142-144.
6. Железняк В.К., Лавров С.В., Барановский М.М., Филиппович А.Г. Математическая модель каналов утечки речевых сигналов при дискретно-квантованном преобразовании. *Доклады БГУИР*. 2020;18(4):89-95.
7. Цыпкин Я.З. *Основы теории автоматических систем*. Москва: Наука; 1977.
8. Бартон Д.К., Вард Г.Р. *Справочник по радиолокационным измерениям*. Москва: Советское радио; 1976.
9. Колесник В.Д., Полтырев Г.Ш. *Курс теории информации*. Москва: Наука; 1992.
10. Железняк В.К., Бураченко И.Б., Рябенко Д.В. Критерии оценки защищенности от утечки речевых сигналов. *Известия Национальной академии наук Беларуси*. 2017;1:122-128.
11. Скляр Б. *Цифровая связь. Теоретические основы и практическое приложение*. Москва: Вильямс; 2007.
12. Стейн С., Джонс Дж. *Принципы современной теории связи и их применение к передаче дискретных сообщений*. Москва: Связь; 1971.

References

1. Zheleznyak V.K., Ryabenko D.S., Lavrov S.V. [System approach: information protection, noise immunity, noise stability]. *Herald of Polotsk State University*. 2016;4:2-7. (In Russ.)
2. Zheleznyak V.K. [*Information leakage protection through technical channels*]. St. Petersburg: SUAI, 2006. (In Russ.)
3. Zheleznyak V.K., Rahanov K.Ya. [Digital treatment of a signal with linear-frequency modulation of frequency-temporary transformation of wigner to estimate the curability of speech]. *Herald of Polotsk State University*. 2019;4:16-26. (In Russ.)
4. Zheleznyak V.K., Burachonak I.B. [Time-frequency features of broadband chirp signals in the bands of equal intelligibility]. *Herald of Polotsk State University*. 2015;12:7-11. (In Russ.)
5. Ryabenko D.S., Zheleznyak V.K., Burachonak I.B. [Assessment of standard indicators of the security of a speech signal in analog and digital form]. *Modern means of communication: materials of the XX international scientific and practical conference*. 2015;142-144. (In Russ.)
6. Zheleznyak V.K., Lavrov S.V., Baranouski M.M., Filipovich A.G. [Mathematical model of speech signal leakage channels during discrete-quantified conversion]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;18(4):89-95. (In Russ.)
7. Tsypkin Ya.Z. [*Foundations of the theory of automatic systems*]. Moscow: Science; 1977. (In Russ.)
8. Barton D.C., Ward G.R. [*Handbook of radar measurements*]. Moscow: Soviet radio; 1976. (In Russ.)
9. Kolesnik V.D., Poltyrev G.Sh. [*Information theory course*]. Moscow: Science; 1992. (In Russ.)
10. Zheleznyak V.K., Burachonak I.B., Ryabenko D.S. [Assessment criteria of voice signal leakage protection]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2017;1:122-128. (In Russ.)
11. Sklyar B. [*Digital communication. Theoretical foundations and practical application*]. Moscow: Williams; 2007. (In Russ.)
12. Stein S., Jones J. [*Principles of modern communication theory and their application to the transmission of discrete messages*]. Moscow: Communication; 1971. (In Russ.)

Вклад авторов

Железняк В.К. определил замысел исследования, осуществил окончательное утверждение рукописи для публикации, ее критический пересмотр в части значимого интеллектуального содержания.

Лавров С.В. принимал участие в разработке способа синтеза композитного сигнала и интерпретации полученных результатов.

Филиппович А.Г. осуществил критический пересмотр статьи в части значимого интеллектуального содержания, вносил правки в текст статьи.

Барановский М.М. принимал участие в разработке способа синтеза композитного сигнала и интерпретации полученных результатов, осуществил редактирование и оформление статьи для публикации.

Authors' contribution

Zheleznjak V.K. defined the concept of research, delivered the final approval of the manuscript for publication, including its critical review in part of significant intellectual content.

Lavrov S.V. participated in the development of a method of synthesis of the composite signal and interpret the results.

Filipovich A.G. included its critical review in part of significant intellectual content, edited the text of the article.

Baranouski M.M. participated in the development of a method for the synthesis of a composite signal and participated in the interpretation of the results, prepared the article for publication.

Сведения об авторах

Железняк В.К., д.т.н., профессор, заведующий опытно-экспериментальной лабораторией технической защиты информации Полоцкого государственного университета.

Лавров С.В., аспирант Полоцкого государственного университета.

Филиппович А.Г., к.т.н., главный специалист Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь.

Барановский М.М., главный специалист Оперативно-аналитического центра при Президенте Республики Беларусь.

Information about the authors

Zheleznjak V.K., D.Sci., Professor, Head of the Research Experimental Laboratory of Technical Information Protection of Polotsk State University.

Lavrov S.V., PG Student of Polotsk State University.

Filipovich A.G., PhD, Chief Specialist of the Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus.

Baranouski M.M., Chief Specialist of the Operational and Analytical Center under the Aegis of the President of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

211440, Республика Беларусь,
Витебская обл., г. Новополоцк, ул. Блохина, 29,
Полоцкий государственный университет
тел. +375-29-212-74-47;
e-mail: v.zheleznjak@psu.by
Железняк Владимир Кириллович

Address for correspondence

211440, Republic of Belarus,
Vitebsk region, Novopolotsk, Blokhina str., 29,
Polotsk State University
tel. +375-29-212-74-47;
e-mail: v.zheleznjak@psu.by
Zheleznjak Vladimir Kirilovich



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-88-93>

Original paper

UDC 537.531:621.039.537-037.87

JUSTIFICATION OF BINDER MATERIAL SELECTION FOR CARBON PARTICLES INCORPORATION INTO FIBROUS ELECTROMAGNETIC RADIATION ABSORBER

ELENA S. BELOUSOVA, BOGDAN I. DUMCHEV, MUSTAFA S.KH. AL-MAHDAWI

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

Submitted 6 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The paper presents justification of a binder material for incorporating carbon particles into the inter-fiber space of electromagnetic radiation absorber. A method for carbon particles incorporation into a fibrous material has been developed. It is based on applying a carbon-containing nanocomposite to the fibrous material's surface. Previously, the research of carbon particles incorporation into a synthetic material by using an aqueous solution were carried out, which ensured a uniform distribution of carbon particles in the material structure. However, the properties of the material have changed significantly upon mechanical deformation. Therefore, the carbon particles incorporation process was investigated using various nanocomposites obtained on the basis of mixtures of vinyl acetate polymer, or epoxy polymer, or surface-active substance with carbon black. Based on the results of electron microscopic analysis and the reflection and transmission coefficients frequency dependences in the frequency range 0.7–17 GHz, the efficiency of using a nanocomposite based on a mixture of surface-active substance and carbon black to create electromagnetic radiation absorbers was justified. Such electromagnetic radiation absorbers have the transmission coefficient value about –18 dB and reflection coefficient value about –12 dB in the frequency range 7–13 GHz. Carbon-containing electromagnetic radiation absorbers based on fibrous material have thickness less than 3 mm, properties of flexibility and resistance to mechanical deformation. It can be used in various fields, in particular for hiding objects from radio frequency reconnaissance or protecting equipment from external interference.

Keywords: carbon black, electromagnetic radiation absorbers, nanocomposite, reflection coefficient, transmission coefficient.

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

Gratitude. This work was carried out in the framework of assignment 3.3.04 of the State Scientific Inspection of the Republic of Belarus “Photonics, Optoelectronics and Microelectronics”.

For citation. Belousova E.S., Dumchev B.I., Al-Mahdawi M.S.Kh. Justification of binder material selection for carbon particles incorporation into fibrous electromagnetic radiation absorber. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 88-93.

Foreword

To date, various binder materials are used to create absorbers and screens of electromagnetic radiation. It is known that paint and varnish materials are widely used to create composite coatings with the addition of powdered conductive materials [1, 2], characterized by low values of reflection

coefficients (up to -15 dB) and transmission coefficients (up to -20 dB) in the frequency range of 8–12 GHz. At the same time, such composite coatings do not retain their electromagnetic radiation shielding properties during deformation.

There are also methods for creating electromagnetic radiation screens based on gypsum and concrete composite materials [3, 4], characterized by low transmission coefficients (up to -20 dB) and reflection coefficients (up to -15 dB) in the frequency range of 0.7–17 GHz. However, such materials have significant weight and size parameters and do not have the properties of elasticity and flexibility.

It is known that hydrophilic polymers are utilized to create composite materials [5, 6] with the transfer coefficients ranging from -20 to -40 dB in the 8–12 GHz frequency range. At the same time, such composite materials have not only the property of flexibility, but also resistance to variations in ambient temperature.

During the research work of the State Scientific Inspection program for 2016–2020 "Photonics, Optoelectronics and microelectronics", the task was set to select the optimal binder for fixing carbon particles in the fibrous structure of the electromagnetic radiation absorber. Thus, we studied the properties of several samples of electromagnetic radiation absorbers made using various binders that differ in the properties of adhesion, density, strength, elasticity and flexibility, and resistance to mechanical deformation.

Earlier [7], studies were conducted on the use of water-based and adhesive composites (solutions of sodium silicates or polyvinyl acetate emulsions) for incorporation of carbon particles into foamed and fibrous materials. The reflection coefficient of such materials is -14 dB, the transmission coefficient varies up to -20 dB in the frequency range of 8–12 GHz. The use of an aqueous solution to incorporate carbon particles does not solve the problem of their fixation in the structure of the material, but the particles penetrate deep into the material and are distributed throughout its volume. The use of a solution of sodium silicates helps to fix the particles only on the surface of the material. Based on these results, it was decided to create nanocomposites based on a vinyl acetate polymer, an epoxy polymer, and a solution of surfactants with the addition of carbon black.

A fibrous material consisting of chaotic polyester fibers (70 %) and polypropylene fibers (20 %) was selected as an electromagnetic radiation absorber material for incorporating carbon particles. It should be noted that this material has the properties of density (from 100 to 1000 g/m²), strength, flexibility, elasticity, shape stability, heat and noise insulation. The thickness of the fibrous material is not more than 2 mm.

The choice of carbon black for incorporation into the fiber structure of the electromagnetic radiation absorber is due to its physical and chemical properties: dispersion, highly developed surface (5–150 m²/g), particle density (1.76–1.9 g/cm³), low transmission coefficient (up to -40 dB in the frequency range of 8–12 GHz), carbon Black is a collection of spheroidal particles (the primary structure of carbon black), the coalescence of which leads to the formation of a secondary structure (Fig. 1, *a*), called the aggregates, up to 90 nm [8]. Also, in the structure of carbon black, a tertiary structure, agglomerates, is isolated, resulting from the physical connections of a set of aggregates (Fig. 1, *b*). Thus, carbon black is characterized by a disoriented particle structure, surface organophilicity, nanoscale primary and secondary structures (from 10 nm), and a variety of particle distribution forms (spheroidal, branched, linear, ellipsoidal).

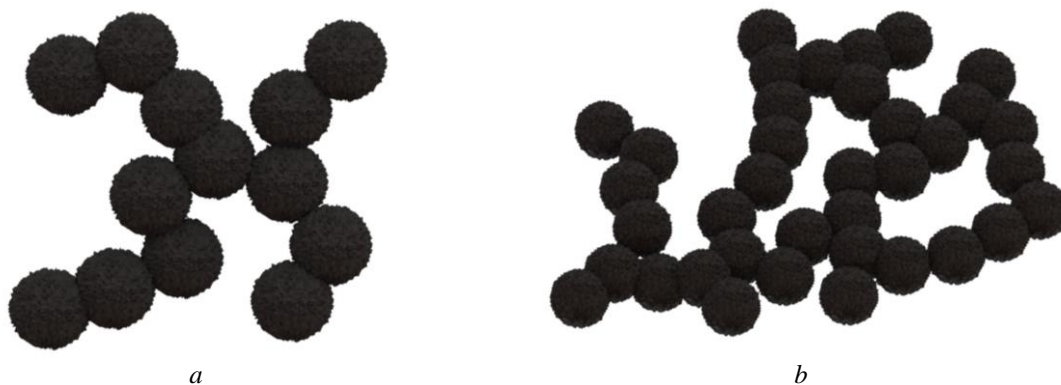


Fig. 1. Carbon black structural units: *a* – aggregate; *b* – agglomerate

Routine of experiment

For the production of samples of electromagnetic radiation absorbers, a method was developed for fixing allotropic carbon particles in a fibrous material, which includes the following steps.

1. Preparation of a carbon-containing nanocomposite: mixing a binder composite (vinyl acetate polymer, epoxy polymer, and surfactant) and carbon black powder in a ratio of 1: 0.5.
2. Cutting the fibrous material into fragments of the required size and shape.
3. Application of a carbon-containing nanocomposite to the surface of a fragment of a fibrous material.
4. Retention of fibrous material fragments for 24 hours under standard conditions.

In accordance with the developed method, the following samples of electromagnetic radiation absorbers were obtained:

- synthetic fibrous non-woven material with a nanocomposite based on a mixture of vinyl acetate polymer and carbon black (sample No. 1);
- synthetic fibrous non-woven material with a nanocomposite based on a mixture of epoxy polymer and carbon black (sample No. 2);
- synthetic fiber non-woven, on the surface of which a nanocomposite based on a mixture of surfactant and carbon black is applied (sample No. 3);
- synthetic fibrous non-woven material with a nanocomposite based on distilled water and carbon black (sample No. 4).

To determine the level of penetration of carbon particles into the internal structure of the fibrous material, an electron microscopic analysis was performed using a non-contact video measuring microscope Norgau NVM-2010, equipped with a color camera CCD 1/2'. The Norgau NVM-2010 video measuring microscope has extensive capabilities in measuring linear-angular values of surfaces of various materials and processing the measured data with an error of $\pm(3.0+L / 200)$ microns, where L is the measured length, mm, and magnification of the optical system from 0.7 to 4.5 times.

Studies of the shielding properties of the obtained samples of electromagnetic radiation absorbers were based on measuring the transmission coefficients (S_{21}) and reflection coefficients (S_{11}) of electromagnetic radiation in the range of 0.7–17 GHz, for which a panoramic transmission and reflection coefficient meter SNA 0.01–18 was used [9]. The reflection coefficient was measured in two modes: matched load (S_{11}) and short-circuit (S_{11ME}), i. e. a metal reflector was located behind the test sample. The choice of this range is due to its use for information exchange in mobile communication systems, between radar stations and computer equipment, etc.

Results and discussion

Based on the results of microscopic analysis of the surface and cross-section of the obtained samples of electromagnetic radiation absorbers, it was found that carbon black particles do not penetrate deep into the material of sample No. 1, on the surface of which a nanocomposite based on a mixture of vinyl acetate polymer and carbon black was deposited (Fig. 2, *a*). A layer of carbon-containing nanocomposite 500 microns thick is fixed on the surface of the fibrous material of sample No. 1 (Fig. 2, *b*).

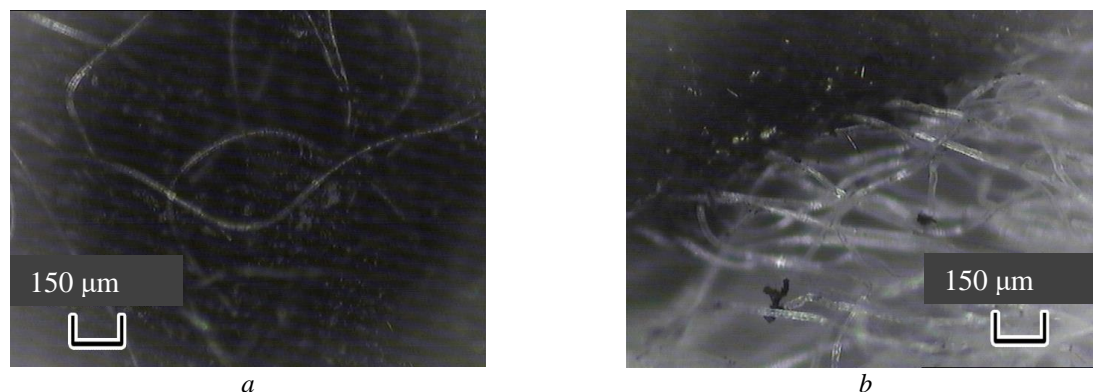


Fig. 2. Micrograph of sample No. 1: *a* – surface; *b* – cross section

The thickness of the layer of carbon-containing nanocomposite from a mixture of epoxy polymer and carbon black deposited on the surface of sample No. 2 is 300 microns. Fig. 3, *b* shows that the boundary between the carbon-containing nanocomposite layer and the fibrous material is clear, which indicates that carbon particles do not penetrate into the depth of the material.

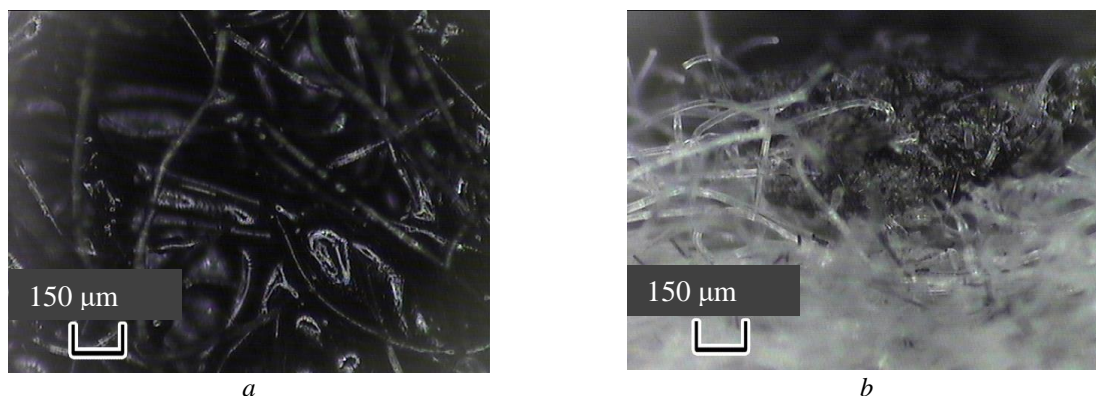


Fig. 3. Micrograph of sample No. 2: *a* – surface; *b* – cross section

Fig. 4, *a, b* show that the mixture of surfactant and carbon black deposited on the surface of sample No. 3 contributed to the uniform distribution of carbon particles over the entire thickness of the sample, as well as their fixation on the material fibers and in the inter-fiber space.

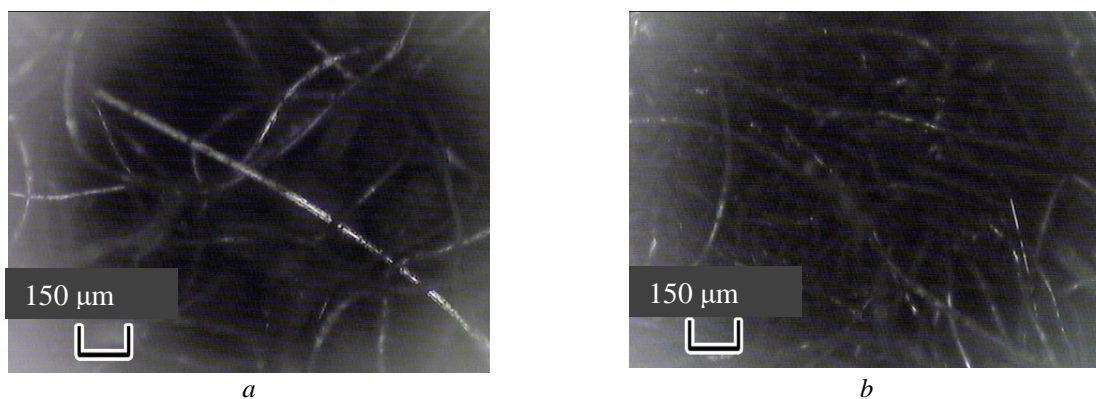


Fig. 4. Micrograph of sample No. 3: *a* – surface; *b* – cross section

As already mentioned in [8], an aqueous carbon-containing solution contributes to the uniform distribution of carbon particles in the structure of the material. In this work, to compare the efficiency of penetration of carbon particles deep into the material, sample No. 4 was also made, on the surface of which a nanocomposite based on distilled water and carbon black was applied. Fig. 5 makes it clear that carbon particles actually penetrate deep into the material. With that, it should be noted that their distribution in the structure of the material is similar to the distribution of particles in the structure of sample No. 3.

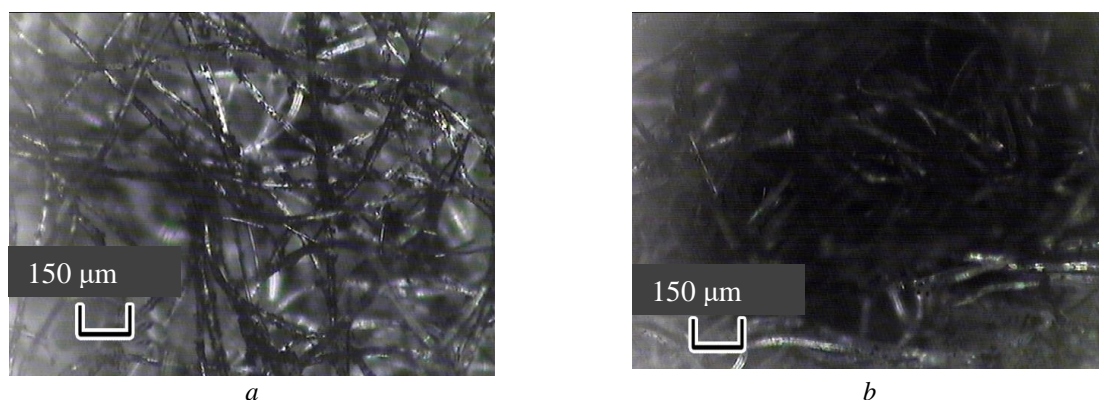


Fig. 5. Micrograph of sample No. 4: *a* – surface; *b* – cross section

The results of the analysis of frequency dependences of the reflection coefficients of manufactured samples obtained during measurements in the modes of matched load and short circuit (Fig. 6) show that the values of the reflection coefficients for sample No. 3 do not differ significantly when measured in the two modes and are $-2.6 \dots -14.4$ dB in the frequency range of 0.7–17 GHz. The frequency dependences of the reflection coefficients of sample No. 3 confirm the results of electron microscopic analysis, since the uniform distribution of carbon particles throughout the structure of the fibrous material reduces the power of the electromagnetic wave due to its repeated re-reflection in the inter-fiber space and absorption when interacting with each fiber with carbon particles fixed on their surface. The transmission coefficient of sample No. 3 is $-2.9 \dots -19.9$ dB and is minimal in comparison with the values of the transmission coefficients of other samples, which also confirms the above assumptions and proves the effectiveness of sample No. 3 for shielding electromagnetic radiation in the frequency ranges of 0.7–17 GHz (Fig. 7).

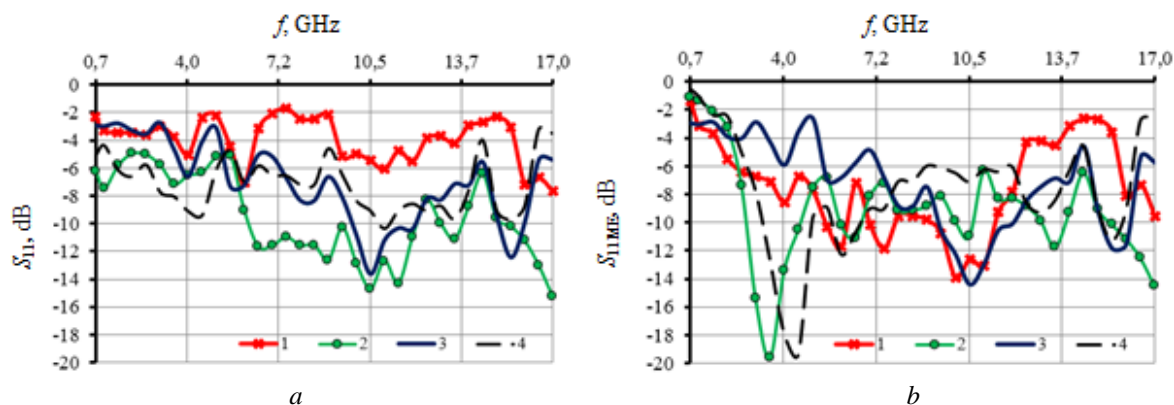


Fig. 6. Reflection coefficients frequency dependences of samples, obtained by measurements in modes matched load (a); short circuit (b)

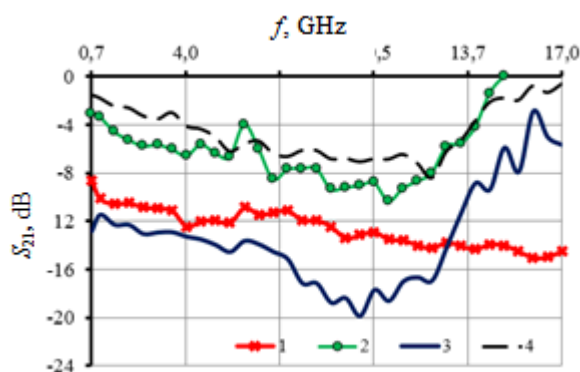


Fig. 7. Transmission coefficients frequency dependences of samples

Conclusion

The presented results of the study of the internal structure of samples of electromagnetic radiation absorbers with incorporated carbon particles and the frequency dependences of the reflection and transmission coefficients in the frequency range of 0.7–17 GHz show that an effective binder material for creating such absorbers is a nanocomposite based on a mixture of surfactant and carbon black. Electromagnetic radiation absorbers based on synthetic fiber material, on the surface of which a nanocomposite based on a mixture of surfactant and carbon black is deposited, are characterized by a uniform distribution of carbon particles in the fiber base, which provides a transmission coefficient of the order of -18 dB and a reflection coefficient of -12 dB in the frequency range of 7–13 GHz. Such electromagnetic radiation absorbers can be used to shield radar equipment from external interference or hide objects from radar reconnaissance. It should also be noted that these absorbers also have insignificant weight and dimensions, possess flexibility properties and are resistant to mechanical deformation.

References

1. Belousova E.S., Bojprav O.V., Lyn'kov L.M. [Composite fire-resistance paints with carbon-containing fillers for electromagnetic radiation shielding]. *Vestnik Polockogo gosudarstvennogo universiteta*. 2016;11:47-51. (In Russ.)
2. Pen'yalosa Oval'es D.I., Lyn'kov L.M., Bojprav O.V., Tumilovich M.V., Bychek I.V. [Non-combustible composite coating based on powdered electrocorundum for electromagnetic shields]. *Pribory*. 2018;6(216):49-54. (In Russ.)
3. Bojprav O.V., Neverov N.A., Bogush N.V., Lyn'kov L.M. [Shielding characteristics of composite materials based on titanium dioxide and gypsum]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2018;8(118):71-75. (In Russ.)
4. Mohamed A.M.A., Belousova E.S., Lyn'kov L.M. [Radio shielding properties of concrete based on shungite nanomaterials]. *Nanotekhnologii v stroitel'stve*. 2015;7(3):43-49. (In Russ.)
5. Smirnov YU.V., Al'-Ademi YA.T.A., Pulko T.A., Nasonova N.V., Lyn'kov L.M. [Temperature dependence of the shielding properties of polymer hydrogels]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2012;6(68):25-29. (In Russ.)
6. Puhir G.A., Mahmud M.SH., Lyn'kov L.M. [Electromagnetic radiation absorbers on the base of elastic polymers with the addition of sorbent powders]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2011;8(62):99-102. (In Russ.)
7. Belousova E.S., Mohamed A.M.A., Al'-Mahdavi M.S.H., Prudnik A.M. [Flexible electromagnetic radiation shields based on carbon-containing glued compounds]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2017;8(110):73-78. (In Russ.)
8. Surovikin V.F. [Modern trends in the development of methods and technology for producing nanodispersed carbon materials.]. *Rossijskij himicheskij zhurnal*. 2007;LI;4:92-97. (In Russ.)
9. Belousova E.S., Abdulsalam M.M.A., Lyn'kov L.M., Borbot'ko T.V. [*Electromagnetic shields based on nanostructured carbon-containing materials*]. Minsk: Bestprint; 2018. (In Russ.)

Authors' contribution

Belousova E.S. identified the purpose and objectives to be solved during the research, developed a method to produce the samples of absorbers, took part in the experiments, and in interpretation of the results.

Dumchev B.I. produced the samples of electromagnetic radiation absorbers, took part in the experiments and interpretation of the results, carried out a comparative analysis of the reflection and transmission coefficients frequency characteristics.

Al-Mahdawi M.S.Kh. produced the samples of electromagnetic radiation absorbers, took part in the experiments and interpretation of the results.

Information about the authors

Belousova E.S., PhD, Associate Professor at the Information Security Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Dumchev B.I., Student of the Information Security Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Al-Mahdawi M.S.Kh., PG student of the Information Security Department of the Belarusian State University of Informatics and Radioelectronic.

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovki str., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-22-09;
e-mail: elenalbelousova@gmail.com;
Belousova Elena Sergeevna



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2020-18-6-94-102>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.3.049.77: 621.793

ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА ПЛЕНОК ОКСИДА ВАНАДИЯ, НАНЕСЕННЫХ МЕТОДОМ РЕАКТИВНОГО МАГНЕТРОННОГО РАСПЫЛЕНИЯ

НГУЕН Т.Д.¹, ЗАНЬКО А.И.², ГОЛОСОВ Д.А.¹, ЗАВАДСКИЙ С.М.¹,
МЕЛЬНИКОВ С.Н.¹, КОЛОС В.В.²

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

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

Поступила в редакцию 14 сентября 2020

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2020

Аннотация. Целью работы являлось исследование влияния состава газовой среды в процессе распыления на электрофизические характеристики пленок оксида ванадия, нанесенных методом импульсного реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Получены зависимости напряжения разряда магнетрона, скорости нанесения, удельного сопротивления, температурного коэффициента сопротивления (ТКС), ширины оптической запрещенной зоны пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в смеси газов. Установлено, что при реактивном магнетроном распылении формируются аморфные пленки оксида ванадия. Показано, что электрофизические свойства нанесенных пленок оксида ванадия имеют сильную зависимость от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов, что связано с образованием в пленке смеси различных промежуточных оксидов ванадия. Установлено, что с точки зрения использования пленок оксида ванадия в качестве термочувствительных слоев пленки необходимо наносить при концентрациях кислорода в смеси газов от 17 до 25 %. При данных концентрациях кислорода без нагрева подложек получены пленки оксида ванадия с удельным сопротивлением $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, ТКС 2,2–2,3 %/°С и шириной запрещенной зоны для прямых переходов 3,7–3,78 эВ. Полученные характеристики позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Ключевые слова: оксид ванадия, реактивное магнетронное распыление, тонкие пленки, микроболометр.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Благодарности. Исследования выполнены при финансовой поддержке БРФФИ в рамках научных проектов № Т19КИТГ-016 и № Т20КИТГ-013.

Для цитирования. Нгуен Т.Д., Занько А.И., Голосов Д.А., Завадский С.М., Мельников С.Н., Колос В.В. Электрофизические свойства пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления. Доклады БГУИР. 2020; 18(6): 94-102.

ELECTROPHYSICAL PROPERTIES OF VANADIUM OXIDE FILMS DEPOSITED BY REACTIVE MAGNETRON SPUTTERING

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

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

² JSC “Integral” – “Integral” Holding Managing Company (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 14 September 2020

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2020

Abstract. The aim of this work was to study the effect of the gas composition during sputtering on the electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by pulsed reactive magnetron sputtering of a vanadium target in an Ar/O₂ medium of working gases. The dependences of the magnetron discharge voltage, deposition rate, resistivity, temperature coefficient of resistance (TCR), and the band gap of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the gas mixture are obtained. It was found that amorphous films of vanadium oxide are formed during reactive magnetron sputtering. It is shown that the properties of the deposited vanadium oxide films have a strong dependence on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture, which is associated with the formation of a mixture of various intermediate vanadium oxides in the film. It was found that from the point of view of using vanadium oxide films as thermosensitive layers of microbolometers, the films must be deposited at oxygen concentrations in the gas mixture of 17 to 25 %. At the given oxygen concentrations without heating the substrates, vanadium oxide films with a resistivity $(0.6-4.0) \cdot 10^{-2}$ Ohm·m, TCR 2.2–2.3%/°C and a band gap for direct transitions of 3.7–3.78 eV. The obtained characteristics make it possible to use these films as thermosensitive layers of microbolometers.

Keywords: vanadium oxide, reactive magnetron sputtering, thin films, microbolometer.

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

Gratitude. The work was supported by the BRFFR, research program grants № T19КИТГ-016 and № T20КИТГ-013.

For citation. Nguen T.D., Zanko A.I., Golosov D.A., Zavadski S.M., Melnikov S.N., Kolos V.V. Electrophysical properties of vanadium oxide films deposited by reactive magnetron sputtering. Doklady BGUIR. 2020; 18(6): 94-102.

Введение

В последние годы интенсивно ведутся исследования, направленные на разработку интегральных неохлаждаемых инфракрасных (ИК) микроболومترических приемников, использующих терморезистивные свойства чувствительного элемента [1]. Основным преимуществом приборов на основе неохлаждаемых микроболومترических приемников является отсутствие системы криогенного охлаждения. По чувствительности такие приемники приближаются к криогенным фотонным приемникам, что позволяет создавать на основе неохлаждаемых микроболметров ИК приборы, имеющие малые габариты, вес, энергопотребление и низкую стоимость. Это открывает возможность разрабатывать на базе неохлаждаемых микроболومترических приемников приборы не только для военной техники, но и для применения в промышленности, охранных системах, медицине, экологическом мониторинге, на транспорте [1, 2].

Работа микроболметра основана на повышении температуры термочувствительного материала (терморезистора) за счет поглощения падающего ИК излучения. Изменение температуры вызывает изменение электрического сопротивления терморезистора, которое преобразуется в напряжение и измеряется внешней цепью. Термочувствительный материал микроболметра должен обладать высоким значением температурного коэффициента

электрического сопротивления (ТКС), малыми значениями удельного сопротивления, теплопроводности и шумов. Также важным вопросом является возможность использования данного материала в стандартных технологических процессах изготовления полупроводниковых интегральных микросхем, что позволяет формировать микроболометрическую матрицу и считывающую электронику на едином кристалле. Одним из таких материалов является оксид ванадия VO_x . Пленки оксида ванадия обладают наилучшим сочетанием показателей: сравнительно высоким ТКС, низким удельным сопротивлением и низкой способностью к созданию помех [3].

Для получения пленок оксида ванадия предложен ряд методов осаждения, таких как золь-гель, центрифугирование, распылительный пиролиз, химическое осаждение из газовой фазы, ионное распыление, электронно-лучевое испарение и импульсное лазерное осаждение [4–9]. Однако до настоящего времени широкое промышленное использование данных методов сдерживается сложностью получения пленок VO_x с заданными характеристиками. Это связано с тем, что оксид ванадия имеет порядка двадцати пяти разных оксидных состояний, и только некоторые из них обладают требуемыми свойствами. Из-за узкого диапазона технологических параметров, обеспечивающих стабильность и оптимальность характеристик оксида, процесс формирования пленок VO_x является сложным для управления и трудно воспроизводимым.

Одним из наиболее перспективных методов формирования пленок оксида ванадия является реактивное магнетронное распыление [10]. Метод обеспечивает высокие скорости нанесения и химическую чистоту наносимых слоев, позволяет в широких пределах варьировать стехиометрический состав пленок за счет изменения парциального давления реактивного газа в камере. Исследованию свойств пленок оксида ванадия, наносимых методом реактивного распыления, посвящен ряд статей, однако в этих статьях чаще всего используется высокочастотное распыление и основное внимание уделяется влиянию параметров процесса распыления на электрохромные и оптические характеристики пленок [11]. В то же время практически отсутствуют представленные в статьях результаты исследований, где для нанесения пленок используется метод импульсного реактивного магнетронного распыления и анализируется влияние параметров процесса на электрофизические свойства пленок с точки зрения использования оксида ванадия в качестве термочувствительных слоев микроболометров. Таким образом, целью работы являлось исследование влияния состава газовой среды в процессе распыления на электрофизические свойства пленок оксида ванадия, наносимых методом импульсного реактивного магнетронного распыления без нагрева подложек.

Методика проведения эксперимента

На рис. 1 представлена схема экспериментальной установки для нанесения пленок оксида ванадия методом импульсного реактивного магнетронного распыления. Установка выполнена на базе вакуумного поста ВУ-2МП. Камера вакуумной установки была оборудована магнетронной распылительной системой MARS.011-80 с мишенью $\varnothing 80$ мм и ионным источником на основе торцевого холловского ускорителя ЕНІS.007-150.

Вращаемый подложкодержатель располагался на расстоянии 120 мм от поверхности мишени магнетрона. В процессе нанесения пленок ось вращения подложки находилась на расстоянии 100 мм от оси магнетрона. Для питания магнетрона использовался блок питания (БП) АРЕL-М-1.5ВР-800-2 (ООО «Прикладная электроника», Россия) мощностью 1,5 кВт.

Пленки оксида ванадия наносились на структуры Si_3N_4/Si и оптическое стекло ВК7. В ходе экспериментов камера вакуумной установки откачивалась до остаточного давления 10^{-3} Па и производилась предварительная ионная очистка подложек. Для этого в ионный источник подавался Аг. Поток Аг составлял $Q_{Ar} = 30$ мл/мин. Время очистки, напряжение и ток разряда во всех экспериментах были постоянными и составляли $t = 6$ мин, $U_d = 80$ В, $I_d = 7,0$ А соответственно. Очистка производилась в режиме вращения подложки.

Затем производилась очистка мишени магнетрона от загрязнений. Для этого в газораспределительную систему магнетрона подавался Аг. Поток Аг в камеру составлял $Q_{Ar} = 60$ мл/мин. Ванадиевая мишень распылялась в течение 2 мин при токе разряда $I_t = 1,5$ А.

Для распыления ванадиевой мишени использовался биполярный асимметричный импульсный ток (частота следования импульсов $F = 10$ кГц, амплитуда положительного импульса 60 В и длительность 3 мкс). После этого в газораспределительную систему магнетрона подавался кислород, и производилось распыление мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. При этом значения расходов рабочих газов устанавливались такие, которые впоследствии использовались при нанесении пленок. В таком режиме мишень распылялась в течение 2 мин при токе разряда $I_t = 1,5$ А. Далее производилось нанесение пленок оксида ванадия. Для этого подложки подводились в зону нанесения. В процессе экспериментов содержание кислорода в Ar/O₂ смеси газов (G_{O_2}) изменялось от 0 до 67 % при общем расходе газа 60 мл/мин. Для поддержания заданного расхода газов использовались автоматические регуляторы расхода газа (РРГ) РРГ-1. Во всех экспериментах ток разряда поддерживался постоянным и составлял $I_t = 1,5$ А. При этом напряжение разряда изменялось от 450 до 583 В в зависимости от концентрации кислорода. Толщина нанесенных пленок составляла около 150 нм и регулировалась временем нанесения в зависимости от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов.

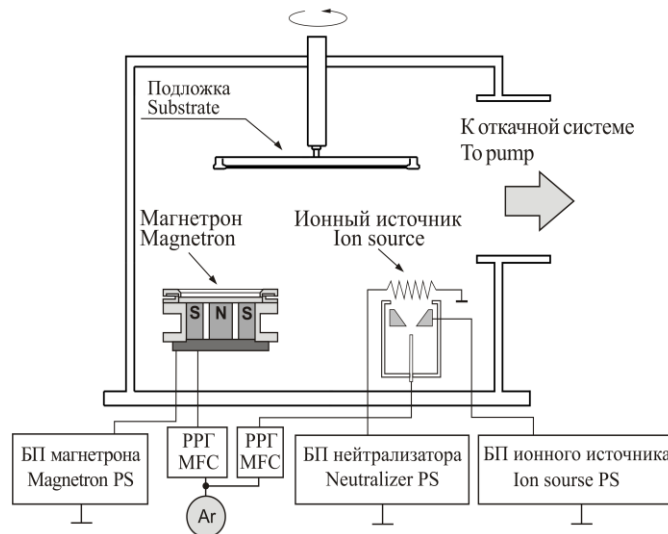


Рис. 1. Схема экспериментальной установки для нанесения пленок оксида ванадия методом импульсного реактивного магнетронного распыления

Fig. 1. Experimental setup for deposition of vanadium oxide films by reactive magnetron sputtering method

Толщина нанесенных слоев определялась с помощью оптического интерферометрического профилометра ПОИ-08. Структура и фазовый состав нанесенных пленок определялись методами EBSD (Electron Backscattered Diffraction) и рамановской спектроскопии. Для исследования пленок методом EBSD использовался двулучевой электронно-ионный микроскоп Versa 3D Lovac (США). Дифракционные картины получены при угле наклона подложки 70°. Исследования комбинационного рассеяния света пленок были проведены на сканирующем конфокальном микроскопе SOL Instrument Confotec NR500 с использованием лазера с длиной волны 473 нм и мощностью 3 мВт. Спектры оптического пропускания пленок в диапазоне 300–900 нм получены с помощью спектрофотометра Проскан МС-121. Ширина оптической запрещенной зоны нанесенных пленок определялась по краю собственного поглощения пленок.

Для исследования электрических свойств нанесенных пленок формировались тестовые структуры. Для этого на пленку оксида ванадия методом ионно-лучевого распыления наносились Ni контакты. Сформированные резисторы имели прямоугольную форму размером 7,5×15 мм (коэффициент формы $K_\phi = 0,5$).

Электрическое сопротивление резисторов измерялось при комнатной температуре при токе 100 мкА. Удельное сопротивление пленок рассчитывалось исходя из сопротивления резистора R , его коэффициента формы K_ϕ и толщины пленки оксида ванадия по формуле

$$\rho = \frac{Rd}{K_\phi}, \quad (1)$$

где d – толщина пленки оксида ванадия.

При измерениях ТКС пленок температура терморезисторов изменялась от комнатной до 90 °С и обратно со скоростью 5 °С/мин. Температурный коэффициент сопротивления рассчитывался по формуле

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{dR}{dT} 100, \quad (2)$$

где T – температура терморезистора.

Результаты и их обсуждение

Проведены исследования процессов импульсного реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. На рис. 2 представлена зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Зависимость получена в режиме стабилизации тока разряда $I_t = 1,5$ А. Общий расход газов поддерживался постоянным 60 мл/мин. Скорость откачки насосной системой составляла около 1200 л/с. При данных расходах газа давление в камере было 0,05 Па.

При распылении V мишени в среде Ar напряжение разряда составляло $U_t = 437$ В. При увеличении содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов напряжение разряда первоначально увеличивалось и достигало максимума $U_t = 550$ В при $\Gamma_{O_2} = 27$ %. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода напряжение разряда незначительно снижалось, и при $\Gamma_{O_2} = 37$ % наблюдался минимум напряжения $U_t = 529$ В. Дальнейшее увеличение Γ_{O_2} опять приводило к росту напряжения. При концентрации кислорода 67,5 % напряжение разряда составляло 573 В. При уменьшении Γ_{O_2} напряжение разряда изменялось по тому же закону. Гистерезис напряжения, характерный для процессов реактивного магнетронного нанесения диэлектрических пленок, отсутствовал. Такая двойная зависимость изменения напряжения разряда от концентрации кислорода и отсутствие гистерезиса, по-видимому, связаны с формированием на поверхности мишени различных промежуточных проводящих оксидов ванадия, стехиометрический состав, электрическая проводимость и коэффициент ионно-электронной эмиссии которых зависит от парциального давления кислорода.

На рис. 3 представлена зависимость скорости нанесения пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. При распылении V мишени в среде Ar скорость нанесения составляла 0,34 нм/с. При добавке кислорода скорость нанесения первоначально увеличивалась и достигала максимума 0,38 нм/с при $\Gamma_{O_2} = 12,5$ %. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода скорость нанесения снижалась до 0,07 нм/с при концентрации кислорода 63 %. На участке снижения скорости нанесения можно выделить три области: 12,5–33,0 %, 33,0–43,0 % и более 43,0 %. В первой и третьей области скорость нанесения снижается плавно при увеличении Γ_{O_2} , на втором участке имеет место резкое снижение скорости.

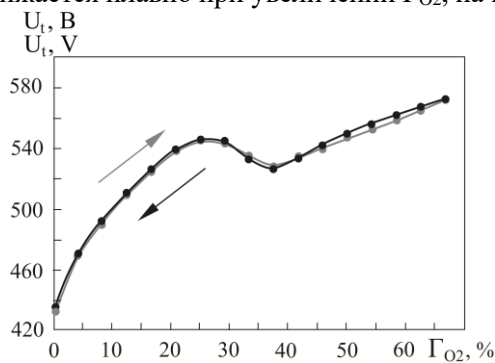


Рис. 2. Зависимость напряжения разряда от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при распылении ванадиевой мишени методом реактивного магнетронного распыления

Fig. 2. Dependence of the discharge voltage on the oxygen concentration in an Ar/O₂ gas mixture during sputtering of a vanadium target by the method of reactive magnetron sputtering

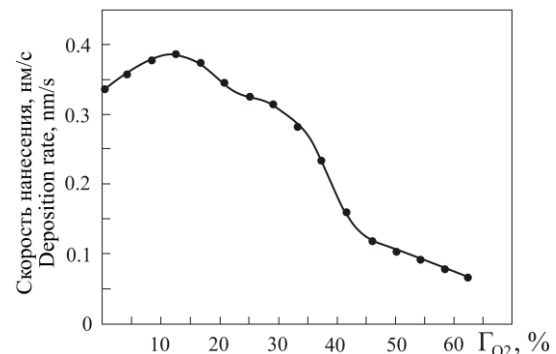


Рис. 3. Зависимость скорости нанесения от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов при распылении ванадиевой мишени методом реактивного магнетронного распыления

Fig. 3. Dependence of the deposition rate on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture during sputtering of a vanadium target by the method of reactive magnetron sputtering

Анализ нанесенных пленок методом EBSD показал, что на всех образцах не наблюдалось дифракционной картины. Полосы Кикучи, характеризующие кристаллические плоскости, полностью отсутствовали, что свидетельствовало об аморфной структуре оксида ванадия. Аморфное состояние пленок также подтверждено методом рамановской спектроскопии. На рис. 4 представлена зависимость удельного сопротивления пленок оксида ванадия при комнатной температуре от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. При распылении ванадиевой мишени в атмосфере Ar удельное сопротивление пленок составляло $\rho = 5 \cdot 10^{-6}$ Ом·м. При увеличении концентрации кислорода до 7,0 % удельное сопротивление пленок незначительно увеличивалось до $2 \cdot 10^{-5}$ Ом·м и далее резко возрастало до $2,5 \cdot 10^{-2}$ Ом·м при $\Gamma_{O_2} = 16,7$ %. При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} в диапазоне 16,7 – 25 % ρ первоначально снижалось до $6 \cdot 10^{-3}$ Ом·м и далее увеличивалось до $4 \cdot 10^{-2}$ Ом·м. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода в смеси газов сопротивление резисторов увеличивалось до десятков мегаом, т. е. формировались диэлектрические пленки.

На рис. 5 представлены температурные зависимости сопротивления $R(T)$ пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Полученные экспериментальные зависимости $R(T)$ аппроксимировались с использованием экспоненциальной функции и рассчитывалась достоверность аппроксимации k^2 , которая характеризовала близость полученной зависимости к экспоненциальной (идеальность кривой). Установлено, что пленки, нанесенные при Γ_{O_2} менее 3 %, имели положительный ТКС и сопротивление линейно зависело от температуры T (рис. 5, кривая 1). При увеличении концентрации кислорода до 8 % сопротивление нанесенных пленок также линейно зависело от T , но ТКС пленок становился отрицательным (кривые 2, 3). При дальнейшем увеличении Γ_{O_2} сопротивление пленок увеличивалось, и кривые приобретали характерный экспоненциальный характер (кривые 4–6). При этом отмечалось увеличение ТКС пленок (рис. 6). На участке Γ_{O_2} от 16 до 29 % ТКС пленок составлял 2,2–2,3 %/°С при k^2 более 0,995. При увеличении Γ_{O_2} более 30 % ТКС пленок снижался до 1,6–2,0 %/°С. При этом достоверность аппроксимации также снижалась до 0,974 при $\Gamma_{O_2} = 63$ %.

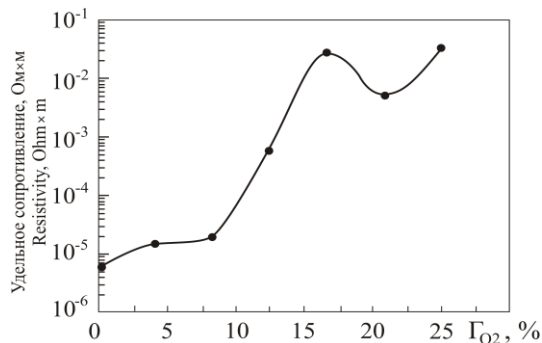


Рис. 4. Зависимость удельного сопротивления пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig. 4. Dependence of the resistivity of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

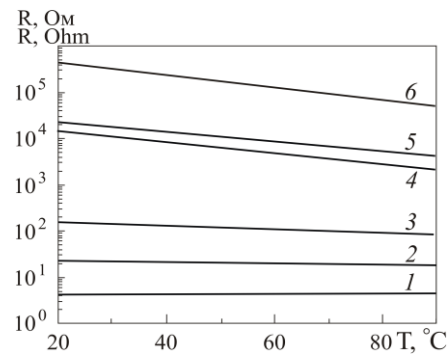


Рис. 5. Температурные зависимости сопротивления пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода: 1 – 4,76 %, 2 – 9,1 %, 3 – 13 %, 4 – 16,7 %, 5 – 20 %, 6 – 25 %

Fig. 5. Temperature dependence of the resistance of vanadium oxide films deposited at various oxygen concentrations: 1 – 4.76%, 2 – 9.1%, 3 – 13%, 4 – 16.7%, 5 – 20%, 6 – 25%

Для расчета оптической ширины запрещенной зоны получены спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия (рис. 7). Установлено, что пленки, нанесенные при Γ_{O_2} менее 30 %, обладали высоким оптическим поглощением. Средний коэффициент пропускания в области спектра 450–900 нм не превышал 0,3. Край оптического пропускания находился на длине волны около 350 нм. При увеличении Γ_{O_2} более 30 % коэффициент пропускания резко увеличивался до 0,6–0,8 (рис. 7, кривая 5), и край оптического пропускания смещался в сторону более длинных волн.

С использованием полученных оптических спектров проведены расчеты оптической ширины запрещенной зоны пленок. В связи с аморфной структурой пленок, отсутствием данных о стехиометрическом составе пленок и теоретических расчетов зонной структуры

пленок оксида ванадия для расчета запрещенной зоны построены спектральные зависимости $(ah\omega)$ от энергии фотона для прямых и непрямых разрешенных переходов. Ширина запрещенной зоны E_g определялась путем экстраполяции прямолинейных участков зависимостей $(ah\omega)^2$ и $(ah\omega)^{1/2}$ от энергии фотона $h\omega$ до пересечения с осью абсцисс. На рис. 8 представлены зависимости ширины запрещенной зоны для прямых (1) и непрямых (2) разрешенных переходов от содержания кислорода в Ar/O₂ смеси газов. Ширина запрещенной зоны также имела сложную зависимость от Γ_{O_2} . Для прямых переходов ширина запрещенной зоны изменялась в пределах от 3,48–3,78 эВ. При малых концентрациях кислорода ($\Gamma_{O_2} = 4\%$) ширина запрещенной зоны составляла 3,48 эВ и увеличивалась до 3,78 эВ при $\Gamma_{O_2} = 19\%$, далее снижалась до 3,67 эВ при $\Gamma_{O_2} = 29\%$. При дальнейшем увеличении концентрации кислорода E_g увеличивалась до 3,78 эВ при $\Gamma_{O_2} = 46\%$. Аналогичный характер кривой был получен для непрямых переходов, но значения E_g имели более низкие значения (от 3,06 до 3,61 эВ).

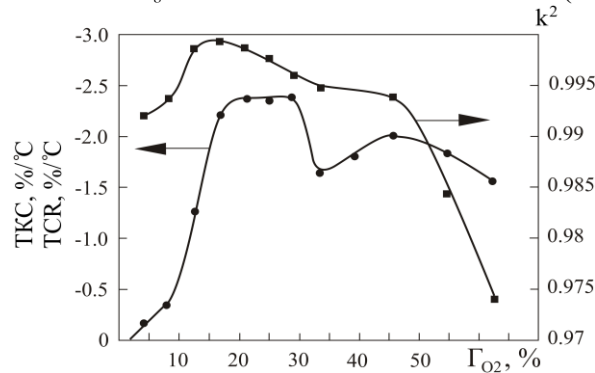


Рис. 6. Зависимость ТКС и достоверности аппроксимации k^2 зависимости $R(T)$ пленок оксида ванадия от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig.6. Dependence of the TCR and the reliability of approximation k^2 of the dependence $R(T)$ of vanadium oxide films on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

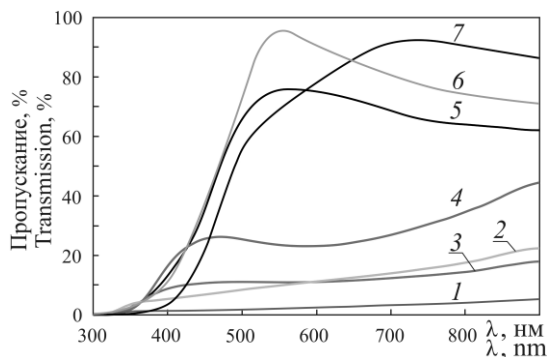


Рис. 7. Спектры оптического пропускания пленок оксида ванадия, нанесенных при различной концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов: 1 – 12,5 %, 2 – 16,7 %, 3 – 25,0 %, 4 – 29,2 %, 5 – 37,5 %, 6 – 45,8 %, 7 – 62,5 %

Fig. 7. Optical transmission spectra of vanadium oxide films deposited at various oxygen concentrations in an Ar/O₂ gas mixture: 1 – 12.5 %, 2 – 16.7 %, 3 – 25.0 %, 4 – 29.2 %, 5 – 37.5 %, 6 – 45.8 %, 7 – 62.5 %

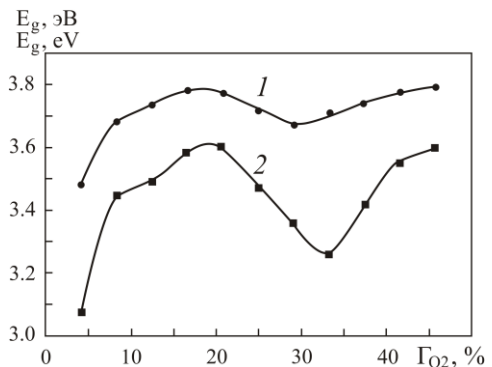


Рис. 8. Зависимость ширины запрещенной зоны пленок оксида ванадия для прямых (1) и непрямых (2) разрешенных переходов от концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов

Fig. 8. Dependence of the band gap of vanadium oxide films for direct (1) and indirect (2) allowed transitions on the oxygen concentration in the Ar/O₂ gas mixture

Анализ полученных результатов показывает, что зависимости напряжения разряда, скорости нанесения пленок, ТКС, удельного сопротивления и ширины запрещенной зоны от концентрации кислорода имеют сложный характер. Данное поведение, по-видимому, связано с тем, что нанесенные пленки представляют собой смесь различных промежуточных оксидов ванадия, электрофизические свойства которых имеют большие различия. И электрофизические свойства пленок определяются соотношением концентраций этих оксидов. Формирование пленок оксида ванадия с высокими значениями ТКС (2,2–2,3 %/°C) отмечалось в сравнительно

узком диапазоне концентраций кислорода (от 17 до 29 %). При этом достоверность аппроксимации составляла более 0,995, что говорит о высокой идеальности кривой $R(T)$ во всем температурном диапазоне измерений. В данном диапазоне концентраций кислорода удельное сопротивление пленок находилось в пределах $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м. Однако при Γ_{O_2} более 25 % удельное сопротивление пленок резко увеличивалось и становилось более 0,1 Ом·м, что не позволяет использовать такие пленки в микроболометрах из-за высокого сопротивления. Анализ зависимости ширины запрещенной зоны от Γ_{O_2} показывает, что в диапазоне концентраций кислорода в Ar/O₂ смеси газов 17–25 % наблюдается максимум значений E_g . Для прямых переходов E_g изменяется от 3,7 до 3,78 эВ, для непрямых переходов от 3,47 до 3,61 эВ. Следует также отметить, что в данном диапазоне концентраций кислорода напряжение разряда монотонно увеличивается и однозначно зависит от Γ_{O_2} . Скорость нанесения пленок имеет сравнительно высокие значения от 0,32 до 0,38 нм/с. Это позволяет эффективно и воспроизводимо наносить пленки оксида ванадия для использования в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Заключение

Проведены исследования электрофизических характеристик пленок оксида ванадия, нанесенных методом реактивного магнетронного распыления ванадиевой мишени в среде Ar/O₂ рабочих газов. Установлено, что метод импульсного реактивного магнетронного распыления может эффективно использоваться для контролируемого и воспроизводимого нанесения пленок оксида ванадия. При реактивном магнетронном распылении формируются аморфные пленки оксида ванадия, которые представляют собой смесь различных промежуточных оксидов. При концентрации кислорода в Ar/O₂ смеси газов 17–25 % без нагрева подложек получены пленки оксида ванадия с удельным сопротивлением $(0,6-4,0) \cdot 10^{-2}$ Ом·м, ТКС 2,2–2,3 %/°С и шириной запрещенной зоны для прямых переходов 3,7–3,78 эВ. Полученные характеристики позволяют использовать данные пленки в качестве термочувствительных слоев микроболометров.

Список литературы / References

1. Rogalski A. Infrared Detectors for the Future. *Acta physica polonica A*. 2009;116(3):389-406.
2. Breen Th.B., Kohin M., Marshall Ch. A., Murphy R., White T.E., Leary A.R., Parker T.W. Even more applications of uncooled microbolometer sensors. *Proc. SPIE*. 1999;3698:308-319.
3. Mauger A, Julien Ch. M. Review V₂O₅ thin films for energy storage and conversion. *AIMS Materials Science*. 2018;5(3):349-401. DOI: 10.3934/matrsoci.2018.3.349.
4. Singh T., Wang Sh., Aslam N., Zhang H., Hoffmann-Eifert S., Mathur S. Atomic Layer Deposition of Transparent VO_x Thin Films for Resistive Switching Applications. *Chemical Vapor Deposition*. 2014;20(7-9):291-297. DOI: 10.1002/cvde.201407122.
5. Esther A.C.M., Sharma A.K., Dey A., Porwal D., Pradeepkumar M.S., Rangappa D. Optical constants of pulsed RF magnetron nanocolumnar V₂O₅ coating. *Physica B*. 2015;478:161-166.
6. Luo Z., Wu Z., Xu X., Du M., Wang T., Jiang Y. Impact of substrate temperature on the microstructure, electrical and optical properties of sputtered nanoparticles V₂O₅ thin film. *Vacuum*. 2010;85(2):145-150.
7. Patil C.E., Tarwal N.L., Shinde P.S., Deshmukh H.P., Patil P.S. Synthesis of electrochromic vanadium oxide by pulsed spray pyrolysis technique and its properties. *Journal of Physics D. Applied Physics*. 2009;42(2):1-6.
8. Kumar A., Singh P., Kulkarni N., Kaur D. Structural and optical studies of nanocrystalline V₂O₅ thin film. *Thin Solid Film*. 2008;516(6):912-918.
9. Beke S. A review of the growth of V₂O₅ films from 1885 to 2010. *Thin Solid Films*. 2011;519(6):1761-1771.
10. Chen S., Jianjun L., Jun D., Hong M., Hongchen W., Xinjian Y. Characterization of nanostructured VO₂ thin films grown by magnetron controlled sputtering deposition and post annealing method. *Optics Express*. 2009;17(26):24153-24161.
11. Zhang H., Wu Z., Yan D., Xu X., Jiang Y. Tunable hysteresis in metal-insulator transition of nanostructured vanadium oxide thin films deposited by reactive direct current magnetron sputtering. *Thin Solid Films*. 2014;552:218-224.

Вклад авторов

Все авторы в равной степени внесли вклад в написание статьи.

Authors' contribution

All authors have equally contributed to writing the article.

Сведения об авторах

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

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

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

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

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

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

Адрес для корреспонденции

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

Information about the authors

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

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

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

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

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

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

Address for correspondence

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

