

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 9

№ 1

Vol. 9

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

Журнал включен в базу данных Web of Science Core Collection (ESCI)

Том 9

№ 1

2018

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

Гусев О.К., д.т.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, проректор Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

СЕКРЕТАРЬ

Воробей Р.И., к.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.А., д.т.н., профессор, ученый секретарь Ижевского государственного технического университета (г. Ижевск, Россия)

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, декан физического факультета Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

Белоус А.И., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)

Бубулис А., д.т.н., профессор, главный научный сотрудник Научного центра мехатроники Каунасского технологического университета (г. Каунас, Литва)

Вайн А.А., д.т.н., профессор Тартуского университета (г. Тарту, Эстония)

Виба Я., д.т.н., профессор, директор Института механики Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)

Гуттен М., д.т.н., заведующий кафедрой метрологии и прикладной электротехники Жилинского университета (г. Жилина, Словакия)

Джилавдари И.З., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Дмитриев С.М., д.т.н., профессор, ректор Нижегородского государственного технического университета им. Р.Е. Алексеева (г. Нижний Новгород, Россия)

Достанко А.П., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры электронной техники и технологии Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)

Дэнилак С., профессор Производственно-исследовательского центра Технологического института штата Джорджия (г. Атланта, США)

Жагора Н.А., д.т.н., доцент, главный специалист по метрологии и стандартизации Белорусского государственного института метрологии (г. Минск, Беларусь)

Жарин А.Л., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Информационно-измерительная техника и технологии» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Жуковский П., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой электрических устройств и техники высоких напряжений Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

Загашвили Ю.В., д.т.н., профессор, член Наблюдательного и Сертификационного совета Ассоциации по сертификации «Русский регистр» (г. Санкт-Петербург, Россия)

Киселев М.Г., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Конструирование и производство приборов» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Колтунович Т.Н., к.т.н., доцент, доцент Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)
Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой физической электроники и нанотехнологий Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
Кулешов Н.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Кучинский П.В., д.ф.-м.н., доцент, директор Института прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)
Матеос Х., к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)
Машко В.В., д.ф.-м.н., заместитель директора Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)
Муравьев В.В., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры систем телекоммуникаций Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники (г. Минск, Беларусь)
Пилипенко В.А., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» НТЦ «Белмикросистемы» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)
Плескачевский Ю.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, советник Национальной академии наук Беларуси (г. Минск, Беларусь)
Погребняк А.Д., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)
Серенков П.С., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Соломахo В.Л., д.т.н., профессор, директор Республиканского института инновационных технологий Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
Турцевич А.С., д.т.н., начальник управления Министерства промышленности Республики Беларусь (г. Минск, Беларусь)
Це Ли, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)
Чернявский А.Ф., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, профессор кафедры интеллектуальных систем Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси (г. Минск, Беларусь)
Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)
Юмашев К.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

**Издание зарегистрировано в Министерстве информации Республики Беларусь 25 июня 2010 г.
Регистрационный номер 1372**

**В соответствии с решением ВАК от 8 июля 2011 г. №13/1 журнал включен в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований; научное направление: «Средства и методы измерений, контроля, диагностики и оценки качества объектов и процессов» (технические и физико-математические науки)
ISSN 2220-9506**

Журнал включен в базы данных: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет

*Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».
Подписные индексы – 74835; 748352.*

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Макет и верстка: Костина Г.А., Чабарова О.Л., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 05.03.2018. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 12,44. Уч.-изд. л. 4,86. Тираж 100 экз.

Дата выхода в свет 14.03.2018. Заказ № 225.

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛИ № 02330/74 от 03.03.2014. Пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь,
тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

The Journal is included in Web of Science Core Collection (ESCI)

Volume 9

№ 1

2018

Editor-in-chief

Oleg K. Gusev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Deputy editor-in-chief

Aliaksandr M. Malyarevich, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Secretary

Roman I. Varabei, *PhD (Engineering), Associate Professor, Head of Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Editorial board

Vladimir A. Alekseev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)*

Victor M. Anishchik, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Dean of the Physics Faculty, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Anatoly I. Belous, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)*

Algimantas Bubulis, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Kaunas University of Technology (Kaunas, Lithuania)*

Arvid A. Vain, *Doctor of Science (Engineering), Professor, University of Tartu (Tartu, Estonia)*

Janis Viba, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of Institute of Mechanics, Riga Technical University (Riga, Latvia)*

Miroslav Gutten, *Doctor of Science (Engineering), Head of Department of Metrology and Applied Electrical Engineering, University of Žilina (Žilina, Slovakia)*

Igor Z. Gilavdary, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Sergei M. Dmitriev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Rector of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, Russia)*

Anatoly P. Dostanko, *Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Electronic Technology and Engineering Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)*

Steven Danyluk, *PhD, Professor, Production and Research Center, Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)*

Nikolai A. Zhagora, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head Specialist of Metrology and Standardization, Belarusian State Institute of Metrology (Minsk, Belarus)*

Anatoly L. Zharin, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

Pawel Zhukowski, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Department of Electrical Apparatus and High Voltages Technology, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

Yuri V. Zagashvili, *Doctor of Science (Engineering), Professor, the Member of the Supervisory and Certification Board of Association for the Certification «Russian Register» (St. Petersburg, Russia)*

- Mikhail G. Kiselev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Manufacture of Devices Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Tomasz N. Koltunowicz**, PhD, Associate Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)
- Fadey F. Komarov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Head of Physical Electronics and Nanotechnologies Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Nikolay V. Kuleshov**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Petr V. Kuchynski**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Alan Kemp**, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)
- Xavier Mateos**, PhD, Associate Professor, Universitat Rovira i Virgili (Tarragona, Spain)
- Vasili V. Mashko**, Doctor of Science (Engineering), Deputy Director of B.I. Stepanov Institute of Physics, National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)
- Valentin V. Murav'iov**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Telecommunication Systems Department, Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics (Minsk, Belarus)
- Vladimir A. Pilipenko**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis», Branch of the Scientific-Technical Center «Belmicrosystems» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)
- Yuriy M. Pleskachevsky**, Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, the Adviser of National Academy of Sciences of Belarus, (Minsk, Belarus)
- Alexander D. Pogrebnjak**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)
- Pavel S. Serenkov**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Standardization, Metrology and Information Systems Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Vladimir L. Solomakho**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Director of the Republican Institute of Innovative Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)
- Arkady S. Turtsevich**, Doctor of Science (Engineering), Chief of Department, the Ministry of Industry of the Republic of Belarus (Minsk, Belarus)
- Tse Li**, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)
- Alexander F. Cherniavsky**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Intelligent Systems Department, Belarusian State University (Minsk, Belarus)
- Sergei A. Chizhik**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)
- Alexey P. Shkadarevich**, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center «LEMT» of the BelOMO (Minsk, Belarus)
- Konstantin V. Yumashev**, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

The Journal is included in the following databases: Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, RISC, Lan, CyberLeninka, Socionet

ADDRESS:

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus
Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.</i> Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод.....	7
<i>Тимофеев А.М.</i> Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи.....	17

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И., Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н.</i> Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч.1. Скользящая граница акустического контакта.....	28
<i>Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.</i> The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on <i>in situ</i> measurements.....	40
<i>Козлов В.Л.</i> Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения.....	48
<i>Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.</i> Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors.....	56
<i>Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В., Бундюкова В.Д., Шумская Е.Е., Канюков Е.Ю.</i> Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn нанотрубок для создания элементов гибкой электроники.....	66
<i>Сенько С.Ф., Зеленин В.А.</i> Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур.....	74
<i>Лейко А.Г., Кандрачук И.В., Святненко А.О.</i> Особенности электроакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем.....	85
<i>Гусинский А.В.</i> Обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров многополюсников.....	96

CONTENTS

Measuring Instruments

- Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.*
Complex for monitoring of sewage optical density changes 7
- Timofeev A.M.*
Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel 17

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

- Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I., Lark K.G., Gill N.N.*
Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding 28
- Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.*
The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements 40
- Kozlov V.L.*
Methods of distance measurement's accuracy increasing based on the correlation analysis of stereo images 48
- Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.*
Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors 56
- Kadyrzhанov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V., Bundyukova V.D., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu.*
Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes arrays for design of flexible electronics elements 66
- Sianko S.F., Zelenin V.A.*
Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures 74
- Leiko A.G., Kandrachuk I.V., Sviatnenko A.O.*
Features of electromechanical acoustic energy conversion by cylindrical piezoceramic transducers with internal screens in composition of flat systems 85
- Gusinsky A.V.*
Generalized mathematical model of the calibration process and the direct measurement of the parameters multipole 96
-

УДК 681.785: 504.064

Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод

Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.

Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 23.09.2017

Принята к печати 12.02.2018

Статья содержит теоретические и практические технические предложения по созданию оптоэлектронного комплекса контроля аварийных сбросов загрязнений в сточные воды предприятий.

Показана актуальность задачи контроля сточных вод на наличие аварийных сгустков в сточных водах для сохранения водных источников. Приведена структурная схема комплекса контроля водной среды. Рассмотрена математическая модель комплекса оптоэлектронного контроля за водной средой на примере сточных вод предприятия. Комплекс контроля описывается случайной импульсной переходной функцией, содержащей две независимые составляющие, одна из которых определяет динамические свойства, другая учитывает стохастичность преобразования.

Приведен пример реализации оптоэлектронного комплекса контроля водной среды в системе сточных вод предприятия. Экспериментально показана эффективность комплекса при измерении изменений оптической плотности анализируемых сред. Для проведения эксперимента выбрано загрязнение воды растительным маслом. Анализ спектров поглощения воды и растительного масла показал, что в качестве излучателя целесообразно использовать лазеры с длинами волн в диапазоне 0,4–0,5 мкм, у которых минимальное поглощение излучения в водной среде и значительное поглощение в среде примеси, например фиолетовый лазер *STLL-MM-405-200-52-A* с длиной волны 0,405 мкм и мощностью 200 мВт. В качестве фотоприемника можно использовать, например, фотодиод типа *PDV-V400-46*.

Приведены результаты эксперимента исследования оптической плотности жидкой среды, содержащей сгустки из растительного масла. Они показывают функциональную связь загрязнения сточных вод с изменением оптической плотности водной среды при определенных длинах волн зондирующего лазерного излучения.

Ключевые слова: комплекс контроля, оптическая плотность, оптоэлектронный контроль загрязнения сточных вод, стохастическая зависимость.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Адрес для переписки:

Алексеев В.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: alekseevv@istu.ru

Address for correspondence:

Alekseev V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: alekseevv@istu.ru

Для цитирования:

Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.
Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 7–16
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

For citation:

Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.
[Complex for monitoring of sewage optical density changes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 7–16 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Complex for monitoring of sewage optical density changes

Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.

Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

Received 23.09.2017

Accepted for publication 12.02.2018

Abstract

Article contains theoretical and practical technical sentences on creation of an optoelectronic complex of monitoring of emergency discharge of pollution in sewage of the enterprises.

The relevance of the task of monitoring of sewage on existence of emergency clots in sewage for saving water sources is shown. The structural scheme of a complex of monitoring of the water environment is provided. The mathematical model of a complex of optoelectronic monitoring over the water environment on the example of sewage of the enterprise is considered. The complex of monitoring is described by the random impulse transition function containing two independent components, one of which defines dynamic properties, another considers stochasticity of conversion.

The example of implementation of an optoelectronic complex of monitoring of the water environment in the system of sewage of the enterprise is given. Experimentally the efficiency of a complex in case of measurement of changes of optical density of the analysable environments is shown. For carrying out an experiment water pollution is selected by vegetable oil. The analysis of absorption spectra of water and vegetable oil showed that as a source of radiation it is expedient to use lasers with lengths of waves in the range of 0,4–0,5 μm which have the minimum absorption of radiation in the water environment and the considerable absorption in the environment of impurity, for example, the violet STLL-MM-405-200-52-A laser with wavelength of 0,405 μm and 200 mW. As the photo-sensor element, it is possible to use, for example, the PDV-V400-46 photodiode.

Results of an experiment of a research of optical density of the liquid environment containing clots from vegetable oil are given. They show the functional connection of pollution of sewage with change of optical density of the water environment with certain lengths of waves of a probing laser radiation.

Keywords: control complex, optical density, optoelectronic control of pollution of sewage, stochastic dependence.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Адрес для переписки:

Алексеев В.А.
Ижевский государственный технический университет
имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия
e-mail: alekseevv@istu.ru

Address for correspondence:

Alekseev V.A.
Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: alekseevv@istu.ru

Для цитирования:

Алексеев В.А., Усольцев В.П., Юран С.И., Шульмин Д.Н.
Комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 7–16.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

For citation:

Alekseev V.A., Usoltcev V.P., Yuran S.I., Shulmin D.N.
[Complex for monitoring of sewage optical density changes].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 7–16 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-7-16

Введение

Для мониторинга загрязнения сточных вод промышленных предприятий используется широкий спектр приборов, ряд которых применяется в системах контроля. В основе их работы лежат различные физическо-химические методы (кондуктометрические, диэлькометрические, потенциометрические, оптические и др.) [1, 2]. Среди них большими возможностями обладают оптические методы, работающие в ультрафиолетовом, рентгеновском, ближнем инфракрасном и ИК-диапазонах [3–5]. Известны оптические датчики для мониторинга водной среды, позволяющие выявить изменение прозрачности и цвета, связанные с возможным загрязнением водной среды [6, 7]. Выпускаются высокоточные и надежные как приборы, предназначенные для лабораторных анализов проб, так и проточные приборы, устанавливаемые на контролируемых объектах [8]. Наибольшее распространение нашли методы измерения мутности водной среды [9–11].

Перспективными являются методы и приборы на основе использования источников излучения с разной длиной волны, в частности двухчастотные измерители прозрачности и мутности воды [12], системы контроля загрязнений сточных вод нефтепродуктами в результате аварийных залповых сбросов [13]. Используются приборы на основе селективного оптического абсорбционного метода с применением трех источников излучения с разной длиной волны, позволяющие производить измерения концентрации воды в нефти в диапазоне от 0,2 до 40 % с погрешностью не более 2 %. При этом цикл измерения составляет более 10 с [14].

Находят применение и оптоэлектронные устройства на основе элементов нарушенного полного внутреннего отражения, работающие в инфракрасном диапазоне, которые позволяют определять наличие воды и ряда загрязнений в нефти и нефтепродуктах [15].

В ряде быстротекущих аварийных ситуаций, сопровождающихся сбросом загрязняющих веществ в водную среду (залповые сбросы), описанные выше приборы не позволят вовремя зафиксировать прохождение аварийного сгустка загрязняющих веществ в зоне контроля, поскольку работают не в реальном масштабе времени. Это может повлечь за собой проникновение загрязняющих веществ в чистый водоем и существенное загрязнение дорогостоящих фильтров очистки.

Целью данной работы являлись разработка и испытание оптоэлектронного комплекса контроля загрязняющих веществ в сточных водах, работающего, в отличие от имеющихся, в реальном масштабе времени, который позволяет оперативно обнаруживать аварийные сбросы и тем самым существенно снижать их влияние на водную среду и фильтры очистки путем своевременного отведения загрязняющих веществ в отстойник.

Теоретический анализ

Основным требованием к выбираемым аппаратуре и методам является их применимость в широком интервале видов и концентраций загрязняющих веществ (элементов), включающих как следовые количества в незагрязненных объектах фоновых трендов, так и высокие значения концентраций в районах техногенного воздействия.

Для построения формализованной схемы комплекса контроля необходимо составить математическую формулировку задачи исследования с указанием искомых величин и оцениваемых зависимостей, описать характеристики процесса, систему параметров, определяющих процесс преобразования входного сигнала, зависимость между характеристиками комплекса и параметрами процесса преобразования с учетом влияющих факторов.

Для преобразования формализованной схемы в математическую модель все соотношения необходимо представить в аналитической форме. Выходной сигнал $y(t)$ связан с основными характеристиками комплекса контроля и действующим входным сигналом $x(t)$, имеющим случайный характер, интегральным соотношением:

$$y(t) = \int_{-\infty}^t g(t, \tau) x(\tau) d\tau,$$

где $g(t, \tau)$ – переходная функция комплекса контроля; τ – время контроля.

Комплекс контроля описывается случайной импульсной переходной функцией, содержащей две независимые составляющие, одна из которых определяет динамические свойства, другая учитывает стохастичность преобразования и представляет безынерционный преобразователь со случайным коэффициентом преобразования:

$$g_1(t, \tau) = g_0(t - \tau), \quad g_2(t, \tau) = k_0(t) \delta(t - \tau).$$

Используя метод канонических разложений, случайную функцию можно представить в виде суммы так называемых элементарных случайных функций; тогда переходная функция примет вид:

$$g(t, \tau) = \int_0^t g_1(t, \tau) g_2(t, \tau) d\tau = k_0(t) g_0(t - \tau),$$

где $g_0(t - \tau)$ – нормированная импульсная переходная функция комплекса контроля; $k(t)$ – случайный коэффициент преобразования, который в общем случае задается случайным образом и позволяет выразить случайную переходную функцию через неслучайную нормированную импульсную переходную функцию; $g_0(t - \tau)$ – дельта-функция;

$$\int_{-\infty}^{+\infty} \delta(t) dt = 1;$$

$$\int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \delta(t - \tau) dt = x(\tau).$$

В зависимости от выбранного измерительного параметра в комплексе контроля уточняется математическая модель комплекса контроля,

$$D_i = A \ln \frac{\int_{\lambda_{1m}}^{\lambda_{1n}} \Phi_{1\lambda}(\lambda) \tau_{1i}(\lambda) d\lambda}{\int_{\lambda_n}^{\lambda_m} \Phi_{\lambda}(\lambda) \tau_i(\lambda) d\lambda} = A \ln \int_{\lambda_{1m}}^{\lambda_{1n}} \Phi_{1\lambda}(\lambda) \tau_{1i}(\lambda) d\lambda - A \ln \int_{\lambda_m}^{\lambda_n} \Phi_{\lambda}(\lambda) \tau_i(\lambda) d\lambda,$$

ных диапазонов источника и приемника излучения; $\tau_{1i}(\lambda)$ – спектральная характеристика оптической защиты источника излучения от влияния помех в водной среде в оптическом тракте аппаратуры контроля, например, защитного стекла с заданной спектральной характеристикой; $\Phi_{1\lambda}(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока источника излучения; $\lambda_{1n}, \lambda_{1m}$ – пределы интегрирования (границы зон спектра источника); $\tau_i(\lambda)$ – спектральная характеристика оптической защиты приемника излучения от влияния водной среды; $\Phi_i(\lambda)$ – спектральная плотность светового потока, поступившего на приемник излучения; λ_n, λ_m – пределы интегрирования (границы зон спектра фотоприемника), A – коэффициент для перевода десятичных логарифмов в натуральные, равный 0,434.

Приняв, что оптическая защита источника и приемника излучения не изменяет их спектральные характеристики, значением $\tau_i(\lambda)$ можно пренебречь.

из множества возможных реализаций выбирается конкретная, соответствующая конкретному параметру, обеспечивающему наиболее существенные критерии идентификации с точки зрения увеличения доверительной вероятности принятия правильного решения. На основании фотометрического метода, базирующегося на законе Бугера–Ламберта–Бера, сравниваем оптические плотности исследуемой жидкости и контрольной, используемой в качестве образца. В качестве информативного параметра комплекса контроля выбираем динамику изменения оптической плотности как меры ослабления света прозрачными объектами. Она вычисляется как натуральный логарифм отношения интенсивности излучения, падающего на объект, I_{in} , к интенсивности излучения, прошедшего через него, I_{out} .

Во многих случаях оказывается полезным использовать такую величину, как спектральная плотность потока излучения.

С учетом частотных диапазонов источника и приемника излучения комплекса контроля загрязнений сточных вод и необходимости защиты источника излучения от помех получим:

где D_i – оптическая плотность с учетом частот-

Отличие предлагаемого комплекса контроля сточных вод заключается в целевой ориентации контроля на определенное вещество, попадающее в сточные воды при аварийной ситуации. Предварительно происходит настройка комплекса на данное вещество, заключающаяся в определении длины волны лазерного зондирующего излучения.

В отличие от всех известных зарубежных и российских разработок комплекс позволяет проводить измерения в реальном масштабе времени, что имеет значение для ликвидации запроектных аварийных ситуаций со сбросом загрязнений в сточные воды. Комплекс обнаруживает сгусток загрязнений, отслеживает его движение в сточной трубе и, открывая специальную заслонку в трубе, сбрасывает сгусток в отстойник.

Такой подход обеспечивает сохранность фильтров очистки системе сточных вод и уменьшает вероятность сброса загрязнений в водоемы.

Пример реализации оптоэлектронного комплекса

Разработан оптоэлектронный комплекс контроля сточных вод с управлением исполнительным устройством – заслонкой в сточной трубе [16]. Схема комплекса представлена на рисунке 1. В структурной схеме оригинальными элементами являются устройство преобразования и борьбы с помехами и исполнительное устройство, управляемое микроконтроллером. Первый элемент позволяет выделить полезный сигнал статистической обработкой данных с использованием априорных сведений о характере сигнала и эталона, полученного с использованием относительного описания [17] в виде отношения, заданного на множестве признаков или составляющих дискретных функционально-регрессионных зависимостей параметров зарегистрированных процессов (изменение оптической плотности водной среды при определенной длине волны излучения) и истинных параметров загрязнений (вида и степени загрязнений) с использованием аппарата теории вероятностей и математической статистики.

Математически это выражается следующим образом:

$$R_m(Q_1, Q_2, \dots, Q_m) = \varphi[R_j(Y_1, Y_2, \dots, Y_j)],$$

где R_m – идентификационные параметры изменения оптической плотности при определенной длине волны излучения, зарегистрированные оптоэлектронным комплексом контроля сточных вод (выходной сигнал); R_j – параметры загрязнения (входной сигнал); $Q_1, Q_2, \dots, Q_m$ – идентификационные параметры изменения оптической плотности; $Y_1, Y_2, \dots, Y_j$ – виды и уровни загрязнений; m – количество идентификационных параметров изменения оптической плотности; j – количество параметров загрязнения; φ – функционально-корреляционная зависимость, связывающая параметры регистрируемых процессов с параметрами загрязнения.

Созданная алгоритмическая база комплекса позволяет решать следующие задачи, обеспечивающие обнаружение аварийного сброса, выведение сгустка загрязнений из сточной трубы и принятие решений по дальнейшей фильтрации сточной жидкости:

– распознавание типа сгустка загрязнений для принятия решения об управлении заслонкой;

– слежение за движением сгустка по сточной трубе;

– управление заслонкой, расположенной между сточной трубой и отстойником, для выделенных загрязнений;

– прогнозирование новых сгустков в данной аварийной ситуации.

Все указанные задачи выполняются в реальном масштабе времени, что отличает данный комплекс от известных систем автоматического контроля сточных вод.

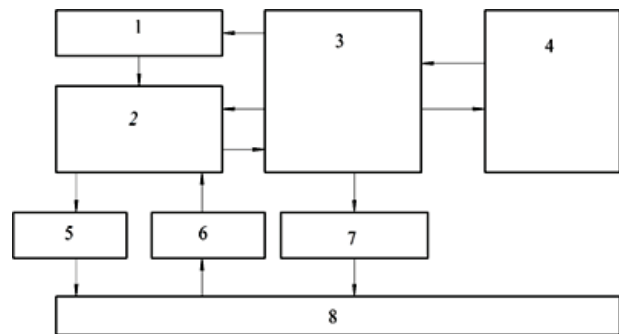


Рисунок 1 – Схема комплекса контроля: 1 – устройство управления; 2 – устройство преобразования и борьбы с помехами; 3 – микроконтроллер; 4 – компьютер; 5 – источник излучения; 6 – приемник излучения; 7 – исполнительное устройство; 8 – гидросистема

Figure 1– Scheme of a complex of control: 1 – control device; 2 – device of transformation and fight against hindrances; 3 – microcontroller; 4 – computer; 5 – radiation source; 6 – the receiver of radiation; 7 – actuating device; 8 – hydrosystem

При включении комплекса контроля микроконтроллер 3 по заданной программе настраивает устройство управления 1. С устройства управления командный сигнал поступает на устройство преобразования и борьбы с помехами 2, задавая выходной ток источника излучения 5; туда же поступает тактовый сигнал, который модулирует выходной ток излучателя. В результате на излучателе формируются импульсы с определенной частотой (4000 Гц) и стабильной амплитудой тока. Модулирующее излучение, пройдя водную среду гидросистемы 8, поступает на приемник излучения 6. Ток с приемника излучения поступает на устройство преобразования и борьбы с помехами, коэффициент преобразования которого изменяется устройством управления. С выхода устройства преобразования и борьбы с помехами преобразованный сигнал поступает в микроконтроллер. Оцифрованный сигнал служит для управления коэффициентом преобразования через устрой-

ство управления. Процесс регулировки продолжается до тех пор, пока сигнал не установится в номинальное значение. Оцифрованный сигнал передается в персональный компьютер 4, после обработки которого осуществляется мониторинг и автоматическое управление исполнительным устройством 7.

Комплекс контроля позволяет:

- задавать допустимое отклонение уровня информативного сигнала;
- задавать время аварийной задержки;
- задавать время сброса после аварийного включения;
- задавать время между циклами автоподстройки;
- перестраивать регулируемые источники и приемники оптического излучения, работающие в ультрафиолетовой (менее 0,4 мкм), видимой (0,40–0,72 мкм), ближней и средней инфракрасной (0,72–20 мкм), длинноволновой (более 20 мкм) областях спектра электромагнитного излучения;
- передавать данные в цифровом виде в компьютер;
- вырабатывать команды управления для разделения и утилизации потоков жидкости на выходе.

Для проверки адекватности полученных аналитических выражений исследуемому процессу проведено сравнение значений сигналов на выходе комплекса и численных значений, полученных в результате расчетов при тех же входных воздействиях. В программе и методике эксперимента сформулированы требования к методу, аппаратуре и условиям проведения эксперимента, чувствительности и порогу срабатывания, произведен выбор исследуемых точек по диапазону измерений, числу измерений в точке, получению представительной выборки, установлено факторное пространство, построен план эксперимента для оценки функции влияния.

Для проведения эксперимента выбрано загрязнение воды растительным маслом. Анализ спектров поглощения воды [18] (рисунок 2) и растительного масла «Олейна» [19] (рисунок 3) показал, что в качестве излучателя целесообразно использовать лазеры с длинами волн в диапазоне 0,4–0,5 мкм, у которых минимальное поглощение излучения в водной среде и значительное поглощение в среде примеси, например фиолетовый лазер *STLL-MM-405-200-52-A* с длиной волны 0,405 мкм и мощностью 200 мВт.

В качестве фотоприемника можно использовать, например, фотодиод типа *PDV-V400-46*.

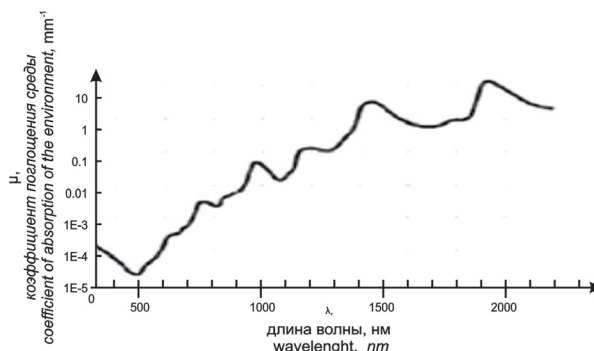


Рисунок 2 – Спектр поглощения воды [18]

Figure 2 – Absorption spectrum of water [18]

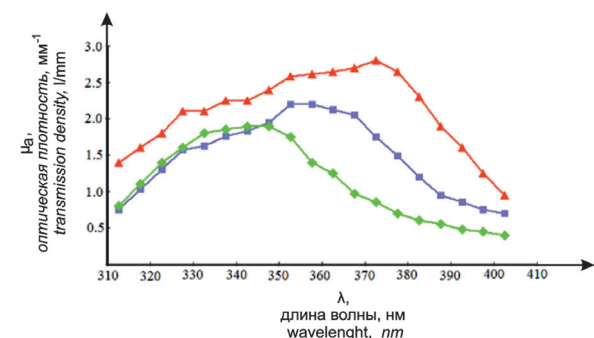


Рисунок 3 – Спектр поглощения растительного масла: ♦ – холодное масло; ■ – масло после тепловой обработки; Δ – осадок после тепловой обработки масла [19]

Figure 3 – Absorption spectrum of vegetable oil: ♦ – cold vegetable oil; ■ – oil after thermal treatment; Δ – a sediment after thermal treatment of oil [19]

Вследствие того, что во время эксперимента режимы работы комплекса остаются неизменными, для оценки неопределенности показаний в статическом режиме и нормальных условиях эксплуатации для однопараметрического сигнала получим:

$$y = k_0 x \quad (1)$$

где k_0 – реализация случайного коэффициента преобразования.

При изменении входного сигнала на величину Δx выходной сигнал изменится на величину Δy с учетом новой реализации случайного коэффициента преобразования k_1 , в общем случае,

учитывающем возможность изменения условий эксперимента (загрязнение оптики, нелинейные процессы в водной среде, динамические изменения потока сточных вод и др.):

$$y + \Delta y = k_1(x + \Delta x), \quad (2)$$

где k_1 – последующая реализация случайного коэффициента преобразования.

Разделив почленно полученные выражения (2) и (1), получим выражение для расчета относительного изменения выходного сигнала:

$$\frac{\Delta y}{y} = \frac{k_1(x + \Delta x)}{k_0 x} - 1. \quad (3)$$

В эксперименте входным сигналом является степень загрязнения водной среды растительным маслом, выходным сигналом – оптическая плотность водной среды. В статическом режиме и нормальных условиях эксплуатации начальными (исходным) считаем отсутствие загрязнений водной среды (содержание растительного масла нуль процентов) и соответствующее этим условиям значение оптической плотности. Изменение входного сигнала производится введением загрязнения на заданную относительную величину от исходного (в процентах), при этом определяется относительное изменение в процентах выходного сигнала от исходного, полученного при отсутствии загрязнения.

Для экспериментального определения зависимости относительного изменения выходного сигнала от относительного изменения входного сигнала проведен эксперимент при загрязнении воды растительным маслом в соотношении 0 %, 60 %, 100 %. В эксперименте использовались в качестве источника излучения полупроводниковый лазер с длиной волны $\lambda = 0,619$ мкм, в качестве фотоприемника – фотодиод типа ФД-К-155, диапазон спектральной чувствительности которого 0,4–1,1 мкм, максимальная спектральная чувствительность в области 0,75–0,85 мкм, расстояния между защитными окнами источника излучения и фотоприемника 15 мм.

Полученные графики изменения оптической плотности водной среды приведены на рисунке 4.

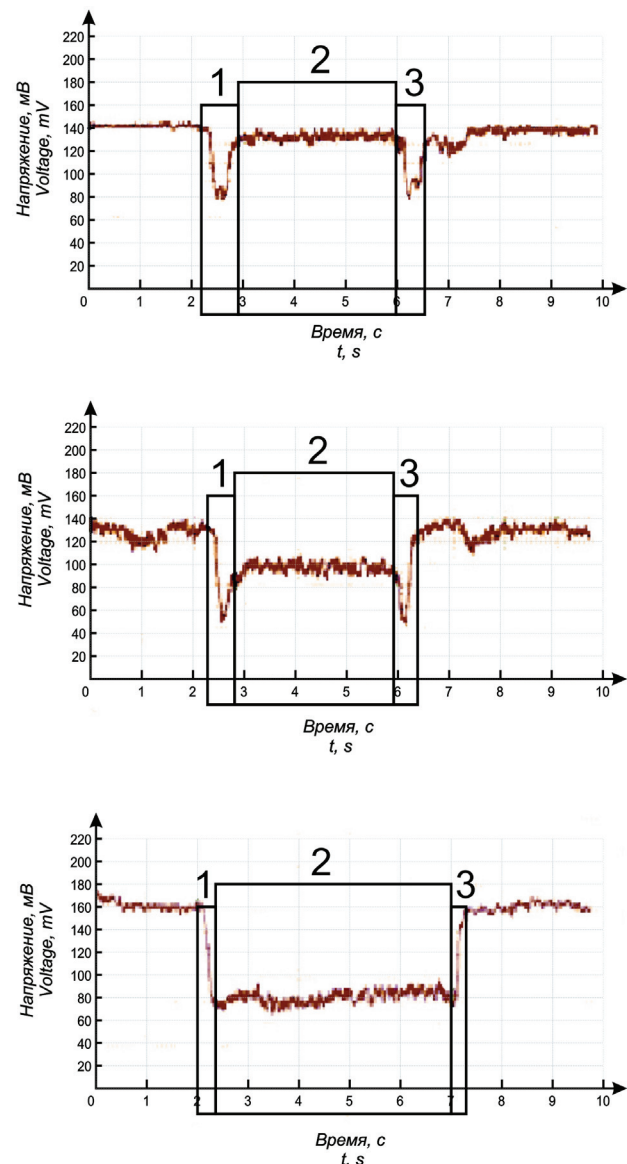


Рисунок 4 – Графики изменения оптической плотности водной среды при загрязнении воды растительным маслом в соотношении: a – 0 %; b – 60 %; c – 100 %; 1 – начало прохождения через оптический тракт потока водной среды, загрязненной маслом; 2 – прохождение потока загрязнения через оптический тракт; 3 – окончание прохождения потока масла через оптический тракт

Figure 4 – Schedules of change of optical density of the water environment at water pollution by vegetable oil in the ratio: a – 0 %; b – 60 %; c – 100 %; 1 – the beginning of passing through an optical path of a stream of the water environment polluted by oil; 2 – passing of a stream of pollution through an optical path; 3 – the end of passing of a stream of oil through an optical path

На графиках область, обозначенная цифрой 1, соответствует моменту начала прохождения через оптический тракт потока водной среды, загрязненной маслом, и связанному с этим изменением коэффициентов пропускания, отра-

жения и поглощения жидкой среды. Область 2 соответствует прохождению потока загрязнения через оптический тракт. Среднее значение оптической плотности при прохождении потока масла через оптический тракт выше, чем при прохождении потоков чистой воды, соответственно, уровень сигнала снижается. Область 3 соответствует моменту окончания прохождения потока масла через оптический тракт.

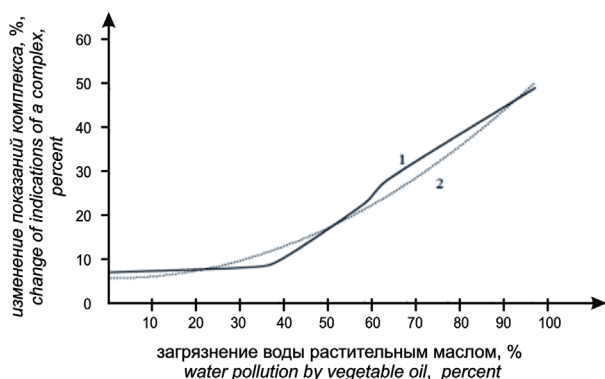
Результаты и их обсуждение

В результате обработки приведенных кривых по выражениям (1)–(3) рассчитана зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом, график которой приведен на рисунке 5.

Для определения аналитических выражений применен метод интерполяции и экстраполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия:

$$F = \sum_{i=1}^n [Y_i - y(t_i)]^2 \rightarrow \min,$$

где F – минимизируемая функция; Y_i – эмпирические точки статистической зависимости; $y(t_i)$ – аналитическая функциональная зависимость.



ности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 5 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом (рисунок 5) с достаточной степенью точности аппроксимируется полиномиальным выражением второго порядка $y = 0,0047x^2 - 0,0167x + 5,7737$.

В диапазоне от 30 % до 100 % (рисунок 6) зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом с большой степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью $y = 0,6304x - 13,485$.

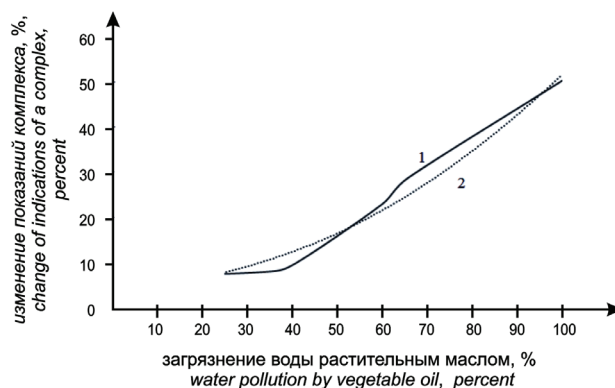


Рисунок 6 – Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом в диапазоне от 30 % до 100 %: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 6 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil in the range from 30 % to 100 %: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

В диапазоне от 0 % до 35 % (рисунок 7) зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом с большой степенью точности аппроксимируется линейной зависимостью $y = 0,0364x + 7,1$.

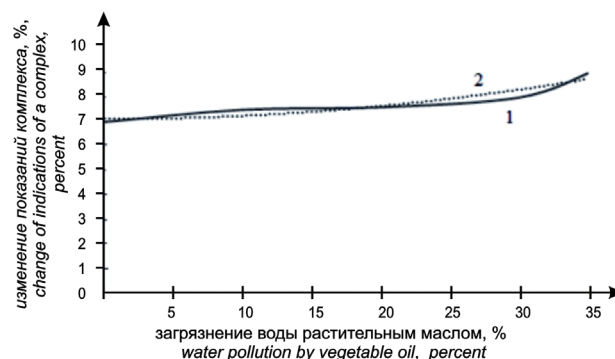


Рисунок 7 – Зависимость изменения оптической плотности водной среды от степени ее загрязнения растительным маслом в диапазоне от 0 % до 35 %: 1 – экспериментальная кривая; 2 – расчетная кривая

Figure 7 – Schedule of dependence of change of optical density of the water environment on extent of its pollution by vegetable oil in the range from 0 % to 35 %: 1 – experimental curve; 2 – calculated curve

Повышение эффективности оптоэлектронного контроля загрязнения сточных вод, повы-

шение достоверности, объективности, оперативности, снижение длительности процедуры контроля, исключение влияния методики и аппаратуры контроля на санитарно-бактериологические свойства контролируемых проб обеспечивается учетом стохастической зависимости между видом и степенью загрязнения и реакцией экосистемы. В результате анализа спектров поглощения воды как основного компонента сточных вод и загрязнителей в виде масел, нефти и нефтепродуктов выбран рабочий диапазон частот от 0,25 до 0,60 мкм. В этом диапазоне вода достаточно прозрачна, что позволяет оптическому излучению проникать на большую глубину, а следы загрязнений, даже небольшого размера, хорошо различимы на фоне естественных природных трендов.

Проведение натурных экспериментов на специализированной экспериментальной установке, разработанной на основе имитационной модели поступления загрязнения сточных вод на очистные сооружения, позволяющей имитировать любое из распространенных загрязнений, вид, содержание и концентрацию загрязнений, влияние факторов, снижающих достоверность контроля, позволило экспериментально обосновать правильность выбора точности, чувствительности, диапазона измерения, быстродействия, функциональных возможностей комплекса контроля изменений оптической плотности сточных вод.

Заключение

В данной работе вместо традиционных приборов измерения мутности жидкости предлагается оптико-электронный комплекс контроля изменений оптической плотности сточных вод промышленного предприятия, позволяющий выявлять аварийные сбросы загрязнений в виде сгустков в сточных водах.

В отличие от имеющихся аналогов комплекс работает в реальном масштабе времени и позволяет управлять исполнительным устройством в сточной трубе для сброса сгустка загрязнений для утилизации. Разработанный комплекс контроля сточных вод и промышленных стоков, использующий в качестве информативного параметра изменение оптической плотности, достаточно перспективен в комплексном обеспечении стабильности функционирования экосистемы, даже при экспресс-контроле состава жидких сред

с близкими оптическими характеристиками, например загрязненной воды, оптическая плотность которой 0,40 и нерафинированного подсолнечного масла, оптическая плотность которого 0,36.

Список использованных источников

1. Казин, В.Н. Физико-химические методы исследования в экологии и биологии / В.Н. Казин, Г.А. Урванцева. – Ярославль : Яросл. гос. ун-т, 2002. – 173 с.
2. Hussain, S. Instrumental methods used for environmental monitoring / S. Hussain, M. Farooqui // Journal of Industrial Pollution Control. – 2005. – Vol. 21, no. 2. – P. 273 – 276.
3. Bhargava, R. Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation / R. Bhargava // Applied Spectroscopy. – 2012. – Vol. 66, no. 10. – P. 1091–1120. doi: 10.1366/12-06801
4. Mizaikoff, B. Infrared optical sensors for water quality monitoring / B. Mizaikoff // Water Science and Technology. – 2003. – Vol. 47, no. 2. – P. 35–42.
5. O'Toole, M. Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices / M. O'Toole, D. Diamond // Sensors. – 2008. – No. 8. – P. 2453–2479. doi: 10.3390/s8042453
6. Murphy, K. A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring / K. Murphy [et al.] // Talanta. – 2015. – Vol. 132. – P. 520–527.
7. Колориметр портативный Hach DR 900 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.ecoinstrument.ru>. – Дата доступа: 10.11.2017.
8. Оптические датчики контроля и мониторинга различных жидкостей, питьевой воды и сточных вод «Optek» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://optek.com>. – Дата доступа: 05.11.2017.
9. Фетисов, В.С. Бесконтактные поточные датчики мутности жидких сред / В.С. Фетисов, Е.В. Цих // Датчики и системы. – 2004. № 7. – С. 61–65.
10. Измерители и датчики мутности Mettler Toledo [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.mt.com>. – Дата доступа: 07.11.2017.
11. Датчик мутности VisoTurb 700 IQ [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.ecoinstrument.ru/catalog/datchiki_iq_sensor_net/datchikmutnostivisoturb700iq. – Дата доступа: 10.11.2017.
12. Козлов, В.Л. Прозрачномеры-газоанализаторы на двухволновом полупроводниковом лазере / В.Л. Козлов, М.М. Кугейко // Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2 (3). – С. 5–12.
13. Алексеев, В.А. Контроль загрязнений сточных вод и промышленных стоков с использованием двухчастотного лазерного зондирования / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, С.И. Юран // Безопасность в техносфере. – 2017. – № 1. – С. 3–9. doi: 10.12737/article_5901928bac1f44.76816878
14. Кабанов, Д.М. Прибор на основе GaInAsSb светодиодов для измерения содержания воды в неф-

ти / Д.М. Кабанов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8. – № 2. – С. 142–150.

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-142-150

15. Рахимов, Н.Р. Оптоэлектронные методы измерения и контроля технологических параметров нефти и нефтепродуктов / Н.Р. Рахимов [и др.] // Автоматика и программная инженерия. – 2015. – № 2 (12). – С. 85–108.

16. Патент №153362 РФ на полезную модель. МПК G01N15/06. Устройство устранения аварийного выброса / В.А. Алексеев, Н.А. Девятков, С.И. Юран, В.П. Усольцев. – Заявка на полезную модель 2014141487. – Дата подачи заявки: 14.10.2014. Опубликовано: 20.07.2015. Бюл. № 20.

17. Алексеев, В.А. Автоматизация регистрации и обработки измерительной информации при испытаниях техники на ударное воздействие: монография / В.А. Алексеев, В.И. Заболотских. – Ижевск : Изд-во ИжГТУ, 2006. – 184 с.

18. Niemz, M.H. Laser – Tissue Interactions: Fundamentals and Applications / M.H. Niemz / – Berlin : Springer, 1996. – 302 p.

19. Перевозников, Е.Н. Влияние тепловой обработки на физические характеристики и полимеризацию растительных масел / Е.Н. Перевозников, В.В. Слугин // Международный научно-исследовательский журнал. – 2016. – № 3 (45). – Ч. 3. – С. 94–96.

References

1. Kazin V.N., Urvantseva G.A. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya v ekologii i biologii* [Physical and chemical methods of research in ecology and biology]. Yaroslavl, Yaroslavl State University, 2002, 173 p. (in Russian).

2. Hussain S. Farooqui M. Instrumental methods used for environmental monitoring. *Journal of Industrial Pollution Control*, 2005, vol. 21, no. 2, pp. 273–276.

3. Bhargava R. Infrared Spectroscopic Imaging: The Next Generation. *Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 66, no. 10, pp. 1091–1120. **doi:** 10.1366/12-06801

4. Mizaikoff B. Infrared optical sensors for water quality monitoring. *Water Science and Technology*, 2003, vol. 47, iss. 2, pp. 35–42.

5. O'Toole M., Diamond D. Absorbance Based Light Emitting Diode Optical Sensors and Sensing Devices. *Sensors*, 2008, no. 8, pp. 2453–2479. **doi:** 10.3390/s8042453

6. Murphy K., Heery B., Sullivan T., Zhang D., Paludetti L., Lau K.T., Diamond D., Costa E., O'Connor N., Regan F. A low-cost autonomous optical sensor for water quality monitoring. *Talanta*, 2015, vol. 132, pp. 520–527. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2014.09.045>

7. *Kolorimetr portativnyj Hach DR 900* [Portable colorimeter Hach DR 900]. Available at: <http://www.ecoinstrument.ru> (accessed: 10.11.2017) (in Russian).

8. *Opticheskie datchiki kontrolya i monitoringa razlichnykh zhidkostei, pit'evoi vody i stochnykh vod «Optek»* [Optical sensors of control and monitoring of various liquids, drinking water and Optek sewage]. Available at: <http://optek.com> (accessed: 05.11.2017) (in Russian).

9. Fetisov V.S., Cih E.V. [Contactless in-line sensors of turbidity of liquid media]. *Sensors & Systems*, 2004, no. 7, pp. 61–65 (in Russian).

10. *Izmeriteli i datchiki mutnosti Mettler Toledo* [Measuring instruments and sensors of turbidity Mettler Toledo]. Available at: <https://www.mt.com> (accessed: 07.11.2017) (in Russian).

11. *Datchik mutnosti VisoTurb 700 IQ* [Turbidity sensor VisoTurb 700 IQ]. Available at: http://www.ecoinstrument.ru/catalog/datchiki_iq_sensor_net/datchikmutnostivisoturb700iq (accessed: 10.11.2017) (in Russian).

12. Kozlov V.L., Kugejko M.M. [Transparency meters and gas analyzers based on two-wavelength semiconductor lasers]. *Devices and Methods of Measurements*, 2011, no. 2 (3), pp. 5–12 (in Russian).

13. Alekseev V.A., Usol'cev V.P., Yuran S.I. [Waste-waters Pollution Control Using Two-Frequency Laser Sounding]. *Bezopasnost' v tekhnosfere* [Safety in technosphere], 2017, no. 1, pp. 3–9 (in Russian).

doi: 10.12737/article_5901928bac1f44.76816878

14. Kabanov D.M., Lebiadok Y.V., Shpak P.V., Zhuk S.M., Stashkevich S.P. [Device based on GaInAsSb LEDs for measurement of water concentration in oil]. *Devices and Methods of Measurements*, 2017, vol. 8, no. 2, pp. 142–150 (in Russian).

doi: 10.21122/2220-9506-2017-8-2-142-150

15. Rahimov N.R., ZHmud' V.A., Trushin V.A., Reva I.L., Satvoldiev I.A. [Optoelectronic Measurement and Control of Technological Parameters of Crude Oil and Petroleum Products]. *Automatics & Software Engineering*, 2015, no. 2 (12), pp. 85–108 (in Russian).

16. Alekseev V.A., Devyatov N.A., Yuran S.I., Usoltsev V.P. *Ustroistvo ustraneniya avariinogo vybrosa* [The device of elimination of emergency emission]. Patent RF, no. 153362, 2015.

17. Alekseev V.A., Zabolotskih V.I. *Avtomatizatsiya registratsii i obrabotki izmeritel'noi informatsii pri ispytaniyakh tekhniki na udarnoe vozdeistvie: monografiya* [Automation of registration and processing of measuring information at tests of the equipment for shock influence]. Izhevsk, Izhevsk State Technical University, 2006, 184 p. (in Russian).

18. Niemz M.H. Laser – Tissue Interactions: Fundamentals and Applications. Berlin, Springer Publ., 1996, 302 p.

19. Perevoznikov E.N., Slugin V.V. [Influence of thermal treatment on physical characteristics and polymerization of vegetable oils]. *International Research Journal*, 2016, no. 3 (45), part 3, pp. 394–96 (in Russian).

УДК 621.383

Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи

Тимофеев А.М.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 17.11.2017

Принята к печати 05.02.2018

При передаче информации по волоконно-оптическим каналам связи необходимо обеспечить ее конфиденциальность и определять подлинность источника информации. Абсолютная скрытность информации от доступа третьих лиц, которым она не предназначена, может быть реализована путем использования квантово-криптографических систем, которые предполагают передачу каждого бита при помощи маломощных оптических сигналов, содержащих от десятка до отдельных фотонов излучения, однако характеризуются большим количеством ошибок вследствие эффекта деполяризации оптического излучения. Поэтому цель работы – создать устройство для передачи и приема конфиденциальных данных, которое бы обеспечивало абсолютную скрытность передаваемой информации, присущую квантово-криптографическим системам связи, и вместе с тем имело малое количество таких ошибок.

Предложено устройство для систем квантово-криптографической связи, в котором в качестве приемного модуля использовался счетчик фотонов. Продемонстрирована возможность применения кремниевых лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов для систем передачи конфиденциальной информации, определяющих подлинность источника передаваемой информации.

Разработанная система волоконно-оптической связи, содержащая в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе лавинного фотоприемника, позволяет обнаружить несанкционированный доступ к информации и нарушение ее целостности и ускорить процесс обмена информацией, в сравнении с известными квантово-криптографическими системами связи.

Ключевые слова: счетчик фотонов, система конфиденциальной передачи информации, лавинный фотоприемник.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

Адрес для переписки:

Тимофеев А.М.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tamvks@mail.ru

Address for correspondence:

Timofeev A.M.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tamvks@mail.ru

Для цитирования:

Тимофеев А.М.
Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 17–27.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

For citation:

Timofeev A.M.
[Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 17–27 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel

Timofeev A.M.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus

Received 17.11.2017

Accepted for publication 05.02.2018

Abstract

When transferring data over optical fiber communication channels, it is required to provide data security and the authenticity of their source. To limit the access to the data for a third party, there can be applied quantum-cryptographical systems which are supposed to transfer every data bit by means of low power optical signals containing radiation photons the number of which could be in the range from 10 to 1, however, are far from being perfect and suffer from shortcomings, the main of which being a large number of errors due to the depolarization effect of optical radiation. The aim of this work was, therefore, to create device for sending and receiving confidential data which could provide complete security of transferred data, inherent to quantum-cryptographical communication systems at the same time could have a low number of such errors.

A device for quantum-cryptographic communication system with a photon counter applied as a receiving module has been proposed. The possibility to use silicon avalanche photodetectors operating in the photon counting mode for confidential information transmission systems and defining authenticity of the source of transmitted information has been shown.

I develop modern optical fiber communication system incorporating avalanche photodetector photon counter as a receiving module, that allow to detect unauthorized access to information and violation of its integrity and speed up the exchange of information in comparison with well-known quantum-cryptographical communication systems.

Keywords: photon counter, confidential information transmission system, avalanche photodetector.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

Адрес для переписки:

Тимофеев А.М.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tamvks@mail.ru

Address for correspondence:

Timofeev A.M.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tamvks@mail.ru

Для цитирования:

Тимофеев А.М.
Устройство для передачи и приема двоичных данных по волоконно-оптическому каналу связи.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 17–27.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

For citation:

Timofeev A.M.
[Device for binary data transmitting and receiving over a fiber-optic communication channel].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 17–27 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-17-27

Введение

В настоящее время к аппаратно-программным комплексам, используемым для систем защиты информации, предъявляют ряд требований, включая как обеспечение конфиденциальности передаваемой информации, так и определение подлинности их источника [1, 2]. Для выполнения этих требований целесообразно применять криптографические преобразования информации, которые используют шифрование и расшифрование данных, механизмы взаимной идентификации и аутентификации пользователей и данных [1–4]. Однако в силу открытости большинства криптографических алгоритмов их криптостойкость зависит от вычислительных возможностей злоумышленника, что является угрозой информационной безопасности криптосистем. Абсолютную конфиденциальность передаваемой информации обеспечивают системы связи, использующие принципы квантовой криптографии [5]. Такие системы требуют достаточно сложной процедуры согласования базисов, используемых для кодирования передаваемых символов и их приема, и характеризуются появлением большого количества ошибок вследствие эффекта деполяризации оптического излучения в волоконно-оптических линиях связи, что ограничивает область практического применения квантово-криптографических систем связи. В этой связи представляет интерес разработать приемо-передающее устройство для систем квантово-криптографической связи, которое упрощает известные устройства за счет устранения процедуры согласования базисов, в которых переданы и приняты символы, обеспечивает определение подлинности источника передаваемой информации, конфиденциальность данных, а также уменьшает ошибку передачи данных, связанную с деполяризацией оптического излучения.

Сущность функционирования системы связи

Сущность функционирования системы квантово-криптографической связи заключается в том, что на передающей стороне данные, подлежащие передаче, смешивают с идентификационной информацией отправителя, зашифровывают данные и идентификационную информацию отправителя на открытом криптографическом

ключе отправителя, кодируют и передают по незащищенному волоконно-оптическому каналу связи на одной длине волны шифртекст при помощи оптических импульсов слабой мощности, которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов. На принимающей стороне декодируют оптические импульсы слабой мощности посредством работающего в режиме счета фотонов приемника, расшифровывают полученный шифртекст на секретном ключе получателя, выделяют идентификационную информацию отправителя и определяют подлинность принятых данных и их отправителя.

Формирование предельно слабого оптического излучения осуществляется с помощью источника одиночных фотонов, полученного путем ослабления оптических импульсов. Такие источники позволяют получить направленный поток фотонов на длинах волн, используемых для всех окон прозрачности волоконно-оптических линий связи, и не требуют ультравысокого вакуума, экстремально низких температур и наличия дорогостоящих искусственных кристаллов и лазеров [5].

Для зашифровывания на открытом криптографическом ключе отправителя смеси данных, подлежащих передаче, и идентификационной информации отправителя, а также их последующего расшифровывания на секретном криптографическом ключе получателя могут быть использованы асимметричные алгоритмы, описанные в [3, 4].

Регистрация предельно слабого оптического излучения выполняется с помощью приемного модуля, функционирующего в режиме счета отдельных фотонов. Этот режим регистрации позволяет обеспечить лучшую пороговую чувствительность в сравнении с другими [6]. При этом счетчик фотонов целесообразно выполнять на базе лавинных фотодиодов (ЛФД), т.к. эти фотоприемники имеют высокий квантовый выход, широкий диапазон спектральной чувствительности, включающий окна прозрачности оптического кабеля, низкие напряжения питания, обладают высоким коэффициентом умножения фотоносителей, имеют небольшие габариты (несколько миллиметров в диаметре) и вес (несколько грамм). Следует также отметить, что кремниевые ЛФД позволяют реализовывать режим счета фотонов при комнатных температурах для первого и второго окон прозрачности оптического кабеля и имеют лучшую пороговую чув-

онная информация отправителя, криптографические ключи), представляется в виде двоичных кодовых слов, состоящих из символов «0» и «1».

Структурная схема и описание работы приемо-передающего устройства

Квантово-криптографическая система связи содержит два приемо-передающих устройства, одно из которых устанавливается на стороне отправителя данных, второе – на стороне получателя данных. Структурная схема приемо-передающего устройства для систем квантово-криптографической связи представлена на рисунке 1.

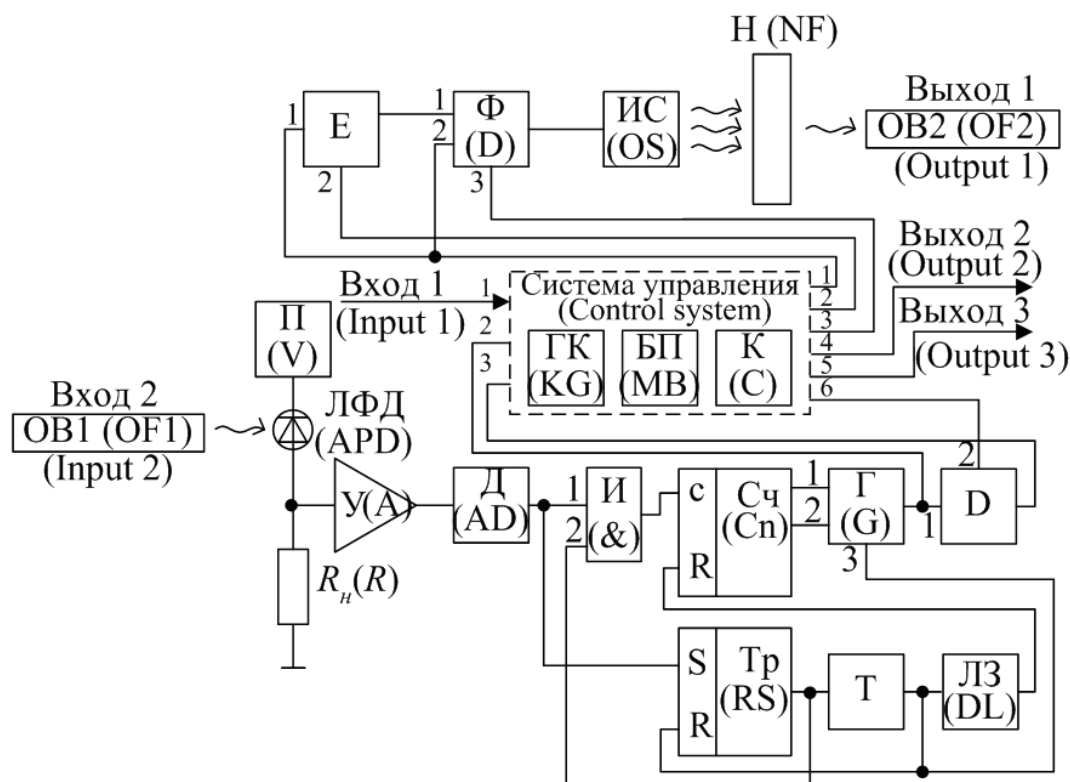


Figure 1 – Structural diagram of the transceiver for cryptographic communication systems: OF1/OF2 – input/output optical fiber; E/D – data encryption/decryption unit; V – constant voltage source; APD – avalanche photodiode; R – resistor; A – amplifier; D – data shaper; AD – amplitude discriminator; KG – cryptographic key generator; & – logical element «AND»; OS – optical signal source; MB – memory block; NF – neutral filter; C – comparator; Cn – pulse counter; RS – RS-trigger; G – square wave generator; T – timer; DL – delay line

Приемо-передающее устройство содержит два входа и три выхода. Первый вход подключен к источнику данных, подлежащих передаче по волоконно-оптическому каналу связи. Второй вход и первый выход устройства соединены соответственно с приемным оптическим волокном ОВ1 и передающим оптическим волокном ОВ2. Второй выход устройства подключен к приемнику данных. Третий выход приемо-передающего устройства является сигнальным и используется для индикации наличия злоумышленника, осуществляющего несанкционированный съем информации, передаваемой по волоконно-оптическому каналу связи, и/или навязывающего ложные данные.

Каждое приемо-передающее устройство содержит систему управления, блоки зашифрования и расшифрования, передающий и приемный модули и работает в четырех режимах: передачи открытого криптографического ключа, приема открытого криптографического ключа, передачи шифртекста и приема шифртекста. Причем при построении квантово-криптографической системы связи необходимо приемо-передающие устройства соединить таким образом, чтобы передающий модуль отправителя через первый выход устройства был подключен ко второму входу приемного модуля устройства получателя. Переключение между режимами работы приемо-передающих устройств осуществляется посредством их систем управления.

На стороне отправителя данных приемо-передающее устройство последовательно работает в режимах приема открытого криптографического ключа и передачи шифртекста.

На стороне получателя данных приемо-передающее устройство последовательно работает в режимах передачи открытого криптографического ключа и приема шифртекста.

До начала передачи данных счетчики импульсов Сч, RS-триггеры Тр и внешние выходы систем управления приемо-передающих устройств отправителя и получателя сбрасывают в нулевое состояние и записывают в блоки памяти БП (рисунок 1) блоки данных для подстановки в виде двоичных кодовых слов, которые являются долговременными секретными элементами, общими для отправителя и получателя данных. Блоки памяти БП, а также генераторы ключей ГК и компараторы К реализуются в системах управления, построенных на базе микроконтроллеров MCS-51, программистская и схемотехническая

модели которых наиболее предпочтительны для осуществления обработки данных, передачи управляющих сигналов и выполнения логических и арифметических операций в режиме реального времени [9].

Количество блоков данных для подстановки равно числу бит идентификационной информации отправителя IDA , длина которой, в свою очередь, определяется по аналогии с выбором длины имитовставки¹. Каждый блок данных для подстановки содержит $(\log_2 n + 1)$ двоичных разрядов, где n – количество двоичных разрядов данных, подлежащих передаче по волоконно-оптическому каналу связи. Причем старший бит первого блока данных для подстановки содержит первый бит IDA , старший бит второго блока данных для подстановки – второй бит IDA и т.д. Остальные биты блоков данных для подстановки образуют кодовые слова, которые используются для определения порядка смешивания данных, подлежащих передаче по волоконно-оптическому каналу связи, и идентификационной информации отправителя IDA следующим образом. Кодовое слово первого блока данных для подстановки определяет номер бита данных, подлежащих передаче, после которого подмешивается первый бит IDA , кодовое слово второго блока данных для подстановки – второй бит IDA и т.д.

Следует отметить, что для выполнения криптографических преобразований информации при формировании шифртекста из смеси данных и идентификационной информации отправителя и последующего обратного преобразования информации при выделении из шифртекста смеси данных и идентификационной информации отправителя целесообразно применять в качестве алгебраической структуры поля Галуа $GF(2^n)$ с множеством 2^n элементов, что позволяет использовать все целые числа в диапазоне от 0 до $2^n - 1$ и реализовывать необходимые криптографические операции на полиномах [2–4].

Затем одновременно приемо-передающие устройства на сторонах отправителя и получателя данных переходят соответственно в режимы приема и передачи открытого криптографического ключа, который будет использован для получения шифртекста из смеси данных и идентификационной информации отправителя.

¹ Системы обработки информации. Защита криптографическая. Алгоритм криптографического преобразования: ГОСТ 28147-89. – Введ. 01.07.90. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1996. – 26 с.

Сущность функционирования прямо-передающего устройства на стороне получателя данных в режиме передачи открытого криптографического ключа заключается в следующем. Генератор ключей ГК (рисунок 1) вырабатывает открытый и секретный криптографические ключи в виде двоичных кодовых слов. Условия, которым должны соответствовать эти криптографические ключи, определяются выбранным асимметричным алгоритмом и реализуются посредством программного обеспечения системы управления. Следует отметить, что такой выбор зависит от криптографических требований, предъявляемых непосредственно к системе квантово-криптографической связи. При этом целесообразно использовать алгоритмы, для которых длина шифртекста не превышает длины зашифровываемых данных, поскольку в противном случае при прочих равных условиях передачи и приема не удастся обеспечить максимально возможную пропускную способность канала связи [10]. Секретный криптографический ключ получателя передается через шестой выход системы управления на второй вход блока расшифрования D . Одновременно на первый выход системы управления побитно передается открытый криптографический ключ, на третий выход – логическая единица.

Сигнал с первого выхода системы управления поступает на первый вход блока зашифрования данных E и на второй вход формирователя данных Φ . Сигнал с третьего выхода системы управления поступает на третий вход формирователя данных Φ . Первый и второй входы формирователя данных Φ являются информационными, а третий – управляющим.

Формирователь Φ , источник оптического сигнала ИС и нейтральный светофильтр H образуют передающий модуль устройства, который работает в режиме асинхронной передачи информации. Такой режим не требует наличия дополнительной линии связи для передачи и приема синхросигналов, что в ряде случаев оказывается более предпочтительным, чем организация режима синхронной передачи информации.

Передающий модуль устройства функционирует следующим образом. Формирователь Φ кодирует поступающие на его информационные входы импульсы, которые представляют собой двоичную последовательность, таким образом, что символам «0» и «1» соответствуют прямоугольные импульсы длительностью Δt и напряжением U_1 и U_2 соответственно ($U_1 < U_2$). Причем между каждой парой символов находится так называемый защитный временной интервал, в течение которого сигнал на выходе формирователя Φ отсутствует, как показано на рисунке 2.

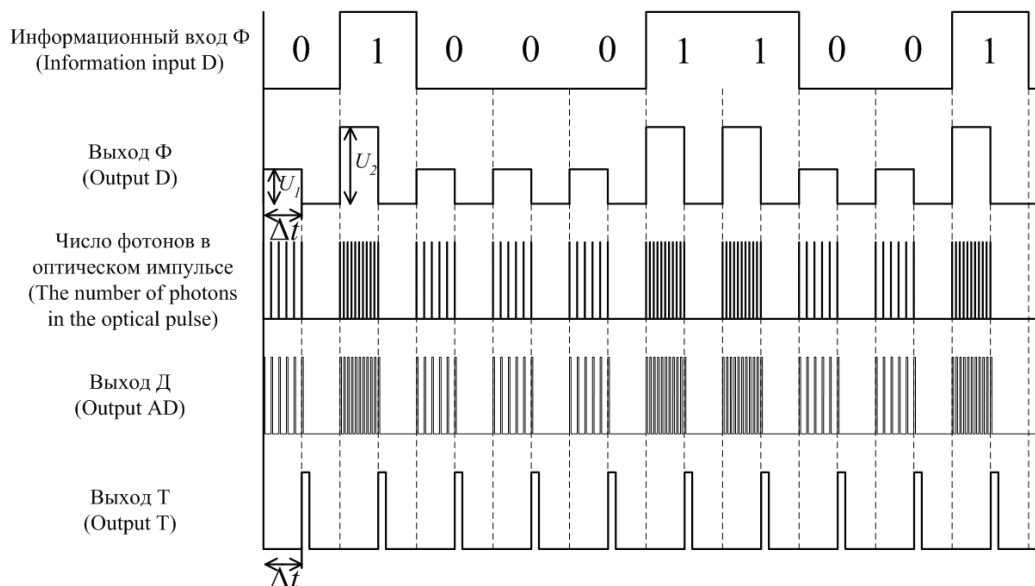


Рисунок 2 – Временная диаграмма функционирования устройства

Figure 2 – Timing diagram of the device operation

Выбор первого или второго кодируемого информационного входа формирователя Φ управляется сигналом, поступающим на его третий вход: при на-

личии на управляющем входе логического нуля и логической единицы формирователь Φ кодирует соответственно первый и второй информационные входы.

Таким образом, в режиме передачи открытого криптографического ключа формирователь Φ , входящий в состав передающего модуля приемопередающего устройства получателя, кодирует импульсы, поступающие на его второй информационный вход.

С формирователя Φ импульсы поступают на вход источника оптического сигнала ИС. На выходе источника ИС формируется оптический сигнал длительностью Δt и мощностью P_1 под воздействием на его вход напряжения U_1 . При появлении на входе источника ИС импульса с напряжением U_2 на его выходе генерируется оптический сигнал длительностью Δt и мощностью P_2 ($P_1 < P_2$).

Оптическое излучение с выхода источника сигнала ИС поступает через нейтральный светофильтр Н, обеспечивающий ослабление мощности оптического сигнала, на первый выход устройства и далее в оптическое волокно ОВ2.

В результате двоичная кодовая последовательность импульсов, соответствующая символам открытого криптографического ключа, передается по волоконно-оптическому каналу связи отправителю. После этого приемопередающее устройство получателя переходит в режим приема шифртекста.

Сущность функционирования приемопередающего устройства на стороне отправителя данных в режиме приема открытого криптографического ключа заключается в следующем.

Оптическое излучение поступает на второй вход приемопередающего устройства отправителя из оптического волокна ОВ1, которое подключено к приемному модулю устройства.

Приемный модуль устройства содержит источник постоянного напряжения П, лавинный фотодиод ЛФД, резистор нагрузки R_n , усилитель У, амплитудный дискриминатор Д, логический элемент «И», счетчик импульсов Сч, RS-триггер Тр, генератор прямоугольных импульсов Г, таймер Т и линию задержки ЛЗ.

Приемный модуль устройства работает в режиме асинхронного приема информации следующим образом. Из оптического волокна ОВ1 излучение подается на лавинный фотодиод ЛФД. При помощи источника постоянного напряжения П на лавинный фотодиод ЛФД подается постоянное напряжение обратного смещения, превышающее напряжение пробоя p - n -перехода ЛФД. В этом случае лавинный фотодиод ЛФД работает в режиме счета фотонов [6]. Под действием оп-

тического излучения в ЛФД формируются однофотонные импульсы тока. Количество этих импульсов прямо пропорционально энергии оптического импульса, которая равна произведению мощности оптического сигнала на время Δt . Количество однофотонных импульсов N также прямо пропорционально числу фотонов в импульсе.

Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной мощности, то на выходе лавинного фотодиода ЛФД за время передачи символа Δt формируется различное количество электрических импульсов, которое прямо пропорционально мощности оптического излучения. Поэтому число импульсов, соответствующее символу «0», будет меньше, чем число импульсов, соответствующее символу «1».

Максимальное число однофотонных импульсов N_0 ЛФД, сформированных за время Δt при передаче символа «0», будет меньше, чем минимальное число импульсов N_1 , сформированных при передаче символа «1». Эти импульсы создают падения напряжений на резисторе нагрузки R_n , т.е. импульсы напряжения. После этого однофотонные импульсы усиливаются усилителем У и поступают на вход амплитудного дискриминатора Д. При помощи амплитудного дискриминатора Д выполняется амплитудная селекция усиленных импульсов напряжения на фоне шумов усилителя, а также их стандартизация по амплитуде и длительности. С выхода амплитудного дискриминатора Д импульсы поступают одновременно на S-вход RS-триггера Тр и на первый вход логического элемента «И». Первый импульс из последовательности импульсов переводит RS-триггер Тр в единичное состояние. Выход RS-триггера Тр соединен со вторым входом логического элемента «И» и управляющим входом таймера Т. Появление напряжения на втором входе логического элемента «И», соответствующего логической единице, позволяет импульсам с выхода амплитудного дискриминатора Д поступать на вход счетчика импульсов Сч, который подсчитывает число импульсов последовательности, поступающих на его вход (рисунок 1).

В момент времени переключения RS-триггера Тр из нулевого в единичное состояние запускается таймер Т. Через промежуток времени Δt на выходе таймера Т формируется импульс, который поступает на R-вход RS-триггера Тр, переводя его в нулевое состояние (см. рисунки 1 и 2). На выходе RS-триггера Тр формируется сигнал, соответствующий логическому нулю, который

подается на второй вход логического элемента «И», что останавливает поступление импульсов на вход счетчика импульсов Сч, а следовательно, останавливает и подсчет импульсов счетчиком Сч. Импульс с выхода таймера Т поступает также на вход линии задержки ЛЗ и на третий вход генератора прямоугольных импульсов Г.

При количестве импульсов $0 \leq N \leq N_0$, сосчитанных счетчиком Сч при передаче символа «0», на его первом выходе появляется уровень, соответствующий логической единице, а на втором выходе – уровень, соответствующий логическому нулю. В случае подсчета количества импульсов счетчиком Сч $N > N_0$ при передаче символа «1» на его первом и втором выходах появляются уровни, соответствующие логической единице. Выходы 1 и 2 счетчика импульсов Сч соединены с первым и вторым информационными входами генератора прямоугольных импульсов Г соответственно.

При наличии на первом информационном входе генератора прямоугольных импульсов Г уровня напряжения, соответствующего логической единице, а на втором входе – логического нуля, и при наличии на управляющем входе генератора прямоугольных импульсов Г импульса с выхода линии задержки ЛЗ на выходе генератора Г появляется уровень, соответствующий логическому нулю. При наличии на информационных входах генератора прямоугольных импульсов Г уровней напряжений, соответствующих логической единице, и при наличии импульса на его управляющем входе с выхода линии задержки ЛЗ на выходе генератора Г появляется уровень, соответствующий логической единице.

Сброс счетчика импульсов Сч происходит через некоторый промежуток времени после прихода импульса от таймера Т на управляющий вход генератора прямоугольных импульсов Г. Длительность этого времени задается линией задержки ЛЗ.

В результате двоичная кодовая последовательность импульсов, соответствующая символам открытого криптографического ключа, поступает с выхода генератора прямоугольных импульсов Г на первый вход блока расшифрования данных D и на второй вход системы управления устройства. Система управления устройства передает символы открытого криптографического ключа на свой второй выход.

После этого приемо-передающее устройство на стороне отправителя данных переходит в режим передачи шифртекста. Сущность этого ре-

жима заключается в следующем. Двоичные данные, подлежащие передачи по волоконно-оптическому каналу связи, поступают на первый вход системы управления устройства отправителя.

Система управления устройства отправителя устанавливает на своем третьем выходе уровень, соответствующий логическому нулю, разбивает данные, поступающие на ее первый вход, на кодовые слова длиной n бит, дополняя при необходимости слово символами «0», на основании блоков данных для подстановки, содержащихся в блоке памяти БП, подмешивает к каждому такому слову идентификационную информацию отправителя IDA, формирует и передает полученную смесь данных и идентификационной информации отправителя на свой первый выход.

Дополнение кодовых слов символами «0» необходимо выполнять, если длина кодового слова, используемого для получения смеси данных и идентификационной информации отправителя, меньше n бит. Такая ситуация может возникнуть в случае, когда общая длина данных, подлежащих передаче по волоконно-оптическому каналу связи, либо меньше, либо не кратна числу n . При этом недостающие биты дополняются символами «0» со стороны старших разрядов кодового слова.

Сформированная смесь данных и идентификационной информации отправителя поступает через первый выход системы управления на первый вход блока зашифрования данных Е и на второй вход формирователя данных Ф.

Блок зашифрования данных Е зашифровывает данные, поступающие на его первый информационный вход, на открытом криптографическом ключе, который подается на второй управляющий вход Е со второго выхода системы управления устройства. Это обеспечивает зашифрование смеси данных и идентификационной информации отправителя и получение шифртекста. Шифртекст побитно поступает на первый информационный вход формирователя данных Ф передающего модуля устройства отправителя через выход блока зашифрования данных Е. Поскольку на третий управляющий вход формирователя данных Ф подается логический нуль, формирователь Ф кодирует импульсы, поступающие на его первый информационный вход. В результате двоичная кодовая последовательность импульсов, соответствующая символам шифртекста, передается по волоконно-оптическому каналу связи получателю.

Приемо-передающее устройство на стороне получателя в режиме приема шифртекста функционирует следующим образом.

На второй вход устройства поступают оптические импульсы шифртекста, которые в режиме асинхронного приема информации регистрируются с помощью приемного модуля получателя и подаются с выхода генератора прямоугольных импульсов Γ на первый вход блока расшифрования данных D и на второй вход системы управления устройства.

Блок расшифрования данных D расшифровывает данные, поступающие на его первый информационный вход, на секретном криптографическом ключе получателя. Этот ключ подается на второй управляющий вход D с шестого выхода системы управления устройства. С выхода блока расшифрования D данные подаются на третий вход системы управления устройства.

Система управления приемо-передающего устройства на стороне получателя разбивает данные, поступающие на ее третий вход, на кодовые слова длиной $(n + IDA)$ бит, выделяет из каждого такого слова идентификационную информацию отправителя IDA' и на ее основе устанавливает подлинность принятых данных и их отправителя.

Выделение из каждого кодового слова IDA' осуществляется на основании блоков данных для подстановки, хранящихся в блоке памяти БП устройства получателя. При этом значения и номера бит IDA' определяются аналогично, как и при подмешивании IDA в устройстве отправителя.

Установление подлинности принятых данных и их отправителя осуществляется путем сравнения IDA и IDA' , что реализуется посредством компаратора K (см. рисунок 1). Если эта информация совпадает для каждого кодового слова, то делается вывод о подлинности принятых данных и их отправителя, и система управления передает данные отправителя на свой четвертый выход. В противном случае устанавливается факт нелегальности данных и их отправителя, и система управления сигнализирует об этом, передавая на свой пятый выход уровень напряжения, соответствующий логической единице.

Следует отметить, что в разработанной системе квантово-криптографической связи конфиденциальность информации, передаваемой по волоконно-оптическому каналу связи, обеспечивается ее шифрованием. При этом наличие двух ключей, один из которых используется для зашифрования данных, а второй – для расшифрования, позволя-

ет передавать открытые ключи по незащищенному волоконно-оптическому каналу связи и сохранять секретные ключи в той части системы связи, в которой будет осуществляться расшифрование данных. В сравнении с известными двухключевыми алгоритмами шифрования и расшифрования данных [1–4] разработанная квантово-криптографическая система связи на базе предложенного приемо-передающего устройства является более защищенной. Это объясняется тем, что информационная безопасность системы связи, предложенной в данной работе, основана не только на безопасности алгоритма шифрования и расшифрования данных, но и на секретности идентификационных данных отправителя (значениях идентификационных данных и их расположения в блоках данных, подлежащих зашифрованию) и используемых принципах передачи и приема шифртекстов при помощи оптических импульсов слабой мощности, которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов.

Смешивание на передающей стороне данных, подлежащих передаче, с идентификационной информацией отправителя в виду случайности данных и секретности значений и расположения бит IDA не позволяет выделить несанкционированному пользователю ни данных, ни IDA , а также не позволяет навязывать ложные данные, которые злоумышленник может пытаться выдавать за подлинные, транслируя в канал связи. Вместе с тем для легальных пользователей системы связи соответственно гарантируется конфиденциальность передаваемой информации и подлинность как самих данных, так и их отправителя.

Следует также отметить, что несанкционированный съем данных, передаваемых по волоконно-оптическому каналу связи, приведет к потере части мощности оптического излучения, в результате чего количество импульсов, сосчитанных счетчиком импульсов $S_{\text{ч}}$ при передаче символа «1», окажется меньше либо равным N_0 , поэтому на выходе генератора прямоугольных импульсов Γ будут формироваться только символы «0». При использовании несанкционированным пользователем компенсационного метода съема данных, описанного в [11], количество импульсов, сосчитанных счетчиком $S_{\text{ч}}$, окажется больше N_0 как при передаче символов «0», так и при передаче символов «1», поэтому на выходе генератора прямоугольных импульсов Γ будут формироваться только символы «1». Это объясняется тем, что при подключении несанкционированного пользователя к каналу связи, он будет получать информацию о состоянии системы связи, что приведет к потере части мощности оптического излучения, в результате чего количество импульсов, сосчитанных счетчиком импульсов $S_{\text{ч}}$ при передаче символа «1», окажется больше либо равным N_0 , поэтому на выходе генератора прямоугольных импульсов Γ будут формироваться только символы «1».

рованного пользователя к волоконно-оптической линии связи в некоторой точке расстояние от нее до выхода линии связи будет всегда меньше, чем длина линии между легальными пользователями системы связи. Следовательно, вероятность поглощения оптических импульсов, передаваемых от несанкционированного передатчика к легальному получателю, окажется меньше вероятности поглощения оптических импульсов, передаваемых от легального отправителя к легальному получателю. Очевидно, что в соответствии с описанными выше принципами функционирования разработанной квантово-криптографической системы связи на базе предложенного приемопередающего устройства при установлении подлинности принятых данных и их отправителя в случае приема кодовых слов, состоящих только из одноименных символов, будет обнаружен факт нелегальности данных и их отправителя, и система управления просигнализирует об этом, передав на свой пятый выход уровень напряжения, соответствующий логической единице

Заключение

Разработано устройство для систем квантово-криптографической связи, в котором в качестве приемного модуля применен счетчик фотонов. Устройство не требует использования для передачи данных поляризационного оптического излучения, что, в сравнении с известными, упрощает его, ускоряет процесс обмена информацией за счет устранения процедуры согласования базисов, в которых переданы и приняты символы, и уменьшает ошибку передачи данных, связанную с деполяризацией оптического излучения.

Продемонстрирована возможность применения кремниевых лавинных фотоприемников в режиме счета фотонов для систем передачи конфиденциальной информации, определяющих подлинность источника передаваемой информации.

Разработанная система волоконно-оптической связи, содержащая в качестве приемного модуля счетчик фотонов на базе лавинного фотоприемника, позволяет обнаружить несанкционированный доступ к информации и нарушение ее целостности и ускорить процесс обмена информацией в сравнении с известными квантово-криптографическими системами связи.

Информационная безопасность системы квантово-криптографической связи, построен-

ной на базе разработанного приемопередающего устройства, определяется безопасностью алгоритма шифрования и расшифрования данных, секретностью как самих идентификационных данных отправителя, так и их расположением в блоках данных, подлежащим зашифрованию, а также за счет используемых режимов асинхронной передачи и приема информации при помощи оптических импульсов слабой мощности, которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов.

Применительно к предложенной в данной работе системе квантово-криптографической связи для достоверного определения подлинности источника передаваемой информации и обеспечения конфиденциальности данных особенно важно учитывать количество возможных ошибок, возникающих при регистрации данных и обусловленных неидеальностью характеристик оборудования легитимных пользователей. В этой связи автору настоящей работы видится перспективным установление влияния мощности оптического излучения, используемого для передачи двоичных символов, и среднего времени однофотонной передачи на вероятности ошибочной регистрации символов «0» и «1», что планируется выполнить в ходе дальнейших исследований.

Список использованных источников

1. Олифер, В.Г. Безопасность компьютерных сетей / В.Г. Олифер, Н.А. Олифер. – М. : Горячая линия-Телеком, 2016. – 644 с.
2. Шнайер, Б. Прикладная криптография / Б. Шнайер. – М. : Триумф, 2002. – 816 с.
3. Лапонина, О.Р. Основы сетевой безопасности: криптографические алгоритмы и протоколы взаимодействия / О.Р. Лапонина. – М. : НОУ «Интуит», 2016. – 244 с.
4. Криптография / Н. Сمارт. – М. : Техносфера, 2005. – 528 с.
5. Килин, С.Я. Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин ; под ред. С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцева. – Минск : Беларус. наука, 2007. – 391 с.
6. Тимофеев, А.М. Исследование распределения временных интервалов между импульсами лавинных фотоприемников, работающих в режиме счета фотонов / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2011. – № 1 (105). – С. 39–41.
7. Resonant-cavity-enhanced single-photon avalanche diodes on reflecting silicon substrates / M. Ghioni [et al.] // IEEE Photonics Technology Letters. – 2008. – Vol. 20, no. 6. – P. 413–415.

8. Solid-state single-photon detectors / F. Zappa [et al.] // *Optical Engineering*. – 1996. – Vol. 35, – no. 4. – P. 938–945.

9. Микушин, А.В. Программирование микропроцессоров семейства MCS-51 / А.В. Микушин, В.И. Сединин. – Новосибирск : СибГУТИ, 2016. – 161 с.

10. Ключев, Л.Л. Теория электрической связи : учебник / Л.Л. Ключев. – Минск : Техноперспектива, 2008. – 423 с.

11. Способ связи по волоконно-оптической линии с обнаружением несанкционированного доступа к передаваемым данным : пат. 20051 Респ. Беларусь, МПК (2013.01) Н 04В 10/00, Н 04В 10/85 / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич, А.М. Тимофеев; заявитель Бел. гос. ун-т. – № а 20131068; заявл. 10.09.2013; опубл. 30.04.2016 // Официальный бюл. / Нац. центр интел. лектуал. собственности. – 2016. – №2. – С. 125.

References

1. Olifer V.G., Olifer N.A. *Bezopasnost' komp'yuternykh setei* [Security of computer networks]. Moscow, Hot line-Telecom Publ., 2016, 644 p. (in Russian).

2. Shnayer B. *Prikladnaya kriptografiya* [Applied cryptography]. Moscow, Triumph Publ., 2002, 816 p. (in Russian).

3. Laponina O.R. *Osnovy setevoi bezopasnosti: kriptograficheskie algoritmy i protokoly vzaimodeistviya* [Fundamentals of network security: cryptographic algorithms and protocols of interaction]. Moscow, NOU «Intuit», 2016, 244 p. (in Russian).

4. Smart N. *Kriptografiya* [Cryptography]. Moscow, Technosphere Publ., 2005, 528 p. (in Russian).

5. Kilin S.Ya. *Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika* [Quantum cryptography: ideas and practices]. Minsk, Belarus. Nauka Publ., 2007, 391 p. (in Russian).

6. Timofeev A.M. [Investigation of the distribution of time intervals between pulses of avalanche photodetectors operating in the photon counting mode]. *Vestnik svyazi* [Communication bulletin], 2011, no. 1 (105), pp. 39–41 (in Russian).

7. Ghioni M., Armellini G., Maccagnani P., Rech I., Emsley M., Unlu M. Resonant-cavity-enhanced single-photon avalanche diodes on reflecting silicon substrates. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2008, vol. 20, no. 6, pp. 413–415.

8. Zappa F., Lacaita A., Cova S., Lovati P. Solid-state single-photon detectors. *Optical Engineering*, 1996, vol. 35, no. 4, pp. 938–945.

9. Mikushin A.V. *Programmirovaniye mikroprotsessorov semeistva MSS-51* [Programming microprocessors of the MSS-51]. Novosibirsk, SibGUTI, 2016, 161 p. (in Russian).

10. Klyuev L.L. *Teoriya elektricheskoi svyazi : uchebnik* [The theory of electrical communication: textbook]. Minsk, Tekhnoperspektiva Publ., 2008, 423 p. (in Russian).

11. Gulakov I.R., Zenevich A.O., Timofeev A.M. *Sposob svyazi po volokonno-opticheskoi linii s obnaruzheniem nesanktsionirovannogo dostupa k peredavaemym dannym* [The method of communication over a fiber optic line with the detection of unauthorized access to transmitted data]. Patent RF, no. 20051, 2016.

УДК 620.179.161. 534.1

Трансформация и рассеяние поверхностных волн на акустической нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользящая граница акустического контакта

Баев А.Р.¹, Пантелеенко Ф.И.², Захаренко В.В.², Размыслович Г.И.¹, Жаворонков К.Г.¹, Гиль Н.Н.¹

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь

²Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 09.01.2018

Принята к печати 27.02.2018

Эффекты трансформации и распространения волн Рэлея и Стоунли представляют значительный интерес для расширения возможностей и совершенствования методов ультразвукового контроля и измерений. Цель данной работы заключалась в установлении влияния геометрических параметров тела акустической нагрузки и его положения на коэффициенты отражения и прохождения волны Стоунли и Рэлея и выявлении возможности использования результатов исследования для практических приложений.

На основе анализа акустического тракта и данных эксперимента установлена связь между измеряемыми амплитудными параметрами и коэффициентами прохождения и отражения поверхностных волн, а также отражательной способностью области контакта тела нагрузки в виде призмы через скользящую границу, которая достигает $\approx 32\text{--}34$ дБ. Впервые определены зависимости указанных коэффициентов от угла наклона одной из боковых граней призмы в диапазоне $0 \pm 45^\circ$, безразмерной толщины контактной прослойки ($0\text{--}0,05$) и ее ориентации относительно акустической оси.

Установлено, что эти коэффициенты преимущественно максимальны, когда призма прямоугольная. Коэффициент же отражательной способности при жестком контакте тел более чем на порядок меньше, а коэффициенты прохождения сравнимы по величине. Показана перспективность использования результатов исследования для контроля качества сцепления материалов при сварке, пайке, склейке, выявления дефектов в труднодоступных местах, а также для определения физико-механических свойств металлов с помощью предложенного способа создания опорного сигнала.

Ключевые слова: поверхностная волна, волна Рэлея, волна Стоунли, трансформация, отражение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Адрес для переписки:

Баев А.Р.

Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of
Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И.,
Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н.

Трансформация и рассеяния поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Сколь-
зящая граница акустического контакта.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 28–39.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

For citation:

Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I.,
Lark K.G., Gill N.N.

[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load
to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary
of acoustic contact is sliding].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary of acoustic contact is sliding

Baev A.R.¹, Panteleenko F.I.², Zakharenko V.V.², Razmyslovich G.I.¹, Lark K.G.¹, Gill N.N.¹

¹*Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus*

²*Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus*

Received 09.01.2018

Accepted for publication 27.02.2018

Abstract

The effects of Rayleigh and Stoneley wave transformation and propagation are of considerable interest for the enhancement and improvement of ultrasonic methods evaluation and measurements. The purpose of this work is to determine the influence of the geometric parameters of the acoustic load body and its position on the coefficients of reflection and propagation of the Stoneley and Rayleigh waves and to identify the possibility of using the results of the study for practical applications.

Based on the analysis of the acoustic path and the experimental data, the relationship between the measured amplitude parameters and the coefficients of the propagation and reflection of surface waves, as well as the reflectivity of the contact region of the load body in the form of a prism through the sliding boundary, which reaches up to $\approx 32\text{--}34$ дБ, is established. For the first time, the dependence of these coefficients on the inclination angle of one of the prism lateral faces in the range of $0 \pm 45^\circ$, dimensionless thickness of the contact layer (0–0,05) and its orientation relative to the acoustic axis.

It is established that these coefficients are mainly maximal when the prism is rectangular. The coefficient of reflectivity in the hard contact of bodies is more than an order of magnitude less, and the coefficients of wave propagation – comparable in magnitude. The prospects of using the results of the study to evaluate the quality of adhesion of materials during welding, soldering, gluing, detection of defects in hard-to-reach places, as well as to determine the physical and mechanical properties of metals by the proposed method of creating a reference signal are shown.

Keywords: surface wave, Rayleigh wave, Stoneley wave, transformation, reflection.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Адрес для переписки:

Баев А.Р.

Ин-т прикладной физики Национальной академии наук Беларуси,
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Baev A.R.

Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of
Belarus,
Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
e-mail: baev@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Баев А.Р., Пантелеенко Ф.И., Захаренко В.В., Размыслович Г.И.,
Жаворонков К.Г., Гиль Н.Н.

Трансформация и рассеяния поверхностных волн на акустической
нагрузке для ультразвукового контроля и измерений. Ч. 1. Скользя-
щая граница акустического контакта.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 28–39.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

For citation:

Baev A.R., Panteleenko F.I., Zakharenko V.V., Razmyslovich G.I.,
Lark K.G., Gill N.N.

[Transformation and scattering of surface waves on the acoustic load
to ultrasonic evaluation and measurements. Part 1. The boundary
of acoustic contact is sliding].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 28–39 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-28-39

Введение

Все более широкое распространение в области неразрушающего контроля и ультразвуковых измерений находят поверхностные волны (ПАВ), включая волны Рэлея (ВР), Стоунли (ВС) и др., относящиеся к классу слабозатухающих волн. Энергия этих волн локализована в поверхностном слое (слоях) исследуемого материала глубиной h , не превышающей их длины волны $\lambda_{\text{ПАВ}}$. Амплитудные, фазовые, частотно-фазовые параметры таких ПАВ весьма чувствительны к изменению структуры исследуемого объекта, наличию поверхностных и подповерхностных несплошностей, качеству сцепления контактирующих материалов и др. [1–7]. При определенных условиях изменение граничных условий в области распространения ВР сопровождается появлением краевых волн, обусловленных трансформацией ПАВ в волны Стоунли, а также в объемные моды. В частности, в работе [4] упоминалось, что изменение граничных условий на пути распространения ВР обусловлено наличием на объекте прямоугольного выступа, что позволяет (в качестве физической модели) рассматривать объект как двухслойную среду с жестким акустическим контактом. Причем область в окрестности линии взаимного пересечения контактной поверхности объекта и передней грани выступа с пространственным параметром не более $l \sim \lambda_{\text{ПАВ}}$ служит источником трансформированных и рассеянных в объеме выступа краевых волн.

Отметим, что возбуждение ВР в однородном материале объекта со свободной границей и скоростью $C_{\text{ПАВ}}$ осуществляется при падении объемной волны, имеющей скорость C_1 , на поверхность объекта под углом $\beta = \arcsin(C_1/C_{\text{ПАВ}})$. Возбуждение же ВС на практике реализуется, как правило, путем трансформации ВР на акустической нагрузке, представляющей собой твердое тело, контактирующее с материалом подложки. Обобщенное граничное условие в области поверхности контакта двух тел $z = 0$, используемое для моделирования процессов распространения ВС (двумерная постановка), предложено в работах [8, 9] для компонент смещений $u_{xz}^{(i)}$ и напряжений $\{\sigma_{xz}^{(i)}, \sigma_{zz}^{(i)}, \sigma_{xx}^{(i)}\}$:

$$\begin{aligned} \sigma_{zz}^{(1)}|_{z=0} &= \sigma_{zz}^{(2)}|_{z=0}; \quad \sigma_{xz}^{(1)}|_{z=0} = \sigma_{xz}^{(2)}|_{z=0}; \\ u_x^{(1)}|_{z=0} &= u_x^{(2)}|_{z=0} + \sigma_{xz}^{(2)}\Xi_t|_{z=0}; \quad u_z^{(1)}|_{z=0} = u_z^{(2)}|_{z=0} + \sigma_{zz}^{(2)}\Xi_n|_{z=0}, \end{aligned} \quad (1)$$

где Ξ_t и Ξ_n – коэффициенты, характеризующие эффективность передачи, соответственно, тангенциальной и нормальной составляющей напряжений через границу сред.

Полученное на основе решения 4 волновых уравнений относительно скалярного и вектора потенциала характеристическое уравнение вырождается в уравнение, описывающее распространение ВС при наличии «жесткого» контакта двух тел ($\Xi_t \rightarrow \infty, \Xi_n \rightarrow \infty$) или «скользящего» контакта ($\Xi_t \rightarrow 0, \Xi_n \neq 0$). Согласно общей методике для определения вещественного корня волнового числа k необходимо выполнение неравенства $k_t < k_n$ или $C_{St} < C_{Tn}$, где индекс T относится к поперечной моде. При реализации соответствующих граничных условий необходимое и достаточное условие существования ВС, заключается в выполнении неравенства:

$$X(\eta, \theta_1, \Xi_t, \Xi_n, g, \dots)|_{\eta=1} > 1, \quad (2)$$

где $\eta = \left(\frac{C}{C_{t2}}\right)^2$, $\theta_1 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{n1}}\right)^2$, $\theta_2 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{t2}}\right)^2$, $\theta_3 = \left(\frac{C_{t2}}{C_{n1}}\right)^2$, $g = \frac{\mu_2}{\mu_1}$ – отношение коэффициентов Пуассона контактирующих материалов.

Согласно (2) моды ВС существуют и при контакте одинаковых тел через скользящую границу, т.е. при выполнении равенства:

$$\theta_1 = \theta_2 = \theta_3 = g = \mu_2/\mu_1 = \rho_2/\rho_1 = 1.$$

Однако в случае жесткой границы контакта двух одинаковых тел ПАВ трансформируется в объемные моды. При этом в работе [4] примером жесткого контакта тела акустической нагрузки (ТАН) с подложкой служил металлический образец с выступом, плоскость передней грани которого образует с контактной поверхностью угол $\gamma = 90^\circ$. Там же показано, что превалирующая часть энергии краевых волн, генерируемой непосредственно в области сопряжения указанных поверхностей, является энергией вертикально поляризованной поперечной моды.

Необходимо отметить, что в ряде технологических процессов соединения материалов (склейка, сварка, пайка и др.) граничные условия в области контакта материалов во времени претерпевают изменения – от скользящей до жесткой границы. Причем область в окрестности изменения или разрыва граничных условий можно рассматривать как самостоятельный вторичный источник излучения объемных волн, волн Стоунли и др. [5, 10]. С одной стороны, эти волны несут информацию о состоянии границы раз-

дела сред, а с другой – могут быть использованы для выявления дефектов в труднодоступных для традиционных методик местах. Отраженные от этой области волны могут создавать шумовой фон, препятствующий проведению контроля такого объекта, но в то же время служить для создания опорного сигнала при проведении измерений физико-механических свойств твердых тел глубины упрочненных слоев по данным скорости, амплитуды или спектра акустического сигнала ПАВ и др.

Таким образом, установление закономерностей трансформации ПАВ в краевые волны на ТАН, включая ВС, объемные и др., представляет как научный, так и практический интерес. Знание параметров акустического тракта таких систем весьма важны при выполнении методической части работы с целью разработки новых методик ультразвуковой диагностики свойств материалов по данным скорости нескольких мод и их спектральным характеристикам. Попытки аналитического описания указанных процессов трансформации ПАВ на акустической нагрузке наталкиваются на ряд трудностей, связанных с выбором корректной модели механизма преобразования смещений ξ_i и напряжений σ_{ik} в области условий проявления сингулярности передаточной функции. В этом случае несомненна роль экспериментального подхода.

В известных же преимущественно экспериментальных исследованиях основное внимание обращено на влияние состояния именно качества контакта сопрягаемых поверхностей при склейке, приложении силы давления. На фундаментальные же зависимости параметров акустического тракта от геометрии тела ТАН не обращалось должного внимания. К ним следует отнести коэффициенты прохождения ПАВ по амплитуде с последующе трансформацией в другую моду согласно схеме ВР→ВС (коэффициент D_{RS}) и ВС→ВР (D_{SR}), а также коэффициенты отражения волны Стоунли R_S и волны Рэлея R_R от соответствующих границ контакта ТАН с подложкой (рисунок 1). Эти вопросы представляют интерес с точки зрения как развития теоретической модели трансформации упругих мод на неоднородной границе, так и разработки усовершенствованных методик и средств ультразвуковых измерений и контроля.

Цель настоящей работы заключалась в разработке методики экспериментального исследования и установлении влияния геометрических параметров ТАН на ее отражательную способ-

ность и коэффициенты отражения, прохождения волны Стоунли и Рэлея, а также выявлении возможности использования результатов исследования для практических приложений, включая создание опорного сигнала при ультразвуковых измерениях и контроле поверхности и структуры материалов, что позволяет существенно повысить надежность и расширить возможности неразрушающего контроля.

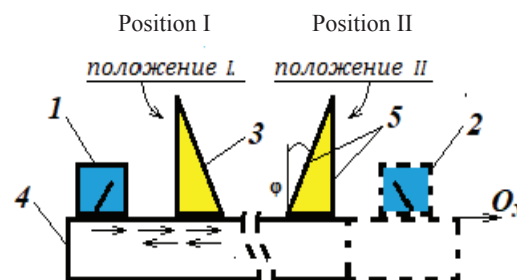


Рисунок 1 – Экспериментальная схема исследования отражения и прохождения поверхностных волн по подложке при наличии тела акустической нагрузки в виде призмы: 1 – излучающий пьезоэлектрический преобразователь; 2 – приемный пьезоэлектрический преобразователь; 3 – тело акустической нагрузки; 4 – подложка объекта; 5 – боковые грани призмы; φ – угол наклона боковых граней призмы

Figure 1 – Experimental scheme of investigation of reflection and propagation of surface waves on the basic solid in the presence of the body of the acoustic load in the form of a prism: 1 – emitting piezoelectric probe; 2 – receiving piezoelectric probe; 3 – the body of the acoustic load as a prism; 4 – the basic solid of the object; 5 – the lateral faces of the prism; φ – the angle of the lateral faces of the prism

Краткий анализ акустического тракта применительно к методике исследования

В качестве исследуемого объекта ТАН выбраны располагаемые в области прохождения ПАВ тела с наиболее простой геометрией и представляющие собой стальные призмы, контактирующие со стальной подложкой через контактную смазку, удельное акустическое сопротивление которой $R_{жс} = (\rho C_L)_{жс}$ более чем в 20 раз меньше импеданса контактирующих через нее стальных материалов $R_T = (\rho C_T)_T$, где индекс L относится к продольной, а T – поперечной моде (рисунок 1). Эффекты трансформации и рассеяния ПАВ имеют место в окрестности линии пересечения плоскости боковых граней призмы с контактной поверхностью (граница 1 и 2),

т.е. в области разрыва граничных условий. Причем одна из этих граней наклонена под углом к вертикали в варьируемом диапазоне $\varphi = 0 \pm 45^\circ$, а оппозитная ей грань образует угол $\varphi = 0$ с вертикалью. Рассматриваются два положения призмы относительно направления акустической оси, вдоль которой распространяются ПАВ, излучаемые их источником – пьезоэлектрическими преобразователем (ПЭП).

Проанализируем в двумерной постановке акустический тракт применительно к определению указанных выше коэффициентов прохождения и отражения ПАВ, а также введенного коэффициента $\mathcal{K}$, характеризующего отражательную способность ТАН. Последний определяется отношением показаний акустических сигналов или амплитуды отраженной ПАВ от 1-й, обращенной к источнику ПАВ границы (A_1), и оппозитной ей 2-й границы (A_2) (рисунок 1). При этом, как легко показать:

$$\mathcal{K} = A_2/A_1 = f_E (D_{RS})_1 (D_{SR})_1 (R_S)_2 (R_R)_1^{-1}, \quad (3)$$

где индексы 1 и 2 соответствуют указанным границам контакта тела ТАН с подложкой, а f_E – поправочный коэффициент, учитывающий влияние расхождения и диссипацию ПАВ.

Если же прозвучивание объекта производится теньвым способом, а A_{T0} и A_T соответствуют амплитудам опорного сигнала в отсутствие ТАН и при наличии последней соответственно, то нормализованный коэффициент прохождения ПАВ через нагрузку примет вид:

$$N_T^* = A_T/A_{T0} = f_T (D_{RS})_1 (D_{SR})_2, \quad (4)$$

где f_T – корректирующий коэффициент, подобный f_E .

Положим, что измеренные в режиме эхо амплитуды отраженных сигналов от 2-й границы ТАН в отсутствие ее наклона A_{2E0} ($\varphi = 0$) и с наклоном A_{2E} ($\varphi \neq 0$), а измеренные в теньвом режиме – амплитуды A_{T0} и A_T соответственно. Тогда из (3) и (4) следует, что нормализованные коэффициенты отражения волны Стоунли R_S^* , а также звукопрозрачности D_{RS}^* и D_{SR}^* , полученные при развороте призмы на 180° , имеют вид:

$$R_S^* = -(R_S)_2/R_{S0} = A_{2E}/A_{2E0}; \quad (5)$$

$$D_{RS}^* = (D_{RS})_1/D_{RS0} = (A_T/A_{T0})_1; D_{SR}^* = (D_{SR})_2/D_{SR0} = (A_T/A_{T0})_2. \quad (6)$$

Вследствие нарушения однородности граничных условий можно считать, что области, $x \in x_i \pm \Delta x, z \in z_i \pm \Delta z$, где $\{\Delta z/\lambda_{\text{ПАВ}}, \Delta x/\lambda_{\text{ПАВ}}\} < 1$ соответствуют расположению вторичных источников краевых волн, где x_1 соответствует отражающей волну Рэлея границе 1, а x_2 – границе, отражающей волну Стоунли и трансформированной из ВР на границе 1. Так что закон сохранения энергии потоков акустических мод в двумерной постановке и пренебрежении диссипативными процессами представляется в виде:

$$\Pi_R = (\Pi_T + \Pi_L + \Pi_{SR}) (1 - D_R^{(0)} - R_R^{(0)})^{-1}, \quad (7)$$

где $\Pi = C \int_{S_r} w dS$ – поток энергии той или иной

моды через поверхность граничной области S , w – плотность этого потока; Π_T и Π_L – поток ТАН и энергии рассеянных на границах краевых поперечных и продольных волн; $D_R^{(0)}$ и $R_R^{(0)}$ – коэффициенты прохождения потока энергии ПАВ на боковые поверхности и отражения его от зоны разрыва граничных условий соответственно.

Учитывая полученные выше формулы (2–6), устанавливающие связь между упомянутыми выше параметрами акустического тракта и показаниями измеряемых амплитуд акустического сигнала ПАВ, были проведены экспериментальные исследования по определению зависимостей $\{\mathcal{K}, R_S^*, D_{RS}^*, D_{SR}^*\}$ от угла φ , разворота призмы на 180° , а также изменения толщины контактного слоя h .

Методические особенности эксперимента

На рисунке 1 представлена схема экспериментальных исследований. Моделирование граничных условий типа «скользящая граница» осуществляется путем размещения на стальной подложке стального образца в виде призмы через тонкий слой контактной смазки. Проводилась тщательная шлифовка контактирующих поверхностей, так что оцененная толщина контактной смазки h (минерального масла) при установке призмы в рабочее положение под постоянным усилием, создаваемым постоянными магнитами, не превышала 5 мкм. Т.е. выполнялось условие: $h_\lambda = h/\lambda_{\text{ж}} < 0,004$, или $h/\lambda_o < 0,01$, где $\lambda_{\text{ж}}$ и λ_o – длина продольной волны в жидкости и объекте соответственно. Размеры контактной поверхности призм $(8 \times 19) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$. Одна из боковых граней используемых стальных образцов ТАН образует

угол с вертикалью $\varphi = 0$, а оппозитная ей грань наклонена к вертикали под углом, варьируемом в диапазоне $\varphi = 0 \pm 45^\circ$. Для повышения надежности измерений путем устранения шумового фона, вызванного преимущественно краевыми объемными модами, на боковых поверхностях призмы выполнены канавки, играющие роль рассеивателей и покрытые поглотителем. Рабочая частота пьезоэлектрического преобразователя (ПЭП) рэлеевских волн 1,8 МГц. При проведении каждого измерения контактная среда, находящаяся вне области контакта ТАН с подложкой, тщательно удалялась.

Источником и приемником недетектированных импульсных сигналов служат электронные блоки генераторов УД2-12, осциллограф С1-71, измеритель временных интервалов И1-8, используемый для синхронизации и анализа параметров акустического сигнала, а также генератор стандартных сигналов, подаваемых на вторую развертку осциллографа для более точного определения амплитуды сигнала методом сравнения амплитуд.

На первом этапе исследований в режиме эхо измерялась отражающая способность моделируемой области контакта ТАН с подложкой преимущественно в зависимости от угла φ и толщины контактной смазки, а расчет искомых коэффициентов $\Xi_i = \{R, D_{SR}^*, D_{RS}^*, R_s^*\}$ проведен путем использования формул (2)–(5). Как следует из них, при определении нормализованных коэффициентов представляется возможным исключить влияние корректирующих коэффициенты f_T и f_E на точность измерений.

Высота щелевого зазора регулировалась с помощью специальных подкладок, толщина которых измерялась с точностью 1 мкм. Для определения абсолютного значения коэффициента отражения волны Стоунли R_s был использован зеркально-теневой метод, позволяющий вначале найти отношение амплитуд ПАВ $A_{12} = A_{1T}/A_{2T}$, где A_{1T} соответствует прямой волне, прошедшей через зону контакта ТАН с подложкой на приемный ПЭП, а A_{2T} – двукратно отраженной от границы 2 и 1. Учтя, как и прежде, ослабление ВС в результате прохождения (при переотражении) ею дополнительного пути в зоне контакта путем ввода некоторого коэффициента ψ_d , получим, что $R_s = (A_{12}\psi_d)^{0.5}$. Коэффициент ψ_d определялся путем анализа изменения величины отношения амплитуд A_{12} в результате варьирования поперечного размера призмы и акустической базы про-

звучивания. Оцененная погрешность измерений не превышала 10–15 %.

Результаты экспериментальных исследований и их обсуждение

Результаты экспериментальных исследований прохождения и трансформации ПАВ на образцах с моделируемой скользящей границей АНГ приведены на рисунках 2–4, где представлены нормализованные зависимости $\Xi_i(\varphi) = \{R_s^*, D_{SR}^*, D_{RS}^*\}$, а также R . На рисунках 5–7 приведены некоторые предложенные схемы и конструкции устройств для акустических измерений, а также данные, свидетельствующие о возможности использования разработки для измерения глубины упрочненного термообработкой поверхностного слоя.

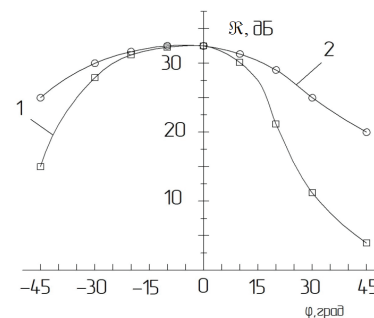


Рисунок 2 – Зависимость коэффициента отражательной способности тела нагрузки (призмы) R от угла наклона ее боковой грани: 1 – положение призмы I; 2 – положение призмы II (согласно рисунку 1)

Figure 2 – The reflectivity coefficient of the load body (as a prism) R depending on the angle of inclination of its side face: 1 – the position of the prism I; 2 – the position II (according to the explanation in Figure 1)

Как видно, все представленные впервые зависимости, характеризующие свойства моделируемого объекта как ТАН или отражателя $\{R, R_s^*\}$, так и коэффициентов прохождения ПАВ через границы 1 и 2, сопровождающегося трансформацией мод $N^* = \{D_{SR}^*, D_{RS}^*\}$ от φ , имеют максимум преимущественно в окрестности $\varphi = 0$. Как видно, левая и правая ветви этих угловых зависимостей относительно оси $\varphi = 0$ асимметричны. Причем для коэффициента, характеризующего отражательную способность тела призмы (формула (2)), величина $R \approx (R_{r2})(D_{RS1})(D_{SR1})(R_{r1})^{-1}$ и достигает 32–34 дБ.

Наименьшее же значение $\mathcal{R} \approx 18\text{--}20$ дБ, имеет место в том случае, когда отражателем служит граница 2, а $\varphi > 0$. Как видно из хода функции $\mathcal{R}(\varphi)$, превалирующий вклад в ее изменение вносит именно коэффициент отражения ВР, который при $\varphi = 0$ равен $(R_s)_2 = (R_s)_1 = R_s$.

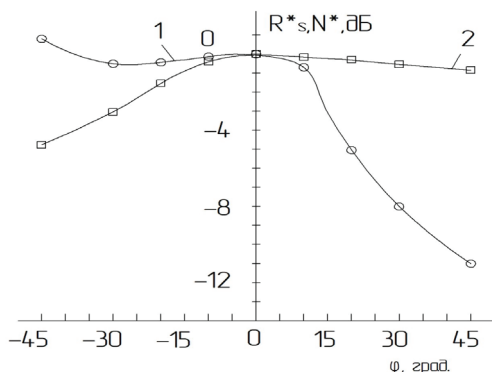


Рисунок 3 – Влияние угла наклона боковой грани призмы на нормализованный коэффициент отражения волны Стоунли R_s^* (1) и коэффициент прохождения границ контакта тела акустической нагрузки к подложке N^* (усредненный (2)) при установке призмы в положение I и II, что поясняется рисунком 1

Figure 3 – Influence of the angle of inclination of the side faces of the prism on the normalized reflection coefficient of the Stonely wave R_s^* (1) and the transmission coefficient of the contact boundaries of the body of the acoustic load to the basic body N^* (averaged (2)) when the prism in position I or II according to the explanation in Figure 1

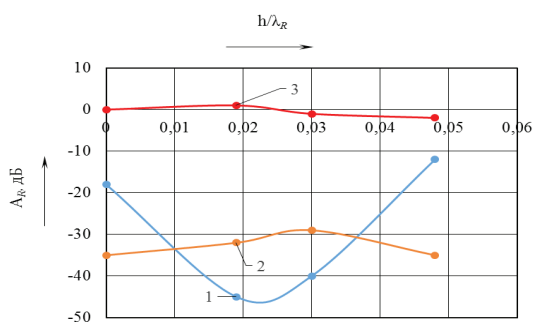


Рисунок 4 – Влияние безразмерной толщины контактного слоя жидкости $h^* = h/\lambda_R$ на амплитуду отраженной поверхностной волны от передней (1), задней (2) границы призмы, а также от ребра подложки (3), выполненной в виде параллелепипеда

Figure 4 – The influence of the dimensionless thickness of the contact layer of the liquid on the amplitude of the reflected surface wave from the front (1), back (2) prism boundary, as well as from the edge of the basic solid (3), made in the form of a parallelepiped

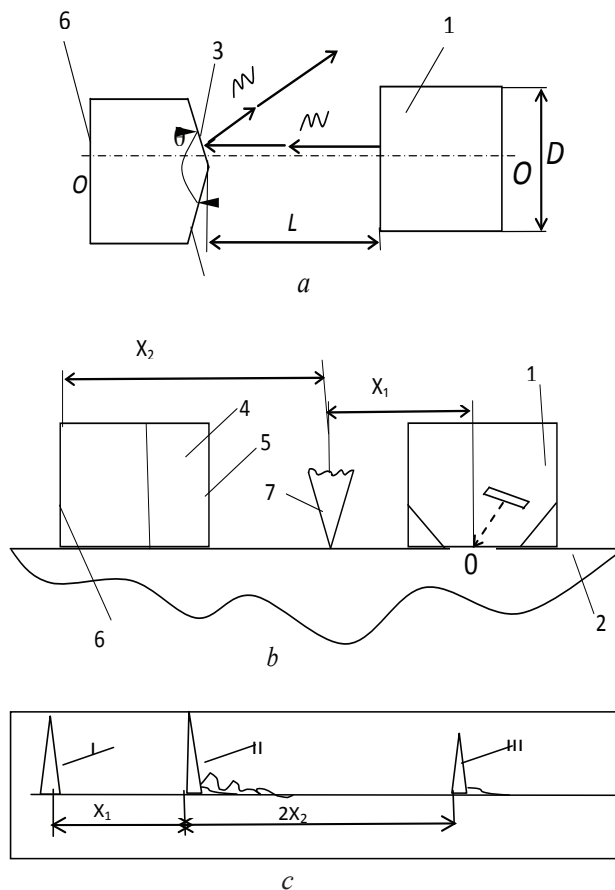


Рисунок 5 – Схемы использования устройства с твердотельным отражателем поверхностных волн для ультразвукового контроля и измерений по данным амплитудных и амплитудно-угловых параметров отраженного сигнала (a) (вид сверху) и по данным скорости поверхностной волны (вид сбоку), определяемой импульсно-фазовым методом с характерной осциллограммой (b): 1 – излучающий преобразователь; 2 – объект контроля; 3 и 4 – грани выступа тела отражателя, формирующие отражающую поверхность волны граница с вершиной 5; 6 – отражающая волны граница 2, формирующая опорный сигнал; 7 – приемный преобразователь; c: I – зондирующий, II и III – принимаемые преобразователем 7 импульсы

Figure 5 – Schemes of use of the device with a solid-state reflector of surface waves for ultrasonic evaluation and measurements by using amplitude parameters of the reflected signal vs. probe angle (a) (top view) and the velocity of the surface wave (side view) determined by pulse-phase method with characteristic oscillogram (b): 1 – emitting probes; 2 – test object to test; 3 and 4 – lateral sides of the reflector forming a reflecting surface waves boundary with the top 5; 6 – reflecting wave boundary 2, forming the reference signal; 7 – receiving probes; c: I – exciting, II and III – impulses receiving by probe 7

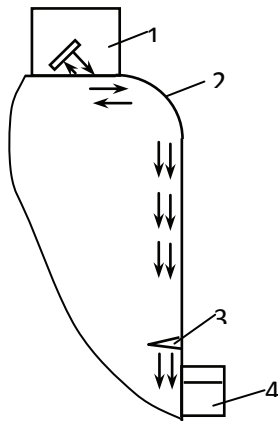


Рисунок 6 – Пример схемы использования ультразвукового устройства с твердотельным отражателем поверхностных волн для контроля объекта со сложным рельефом поверхности: 1 – преобразователь; 2 – объект контроля; 3 – поверхностная несплошность; 4 – отражатель поверхностных волн

Figure 6 – Scheme of using an ultrasonic device with a solidstate reflection of surface waves to test an object with a complex surface relief: 1 – probe; 2 – object to be tested; 3 – surface discontinuity; 4 – reflector of surface waves

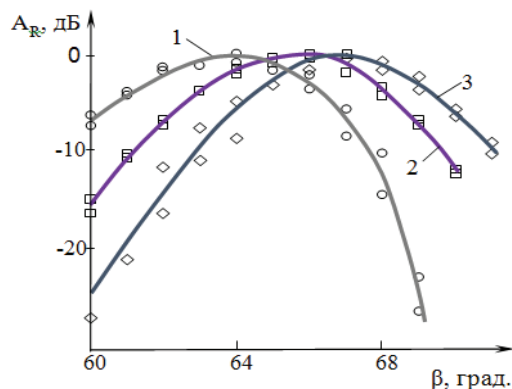


Рисунок 7 – Зависимости нормализованной амплитуды поверхностных волн, отраженных отражателем, от угла падения волны β на частоте 1,8 МГц: безразмерная глубина упрочненного слоя $h^* = h_\lambda = 0$ (1); 0,4 (2); 1,5 (3)

Figure 7 – Dependences of the normalized amplitude of reflected surface waves vs. the probe angle β when the depth of work-hardened by the currents of high-purity of steel layer is of $h^* = h_\lambda = 0$ (1); 0,4 (2); 1,5 (3) and when signal frequency is of 1,8 MHz

В результате исследований согласно приведенной выше методике было установлено, что определенная с погрешностью, не превосходящей 10–15 %, величина $R_s \approx 3,2$. Это позволяет по данным, приведенным на рисунке 2, оценить

абсолютную величину коэффициента отражения волны Стоунли R_s при изменении угла наклона как одной, так и двух граней призмы ТАН в исследованном угловом диапазоне. Это же касается определения абсолютной зависимости коэффициента прохождения ПАВ $N(\varphi)$, определяемой теневым методом.

Что касается зависимостей нормализованных коэффициентов прохождения ПАВ через область с акустической нагрузкой, то $N = D_{RS}^*(\varphi)$ и $N^* = D_{SR}^*(\varphi)$ построены, как указывалось выше, путем разворота призмы ТАН на 180° относительно акустической оси. Установлено, что различие между ними по величине во всем исследованном диапазоне углов наклона одной из граней призмы не превышает половины погрешности измерений. Это позволило отобразить указанные зависимости одной «усредненной кривой» – $N^*(\varphi)$. Т.е. для углов $45^\circ \geq \varphi \geq 0$ зависимость $N^*(\varphi)$ монотонно убывает не более, чем на 10 %, а для $0 \geq \varphi \geq -45^\circ$ – на ≈ 70 –80 %. Таким образом, если угол наклона боковой поверхности призмы $0 \geq \varphi \geq 45^\circ$, то можно положить, что:

$$\frac{D_{RS}}{D_{SR}} = \left(\frac{D_{RS}}{D_{SR}} \right)_{\varphi=0} = \text{const.}$$

Что касается абсолютного значения функции прохождения N , то, как показывают данные эксперимента, в пределах указанной погрешности измерений (10–15 %) наличие ТАН в виде прямоугольной призмы сопровождается уменьшением N приблизительно в 3,3 раза.

Причина хода указанных выше угловых зависимостей обусловлена сложным характером трансформации ВР и ВС в окрестности границ ТАН, что поясняется уравнением баланса (6). Как следует из экспериментальных данных, представленных на рисунке 2, энергией ВР, отраженных от передней границы ТАН, можно пренебречь. (Однако при проведении прецизионных ультразвуковых измерений этот фактор необходимо учитывать.) Как установлено, часть энергии ВР теряется при переходе этих волн на боковую поверхность призмы (граница 1), а часть – трансформируется в объемные моды. Подобный процесс имеет место и при трансформации волны Стоунли в волну Рэлея на границе 2.

Используя подобную указанным методическим особенностям процедуру, были получены данные сравнения коэффициента отражательной способности ТАН и коэффициента отраже-

ния ВР от ребра параллелепипеда $(R_R)_{\Pi}$, которое идентично отражению от бесконечной трещины. Установлено, что величина $(R_R)_{\Pi}$ больше $\mathcal{K}$ всего приблизительно на 5 дБ. Если же ПАВ проходит через зону контакта ТАН, отражается от ребра параллелепипеда и возвращается обратно, то эта разница достигает приблизительно 18–19 дБ. Увеличение безразмерного значения толщины контактного слоя $h_\lambda = h/\lambda_R$ (рисунок 4) приводит к росту этой разницы до 47–48 дБ, достигаемой в окрестности минимума исследуемой зависимости при $h_\lambda \approx 0,02$. В то же время на величину $\mathcal{K}$ слабо сказывается варьирование h_λ в диапазоне от нуля до 0,05. Изменение же скорости ПАВ в контактном зазоре, измеренной импульсно-фазовым методом, может составить $\approx 4\text{--}5\%$.

Исходя из анализа акустического тракта и полученных опытных данных о коэффициентах прохождения и отражения ПАВ, можно сделать вывод о возможности проведения на практике контроля дефектности поверхности объектов как непосредственно расположенных в зоне контакта материалов, так и с противоположной стороны технологического объекта.

Необходимо отметить, что подобные указанным выше процессы трансформации волн имеют место и в том случае, когда объектом исследования служит твердое тело с выступом, реализуя модель жесткого сцепления поверхности подложки с ТАН. В этом случае, как показано в работе [4], преобладающая часть потока акустической энергии трансформируется на выступе в поперечную вертикально поляризованную T -моду. (Более подробный анализ механизма трансформации упругих мод представляется дать во второй части статьи.) Если же выступ имеет форму прямоугольной призмы, то коэффициент прохождения акустического сигнала, включающий трансформацию мод согласно схеме ПАВ $\rightarrow T$ -мода $\rightarrow$ ПАВ, может быть представлен в виде:

$$N = N_2 = (D_{RT})_1 (D_{TR})_2 f_T$$

где D_{RT} и D_{TR} – коэффициенты трансформации ВР в T -моду и обратно; f_T – множитель, обуславливающий ослабление T -моды или краевой поперечной волны, распространяющейся в пространстве $x_1 < x < x_2$. При работе в режиме эхо аналогичный коэффициент:

$$\mathcal{K} = (D_{RT})_1 (D_{TR})_1 (R_T)_2 f_E [(R_{R1})]^{-1}.$$

Сравнительные экспериментальные данные показали, что коэффициент прохождения ПАВ по подложке с ТАН и скользящей контактной границей не более чем на 10 % превышает аналогичную величину при реализации жесткого контакта нагрузки с подложкой. Что касается отражательной способности зоны контакта ТАН с подложкой при жесткой границе между ними, то ее величина составляет всего $\mathcal{K} \approx 7\text{--}8$ дБ. При реализации же скользящей границы (рисунок 2) отражательная способность ТАН более чем на порядок (25–26 дБ) больше, а амплитуда принимаемого акустического сигнала, отраженного от 2-й (отражающей) границы, превышает всего на 7–8 дБ.

Таким образом, при соединении одинаковых материалов методом склейки, пайки и др. характер изменения функции $\mathcal{K}(t)$ за характерное время $t = t_0$ может служить высокочувствительным показателем качества технологического процесса соединения одинаковых материалов. При этом отношение величин отражательных способностей $\mathcal{K}^* = \frac{\mathcal{K}_{t=0}}{\mathcal{K}_{t=t_0}}$ для указанных случаев превышает порядок.

Исходя из анализа механизма отражения и прохождения ПАВ, а также предварительных данных эксперимента, полученных для случая контакта ТАН из дюрали со стальной подложкой (и наоборот), следует предположить эффективность использования временной зависимости функции $\mathcal{K}(t)$ для контроля аналогичного технологического процесса и при другом сочетании соединяемых материалов ТАН и подложки.

Создание опорного сигнала применительно к ультразвуковым измерениям и контролю

При проведении ультразвукового контроля физико-механических свойств твердых тел по данным скорости ПАВ, ее амплитудно-частотным характеристикам, а также при выявлении поверхностных и подповерхностных дефектов требуется высокая точность измерений, существенно зависящая от шумового фона, вызванного указанными выше причинами. Для устранения этого фактора предлагаются некоторые схемы измерений, поясняемые на рисунках 5 и 6. В частности, предлагается использовать ТАН в качестве высокоэффективного отражателя ПАВ при определении, например, структуры чугунов, глубины упрочненного слоя, по данным скорости

ПАВ, коррелирующей с глубиной упрочненного слоя, где $C_{\text{ПАВ}} = C_{\text{ПАВ}}(h)$. Последняя может быть определена импульсно-фазовым методом по формуле: $C_{\text{ПАВ}} = L^*/\Delta t$, где L^* – акустическая база измерений, Δt – время распространения ПАВ (рисунок 5), либо по данным угла β^* максимума амплитуды отраженной от отражателя поверхностной волны, где $C_{\text{ПАВ}} = C_1/\sin\beta^*$.

Дополнительное снижение на десятки децибел шумового фона, попадающего в режиме приема на ПЭП, достигается путем выполнения передней отражающей ПАВ границы ТАН оптимальной формы. Например, эта граница может иметь вид треугольного уступа или выступа, обращенного к излучающему ПЭП (рисунок 6), угол которого 2ϕ образован двумя линейными участками отражающей ПАВ границы с вершиной в точку S . В этом случае превалирующая часть потока отраженной от границы энергии ПАВ выводится из зоны расположения ПЭП. Используя представление лучевой акустики, представляется возможным в первом приближении оценить соотношение между поперечным размерами призмы нагрузки $2b$, преобразователя $2d$ и его расстоянием s до вершины S . Так, если эта отражающая волна Рэлея граница имеет форму уступа, то указанное соотношение примет вид:

$$(s - b \cot \phi) / d > 2 \tan 2\phi,$$

а если граница имеет форму выступа, то:

$$-s / d > \tan 2\phi,$$

где $s^* = s - b \cot \phi$ – расстояние между передней гранью ПЭП и крайними (ближайшими) точками отражающей границы в виде уступа.

Как показывают численные оценки, при одинаковых параметрах $\{s^*/d, b/d\}$ наиболее компактной является конструкция отражателя с выступом, обращенным к излучающему волны ПЭП (рисунок 6). Как видно из приведенных формул, именно в этом случае влияние поперечного размера отражателя на его отражающую ПАВ способность существенно нивелируется. При этом представляется возможным в 1,5–2 раза и более сократить размеры конструкции ультразвукового устройства при одновременном уменьшении на десятки децибел соотношения шум-сигнал. Несомненно, это позволит значительно расширить номенклатуру контролируемых на качество их структуры объектов.

Отметим, что отражающая ПАВ граница 2 может иметь различное направление по отноше-

нию к акустической оси системы, а также разную форму. Так что ТАН может быть использована в качестве «механического девиатора» поверхностных волн, отклоняющего поток энергии ПАВ под некоторым углом к акустической оси. Во втором же случае – осуществлять фокусировку ПАВ перед границей акустической нагрузки 1. При этом отраженные волны от границы 2, выполненной в виде окружности с определенным радиусом r_0 , концентрируются на расстоянии от этой границы в окрестности своеобразного фокуса $F \approx r_0/2$. Использование таких схем управления направленностью ПАВ представляет интерес для контроля объектов в труднодоступных местах, имеющих изменяемую структуру поверхности и требующих повышенной стабильности и чувствительности измерений.

На рисунке 7 демонстрируется эффективность применения предложенного устройства для оценки глубины упрочненного слоя металла по данным корреляционной зависимости скорости ПАВ: $C_{\text{ПАВ}} = C_{\text{ПАВ}}(h) \sim (E_e/\rho_e)^{0.5}$, где E_e и ρ_e рассматриваются как эффективные значения модуля Юнга и плотности контролируемой среды, локализованной на глубину $h \approx \lambda_{\text{ПАВ}}$. Как видно, измерения могут производиться как импульсно-фазовым, так и амплитудно-угловым методом по формуле $C_{\text{ПАВ}} = C_1 (\sin \beta^*)^{-1}$, где β^* – угол падения волны на металл, обеспечивающий максимум амплитуды возбуждаемой ПАВ. Отметим, что в данном случае нет необходимости усложнять измерительную процедуру, используя два ПЭП, работающих в теновом режиме прозвучивания.

Заключение

На основе анализа акустического тракта получены соотношения, связывающие амплитудные параметры поверхностных волн, отраженных и проходящих через зону акустического контакта (тонкий смазочный слой) создаваемого стальной подложкой с телом акустической нагрузки в виде призмы и коэффициентами прохождения и отражения волн Стоунли через ее границы, а также отражательную способность тела нагрузки. Предложена методика и впервые экспериментально определены зависимости указанных коэффициентов при изменении угла наклона одной из боковых граней призмы в диапазоне $\phi = 0 \pm 45^\circ$, безразмерной толщины контактной прослойки (0–0,05) и ее ориентации

вдоль акустической оси измерительной системы и оппозитно ей.

Впервые экспериментально установлено, что представленные зависимости, коэффициенты отражения и прохождения волн Рэлея и Стоунли через переднюю (1-я граница) и заднюю (2-я) границы скользящего контакта тела призмы с подложкой (при одновременной трансформации мод), а также коэффициент отражательной способности, определяемый отношением амплитуд принимаемых отраженных акустических сигналов от 2-й и 1-й границы, являются асимметричными функциями от угла наклона боковой поверхности призмы и имеют преимущественно максимум в окрестности $\varphi \rightarrow 0$. Причем это отношение, измеренное в режиме эхо, принимает максимальное значение ($\approx 32\text{--}34$ дБ) в случае использования в качестве отражающего тела прямоугольной призмы, что более чем на порядок превышает аналогичный коэффициент, измеренный при наличии жесткого контакта тел, в то время как коэффициенты прохождения акустического сигнала сравнимы по величине.

На основании этих данных предложено использовать коэффициент отражательной способности в качестве высокоинформативного параметра, характеризующего качества соединения материалов пайкой, сваркой, склеиванием и др.

Определенные с погрешностью не более 10–15 % зеркально теневым и теневым способом максимальные значения коэффициенты отражения волны Стоунли и прохождения поверхностной волны через акустическую нагрузку составляют приблизительно 0,31 и 0,33 соответственно. Установлено, что угловые зависимости коэффициента прохождения поверхностной волны в пределах погрешности измерений совпадают при повороте призмы на 180° . Причем для $\varphi > 0$ этот коэффициент уменьшается не более чем на 1 дБ, а при $\varphi < 0$ – приблизительно на 4–5 дБ. Для коэффициента же отражения волны Стоунли наблюдается обратная зависимость: при $\varphi > 0$ его величина падает приблизительно на 12 дБ, а для $\varphi < 0$ его изменение не превосходит 1 дБ.

Предложены способы ультразвукового контроля и даны рекомендации по использованию результатов исследования:

– для определения физико-механических свойств поверхности материалов, включая определение глубины упрочненного слоя, по данным скорости поверхностной волны, измеренной

импульсно-фазовым и амплитудно-угловым методом, путем использования отражателей поверхностных волн, что позволяет сократить акустическую базу прозвучивания объекта в 1,5–2 раза и существенно расширить номенклатуру контролируемых объектов;

– для выявления дефектов, расположенных в труднодоступных местах и на объектах со сложным рельефом поверхности и неоднородной структурой, используя возможности фокусировки ПАВ путем выполнения границы 2 с заданным радиусом кривизны либо дефлекции волны механическим способом.

Полученные экспериментально данные могут быть использованы для оценки возможности диагностирования состояния трущихся поверхностей, для определения наличия на них поверхностных дефектов, а также контроля качества сцепления соединяемых материалов. Определенные коэффициенты отражения и прохождения ПАВ представляют интерес при теоретическом моделировании эффектов трансформации поверхностных волн их распространения.

Работа выполнена при частичной поддержке Белорусского Республиканского фонда фундаментальных исследований в рамках договора № Т17-159 от 18.04.2018.

This work was carried out with the partial support of the Belarusian Republican Fund of fundamental investigations within the bounds of contract no. T17-159 of 18.04.2018.

Список использованных источников

1. Kruger, S.E. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound / A.J. Bakker, S.E. Kruger // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2007. – Vol. 27A. – P. 279–285.
2. Pecorary, C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact / C. Pecorary // JASA. – 2003. – Vol. 113. – P. 3065–3072.
3. Kim, H.J. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves / S.-J. Song Golden, D.-Y. Kim, S.-D. Kwon, H.-J. Kim // Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation. – 2007. – Vol. 27B. – P. 1066–1073.
4. Баев, А.Р. Распространение волны Рэлея в твердых телах с технологическим выступом / А.Р. Баев, О.С. Сепгеева, М.В. Асадчая, Г.Е. Коновалов //

Приборы и методы измерений. – 2011. – № 2. – С. 121–129.

5. Jerzak, W. Modeling Rayleigh and Stonely Waves and other Interface and Boundary Effects with the Parabolic Equation / W. Jerzak, W.L. Siegman., H.D. Collinz // JASA. – 2005. – Vol. 117. – P. 3497–3503.

6. Aladeddin, E. Combining NMR and Stonely Analysis for Better Estimation and Permeability in Carbonate Reservoirs / E. Aladeddin, H. Tchambaz and N. Al-Adani // Paper E. Proceedings, Formation Evaluation Symposium of Japan Society Petrophysist and Well Log Analysts, Japan. – 2005. – Chapter, 7 p.

7. Ультразвуковое устройство с отражателем поверхностных волн / А.Р. Баев, О.С. Сергеева, М.В. Асадчая, М.А. Тищенко: пат. 9911 Респ. Беларусь, МПК (1023.09) G 01 N 29/04 / и 20130571; опубл. 28.02.14 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2014. – № 4. – С. 36.

8. Аббакумов, К.Е. Влияние нарушения акустического контакта на распространение волн Стоунли вблизи границы твердых полупространств / К.Е. Аббакумов, В.А. Конавалов // Дефектоскопия. – 2008. – № 3. – С. 52–58.

9. Abbakumov, K.E. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact / K.E. Abbakumov, V.A. Konovalov // Abstracts of 10th European conference on Non-destructive testing. – Moscow, 2010. – P. 173–175.

10. Люткевич, А.М. Акустические поля малоапертурных. Поперечные волны, излучаемые прямоугольным источником нормальной силы / А.М. Люткевич, А.В. Жуков, А.А. Самокрутов, В.Г. Шевалдыкин // Контроль. Диагностика. – 2004. – № 4. – С. 3–8.

References

1. Kruger S.E., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27A, pp. 279–285.

2. Pecorary C. Nonlinear interaction of plane ultrasonic waves with an interface between rough surfaces in contact. *JASA*, 2003, vol. 113, pp. 3065–3072.

3. Kim H.J., Song Golden S.J., Kim D.Y., Kwon S.D. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, 2007, vol. 27B, pp. 1066–1073.

4. Baev A.R., Sergeeva O.S., Asadchaya M.V., Konovalov G.E. [Propagation of Rayleigh waves in solids with protrusion]. *Devices and methods of measurements*, 2011, vol. 2, no. 2, pp. 121–129 (in Russian).

5. Jerzak W., Siegman W.L., Collinz H.D. Modeling Rayleigh and Stonely Waves and other Interface and Boundary Effects with the Parabolic Equation. *JASA*, 2005, vol. 117, pp. 3497–3503.

6. Aladeddin E., Tchambaz H., Al-Adani N. Combining NMR and Stonely Analysis for Better Estimation and Permeability in Carbonate Reservoirs. Paper E. Proceedings, Formation Evaluation Symposium of Japan Society Petrophysist and Well Log Analysts, Japan, 2005, Chapter, 7 p.

7. Baev A.R., Sergeeva O.S., Asadchaya M.V., Tishchenko M.A.: *Ультразвуковое устройство с отражающей поверхностью волн* [Ultrasonic arrangement with reflector of surface waves]. Patent RB no. u20130571, 2014.

8. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. [Influence of the broken acoustical contact on propagation of Stonely waves at the boundary of solid mediums]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2008, no. 3, pp. 52–58 (in Russian).

9. Abbakumov K.E., Konovalov V.A. Britvin Informative opportunities of wave processes at the boundary of solid mediums in conditions of broken acoustic contact. *Abstracts of 10th European conference on Non-destructive testing*, Moscow, 2010, pp. 173–175.

10. Lutkevich A.M., Zukove A.V., Samokrutov A.A., Shevaldykin V.G. [Acoustical fields of the probes with small aperture. Transverse waves, radiated by rectangular source of the normal force]. *Kontrol. Diagnostika* [Control. Diagnostics], 2004, no. 4, pp. 3–8 (in Russian).

The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements

Zhukouski A.¹, Anshakou O.¹, Nichyparchuk A.¹, Marozik P.², Kuten S.³

¹SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

²International Sakharov Environmental Institute, Belarusian State University,

Dolgobrodskaya str., 23, Minsk 220070, Belarus

³Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University,

Bobruiskaya str., 11, Minsk 220030, Belarus

Received 12.01.2018

Accepted for publication 19.02.2018

Abstract

Periodic radiation monitoring of soils today is a priority task not only for Belarus, but also for Japan, suffered by Fukushima nuclear power plant accident. Use of portable and light spectrometers with ability to perform *in situ* measurements makes it possible to quickly estimate specific activity of measured radionuclides with required accuracy in particular soil site. Basic information of a gamma radiation source (radionuclides content, effective radius of measurement area and thickness of contaminated layer) can be obtained directly during measurement. The purpose of this research is to test the feasibility of using algorithms for determination of specific activity and thickness of contaminated layer under conditions of soil measurement with variable density parameters and radiocesium distribution in soil.

Monte-Carlo simulating allowed to estimate the degree of deviation of the shape of simulated spectra obtained with the use of Monte-Carlo soil model with uniformly distributed radionuclide in it, and for the case when the radionuclide distribution by soil profile can be described by an exponential function. For these cases of natural distribution of radiocesium, the pulse-amplitude spectrum is formed by an effective thickness of the contaminated site, which contains more than 90 % of radionuclides.

The developed Monte-Carlo model of a probe and contaminated soil site allows to estimate the effect of the variability of soil density on the total count rate of the pulse-amplitude spectrum. As a result of theoretical estimations, the relationship between the effective radius of contaminated site is determined as a function of soil density.

Analysis of the influence of radial zones of the cylindrical gamma source on *in situ* gamma-spectrometer showed that the main contribution to the total count rate of the pulse-amplitude spectrum is made by the radial zone with radius of up to 40 cm from the center of the probe, regardless of the thickness of the contaminated layer in geometry «Probe is located on the soil surface». A small site facilitates the selection of measurement area of land with a sufficiently flat surface, which is desirable during surveying the territories, especially with complex terrain.

Keywords: *in situ* gamma-spectrometer, contaminated soil layer, non-uniform distribution, effective thickness, density of soil.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

Адрес для переписки:

Жуковский А.И.

НПУП «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005 Минск, Беларусь

e-mail: alexzhukovskii@gmail.com

Address for correspondence:

Zhukouski A.

SPE «ATOMTEX»,

Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

e-mail: alexzhukovskii@gmail.com

Для цитирования:

Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.
The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 40–47.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

For citation:

Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.
The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements.

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 40–47.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

Влияние плотности почвы и характера распределения радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs по профилю при *in situ* измерениях

Жуковский А.И.¹, Аншаков О.М.¹, Ничипорчук А.О.¹, Морозик П.М.², Кутень С.А.³

¹НПТУ «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005 Минск, Беларусь

²Международный государственный экологический институт имени А.Д. Сахарова

Белорусского государственного университета,

ул. Долгобродская, 23, 220070 Минск, Беларусь

³Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,

ул. Бобруйская, 11, 220030 Минск, Беларусь

Поступила 12.01.2018

Принята к печати 19.02.2018

Проведение периодического радиационного мониторинга почв на сегодняшний день является одной из приоритетных задач для обеспечения радиационной безопасности не только в Беларуси, пострадавшей от Чернобыльской катастрофы, но и в Японии, территории которой подверглись радиоактивному загрязнению в результате аварии на АЭС Фукусима. Цель настоящей работы заключалась в проверке возможности применения разработанных на основе упрощенной («равномерной») модели алгоритмов определения активности и толщины загрязненного слоя в условиях радиометрии почвенного покрова с вариативными параметрами плотности и распределения радиоцезия по глубине.

Использование портативных *in situ* спектрометров позволяет оперативно оценить удельную активность контролируемых радионуклидов и плотность загрязнения почвы прямо на месте измерения и с необходимой точностью. Основная информация об источнике гамма-излучения (присутствующие радионуклиды, эффективный радиус участка и толщина загрязненного слоя) может быть получена непосредственно по результатам измерения аппаратного спектра в сравнении с теоретическими (калибровочными) спектрами. Теоретические спектры рассчитывают путем имитационного моделирования процесса *in situ* измерений активности радионуклидов ^{134}Cs и ^{137}Cs , равномерно распределенных в однородной почвенной среде постоянной плотности. На практике следует учитывать приближенность принятой модели измерений в отношении реального профиля заглубления радиоактивных загрязнений и изменчивости плотности исследуемых почв.

Анализ влияния радиальных зон цилиндрического источника на интегральную скорость счета спектрометра показал, что основной вклад вносят радиальные зоны в радиусе до 40 см от центра устройства детектирования при расположении его на поверхности почвы вне зависимости от толщины загрязненного слоя. Небольшая по площади зона влияния облегчает выбор контролируемых участков земли с достаточно плоской поверхностью, что желательно при обследовании территорий, особенно со сложным рельефом.

Ключевые слова: *in situ* гамма-спектрометр, загрязненный слой почвы, неравномерное распределение радионуклида, эффективная толщина, плотность почвы

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

Адрес для переписки:

Жуковский А.И.

НПТУ «АТОМТЕХ»,

ул. Гикало, 5, 220005 Минск, Беларусь

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Address for correspondence:

Zhukouski A.

SPE «ATOMTEH»,

Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

e-mail: alexzhukovski@gmail.com

Для цитирования:

Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.

The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 40–47.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

For citation:

Zhukouski A., Anshakou O., Nichyparchuk A., Marozik P., Kuten S.

The influence of soil density and the character of radioactive ^{134}Cs and ^{137}Cs pollution's distribution on *in situ* measurements.

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 40–47.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-40-47

Introduction

The soil, together with atmosphere air and natural waters, is a main subject for radiation and environmental monitoring [1, 2]. Portable gamma spectrometers with the probe, located above the soil (usually at 1 m height) [3–6] or on its surface, are being developed for the purposes of immediate survey of soil radioactive contamination [3, 7]. An important condition for the reliability and validity of *in situ* techniques of radionuclides activity determination in soil is to take into account the effect of its density and thickness of contaminated layer, as well as the distribution profile of radioactive substances in soil [3, 7, 8].

The described in [7] principles of the analysis of experimental spectra allows to simultaneously obtain information on the content and thickness layer with gamma-emitting ^{134}Cs and ^{137}Cs nuclides, expecting their homogeneous distribution over the contaminated layer. The algorithm for determination of specific activity and thickness of the contaminated layer is based on comparative analysis of experimental and simulated spectra of cesium isotopes obtained for a scintillation gamma spectrometer [7]. Simulated spectra were calculated using the Monte-Carlo (MC) method for the NaI(Tl) detector ($\varnothing 63 \times \varnothing 63$ mm) in the model of radiometric measurements of the contaminated site of the soil, represented as a cylindrical source with uniformly distributed ^{134}Cs and ^{137}Cs isotopes. The elemental composition (the effective atomic number $Z_{\text{eff}} \approx 10$) and the density (1.5 g/cm^3) of the model soil are chosen with maximum correspondence to average parameters of soils of Tohoku region (Japan) and Gomel region (Belarus) [2, 9–11]. For typical soils in areas contaminated by the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents, the Z_{eff} values are almost the same in a wide range of densities from 1.0 to 1.8 g/cm^3 [2, 9, 10].

The purpose of this research is the verification of the application of the algorithm, proposed in [7], for determination of specific activity and thickness of the contaminated layer under conditions of soil radiometry with variable density parameters and radiocesium distribution by soil profile.

Materials and methods

The researches were based on simulation of the radiometric MC model [7], developed according to the purpose of the work and parameters of the probe. MCNP 4B software was used for simulating [12]. The model of the measurement soil vol-

ume, as in [7], is a cylindrical source located in a semi-infinite isotropic environment with the radioactively contaminated layer of the fixed thickness. Gamma radiation of contaminated soil site was registered by the detector located on the middle of the upper surface of a cylindrical source. The studied model, unlike the prototype, is not limited to one average value of the soil density and the requirement of uniform distribution of cesium radionuclides over a layer of fixed thickness and can be used to assess the uncertainty of measurement *in situ* with variable parameters.

The height of the cylindrical source d is equal to the thickness of contaminated layer. The field of-view of the probe characterizes the radius r . In MC modeling, the number of emitted particles with a given energy should be distributed uniformly over the cylinder. With an increase in the radius r , the fraction of the photons emitted from regions of measurement area located far from the detector (and also the simulation time) increases rapidly, but the chance of these photons to contribute to the energy distribution of the pulse-height spectrum (F8 tally) becomes less and less important. Therefore, when modeling an extended (including infinite) source, the size of the measurement area should be restricted by some effective radius r_{eff} , at which the energy distribution of the pulse-amplitude spectrum $I(E)$ will be close to experimental one for the real object.

To determine the effective radius is need to use acceptable relative deviation β . By definition, the quantity β is written in the form:

$$\beta = \frac{I_{\text{FEP}}(\infty) - I_{\text{FEP}}(r)}{I_{\text{FEP}}(\infty)}, \quad (1)$$

were $I_{\text{FEP}}(r)$ – the count rate the range $\pm 3\sigma$ of the full energy peak (FEP) for the source of given radius r ; $I_{\text{FEP}}(\infty)$ – the count rate in the same range for the source of infinite radius.

Value of r can be considered as the effective radius $r = r_{\text{eff}}$ of the source corresponding to the relative deviation β .

The areas behind the circle with radius $r > r_{\text{eff}}$ make an insignificant contribution to the value $I_{\text{FEP}}(r)$, since the probability of a gamma-quantum reaching from them to the detector, even after scattering in the soil and air, is negligible. At $\beta = 10\%$, a source with a radius r_{eff} provides 90 % of the total count rate in energy range from 50 to 3000 keV of simulated spectrum of contaminated with cesium ra-

dionuclides soil layer with thickness d in the definite geometry of measuring.

The value of the effective radius for a uniformly contaminated soil layer is mainly determined by its density and energy gamma radiation of the measured radionuclide, and weakly depends on the elemental composition of the substance [13, 14]. For radionuclide with several gamma-ray energies, the value r_{eff} is set by the most intense one. For nearby energies of the main gamma-ray energies of ^{134}Cs and ^{137}Cs in the range 550–900 keV, the effective radius values will not differ significantly. In further analysis, an isotope ^{137}Cs with gamma-ray energy of 662 keV was used to simplify the simulation in order to obtain simulated spectra.

In cases, observed in practice, the depth of distribution of radioactive pollution into the soil does not exceed 20–25 cm [2, 15, 16]. During natural migration, the content of radionuclides usually decreases in depends on depth [2, 15–17]. The process of radionuclides redistribution by profile depends on many factors: soil type and density, time since radioactive contamination; agricultural activities, quantity of clay content, etc. Over the time, the maximum content of radionuclides along the soil layers may vary inland. Even within a relatively small area, cesium isotopes can be concentrated both in comparatively thin (2–3 cm) and thick (over 10 cm) layers [17–19]. To take into account a non-uniformly distribution of radiocesium by soil profile, it is necessary to introduce a concept «effective depth» or «effective thickness» of the contaminated soil layer.

The non-uniformly distribution of radionuclides in the soil and the effective thickness of the contaminated soil layer

For soil model with non-uniformly distributed ^{137}Cs isotope, only few cases from the set of possible radionuclide distributions along the profile were considered [11, 19]. Radionuclide content Q was distributed from the surface into the soil on depth up to 3 cm, up to 5 cm, up to 7 cm and up to 12 cm according with dependences presented in Table 1.

The situation when the layer contaminated with the radionuclide was located under a «clean» cover of the soil was also researched. In this case, a clean environment was modeled between probe and contaminated soil layer with a soil layer of a similar elemental composition 1, 2, and 3 cm thick, in which photon starts were not set.

Table 1
Relative radionuclide content Q in the top and lower layer of the soil profile

The thickness of the soil layer with a non-uniformly distributed radionuclide	The content of ^{137}Cs in the top layer, (0–1 cm), %	The content of ^{137}Cs in the lower layer, %	Exponential dependence of radionuclide content by soil profile
up to 3 cm	65.4	9.3	$Q=173.8e^{-0.977d}$
up to 5 cm	55.0	2.5	$Q=112.7e^{-0.757d}$
up to 7 cm	48.0	1.0	$Q=87.19e^{-0.630d}$
up to 12 cm	38.0	0.2	$Q=58.60e^{-0.464d}$

The radiocesium experimental spectrum from contaminated soil during natural migration of the nuclide into the soil will differ in shape from the «equivalent» spectrum with uniform distribution of the nuclide in the soil layer of the same thickness. The MC simulating results showed that for simulated spectrum, which calculated for a non-uniformly distribution of the radionuclide in the soil layer to a defined depth (hereinafter, the spectrum S_{un}), some equivalent soil thickness with uniform radionuclide distribution can be found, in which an identical simulated spectrum is formed (hereinafter, the «equivalent» spectrum S_{eq}) (Figure 1).

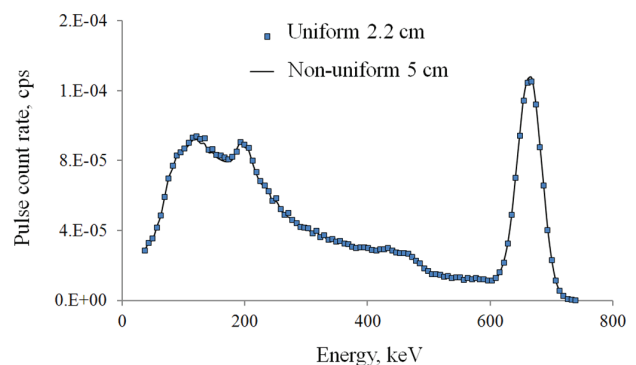


Figure 1 – Spectrum S_{un} with non-uniformly distributed ^{137}Cs and its «equivalent» spectrum S_{eq} with uniformly distributed ^{137}Cs

The deviation of the FEP heights with the gamma-ray energy spectrum of 662 keV S_{un} relatively to the «equivalent» spectrum S_{eq} , cited to mass unit considering the value of equivalent thickness of contaminated layer is presented in Table 2.

In the process of MC simulating of spectra, more than 90 % of photon starts were distributed in the thickness of the source commensurate to the thickness of «equivalent» spectra. Thus, more than 90 % of the experimental spectrum will be formed due to contaminated layer of effective thickness equal to thickness of uniformly contaminated soil

layer, which ensures the formation of an «equivalent» spectrum S_{un} .

Table 2

Deviation of FEP height with gamma radiation energy of 662 keV spectra S_{un} relatively to «equivalent» spectra S_{eq}

The thickness of the soil layer with a non-uniformly distributed ^{137}Cs along the profile (Table 1), cm	Thickness «clean» soil layer above the contaminated layer, cm	The thickness of the soil layer with an uniform distribution ^{137}Cs , cm	The ratio of the FEP height, %
3	0	2	–5.2
	1	4	2.3
	2	6	10.1
5	0	2	3.1
	1	5	–1.7
	2	7	0.7
7	0	4	–9.1
	1	6	0.9
	2	8	3.3
12	0	4	–5.2
	1	6	5.0
	2	10	1.2

The influence of natural distribution of radionuclides into the soil on shape and intensity of experimental spectrum can be considered as unissued component of the systematic error in measuring by the methodological properties. According the data in the Table 2, for *in situ* measurements in geometry «Probe is located on the soil surface» the indicated error will not exceed 10 %.

The effect of soil density on *in situ* measurements

The results presented above, as well as the results of the MC simulation in [7], were obtained with an average homogeneous medium density of

1.3 g/cm³. In real conditions, the typical range of soil density is in the range from 1.1 g/cm³ to 1.8 g/cm³ with a tendency to increase by depth [2, 16].

In order to evaluate the effect of changes in soil density in the range from 1.3 g/cm³ to 1.8 g/cm³ on the count rate I_{FEP} in FEP region ($\pm 3\sigma$), simulated spectra of the ^{137}Cs radionuclide for different thicknesses of the contaminated layer were estimated. Figure 2 shows the results of MC simulations showing the inverse dependence of the effective radius r_{eff} on the soil density for equal values of the parameter β .

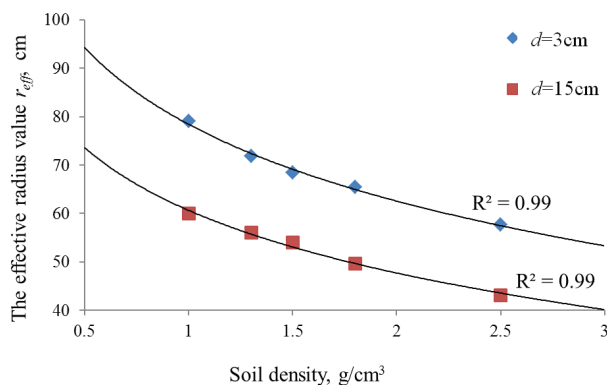


Figure 2 – Dependence effective radius vs. soil density

The component of the error of *in situ* measurements caused by the variability of the soil density, was estimated from simulated spectra calculated using the effective radius dependencies on the density in the range from 1.3 g/cm³ to 1.8 g/cm³ (see Figure 2). Table 3 shows the calculated data reflecting the nature of the change in the effective radius and count rate in FEP range $\pm 3\sigma$ depending on the soil density.

It was found that in the range of soil densities from 1.3 g/cm³ to 1.8 g/cm³, the count rate I_{FEP} in the FEP region $\pm 3\sigma$ do not change by more than $\pm 5\%$ compared to I_{FEP} obtained with an average density of 1.5 g/cm³.

The density of the soil by profile ρ_{pr} is not constant and, as a rule, varies in the direction of increase, depending on the distribution [16]. Using MC simu-

Table 3

Effective radius values and changing of count rate in FEP range, depending on soil density

The density of the soil, g/cm ³	1	1.3	1.5	1.8	2.5
The effective radius values for the thickness of the contaminated soil layer $d = 3$ cm, cm	82	73	69	63	56
The deviation of the count rate I_{FEP} relatively to the ones at soil density of 1.5 g/cm ³ ($d = 3$ cm), %	–15.2	–4.0	0.0	3.5	22.3
The effective radius values for the thickness of the contaminated soil layer $d = 15$ cm, cm	62	57	54	49	46
The deviation of the count rate I_{FEP} relatively to the ones at soil density of 1.5 g/cm ³ ($d = 15$ cm), %	–9.0	–3.1	0.0	2.3	5.8

lation, the variation of the count rate I_{FEP} was evaluated as a function of the variety in soil density by profile. The soil density varied in the range from 1.1 g/cm³ to 1.8 g/cm³ in increments of 0.2 g/cm³ per one centimeter of the soil profile. The radionuclide was distributed non-uniformly to depth of up to 5 cm and up to 7 cm (Table 1) by soil profile, with «clean» soil layer 1 cm thick located between the probe and the contaminated soil layer (Figure 3).

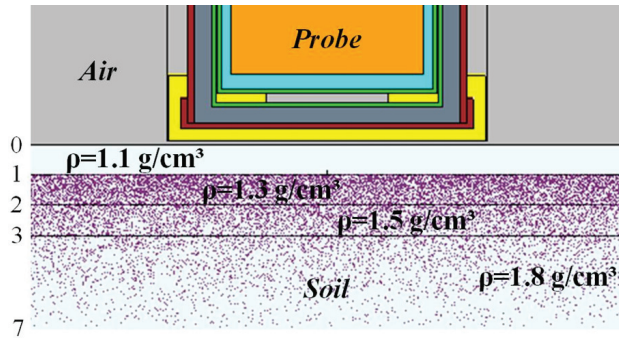


Figure 3 – Monte-Carlo model of the probe and the soil with different density by profile. The «clean» 0–1 cm layer of soil was located between the probe and contaminated layer 1–7 cm.

Figure 4 shows the simulated spectra of S_{ev} with the ^{137}Cs distribution depth up to 5 cm and up to 7 cm, their «equivalent» spectra S_{un} and simulated spectra obtained using MC soil model with a different density profile ρ_{pr} with «clean» top (0–1 cm) layer.

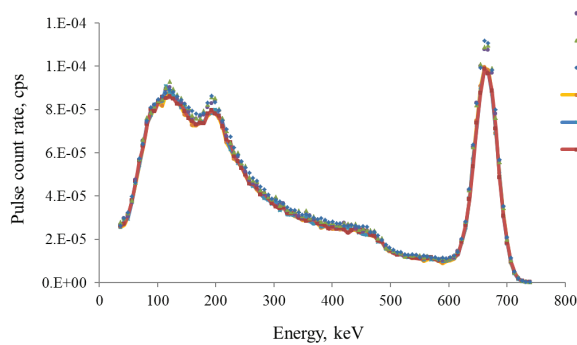


Figure 4 – Simulated spectra of the ^{137}Cs radionuclide in the soil: *a* – the spectrum S_{ev} ($d = 5$ cm) with «clean» soil layer, $\rho_{pr} \neq \text{const}$; *b* – the spectrum S_{ev} ($d = 5$ cm) with «clean» soil layer, $\rho_{pr} = \text{const}$; *c* – the «equivalent» spectrum S_{un} ($d = 5$ cm), $\rho_{pr} = \text{const}$; *d* – the spectrum S_{ev} ($d = 7$ cm) with «clean» soil layer, $\rho_{pr} = \text{const}$; *e* – the spectrum S_{ev} ($d = 7$ cm) with «clean» soil layer, $\rho_{pr} \neq \text{const}$; *f* – the «equivalent» spectrum S_{un} ($d = 6$ cm), $\rho_{pr} = \text{const}$

The heights deviations of the FEP for contaminated layers up to 5 cm and up to 7 cm with a different soil density compared to simulated spectra from a source with a density fixed at the profile of 1.5 g/cm³ are within $\pm 1\%$.

Contributions of radial source zones to the total count rate of the pulse-amplitude spectrum

The results presented above show that in during radiation monitoring of soils in the measurement geometry «Probe is located on the soil surface», the area of the cylindrical source, which provides the formation of 90 % of the total count rate of the pulse-amplitude spectrum, is limited to a circle with a radius of no more than 1 m regardless of soil density and nature of distribution of radiocesium along the profile.

In assessment of the effect of the sections of a cylindrical gamma-radiation source on the total count rate, the effective volume of the soil was considered as a set of radial zones – one central cylinder with a diameter of 10 cm and six coaxial cylinders, nested inside each other with an internal r_{in} from 10 to 60 cm and external $r_{out} = (r_{in} + \Delta)$ cm radii, where Δ is the width of the coaxial cylinder equal to 10 cm. The height of the cylinders was equal to the thickness of the contaminated layer d . When simulated spectra were calculated, photon starts were distributed only in the investigated radial zone, which subsequently moved from the center to the edge of the field-of-view of the probe limited by the effective radius r_{eff} . The spectra were calculated for the thickness of the contaminated layer $d = 5$ cm and $d = 15$ cm. The main contribution to the total count rate within a circle with a radius of r_{eff} regardless of the thickness of the contaminated source layer, provides the radial zones, located directly next to probe in a radius of 40 cm. Analysis of MC simulation results in the form of a distribution of the relative contributions of radial zones to the total count rate within the region limited by r_{eff} is shown in Figure 5.

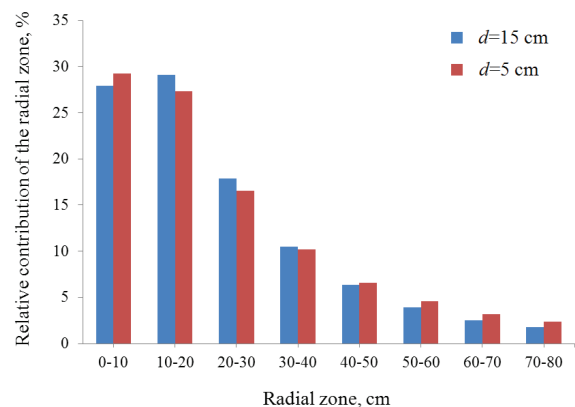


Figure 5 – Relative contribution of radial zone to the total count rate

For practical implementation of *in situ* soil measurements, it is not difficult to choose a soil

area whose surface will fully correspond to the adopted model of a cylindrical gamma-radiation source with a sufficiently flat surface. Wherein, there is no need to take into account the influence of trees, structures and other objects of the environment located at a distance of more than 2 meters. In addition, non-uniform ground at a distance of more than 40 cm from the center of the detector will not have a significant effect on the results of *in situ* measurements of the specific activity of radiocesium.

Summary

The results of MC simulating showed the efficiency of *in situ* measurement of soil with undefined density parameters and distribution of radiocesium in depth, using the algorithm of determine the thickness of the contaminated layer and the effective volume, which is based on comparative analysis of the experimental spectrum and simulated spectra.

The FEP count rate varies within ± 5 % for the soil density range from 1.3 g/cm³ to 1.8 g/cm³ relatively to the count rate at soil density of 1.5 g/cm³. This deviation (± 5 %) can be considered as the non-excluded systematic error of the *in situ* measurement in geometry «Probe is located on the soil surface».

According to results of MC simulating, the spectrum, obtained for ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs isotopes with arbitrary distribution in the soil, has coincidences in form and intensity simulated spectrum of the same radionuclides, uniformly distributed in a layer of some thickness. Formation of the experimental spectrum at *in situ* measurements of contaminated soils with ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs radionuclides with a natural distribution by profile is provided by an effective thickness layer, containing more than 90 % of radiocesium. The methodical error of determining the specific activity of ¹³⁴Cs and ¹³⁷Cs radionuclides in soil for the considered cases of natural distribution by profile is within ± 10 %.

The presented data of MC simulating for determining of radial zone contribution to the total count rate of simulated spectrum demonstrate that the main contribution is made by the radial zone with radius of up to 40 cm from the center of the probe regardless of the thickness of the contaminated layer. Such small site facilitates the selection of measurement areas of soil with enough flat surface, which is desirable for surveying areas, especially with complex terrain.

References

1. [On priority directions of scientific research of the Republic of Belarus for 2016–2020: Resolution of the Council of Ministers of the Republic of Belarus, March 12, 2015, no. 190]. *Natsional'nyi reestr pravovykh aktov Respubliki Belarus* [National Register of Legal Acts of the Republic of Belarus], 2015, no. 5/40254 (in Russian).
2. Izrael Y.A., Bogdevich I.M. *Atlas sovremennykh i prognozykh aspektov posledstviy avarii na Chernobyl'skoi AES na postradavshikh territoriyakh Rossii i Belarusi* [Atlas of modern and predictive aspects of the consequences of the Chernobyl accident in the affected territories of Russia and Belarus]. Moscow–Minsk, Fund «Infosfera» – NIA Nature, 2009, 140 p. (in Russian).
3. Drovnikov V.V., Egorov M.V., Egorov N.Y., Zhiyun V.M., Kadushkin A.V., Kovalenko V.V., Mamatov A.P. [In situ scintillation gamma spectrometry with fundamentally new capabilities. Some results of studies of the content of natural radionuclides in the ground]. *ANRI*, 2011, no. 1, pp. 56–64 (in Russian).
4. Tyler A.N. Monitoring anthropogenic radioactivity in salt march environments though in situ gamma-ray spectrometry. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1999, no. 45, pp. 235–252.
doi: 10.1016/S0265-931X(98)00110-6
5. Korun M., Likar A., Lipoglavsek M., Martincic R., Pucelj B. In situ measurement of Cs distribution in the soil. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B*, 1994, vol. 93, no. 4, pp. 485–491.
doi: 10.1016/0168-583X(94)95638-3
6. Zombori P., Andrasi A., Nemeth I. A new method of determining radionuclide distribution in soil by *in situ* gamma-spectrometry. *Hungarian Academy of Science, Central Research Institute for Physics, Institute for Atomic Research*, Budapest, 1992, 35 p.
7. Zhukouski A., Mogi K., Kutsen S. [In situ measurement of soil radioactivity]. *Vesti NAN Belarusi, Fiziko-tehnicheskaya seriya* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, physico-technical series], 2016, no. 3, pp. 105–110 (in Russian).
8. Drovnikov V.V., Egorov M.V., Egorov N.Y., Zhiyun V.M., Kadushkin A.V., Kovalenko V.V., Mamatov A.P. [A new method for determining the activity of gamma-ray sources behind a layer of an absorber with a priori unknown properties by the G-factor method]. *ANRI*, 2010, no. 3, pp. 9–15 (in Russian).
9. Mishra S., Sahoo S.K., Bossew P., Sorimachi A., Tokonami S. Vertical migration of radio-caesium derived from the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident in undisturbed soils of grassland and forest. *Journal of Geochemical Exploration*, 2016, no. 169, pp. 163–186.
doi: 10.1016/j.gexplo.2016.07.023
10. Matsuda N., Mikami S., Shimoura S., Takahashi J., Nakanu M., Shimada K., Uno K., Hagiwara S., Saito K. Depth profiles of radioactive cesium in soil using

a scraper plate over a wide area surrounding the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant Japan. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, no. 139, pp. 427–434. doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.10.001

11. Onda Yu., Kato H., Hoshi M., Takahashi Y., Nqueyn ML. Soil sampling and analytical strategies for mapping fallout in nuclear emergencies based on the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant accident. *Journal of Environmental Radioactivity*, 2015, no. 139, pp. 300–307. doi: 10.1016/j.jenvrad.2014.06.002

12. Briestmeister J.F. Ed. MCNPA general Monte-Carlo N-particle transport code, Version 4A. Report LA12625-M, Los Alamos. NM, Los Alamos National Laboratory, 1994, 736 p.

13. ISO 18589-7. Measurement of radioactivity in the environment – Soil – Part 7: In situ measurement of gamma-emitting radionuclides, 2013, 54 p.

14. Zhukouski A. Kutsen S., Khrutchinsky A., Tolkachev A., Guзов V., Kojemiakin V., Chudakov V. [Evaluation of the area of influence of the contaminated soil region in solving the problems of radiation monitoring by in situ]. *Devices and Methods of Measurements*, 2014, no. 1 (8), pp. 119–124 (in Russian).

15. Ageyets V.Y. [Migration of radionuclides in the soils of Belarus]. *Vesti NAN Belarusi, Seriya agrarnykh nauk* [Proceeding of the National academy of scienc-

es of Belarus, agrarian series], 2002, no. 1, pp. 61–65 (in Russian).

16. Appleby L.J., Dewell L., Mishara Yu.K. [The ways of migration of artificial radionuclides in the Environment. Radioecology after Chernobyl]. In F. Warner and Harrison (eds.). Moscow, Mir Publ., 1999, 512 p. (in Russian).

17. Silantiyev A.N., Shkuratov N.G., Bobovnikova Ts.I. [Vertical migration of radionuclides in the soil that fell as a result of the accident at the Chernobyl nuclear power plant]. *Atomnaya energiya* [Atomic energy], 1989, vol. 66, no. 3, pp. 194–197 (in Russian).

18. Ivanov Y.A. Lewyckij N., Levchuk S.E., Prister B.S., Firsakova S.K., Arkhipov N.P., Arkhipov A.N., Kruglov S.V., Alexakhin R.M., Sandalls J., Askbrant S. Migration of ^{137}Cs and ^{90}Sr from Chernobyl fallout in Ukrainian, Belarus and Russian soils. *Journal of Environmental Radioactivity*, 1997, vol. 35, no. 1, pp. 1–21. doi: 10.1016/S0265-931X(96)00036-7

19. Bogdevich, I.M. Tarasiuk S.V., Novikova I.I., Dovnar V.A., Karpovich I.N., Tretyakov E.S. [Vertical migration of radionuclides ^{137}Cs and ^{90}Sr in soils of reserve lands and their availability by plants]. *Vesti NAN Belarusi, Seriya agrarnykh nauk* [Proceeding of the National academy of sciences of Belarus, agrarian series], 2013, no. 3, pp. 58–70 (in Russian).

УДК 621.375.826

Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения

Козлов В.Л.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь

Поступила 10.01.2018

Принята к печати 19.02.2018

Для решения задачи повышения точности восстановления трехмерной картины пространства по двумерным цифровым изображениям необходимо использовать новые эффективные методики и алгоритмы обработки и корреляционного анализа цифровых изображений. Активно разрабатываются инструменты, позволяющие снизить временные затраты на обработку стереоизображений, повысить качество построения карт глубины и автоматизировать их построение. Целью работы являлось исследование возможностей использования различных методик обработки цифровых изображений для повышения точности измерений дальномера на основе корреляционного анализа стереоизображения.

Приведены результаты исследований влияния методик смещения цветовых каналов на точность измерения расстояний для различных функций, реализующих корреляционную обработку изображений; исследования по анализу возможности использования интегрального представления изображений для снижения временных затрат при построении карты глубины; исследования возможности использования предварительной фильтрации изображений перед корреляционной обработкой при измерении расстояний по стереоизображению.

Установлено, что использование равномерного смещения каналов ведет к минимизации общего числа измерительных ошибок, а применение извлечения яркости согласно стандарту sRGB ведет к увеличению числа ошибок для любой из рассмотренных методик корреляционной обработки. Интегральное представление изображения позволяет добиться ускорения корреляционной обработки, однако данный метод целесообразно применять для вычисления карты глубины на изображениях не более 0,5 мегапикселя. Использование фильтрации изображений перед корреляционной обработкой может обеспечить в зависимости от параметров фильтра либо увеличение значения корреляционной функции, что целесообразно использовать для анализа зашумленных изображений, либо сжатие корреляционной функции.

Ключевые слова: цифровое изображение, стереокамера, корреляционная обработка, карта глубины.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Address for correspondence:

Kozlov V.L.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Для цитирования:

Козлов В.Л.
Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 48–55.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

For citation:

Kozlov V.L.
[Methods of distance measurement's accuracy increasing based on the correlation analysis of stereo images].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 48–55 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

Methods of distance measurement's accuracy increasing based on the correlation analysis of stereo images

Kozlov V.L.

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus

Received 10.01.2018

Accepted for publication 19.02.2018

Abstract

To solve the problem of increasing the accuracy of restoring a three-dimensional picture of space using two-dimensional digital images, it is necessary to use new effective techniques and algorithms for processing and correlation analysis of digital images. Actively developed tools that allow you to reduce the time costs for processing stereo images, improve the quality of the depth maps construction and automate their construction. The aim of the work is to investigate the possibilities of using various techniques for processing digital images to improve the measurements accuracy of the rangefinder based on the correlation analysis of the stereo image.

The results of studies of the influence of color channel mixing techniques on the distance measurements accuracy for various functions realizing correlation processing of images are presented. Studies on the analysis of the possibility of using integral representation of images to reduce the time cost in constructing a depth map are proposed. The results of studies of the possibility of using images prefiltration before correlation processing when distance measuring by stereo imaging are proposed.

It is obtained that using of uniform mixing of channels leads to minimization of the total number of measurement errors, and using of brightness extraction according to the sRGB standard leads to an increase of errors number for all of the considered correlation processing techniques. Integral representation of the image makes it possible to accelerate the correlation processing, but this method is useful for depth map calculating in images no more than 0.5 megapixels. Using of image filtration before correlation processing can provide, depending on the filter parameters, either an increasing of the correlation function value, which is useful for analyzing noisy images, or compression of the correlation function.

Keywords: digital image, stereo camera, correlation processing, depth maps.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220050, Беларусь
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Address for correspondence:

Kozlov V.L.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220050, Belarus
e-mail: KozlovVL@bsu.by

Для цитирования:

Козлов В.Л.
Методики повышения точности измерения расстояний на основе корреляционного анализа стереоизображения.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 48–55.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

For citation:

Kozlov V.L.
[Methods of distance measurement's accuracy increasing based on the correlation analysis of stereo images].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 48–55 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-48-55

Введение

Для решения задачи повышения точности восстановления трехмерной картины пространства по двумерным цифровым изображениям необходимо использовать новые эффективные методики и алгоритмы обработки и корреляционного анализа цифровых изображений. Значительный прогресс в этой области обусловлен, во-первых, развитием методов проективной геометрии применительно к области компьютерного зрения [1] и, во-вторых, перспективными достижениями в области детектирования характеристических точек на изображениях и их сопоставлением между изображениями [2], что обусловлено разработкой теории теорий цветовых [3] и дифференциальных [4] инвариантов и созданием дескрипторов характеристических точек [2].

Задача реконструкции трехмерных сцен по стереоизображениям с учетом эпиполярных ограничений решается в работе [5]. Предложенная модель сопоставления изображений позволяет избежать процедуры ректификации, вносящей дополнительные динамические искажения, что обеспечивает возможность поиска соответствующих точек непосредственно на исходных стереоизображениях. Сравнительный анализ эффективности алгоритмов стереозрения в рамках решения задачи восстановления трехмерной картины объекта исследования представлен в [6]. В качестве критериев количественной оценки работы алгоритмов предложена мера расхождения восстановленной карты дальности и эталонной карты дальности, полученной с использованием камеры со структурированной инфракрасной подсветкой.

Для снижения временных затрат на обработку стереоизображений и повышение качества построения карт глубины активно разрабатываются инструменты, автоматизирующие их построение. Задача точного восстановления глубины по видео без дополнительной информации является в общем случае неразрешимой, поэтому для автоматического построения используются подходы, основанные на минимизации локальных критериев, такие как методы обработки карт глубины, использующие данные о цвете и движении из исходной видеопоследовательности для повышения стабильности карт глубины по времени и исправления ошибок построения. Фильтрация производится с учетом сходства пикселей исходного видео по яркости (цвету) и их пространственной близости [7]. В работе [8] предложен скоростной метод вычисления карты глубины (изображения,

каждый пиксель которого содержит информацию о расстоянии до стереокамеры) для реализации на графическом процессоре. Данное решение базируется на использовании нескольких скользящих окон адаптивной структуры с пред- и постобработкой входных и выходных изображений. Высокая производительность достигается за счет архитектуры современных графических процессоров, наиболее подходящих для решения задачи вычисления карты глубины локальными методами.

Однако в литературных источниках отсутствуют исследования о влиянии методик смешения цветовых каналов на точность измерений расстояний для различных функций, реализующих корреляционную обработку изображений; исследования по анализу возможности использования интегрального представления изображений для снижения временных затрат при построении карты глубины; исследование возможности использования предварительной фильтрации изображений перед корреляционной обработкой при измерении расстояний по стереоизображению.

Целью работы являлось исследование возможностей использования упомянутых выше методик для повышения точности измерений дальности на основе корреляционного анализа стереоизображения.

Методики смешения цветовых каналов при измерении расстояний по стереоизображению

Были проведены исследования влияния методик смешения цветовых каналов на точность измерения расстояний. Анализировались зависимости числа ошибок при обнаружении объекта на втором изображении стереопары для ряда функций, реализующих корреляционную обработку цифровых изображений, используемых в локальных методах восстановления сцены, от выбора метода перехода от цветного изображения к полутоновому. Исследования проводились для следующих функций:

1. Нормированная кросскорреляционная функция (NCC) – хорошо показывает себя при перепадах яркости и смещении цвета на фрагментах поиска и определяется выражением:

$$K(d) = \frac{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1) \cdot (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1)^2 \cdot (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)^2}}, \quad (1)$$

где I_1, I_2 – интенсивность точек первого и второго изображения стереопары соответственно; $\bar{I}_1, \bar{I}_2$ – средняя интенсивность точек первого и второго изображений внутри окон сканирования соответственно; u, v – координаты объекта на фотоприемной матрице вдоль строк и столбцов соответственно; d – сдвиг между окнами сканирования.

2. Сумма квадратов разностей (*SSD*) – более простая с математической точки зрения функция:

$$K(d) = \sum_{u,v} (I_1(u,v) - I_2(u+d,v))^2. \quad (2)$$

3. Нормированная сумма квадратов разностей (*NSSD*) – вычисляется в соответствии с выражением:

$$K(d) = \sum_{u,v} \left(\frac{I_1(u,v) - \bar{I}_1}{\sum_{u,v} (I_1(u,v) - \bar{I}_1)^2} - \frac{I_2(u+d,v) - \bar{I}_2}{\sum_{u,v} (I_2(u+d,v) - \bar{I}_2)^2} \right)^2. \quad (3)$$

4. Сумма модуля разностей (*SAD*) – аналог *SSD*, часто используется для снижения вычислительных затрат и определяется выражением:

$$K(d) = \sum_{u,v} |I_1(u,v) - I_2(u+d,v)|. \quad (4)$$

5. Метод, предложенный в работе [9], использующий локальное непараметрическое преобразование изображения перед поиском соответствия (*RANK*-преобразование). Сущность *RANK*-преобразования заключается в подсчете количества пикселей в окрестности текущего, интенсивность которых меньше, чем интенсивность текущего (центрального) пикселя. *RANK*-преобразование проводилось для трех размеров окна предобработки: 3×3 ; 5×5 ; 7×7 соответственно, *RANK 3*, *RANK 5*, *RANK 7*. Для устранения влияния фоновой засветки и шумов изображения результаты обработки сравниваются областями. В качестве функции соответствия обработанных областей используется функция *SAD*:

$$K(d) = \sum_{u,v} |I'_1(u,v) - I'_2(u+d,v)|, \quad (5)$$

$$I'_1(u,v) = \sum_{m,n} I_k(m,n) < I_k(u,v). \quad (6)$$

Перечисленные функции поиска стереосоответствия (1)–(6) применялись к карте яркостей, полученной из цветного изображения. Наиболее распространенным способом является равномерное смешение каналов *RGB* изображения, однако для некоторых задач целесообразно использова-

ние одного из цветных *RGB*-каналов, *Y*-канала из пространства цветов *YCbCr* или извлечение яркости согласно стандарту *sRGB*.

Использование одного из цветных *RGB*-каналов целесообразно в случаях, когда на изображении преобладает один из основных цветов *RGB*-модели: красный, зеленый либо синий. В таком случае вся информация о перепадах яркости будет сосредоточена в одном из каналов, а остальные будут добавлять шум при смешении. Использование такой методики оправдано при заранее известных параметрах съемки.

Применение равномерного смешения каналов является стандартной предкорреляционной обработкой при анализе изображений. Интенсивности итоговой карты яркости получаются усреднением суммы значений каналов:

$$I = (R + G + B) / 3, \quad (7)$$

где I – массив интенсивностей, поступающий на вход алгоритма поиска стереосоответствия; R, G, B – массивы, содержащие интенсивности красного, зеленого и голубого каналов исходного изображения соответственно.

Модель *YCbCr* широко используется в алгоритмах сжатия изображений и видео [10]. Канал Y этой модели несет информацию о яркости объектов на изображении, а каналы Cb и Cr – о распределении цвета. Использование Y -канала модели *YCbCr* позволяет начинать обработку алгоритмом поиска стереосоответствия еще до полной расшивки изображения или кадра видеопотока. Получение Y -канала пространства *YCbCr* из *RGB*-изображения производится по формуле [11]:

$$I = 0,299R + 0,587G + 0,114B. \quad (8)$$

Стандарт *sRGB* применяется в большинстве современных мониторов. Использование данного стандарта позволяет получить карту яркостей такой, какой видит ее человеческий глаз. Извлечение яркости согласно стандарту *sRGB* производится по формуле [12]:

$$I = 0,21R + 0,72G + 0,07B. \quad (9)$$

Для определения влияния выбора цветового пространства на количество ошибок при построении карты диспаратностей набор тестовых цветных изображений был переведен в градации серого каждой из формул (7)–(9). Для каждого из полученных наборов изображений строилась карта диспаратностей с использованием всех приве-

денных выше методов поиска стереосоответствия (1)–(6). В процессе обработки варьировались размеры окна сканирования, а для метода Забиха и Вудфилла [9] так же варьировался размер окрестности непараметрического преобразования.

Вклад ошибок, связанных с выбором того или иного метода получения карты яркости, представлен на графике (рисунок 1). Данные были получены для окон сканирования размером от 5×5 до 11×11 пикселей; дальнейшее увеличение размера окон сканирования ведет к росту ошибок вблизи границ объектов на изображении.

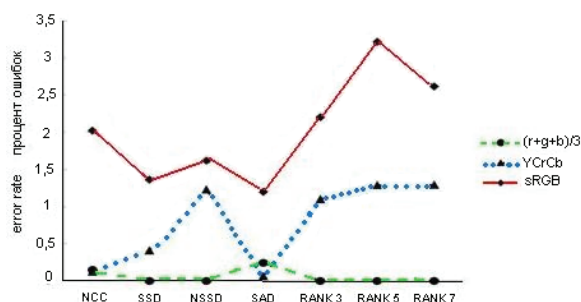


Рисунок 1 – Процент измерительных ошибок, связанных с выбором методики получения карты яркостей из *RGB* изображения

Figure 1 – Percentage of measurement errors depending of method of obtaining a brightness map from an *RGB* image

Проведенные исследования показали, что в задачах измерения расстояний для большинства рассмотренных видов корреляционных функций использование равномерного смещения каналов

ведет к минимизации общего числа измерительных ошибок. Однако использование *Y*-канала из пространства *YCbCr* будет оправдано при построении карты глубины совместно с функцией *SAD*. Наиболее популярная функция *NCC* показывает одинаковые результаты как при использовании равномерного смещения, так и при извлечении *Y*-канала. Попытка извлечения яркости согласно стандарту *sRGB* ведет к увеличению числа ошибок для любого из рассмотренных методов корреляционной обработки.

Анализ влияния предварительной фильтрации изображений на вид корреляционной функции

Были проведены исследования влияния предварительной фильтрации изображений на поведение корреляционной функции. Для целей исследования в программном комплексе *MATLAB* был сформирован ряд фильтров с конечной импульсной характеристикой при помощи алгоритма обмена Ремеза. На рисунке 2 представлены передаточные характеристики фильтров в логарифмическом масштабе. На графиках частоты задаются в относительных единицах, т.е. в диапазоне $[0, 1]$, где 1 соответствует частоте Найквиста. Зависимости значения корреляционной функции *NCC* от сдвига между изображениями в области точки корректного обнаружения после различной предварительной фильтрации представлены на рисунке 3.

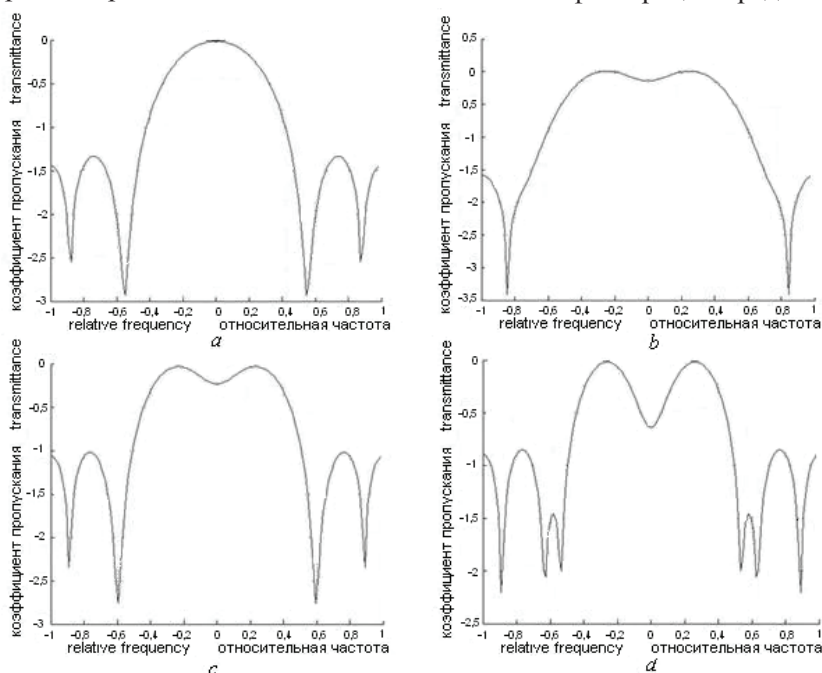


Рисунок 2 – Передаточные характеристики исследуемых фильтров

Figure 2 – Transmission characteristics of the filters under study

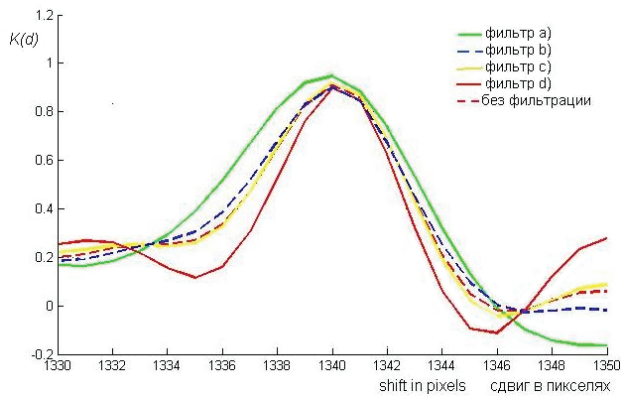


Рисунок 3 – Вид корреляционной функции NCC для изображений с различной предварительной фильтрацией
Figure 3 – The form of the NCC correlation function for images with different prefiltration

Как видно из рисунка 3, фильтры b и c незначительно изменяют вид функции корреляции; фильтр a , агрессивно убирающий высокочастотный шум, дает более пологие экстремумы корреляции с лучшим абсолютным значением; а фильтр d , гасящий не только высокочастотный шум, но и низкочастотный цветовой фон, дает большую крутизну кривой корреляции. Таким образом, для зашумленных изображений целесообразно использовать фильтр a , обеспечивающий максимальное значение корреляционной функции, а для повышения точности измерения сдвига между изображениями следует использовать фильтр d , обеспечивающий максимальное сжатие корреляционной функции.

Оптимизация вычислений путем использования интегрального представления изображений

Вычисление нормированной кросскорреляционной функции (NCC) можно ускорить, используя интегральное представление изображений [13]. Такое представление уменьшает время расчета суммарной яркости пикселей, попадающих в прямоугольник произвольных размеров.

Интегральное представление изображения – это матрица, совпадающая по размерам с исходным изображением. Значением каждого ее элемента является сумма интенсивностей всех пикселей исходного изображения, попадающих в прямоугольную область от верхнего левого угла изображения до координат текущего элемента. Формула, связывающая значения элементов матрицы и интенсивности пикселей исходного изображения, имеет вид:

$$M(x, y) = \sum_{i=0, j=0}^{i \leq x, j \leq y} I(i, j), \quad (10)$$

где $I(i, j)$ – яркость пикселя исходного изображения.

Элемент матрицы M с координатами (x, y) представляет собой сумму пикселей в прямоугольнике от $(0, 0)$ до (x, y) исходного изображения. Чтобы найти значение средней интенсивности пикселей исходного изображения в этом прямоугольнике, необходимо только разделить значение элемента матрицы M с координатами (x, y) на площадь прямоугольника.

Значения элементов матрицы M целесообразно вычислять по рекуррентной формуле:

$$M(x, y) = I(x, y) - M(x-1, y-1) + M(x, y-1) + M(x-1, y). \quad (11)$$

При таком подходе расчет производится с левого верхнего угла вправо и вниз и занимает время, пропорциональное числу пикселей в изображении.

Рассмотрим задачу вычисления суммы интенсивностей пикселей произвольного прямоугольника произвольной площади. Выберем на изображении прямоугольник произвольных размеров и обозначим координаты его верхнего левого угла как (x_1, y_1) , а координаты нижнего правого угла как (x_2, y_2) . Для вычисления суммы интенсивностей пикселей, попадающих в прямоугольник, обозначим на изображении точки $A(x_1-1, y_1-1)$, $B(x_2, y_1-1)$, $C(x_2, y_2)$, $D(x_1-1, y_2)$. В таком случае интересующая нас сумма будет вычисляться по формуле:

$$Sum = II(A) + II(C) - II(B) - II(D). \quad (12)$$

На рисунке 4 представлена графическая схема, иллюстрирующая расчет суммы интенсивностей пикселей произвольного прямоугольника с использованием интегральных изображений.

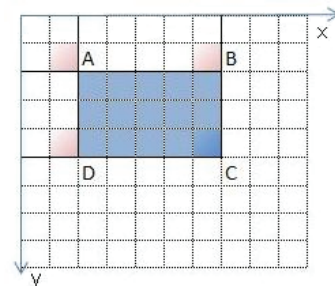


Рисунок 4 – Схема вычисления суммы яркостей пикселей через интегральное представление изображения
Figure 4 – A scheme for calculating the sum of the pixels brightnesses through an integral image presentation

Интегральное представление изображения позволяет найти сумму значений интенсивности пикселей любого прямоугольника в первоначальном изображении с помощью трех целочисленных операций, что позволяет добиться ускорения расчета корреляционной функции NCC за счет отсутствия необходимости пересчета сумм. Данный метод целесообразно применять при необходимости быстрого вычисления карты глубины на изображениях небольшого размера. При обработке изображений размером более 0,5 мегапикселя может произойти переполнение целочисленных переменных из-за накопления значений в нижней правой части массива. Увеличение размера переменных позволяет избежать ошибки переполнения при обработке изображений до 17 мегапикселей, но существенно повышает затраты оперативной памяти, используемой для работы.

Заключение

Предложены и обоснованы методики повышения точности измерения расстояний в пассивных дальномерах на основе корреляционного анализа стереоизображения:

- проведены исследования методик смещения цветовых каналов при измерении расстояний по стереоизображению. Установлено, что для рассмотренных видов функций, реализующих корреляционную обработку изображений, использование равномерного смещения каналов ведет к минимизации общего числа измерительных ошибок. Использование Y -канала из пространства YC_bCr будет оправдано при построении карты глубины совместно с функцией SAD . Функция NCC показывает одинаковые результаты как при использовании равномерного смещения, так и при извлечении Y -канала. Использование извлечения яркости согласно стандарту $sRGB$ ведет к увеличению числа ошибок для любой из рассмотренных методик корреляционной обработки;

- исследована возможность использования интегрального представления изображений при измерении расстояний по стереоизображению. Получено, что интегральное представление изображения позволяет добиться ускорения корреляционной обработки, однако данный метод целесообразно применять для вычисления карты глубины на изображениях небольшого размера. Для обработки изображений размером более 0,5 мегапикселя необходимо увеличивать размер целочисленных переменных (из-за появления оши-

бок переполнения), что существенно повышает затраты оперативной памяти, используемой для работы;

- предложена методика использования фильтрации изображений перед корреляционной обработкой с использованием фильтров с конечной импульсной характеристикой, обеспечивающая в зависимости от параметров фильтра либо увеличение значения корреляционной функции, что целесообразно использовать для анализа зашумленных изображений, либо сжатие корреляционной функции, что может быть использовано для повышения точности измерений.

Список использованных источников

1. Hartley, R. Multiple view geometry in computer vision / R. Hartley, A. Zisserman // Cambridge : Cambridge University Press, 2004. – 672 p.
2. Tuytelaars, T. Local invariant feature detectors: A survey / T. Tuytelaars, K. Mikolajczyk // Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision. – 2008. – Vol. 3, no. 3. – P. 177–280. doi: 10.1561/06000000017
3. Color invariance / J.M. Geusebroek [et al.] // IEEE Transactions on PAMI. – 2001. – Vol. 23, no. 12. – P. 1338–1350.
4. Lindeberg, T. Scale-space theory in computer vision / T. Lindeberg. – Dordrecht : Kluwer Academic Publishers, 1994. – 69 p.
5. Гошин, Е.В. Модель реконструкции 3D-сцен с учетом эпиполярных ограничений / Е.В. Гошин // Молодой ученый. – 2014. – № 12. – С. 71–73. doi: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-770-776
6. Пономарев, С.В. Методика сравнения алгоритмов стереозрения при восстановлении трехмерной модели лица человека / С.В. Пономарев // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. – 2013. – Т. 88, № 6. – С. 40–45.
7. Simonyan, K. Confidence measure for block-based motion vector field / K. Simonyan, S. Grishin, D. Vatolin // Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2008) : Proc. of 18th International Conference, Moscow, 23–27 June 2008. – Moscow, 2008. – P. 110–113.
8. Котюжанский, Л.А. Вычисление карты глубины стереоизображения на графическом процессоре в реальном времени / Л.А. Котюжанский // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6. – С. 444–449.
9. Zabih, R. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence / R. Zabih, J. Woodfill // Computer Vision – ECCV '94 : Proc of Third European Conference on Computer Vision, Stockholm, 2–6 May 1994. – Springer, 1994. – P. 150–158.
10. Стандарт сжатия JPEG / Лекции по курсу «Методы кодирования информации» [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://sernam.ru/lect_cod.php. – Дата доступа: 26.05.2014.

11. Фисенко, В.Т. Компьютерная обработка и распознавание изображений / В.Т. Фисенко, Т.Ю. Фисенко. – СПб.: СПбГУ ИТМО, 2008. – 192 с.

12. Мalykhina, М.П. Аспекты практического применения цветового различия для распознавания и выделения границ изображений / М.П. Мalykhina, Д.А. Шичкин // Научный журнал КубГАУ. – 2013. – Т. 89, № 5. – С. 623–634.

13. Гонсалес, Р. Цифровая обработка изображений / Р. Гонсалес, Р. Вудс. – М.: Техносфера, 2005. – 1072 с.

References

1. Hartley R., Zisserman A. Multiple view geometry in computer vision. Cambridge, Cambridge University Press, 2004, 672 p.

2. Tuytelaars T., Mikolajczyk K. Local invariant feature detectors: A survey. *Foundations and Trends in Computer Graphics and Vision*, 2008, vol. 3, no. 3, pp. 177–280. doi: 10.1561/06000000017

3. Geusebroek J.M. [et al.] Color invariance. *IEEE Transactions on PAMI*, 2001, vol. 23, no. 12, pp. 1338–1350.

4. Lindeberg T. Scale-space theory in computer vision. Dordrecht, Kluwer Academic Publishers, 1994, 69 p.

5. Goshin E.V. A model for the reconstruction of 3D scenes with epipolar constraints taken into account. *The young scientist*, 2014, no. 12, pp. 71–73 (in Russian). doi: 10.18287/0134-2452-2015-39-5-770-776

6. Ponomarev S.V. A method for comparing stereoscopic algorithms for restoring a three-dimensional model of a person's face. *Scientific and Technical Herald of Information Technologies, Mechanics and Optics*, 2013, vol. 88, no. 6, pp. 40–45 (in Russian).

7. Simonyan K., Grishin S., Vatolin D. Confidence measure for block-based motion vector field. *Computer Graphics and Vision (GraphiCon'2008), Proc. of 18th International Conference, Moscow, 23–27 June 2008, Moscow*, 2008, pp. 110–113.

8. Kotyuzhansky L.A. Calculation of the depth map of the stereo image on a graphical processor in real time. *Fundamental research*, 2012, no. 6, pp. 444–449 (in Russian).

9. Zabih R., Woodfill J. Non-parametric local transforms for computing visual correspondence. *Computer Vision - ECCV '94: Proc of Third European Conference on Computer Vision, Stockholm, 2–6 May 1994*, Springer, 1994, pp. 150–158.

10. JPEG compression standard. Lectures on the course «Methods of information coding». Available at: http://sernam.ru/lect_cod.php (access: 26.05. 2014).

11. Fisenko V.T., Fisenko T.Yu. Computer processing and image recognition. St. Petersburg, St. Petersburg State University ITMO, 2008, 192 p. (in Russian).

12. Malykhina M.P., Shichkin D.A. Aspects of practical application of color difference for recognition and allocation of image boundaries. *Scientific Journal of KubSU*, 2013, vol. 89, no. 5, pp. 623–634 (in Russian).

13. Gonzalez R., Woods R. Digital image processing. Moscow, Technosphere Publ., 2005, 1072 p. (in Russian).

Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during photometry by ellipsoidal reflectors

Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine

Received 16.01.2018

Accepted for publication 20.02.2018

Abstract

The correct accounting of laser emitter parameters for improvement of diagnostic authenticity of methods of optical biomedical diagnostic is important problem for applied biophotonic tasks. The purpose of the current research is estimation of influence of energy distribution profile in transversal section of laser beam on light scattering by human skin layers at photometry by ellipsoidal reflectors.

Biomedical photometer with ellipsoidal reflectors for investigation of biological tissue specimens in transmitted and reflected light uses laser probing radiation with infinitely thin, Gauss-type and uniform cross-section profile. Distribution of beams with denoted profiles, which consist of 20 million photons with wavelength 632.8 nm, was modeled by using of Monte-Carlo simulation in human skin layers (corneous layer, epidermis, derma and adipose tissue) of various anatomic thickness and with ellipsoidal reflectors with focal parameter equal to 16.875 mm and eccentricity of 0.66.

The modeling results represent that illuminance distribution in zones of photometric imaging is significantly influenced by the laser beam cross-section profile for various thickness of corneous layer and epidermis in transmitted and reflected light, and also derma in reflected light. Illuminance distribution for adipose tissue in reflected and transmitted light, and also derma in transmitted light, practically do not depend of laser beam profile for anatomic thicknesses, which are appropriate for human skin on various sections of body.

There are represented results of modified Monte-Carlo simulation method for biomedical photometer with ellipsoidal reflectors during biometry of human skin layers. For highly scattered corneous layer and epidermis the illumination of middle and external rings of photometric images changes depending from the laser beam profile for more than 50 % in transmitted and 30 % in reflected light. For weakly scattering skin layers (derma and adipose layer) the influence of profile can be observed only for derma in reflected layer and is equal not more than 15 %.

Keywords: ellipsoidal reflector, laser, human skin, photometry, Monte-Carlo simulation.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

Адрес для переписки:

Безуглый М.А.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: mikhail_bezuglyy@ukr.net

Для цитирования:

Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.
Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during
photometry by ellipsoidal reflectors.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 56–65.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

Address for correspondence:

Bezuglyi M.
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: mikhail_bezuglyy@ukr.net

For citation:

Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.
Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during
photometry by ellipsoidal reflectors.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 56–65.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

Влияние профиля лазерного пучка на светорассеяние кожей человека при фотометрии эллипсоидальными рефлекторами

Безуглый М.А., Безуглая Н.В., Костюк С.А.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина

Поступила 16.01.2018

Принята к печати 20.02.2018

Корректный учет параметров лазерного излучателя для повышения диагностической достоверности методов оптической биомедицинской диагностики является важным для прикладных задач биофотоники. Целью данной работы являлась оценка влияния профиля распределения энергии в поперечном сечении лазерного пучка на светорассеяние слоями кожи человека при фотометрии эллипсоидальными рефлекторами.

Биомедицинский фотометр с эллипсоидальными рефлекторами для исследования образцов биологических тканей в проходящем и отраженном свете использует в качестве зондирующего лазерное излучение бесконечно тонкого, гауссового и равномерного профиля поперечного сечения. Распространение пучков обозначенных профилей, состоящих из 20 млн фотонов с длиной волны 632,8 нм, было промоделировано путем симуляции Монте-Карло в слоях кожи человека (роговом слое, эпидермисе, дерме и подкожной жировой ткани) различной анатомической толщины и эллипсоидальных рефлекторах с фокальным параметром 16,875 мм и эксцентриситетом 0,66.

Результаты моделирования показали, что распределение освещенности в зонах поля фотометрических изображений для различных толщин рогового слоя и эпидермиса в проходящем и отраженном слое, а также дермы в отраженном свете существенно подвержены влиянию профиля поперечного сечения лазерного пучка. Распределение освещенности для подкожной жировой ткани в отраженном и проходящем свете, а также дермы в проходящем свете, практически не зависят от профиля лазерного пучка для анатомических толщин, свойственных коже человека на различных участках тела.

Представлены результаты модифицированного метода симуляции Монте-Карло для биомедицинского фотометра с эллипсоидальными рефлекторами при биометрии слоев кожи человека. Для сильно рассеивающих рогового слоя и эпидермиса освещенность среднего и внешнего колец фотометрических изображений изменяется в зависимости от профиля лазерного пучка более чем на 50 % в прошедшем свете и 30 % – в отраженном. Для слабо рассеивающих слоев кожи (дермы и подкожной жировой ткани) влияние профиля заметно только для дермы в отраженном слое и не превышает 15 %.

Ключевые слова: эллипсоидальный рефlector, лазер, кожа человека, фотометрия, Монте-Карло моделирование.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

Адрес для переписки:

Безуглый М.А.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: mikhail_bezuglyi@ukr.net

Address for correspondence:

Bezuglyi M.
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute»,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: mikhail_bezuglyi@ukr.net

Для цитирования:

Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.
Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during
photometry by ellipsoidal reflectors.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 56–65.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

For citation:

Bezuglyi M., Bezuglaya N., Kostuk S.
Influence of laser beam profile on light scattering by human skin during
photometry by ellipsoidal reflectors.
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 56–65.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-56-65

Introduction

Class of modern optical informational and measurement devices, which applies for noninvasive and low-invasive diagnostic of different indicators, conditions and diseases, use light-emitting diode or laser probing radiation with corresponding characteristics of energy and wavelength. Pulsioxymetry, glucose metering, chromometry, mexametry, laser Doppler flowmetry, and optical profilometry [1] create small by nomenclature, but the most numerous by production group of optical methods, which are widely used in biomedical and laboratory practice. Considering that mentioned methods use light, which is reflected and/or transmitted and the main light scattering organ is human skin, the evaluation of influence of its optical properties on the indicators of the registered light is important and actual problem.

In more complicated systems of optical noninvasive diagnostic (like optical diffuse or coherent tomography, confocal microscopy, and dermatoscopy) [2], there takes into consideration light scattering and light absorption properties of human skin during the process of medical visualization. Each of the mentioned methods allows estimation of skin integument structure in normal state or during pathologies in different depth and at different resolutions. The advantage of noninvasive research methods against traditional biopsy is not only the ability of fast receiving of cell image, tissue, and skin relief into mode, but also dynamical objectification of observation and evaluation of light therapy efficiency. Authors [1, 3] notes that interaction between light and skin is complicated due to the multilayer and multicomponent structures of skin. Corneous layer reflects 5–7 % of incident radiation. Collimated beam of light transforms into diffusive owing to microscopic heterogeneity in the boundary of air and corneous layer. Significant part of light, reflected by the skin, creates due to backscattering by different skin layers (corneous layer, epidermis, derma and microvascular system). Absorption of scattered light by skin pigments provide quantitative information about concentration of bilirubin, melanin, water, saturation of hemoglobin with oxygen, actual content of different absorbers in tissues and blood, and this form the basis for the number of previously mentioned methods [1, 4]. Significant penetration of visible and near infrared light through the skin inside the human organism, especially in the wavelength range of «therapeutic

window» (650–900 nm), is the basis for number of phototherapy methods [5].

Devices and systems, which realize these methods, refers to the class of photometers, according to measuring parameters and technical essence. The construction of such devices is typical for applied optical systems. However, the reliability and accuracy of measured values is still problem. The first reason is the loss of useful optical signal. The reason for this is impossibility of total registration of scattered by biological tissue radiation by collecting aperture. The second reason is the mathematical model of optical radiation distribution. It ensures the interconnection of measurement results with physiological characteristics, but it not necessarily considers the features of measurement system based on photometer. Taking into account general operation principles of mentioned biomedical photometers, they can be equipped by the measuring core with the shape of ellipsoidal reflector (ER). Thus allow increasing of specific weight of registered optical signal [6]. Practical experience of real and modelled experiments reveal that proper selection of parameters of reflector, source and photodetector [7] allow selection of necessary configuration of measuring tool for solution of different problems of biomedical experiment. The one of necessary condition for consideration of interaction of optical radiation with biological media is collimating of incident radiation, similarly to biophotonics in general and method of ellipsoidal photometry in particular. That is the reason why the interest of the research is the profile of energy distribution of radiation source in transversal direction to the light propagation and its influence on the features of ray tracing [8] in the system «biological media + ellipsoidal reflector» and on spatial distribution of scattered light. The aim of the study was the evaluation influence of the laser beam profile on the light scattering by human skin layers at ellipsoidal photometry.

Methods

Output parameters of laser radiation source, such as spectral characteristics, divergence of the laser beam, average or continuous power, coherence degree and modes [3], significantly influences the optical properties, which describes the interaction of such radiation with biological media. Since determination of optical properties of biological media (BM) solves using inverse methods of biomedical analysis, the proper consideration of

sourced parameters during solution of major problem will allow significant increasing of its accuracy. Considering the advantages, formulated in for photometers with ellipsoidal reflectors, among the direct methods of modelling of light propagation in BM the article authors singles out the Monte-Carlo method [9, 10]. During this method realization, it is possible to consider such parameters of source like power and energy distribution in transversal modes. From the other side, spectral characteristics of laser radiation are included in optical coefficients of scattering and absorption, scattering anisotropy factor, and in refractive index, that characterizes BM sample. Considering the photometer construction with ER and their purpose, longitudinal profile of laser beam (direction diagram, divergence), which traditionally considers as Gaussian, do not provide diagnostically significant information, and in this research it is not examined.

Power distribution in laser beam defines by properties of active resonator, which can have different stationary configurations of electromagnetic field (modes and oscillation type), thus the change of field directions in orthogonal secant of beam in each of coordinates [11] can be considered for specific laser type of selected power. For single-mode laser transversal mode TEM₀₀ of lower order is under the Gaussian law of intensity distribution around the central maximum (1). This transversal mode allow focusing of the laser ray into minimal spot with high power density:

$$\frac{I(r)}{I_0} = e^{-2r^2/r_0^2}, \quad (1)$$

where I_0 – intensity in the center of Gaussian beam; r_0 – radius of laser beam.

In the research there is represented analysis of influence of profile of main transversal mode with Gauss distribution. Additionally there considered cases with infinite thin beam and beam of finite diameter with uniform distribution (Figure 1). Practically, infinitely thin beam can be reached by using one or, in some cases, two diaphragms with small orifice diameter, placed in series. In this case, diameter of laser beam strives for zero. Gauss profile of main transversal mode corresponds to parameters of real laser sources without using of transmission optics, and beam radius determines by maximum value of intensity in beam center reduced on e^2 times. Almost uniform distribution is resulted by using of thin plate of milk-glass and collimating

optical system, increase of angular value of which corresponds to the output beam diameter, and suitable diaphragm, which acts as a spatial filter. Both critical cases of intensity distribution and Gauss transversal profile are axially symmetric and centered referring to receiving side of photodetector.

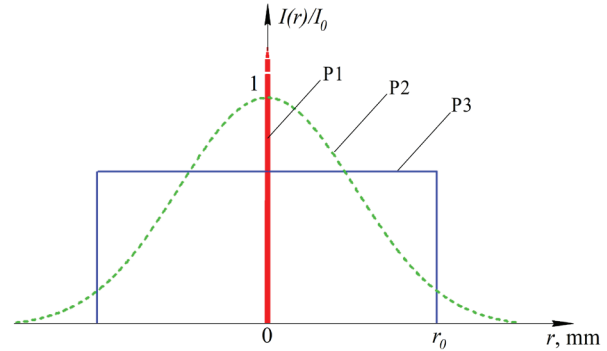


Figure 1 – Transversal distribution of laser power: $P1$ – infinitely thin beam; $P2$ – Gauss section beam; $P3$ – uniform intensity beam

The transition to values of laser source power (in case of continuous light emitting) and energy (in case of impulse light emitting) is possible if consider specific laser type and measurement method of these energy parameters. Considering numeric experiment of current research, it is assumed that nominal power of laser radiation is the graph functions situated under integral, and they are represented in Figure 1. At the same time incident radiation on experimental sample is considered the same for three examined cases of transversal profile of its distribution. At both anatomically and optically, human skin can be represented as single-layer organ, or multi-layer one with layer quantity up to 10 [12–14]. At the same time, separate layers are similar to each other, with minor differences in optical coefficients of scattering and absorption and the same refractive index [15]. For the research in this work there was selected four-layered structure with optical properties represented in Table. At the same time the thickness range of upper mentioned layers corresponds to Ref. [16]. Analysis of optical properties describe the corneous layer and epidermis as strongly scattering layers in this structure. Dermis and adipose tissue are weakly scattering comparing to them.

Algorithmization of light propagation in multi-layered BM by Monte Carlo method [10] include sequential considering of interactions of incident photon of initial weight with scattering (absorbing) center in separate layer. Results of modeling are coordinates of outgoing photon of reduced weight and directing cosines, which forms spatial distribution

of scattered radiation in photo receiving plane of measuring system, considering mechanism of ray-tracing in system «BM+ER» [7]. At the same time there considers Fresnel conditions between media of human skin layers. Multi-layered skin concept considers that optical properties and thickness of corneous layer, epidermis, derma, and adipose tissue remain constant. That is the reason why the variation of real layers thickness cannot be considered, and it is time-consuming process to evaluate the

influence of incident beam of rays on such structure. That's why in the research there was investigated the influence of energy distribution in transversal section inside the laser beam for separate layers of human skin in forward and backscattered light with using of mirror ellipsoid of revolution methods. As an informational-measuring system there was used photometer configuration (Figure 2), similar to experimental setup used in [7, 8], and Monte-Carlo simulation algorithm in system «BM+ER».

Table

Optical properties of human skin layers

Human skin layers	n	μ_a	μ_s	g	d, mm
Corneous layer	1.5	0.1	100	0.8	0.02 ... 0.62
Epidermis	1.34	0.15	45	0.8	0.035 ... 0.726
Derma	1.39	0.073	20	0.76	0.66 ... 4,76
Adipose tissue	1.44	0.068	15	0.8	0.03 ... 8,38

In real photometer are used two monochrome CCD camera DMK-21 (Imaging Source) and objective optical system Tamron 13VM2812. In case when photodetector size corresponds to reflector entrance port diameter (double focal parameter) and is sensitive plane situated directly in its second focal plane, thus all rays passed out of the BM sample participate in formation of photometric image. As size of CCD matrix of camera are significantly smaller then entrance port, than at photometry uses matching optical system that project photometric image, which was formed in second focal plane, into photodetecting plane. Actually, in such case in formation of photometric image participates only rays, which interacts with reflectors.

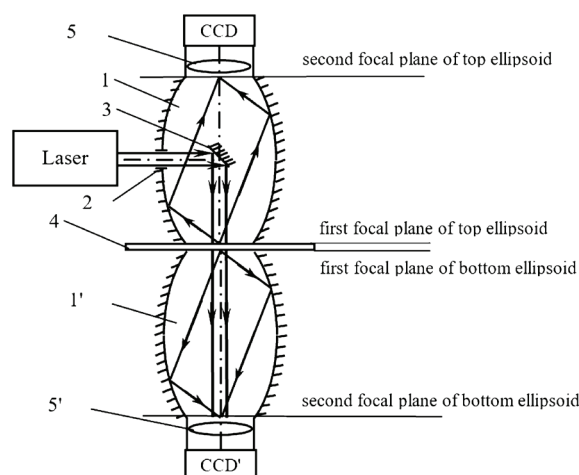


Figure 2 – Scheme of model photometer: top (1) and bottom (1') ellipsoidal reflector; source port (2); plane mirror (3); BM sample (4); the matching optical systems (5, 5')

For comparison of images, that were received by real photometer and obtained during simulation in modeling photometer, it is necessary to apply appropriate filtering. It is necessary to separate from photometric images only part of radiation, which reflected from the internal mirror surface of reflector, so as other part of radiation does not go to CCD matrix. Thus, it is possible to consider the influence of objective optical system of real photometer as a result of numerical modelling. Radiation from the light source comes through the source port 2 to the plane mirror 3, which is situated on the small axis of ellipsoid of revolution. In modeling experiment, the point of ray initiation is the plane mirror center, which coincides with mathematical center of ellipsoid, and initial weight of photons is reduced on the coefficient of reflection of mirror 3, which is used in real photometer.

Results and discussion

Modeling is performed by authorial developed specialized software. It represent adequately in both numerical comparison of calculated values of coefficients of diffuse reflection, absorption, and total transmittance; and analysis of photometric images of real and model experiments [17]. The quantity of emitted photons equals to 20 million for approximation of incident radiation parameters to possibilities of reception and registration system that use monochrome CCD camera. For three considered cases, separate photons sizes were adapted to form and size of photometric image pixels. The unit

photons weight was modeled by white color, and smaller values – at grayscale. As a result of modeling, there was received a series of photo-metric images of second focal plane of top and bottom ellipsoids for separate layers of human skin with different thickness

(Figure 3) considering the incident laser beam profiles. Photometric spatial distribution in second focal plane of top ellipsoid corresponds to backscattered light, and in second focal plane of bottom ellipsoid corresponds to forward scattered light.

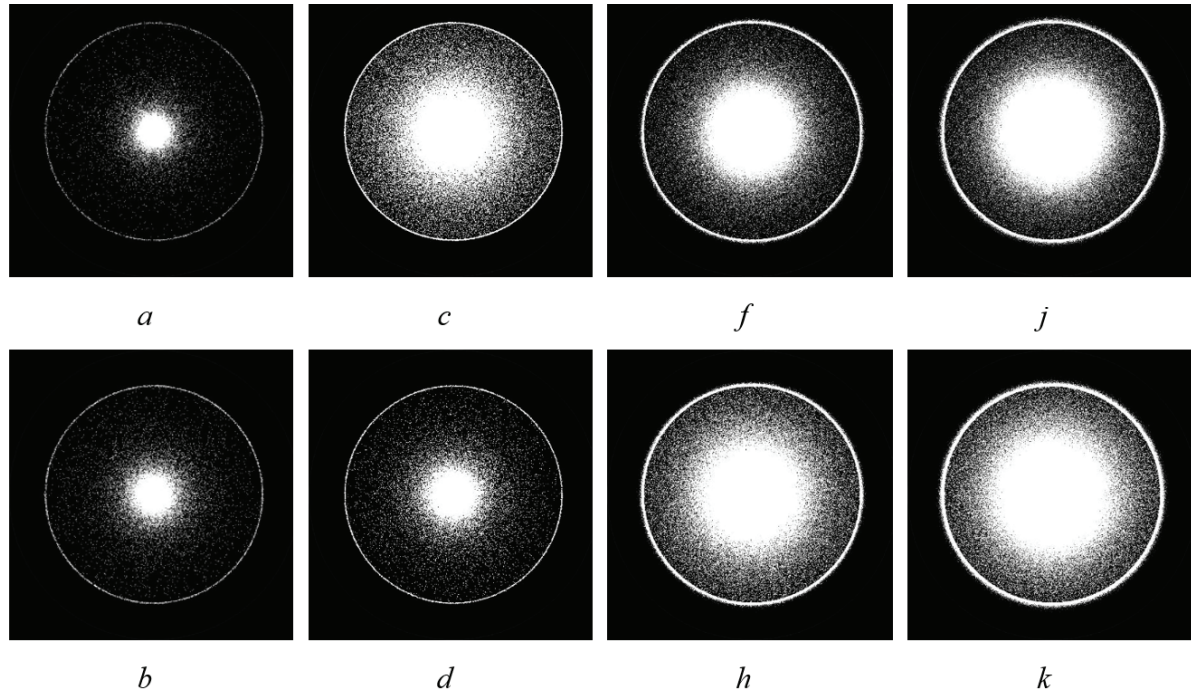
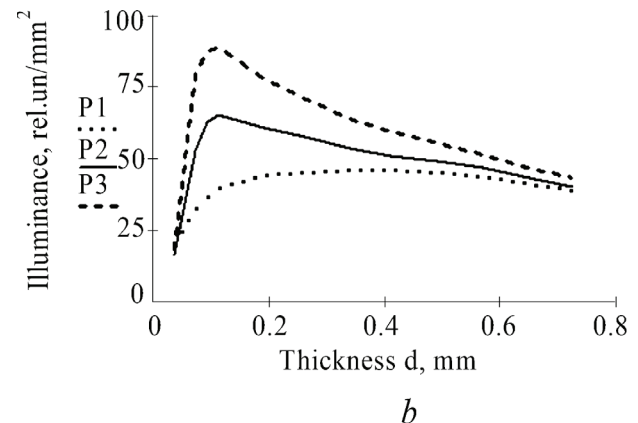
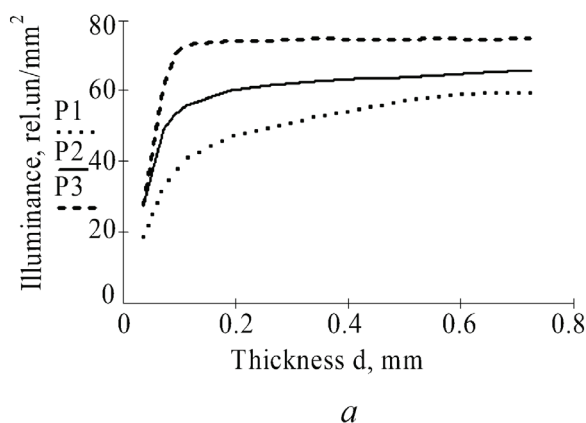


Figure 3 – Photometric images of forward and backscattered light for model with corneous layer thickness 0.02 mm (*a*, *b*), epidermis with thickness 0.035 mm (*c*, *d*), derma with thickness 1.56 mm (*f*, *h*) and adipose tissue with thickness 2.12 mm (*j*, *k*), which corresponds to uniform intensity distribution of incident beam

Based on the zone-analysis principles of axially symmetrical images at ellipsoid photometry [18], there were received graphs of illuminance dependency (relation between intensity in pixels to area of corresponding zones) for middle and external rings of photometric images (Figures 4–7). Error of determination of illuminance in middle ring of photometric image *a* calculates as relative deviation of illuminance level in central circle in each series of

modal experiments, equals to 0.02 % and 0.007 % for corneous layer, 0.015 % and 0.024 % for epidermis, 0.004 % and 0.003 % for derma, 0.01 and 0.03 % for adipose tissue in forward and backscattered respectively. Illuminance level of central circle is equable and includes collimated component, and component that characterizes main petal of light scattering diagram in forward and backward direction.



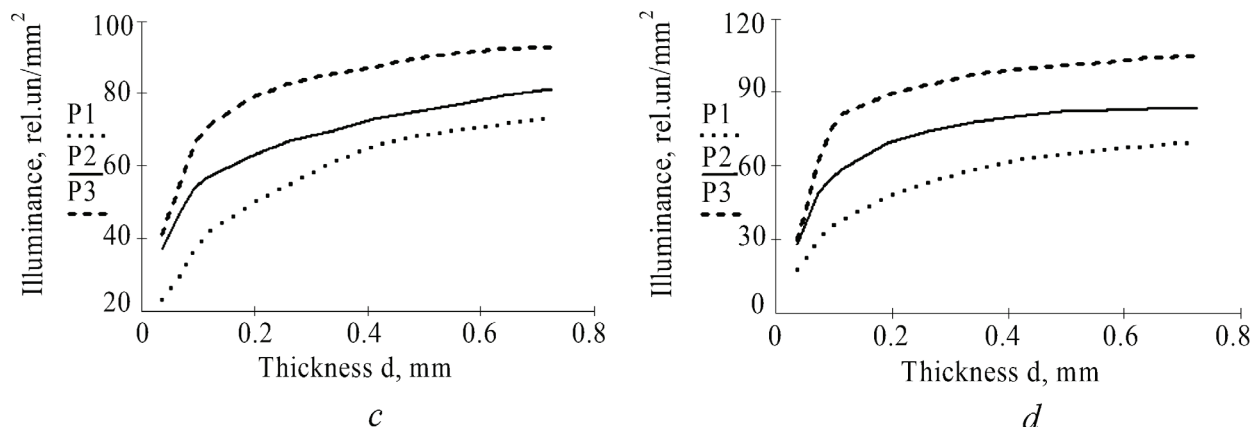


Figure 4 – Illuminance of the external and middle rings of photometric images for model of various thickness of corneous layer in forward (*a*, *b*) and backscattered (*c*, *d*) light respectively: *P1* – infinitely thin beam; *P2* – Gauss section beam; *P3* – uniform intensity beam

The mentioned error defines the accuracy photometric image central circle borders determination, where illuminance is equable, and correlate with sensitivity threshold value, expressed in Ref. [17], as $(100-\alpha)\%$. Parameters of mai

petal and middle ring can be used for investigation of scattering indicatrix by thick layers of BM, and therefore for determination of anisotropy factor of single scattering [18, 19]. However, they were not considered in the current research.

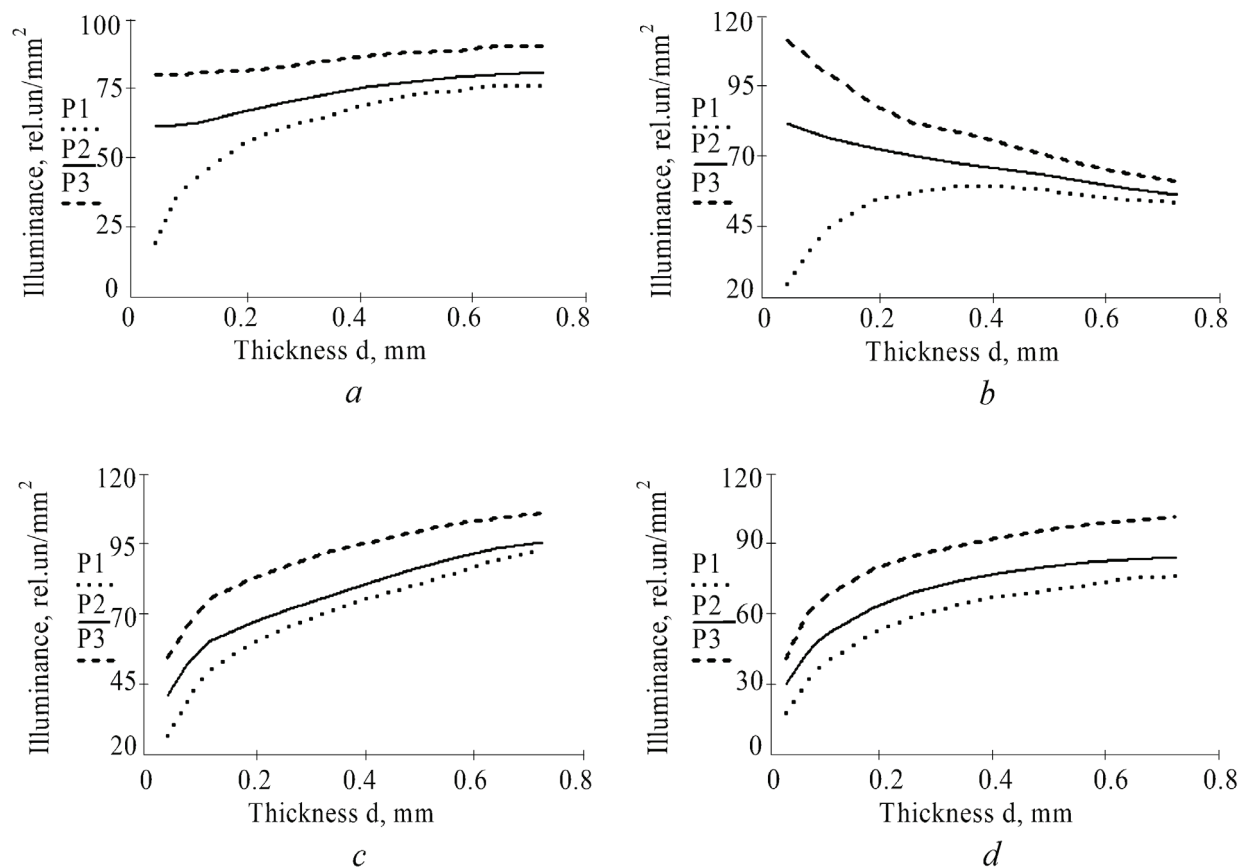


Figure 5 – Illuminance of the external and middle rings of photometric images for model of various thickness of epidermis in forward (*a*, *b*) and back scattered (*c*, *d*) light respectively: *P1* – infinitely thin beam; *P2* – Gauss section beam; *P3* – uniform intensity beam

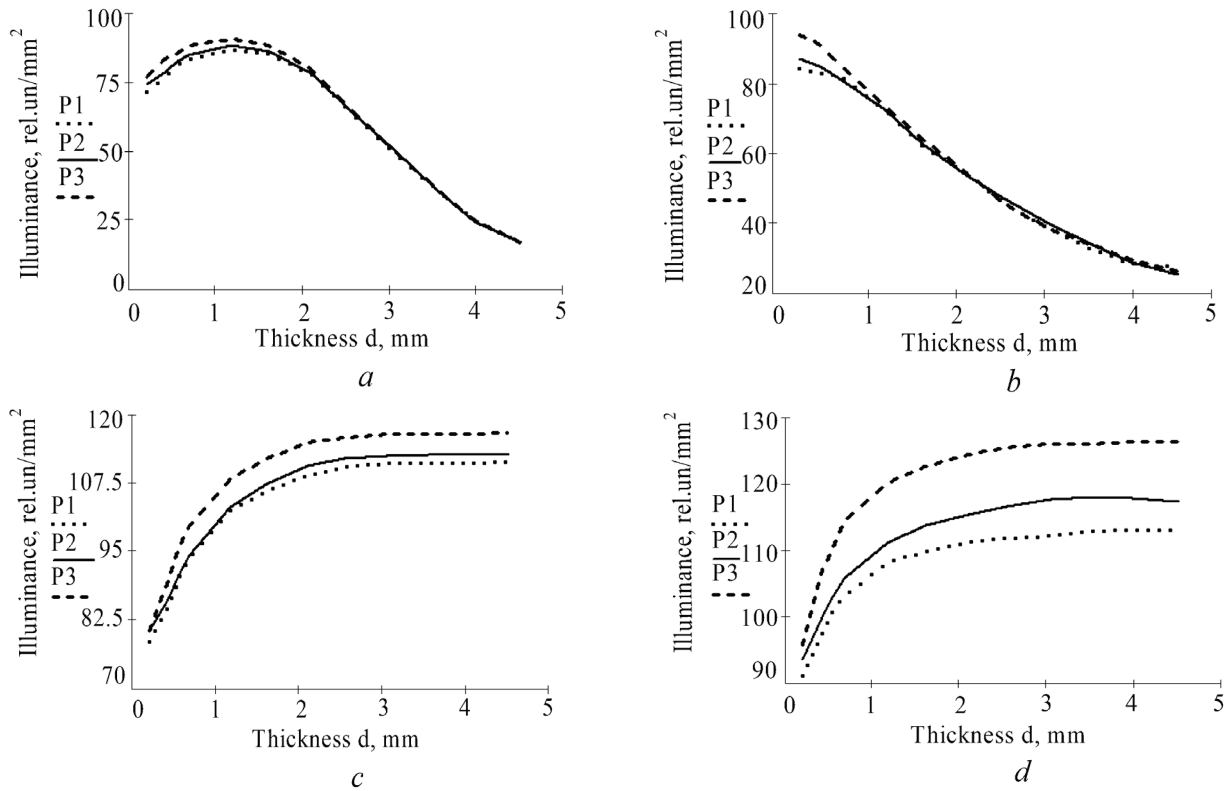


Figure 6 – Illuminance of the external and middle rings of photometric images for model of various thickness of derma in forward (a, b) and back scattered (c, d) light respectively: P1 – infinitely thin beam; P2 – Gauss section beam; P3 – uniform intensity beam

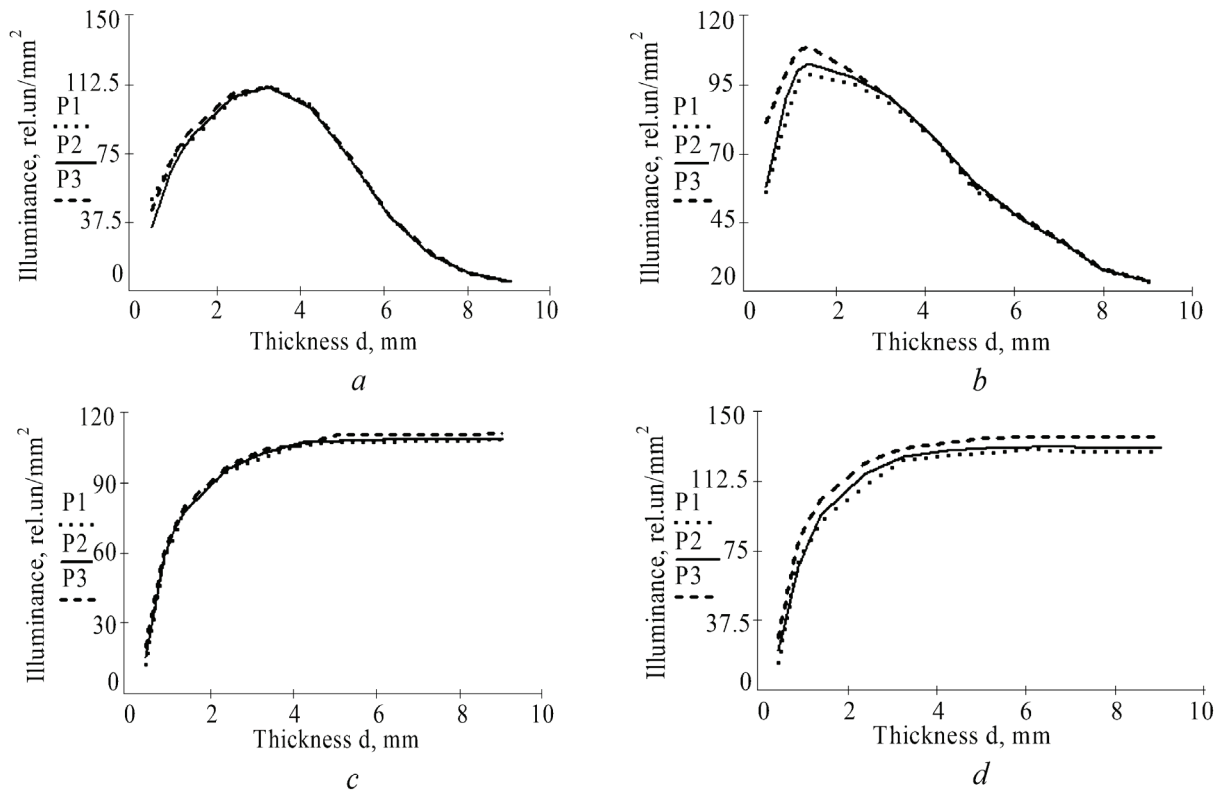


Figure 7 – Illuminance of the external and middle rings of photometric images for model of various thickness of adipose tissue in forward (a, b) and back scattered (c, d) light respectively: P1 – infinitely thin beam; P2 – Gauss section beam; P3 – uniform intensity beam

During the analysis of graphs, it is important to consider that real range of thickness change of investigated human skin layers is situated in the limits, described in the Table. That is the reason why the estimation of influence of incident beam profile on the spatial distribution of scattered radiation in photometric images (Figure 3) of separate layers is expedient to perform in mentioned thickness range of multi-layered structure. However, the combination of skin layers with different thicknesses in one modeling experiment can have too many variations.

Previous estimative tests of authors reveal that problem resolving require additional analytical basis. Thus, in current research it was analyzed influence of separate layers of human skin on spatial distribution at photometry by ellipsoidal reflectors.

There compares graphs of corneous layer (Figure 4) and epidermis (Figure 5) with dependency of different zones in photometric images of derma (Figure 6) and adipose tissue (Figure 7). Figures represent that in both reflected and transmitted light the transversal section of laser collimated beam significantly influences on the light distribution in both edge zone (external ring) and middle ring [17] of photometric image of corneous layer and epidermis. Thus, the profile of incident beam for these light scatter tissues will have crucial influence on light scattering of multi layered human skin structure regardless of the thickness of mentioned layers. At the same time, the influence of laser beam profile on adipose tissue in applied tasks of biomedical photometry by ellipsoidal reflectors will have no significant influence on light scattering. Thereby, the contribution of spatial distribution of scattered light by adipose tissue during investigation of multi layered skin structure can be represented by constant component of defined thickness. Atypical for this particular investigation is light scattering by derma (Figure 6). Moreover, the dependency of illuminance of forward scattered light from the beam profile is insignificant for almost all investigated thicknesses. This allows considering the radiation distribution effect in derma as constant component during creation of analytical model of forward light scattering. Thereby, the influence of incident beam profile on the light scattering in derma in forward direction is similar to light scattering of adipose tissue in forward and backward directions. At the same time, the influence of the laser profile on light scattering of derma in backward direction is similar to light scattering type in epidermis and corneous layer. Moreover, the influence of the profile on light

scattering in forward direction for corneous layer is too big for small thickness of such BM, which will particularly influence on the investigation of human skin samples from lips, forehead, nose, breast genitals, belly, back, shoulder, forearm, and thigh [16].

Light of the middle ring and edge zone of graphs can be considered typical for different profiles of incident beam, because there observes typical correlation in mutual disposition of corresponding curves. Infinitely small profile of incident laser beam creates lower illuminance of corresponding zones of photometric images comparing to Gaussian profile. Uniform distribution of radiation intensity in transversal section leads to the highest illuminance level.

Conclusion

Current report represents results of numerical modeling illuminance distribution in different zones of photometric image for separate layers of human skin in forward and back scattered light during photometry by ellipsoid reflectors. Numerical modeling was performed by Monte-Carlo method, which was modified for photometry by ellipsoid reflectors, and considers profile of transversal distribution of probing laser radiation. Received results reveal that for strongly scattering layers of human skin (corneous layer and epidermis) the influence of the incident beam profile for anatomic thicknesses of these layers is considerable, and create the illuminance difference in both edge zone and middle ring of photometric image. The difference reaches more than 50 % in forward scattered light, and 30 % in backward scattered light. At the same time, for relatively weak scattering layers of human skin (derma and adipose tissue) the influence of the incident beam profile is considerable only for derma in reflected light and reaches 10–15 %. Mentioned features reveal the influence of profile of incident laser beam on light scattering effects in separate layers of human skin. This allow interpretation of such results during construction of photometers with ellipsoid reflectors for human skin investigation as a multi layered media in condition of in vitro or in vivo experiments.

References

1. Tuchin V.V. *Opticheskaya biomeditsinskaya diagnostika* [Optical biomedical diagnostics. In 2 parts. Part. 1. Translated from English]. Moscow, Physmathlit Publ., 2007, 560 p. (in Russian).

2. Vo-Dinh Tuan. Biomedical Photonics Handbook II Vol., USA, CRC Press LLC, 2003, 889 p.
3. Baranoski G., Krishnaswamy A. An introduction to light interaction with human skin. *RITA*, 2004, no. 11 (1), pp. 33–62.
4. Pushkareva E. *Metody matematicheskogo modelirovaniya v optike biotkani* [Methods of mathematical modeling in tissue optics]. St. Petersburg, ITMO Publ., 2008, 103 p. (in Russian).
5. Genina E. *Metody biofotoniki: Fototerapiya* [Methods of biophotonics: Phototherapy]. Saratov, Novyi Veter Publ., 2012, 119 p. (in Russian).
6. Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V. Ellipsoidal reflectors in biomedical diagnostic. *Proc. SPIE*, 2013, pp. 9032. **doi:** 10.1117/12.2044606
7. Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V., Helich I.V. Ray tracing in ellipsoidal reflectors for optical biometry of media. *Appl Opt.*, 2017, no. 56 (30), pp. 8520–8526. **doi:** 10.1364/AO.56.008520
8. Bezuglyi M.A., Pavlovets N.V. Optical biometry of biological tissues by ellipsoidal reflectors. *Proc. OSA-SPIE*, 2013, pp. 8798. **doi:** 10.1117/12.2031142
9. Meglinskii I.V. Monte Carlo simulation of reflection spectra of random multilayer media strongly scattering and absorbing light. *Quantum Electronics*, 2001, no. 31, pp. 1101–1107. **doi:** 10.1070/QE2001v031n12ABEH002108
10. Prahl S.A., Keijzer M., Jacques S.L., Welch A.J. A Monte Carlo Model of Light Propagation in Tissue. *Dosimetry of Laser Radiation in Medicine and Biology*, 1989, SPIE Institute Series 5, pp. 102–111. **doi:** 10.1117/12.2283590
11. Budagovsky A.V. *Distantionnoye mezhkletchnoye vzaimodeystviye* [Distant intercellular interaction]. Moscow, Technika Publ., 2004, p. 104. (in Russian).
12. Florence Sudha G., T Ganesa Palnivelevu. Electronic biopsy for skin cancer detection. *Current science*, 2004, no. 87 (5), pp. 645–649.
13. Bashkatov A.N., Genina E.A., Kochubey V.I. and Tuchin V.V. Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm. *J. Phys. D Appl. Phys.*, 2005, no. 38 (15), pp. 2543–2555. **doi:** 10.1142/S1793545811001319
14. Cui W., Ostrander L.E. The relationship of surface measurements to optical properties of layered biological media. *IEEE Trans. Biomed. Eng.*, 1992, no. 39, pp. 194–201. **doi:** 10.1109/10.121651
15. Kozhemiako V., Pavlov S., Stanchuk K. *Optyko-elektronni metody i zasoby dlya obrobky ta analizu biomedychnykh zobrazen': Monohrafiya* [Optical-electronic methods and technics for treatment and analysis of biomedical images. Monography]. Vinnytsia, Universum, 2006, 203 p. (in Ukrainian).
16. Yeliseyev Yu. *Zabolevaniya kozhi. Polnyy meditsinskiy spravochnik dlya vsey semi* [Skin diseases: A complete medical reference book for the whole family]. Moscow, Eksmo Publ., 2009, 802 p. (in Russian).
17. Bezuglyi M.A., Bezuglaya N.V., Samilyak A.B. [Image processing at ellipsoidal photometry]. *Devices and methods of measurements*, 2016, no. 7, pp. 67–76 [in Russian]. **doi:** 10.21122/2220-9506-2016-7-1-67-76
18. Jacques S. L. Optical properties of biological tissues: a review. *Phys. Med. Biol.*, 2013, vol. 58, pp. R37–R61. **doi:** 10.1088/0031-9155/58/11/R37
19. Hall G., Jacques S.L., Eliceiri K.W., Campagnola P.J. Goniometric measurements of thick tissue using Monte Carlo simulations to obtain the single scattering anisotropy coefficient. *Biomedical optics express*, 2012, no. 3 (11), pp. 2707–2719. **doi:** 10.1364/BOE.3.002707

УДК 53.043

Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn нанотрубок для создания элементов гибкой электроники

Кадыржанов Д.Б.¹, Здоровец М.В.^{1,2,3}, Козловский А.Л.^{1,2}, Петров А.В.⁴, Бундюкова В.Д.⁴, Шумская Е.Е.⁴, Каниюков Е.Ю.⁴

¹Евразийский национальный университет им. Л.Н. Гумилева,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

²Астанинский филиал Института ядерной физики Министерства энергетики Республики Казахстан,
пр. Абылай хана, 2/1, г. Астана 010008, Казахстан

³Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина,
пр. Мира, 19, г. Екатеринбург 620075, Россия

⁴Научно-практический центр НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 19.01.2018

Принята к печати 21.02.2018

Целью работы являлось изучение возможности применения массивов Zn нанотрубок в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе в условиях воздействия ионизирующего излучения.

В работе представлены результаты синтеза Zn нанотрубок, полученных путем электрохимического осаждения в поры полимерных матриц, и изучение их структурных и электрофизических свойств после направленной модификации ионизирующим излучением с различной дозой. Методами растровой электронной микроскопии, рентгеноструктурного и энергодисперсионного анализа изучена структура нанотрубок, имеющих поликристаллическую структуру и полностью состоящих из цинка, и продемонстрировано, что облучение ионами Ar^{8+} с дозой от 1×10^9 до 5×10^{11} ион/см² и энергией 1,75 МэВ/нуклон оказывает влияние на кристаллическую структуру нанотрубок.

При больших дозах в Zn нанотрубок возникают локализованные высокодефектные зоны, приводящие к критическому изменению структуры и, соответственно, электропроводимости: при малых дозах электропроводимость увеличивается, однако при достижении порогового значения – резко снижается. Таким образом, был установлен механизм воздействия ионизирующего облучения на наноматериалы и определена возможность применения массивов Zn нанотрубок в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники.

Ключевые слова: срадиационное материаловедение, нанотехнологии, кристаллическая структура, электропроводность, гибкая электроника.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Адрес для переписки:

Шумская Е.Е.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lunka7@mail.ru

Address for correspondence:

Shumskaya A.E.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lunka7@mail.ru

Для цитирования:

Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В.,
Бундюкова В.Д., Шумская Е.Е., Каниюков Е.Ю.

Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn
нанотрубок для создания элементов гибкой электроники
Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 66–73.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

For citation:

Kadyrzhanov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V.,
Bundyukova V.D., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu.

[Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes
arrays for design of flexible electronics elements].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 66–73 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes arrays for design of flexible electronics elements

Kadyrzhanov D.B.¹, Zdorovets M.V.^{1,2,3}, Kozlovskiy A.L.^{1,2}, Petrov A.V.⁴, Bundyukova V.D.⁴, Shumskaya A.E.⁴, Kaniukov E.Yu.⁴

¹L.N. Gumilyov Eurasian National University,
Abay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

²Astana branch of the Institute of Nuclear Physics, Ministry of Energy of the Republic of Kazakhstan,
Abay Hana Ave., 2/1, Astana 010008, Kazakhstan

³Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin,
Mira str., 19, Ekaterinburg 620002, Russia

⁴Scientific and Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus

Received 19.01.2018

Accepted for publication 21.02.2018

Abstract

The aim of the study is establishing the possibility of using Zn nanotube arrays as a basis for design compact and lightweight elements of flexible electronics, including operating under influence of ionizing irradiation.

The paper presents the results of the synthesis of Zn nanotubes obtained by electrochemical deposition in the pores of polymer matrices and the study of their structural and electrophysical properties after directional modification by ionizing radiation with different doses. Using the methods of scanning electron microscopy, X-ray diffraction and energy dispersive analysis, the structure of nanotubes having a polycrystalline structure and completely consisting of zinc was studied and it was demonstrated that irradiation with Ar⁸⁺ ions with a dose from 1×10^9 to 5×10^{11} ion/cm² and energy 1.75 MeV/nucleon has an effect on the crystal structure of nanotubes.

At high doses, localized highly defect zones arise, leading to a critical change in the structure and physical properties of the nanotubes, respectively. It is shown that the consequence of the modification of the crystal structure is a change in the electrical conductivity of nanotubes: at low doses the electrical conductivity increases, but when the threshold value is reached, it sharply decreases. The change in the crystal structure and the corresponding changes in the conductive properties of Zn nanotubes due to irradiation determine the mechanism of ionizing radiation influence on nanomaterials and determine the possibility of using Zn nanotubes arrays as a basis for creating compact and lightweight elements of flexible electronics.

Keywords: radiation material science, nanotechnology, crystal structure, conducting properties, flexible electronics.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Адрес для переписки:

Шумская Е.Е.
НПЦ НАН Беларуси по материаловедению,
ул. П. Бровки, 19, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: lunka7@mail.ru

Address for correspondence:

Shumskaya A.E.
Scientific and Practical Materials Research Center of NAS of Belarus,
P. Brovka str., 19, Minsk 220072, Belarus
e-mail: lunka7@mail.ru

Для цитирования:

Кадыржанов Д.Б., Здоровец М.В., Козловский А.Л., Петров А.В.,
Бундюкова В.Д., Шумская Е.Е., Каниуков Е.Ю.
Влияние ионизирующего облучения на параметры массивов Zn нанотрубок для создания элементов гибкой электроники
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 66–73.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

For citation:

Kadyrzhanov D.B., Zdorovets M.V., Kozlovskiy A.L., Petrov A.V.,
Bundyukova V.D., Shumskaya A.E., Kaniukov E.Yu.
[Influence of ionizing irradiation on the parameters of Zn nanotubes arrays for design of flexible electronics elements].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 66–73 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-66-73

Введение

Среди огромного разнообразия материалов Zn [1] и ZnO [2, 3] являются одними из наиболее перспективных для создания наноструктур на их основе, так как они обладают как полупроводниковыми, так и пьезоэлектрическими свойствами, что может служить основой для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе предназначенных для работы в экстремальных условиях. Модификация с применением ионизирующего излучения наноструктурных материалов является одной из задач современного материаловедения, поскольку носит как прикладной, так и фундаментальный характер. Путем облучения ионными пучками представляется возможным не только модифицировать структуру наноматериалов [4–8], но и изменить проводимость наноструктур [9, 10].

Фундаментальный аспект изучения влияния ионизирующего излучения состоит в определении механизмов его взаимодействия с наноразмерными объектами, определении характера и свойств возникающих дефектов и их влияния на свойства материала. Известно, что взаимодействие пучков тяжелых ионов с материалом происходит посредством двух механизмов, наблюдаемых при разных энергиях ионов: за счет столкновений с ядрами и с электронами. Электронные потери энергии представляют собой неупругий процесс, который включает в себя возбуждение электронов и доминирует при энергии налетающих ионов > 1 МэВ/нукл. В то же время потеря энергии на ядрах включает в себя замедление налетающего иона за счет упругих столкновений и доминирует при низких энергиях (< 10 – 60 кэВ/нукл). Такое взаимодействие приводит к изменению структуры из-за формирования точечных дефектов в кристаллической структуре. Точечные радиационные дефекты могут аннигилировать или стекать по границам зерен. При больших энергиях облучающих ионов характерны каскадные атомные столкновения. Задача анализа таких явлений до сих пор не решена. Наиболее сложными для описания и анализа являются процессы эволюции кристаллической структуры вследствие облучения: диффузия, рекомбинация, а также образование комплексных дефектов. Указанные процессы определяют нарушения в кристаллической решетке и вызывают изменение как физических, так и механических характеристик наноструктур [9, 10]. В то же время структурные

изменения, связанные с изменением количества и характера дефектов при радиационном отжиге металлических наноструктур, приводят к изменению проводимости. При этом важными факторами при радиационной модификации являются энергия налетающих ионов и доза облучения, которые определяют конечную концентрацию дефектов в структуре.

С практической точки зрения наиболее интересными являются исследования, посвященные радиационной модификации структуры и физических свойств массивов наноразмерных материалов, таких как нанотрубки и нанопроволоки. Как массивы, так и одиночные нанотрубки и нанопроволоки могут стать основой микро- и наноэлектроники устройств в качестве элементов диодных и транзисторных систем. Благодаря своим уникальным структурным свойствам цилиндрические наноструктуры обладают потенциальной возможностью применения в качестве фотоэлектрических элементов, датчиков, лазеров, солнечных элементов, фотодетекторов. Особый интерес представляют структуры, полученные хорошо масштабируемым методом шаблонного синтеза в порах полимерных трековых мембран, позволяющих создавать целый класс малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники. Известны экспериментальные данные по исследованию влияния низкоэнергетических пучков тяжелых ионов на структуру и транспортные свойства Zn нанотрубок [7]. Нами в предыдущих работах было показано влияние облучения ионами Xe^{22+} [10] и электронами на структурные характеристики массивов Zn нанотрубок. В представленной работе на примере облучения ионами Ag^{8+} показано влияние воздействия ионизирующего излучения на структуру и электропроводимость массивов Zn нанотрубок с целью определения возможности их использования в качестве основы для создания малогабаритных и легковесных элементов гибкой электроники, в том числе предназначенных для работы в экстремальных условиях.

Методика

В качестве шаблонов для синтеза наноструктур Zn были использованы трековые мембраны толщиной 12 мкм на основе полиэтилен-терефталата с порами диаметром 380 ± 10 нм. Электрохимическое осаждение в поры шаблонной матрицы проводилось в потенциостатиче-

ском режиме при напряжении 1,75 В. Состав раствора электролита: $\text{ZnSO}_4 \times 7\text{H}_2\text{O}$ (360 г/л), NH_4Cl (30 г/л), $\text{NaC}_2\text{H}_3\text{O}_2 \times 3\text{H}_2\text{O}$ (15 г/л), $\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_6$ (120 г/л). Контроль за процессом роста наноструктур осуществлялся методом хроноамперометрии мультиметром Agilent 34410A. Для создания катода на шаблоны методом магнетронного напыления в вакууме наносился слой золота толщиной 10 нм, который служил рабочим электродом (катодом) при осаждении. При данных условиях напыления поры в матрице оставались открытыми, что позволяло получать наноструктуры в форме нанотрубок. Особенности получения формирования металлических нанотрубок в порах полимерных шаблонов приведены в работе [11].

Облучение Zn нанотрубок в полимерных шаблонах ионами Ar^{+8} с флюенсом от 1×10^9 до 5×10^{11} ион/см² проводилось на ускорителе тяжелых ионов «ДЦ-60» Астанинского филиала Института ядерной физики при давлении 10^{-4} Па. При этом траектория пробега ионов пролегла вдоль главной оси нанотрубок. Доза облучения задавалась путем изменения времени экспозиции. Оценка с использованием программного комплекса *SRIM 2013 Pro* показала, что при выбранной энергии 1,75 МэВ/нуклон расчетная длина пробега ионов Ar^{+8} в Zn нанотрубках составляет порядка 10 мкм, что меньше длины нанотрубок (12 мкм).

Исследование морфологических характеристик и элементного состава полученных нанотрубок до и после облучения проводилось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) *Hitachi TM3030* с системой энергодисперсионного микроанализа (ЭДА) *Bruker XFlash MIN SVE* при ускоряющем напряжении 15 кВ. Рентгеноструктурный анализ (РСА) проводился на дифрактометре *D8 ADVANCE ECO* с использованием излучения рентгеновской трубки с Cu-анодом и графитового монохроматора на дифрагированном пучке. Дифрактограммы записывались в диапазоне углов $30\text{--}90^\circ 2\theta$, с шагом $0,01^\circ 2\theta$. Для идентификации фаз и исследования кристаллической структуры использовалось программное обеспечение *Bruker AXSDIFFRAC.EVA v.4.2* и международная база данных *ICDD PDF-2*.

Определение электрофизических свойств массивов нанотрубок проводилось с использованием источника тока *HP 66312A* (США) и мультиметра *34401A Agilent* (США). Вольт-амперные

характеристики снимались с массива нанотрубок площадью 1,0 см² следующим образом: между двумя металлическими пластинами помещали образец с Zn нанотрубками таким образом, чтобы пластины перекрывали только ту часть, где нанотрубки находятся в пленке. Затем пластины подсоединяются к источнику тока с последовательным соединением мультиметра. Так как полимерный темплат имеет диэлектрическую природу, то во всем измеряемом диапазоне напряжений от $-1,3$ до $1,3$ В матрица не вносит вклад в электропроводящие характеристики нанотрубок.

Основная часть

При электроосаждении в поры ионо-трековых мембран были получены наноструктуры, представляющие собой трубки высотой 12 мкм, с внешним диаметром 380 нм (который задавался диаметром пор матрицы), внутренним диаметром 180 нм и толщиной стенок 100 нм. РЭМ снимки массивов Zn нанотрубок после удаления полимерной матрицы представлены на рисунке 1.

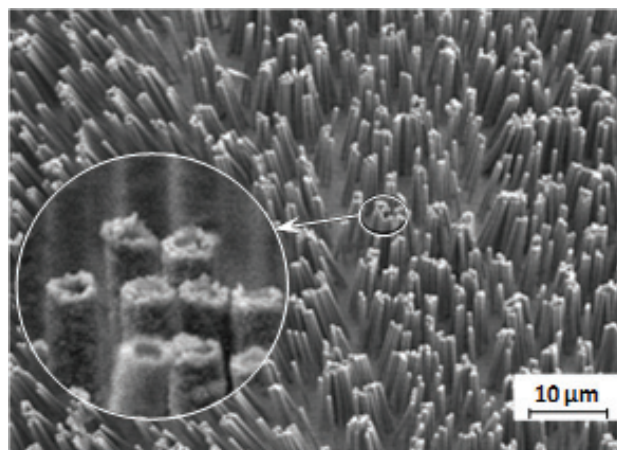


Рисунок 1 – РЭМ-изображение массива Zn нанотрубок после удаления полимерной матрицы

Figure 1 – SEM-images of array of Zn nanotubes after polymer template dissolution

Фазовый состав и параметры кристаллической решетки Zn нанотрубок были исследованы методом РСА, который подтвердил (рисунок 2), что синтезированные исходные образцы состоят из Zn с гексагональной примитивной решеткой с параметрами элементарной ячейки $a = 2,6638 \text{ \AA}$, $c = 4,9337 \text{ \AA}$ (PDF # 04-0831, $a = 2,665 \text{ \AA}$, $c = 4,947 \text{ \AA}$). Отличие значения параметра элементарной ячейки от эталонного значения, скорее всего, обусловлено микронапряжениями, возникающими в структуре в процессе синтеза.

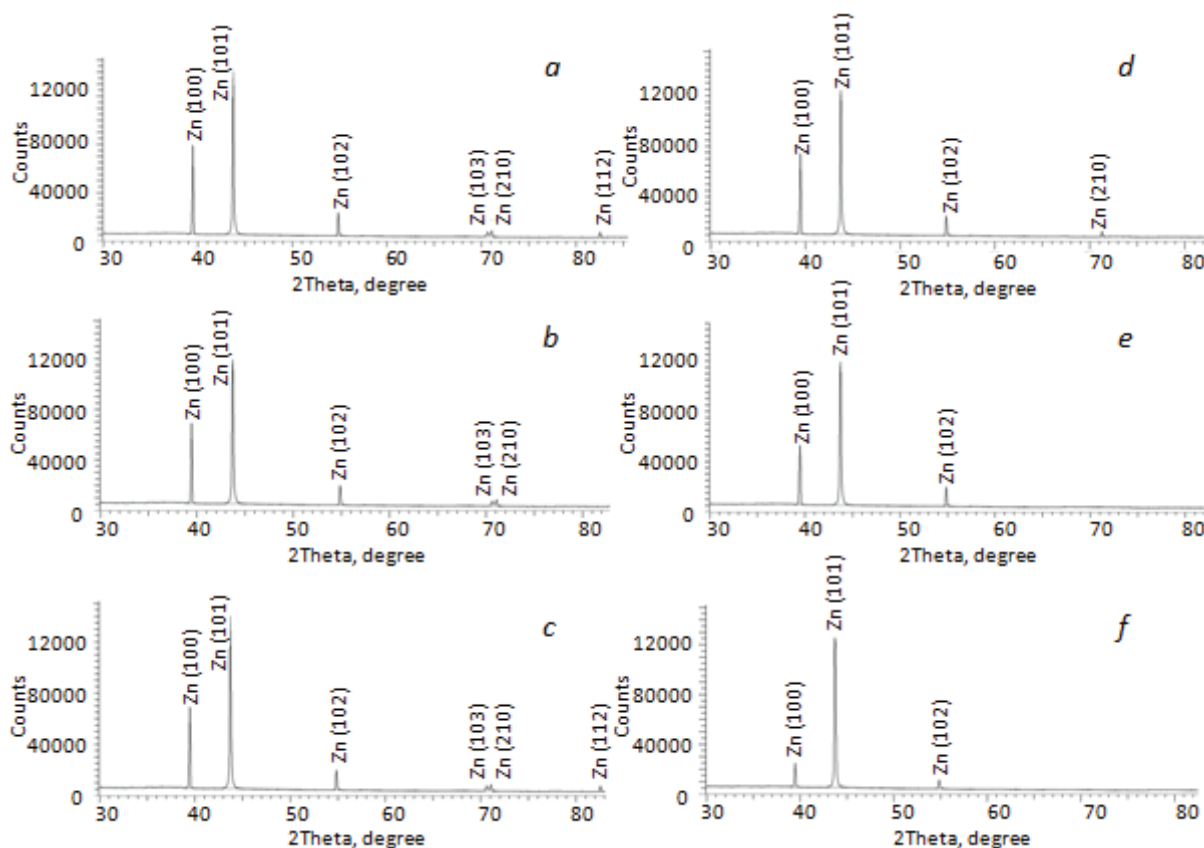


Рисунок 2 – PCA-спектры Zn нанотрубок, облученных с различной дозой: *a* – исходный; *b* – 1×10^9 ион/см²; *c* – 1×10^{10} ион/см²; *d* – 5×10^{10} ион/см²; *e* – 1×10^{11} ион/см²; *f* – 5×10^{11} ион/см²

Figure 2 – XRD-spectrum of Zn nanotubes irradiated with different doses: *a* – pristine; *b* – 1×10^9 ion/cm²; *c* – 1×10^{10} ion/cm²; *d* – 5×10^{10} ion/cm²; *e* – 1×10^{11} ion/cm²; *f* – 5×10^{11} ion/cm²

Как видно, с увеличением флюенса происходит изменение кристаллической структуры, что легко проследить по изменению параметра элементарной ячейки (таблица 1).

Таблица 1 / Table 1

Эволюция параметров кристаллической решетки Zn после облучения ионами Ar⁸⁺ с различной дозой
Evolution of the Zn lattice parameters after irradiation with Ar⁸⁺ ions with different doses

Доза, ион/см ² Doze, ion/cm ²	Исходный Pristine	1×10^9 ион/см ² ion/cm ²	1×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	1×10^{11} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{11} ион/см ² ion/cm ²
<i>a</i> , Å	2,6638	2,6641	2,6646	2,6649	2,6663	2,6672
<i>c</i> , Å	4,9337	4,9332	4,9327	4,9323	4,9321	4,9317

При увеличении дозы наблюдается незначительный рост параметров элементарной ячейки. Также при анализе представленных на рисунке 2 данных можно заметить, что с увеличением дозы облучения наблюдается снижение интенсивностей пиков при больших углах и при флюенсе облучения выше 5×10^{10} ион/см² интенсивность пиков для плоскостей (103), (210) и (212) снижается до минимума и сравнима по величине с фоновым излучением. Снижение интенсивностей может быть обусловлено изменением текстурных

коэффициентов (*TC*), которые рассчитывались по формуле Харриса (1):

$$TC(hkl) = \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)} \bigg/ \frac{1}{n} \sum \frac{I(hkl)}{I_0(hkl)}, \quad (1)$$

где $I(hkl)$ – экспериментально полученная относительная интенсивность; $I_0(hkl)$ – относительная интенсивность, соответствующая данной плоскости согласно базе JCPDS; n – количество плоскостей. Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Расчетные текстурные коэффициенты

Calculated texture coefficients

<i>hkl</i>	<i>TC (hkl)</i>					
	Исходный Pristine	1×10^9 ион/см ² ion/cm ²	1×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{10} ион/см ² ion/cm ²	1×10^{11} ион/см ² ion/cm ²	5×10^{11} ион/см ² ion/cm ²
100	0,7852	0,7146	0,7314	0,6931	0,5633	0,4521
101	1,0314	1,0452	1,1067	1,1462	1,1863	1,2156
102	0,4551	0,4135	0,4062	0,3984	0,3468	0,2461
103	0,3414	0,3151	0,3015	0,2893	–	–
210	0,3241	0,2972	0,2842	0,2576	0,1351	–
212	0,2315	0,2146	–	–	–	–

Текстурные коэффициенты больше единицы для направления указывают на преимущественную ориентацию кристаллитов (областей когерентного рассеяния), что предполагает увеличение числа зерен вдоль этих направлений. Число отражений (*n*) соответствует максимальному значению текстурных коэффициентов. Значения *TC(hkl)* исходного образца Zn нанотрубок подтверждают предположение о поликристаллической структуре с доминирующим направлением [101]. Незначительное регистрируемое изменение в кристаллической структуре связано с локализацией дефектов при их незначительном количестве относительно размеров самих образцов. Учитывая, что характер радиационных повреждений материала сильно зависит от энергии иона, и принимая во внимание, что выбранная энергия ионов Ar⁸⁺ составляет 1,75 МэВ/нуклон (т.е. расчетная длина пробега ионов в Zn нанотрубках 10 мкм меньше длины нанотрубок в 12 мкм), необходимо учитывать локальные изменения структуры, возникающие из-за уменьшения энергии ионов при их движении вдоль трека.

Известно, что энергия ионов может передаваться двумя механизмами: за счет энергии ядерных потерь (*S_e*), которая связана с передачей энергии атому через упругое столкновение и доминирует при низкой энергии (< 1 МэВ/нуклон), и энергии электронных потерь (*S_n*), которая представляет собой неупругое столкновение налетающего иона с электронами атомов мишени и доминирует при более высокой энергии (> 1 МэВ/нуклон).

Электронное торможение ионов приводит к переходу электронов на более высокие свободные энергетические уровни и, соответственно, образованию электронных вакансий на низких энергетических уровнях, т.е. происходит возбуждение атомов. В результате неупругих взаимодей-

ствий возникают электромагнитное излучение, приводящее ко вторичной ионизации. Упругое торможение порождает в первую очередь точечные дефекты типа пары Френкеля, а также каскады таких точечных дефектов.

При облучении наноструктур ионами Ar⁸⁺ с энергией 1,75 МэВ/нуклон возникают электронные (*S_e*) и ядерные (*S_n*) потери энергии, которые согласно расчету с применением программного обеспечения *SRIM Pro* 2013 сопоставимы. Так как электронные и ядерные энергетические потери способствуют локальному нагреву образца в области взаимодействия ионов с кристаллической решеткой. При последующей рекристаллизации происходит релаксация напряжений вследствие отжига дефектов и образование новых зерен с кристаллической структурой, близкой к эталонной. Таким образом, наблюдается переориентация текстурных направлений, что подтверждается данными рентгеноструктурного анализа.

В то же время при замедлении ионов в определенный момент времени их энергии становится недостаточно для электронного взаимодействия или образования каскадных дефектов, но достаточно для образования точечных дефектов типа пары Френкеля. С учетом того, что концентрация точечных дефектов в определенных зонах будет увеличиваться с увеличением флюенса, локализация и накопление таких дефектов будут происходить в областях, где ионы имеют наименьшую энергию и окончательно тормозятся. При превышении концентраций накопленных дефектов некоторого определенного значения и их коагуляции в таких областях будут происходить разрушение структуры и аморфизация отдельных областей нанотрубок. Впоследствии эти зоны становятся более подверженными внешним воздействиям и могут разрушаться вследствие механической или химической обработки. Так,

на рисунке 3 представлено РЭМ изображение нанотрубки, облученной с наибольшей дозой, после удаления полимерного шаблона.

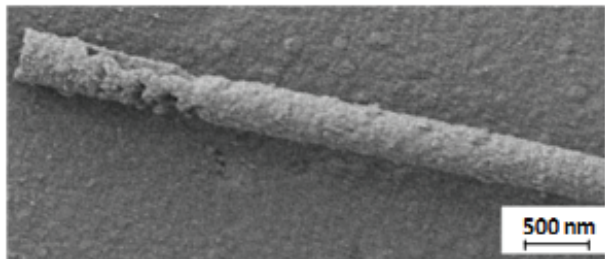


Рисунок 3 – РЭМ-изображение разрушенной структуры Zn нанотрубки, полученной для образца, облученного ионами Ar^{8+} с дозой $5 \times 10^{11} \text{ ion/cm}^2$

Figure 3 – SEM-image of the destroyed structure of a Zn nanotube obtained for a sample irradiated with Ar^{8+} ions with a dose of $5 \times 10^{11} \text{ ion/cm}^2$

Для потенциального практического применения наноструктур в качестве основы для устройств микроэлектроники одной из важных характеристик является удельная проводимость (σ), которую для массивов нанотрубок рассчитывали по формуле (2):

$$\sigma = \frac{dI}{dU} \frac{l}{A}, \quad (2)$$

где l – длина нанотрубок; A – площадь; dI/dU – тангенс угла наклона $I-U$. На рисунке 4 представлен график зависимости удельной проводимости

Zn нанотрубок от дозы облучения. Погрешность измерений составляет не более 3 %.

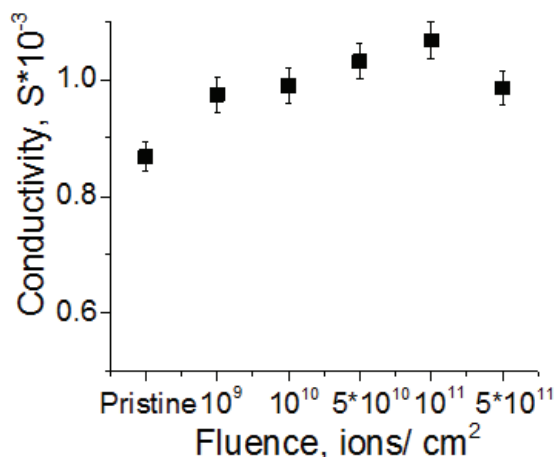


Рисунок 4 – График зависимости проводимости образцов Zn нанотрубок от дозы облучения

Figure 4 – Graph of the change in conductivity of Zn nanotubes samples from the radiation dose

Как видно из рисунка 4, модификация кристаллической структуры ионами Ar^{8+} влечет изменение проводящих свойств. При росте дозы облучения проводимость увеличивается. После достижения критического значения $5 \times 10^{11} \text{ ion/cm}^2$, при котором происходит разрушение структуры, наблюдается уменьшение электропроводности. Ионизирующее облучение, являясь причиной радиационного отжига дефектов, приводит к увеличению электропроводности массива нанотрубок. Накопление дефектов, вызывающее разрушение структуры при больших дозах облучения, снижает проводимость.

Таким образом, определена зависимость электропроводности массивов Zn нанотрубок от дозы ионизирующего облучения. Также установлена критическая доза, превышение которой приводит к деградации наноструктурного материала и утрате электропроводящих свойств. Несмотря на это, достаточно высокие значения проводимости образцов позволяют рассматривать массивы Zn нанотрубок в качестве основы для элементов электроники, функционирующих в пределах определенной дозы облучения.

Заключение

Проведено исследование влияния облучения ионами Ar^{8+} с энергией 1,75 МэВ/нукл и дозой от 1×10^9 до $5 \times 10^{11} \text{ ion/cm}^2$ на структуру и электропроводность массивов Zn нанотрубок диаметром 380 нм, синтезированных методом электрохимического осаждения в порах трековых мембран. В результате направленной модификации нанотрубок наблюдается незначительное увеличение параметров элементарной ячейки, что может быть обусловлено отжигом дефектов и рекристаллизацией. При этом увеличивается электропроводность образцов вплоть до доз 10^{11} ion/cm^2 , после чего электропроводящие характеристики ухудшаются за счет появления локальных высокодефектных зон и разрушения структуры. Таким образом, установлена критическая доза, превышение которой приводит к деградации наноструктурного материала и утрате физических свойств. Несмотря на это, достаточно высокие значения проводимости образцов позволяют рассматривать синтезированные массивы нанотрубок в качестве основы для элементов электроники, функционирующих в пределах определенной дозы облучения.

References

1. Kaur A., Chauhan R.P. Modifications induced by silicon and nickel ion beams in the electrical conductivity of zinc nanowires. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2013, vol. 24, no. 11, pp. 4302–4310. **doi:** 10.1007/s10854-013-1402-0
2. Ronning C., Borschel C., Geburt S., Niepelt R. Ion beam doping of semiconductor nanowires. *Materials Science and Engineering R: Reports*, 2010, vol. 70, no. 3–6, pp. 30–43. **doi:** 10.1016/j.mser.2010.07.002
3. Chauhan R.P., Gehlawat D., Kaur A. Ion beam fluence induced variation in optical band-gap of ZnO nanowires. *Journal of Experimental Nanoscience*, 2014, vol. 9, no. 8, pp. 871–876. **doi:** 10.1080/17458080.2012.736639
4. Gehlawat D., Chauhan R.P. Swift heavy ions induced variation in the electronic transport through Cu nanowires. *Materials Chemistry and Physics*, 2014, vol. 145, no. 1–2, pp. 60–67. **doi:** 10.1016/j.matchemphys.2014.01.033
5. Chauhan R.P., Rana P. Effect of O⁵⁺ ion implantation on the electrical and structural properties of Cu nanowires. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2014, vol. 302, no. 2, pp. 851–856. **doi:** 10.1007/s10967-014-3262-3
6. Dhara S. Formation, dynamics, and characterization of nanostructures by ion beam irradiation. *Critical Reviews in Solid State and Materials Sciences*, 2007, vol. 32, no. 1–2, pp. 1–50. **doi:** 10.1080/10408430601187624
7. Park S.K., Hong Y.K., Lee Y.B., Bae S.W., Joo J. Surface modification of Ni and Co metal nanowires through MeV high energy ion irradiation. *Current Applied Physics*, 2009, vol. 9, no. 4, pp. 847–851. **doi:** 10.1016/j.cap.2008.07.021
8. Rana P., Narula C., Rani A., Chauhan R.P., Gupta R., Kumar R. Ion implantation effects of negative oxygen on copper nanowires. *Journal of Materials Science: Materials in Electronics*, 2017, vol. 28, no. 14, pp. 9998–10006. **doi:** 10.1007/s10854-017-6757-1
9. Kumari M., Rana P., Chauhan R.P. Modifications in structural and electrical properties of gamma irradiated CdSe nanowires. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research, Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2014, vol. 753, pp. 116–120. **doi:** 10.1016/j.nima.2014.03.062
10. Shlimas D.I., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V., Mashentseva A.A., Kadyrzhanov K.K. Changes in structural and conducting characteristics of zinc nanotubes by bombardment with Xe⁺²² heavy ions. *High Energy Chemistry*, 2017, vol. 51, no. 1, pp. 14–19. **doi:** 10.1134/S0018143916060175
11. Korolkov I. V., Gorin Y.G., Yeszhanov A.B., Kozlovskiy A.L., Zdorovets M.V. Preparation of PET track-etched membranes for membrane distillation by photo-induced graft polymerization. *Materials Chemistry and Physics*, 2018, vol. 205, pp. 55–63. **doi:** 10.1016/j.matchemphys.2017.11.006

удк 621. 382.8.002

Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.

Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь

Поступила 15.01.2018

Принята к печати 21.02.2018

Влияние неплоскостности полупроводниковых пластин на характеристики изготавливаемых приборов проявляется через расфокусировку изображения топологии формируемой структуры и снижение разрешения при проведении операций фотолитографии. Для качественного контроля неплоскостности широко используется метод *Макуон* топографии, который однако не позволяет получить количественные характеристики наблюдаемых дефектов, что существенно ограничивает его применение. Цель данной работы заключалась в разработке методики расчета размеров топографических дефектов пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами, что позволило установить критерии годности пластин в зависимости от размеров дефектов и проводить их своевременную отбраковку.

В основу разрабатываемой методики расчета положен вывод соотношений, связывающих искажение элементов изображения с кривизной локальных участков полупроводниковой пластины со сформированными на ней структурами. Данные структуры рассматривались как конечные элементы изображения, в пределах которых радиус кривизны поверхности принимался постоянным. Последовательное вычисление отклонения края элементов от идеальной плоскости на основании определения радиуса их кривизны позволило получить геометрический профиль контролируемой поверхности в выбранном ряду элементов. Определены условия формирования изображений и требования к структурам.

Получены аналитические выражения, связывающие величину искажений элементов светотеневого изображения с геометрическим профилем поверхности. Это позволяет проводить оперативный количественный контроль наблюдаемых топографических дефектов как в производственных условиях, так и в исследовательских целях. Приведены примеры расчетов топографических дефектов полупроводниковых кремниевых пластин. Сравнение полученных результатов с данными традиционных методов показало их полную идентичность.

Ключевые слова: полупроводниковые структуры, оптическая топография, количественный контроль, расчет изображений.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых кремниевых структур.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 74–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 74–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor silicon structures

Sianko S.F., Zelenin V.A.

Physical Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus,
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus

Received 15.01.2018

Accepted for publication 21.02.2018

Abstract

The effect of non-flatness of semiconductor wafers on characteristics of manufactured devices is shown through defocusing of an image of a topological layout of a structure being formed and through reduction of resolution at photolithographic processing. For quality control of non-flatness the Makyoh method is widely used. However, it does not allow obtaining quantitative characteristics of observed defects, which essentially restricts its application. The objective of this work has been developing of a calculation method for dimensions of topographic defects of wafers having semiconductor structures formed on them, which has allowed determining acceptability criteria for wafers, depending on defects dimensions and conducting their timely penalization.

A calculation method under development is based on deduction of relationships linking distortion of image elements to curvature of local sections of a semiconductor wafer that has formed structures. These structures have been considered to be image finite elements and within this range the curvature radius has been assumed to be constant. Sequential calculation of deviation of element ends from ideal plane based on determining their curvature radius has allowed obtaining geometry of a target surface in a set range of elements. Conditions of image formation and requirements to structures have been determined.

Analytical expressions relating a deviation value of elements of a light-to-dark image with surface geometry have been obtained. This allows conducting effective quantitative control of observed topographic defects both under production and research conditions. Examples of calculation of topographic defects of semiconductor silicon wafers have been provided. Comparison of the obtained results with the data obtained by conventional methods has shown their complete conformity.

Keywords: semiconductor structures, Makyoh topography, quantitative characterization, image calculation.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Адрес для переписки:

Сенько С.Ф.
Физико-технический институт Национальной академии
наук Беларуси,
ул. Купревича, 10, г. Минск 220114, Беларусь
e-mail: senkosf@tut.by

Для цитирования:

Сенько С.Ф., Зеленин В.А.
Оценка размеров топографических дефектов полупроводниковых
кремниевых структур.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 74–84.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Address for correspondence:

Sianko S.F.
Physical Technical Institute of the National Academy
of Sciences of Belarus
Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
e-mail: senkosf@tut.by

For citation:

Sianko S.F., Zelenin V.A.
[Estimation of topographic defects dimensions of semiconductor
silicon structures].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 74–84 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-74-84

Введение

Геометрическое совершенство полупроводниковых пластин оказывает огромное влияние на выход и качество изготавливаемых на них приборов. Однако, поскольку пластин с идеальными плоскими поверхностями не существует, можно утверждать, что в действительности поверхность любой пластины характеризуется объемным топографическим рельефом. Положение любой точки на ее поверхности однозначно характеризуется тремя координатами X , Y и Z . Наибольший интерес при этом представляет изменение координаты Z на заданном участке поверхности от некоторого значения, соответствующего идеальной плоскости, иначе неплоскостность, выражаемая как функция $Z = f(X, Y)$ и определяемая качеством механической обработки рабочей поверхности.

Влияние неплоскостности на характеристики изготавливаемых приборов проявляется через расфокусировку изображения топологии формируемой структуры и снижение разрешения при проведении фотолитографических операций. Современные проекционные системы, использующие дальнее ультрафиолетовое излучение ($\lambda = 100\text{--}300\text{ нм}$), характеризуются глубиной фокуса $1\text{--}2\text{ мкм}$. Размер кристаллов ИС при этом составляет примерно $1 \times 1\text{ см}$. Это означает, что допустимая неплоскостность составляет 2 мкм на 1 см длины. В противном случае часть элементов кристалла будет находиться вне фокуса и их размеры уже не будут соответствовать требуемым нормам [1].

Нормативно-техническая документация на полупроводниковые пластины в качестве одного из основных требований выдвигает соответствие качества обработки поверхности 14 классу шероховатости [2, 3], что соответствует высоте неровностей профиля R_z менее 25 нм . Однако фактические требования к качеству поверхности гораздо выше, т.к. современные полупроводниковые приборы базируются на технологии, использующей пленки толщиной 10 нм и менее. Кроме того, многочисленные исследования качества поверхности пластин после полировки показали наличие разнообразных дефектов [4–7], связанных как непосредственно с полировкой, так и с предыдущими операциями, в частности выращиванием слитков, их резкой на пластины, травлением и т.д.

Контроль поверхностей такого уровня качества достигается теневыми методами, которые позволяют выявлять дефекты размером порядка $1/100$ длины волны, что для видимого света составляет величину порядка 7 нм . Среди них широкое распространение получил метод опти-

ческой топографии [8–10], называемый в зарубежной литературе методом *Макуо* топографии [11, 12]. С помощью данного метода проведены обширные исследования топографических дефектов поверхности полупроводниковых пластин и их связи с другими видами дефектов [13–16]. Установлены виды дефектов и причины их возникновения, в частности ямок, бугорков, волнистости поверхности и др. Установлена их взаимосвязь с другими дефектами подложек, например свирл-дефектами, линиями скольжения. Определены размеры топографических дефектов в плане. В то же время практически отсутствует информация об их размерах в высоту, что сдерживает разработку критериев годности пластин по данной группе дефектов. Одной из причин этого является сложная нелинейная зависимость интенсивности изображения дефекта от его геометрических параметров и отсутствие приемлемых методов расчета наблюдаемых изображений.

Цель данной работы заключалась в разработке методики расчета размеров топографических дефектов пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами, что позволило установить критерии годности пластин в зависимости от размеров дефектов и проводить их своевременную отбраковку.

Формирование изображения структур методом оптической топографии

Метод оптической топографии основан на простых законах геометрической оптики. Оптическая схема контроля приведена на рисунке 1.

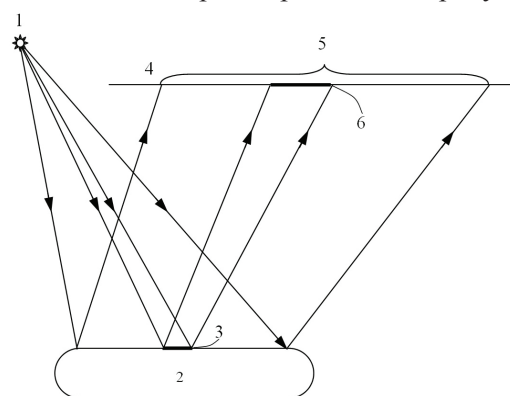


Рисунок 1 – Оптическая схема контроля поверхностей методом оптической топографии: 1 – источник света; 2 – контролируемая поверхность; 3 – дефект; 4 – экран; 5 – светотеневое изображение поверхности; 6 – изображение дефекта

Figure 1 – Scheme of Makyoh topography imaging: 1 – light source; 2 – target surface; 3 – defect; 4 – screen; 5 – light-to-dark image of surface; 6 – defect image

Свет от гомоцентрического источника падает на контролируемую поверхность, отражается от нее и попадает на экран. Наличие неровностей поверхности кремниевых пластин со сформированными на них полупроводниковыми структурами приводит к локальному изменению угла отражения света по отношению к углу отражения поверхностью в целом, что проявляется в искажении изображения структуры в локальных областях с $Z \neq 0$. При $Z < 0$ (вогнутость поверхности) изображение структуры уменьшается, а при $Z > 0$ (выпуклость) – увеличивается. Величина искажений напрямую зависит от размеров дефектов, что позволяет рассчитать размеры микронеровностей поверхности полупроводниковой пластины.

Искажение изображения на криволинейном участке поверхности

Удобными объектами для расчета размеров дефектов являются полупроводниковые пластины со сформированными на них структурами в виде кристаллов прямоугольной формы с размерами сторон 1–3 мм. Сформированные структурами можно рассматривать как координатную сетку с размерами ячейки x вдоль оси X и y вдоль оси Y . Условие ортогональности осей X и Y при этом не является обязательным. Измерение искажения изображения такой сетки позволяет рассчитать величину неровностей.

От размера структурного элемента или ячейки координатной сетки зависит точность расчета координат Z дефекта. Уменьшение размера ячейки приводит к увеличению количества измерений и повышению точности контроля. Расчет размеров неровностей поверхности возможен, если максимальный размер ячейки не превышает трети размера дефекта в плане, т.е. необходимо, чтобы изображение дефекта с линейными размерами l было разделено по крайней мере на три элемента. Если изображение дефекта разделено ровно на два элемента, то границы дефекта и границы этих элементов совпадают и смещения изображения не наблюдается, т.к. для края и центра дефекта данное смещение отсутствует.

С уменьшением размеров ячейки координатной сетки точность контроля возрастает. Однако минимальный размер ячейки имеет свой предел. Физический предел определяется разрешающей возможностью метода по изображению дефек-

тов в плане. Так, для случая, изображенного на рисунке 1, он равен:

$$\delta_{\min} = \frac{gh}{g+h} \times \operatorname{tg} \gamma, \quad (1)$$

где γ – угловой размер используемого источника света; g – расстояние от источника света до контролируемой поверхности, h – расстояние от контролируемой поверхности до экрана. Для наиболее типичного случая, когда $g = 1$ м, $h = 1$ м и $\operatorname{tg} \gamma = 0,0001$ такой предел составляет 50 мкм, т.е. величину порядка ширины скрайберной дорожки на полупроводниковой пластине.

Примем, что каждая ячейка сетки представляет собой элементарный участок поверхности, который может быть вогнутым ($Z < 0$), выпуклым ($Z > 0$) или плоским ($Z = 0$). Допустим также, что радиус кривизны контролируемой поверхности в пределах каждого такого отдельно взятого элемента является величиной постоянной. Изображение контролируемой поверхности на экране также оказывается разделенным на отдельные элементы, ограниченные линиями координатной сетки. Однако вследствие кривизны поверхности пластины размеры таких элементов на экране оказываются искаженными. Определим соотношение между расстояниями от источника света до контролируемой поверхности, от контролируемой поверхности до экрана и радиусами кривизны R элементов контролируемой поверхности.

Воспользуемся формулой сферического зеркала [4]:

$$\frac{1}{g} + \frac{1}{F} = \frac{2}{R}, \quad (2)$$

где F – расстояние от контролируемой поверхности до точки фокусировки отраженного светового потока. Отсюда:

$$F = \frac{Rg}{2g - R}. \quad (3)$$

Для обеспечения однозначности результатов контроля различных неровностей одной и той же поверхности необходимо, чтобы изображение всех элементарных участков, составляющих контролируемую поверхность, формировались одинаковым образом. Размеры изображений ячеек координатной сетки на выпуклых участках поверхности всегда больше по сравнению

с размерами изображений ячеек, расположенных на плоских участках поверхности. Изображения же структур, расположенных на вогнутых участках поверхности, сильно зависят от положения экрана и могут быть прямыми уменьшенными, перевернутыми уменьшенными и перевернутыми увеличенными. Для достоверной идентификации дефектов и проведения расчетов приемлемым является лишь такой случай, когда вогнутые участки дают прямое уменьшенное изображение, т.е. противоположное изображению выпуклых участков. Размеры изображений ячеек координатной сетки на вогнутых участках поверхности при этом меньше по сравнению с размерами изображений ячеек, расположенных на плоских участках поверхности. Это может быть осуществлено только в случае, если фокусы вогнутых элементов будут располагаться после экрана (т.е. $F > h$) или же будут отсутствовать вовсе (случай, если $2g < R$, а также для выпуклых элементов $R < 0$). Данное условие можно выразить математически в виде:

$$R > \frac{2gh}{g+h}. \quad (4)$$

Если данное условие не соблюдается, изображение вогнутого элемента контролируемой поверхности на экране либо превращается в точку ($F = h$) и становится практически невидимым, либо является перевернутым и накладывается на изображение других элементов ($F < h$). Часть изображений ячеек «исчезает», что создает некоторую неопределенность при идентификации изображения. В этих случаях проведение измерений параметров изображения сильно усложняется или даже практически невозможно.

Следующим этапом настоящей методики является измерение смещений Δx и Δy изображений ячеек координатной сетки и расчет координат. Измерение смещений изображений ячеек координатной сетки может быть осуществлено с помощью практически любых измерительных приспособлений либо программными средствами при загрузке изображения в персональный компьютер. В отдельных случаях, когда размеры неровностей соизмеримы с размерами всей контролируемой поверхности, проводят измерение размеров изображения ячейки координатной сетки, из которого вычитают расчетный размер этого изображения, равный $x^* = x(g+h)/g$.

Расчет координат X и Y не представляет затруднений. Смещение изображений ячеек

не приводит к изменению количества элементов изображения. Поэтому координаты выбранной точки можно вычислить простым умножением порядкового номера элемента на его размер в направлении оси X или Y :

$$X_{ij} = ix|_{j=\text{const}}, \quad (5)$$

$$Y_{ij} = jy|_{i=\text{const}}. \quad (6)$$

Сложнее обстоит дело с определением координаты Z_{ij} . Это возможно только на основании измерений смещений изображений координатной сетки. Изменение величины Z_{ij} определяется смещением изображения как контролируемого элемента, так и предыдущего, причем вклад смещения изображения предыдущего элемента в два раза выше. Очевидно, и это будет показано ниже, что приращение величины Z_{ij} определяется тангенсом угла наклона контролируемого элемента к плоскости контролируемой поверхности, определяемого как $\Delta x/2h$. Значение Z_i для ряда, состоящего из нескольких элементов изображения при $j = \text{const}$, является суммой приращений отдельных элементов и может быть выражено как:

$$Z_i = z_0 - \frac{kx}{2h} \sum_{n=1}^{i-1} \Delta x_n - \frac{kx \Delta x_i}{4h}. \quad (7)$$

На рисунке 2 приведена схема образования смещения изображения элементов поверхности, поясняющая соотношение между углами падающих и отраженных лучей, а на рисунке 3 приведена схема, поясняющая формирование профиля поверхности. Наличие неровности на контролируемой поверхности приводит к смещению изображения ее элементов. Свет от точечного источника S , расположенного на расстоянии g от контролируемой поверхности, падает на элемент контролируемой поверхности AB с некоторой кривизной радиусом R с центром в точке O . Точка A данного элемента совпадает с положением x_0 , соответствующим идеальной плоскости, а точка B отклонена от этой идеальной плоскости на величину $\Delta z = x_3 B$. Примем, что размер контролируемого элемента поверхности достаточно мал, и изменением радиуса его кривизны от точки A до точки B можно пренебречь. Размер контролируемого элемента AB в плане вдоль оси X , принадлежащей плоскости контролируемой поверхности, составляет величину $x = x_0 x_3$. Контролируемый элемент дает на экране, располо-

женном от контролируемой поверхности на расстоянии h , изображение вдоль соответствующей оси X^* , принадлежащей плоскости экрана, размером $x^* + \Delta x = x_0^* x_7^*$. На основании геометрической оптики легко определить соотношение между углами α ($\operatorname{tg} \alpha = x/R$) и β ($\operatorname{tg} \beta = x/g$). В случае отсутствия кривизны контролируемой поверхности размер изображения составил бы величину $x^* = x_0^* x_4^* = x(g+h)/g$. Величина смещения изображения края контролируемого элемента, соответствующего точке B , от положения, соответствующего идеальной плоскости (далее – изменение размеров элемента в соответствующем направлении X или Y по отношению к размеру, соответствующему идеальной плоскости), составляет величину $\Delta x = x_4^* x_7^*$, которую можно выразить как:

$$\Delta x = h \times \operatorname{tg}(2\alpha - \beta + \beta) = h \times \operatorname{tg} 2\alpha. \quad (8)$$

Отсюда:

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{\Delta x}{h} \quad (9)$$

или для малых углов

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta x}{2h}. \quad (10)$$

Поскольку $x_0 x_1 = x_1 x_3$, то величину отклонения $\Delta z = x_3 B$ поверхности от идеальной плоскости можно записать как:

$$\Delta z = -\frac{x}{2} \times \operatorname{tg} \alpha = -\frac{x \Delta x}{4h}. \quad (11)$$

Знак минус указывает на то, что положительные значения смещения Δx соответствуют отрицательным значениям Δz (т.е. дефект имеет форму ямки).

Из рисунка 2 видно, что величина R связана с Δx следующим соотношением:

$$R = \frac{x}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{2hx}{\Delta x}. \quad (12)$$

Это отношение можно использовать в случае необходимости для предварительной оценки радиуса кривизны дефектов контролируемой поверхности с точки зрения обеспечения необходимого условия формирования ее изображения.

$$z_2 = z_{2-1} + z_{2-2} + z_{2-3} = z_1 - x \operatorname{tg} \alpha_1 - \frac{x}{2} \times \operatorname{tg}(\alpha_2 - \alpha_1) = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{2h} - \frac{x \Delta x_2}{4h}. \quad (14)$$

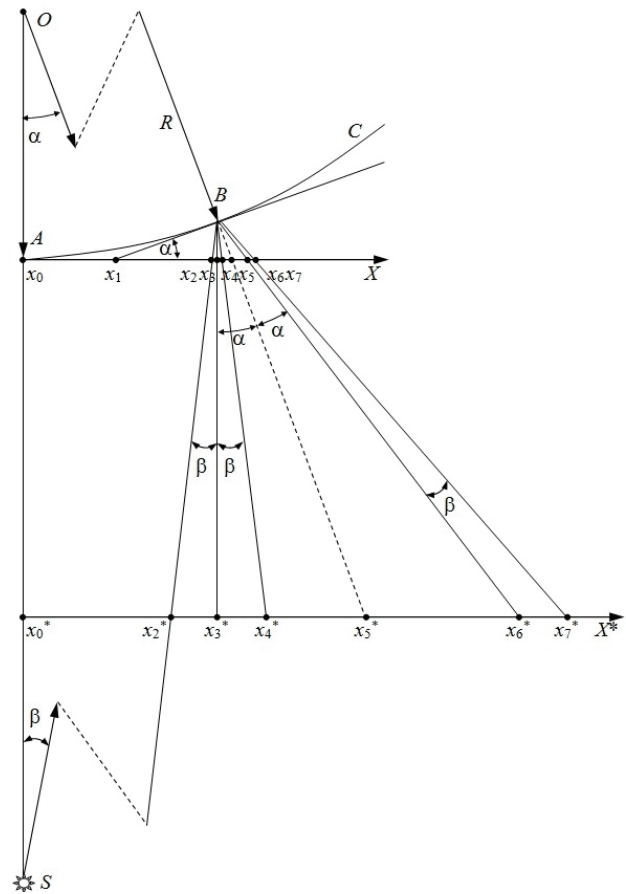


Рисунок 2 – Отражение света на криволинейном участке поверхности

Figure 2 – Light reflection at a curvilinear section of surface area

Теперь рассмотрим смещение изображения и восстановление профиля поверхности при наличии множества элементов изображения. В данном случае необходимо учесть изменение радиуса кривизны контролируемой поверхности при переходе от одного элемента к другому. Из рисунка 3 можно определить поэлементное изменение величины z_i . За точку отсчета примем некоторый элемент изображения, расположенный на бездефектном участке поверхности, т.е. соответствующий условию $z_0 = 0$ и $x_0 = 0$. Величина отклонения z_1 поверхности от идеальной плоскости для первого элемента в точке x_1 составляет:

$$z_1 = z_0 - \frac{x}{2} \times \operatorname{tg} \alpha_1 = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{4h}. \quad (13)$$

Для второго элемента отклонение состоит из трех составляющих:

Аналогично для последующих элементов:

$$z_3 = z_{3-1} + z_{3-2} + z_{3-3} = z_2 - x \operatorname{tg} \alpha_2 - \frac{x}{2} \times \operatorname{tg}(\alpha_3 - \alpha_2) = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{2h} - \frac{x \Delta x_2}{2h} - \frac{x \Delta x_3}{4h} \quad (15)$$

$$z_4 = z_{4-1} + z_{4-2} + z_{4-3} = z_0 - \frac{x \Delta x_1}{2h} - \frac{x \Delta x_2}{2h} - \frac{x \Delta x_3}{2h} - \frac{x \Delta x_4}{4h}. \quad (16)$$

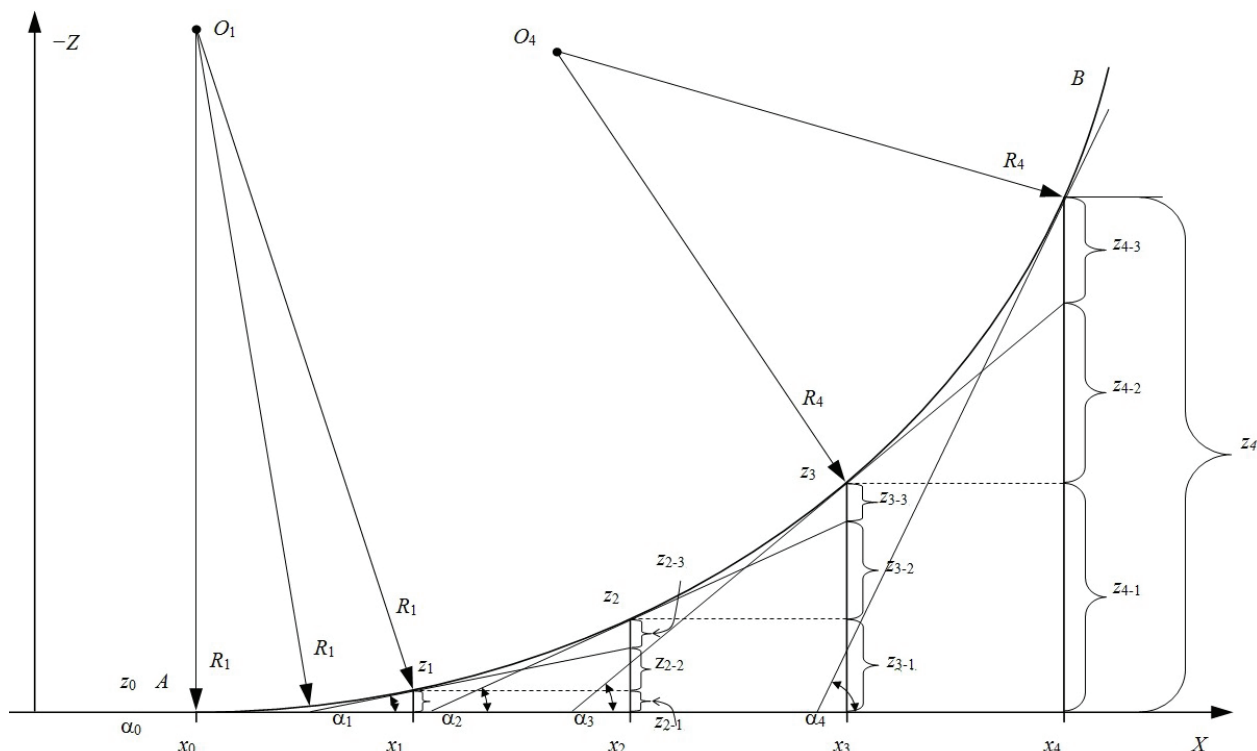


Рисунок 3 – Элементы изображения и соответствующие им элементы поверхности

Figure 3 – Image elements and corresponding surface elements

Общая формула для координаты Z_i вдоль оси X (т.е. профиль контролируемой поверхности вдоль оси X) принимает следующий вид:

$$Z_i = z_0 - \frac{x}{2h} \sum_{n=1}^{i-1} \Delta x_n - \frac{x \Delta x_i}{4h} \Big|_{j=\text{const}}. \quad (17)$$

Аналогичное выражение для профиля вдоль оси Y .

$$Z_j = z_0 - \frac{y}{2h} \sum_{n=1}^{j-1} \Delta y_n - \frac{y \Delta y_j}{4h} \Big|_{i=\text{const}}. \quad (18)$$

Полученные формулы, несмотря на кажущуюся сложность, достаточно просты в применении. При расчете профиля к ранее полученному значению z_{i-1} прибавляется величина Δz_i :

$$\Delta z_i = -\frac{x}{4h} (\Delta x_{i-1} + \Delta x_i). \quad (19)$$

Очевидно, что расчетные значения для одного и того же элемента, полученные по формулам для Z_i и Z_j , должны быть практически одинаковыми с учетом погрешности измерений, если координаты z_{ij} исходных точек одинаковы, т.е. $z_{0i} = z_{j0}$.

Рассмотрим несколько примеров расчета реальных структур.

На рисунке 4 приведена топограмма кремниевой пластины со сформированными структурами интегральных схем, которая свидетельствует о наличии в центре пластины топографического дефекта. Увеличенное изображение дефектной области приведено на рисунке 5. Коэффициент линейного увеличения приведенного изображения к действительному изображению топограммы составил 2,5. Значения g и h при получении топограммы составили соответственно 1,0 м и 0,5 м. Диаметр пластины составляет 100 мм, размер кристалла $4,00 \times 4,65$ мм, т.е. $x = 4,00$ мм, $y = 4,65$ мм.

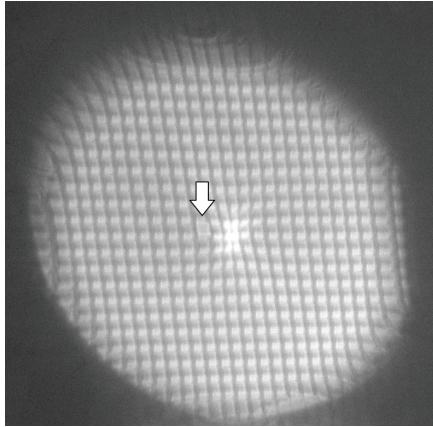


Рисунок 4 – Топограмма полупроводниковой кремниевой пластины со сформированными структурами

Figure 4 – Makyoh image of a semiconductor silicon wafer with formed structures

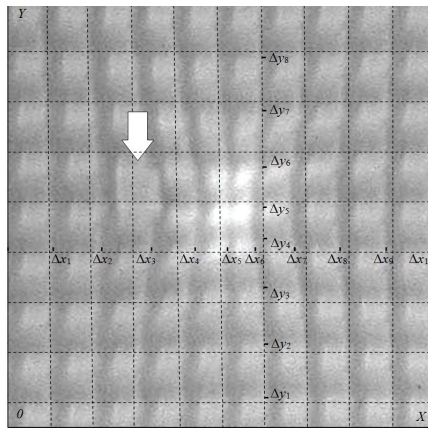


Рисунок 5 – Определение величины смещения изображения элементов на топограмме

Figure 5 – Determination of a deviation value of elements on a Makyoh image

В таблице 1 приведены результаты контроля профиля дефекта вдоль направления X . Величина увеличенного смещения изображения чипов на приведенной топограмме обозначена как Δx_i^* .

Величина смещения изображения чипов на действительной топограмме обозначена как Δx_i ($\Delta x_i = \Delta x_i^*/2,5$). Значение Z_i^* получали путем прямого измерения профиля с помощью индикатора многооборотного с ценой деления 1 мкм. Аналогичные результаты контроля вдоль оси Y приведены в таблице 2.

Во избежание ошибки при определении точки отсчета в качестве ориентира использовали тестовый модуль, имеющий иные размеры и помеченный стрелками. Из приведенных данных видно, что результаты контроля с учетом относительно невысокой точности измерений, проведенных с помощью многооборотного индикатора, хорошо согласуются друг с другом.

На рисунке 6 приведены фотография (а) и топограмма (b) кремниевой пластины со следами резки и сформированными на ней тестовыми МОП конденсаторами.

На рисунке 7 приведен геометрический профиль этой пластины вдоль направления АА (подачи режущего круга), полученный путем прямого измерения индикатором многооборотным (а), а также расчетным путем (b) на основании измерения смещения элементов изображения с использованием выражений (17) и (19).

Таблица 1

Результаты контроля профиля дефекта вдоль направления X

Defect profile control results along X

i	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$X_{i,j=3}, \text{ mm}$	0	4	8	12	16	20	24	28	32	36	40
$\Delta x_i^*, \text{ mm}$	0	1,0	3,0	5,5	5,0	1,5	-3,0	-5,0	-4,5	-3,0	-0,5
$\Delta x_i, \text{ mm}$	0	0,4	1,2	2,2	2,0	0,6	-1,2	-2,0	-1,8	-1,2	-0,2
$Z_{i,j=3}, \mu\text{m}$	0	-0,8	-4,0	-10,8	-19,2	-24,4	-23,2	-16,8	-9,2	-3,2	-0,4
$Z_{i,j=3}^*, \mu\text{m}$	0	0	-5	-10	-18	-22	-22	-15	-10	-4	0

Таблица 2

Результаты контроля профиля дефекта вдоль направления Y

Defect profile control results along Y

j	0	1	2	3	4	5	6	7	8
$Y_{i=4,j}, \text{ mm}$	0	4,65	9,30	13,95	18,60	23,25	27,90	32,55	37,20
$\Delta y_j^*, \text{ mm}$	0	1,5	3,5	5,5	4,0	-2	-6	-4	-2,5
$\Delta y_j, \text{ mm}$	0	0,6	1,4	2,2	1,6	-0,8	-2,4	-1,6	-1,0
$Z_{i=4,j}, \mu\text{m}$	0	-1,4	-6,0	-14,4	-23,3	-25,1	-17,7	-8,4	-2,3
$Z_{i=4,j}^*, \mu\text{m}$	0	-1	-5	-12	-22	-22	-16	-8	-2

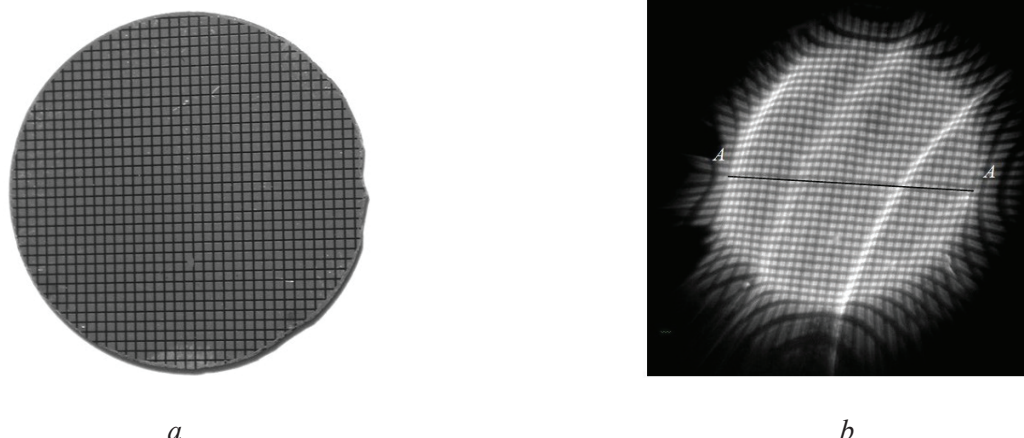


Рисунок 6 – Внешний вид полупроводниковой структуры со следами резки (a) и ее оптическая топограмма (b)
Figure 6 – Semiconducting structure with grinding marks (a) and its Makyoh image (b)

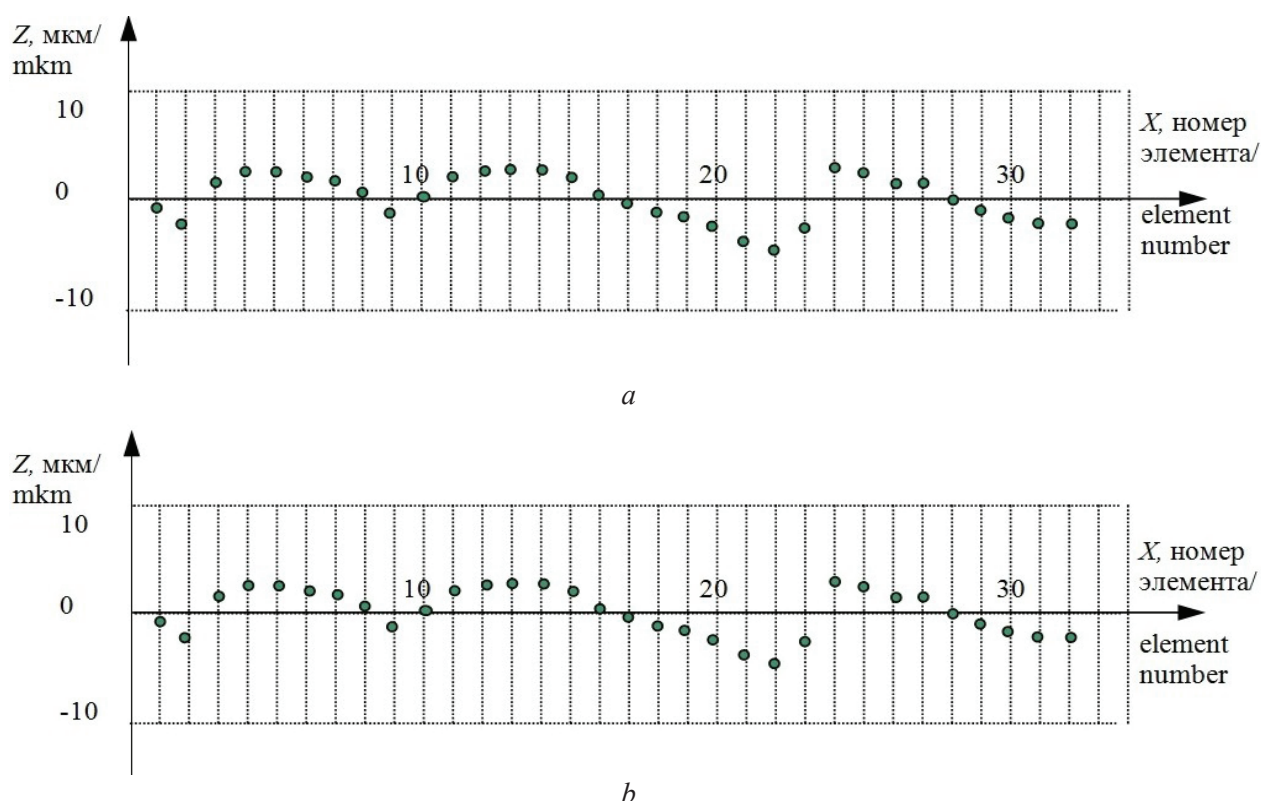


Рисунок 7 – Измеренный (a) и расчетный (b) профили поверхности пластины со следами резки
Figure 7 – Measured (a) and analytical (b) profiles of a wafer surface with grinding marks

В первом случае изменение профиля обусловлено как неровностью поверхности, так и изменением толщины пластины, и характеризуется максимумом для 24-го элемента (314 мкм) и минимумом для 2-го элемента (302 мкм). Во втором – только неровностью поверхности, т.е. следами резки. Максимальное различие в высоте профиля (8 мкм) получено между 22-м и 24-м элементами. С учетом этого различия полученные профили можно считать совпадаю-

щими. Характерной чертой полученных профилей является заметный пилообразный характер, что связано с особенностями динамики процесса резки.

Закключение

Предложена методика расчета микрогеометрических параметров поверхностей на основе измерений искажения изображения сформиро-

ванных на них структур. Получены выражения, связывающие величину искажения изображения на топограммах и геометрический профиль поверхности, что позволяет осуществлять количественный контроль наблюдаемых дефектов. Приведены примеры расчета реальных топографических дефектов.

Полученные результаты могут быть использованы как в исследовательских целях, так и в условиях серийного производства для оперативного контроля и разбраковки полупроводниковых структур.

Список использованных источников

1. Моро, У. Микролитография. Принципы, методы, материалы / У. Моро ; пер. с англ. : в 2 ч. Ч. 2. – М. : Мир, 1990. – 608 с.
2. Pei, Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers / Z.J. Pei // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2002. – Vol. 42 (3) – P. 385–393.
3. Pei, Z.J. Fine grinding of silicon wafers / Z.J. Pei, A. Strasbaugh // *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. – 2001. – Vol. 41 (5). – P. 659–672.
4. Пасынков, В.В. Материалы электронной техники / В.В. Пасынков, В.С. Сорокин. – СПб. : Лань, 2003. – 368 с.
5. Нанотехнологии в электронике / под ред. Ю.А. Чаплыгина. – М. : Техносфера, 2005. – 450 с.
6. Sievert, W. New standards improve chemistry between device makers, suppliers / W. Sievert // *Semiconductor magazine*. – 2000. – Vol. 1. – Iss. 3. – P. 30–34.
7. Бохан, Ю.И. Доминирующие факторы лазерного геттерирования кремниевых пластин / Ю.И. Бохан, В.С. Каменков, Н.К. Толочко // *Физика и техника полупроводников*. – 2015. – Т. 49, вып. 2. – С. 278–282.
8. Сенько, С.Ф. Особенности формирования изображений дефектов при контроле поверхностей методом оптической топографии / С.Ф. Сенько // *Микроэлектроника*. – 2003. – Т. 32, № 6. – С. 375–385.
9. Сенько, С.Ф. Цветовая диагностика топографических дефектов / С.Ф. Сенько, А.С. Сенько // *Доклады БГУИР*. – Апрель–июнь 2003. – Т. 1, № 2. – С. 103–106.
10. Зеленин, В.А. Новые методы и приборы контроля в технологии микроэлектроники / В.А. Зеленин, С.Ф. Сенько // *Технологии Физтеха. Юбилейный сборник трудов : в 2 т. Т. 1* / под общ. ред. академик НАН Беларуси С.А. Астапчик. – Минск : ЭКОПЕРСПЕКТИВА, 2003. – С. 234–253.
11. Riesz, F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography / Ferenc Riesz // *J. Phys. D: Appl. Phys.* – 2000. – Vol. 33. – P. 3033–3040.
12. Riesz, F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. / Ferenc Riesz // *Phys. Stat. Sol. (a)*. – 1999. – Vol. 171, no. 1. – P. 403–409.

13. Riesz, F. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers / R. Ferenc, A.E. Pap, M. Ádám, I.E. Lukács // *Thin Solid Films*. – 2008. – Vol. 516, iss. 22. – P. 8087–8091.

14. Mock, P. How to avoid plastic deformation in-GaAs wafers duaring molecular beam epitaxial growth / P. Mock, G.W. Smith // *Cryst. Res. Technol.* – 2000. – Vol. 35. – P. 541–548.

15. Berry, M.V. Oriental magic mirrors and the Laplacian image / M.V. Berry // *European Journal of Physics*. – 2006. – Vol. 27. – P.109–118.

16. Chidambaram, S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chuck shape / S. Chidambaram, Z.J. Pei, S. Kassir // *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*. – 2003. – Vol. 43 (7). – P. 739–746.

References

1. Wayne M. Moreau. *Semiconductor Lithography. Principles, Practices, and Materials*. Plenum Press. New York and London, 1988, 608 p.
2. Pei Z.J. A study of surface grinding of 300 mm silicon wafers. *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*, 2002, vol. 42 (3), pp. 385–393.
3. Pei Z.J., Strasbaugh A. Fine grinding of silicon wafers. *International Journal of Mashine Tools & Manufacture*, 2001, vol. 41 (5), pp. 659–672.
4. Pasynkov V.V., Sorokin V.S. *Materialy elektronnoi tekhniki* [Electronic technology materials]. St. Petersburg, Lan Publ., 2003, 368 p.
5. *Nanotekhnologii v elektronike* [Nanotechnology in electronics]. Under red. Yu.A. Chaplygina. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 450 p.
6. Sievert W. New standards improve chemistry between device makers, suppliers. *Semiconductor magazine*, 2000, vol. 1, iss. 3, pp. 30–34.
7. Bohan Yu.I., Kamenkov V.S., Tolochko N.K. [Dominant factors of laser gettering of silicon plates]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Physics and technology of semiconductors], 2015, vol. 49, no. 2, pp. 278–282 (in Russian).
8. Senko S.F. [Peculiarities of forming of defects images under surface control by optical topography]. *Mikroelektronika* [Microelectronics], 2003, vol. 32, no. 6, pp. 375–385 (in Russian).
9. Senko S.F., Senko A.S. [Color diagnostics of topographic defects]. *Doklady BGUIR*. [Proceeding of the BSUIR], 2003, vol. 1, no. 2, pp. 103–106 (in Russian).
10. Zelenin V.A., Senko S.F. [New methods and control devices in microelectronics]. *Tekhnologii Fiztekha. Yubileinyi sbornik trudov* [FTI Technology. Jubilee collection works]. In 2 parts. Part.1. Under red. academician S.A. Astapchik. Minsk, EKOPERSPEKTIVA Publ., 2003, pp. 234–253.
11. Riesz F. Geometrical optical model of the image formation in Makyoh (magic-mirror) topography. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2000, vol. 33, pp. 3033–3040.

12. Riesz F. Makyoh Topography for the Study of Large-Area Extended Defects in Semiconductors. *Phys. Stat. Sol. (a)*, 1999, vol. 171, no. 1, pp. 403–409.

13. Riesz F., Pap. E.A., Ádám M., Lukács I.E. Makyoh-topography study of the swirl defects in Si wafers. *Thin Solid Films*, 2008, vol. 516, iss. 22, pp. 8087–8091.

14. Mock P., Smith G.W. How to avoid plastic deformation in GaAs wafers during molecular beam

epitaxial growth. *Cryst. Res. Technol.*, 2000, vol. 35, pp. 541–548.

15. Berry M.V. Oriental magic mirrors and the Laplacian image. *European Journal of Physics*, 2006, vol. 27, pp. 109–118.

16. Chidambaram S., Pei Z.J., Kassir S. Fine grinding of silicon wafers: a mathematical model for the chuck shape. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2003, vol. 43 (7), pp. 739–746.

УДК 537.8

Особенности электромеханоакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем

Лейко А.Г., Кандрачук И.В., Святненко А.О.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина

Поступила 23.01.2018

Принята к печати 28.02.2018

Рассмотрена задача излучения звука плоской системой, образованной из цилиндрических пьезокерамических излучателей с внутренними акустически мягкими экранами. Продольные оси излучателей параллельны и лежат в одной плоскости. Указанная система характеризуется взаимодействием электрических, механических и акустических полей в процессе преобразования излучателями электрической энергии в акустическую и взаимодействием акустических полей излучателей в процессе формирования полей в окружающих средах. Целью работы являлось определение закономерностей электромеханоакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем с учетом всех видов взаимодействия.

Исследования осуществлялись методом связанных полей в многосвязных областях с привлечением теорем сложения для цилиндрических волновых функций. Физические поля, возникающие при излучении звука такой системой, определены путем совместного решения системы дифференциальных уравнений: волнового уравнения; уравнений движения тонких пьезокерамических оболочек в перемещениях; уравнений вынужденной электростатики для пьезокерамики при заданных граничных условиях, условиях сопряжения полей на границах раздела многосвязных областей и электрических условиях.

Решение задачи сведено к решению бесконечной системы линейных алгебраических уравнений относительно неизвестных коэффициентов разложений полей в ряды по волновым функциям.

Анализ результатов численных расчетов, выполненных на основе полученных аналитических соотношений, позволил установить ряд закономерностей в электромеханоакустическом преобразовании энергии излучателями в составе плоских систем. При этом учтены: взаимодействие полей в процессе преобразования энергии; взаимодействие излучателей и системы по акустическому полю; степень нарушения радиальной симметрии акустического нагружения излучателей от величины акустического взаимодействия; многомодовость механических полей излучателей в составе плоской системы и зависимость перераспределения энергии между модами колебаний от степени нарушения радиальной симметрии акустического нагружения излучателей.

Ключевые слова: преобразование энергии; акустическое взаимодействие; плоская система; цилиндрический пьезокерамический излучатель.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

Адрес для переписки:

Кандрачук И.В.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
корпус 12, пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: kandra4uk@gmail.com

Address for correspondence:

Kandrachuk I.V.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute», corps 12,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: kandra4uk@gmail.com

Для цитирования:

Лейко А.Г., Кандрачук И.В., Святненко А.О.

Особенности электромеханоакустического преобразования энергии цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем.

Приборы и методы измерений.

2018. – Т. 9, № 1. С. 85–95.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

For citation:

Leiko A.G., Kandrachuk I.V., Sviatnenko A.O.

[Features of electromechanical acoustic energy conversion by cylindrical piezoceramic transducers with internal screens in composition of flat systems].

Devices and Methods of Measurements.

2018, vol. 9, no. 1, pp. 85–95 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

Features of electromechanical acoustic energy conversion by cylindrical piezoceramic transducers with internal screens in composition of flat systems

Leiko A.G., Kandrachuk I.V., Sviatnenko A.O.

National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine

Received 23.01.2018

Accepted for publication 28.02.2018

Abstract

The problem of sound emission is considered by a system formed from cylindrical piezoceramic radiators with internal acoustically soft screens. Longitudinal axis of emitters lie in one plane. This system is characterized by the interaction of electric, mechanical and acoustic fields in the process of conversion electrical energy to acoustical energy and acoustic fields in the process of forming them in the environments. The purpose of the work is to determine the peculiarities of the electromechanical acoustic transformation of energy by cylindrical piezoceramic radiators with internal screens in the composition of flat systems, taking into account all types of interaction.

The research was carried out by the method of bound fields in multiply connected domains with the use of addition theorems for the cylindrical wave functions. The physical fields arising from the emission of sound by such a system are determined by the joint solution of the system of differential equations: the wave equation; equations of motion of thin piezoceramic shells with circular polarization in displacements; the equations of forced electrostatics for piezoceramics at given boundary conditions, the conditions of conjugation of fields at the boundaries of the division of domains and electric conditions.

The solution of the problem is reduced to the solution of an infinite system of linear algebraic equations with respect to unknown coefficients of field expansions.

An analysis of the results of numerical calculations, performed on the basis of the obtained analytical relations, called to establish a number of features in the electromechanical acoustic transformation of energy by emitters in the composition of flat systems. They include: the role of acoustic interaction in the process of energy conversion; determination of the mechanism of quantitative assessment of the influence of interaction on these processes; the dependence of the degree of violation of the radial symmetry of the acoustic loading of the emitters on the amount of acoustic interaction; the appearance of multimodality of the mechanical field of emitters in the structure of the plane system and the dependence of the redistribution of energy between all modes on the degree of disturbance of the radial symmetry of the acoustic loading of the emitters.

Keywords: energy conversion; acoustic interaction; flat system; cylindrical piezoceramic emitter.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

Адрес для переписки:

Кандрачук И.В.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
корпус 12, пр. Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: kandra4uk@gmail.com

Address for correspondence:

Kandrachuk I.V.
National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv
Polytechnic Institute», corps 12,
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: kandra4uk@gmail.com

Для цитирования:

Лейко А.Г., Кандрачук И.В., Святненко А.О.
Особенности электромеханоакустического преобразования энергии
цилиндрическими пьезокерамическими излучателями с внутрен-
ними экранами в составе плоских систем.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 85–95.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

For citation:

Leiko A.G., Kandrachuk I.V., Sviatnenko A.O.
[Features of electromechanical acoustic energy conversion by cylindri-
cal piezoceramic transducers with internal screens in composition of
flat systems].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 85–95 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-85-95

Введение

Практическая реализация снижения рабочих частот корабельных гидролокационных систем [1] для увеличения их дальности при сохранении направленных свойств гидроакустических антенн и размеров транспортных отсеков для размещения этих антенн обусловила необходимость поиска новых подходов к построению таких антенн. Одним из таких подходов является перенос внешних акустических экранов, обычно покрывающих часть излучающей поверхности цилиндрических излучателей для формирования односторонней направленности антенн [2], во внутреннюю полость излучателей. При этом внутренние полости излучателей должны быть заполнены жидкой средой [3–4], а размещенные в них экраны – быть цилиндрическими и иметь либо несимметричную форму, либо не осесимметричное расположение, либо и то и другое [4–5].

Из физических соображений ясно, что при работе плоской системы, образованной из цилиндрических пьезокерамических излучателей с параллельными продольными осями, лежащими в одной плоскости, и внутренними цилиндрическими экранами, возникает ряд эффектов взаимодействия волновых процессов. Преобразование электрической энергии в акустическую сопряжено со взаимодействием электрических, механических и акустических волновых полей [4, 6]. Формирование акустических полей во внутренних полостях излучателей сопровождается взаимодействием механических колебаний их пьезокерамических оболочек со средами [3, 4] и внутренними экранами излучателей [4, 5]. При формировании же акустических полей в упругой среде, окружающей плоскую излучающую систему, возникает взаимодействие механических колебаний излучателей с внешней средой и многократный процесс обмена излученными и рассеянными акустическими волнами в системе, определяемый как взаимодействие излучателей по акустическому полю [2, 3, 7–9].

Известно [2–4, 10], что цилиндрические пьезокерамические излучатели обычно возбуждаются радиально симметричным электрическим напряжением, что обеспечивает «закачивание» в них электрической энергии только на нулевой моде их механических колебаний и, как следствие, радиальную симметрию этих колебаний и создаваемых ими акустических полей при работе излучателя вне системы.

Естественным следствием наличия указанных выше взаимодействий физических полей является потеря цилиндрическими пьезокерамическими излучателями при работе в составе плоской системы радиальной симметрии их механического и акустического нагружения.

Эти нарушения радиальной симметрии акустических и механических полей обуславливают появление в механическом поле излучателей, помимо одной собственной формы их колебаний, последующих мод. При этом амплитуды колебаний последующих мод сравнимы с амплитудой колебаний нулевой моды [4, 6]. Это значит, что в данном случае происходит эффективное перераспределение «закачиваемой» в излучатели энергии между всеми модами колебаний. Таким образом, в процессе преобразования электрической энергии в механическую при излучении звука исследуемой системой принимает участие только одна, нулевая мода колебаний излучателей. Другие вновь возникшие моды на этом этапе процесса преобразования электрической энергии в акустическую не участвуют. В то же время энергия всех мод механического поля преобразуется в энергию акустического поля. В количественном отношении эти процессы зависят от многих физических факторов и представляют большой интерес в прикладном плане.

Целью данной работы являлось определение закономерностей механоакустического преобразования энергии пьезокерамическими цилиндрическими излучателями с внутренними экранами в составе плоских систем с учетом всех видов взаимодействия.

Основная часть

Рассмотрим задачу об излучении звука системой (рисунок 1), образованной из конечного числа N бесконечно длинных круговых цилиндрических излучателей, продольные оси которых параллельны и лежат в одной плоскости на расстоянии $l_{s-1,s}$ друг от друга ($s = 1, \dots, N$). Каждый излучатель со средним радиусом r_{0s} и толщиной стенки h_s образован из жестко склеенных между собой пьезокерамических призм с нанесенными на их боковые плоские поверхности электродами. Электрически призмы включены параллельно, благодаря чему векторы напряженности электрического поля и механических деформаций параллельны (окружная поляризация). Поэтому

излучатели возбуждаются на нулевой моде их механических колебаний электрическим напряжением $\psi^{(s)} = \psi_{0s} \cdot e^{-i\omega t}$, где ω – круговая частота. Внутренняя полость излучателей заполнена средой с плотностью ρ_s и скоростью звука c_s . В этой среде располагается акустически мягкий экран, выполненный в виде сплошного кругового цилиндра

радиусом a_{0s} . Продольная ось экрана параллельна продольной оси излучателя, сдвинута относительно нее на расстояние $l_{0s0s'}$ и угол $\varphi_{0s0s'}$. Система излучателей располагается в упругой среде с волновыми сопротивлением ρc . Системы координат и дополнительные частичные области, введенные для решения задачи, представлена на рисунке 1.

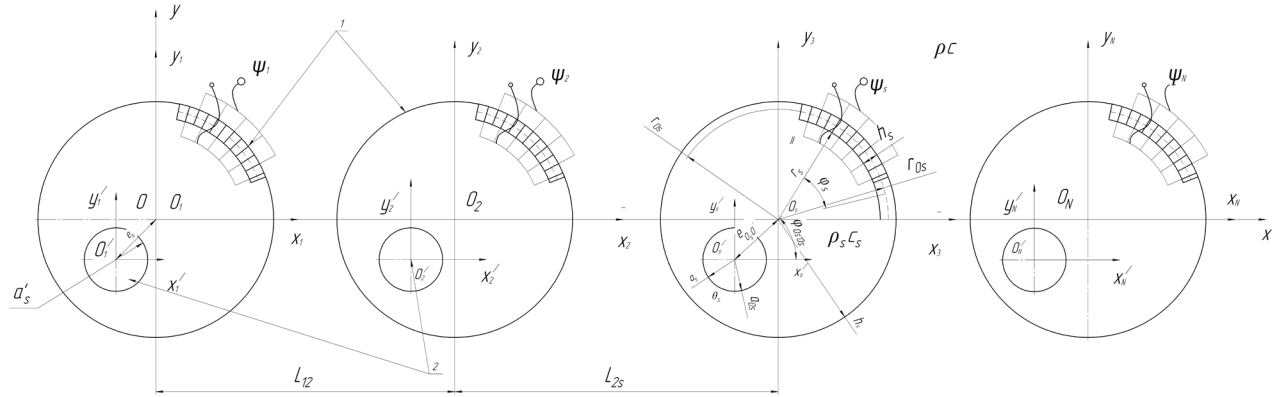


Рисунок 1 – Нормальное сечение плоской системы
Figure 1 – Normal section of flat system

В математическом плане задача определения физических полей, принимающих участие в преобразовании электрической энергии в акустическую и формировании последней в окружающих систему средах, сводится к совместному решению системы дифференциальных уравнений, состоящей для s -го излучателя ($s = 1, \dots, N$) из:

– волнового уравнения, описывающего движение упругих сред внутри и вне излучателей системы:

$$\Delta \Phi_i^{(s)} + k_{is}^2 \Phi_i^{(s)} = 0; \quad (1)$$

– уравнений движения тонких пьезокерамических оболочек с окружной поляризацией в перемещениях:

$$(1 + \beta_s) \frac{\partial^2 U_s}{\partial \varphi_s^2} + \frac{\partial^2 W_s}{\partial \varphi_s^2} = \alpha_s \gamma_s \frac{\partial^2 W_s}{\partial t^2} \\ \beta_s \left(\frac{\partial^2 U_s}{\partial \varphi_s^2} - \frac{\partial^4 W_s}{\partial \varphi_s^4} \right) - \frac{\partial^2 U_s}{\partial \varphi_s^2} - W_s + \frac{e_{33s} r_{0s}}{c_{33s}^E} E_\varphi^{(s)} + \quad (2) \\ + \frac{\alpha_s q_{rs}}{h_s} = \alpha_s \gamma_s \frac{\partial^2 W_s}{\partial t^2};$$

– уравнений вынужденной электростатики для пьезокерамики:

$$E_s = -\text{grad} \psi_s, \quad \text{div} D_s = 0.$$

Здесь Δ – оператор Лапласа; $\Phi^{(s)}$ – потенциал скорости акустического поля внутри $\Phi_i^{(s)} = \Phi_1^{(s)}$ и вне $\Phi_i^{(s)} = \Phi^{(s)}$ s -го излучателя; k_{is} – волновые числа сред внутри l_1 $k_{is} = k_{1s}$ и вне $k_{is} = k$ s -го излучателя;

U_s, W_s – окружная и радиальная составляющие вектора смещений точек срединной поверхности оболочки s -го излучателя;

$$\beta_s = \frac{h_s^2}{12 r_{0s}^2} \left(1 + \frac{e_{33s}^2}{c_{33s}^E \epsilon_{33s}^s} \right) \alpha_s = \frac{r_{0s}^2}{c_{33s}^E};$$

q_{rs} – внешняя радиационная нагрузка s -го излучателя; $c_{33s}^E, \epsilon_{33s}^s, e_{33s}^s, \gamma_s$ – соответственно модуль упругости при нулевой электрической напряженности, диэлектрическая проницаемость при нулевой деформации, пьезоконстанта, плотность материала пьезокерамической оболочки s -го излучателя; E и D – векторы напряженности и индукции электрического поля.

Приведенные уравнения дополняются граничными условиями и условиями сопряжения акустических полей на границах раздела частичных областей, принимающими вид:

$$\Phi_1^{(s)}(\alpha_s, \Theta_s) = 0, \alpha_s = \alpha_{0s}; \quad 0 \leq \Theta_s \leq 2\pi; \quad s = 1, \dots, N; \quad (4)$$

$$-\frac{\partial \Phi_1^{(s)}}{\partial r_s} = \frac{\partial W_s}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; \quad r_s = r_{2s} = r_{0s} - \frac{h_s}{2}; \quad (5)$$

$$-\frac{\partial \Phi}{\partial r_s} = \frac{\partial W_s}{\partial t}, \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; \quad r_s = r_{1s} = r_{0s} - \frac{h_s}{2}; \quad (6)$$

$$\sigma_{rs} = -q_{rs} = - \left(\rho \frac{\partial \Phi}{\partial t} - \rho_s \frac{\partial \Phi_1^{(s)}}{\partial t} \right), \quad 0 \leq |\varphi_s| \leq \pi; \quad s = 1, \dots, N, \quad (7)$$

где $\Phi = \sum_{s=1}^N \Phi_1^{(s)}$ – потенциал скорости полного поля излучения рассматриваемой системы; σ_{rs} – нормальная составляющая тензора механических напряжений в пьезокерамике s -го излучателя.

Электрические условия состоят в задании напряженности электрического поля в пьезокерамической оболочке каждого излучателя ($s = 1, \dots, N$) системы в виде:

$$E_{\varphi s} = \frac{-\Psi_{0s} M_s}{2\pi r_{0s}}, \quad (8)$$

где M_s – число параллельно включенных пьезокерамических призм в оболочке s -го излучателя. Перечисленные условия дополняются условиями излучения на бесконечности.

Решение рассматриваемой задачи будем искать методом связанных полей в многосвязных областях [2, 4]. Для этого представим выражение для механических и акустических полей следующими разложениями в ряды:

$$\begin{aligned} \Phi_1^{(s)}(\alpha_s, \theta_s) &= \sum_{m=0}^{\infty} \left[C_m^{(s)} J_m(k_s \alpha_s) + D_m^{(s)} N_m(k_s \alpha_s) \right] e^{im\theta_s}, \quad s=1, \dots, N; \\ U_s &= \sum_n U_{ns} e^{in\varphi_s}; \quad W_s = \sum_n W_{ns} e^{in\varphi_s}; \\ \Phi^{(s)}(r_s, \varphi_s) &= \sum_n A_n^{(s)} H_n^{(1)}(kr_s) e^{in\varphi_s}, \end{aligned} \quad (9)$$

где использованы традиционные обозначения цилиндрических функций. Применение граничного

условия (4) позволяет представить последнее из выражений (9) в виде:

$$\Phi_1^{(s)}(\alpha_s, \theta_s) = \sum_m C_m^{(s)} \left[J_m(k_s \alpha_s) - \frac{J_m(k_s \alpha_{0s})}{N_m(k_s \alpha_{0s})} \cdot N_m(k_s \alpha_s) \right] e^{im\theta_s}. \quad (10)$$

Особенность решения рассматриваемой задачи состоит в том, что все акустические поля заданы в своих локальных координатных системах. Поэтому для использования условий сопряжения (5) и (6) необходимо выразить их в координатах соответствующего излучателя. Перенос систем координат обеспечивается с помощью теорем сложения для цилиндрических волновых функций:

$$\begin{aligned} H_m^{(1)}(kr_q) e^{im\varphi_q} &= \sum_n J_n(kr_s) H_{m-n}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-n)\varphi_{qs}} e^{in\varphi_s}; \\ J_m(k_s \alpha_s) e^{im\varphi_s} &= \sum_n J_{m-n}(k_s l_{os'os}) e^{i(m-n)\varphi_{os'os}} J_n(k_s r_s) e^{in\varphi_s}; \quad (11) \\ N_m(k_s \alpha_s) e^{im\varphi_s} &= \sum_n J_{m-n}(k_s l_{os'os}) e^{i(m-n)\varphi_{os'os}} N_n(k_s r_s) e^{in\varphi_s}, \end{aligned}$$

где r_{qs} , $l_{os'os}$ и φ_{qs} , $\varphi_{os'os}$ – полярные координаты начала координатной системы O_s в координатах систем с началами O_q и O'_s .

Алгебраизация функциональных уравнений (1)–(3), (5) и (6) с учетом выражений (7)–(11) на основе свойств полноты и ортогональности систем угловых функций на интервале $[0, 2\pi]$ позволяет получить для отыскания неизвестных коэффициентов разложений (9) следующую бесконечную систему линейных алгебраических уравнений:

$$\begin{aligned} A_m^{(s)} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_n \left[A_n^{(q)} \frac{J'_m(kr_s)}{H_m^{(1)'}(kr_s)} \cdot H_{n-m}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(n-m)\varphi_{qs}} \right] &= ic \frac{W_{ms}}{H_m^{(1)'}(kr_s)}; \\ \sum_m C_m^{(s)} J_{m-n}(k_s l_{os'os}) \cdot e^{i(m-n)\varphi_{os'os}} \cdot \Delta_{nm}^{(s)'}(k_s r_s) &= ic_s W_{ns}; \\ R_v^{(s)} W_{vs} + \frac{\alpha_s}{h_s} i\omega\rho \left[A_v^{(s)} H_v^{(1)}(kr_s) + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq s}}^N \sum_m A_m^{(s)} H_{m-v}^{(1)}(kr_{qs}) e^{i(m-v)\varphi_{qs}} \cdot J_v(kr_s) \right] &- \\ - \left[\frac{\alpha_s}{h_s} i\omega\rho_s \sum_m C_m^{(s)} J_{m-v}(k_s l_{os'os}) \cdot e^{i(m-v)\varphi_{os'os}} \cdot \Delta_{mv}^{(s)}(k_s r_s) \right] &= \frac{e_{33s}}{c_{33s}^E} \frac{\Psi_{0s} M_s}{4\pi^2} Q_v^{(s)}, \\ m = -\infty, 0, \infty; \quad n = -\infty, 0, \infty; \quad v = -\infty, 0, \infty, \end{aligned} \quad (12)$$

где штрих означает производную функции;

$$\Delta_{nm}^{(s)} = J_n(k_s r_s) - \frac{J_m(k_s \alpha_{os})}{N_m(k_s \alpha_{os})} N_n(k_s r_s);$$

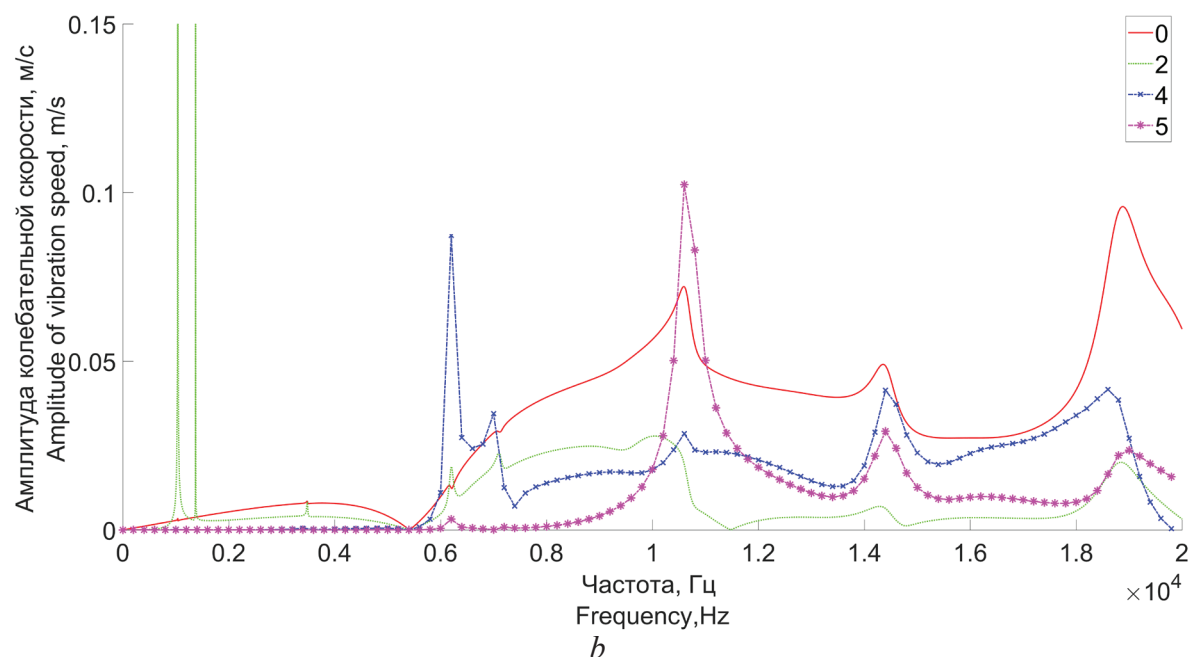
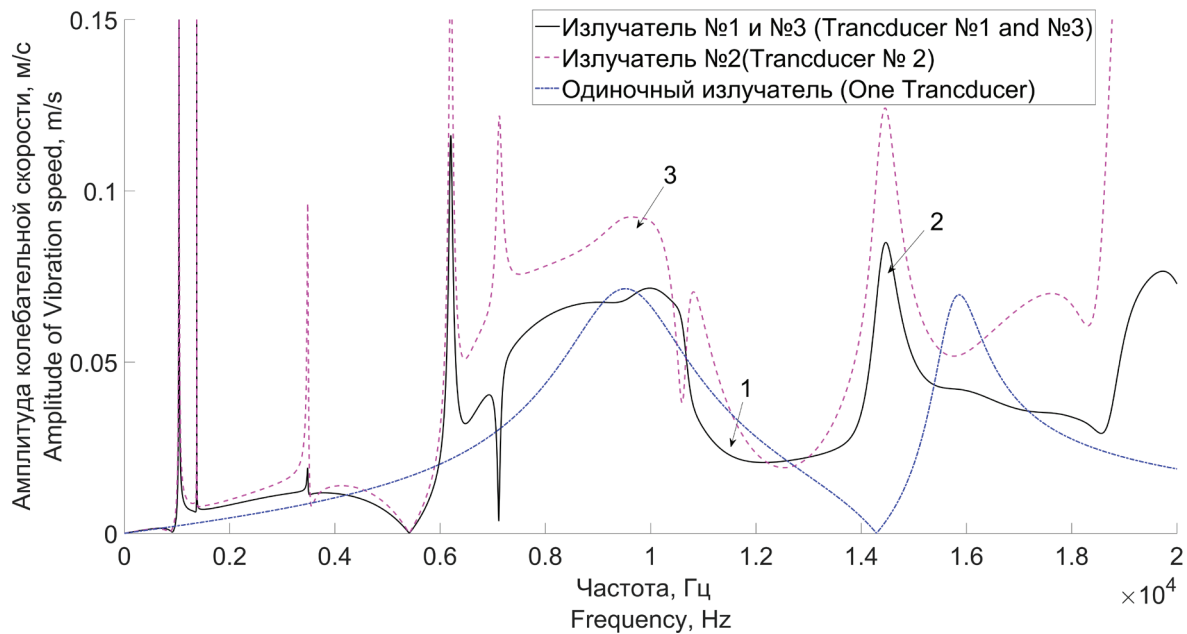
$$Q_v^{(s)} = \int_0^{2\pi} e^{-i\nu\varphi_s} d\varphi_s = \begin{cases} 2\pi (\nu = 0); \\ 0 (\nu \neq 0); \end{cases}$$

$$R_v^{(s)} = \frac{(\beta_s n^3 + n)^2}{(1 + \beta_s) n^2 - \omega^2 \alpha_s \gamma_s} - 1 + \beta_s n^3 - \omega^2 \alpha_s \gamma_s$$

После проведения ряда процедур по регуляризации системы (12) она может быть разрешима методом редукции.

На основе полученных соотношений на примере плоской системы, образованной из трех идентичных излучателей с внутренними экранами, определим закономерности механоакустического преобразования энергии ее пьезокерамическими излучателями.

Расчеты выполнялись для следующих характеристик и параметров излучателей и системы: пьезо-керамика ЦТБС-3 с $\gamma = 7210 \text{ кг/м}^3$, $e_{33} = 38,896 \text{ Кл/м}^2$; $C_{33} = 13,6 \cdot 10^{10} \text{ Н/м}^2$; $\epsilon_{33}^{(s)} = 7002,8 \cdot 10^{-12} \text{ Ф/м}$; $M = 48$; $\Psi_0 = 200 \text{ В}$; $h = 0,008 \text{ м}$; $r_0 = 0,068 \text{ м}$; $\rho_s = \rho_1 c_1 = 1,5 \cdot 10^6 \text{ кг/м}^3$; $r_{12} = r_{21} = 0,139 \text{ м}$; $\alpha_0 = 0,2 r_0$; $l_{os/os} = r_0 - h/2 - \alpha_0 = -0,003 \text{ м}$; $\varphi_{oo} = 90^\circ$; f изменялась от 0 до 20 кГц.



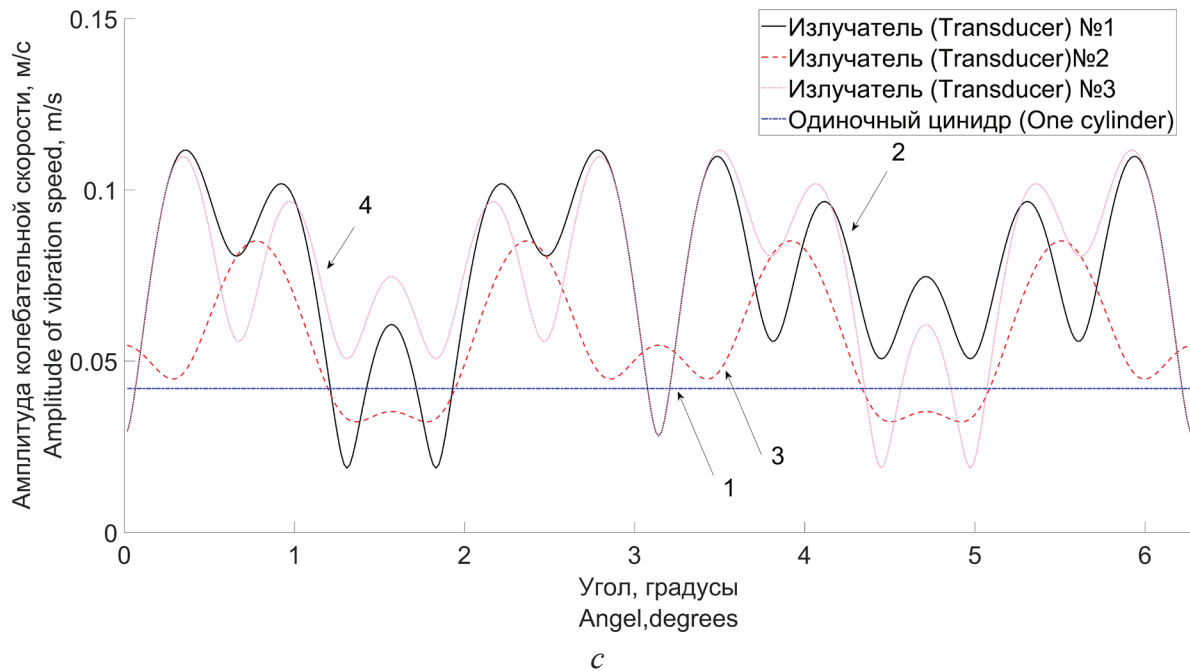


Рисунок 2 – Частотные зависимости амплитуд радиальной колебательной скорости излучателей (а) и её мод для срединных с номером 2 (b) и крайних с номерами 1 и 3 (c) излучателей в составе системы и вне ее (кривая 1) в точках с координатами ($r_1 = 0,072$ м, $\varphi = 90^\circ$)

Figure 2 – Frequency dependences of amplitudes of radial vibrational emitter speed (a) and its mode for the middle number 2 (b) and the last with numbers 1 and 3 (c) emitters in the system and outside it (curve 1) at points with coordinates ($r_1 = 0,072$ м, $\varphi = 90^\circ$)

В качестве исследуемых были выбраны частотные и угловые зависимости амплитуд колебательной скорости и акустического давления на поверхности излучателей. Результаты расчетов представлены на рисунках 2–4.

Анализ приведенных результатов свидетельствует о сложном характере преобразования электрической энергии в акустическую в процессе излучения звука рассматриваемой системой.

Как уже отмечалось, эта сложность связана с обилием взаимодействий, обусловленных обменами акустическими волнами между элементами системы в процессе ее работы. Представляется интересным установить механизм влияния этих взаимодействий на формирование механического и акустического полей излучателей системы.

Как известно [5], при выбранном способе электрического нагружения излучателей в системе в цилиндрических водозаполненных пьезокерамических преобразователях возбуждается только одна собственная форма колебаний и поэтому должны были существовать только два резонанса излучателя (рисунок 2а, кривая 1). В то же время реальные частотные зависимости амплитуд колебательных скоростей излучателей

в составе плоской системы существенно отличаются (рисунок 2а) от описанной.

Проанализируем эти зависимости. Выделим в них три зоны: первую (низкочастотную) зону ($f < 6000$ Гц), вторую (резонансную) зону ($6000 < f < 14\,000$ Гц) и третью (высокочастотную) зону ($f > 14\,000$ Гц). Анализ графиков рисунка 2а свидетельствует о значительном увеличении количества механических резонансов пьезокерамических излучателей при работе их в составе плоской системы по сравнению с работой излучателей вне системы. Особо интересным представляется появление дополнительных механических резонансов в первой зоне, где частоты резонансов оказываются в (3–10 раз) ниже собственной резонансной частоты пьезокерамических оболочек излучателей. При этом амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) каждого излучателя системы во второй зоне полностью изменяет свой вид. Кроме того, АЧХ колебательных скоростей излучателей зависят от места расположения излучателей в системе. Если в первой зоне различия между АЧХ излучателей, расположенных внутри плоской системы (срединных) и на ее краях (крайних), являются небольшими, то во второй и третьей зонах эти различия становятся существенными. Они проявляются в том,

что практически на всех частотах в этих зонах амплитуды колебательных скоростей срединных излучателей в несколько раз превышают амплитуды скоростей колебаний крайних излучателей.

Анализ кривых (рисунок 2*b, c*) показывает, что причиной приобретения цилиндрическими излучателями с экраном в составе плоской системы свойства многорезонансности является преобразование их механических полей под влиянием акустического взаимодействия в многомодовые. При этом амплитуды колебательных скоростей отдельных мод, следующих за нулевой, сравнимы по величине с амплитудой скорости нулевой моды, а в области низких частот во много десятков раз превышают ее. Именно генерированием этих мод в механических полях излучателей объясняется появление, в частности, дополнительных механических резонансов в зоне низких частот. Это видно (рисунок 2*a*) из совпадения резонансных частот и близости величин амплитуд колебательных скоростей на АЧХ полных колебательных скоростей излучателей (рисунок 2*a*) и АЧХ колебательных скоростей излучателей на этих модах (рисунок 2*b, c*).

Обращает на себя внимание также и тот факт, что механические поля излучателей имеют наборы мод, разные по амплитуде и фазе их колебательных скоростей в зависимости как от места расположения излучателей в составе плоской системы, так и на разных частотах. Этим объясняется различие амплитудных и фазовых частотных характеристик крайних и средних излучателей плоской системы.

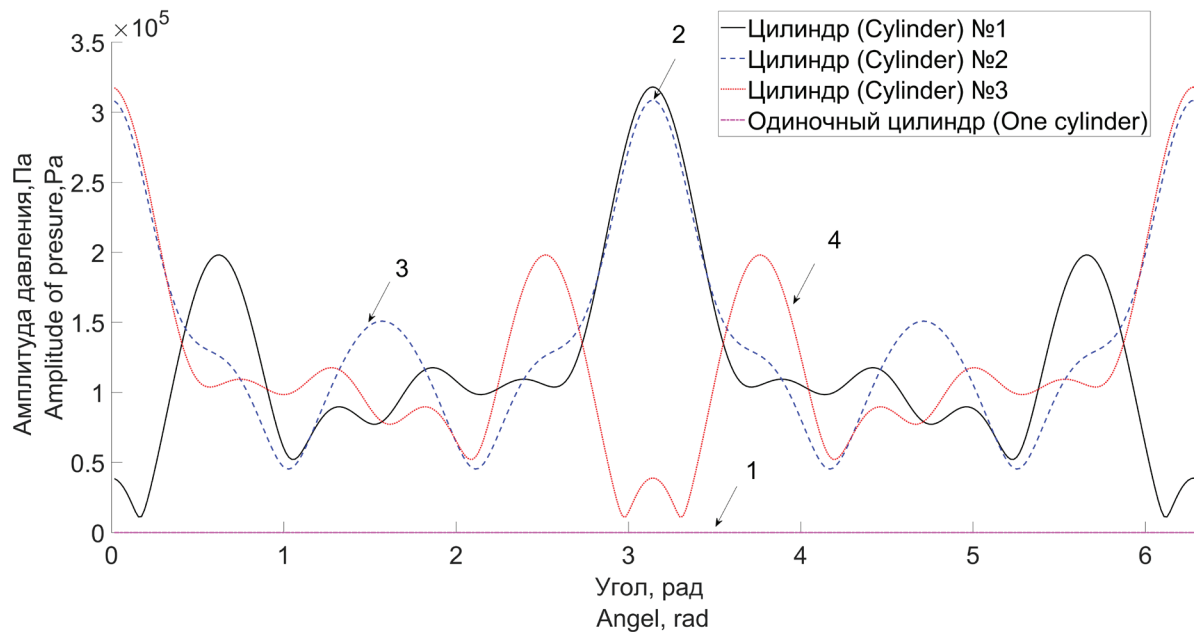
Установленные выше закономерности механических полей излучателей в составе плоских систем свидетельствуют о том, что в данном случае происходит эффективное перераспределение «закачиваемой» энергии между несколькими последующими формами колебаний излучателей. При этом генерируются не все формы колебаний (на рисунках 2*b, c*), первая и третья мода отсутствуют.

Возникновение многомодовости колебаний цилиндрических излучателей в составе плоской системы находит свое отражение и в угловых распределениях колебательных скоростей на поверхности излучателей (рисунок 3*a*). Вместо однородного углового распределения колебательной скорости цилиндрического излучателя при работе его вне системы возникает сложное угловое распределение скорости излучателя при работе его в составе плоской системы. Оно характеризуется двумя закономерностями. Во-первых, угловое распределение колебательной скорости зависит от места

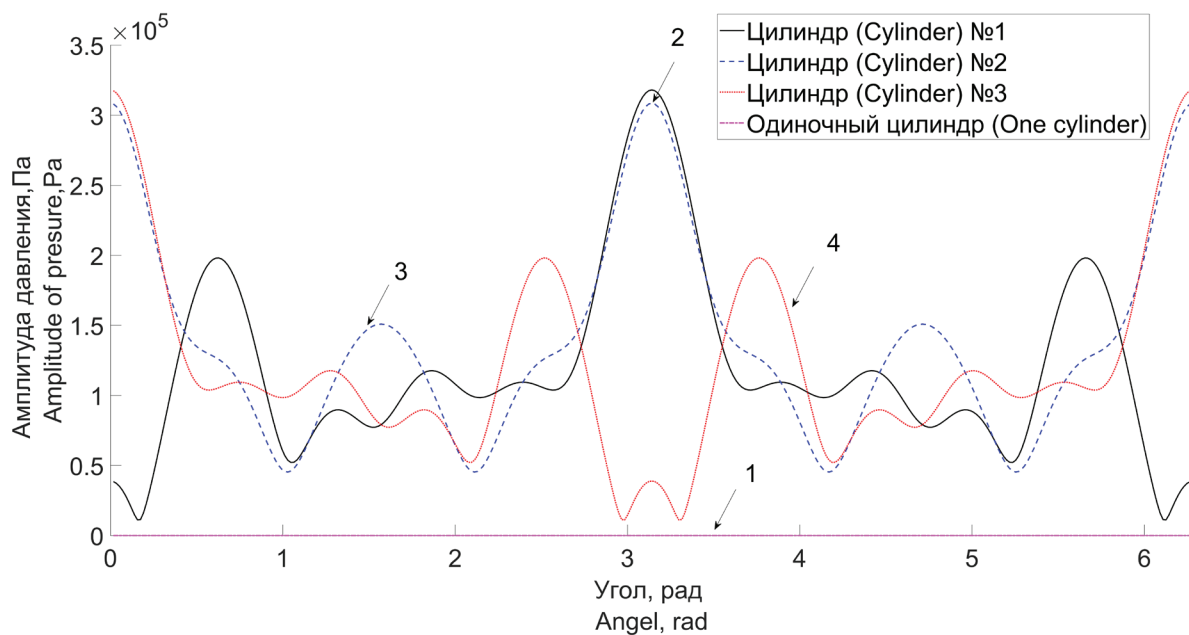
расположения излучателя в плоской системе. Во-вторых, оно отличается значительной неоднородностью распределения амплитуд и фаз скорости, различной для разных частот излучения.

Естественно, что установленные выше существенные изменения механических полей цилиндрических излучателей в составе плоских систем находят свое отражение и в процессе преобразования механической энергии колебаний излучателей в их акустическую энергию. Об этом свидетельствуют графики (рисунки 3*b* и 4). Анализ частотных зависимостей амплитуд акустического давления (рисунок 4) говорит о том, что возникновение многомодовости механических колебаний излучателей, обусловленное взаимодействием акустических полей при излучении звука плоской системой, приводит к расширению и обогащению их спектра собственных частот. Особый практический интерес связан с проявлением акустических резонансов на дополнительных частотах в низкочастотной области. Значения этих частот в (3–10) раз меньше основной резонансной частоты пьезокерамической оболочки в вакууме, хотя геометрические размеры излучателей остались неизменными. При этом амплитуды акустических давлений сопоставимы с амплитудами давлений акустического поля в области основного резонанса оболочек излучателей. Таким образом, эффективность преобразования механической энергии в акустическую сохраняется на частотах этих дополнительных резонансов, хотя при этом резонансная область сужается в 10–15 раз по сравнению с основной резонансной областью оболочки.

Особо интересным представляется поиск механизма влияния акустического взаимодействия элементов плоской системы излучателей с экранами на процессы преобразования в них электрической энергии в акустическую. Для этого обратимся к рисунку 3*b*. Анализ приведенных зависимостей свидетельствует о том, что результатом влияния акустического взаимодействия элементов плоской системы является нарушение радиальной симметрии акустического нагружения цилиндрических излучателей системы. Известно [4], что прямым следствием этого нарушения является возникновение в механическом поле этих излучателей последующих за нулевой модой колебаний. В количественном отношении степень эффективного перераспределения энергии, закачиваемой в излучатели на нулевой моде, между последующими формами колебаний определяется уровнем акустического взаимодействия.



a



b

Рисунок 3 – Угловые зависимости амплитуд колебательной скорости (a) и акустического давления (b) на поверхности излучателей на частоте 11 кГц

Figure 3 – Angular dependences of the amplitudes of the vibrational velocity (a) and acoustic pressure (b) on the surface of the radiators at a frequency of 11 kHz

Как следует из анализа соотношений (12), этот уровень зависит от значения функций $H_{n-m}^{(1)}(kr_{qs})$ и $J_{m-n}(kl_{os})$. Функция $H_{n-m}^{(1)}(kr_{qs})$ описывает взаимодействие по акустическому полю во внешней среде излучателей плоской системы с номерами q и s ($q = 1, \dots, N$; $s = 1, \dots, N$) при обмене ими излученными и отраженными волнами с номерами n и m . Значение этой функции

определяется волновым расстоянием $k r_{qs} \rightarrow \infty$ и стремится к нулю при $kr_{qs} \rightarrow \infty$. Это значит, что при увеличении kr_{qs} акустическое взаимодействие излучателей в плоской системе уменьшается, следствием чего является уменьшение степени нарушения радиальной симметрии акустического нагружения цилиндрических излучателей и снижение эффективности отбора энергии от нулевой моды

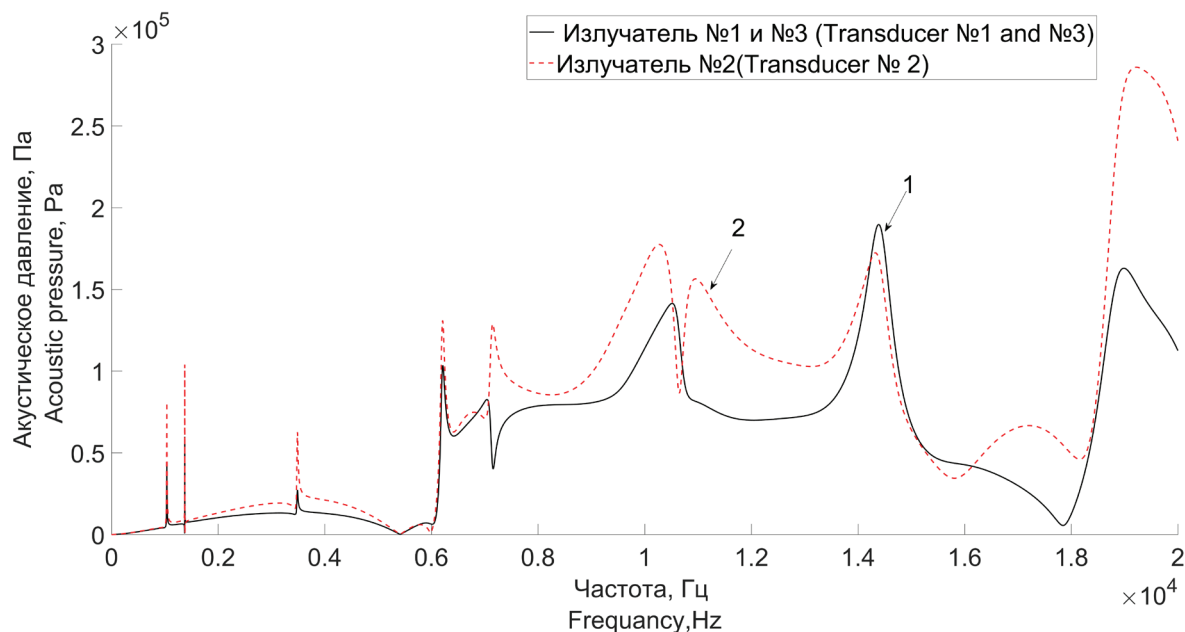


Рисунок 4 – Частотные зависимости амплитуд акустического поля на поверхности излучателей в составе системы в точках с координатами ($r_1 = 0,072$ м, $\varphi = 90^\circ$)

Figure 4 – The frequency dependences of the amplitudes of the acoustic field on the surface of the emitters in the system at points with coordinates ($r_1 = 0,072$ м, $\varphi = 90^\circ$)

последующими модами колебаний. При $J_{m-n}(kl_{s\text{осос}})$ этот вид взаимодействия исчезает.

Функция $J_{m-n}(kl_{s\text{осос}})$ описывает акустическое взаимодействие во внутренней области s -го излучателя ($s = 1, \dots, N$) между акустическим экраном и пьезокерамической оболочкой излучателя при обмене ими излученными и отраженными волнами с номерами n и m . Значение этой функции определяется волновым расстоянием $kl_{s\text{осос}}$ и стремится к нулю при $kl_{s\text{осос}} = 0$. При этом имеют место описанные выше последствия для акустического взаимодействия этого вида.

Заключение

Методом связанных полей в многосвязных областях решена задача излучения звука плоскими системами цилиндрических пьезокерамических излучателей с внутренними экранами. При решении задачи учтено взаимодействие физических полей в процессе электроакустического преобразования энергии, взаимодействие акустических полей излучателей системы во внешней среде и взаимодействие акустических полей экрана и пьезокерамической оболочки во внутренней среде каждого излучателя системы.

На основе полученных аналитических соотношений выполнены расчеты и произведен

анализ электроакустического преобразования энергии излучателями рассматриваемого типа в составе плоских систем. Установлен ряд закономерностей в этом преобразовании, связанных с акустическими взаимодействиями элементов систем и излучателей. Эти закономерности могут играть существенную роль при построении плоских систем из цилиндрических пьезокерамических излучателей с внутренними экранами и должны учитываться при проектировании таких систем.

Список использованных источников

1. Корякин, Ю.А. Корабельная гидроакустическая техника: Состояние и актуальные проблемы / Ю.А. Корякин, С.А. Смирнов, Г.В. Яковлев. – СПб. : Наука, 2004. – 410 с.
2. Лейко, А.Г. Подводные акустические антенны : монография / А.Г. Лейко, Ю.Е. Шамарин, В.П. Ткаченко. – К. : Авантприм, 2000. – 320 с.
3. Балабаев, С.М. Акустическое излучение водозаполненной пьезокерамической оболочки / С.М. Балабаев, Н.Ф. Ивина // Акуст. журн. – 1999. – Т. 45. – № 44. – С. 450–453.
4. Гринченко, В.Т. Волновые задачи акустики : монография / В.Т. Гринченко, И.В. Вовк, В.Т. Мацыпура. – К. : Интерсервис, 2013. – 572 с.
5. Vovk, I.V. Sound radiation by cylindrical piezoelectric shell with asymmetric insertion / I.V. Vovk, V.N. Oli-

nyk // JASA. – 1996. – Vol. 99, no. 1. – P. 133–138.

6. Лейко, А.Г. Частотные характеристики электрических полей цилиндрических пьезокерамических излучателей в составе плоских систем / А.Г. Лейко, А.И. Нижник // Журнал нано- и электронной физики. – 2016. – Т. 8. – № 4–04012. – С. 1–6.

7. Aronov, B. Effects of coupled vibrations on the acoustical performance of underwater cylindrical shell transducers / B. Aronov, A.B. David, L.B. Corey // JASA. – 2007. – Vol. 122, no. 11. – P. 3419–3428.

8. Aronov, B. Methods of experimental investigation of acoustic interaction between electroacoustical transducers in array / B. Aronov, O. Tetsuro, A.B. David // JASA. – 2002. – Vol. 112, no. 2. – P. 753–763.

9. Aronov B. Couplend vibration analysis of the thinwalled cylindrical piezoelectric ceramic transducers / B. Aronov // JASA. – 2009. – Vol. 125, no. 3. – P. 803–818.

10. Коржик, А.В. Амплитудно-частотные характеристики некоторых форм колебаний пьезокерамических цилиндрических приемников звука при различных видах электродирования в условиях связанности / А.В. Коржик // Акустический вестник. 2009. – Т. 12. – № 3. – С. 33–40.

Reference

1. Koryakin Yu.A., Smirnov S.A., Yakovlev G.V. *Korabelnaya gidroakusticheskaya tekhnika: Sostoyanie i aktualnye problemy* [Ship's hydroacoustic technique: Status and current problems]. St. Petersburg, Nauka Publ., 2004, pp. 410 (in Russian).

2. Leyko A.G., Shamarin Yu.Ye., Tkachenko V.P. *Podvodnye akusticheskie anteny: monografiya*

[Underwater hydroacoustic antennas]. Kiev, Avanposprim Publ., pp. 200–320 (in Russian).

3. Balabaev S.M., Ivina N.F. [Acoustic radiation of a water-filled piezoceramic shell]. *Akusticheskiy zhurnal* [Acoustic journal], 1999, vol. 45, no. 44, pp. 450–453 (in Russian).

4. Grinchenko V.T., Vovk I.V., Matsypura V.T. *Volnovye zadachi akustiki: monografiya* [Wave problems of acoustics: monograph], Kiev, Interservis Publ., 2013, 572 p.

5. Vovk I.V., Oliynik V.N. Sound radiation by cylindrical piezoelastic shell with asymmetric insertion. *JASA*, 1996, vol. 99, no. 1, pp. 133–138.

6. Leyko A.G., Nizhnik A.I. [Frequency characteristics of electric fields of cylindrical piezoceramic radiators in the composition of flat systems]. *Zhurnal nano ta elektronnoy fiziki* [Journal of Nano – Electron Physics], 2016, vol. 8, no. 4–04012, pp. 1–6 (in Russian).

7. Aronov B., David A.B., Corey L.B. Effects of coupled vibrations on the acoustical performance of underwater cylindrical shell transducers. *JASA*, 2007, vol. 122, no. 11, pp. 3419–3428.

8. Aronov B., Tetsuro O., David A.B. Methods of experimental investigation of acoustic interaction between electroacoustical transducers in array. *JASA*, 2002, vol. 112, no. 2, pp. 753–763.

9. Aronov B. Couplend vibration analysis of the thinwalled cylindrical piezoelectric ceramic transducers. *JASA*, 2009, vol. 125, no. 3, pp. 803–818.

10. Korzhik A.V. [Amplitude-frequency characteristics of some vibration modes of piezoceramic cylindrical sound receivers for various types of electrodynamics under conditions of coupling]. *Akusticheskiy vestnik* [Acoustic messenger], 2009, vol. 12, no. 3, pp. 33–40 (in Russian).

УДК 537.86.029

Обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров многополюсников

Гусинский А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 09.01.2018

Принята к печати 26.02.2018

Качество измерительных систем сверхвысокочастотного диапазона, в том числе векторных анализаторов цепей, во многом зависит от достоверности процедур калибровок и непосредственных измерений, которые позволяют учесть информацию о воспроизводимых погрешностях измерительных систем для последующей корректировки. Целью работы являлось математическое моделирование погрешностей измерительной системы для обобщенного случая – $2n$ -полюсника.

Рассмотрены вопросы повышения точности измерительных сверхвысокочастотных систем за счет компенсации систематических погрешностей, определяемых при калибровке. Калибровка измерительных систем и корректировка результатов непосредственных измерений по результатам калибровки требуют использования соответствующих математических моделей погрешностей. Математические модели погрешностей представляются в виде многополюсников погрешностей, включаемых между объектом измерения и измерительной системой, которая предполагается идеальной, т.е. свободной от погрешностей.

В статье предложена обобщенная математическая модель погрешностей, описываемая многополюсником погрешностей, содержащим n портов, соединяемых с n -портовой измерительной системой, и n портов, соединяемых с n портом объекта измерения. Для получения в общем виде уравнения калибровки для $2n$ -портовой модели многополюсника погрешностей использована его волновая матрица передачи $[T]$, записанная в клеточном виде, а затем найдена связь между результатом измерений в матричном виде с клеточной волновой матрицей T . Рассмотрено решение для нахождения матрицы погрешностей матричного уравнения, связывающего известные по результатам соответствующей аттестации матрицы для эталонов с результатами измерений при калибровке в матричном виде. При решении этого уравнения из-за клеточной волновой матрицы $[T]$ появляется матричное произведение «сэндвичного» типа. Решение возможно при использовании кронекеровского произведения двух матриц, оператора перемещения матрицы, RS -оператора матрицы, а также метода исключения Гаусса. Получено уравнение восстановления действительных значений матрицы рассеяния объекта измерения, исходя из результатов непосредственных измерений в матричном виде и матрицы погрешностей. При решении уравнения восстановления целесообразно использовать матрицу, инверсную к матрице передачи $[T]$.

Разработанная обобщенная математическая модель может быть использована, например, при необходимости измерения параметров сложных СВЧ устройств, выполненных на платах (подложках), с переходами-зондами к измерительным портам, где важно учитывать наличие дополнительных утечек СВЧ мощности между портами.

Ключевые слова: сверхвысокие частоты, произвольный многополюсник, многополюсник погрешностей, матричное уравнение калибровки, матричное уравнение непосредственного измерения.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

Адрес для переписки:

Гусинский А.В.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: avggus@mail.ru

Address for correspondence:

Gusinsky A.V.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: avggus@mail.ru

Для цитирования:

Гусинский А.В.
Обобщенная математическая модель процессов калибровки и непосредственного измерения параметров многополюсников. Приборы и методы измерений. 2018. – Т. 9, № 1. С. 96–105.
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

For citation:

Gusinsky A.V.
[Generalized mathematical model of the calibration process and the direct measurement of the parameters multipole].
Devices and Methods of Measurements. 2018, vol. 9, no. 1, pp. 96–105 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

Generalized mathematical model of the calibration process and the direct measurement of the parameters multipole

Gusinsky A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus

Received 09.01.2018

Accepted for publication 26.02.2018

Abstract

The quality of measuring systems of the microwave range, including vector network analyzers, largely depends on the reliability of calibration procedures and direct measurements, which allow to take into account information about the reproducible errors of measuring systems for subsequent correction. The aim of the paper is mathematical modeling of the errors of the measuring system for the generalized case for $2n$ pole device.

The problems of increasing the accuracy of measuring microwave systems due to compensation of systematic errors determined during calibration are considered. Calibration of measuring systems and correction of the results of direct measurements based on calibration results require the use of appropriate mathematical models of errors. Mathematical models of errors are represented in the form of multipolar errors, included between the object of measurement and the measuring system, which is assumed to be ideal, ie, free of errors.

The article proposes a generalized mathematical model of errors, described by a network of errors containing n ports connected to the n -port measuring system, and n ports connected to the n port of the measurement object. To obtain in general form the calibration equation for the $2n$ -port model of the error multipolar network, its transmission wave matrix $[T]$, recorded in a cellular form, was used, and then a relationship was found between the measurement result in a matrix form with the cellular wave matrix T . A solution for finding the error matrix of matrix equation that connects the matrices known from the results of the corresponding attestation for the standards with the results of measurements during calibration in the matrix form. When solving this equation, a matrix product of «sandwich» type appears due to the cellular wave matrix $[T]$. The solution is possible when using the Kronecker product of two matrix, the matrix translation operator, the RS operator of the matrix, and the Gaussian elimination method. An equation is obtained for reconstructing the actual values of the scattering matrix of the measurement object, starting from the results of direct measurements in the matrix form and the error matrix. When solving the reconstruction equation, it is advisable to use a matrix inverse to the transmission matrix $[T]$.

The developed generalized mathematical model can be used, for example, when it is necessary to measure the parameters of complex microwave devices made on boards (wafer), with probe transitions to measuring ports, where it is important to consider the presence of additional microwave power leaks between ports.

Keywords: ultrahigh frequencies, arbitrary multipolar network, a network of errors, a matrix equation of calibration, a matrix equation of direct measurement.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

Адрес для переписки:

Гусинский А.В.
Белорусский государственный университет информатики и радио-
электроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: avggus@mail.ru

Address for correspondence:

Gusinsky A.V.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics
P. Brovka str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: avggus@mail.ru

Для цитирования:

Гусинский А.В.
Обобщенная математическая модель процессов калибровки
и непосредственного измерения параметров многополюсников.
Приборы и методы измерений.
2018. – Т. 9, № 1. С. 96–105.

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

For citation:

Gusinsky A.V.
[Generalized mathematical model of the calibration process and the
direct measurement of the parameters multipole].
Devices and Methods of Measurements.
2018, vol. 9, no. 1, pp. 96–105 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2018-9-1-96-105

Введение

Процедура калибровки измерительных систем сверхвысокочастотного диапазона, в том числе векторных анализаторов цепей, способна обеспечить получение информации о воспроизводимых погрешностях системы для последующей корректировки при непосредственных измерениях [1–5]. Это требует использования соответствующих математических моделей погрешностей. Существует большое разнообразие моделей погрешностей и процедур калибровок, которые отличаются по степени сложности и эффективности [6–10]. Но типичной особенностью всех предлагаемых моделей погрешностей является представление повторяющихся, т.е. систематических погрешностей измерительной системы посредством некоторых многополюсников погрешностей, включаемых между объектом измерения и измерительной системой, которая предполагается идеальной, т.е. свободной от погрешностей.

В качестве математической модели погрешностей, используемой в самом общем случае – для произвольного многополюсника с числом портов n (с числом полюсов соответственно $2n$), с учетом погрешностей, вызываемых возможностями утечек сигнала за счет связей между всеми парами портов, может быть использован многополюсник погрешностей в виде $4n$ -полюсника, который в эквивалентной схеме измерения связывает n -портовый объект измерения со свободной от погрешностей n -портовой измерительной системой. При этом все систематические погрешности измерительной системы представляются посредством параметров матрицы рассеяния $[E]$ этого $2n$ -портового многополюсника погрешностей.

Многополюсник погрешностей в таком случае содержит n портов ($i = 1, n$), соединяемых с n -портовой измерительной системой, и n портов ($j = n + 1, 2n$) подсоединяемых к n портам объекта измерения. Первая группа портов представляет собой входы многополюсника погрешностей, на которых определяются измеряемые параметры матрицы рассеяния $[S_x]$ объекта измерения (ОИ), а вторая группа портов представляет собой выходы, к которым «подключены» действительные значения параметров матрицы рассеяния $[S_x]$ ОИ.

Целью работы являлось математическое моделирование погрешностей измерительной системы для обобщенного случая – случая $2n$ -полюсника.

Математическая модель калибровки и непосредственного измерения

Обобщенная математическая модель измерения для $2n$ -полюсника приведена на рисунке.

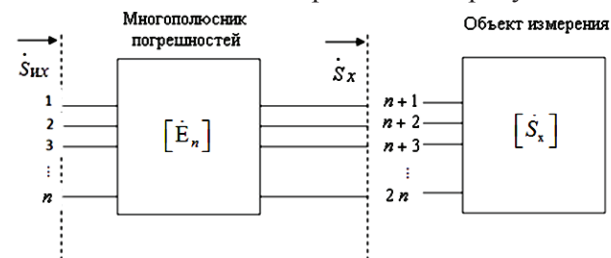


Рисунок – Обобщенная математическая модель измерения для $2n$ -полюсника

Figure – Generalized mathematical model of measurement for $2n$ -polyusnik

Для количественного описания в матричном виде многополюсника погрешностей на каждой частоте необходимо иметь максимум $(2n)^2$ независимых комплексных параметров. При этом оптимальным представляется вариант установления соответствия между портами $i = 1, n$ входа и портами $j = n + 1, 2n$ выхода, при котором любой из n сигнальных путей между входом i и соответствующим выходным портом $j = I + n$ можно рассматривать как «прямой» путь, в то время как любой другой путь можно считать представляющим сигналы утечки. Тогда из общего числа путей $n(2n - 1)$ имеются $2n(n - 1)$ путей утечки и n прямых путей и, как следствие этого, из общего числа $(2n)^2$ независимых комплексных параметров, описывающих многополюсник погрешностей, $4n(n - 1)$ параметров представляют сигналы утечки и $4n$ параметров описывают прямые пути.

В ситуациях нулевых утечек, когда существуют только прямые пути сигналов, $2n$ -портовая схема многополюсника погрешностей может быть расщеплена по горизонтали на n двухпортовых схем, непосредственно связывающих соответствующие входы и выходы. В этом случае матричное представление $[E]$ будет содержать $4n$ ненулевых параметров и $4n(n - 1)$ нулевых.

Для получения в общем виде уравнения калибровки при $2n$ -портовой модели многополюсника погрешностей можно использовать его волновую матрицу передачи $[T]$ порядка $(2n \times 2n)$, записываемую в клеточном виде, и затем найти связь измеренной матрицы рассеяния $[S_{\mu}]$ ОИ с его матрицей рассеяния $[S_x]$, выражаемой через матрицу-клетки волновой матрицы $[T]$.

Матрица $[T]$ $2n$ -портового многополюсника погрешностей связывает матрицу падающих и отраженных волн входа a_i и b_i с матрицей падающих и отраженных волн выхода a_j и b_j в соответствии с матричным выражением [1]:

$$\begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} = [T] \begin{bmatrix} b_j \\ a_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{aa}] & [T_{ab}] \\ [T_{ba}] & [T_{bb}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_j \\ a_j \end{bmatrix}, \quad (1)$$

где:

$$[a_i] = \begin{bmatrix} a_1 \\ \vdots \\ a_i \\ \vdots \\ a_n \end{bmatrix}; [b_i] = \begin{bmatrix} b_1 \\ \vdots \\ b_i \\ \vdots \\ b_n \end{bmatrix}; [a_j] = \begin{bmatrix} a_{n+1} \\ \vdots \\ a_j \\ \vdots \\ a_{2n} \end{bmatrix}; [b_j] = \begin{bmatrix} b_{n+1} \\ \vdots \\ b_j \\ \vdots \\ b_{2n} \end{bmatrix}.$$

Если рассматривать волны со стороны объекта измерения, то роли волн a_j и b_j выхода многополюсника погрешности взаимно меняются, т. е. волны b_j распространяясь от цепи многопо-

люсника погрешностей, по отношению к объекту измерения являются падающими, в то время как волны a_j , падающие на цепь многополюсника погрешностей, распространяются от объекта измерения. Как следствие данного обстоятельства волны a_j соотносятся с волнами b_j через матрицу рассеяния $[S_x]$ порядка $(n \times n)$ как:

$$[a_j] = [S_x][b_j]. \quad (2)$$

Тогда волны a_j и b_j выхода многополюсника погрешностей могут быть записаны в виде:

$$\begin{bmatrix} b_j \\ a_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & [1] \\ [S_x] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_j \\ b_j \end{bmatrix}, \quad (3)$$

где $[0]$ – нулевая матрица порядка $(n \times n)$; $[1]$ – единичная матрица порядка $(n \times n)$.

При подстановке выражения (3) в правую часть выражения (1), проведя перемножение блочных матриц, получим матричное уравнение порядка $(2n \times 2n)$ вида

$$\begin{bmatrix} [a_i] \\ [b_i] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{aa}] & [T_{ab}] \\ [T_{ba}] & [T_{bb}] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] & [1] \\ [S_x] & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [b_j] \\ [b_j] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{ab}] & [S_x] \\ [T_{bb}] & [S_x] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [b_j] \\ [b_j] \end{bmatrix}. \quad (4)$$

Данное уравнение может быть расщеплено горизонтально на два матричных уравнения порядка $(n \times n)$:

$$[a_i] = ([T_{ab}][S_x] + [T_{aa}])[b_j]; \quad (5)$$

$$[b_i] = ([T_{bb}][S_x] + [T_{ba}])[b_j]. \quad (6)$$

Уравнение (5) может быть решено относительно матрицы $[b_j]$ перемножением на матрицу $([T_{ab}][S_x] + [T_{aa}])^{-1}$; при этом получаем:

$$[b_i] = ([T_{ab}][S_x] + [T_{aa}])^{-1}[a_i]. \quad (7)$$

Сравнивая полученное выражение (7) с определением матрицы рассеяния $[S_u]$ порядка $(n \times n)$ на входе многополюсника погрешностей

$$[b_i] = [S_u][a_i], \quad (8)$$

имеем:

$$[S_u] = ([T_{bb}][S_x] + [T_{ba}])([T_{ab}][S_x] + [T_{aa}])^{-1}. \quad (9)$$

Это уравнение показывает, как четыре клеточные матрицы $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$ матрицы

передачи $[T]$ $2n$ -портового многополюсника погрешностей связывают матрицу $[S_u]$ с матрицей $[S_x]$. Уравнение (9) является в обобщенном виде уравнением калибровки измерительной системы, представляемой $2n$ -полюсной эквивалентной схемой.

Если для калибровки используется v эталонов ($l=1, v$) то в случае использования l -го эталона уравнение (9) может быть записано как:

$$[S_{ul}^k] = ([T_{bb}] [S_l^k] + [T_{ba}])([T_{ab}] [S_l^k] + [T_{aa}])^{-1}, \quad (10)$$

где $[S_l^k]$ – известная по результатам соответствующей аттестации матрица l -го эталона.

Выражение (10) определяет матричное преобразование известной матрицы $[S_l^k]$ в матрицу измерения $[S_{ul}^k]$ порядка $(n \times n)$. Преобразование (10) описывает n -портовое отражение на входе эталона, трансформированное через $2n$ -портовую схему.

При $n = 1$ многополюсник погрешностей сокращается до обычного четырехполюсника, матрицы $[S_l^k]$ и $[S_{ul}^k]$ становятся матрицами параметров, представляющих по физическому смыс-

лу коэффициенты отражения, а $[T]$ становится матрицей 2-го порядка. Выражение (10) в таком случае сводится к преобразованию отражения от нагрузки с заданным импедансом через линейный четырехполюсник.

$$[T_{bb}][S_l^k] + [T_{ba}] - [S_{ul}^k][T_{ab}][S_l^k] - [S_{ul}^k][T_{aa}] = [0], \quad (11)$$

где $[0]$ – нулевая матрица порядка n^2 .

Каждое из этих v уравнений может быть сведено к ряду из n^2 линейных однородных уравнений на входе многополюсника погрешностей, описываемого $[T]$. Так как это матрица порядка $2n$ и она содержит $(2n)^2$ элементов, то решение уравнения (11) требует в общем случае решения четырех систем уравнений для четырех n -портовых эталонов. Если при $n = 2$ решение этой задачи для каждого эталона представляет достаточно хорошо разработанную процедуру, то при n , больших 2, можно столкнуться со сложной задачей.

Исследуем возможность решения уравнения (11) в матричной форме благодаря выражению клеточных матриц $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$ в виде матричных функций от матриц $[S_{ul}^k]$ и $[S_l^k]$. Из-за некоммутативности матричного произведения и появления клеточной матрицы $[T_{ab}]$ в матричном произведении «сэндвичного» вида $[S_{ul}^k][T_{ab}][S_l^k]$ решить систему соответствующих скалярных линейных уравнений не удастся. Тем не менее произведение матриц «сэндвичного» типа в (11) можно исключить, применяя преобразование, использующее два матричных оператора – это кронекеровское произведение $[A] \otimes [B]$ двух матриц $[A]$ и $[B]$ 12 оператор перемещения $S([A])$ матрицы $[A]$.

Применяя к матрицам $[A]$ и $[B]$ 12-го порядка $(n \times n)$ кронекеровское умножение, получают

$$([1] \otimes [S_l^k]^T) RS([T_{bb}]) + RS([T_{ba}]) - ([S_{ul}^k] \otimes [S_l^k]^T) RS([T_{ab}]) - ([S_{ul}^k] \otimes [1]) RS([T_{aa}]) = [0], \quad (15)$$

Преимуществом полученного выражения (15) является то, что все его величины являются произведениями типа матрица-бивектор одинакового порядка n^2 и тем самым получаемые уравнения принимают вид системы линейных однородных матричных уравнений для четырех векторов-столбцов $RS([T_{aa}])$, $RS([T_{ab}])$, $RS([T_{ba}])$, $RS([T_{bb}])$.

$$([1] \otimes [S_l^k]^T) RS([T_{bb}]) + RS([T_{ba}]) - ([S_{ul}^k] \otimes [S_l^k]^T) RS([T_{ab}]) - ([S_{ul}^k] \otimes [1]) RS([T_{aa}]) = [0]; \quad (16)$$

Рассмотрим решение матричного уравнения, представленного в выражении (10) [2].

Можно показать, что любое из v матричных уравнений (10) n -порядка может быть записано как:

$(n^2 \times n^2)$ -матричное произведение, в то время как S -оператор преобразует $(n \times n)$ матрицу $[A]$ в n^2 -размерный вектор-столбец $S([A])$ последовательной перестановкой столбцов матрицы $[A]$ в вертикальном порядке. Альтернативно может быть использован и RS -оператор, воздействие которого аналогично воздействию S -оператора на транспонированную матрицу $[A]^T$, т.е.:

$$RS([A]) = S([A]^T). \quad (12)$$

Следовательно, $RS([A])$ является вектором-столбцом размерностью n^2 , содержащим последовательно в вертикальном порядке строки матрицы $[A]$, повернутые на 90° по часовой стрелке.

Используя указанные выше операторы, можно избавиться от «сэндвичного» вида матричного произведения $[A][B][C]$ в виде одной из следующих форм:

$$S([A][B][C]) = ([B]^T \otimes [A])S([C]) \quad (13)$$

или

$$RS([A][B][C]) = ([A] \otimes [B]^T)RS([C]). \quad (14)$$

Используя вторую форму записи (14) и дополняя единичной матрицей n -го порядка «несэндвичные» произведения, выражение (11) можно представить в виде:

Если использовать по меньшей мере три n -портовых эталона, измеряемых в ходе калибровки измерительной системы ($v = 3$), то можно получить точные векторные решения системы (15), применяя метод исключения Гаусса в соответствии со следующей методикой.

Для трех уравнение калибровки (15) может быть записано в виде следующих трех уравнений:

$$([1] \otimes [S_2^k]^T) RS([T_{bb}]) + RS([T_{ba}]) - ([S_{u2}^k] \otimes [S_2^k]^T) RS([T_{ab}]) - ([S_{u2}^k] \otimes [1]) RS([T_{aa}]) = [0]; \quad (17)$$

$$([1] \otimes [S_3^k]^T) RS([T_{bb}]) + RS([T_{ba}]) - ([S_{u3}^k] \otimes [S_3^k]^T) RS([T_{ab}]) - ([S_{u3}^k] \otimes [1]) RS([T_{aa}]) = [0]. \quad (18)$$

Вычитая выражение (17) из выражения (16), получим:

$$\begin{aligned} & \left(([1] \otimes [S_1^k]^T) - ([1] \otimes [S_2^k]^T) \right) RS([T_{bb}]) - \left(([S_{u1}^k] \otimes [S_1^k]^T) - ([S_{u2}^k] \otimes [S_2^k]^T) \right) \cdot RS([T_{ab}]) - \\ & - \left(([S_{u1}^k] \otimes [1]) - ([S_{u2}^k] \otimes [1]) \right) RS([T_{aa}]) = [D_1] RS([T_{bb}]) - [D_2] RS([T_{ab}]) - \\ & - [D_3] RS([T_{aa}]) = 0. \end{aligned} \quad (19)$$

Вычитая выражение (18) из (16), получим:

$$\begin{aligned} & \left(([1] \otimes [S_1^k]^T) - ([1] \otimes [S_3^k]^T) \right) RS([T_{bb}]) - \left(([S_{u1}^k] \otimes [S_1^k]^T) - ([S_{u3}^k] \otimes [S_3^k]^T) \right) RS([T_{ab}]) - \\ & - \left(([S_{u1}^k] \otimes [1]) - ([S_{u3}^k] \otimes [1]) \right) RS([T_{aa}]) = [D_4] RS([T_{bb}]) - [D_5] RS([T_{ab}]) - [D_6] RS([T_{aa}]) = 0. \end{aligned} \quad (20)$$

Умножая выражение (19) на $[D_2]^{-1}$, а выражение (20) на $[D_5]^{-1}$, получаем:

$$\begin{cases} RS([T_{ab}]) + [D_2]^{-1} [D_3] RS([T_{aa}]) = [D_2]^{-1} [D_1] RS([T_{bb}]); \end{cases} \quad (21)$$

$$\begin{cases} RS([T_{ab}]) + [D_5]^{-1} [D_6] RS([T_{aa}]) = [D_5]^{-1} [D_4] RS([T_{bb}]). \end{cases} \quad (22)$$

Вычитая выражение (22) из выражения (21), имеем уравнение

$$([D_2]^{-1} [D_3] - [D_5]^{-1} [D_6]) RS([T_{aa}]) = ([D_2]^{-1} [D_1] - [D_5]^{-1} [D_4]) RS([T_{bb}]), \quad (23)$$

которое может быть решено относительно $RS([T_{aa}])$:

$$RS([T_{aa}]) = ([D_2] [D_3] - [D_5]^{-1} [D_6])^{-1} [D_2]^{-1} [D_1] - [D_5]^{-1} [D_4] RS([T_{bb}]). \quad (24)$$

Подобным же образом, умножая выражение (19) на $[D_3]^{-1}$, а (20) на $[D_6]^{-1}$ получим:

$$\begin{cases} [D_3]^{-1} [D_2] RS([T_{aa}]) + RS([T_{aa}]) = [D_3]^{-1} [D_1] RS([T_{bb}]); \end{cases} \quad (25)$$

$$\begin{cases} [D_6]^{-1} [D_5] RS([T_{ab}]) + RS([T_{aa}]) = [D_6]^{-1} [D_4] RS([T_{bb}]). \end{cases} \quad (26)$$

Вычитая выражение (26) из выражения (25), имеем уравнение:

$$([D_3]^{-1} [D_2] - [D_6]^{-1} [D_5]) RS([T_{ab}]) = ([D_3]^{-1} [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) RS([T_{bb}]), \quad (27)$$

которое может быть решено относительно $RS([T_{ab}])$:

$$RS([T_{ab}]) = ([D_3]^{-1} [D_2] - [D_6]^{-1} [D_5])^{-1} ([D_3]^{-1} [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) RS([T_{bb}]). \quad (28)$$

Окончательно, подставляя выражения (24) и (28) в выражение (17), получим:

$$\begin{aligned} RS([T_{ba}]) = & \left([S_{u1}^k] \otimes [S_1^k]^T \right) ([D_3]^{-1} [D_2] - [D_6]^{-1} [D_5]) ([D_3]^{-1} [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) + \\ & + ([S_{u1}^k] \otimes [1]) ([D_2]^{-1} [D_1] - [D_5]^{-1} [D_4]) - ([1] \otimes [S_1^k]^T) RS([T_{bb}]). \end{aligned} \quad (29)$$

Полученные уравнения (24), (28) и (29) представляют собой решения уравнений калибровки (16)–(18).

В результате решения уравнения калибровки (15) получаем:

$$\begin{cases} RS([T_{aa}]) = ([D_2]^{-1} [D_3] - [D_5]^{-1} [D_6]) ([D_2]^{-1} [D_1]^{-1} [D_4]) RS([T_{bb}]); \\ RS([T_{ab}]) = ([D_3]^{-1} [D_2] - [D_6]^{-1} [D_5])^{-1} ([D_3]^{-1} [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) RS([T_{bb}]); \\ RS([T_{ba}]) = \left(([S_{u1}^k] \otimes S_1^k) ([D_3]^{-1} [D_2] - [D_6]^{-1} [D_5])^{-1} ([D_3] [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) + \right. \\ \left. + ([S_{u1}^k] \otimes [1]) ([D_2]^{-1} [D_3] - [D_5]^{-1} [D_6])^{-1} ([D_2]^{-1} [D_1] - [D_6]^{-1} [D_4]) - \right. \\ \left. - ([1] \otimes [S_1^k]) \right) RS([T_{bb}]); \\ RS([T_{bb}]) - \text{произвольный, ненулевой комплексный вектор} - \text{столбец порядка } n^2, \end{cases} \quad (30)$$

где вспомогательные матрицы $[D_1] \dots [D_6]$ порядка $n^2 \times n^2$ определяются следующими выражениями:

$$\begin{cases} [D_1] = ([1] \otimes [S_1^k]^T) - ([1] \otimes [S_2^k]^T); \\ [D_2] = ([S_{u1}^k] \otimes [S_1^k]^T) - ([S_{u2}^k] \otimes [S_2^k]^T); \\ [D_3] = ([S_{u1}^k] \otimes [1]) - ([S_{u2}^k] \otimes [1]); \\ [D_4] = ([1] \otimes [S_1^k]^T) - ([1] \otimes [S_3^k]^T); \\ [D_5] = ([S_{u1}^k] \otimes [S_1^k]^T) - ([S_{u3}^k] \otimes [S_3^k]^T); \\ [D_6] = ([S_{u1}^k] \otimes [1]) - ([S_{u3}^k] \otimes [1]). \end{cases} \quad (31)$$

Выражения (30), определяя матричные решения уравнения калибровки, заключают некую степень произвольности выбора матричной клетки $[T_{bb}]$. Выбор $[T_{bb}]$ в качестве независимой ма-

тричной переменной произволен, так как процесс исключения переменных по методу Гаусса должен проводиться таким образом, чтобы любой из четырех клеточных матриц $[T]$ мог быть произвольным, в то время как три других определяются как матричные функции в ходе выполнения операций исключения, как было показано выше.

Некоторые ограничения относительно произвольности выбора независимой клеточной матрицы тем не менее существуют. Во-первых, ясно, что бессмысленно выбирать нулевую матрицу. Во-вторых, не годится выбор такой клеточной матрицы, которая делает сингулярной полную матрицу $[T]$. Кроме того, уравнение калибровки должно быть инвариантно к выбору независимой клеточной матрицы, что также накладывает определенные ограничения на произвольность выбора. В таком случае, если в качестве независимой выбрана, как в нашем случае, клеточная матрица $[T_{bb}]$ и она коммутирует со всеми $[S_i^k]$, тогда:

$$\begin{aligned} [S_{ul}^k] &= ([T_{bb}] [S_l^k] + [T_{ba}]) ([T_{ab}] [S_l^k] + [T_{aa}])^{-1} = \\ &= ([S_l^k] + [T_{ba}] [T_{bb}]^{-1}) ([T_{ab}] [T_{bb}]^{-1} [S_l^k] + [T_{aa}] [T_{ab}]^{-1})^{-1}, \end{aligned} \quad (32)$$

и, таким образом, требуются только три матрицы $[T_{ba}] [T_{bb}]^{-1}$, $[T_{ab}] [T_{bb}]^{-1}$ и $[T_{aa}] [T_{bb}]^{-1}$ для определения матричного преобразования согласно выражению (10).

Для вывода уравнения восстановления действительных значений параметров $[S_x]$ предварительно введем матрицу $[R]$, инверсную к волновой матрице передачи $[T]$:

$$[R] = [T]^{-1} = \begin{bmatrix} R_1 & \vdots & R_2 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ R_3 & \vdots & R_4 \end{bmatrix}, \quad (33)$$

где $[R_1], \dots, [R_4]$ – клеточные матрицы инверсной матрицы $[R]$.

Решая матричное уравнение (33) порядка $(2n \times 2n)$ относительно волн a_j, b_j , имеем:

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} b_j \\ a_j \end{bmatrix} &= [T]^{-1} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [T_{aa}] & \vdots & [T_{ab}] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [T_{ba}] & \vdots & [T_{bb}] \end{bmatrix}^{-1} \\ \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} [R_1] & \vdots & [R_2] \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ [R_3] & \vdots & [R_4] \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} a_i \\ b_i \end{bmatrix}. \end{aligned} \quad (34)$$

С учетом связи падающих и рассеянных волн на входе многополюсника погрешностей a_j и b_j , определяемой соотношением (8), а именно $b_j = [S_x] [a_j]$, можно записать:

$$\begin{bmatrix} [a_i] \\ [b_i] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [1] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [S_x] & \vdots & [0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [a_i] \\ [a_i] \end{bmatrix}. \quad (35)$$

Подстановкой выражения (35) получаем следующее матричное уравнение порядка $(2n \times 2n)$:

$$\begin{bmatrix} [b_j] \\ [a_j] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_1] & \vdots & [R_2] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [R_3] & \vdots & [R_4] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [0] & \vdots & [1] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [S_x] & \vdots & [0] \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} [a_i] \\ [a_i] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [R_2][S_u] & \vdots & [R_1] \\ \cdots & \vdots & \cdots \\ [R_4][S_x] & \vdots & [R_3] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [a_i] \\ [a_i] \end{bmatrix}, \quad (36)$$

которое может быть расщеплено по горизонтали на два матричных уравнения n -порядка:

$$[a_j] = ([R_4][S_u] + [R_3])[a_i], \quad (37)$$

$$[b_j] = ([R_2][S_u] + [R_1])[a_i]. \quad (38)$$

Уравнение (38) может быть затем решено относительно падающих волн a_i :

$$[S_x] = \left\{ ([T_{bb}] - [T_{ba}][T_{aa}]^{-1}[T_{ab}])^{-1} [S_u] + ([T_{ab}] - [T_{aa}][T_{ba}]^{-1}[T_{bb}])^{-1} \right\} \times$$

$$\times \left\{ ([T_{ba}] - [T_{bb}][T_{ab}]^{-1}[T_{aa}])^{-1} [S_u] + ([T_{aa}] - [T_{ab}][T_{bb}]^{-1}[T_{ba}])^{-1} \right\}^{-1}. \quad (46)$$

Если клеточные матрицы $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$ взаимно коммутируют, выражение (46) значительно упрощается:

$$[S_x] = ([T_{aa}][S_u] - [T_{ba}])(-[T_{ab}][S_u] + [T_{bb}])^{-1}. \quad (47)$$

Уравнение восстановления действительных значений $[S_x]$ можно решить, используя клеточ-

$$[a_i] = ([R_2][S_u] + [R_1])^{-1} b_j. \quad (39)$$

Подставляя выражение (39) в выражение (37), получим выражение:

$$[a_j] = ([R_4][S_u] + [R_3])([R_2][S_u] + [R_1])^{-1} b_j. \quad (40)$$

которое с учетом выражения (2) позволяет получить уравнение восстановления этой матрицы в следующем виде:

$$[S_x] = ([R_4][S_x] + [R_3])([R_2][S_x] + [R_1])^{-1}. \quad (41)$$

Клеточные матрицы $[R_1]$, ..., $[R_4]$ инверсной матрицы $[R]$ могут быть представлены через квадранты матрицы $[T]$ в следующем виде:

$$[R_1] = ([T_{aa}] - [T_{ab}][T_{bb}]^{-1}[T_{ba}])^{-1}; \quad (42)$$

$$[R_2] = ([T_{ba}] - [T_{bb}][T_{ab}]^{-1}[T_{aa}])^{-1}; \quad (43)$$

$$[R_3] = ([T_{ab}] - [T_{aa}][T_{ba}]^{-1}[T_{bb}])^{-1}; \quad (44)$$

$$[R_4] = ([T_{bb}] - [T_{ba}][T_{aa}]^{-1}[T_{ab}])^{-1}. \quad (45)$$

С учетом выражений (43)–(45) уравнение восстановления можно записать в следующем виде:

ные матрицы $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$ матрицы передачи $[T]$ (выражение (46)) или через клеточные матрицы $[R_1]$, $[R_2]$, $[R_3]$, $[R_4]$ матрицы R , инверсной к матрице передачи $[T]$.

Клеточные матрицы $[R_1]$, $[R_2]$, $[R_3]$, $[R_4]$ можно непосредственно рассчитывать, используя выражения, аналогичные (15)–(31). Они имеют вид:

$S([R_1])$ – произвольный ненулевой вектор-столбец порядка n^2 ;

$$S([R_2]) = -([D_8]^{-1}[D_{15}] - [D_{10}]^{-1}[D_{12}])^{-1}([D_8]^{-1}[D_{13}] - [D_{10}]^{-1}[D_{14}])S([R_1]);$$

$$S([R_3]) = ([D_{11}]^{-1}[D_7] - [D_{12}]^{-1}[D_9])^{-1}([D_{11}]^{-1}[D_8] - [D_{12}]^{-1}[D_{10}])S([R_1]);$$

$$S([R_4]) = ([D_7]^{-1}[D_{11}] - [D_9]^{-1}[D_{12}])^{-1}([D_7]^{-1}[D_8] - [D_9]^{-1}[D_{10}])S([R_1])^{-1} \quad (48)$$

и в них вспомогательные матрицы $[D_7]$ – $[D_{16}]$ выражаются в виде:

$$\begin{aligned} [D_7] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [S_1^k] \right) - \left([S_{u2}^k]^T \otimes [S_2^k] \right); \\ [D_8] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [1] \right) - \left([S_{u2}^k]^T \otimes [1] \right); \\ [D_9] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [S_1^k] \right) - \left([S_{u3}^k]^T \otimes [S_3^k] \right); \\ [D_{10}] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [1] \right) - \left([S_{u3}^k]^T \otimes [1] \right); \\ [D_{11}] &= \left([1] \otimes [S_1^k] \right) - \left([1] \otimes [S_2^k] \right); \\ [D_{12}] &= \left([1] \otimes [S_1^k] \right) - \left([1] \otimes [S_3^k] \right); \\ [D_{13}] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [S_1^k]^{-1} \right) - \left([S_{u2}^k]^T \otimes [S_2^k]^{-1} \right); \\ [D_{14}] &= \left([S_{u1}^k]^T \otimes [S_1^k]^{-1} \right) - \left([S_{u3}^k]^T \otimes [S_3^k]^{-1} \right); \\ [D_{15}] &= \left([1] \otimes [S_1^k]^{-1} \right) - \left([1] \otimes [S_2^k]^{-1} \right); \\ [D_{16}] &= \left([1] \otimes [S_1^k]^{-1} \right) - \left([1] \otimes [S_3^k]^{-1} \right). \end{aligned} \quad (49)$$

Заключение

Разработана обобщенная математическая модель измерения параметров матрицы рассеяния $[S_x]$ для произвольного многополюсника ($2n$ -полюсника), в которой математическая модель $4n$ -полюсника погрешностей описывается $2n^2$ параметрами матрицы рассеяния $[E]$. При использовании матричных методов анализа получены уравнения калибровки и восстановления действительных значений параметров матрицы $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$. При этом вместо матрицы рассеяния $[E]$ используется матрица передачи $[T]$ в виде четырех клеточных матриц $[T_{aa}]$, $[T_{ab}]$, $[T_{ba}]$, $[T_{bb}]$. Анализ показал, что из-за появления клеточной матрицы вида $[T_{ab}]$ в матричном произведении «сэндвичного» типа $[S_{ul}^k][T_{ab}][S_l^k]$ решение уравнений возможно при использовании кронекерского произведения двух матриц $[A] \otimes [B]$, оператора перемещения $[S_x]$ матриц $[A]$ и RS -оператора матрицы $[A]$, а также метода исключения Гаусса. Кроме того, при решении уравнения восстановления действительных значений матрицы $[S_x]$ целесообразно использовать матрицу $[R]$, инверсную к матрице передачи $[T]$.

Разработанная обобщенная математическая модель может быть использована, например, при необходимости измерения параметров сложных СВЧ устройств, выполненных на платах (подложках), с переходами-зондами к измерительным

портам, где важно учитывать наличие дополнительных утечек СВЧ мощности между портами.

Список использованных источников

1. Белоус, А.И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия : в 2 кн. Книга 1 / А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов. – М. : Техносфера, 2016. – 688 с.
2. Белоус, А.И. СВЧ-электроника в системах радиолокации и связи. Техническая энциклопедия : в 2 кн. Книга 2 / А.И. Белоус, М.К. Мерданов, С.В. Шведов. – М. : Техносфера, 2016. – 728 с.
3. Шаров, Г.А. Основы теории сверхвысокочастотных линий передачи, цепей и устройств / Г.А. Шаров. – М. : Горячая линия–Телеком, 2016. – 472.
4. Шаров, Г.А. Волноводные устройства сантиметровых и миллиметровых волн / Г.А. Шаров. – М. : Горячая линия–Телеком, 2016. – 640 с.
5. Голубева, Н.С. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот / Н.С. Голубева, В.Н. Митрохин. – М. : МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 488 с.
6. Alby, M.M. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology / M.M. Alby // IEEE Trans. On Instr. And Meas. – 2005. – Vol. 54, no. 1. – P. 24–30.
7. Sand, A. Secure Approach to Distributed Internet-Enabled Metrology / A. Sand, H. Slinde, T. Fyeldly // IEEE Trans. On Instr. And Meas. – 2007. – Vol. 56, no. 5. – P. 1979–1985.
8. Sand, A. Internet Enabled Calibration: An Analysis of Different Topologies and a Comparison of Two Different Approaches / A. Sand, M. Stevens, G. Parkin // IEEE Trans. Of Instr. And Meas. – 2007. – Vol. 56, no. 5. – P. 1986–1991.
9. Шаров, Г.А. Математика радиоэлектроники сверхвысоких частот (координаты, векторы, матрицы) / Г.А. Шаров, А.М. Кострикин, А.В. Гусинский. – Минск : Бестпринт, 2014. – 240 с.
10. Гусинский, А.В. Векторные анализаторы цепей миллиметровых волн : монография : в 3 ч. Ч. 1. Основные понятия и представления теории преобразования сигналов и спектрального анализа / А.В. Гусинский, Г.А. Шаров, А.М. Кострикин. – Минск : БГУИР, 2004. – 214 с.

References

1. Belous A.I., Merdanov M.K., Shvedov S.V. SVCH-elektronikakh v sistemakh radiolokacii i svyazi. *Tekhnicheskaya ehnciklopediya, V 2-kh knigakh. Kniga 1.* [Microwave Electronics in the systems of Radiolocation and Telecommunication, Technical encyclopedia, v 2 books, Book 1] Moskow, Tekhnosfera Publ., 2016, 688 p. (in Russian).
2. Belous A.I., Merdanov M.K., Shvedov S.V. SVCH-elektronika v sistemakh radiolokacii i svyazi. *Tekhnicheskaya ehnciklopediya, V 2-kh knigakh. Kniga 2.* [Microwave Electronics in the systems of Radiolocation

and Telecommunication, Technical encyclopedia, in 2 books, Book 2] Moscow, Tekhnosfera Publ., 2016, 728 p. (in Russian).

3. Sharov G.A. *Osnovy teorii sverkhvysokochastotnykh linii peredachi, cepej i ustrojstv* [Base theory of the microwave transmission lines, networks and devices] Moscow, Goryachaya liniya–Telekom [Hot line–Telecom], 2016, 472 p. (in Russian).

4. Sharov G.A. *Volnovodnye ustrojstva santimetrovykh i millimetrovykh voln*. [Waveguide devices of the centimeter and millimeter waves]. Moscow, Goryachaya liniya–Telekom Publ., 2016, 640 p. (in Russian).

5. Golubeva N.S., Mitrohin V.N. *Osnovy radioelektroniki sverkhvysokikh chastot* [Fundamentals of radio electronics of supersonic frequencies]. Moscow, MGTU im. N.EH.Baumana [MSTU Bauman], 2006, pp. 132–138 (in Russian).

6. Alby M.M. Remote Calibration Using Mobile, Multiagent Technology [Highfrequency Radioelectronics

base]. IEEE Trans. On Instr. And Meas., 2005, vol. 54, no. 1, pp. 24–30.

7. Sand A., Slinde H., Fyeldly T. Secure Approach to Distributed Internet-Enabled Metrology. IEEE Trans. On Instr. And Meas., 2007, vol. 56, no. 5, pp. 1979–1985.

8. Sand A., Stevens M., Parkin G. Internet Enabled Calibration: An Analysis of Different Topologies and a Comparison of Two Different Approaches. – IEEE Trans. Of Instr. And Meas., 2007, vol. 56, no. 5, pp. 1986–1991.

9. Sharov G.A., Kostrikin A.M., Gusinskij A.V. *Matematika radioelektroniki sverkhvysokikh chastot (koordinaty, vektory, matricy)* [Microwave Radioelectric Mathematics]. Minsk, Bestprint Publ., 2014, 240 p.

10. Gusinskij A.V., Sharov G.A., Kostrikin A.M. *Vektornye analizatory cepej millimetrovykh voln. Monografiya. V 3 ch. Ch. 1. Osnovnye ponyatiya i predstavleniya teorii preobrazovaniya signalov i spektral'nogo analiza* [Vector Network Analyzer in Millimeter Waves]. Minsk, BGUIR, 2004, 214 p.

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows. Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и четким. Фотографии представляются в электронном виде (**формат tif, разрешение не менее 300 dpi**). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подписными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т.д. Подписи к рисункам даются на отдельном листе на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения на рисунках должны быть расшифрованы в подписной подписи. Надписи на рисунке даются на русском и английском языках.

8. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

9. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

10. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

11. Многострочные формулы должны быть набраны в редакторе MathType, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы, символы химических элементов (в т.ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т.ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

14. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

15. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

16. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

17. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

18. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be deciphered.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы:
74835; 748352