

ISSN: 2220-9506 (Print)
ISSN: 2414-0473 (Online)

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 6

№ 2

Vol. 6

2015

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 2 раза в год

Журнал включён в базу данных РИНЦ

Том 6

№ 2

2015

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маляревич А.М., д.ф.-м.н., профессор, декан приборостроительного факультета 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

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

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

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

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

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)

Малкин В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры авиационных радиоэлектронных систем Военной академии Республики Беларусь (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)

Серенков П.С., д.т.н., доцент, заведующий кафедрой «Стандартизация, метрология и информационные системы» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Соломахо 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)

Хатько В.В., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (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)

МЕЖДУНАРОДНЫЙ РЕДАКЦИОННЫЙ СОВЕТ

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)

Гринчук А.П., к.т.н., доцент, заместитель директора Минского НИИ радиоматериалов

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

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

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)

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)

Захаров И.П., д.т.н., профессор, профессор кафедры метрологии и измерительной техники Харьковского Национального университета радиоэлектроники (г. Харьков, Украина)

Колтунович Т.Н., к.т.н., доцент, доцент Люблинского технологического университета (г. Люблин, Польша)

Кухаренко Н.А., генеральный директор ОАО «Минский научно-исследовательский приборостроительный институт» (г. Минск, Беларусь)

Кэмп А., профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)

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)

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)

*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

С 2013 года журнал включён в Научную электронную библиотеку и Российский индекс научного цитирования (РИНЦ), имеет импакт-фактор

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: Дубаневич А.В., редактор: Иванова Т.А.

Подписано в печать 11.2015. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага офсетная.

Гарнитура Times New Roman. Отпечатано на ризографе. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 300 экз.

Дата выхода в свет 12.2015. Заказ № .

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
www.pimi.bntu.by

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued twice per year

The Journal is included in RSCI

Volume 6

№ 2

2015

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, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Dean of the Instrumentation Engineering Faculty, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

SECRETARY

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

EDITORIAL BOARD

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

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

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

Mikhail G. Kiselev, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Design and Manufacture of Devices Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

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 of Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Vitaly A. Malkin, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Aviation Department, Belarusian Military Academy (Minsk, Belarus)*

Vladimir A. Pilipenko, *Correspondent Member of National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy of 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)*

Pavel S. Serenkov, *Doctor of Science (Engineering), Associate 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 Republic 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)*

Viacheslav V. Khatko, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Micro- and Nanotechnology Department, Belarusian National Technical University (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)

INTERNATIONAL ADVISORY EDITORIAL BOARD

Vladimir A. Alekseev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Scientific Secretary of R.E. Alekseev Nizhny Novgorod State Technical University (Nizhny Novgorod, 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 of 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 Mechnics, Riga Technical University (Riga, Latvia)

Anatoly P. Grinchuk, PhD (Engineering), Associate Professor, Deputy of Director of the Scientific Research Institute of Radiomaterials (Minsk, Belarus)

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

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

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

Nikalai A. Zhagora, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head Specialist of Metrology and Standardization, Belarusian State Institute of Metrology (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 of the Certification «Russian Register» (St. Petersburg, Russia)

Igor P. Zakharov, Doctor of Science (Engineering), Professor, Metrology and Measurement Engineering Department, Kharkiv National University of Radioelectronics (Kharkiv, Ukraine)

Tomasz N. Koltunowicz, PhD, Associate Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)

Alan Kemp, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom)

Nikalai A. Kuharenko, General Director of Minsk Scientific and Research Instrumentation Engineering Institute (Minsk, Belarus)

Vasili V. Mashko, Doctor of Science (Engineering), Deputy of Director of B.I. Stepanov Institute of Physics of 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)

Tse Li, Deputy of 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 Presidium of National Academy of Sciences of Belarus (Minsk, Belarus)

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
www.pimi.bntu.by

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>Захарова А.Н., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.</i> Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных активных элементах методом пробного пучка	127
<i>Климович И.М., Кулешов В.Н., Зайков В.А., Бурмаков А.П., Комаров Ф.Ф., Людчик О.Р.</i> Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления	139
<i>Длугунович В.А., Ждановский В.А., Липлянин А.А., Никоненко С.В., Тарасова О.Б.</i> Устройство юстировки тела накала светоизмерительных ламп	148
<i>Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В.</i> Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей	156
<i>Джилавдари И.З., Мекид С.Н., Ризноокая Н.Н.</i> Управление чувствительностью инерционного датчика с дифференциальным электростатическим преобразователем	163
<i>Попечиц В.И.</i> Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля на основе трехкомпонентных растворов органических красителей	173
<i>Бусько В.Н.</i> Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения	181

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.</i> Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов	188
<i>Шаронов Г.В., Жарин А.Л., Мухуров Н.И., Пантелеев К.В.</i> Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона	196
<i>Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.</i> Проектирование многопорядковых интраокулярных линз	204
<i>Демеш М.П., Гусакова Н.В., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., С.В. Григорьев, Крот Ю.А., Космына М.Б., Шеховцов Н.А.</i> Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред	211
<i>Козлов В.Л., Васильчук А.С.</i> Применение корреляционной обработки цифровых оптических изображений для решения задач криминалистики	220
<i>Титович Е.В., Киселев М.Г.</i> Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 1. Зависимость от механических параметров штатива	230
<i>Невдах В.В.</i> Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование	239
<i>Нисс В.С., Васьков О.С., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К.</i> Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектрометрии	249
<i>Мачехин Ю.П., Курской Ю.С.</i> Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием интервального анализа	257

CONTENTS

Measuring instruments

<i>Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.</i> Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements with a probe beam method	127
<i>Klimovich I.M., Kuleshov V.N., Zaikou V.A., Burmakou A.P., Komarov F.F., Ludchik O.R.</i> Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology	139
<i>Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Liplianin A.A., Nikanenka S.V., Tarasova O.B.</i> The apparatus for alignment of the photometric lamp filament	148
<i>Novoselov S.P., Botsman A.S., Nevliudova V.V.</i> The experimental setup for research of the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems based on flexible modules	156
<i>Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N.</i> Controlling of sensitivity of the sensor with differential electrostatic transducers	163
<i>Papechyts V.I.</i> The registering systems for the radiation nondestructive control on the basis of the three-component organic dyes solutions	173
<i>Busko V.N.</i> Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of biharmonic lading	181

Methods of measurements, monitoring, diagnostics

<i>Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.</i> Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies	188
<i>Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeyeu K.U.</i> Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function	196
<i>Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.</i> Design of the multiorder intraocular lenses	204
<i>Demesh M.P., Gusakova N.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Grigor`ev S.V., Krot Y.A., Kosmyna M.B., Shekhotsov A.N.</i> Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity method for determination of emission cross sections of Nd-doped laser media	211
<i>Kozlov V.L., Vasilchuk A.S.</i> Correlation processing of digital optical images for solving criminalistic problems	220
<i>Tsitovich Y.V., Kiselev M.G.</i> Technique of estimation of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 1. Dependence of the mechanical parameters of linac's gantry	230
<i>Nevdakh V.V.</i> Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation	239
<i>Niss V.S., Vaskou A.S., Turtsevich A.S., Kerentsev A.F., Kononenko V.K.</i> Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors by the method of thermal relaxation differential spectrometry	249
<i>Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S.</i> The compilation of Shannon entropy measurement equation for nonlinear dynamic systems by using the interval analysis methods	257

УДК 535.327

Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных активных элементах методом пробного пучка

Захарова А.Н., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.

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

Поступила 21.09.2015

Принята к печати 03.11.2015

Разработан прибор, предназначенный для измерения параметров термической линзы (ТЛ) в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке. Измерения основаны на методе пробного пучка. Прибор позволяет определять знак и оптическую силу ТЛ в главных меридиональных плоскостях, коэффициент чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки и степень астигматизма, коэффициент тепловыделения в лазерном материале, что дает возможность оценивать интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наведенную в лазерном элементе. Измерения проводятся в линейно поляризованном свете на длине волны 0,53 мкм. Накачка активного элемента осуществляется на длине волны 0,96 мкм, что позволяет исследовать лазерные среды, активированные ионами Yb^{3+} и (Er^{3+} , Yb^{3+}). Точность определения коэффициента чувствительности ТЛ к мощности накачки – $0,1 \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$, степени астигматизма ТЛ – $0,2 \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$, коэффициента тепловыделения – 5% , вклада фотоупругого эффекта в ТЛ – $0,5 \cdot 10^{-6} \text{ К}^{-1}$. С помощью данного прибора проведены исследования ТЛ в лазерном активном элементе на основе кристалла иттриевого ванадата $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$.

Ключевые слова: термическая линза, лазерные активные элементы, продольная диодная накачка, кристалл иттриевого ванадата.

Адрес для переписки:

Юмашев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

Address for correspondence:

Yumashev K.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: kyumashev@bntu.by

Для цитирования:

Захарова А.Н., Лойко П.А., Маляревич А.М., Юмашев К.В.
Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных
активных элементах методом пробного пучка
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 127–138

For citation:

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.
Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements
with a probe beam method
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 127–138

Введение

Оптическая накачка лазерного активного элемента приводит к возникновению в нем неоднородного распределения температуры, следствием которого, в свою очередь, является возникновение в нем термически обусловленных деформаций (напряжений) и изменение показателя преломления, обусловленного действием фотоупругого эффекта [1]. Такие фотоупругие искажения вызывают возникновение в лазерном элементе термической линзы (ТЛ), под действием которой могут существенно ухудшаться выходные характеристики лазера. В частности, ТЛ приводит к изменению условий устойчивости лазерного резонатора, искажению пространственного профиля пучка лазерного излучения, рассогласованию мод накачки и генерации и т.д. [1]. Все это особенно ярко проявляется для лазерных элементов на основе анизотропных кристаллов, использование которых является одной из тенденций современной лазерной физики. Анизотропные кристаллы обладают рядом привлекательных спектроскопических свойств по сравнению с высокосимметричными кристаллами и позволяют существенно расширить область применения лазеров на их основе, а также получать лазерную генерацию в более широком временном и спектральном диапазонах.

Расчет параметров ТЛ в лазерных элементах (в особенности на основе анизотропных кристаллов) в настоящее время представляется трудновыполнимой задачей. Это связано, главным образом, с отсутствием информации о компонентах тензоров податливости и фотоупругих постоянных, необходимых для таких расчетов. Определение фотоупругих постоянных требует использования довольно сложных экспериментальных методик, образцов специальной формы и размеров, которые часто не могут быть реализованы в силу особенностей выращивания материала. Кроме того, аналитические выражения для определения вклада фотоупругого эффекта в ТЛ в настоящее время существуют только для высокосимметричных сред.

Поэтому задача создания относительно простого и компактного прибора для измерения параметров ТЛ в лазерных элементах является весьма актуальной. В настоящее время подобные коммерчески выпускаемые приборы отсутствуют, в некоторых научных центрах имеются экспериментальные установки, позволяющие проводить такие измерения.

Целью данной работы являлась разработка прибора для измерения параметров ТЛ в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке (знака и оптической силы в главных меридиональных плоскостях, коэффициента чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки, степени астигматизма) [2], коэффициента тепловыделения в лазерном материале [3] и определения на этой основе интегрального вклада фотоупругого эффекта [4] в термически наведенную линзу лазерного элемента. Совокупность такой информация является весьма востребованной при конструировании лазерных систем. Известен ряд методов измерения параметров ТЛ в лазерных элементах. В частности, методы пробного пучка, интерференционные методы, ряд методик, основанных на анализе изменения различных характеристик выходного лазерного излучения [1]. В основу разрабатываемого в данной работе прибора положен метод пробного пучка, преимуществами которого являются относительная техническая простота реализации, высокая надежность и достоверность измерений.

Термическая линза

В процессе работы лазера активный элемент испытывает значительные термооптические искажения. Для описания влияния данных искажений на волновой фронт лазерного пучка используется модель термической линзы – линзы, влияние которой на волновой фронт пучка эквивалентно воздействию на него термически искаженного лазерного элемента. При этом имеет место прямо пропорциональная зависимость между оптической силой D ТЛ и мощностью накачки P_{abs} , поглощенной в лазерном элементе. В случае продольной диодной накачки выражение, описывающее данную зависимость, имеет вид [1]:

$$D = \frac{P_{abs} \eta_h}{2\pi\kappa w_p^2} \cdot \left[\frac{dn}{dT} + X_{PHE} + Y_{DIST} \right], \quad (1)$$

где η_h – коэффициент объемного тепловыделения, показывающий, какая часть поглощенной мощности P_{abs} рассеивается в лазерном элементе в виде тепла; κ – «эффективный» коэффициент теплопроводности для плоскости, перпендикулярной оптической оси лазерного элемента (т.е. перпендикулярной распространению излучения); w_p – радиус

моды накачки в лазерном элементе. Сумма $\Delta = dn/dT + X_{PHE} + Y_{DIST}$ представляет собой «обобщенный» термо-оптический коэффициент [4], в котором dn/dT описывает вклад температурной зависимости показателя преломления; X_{PHE} – вклад фотоупругого эффекта; Y_{DIST} – вклад искажения плоскости торцов лазерного элемента. Величина Y_{DIST} описывается выражением $Y_{DIST} = (1+\nu)(n-1)\alpha$ [1], где ν – «эффективный» коэффициент Пуассона; n – показатель преломления активной среды; α – коэффициент термического расширения в направлении, параллельном оптической оси лазерного элемента (т.е. параллельном распространению излучения).

Термическая линза в лазерном элементе в общем случае является астигматической, т.е. ее оптическая сила имеет различные значения для разных меридиональных плоскостей – плоскостей, содержащих направление распространения излучения и некоторое направление в ортогональной ему плоскости [1]. Поэтому измерение знака и оптической силы ТЛ производится для двух ортогональных друг другу главных меридиональных плоскостей, для которых оптическая сила ТЛ будет наибольшей и наименьшей. Данным плоскостям в дальнейшем будут ставиться в соответствие лежащие в каждой из них направления A и B , перпендикулярные направлению распространения излучения.

Параметрами ТЛ, кроме её знака и оптической силы D_A и D_B , являются также коэффициенты чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки $M_A = dD_A/dP_{abs}$, $M_B = dD_B/dP_{abs}$ и степень астигматизма $S = |M_A - M_B|$ [2]. Параметры $M_{A(B)}$ характеризуют скорость изменения оптической силы ТЛ при изменении поглощенной мощности накачки. Степень астигматизма характеризует различие коэффициентов чувствительности $M_{A(B)}$ для главных меридиональных плоскостей. Интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наводимой в лазерном элементе, определяется по формуле:

$$(X_{PHE})_{A(B)} = \frac{2\pi k \omega_p^2 M_{A(B)}}{\eta_h} - \frac{dn}{dT} - Y_{DIST}. \quad (2)$$

Метод измерения

На рисунке 1 приведена оптическая схема измерения параметров ТЛ в лазерных элементах при продольной диодной накачке с помощью метода пробного пучка. Излучение накачки лазерного ди-

ода 8, выходящее из SMA-разъема 6 оптического волокна 7, при помощи фокусирующей системы 4 доставляется к поверхности исследуемого образца лазерного элемента 3, представляющего собой плоскую полированную пластинку. Образец закреплен в радиатор 2, обеспечивающий отток от него тепла. Зондирующее излучение лазера 1 проходит через исследуемый лазерный элемент 3, перекрываясь в нем с пучком накачки. При этом в области их перекрытия размер зондирующего пучка меньше размера пучка накачки.

Под действием излучения накачки в лазерном элементе формируется ТЛ, которая искажает поперечный профиль зондирующего пучка. Эти изменения регистрируются при помощи ПЗС-камеры.

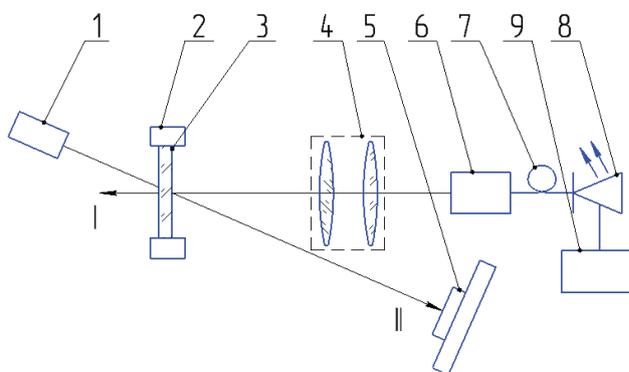


Рисунок 1 – Оптическая схема измерения параметров термической линзы в лазерных элементах при продольной диодной накачке с помощью метода пробного пучка: 1 – лазер-источник зондирующего излучения; 2 – радиатор; 3 – исследуемый лазерный элемент; 4 – фокусирующая система; 5 – ПЗС-камера; 6 – SMA-разъем; 7 – оптическое волокно; 8 – лазерный диод; 9 – блок питания; I – пучок накачки; II – зондирующий пучок

Figure 1 – Optical scheme for the determination of the thermal lens parameters in laser elements under longitudinal diode pumping by a probe beam method: 1 – laser-source of probe radiation; 2 – heat sink; 3 – studied laser element; 4 – focusing system; 5 – CCD camera; 6 – SMA-slot; 7 – optical fiber; 8 – laser diode; 9 – power supply; I – pump beam; II – probe beam

Изменение поперечного профиля пучка зондирующего излучения моделируется с помощью метода матричной оптики [5]. Оптическая схема распространения зондирующего пучка через термически возмущенный лазерный элемент показана на рисунке 2. При диодной накачке концентрация ионов-активаторов подбирается таким образом, чтобы обеспечить высокое поглощение излучения накачки на малой длине активной сре-

ды. Это приводит к тому, что объемное тепловыделение в лазерном элементе локализовано вблизи его «входного» торца, через который производится накачка. Поэтому ТЛ формируется в тонком слое, расположенном вплотную к «входному» торцу лазерного элемента.

Лучевые матрицы, описывающие распространение пробного пучка от выходного зеркала лазера 1 (см. рисунок 2) до плоскости измерения 4, для лучей, лежащих в сагиттальной (xz) и тангенциальной (yz) плоскостях, имеют вид [5]:

$$\begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix}_{xz(yz)} = \begin{pmatrix} 1 & l_1 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -D_{xz(yz)} & 1 \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} 1 & d_{xz(yz)} \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & l_2 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3)$$

В этой формуле $D_{xz} = D \cos \theta$, $D_{yz} = D \cos^{-1} \theta$, $d_{xz} = d(n^2 - \sin^2 \theta)^{-1/2}$, $d_{yz} = dn^2(1 - \sin^2 \theta (n^2 - \sin^2 \theta)^{3/2})^{-1}$ – соответственно оптические силы ТЛ и «эффективные» толщины пластинки лазерного элемента, наклоненного под углом θ к направлению распространения излучения, для лучей, лежащих в плоскостях (xz) и (yz), а d и n – соответственно толщина пластинки и показатель преломления материала лазерного элемента. ABCD-закон распространения гауссова пучка имеет вид [5]:

$$q_2 = \frac{Aq_1 + B}{Cq_1 + D}, \quad \frac{1}{q_{1(2)}} = \frac{1}{R_{1(2)}} - i \frac{\lambda}{\pi w_{1(2)}^2}, \quad (4)$$

где $R_{1(2)}$, $w_{1(2)}$, $q_{1(2)}$ – соответственно радиус кривизны волнового фронта, радиус пятна гауссова пучка, комплексный параметр (индексы 1 и 2 соответствуют параметрам пучка на входе и на выходе рассматриваемой оптической системы). Решая уравнение (4) с использованием выражения (3) и принимая во внимание, что волновой фронт гауссова пучка на входе оптической системы (т.е. на выходе из лазера-источника зондирующего излучения) плоский, получаем формулы для измеряемых радиусов гауссова пучка:

$$(w_2)_{xz(yz)} = w_1 \sqrt{\frac{(1 - l_2 D_{xz(yz)})^2 + \left\{ \frac{\lambda}{\pi w_1^2} \left[l_2 + (l_1 + d_{xz(yz)}) (1 - l_2 D_{xz(yz)}) \right] \right\}^2}{(1 - l_2 D_{xz(yz)})^2}}. \quad (5)$$

Таким образом, радиус регистрируемого зондирующего пучка имеет различные значения

для лучей, лежащих в сагиттальной (xz) и тангенциальной (yz) плоскостях, и соотношение между этими значениями радиусов пучка зависит от угла наклона θ исследуемой пластинки лазерного элемента. На рисунке 3 приведены зависимости радиусов пучка $(w_2)_{xz}$ и $(w_2)_{yz}$ от оптической силы D ТЛ при различных углах наклона θ , полученные с помощью формулы (5) при значениях $w_1 = 0,23$ мм, $l_1 = 6$ см, $l_2 = 80$ см, $d = 1,0$ мм, $n = 2,0$, которые являются типичными для подобных измерений. Результаты этих расчетов показывают, что угол θ (т.е. угол между пучком накачки и зондирующим пучком) не должен превышать $\cong 15^\circ$, чтобы избежать влияния астигматизма наклоненной исследуемой пластинки лазерного элемента на результаты измерения оптической силы наводимой в нем ТЛ.

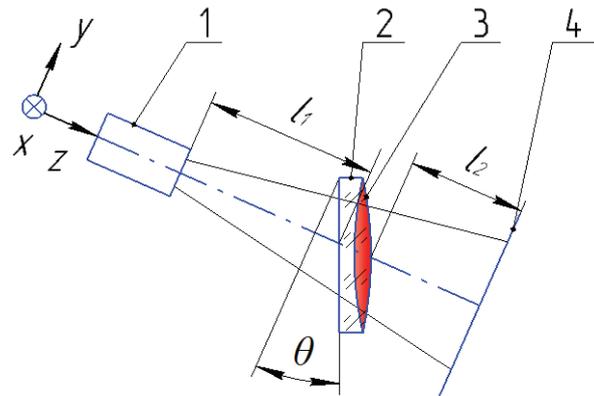


Рисунок 2 – Оптическая схема распространения зондирующего пучка через исследуемый лазерный элемент: 1 – лазерный источник зондирующего пучка; 2 – лазерный элемент с наведенной в нем термической линзой; 3 – термическая линза (ТЛ); 4 – плоскость измерения поперечного профиля зондирующего пучка; l_1 – расстояние от выходного зеркала лазера 1 до лазерного элемента; θ – угол наклона лазерного элемента по отношению к направлению распространения зондирующего пучка; l_2 – расстояние от лазерного элемента до плоскости измерения; (xyz) – декартова система координат, в которой ось z параллельна направлению распространения зондирующего пучка

Figure 2 – Optical scheme of propagation of the probe beam through the studied laser element: 1 – laser source of the probe beam; 2 – laser element with an induced thermal lens; 3 – thermal lens (TL); 4 – plane of measurements of the cross-section of the probe beam; l_1 – distance between the laser output coupler 1 and laser element, θ – angle of inclination of laser element with respect to the probe beam propagation direction; l_2 – distance between the laser element and measurement plane; (xyz) – Cartesian coordinate system, wherein axis z is parallel to the propagation direction of the probe beam

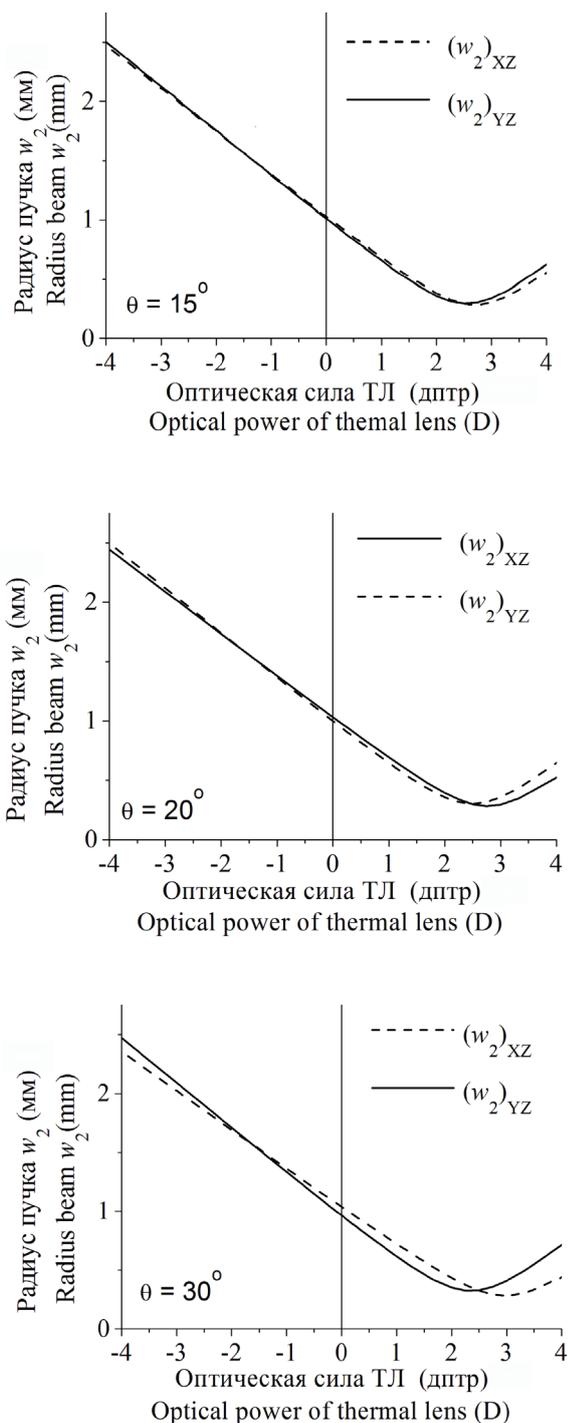


Рисунок 3 – Зависимость радиусов зондирующего пучка $(w_2)_{XZ}$ и $(w_2)_{YZ}$ от оптической силы термической линзы при различных углах наклона θ пластинки лазерного элемента, полученные с помощью формулы (5) при $w_1 = 0,23$ мм; $l_1 = 6$ см; $l_2 = 80$ см; $d = 1,0$ мм; $n = 2,0$

Figure 3 – Dependence of radii of the probe beam $(w_2)_{XZ}$ and $(w_2)_{YZ}$ on the optical power of the thermal lens for various inclination angles θ for the laser element derived with the formula (5) when $w_1 = 0,23$ мм; $l_1 = 6$ см; $l_2 = 80$ см; $d = 1,0$ мм; $n = 2,0$

Для того чтобы определить интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ лазерного элемента, необходимо знать коэффициент объемного тепловыделения η_h , см. формулу (2). Нижнюю границу для его значения можно оценить по величине квантового дефекта как $\eta_h = (1 - \lambda_p/\lambda_g)$, где λ_p – длина волны накачки; λ_g – длина волны генерации. Однако достоверно рассчитать коэффициент η_h не представляется возможным, поскольку для этого необходимо знать численные значения различных постоянных, описывающих такие процессы, как, в частности, поглощение из возбужденного состояния, перенос энергии и кросс-релаксация, совокупность которых и определяет значение коэффициента η_h для конкретного лазерного материала. Поэтому актуальной задачей является экспериментальное определение коэффициента η_h для конкретного лазерного материала.

Разработанный в настоящей работе прибор позволяет осуществлять измерение коэффициента объемного тепловыделения η_h в лазерном элементе с помощью метода лазерной калориметрии по импульсной методике [3]. Для таких измерений используется оптическая схема, приведенная на рисунке 1, в которой распространяется только пучок накачки II (лазер 1 не включен), а исследуемый лазерный элемент закрепляется на теплоизолирующем основании, препятствующем оттоку от него тепла. Дополнительно в тепловом контакте с исследуемым лазерным элементом находится термопара для измерения его температуры. Регистрируется зависимость температуры лазерного элемента от времени после включения источника накачки и после его выключения до полного восстановления начальной температуры. Значение коэффициента η_h рассчитывается по формуле [3]:

$$\eta_h = \frac{T_p(m_1c_1 + m_2c_2)}{t_p P_{abs}}, \quad (6)$$

где m_1 и c_1 – соответственно масса и удельная теплоёмкость материала лазерного элемента; m_2 и c_2 – масса и удельная теплоёмкость термопасты, с помощью которой термопара прикрепляется к лазерному элементу для обеспечения надежного с ним теплового контакта; t_p – интервал времени, в течение которого включена накачка; T_p – температура в момент времени $t = t_p/2$, определяемая путем экстраполяции кривой релаксации температуры, полученной после выключения накачки.

Устройство комплекса

В состав разработанного прибора входят: блок продольной диодной накачки, источник зондирующего лазерного излучения, узел крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента и блок регистрации зондирующего лазерного излучения. Принципиальная схема прибора приведена на рисунке 4.

Блок продольной диодной накачки обеспечивает оптическую накачку исследуемого лазерного элемента и состоит из:

- блока питания и управления лазерным диодом 5, который позволяет осуществлять изменение тока через лазерный диод, а также контролировать температуру лазерного диода и температуру лазерного элемента с точностью не хуже $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$, для чего предусмотрено подключение данного блока к двум элементам Пельтье 2, 19 и двум термисторам 3, 20;

- узла крепления лазерного диода, включающего непрерывный полупроводниковый лазерный диод 1 на основе структуры InGaAs с мощностью до 5 Вт на длине волны $0,96\text{ }\mu\text{m}$, с волоконным выводом излучения; массивное металлическое основание 4, предназначенное для отвода тепла от лазерного диода 1; элемент Пельтье 2, предназначенный для поддержания требуемой температуры лазерного диода 1; термистор 3 для контроля температуры лазерного диода, кулер 6 для охлаждения данного узла, подключенный к блоку питания 5;

- узла крепления оптического волокна 8, состоящего из SMA-разъема 9, юстировочного столика 10 и трансляционной подвижки 11;

- коллимирующей линзы 12, закрепленной в юстировочном столике 13;

- фокусирующей линзы 14, закрепленной в юстировочном столике 15, установленном на трансляционной подвижке 16.

Источник зондирующего лазерного излучения включает: твердотельный лазер 24 (выходное излучение – непрерывное, поляризация – линейная, выходная мощность – 20 мВт, длина волны выходного излучения – $0,53\text{ }\mu\text{m}$); радиатор 25 для пассивного охлаждения лазера; юстировочный столик 26; блок питания лазера 27.

Узел крепления и юстировки лазерного элемента включает: радиатор 18 для отвода тепла от лазерного элемента 17; элемент Пельтье 19, предназначенный для его охлаждения и термистор 20 для контроля его температуры; юстировочный

столик 21, позволяющий осуществлять плавную юстировку в горизонтальной и вертикальной плоскостях; кулер 22 для охлаждения данного узла, подключенный к блоку питания 5.

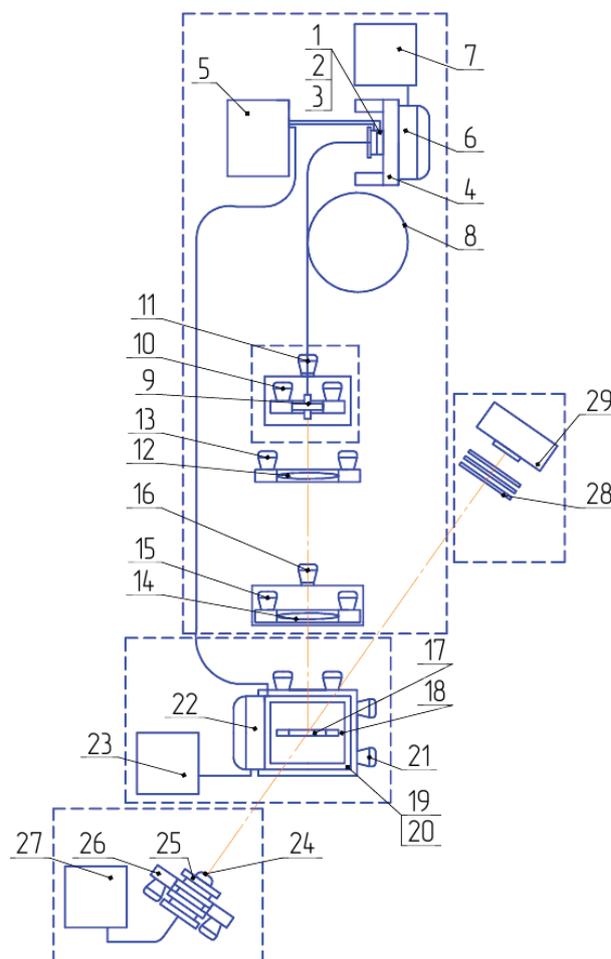


Рисунок 4 – Принципиальная схема прибора: 1 – лазерный диод; 2, 19 – элементы Пельтье; 3, 20 – термисторы; 4 – основание; 5 – блок питания; 6, 22 – кулеры; 7, 23 – блоки питания; 8 – оптическое волокно; 9 – SMA-разъем; 10, 13, 15, 26 – юстировочные столики; 11, 16 – трансляционные подвижки; 12 – коллимирующая линза; 14 – фокусирующая линза; 17 – исследуемый лазерный элемент; 18, 25 – радиаторы; 21 – узел юстировки лазерного элемента; 24 – твердотельный лазер; 27 – блок питания лазера; 28 – набор нейтральных светофильтров; 29 – ПЗС-камера

Figure 4 – Principle scheme of device: 1 – laser diode; 2, 19 – Peltier elements; 3, 20 – thermistors; 4 – base; 5 – power supply; 6, 22 – coolers; 7, 23 – power supplies; 8 – optical fiber; 9 – SMA-slot; 10, 13, 15, 26 – alignment tables; 11, 16 – translation stages; 12 – collimation lens; 14 – focusing lens; 17 – studied laser element; 18, 25 – heat sinks; 21 – alignment block of the laser element; 24 – solid-state laser; 27 – laser power supply; 28 – set of neutral filters; 29 – CCD camera

Блок регистрации зондирующего лазерного излучения предназначен для регистрации пространственного профиля пучка зондирующего лазерного излучения, прошедшего через оптически накачиваемый исследуемый лазерный элемент. Он представляет собой ПЗС-матрицу с набором нейтральных светофильтров 28 и систему передачи данных на персональный компьютер.

Все элементы прибора закреплены на массивной металлической плите, препятствующей разъюстировке комплекса в течение времени проведения измерений. Прибор содержит металлическую крышку для защиты оптических элементов от неблагоприятных внешних воздействий.

На рисунке 5 показана оригинальная схема узла крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента.

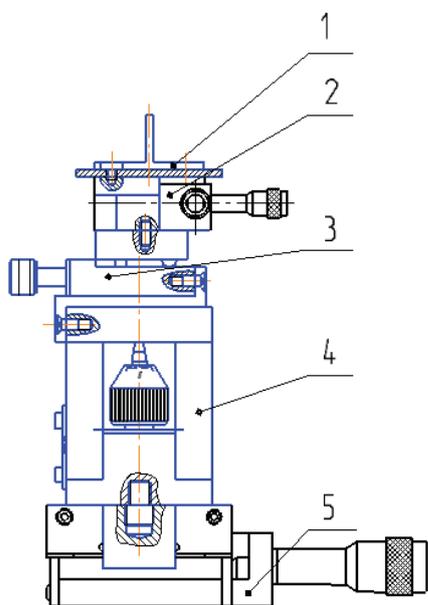


Рисунок 5 – Схема узла крепления и юстировки исследуемого лазерного элемента: 1 – крепление лазерного элемента; 2 – поворотная микроплатформа; 3 – держатель с боковой регулировкой; 4 – вертикальный транслятор; 5 – транслятор двухкоординатный

Figure 5 – Scheme of fixation and alignment block for the laser element: 1 – stage for fixing of the laser element; 2 – rotary micro-platform; 3 – holder with a side adjustment; 4 – vertical translation stage; 5 – two-axis translation stage

На рисунке 6 показана оригинальная схема узла крепления источника зондирующего лазерного излучения.

Технические характеристики разработанного прибора приведены в таблице 1.

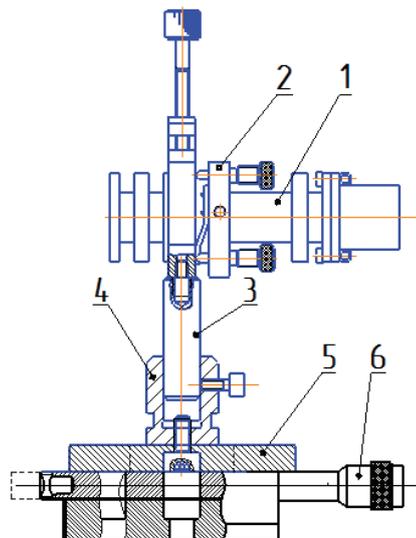


Рисунок 6 – Схема узла крепления источника зондирующего лазерного излучения: 1 – радиатор лазера; 2 – юстировочный столик; 3 – стержень; 4 – стакан; 5 – основание; 6 – трансляционная подвижка

Figure 6 – Scheme of fixation block for the source of probe laser radiation: 1 – heat sink of the laser; 2 – alignment table; 3 – bar; 4 – shell; 5 – basement; 6 – translation stage

Таблица 1 / Table 1

Технические характеристики разработанного прибора/Technical characteristics of the developed device

Рабочая длина волны Operating wavelength	0,53 мкм 0,53 μm
Поляризация света Light polarization	линейная Linear
Тип накачки Type of pumping	продольная диодная longitudinal diode
Длина волны накачки Pump wavelength	0,96 мкм 0,96 μm
Радиус пучка накачки в активном элементе, $w_{\text{нак}}$ Radius of the pump beam in the active element w_{pump}	0,1–1 мм 0,1 – 1 mm
Мощность накачки, $P_{\text{нак}}$ Pump power, P_{pump}	до 5 Вт up to 5 W
Точность определения М-фактора Precision of determination of M-factor	0,1 м ¹ /Вт 0,1 m ¹ /W
Точность определения степени астигматизма S Precision of determination of the astigmatism degree S	0,2 м ¹ /Вт 0,2 m ¹ /W
Точность определения вклада фотоупругого эффекта Precision of determination of the impact of photoelastic effect	$0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ $0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$
Точность определения коэффициента тепловыделения Precision of determination of the fractional heat load	0,05 0,05

Результаты измерений

С помощью разработанного прибора были проведены исследования параметров ТЛ в лазерном элементе на основе кристалла иттриевого ванадата YVO_4 , активированного ионами Er^{3+} (0,7 ат.%) и Yb^{3+} (3 ат.%). Кристалл $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ в настоящее время широко используется в лазерных системах, генерирующих условно безопасное для органов зрения излучение с длиной волны в области 1,5–1,7 мкм [6]. Такие лазеры находят применение, в частности, в дальнометрии, зондировании атмосферы, воздушной навигации, медицине.

Иттриевый ванадат YVO_4 является тетрагональным кристаллом (параметры его кристаллической решетки: $a = b = 7,1183 \text{ \AA}$, $c = 6,2893 \text{ \AA}$ [6]), что обуславливает анизотропию его оптических свойств: кристалл является оптически одноосным, его оптическая ось параллельна кристаллографической оси [001] (оси c). Исследования параметров ТЛ проводились для пластинки лазерного элемента из кристалла $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, вырезанного таким образом, что направление распространения излучения было параллельно кристаллографической оси [100] (оси a). При этом вектор напряженности электрического поля линейно поляризованного зондирующего излучения был перпендикулярен кристаллографической оси [001] (оси c). Данная поляризация соответствует наибольшим поперечным сечениям вынужденного испускания в кристалле $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ [6].

Пластинка лазерного элемента, имевшая толщину 1 мм и поперечные размеры 5×5 мм, закреплялась в медном радиаторе, температура которого поддерживалась на уровне 14°C при помощи элемента Пельтье. Для улучшения теплового контакта между радиатором и лазерным элементом находилась теплопроводящая паста. Пластинка лазерного элемента ориентировался таким образом, что кристаллографическая ось [001] (ось c) находилась в сагиттальной (xz), а кристаллографическая ось [100] (a) – в тангенциальной (yz) плоскостях (рисунок 7). Радиусы пучка накачки и зондирующего пучка в области их перекрытия в лазерном элементе составляли соответственно 0,60 мм и 0,24 мм. Радиус зондирующего пучка w_1 , расстояния l_1 и l_2 (рисунок 7) составляли соответственно 0,23 мм, 6 см и 52 см.

На рисунке 7 показана зависимость радиуса зондирующего пучка w_2 , прошедшего через лазерный элемент, от поглощенной мощности накачки P_{abs} . Увеличение мощности P_{abs} приводит к сжатию

пучка зондирующего излучения (уменьшению w_2), что свидетельствует о положительной (фокусирующей) ТЛ лазерного элемента. При этом сагиттальная (xz) и тангенциальная (yz) плоскости соответствуют главным меридиональным плоскостям его ТЛ.

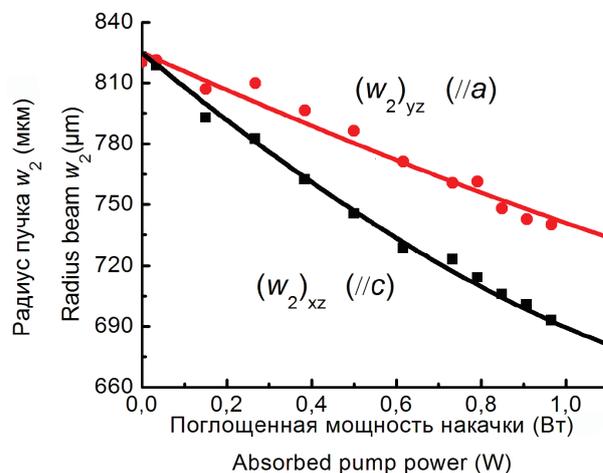


Рисунок 7 – Зависимость радиуса пучка зондирующего излучения, прошедшего через лазерный элемент из $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$, от поглощенной мощности накачки для поляризации света $E \perp [001]$ (c). Точки – эксперимент, линии – расчет по формуле (5)

Figure 7 – Dependence of radius of the probe radiation passed through the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser element on the absorbed pump power for light polarization $E \perp [001]$ (c). Points – experimental data, lines – modeling with Eq.(5)

На рисунке 8 показана зависимость оптической силы ТЛ в лазерном элементе из кристалла $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ от поглощенной мощности накачки. В соответствии с формулой (1) данная зависимость описывается прямой линией, выходящей из начала координат. По тангенсу наклона прямых, проведенных через экспериментальные точки на рисунке 8 с помощью метода наименьших квадратов, рассчитаны коэффициенты чувствительности ТЛ к изменению поглощенной мощности накачки, которые составили $M_{yz} = (0,9 \pm 0,1) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$ и $M_{xz} = (1,3 \pm 0,1) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$. Соответственно, степень астигматизма ТЛ составляет $S = |M_A - M_B| = (0,4 \pm 0,2) \text{ м}^{-1}/\text{Вт}$.

Для измерения коэффициента объемного тепловыделения η_h в исследуемом лазерном материале вначале накачка включалась на промежуток времени $t_p = 120$ с, в течение которого регистрировалась температура лазерного элемента. Затем накачка отключалась и измерение температуры продолжались в течение 200 с. Данные по зависимости температуры от времени при такой проце-

дуре измерения «включение-отключение» накачки представлены на рисунке 9. Температура T_p в момент времени $t = t_p/2$ (формула (6) и пояснения к ней) составила 75°C . Поглощенная мощность накачки составляла $P_{abs} = 0,3$ Вт. Значение коэффициента η_h , рассчитанное по формуле (6), составило $\eta_h = 0,63 \pm 0,05$.

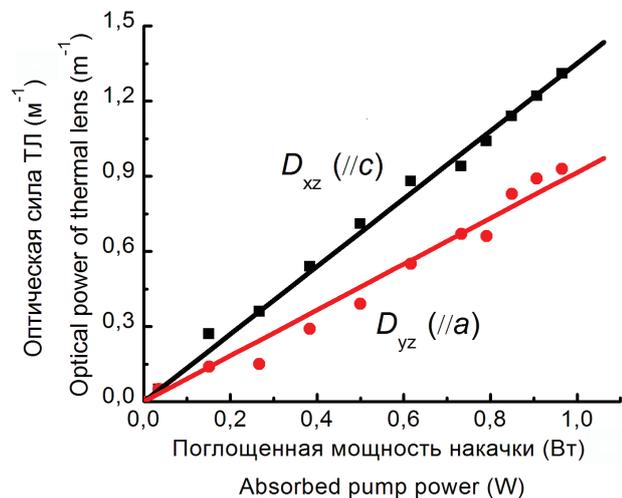


Рисунок 8 – Зависимость оптической силы термической линзы для лазерного элемента из $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ от поглощенной мощности накачки для поляризации света $E \perp [001]$ (с). Точки – экспериментальные данные, линии – моделирование линейной зависимостью в соответствии с формулой (1)

Figure 8 – Optical (refractive) power of the thermal lens vs. the absorbed pump power for the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ crystal for light polarization $E \perp [001]$ (c). Points – experimental data, lines – linear fitting in accordance with Eq. (1)

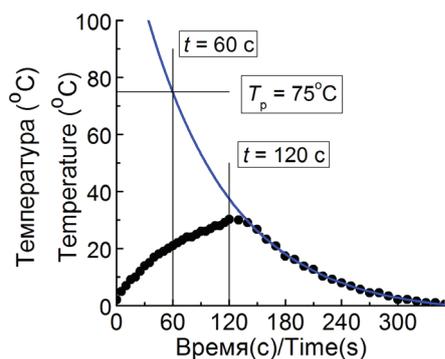


Рисунок 9 – Зависимость температуры кристалла $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ от времени: время $t = 0$ соответствует моменту включения накачки, $t = 120$ с – отключению накачки

Figure 9 – Dependence of temperature of the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ crystal on time: time $t = 0$ corresponds to the moment when the pump is switched on, $t = 120$ s corresponds to the moment when the pump is switched off

При расчете использовались следующие значения констант, входящих в данную формулу: $m_1 = 0,48$ г; $c_1 = 0,59$ Дж/г · С (для кристалла лазерного элемента); $m_2 = 5,0$ мг; $c_2 = 0,89$ Дж/г · С (для теплопроводящей пасты). Полученное значение коэффициента $\eta_h = 0,63$ превышает значение, которое дает расчет по квантовому дефекту (см. раздел «Методика измерения» настоящей статьи): $\eta_h = (1 - \lambda_p/\lambda_g) = (\lambda_c - 0,96 \text{ мкм}/1,54 \text{ мкм}) = 0,38$. Это свидетельствует о том, что для кристалла $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ поглощение из возбужденного состояния и кросс-релаксационные процессы вносят существенный вклад в безызлучательную релаксацию энергии возбуждения.

Вклад фотоупругого эффекта X_{PHE} в ТЛ лазерного элемента определялся по формуле (2) с использованием полученных в данной работе значений коэффициентов чувствительности (M_{yz} и M_{xz}) и коэффициента объемного тепловыделения (η_h), а также известных в литературе для кристалла иттриевого ванадата значений dn/dT , «эффективного» коэффициента теплопроводности $k = (k_o + k_c)/2 = 10,5$ Вт/(м·К) и вклада искажений торцов лазерного элемента Y_{DIST} в ТЛ [7, 8]. Результаты вычислений приведены в таблице 2.

Таблица 2 / Table 2

Вклад различных эффектов* в формирование термической линзы в кристалле $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ для поляризации света $E \perp c$

Contribution of different effects to the formation of thermal lens in the $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ crystal for light polarization $E \perp c$

Меридиональная плоскость Meridional plane	dn/dT	X_{PHE}	Y_{DIST}	Δ
(xz), c	13,8	10,6	2,7	27,1
(yz), a	13,8	2,0	3,0	18,8

* Δ – «обобщенный» термо-оптический коэффициент; dn/dT – вклад температурной зависимости показателя преломления; X_{PHE} – вклад фотоупругого эффекта; Y_{DIST} – вклад искажения торцов активного элемента. Значения всех величин приведены в 10^{-6} K^{-1}

* Δ – «generalized» thermo-optic coefficient, dn/dT – contribution of temperature dependence of the refractive index, X_{PHE} – contribution of the photoelastic effect, Y_{DIST} – contribution of distortion of endfaces of the active element. All values are in 10^{-6} K^{-1}

Вклад фотоупругого эффекта X_{PHE} в ТЛ является положительным и существенно зависит от выбранной меридиональной плоскости, что обуславливает достаточно заметный астигматизм ТЛ.

Заключение

Разработан прибор для измерения параметров ТЛ в лазерных активных элементах при продольной диодной накачке. Измерения основаны на методе пробного пучка. Прибор позволяет определять знак и оптическую силу ТЛ в главных меридиональных плоскостях, коэффициент чувствительности к изменению поглощенной мощности накачки и степень астигматизма, коэффициент тепловыделения в лазерном материале, что позволяет оценивать интегральный вклад фотоупругого эффекта в ТЛ, наведенную в лазерном элементе. Измерения проводятся в линейно поляризованном свете на длине волны 0,53 мкм. Накачка активного элемента осуществляется на длине волны 0,96 мкм, что позволяет исследовать лазерные среды, активированные и соактивированные ионами иттербия. Точность определения коэффициента чувствительности ТЛ к мощности накачки – 0,1 м⁻¹/Вт; степени астигматизма ТЛ – 0,2 м⁻¹/Вт; определения коэффициента тепловыделения – 5 %; вклада фотоупругого эффекта в ТЛ – 0,5 × 10⁻⁶ К⁻¹. С помощью данного прибора проведены измерения ТЛ в лазерном активном элементе из кристалла иттриевого ванадата Er³⁺, Yb³⁺:YVO₄, ориентированного вдоль кристаллографической оси [100] (оси *a*) для поляризации света $E \perp c$. Определены коэффициенты чувствительности ТЛ к изменению поглощенной мощности накачки ($M_{yz} = 0,9$ м⁻¹/Вт, $M_{xz} = 1,31$ м⁻¹/Вт), степень астигматизма термической линзы (0,4 м⁻¹/Вт), коэффициент тепловыделения в лазерном материале ($\eta_h = 0,63$), вклад фотоупругого эффекта в ТЛ [$(X_{PHE})_{xz} = 10,6 \times 10^{-6}$ К⁻¹, $(X_{PHE})_{yz} = 2,0 \times 10^{-6}$ К⁻¹].

Благодарности

Данные исследования выполнены при финансовой поддержке ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований» (подпрограмма «Научно-учебное оборудование», задание № 21), а также гранта Президента Республики Беларусь в науке, образовании, здравоохранении, культуре на 2015 год, предоставленного одному из авторов (К.В. Юмашев).

Список использованных источников

1. *Chenais, S.* On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials / S. Chenais [et al.] // Progress in Quant. Electr. – 2006. – Vol. 30. – P. 89–153.
2. *Loiko, P.A.* Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO₄ laser crystal / P. Loiko [et al.] // Opt. Mater. Express. – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 2241–2249.
3. *Willamowski, U.* Measuring the absolute absorptance of optical laser components / U. Willamowski, D. Ristau, E. Welsh // Appl. Opt. – 1998. – Vol. 37. – P. 8362–8370.
4. *Loiko, P.A.* Anisotropy of the photo-elastic effect in Nd:KGd(WO₄)₂ laser crystals / P.A. Loiko [et al.] // Laser Phys. Lett. – 2014. – Vol. 11. – P. 055002-1–7.
5. *Hodgson, N.* Optical resonators: fundamentals, advanced concepts and applications / N. Hodgson, H. Weber // Springer. – 1997.
6. *Tolstik, N.A.* Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er³⁺, Yb³⁺:YVO₄ crystal / N.A. Tolstik [et al.] // Appl. Phys. B. – 2006. – Vol. 86, No. 2. – P. 275–278.
7. *Loiko, P.A.* Dispersion and anisotropy of thermo-optic coefficients in tetragonal GdVO₄ and YVO₄ laser host crystals: Errata / P.A. Loiko [et al.] // Appl. Opt. – 2015. – Vol. 54, No. 15. – P. 4820–4822.
8. *Yumashev, K.V.* Thermal stresses and end-bulging in the laser disc from a tetragonal [100]-cut crystal / K.V. Yumashev, P.A. Loiko // Laser Physics. – 2015. – Vol. 25, No. 1. – P. 015003-1–9.

Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements with a probe beam method

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.

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

Received 21.09.2015

Accepted for publication 03.11.2015

Abstract. We have developed a device for measuring of parameters of thermal lens (TL) in laser active elements under longitudinal diode pumping. The measurements are based on the probe beam method. This device allows one to determine sign and optical power of the lens in the principal meridional planes, its sensitivity factor with respect to the absorbed pump power and astigmatism degree, fractional heat loading which make it possible to estimate integral impact of the photoelastic effect to the formation of TL in the laser element. The measurements are performed in a linearly polarized light at the wavelength of 532 nm. Pumping of the laser element is performed at 960 nm that makes it possible to study laser materials doped with Yb^{3+} and (Er^{3+} , Yb^{3+}) ions. The precision of measurements: for sensitivity factor of TL – $0,1 \text{ m}^{-1}/\text{W}$, for astigmatism degree – $0,2 \text{ m}^{-1}/\text{W}$, for fractional heat loading – 5 %, for the impact of the photoelastic effect – $0,5 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$. This device is used for characterization of thermal lens in the laser active element from an yttrium vanadate crystal, $\text{Er}^{3+}, \text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$.

Keywords: thermal lensing, laser active materials, longitudinal diode-pumping, yttrium vanadate crystal.

Адрес для переписки:

Юмашев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: kyumashev@bntu.by

Address for correspondence:

Yumashev K.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: kyumashev@bntu.by

Для цитирования:

Захарова А.Н., Лойко П.А., Мальяревич А.М., Юмашев К.В.
Прибор для измерения параметров термической линзы в лазерных
активных элементах методом пробного пучка
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 127–138

For citation:

Zakharova A.N., Loiko P.A., Malyarevich A.M., Yumashev K.V.
Device for measuring of thermal lens parameters in laser active elements
with a probe beam method
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 127–138

Acknowledgments

This study was supported by Belarusian State Scientific and Technical Program «Development and Manufacturing of Etalons, Unique Devices and Set-ups for Scientific Research» (subprogram «Etalons and Scientific Devices», project No. 21) and grant from the President of Republic of Belarus in science, education, public health and culture for the year of 2015 which was awarded to one of the authors (K.V. Yumashev).

References

1. Chenais, S. On thermal effects in solid-state lasers: The case of ytterbium-doped materials / S. Chenais [et al.] // *Progress in Quant. Electr.* – 2006. – Vol. 30. – P. 89–153.
2. Loiko, P.A. Thermo-optic characterization of Yb:CaGdAlO₄ laser crystal / P. Loiko [et al.] // *Opt. Mater. Express.* – 2014. – Vol. 4, No. 11. – P. 2241–2249.
3. Willamowski, U., Measuring the absolute absorptance of optical laser components / U. Willamowski, D. Ristau, E. Welsh // *Appl. Opt.* – 1998. – Vol. 37. – P. 8362–8370.
4. Loiko, P.A. Anisotropy of the photo-elastic effect in Nd:KGd(WO₄)₂ laser crystals / P.A. Loiko [et al.] // *Laser Phys. Lett.* – 2014. – Vol. 11. – P. 055002-1–7.
5. Hodgson, N. Optical resonators: fundamentals, advanced concepts and applications / N. Hodgson, H. Weber // *Springer.* – 1997.
6. Tolstik, N.A. Spectroscopy, continuous-wave and Q-switched diode-pumped laser operation of Er³⁺, Yb³⁺:YVO₄ crystal / N.A. Tolstik [et al.] // *Appl. Phys. B.* – 2006. – Vol. 86, No. 2. – P. 275–278.
7. Loiko, P.A. Dispersion and anisotropy of thermo-optic coefficients in tetragonal GdVO₄ and YVO₄ laser host crystals: Errata / P.A. Loiko [et al.] // *Appl. Opt.* – 2015. – Vol. 54, No. 15. – P. 4820–4822.
8. Yumashev, K.V. Thermal stresses and end-bulging in the laser disc from a tetragonal [100]-cut crystal / K.V. Yumashev, P.A. Loiko // *Laser Physics.* – 2015. – Vol. 25, No. 1. – P. 015003-1–9.

УДК 533.9.08; 539.216

Система контроля расхода газов для применения в технологии реактивного магнетронного распыления

Климович И.М., Кулешов В.Н., Зайков В.А., Бурмаков А.П., Комаров Ф.Ф., Людчик О.Р.

Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь

Поступила 14.01.2015

Принята к печати 15.09.2015

Неустойчивость параметров разряда и химического состава потоков частиц, поступающих на подложку, в переходных режимах реактивного магнетронного распыления приводит к невозможности воспроизводимости состава покрытий от процесса к процессу. Целью настоящей работы являлась разработка системы контроля расхода газа, позволяющая стационарно поддерживать неравновесное состояние магнетронного разряда в переходных режимах осаждения с неустойчивым химическим состоянием поверхности мишени. В качестве параметров контроля предложено использовать интенсивности элементов эмиссионного спектра разряда. Для регистрации интенсивностей спектральных элементов (спектральные линии и полосы химических элементов, присутствующих в разряде) применяли фотодиодные датчики. Система контроля расхода газа автоматически регулирует подачу аргона и реактивного газа, используя сигналы обратной связи с оптических датчиков интенсивности спектральных элементов разряда, вакуумметра, датчиков ионного тока, разрядного тока и напряжения. В качестве примера использования системы рассмотрен процесс реактивного магнетронного нанесения покрытий Ti-Al-N. В ходе распыления составной мишени на основе Ti с цилиндрическими Al вставками контролировались следующие параметры разряда: ток, напряжение, суммарное давление смеси аргон – реактивный газ, температура подложки, напряжение и ток смещения на подложке. Напуск азота контролировался по интенсивности спектральной линии титана TiI 506,5 нм, величина интенсивности которой связана со степенью реактивности. Элементный состав и структура сформированных покрытий Ti-Al-N исследовались с помощью резерфордского обратного рассеяния, растровой электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. Установлено, что в осажденных покрытиях Ti-Al-N стехиометрического состава столбчатая микроструктура переходит в лобулярную микроструктуру, с повышенной твердостью и низким коэффициентом трения покрытия. Таким образом, показано, что система контроля расхода газа позволяет контролировать стехиометрию состава и физические свойства осаждаемого покрытия.

Ключевые слова: реактивное магнетронное распыление, система управления расходом газов, Ti-Al-N, резерфордское обратное рассеяние, рентгеноструктурный анализ.

Адрес для переписки:

Климович И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: imklimovich@gmail.com

Address for correspondence:

Klimovich I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave, 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: imklimovich@gmail.com

Для цитирования:

Климович И.М., Кулешов В.Н., Зайков В.А., Бурмаков А.П.,
Комаров Ф.Ф., Людчик О.Р.
Система контроля расхода газов для применения в технологии
реактивного магнетронного распыления
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147

For citation:

Klimovich I.M., Kuleshov V.N., Zaikou V.A., Burmakou A.P.,
Komarov F.F., Ludchik O.R.
Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 139–147

Введение

В настоящее время магнетронное распыление является одним из основных широко распространенных вакуумных методов нанесения тонкопленочных покрытий. Разработка новых технологий магнетронного распыления стимулируется в основном требованиями новых сфер применения, где возникает острая необходимость в высококачественных покрытиях, а также возрастающими требованиями к промышленному нанесению покрытий, такими как: высокая производительность, широкие функциональные и технологические возможности установок для нанесения покрытий [1–5].

В процессе реактивного магнетронного распыления система мишень-плазма-пленка находится в состоянии неустойчивого равновесия [1, 6, 7]. Устойчивые состояния возможны только в двух предельных случаях: «металлическая мода» – металлическое состояние поверхности мишени при малом расходе реактивного газа; «реактивная мода» – поверхность мишени является химическим соединением распыляемого металла и реактивного газа. В режимах металлической или реактивной моды покрытия являются нестехиометрическими с невоспроизводимыми свойствами. Как правило, оптимальные физические свойства покрытий реализуются для близкого к стехиометрическому составу покрытия [2–5]. Указанная неустойчивость реактивного магнетронного распыления возникает вследствие конкуренции процессов распыления поверхности мишени ионами и химическими реакциями между металлической мишенью и реактивным газом. Это, в свою очередь, приводит к гистерезисному поведению и неконтролируемым переходам между металлическими и реактивными модами процесса, особенно в диапазоне давлений реактивного газа, при котором формируется стехиометрическое покрытие [6–8].

Следовательно, для получения покрытий стехиометрического состава необходимо стационарно поддерживать мишень магнетрона в промежуточном состоянии между металлической и реактивной модами, контролируя расход реактивного газа в режиме реального времени.

Используют несколько способов контроля процесса реактивного магнетронного распыления (с помощью управления вольтамперными характеристиками разряда, дифференцированной подачей газа и скоростью откачки), однако они не гарантируют стабилизации процесса и воспроизводимости состава покрытий [6, 7].

В данной работе предлагается система контроля расхода газа, позволяющая стационарно поддерживать неравновесное состояние магнетронного разряда в среде аргон–реактивный газ и, следовательно, повысить воспроизводимость и производительность нанесения покрытий с помощью методов реактивного магнетронного распыления. На примере формирования Ti-Al-N покрытий показаны преимущества использования разработанной системы контроля расходом газов.

Система контроля расхода газов

Высокая производительность и воспроизводимость свойств пленочных покрытий сложного состава, формируемых вакуумно-плазменными технологиями, может быть достигнута с помощью системы контроля расходом газов. В технологиях ионно-плазменного (магнетронного) нанесения покрытий сложного химического состава целесообразным является использование оптических алгоритмов управления для поддержания заданного соотношения потоков распыленных частиц и реактивного газа на подложке, что обеспечивает необходимую стехиометрию состава покрытия [6]. Предлагаемый алгоритм сводится к регистрации интенсивности одного или нескольких контрольных элементов (спектральная линия, молекулярная полоса) эмиссионного спектра разряда и выработке сигналов, контролирующих расход газов. С целью реализации указанных алгоритмов нами разработана система, адаптируемая к широкому кругу технологических установок. Структурная схема системы представлена на рисунке 1.

Система состоит из аналоговых датчиков (Д/С), блока аналогово-цифрового преобразования (АЦП/ADC), блока управления натекателями (БУН/GFC), управляемых натекателей и клапанов (Н/В), ПЗС-спектрометра, компьютера с управляющим программным обеспечением. К блоку АЦП можно подключить до трех аналоговых датчиков. БУН имеет пять выходов, к каждому из которых можно подключить натекатель или клапан. Для случая большего числа аналоговых датчиков и исполнительных устройств используется несколько блоков АЦП и БУН в системе соответственно. Подключение ПЗС-спектрометра к компьютеру осуществляется через интерфейс *USB*. Обмен информацией между компьютером, блоками АЦП и БУН происходит посредством высоконадежной шины *CAN*, использование которой делает возможным расположение данных блоков в непосред-

ственной близости к датчикам и исполнительным устройствам, которые могут находиться на значительном удалении от компьютера. В целях помехозащищенности входы АЦП и выходы БУН гальванически изолированы от шины CAN.

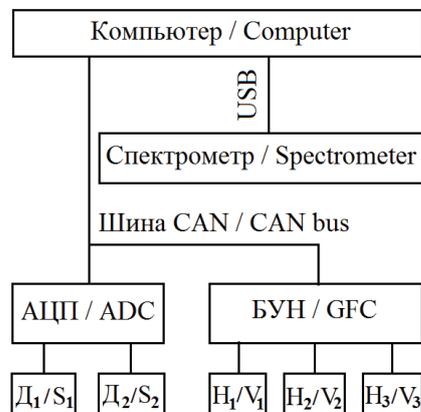


Рисунок 1 – Структурная схема системы контроля расхода газов: Д – аналоговые датчики; АЦП – блок аналогово-цифрового преобразования; БУН – блок управления натекателями; Н – управляемые натекатели и клапаны

Figure 1 – Schematic drawing of the gas flow control system: S – analog sensors; ADC – analog-to-digital conversion; GFC – gas flow controller; V – valves

Датчиками системы могут выступать: вакуумметры или датчики давления, оптические датчики интенсивности спектральных элементов разряда, а также датчики ионного и разрядного тока и напряжения распылителей. Исполнительными устройствами являются натекатели газов, регулирующие расход каждого рабочего газа и формирующие требуемую смесь газов, а также клапаны, коммутирующие газовую смесь на распылители. В системе возможно использование как вибронатекателей, так и пьезоэлектрических натекателей.

В качестве оптических датчиков интенсивности спектральных элементов разряда могут использоваться аналоговые фотодиодные датчики со встроенными светофильтрами, выделяющими необходимый диапазон длин волн излучения. Для регистрации интенсивности каждого спектрального элемента используется по одному фотодиодному датчику. Альтернативой является использование многоканального регистратора оптических спектров (ПЗС-спектрометра). В данном случае спектральные элементы задаются как диапазоны длин волн в регистрируемых спектрах при настройке программного обеспечения системы. Кроме того, использование ПЗС-спектрометра по-

зволяет контролировать нежелательные газовые примеси (воздух, пары воды и масла) в вакуумной камере [7]. Наличие ПЗС-спектрометра в составе системы, наличие и количество фотодиодных датчиков определяется требованиями к проводимым процессам.

В технологии реактивного магнетронного распыления, как правило, перед операцией нанесения покрытий проводят процесс ионной очистки [2, 4]. Поэтому в предлагаемой системе реализована возможность контроля расходов газов для процессов ионной очистки. Системой обеспечивается постоянство давления в вакуумной камере при ионной очистке и постоянство давления и состава смеси инертного и реактивного газов при магнетронном нанесении покрытий.

Управление исполнительными устройствами осуществляется по алгоритмам, зависящим от количества ионных источников и распылителей, последовательности их работы, состава и структуры покрытий. Расчет управляющих воздействий производится программным обеспечением системы, которое позволяет обеспечить стабильность состава осаждаемого потока не хуже 3 % даже для случая разветвленных газовых систем подачи рабочих газов в зону разряда. Управление программным обеспечением системы производится через графический интерфейс, а также с использованием протоколов обмена со сторонним программным обеспечением, которое может быть установлено как на компьютере системы, так и взаимодействовать с ним через интерфейсы RS-232 и Ethernet.

Система испытана в ионно-плазменных процессах при формировании стехиометрических оксидов титана, кремния, индия, циркония, меди, карбонитридов титана и циркония, оксинитридов титана и др., а также при формировании пленок с изменяющимся по толщине составом. Для примера рассмотрим возможности системы контроля над расходом газов при формировании бинарного нитрида Ti-Al-N реактивным магнетронным распылением.

Методика формирования Ti-Al-N покрытий

Покрытия на основе бинарных нитридов переходных металлов (Ti-Al-N, Ti-Cr-N, Ti-Si-N и др.) являются привлекательными для многих приложений промышленности благодаря их низкому коэффициенту трения, повышенной твердости, термостойкости, а также стойкости к окислению,

что значительно увеличивает срок эксплуатации изделий [2–3]. Хотя большинство выполненных до сих пор работ по нанесению Ti-Al-N покрытий осуществлялось методом катодно-дугового осаждения [3–5], из-за невозможности устранения капельной фракции обеспечить высокую гомогенность поверхности этим методом не удастся. В связи с этим получение покрытий Ti-Al-N методом реактивного распыления является актуальной задачей.

Нанесение покрытий Ti-Al-N методом реактивного распыления производилось на модернизированной установке УВН-2М, оснащенной магнетронным распылителем, ионным источником типа «Радикал», системой нагрева подложек, системой подачи смещения на подложку и системой контроля расхода газов. Контролировались следующие параметры разряда: ток, напряжение, суммарное давление смеси аргон–реактивный газ, температура подложки, напряжение и ток смещения на подложку.

Откачка вакуумной камеры, оснащенной азотной ловушкой, производилась с помощью диффузионного паромасляного и форвакуумного наносов. Вакуумная система позволяла получать предельное остаточное давление $9,0 \cdot 10^{-4}$ Па.

Непосредственно перед напылением производилась ионная очистка подложек с помощью ионного источника «Радикал». Режим работы ионного источника задавался следующими параметрами: давление аргона $P = 6,0 \cdot 10^{-2}$ Па; ток разряда $I = 20$ мА; напряжение разряда $U = 2,4$ кВ; время очистки $t = 5$ мин. Давление аргона автоматически поддерживалось на заданном уровне с помощью блока управления натекателем системы контроля расхода газов. Выбор параметров разряда и времени очистки обусловлен стабильным горением разряда, а также удалением адсорбированного слоя и частичным распылением подложки, что значительно увеличивает адгезию покрытий.

Процесс распыления проводили с использованием составной мишени на основе Ti (110 мм) с цилиндрическими Al вставками (6 мм), расположенными по среднему диаметру зоны эрозии (67 мм). Расстояние мишень–подложка выбиралось равным 80 мм. Мощность разряда поддерживалась постоянной и задавалась в диапазоне 400–600 Вт.

В качестве датчика расхода аргона использовалась вакуумная лампа ПМИ-51 и вакуумметр ВИТ-3. Контроль над расходом аргона осуществляется с помощью обратной связи между выходным

сигналом вакуумметра и сигналом на натекатель аргона, что позволяет поддерживать в вакуумной камере требуемую величину суммарного давления смеси газов аргон–азот. Для контроля над расходом азота использовалась зависимость характеристик спектра оптического излучения разряда от содержания азота в вакуумной камере. В настоящей работе использовался одноканальный алгоритм контроля расхода газов, который сводится к регистрации и поддержанию на заданном уровне интенсивности одного контрольного спектрального элемента. В качестве параметра контроля использовалась линия титана TiI 506,5 нм, величина интенсивности которой связана со степенью реактивности α . Степень реактивности процесса является основным параметром, определяющим состав и, как следствие, структуру и свойства покрытий Ti-Al-N. Степень реактивности α определялась из спектроскопических характеристик разряда по формуле [6]:

$$\alpha = \frac{I_0 - I}{I_0 - I^*},$$

где I_0 – интенсивность атомной линии металла мишени ($\lambda = 506,5$ нм); I – текущая величина интенсивности линии титана при нанесении покрытия; I^* – интенсивность линии металла для полностью азотированной мишени.

Режимы реактивного магнетронного нанесения: давление $P = 7,0 \cdot 10^{-2}$ Па; напряжение на источнике питания $U = 300$ – 320 В; ток разряда $I = 1,3$ – $1,75$ А; смещение на подложке $U = -90$ В; температура подложки $T = 450$ °С. Время напыления выбиралось в соответствии с предъявляемыми требованиями к толщине покрытия. Некоторые пленки требовали напыления подслоя TiAl для улучшения адгезионных качеств покрытия.

Исследование структуры, состава и свойств полученных покрытий

Элементный состав сформированных пленочных структур исследовался с помощью резерфордовского обратного рассеяния (РОР) с использованием ускоренных ионов гелия с энергией 1,2 МэВ на ускорительном комплексе AN-2500 фирмы «HVEE». Обработка спектров РОР выполнялась с использованием программных комплексов «HEAD» и «SIMNRA». Энергетическому спектру РОР регистрируемых частиц можно однозначно сопоставить шкалу глубин,

которая позволяет оценить толщину покрытия. В таблице приведены глубина покрытия в атомных монослоях, а также количественные соотношения элементов в покрытии Ti-Al-N, полученных при различных степенях реактивности α . Для расчета реальной толщины пленки необходимо полученное из спектров РОР значение глубины в атомных

монослоях разделить на атомную плотность покрытия.

В литературе отсутствуют достоверные данные по атомной плотности Ti-Al-N покрытий. Для оценочных расчетов, дающих нижнюю границу, можно использовать значение атомной плотности нитрида титана равное $5,3 \cdot 10^{22}$ ат/см³.

Таблица / Table

Количественные соотношения элементов в покрытии при нанесении в режимах с различными степенями реактивности α

The quantitative ratio of the elements in the coating under varying value of reactivity α

α	Глубина / Depth, 10^{-15} ат/см ²	Ti, %	Al, %	N, %	O, %	Al/Ti	N/(Al+Ti)
0,53	320	35	18	11	36	0,51	0,21
	3000	35	18	47	0	0,51	0,89
0,58	350	33	17	11	39	0,52	0,22
	2850	33	17	50	0	0,52	1,0
0,65	400	29	17	10	40	0,59	0,22
	2650	29	17	54	0	0,59	1,17

Из таблицы следует, что кислород присутствует только в поверхностном слое. Так как толщина окисла достаточно мала (≈ 30 нм), можно сделать вывод о том, что поверхность пленки окисляется под воздействием окружающей среды после выгрузки образцов из вакуумной камеры. Толщина покрытий измерялась с помощью растрового электронного микроскопа марки Hitachi S-4800 на сколах образцов и составляла 680–720 нм. Скорость напыления пленок Ti-Al-N при различном содержании азота в смеси рабочих газов отличается и составляет: для $\alpha = 0,65$ (избыток азота) – 67,6 нм/мин; для $\alpha = 0,58$ (стехиометрия) – 70 нм/мин и для $\alpha = 0,53$ (дефицит азота) – 72 нм/мин.

На рисунке 2 представлены микрофотографии сечений покрытий Ti-Al-N. Для пленок с избытком (степень реактивности $\alpha = 0,65$) и дефицитом азота ($\alpha = 0,53$) характерна столбчатая структура. В покрытиях стехиометрического состава ($\alpha = 0,58$) столбчатая микроструктура переходит в глобулярную микроструктуру. Превращение столбчатой микроструктуры в глобулярную объясняется в литературе [9] наличием в системе двух фаз (в случае пленки с глобулярной структурой формируется двухфазная пленка из смеси зерен TiN с ГЦК структурой и AlN с гексагональной решеткой типа вюр-

цита) или зерен с различной ориентацией [9, 10].

Фазовый состав Ti-Al-N покрытий исследовался с помощью рентгеноструктурного анализа с использованием установки, оборудованной Cu-K α источником излучения с длиной волны 1,5406 Å. Интерпретация рентгеновских дифрактограмм проводилась с использованием базы межплоскостных расстояний ASTM (American Society for Testing and Materials).

На рисунке 3 приведены фрагменты рентгеновских дифрактограмм, снятых с поверхности покрытий Ti-Al-N различной морфологии и состава, полученных при нанесении с различными степенями реактивности ($\alpha = 0,58$ и $\alpha = 0,65$). В обоих случаях на рентгенограмме присутствуют фазы ГЦК (111) TiN и TiAlN, а в покрытии стехиометрического состава появляется фаза (200) ГЦК TiN, что согласуется с образованием глобулярной структуры покрытия по данным литературы [9, 10].

Из рисунка 3 видно, что пики интенсивности смещаются вправо с увеличением количества азота в процессе напыления (т.е. с увеличением степени реактивности). В работе [10] такое поведение рентгеновского дифракционного спектра объясняется наличием сжимающих напряжений, а авторы работы [11] соотносят смещение пиков с увеличением содержания алюминия в составе покрытия.

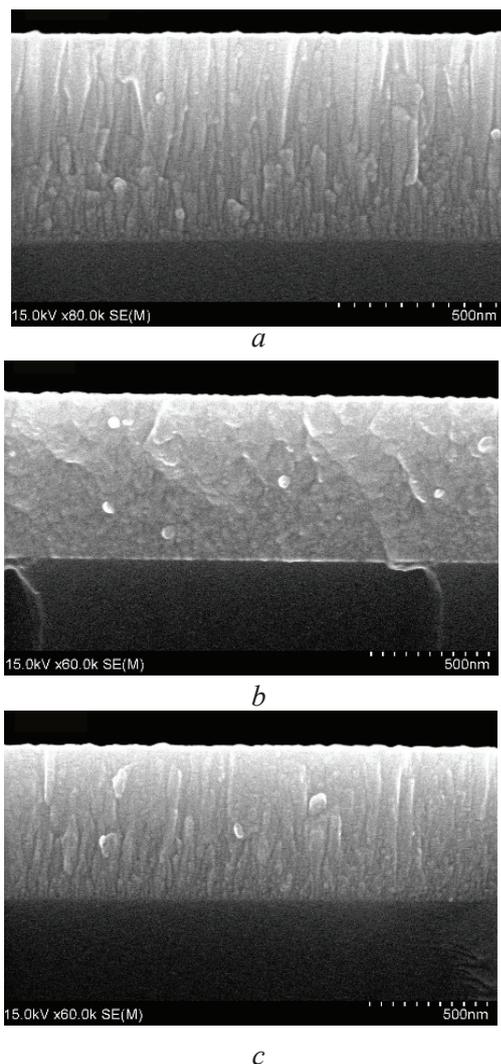


Рисунок 2 – Сечения Ti-Al-N покрытий с различным содержанием азота: *a* – $\alpha = 0,65$; *b* – $\alpha = 0,58$; *c* – $\alpha = 0,53$
Figure 2 – Cross-sectional SEM micrographs of Ti-Al-N coatings with different nitrogen contents: *a* – $\alpha = 0,65$; *b* – $\alpha = 0,58$; *c* – $\alpha = 0,53$

Для изучения оптических характеристик были сняты спектры отражения покрытий (рисунок 4). Для сравнения на рисунках 4*a* и 4*b* приведены спектры отражения покрытия TiN стехиометрического состава.

На всех спектрах отражения наблюдаются общие тенденции: минимум коэффициента отражения в синей или сине-зеленой области спектра, увеличение коэффициента отражения в ИК области и сдвиг минимума по сравнению с TiN. Из рисунка 4 следует, что спектральный коэффициент отражения от пленки несет информацию об ее стехиометрическом составе (содержании N) и толщине. Вид зависимости коэффициентов отражения покрытий Ti-Al-N от длины волны согласуется с теорией Друде–Лоренца (металлический тип коэффициента отражения).

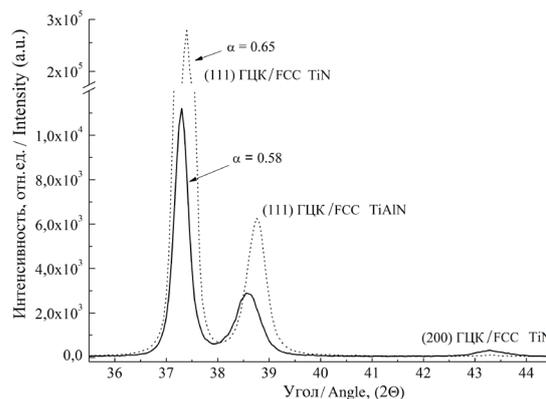


Рисунок 3 – Спектры рентгеноструктурного анализа Ti-Al-N покрытий, полученных в режимах нанесения с различными степенями реактивности α ($\alpha = 0,65$ и $\alpha = 0,58$)
Figure 3 – X-ray diffraction spectra of Ti-Al-N coatings with different contents of nitrogen, obtained by varying value of reactivity α ($\alpha = 0,65$ и $\alpha = 0,58$)

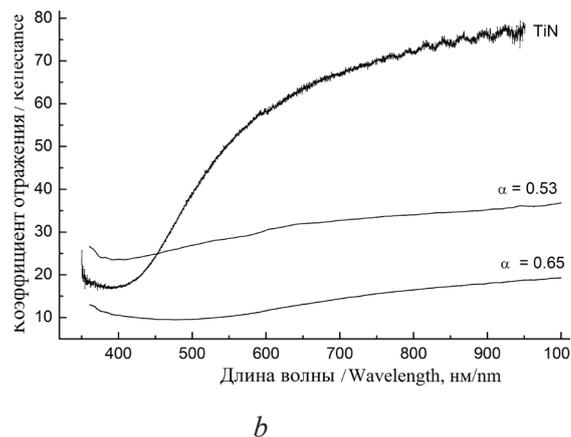
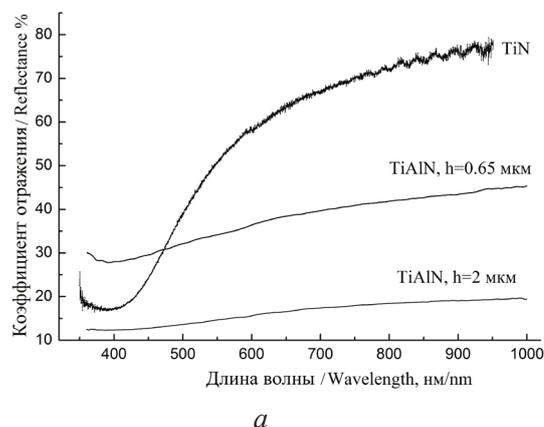


Рисунок 4 – Спектры отражения (Ti-Al-N/стекло): *a* – с одинаковыми показателями $\alpha = 0,58$, но разной толщиной пленки; *b* – с различными показателями α ($\alpha = 0,65$ и $\alpha = 0,53$)
Figure 4 – Reflectivity spectra (Ti-Al-N/glass): *a* – the same values $\alpha = 0,58$, but different film thickness; *b* – different values α ($\alpha = 0,65$ и $\alpha = 0,53$)

В рамках эксперимента проводились также исследования механических свойств покрытий Ti-Al-N. Наименьший измеренный коэффициент

трения покрытий (в 3 раза меньше, чем у нержавеющей стали) и максимальное значение твердости (19,7 ГПа) соответствуют пленкам с глобулярной структурой стехиометрического состава (степень реактивности $\alpha = 0,58$). Более подробное описание механических свойств полученных покрытий приведено в статье [12].

Заключение

Представленные результаты позволяют утверждать, что предложенная система контроля расхода газа обеспечивает оптимальный алгоритм управления процессом реактивного магнетронного распыления при формировании покрытий Ti-Al-N с заданными свойствами.

Проведенные исследования показали, что система контроля расхода газа позволяет управлять стехиометрией состава покрытия, а также физическими свойствами покрытий, которые существенно зависят от условий их напыления. Скорость нанесения покрытий стехиометрического состава, обеспечиваемая системой контролем расходом газов, является максимальной, что определяет высокую производительность данного метода получения покрытий.

Список использованных источников

1. *Spencer, A.G.* Pressure stability in reactive magnetron sputtering / A.G. Spencer, R.P. Howson, R.W. Lewin // *Thin Solid Films*. – 1988. – Vol. 158. – P. 141–149.
2. *Бурмаков, А.П.* Алгоритмы оптического управления реактивным магнетронным осаждением пленочных покрытий / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов // *Журнал при-*

кладной спектроскопии. – 2012. – Т. 79, №3. – С. 430–435.

3. *Бурмаков, А.П.* Спектроскопическая система контроля расхода газов и содержания примесей в процессе магнетронного осаждения пленок / А.П. Бурмаков, В.Н. Кулешов // *Журнал прикладной спектроскопии*. – 2007. – Т. 74, № 3. – С. 412 – 416.

4. *Комаров, Ф.Ф.* Формирование наноструктурированных покрытий TiAlN, TiCrN, TiSiN методом реактивного магнетронного осаждения / Ф.Ф. Комаров, С.В. Константинов, В.В. Пилько // *Трение и износ*. – 2014. – Т. 3, № 35. – С. 293–303.

5. *Ramadoss, R.* Tribological properties and deformation mechanism of TiAlN coating sliding with various counterbodies / Ramadoss R. [et al.] // *Tribology International*. – 2013. – № 66 – P. 143–149.

6. *Soner, S.* Multipass sliding wear behavior of TiAlN coatings using a spherical indenter: effect of coating parameters and duplex treatment / Soner S., Sengül D. // *Tribology Transactions*. – 2014. – P. 242–255.

7. *Погребняк, А.Д.* Структура и свойства твердых и сверхтвердых нанокompозитных покрытий / А.Д. Погребняк [и др.] // *Успехи физических наук*. – 2009. – Т. 179, № 1. – С. 35–64.

8. *Белоус, В.А.* Твердые покрытия Ti-Al-N, осажденные из фильтрованной вакуумно-дуговой плазмы / В.А. Белоус [и др.] // *Физическая инженерия поверхности*. – 2009. – Т. 7. – № 3. – С. 216–222.

9. *Cavaleiro A., De Hosson J.T.* *Nanostructured Coatings*. Berlin, Springer-Verlag, 2006. 648 p.

10. *Santana, A.E.* Thermal treatment effects on microstructure and mechanical properties of TiAlN thin films / A.E. Santana [et al.] // *Tribology Letters*. – 2004. – Vol. 17, № 4. – P. 689–696.

11. *Shum, P.W.* Structural and mechanical properties of titanium-aluminium-nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering / P.W. Shum [et al.] // *Surface & Coating Technology* – 2004. – № 185. – P. 245–253.

12. *Комаров, Ф.Ф.* Контролируемое нанесение Ti-Al-N покрытий методом реактивного магнетронного распыления / Ф.Ф. Комаров [и др.] // *Доклады НАН Беларуси*. – 2014. – Т. 58, № 5. – С. 40–43.

Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology

Klimovich I.M., Kuleshov V.N., Zaikou V.A., Burmakou A.P., Komarov F.F., Ludchik O.R.

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220030, Minsk, Belarus

Received 14.01.2015

Accepted for publication 15.09.2015

Abstract. It is known that the discharge parameters and the chemical composition of the particles flux impinging onto the substrate during a reactive magnetron sputtering are unstable. As a result spontaneous transitions between the «metal» mode of the target surface and the «poisoned» mode of the target surface have been observed. This leads to nonrepeatability of the coating compositions from process to process. The aim of this work is to design a gas flow control system for reactive sputtering processes. The control system allows to maintain a steady nonequilibrium state of the magnetron discharge in transition mode where the chemical state of the target surface is unstable. The intensities of spectral lines of the discharge spectrum are proposed as control parameters. Photodiode detectors were used for registration of intensities of spectral lines. A gas flow control system regulates argon and reactive gas flow automatically, using feedback signals from photodiode detectors on the intensities of the spectral lines, vacuum gauge, ion current sensor, sensors of discharge current and voltage. As an example, the process of reactive magnetron Ti-Al-N deposition is considered. The following discharge parameters are controlled during sputtering a composite target based on Ti with Al cylindrical inserts: current, voltage, total pressure of a gas mixture, substrate temperature, bias voltage and current of the substrate. Nitrogen flow was controlled by the spectral line intensity of titanium TiI 506,5 nm. The value of the line intensity is connected with the value of reactivity. Elemental composition and structure of the Ti-Al-N coatings were studied using Rutherford backscattering spectroscopy, scanning electron microscopy and X-ray diffraction. It was found, that stoichiometric Ti-Al-N coatings have a globular structure, enhanced hardness and low friction coefficient in contrast to Ti-Al-N coatings with nonstoichiometric composition, which have a columnar structure. As result, it was shown, that a gas flow control system allows to control stoichiometry composition and physical properties of the deposited coating.

Keywords: reactive magnetron sputtering, gas flow control system, Ti-Al-N, Rutherford backscattering spectrometry, X-ray diffraction.

Адрес для переписки:

Климович И.М.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220030, г. Минск, Беларусь
e-mail: imklimovich@gmail.com

Address for correspondence:

Klimovich I.M.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave, 4, 220030, Minsk, Belarus
e-mail: imklimovich@gmail.com

Для цитирования:

Климович И.М., Кулешов В.Н., Зайков В.А., Бурмаков А.П.,
Комаров Ф.Ф., Людчик О.Р.
Система контроля расхода газов для применения в технологии
реактивного магнетронного распыления
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 139–147

For citation:

Klimovich I.M., Kuleshov V.N., Zaikou V.A., Burmakou A.P.,
Komarov F.F., Ludchik O.R.
Gas flow control system in reactive magnetron sputtering technology
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 139–147

References

1. Spencer A.G., Howson R.P., Lewin R.W. Pressure stability in reactive magnetron sputtering. *Thin Solid Films*, 1988, vol. 158, issue 1, pp. 141–149.
2. Burmakov A.P., Kuleshov V.N. Algorithms for optical control of reactive magnetron deposition of film coatings. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2012, vol. 79, no. 3, pp. 410–415.
3. Burmakov A.P., Kuleshov V.N. Spectroscopic system for controlling gas flow and impurity content during magnetron deposition of films. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2007, vol. 74, no. 3, pp. 459–463.
4. Komarov F.F., Konstantinov V.V., Pilko V.V. Formation of nanostructured coatings TiAlN, TiCrN, TiSiN coatings using reactive magnetron sputtering. *Journal of Friction and Wear*, 2014, vol. 35, no. 3, pp. 215–223.
5. Ramadoss R., Kumar N., Pandian R., Dash S., Ravindran T.R., Arivuoli D., Tyagi A.K. Tribological properties and deformation mechanism of TiAlN coating sliding with various counterbodies. *Tribology International*, 2013, vol. 66, pp. 143–149.
6. Soner S., Sengül D. Multipass sliding wears behavior of TiAlN coatings using a spherical indenter: effect of coating parameters and duplex treatment. *Tribology Transactions*, 2014, vol. 57, pp. 242–255.
7. Pogrebnyak A.D., Shpak A.P., Azarenkov N.A., Beresnev V.M. Structures and properties of hard and superhard nanocomposite coatings. *Physics – Uspekhi*, 2009, vol. 52, no. 1, pp. 29–54.
8. Belous V.A., Vasilev V.V., Luchaninov A.A., Reshetnyak E.N., Strelnitskiy V.E., Tolmacheva G.N., Goltvyanitsa V.S., Goltvyanitsa S.K. Hard coatings Ti-Al-N deposited from the filtered cathodic-arc plasma source. *Physical Surface Engineering* 2009, vol. 7, no. 3, pp. 216–222.
9. Cavaleiro A., De Hosson J. T. Nanostructured Coatings. Berlin: Springer-Verlag, 2006. 648 p.
10. Santana A.E., Karimi A., Derflinger V.H., Schütze A. Thermal treatment effects on microstructure and mechanical properties of TiAlN thin films, *Tribology Letters*, 2004, vol. 17, no. 4, pp. 689–696.
11. Shum, P.W., Li K.Y., Zhou Z.F., Shen Y.G. Structural and mechanical properties of titanium-aluminium-nitride films deposited by reactive close-field unbalanced magnetron sputtering. *Surface and Coating Technology*, 2004, no. 185, pp. 245–253.
12. Komarov F.F., Zaikov V.A., Klimovich I.M., Pilko V.V. [Controlled deposition of Ti-Al-N coatings by reactive magnetron sputtering], *Doklady NAN Belarusi*, 2014, vol. 58, no. 5, pp. 40–43 (in Russian).

УДК 535.241

Устройство юстировки тела накала светоизмерительных ламп

Длугунович В.А.¹, Ждановский В.А.¹, Липлянин А.А.¹, Никоненко С.В.¹, Тарасова О.Б.²

¹Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь

²Белорусский государственный институт метрологии,
Старовиленский тракт, 93, 220053, г. Минск, Беларусь

Поступила 29.09.2014

Принята к печати 27.10.2015

При выполнении фотометрических измерений, связанных с использованием светоизмерительных ламп, необходимо, чтобы тело накала лампы занимало строго заданное положение относительно фотоприемника и оптической оси фотометрической установки. Неточность позиционирования плоскости тела накала (ТН) лампы относительно оптической оси измерительной системы ведет к увеличению неопределенности измерений фотометрических характеристик источников света. Типичный способ юстировки ТН светоизмерительных ламп основан на использовании при юстировке диоптрийных трубок (телескопов) и осуществляется посредством последовательных приближений, что требует особой концентрации оператора и много времени. Цель данной работы – разработать устройство юстировки, обеспечивающее возможность одновременной юстировки ТН ламп в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Представлены способ и устройство юстировки источников излучения при фотометрических измерениях на основе двух цифровых видеокамер. Устройство позволяет одновременно отображать на экране компьютера изображение ТН ламп в двух взаимно перпендикулярных плоскостях. Устройство юстировки исключает большое количество функциональных узлов, требующих поэлементной юстировки, что сокращает затраты времени на проведение юстировки. Устройство также обеспечивает отображение ТН лампы с непрозрачным напылением на колбе. Устройство используется в Национальном эталоне единиц силы света и освещенности Республики Беларусь.

Ключевые слова: юстировка, тело накала, светоизмерительная лампа.

Адрес для переписки:

Никоненко С.В.
Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Address for correspondence:

Nikanenka S.V.
Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Для цитирования:

Длугунович В.А., Ждановский В.А., Липлянин А.А., Никоненко С.В.,
Тарасова О.Б.
Устройство юстировки тела накала светоизмерительных ламп
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 148–155

For citation:

Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Liplianin A.A., Nikanenka S.V.,
Tarasova O.B.
The apparatus for alignment of the photometric lamp filament
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 148–155

Введение

При выполнении ряда фотометрических измерений, связанных с использованием светоизмерительных ламп, необходимо, чтобы тело накала (ТН) светоизмерительной лампы занимало строго заданное положение относительно фотоприемника и оптической оси фотометрической установки [1]. Например, при измерениях силы света светоизмерительных ламп их ТН должно быть выставлено в вертикальной плоскости перпендикулярно оптической оси измерительной системы, при этом оптическая ось установки должна быть выставлена в горизонтальной плоскости [1–4]. Неточность позиционирования плоскости ТН лампы относительно оптической оси измерительной системы вносит дополнительную неопределенность в результат измерений фотометрических характеристик источников света.

Типичный способ юстировки ТН светоизмерительных ламп, применяемый в ведущих Национальных метрологических центрах, следующий [2, 3]: ТН лампы ориентируется вертикально, путем визуального сравнения с помощью диоптрийных трубок или телескопов, наклона ТН лампы с референсной вертикальной линией создаваемой отвесом и крестообразными маркерами расположенными на стенах комнаты (или специальных экранах), где расположена фотометрическая установка.

Юстировка ТН светоизмерительных ламп с помощью диоптрийных трубок (телескопов) весьма трудоемка, так как при ее выполнении по одной координате наблюдение за перемещением ТН осуществляется в одном направлении, однако из-за несовершенства юстировочных механизмов такое перемещение ТН вызывает нежелательные и незаметные смещения ТН по другим координатам. Эти смещения можно заметить, если перейти к наблюдению за ТН с другого, как правило, ортогонального направления. В результате установка ТН лампы в необходимое положение осуществляется методом последовательных приближений, что требует особой концентрации внимания и отнимает много времени у оператора.

Для установки в рабочее положение светоизмерительных ламп с колбами, матированными изнутри, предложено использовать He-Ne лазер [4, 5]. В этом случае лампа выставляется в горизонтальной оси измерительной системы по лазерному лучу, отраженному назад от колбы. Для юстировки лампы в направлении, ортогональном оптической оси установки (по вертикали), используют теле-

скоп с присущими этому способу недостатками.

Известен способ юстировки ТН ламп с помощью только He-Ne лазера – как в направлении оптической оси фотометрической установки, так и в ортогональном ей направлении¹. Для этого используют два матовых экрана с перекрестиями, рассеивающую линзу и поворотные зеркала. Выставляют лампу в рабочее положение, наблюдая поочередно за расположением теневых проекций нитей ТН лампы в симметрированных относительно перекрестий экранов пятнах излучения юстировочного лазера. При этом на первом экране наблюдают отдельные проекции всех нитей, образующих плоскость ТН лампы (вид «анфас»), а на втором экране при отъюстированном положении ТН лампы видна проекция только одной нити ТН лампы (вид «в профиль»). Такой способ юстировки эффективнее приведенных выше способов, так как при проведении подготовительной работы по формированию оптических осей и при выполнении юстировки ТН ламп исключается необходимость перемещения оператора от телескопа к телескопу у каждой оптической оси и не затрачивается время на адаптацию глаза и подстройку резкости каждого телескопа. Тем не менее и при использовании данного способа установка ТН ламп в необходимое положение относительно фотоприемника довольно кропотливая и трудоемкая задача.

Цель данной работы – создание устройства юстировки, обеспечивающее возможность одновременной юстировки ТН ламп в двух взаимно перпендикулярных плоскостях, что позволит сократить время проведения юстировочных работ.

Юстировка тела накала светоизмерительных ламп с помощью цифровых камер

В 2008–2011 гг. проводились работы по модернизации Национального эталона единиц силы света и освещенности Республики Беларусь. Цель модернизации заключалась в расширении диапазона измерений силы света и коррелированной цветовой температуры источников излучения, а также создаваемой ими освещенности. Модернизация проводилась в три этапа, условно названные колориметрический, фотометрический и геометрический.

¹ Михайлов, М.В. Способ юстировки протяженного источника света на фотометрической скамье / М.В. Михайлов // Фотометрия и ее метрологическое обеспечение: тезисы докладов 6-й Всес. науч.-техн. конф, Москва, 27–31 окт. 1986 г. / ВНИИОФИ. – М., 1986. – С. 227.

Основным результатом выполнения колориметрического этапа было создание колориметрического блока эталона [6]. В результате фотометрического этапа был создан фотометр малых уровней освещенности [7]. Для третьего этапа одной из поставленных задач являлась оптимизация измерительных процедур на эталоне с целью сокращения временных затрат при проведении работ на нем. В рамках решения этой задачи было разработано и изготовлено устройство юстировки ТН светоизмерительных ламп с помощью цифровых камер. Принципиальная схема этого устройства изображена на рисунке 1.

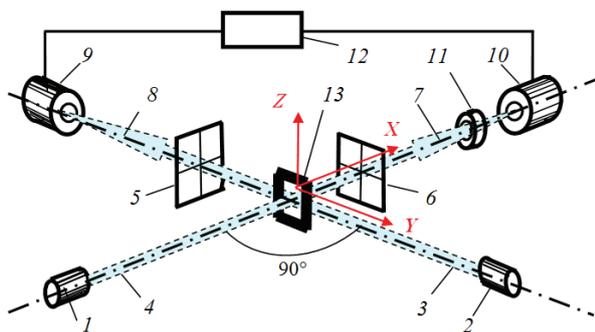


Рисунок 1 – Схема юстировки тела накала светоизмерительной лампы; 1, 2 – лазеры; 3, 4 – пучки лазерного излучения; 5, 6 – рамки с перекрестиями; 7, 8 – оптические оси устройства; 9, 10 – цифровые видеокамеры; 11 – фотоприемник; 12 – персональный компьютер; 13 – тело накала светоизмерительной лампы

Figure 1 – Scheme of alignment the filament of photometric lamp: 1, 2 – lasers; 3, 4 – laser beams; 5, 6 – frame with a cross; 7, 8 – optical axes of the device; 9, 10 – digital video cameras; 11 – photodetector; 12 – computer; 13 – filament of photometric lamp

Устройство включает два оптических рельса (не показанных на рисунке), размещенные под прямым углом; рабочие поверхности, которых расположены в горизонтальной плоскости. На одном из рельсов на регулируемых по линейным и угловым координатам каретках устанавливают юстировочный лазер 1, рамку с перекрестием 6, фотоприемник 11, цифровую видеокамеру (ЦВК) 10. При снятом с рельса фотоприемнике 11 и закрытом непрозрачным экраном объективе ЦВК 10 (во избежание повреждения матрицы камеры), с помощью пучка 4 юстировочного лазера 1 формируют оптическую ось фотометрической установки (ООФУ) 7, параллельную направляющим рельсам.

Если ось сформирована, то при перемещении рамки с перекрестием 6 вдоль рельса центр пере-

крестия совпадает с центром пятна, создаваемого на перекрестии пучком 4 юстировочного лазера 1.

После завершения формирования ООФУ все установленные на этом рельсе элементы устройства (юстировочный лазер 1, перекрестие 6, фотоприемник 11, ЦВК 10) центрируются относительно этой оси. Прежде всего, центрируется подключенная к персональному компьютеру (ПК) ЦВК 10.

В данном методе используется программа, которая позволяет:

- накладывать виртуальное перекрестие по центру формируемого камерой кадра;
- наблюдать полученное изображение положения виртуального перекрестия на экране монитора;
- создавать на экране того же монитора отдельное окно для изображения, фиксируемого каждой из камер.

Центрирование начинают с получения резкого изображения нитей реального перекрестия 6 на экране ПК в окне ЦВК 10 посредством настройки объектива ЦВК 10. Далее, посредством линейных юстировочных перемещений ЦВК 10 в вертикальной плоскости совмещают центр пересечений линий виртуального перекрестия 2 с центром пересечения нитей реального перекрестия 6 (рисунок 2). При этом на экране ПК неподвижным остается виртуальное перекрестие 2, а перемещается изображение реального неподвижного перекрестия 6, уже выставленного по ООФУ в процессе предыдущего этапа юстировки.

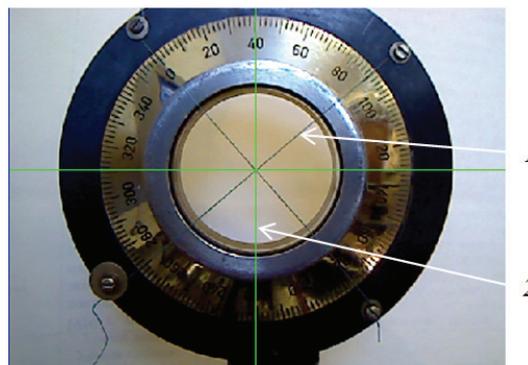


Рисунок 2 – Изображение на экране персонального компьютера совмещенных перекрестий (реального и виртуального): 1 – реальное перекрестие (5 либо 6 на рисунке 1); 2 – виртуальное перекрестие

Figure 2 – Image on the screen of a computer of aligned crosshair (real and virtual): 1 – real crosshair; 2 – virtual crosshair

Для уменьшения искажения изображения наблюдаемых объектов симметрируют поле зре-

ния ЦВК 10 относительно ООФУ. Для этого требуется выполнить ряд процедур. К плоскости наружного торца объектива ЦВК необходимо прижать непрозрачный для лазерного излучения экран (во избежание повреждения матрицы ЦВК лазерным излучением) с полированной поверхностью и направить на него пучок излучения юстировочного лазера 4, ранее сцентрированный относительно ООФУ. Юстируя ЦВК 10 по угловым координатам, добиваются, чтобы пятно лазерного излучения, отраженного от экрана в обратном направлении, расположилось в плоскости выходного торца лазера 1 симметрично выходящему пучку излучения.

После завершения центрирования ЦВК 10 необходимо выключить лазер 1 и убрать с рельса перекрестие 6. Поскольку в дальнейшем ТН лампы юстируется относительно виртуального перекрестия в окне камеры на экране ПК, необходимо, чтобы линии этого перекрестия располагались вертикально и горизонтально относительно плоскости XU (рисунок 1). Чтобы добиться этого, можно использовать отвес, находящийся в состоянии покоя, нить которого вводится в поле зрения ЦВК 10. С помощью объектива камеры необходимо настроиться на резкое изображение нити. Поворачивая относительно ООФУ камеру 10 в вертикальной плоскости, необходимо добиться, чтобы изображение нити стало параллельным вертикальным линиям виртуального перекрестия (рисунок 3а). В противном случае изображение нити отвеса на экране монитора ПК будет пересекать линии

виртуального перекрестия камеры.

Далее требуется установить на рельс каретку с фотоприемником 11, включить лазер 1 и отъюстировать положение фотоприемника относительно лазерного пучка визуальным или по максимуму выходного сигнала фотоприемника 11; установить на рельс и жестко закрепить вплотную к каретке фотоприемника 11 упор, позволяющий после снятия с рельса каретки с фотоприемником устанавливать ее повторно в прежнее положение без нарушения достигнутых ранее юстировок фотоприемника. Для возможности контроля установки фотоприемника в прежнее положение относительно ООФУ после его возвращения на рельс на тыльной стороне приемника, обращенной к ЦВК 10, необходимо установить реперную метку. Метка в процессе юстировки фотоприемника должна быть совмещена с центром виртуального перекрестия ЦВК 10.

Теперь при снятии с рельса каретки с фотоприемником 11 и установке на рельс лампы с ТН 13 появляется возможность симметрирования фронтальной поверхности ТН лампы относительно ООФУ.

Для одновременного наблюдения за процессом установки плоскости ТН лампы перпендикулярно ООФУ вдоль рабочей поверхности второго рельса формируют вспомогательную оптическую ось фотометрической установки (ВООФУ). На этот рельс, в соответствии с рисунком 1, устанавливают юстировочный лазер 2, рамку с перекрестием 5, ЦВК 9.

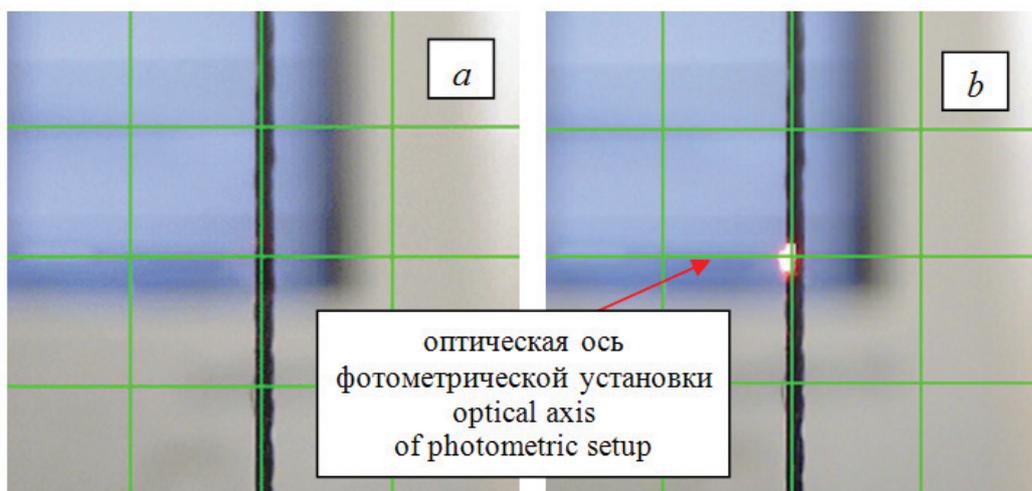


Рисунок 3 – Изображения съюстированных по нити отвеса линий виртуального перекрестия камер: *a* – изображение с камеры 10; *b* – изображение с камеры 9. Светлая точка на нити отвеса на рисунке *b* – пятно, созданное пучком 4 лазера 1 (точка пересечения нити отвеса с оптической осью фотометрической установки)

Figure 3 – Images of the virtual crosshair of cameras that are aligned relative to plumb line: *a* – image from the camera 10; *b* – image from the camera 9. The bright point on the plumb line in Figure *b* is a spot of beam 4 of laser 1 (point of crossing of the plumb line with the optical axis of the photometric setup)

Как и при формировании ООФУ, добиваются, чтобы центр перекрестия 5 при перемещении его вдоль рельса совпадал с центром пятна, создаваемого на перекрестии пучка 3 юстировочного лазера 2.

После завершения формирования ВООФУ ЦВК 9 также подключают к ПК. Используя приемы, применяемые при юстировке ЦВК 10, центрируют ЦВК 9 относительно ВООФУ, симметрируют ее поле зрения относительно этой оси, а также выставляют виртуальное перекрестие этой камеры по нити отвеса (рисунок 3*b*).

После установки светоизмерительной лампы в зону пересечения ООФУ и ВООФУ камеры 9 и 10 позволяют в реальном режиме времени наблюдать за процессом юстировки ТН лампы по координатам X , Y и Z (рисунок 1) относительно ООФУ и ВООФУ фотометрической установки. Поскольку наблюдение за изображением ТН лампы относительно виртуальных перекрестий камер 10 и 9 осуществляется одновременно на мониторе ПК, это позволяет быстро и точно устанавливать ТН лампы в необходимое положение.

Работоспособность представленного устройства проверена при юстировке ТН светоизмерительной лампы силы света СИС-500, отцентрированной относительно ООФУ в соответствии с требованиями [2] (рисунок 4). При реализации описанного устройства юстировки ТН светоизмерительных ламп в качестве ЦВК использованы веб-камеры Genius iSlim 1300 V2. Различие в размерах изображения ТН лампы на снимках (рисунок 4)

вызвано применением объектива HELIUS-44-2 вместо исходного объектива ЦВК 9 при юстировке положения ТН лампы в направлении ВООФУ (рисунок 4*b*). Кроме того, использование подобного объектива упрощает процедуру симметрирования поля зрения камеры относительно направления наблюдения, так как радиус кривизны его входной линзы существенно больше радиуса кривизны линз, использующихся в бытовых веб-камерах. Это позволяет обходиться без дополнительных плоскопараллельных насадок на объектив веб-камеры, а использовать отражение лазерного пучка в обратном направлении непосредственно от поверхности входной линзы такого объектива.

Предложенный способ юстировки ТН светоизмерительных ламп защищен патентами Республики Беларусь [8] и Российской Федерации [9], а устройство юстировки используется в Национальном эталоне единиц силы света и освещенности Республики Беларусь.

Заключение

Представлен способ и устройство юстировки источников излучения при фотометрических измерениях с помощью цифровых камер, позволяющие сократить время юстировки светоизмерительных ламп и других источников излучения на фотометрической скамье не менее чем в 2–4 раза в зависимости от типа светоизмерительной лампы (или источников излучения). Устройство запатентовано

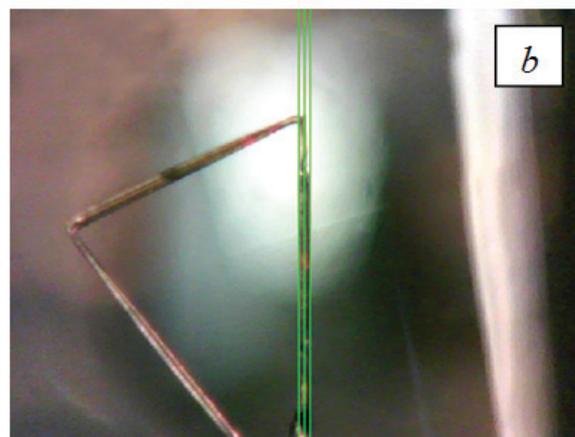


Рисунок 4 – Изображения тела накала светоизмерительной лампы силы света СИС-500, отъюстированной относительно оптической оси фотометрической установки: *a* – вид тела накала вдоль оптической оси фотометрической установки с камеры 10; *b* – вид тела накала под углом 90° к оптической оси фотометрической установки с камеры 9

Figure 4 – Images of the filament of photometric lamp SIS-500 aligned on the optical axis of the photometric setup: *a* – view of the filament from camera 10 along the optical axis of the photometric setup; *b* – view of the filament at 90° angle to the optical axis of the photometric setup from camera 9

в Республике Беларусь, Российской Федерации и используется в Национальном эталоне единиц силы света и освещенности Республики Беларусь.

Список использованных источников

1. Handbook of Applied Photometry / ed. C. DeCusatis. – N.Y. : AIP Press, 1998. – 463 p.
2. Köhler, R. Final Report on the International Comparison of Luminous Responsivity CCPR-K3.b / R. Köhler, M. Stock, C. Garreau // Metrologia. Tech. Suppl. – 2004. – Vol. 41. – P. 02001.
3. Mamedbeyli, I. Transfer of Photometric Quantities at Arbitrary Distribution Temperatures / I. Mamedbeyli, Z. Ürey, A.K. Türkoğlu // Tr. J. of Physics. – 1998. – Vol. 22. – P. 841–850.
4. Ohno, Y. NIST measurement services: Photometric calibrations. / Y. Ohno // NIST Special Publication 250-37. – Washington, U.S. Government Printing Office. – 1997. – 85 p.
5. Yoon, H.W. NIST measurement services: Spectral Irradiance Calibrations / H.W. Yoon, C.E. Gibson // NIST Special Publication 250-89. – Gaithersburg, NIST printing

and duplication office. – 2011. – 132 p.

6. Лысенко, О.Н. Модернизация эталона единиц силы света и освещенности. Разработка и изготовление колориметрического блока / О.Н. Лысенко [и др.] // Метрология и приборостроение. – 2011. – № 1. – С. 12–15.

7. Длугунович, В.А. Измерение освещенности в диапазоне от 0,001 до 1,000 лк / В.А. Длугунович, С.В. Никоненко, О.Б. Тарасова // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 1(6). – С. 121–125.

8.. Патент ВУ 6923 от 10.01.2010 на полезную модель «Устройство юстировки тела накала светоизмерительной лампы». Заявители – Институт физики НАН Беларуси, БелГИМ. Авторы – В.А. Длугунович, В.А. Ждановский, С.В. Никоненко (Институт физики НАН Беларуси), О.Б. Тарасова (БелГИМ).

9. Патент RU 101849 от 27.01.2011 на полезную модель «Устройство юстировки тела накала светоизмерительной лампы». Заявители – Институт физики НАН Беларуси, БелГИМ. Авторы – В.А. Длугунович, В.А. Ждановский, С.В. Никоненко (Институт физики НАН Беларуси), О.Б. Тарасова (БелГИМ).

The apparatus for alignment of the photometric lamp filament

Dlugunovich V.A.¹, Zhdanovskii V.A.¹, Liplianin A.A.¹, Nikanenka S.V.¹, Tarasova O.B.²

¹*Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus*

²*Belorussian State Institute of Metrology,
220053, Starovilenskii Tr., 93, Minsk, Belarus*

Received 29.09.2014

Accepted for publication 27.10.2015

Abstract. During photometric measurements involving the use of photometric lamps it is necessary that the filament of lamp takes a strictly predetermined position with respect to the photodetector and the optical axis of the photometric setup. The errors in positioning of alignment filament with respect to the optical axis of the measuring system lead to increase the uncertainty of measurement of the photometric characteristics of the light sources. A typical method for alignment of filament of photometric lamps is based on the use a diopter tubes (telescopes). Using this method, the mounting of filament to the required position is carried out by successive approximations, which requires special concentration and a lot of time. The aim of this work is to develop an apparatus for alignment which allows simultaneous alignment of the filament of lamps in two mutually perpendicular planes. The method and apparatus for alignment of the photometric lamp filament during measurements of the photometric characteristics of light sources based on two digital video cameras is described in this paper. The apparatus allows to simultaneously displaying the image of lamps filament on the computer screen in two mutually perpendicular planes. The apparatus eliminates a large number of functional units requiring elementwise alignment and reduces the time required to carry out the alignment. The apparatus also provides the imaging of lamps filament with opaque coated on the bulb. The apparatus is used at the National standard of light intensity and illuminance units of the Republic of Belarus.

Keywords: alignment, filament, photometric lamp.

Адрес для переписки:

Никоненко С.В.
Институт физики НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Address for correspondence:

Nikanenka S.V.
Institute of Physics of the National Academy of Science of Belarus,
Nezavisimosti Ave., 220072, 68, Minsk, Belarus
e-mail: s.nikonenko@dragon.bas-net.by

Для цитирования:

Длугунович В.А., Ждановский В.А., Липлянин А.А., Никоненко С.В.,
Тарасова О.Б.
Устройство юстировки тела накала светоизмерительных ламп
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 148–155

For citation:

Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Liplianin A.A., Nikanenka S.V.,
Tarasova O.B.
The apparatus for alignment of the photometric lamp filament
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 148–155

References

1. Handbook of Applied Photometry / ed. C. DeCusatis. N.Y.: AIP Press, 1998, 463 p.
2. Köhler R., Stock M., Garreau C. Final Report on the International Comparison of Luminous Responsivity CCPR-K3.b. Metrologia. Tech. Suppl., 2004, vol. 41, pp. 02001.
3. Mamedbeyli I., Ürey Z., Türkoğlu A.K. Transfer of Photometric Quantities at Arbitrary Distribution Temperatures. Tr. J. of Physics, 1998, vol. 22, pp. 841–850.
4. Ohno Y. NIST measurement services: Photometric calibrations. NIST Special Publication 250-37, Washington, U.S. Government Printing Office, 1997, 85 p.
5. Yoon H.W., Gibson C.E. NIST measurement services: Spectral Irradiance Calibrations. NIST Special Publication 250-89, Gaithersburg, NIST printing and duplication office, 2011, 132 p.
6. Lysenok V.N., Nikanenka S.V., Scums D.V., Tarasova O.B. Hayrova N.V. Upgrading the standard unit of luminous intensity and irradiance. Development and production of the colorimetric block. Metrologiya i priborostroyeniye, 2011, no. 1, pp. 12–15 (in Russian).
7. Dlugunovich V.A., Nikanenka S.V., Tarasova O.B. Illuminance measurement in the range from 0,001 to 1,000 lx. Devices and Methods of Measurements, 2013, no 1(6), pp. 121–125.
8. Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Nikanenka S.V., Tarasova O.B. Ustrojstvo yustirovki tela nakala svetoizmeritelnoj lampy [The apparatus for alignment of the photometric lamp filament]. Patent BY, no. 6923, 2010.
9. Dlugunovich V.A., Zhdanovskii V.A., Nikanenka S.V., Tarasova O.B. Ustrojstvo yustirovki tela nakala svetoizmeritelnoj lampy [The apparatus for alignment of the photometric lamp filament]. Patent RF, no. 101849, 2011.

УДК.62.752.6

Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей

Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, г. Харьков, Украина

Поступила 30.06.2015

Принята к печати 28.10.2015

Периодические вибрации в виде искаженной синусоиды или другой сложной формы наиболее часто встречаются на реальных подвижных объектах, где могут эксплуатироваться радиоэлектронные средства (РЭС) на основе гибких модулей. Данного рода воздействия непосредственно влияют на надежность всей конструкции в целом. Поэтому целью работы являлось создание экспериментальной установки для исследования механических вибраций и построение зависимостей их влияния на эксплуатируемое устройство, что позволит находить решения проблем, связанных с надежностью и безотказностью РЭС с применением гибких печатных модулей. Для этого была разработана экспериментальная установка и автоматическая адаптивная система регулирования собственной резонансной частоты гибкого модуля. В результате проведения экспериментов выявлены и построены зависимости механических воздействий на выходные параметры РЭС, что позволит в дальнейшем учитывать и применять данный опыт при разработке и производстве устройств на основе гибких печатных плат.

Ключевые слова: радиоэлектронные средства, низкочастотные вибрации, адаптивная система, резонансная частота.

Адрес для переписки:

Боцман А.С.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, г. Харьков, Украина
e-mail: bas-2012@yandex.ua

Address for correspondence:

Botsman A.S.
Kharkiv National University of Radio Electronics,
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine
e-mail: bas-2012@yandex.ua

Для цитирования:

Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В.
Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 156–162

For citation:

Novoselov S.P., Botsman A.S., Nevliudova V.V.
The experimental setup for research of the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems based on flexible modules
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 156–162

Введение

Радиоэлектронные средства (РЭС) эксплуатируются в помещениях, на открытом воздухе, на различных подвижных объектах и т.д. При эксплуатации они подвергаются воздействию внешних и внутренних дестабилизирующих факторов (рисунок 1).

Как пример внешнего дестабилизирующего воздействия может выступать механическая вибрация. Вибрации могут быть гармоническими, негармоническими, периодическими и случайными [1]. Вибрации любого рода непосредственно влияют на выходные параметры РЭС на основе гибких модулей, поэтому актуальной проблемой является исследование данных воздействий. Известно большое количество конструкций низкочастотных вибростендов [2] для исследования параметров РЭС на основе традиционных жестких печатных плат, однако описаний аналогичных стендов для испытаний РЭС на гибком основании авторами в литературе найдено не было. Поэтому целью данной работы являлось создание низкочастотного вибростенда, который позволил бы измерять параметры РЭС на гибком основании в зависимости от воздействия механических вибраций.

Гармонические вибрации редко встречаются на подвижных объектах в чистом виде, однако их широко используют при анализе отклика конструкции на механическое воздействие, при проведении испытаний аппаратуры и, кроме того, любой сложный периодический колебательный процесс можно представить в виде суммы более простых – гармонических. Гармонические вибрации характеризуются амплитудой, периодом колебаний или частотой [2–4].

Периодические вибрации в виде искаженной синусоиды или другой сложной формы наиболее часто встречаются на реальных подвижных объектах, где могут эксплуатироваться РЭС на основе гибких модулей.

При воздействии на радиоэлектронную аппаратуру вибраций возможно возникновение нарушений ее функционирования, которые можно классифицировать следующим образом (рисунок 1) [5].

Восстанавливаемые отказы функционирования аппаратуры, к которым относят искажение выходных параметров РЭС, представляют собой временные изменения в работе элементов аппаратуры, с последующим восстановлением функционирования после прекращения воздействия вибра-

ции. К подобным элементам аппаратуры можно отнести катушки индуктивности, выполненные непосредственно на гибких модулях, а также обычные проводники, колеблющиеся в магнитных полях [6–8].

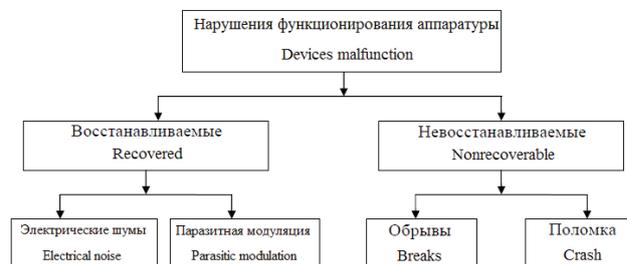


Рисунок 1 – Классификация нарушений функционирования аппаратуры

Figure 1 – Classification of devices malfunctions

Невосстанавливаемые отказы, к которым приводят различного рода обрывы и поломки, окончательно выводят аппаратуру из строя, и ее функционирование не возобновляется после прекращения воздействия вибрации. Примерами такого рода отказов могут быть, например, разрывы дорожек печатного монтажа вибрирующей платы, разрушение паяных, сварных и клеевых соединений, обрывы выводов резисторов, конденсаторов и т.д. [9].

Целью работы являлось создание экспериментальной установки для исследования влияния механических вибраций на гибкие модули в составе РЭС.

Таким образом, для уменьшения воздействия вибраций на РЭС на основе гибких модулей сначала необходимо измерить и проанализировать воздействие вибраций разной амплитуды и частоты на тестовый образец такого модуля. Анализ результатов данных измерений позволит вносить изменения в дальнейшую концепцию защиты РЭС от механических воздействий.

Измерение влияния вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств

Измерение воздействия на радиоэлектронный модуль механических колебаний возможно при создании для данного модуля в лабораторных условиях подобных механических колебаний. Для этого авторами был разработан низкочастотный вибростенд (заявка № U 2015 04766 на патент Украины на полезную модель от 18.05.2015 г.) для исследования влияния механических колебаний на выходные параметры РЭС на основе гибких модулей (рисунок 2).

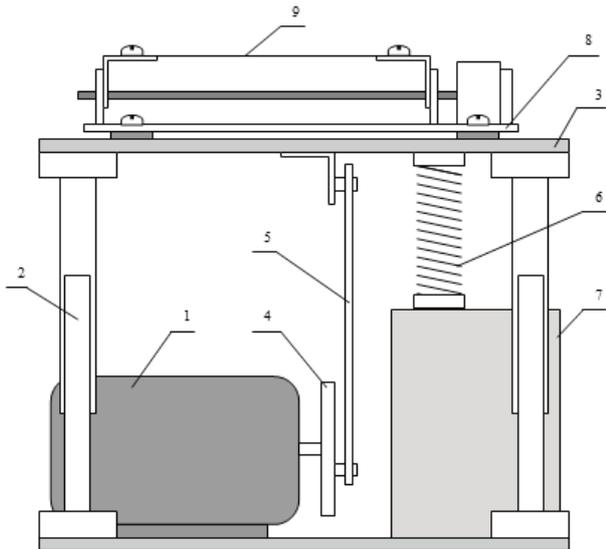


Рисунок 2 – Эскиз станда для исследования влияния механических колебаний на выходные параметры РЭС: 1 – двигатель постоянного тока для приведения в движение эксцентрикового механизма; 2 – телескопические направляющие, для движения предметного столика в вертикальной плоскости; 3 – предметный столик для установки тестируемого образца или адаптивной системы для него; 4 – программный эксцентричный диск с спиралеобразной прорезью для изменения амплитуды механических колебаний; 5 – соединительная планка; 6 – демпферная пружина; 7 – блок широтно-импульсного управления двигателем постоянного тока; 8 – адаптивная система; 9 – тестируемый образец

Figure 2 – Sketch of the stand to investigate the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems: 1 – DC motor for driving the eccentric mechanism; 2 – telescopic rails, for moving the stage only in a vertical plane; 3 – the stage for installation the test sample or the adaptive system; 4 – eccentric disc with spiral cut for changing the amplitude of mechanical vibrations; 5 – connector plate; 6 – damper spring; 7 – block of PWM DC motor control; 8 – adaptive system; 9 – the test sample

Низкочастотный вибростенд работает следующим образом. Напряжение с блока питания заставляет вращаться вал двигателя с диском для изменения амплитуды 4, который с помощью соединительной планки 5 превращает круговое движение в поступательное и заставляет двигаться предметный столик 3 в вертикальной плоскости. Телескопические направляющие 2 обеспечивают исключительно вертикальное движение предметного столика 3.

На представленный вибростенд можно устанавливать как непосредственно тестируемый об-

разец, так и адаптивную систему (рисунок 3). Данное решение расширяет возможности станда, и позволяет не только исследовать влияние низкочастотных вибраций на выходные параметры РЭС на основе гибких модулей, но и изменять натяжение, а, как следствие, и собственную резонансную частоту колебания модуля.

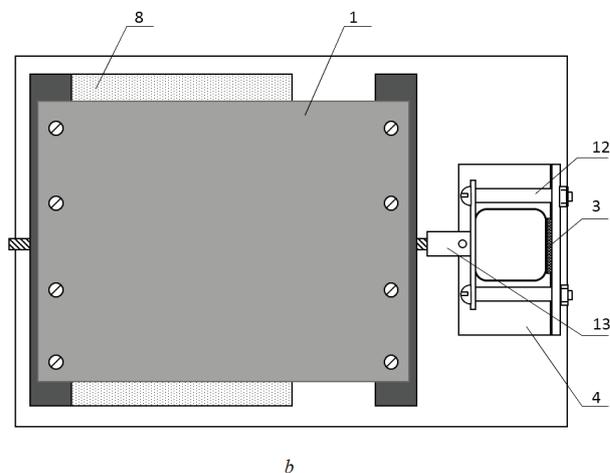
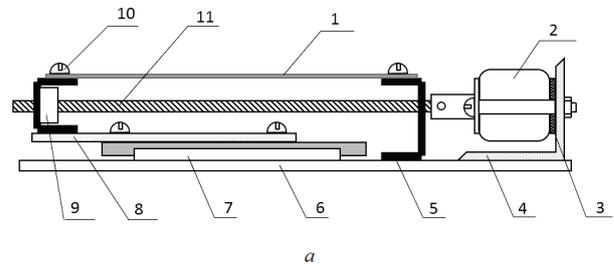


Рисунок 3 – Эскиз адаптивной системы: а – вид спереди; б – вид сверху; 1 – гибкая печатная плата; 2 – шаговый двигатель; 3 – датчик давления; 4 – крепежный уголок; 5 – неподвижный крепежный профиль; 6 – основание макета; 7 – телескопическая направляющая; 8 – подвижное основание; 9 – подвижный крепежный профиль с гайкой; 10 – крепежные винты; 11 – червячная винтовая передача; 12 – стойки крепления шагового двигателя; 13 – муфта

Figure 3 – Sketch the adaptive system: а – front view; б – top view; 1 – flexible PCB; 2 – stepper motor; 3 – pressure sensor; 4 – mounting bracket; 5 – fixed mounting profile; 6 – foundation; 7 – telescopic rail; 8 – movable base; 9 – movable mounting profile with a nut; 10 – fixing screws; 11 – worm screw gear; 12 – rack mounting the stepper motor; 13 – coupling

Как видно из рисунка 3, тестируемая гибкая печатная плата правым краем закреплена на жестком неподвижном основании.

Второй (левый) край платы закреплен на подвижной части механизма натяжения. Крепление платы выполняется при помощи прижимной план-

ки и крепежных винтов. Шаговый электродвигатель создает натяжение платы при помощи винтовой передачи, смещая подвижную пластину.

Датчик давления механически связан с системой регулирования натяжения гибкой печатной платы. Изменение сопротивления, а, следовательно, и изменение силы, с которой натягивается гибкая печатная плата, фиксируется блоком принятия решения. Также на блок принятия решения поступают данные о частоте внешних вибраций, что позволяет ему динамически подстраивать натяжение гибкой печатной платы.

Таким образом, блок принятия решения, проанализировав полученную информацию, производит внутренний расчет резонансной частоты и частоты внешних механических воздействий. Если полученные значения резонансных частот находятся в критической близости друг относительно друга, то блок натяжения гибкой печатной платы, выполненный в виде шагового двигателя, изменяет натяжение и, как следствие, собственную резонансную частоту колебаний тестируемого образца.

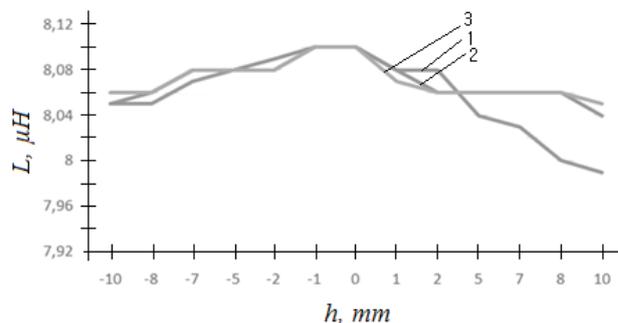
Результаты экспериментальных исследований

Для проведения испытаний установки в качестве тестового образца выбран автоколебательный контур на основе катушки индуктивности, выполненной непосредственно на поверхности гибкой печатной платы. Задача эксперимента состояла в исследовании изменения индуктивности катушки при различных параметрах вибрации.

Для проведения эксперимента исследуемый образец закреплен на рабочей поверхности с двух сторон. Исследование механической деформации происходит путем воздействия механических колебаний разной частоты на печатный модуль. Результатом проведенного эксперимента является зависимость изменения индуктивности от смещения модуля для центральной части печатной платы, ее левого и правого края (рисунок 4а), а также зависимость изменения выходных параметров катушки индуктивности от частоты внешних механических колебаний (рисунок 4б).

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные изменения величины индуктивности катушки в зависимости от изменения частоты колебаний и смещения разных частей модуля. В соответствии с полученными результатами можно провести построение и анализ зависимостей выходных пара-

метров катушки индуктивности при воздействии на гибкий модуль вибрации различного типа.



1 – центральная часть, 2 – левый край, 3 – правый край
1 – central part, 2 – left side, 3 – right side

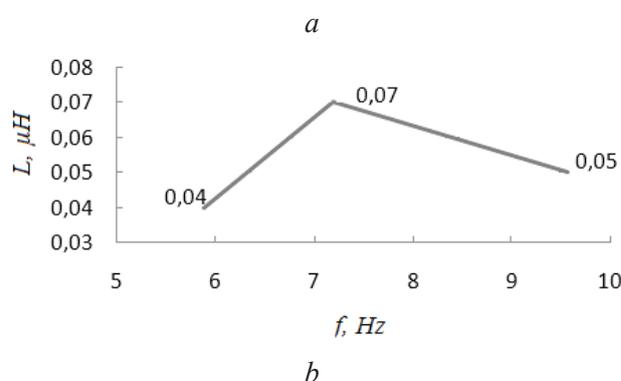


Рисунок 4 – Зависимость индуктивности образца: а – от смещения; б – от частоты вибраций

Figure 4 – The dependence of the inductance sample: а – from bias; б – from frequency of the vibrations

Заключение

Разработан испытательный стенд для исследования влияния амплитуды и частоты вибраций на гибкие модули радиоэлектронных средств, позволяющий проводить лабораторные испытания адаптивной системы изменения натяжения гибких печатных плат, для последующих корректировок технологического процесса их изготовления. Предложенная конструкция отличается от имеющихся возможностью исследования именно гибких модулей радиоэлектронных средств. Устройство может использоваться при испытаниях влияния механических колебаний бортовых радиоэлектронных средств в различных областях их применения.

В результате проведенных экспериментальных исследований получены данные, в соответствии с которыми можно провести анализ зависимостей выходных параметров катушки индуктивности при воздействии на гибкий модуль вибраций различного типа.

Список использованных источников

1. Кутровский П.В. Методика виброзащиты радио-технических устройств частотной отстройкой / П.В. Кутровский, Е.Н. Талицкий, С.В. Шумарин // Известия института технической физики. Серпухов, 2008. – №4. – С. 52–55.
2. Млицкий, В.Д. Испытание аппаратуры и средства измерений на воздействие внешних факторов / В.Д. Млицкий, В.Х. Беглария, Л.Г. Дубицкий. – М. : Машиностроение, 2003. – 567 с.
3. Испытания радиоэлектронной, электронно-вычислительной аппаратуры и испытательное оборудование / под ред. А.И.Коробова. – М. : Радио и связь, 2002. – 272 с.
4. Глудкин, О.П. Методы и устройства испытания РЭС и ЭВС / О.П. Глудкин. – М. : Высш. школа, 2001. – 335 с.
5. Steinberg, D.S. Vibrations analysis for electronic equipment / D.S. Steinberg. – New York, 1973. – 456 p.
6. Royzman, V.P. Investigation of dynamic of gas turbine Engine by identification of rotor supports / V.P. Royzman. – Milano, 1995.
7. Федоров, В. Контроль и испытания в проектировании и производстве радиоэлектронных средств / В. Федоров, Н. Сергеев, А. Кондрашин. – Техносфера, 2005. – 504 с.
8. Жарикова, И.В. Системологический подход при исследовании параметров РЭС / И.В. Жарикова, В.В. Невлюдова // Технология приборостроения. – 2014. – № 2. – С. 40–43.
9. Технологии в производстве электроники. Часть III. Гибкие печатные платы / под общ. ред. А.М. Медведева и Г.В. Мылова. – М. : Группа ИДТ,

The experimental setup for research of the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems based on flexible modules

Novoselov S.P., Botsman A.S., Nevliudova V.V.

Kharkiv National University of Radio Electronics,
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine

Received 30.06.2015

Accepted for publication 28.10.2015

Abstract. Periodic vibration in the form of distorted sine wave or other complex shapes are most common in the real moving objects, where the device can be exploited on the basis of flexible modules. This kind of exposure directly affects the reliability of the construction in general. The objective of the work was the creation of an experimental device for the study of mechanical vibrations and the dependencies of their impact on the operated device. Research of mechanical vibrations and the dependencies of their influence on the device will allow finding solutions to the problems of reliability of radio electronic devices. It developed an experimental device and automatic adaptive system for control own resonant frequency of the flexible module. As a result of the experiments has been identified according to mechanical influences on the output parameters of the devices. This will take into account and to apply this experience in the design and manufacture of devices with the use of flexible printed circuit boards.

Keywords: electronic systems, low frequency vibration, adaptive system, resonance frequency.

Адрес для переписки:

Боцман А.С.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, г. Харьков, Украина
e-mail: bas-2012@yandex.ua

Address for correspondence:

Botsman A.S.
Kharkiv National University of Radio Electronics,
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine
e-mail: bas-2012@yandex.ua

Для цитирования:

Новоселов С.П., Боцман А.С., Невлюдова В.В.
Экспериментальная установка для исследования влияния механических вибраций на выходные параметры радиоэлектронных средств на основе гибких модулей
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 156–162

For citation:

Novoselov S.P., Botsman A.S., Nevliudova V.V.
The experimental setup for research of the influence of mechanical vibrations on the output parameters of electronic systems based on flexible modules
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 156–162

References

1. Kutrovskiy P.V., Talitskiy E.N., Shumarin S.V. Methods of vibration protection devices radio frequency detuning. *Izvestiya instituta tekhnicheskoy fiziki*, 2008, no. 4, pp. 52–55 (in Russian).
2. Mlistkiy V.D., Beglariya V.H., Dubistkiy L.G. *Ispytaniye apparatury i sredstva izmerenij na vozdeystviye vneshnikh faktorov* [Testing devices and measuring instruments to the impact of external factors]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 2003, 567 p. (in Russian)
3. Korobkov A.I. *Ispytaniya radioelektronnoj, elektronno-vychislitel'noj apparatury i ispytatelnoye oborudovaniye* [Testing of electronic, computing devices and testing equipment]. Moscow, Radio i svyaz' Publ., 2002, 272 p. (in Russian)
4. Gludkin O.P. *Metody i ustrojstva ispytaniya RES i EVS* [Methods and devices testing of radioelectronic systems and electronic computing systems]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 2001, 335 p. (in Russian)
5. Steinberg D.S. *Vibrations analysis for electronic equipment*. New York, 1973, 456 p.
6. Royzman V.P. *Investigation of dynamic of gas turbine Engine by identification of rotor supports*, Milano, 1995.
7. Fedorov V.A., Sergeev N.P., Kondrashin A.V. *Kontrol' i ispytaniya v proyektirovanii i proizvodstve radioelektronnykh sredstv* [Inspection and testing in the design and manufacture of of radio electronic equipment]. Moscow, Tehnosfera Publ., 2005, 504 p. (in Russian)
8. Zharikova I.V., Nevliudova V.V. Systemological approach in the study of the parameters of electronic systems. *Tekhnologiya priborostroyeniya*, 2014, no. 2, pp. 40–43 (in Russian).
9. Medvedev A.M., Mylov G.V. *Tekhnologii v proizvodstve elektroniki. Chast III. Gibkiye pechatnye platy* [Technology in the production of electronics. Part III. Flexible printed circuit boards]. Moscow, Grupa IDT Publ., 2008, 488 p. (in Russian)

УДК 681.5.08

Управление чувствительностью инерционного датчика с дифференциальным электростатическим преобразователем

Джилавдари И.З.¹, Мекид С.Н.², Ризноокая Н.Н.¹

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²Университет нефти и минералов короля Фадха,
31261, Дхахран, Саудовская Аравия

Поступила 01.07.2015

Принята к печати 30.10.2015

Формулируется проблема разработки датчика для измерения моментов сил инерции и гравитации с минимальным уровнем шумов и минимально возможной крутильной жесткостью торсионного подвеса подвижной массы, обеспечивающих достижение максимальной чувствительности прибора. Обосновывается возможность решения этой проблемы с помощью дифференциальной емкостной системы, которая одновременно обеспечивает и считывание полезного сигнала, и уменьшение крутильной жесткости. Отмечается, что основным фактором, определяющим минимальную крутильную жесткость, является известный *pull-in* эффект, возникающий в электростатическом конденсаторе с подвижной пластиной. Описывается электромеханическая схема датчика с дифференциальной электростатической системой. Предлагается методика расчета емкости электростатического конденсатора с наклонной пластиной. Проводится расчет момента электрических и механических сил, действующих на подвижную пластину дифференциального конденсатора. Показано, что основной причиной, приводящей к *pull-in* эффекту в дифференциальном конденсаторе, является несимметричность электростатической системы. Вводится параметр несимметричности этой системы. Установлена зависимость резонансной частоты датчика от электрического напряжения и параметра несимметричности. Рассчитываются области квазистатической стабильности и нестабильности системы, границы которых определяются значением данного коэффициента. Проводится расчет конкретной модели датчика. Показано, что для уменьшения резонансной частоты датчика более чем в 10 раз требуются нереально малые значения параметра несимметричности.

Ключевые слова: емкостной датчик, емкостной актюатор, эффект залипания, отрицательная жесткость, устойчивость равновесия, чувствительность датчика.

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@bntu.by

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013 Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@bntu.by

Для цитирования:

Джилавдари И.З., Мекид С.Н., Ризноокая Н.Н.
Управление чувствительностью инерционного датчика с дифференциальным электростатическим преобразователем
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6. – № 2. – С. 163–172

For citation:

Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N.
Controlling sensitivity of the sensor with differential electrostatic transducers
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 163–172

Введение

Инерционные датчики с подвижной массой (ПМ), удерживаемой относительно корпуса с помощью упругого подвеса, такие как линейные и угловые акселерометры, виброметры, гравиметры и гравитационные градиентометры (ГГ), широко используются в измерительной технике. Принцип действия этих датчиков состоит в измерении смещения ПМ относительно корпуса под действием сил инерции или гравитации. Чувствительность этих датчиков ограничивается в основном жесткостью упругого подвеса, тепловыми шумами, шумами $1/f$, а также шумами систем считывания информации и управления [1]. В приборах, предназначенных для измерений на подвижном основании, упругие подвесы должны удовлетворять противоречивым требованиям: они должны, с одной стороны, иметь минимальную жесткость в направлениях осей чувствительности и, с другой стороны, быть максимально жесткими в других направлениях [2].

Один из методов, позволяющий уменьшить жесткость механического подвеса ПМ, состоит в компенсации силы тяжести и сил инерции гидростатическими силами, а также силами магнитного или электростатического поля [3]. Максимальной чувствительности удастся достигнуть в откаченных приборах с электростатическими бесконтактными подвесами. В частности, на основе трехосных линейных электростатических акселерометров, разработанных фирмой *ONERA*, был построен гравитационный градиентометр *EGG* (*Electrostatic Gravity Gradiometer*), который успешно использовался для измерений возмущений гравитационного поля Земли на околоземной орбите по программе *GOCE* (*Gravity Field and Steady-State Ocean Circulation Mission*) Европейского космического агентства с 2009 по 2013 год [4].

В условиях действия силы тяжести или сил инерции, вызванных движением основания, отказаться от использования механических подвесов трудно. Среди любых других механических подвесов торсионный подвес обладает максимальной чувствительностью [5], и это касается приборов любых размеров [6]. Один из возможных путей решения этой проблемы состоит в разработке подвесов, в которых механические силы частично компенсируются действием электрического поля лишь в направлении оси чувствительности прибора. Насколько известно авторам, впервые подобный метод был использован для повышения

чувствительности электрометров с торсионным подвесом и описан в работе [7]. В настоящее время этот метод используется в МЭМС – резонаторах и акселерометрах (см., например, [8–10]).

Ультраточувствительные приборы с электро-механическими подвесами, как правило, имеют емкостные системы считывания информации о перемещениях ПМ (емкостные сенсоры). Емкостные сенсоры обладают рядом достоинств: малое энергопотребление, малые размеры, максимальная стабильность, электромагнитная совместимость и практически рекордная чувствительность [11–14]. В приборах, содержащих емкостные сенсоры, влияние электрического поля эквивалентно действию пружины с отрицательной жесткостью [8, 15]. Этот эффект называют «обратным влиянием» [16] и иногда рассматривают как нежелательное явление.

В измерительных приборах электрические силы, как правило, невелики и мало влияют на резонансную частоту свободных колебаний ПМ. В то же время электростатическое поле широко используется для управления движением упруго подвешенных элементов в МЭМ-актюаторах, которые применяются в таких приборах, как микронасосы, управляемые микрозеркала, ВЧ-переключатели, ВЧ-резонаторы и т.п. [17, 18]. В этих устройствах электростатические силы сравнимы с упругими силами механических элементов и могут превосходить их. Поскольку силы упругости всегда ограничены, а силы электростатического притяжения неограниченно растут при уменьшении зазора между элементами, несущими противоположные заряды, возникает эффект залипания или схлопывания [17, 19], когда эти элементы неудержимо стремятся друг к другу. В ряде устройств, например в микровыключателях или в датчиках со специальными режимами измерений, этот эффект может быть полезным [20, 21], в других устройствах, например в системах управления положением микрозеркал или в микронасосах, он нежелателен, так как может приводить к нарушению работы этих устройств и даже к их разрушению [22]. Таким образом, стремление в максимальной степени уменьшить жесткость упруго подвеса ПМ неизбежно упирается в проблему эффекта залипания.

Понимание процессов, приводящих к залипанию, и необходимость контроля или управления им вызвали многочисленные теоретические и экспериментальные исследования. Этот эффект изучают в различных режимах движения ПМ: в статическом, динамическом, резонансном, в переходном, импульсном [23]. При этом в каждой кон-

кретной задаче приходится преодолевать и конкретные трудности, связанные с нелинейностью емкостных систем. В свою очередь, эффективным способом уменьшения нелинейности емкостных преобразователей является применение дифференциальных схем их включения [12–14, 24, 25].

Цель данной работы состояла в исследовании условий, при которых можно добиться максимального уменьшения жесткости торсионного подвеса в инерционном датчике с дифференциальным электростатическим преобразователем. В этом датчике могут быть объединены и емкостное считывание полезного сигнала, и емкостное управление жесткостью подвеса. Датчик такого типа был предложен в [26].

Описание электрической схемы датчика

Схема датчика показана на рисунке 1. Здесь ПМ представляет собой плоскую проводящую пластину, закрепленную в торсионном подвесе между двумя непроводящими неподвижными пластинами, на каждой из которых имеется пара электродов. Электроды и ПМ образуют 4 конденсатора от C_1 до C_4 . ПМ может поворачиваться под действием полезного сигнала вокруг оси подвеса. При отсутствии измеряемого сигнала ПМ расположена параллельно электродам. Угол поворота ПМ обозначен через φ .

Электроды и ПМ подсоединены к источнику с постоянным напряжением U так, как это показано на рисунке 1. При повороте ПМ расстояние между ПМ и электродами изменяется, что приводит к изменению емкостей. При этом в цепи возникают токи от I_1 до I_4 , текущие через соответствующие конденсаторы. Из направлений этих токов видно, что конденсаторы C_1 и C_3 , как и конденсаторы C_2 и C_4 , соединены параллельно. Поэтому введем обозначения $C_{13} = C_1 + C_3$ и $C_{24} = C_2 + C_4$.

Данная схема позволяет не только уменьшить нелинейность зависимости емкости конденсаторов C_{13} и C_{24} от угла φ , но и уменьшить влияние нежелательной деформации торсиона в направлении, перпендикулярном плоскости электродов, т.е. обеспечить низкую поперечную чувствительность датчика к линейным ускорениям [27]. Действительно, предположим, что под действием силы тяжести ось торсиона сместилась вниз на некоторое расстояние. Тогда емкость конденсатора C_1 увеличится на некоторую величину Δ_1 , и емкость конденсатора C_3 уменьшится примерно на такую же величину Δ_3 , так что емкость $C_{13} = C_1 + C_3 + \Delta_1 - \Delta_3$.

Аналогично изменится и емкость конденсатора C_{24} : $C_{24} = C_2 + C_4 + \Delta_2 - \Delta_4$. Легко видеть, что, если $\Delta_1 \approx \Delta_3$ и $\Delta_2 \approx \Delta_4$, линейные деформации торсиона будут мало сказываться на электрических сигналах.

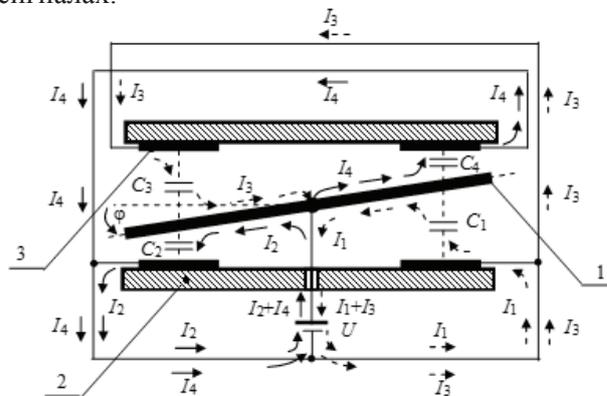


Рисунок 1 – Схема дифференциального электростатического датчика и направления движения токов при вращении подвижной массы против часовой стрелки: 1 – проводящая подвижная масса в виде плоскопараллельной пластины, закрепленная в торсионном подвесе с осью вращения, перпендикулярной плоскости рисунка; 2 – непроводящая подложка; 3 – проводящий электрод. Конденсаторы C_2 и C_4 заряжаются, конденсаторы C_1 и C_3 разряжаются

Figure 1 – A sketch of the differential electrostatic sensor and the currents movement directions, if the proof mass is rotating counter clock wise: 1 – conductive movable mass in the form of a plane-parallel plate, is fixed with the suspension, which has a torsion axis perpendicular to the plane of the figure; 2 – a non-conductive substrate; 3 – a conductive electrode. Capacitors C_2 and C_4 are charging, capacitors C_1 and C_3 are discharging

Расчет момента электрических сил, действующих на подвижную массу с учетом несимметричности емкостной системы

Существуют разные методики расчета электростатических сил между неподвижными электродами и ПМ. В большинстве случаев пренебрегают краевыми эффектами и предполагают, что электрическое поле конденсаторов является однородным, как в плоском конденсаторе, и эта однородность сохраняется при малых поворотах ПМ. При таком подходе получаются сложные формулы, которые трудно исследовать аналитически [25, 28]. Вместе с тем считается, что при исследовании *pull-in* эффектов именно аналитические методы являются наиболее эффективными, ввиду большой чувствительности окрестностей границ стабильности к размеру расчетного шага [22]. В рассматриваемой здесь за-

даче при расчете емкости конденсаторов использован другой подход, более отвечающий симметрии задачи и, как оказалось, позволяющий получать более простые формулы для расчета моментов сил и проводить аналитические расчеты в конечном виде.

Представим, что в датчике, показанном на рисунке 1, конденсатор C_1 , образованный ПМ и соответствующим неподвижным правым электродом, состоит из последовательно соединенных конденсаторов C'_1 и C''_1 , как это показано на рисунке 2а.

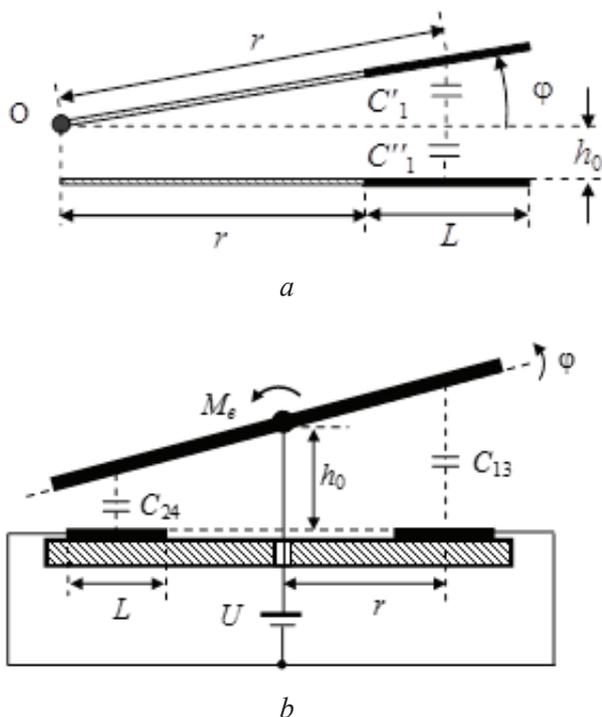


Рисунок 2 – Расчетная модель датчика: а – расчет емкости конденсатора C_1 ; б – эквивалентная схема датчика, показанного на рисунке 1. M_e – момент электростатических сил, действующих на проводящую подвижную массу со стороны двух нижних неподвижных электродов; L – длина нижних электродов; r – расстояние от центра электрода до перпендикуляра к оси вращения

Figure 2 – The computational model of the sensor: а – the calculation of capacitance of the capacitor C_1 ; б – equivalent circuit of the sensor is shown in Figure 1. M_e – the moment of electrostatic forces acting on the conductive movable mass from two lower fixed electrodes; L – length of the lower electrode; r – distance from the center of the electrode up to the perpendicular to the PM's rotation axis

Предположим, что зазоры между пластинами малы по сравнению с остальными геометрическими размерами. Так же, как это сделано в [29] (см. также [30]), можно принять, что электрическое поле в конденсаторе C'_1 является аксиально-симметричным. Тогда емкость:

$$C'_1 = \frac{\varepsilon_0 S}{\phi L} \cdot \ln \frac{r + \frac{L}{2}}{r - \frac{L}{2}} = \frac{C_{01}}{\phi} \frac{h_0}{L} \cdot \ln \frac{a_1}{a_2}, \quad (1)$$

где $C_{01} = \frac{\varepsilon_0 S}{h_0}$; S – площадь одного электрода,

$$a_1 = r - \frac{L}{2}, \quad a_2 = r + \frac{L}{2}.$$

Конденсатор C''_1 – плоский, и будем считать, что его электрическое поле однородное. В этом случае $C''_1 = C_{01}$.

Тогда, введя обозначения $\phi_m = \frac{h_0}{L} \ln \left(\frac{a_1}{a_2} \right)$

и $v = \frac{\phi}{\phi_m}$, искомую емкость между верхним на-

клонным и нижним электродами получим в виде:

$$C_1(\phi) = \frac{C'_1 C''_1}{C'_1 + C''_1} = \frac{C_{01} \phi_m}{\phi_m + \phi} = \frac{C_{01}}{1 + v}. \quad (2)$$

Точно так же емкость C_3 (см. рисунок 1) будет описываться аналогичной формулой:

$$C_3(v) = \frac{C_{03}}{1 + v}. \quad (3)$$

Тогда емкость:

$$C_{13}(v) = C_1(v) + C_3(v) = \frac{C_{13}^0}{1 + v}, \quad (4)$$

где:

$$C_{13}^0 = C_{01} + C_{03}. \quad (5)$$

Точно также найдем, что емкость:

$$C_{24}(v) = \frac{C_{24}^0}{1 - v}, \quad (6)$$

где:

$$C_{24}^0 = C_{02} + C_{04}. \quad (7)$$

Далее требуется вычислить вращающий момент $M_e(\phi)$ электростатических сил, действующий на ПМ, показанный на рисунке 2б. Сначала найдем момент $M_r(\phi)$, действующий на правую сторону ПМ со стороны конденсатора C_{13} . Этот момент найдем из потенциальной энергии конденсатора [29], которая имеет вид:

$$W_{13} = -\frac{1}{2} C_{13}(\phi) U^2, \quad (8)$$

и далее из соотношения [29]:

$$M_r(\varphi) = -\frac{\partial W_{13}(\varphi)}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} U^2 \frac{\partial C_{13}(\varphi)}{\partial \varphi} = \frac{1}{2} \frac{C_{13}^0 U^2}{\varphi_m} \times \frac{1}{(1+\nu)^2}. \quad (9)$$

Момент силы электрического поля $M_l(\varphi)$, действующий на левую часть ПМ, определится формулой, аналогичной формуле (9):

$$M_l(\nu) = \frac{1}{2} \frac{C_{24}^0 U^2}{\varphi_m} \frac{1}{(1-\nu)^2}. \quad (10)$$

Модуль полного момента электрических сил, действующего на ПМ:

$$M_e(\nu) = M_l(\nu) - M_r(\nu) = \frac{1}{2} \frac{U^2}{\varphi_m} \left[\frac{C_{02} + C_{04}}{(1-\nu)^2} - \frac{C_{01} + C_{03}}{(1+\nu)^2} \right]. \quad (11)$$

Будем считать, что в силу нарушения электрической симметрии, вызванной погрешностью изготовления, имеют место соотношения:

$$C_{02} = (1 + \gamma_{01}) C_{01} \quad \text{и} \quad C_{04} = (1 + \gamma_{02}) C_{03}, \quad (12)$$

где γ_{01} и γ_{02} – параметры несимметричности, и, кроме того, $C_{03} = C_{01} = C_0$. В этом случае формула (11) запишется в виде:

$$M_e(\nu) = B \left[\frac{8\nu + \gamma(1+\nu)^2}{(1-\nu^2)^2} \right], \quad (13)$$

где введены обозначения:

$$B = \frac{1}{2} \frac{C_0 U^2}{\varphi_m} \quad \text{и} \quad \gamma = \gamma_{01} + \gamma_{02} \quad (14)$$

Вследствие различных причин на практике несимметричность датчика присутствует всегда. В работе [24] несимметричность использовали при демонстрации эффекта параметрического усиления сигнала в МЕМ-резонаторе.

Кроме момента сил $M_e(\varphi)$ электрического поля, на ПМ действуют механические силы со стороны упругого подвеса. Будем считать, что момент этих сил линейно зависит от угла поворота ПМ относительно оси вращения, так что:

$$M_m(\varphi) = k \varphi, \quad (15)$$

где k – упругий коэффициент, или в других обозначениях:

$$M_m(\nu) = k \varphi_m \nu. \quad (16)$$

При поворотах ПМ моменты $M_e(\varphi)$ и $M_m(\varphi)$ действуют в противоположных направлениях. Результирующий момент электрических и механических сил: $M(\varphi) = M_m(\varphi) - M_e(\varphi)$. (17)

Производная от этого момента по углу φ определяет результирующий коэффициент угловой жесткости. Выделив в этом коэффициенте постоянную составляющую, получим начальное значение результирующего коэффициента угловой жесткости:

$$k_r = k - (\gamma + 8) \frac{B}{\varphi_m}. \quad (18)$$

При заданной величине момента инерции I_z ПМ значение k_r определяет частоту f_0 свободных колебаний ПМ при наличии электрического поля:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k_r}{I_z}}. \quad (19)$$

При отсутствии электрического поля, т.е. при $B = 0$, частота свободных колебаний ПМ описывается формулой:

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{I_z}}. \quad (20)$$

При заданном значении момента инерции I_z именно значение параметра f_0 определяет чувствительность упругого подвеса: чем меньше f_0 , тем больше чувствительность [31]. Из формул (13), (14), (16), (17), полагая $\gamma = 0$, найдем значение электрического напряжения U , при котором достигается заданное значение f_0 :

$$U = \frac{\varphi_m}{2} \sqrt{\frac{k - 4\pi^2 I_z f_0^2}{C_0}} = \pi \varphi_m \sqrt{\frac{I_z}{C_0} (f^2 - f_0^2)}. \quad (21)$$

Для примера рассмотрим расчет датчика, исходные параметры которого указаны в таблице. Тогда зависимость частоты f_0 от напряжения U , полученная из формулы (21), будет иметь вид, показанный на рисунке 3.

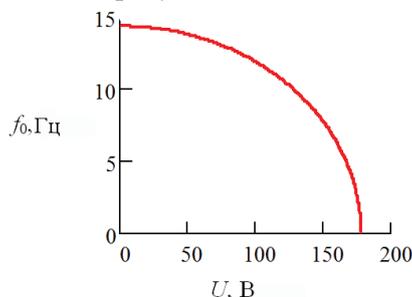


Рисунок 3 – Зависимость резонансной частоты датчика f_0 от электрического напряжения U

Figure 3 – Dependence of the sensor natural frequency f_0 on electric voltage U

Исходные параметры датчика
The design parameters of the sensor

I_2 , кг·м ²	k , Н·м/рад	f , Гц	f_0 , Гц	L , м	r , м	h_0 , мм	C_0 , пФ
$4,912 \cdot 10^{-4}$	4	14,36	2	0,035	0,0525	0,1	123,9

Видно, что частота f_0 изменяется особенно быстро при значениях U , близких к максимальному значению 177,92 В.

Решая уравнение $M(\varphi) = 0$, получим связь между параметром γ и углом φ , где имеет место равновесие механических и электрических сил, действующих на ПМ при бесконечно медленном включении электрического поля, обеспечивающем квазистатическое равновесие датчика, когда кинетической энергией перемещения ПМ из начального положения можно пренебречь. Эта связь, полученная при параметрах датчика из таблицы 1, показана на рисунке 4. Как будет показано в следующей работе авторов, квазистатическое равновесие ПМ возможно в интервале $\gamma_1 < \gamma < \gamma_2$, где уравнение $M(\varphi)=0$ имеет три действительных корня.

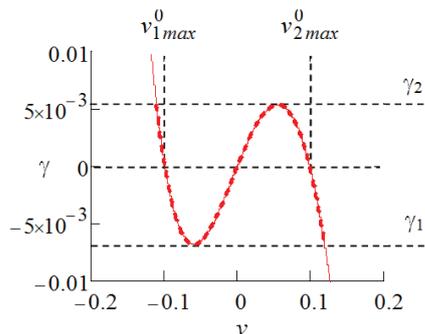


Рисунок 4 – Связь между параметром несимметричности γ и углом φ , полученная из уравнения $M(\varphi) = 0$. Здесь v_{1max}^0 и v_{2max}^0 – максимальные допустимые значения безразмерного угла v

Figure 4 – Relation between the asymmetry parameter γ and the angle φ received from equation $M(\varphi) = 0$. Here, parameters v_{1max}^0 and v_{2max}^0 are the maximum values of a dimensionless angle v

В частном случае, когда $\gamma = 0$, т.е. в симметричном дифференциальном датчике, решая уравнение $M(\varphi) = 0$, найдем максимальный допустимый угол v_{max}^0 квазистатического отклонения ПМ от положения равновесия, при котором эффект залипания будет отсутствовать:

$$v_{max}^0 = \sqrt{1 - \sqrt{1 - (f_0 / f)^2}}. \quad (22)$$

Эта зависимость показана на рисунке 5а. При $f_0 = 2$ Гц угол $v_{max}^0 = \pm 0,099$. Также на рисунках 5b и 5c показаны обычная и логарифмическая зависимости максимальных допустимых положительных γ_2 и отрицательных значений γ_1 параметра γ от отношения частот f_0/f , которые дают представление о реально достижимых минимальных значениях частот f_0 ограниченных несимметричностью конденсаторов. Видно, что обеспечение значений $(f_0/f) < 0,1$ возможно лишь при нереально малых значениях $|\gamma|$.

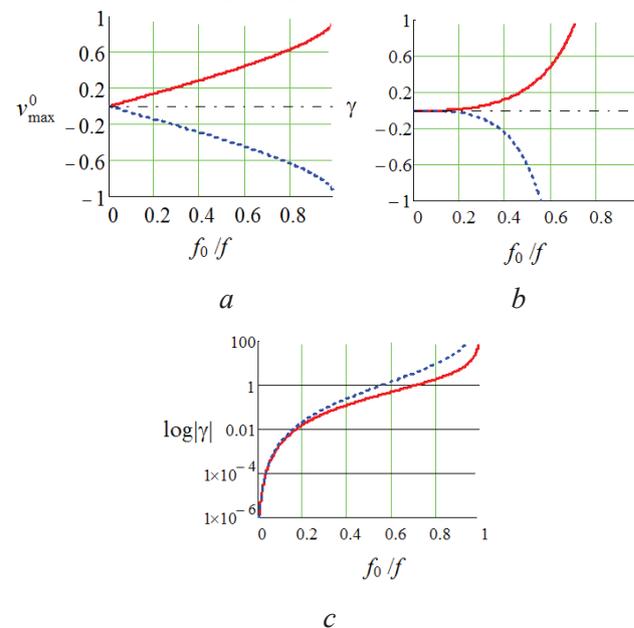


Рисунок 5 – Зависимости допустимого угла отклонения подвижной массы от положения равновесия симметричного датчика ($\gamma = 0$) (а) и параметра несимметричности γ от отношения частот f_0 и f (b и c)

Figure 5 – Dependencies of allowable angle of deflection of the movable mass on its equilibrium position for symmetrical sensor ($\gamma = 0$) (a) and of asymmetry parameter γ on the ratio of frequency f_0 and f (b and c)

Закключение

Емкостные системы считывания полезного сигнала в датчиках, предназначенных для измерений гравитационных и инерционных сил и моментов, обладают рядом преимуществ по сравнению с

датчиками, построенными на других физических принципах, в первую очередь, благодаря низкому уровню шумов и малым габаритам. Применение дифференциальной емкостной системы позволяет уменьшать крутильную жесткость механических подвесов гравиинерциальных датчиков (и, соответственно, увеличить их чувствительность) путем наложения постоянного электрического поля.

В данной работе в режиме квазистатического равновесия подвижной массы установлено, что несимметричность дифференциальной емкостной системы может приводить к неустойчивости датчика, ввиду возникновения известного эффекта прилипания (*pull-in* эффект). Разработана методика расчета датчика, главным образом аналитическая, которая определяет границы устойчивости квазистатического равновесия подвижной массы. Показано, что несимметричность емкостной системы определяет предел уменьшения жесткости подвеса подвижной массы, при этом требование к допустимому значению параметра несимметричности резко возрастает с уменьшением жесткости. В частности, резонансная частота датчика может быть уменьшена в 10 раз, если значение коэффициента несимметричности не превышает нескольких десятых процента.

Дальнейшие исследования датчика с максимально возможной чувствительностью должны включать анализ его динамических характеристик вообще и резонансных характеристик в частности.

Список использованных источников

1. Silvestrin, P. Control and navigation aspects of the new Earth observation missions of the European Space Agency / P. Silvestrin // Annual Reviews in Control. – 2005. – Vol. 29, № 2. – P. 247–260.
2. Liu, H. Design, Fabrication and Characterization of a Micro-Machined Gravity Gradiometer Suspension / H. Liu, W. T. Pike, G. Dou // Ratio. – 2011. – Vol. 11, Issue 12. – P. 11206–11234.
3. Васюков, С. Теория и применение электростатических подвесов / С. Васюков, Г. Дробышев. – М. : Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – 336 с.
4. Douch, K. Ultra-sensitive electrostatic planar acceleration gradiometer for airborne geophysical surveys / K. Douch [et al.] // Measurement Science and Technology. – 2014. – Vol. 25, № 10. – P. 105902.
5. Gravity gradiometer with torsion flexure pivots: Patent No US 8,201,448 B2 / J.B. French, K.A. Carroll. – Date of Patent: Jun. 19, 2012.
6. Carr, D. Parametric amplification in a torsional microresonator / D. Carr [et al.] // Applied Physics Letters. – 2000. – Vol. 77, № 10. – P. 1545–1547.
7. Milatz, J.M.W. The Brownian Motion of Electrometers / J.M.W. Milatz, J.J. van Zolingen // Physica. – 1953. – Vol. 19, Issue 1. – P. 181–194.
8. Capacitance based tunable micromechanical resonators: Patent N:5,640,133 / N.C. MacDonald; F.M. Bertsch; K.A. Shaw; S.G. Adams. – Date of Patent: Jun. 17, 1997
9. Handtmann, M. Sensitivity enhancement of MEMS inertial sensors using negative springs and active control / M. Handtmann [et al.] // Sensors and Actuators A: Physical. – 2002. – Vol. 97–98. – P. 153–160.
10. Park, K.Y. Capacitive sensing type surface micromachined silicon accelerometer with a stiffness tuning capability / K.Y. Park [et al.] // The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems, 25–29 January Heidelberg, Germany, 1998 // Congress & Incoming Service Heidelberg GmbH (CIS), Hahn-Schickard-Gesellschaft, Institute of Micromachining and Information Technology (HSG-IMIT). – Heidelberg, 1998. – P. 637–642.
11. Flokstra, J. MEMS based gravity gradiometer for Space Application / J. Flokstra [et al.] // Cryogenics. – 2009. – Vol. 49, Issue 11. – P. 665–668.
12. Bernstein, J. Low-Noise MEMS Vibration Sensor for Geophysical Applications / J. Bernstein [et al.] // Journal of Microelectromechanical Systems. – 1999. – Vol. 8, № 4. – P. 433–438.
13. Micro-System Inertial Sensing Technology Overview: report / Sandia National Laboratories; head J. Allen. – California, 2009. – 32 p. – SAND2009-3080.
14. Jiang, X. An integrated surface micromachined capacitive lateral accelerometer with $2\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution / X. Jiang [et al.] // Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop, Hilton Head Island of America, South Carolina, USA, June 2–6 2002. – Hilton Head Island, 2002. – P. 202–205.
15. Chuang, W.-Ch. Physical Sensors. Review on the Modeling of Electrostatic MEMS / W.-Ch. Chuang [et al.] // Sensors. – 2010. – Vol. 10, № 6. – P. 6149–6171.
16. Брагинский, В.Б. Измерение малых сил в физических экспериментах / В.Б. Брагинский, А.Б. Манукин. – М. : Наука, 1974. – 152 с.
17. Мухуров, Н.И. Электромеханические микроустройства / Н.И. Мухуров, Г.И. Ефремов. – Минск : Беларуская навука, 2012. – 257 с.
18. Mobki, H. A comprehensive study of stability in an electro-statically actuated micro-beam / H. Mobki [et al.] // International Journal of Non-Linear Mechanics. – 2013. – Vol. 48. – P. 78–85.
19. Микро- и наноинженерия в электронном машиностроении : в 7 т. / Н.Н. Балан [и др.]. – Ивanteeвка МО : НИИ предельных технологий, 2012. – Монография 1: Инженерия туннельных преобразователей. – 204 с.
20. Gupta, R.K. Pull-in dynamics of electrostatically-actuated beams / R.K. Gupta [et al.] // Solid-State Sensor and Actuator Workshop Late News Paper, Hilton Head Island of America, South Carolina, USA, June 2–6 1996. – Hilton Head Island, 1996. – P. 2–6.

21. Dias, R.A. Pull-in-based μg -resolution accelerometer: Characterization and noise analysis / R.A. Dias [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2011. – Vol. 172. № 1. – P. 47–53.
22. Zhang, Y. Numerical and analytical study on the pull-in instability of micro-structure under electrostatic loading / Y. Zhang, Y. Zhao // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2006. – Vol. 127. – P. 366–380.
23. Zhang, W.M. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review / W.M. Zhang [et al.] // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 2014. – Vol. 214. – P. 187–218.
24. Dittmer, J. Modeling and Design of Electrostatic Voltage Sensors Based on Micro Machined Torsional Actuators / J. Dittmer [et al.] // *Nanotechnology 2008: Microsystems, Photonics, Sensors, Fluidics, Modeling, and Simulation – Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*. – 2008. – Vol. 3. – P. 521–524
25. Puers, R. Electrostatic forces and their effects on capacitive mechanical sensors / R. Puers, D. Lapadatu // *Sensors and Actuators A: Physical*. – 1996. – Vol. 56. – Issue 3. – P. 203–210.
26. Differential capacitance torque sensor: US Patent No 8,893,563 / S. Mekid, I. Gilavdary. – Date of Patent: Nov. 25, 2014.
27. Differential capacitive sensor and method of making same: US Patent No 7,610,809 / A. McNeil, Y. Lin, T. Miller. – Date of Patent: Nov. 3, 2009.
28. Elata, D. On the static and dynamic response of electrostatic actuators // *Technical Sciences*. – 2005. – Vol. 53. – № 4. – P. 373–384.
29. Матвеев, А.Н. Электричество и магнетизм: учебн. пособие / А.Н. Матвеев. – М. : Высшая школа, 1983. – 463 с.
30. Gao, L. The Fringing Capacitance of an Inclined Plate Capacitor / L. Gao, D. Zhao // *Fundamental J. Mathematical Physics*. – 2012. – Vol. 2, Issue 1. – P. 11–17.
31. Bernstein, J. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology / J. Bernstein // *Sensors online* [Electronic resource]. – 2003. – Mode of access: <http://www.sensorsmag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970>. – Date of access: 19.02.2015.

Controlling sensitivity of the sensor with differential electrostatic transducers

Gilavdary I.¹, Mekid S.², Riznookaya N.¹

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²King Fahd University of Petroleum & Minerals, Mechanical Engineering Department,
31261, Dhahran, Saudi Arabia

Received 01.07.2015

Accepted for publication 30.10.2015

Abstract. The problem of developing a sensor for measuring of moment forces of inertia and gravitation with minimal noise and minimal rigidity of the torsion suspension of proof mass (PM) is formulated. The possibility to solve this problem by a differential capacitive system, which simultaneously provides forming of the useful signal and reducing the torsion rigidity is shown. Sensor's electromechanical circuit with differential electrostatic system is described. Method of calculating the electrostatic capacitance of the capacitor with an inclined plate is proposed. Calculations of electrical and mechanical forces moment acting on the movable plate of the differential capacitor in quasi-static mode are performed. It is shown that the main factor leading to the pull-in effect in the differential capacitor is the asymmetry of electrostatic system. The coefficient of asymmetry of the differential electrostatic system is introduced. The dependence on voltage of the resonance frequency of the sensor is received. The areas of the quasi-static stability of the system are calculated. It is shown that their boundaries are determined by the value of the coefficient of asymmetry, as well as by the value of the resonant frequency of the PM. It is shown that for reducing the resonant frequency of the sensor in more than ten times an unrealistically low values of the coefficient of asymmetry are required.

Keywords: capacitive sensor, capacitive actuator, pull-in effect, the negative stiffness, stable equilibrium.

Адрес для переписки:

Джилавдари И.З.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: gilavdary@bntu.by

Address for correspondence:

Gilavdary I.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013 Minsk, Belarus
e-mail: gilavdary@bntu.by

Для цитирования:

Джилавдари И.З., Мекид С.Н., Ризноокая Н.Н.
Управление чувствительностью инерционного датчика с дифференциальным электростатическим преобразователем
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6. – № 2. – С. 163–172

For citation:

Gilavdary I., Mekid S., Riznookaya N.
Controlling sensitivity of the sensor with differential electrostatic transducers
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 163–172

References

1. Silvestrin P. Control and navigation aspects of the new Earth observation missions of the European Space Agency. *Annual Reviews in Control*, 2005, vol. 29, no. 2, pp. 247–260.
2. Liu H., Pike W. T., Dou G. Design, Fabrication and Characterization of a Micro-Machined Gravity Gradiometer Suspension. *Ratio*, 2011, vol. 11, pp. 11206–11234.
3. Vasykov S., Drobishev G. *Teoriya i primeniya elektrostatischeskikh podvesov* [Theory and Application of electrostatic suspension]. Moscow, MSTU Publ., 2009, 336 p. (in Russian)
4. Douch K., Christophe B., Foulon B., Panet I., Pajot-Mtivier G., Diament M. Ultra-sensitive electrostatic planar acceleration gradiometer for airborne geophysical surveys. *Measurement Science and Technology*, 2014, vol. 25, no. 10, pp. 105902.
5. French J.B., Carroll K.A. Gravity gradiometer with torsion flexure pivots. Patent US, no. 8,201,448 B2, 2012.
6. Carr D., Evoy S., Sekaric L., Craighead H., Parpia J. Parametric amplification in a torsional microresonator. *Applied Physics Letters*, 2000, vol. 77, no. 10, pp. 1545–1547.
7. Milatz J.M. W., van Zolingen J.J. The Brownian Motion of Electrometers. *Physica*, 1953, vol. 19, pp. 181–194.
8. MacDonald N.C. Bertsch F.M. Shaw K.A., Adams S.G. Capacitance based tunable micromechanical resonators. Patent US no. 5,640,133, 1997.
9. Handtmann M., Aigner R., Meckes A., Wachutka G.K.M. Sensitivity enhancement of MEMS inertial sensors using negative springs and active control. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2002, vol. 97–98, pp. 153–160.
10. Park, K.-Y., Lee Ch.-W., Jang H.-S., Oh Y., Ha B. Capacitive sensing type surface micromachined silicon accelerometer with a stiffness tuning capability. *The Eleventh Annual International Workshop on Micro Electro Mechanical Systems*, Heidelberg, Germany, 1998, pp. 637–642.
11. Flokstra J., Cuperus R., Wiegerink R.J., van Essen M.C. MEMS based gravity gradiometer for Space Application. *Cryogenics*, 2009, vol. 49, pp. 665–668.
12. Bernstein J., Miller R., Kelley W., Ward P. Low-Noise MEMS Vibration Sensor for Geophysical Applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*, 1999, vol. 8, no. 4, pp. 433–438.
13. Allen J. *Micro-System Inertial Sensing Technology Overview: report SAND2009-3080*. California, Sandia National Laboratories, 2009, 32 p.
14. Jiang X., Wang F., Kraft M., Boser B.E. An integrated surface micromachined capacitive lateral accelerometer with $2\mu\text{G}/\sqrt{\text{Hz}}$ resolution. *Solid-State Sensor, Actuator and Microsystems Workshop*. South Carolina, USA, 2002, pp. 202–205.
15. Chuang Wan-Chun, Lee Hsin-Li, Chang Pei-Zen, Hu Yuh-Chung *Physical Sensors. Review on the Modeling of Electrostatic MEMS*. *Sensors*, 2010, vol. 10, № 6, pp. 6149–6171.
16. Braginskij V. B. *Izmereniye malykh sil v fizicheskikh eksperimentakh* [Measurement of small forces in physics experiments]. Moscow, Nauka Publ., 1974, 152 p. (in Russian)
17. Myhyrov N.I., Efremov G.I. *Elektrromekhanicheskiye mikroustrojstva* [Electromechanical microdevices]. Minsk, Belaruskaya navuka Publ., 2012, 257 p. (in Russian)
18. Mobki H., Rezazadeh Gh., Sadeghi M., Vakili-Tahami F., Seyyed-Fakhrabadi M.-M. A comprehensive study of stability in an electro-statically actuated micro-beam. *International Journal of Non-Linear Mechanics*, 2013, vol. 48, pp. 78–85.
19. Balan N.N., Vasin V.A., Ivashov E.N., Lvov B.G., Nevskij A.B. *Ingeneriya tynnelnykh preobrazovatelej* [Engineering tunnel converters]. *Ivanteyevka, NII predel'nykh tekhnologij Publ.*, 2012, 204 p. (in Russian)
20. Gupta R.K., Hung E.S., Yang Y.-J., Ananthasuresh G.K., Senturia S.D. Pull-in dynamics of electrostatically-actuated beams. *Solid-State Sensor and Actuator Workshop Late News Paper*. South Carolina, USA, 1996, pp. 2–6.
21. Dias R.A., Cretu E., Wolffenbittel R., Rocha L.A. Pull-in-based μg -resolution accelerometer: Characterization and noise analysis. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2011, vol. 172, no. 1, pp. 47–53.
22. Zhang Y., Zhao Y. Numerical and analytical study on the pull-in instability of micro-structure under electrostatic loading. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2006, vol. 127, pp. 366–380.
23. Zhang W.M., Yan H., Peng Zhi-Ke, Meng G. Electrostatic pull-in instability in MEMS/NEMS: A review. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2014, vol. 214, pp. 187–218.
24. Dittmer J., Dittmer A., Judaschke R., Büttgenbach S. Modeling and Design of Electrostatic Voltage Sensors Based on Micro Machined Torsional Actuators. *Technical Proceedings of the 2008 NSTI Nanotechnology Conference and Trade Show*. Danville, 2008, vol. 3, pp. 521–524.
25. Puers R., Lapadatu D. Electrostatic forces and their effects on capacitive mechanical sensors. *Sensors and Actuators A: Physical*, 1996, vol. 56, pp. 203–210.
26. Mekid S., Gilavdary I. Differential capacitance torque sensor. Patent US no. 8,893,563, 2014.
27. McNeil A., Lin Y., Miller T. Differential capacitive sensor and method of making same. Patent US no. 7,610,809, 2009.
28. Elata D. On the static and dynamic response of electrostatic actuators. *Technical Sciences*, 2005, vol. 53, no. 4, pp. 373–384.
29. Matveev A.N. *Elektrichestvo i magnetizm* [Electricity and Magnetism]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1983, 463 p. (in Russian)
30. Gao L., Zhao D. The Fringing Capacitance of an Inclined Plate Capacitor. *Fundamental J. Mathematical Physics*, 2012, vol. 2, pp. 11–17.
31. Bernstein J. An Overview of MEMS Inertial Sensing Technology. *Sensors online* [Electronic resource]. Available at: <http://www.sensormag.com/sensors/acceleration-vibration/an-overview-mems-inertial-sensing-technology-970>. Date of access: 19.02.2015.

УДК 535.37

Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля на основе трехкомпонентных растворов органических красителей

Попечиц В.И.

Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

Поступила 06.04.2015

Принята к печати 27.10.2015

Исследованы спектральные свойства ряда трехкомпонентных растворов органических красителей различных классов, подвергнутых облучению гамма- и рентгеновским излучением. Исходя из критериев отбора многокомпонентных растворов красителей для целей радиационной дефектоскопии (наличие у красителей интенсивных полос поглощения в видимой области спектра, хорошая растворимость в выбранном растворителе, отсутствие химического взаимодействия друг с другом и с образующимися продуктами радиационной деструкции красителей, существенное различие скоростей радиационной деструкции красителей, низкий фэдинг), показано, что наиболее перспективными являются растворы следующих пар красителей (один из которых поглощает в коротковолновой, другой – в длинноволновой областях видимого спектра): кислотный желтый светопрочный + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С, кислотный желтый светопрочный + кислотный ярко-голубой 3, трипафлавин + метиленовый голубой, кислотный алый + метиленовый голубой, уранин + метиленовый голубой, родамин 6Ж + кислотный ярко-голубой 3, эозин натрий + кислотный ярко-голубой 3, эозин натрий + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С, ланазоль оранжевый + кислотный ярко-голубой 3, ланазоль оранжевый + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С.

Ключевые слова: растворы органических красителей, регистрирующие системы, радиационный неразрушающий контроль.

Адрес для переписки:

Попечиц В.И.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: papechyts@bsu.by

Address for correspondence:

Papechyts V.I.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: papechyts@bsu.by

Для цитирования:

Попечиц В.И.
Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля на основе трехкомпонентных растворов органических красителей
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6. – № 2. – С. 173–180

For citation:

Papechyts V.I.
The registering systems for the radiation nondestructive control on the basis of the three-component organic dyes solutions
Devices and Methods of Measurements
2015, Vol. 6, No 2, pp. 173–180

Введение

При проведении радиационного неразрушающего контроля материалов и изделий различного состава и структуры используются источники ионизирующих излучений, методы и приборы радиационной физики и радиационной химии [1–3]. Растворы органических красителей в органических и неорганических растворителях, а также в полимерных матрицах (окрашенные полимерные пленки) имеют интенсивные полосы поглощения в видимой области спектра (определенный цвет), что указывает на возможность их применения в качестве детекторов радиационной дозы [4, 5].

В ряде работ, например [6–9], было показано, что при облучении растворов красителей или других сложных органических соединений, интенсивность длинноволновой полосы спектра поглощения уменьшается, т.е. в результате происходящих в растворе радиационно-химических процессов растворы обесцвечиваются. В коротковолновой области спектра возникают новые полосы поглощения продуктов радиационной деструкции. Необратимая радиационная деструкция красителей (радиационное обесцвечивание) в конденсированных средах вызывается в основном окислением красителей кислородсодержащими радикалами и ион-радикалами, образующимися в результате радиолитического расщепления растворителей. В обесцвечивании растворов красителей принимает также участие относительно стабильный продукт радиолитического расщепления растворителей – пероксид водорода. По уменьшению интенсивности длинноволновой полосы спектра поглощения облученных растворов красителей (степени обесцвечивания) можно определить величину радиационной дозы, воздействовавшей на раствор. В работах [9–11] показано, что для этого удобнее использовать многокомпонентные растворы красителей, в которых под действием ионизирующего излучения происходит изменение цвета раствора, зависящее от времени облучения, исходной концентрации и химической природы красителей, физико-химических свойств используемого растворителя, спектрального состава и радиационной дозы ионизирующего излучения. Первоначальный цвет необлученного многокомпонентного раствора можно устанавливать, создавая определенную концентрацию каждого из входящих в раствор красителей. Наиболее простым многокомпонентным раствором является трехкомпонентный раствор, содержащий два красителя, поглощающих в

разных спектральных областях видимого диапазона света, и растворитель.

Если между источником ионизирующего излучения и многокомпонентным раствором красителей поместить материал или изделие, то через некоторое время облучения изменение цвета раствора в определенном месте будет коррелировать с величиной радиационной дозы, воздействовавшей на данный участок раствора, и, следовательно, по цветовой структуре отпечатавшегося на растворе изображения можно судить о внутренней структуре объекта исследования (о наличии полостей, вкраплений, неоднородностей и других дефектов) [11]. Глаз человека более точно реагирует на изменение цвета, чем на изменение контраста черно-белого или насыщенности одноцветного изображения [12].

Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля материалов и изделий на основе трехкомпонентных жидких и твердых растворов органических красителей ранее не применялись, хотя они обладают рядом преимуществ по сравнению с применяющимися регистрирующими системами: имеют низкую стоимость, не требуют источников питания, удобны в практическом использовании.

Целью работы являлась разработка и создание перспективных в практическом использовании регистрирующих систем для радиационного неразрушающего контроля материалов и изделий на основе трехкомпонентных растворов красителей различных классов.

Основная часть

Ниже приведены результаты исследования радиационной стойкости и фэдинга (изменение спектральных свойств раствора после прекращения облучения) трехкомпонентных растворов красителей нескольких классов и модифицированных добавками кислот и щелочей растворов с целью определения возможности их использования в качестве регистрирующих систем для визуального радиационного неразрушающего контроля внутренней структуры материалов и изделий. В качестве объектов исследования использовались жидкие (водные, водно-спиртовые и спиртовые) и твердые (окрашенные полимерные пленки) многокомпонентные растворы органических красителей различных классов: арилметановые, ксантоновые, акридиновые, кислотные, тиазиновые, полиметиновые и др. Применялись спектроскопические

чистые красители. Растворы облучались на гамма-установке «МРХу-25М», в которой в качестве источника гамма-излучения используется ^{60}Co (мощность дозы облучения изменялась в диапазоне 2–0,5 Гр/с), а также на рентгеновском дифрактометре «Дрон 2М» (напряжение на рентгеновской трубке составляло 22 кВ, электрический ток в рентгеновской трубке – 10 мА). На спектрометре PV 1251 «Solar» перед облучением, непосредственно после облучения и через определенные промежутки времени после облучения записывались спектры поглощения растворов красителей.

На рисунках 1 и 2 представлены в относительных единицах спектры поглощения необлученного и облученного в течение различного времени водного раствора, содержащего два красителя, один из которых поглощает в коротковолновой, а другой – в длинноволновой области видимого спектра (D_0 – оптическая плотность в спектре необлученного раствора). Из рисунков видно, что цвет водного раствора фуксин основание + метиленовый голубой (рисунок 1) будет изменяться с увеличением дозы облучения более сильно, чем цвет водного раствора кислотный алый + кислотный ярко-голубой 3 (рисунок 2). Во втором случае изменения интенсивности полос поглощения красителей происходят почти синхронно, т.е. цвет раствора практически не будет изменяться с увеличением дозы облучения, будет уменьшаться лишь насыщенность цвета. Поэтому предпочтительнее использовать трехкомпонентный раствор, спектральные характеристики которого представлены на рисунке 1.

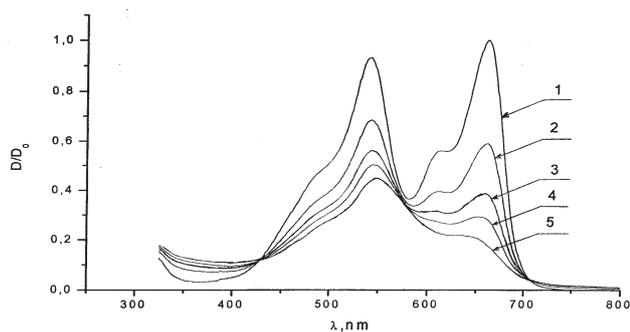


Рисунок 1 – Спектры поглощения раствора фуксин основание ($\lambda_m = 540$ нм) + метиленовый голубой ($\lambda_m = 670$ нм) в воде: необлученный раствор (1), гамма-облученный в течение 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 мин (5). Мощность дозы гамма облучения – 72 Р/с (0,63 Гр/с)

Figure 1 – Absorption spectra of the solution of basic fuchsin ($\lambda_m = 540$ nm) + methylene blue ($\lambda_m = 670$ nm) in water: unirradiated solution (1), gamma-irradiated for 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 min (5). The dose rate of gamma irradiation – 72 R/s (0,63 Gy/s)

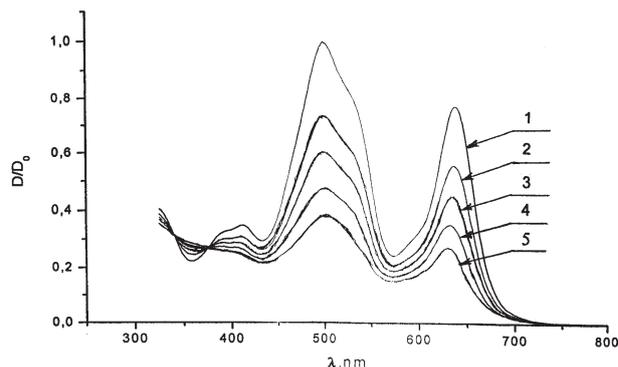


Рисунок 2 – Спектры поглощения раствора кислотный алый ($\lambda_m = 495$ нм) + кислотный ярко-голубой 3 ($\lambda_m = 640$ нм) в воде: необлученный раствор (1), гамма-облученный в течение 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 мин (5). Мощность дозы гамма облучения – 72 Р/с (0,63 Гр/с)

Figure 2 – Absorption spectra of the solution of acid scarlet ($\lambda_m = 495$ nm) + acid bright-blue G ($\lambda_m = 640$ nm) in water: unirradiated solution (1), gamma-irradiated for 5 (2), 10 (3), 15 (4), 20 min (5). The dose rate of gamma irradiation – 72 R/s (0,63 Gy/s)

Таким образом, при использовании трехкомпонентного раствора красителей в качестве регистрирующей среды для целей дефектоскопии необходимо, чтобы красители в данном растворе имели интенсивные электронно-колебательные полосы поглощения в видимой области спектра, хорошо растворялись в выбранном растворителе, химически не взаимодействовали друг с другом и с образующимися продуктами радиационной деструкции красителей, имели существенно различающиеся скорости радиационной деструкции (в этом случае изменения цвета соседних участков раствора будут наиболее чувствительны к изменению величин радиационной дозы, воздействовавших на эти участки). Последнее требование к растворам наглядно проиллюстрировано на рисунках 3 и 4, на которых в полулогарифмическом масштабе представлены величины интенсивностей в максимумах полос поглощения, входящих в трехкомпонентный раствор двух красителей, в зависимости от времени облучения раствора, т.е. от величины воздействовавшей на раствор радиационной дозы. Ясно, что использование раствора, спектральные характеристики которого представлены на рисунке 3, в качестве регистрирующей среды для радиационного неразрушающего контроля материалов и изделий более предпочтительно, чем раствора, характеристики которого представлены на рисунке 4. Важную роль играет также спектральный диапазон между максимумами спектров

двух красителей в трехкомпонентном растворе. Как правило, чем он больше, тем резче меняется цвет раствора при облучении.

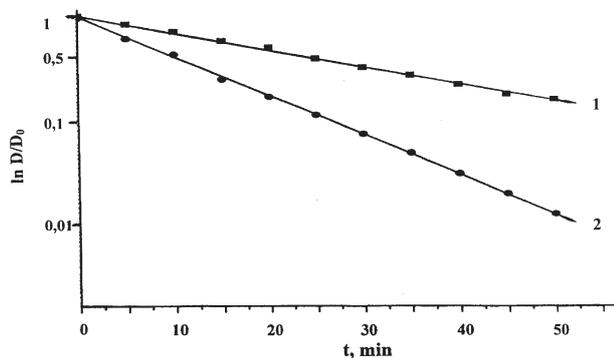


Рисунок 3 – Зависимость нормированной интенсивности поглощения в максимуме длинноволновых полос раствора трипафлавин (1) + малахитовый зеленый (2) в воде от времени облучения раствора

Figure 3 – Dependence of normalized intensity of the absorption at the maximum wavelength bands of tripaflavine solution (1) + malachite green (2) in water on the irradiation time of solution

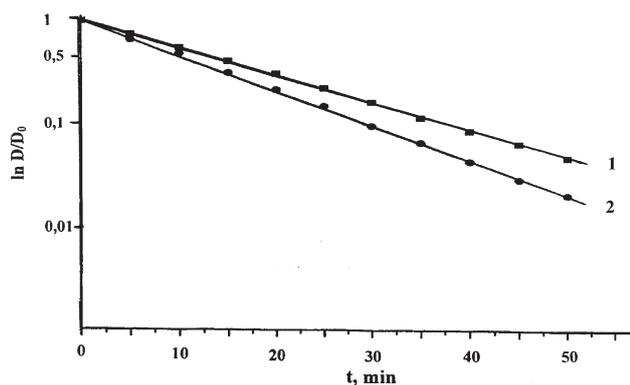


Рисунок 4 – Зависимость нормированной интенсивности поглощения в максимуме длинноволновых полос раствора родамин 6Ж (1) + малахитовый зеленый (2) в воде от времени облучения раствора

Figure 4 – Dependence of normalized intensity of the absorption at the maximum wavelength bands rhodamine 6G solution (1) + malachite green (2) in water on the irradiation time of solution

Подобные изменения спектров поглощения наблюдались для водно-спиртовых и спиртовых многокомпонентных растворов красителей, только скорости радиационной деструкции красителей в водно-спиртовых растворах были ниже, чем в водных, а в чисто спиртовых ниже, чем в водно-спиртовых. Наибольшая скорость радиационной деструкции красителей наблюдалась для водных многокомпонентных растворов. В твердых рас-

творах (окрашенные полимерные пленки поливинилового спирта, полистирола и др.) характерные скорости радиационной деструкции красителей были примерно на два порядка меньше, чем в водных растворах.

Проведенные ранее исследования [6, 7] показали, что необратимая радиационная деструкция красителей в растворах происходит в результате химического взаимодействия красителей с короткоживущими кислородсодержащими радикалами и ион-радикалами, которые возникают в результате радиолитического разложения растворителей, а также с относительно стабильным продуктом радиолитического разложения растворителей – пероксидом водорода.

При практическом применении жидких и твердых многокомпонентных растворов красителей в качестве регистрирующих систем радиационной дозы важно, чтобы растворы красителей обладали низким фэдингом, т.е. чтобы изменения цвета облученных участков раствора после прекращения воздействия радиации на раствор красителей были минимальными.

Для определения фэдинга растворов двух красителей проведены исследования зависимости интенсивностей спектров поглощения наполовину обесцвеченных растворов (по красителю, имеющему более интенсивную полосу поглощения в видимой области спектра) в зависимости от времени хранения раствора в темноте. Растворы хранились в темноте, чтобы исключить их возможную фотодеструкцию. Низким фэдингом обладали водные, спиртовые и водно-спиртовые растворы следующих красителей: малахитовый зеленый, кислотный алый, метиленовый голубой, кислотный ярко-голубой 3, кислотный желтый светопрочный, ланазоль оранжевый, родамин С, кислотный зеленый антрахиноновый H2C и др.

Также было исследовано влияние пероксида водорода на обесцвечивание растворов красителей. В качестве растворителя использовалась дистиллированная вода. В раствор красителя (концентрация красителя $3,5 \cdot 10^{-5}$ М) добавлялся 3-процентный раствор пероксида водорода в соотношении 10 мл раствора красителя на 5 мл раствора пероксида водорода. Спектры поглощения записывались через определенные промежутки времени. В качестве примера на рисунке 5 приведена зависимость относительной интенсивности длинноволновой полосы спектра поглощения водного раствора эозина натрия, содержащего пероксид водорода, от времени хранения раствора.

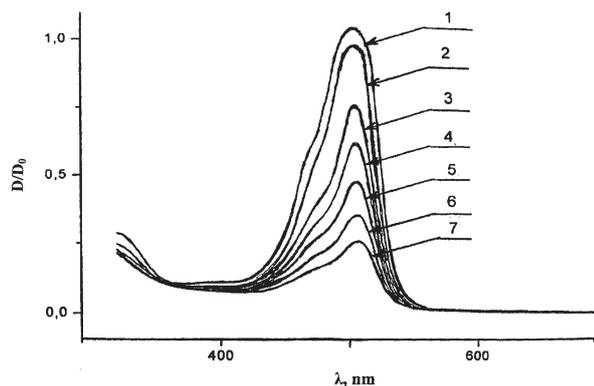


Рисунок 5 – Зависимость спектра поглощения раствора эозина натрия в воде с добавлением H_2O_2 от времени хранения: 30 мин (1), 4 (2), 11 (3), 14 (4), 18 (5), 21 (6); 25 сут (7)

Figure 5 – Dependence of the absorption spectrum of eosin sodium solution in water with adding H_2O_2 on storage time: 30 min (1), 4 (2), 11 (3), 14 (4), 18 (5), 21 (6); 25 days (7)

Органические красители по обесцвечиванию под действием пероксида водорода условно можно разделить на 3 группы: быстро обесцвечивающиеся (высокий фэдинг): красители класса полиметиновых, малахитовый зеленый, фуксин основание, бриллиантовый зеленый, и др. (обесцветились более чем в 10 раз за 3 сут); средне обесцвечивающиеся (средний фэдинг): родамин 6Ж, эозин-натрий, уранин, акридиновый желтый, метиленовый голубой, конго красный и др. (обесцветились в 2 раза в течение примерно 10 сут); относительно стойкие к влиянию пероксида водорода (низкий фэдинг): желтый светопрочный, ланазоль оранжевый Г, родамин С, кислотный ярко-голубой 3, триафлавин, метиловый оранжевый, кислотный зеленый антрахиноновый Н2С и др. (по прошествии 10 сут эти красители обесцветились менее чем на треть).

Заключение

Исходя из указанных выше критериев отбора многокомпонентных водных растворов красителей для целей радиационной дефектоскопии, отобраны следующие пары красителей (один из которых поглощает в коротковолновой, другой – в длинноволновой областях видимого спектра): кислотный желтый светопрочный + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С, кислотный желтый светопрочный + кислотный ярко-голубой 3, триафлавин + метиленовый голубой, кислотный алый + метиленовый голубой, уранин + метилено-

вый голубой, родамин 6Ж + кислотный ярко-голубой 3, эозин натрий + кислотный ярко-голубой 3, эозин натрий + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С, ланазоль оранжевый + кислотный ярко-голубой 3, ланазоль оранжевый + кислотный зеленый антрахиноновый Н2С.

Проведенные с тестовыми структурами испытания (тестовые структуры накладывались на растворы и облучались на рентгеновской установке ДРОН 2) показали, что эти растворы вполне пригодны для использования в качестве визуализаторов жестких излучений при проведении неразрушающего контроля материалов и изделий. Модификация растворов добавлением в них ортофосфорной кислоты и щелочи (КОН, NaOH) позволяет увеличить чувствительность определенных растворов к гамма- и рентгеновскому излучению примерно на 10–15 % и несколько улучшить цветоконтрастные характеристики облученных растворов.

Предложенные регистрирующие системы для радиационного неразрушающего контроля материалов и изделий на основе трехкомпонентных растворов органических красителей обладают рядом преимуществ по сравнению с применяющимися регистрирующими системами: имеют низкую стоимость, не требуют источников питания, работают в широком диапазоне доз ионизирующего излучения, удобны в практическом использовании.

Список использованных источников

1. Пикаев, А.К. Современная радиационная химия. Основные положения. Экспериментальная техника и методы / А.К. Пикаев. – М.: Наука, 1985. – 375 с.
2. Черняев, А.П. Взаимодействие ионизирующего излучения с веществом / А.П. Черняев. – М.: Физматлит, 2004. – 152 с.
3. Белоус, Д.А. Радиация, биосфера, технология / Д.А. Белоус. – СПб.: ДЕАН, 2004. – 448 с.
4. Мейстер, Т.Г. Электронные спектры многоатомных молекул / Т.Г. Мейстер. – Л.: Изд. ЛГУ, 1969. – 206 с.
5. Бахшиев, Н.Г. Введение в молекулярную спектроскопию / Н.Г. Бахшиев. – Л.: Изд. ЛГУ, 1987. – 215 с.
6. Perez, G. Formation of fluoranthene and nitrofluoranthenes by gamma radiolysis / G. Perez, R. Bassaneli, E. Lilla, C. Polcaro, G. Caponecchi // Chemosphere. – 1989. – Vol. 19, № 8/9. – P. 1153–1161.
7. Talamoni, J. Gamma-radiolysis of hydroquinone in methanol solution / J. Talamoni, P.J.M. Cordeiro // Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters. – 1990. – Vol. 145, № 1. – P. 61–68.
8. Gupta, A.K. Radiolysis of sodium and potassium tetraphenylborate in aqueous systems / A.K. Gupta,

R.J. Hanrahan, D.D. Walker // Russian Journal Physical Chemistry. – 1991. Vol. 95, № 9. – P. 3590–3594.

9. Papechyts, V.I. Effect of γ -irradiation on the absorption spectra of the solutions of acid dyes / V.I. Papechyts // Journal of Applied Spectroscopy. – 2003. – Vol. 70, № 1. – P. 34–37.

10. Попечиц, В.И. Влияние гамма-облучения на спектральные характеристики растворов ксантеновых красителей / В.И. Попечиц // Вестник БГУ. Серия 1. – 2008. – № 2. – С. 49–52.

11. Гончаров, В.К. Исследование воздействия высокоэнергетического излучения на вещество с целью создания новых материалов и технологий / В.К. Гончаров, К.В. Козадаев, В.И. Попечиц, М.В. Пузырев // Вестник БГУ. Серия 1. – 2010. – № 1. – С. 3–10.

12. Кухарчик, Л.В. Цвет в ЖК дисплее, модели цвета, цветовосприятие / Л.В. Кухарчик, Д.И. Сагайдак, В.И. Попечиц, Г.И. Тимофеева. – Минск : Изд. БГУ, 2003. – 199 с.

The registering systems for the radiation nondestructive control on the basis of the three-component organic dyes solutions

Papechyts V.I.

*A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University,
Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus*

Received 06.04.2015

Accepted for publication 27.10.2015

Abstract. Spectral properties of a number of three-component organic dyes of various classes solutions subjected to radiation by gamma and x-ray radiation are investigated. Based on the criteria for the selection of multi-component dye solutions for radiation defectoscopy (presence of dyes intense absorption bands in the visible region of the spectrum, good solubility in the selected solvent, no chemical interaction with each other and with the product of dyes radiation degradation, a significant difference in the rates of radiation degradation of dyes, low fading), it shows that the most promising solutions of the following pairs of dyes (one of which absorbs short-wave, the other – in the longer wavelengths of the visible spectrum): acid yellow fast light + acid green anthraquinone N2B, acid yellow fast light + acid bright blue G, tryptaflavine + methylene blue, acid scarlet + methylene blue, uraninite + methylene blue, rhodamine 6G + acid bright blue G, eosin sodium + acid bright blue G, eosin sodium + acid green anthraquinone N2B, lanazol orange + acid bright blue G, lanazol orange + acid green anthraquinone N2B.

Keywords: organic dyes solutions, registering systems, radiation nondestructive control.

Адрес для переписки:

Попечиц В.И.
Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь
e-mail: papechyts@bsu.by

Address for correspondence:

Papechyts V.I.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov st., 7, 220045, Minsk, Belarus
e-mail: papechyts@bsu.by

Для цитирования:

Попечиц В.И.
Регистрирующие системы для радиационного неразрушающего
контроля на основе трехкомпонентных растворов органических
красителей
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6. – № 2. – С. 173–180

For citation:

Papechyts V.I.
The registering systems for the radiation nondestructive control on the
basis of the three-component
organic dyes solutions
Devices and Methods of Measurements
2015, Vol. 6, No 2, pp. 173–180

References

1. Pikaev A.K. *Sovremennaya radiatsionnaya khimiya. Osnovniye polozheniya. Experementalnaya tekhnika i metody* [Modern radiation chemistry. The main provisions. Experimental techniques and methods]. Moscow, Nauka Publ., 1985, 375 p. (in Russian).
2. Chernyaev A.P. *Vzaimodejstviye ioniziruyushego izlucheniya s veschestvom* [Interaction of ionizing radiation with matter]. Moscow, Physmathlit. Publ. 2004, 152 p. (in Russian).
3. Belous D.A. *Radiatsiya, biosfera, tekhnologiya* [Radiation, biosphere, technology]. St. Peterburg, DEAN Publ., 2004, 448 p. (in Russian).
4. Meister T.G. *Elektronniye spektry mnogoatomykh molekul* [Electronic spectra of polyatomic molecules]. Leningrad, Publ. House LGU, 1969, 206 p. (in Russian).
5. Bakhshiyev N.G. *Vvedeniye v molekuliarnuyu spektroskopiyu* [Introduction to molecular spectroscopy]. Leningrad, Publ. House. LGU, 1987, 215 p. (in Russian).
6. Perez G., Bassaneli R., Lilla E., Polcaro C., Caponecchi G. Formation of fluoranthene and nitrofluoranthenes by gamma radiolysis. *Chemosphere*, 1989, vol. 19, no 8/9, pp. 1153–1161.
7. Talamoni J. Gamma-radiolysis of hydroquinone in methanol solution / J.Talamoni, P.J.M.Cordeiro // *Journal Radioanalytical and Nuclear Chemistry Letters* – 1990. – V. 145, № 1, P. 61 – 68.
8. Gupta K., Hanrahan R.J., Walker D.D. Radiolysis of sodium and potassium tetraphenylborate in aqueous systems. *Russian Journal Physical Chemistry*, 1991, vol. 95, no 9, pp. 3590–3594.
9. Papechyts V.I. Effect of γ -irradiation on the absorption spectra of the solutions of acid dyes. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2003, vol. 70, no 1, pp. 34–37.
10. Papechyts V.I. Influence of gamma radiation on the spectral characteristics of xanthene dyes solutions. *Vestnik BGU. Seriya 1*, 2008, no. 2, pp. 49–52 (in Russian).
11. Goncharov V.K., Kozadaev K.V., Papechyts V.I., Puzyrev M.V. Study the impact of high-energy radiation with matter to create new materials and technologies. *Vestnik BGU. Seriya 1*, 2010, no. 1, pp. 3–10 (in Russian).
12. Kukharchyk L.V., Sagaidak D.I., Papechyts V.I., Timofeeva G.I. *Tsvet v ZHC displeye, modeli tsveta, tsvetovospriyatiye* [Color in LC display, color models, color perception]. Minsk, Publ. House BGU, 2003, 199 p. (in Russian).

УДК 620.179.14/15

Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения

Бусько В.Н.

Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила 17.08.2015

Принята к печати 05.11.2015

Ситуация, когда металл конструкции подвергается одновременному воздействию двух и более источников простых напряжений широко распространена в машиностроении, авиастроении, строительстве. Усталостная долговечность материала в результате бигармонического нагружения, в 1,5–4 раза ниже, чем одночастотном. В отличие от одночастотного при бигармоническом нагружении за счет интенсификации процесса накопления усталостных повреждений происходит ускоренное наступление процесса разрушения конструкции. Процесс накопления усталостной повреждаемости в материале при бигармоническом нагружении отражает более близкую к реальности ситуацию в конструкции. Цель работы – создание эффективной малогабаритной установки для испытаний и исследований на усталость. Для решения поставленных задач разработана и изготовлена лабораторная установка для испытания и исследования ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. При исследованиях использовался магнитный метод эффекта Баркгаузена. В работе представлена конструкция установки, подробно описан принцип действия, а также приведены основные технические характеристики. Принцип работы основан на использовании бигармонического нагружения на оба конца образца с использованием двух электродвигателей и двух специальных силовозбудителей в виде подшипников качения. Установка и методика испытаний образцов путем независимого регулирования двухчастотных циклических нагружений позволяет моделировать состояние исследуемого образца, приближенного к реальным условиям работы конструкции. Установка позволяет более детально исследовать трещиностойкость материала, стадии распространения усталостных трещин, выявлять новые закономерности развития процесса усталости. В отличие от аналогов установка имеет малые размеры и вес (длина образцов – до 0,2 м; ширина – 0,13 м; высота – 0,25 м; вес – 12 кг) и позволяет повысить производительность и достоверность испытаний в 1,5–2 раза.

Ключевые слова: бигармоническое (двухчастотное) нагружение, изгибные напряжения, циклирование, усталость, магнитный шум.

Адрес для переписки:

Бусько В.Н.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Address for correspondence:

Busko V.N.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by

Для цитирования:

Бусько В.Н.
Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость
с помощью бигармонического нагружения
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 181–187

For citation:

Busko V.N.
Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of
biharmonic lading
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 181–187

Введение

Усталостное разрушение металлических материалов, обусловленное действием динамических, повторных и знакопеременных нагрузок относится к основному виду разрушения материалов [1]. В процессе эксплуатации значительная часть деталей машин и элементов различных конструкций подвергаются бигармоническому (двухчастотному) циклическому нагружению, при котором на циклическую (периодическую) нагрузку наложены гармоники малых амплитуд относительно высоких частот. При таком виде нагружения, в отличие от одночастотного, за счет интенсификации процесса накопления усталостных повреждений происходит ускоренное наступление процесса разрушения. Обычно усталостная долговечность, обусловленная бигармоническом нагружением, в 1,5–4 раза ниже, чем при одночастотном (гармоническом) [2]. Процесс накопления усталостной повреждаемости в материале становится более близким к реально работающему элементу конструкции. Нагружение, при котором металл подвергается одновременному воздействию двух и более источников сложнонапряженного состояния, широко распространено в машиностроении (элементы автомобильных рам, кузовов, лопатки двигателей, сварные соединения), авиастроении (фюзеляж, нервюры крыла), строительстве (фермы и опоры мостов, мачт). Кроме того, испытания и исследования образцов на основе бигармонического нагружения позволяют более детально исследовать трещиностойкость материалов, стадии распространения усталостных трещин и выявлять новые закономерности развития процессов усталости в различных материалах.

Оптимальным вариантом и необходимым условием для изучения усталостных явлений при бигармоническом нагружении является проведение механических испытаний с помощью различных машин, установок, стендов, устройств с использованием образцов.

Бигармоническое нагружение реализуется различными схемами, описанными в [2–7]. Однако существующие испытательные машины, установки и оборудование подобного рода, как правило, громоздки, дороги и трудоемки в эксплуатации, представляют собой технически сложные системы, содержат кривошипные механизмы, электродинамические вибраторы, комплекты гидроцилиндров и другие многочисленные узлы, блоки [3–7], что в лабораторных условиях сложно обеспечить

и реализовать. Важность учета моделирования условий нагружения на экспертную оценку эксплуатационной нагруженности материала отмечалась, например, в [8, 9]. В связи с этим целью работы являлось создание эффективной малогабаритной установки для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе, основанной на расширении функциональных возможностей испытательной техники, повышении производительности испытаний и достоверности исследований физико-механического состояния на основе нерегулярного (двухчастотного) нагружения испытуемых образцов, изготовленных из материала элемента контролируемой конструкции или изделия.

Описание конструкции установки и принцип работы

В работе представлена разработанная и изготовленная лабораторная малогабаритная установка, основанная на бигармоническом нагружении и предназначенная для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. Установка реализует двухчастотный режим нагружения образца, пример которого представлен на рисунке 1 [2].

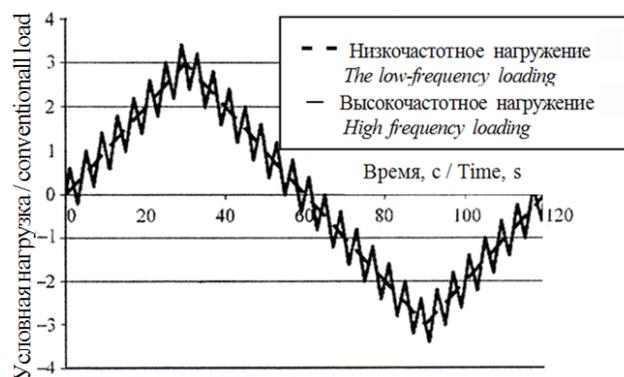


Рисунок 1 – Условная схема бигармонического нагружения образца при усталостных испытаниях

Figure 1 – Schematic diagram of biharmonic sample loading during fatigue tests

При создании установки использовались предложенные нами ранее устройство и методика создания в образце изгибных напряжений с помощью электродвигателя и силовозбудителя в виде подшипника качения, позволяющих осуществлять одночастотное нагружение свободного конца консоли закрепленного образца [10, 11]. Для реализации бигармонического нагружения установка дополнительно содержит второй электродвига-

тель, второй силовозбудитель, а образец закрепляется посередине таким образом, чтобы оба конца образца оставались свободными.

Принцип работы установки состоит в том, что нагружение на испытуемый образец производится одновременно двумя частотами f_1 и f_2 , при этом изгибающие моменты создаются на обоих концах испытуемого плоского образца прямоугольной формы независимо: один конец образца подвергается низкочастотному циклированию с частотой f_1 , второй – высокочастотному с частотой f_2 . В результате одновременного воздействия двух частот нагружения с амплитудами напряжений σ_1 и σ_2 в образце (преимущественно в зоне образования максимальных изгибных напряжений) с увеличением числа низкочастотного N_1 и высокочастотного N_2 циклов нагружения происходит накопление усталостной повреждаемости и образуются вначале невидимые, затем видимые усталостные трещины, вследствие чего снижается механическая прочность образца и происходит разрушение.

На рисунке 2 представлена схема малогабаритной лабораторной установки (без измерительного магнитошумового прибора) для бигармонических испытаний образцов на усталость.

Установка содержит станину 1, на которой установлены два электродвигателя: двигатель 2 с редуктором с низкой частотой вращения вала и двигателя 3 (высокая частота) для создания в образце двухчастотных изгибных напряжений. На валах электродвигателей 2 и 3 установлены стальные диски 4 с размещенными на них подшипниками качения 5, основание 6, на котором размещен испытуемый образец 7 плоской формы, прижимаемый Г-образной пластиной 8 и закрепленной с помощью двух болтов 9 к основанию 6 так, чтобы она прижимала образец 7 сверху, механический или электронный индикатор прогиба образца 10, закрепленный к станине 1, основанию 6 или электродвигателям 2 или 3, два постоянных магнита 11, два геркона 12 с замыкающимися контактами от магнитного поля, двухшкальный (на каждую частоту циклирования) электронный счетчик 13 оборотов вала электродвигателей и магнитошумовой (магнитоакустический) преобразователь Баркгаузена (ПБ) 14. Для создания изгибающих моментов в образце использовались описанные в [10, 11] схема и методика нагружения образца, основанные на применении специального силовозбудителя при консольном защемлении образца и циклических знакопеременных нагружениях.

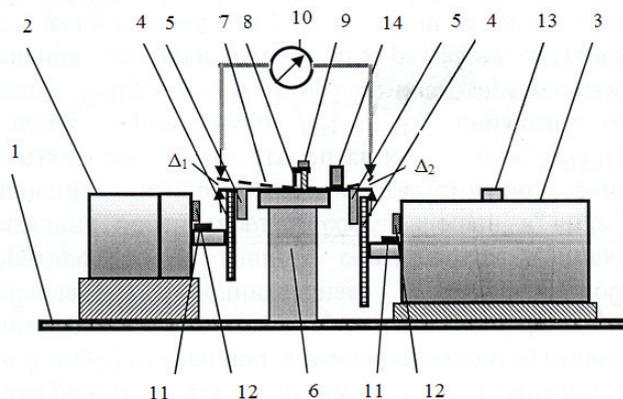


Рисунок 2 – Схема макета действующей установки для испытаний образцов на усталость с помощью бигармонического нагружения: 1 – станина; 2 – электродвигатель с низкой частотой вращения вала с редуктором; 3 – электродвигатель с высокой частотой вращения вала; 4 – стальные диски; 5 – силовозбудители в виде подшипника качения; 6 – основание; 7 – образец; 8 – Г-образная пластина; 9 – болты крепления; 10 – индикатор; 11 – постоянные магниты; 12 – герконы; 13 – двухшкальный электронный счетчик оборотов; 14 – магнитошумовой преобразователь Баркгаузена

Figure 2 – Layout settings for sample testing of fatigue using the bi-harmonic loading: 1 – frame; 2 – the a low speed electric motor with; 3 – the high speed electric motor at; 4 – steel wheels; 5 – power pathogens; 6 – base; 7 – sample; 8 – pressing plate; 9 – bolts; 10 – the deflection indicator; 11 – permanent magnets; 12 – sealed contact; 13 – electronic rev counter; 14 – magnetic-noise Barkhausen converter

Установка работает следующим образом. Испытуемый образец 7 плоской формы устанавливается на основание 6 и с помощью специальной Г-образной прижимной пластины 8 болтами 9 закрепляется к основанию 6. С помощью перемещения подшипников качения 5, установленных на плоскостях стальных дисков 4, подбора их диаметров или изменения положения основания 6 по высоте с помощью механического индикатора перемещения часового типа 10 (или электронного) устанавливается необходимая величина прогиба обоих концов образца Δ_1 и Δ_2 , характеризующих амплитуду максимальных изгибных напряжений. Пересчет величин прогибов Δ_1 и Δ_2 в значения создаваемых в любой точке поверхности образца 7 механических напряжений (в МПа) σ производится предварительно с помощью известных формул с учетом размеров образца, механических характеристик (упругих постоянных) и расстояний между местом приложения силы и точкой измерения сигнала. После включения электродвигателей 2 и 3 при вращении стальных дисков 4 установ-

ленные на них подшипники 5, выполняющие роль силовозбудителей нагружения, надавливают снизу поперек продольной оси на противоположные концы образца 7, создавая в нем прогибы Δ_1 и Δ_2 соответственно. Формы и размеры образцов для исследований приведены на рисунке 3. В соответствии с ГОСТом 25.502-79 соблюдались основные соотношения между геометрическими размерами, что позволяет использовать как специальные, так и стандартные образцы плоской формы, учитывались требования к состоянию поверхности образца (шероховатость и качество обработки). Точность задания нагрузки в процессе испытаний для лабораторной нестандартизованной и не сертифицированной установки не регламентируется, поэтому не оценивалась. При необходимости изучить влияние коэффициентов асимметрии и форму циклов нагружения на кинетику процесса накопления усталостных повреждений с помощью магнитного шума при бигармоническом режиме можно установить на стальных дисках вторую пару подшипников [10, 11].

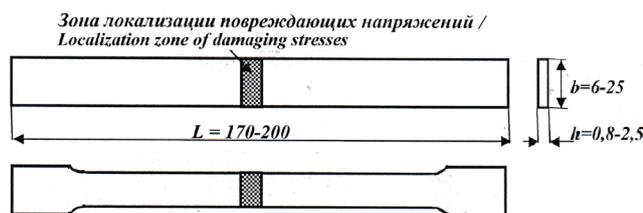


Рисунок 3 – Условная схема бигармонического нагружения образца при усталостных испытаниях

Figure 3 – Schematic diagram of biharmonic sample loading during fatigue tests

В качестве источника низкочастотного нагружения образца 7 в установке использовался однофазный реверсивный электродвигатель типа РД-09 с передаточным отношением 1/137 и частотой вращения вала двигателя $n = 8,8$ об/мин ($f_1 = 0,15$ Гц). Такое передаточное отношение позволяет испытывать образцы толщиной до 2–2,5 мм, создавая в них упруго-пластические деформации. Для высокочастотного нагружения использовались электродвигатели переменного тока типа АВЕ-071 со скоростью вращения вала 1350 об/мин ($f_2 = 23$ Гц) и типа ДАСМ-2УХЛ4 с $n = 2900$ об/мин ($f_2 = 48$ Гц). В зависимости от напряжения питания используемого электродвигателя диапазон изменения f_2 может находиться в пределах от 14 до 48 Гц. При использовании двигателей других модификаций частоты вращения могут быть другими.

В результате одновременного действия на образец 7 циклических знакопеременных двухчастотных нагружений в нем с ростом N_1 и N_2 со временем изменяются физико-механические свойства, регистрируемые накладным магнитошумовым (магнитоакустическим) ПБ 14. С помощью ПБ 14 можно производить сканирование вдоль поверхности образца 7, измеряя магнитный шум в любой его части по поверхности и получая его распределение по длине образца. Значения N_1 и N_2 определяются с помощью электронного счетчика импульсов 13, сигнал на который поступает от двух магнитоуправляемых герконов 12, расположенных на корпусах двигателей 2 и 3 и срабатывающих от двух постоянных магнитов 11, закрепленных на валах электродвигателей. В качестве электронного счетчика для определения количества циклов нагружения использовался двухшкальный электронный счетчик с автономным питанием постоянным напряжением 9 В.

Установка обеспечивает независимое регулирование низкой и высокой компонент частот нагружения и максимальных амплитуд изгибных напряжений на обоих концах образца. В результате суперпозиции бигармонического нагружения в образце (в месте его закрепления) происходит накопление усталостной повреждаемости, которая приводит к изменению физико-механического состояния образцов и регистрируется ПБ.

Основные технические характеристики: частоты циклирования: $f_1 = 0,15$ Гц; $f_2 = (12–48)$ Гц; амплитуда создаваемых напряжений при низкочастотном циклировании приблизительно равна $\pm (0–500)$ МПа, высокочастотном $\pm (0–350)$ МПа; длина образца – 170–200 мм, ширина – (6–25) мм; толщина – 0,8–2,5 мм; максимальный прогиб образца – (0–10) мм; габариты установки – 500 × 130 × 250 мм; масса – 12 кг.

Заключение

Разработана и изготовлена малогабаритная (длиной до 0,5 м, шириной 0,13 м, высотой 0,25 м и весом 12 кг) лабораторная установка для испытаний ферромагнитных образцов на усталость при изгибе. Принцип работы основан на использовании бигармонического (двухчастотного) нагружения образца с применением двух электродвигателей и двух силовозбудителей в виде подшипников качения, предложенных нами ранее для создания изгибных напряжений.

Установка позволяет расширить функциональные возможности испытательной техники за счет упрощения (используется один образец) и универсализации конструкции (схема нагружения представляет собой моноблок), увеличить в 2 раза производительность испытаний, а также осуществлять неразрушающий контроль и исследование усталости с помощью метода магнитных шумов.

Отличается простотой конструкции, малыми габаритами и удобством использования в сравнении с аналогичными громоздкими, сложными в исполнении и эксплуатации дорогостоящими машинами и стендами. Появилась возможность создавать одновременно и независимо бигармонические знакопеременные циклические нагружения с возможностью регулирования частот и амплитуд напряжений, моделируя и приближая состояние образца элемента конструкции, близкого к реальным условиям.

Список использованных источников

1. Терентьев, В.Ф. Усталость металлических материалов / В.Ф. Терентьев. – М. : Наука, 2003. – 254 с.
2. Воробьев, А.З. Сопротивление усталости элементов конструкций / А.З. Воробьев, Б.И. Олькин, В.Н. Стебнев. – М. : Машиностроение, 1990. – 240 с.
3. Патент РФ 1826031А1, МПК G 01N3/32. Установка для испытания образцов при двухчастотном нагружении / М.Е. Колотников, В.А. Соляников //

БИ. – № 25. – 07.07.1993.

4. Махутов, Н.А. Конструкционная прочность, ресурс и техногенная безопасность. Ч. 2 / Н.А. Махутов. – Новосибирск : Наука, 2005. – 610 с.

5. Патент РФ 2115910, МПК G 01N3/32. Установка для испытания образцов при двухчастотном нагружении / М.Е. Колотников, В.А. Соляников. – 20.07.1998.

6. Патент РФ 2047134, МПК G 01N3/20. Установка для испытаний образцов на изгиб / Е.В. Лодус // БИ. – № 4. – 27.10.1995.

7. А.с. СССР 1259145, МПК G 01N3/32. Установка для испытаний на усталость при бигармоническом воздействии / В.М. Филонов, В.П. Руденко, К.Б. Кацов // БИ. – № 3. – 23.01.1987.

8. Benasciutti, D. Spectral methods for lifetime prediction under wideband stationary random processes / D. Benasciutti, R. Tovo // Int J Fatigue. – 2005. – № 27(8). – P. 867–877.

9. Benasciutti D. On fatigue cycle distribution in non-stationary switching loadings with Markov chain structure / D. Benasciutti, R. Tovo // Prob Eng Mech. – 2010. – № 25. – P. 406–418.

10. Бусько, В.Н. Лабораторная установка для исследования усталостной повреждаемости плоских ферромагнитных образцов / В.Н. Бусько // Приборы и техника эксперимента. – 2011. – № 1. – С. 165–167.

11. Патент РБ 5248, МПК G 01N3/32, G 01N27/30. Устройство для испытания плоских образцов на усталость / В.Н. Бусько, В.Л. Венгринович, А.Г. Довгялло; заявитель – ГНУ «ИПФ НАН Беларуси» // Оф. Бюлл. – 2009. – № 2. – С. 202–203.

Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of biharmonic lading

Busko V.N.

*Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus*

Received 17.08.2015

Accepted for publication 05.11.2015

Abstract. The situation when the metal structure is subjected to the simultaneous impact of two or more sources of simple stress is common in mechanical engineering, aviation and civil engineering. The fatigue life of the material by the impact of Biharmonic loading is 1.5–4 times lower than in single-frequency operation loading. Unlike the single-frequency loading under Biharmonic loading degradation of the material is accelerated because of the intensification of the process of fatigue damage accumulation. Description of the process of damage accumulation of fatigue in the material under biharmonic loading is closer to the real situation. The aim of the work is – to create an effective setting for testing of ferromagnetic samples for fatigue and durability. To achieve the objectives small-sized laboratory facility for testing ferromagnetic sample flexural fatigue developed and produced. Studies have been conducted using the method of magnetic Barkhausen effect. The article describes the design and its basic characteristics, as well as the basic technical characteristics the sample. The principle of operation is based on the bi-harmonic load acting on both ends of the sample. The device use two electric motors with two special agents of power, based on the use of rolling bearings. Installation and testing of samples by the method of independent regulation of dual-frequency cyclic loading allows to simulate the condition of the test sample in the approximation to the real working conditions. This allows a detailed investigation of fracture toughness of the material, the stages of fatigue crack propagation and identify new patterns of development of fatigue. Unlike analog unit has small dimensions and weight (the length of the sample does not exceed 20 cm, width – 13 cm, height – 25 cm, weight of the unit is 12 kg). Use of the setting can improve performance and reliability of tests in two times.

Keywords: biharmonic (twofrequency), loading, flexural tensions, cycling, fatigue, magnetic Barkhausen Noise.

Адрес для переписки:

*Бусько В.Н.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,
ул. Академическая, 16, 220072, г. Минск, Беларусь
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Address for correspondence:

*Busko V.N.
Institute of Applied Physics National Academy of Sciences of Belarus,
Akademicheskaya str., 16, 220072, Minsk, Belarus
e-mail: busko@iaph.bas-net.by*

Для цитирования:

*Бусько В.Н.
Лабораторная установка для испытаний образцов на усталость
с помощью бигармонического нагружения
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 181–187*

For citation:

*Busko V.N.
Laboratory setting for tests of standards on tiredness by means of
biharmonic lading
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 181–187*

References

1. Terentiev V.F. Uсталost' metallicheskih materialov [Fatigue of metal materials]. Moscow, Nauka Publ., 2003, 254 p. (in Russian).
2. Vorobiov A.Z, Olkin B.I., Srebenev V.N. Soprotivleniye ustalosti elementov konstrukcij [Fatigue resistance of structural elements]. Moscow, Mashinostroyeniye Publ., 1990, 240 p. (in Russian).
3. Kolotnikov M.E., Soliannikov V.A. Ustanovka dlia ispytaniy obrazcov pri dvukhchastotnom nagruzheniyi [Installation for testing samples at two-frequency loading]. Patent RU no. 1826031A1, IPC G 01N3/32. Bulletin of inventions, no. 25, 07.07.1993.
4. Makhutov N.A. Konstrukcionnaya prochnost', resurs i tekhnogennaya bezopasnost'. Chast' 2 [Structural strength, resources and technological safety. Part 2], Novosibirsk, Nauka Publ., 2005, 610 p. (in Russian).
5. Kolotnikov M.E., Soliannikov V.A. Ustanovka dlia ispytaniya obrazcov pri dvukhchastotnom nagruzheniyi [Installation for testing samples at two-frequency loading]. Patent RU no. 2115910, IPC G 01N3/32, 20.07.1998.
6. Lodus E.V. Ustanovka dlia ispytaniy obrazcov na izgib [Installation for testing of samples for bending]. Patent RU no. 2047134, IPK G 01N3/20. Bulletin of inventions, no. 4. 27.10.1995.
7. Filonov V.M., Rudenko V.P., Kacov K.B. Ustanovka dlia ispytaniy pri bigarmonicheskom vozdeystvii [Installation for testing testing on the effects of fatigue under Bi-harmonic impact]. USSR Author's Certificate no 1259145, IPC G01N3/32. Bulletin of inventions, № 3, 23.01.1987.
8. Benasciutti D., Tovo R. Spectral methods for lifetime prediction under wideband stationary random processes. Int J Fatigue, 2005, no. 27(8), pp. 867–877.
9. Benasciutti D., Tovo R. On fatigue cycle distribution in non-stationary switching loadings with Markov chain structure. Prob Eng Mech, 2010, no. 25, pp. 406–418.
10. Busko V.N. Laboratory unit for investigating fatigue of damage to the plane of the ferromagnetic sample. Russian Journal «Instruments and Experimental Techniques», 2011, no. 1, pp. 165–167.
11. Busko V.N., Vengrinovich V.L., Dovgiallo A.G. Ustrojstvo dlia ispytaniy ploskikh obrazcov na ustalost' [The device for testing flat samples fatigue]. Patent BY № 5248, IPC G01N3/32, G 01N27/30. The applicant—«IAP National Academy of Sciences of Belarus» NASB. Official Bulletin, 2009, no. 2, pp. 202–203.

УДК 621.039

Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия

Поступила 15.09.2015

Принята к печати 6.11.2015

Разработка интенсификаторов тепло- и массообмена является важной инженерной задачей при конструировании новых и модернизации существующих тепловыделяющих сборок (ТВС). Такие устройства создают направленный поперечный основному потоку перенос массы теплоносителя. В то же время конструкция интенсификаторов влияет как на перемешивание теплоносителя, так и на гидравлическое сопротивление. Целью работы являлась разработка методики измерения локальных векторов скорости теплоносителя в моделях ТВС с различными перемешивающими решетками. Для решения поставленных задач был изготовлен пневмометрический пятиканальный зонд, проведена его тарировка в однородном потоке воздуха с заданной скоростью при различных углах установки зонда. По результатам тарировки получены численные значения безразмерных комплексов давления в каналах зонда и определена их зависимость от углов набегания воздушного потока. Представленная в статье методика измерения вектора скорости потока воздуха многоканальным пневмометрическим зондом была применена в экспериментальных исследованиях по изучению локальной гидродинамики в тепловыделяющих сборках с перемешивающими решетками. Анализ полученных векторных полей поперечной скорости теплоносителя позволил изучить формирование вторичных вихревых течений за перемешивающими решетками моделей ТВС, а также определить основные закономерности движения теплоносителя. Количественные данные о распределении всех трех проекций вектора скорости потока теплоносителя, полученные с помощью пятиканального зонда, позволили определить величины поперечных скоростей потока в межтвэльных зазорах, а также определить расстояние, на котором происходит затухание процессов перемешивания.

Ключевые слова: пневмометрический зонд, локальная гидродинамика, тепловыделяющая сборка.

Адрес для переписки:

Добров А.А.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Address for correspondence:

Dobrov A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.
Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных кассет ядерных реакторов
Приборы и методы измерений,
2015. – Т. 6, № 2. – С. 188–195

For citation:

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.
Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 188–195

Введение

Одним из самых энергонапряженных элементов реакторной установки является активная зона, которая может работать лишь на тех уровнях мощности, для которых обеспечивается достаточное охлаждение самых «горячих» тепловыделяющих сборок (ТВС). Повышение интенсивности перемешивания в ТВС ядерных реакторов с водой под давлением приводит к выравниванию локальных свойств теплоносителя, тем самым уменьшая влияние факторов местного перегрева [1]. Это говорит о том, что разработка интенсификаторов тепло- и массообмена является важной инженерной задачей при конструировании новых и модернизации существующих ТВС. В качестве таких интенсификаторов, например, могут применяться дистанционирующие решетки, выполненные из сотовых элементов сложной формы [2–3], или дополнительно установленные перемешивающие решетки, снабженные турбулизирующими дефлекторами [4–6]. Такие устройства создают направленный конвективный поперечный перенос массы теплоносителя. В то же время форма и угол отгиба дефлекторов влияют как на интенсивность перемешивания теплоносителя, так и на гидравлическое сопротивление решетки. Поэтому представление о степени влияния геометрии дефлекторов на гидродинамические характеристики теплоносителя весьма важно для поиска оптимальной конструкции перемешивающей решетки, а также для проведения достоверного теплогидравлического расчета активной зоны, учитывающего эффекты от таких решеток. Целью работы являлась разработка методики измерения локальных векторов скорости теплоносителя в моделях ТВС с различными перемешивающими решетками.

Описание экспериментального стенда и средств измерения скорости потока теплоносителя в моделях тепловыделяющих сборок

Для решения задач по исследованию локальных гидродинамических характеристик потока теплоносителя в моделях ТВС с перемешивающими решетками использовался экспериментальный стенд [7], представляющий собой разомкнутый аэродинамический контур (рисунок 1).

Моделирование течения водяного теплоносителя воздухом, а также использование увеличенных моделей позволяют достичь высоких значений чисел Рейнольдса при относительно невысоких

скоростях и не требуют учета сжимаемости воздушного потока. При этом с учетом теории подобия результаты исследования гидродинамических характеристик, представленные в безразмерной форме, могут быть перенесены на натурные условия течения теплоносителя. Кроме того, выбор воздуха в качестве рабочей среды позволил применить достаточно простые и информативные пневмометрические методы измерения скорости. Одним из таких методов является использование многоканального пневмометрического зонда. После предварительной тарировки по информации об измеренных значениях давления в приемных отверстиях зонда можно восстановить три компоненты вектора скорости, а также значения полного и статического давления в исследуемой точке.

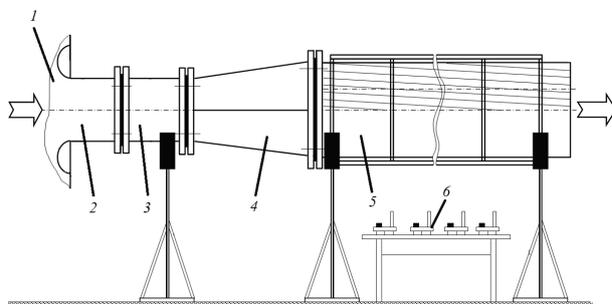


Рисунок 1 – Схема экспериментального аэродинамического стенда: 1 – аэродинамическая труба; 2 – расходомерный коллектор; 3 – успокоительный участок; 4 – переходник; 5 – экспериментальная модель; 6 – преобразователи давления

Figure 1 – The scheme of the experimental aerodynamic stand: 1 – wind tunnel; 2 – flowmeter; 3 – stabilizing section; 4 – adapter; 5 – experimental model; 6 – pressure transducers

Для измерения вектора скорости в моделях ТВС активных зон ядерных реакторов была разработана конструкция зонда. Чувствительная часть зонда представляет собой пять стальных капилляров $\varnothing 0,8 \times 0,1$ мм, расположенных в двух перпендикулярных друг другу диаметральных плоскостях. Остальная часть капилляров проложена внутри державки зонда, которая представляет собой стальную трубку. Центральный капилляр срезан под углом 90° к своей оси, а четыре боковых капилляра срезаны под углом 45° .

Методика тарировки пневмометрического зонда

При проведении исследований использовалась методика измерения вектора скорости воздушного

потока неподвижным многоканальным пневмометрическим зондом с предварительной тарировкой его в аэродинамической трубе. При тарировке зонда необходимо записать значения давлений в его приемных отверстиях, а также значения статического и полного давления в точке измерения для каждой комбинации углов установки зонда при заранее установленной скорости. Координатное устройство, входящее в состав тарировочной, позволяет поворачивать зонд в горизонтальной плоскости (угол δ) и вращать его вокруг собственной оси (угол φ).

Для проведения последующих измерений скорости неподвижным зондом необходимо произвести перенос системы координат, применяемой при тарировке $\{W, \varphi, \delta\}$, в систему координат $\{W, \alpha, \beta\}$, связанную с зондом (рисунок 2).

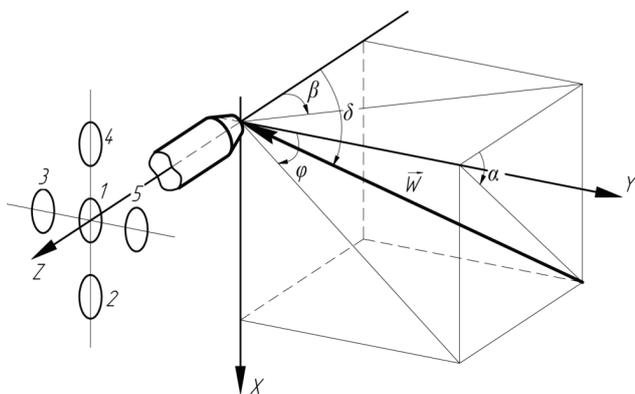


Рисунок 2 – Ориентация зонда и схема координатных осей: W – абсолютное значение вектора скорости; α – угол атаки (лежит в плоскости, проходящей через ось зонда и отверстия 4-1-2); β – угол заноса (лежит в плоскости, проходящей через ось зонда и отверстия 3-1-5)

Figure 2 – Orientation of the probe and the scheme of coordinate axes: W – absolute velocity; α – pitch angle; β – yaw angle

Такое преобразование осуществляется по следующим формулам:

$$\alpha = \arctg(\operatorname{tg} \delta \cdot \sin \varphi), \quad (1)$$

$$\beta = \arctg(\operatorname{tg} \delta \cdot \cos \varphi). \quad (2)$$

По результатам тарировки определены показания давления в приемных отверстиях в зависимости от углов установки зонда. Для дальнейшего использования этих данных были составлены безразмерные комплексы давления и определена их зависимость от углов α и β .

C_α – тарировочный коэффициент угла атаки α :

$$C_\alpha = \frac{P_2 - P_4}{P_1 - P_{ave}}, \quad (3)$$

где P_{ave} – псевдостатическое давление, которое определяется как среднее арифметическое от показаний давления в боковых приемных отверстиях ($P_2 - P_5$):

$$P_{ave} = (P_2 + P_3 + P_4 + P_5) / 4, \quad (4)$$

C_β – тарировочный коэффициент угла заноса β :

$$C_\beta = \frac{P_5 - P_3}{P_1 - P_{ave}}, \quad (5)$$

C_{st} – тарировочный коэффициент статического давления:

$$C_{st} = \frac{P_1 - P_{st}}{P_1 - P_{ave}}, \quad (6)$$

где P_{st} – статическое давление, Па.

C_{tot} – тарировочный коэффициент полного давления:

$$C_{tot} = \frac{P_1 - P_{tot}}{P_1 - P_{ave}}. \quad (7)$$

где P_{tot} – полное давление, Па.

Зависимости коэффициентов C_α , C_β от углов α и β приведены на рисунках 3, 4 в виде картограмм. Данные коэффициенты аппроксимированы гладкими полиномиальными зависимостями средствами математического пакета *Matlab* (функция *sftool*).

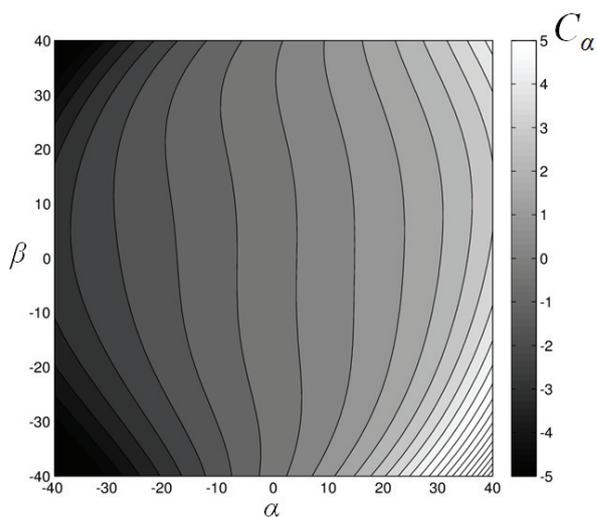


Рисунок 3 – Зависимость коэффициента C_α от углов α и β

Figure 3 – C_α coefficient dependence on the angles α and β

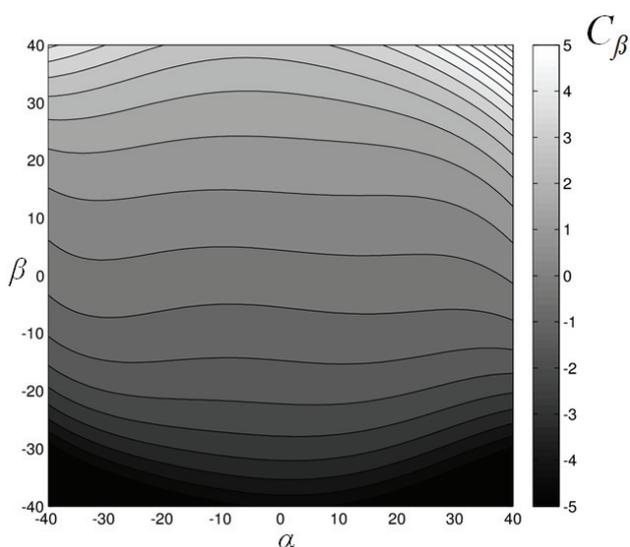


Рисунок 4 – Зависимость коэффициента C_β от углов α и β

Figure 4 – C_β coefficient dependence on the angles α and β

Методика определения величины и направления вектора скорости потока теплоносителя

Для измерения величины и направления вектора скорости пневмометрический зонд с помощью координатного устройства последовательно размещается в заданных точках экспериментальной модели ТВС. При этом производится замер значений давления в каждом канале зонда с помощью пьезоэлектрических преобразователей давления. Затем производится обработка первичных данных по следующей методике:

1) по измеренным значениям давлений рассчитываются комплексы C_α и C_β ;

2) определяются углы набегания потока α и β с использованием обратных зависимостей $\alpha = f(C_\alpha, C_\beta)$ и $\beta = f(C_\alpha, C_\beta)$;

3) определяются коэффициенты статического и полного давлений C_{st} и C_{tot} в зависимости от углов набегания;

4) рассчитываются значения статического и полного давления:

$$P_{st} = P_1 - C_{st} \cdot (P_1 - P_{ave}), \quad (8)$$

$$P_{tot} = P_1 - C_{tot} \cdot (P_1 - P_{ave}); \quad (9)$$

5) рассчитывается величина вектора скорости:

$$W = \sqrt{\frac{2 \cdot (P_{tot} - P_{st})}{\rho}}; \quad (10)$$

6) рассчитываются проекции вектора скорости на оси X, Y, Z системы координат модели:

$$W_z = \frac{W}{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2 \alpha + \operatorname{tg}^2 \beta}}, \quad (11)$$

$$W_x = W_z \cdot \operatorname{tg} \alpha, \quad (12)$$

$$W_y = W_z \cdot \operatorname{tg} \beta. \quad (13)$$

Результаты использования пневмометрического зонда для изучения гидродинамики потока в моделях тепловыделяющих сборок

Вышеописанная методика определения величины и направления вектора скорости потока была применена в экспериментальных исследованиях по изучению локальной гидродинамики в тепловыделяющих сборках ТВСА для реакторов ВБЭР-300 и ТВС-КВАДРАТ для реакторов PWR [8–12].

В тепловыделяющей сборке ТВСА реактора ВБЭР-300 применяются перемешивающие решетки (ПР), которые позволяют турбулизовать поток в пределах отдельных ячеек и улучшить перемешивание теплоносителя между ячейками сборки.

В конструкции ТВС-КВАДРАТ для улучшения теплогидравлических характеристик используются перемешивающие дистанционирующие решетки (ПДР) с интенсификаторами теплообмена – дефлекторами потока типа *split vane*.

На рисунках 5, 6 представлены фотографии экспериментальных моделей фрагментов ТВСА и ТВС-КВАДРАТ.

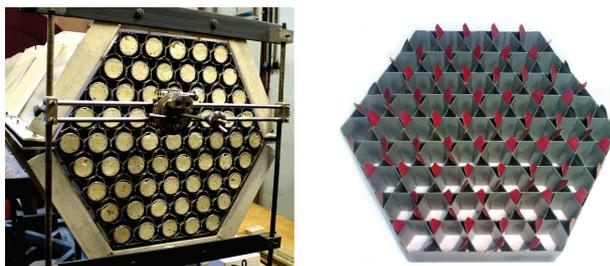


Рисунок 5 – Общий вид масштабной 61-стержневой модели фрагмента ТВСА и перемешивающей решетки типа «порядная прогонка»

Figure 5 – A general view of a large-scale 61-rod model of TVSA fuel assembly and mixing grid

Измерения локальных гидродинамических характеристик проводились в характерных областях экспериментальных моделей в нескольких сечениях по длине.



Рисунок 6 – Общий вид масштабной 49-стержневой модели фрагмента ТВС-КВАДРАТ и перемешивающей решетки

Figure 6 – A general view of a large-scale 49-rod model of TVS-KVADRAT fuel assembly and mixing grid

По результатам измерений с помощью пятиканального зонда получены данные о распределении компонент вектора скорости в различных сечениях за дистанционирующими решетками, а с помощью математического пакета *Matlab* построены векторные поля поперечной скорости (рисунок 7, 8).

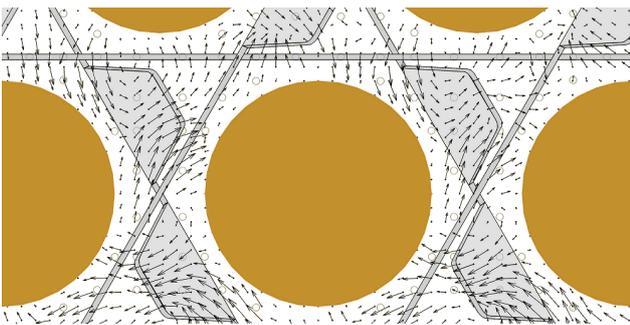


Рисунок 7 – Векторное поле поперечной скорости на расстоянии 1 гидравлического диаметра за перемешивающей решеткой ТВСА

Figure 7 – The vector field of lateral velocity behind the mixing grid of TVSA model

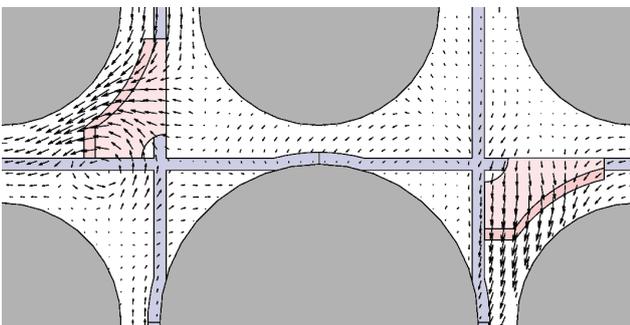


Рисунок 8 – Векторное поле поперечной скорости в области направляющего канала на расстоянии 1 гидравлического диаметра за перемешивающей решеткой ТВС-КВАДРАТ

Figure 8 – The vector field of lateral velocity behind the mixing grid of TVS-KVADRAT model

Полученные векторные поля поперечной скорости теплоносителя позволили наглядно изучить формирование вторичных вихревых течений за дефлекторами перемешивающих решеток ТВС, а также определить основные закономерности движения теплоносителя.

Максимальное значение поперечной скорости теплоносителя за ПР модели ТВСА наблюдается сразу за дефлекторами и достигает 35 % от аксиальной составляющей. На расстоянии 5 гидравлических диаметров от ПР это значение снижается до 20 %. Полное затухание поперечных скоростей прекращается на расстоянии 23–25 гидравлических диаметров.

В результате анализа векторных полей поперечной скорости за ПДР ТВС-КВАДРАТ сделаны следующие выводы:

- в стандартной области сразу за дефлекторами перемешивание происходит в основном внутри ячейки, но уже на небольшом расстоянии (примерно 2 гидравлических диаметра за ПДР) поперечный поток движется по направлению дефлекторов в соседние ячейки. Затухание поперечных скоростей происходит на расстоянии 25–27 гидравлических диаметров за ПДР;

- в районе направляющего канала результатом воздействия дефлектора на поток теплоносителя является вихрь, дающий основное перемешивание лишь внутри ячейки.

Количественные данные о распределении всех трех проекций вектора скорости потока теплоносителя, полученные с помощью пятиканального зонда, позволили определить величины поперечных скоростей потока в межъячеечных зазорах, а также определить расстояние, на которых происходит затухание процессов перемешивания. Полученные сведения необходимы для вычисления коэффициентов межъячеечного перемешивания, позволяющих учесть эффекты, вызванные перемешивающими решетками в инженерных программах теплогидравлического расчета активных зон ядерных реакторов.

Заключение

Представленная в данной работе методика определения вектора скорости воздушного потока многоканальным пневмометрическим зондом адаптирована для исследований гидродинамических характеристик потока в моделях ТВС ядерных реакторов. Результатом исследований являются данные о величинах поперечных скоростей

за перемешивающими устройствами, установленными в ТВС, а также восстановленные по этим данным векторные поля, позволяющие изучить влияние дефлекторов на локальную гидродинамику потока теплоносителя в ТВС. Эти данные необходимы для обоснования теплотехнической надежности активных зон с ТВС, оснащенными перемешивающими решетками.

Благодарности

Работа выполнена при поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации в рамках договора № 02.G25.31.0124 от 03.12.2014 г. в соответствии с постановлением Правительства Российской Федерации № 218 от 9 апреля 2010 г.

Список использованных источников

1. *Дмитриев, С.М.* Основное оборудование АЭС / С.М. Дмитриев [и др.]. – Минск : Вышэйшая школа. – 2015.
2. *Марков, П.В.* Интенсификация перемешивания в ТВС водоохлаждаемых реакторов сотовыми перемешивающими решетками / П.В. Марков // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2012. – № 1. – С. 117–125.
3. *Крапивцев, В.Г.* Организация конвективного переноса в пучке твэлов за сотовыми решетками для водоводяных энергетических реакторов / В.Г. Крапивцев, В.И. Солонин, С.И. Цирин // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. – 2011. – № 4. – С. 7–12.
4. *Самойлов, О.Б.* Перемешивающая решетка тепловыделяющей сборки ядерного реактора / О.Б. Самойлов [и др.] // Патент RU 2383954 от 15.09.2008.
5. *Самойлов, О.Б.* Экспериментальные исследования теплотехнических характеристик ТВСА с переме-

шивающими решетками / О.Б. Самойлов [и др.] // Атомная энергия. – 2014. – Т.116. – Вып.1. – С. 11–15.

6. *Перепелица, Н.И.* Дистанционирующие решетки с локальными завихрителями для тепловыделяющих сборок PWR / Н.И. Перепелица // Атомная техника за рубежом. – 2006. – № 1. – С.3–7.

7. *Дмитриев, С.М.* Экспериментальные и расчетные исследования гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в модели ТВС реактора КЛТ-40С / С.М. Дмитриев [и др.] // Научно-технический вестник Поволжья. – 2013. – № 3. – С. 114–119.

8. *Бородин, С.С.* Исследования гидродинамических и массообменных характеристик теплоносителя в ТВСА–Альфа реакторов ВВЭР при постановке системы перемешивающих решеток типа «порядная прогонка» / С.С. Бородин [и др.] // Вестник Нижегородского университета им. Н.И. Лобачевского. – 2011. – № 4–3. – С. 650–652.

9. *Дмитриев, С.М.* Исследование массообмена теплоносителя за перемешивающими решетками ТВС реакторов ВВЭР-300 с целью обоснования их эффективности / С.М. Дмитриев [и др.] // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. – 2013. – № 5 (102). – С. 197–205.

10. *Дмитриев, С.М.* Исследования локальной гидродинамики и межъячеечного массообмена потока теплоносителя в районе направляющих каналов тепловыделяющих сборок реакторов PWR / С.М. Дмитриев [и др.] // Промышленная энергетика. – 2013. – № 12. – С. 45–50.

11. *Дмитриев, С.М.* Расчетно-экспериментальные исследования локальной гидродинамики и массообмена потока теплоносителя в ТВС-КВАДРАТ реакторов PWR с перемешивающими решетками / С.М. Дмитриев [и др.] // Теплоэнергетика. – 2014. – № 8. – С. 20–27.

12. *Бородин, С.С.* Расчетно-экспериментальные исследования локальных гидродинамических и массообменных характеристик потока теплоносителя в ТВСА реакторов ВВЭР с перемешивающими решетками / С.С. Бородин [и др.] // Тепловые процессы в технике. – 2015. – № 4. – С. 177–182.

Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia

Received 17.06.2015

Accepted for publication 03.11.2015

Abstract. Development of heat and mass transfer intensifiers is a major engineering task in the design of new and modernization of existing fuel assemblies. These devices create lateral mass flow of coolant. Design of intensifiers affects both the coolant mixing and the hydraulic resistance. The aim of this work is to develop a methodology of measuring coolant local velocity in the fuel assembly models with different mixing grids. To solve the problems was manufactured and calibrated multihole pressure probe. The air flow velocity measuring method with multihole pressure probe was used in the experimental studies on the coolant local hydrodynamics in fuel assemblies with mixing grids. Analysis of the coolant lateral velocity vector fields allowed to study the formation of the secondary vortex flows behind the mixing grids, and to determine the basic laws of coolant flow in experimental models. Quantitative data on the coolant flow velocity distribution obtained with a multihole pressure probe make possible to determine the magnitude of the flow lateral velocities in fuel rod gaps, as well as to determine the distance at which damping occurs during mixing.

Keywords: multihole pressure probe, local hydrodynamics, fuel assembly.

Адрес для переписки:

Добров А.А.
Нижегородский государственный технический университет
им. Р.Е. Алексеева,
ул. Минина, 24, 603950, г. Нижний Новгород, Россия
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Address for correspondence:

Dobrov A.A.
Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minina st., 24, 603950, Nizhny Novgorod, Russia
e-mail: a.a.dobrov@yandex.ru

Для цитирования:

Дмитриев С.М., Добров А.А., Легчанов М.А., Хробостов А.Е.
Применение многоканального пневмометрического зонда для исследования профиля скорости теплоносителя в моделях топливных каскад ядерных реакторов
Приборы и методы измерений,
2015. – Т. 6, № 2. – С. 188–195

For citation:

Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Legchanov M.A., Khrobostov A.E.
Application of multihole pressure probe for research of coolant velocity profile in nuclear reactor fuel assemblies
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 188–195

Acknowledgments

This work was supported by the Ministry of Education and Science of the Russian Federation under the contract № 02.G25.31.0124 dated December 3, 2014 according to Government of the Russian Federation order №218 dated April 9, 2010.

References

1. Dmitriev S.M., Zverev D.L., Byh O.A., Panov Ju.K., Sorokin N.M., Farafonov V.A. *Osnovnoye oborudovaniye AES* [Basic equipment of Nuclear Power Plants]. Minsk, Vyshejschaya shkola Publ., 2015. 288 p. (in Russian).
2. Markov P.V. [Mixing intensification in water-cooled reactor fuel assemblies with honeycomb mixing grid]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Yadernaya energetika*, 2012, no. 1, pp.117–125 (in Russian).
3. Krapivtsev V.G., Solonin V.I., Tsirin S.I. [Organization of convective transport in the rod bundle behind honeycomb grids for VVER]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenij. Mashinostroyeniye*, 2011, no. 4, pp. 7–12 (in Russian).
4. Samoilov O.B., Romanov A.I., Kaydalov V.B., Falkov A.A., Simanovskaya I.E., Kostritsyn V.A., Evstigneev I.V. *Peremeshivayuschaya reshiotka teplovyydelyayuschej sborki yadernogo reaktora* [Mixing grid for fuel assembly of nuclear reactor]. Patent RF № RU 2383954, 2008.
5. Samoilov O.B., Kupriyanov A.V., Falkov A.A., Shipov D.L., Molodtsov A.A., Luk'yanov V.E. Experimental investigation of the heat-engineering characteristics of TVSA fuel assemblies with mixing lattices. *Atomic Energy*, 2014, vol. 116, no. 1, pp.14–19.
6. Perepelitsa N.I. Spacer grid with local swirlers for PWR fuel assemblies. *Atomnaya tekhnika za rubezhom*, 2006, no. 1, pp. 3–7 (in Russian).
7. Varencov A.V., Dmitriev S.M., Dobrov A.A., Solntsev D.N., Khrobostov A.E. [Experimental and computational studies of coolant hydrodynamics and mass transfer in the fuel assembly of KLT-40S reactor]. *Nauchno-tekhnicheskij vestnik Povolzhya*, 2013, no. 3, pp. 114–119 (in Russian).
8. Borodin S.S., Varencov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Solntsev D.N. [Researches of hydrodynamic and mass transfer characteristics of the coolant in the TVSA-Alpha fuel assembly with system of mixing grids “raw sweep”]. *Vestnik Nizhegorodskogo universiteta imeni N.I. Lobachevskogo*, 2011, no. 4–3, pp. 650–652 (in Russian).
9. Dmitriev S.M., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Legchanov M.A., Khrobostov A.E. [Researches of coolant mass transfer behind mixing grids in fuel assemblies for reactors VBER-300 in order to substantiate its effectiveness]. *Trudy NGTU imeni R.E. Alekseyeva*, 2013, no. 5 (102), pp. 197–205 (in Russian).
10. Dmitriev S.M., Legchanov M.A., Khrobostov A.E., Varentsov A.V., Doronkov D.V., Dobrov A.A. [Researches of local hydrodynamics and intercell mass transfer of coolant flow in the area of the control rod of PWR fuel assemblies]. *Promyshlennaya energetika*, 2013, no. 12, pp. 45–50 (in Russian).
11. Dmitriev S.M., Samoilov O.B., Khrobostov A.E., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Doronkov D.V., Sorokin V.D. Combined numerical and experimental investigations of local hydrodynamics and coolant flow mass transfer in KVADRAT-type fuel assemblies of PWR reactors with mixing grids. *Thermal Engineering*, 2014, vol. 61, issue 8, pp. 558–565.
12. Borodin S.S., Varentsov A.V., Dobrov A.A., Dmitriev S.M., Pronin A.N., Solntsev D.N., Sorokin V.D., Khrobostov A.E. [Computational and experimental studies of local hydrodynamic and mass transfer characteristics of coolant flow in the TVSA fuel assembly of VVER reactors with mixing grids]. *Teplovye processy v tekhnike*, 2015, no. 4, pp. 177–182 (in Russian).

УДК 620.16(075.8)

Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона

Шаронов Г.В.¹, Жарин А.Л.², Мухуров Н.И.³, Пантелеев К.В.²

¹Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

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

³Институт физики им. Б.И. Степанова Национальной академии наук Беларуси, пр. Независимости, 68, 220072, Минск, Беларусь

Поступила 22.09.2015

Принята к печати 05.11.2015

Технология размерной обработки резанием базируется на использовании интегральных геометрических параметров поверхности твердого тела. Технологическое воздействие резца приводит к процессам окисления и изменению физико-химических параметров поверхности. Для описания характеристик обработки и формирования сверхгладких поверхностей контроль геометрических параметров оказывается недостаточным. Поэтому используется параметр работа выхода электрона. Целью работы являлось исследование электрофизического состояния оптических поверхностей цветных металлов и сплавов в совокупности с геометрическими и физико-химическими параметрами по распределению работы выхода электрона поверхности. Исследование проводилось на экспериментальных образцах из меди и алюминиевого сплава, обработанных по технологии алмазного наноточения. Технология алмазного наноточения позволяет обеспечить шероховатость обработки цветных металлов и сплавов на уровне $R_a \leq 0,005$ мкм. В качестве метода регистрации изменений по поверхности работы выхода электрона использовался модернизированный зонд Кельвина. Определена зависимость величины работы выхода электрона и ее изменение от физико-химических и геометрических параметров поверхности. Показано, что технология алмазного наноточения позволяет получать электрофизически однородные оптические поверхности на меди и алюминиевом сплаве с минимальным разбросом распределения по поверхности электропотенциала.

Ключевые слова: пористый анодный оксид алюминия, алмазное наноточение, поверхность, шероховатость, работа выхода электрона.

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Шаронов Г.В., Жарин А.Л., Мухуров Н.И., Пантелеев К.В.
Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным наноточением, по работе выхода электрона
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203

For citation:

Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeveu K.U.
Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 196–203

Введение

В настоящее время методы, основанные на регистрации распределения работы выхода электрона (РВЭ), например по контактной разности потенциалов, находят достаточно широкое применение для исследований и неразрушающего контроля параметров поверхности, и процессов, протекающих в поверхностных и приповерхностных слоях твердых тел [1–3]. Величина РВЭ связана напрямую с физико-химическими и механическими свойствами вещества в конденсированном состоянии. Изменение физико-химических и механических параметров поверхности твердого тела должно вызывать соответствующее изменение РВЭ [2]. Существующая технология размерной обработки резанием базируется на известных теориях обработки с использованием интегральных параметров поверхностного слоя, например, значением R_{max} – максимальной высоты шероховатости [4]. Как показывает практика, при обработке и формировании сверхгладких поверхностей цветных металлов и сплавов свободные электроны, образующиеся при технологическом воздействии резца, приводят к процессам окисления поверхности и изменению физико-химических параметров [5]. При этом толщина образующейся оксидной пленки может быть сравнима или больше высоты максимальной шероховатости. При описании характеристик реальной поверхности металлов после обработки недостаточно оперировать только геометрическими параметрами. Необходимо учитывать также все виды неоднородности, присущие металлам: физическую, химическую и индуцированную. Неоднородность поверхности, вызванная воздействием резца в процессе обработки, существенно влияет на распределение электронов в металле и приводит к эффектам эмиссии электронов и сглаживанию электронной плотности. Согласно электронной теории металлов, энергия электронов будет тем ниже, чем более гладкой и однородной является поверхность с электронами. Для исследования шероховатой поверхности металлов и сплавов используется параметр РВЭ поверхности [6], так как он наиболее чувствителен к процессам, протекающим в поверхностных и приповерхностных слоях твердого тела при внешних физических воздействиях (пластическая деформация, окисление, фазовые и структурные превращения, распределение поверхностных и подповерхностных дефектов и т.п. [1–3, 7]). Поэтому величина РВЭ может быть принята в качестве комплексного па-

раметра оценки физико-химического состояния поверхности при обработке и формировании оптических чистых поверхностей [8].

Целью работы являлось исследование электрофизического состояния оптических поверхностей цветных металлов и сплавов в совокупности с геометрическими и физико-химическими параметрами по распределению РВЭ поверхности.

Метод исследования

Регистрация распределения РВЭ осуществлялась модернизированным зондом Кельвина [9]. Метод заключается в измерении контактной разности потенциалов между поверхностями контролируемого образца и эталонным измерительным электродом. Величина контактной разности потенциалов определяется разностью работ выхода электрона поверхностей образованного плоского конденсатора. Измерительный зонд выполнен из материала с относительно стабильной работой выхода электрона (в нашем случае из никеля). Поэтому для перехода от регистрируемой величины контактной разности потенциалов к относительной величине РВЭ необходимо знак измеренных показаний изменить на противоположный. Отличительной особенностью методики исследования является бесконтактность, отсутствие каких-либо разрушающих воздействий на контролируемый образец и возможность выявления дефектов структуры, недоступных другим неразрушающим, в частности, оптическим и электронным методам контроля.

Измерения выполняли на сканирующей установке [1]. В состав установки входят следующие основные узлы: двухкоординатный привод перемещения рабочего столика; блок управления и сбора данных, выполненного на базе стандартного ПК; вибрирующий зонд Кельвина–Зисмана. Привод позволяет проводить перемещение рабочего столика с закрепленным на нем образцом линейными размерами до 180×180 мм, шагом сканирования от 10 мкм. Регистрация контактной разности потенциалов осуществлялась в диапазоне ± 5 мВ и разрешающей способностью 250 мкм. Случайные ошибки измерения сведены к нулю [10].

Технология изготовления экспериментальных образцов металлических подложек с оптической чистотой поверхности

Для алмазного наноточения используется специальное высокоточное оборудование, позволяю-

щес обеспечить шероховатость обработки цветных металлов и сплавов на уровне $R_a \leq 0,005$ мкм. Из бескислородной меди МО, как правило, изготавливаются зеркала для мощных технологических CO_2 -лазеров и теплоотводы для мощных полупроводниковых лазеров. Из алюминиевого сплава марки 5086 США (4,0 % Mg, 0,5 % Mn) изготавливаются подложки для получения пористого анодного оксида алюминия для гибридных микросхем, а из сплава АМГ-2 – оптические зеркала широкого практического применения [11]. Технология изготовления экспериментальных образцов подложек включает предварительную токарную или фрезерную обработку с последующим нагревом для стабилизации фазового и структурного состояния материала, снятия внутренних напряжений, оптимизации сопротивления пластическим деформациям.

Суперфинишная обработка поверхности подложек проводится на базе прецизионного токарного станка модели МК 6501 с вертикальным расположением шпинделя. Во избежание влияния внешних колебаний станок имеет виброизолирующие пневмоопоры и устанавливается на бетонной подушке толщиной 70 мм непосредственно на земле. Шпиндель станка расположен с зазором в радиально-упорном аэростатическом подшипнике. Точение деталей осуществляется на выбеге за счет кинетической энергии шпинделя, предварительно раскрученного асинхронным двигателем. Для перемещения суппорта в процессе обработки используется пневмогидравлический привод.

В качестве инструмента использовался специально разработанный резец из монокристаллического синтетического алмаза СТМ «Алмазот» (ТУ РБ 40007852.010-2004) с радиусной заточкой режущей кромки. Особенности процесса резания алмазными резцами определяются физико-механическими свойствами и структурой алмазов: низким коэффициентом трения по обрабатываемым материалам, высокими значениями тепло- и температуропроводности, обеспечивающими сравнительно низкие температуры в зоне резания. Это позволяет проводить обработку на высоких скоростях резания.

Для изготовления алмазных резцов использовались специально отобранные кристаллы алмаза (СТМ «Алмазот») октаэдрической формы весом порядка 1 карата с низким уровнем внутренних напряжений. Параметры станка: точность позиционирования суппорта, радиальное и осевое биение шпинделя, погрешность линейного перемещения

суппорта должны быть не хуже 100 нм. Алмазное наноточение происходит на уровне кристаллической решетки, и деформация зерен материала практически отсутствует, поэтому радиус заострения режущей кромки резца должен быть соизмерим с размерами кристаллической решетки материала изделия и молекул поверхностно-активных веществ (ПАВ), т.е. порядка 0,1–0,5 мкм. Необходимость применения ПАВ обусловлена требованием получить высокое качество рабочей поверхности $R_a \leq 0,005$ мкм при максимальном оптическом коэффициенте отражения. Обычно в качестве ПАВ используют этиловый спирт. Попадая в зону резания, спирт интенсивно испаряется, что приводит к охлаждению резца и изделия. В результате возникает обратный эффект – укорочение резца вследствие его охлаждения, что при правильном выборе скорости и положения попадания струи спирта в зону резания приводит к компенсации тепловых деформаций алмаза вследствие нагрева в зоне резания. При алмазном точении в случае отсутствия ПАВ такого качества поверхности достигнуть не удастся, хотя точность формы изделия может быть получена достаточно высокая.

Обрабатываемые изделия, как правило, по 2 единицы для балансировки, крепились на вакуумной планшайбе, закрепленной на шпинделе и предварительно отбалансированной. Скорость вращения шпинделя на воздушном подшипнике 2000 об/мин. Обработка резцом ведется за один проход глубиной не более 0,01 мм со скоростью подачи резца 10 мм/мин. В процессе обработки осуществляется визуальный контроль поверхности. Обработку проводят в несколько циклов до тех пор, пока не будут выведены все видимые дефекты на зеркальной поверхности изделия.

Результаты исследования и их обсуждение

Анализ распределения РВЭ прецизионных поверхностей позволяет выявить неоднородность их электрофизических свойств, отражающую распределение дефектов поверхности. Зарегистрированная величина разброса электростатического потенциала по поверхности будет свидетельствовать об неоднородности электрофизических свойств поверхности. Характеристики экспериментальных образцов и результаты измерения относительных изменений РВЭ по их поверхности представлены в таблице.

Таблица / Table

Результаты измерения относительного значения работы выхода электрона
Measuring results of relative value of electron work function

№ образца № sample	Характеристика образцов Sample parameters	U_1 , мэВ meV	U_2 , мэВ meV	ΔU
1	Пористый анодный оксид алюминия (ПАОА), диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Sample of porous anodic alumina (PAOA) having a diameter of 100 mm and thickness of 1,5 mm	60	125	65
2	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 10, диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 10, diameter of 100 mm and thickness of 1,5 mm	-300	-250	50
3	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 14, диаметр 100 мм, толщина 1,5 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 14, diameter of 100 mm and thickness of 1,5	-265	240	25
4	ПАОА с гальваническим наноалмазным покрытием, диаметр 50 мм, толщина 10 мм Aluminium sample PAOA with nanodiamond galvanic coating sample having a diameter of 50 mm and thickness of 10 mm	0	45	45
5	Алюминий АМГ-2, класс чистоты 14, линейные размеры 100 × 50 × 7 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 14, 100 × 50 × 7 mm	-295	-290	5
6	Алюминиевая подложка АМГ-2, класс чистоты 10, линейные размеры 100 × 50 × 7 мм Aluminium AMG-2 sample having a purity grade of 10, 100 × 50 × 7 mm	-295	-270	25
7	Медь М2, класс чистоты 13, линейные размеры 30 × 25 × 2 мм Copper M2 sample having a purity grade of 14, 30 × 25 × 2 mm	-5	5	10
8	Медь М2, класс чистоты 12, диаметр 25 мм, толщина 10 мм Copper M2 sample having a purity grade of 13, having a diameter of 25 mm and thickness of 10 mm	-20	5	25

Как видно из приведенных результатов, относительное максимальное значение РВЭ 125 мВ и изменение электропотенциала по поверхности $\Delta U = 65$ мВ имеет алюминий ПАОА, образец № 1. Визуализированные изображения электропотенциального рельефа поверхности исследуемых образцов представлены на рисунке 1.

Электропотенциальное изображение поверхности диска пористого анодного оксида алюминия с гальванически нанесенным наноалмазным

покрытием (образец № 4) приведено на рисунке 1d. На визуализированном изображении видны неоднородности электрофизических свойств поверхности, проявляющаяся в изменении значений потенциала. По сравнению с образцом № 1 ПАОА (рисунок 1a) распределение электропотенциала более однородно, максимально зарегистрированная энергия выхода электрона составляла 45 мВ, а изменение электропотенциала по поверхности $\Delta U = 45$ мВ.

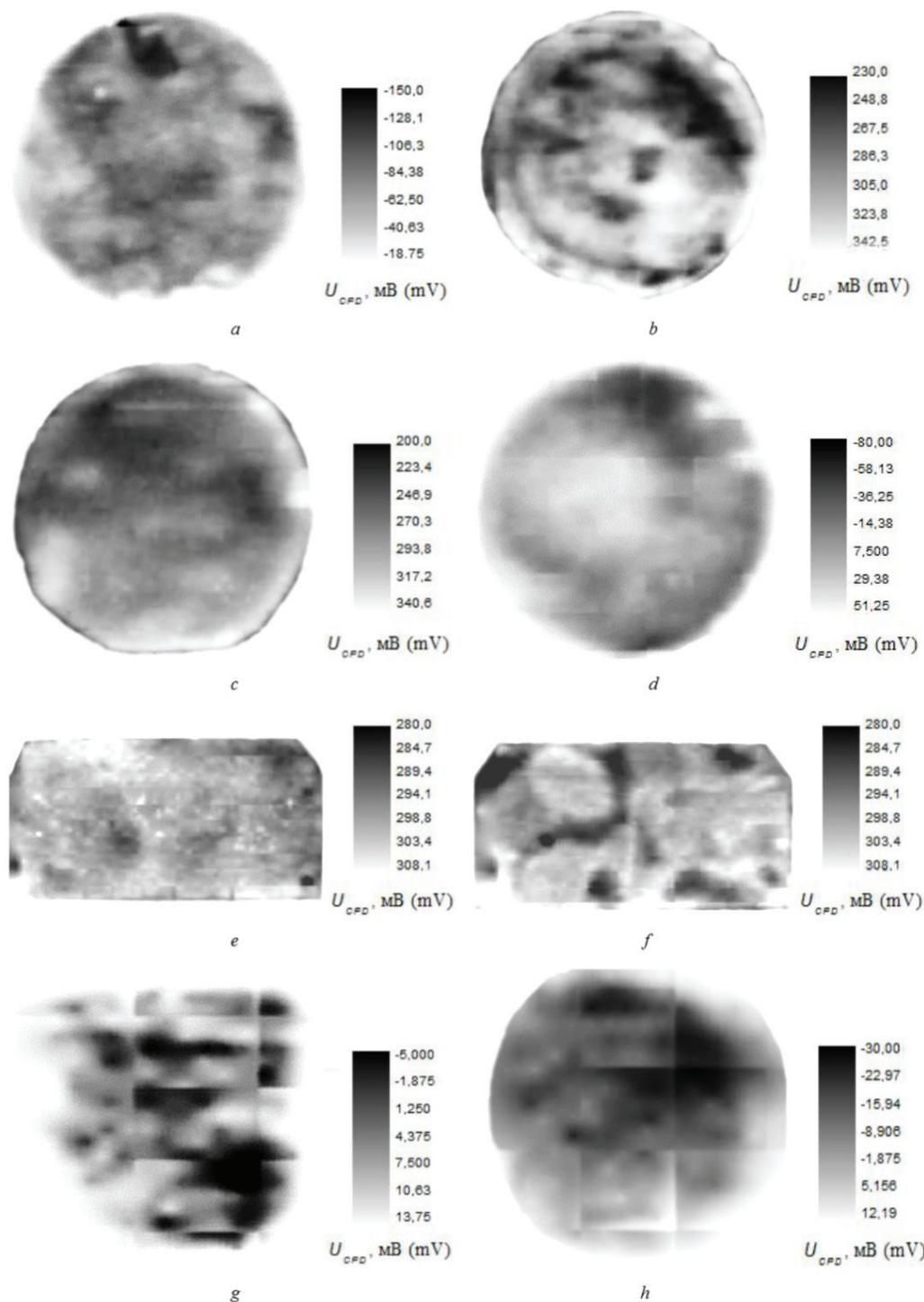


Рисунок 4 – Эле́ктропотенциальные изображения поверхности экспериментальных образцов: *a–h* – соответственно образцы 1–8

Figure 4 – Electric potential images of the surface of experimental samples: *a–h* are samples 1–8, respectively

Из полученных изображений распределения РВЭ можно сделать вывод о степени неоднородности поверхностей пористого анодного оксидного слоя и влияния на характер распределения РВЭ гальванически нанесенного наноалмазного покры-

тия. Подложки из алюминиевого сплава, образцы № 2, 3, 5, 6 (рисунок 1*b*, 1*c*, 1*e*, 1*f*) имеют минимальные значения РВЭ -300 мВ , -265 мВ , -295 мВ и -295 мВ соответственно, причем она не зависит от класса чистоты обработки поверхности, что

противоречит часто встречающемуся в литературе утверждению, чем поверхность более гладкая, тем работа выхода электрона меньше. Полученные результаты говорят о другом. Класс чистоты, шероховатость и электрофизическую однородность поверхности характеризует не только численное значение РВЭ, но в значительной степени изменение электропотенциала по поверхности ΔU . На рисунке 1*h* приведены электропотенциальное изображение образца медной марки М2 с 12 классом чистоты, на рисунках 1*e* и 1*g* приведены электропотенциальные изображения поверхностей подложек из алюминиевого сплава АМГ-2 (образец № 5) и медной марки М2 (образец № 7) соответственно, обработанных по технологии алмазного наноточения с классом чистоты не хуже 14. Зарегистрированный разброс значений РВЭ у образцов № 5 и № 7 имел минимальное значения 5 мВ и 10 мВ соответственно, что говорит о высоком уровне электрофизической однородности поверхностного слоя достигаемой за счет технологии алмазного наноточения.

Заключение

Проведенные исследования показали, что при наноразмерной обработке металлической поверхности, в том числе и по технологии алмазного наноточения, работа выхода электрона и ее изменение по поверхности характеризуют ее физико-химическое состояние и в совокупности с ее геометрическими характеристиками, прежде всего шероховатостью, позволяют в полной мере контролировать достижение заданных эксплуатационных характеристик обрабатываемых изделий, задавать и оптимизировать технологические режимы процесса обработки.

При наноразмерной алмазной обработке алюминиевого сплава АМГ-2 получена высокая электрофизическая однородность поверхностного слоя с минимальным значением РВЭ и минимальным разбросом электропотенциала по поверхности на уровне $\Delta U = 5$ мВ.

Использование технологии алмазного наноточения с последующим анодным оксидированием с нанесением наноалмазного покрытия позволяет получить однородный теплопроводящий материал. Предложенная методика контроля электрофизического состояния может быть использована для производства электронных изделий на основе пористого анодного оксида алюминия с повышенными энергетическими характеристиками, где тре-

буется для отвода тепла, монтажа и изготовления печатных плат высокопрочный теплопроводящий материал: светодиодные осветительные системы, гибридные интегральные микросхемы, полупроводниковые лазеры, тиристоры, транзисторы и др.

Список использованных источников

1. Zharin, A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping / A.L. Zharin // Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology. – Heidelberg : Springer-Verlag, 2010. – P. 687–720.
2. Жарин, А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии / А.Л. Жарин. – Минск : Изд-во Беспринт, 1996. – С. 235.
3. Жарин, А.Л. Методы зондовой электрометрии для разработки и исследования свойств перспективных материалов / А.Л. Жарин // Перспективные материалы и технологии: монография : в 2 т. / А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.К. Тявловский. – Витебск : Изд-во ВГТУ, 2015. – Т. 1. – 398 с.
4. Predicting surface roughness in machining: a review / P.G. Benardos, G.-C. Vosniakos // Int. J. of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43, № 8. – P. 833–844.
5. On the correlation between surface roughness and work function in copper / W. Li, D.Y. Li // J. Chem. Phys. – 2005. – Vol. 122, № 6. – P. 81–86.
6. Назаров, Ю.Ф. Методы исследования и контроля шероховатости поверхности металлов и сплавов / Ю.Ф. Назаров, А.М. Шкилько, В.В. Тихоненко, И.В. Компанец // Физическая инженерия поверхности. – 2007. – Т. 5. – № 3–4. – С. 206–216.
7. Диагностика локальных изменений пластической деформации по работе выхода электрона / К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2015. – № 1 (10). – С. 56–63.
8. Анализ способов обработки поверхностно-пластическим деформированием / А.В. Ежелев, И.Н. Бобровский, А.А. Лукьянов // Фундаментальные исследования. – 2012. – № 6–3. – С. 642–646.
9. Zharin, A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies / A.L. Zharin // Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales. – Netherland : Kluwer Academic Publishers, 2001. – P. 445–466.
10. Tyavlovsky, A.K. Kelvin probe error compensation based in harmonic analysis of measurement signal / A.K. Tyavlovsky and et al. / Przegląd Elektrotechniczny, 2014. – No. 3. – P. 251–254.
11. Ультрафиолетовые детекторы на основе эпитаксиальных алмазных пленок, выращенных на монокристаллических алмазных подложках методом газофазного синтеза / Г.В. Шаронов [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2010. – Т. 76, № 5. – С. 714–719.

Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond nanomachining technology based on the electron work function

Sharonov G.V.¹, Zharin A.L.², Muhurov N.I.³, Pantsialeveu K.U.²

¹A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Kurchatova St., 7, 220045, Minsk, Belarus

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

³B.I. Stepanove Institute of Physic of National Academy of Science,
Nezavisimisty Ave., 68, 220072, Minsk, Belarus

Received 22.09.2015

Accepted for publication 05.11.2015

Abstract. Dimensional machining technology is based on the use of integrated geometric parameters of machined surfaces. Technological impact of a pick results in oxidation processes and changes in physic-chemical parameters of surface. Control of only geometric parameters is insufficient to describe characteristics of machining and formation of ultra-smooth surfaces. The electron work function is therefore used. The aim of the work was to study electrophysical states of optic surfaces of non-ferrous metals and alloys in relation to geometric and physic-chemical parameters according to the distribution of the electron work function over the surface. We conducted the study on experimental metal samples made of copper and aluminum alloy, machined in accordance with the diamond nanomachining technology. The diamond nanomachining technology would be capable of ensuring the roughness of non-ferrous metals and alloys machined at the level of $R_a \leq 0,005 \mu\text{m}$. Modernized Kelvin probe was used as the registration technique of the changes of the electron work function over the surface. Dependence between the electron work function value, as well as its alteration and the physic-chemical and geometric parameters of a surface has been determined. It has been shown that the diamond nanomachining technology makes it possible to obtain electro-physically uniform optical surfaces on copper and aluminum alloy with the minimal range of the distribution of the electric potential over the surface.

Keywords: porous anodic alumina, diamond nanomachining, surface, roughness, electron work function.

Адрес для переписки:

Пантелеев К.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, Минск, Беларусь
e-mail: nil_pt@bntu.by

Address for correspondence:

Pantsialeveu K.U.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimisty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: nil_pt@bntu.by

Для цитирования:

Шаронов Г.В., Жарин А.Л., Мухуров Н.И., Пантелеев К.В.
Контроль металлических поверхностей, обработанных алмазным
наноочением, по работе выхода электрона
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 196–203

For citation:

Sharonov G.V., Zharin A.L., Muhurov N.I., Pantsialeveu K.U.
Control of metal surfaces machined in accordance with the diamond
nanomachining technology based on the electron work function
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 196–203

References

1. Zharin A.L. Contact Potential Difference Techniques As Probing Tools in Tribology and Surface Mapping. *Scanning Probe Microscopy in Nanoscience and Nanotechnology*, Heidelberg, Springer-Verlag, 2010, pp. 687–720.
2. Zharin A.L. *Metod kontaktnoj raznosti potentsialov i yego primeneniye v tribologii* [Method of contact potential difference and its application in tribology]. Minsk, Best-print Publ., 1996, 235 p. (in Russian).
3. Zharin A.L., Pantsialeyeu K.U., Tyavlovski A.K. [Methods probe electrometry for the development and study of the properties of advanced materials] *Perspektivnye materialy i tekhnologii: monografija* [Perspective materials and technologies: a monograph. In 2 Volumes]. Vitebsk, VSTU, vol. 2, 398 p. (in Russian).
4. Benardos P.G., Vosniakos G.-C. Predicting surface roughness in machining: a review. *Int. J. of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, no. 8, pp. 833–844.
5. Li W., Li D.Y. On the correlation between surface roughness and work function in copper. *J. Chem. Phys.*, 2005, vol. 122, no. 6, pp. 81–86.
6. Nazarov Yu.F., Shkilko A.M., Tihonenko V.V., Kompaneec I.V. Metals and alloys surface roughness investigation and control methods. *Physical Surface Engineering*, 2007, vol. 5, no 3–4, pp. 206–216.
7. Pantsialeyeu K.V., Svistun A.I., Zharin A.L. Methods for local changes in the plastic deformation diagnostics on the work function. *Devices and Methods of Measurements*, 2015, vol. 10, no. 1, pp. 56–63.
8. Ezhelev A.V., Bobrowski I.N., Lukyanov A.A. Analysis of processing ways by superficial and plastic deformation. *Fundamental Research*, 2012, no. 6–3, pp. 642–646.
9. Zharin A.L. Application Macro- and Micro Kelvin Probe in Tribological Studies. *Fundamentals of Tribology and Bridging the Gap between the Macro- and Micro/Nanoscales*, Netherland, Kliwer Academic Publishers, 2001, pp. 445–466.
10. Tyavlovsky A.K. Kelvin Probe error compensation based in harmonic analysis of measurement signal / A.K. Tyavlovsky and et al. / *Przegląd Elektrotechniczny*, 2014. – No. 3. – P. 251–254.
11. Sharonov G.V., Bolshakov A.P., Ralchenko V.G., Kazuchits N.M., Petrov S.A. Ultraviolet detectors based on epitaxial diamond films grown on single-crystal diamond substrate by chemical vapor deposition. *Journal of Applied Spectroscopy*, 2010, vol. 76, no. 5, pp. 658–662.

УДК 535.42

Проектирование многопорядковых интраокулярных линз

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина

Поступила 12.03.2015

Принята к печати 23.10.2015

Интраокулярные линзы (ИОЛ) используются для замены натурального хрусталика глаза. Клинически используется несколько стандартных конструкций ИОЛ. Многопорядковые дифракционные линзы (МПДЛ), которые работают в нескольких дифракционных порядках, были предложены для уменьшения хроматической аберрации. Анализ свойств МПДЛ показал перспективу их использования для разработки новых конструкций ИОЛ. Целью данной статьи являлась разработка нового метода проектирования многопорядковых интраокулярных линз с уменьшенной хроматической аберрацией. Проводилось теоретическое исследование свойств МПДЛ. Исследована зависимость дифракционной эффективности от длины волны. Проведено компьютерное моделирование МПДЛ в схематической модели человеческого глаза. Установлена способность многопорядковой дифракционной линзы фокусировать с высокой эффективностью полихроматический свет в отрезок. В каждой точке на отрезке присутствует составляющая каждого спектрального диапазона, которые в комбинации будут строить цветное изображение. Предложен метод проектирования интраокулярных линз с уменьшенным хроматизмом и бесконечной глубиной аккомодации. Смоделирована оптическая система глаза с интраокулярной линзой, которая обеспечивает резкое видение объектов, расположенных на расстоянии от 700 мм до бесконечности.

Ключевые слова: многопорядковая интраокулярная линза, дифракционная эффективность, бесконечная глубина аккомодации.

Адрес для переписки:

Кучугура И.О.

Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Address for correspondence:

Kuchugura I.O.

National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net

Для цитирования:

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.

Проектирование многопорядковых интраокулярных линз
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 204–210

For citation:

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.

Design of the multiorder intraocular lenses
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 204–210

Введение

Имплантация искусственных хрусталиков глаза – интраокулярных линз (ИОЛ) – является эффективным решением ряда проблем, связанных с нарушениями зрения – от замены помутневшего из-за катаракты естественного хрусталика глаза и до коррекции возрастной дальнозоркости. Ежегодно в мире проводится около 3 млн операций по имплантации ИОЛ [1].

Существует несколько стандартных вариантов конструкций ИОЛ [1–3]. Рефракционные ИОЛ являются монофокальными, при их использовании теряется естественная аккомодация глаза и появляется необходимость дополнительной коррекции очками. Для достижения мультифокальности на одну из поверхностей рефракционной линзы наносят дифракционную линзу (ДЛ), такие линзы называются дифракционно-рефракционными. Чаще всего их проектируют бифокальными или трифокальными. К сожалению, использование только стандартных конструкций линз ограничивает разработчика, поскольку каждая из вариаций дифракционного профиля имеет свои уникальные оптические характеристики. По нашему мнению, перспективным направлением является использование многопорядковых дифракционных линз.

Для создания ДЛ изображения объекта, находящегося на некотором расстоянии, обычно используют один дифракционный порядок [2]. Основным недостатком таких линз является значительный хроматизм. В отличие от обычных ДЛ многопорядковые имеют увеличенную в p раз толщину, что делает возможным работу в высших дифракционных порядках. Эти линзы способны создавать ахроматические изображения в широком спектральном диапазоне [4–5]. В перечисленных работах не проведены исследования, связанные с принципами формирования полихроматического изображения МПДЛ как важного аспекта их разработки.

Известны примеры использования МПДЛ в некоторых областях техники [6–9], но для применения в качестве ИОЛ они почти не рассматривались. В работе [10] рассмотрена ИОЛ в виде чисто многопорядковой линзы с большим значением $p = 20$, но в результате исследования авторы выяснили, что в этом случае хроматические aberrации линз в модели глаза соизмеримы с такими же aberrациями рефракционных ИОЛ. В свою очередь, наименьшими aberrациями об-

ладают дифракционно-рефракционные линзы. Для того, чтобы использовать уникальные свойства МПДЛ, можно модернизировать стандартную конструкцию ИОЛ путем нанесения рельефа МПДЛ вместо обычной дифракционной. Представленная идея также не была реализована предшественниками.

Целью данной статьи являлась разработка нового метода проектирования многопорядковых интраокулярных линз с уменьшенной хроматической aberrацией.

Расчетные формулы

Фокусное расстояние МПДЛ зависит от дифракционного порядка. Такая линза имеет бесконечное количество фокусных расстояний f_N , которые рассчитываются по формуле:

$$f_N = \frac{pf_0\lambda_0}{N\lambda}, \quad (1)$$

где f_0 – фокусное расстояние для расчетной длины волны λ_0 ; N – рабочий порядок дифракции; $\lambda \neq \lambda_0$; p – расчетный параметр. Из уравнения (1) следует, что при $p\lambda_0/N\lambda = 1$ несколько длин волн из заданного диапазона фокусируются в общей точке с высокой дифракционной эффективностью. В этом состоит главная особенность МПДЛ.

Дифракционная эффективность (ДЭ) МПДЛ для N -го порядка дифракции в фокальных точках имеет вид [7]:

$$\eta_N = \text{sinc}^2(\alpha\mu p - N), \quad (2)$$

где α – параметр, определяемый долей фазовой задержки 2π для длин волн, отличных от расчетной

$\lambda \neq \lambda_0$, задается выражением $\alpha = \frac{\lambda_0 [n(\lambda) - 1]}{\lambda [n(\lambda_0) - 1]}$, где $n(\lambda)$ – показатель преломления линзы; μ – коэффициент толщины микрорельефа, рассчитываемый по формуле $\mu = t'/t$, где t' и t – реальная и расчетная толщины профиля соответственно.

Исследование формирования полихроматического изображения

Анализ выражений (1) и (2) дает основания для следующих выводов. Коэффициент μ не влияет на положения фокусов f_N , но изменяет распределение энергии в этих точках. Зависимость характеристик ДЛ от коэффициента μ детально

рассматривались в статье [11], поэтому примем $\mu = 1$. При увеличении параметра p увеличивается количество длин волн, удовлетворяющих условию максимума. Основным будем считать максимум на длине волны λ_0 при котором $p = N$. Таким образом, задавая значение параметра p , устанавливается и основной рабочий порядок. Основная задача данной работы заключалась в получении безаберрационного изображения, состоящего из комбинации трех различных длин волн – красной, зеленой и синей. Данное условие наилучшим образом выполняется для значения $p = 6$.

Рассмотрим зависимость ДЭ от длины волны $\eta(\lambda)$ при значениях $p = 6$, $N = \{5, 6, 7\}$ в диапазоне длин волн $\lambda = 0,4 \dots 0,7$ мкм (рисунок 1). Для некоторых длин волн линза создает высокоэффективное изображение (ДЭ = 100 %). Согласно свойству МПДЛ величины соответствующих длин волн получены из формулы (1) для заданного фокусного расстояния $f_N = 74,8$ мкм при условии, что $f_N = f_0$ для расчетной длины волны $\lambda_0 = 0,525$ мкм. В результате получен набор длин волн для разных дифракционных порядков N : для 5-го порядка $\lambda_5 = 0,63$ мкм; для 6-го – $\lambda_6 = 0,525$ мкм; для 7-го – $\lambda_7 = 0,45$ мкм.

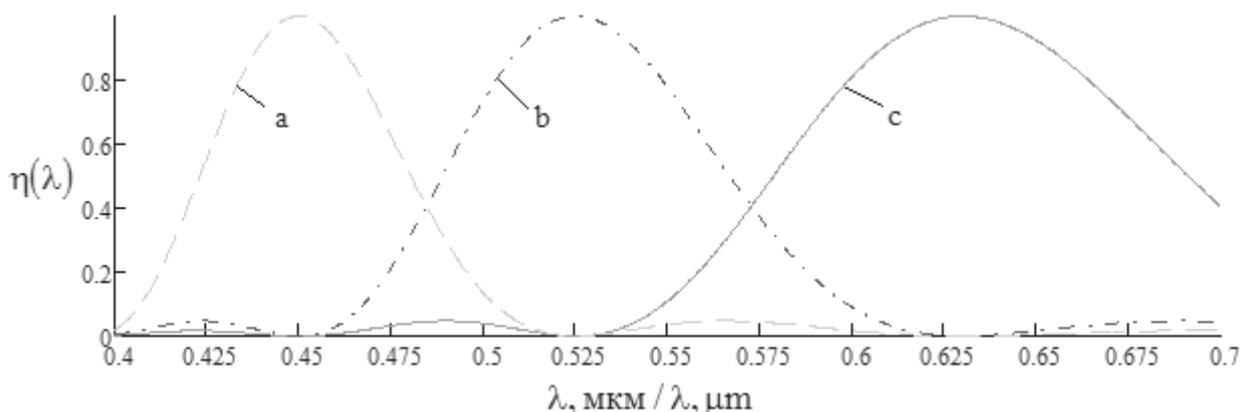


Рисунок 1 – Зависимость дифракционной эффективности от длины волны λ : $a - N = 7$; $b - N = 6$; $c - N = 5$

Figure 1 – The diffractive efficiency dependence with the change of wavelength λ : $a - N = 7$; $b - N = 6$; $c - N = 5$

Данная линза способна работать также как бифокальная (ДЭ в каждом порядке составляет 40,5 %). Исходя из формулы ДЭ (2) в соседних порядках N , $N+1$ длины волн определяются по формуле:

$$\lambda = \frac{2\lambda_0 \mu p}{2N + 1}. \quad (3)$$

Используя выражения (1) и (3), можно рассчитать соответствующие значения длин волн и фокусных точек. Например, для длины волны $\lambda = 0,485$ мкм ближняя и дальняя фокусные точки будут находиться на расстояниях $f_{бл} = 69,46$ мм, $f_{д} = 81,03$ мм.

Детально проанализировано поведение света с другими длинами волн при прохождении через линзу такого типа. Спектральный диапазон был разделен на условные отрезки, отвечающие следующим спектрам света: a – синий $\lambda_c = 0,420 \dots 0,485$ мкм; b – зеленый $\lambda_3 = 0,485 \dots 0,573$ мкм; c – красный $\lambda_k = 0,573 \dots 0,700$ мкм.

Независимо от номера порядка дифракции свет с длиной волны из каждого диапазона фокусируется в отрезки на оптической оси, которые перекрываются и имеют общую часть. Рисунок 2, построенный на основании выражений (1) и (2), дает объяснение, с какой ДЭ свет из каждого диапазона фокусируется в отрезке вдоль оптической оси. На данном этапе был проанализирован свет с ДЭ больше 40 %. Как показали исследования, рассчитанная МПДЛ фокусирует белый свет в отрезок длиной ≈ 15 мм. В каждой точке на отрезке присутствует составляющая каждого спектрального диапазона, которые в комбинации будут строить цветное изображение. Это свойство можно использовать при проектировании интраокулярных линз для замещения естественного хрусталика глаза человека, чтобы сделать менее заметным эффект наличия цветного ореола вокруг изображения.

Для определения коэффициента дисперсии МПДЛ использовано выражение $v_\lambda = \phi / \Delta\phi$, где ϕ – оптическая сила линзы для центральной длины волны; $\Delta\phi = \phi_1 - \phi_2$, ϕ_1 – оптическая сила линзы

для короткой длины волны, φ_2 – для длинной. При выражении фокусного расстояния через (1) и определении центральной λ_3 , короткой λ_c и длинной λ_k длины волн заданного спектрального диапазона коэффициент дисперсии МПДЛ записывается в виде:

$$v_\lambda = \frac{N_3 \lambda_3}{N_c \lambda_c - N_k \lambda_k}. \quad (4)$$

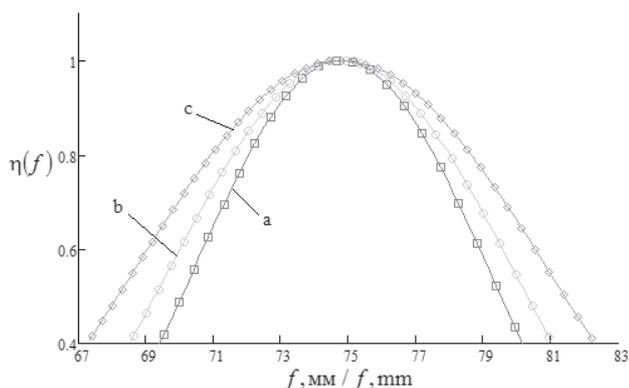


Рисунок 2 – Распределение света из заданных спектральных диапазонов вдоль оптической оси: *a* – синий $N_c = 7$; *b* – зеленый $N_3 = 6$; *c* – красный $N_k = 5$

Figure 2 – The light distribution of the specified spectral ranges along the optical axis: *a* – blue $N_b = 7$; *b* – green $N_g = 6$; *c* – red $N_r = 5$

Проведена оценка хроматизма рассмотренной МПДЛ в видимом диапазоне, для которой $N_c = 7$, $N_3 = 6$, $N_k = 5$. Согласно рисунку 2 наибольший хроматизм имеют изображения в плоскостях ближней и дальней фокусных точек, где рассматривается свет с длинами волн $\lambda_c = 0,485$ мкм, $\lambda_3 = 0,573$ мкм, $\lambda_k = 0,700$ мкм и $\lambda_c = 0,420$ мкм, $\lambda_3 = 0,485$ мкм, $\lambda_k = 0,573$ мкм соответственно. В случае ближней точки коэффициент дисперсии (4) составляет $v_{\text{бли}} = -32,74$, а для дальней – $v_{\text{д}} = 38,8$.

Как известно, для видимого диапазона коэффициент дисперсии обычной ДЛ составляет примерно $-3,5$ [2]. Таким образом, хроматизм МПДЛ на порядок меньше, чем у обычной ДЛ.

В результате исследования свойств МПДЛ выявлено, что кроме формирования качественного цветного изображения, такие линзы имеют также бесконечную аккомодацию. МПДЛ фокусируют свет в отрезок, ограниченный двумя фокусными точками – ближней $F_{\text{бли}}$ и дальней $F_{\text{д}}$. Принцип проектирования таких линз состоит в том, чтобы изображение предмета в бесконечности размещалось в дальней фокусной точке $F_{\text{д}}$, а в случае, когда предмет находится на некотором расстоянии a от

линзы, его изображение наблюдалось в ближней фокусной точке $F_{\text{бли}}$. Изображения промежуточных предметов размещаются в пределах отрезка $F_{\text{д}} F_{\text{бли}}$. Таким образом, формируются изображения предметов, находящихся на расстоянии от a и до бесконечности.

Метод проектирования многопорядковых дифракционных линз

На основании приведенных выше выкладок предложен метод проектирования интраокулярных МПДЛ. Была спроектирована линза со следующими параметрами: фокусное расстояние в воздухе $f = 100$ мм, $p = 6$, материал ПММА, расчетная длина волны $\lambda_0 = 0,525$ мкм. В пределах светового диаметра линзы $D = 7$ мм размещается 19 дифракционных зон, а максимальная глубина канавки составляет 6 мкм. В качестве основы для проектирования взята рефракционно-дифракционная ИОЛ, первая поверхность которой сферическая, а на вторую, плоскую, нанесен рельеф рассчитанной МПДЛ. Спроектированная гибридная ИОЛ была помещена в схематическую модель глаза человека по Гульстранду [12] на место естественного хрусталика (рисунок 3).

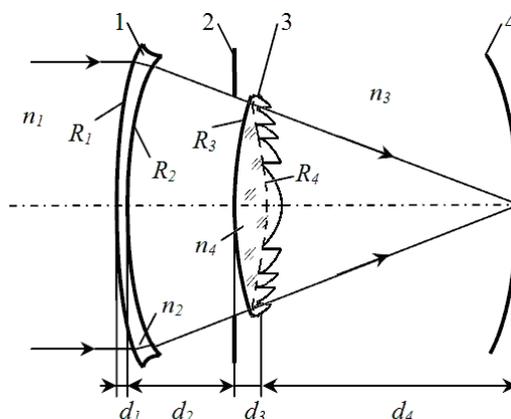


Рисунок 3 – Схематическая модель глаза: 1 – роговица; 2 – зрачок; 3 – интраокулярная линза; 4 – сетчатка

Figure 2 – The schematic eye model: 1 – cornea; 2 – pupil; 3 – intraocular lens; 4 – retina

Конструктивные параметры оптической системы представлены в таблице.

Моделирование производилось в программной среде ZEMAX. В соответствии с пояснениями из предыдущего раздела с использованием положения дальней точки $F_{\text{д}}$ бифокальной линзы, рассчитанной ранее при условии размещения предмета в бесконеч-

Таблица / Table

Параметры модели глаза с дифракционной линзой
Parameters of eye model with diffractive lens

Показатель преломления Refractive index	Радиус кривизны поверхности, мм Surface curvature radius, mm	Расстояние между поверхностями, мм Distance between components, mm
$n_1 = 1$	$R_1 = 7,7$	$d_1 = 0,5$
$n_2 = 1,38$	$R_2 = 6,8$	$d_2 = 3,1$
$n_3 = 1,34$	$R_3 = 10,91$	$d_3 = 3,6$
$n_4 = 1,49$	$R_4 = \infty$	$d_4 = 15$

ности, определялась кривизна рефракционной части ДЛ ($R_3 = 10,91$ мм). С учетом положения ближней фокусной точки $F_{\text{бли}}$ было определено, что расстояние к ближнему объекту составляет ≈ 700 мм. Таким образом, оптическая система «глаз + ИОЛ» обеспечивает четкое изображение объектов, расположенных на расстоянии от 700 мм до бесконечности.

Заключение

Установлено свойство многопорядковых линз фокусировать белый свет в отрезок на оптической оси. На основании этой способности предложен метод проектирования многопорядковых линз в качестве интраокулярных с уменьшенными хроматическими аберрациями. Подбором расчетного параметра p достигается присутствие в каждой точке отрезка трех цветных составляющих видимого света, обеспечивая полноценное изображение. С помощью предложенного выражения для коэффициента дисперсии многопорядковой дифракционной линзы показано, что ее хроматизм на порядок меньше, чем у обычных дифракционных линз. Рассмотренный подход к проектированию таких линз позволяет создавать интраокулярные линзы с бесконечной глубиной аккомодации, что обеспечивает четкое видение предметов, расположенных на некотором расстоянии a от наблюдателя и до бесконечности.

Список использованных источников

1. *Коронкевич, В.П.* Новое поколение бифокальных дифракционно-рефракционных линз / В.П. Коронкевич, Г. А. Ленкова, В. П. Корольков, А.Г. Полещук и др. // Компьютерная оптика. – 2008. – № 1. – Т. 32. – С. 50–58.

2. *Колобродов, В.Г.* Прикладная дифракционная оптика / В.Г. Колобродов, Г.С. Тымчик. – К. : НТУУ «КПИ», 2014. – 312 с.

3. *Vega, F.* Energy Efficiency Of A New Trifocal Intraocular Lens / F. Vega, F. Alba-Bueno, M.S. Millan // Journal Of The European Optical Society – Rapid Publications. – 2014. – Vol. 9. – P. 140021–140028.

4. *Faklis, D.* Spectral properties of multiorder diffractive lenses / D. Faklis, G. M. Morris // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34, No. 14. – P. 2462–2468.

5. *Sweeney, D.W.* Harmonic diffractive lenses / D.W. Sweeney, G.E. Sommargren // Appl. Opt. – 1995. – Vol. 34, No. 14. – P. 2469–2475.

6. *Chang-Jiang, F.* Design of infrared telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element / F. Chang-Jiang [et al.] // Chin. Phys. Lett. – 2007. – Vol. 24, No. 7. – P. 1973–1976.

7. *Lou, D.* Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum / D. Lou, J. Bai, X. Hou, G. Yang // Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II. – 2005. – Vol. 5636. – P. 78–85.

8. *Reichelt, S.* Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays / S. Reichelt, H. Sahn, N. Leister, A. Schwerdtner // Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications. – 2008. – Vol. 6912. – P. 69120–69130.

9. *Qiang, S.* Study of an athermal infrared dual optical system design containing harmonic diffractive element / S. Qiang [et al.] // Chinese Science Bulletin. – 2003. – Vol. 48, No. 12, P. 1193–1198.

10. *Lenkova, G.A.* Chromatic Aberrations of Diffractive-Refractive Intraocular Lenses in an Eye Model / G.A. Lenkova // Optoelectr., Instrum. Data Process. – 2009. – Vol. 45, No. 2. – P. 171–183.

11. *Колобродов, В.Г.* Проектирование многопорядковых дифракционных линз / В.Г. Колобродов, Е.О. Кучугура, И.О. Кучугура // Научные весты НТУУ «КПИ». – 2015. – №2. м С. 82–88.

12. *Сокурченко, В. М.* Глаз человека и офтальмологические приборы: / В.М. Сокурченко, Г.С. Тымчик, И.Г. Чиж. – К.: НТУУ «КПИ», 2009. – 264 с.

Design of the multiorder intraocular lenses

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»,
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine*

Received 12.03.2015

Accepted for publication 23.10.2015

Abstract. Intraocular lenses (IOLs) are used to replace the natural crystalline lens of the eye. Just few basic designs of IOLs are used clinically. Multiorder diffractive lenses (MODL) which operate simultaneously in several diffractive orders were proposed to decrease the chromatic aberration. Properties analysis of MODL showed a possibility to use them to develop new designs of IOLs. The purpose of this paper was to develop a new method of designing of multiorder intraocular lenses with decreased chromatic aberration. The theoretical research of the lens properties was carried out. The diffraction efficiency dependence with the change of wavelength was studied. A computer simulation of MODL in a schematic model of the human eye was carried out. It is found the capability of the multiorder diffractive lenses to focus polychromatic light into a segment on the optical axis with high diffraction efficiency. At each point of the segment is present each component of the spectral range, which will build a color image in combination. The paper describes the new design method of intraocular lenses with reduced chromaticism and with endless adaptation. An optical system of an eye with an intraocular lens that provides sharp vision of objects located at a distance of 700 mm to infinity is modeled.

Keywords: multiorder intraocular lens, diffraction efficiency, endless adaptation.

Адрес для переписки:

Кучугура И.О.

*Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,
пр. Победы, 37, корп. 1, 03056, г. Киев, Украина
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net*

Address for correspondence:

Kuchugura I.O.

*National Technical University of Ukraine «Kyiv Politechnic Institute»
Peremogy Ave., 37, building 1, 03056, Kyiv, Ukraine
e-mail: inna_kuchugura@ukr.net*

Для цитирования:

Колобродов В.Г., Тымчик Г.С., Кучугура И.О.

*Проектирование многопорядковых интраокулярных линз
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 204–210*

For citation:

Kolobrodov V.G., Tymchik G.S., Kuchugura I.O.

*Design of the multiorder intraocular lenses
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 204–210*

References

1. Koronkevich V.P., Lenkova G.A., Korol'kov A.G., Poleschik A.G. and other. New generation of bifocal diffractive-refractive lenses. *Kompyuternaya optika*, 2008, vol. 32, no. 1, pp. 50–58.
2. Kolobrodov V.G., Tymchik G.S. *Prikladnaya difraktsionnaya optika* [Applied diffractive optics]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2014, 312 p. (in Ukrainian).
3. Vega F., Alba-Bueno F., Millan M.S. Energy Efficiency Of A New Trifocal Intraocular Lens. *Journal Of The European Optical Society – Rapid Publications*, 2014, Vol. 9, pp. 140021–140028.
4. Faklis D., Morris G. M. Spectral properties of multiorder diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1995, Vol. 34, No. 14, pp. 2462–2468.
5. Sweeney D.W., Sommargren G.E. Harmonic diffractive lenses. *Appl. Opt.*, 1995, Vol. 34, No. 14, pp. 2469–2475.
6. Chang-Jiang F., Zhao-Qi W., Lie L. Mei Z., Hai-Ying F. Design of infrared telephoto-optical system with double-layer harmonic diffractive element. *Chin. Phys. Lett.*, 2007, Vol. 24, No.7, pp. 1973–1976.
7. Lou D., Bai J., Hou X., Yang G. Application and research of harmonic diffractive/refractive optics in visible spectrum. *Proc. SPIE., Holography, Diffractive Optics, and Applications II*, 2005, Vol. 5636, pp. 78–85.
8. Reichelt S., Sahm H., Leister N., Schwerdtner A. Capabilities of diffractive optical elements for real-time holographic displays. *Proc. SPIE., Holography XXII: Materials and Applications*, 2008, Vol. 6912, pp. 69120–69130.
9. Qiang S., Zhaoqi W., Fengyou L., Hongli L. and other. Study of an athermal infrared dual optical system design containing harmonic diffractive element. *Chinese Science Bulletin*, 2003, Vol. 48, No. 12, pp. 1193–1198.
10. Lenkova G.A. Chromatic Aberrations of Diffractive-Refractive Intraocular Lenses in an Eye Model. *Optoelectr., Instrum. Data Process.*, 2009, Vol. 45, No. 2, pp. 171–183.
11. Kolobrodov V.G., Kuchugura Ie.O., Kuchugura I.O. *Projektirovanije mnogoporjadkovykh difrakcionnykh linz* [Design of multiorder diffractive lenses]. *Research Bulletin of NTUU «KPI»*, 2015, No. 2, pp. 82–88 (in Ukrainian).
12. Sokurenko V.M., Tymchik G.S., Chyzh I.H. *Glaz cheloveka i oftal'mologicheskije pribory* [The human eye and ophthalmic devices]. Kiev, NTUU «KPI» Publ., 2009, 264 p. (in Ukrainian).

УДК 535.37

Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред

Демеш М.П.¹, Гусакова Н.В.¹, Ясюкевич А.С.¹, Кулешов Н.В.¹, Григорьев С.В.¹, Крот Ю.А.², Космына М.Б.³, Шеховцов А.Н.³

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²Институт прикладных физических проблем им. А.Н. Севченко Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, 220045, г. Минск, Беларусь

³Институт монокристаллов НАН Украины,
пр. Ленина, 60, 61001, г. Харьков, Украина

Поступила 09.06.2015

Принята к печати 23.10.2015

Для создания лазеров, генерирующих импульсы ультракороткой длительности, представляют большой интерес лазерные материалы с широкими полосами усиления. В этой связи значительный интерес представляют структурно разупорядоченные материалы, в частности новые кристаллические среды, принадлежащие тригональной сингонии $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CKV), $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CLaV) и $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$ (Nd:CLiV). В данной работе формула Фюхтбауэра–Ладенбурга и интегральный метод соответствия применены для определения спектров сечений стимулированного испускания указанных выше кристаллов на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ иона неодима. Максимальные пиковые значения сечений стимулированного испускания и наибольшие спектральные ширины полос в области 1,07 мкм составляют $9,33 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ (σ -поляризация, Nd:CKV) и 30 нм (π -поляризация, Nd:CKV), в области 1,35 мкм – $1,55 \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ и 50 нм (π -поляризация, Nd:CKV). Полосы стимулированного испускания, а следовательно, и усиления в областях спектра 1,07 и 1,35 мкм являются гладкими и бесструктурными с ширинами, позволяющими получать ультракороткие импульсы света с длительностью $\approx 60 \text{ фс}$ (1,07 мкм), $\approx 45 \text{ фс}$ (1,35 мкм) в лазерах на исследованных лазерных средах, работающих в режиме синхронизации мод.

Ключевые слова: двойной ортованадат, коэффициент ветвления люминесценции, сечение стимулированного испускания, формула Фюхтбауэра–Ладенбурга, интегральный метод соответствия.

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: anatol@bntu.by

Для цитирования:

Демеш М.П., Гусакова Н.В., Ясюкевич А.С., Кулешов Н.В., Григорьев С.В., Крот Ю.А., Космына М.Б., Шеховцов А.Н. Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия для определения спектров сечений стимулированного испускания неодимовых лазерных сред // Приборы и методы измерений. 2015. – Т. 6, № 2. – С. 211–219

For citation:

Demesh M.P., Gusakova N.V., Yasukevich A.S., Kuleshov N.V., Grigor'ev S.V., Krot Y.A., Kosmyna M. B., Shekhotsov A.N. Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity method for determination of emission cross sections of Nd-doped laser media // Devices and Methods of Measurements. 2015, vol. 6, No. 2, pp. 211–219

Введение

Кристаллы ванадатов, относящиеся к тетрагональной сингонии с общей формулой $REVO_4$ (где $RE = Y, Gd, Lu$), активированные ионами редкоземельных элементов ($Nd^{3+}, Yb^{3+}, Tm^{3+}$ и др.), широко используются как активные материалы в лазерах с диодной накачкой [1–3]. Кристаллы твердых растворов ванадатов состава $Gd Y_{1-x} VO_4$ и $Ca_9 X (VO_4)_7$ ($X = La^{3+}, Y^{3+}, Gd^{3+}, Lu^{3+}, Bi^{3+}$) [4, 5] с ионами PЗЭ привлекательны как активные среды для получения импульсов ультракороткой длительности, что связано с уширением их полос усиления.

В работе [6] представлены результаты исследований спектрально-люминесцентных характеристик новых соединений $Nd^{3+}:Ca_{10}K(VO_4)_7$, $Nd^{3+}:Ca_9La(VO_4)_7$ и $Nd^{3+}:Ca_{10}Li(VO_4)_7$ с кристаллической структурой, принадлежащей тригональной сингонии.

Целью данной работы являлось экспериментальное определение коэффициентов ветвления и расчет спектров сечений стимулированного испускания на переходах ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$, и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ ионов неодима в кристаллах $Nd:CKV$, $Nd:CLaV$ и $Nd:CLiV$ по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга (ФЛ). Для расчетов спектров сечений на переходе ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ был дополнительно применен интегральный метод соответствия.

Определение спектральной чувствительности люминесцентной установки

Спектральная чувствительность регистрирующей части люминесцентной установки может быть найдена несколькими методами [7]: метод флуоресцирующего раствора, метод отражения света источника возбуждения, метод эталонной лампы. Последний метод наиболее часто применяется на практике. В качестве эталонной лампы могут быть использованы светоизмерительные лампы типа СИРШ, СИП и другие, с ленточным телом накала. Такие лампы являются источником света с известным распределением яркости излучения по спектру в абсолютных единицах. Для целей люминесцентных измерений более удобными являются калибровочные галогеновые источники света, позволяющие получить относительное распределение яркости в видимой и ближней инфракрасной областях спектра.

Калибровка регистрирующей части люминесцентной установки на спектральную чувствительность разбивается на два этапа: определение

относительной спектральной плотности энергетической яркости (СПЭЯ) эталонной галогеновой лампы, которая пропорциональна спектральной плотности мощности излучения лампы $P_{ил}(\lambda)$, и непосредственно определению спектральной чувствительности люминесцентной установки с использованием откалиброванной галогеновой лампы. Отметим, что говоря о спектральной мощности излучения лампы или люминесценции, мы будем иметь в виду только ее относительное распределение в спектре.

Калибровка спектра галогеновой лампы проводилась методом компарирования со спектром рабочего эталона (РЭ), который представляет собой ленточную лампу накаливания с сертификатом калибровки по СПЭЯ. Метод компарирования заключается в том, что в исследуемом спектральном диапазоне непосредственным образом измеряются величины сигналов от фотоприемников для РЭ и галогеновой лампы, и по известному спектру РЭ определяется СПЭЯ галогеновой лампы. Для сравнения сигналов от двух источников света использовался монохроматор МДР-23 с охлаждаемыми приемниками излучения *Hamamatsu S 7031-1006S* и *G9208-256W* на области спектра 350–1000 нм и 1000–2500 нм соответственно. Для работы в спектральном диапазоне 350–2500 нм используются три дифракционные решетки с числом штрихов на миллиметр 1200, 600 и 300. Для устранения переналожения порядков дифракции применялась предварительная спектральная селекция при помощи полосовых фильтров, установленных перед входной щелью монохроматора.

При проведении измерений соблюдалась идентичность геометрических условий ввода излучения в монохроматор от обоих источников света. Излучение РЭ и галогеновой лампы подавалось на входную щель монохроматора с помощью зеркального коллиматора. Изображение тела накала источника света переносилось на щель монохроматора в масштабе 1:1. При измерениях контролировалась величина и однородность заполнения излучением дифракционной решетки монохроматора. Полученная относительная СПЭЯ галогеновой лампы показана на рисунке 1.

Калибровка люминесцентной установки на спектральную чувствительность по галогеновой лампе с известной СПЭЯ проводилась в трех спектральных диапазонах 400–900 нм, 850–1800 нм, 1700–2500 нм для поляризации света, параллельной входной спектральной щели монохроматора МДР 23, перпендикулярно ей и для неполяризо-

ванного света. Для устранения переналожения порядков дифракции применялась предварительная спектральная селекция при помощи полосовых фильтров, установленных перед входной щелью монохроматора. Схема люминесцентной установки представлена на рисунке 2.

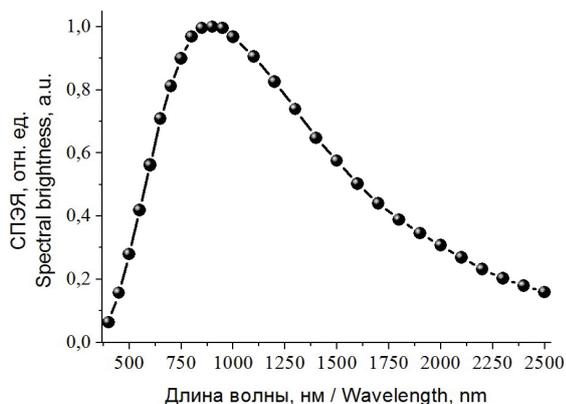


Рисунок 1 – Спектральная плотность энергетической яркости галогеновой лампы

Figure 1 – Spectral brightness of the halogen lamp

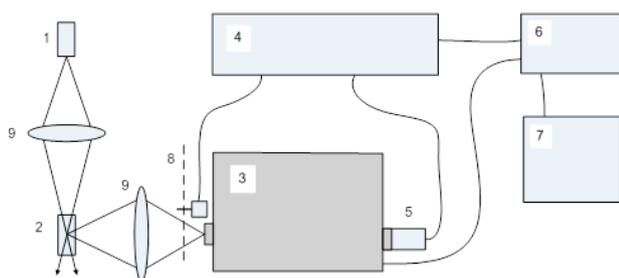


Рисунок 2 – Схема люминесцентной установки: 1 – источник излучения возбуждения (лазерный диод, длина волны излучения – 802 нм); 2 – исследуемый образец; 3 – монохроматор МДР-23; 4 – фазовый синхронный усилитель SR830; 5 – фотоприемник; 6 – блок управления монохроматором; 7 – компьютер; 8 – механический модулятор; 9 – фокусирующие объективы

Figure 2 – Setup for luminescence measurements: 1 – excitation source (laser diode, $\lambda = 802$ nm); 2 – sample; 3 – monochromator MDR-23; 4 – lock-in amplifier SR830; 5 – photodetector, 6 – control unit of the monochromator; 7 – PC; 8 – chopper; 9 – lenses

В процессе калибровки регистрировался спектр излучения галогеновой лампы $U(\lambda)$ в соответствующем спектральном диапазоне в относительных единицах как функция длины волны света. Связь между зарегистрированным спектром $U(\lambda)$ и $P_{HL}(\lambda)$ определяется как

$$U(\lambda) = S(\lambda) P_{HL}(\lambda), \quad (1)$$

где $S(\lambda)$ есть спектральная чувствительность регистрирующей части люминесцентной установки в относительных единицах. При регистрации спектра $U(\lambda)$ наблюдались провалы в областях 1345–1485 нм и 1800–1975 нм, обусловленные поглощением паров воды, присутствующих в воздухе [8]. Кривые $S(\lambda)$ в этих областях исправлялись на спектр поглощения паров воды при помощи сплайн функций 3-го порядка. На рисунке 3 приведен вид $S(\lambda)$ для спектрального диапазона 850–1800 нм, в котором расположены интересные нас линии в спектре люминесценции ионов Nd^{3+} .

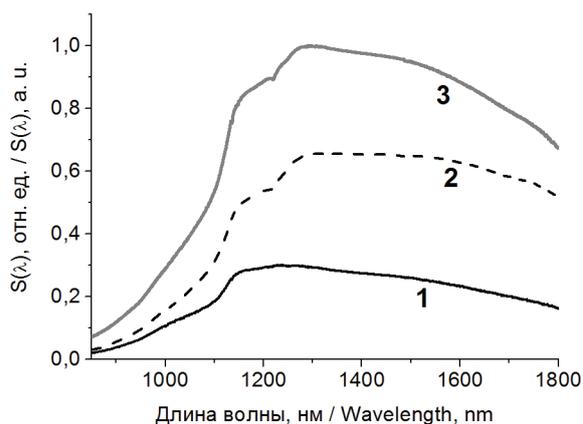


Рисунок 3 – Калибровочные кривые в спектральном диапазоне 850–1800 нм для поляризации света параллельно (1) и перпендикулярно (2) входной щели монохроматора и для неполяризованного света (3)

Figure 3 – Calibration curves in the spectral range of 850–1800 nm for light polarization parallel to (1) and perpendicular to (2) the entrance slit of the monochromator and for unpolarized light (3)

В качестве примера для кристалла $Nd^{3+}:Ca_9La(VO_4)_7$ на рисунке 4 представлены спектры люминесценции для π - и σ -поляризации до и после корректировки на спектральную чувствительность установки.

Определение спектров стимулированного испускания

Спектры люминесценции в поляризованном свете зарегистрированы для переходов ионов неодима ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$ и ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ при возбуждении уровня ${}^4F_{5/2}$. Люминесценция в области 1860 нм, соответствующая переходу ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ [9], в наших экспериментах не наблюдалась. Измеренные спектры люминесценции U_{lum} корректировались на спектральную чувствительность установки и были получены спектры мощ-

ности люминесценции $P_{lum}(\lambda)$ в относительных единицах:

$$P_{lum}(\lambda) = U_{lum}(\lambda) / S(\lambda), \quad (2)$$

По этим спектрам определены коэффициенты ветвления люминесценции β_{ji} при переходах с уровня ${}^4F_{3/2}$ по формуле:

$$\beta_{ji}^\alpha = \frac{\int \lambda P_{ji}^\alpha(\lambda) d\lambda}{\sum_k \int \lambda P_{jk}^\alpha(\lambda) d\lambda}, \quad (3)$$

где $P_{ji}^\alpha(\lambda)$ – спектральная плотность мощности люминесценции, соответствующая одной из линий в спектре люминесценции $P_{lum}(\lambda)$ при переходе с уровня ${}^4F_{3/2}$. Индекс j соответствует начальному состоянию перехода – ${}^4F_{3/2}$. Индексы i и k обозначают конечное состояние перехода – ${}^4I_{9/2}$, ${}^4I_{11/2}$ и

${}^4I_{13/2}$, индекс α – состояние поляризации излучения люминесценции.

В таблице 1 представлены полученные результаты в сравнении с теоретически рассчитанными в работе [6]. Для кристалла Nd:CLiV в данной работе нами проведены расчеты по теории Джадда–Офельта [10–11], которые уточняют данные из [6]. Исследуемые кристаллы кальциевых ванадатов являются оптически одноосными. Поэтому для сравнения экспериментальных данных с результатами теоретического расчета использовались средние значения коэффициентов ветвления в соответствии с выражением $\beta_{ji} = (\beta_{ji}^\pi + 2\beta_{ji}^\sigma) / 3$. Здесь индексы π и σ обозначают коэффициенты ветвления, определенные из спектров люминесценции в поляризованном свете, зарегистрированных для поляризации параллельно и перпендикулярно оптической оси кристаллов соответственно.

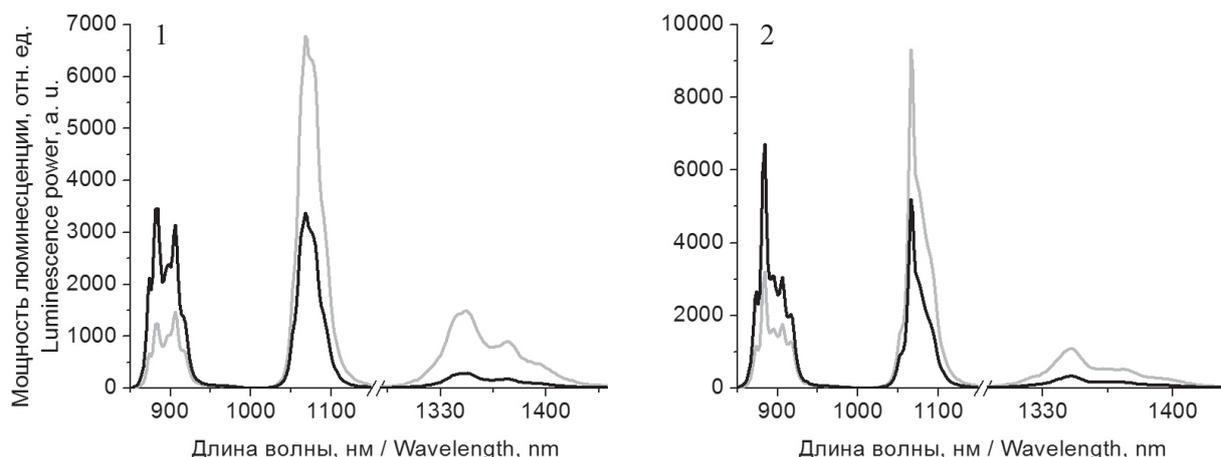


Рисунок 4 – Спектр люминесценции для π (1) и σ (2) поляризации $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ до (серая линия) и после коррекции (черная линия) на спектральную чувствительность люминесцентной установки

Figure 4 – Luminescence spectra for π (1) и σ (2) polarizations of $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ crystal before (gray line) and after (black line) spectral correction

Таблица 1 / Table 1

Коэффициенты ветвления люминесценции при переходах с уровня ${}^4F_{3/2}$
Branching ratios for the ${}^4F_{3/2}$ manifold

Переход Transition	Диапазон длин волн, нм Wavelength range, nm	Nd:CLiV		Nd:CKV		Nd:CLaV	
		β_{exp}	β_{calc}	β_{exp}	$\beta_{calc}^{[6]}$	β_{exp}	β_{calc}
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$	850–1000	0,47	0,47	0,45	0,44	0,47	0,46
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{11/2}$	1020–1150	0,46	0,45	0,48	0,49	0,46	0,45
${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$	1280–1460	0,07	0,08	0,07	0,07	0,07	0,08
$\tau_{rad}^?$ МКС			140		92		125

Как видно из таблицы 1, для всех кристаллов наблюдается хорошее согласие теоретических и экспериментальных результатов, различие между которыми составляет не более 14 %.

Откорректированные спектры люминесценции использованы для расчета спектров сечений стимулированного испускания (СИ) по ФЛ [12].

$$\sigma_{ji}^a(\lambda) = \beta_{ji} \frac{\lambda^4}{8\pi c n^2 \tau_{rad}} g_{ji}^a(\lambda), \quad (4)$$

где c – скорость света в вакууме; n – показатель преломления среды; τ_{rad} – радиационное время жизни верхнего лазерного уровня; $g_{ji}^a(\lambda)$ – форма спектральной линии:

$$g_{ji}^a(\lambda) = \frac{3\lambda P_{ji}^a(\lambda)}{\int [2P_{ji}^\sigma(\lambda) + P_{ji}^\pi(\lambda)] \lambda d\lambda}. \quad (5)$$

На рисунке 5 представлены спектры сечений СИ, рассчитанные по ФЛ для переходов диапазонов спектра 1020–1140 нм и 1280–1460 нм.

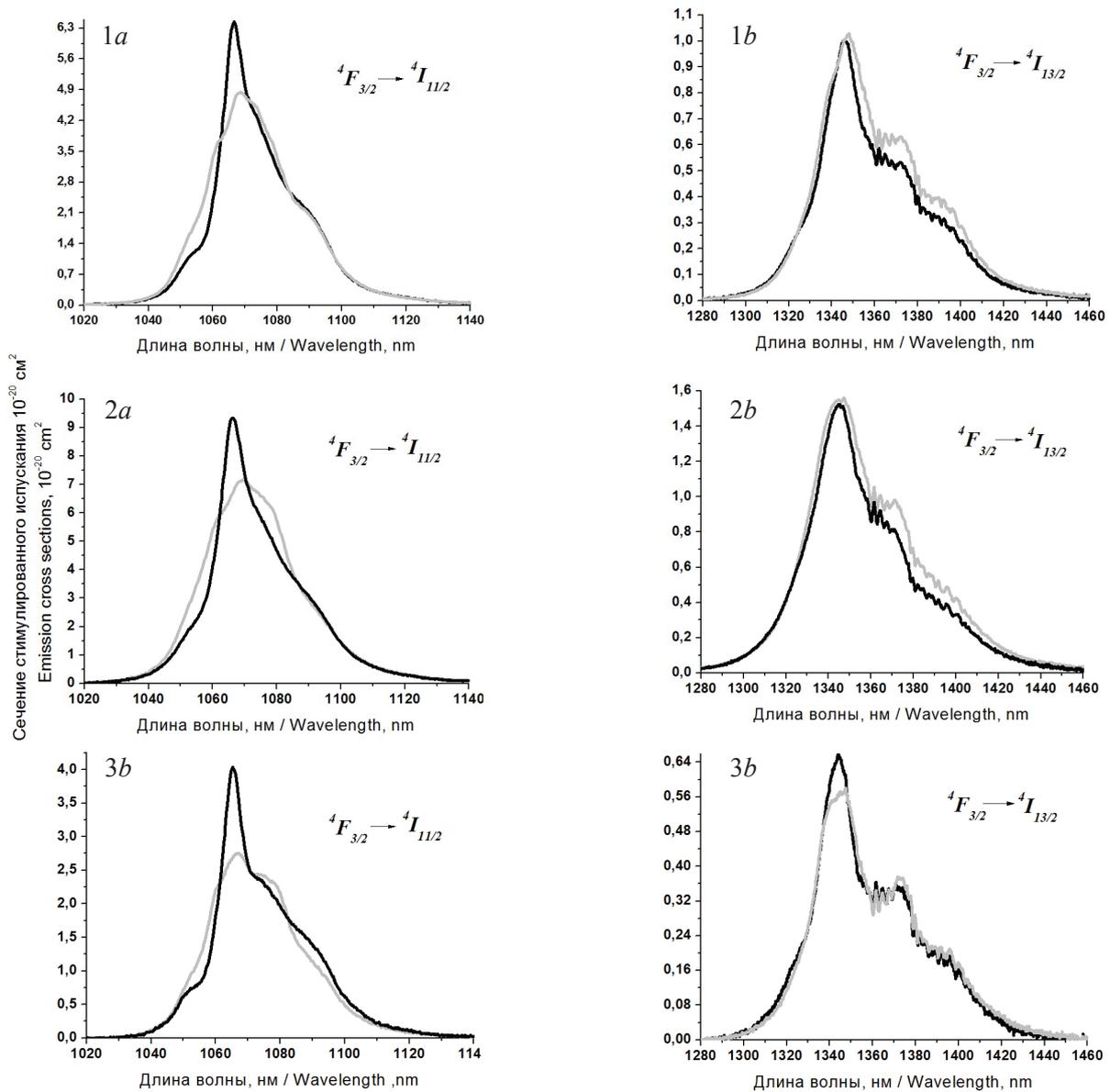


Рисунок 5 – Спектры поперечных сечений стимулированного испускания кристаллов, рассчитанные по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга: серые линии – π -поляризация; черные линии – σ -поляризация; 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$

Figure 5 – Emission cross sections spectra calculated by Füchtbauer–Ladenburg equation: gray line – π -polarization; black line – σ -polarization; 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$

Таблица 2 / Table 2

**Поперечное сечения стимулированного испускания $\sigma_{em} * 10^{20}$ (см²) и ширина полосы (нм)
Emission cross sections $\sigma_{em} * 10^{20}$ (cm²) and FWHM (nm)**

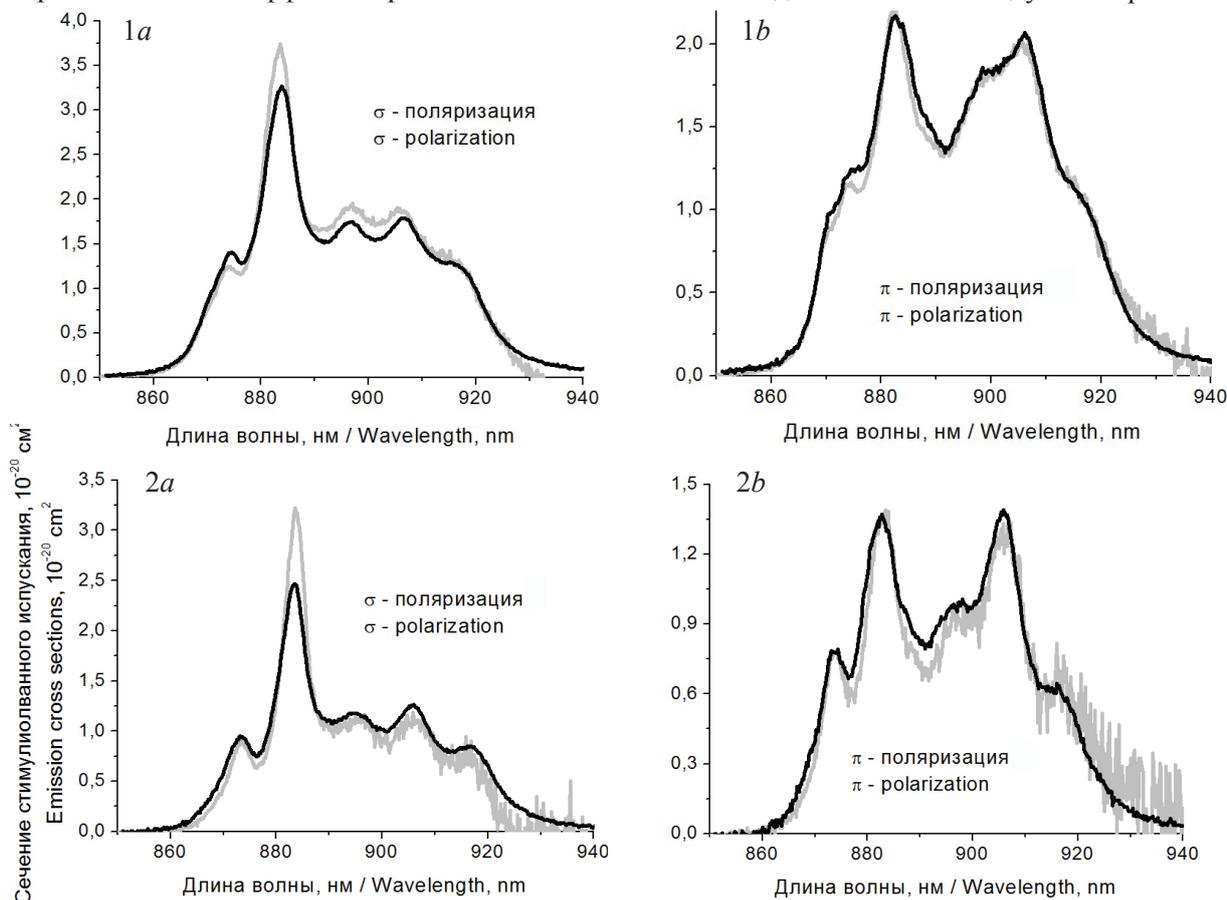
Длина волны, мкм Wavelength, μm	Nd:CLiV		Nd:CKV		Nd:CLaV	
	σ	π	σ	π	σ	π
~0,98	3,7 (9)	2,17 (43)	3,2 (6)	1,38 (40)	3,06 (7)	3,06 (40)
~1,07	6,44 (19)	4,78 (28)	9,33 (19)	7,17 (30)	4,02 (19)	2,74 (30)
~1,35	1,0 (40)	1,03 (46)	1,52 (43)	1,55 (50)	0,66 (41)	0,59 (47)

Как видно из рисунка 5, формы спектров СИ для соответствующих переходов слабо отличаются друг от друга для различных кристаллов, в то время как значение сечения в максимуме спектра для σ -поляризации кристалла Nd:CKV составляет $9,3 \cdot 10^{-20}$ см², что примерно в 2 раза больше, чем для Nd:CLaV, и в 1,5 раза – чем для Nd:CLiV (таблица 2).

Уровень $^4I_{9/2}$, в отличие от $^4I_{11/2}$ и $^4I_{13/2}$, является термически заселенным, поэтому спектры люминесценции на переходе $^4F_{3/2} \rightarrow ^4I_{9/2}$ могут быть искажены за счет перепоглощения. Вследствие этого, мы провели расчет спектров СИ для этого перехода по ФЛ и интегральным методом соответствия [13], который свободен от эффекта перепоглощения:

$$\sigma_{em}^{\alpha}(\lambda) = \frac{3 \exp(-hc/kT\lambda)}{8\pi c n^2 \tau_{rad} \sum_i \int \lambda^{-4} \sigma_{abs}^i(\lambda) \exp(-hc/kT\lambda) d\lambda} \sigma_{abs}^{\alpha}(\lambda). \quad (6)$$

На рисунке 6 представлены спектры сечений стимулированного испускания, рассчитанные по этим двум методам. Как видно, наиболее сильно искажены спектры для σ -поляризации. Так, для этой поляризации сечения поглощения имеют большие значения, чем для π -поляризации, и здесь наблюдается значительное перекрытие линий поглощения и люминесценции в области 880 нм. В наибольшей степени это проявляется для кристалла Nd:CKV, где наибольшая концентрация ионов неодима из всех исследуемых кристаллов.



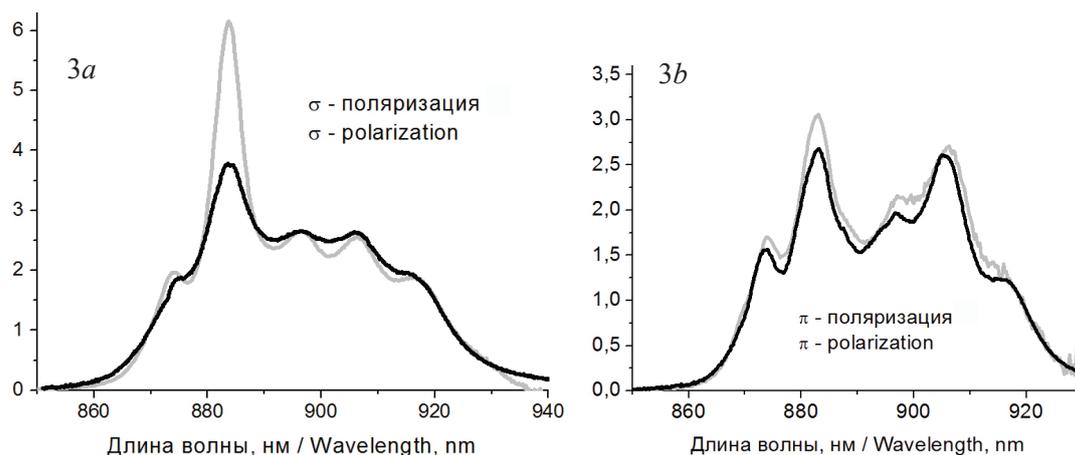


Рисунок 6 – Спектры поперечных сечений стимулированного испускания перехода ${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$, рассчитанные по формуле Фюхтбауэра–Ладенбурга (черные линии) и по интегральному методу соответствия (серые линии): 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$

Figure 6 – Emission cross sections spectra (${}^4F_{3/2} \rightarrow {}^4I_{9/2}$ transition) calculated by Fuchtbauer–Ladenburg equation (black line) and by integral method of reciprocity (gray line): 1 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{Li}(\text{VO}_4)_7$; 2 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$; 3 – $\text{Nd}^{3+}:\text{Ca}_{10}\text{K}(\text{VO}_4)_7$

Заключение

Определены коэффициенты ветвления люминесценции и сечений стимулированного испускания кристаллов семейства двойных ортованадатов $\text{Ca}_9\text{La}(\text{VO}_4)_7$ и $\text{Ca}_{10}\text{A}(\text{VO}_4)_7$ (A – Li, K), активированных ионами неодима. Для корректного определения этих спектроскопических параметров проведена калибровка люминесцентной установки по спектральной чувствительности.

Значения сечений стимулированного испускания в пике полосы в области 1,06 мкм для σ -поляризации равны $(6,4; 9,3 \text{ и } 4) \cdot 10^{-20} \text{ см}^2$ для кристаллов $\text{Nd}:\text{CLiV}$, $\text{Nd}:\text{CaKV}$ и $\text{Nd}:\text{CLaV}$ соответственно.

Спектры стимулированного испускания исследуемых кристаллов имеют ширину полосы от 20 до 40 нм (в зависимости от кристалла и состояния поляризации излучения), что делает их привлекательными в качестве активных сред лазеров для получения ультракоротких импульсов (< 100 фс) в режиме синхронизации мод.

Список использованных источников

1. Kisel, V.E. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped $\text{Yb}^{3+}:\text{YVO}_4$ laser / V.E. Kisel [et al.] // Optics Letters. – 2005. – Vol. 30, № 10. – P. 1150–1152.
2. Ter-Gabrielyan, N. Spectroscopic and laser properties of resonantly (in-band) pumped $\text{Er}:\text{YVO}_4$ and $\text{Er}:\text{GdVO}_4$ crystals: a comparative study / N. Ter-Gabrielyan [et al.] // Opt. Lett. Express. – 2012. – Vol. 2, № 8. – P. 1040–1049.
3. Chen, H.R. Passive mode-locking in diode-pumped c-cut $\text{Nd}:\text{LuVO}_4$ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror / H.R. Chen [et al.] // Appl. Phys. B. – 2009. – Vol. 96. – P. 19–23.

4. Petrov, V.V. Partially disordered $\text{Yb}:\text{CdxY1-xVO}_7$ crystal for femtosecond lasers / V.V. Petrov [et al.] // International Conference on Lasers, Applications and Technologies: Conference program, Minsk, Belarus, May 28 – June 1 / B.I. Stepanov Institute of Physics; ed. by V.A. Orlovich [et al.]. – Minsk, 2007. – P. 67310I-1.
5. Belik, A.A. Crystal Structures of Double Vanadates, $\text{Ca}_9\text{R}(\text{VO}_4)_7$. I. R = La, Pr, and Eu / A.A. Belik [et al.] // Cryst. reports. – 1997. – Vol. 42, № 5. – P. 751–756.
6. Loiko, P.A. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered $\text{Ca}_9(\text{La/Y})(\text{VO}_4)_7$ and $\text{Ca}_{10}(\text{Li/K})(\text{VO}_4)_7$ crystals / P.A. Loiko [et al.] // Journal of Luminescence. – 2013. – Vol. 137. – P. 252–258.
7. Левшин, Л.В. Люминесценция и ее измерения: Молекулярная люминесценция / Л.В. Левшин, А.М. Селечкий. – М.: Изд-во МГУ, 1989. – 272 с.
8. The infrared and electro-optical systems handbook: in 8 volumes / Joseph S. Accetta, David L. Shumaker (executive editors). – Washington: SPIE optical eng. press. – Vol. 2: Atmospheric propagation of radiation / Frederick G. Smith (editor). – 1993. – 322 p.
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2013). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2013, October 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
10. Judd, B.R. Optical absorption intensities of rare-earth ions / B.R. Judd // Phys. Rev. – 1962. – Vol. 127. – P. 750–761.
11. Ofel, G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ions / G.S. Ofel // Journal Chem. Phys. – 1962. – Vol. 37. – P. 511–520.
12. Payne, S.A. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er^{3+} , Tm^{3+} and Ho^{3+} / S.A. Payne [et al.] // IEEE J. of Quantum Electron. – 1992. – Vol. 28. – P. 2619–2630.
13. Yasukevich, A.S. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers / A.S. Yasukevich [et al.] // Journal of App. Spectroscopy. – 2004. – Vol. 71. – P. 202–208.

Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity method for determination of emission cross sections of Nd-doped laser media

Demesh M.P.¹, Gusakova N.V.¹, Yasukevich A.S.¹, Kuleshov N.V.¹,
Grigor'ev S.V.¹, Krot Y.A.², Kosmyna M.B.³, Shekhotsov A.N.³

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus

²A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University,
Kurchatova St., 7, 220045, Minsk, Belarus

³Institute for Single Crystal of the National Academy of Science of Ukraine,
Lenin Ave., 60, 61001, Kharkov, Ukraine

Received 09.06.2015

Accepted for publication 23.10.2015

Abstract. Rare-earth doped crystals with broad bands of gain spectra are attractive for femtosecond laser applications. Therefore, for this purposes crystals with disordered structure are of great interest. In this article we investigate laser-related spectroscopic properties of new trigonal crystals Nd³⁺:Ca₁₀K(VO₄)₇ (Nd:CKV), Nd³⁺:Ca₉La(VO₄)₇ (Nd:CLaV) и Nd³⁺:Ca₁₀Li(VO₄)₇ (Nd:CLiV). The Füchtbauer-Ladenburg equation and the integral reciprocity method were applied for determination of stimulated emission cross section spectra for Nd³⁺ ions. The maximum values of emission cross sections and bandwidth (FWHM) near $\lambda = 1,07 \mu\text{m}$ are $9,33 \cdot 10^{-20} \text{cm}^2$ (σ – polarization, Nd:CKV) and 30 nm (π – polarization, Nd:CKV), near $\lambda = 1,35 \mu\text{m}$ – $1,55 \cdot 10^{-20} \text{cm}^2$ and 50 nm (π – polarization, Nd:CKV). The broad and smooth bands of the gain spectra in the regions near 1,07 and 1,35 μm make it possible to generate ultra short light pulses with duration of about 60 fs (1,07 μm) and 45 fs (1,35 μm) in the mode-locking regime.

Keywords: calcium vanadate, luminescence branching ratio, stimulated emission cross-sections, the Füchtbauer-Ladenburg equation, the integral method of reciprocity.

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: anatol@bntu.by

Для цитирования:

Демеш М. П., Гусакова Н. В., Ясюкевич А. С., Кулешов Н. В.,
Григорьев С. В., Крот Ю. А., Космына М. Б., Шеховцов Н. А.
Применение методов Фюхтбауэра–Ладенбурга и соответствия
для определения спектров сечений стимулированного излучения
неодимовых лазерных сред
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 211–219

For citation:

Demesh M. P., Gusakova N. V., Yasukevich A. S., Kuleshov N. V.,
Grigor'ev S. V., Krot Y. A., Kosmyna M. B., Shekhotsov A. N.
Application of Füchtbauer–Ladenburg equation and reciprocity
method for determination of emission cross sections of Nd-doped
laser media
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 211–219

References

1. Kisel V.E., Troshin A.E., Shcherbitsky V.G., Kuleshov N.V., Matrosov V.N., Matrosova T.A., Kupchenko M.I., Brunner F., Paschotta R., Morier-Genoud F., Keller U. Femtosecond pulse generation with a diode-pumped Yb³⁺:YVO₄ laser. *Optics Letters*, 2005, vol. 30, pp. 1150–1152.
2. Ter-Gabrielyan N., Fromzel V., Ryba-Romanowski W., Likasiewicz T, Dubinskii M. Spectroscopic and laser properties of resonantly (in-band) pumped Er:YVO₄ and Er:GdVO₄ crystals: a comparative study. *Opt. Lett. Express*, 2012, vol. 2, pp. 1040–1049.
3. Chen H.R., Lin J.H., Song K.T., Lin K.H., Hsieh W.F. Passive mode-locking in diode-pumped c-cut Nd:LuVO₄ laser with a semiconductor saturable-absorber mirror. *Appl. Phys. B*, 2009, vol. 96, pp. 19–23.
4. Petrov V.V., Pestryakov E.V., Trunov V.I., Kirpichnikov A.V., Merzliakov M.A., Laptev A.V., Matrosov V.N., Klimin S.A. Partially disordered Yb:CdxY1-xVO₇ crystal for femtosecond lasers. International Conference on Lasers, Applications and Technologies: Conference program, Minsk, Belarus, May 28 – June 1 / B.I. Stepanov Institute of Physics, Minsk 2007, p. 67310I-1.
5. Belik A. A., Morozov V. A., Grechkin S.V., Khasanov S. S., Lazoryak B.I. Crystal Structures of Double Vanadates, Ca₃R(VO₄)₇. I. R = La, Pr, and Eu. *Cryst. Reports*. 1997, vol. 42, pp. 751–756.
6. Loiko P.A., Yasukevich A. S., Gulevich A. E., Demesh M.P., Kosmyna M.B., Nazarenko B.P., Puzikov V.M., Shehovtsov A.N., Kornienko A.A., Dunina E.B., Kuleshov N.V., Yumashev K.V. Growth, spectroscopic and thermal properties of Nd-doped disordered Ca₉(La/Y)(VO₄)₇ and Ca₁₀(Li/K)(VO₄)₇ crystals. *Journal of Luminescence*, 2013, vol. 137, pp. 252–258.
7. Levshin L.V. *Lyumineszenziya i yeye izmereniya* [Luminescence and its measurements]. Moscow, Moscow St. Univ Publ, 1989. 272 p.
8. Frederick G. Smith (editor). Atmospheric propagation of radiation. Washington : SPIE optical eng. press. 1993, vol. 2, 322 p. The infrared and electro-optical systems handbook : in 8 volumes. Accetta Joseph S., Shumaker David L. (executive editors).
9. Kramida A., Ralchenko Yu., Reader J., and NIST ASD Team (2013). *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1), [Online]. Available: <http://physics.nist.gov/asd> [2013, October 22]. National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
10. Judd B.R. Optical absorption intensities of rare earth ions. *Phys. Rev.* 1962, vol. 127, pp. 750–761.
11. Ofelt G.S. Intensities of crystal spectra of rare earth ions. *Journal Chem. Phys.* 1962, vol. 37. pp. 511–520.
12. Payne S.A., Chase L.L., Smith Larry K., Kway Wayne L., Krupke William F. Infrared cross-section measurements for crystals doped with Er³⁺, Tm³⁺ and Ho³⁺. *IEEE J. of Quantum Electron.* 1992, vol. 28, pp. 2619–2630.
13. Yasukevich A.S., Shcherbitskii V.G., Kisel V.E., Mandrik A.V., Kuleshov N.V. Integral method of reciprocity in the spectroscopy of laser crystals with impurity centers. *Journal of App. Spectroscopy.* 2004, vol. 71, pp. 202–208.

УДК 621.375.826

Применение корреляционной обработки цифровых оптических изображений для решения задач криминалистики

Козлов В.Л., Васильчук А.С.

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

Поступила 17.06.2015

Принята к печати 30.10.2015

Применение корреляционной обработки цифровых оптических изображений объектов экспертного исследования является перспективным направлением повышения качества, достоверности и репрезентативности проводимых исследований. Целью работы являлась разработка принципов компьютерной реализации и алгоритмов проведения экспертных исследований с применением методов корреляционного анализа для решения таких задач криминалистики, как сравнение цвето-тоновых параметров изображений оттисков печатей и штампов и измерение параметров следов полей нарезов канала ствола на стреляных пулях. Разработана методика и программное приложение, предназначенное для получения линейных, угловых и высотных характеристик профиля (микрорельефа) следов полей нарезов канала ствола оружия, отобразившихся на пуле в процессе выстрела, для проведения судебно-баллистических экспертиз. Экспериментальные данные свидетельствуют о высокой эффективности работы разработанного программного приложения и подтверждают требуемую точность проводимых измерений. Разработана методика и создано специализированное программное приложение для сравнительного анализа цвето-тоновых характеристик изображений оттисков печатей и штампов, отражающее степень и характер распределения красящего вещества в штрихах, что повышает наглядность и объективность экспертиз, а также позволяет сократить сроки их проведения. Предложена методика экспертной интерпретации результатов корреляционного анализа. Достоверность полученных значений подтверждается экспериментальными исследованиями и была проверена при помощи других методов.

Ключевые слова: цифровое изображение, цвето-тоновые параметры, корреляционная обработка, субпиксельная интерполяция.

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220050, г. Минск, 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., Васильчук А.С.
Применение корреляционной обработки цифровых оптических изображений для решения задач криминалистики
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 220–229

For citation:

Kozlov V.L., Vasilchuk A.S.
Correlation processing of digital optical images for solving criminalistic problems
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 220–229

Введение

Разработка специализированного программного обеспечения (ПО) с применением функций корреляционной обработки цифровых изображений объектов экспертного исследования является перспективным направлением проведения криминалистических экспертиз, так как позволяет расширить перечень методов и средств измерений, оптимизировать процесс измерений и тем самым повысить качество, достоверность и репрезентативность проводимых исследований [1–3].

Одной из важных задач криминалистической экспертизы является изучение цвето-тоновых параметров цифровых моделей изображений оттисков печатей и штампов (ОПШ) [4]. Применение корреляционной обработки оптических изображений является одним из направлений повышения качества цифровой обработки оттисков удостоверительных печатных форм, т.к. делает возможным получение данных, которые недоступны при использовании других методов исследования и могут быть полезны при решении различного рода диагностических и некоторых идентификационных экспертных задач [5–8]. Цифровой анализ оптических характеристик изображений позволит получить информацию, отражающую степень и характер распределения красящего вещества в штрихах, с максимально высокой точностью и достоверностью. Важной задачей также является преобразование полученных цифровых данных в криминалистически значимую информацию, что возможно только путем использования специализированного ПО, алгоритмы работы которого позволяют осуществлять необходимый подсчет и интерпретацию соответствующих параметров изображения.

Другой важной задачей криминалистической и судебно-баллистической экспертизы является определение вида и конкретного экземпляра ручного огнестрельного оружия. Успешная идентификация конкретного экземпляра оружия напрямую зависит от применяемых в процессе исследования технических средств и методов, что позволяет расширить круг идентификационных признаков и в результате значительно повысить качество проводимых исследований, обоснованность и достоверность полученных выводов [9]. В криминалистической литературе справедливо отмечается, что техника исследования пуль, гильз и огнестрельного оружия в целях его идентификации пока отстает от возможностей, которые может обеспечить

современное развитие технических наук. В связи с этим технические средства, применяемые при производстве судебно-баллистических экспертиз, нуждаются в совершенствовании [1, 2].

Для определения модели оружия, из которого выстрелена исследуемая пуля, измеряются: диаметр пули, число отобразившихся на ней нарезов, ширина и угол их наклона. Одним из параметров, определение которого до настоящего времени представляло значительную сложность, является измерение высот неровностей профиля (микрорельефа) следов полей нарезов канала ствола на выстрелянных пулях. Решение приведенной задачи возможно с использованием корреляционного анализа цифрового стереоизображения объектов экспертного исследования. Корреляционный анализ стереоизображения используется для решения задач построения 3D-изображений объектов и карты глубины по дальности заданной области пространства [10–13]. Однако задача измерения размерных параметров и профиля микрообъектов с использованием этой методики до настоящего времени не решена. Для обеспечения высокой точности измерений необходимо применение субпиксельной интерполяции [14–15], при этом целесообразно разработать специализированную методику для анализа размеров микрообъектов.

Целью работы являлась разработка принципов компьютерной реализации алгоритмов проведения экспертных исследований и создание программного приложения для решения таких задач криминалистики, как сравнение цвето-тоновых параметров изображений оттисков печатей и штампов и измерение параметров следов полей нарезов канала ствола на стреляных пулях с применением методов корреляционного анализа оптических изображений и субпиксельной интерполяции положения максимума корреляционной функции.

Измерение неровностей профиля и линейных характеристик микроследов на объектах исследования криминалистических экспертиз

Для исследования следов оружия на пулях и гильзах патронов в настоящее время применяются в основном два метода: по развернутым фотоизображениям следов оружия на пулях и гильзах, а также непосредственно на них с помощью инструментальных и сравнительных микроскопов,

имеющихся в распоряжении экспертных подразделений [1, 2, 9]. Следует отметить, что наибольшую точность измерения линейных и угловых параметров следов могут обеспечить универсальные измерительные микроскопы, однако в большинстве экспертных подразделений такие микроскопы отсутствуют. Измерение высот неровностей профиля следов канала ствола на пуле могло быть произведено лишь на двойном микроскопе Линника, принцип работы которого основан на использовании метода светового сечения [1]. Однако отсутствие данного прибора в экспертных учреждениях не позволяет до настоящего времени в полной мере использовать указанный параметр при производстве судебно-баллистических экспертиз.

В целях решения обозначенной выше проблемы для получения необходимых в ходе проведения судебно-баллистических экспертиз параметров следов канала ствола оружия, отобразившихся на поверхности пули, была разработана методика, основанная на корреляционном анализе их цифрового стереоизображения. Известные измерители расстояний [16, 17], в которых используется цифровая фотокамера и анализ стереоизображения, не обеспечивают необходимую точность проводимых измерений, в частности не позволяют измерять высоты неровностей профиля следов полей нарезов канала ствола, отобразившихся на метаемом элементе (пуле) в процессе выстрела, а также их линейные и угловые параметры.

Принцип работы устройства измерения линейных и угловых параметров, а также высоты профиля (микрорельефа) следов упрощенно показан на функциональной схеме (рисунок 1). На фотоприемной матрице 5 через оптическую систему микроскопа 4 формируется первое цифровое изображение измеряемого следа, отобразившегося на поверхности исследуемого объекта. После формирования первого изображения с помощью координатного стола микроскопа (блока микроперемещения 2) объект исследования перемещается в пространстве в горизонтальной плоскости на расстояние L и производится формирование второго цифрового изображения. Полученные изображения поступают в процессор 7, где производится измерение высот профиля, линейных и угловых размеров по следующему алгоритму. На первом изображении в блоке индикации 8 указывается точка исследуемого объекта (окно сканирования), до которой необходимо произвести измерение расстояния. Окно сканирования с аналогичными ко-

ординатами автоматически формируется и на втором снимке. После этого в процессоре осуществляется сканирование первого окна относительно второго по горизонтали и вертикали, при этом вычисляется значение двухмерной нормированной корреляционной функции между выделенными изображениями в соответствии с выражением:

$$R(\Delta x, \Delta y) = \frac{\sum_{x,y} (I_1(x, y) - \bar{I}_1)(I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{x,y} (I_1(x, y) - \bar{I}_1)^2 \sum_{x,y} (I_2(x + \Delta x, y + \Delta y) - \bar{I}_2)^2}}, \quad (1)$$

$$\bar{I}_n = \frac{\sum_{x,y} I_n(x, y)}{x_{max} y_{max}},$$

где I_1 – сигнал окна сканирования первого изображения; I_2 – сигнал окна сканирования второго изображения; x_{max}, y_{max} – размер сканирующего окна по горизонтали и вертикали, соответственно; $\Delta x, \Delta y$ – сдвиг по горизонтали и вертикали, соответственно, \bar{I}_1, \bar{I}_2 – средние значения сигнала в первом и втором окне сканирования соответственно; $n = 1, 2$.

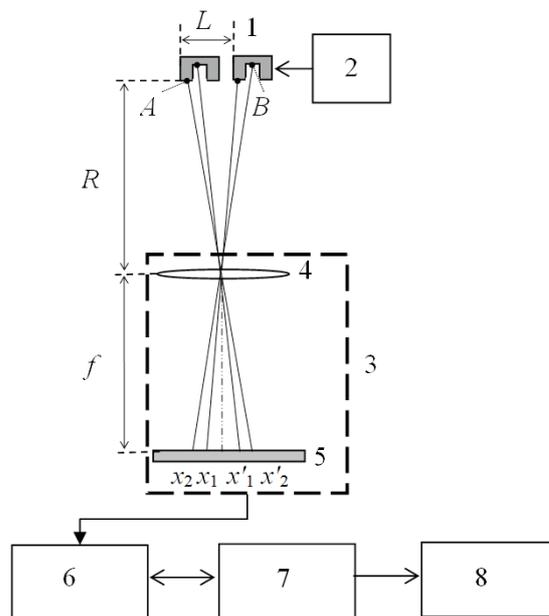


Рисунок 1 – Функциональная схема устройства измерения параметров следов: 1 – измеряемый объект; 2 – блок микроперемещения; 3 – цифровой микроскоп; 4 – оптическая система микроскопа; 5 – фотоприемная матрица; 6 – контроллер; 7 – процессор; 8 – блок индикации

Figure 1 – Functional diagram of the measuring device: 1 – object; 2 – micro-displacements block; 3 – digital microscope; 4 – the optical system of the microscope; 5 – photo-detector matrix; 6 – controller; 7 – processor; 8 – indicator

Из приведенного выражения следует, что сканирование осуществляется по горизонтали и вертикали, что компенсирует возможное отклонение перемещения объекта от горизонтальной линии. По положению максимального значения нормированной корреляционной функции (1) определяют сдвиг между изображениями в пикселях $\Delta x_A = x'_1 - x_1$. Дальность R_A до выделенной точки А объекта определяется из выражения:

$$R_A = \frac{f \cdot L}{\omega_x \cdot \Delta x_A}, \quad (2)$$

где L – перемещение объекта по горизонтали, f – фокусное расстояние фотокамеры, ω_x – расстояние между чувствительными элементами фотоприемной матрицы по горизонтали. Аналогичным образом определяется расстояние R_B до точки В объекта, имеющей координаты на первом и втором снимках x_2 и x'_2 соответственно. По положению максимального значения корреляционной функции (1) определяют сдвиг между изображениями $\Delta x_B = x'_2 - x_2$, а дальность R_B до точки В определяется из выражения:

$$R_B = \frac{f \cdot L}{\omega_x \cdot \Delta x_B}. \quad (3)$$

По разности расстояний до указанных точек исследуемого объекта (точка А и точка В) определяется высота профиля поверхности объекта $\Delta R = R_B - R_A$.

Устройство позволяет измерять линейные размеры индивидуальных особенностей следа (микрорельефа) на исследуемом объекте между указанными точками. Это осуществляется следующим образом. Определив значение расстояния до i -го объекта измерения R_i и размеры этого объекта (расстояние между указанными точками) на фотоприемной матрице, ширина измеряемого объекта D_i и высота H_i определяются из выражений:

$$H_i = \frac{R_i \cdot y_i}{f}, \quad D_i = \frac{R_i \cdot x_i}{f}, \quad (4)$$

где x_i, y_i – размеры измеряемого объекта (расстояние между точками) на фотоприемной матрице по горизонтали и вертикали соответственно.

Система также обеспечивает измерение угла наклона следов нарезов на пулях относительно ее

продольной оси. Выражение для определения угла наклона нареза α имеет следующий вид:

$$\alpha = \arctg \left(\frac{X_2 - X_1}{Y_2 - Y_1} \right), \quad (5)$$

где X_1, Y_1 – координаты на фотоприемной матрице начальной точки нареза; X_2, Y_2 – координаты конечной точки нареза.

Корреляционная обработка изображений в соответствии с алгоритмом (1) позволяет определить сдвиг между изображениями Δx исследуемого объекта на матрице с точностью до одного чувствительного элемента (пикселя). Для уточнения величины сдвига Δx в субпиксельном диапазоне используется билинейная интерполяция сигнала с заданным шагом, алгоритм которой приведен в [18]. Применение субпиксельной интерполяции обеспечивает разрешение при определении сдвига Δx на величину, равную менее десятой доли пикселя, что значительно повышает точность измерения размерных параметров. Знать точное значение расстояния между чувствительными элементами фотоприемной матрицы и значение фокусного расстояния объектива устройства фотосъемки нет необходимости, поскольку данные значения можно определить в процессе калибровки системы по эталонному объекту.

Для реализации корреляционной методики измерения параметров и высот профиля следов нарезов на пулях было разработано программное приложение на языке объектно-ориентированного программирования C++. На экране монитора отображается лишь первое изображение из полученной стереопары. Интерфейс приложения включает в себя следующие пользовательские элементы: информационную строку; общие инструменты (открыть, сохранить, очистить); функциональные инструменты (выделение, перемещение, удаление), калибровка камеры; переключение режима просмотра: включить/выключить отображение подписей расстояний, включить/выключить отображение второго изображения стереопары; прокрутка и масштабирование области изображения. Приложение позволяет пользователю определять дальность до выделенных точек элементов следа на исследуемом объекте, значение расстояния между указанными точками, линейные размеры как исследуемого следа, так и объекта исследования, а также углы наклона нарезков относительно ее продольной оси.

На рисунке 2 приведен пример работы системы в ходе измерения параметров следов полей нарезов, отобразившихся на пуле, по цифровому стереоизображению.

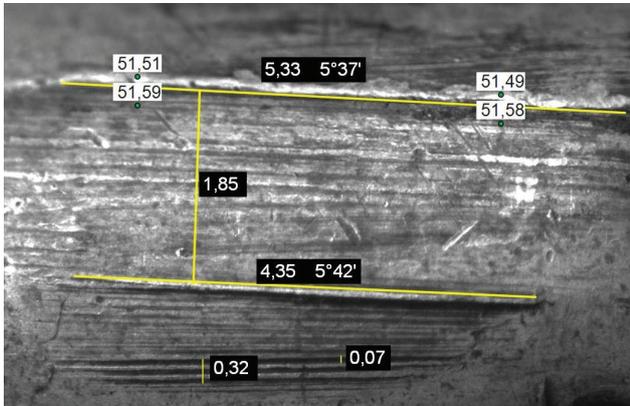


Рисунок 2 – Результаты измерения линейных и угловых параметров профиля следа нареза канала ствола на пуле патрона 7,62 x 25 мм (расстояния в миллиметрах)

Figure 2 – The measurement results of linear and angular parameters of the rifling profile trace of the barrel on the bullet 7,62 x 25 mm (the distances in millimeters)

Цифрами на белом фоне показаны расстояния до выбранных точек объекта измерения на фотографии, точками отмечены выбранные элементы объекта измерения, до которых устанавливается искомое расстояние. По разности расстояний до точек объекта можно определить глубину профиля следа нареза на пуле. Например, для точки, расположенной в левой части снимка на расстоянии $R = 51,51$ мм, высота профиля следа составляет 80 мкм ($\Delta R = 51,59 - 51,51 = 0,08$ мм), а для точки на расстоянии $R = 51,49$ мм в правой части снимка, высота профиля следа составляет 90 мкм ($\Delta R = 51,58 - 51,49 = 0,09$ мм). Белыми цифрами на черном фоне показаны расстояния между выбранными точками в миллиметрах и углы наклона следов к продольной оси пули в градусах. Например, ширина следа нареза на пуле составляет 1,85 мм, а длина следов от «боевой» и «холостой» граней нареза составляют 5,33 и 4,35 мм, соответственно. Углы наклона указанных следов относительно продольной оси пули равны $5^{\circ}37'$ и $5^{\circ}42'$, соответственно. На снимке также отображены результаты измерения расстояний между отдельными валиками и бороздками (их группами), отобразившимися в первичном следе поля нарезов канала ствола, расстояние между которыми составляет 320 и 70 мкм.

Оптимизация сравнения изображений оттисков печатей и штампов с использованием корреляционной обработки

Для расширения функциональных возможностей, повышения качества, достоверности и наглядности проводимых исследований по сравнению цвето-тоновых параметров изображений оттисков печатей и штампов (ОПШ) была разработана соответствующая компьютерная система на основе применения метода корреляционного анализа. Предлагаемый процесс цифровой обработки ОПШ предусматривает: фиксацию изображения путем сканирования (регистрация изображения); применение алгоритмов обработки, предусмотренных используемым ПО (преобразование изображения); сохранение данных с последующей экспертной интерпретацией полученных результатов (анализ данных изображения).

Сканирование как способ регистрации изображений позволяет получать цифровые модели ОПШ, максимально соответствующие реальной действительности по своим геометрическим, топографическим и колористическим характеристикам [4]. Кроме того, устройство планшетных сканеров обеспечивает высокую стабильность освещения по сравнению с обычной фотографией, позволяет исключить проблемы фокусировки, а также минимизирует влияние «сбивающих» факторов при регистрации изображений. Формат хранения изображений может быть различным (*JPEG*, *TIFF*, *PXC*, *PNG*, *BMP* и др.). Одним из наиболее корректных форматов является несжатый растровый графический формат *TIFF*. Проведенные экспериментальные исследования показали, что значение корреляционной функции для новой печати в формате *JPEG* составляет порядка 0,998, а для формата *TIFF* – 0,999993. Это свидетельствует о том, что для проведения экспертных исследований целесообразно использовать документы в формате *TIFF*, т.к. он дает более высокую эффективность проведения исследований по сравнению с *JPEG* форматом.

Этап преобразования изображений можно условно разделить на две стадии: предварительную, которая заключается в приведении сравниваемых изображений в соответствие определенным критериям для проведения дальнейшего исследования; и основную, предусматривающую непосредственный попиксельный анализ изображений. Предварительная обработка может быть осуществле-

на путем использования программного продукта «Adobe Photoshop» [2, 4], наиболее распространенного для технико-криминалистических исследований документов (включая исследование ОПШ).

Основная стадия этапа преобразования изображений заключается в непосредственном сравнении цифровых моделей исследуемых оттисков, используя алгоритмы корреляционного типа [19]. Для реализации корреляционной методики анализа степени совпадения двух изображений было разработано программное приложение (далее – ПП) на языке объектно-ориентированного программирования C++ (далее – ПП «CIPSS», от англ. *Comparing Images of Prints of Seals and Stamps*). Вид интерфейса разработанного программного приложения представлен на рисунке 3. Интерфейс ПП «CIPSS» имеет два синхронизированных рабочих окна. Левое окно предназначено для ввода исследуемого изображения, т.е. изображения, чьи цвето-тоновые характеристики подлежат непосредственному изучению (установлению), а правое – для ввода изображения-эталона, т.е. изображения, посредством параметров которого происходит установление степени совпадения (различия).

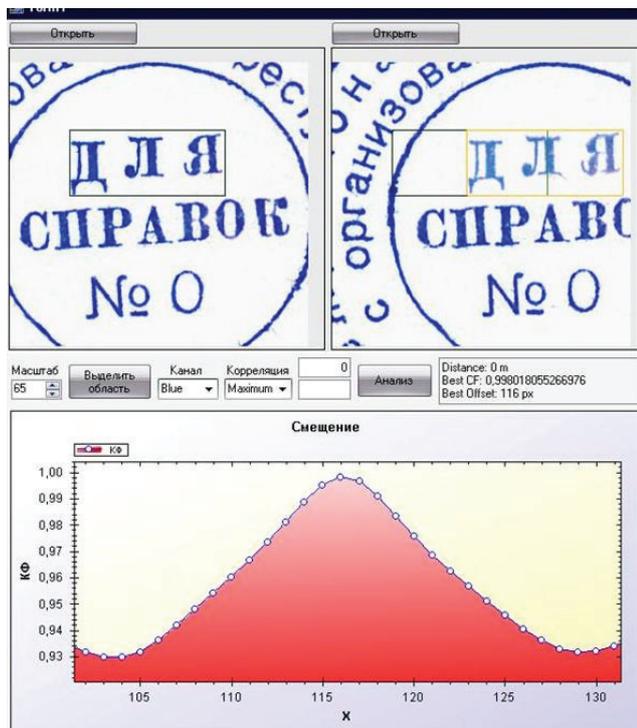


Рисунок 3 – Вид интерфейса ПП «CIPSS»

Figure 3 – Interface software application «CIPSS»

Интерфейс приложения обеспечивает выполнение следующих пользовательских функций: из-

менение размера изображений в окне «Масштаб»; выбор вида корреляционной функции (КФ) в зависимости от необходимости получения конкретных результатов, отражающих либо степень совпадения изображений (вкладка «Maximum»), либо степень их различия (вкладка «Minimum»); определение спектрального диапазона анализа в окне «Канал». Выбор цветового канала позволяет получать наиболее точное значение КФ отдельно в красном, зеленом и синем участках спектра, а также в их суммарном диапазоне. Поскольку процесс нанесения ОПШ на поверхность документа сопряжен с наличием факторов, влияющих на качество отображения ОПШ (перекос, нажим, неравномерная подложка и пр.), при исследовании двух оттисков (для проведения корреляционного анализа) возникает необходимость правильного выбора сравниваемых областей, отвечающих принципу сопоставимости. Выполнение данной задачи реализуется при помощи вкладки «Выделить область», функцией которой является обеспечение ручного выделения исследуемой области в левом окне.

Производство непосредственно корреляционного анализа цвето-тоновых параметров изображений обеспечивает активация вкладки «Анализ». Осуществление указанной функции достигается путем вычисления значения двумерной нормированной КФ между выделенными фрагментами изображений, отражающей степень совпадения изображений (вкладка «Maximum») в соответствии с выражением (1). Для определения степени различия выделенных изображений (вкладка «Minimum») используется нормализованная сумма квадратов разностей вида:

$$R(\Delta u, \Delta v) = \sum_{x,y} \left[\frac{(I_1(x, y) - \bar{I}_1)}{\sqrt{\sum_{x,y} (I_1(x, y) - \bar{I}_1)^2}} - \frac{(I_2(x + \Delta u, y + \Delta v) - \bar{I}_2)}{\sqrt{\sum_{x,y} (I_2(x + \Delta u, y + \Delta v) - \bar{I}_2)^2}} \right]^2, \quad (6)$$

$$\bar{I}_n = \frac{\sum_{x,y} I_n(x, y)}{x_{max} y_{max}},$$

где I_1 – сигнал исследуемого изображения; I_2 – сигнал эталонного изображения; x_{max} , y_{max} – размер сканирующего окна; \bar{I}_1 , \bar{I}_2 – средние значения сигнала в первом и втором окне сканирования; Δx , Δy – сдвиг по горизонтали и вертикали соответственно, $n = 1, 2$. Нормированная кросс-корреляция (1), (6) применима в случае, когда одно изображение отличается от другого не только относительным сдвигом, но и подвержено монотонному амплитудному преобразованию.

Так как при получении изображений возможно различие взаимного положения эталонного и исследуемого оттисков, то для максимальной эффективности анализа используется сканирование одного окна изображения относительно другого по горизонтали и по вертикали. Каждую итерацию второе окно сдвигается на 1 пиксель в системе координат изображения и вычисляется соответствующее значение КФ. График зависимости значения КФ от сдвига между рабочими окнами в пикселях представлен в диалоговом окне «Смещение», где по оси X отображается смещение в пикселях, а по оси Y – значение КФ. При выборе вида используемой КФ необходимо, чтобы она была нормированная, что позволяет устранить влияние различия яркости и контрастности в первом и втором окнах на точность измерений.

Результат проведенного корреляционного анализа отображается в диалоговом окне справа от вкладки «Анализ». Если выделенные фрагменты изображения полностью совпадают, то значение КФ будет близко к единице, например 0,99983. Отклонение значения КФ от величины 0,99 является характеристикой степени совпадения колористических параметров эталонного и исследуемого изображений. Величина 0,99 выбрана в качестве максимально значения КФ, т.к. даже при сравнении изображения самого с собой за счет дискретности анализа и влияния «шумов» будут наблюдаться минимальные различия.

Применение ПП «CIPSS» является одним из этапов цифровой обработки ОПШ, а полученные результаты корреляционного анализа колористических характеристик изображений требуют соответствующей экспертной интерпретации [1, 7]. Кроме того, исследуемые параметры должны быть доступны и просты для понимания лицам, не обладающим специальными познаниями в данной области. В этой связи был разработан алгоритм преобразования результатов исследования ОПШ, получаемых при помощи ПП «CIPSS». Данный алгоритм реализуется посредством выражения (7), целью применения которого является определение в процентном соотношении показателя совпадения цвето-тоновых параметров сравниваемых изображений ОПШ на основе значения КФ:

$$P_c = \frac{K_{max}}{1 - K^1}, \quad (7)$$

где P_c – показатель совпадения; K_{max} – максимальное значение КФ (постоянная величина, равная

0,99); K^1 – рабочее значение КФ, полученное в ходе анализа изображений ОПШ. Наиболее типичные результаты исследования цифровых моделей ОПШ посредством применения ПП «CIPSS», имеют следующее значение: при $K^1 = 0,99$, $P_c \approx 99$ %; при $K^1 = 0,98$, $P_c \approx 49,5$; при $K^1 = 0,97$ $P_c \approx 33$ %. С криминалистической точки зрения, значение КФ не менее 0,99 свидетельствует о полном совпадении колористических характеристик исследуемых изображений, значение КФ равное 0,98 может свидетельствовать о вероятном совпадении либо различии (вероятность составляет примерно 50 %), значения же КФ 0,97 и ниже свидетельствуют о значительном различии исследуемых характеристик.

Заключение

Предложены и обоснованы принципы использования корреляционной обработки цифровых изображений объектов экспертного исследования для решения таких задач криминалистики, как сравнение цвето-тоновых параметров изображений оттисков печатей и штампов и измерение параметров следов полей нарезов канала ствола на стреляных пулях.

Разработана методика и создано программное приложение, предназначенное для получения линейных, угловых и высотных характеристик профиля (микрорельефа) следов полей нарезов канала ствола оружия, отобразившихся на пуле в процессе выстрела, для проведения судебно-баллистических экспертиз. Приложение позволяет пользователю определять дальность до выделенных точек элементов следа на исследуемом объекте с разрешением ~ 10 мкм, значение расстояния между указанными точками, линейные размеры как исследуемого следа, так и объекта исследования (погрешность ~ 10 мкм), а также углы наклона нарезов относительно ее продольной оси (погрешность $\sim 0,01$). Разработанная система позволяет получить необходимую точность проводимых измерений исследуемых объектов, уменьшить трудо-временные затраты и перечень применяемого измерительного оборудования. Полученные экспериментальные данные свидетельствуют о высокой эффективности работы программного приложения. Наглядность полученных результатов, повышает достоверность и репрезентативность выводов криминалистических экспертиз.

Разработана методика и создано специализированное программное приложение для сравнительного анализа цвето-тоновых характеристик

изображений оттисков печатей и штампов, отражающее степень и характер распределения красящего вещества в штрихах, что повышает наглядность и объективность экспертиз, а также позволяет сократить сроки их проведения. Использование математических алгоритмов корреляционной обработки позволяет получать высокоточные и достоверные результаты, близкие практически к предельным значениям.

Разработана методика преобразования полученных цифровых данных в криминалистически значимую информацию, алгоритм работы которой позволяет осуществлять интерпретацию в процентном соотношении показателя совпадения цвето-тоновых параметров сравниваемых изображений ОПШ. Достоверность полученных значений подтверждается экспериментальными исследованиями и была проверена при помощи других методов. Разработанная методика может явиться полезным инструментом для решения диагностических и идентификационных экспертных задач, а в совокупности с другими методами исследования расширить и круг вопросов по установлению тождества оттисков удостоверительных печатных форм, что позволит повысить эффективность и качество экспертных методик.

Список использованных источников

1. Яблоков, Н.П. Криминалистика: природа, система, методологические основы / Н.П. Яблоков, А.Ю. Голвин. – М. : НОРМА, 2009. – 288 с.
2. Вандер, М.Б. Применение научно технических средств при расследовании преступлений. – СПб., 2000. – 60 с.
3. Зубаха, В.С. Видовая классификация компьютерно-технической экспертизы / В.С. Зубаха, А.И. Усов // Экспертная практика. – М. : ЭКЦ МВД РФ, 2000. – № 48.
4. Булгаков, В.Г. Компьютерные технологии в криминалистической фотографии / В.Г. Булгаков, С.М. Колотушкин. – Волгоград, 2000. – 164 с.
5. Sutton, M.A. Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements / M.A. Sutton, J.-J. Ortu, H. Schreier. – University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009. – 364 p.
6. Thorsten, S. Crompton. Application of High Speed Digital Image Correlation for Vibration Mode Shape Analysis / S. Thorsten, J. Crompton Matt // Proceedings of the SEM Annual Conference June 7–10, 2010. – Indianapolis, Indiana USA.

7. Im, J. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation / J. Im, J.R. Jensen, J.A. Tullis // International Journal of Remote Sensing. – Vol. 29, no. 2. – 20 January 2008. – P. 399–423.

8. Okhandiara, R.R. Neighborhood correlation image analysis technique for change detection in forest landscape / R.R. Okhandiara, P.L.N. Rajub, W. Bijkerk // The International Archives of the 95 Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. – Vol. XXXVII. – Part B8. – Beijing 2008.

9. Бардаченко, А.Н. Особенности проведения линейных и угловых измерений следов полей нарезков на выстрелянных пулях с использованием современного микроскопического оборудования / А.Н. Бардаченко // Известия Саратовского университета. Новая серия Сер. Экономика. Управление. Право. – Т. 14, Вып. 1, ч. 2. – 2014. – С. 216–218.

10. Brown, Myron Z. Advances in Computational Stereo / Myron Z. Brown, Darius Burschka, Gregory D. Hager // IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence. – Vol. 25, no. 8. – 2003. – P. 993–1008.

11. Szeliski, R. Computer Vision: Algorithms and Applications / R. Szeliski // Springer. – 2010. – 957 p.

12. Хорн, Б. Зрение роботов. Мир / Б. Хорн. – 1989. – 487 с.

13. Wang, S. A stereo video segmentation algorithm combining disparity map and frame difference / S. Wang, X. Wang, H. Chen // 3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering. – Vol. 1. – 2008. – P. 1121–1124.

14. Ackermann, F. Digital image correlation – performance and potential application in photogrammetry / F. Ackermann // Photogram Rec. – 1984. – Vol. 11, 64. – P. 429–439.

15. William, H. Press Numerical recipes in C: the art of scientific computing / H. Press William / H. William // Cambridge University Press, 2nd ed. – 1995. – 994 p.

16. Optical distance measurement device using image sensors for determining distance to symmetric objects: patent №5432594 US, МКИ G 01 C 3/00 / Kenhi Ogasawa. – № 1118544; Filing Date: 26.08.1993; Issue Date: 11.07.1995.

17. Измеритель расстояний на цифровой фотокамере для криминалистических экспертиз: пат. 8572 Респ. Беларусь, МКИ G 01 C 3/00 / В.Л. Козлов, И.А. Мороз, А.С. Рубис. – 2012.

18. Козлов, В.Л. Субпиксельная обработка изображений для измерения дальности на основе цифровой фотокамеры / В.Л. Козлов, А.С. Васильчук // Приборы и методы измерений. – 2012. – № 1(4). – С. 115–120.

19. Устройство для сравнения цифровых изображений оттисков печатей и штампов для криминалистических экспертиз: пат. 10722 Респ. Беларусь, МКИ G 01 C 3/00 / В.Л. Козлов, А.С. Рубис, Р.М. Ропот. – 2015.

Correlation processing of digital optical images for solving criminalistic problems

Kozlov V.L., Vasilchuk A.S.

Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk, 220030, Belarus

Received 17.09.2015

Accepted for publication 30.10.2015

Abstract. The correlation processing of optical digital images of expert research objects is promising to improve the quality, reliability and representativeness of the research. The development of computer algorithms for expert investigations by using correlation analysis methods for solving such problems of criminology, as a comparison of color-tone image parameters impressions of seals and stamps, and measurement of the rifling profile trace of the barrel on the bullet is the purpose of the work. A method and software application for measurement of linear, angular and altitude characteristics of the profile (micro relief) of the rifling traces of the barrel on the bullet for judicial-ballistic tests is developed. Experimental results testify to a high overall performance of the developed program application and confirm demanded accuracy of spent measurements. Technique and specialized program application for the comparison of color-tone image parameters impressions of seals and stamps, reflecting degree and character of painting substance distribution in strokes has been developed. It improves presentation and objectivity of tests, and also allows to reduce their carrying out terms. The technique of expert interpretation of correlation analysis results has been offered. Reliability of the received results has been confirmed by experimental researches and has been checked up by means of other methods.

Keywords: digital image, color-tone image parameters, correlation processing, sub-pixel interpolation.

Адрес для переписки:

Козлов В.Л.
Белорусский государственный университет,
пр. Независимости, 4, 220050, г. Минск, 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., Васильчук А.С.
Применение корреляционной обработки цифровых оптических изображений для решения задач криминалистики
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 220–229

For citation:

Kozlov V.L., Vasilchuk A.S.
Correlation processing of digital optical images for solving criminalistic problems
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 220–229

References

1. Yablokov N.P. *Kriminalistika: priroda, sistema, metodologiceskiye osnovy* [Criminalistics: the nature, system, methodological bases]. Moscow, Norma Publ., 2009, 288 p.
2. Vandler M.B. *Primeneniye nauchno-tekhnicheskikh sredstv pri rassledovanii prestyplenij* [Application of scientific and technical tools in the investigation of crimes]. St. Peterburg., 2000, 60 p.
3. Zubaha V.S., Ysov A.I. Species classification of computer-technical expertise. *Ekspertnaya praktika. Moscow, EKC MVD RF*, no. 48, 2000 (in Russian).
4. Bulgakov V.G., Kolotushkin S.M. *Kompyuterniye tekhnologii v kriminalisticheskoy fotografii* [Computer technologies in criminalistics photography]. Volgograd, 2000, 164 p.
5. Sutton M.A., Orteu J.-J., Schreier H. *Image Correlation for Shape, Motion and Deformation Measurements*. University of South Carolina, Columbia, SC, USA, 2009, 364 p.
6. Thorsten Siebert, Matt J. Crompton. Application of High Speed Digital Image Correlation for Vibration Mode Shape Analysis. *Proceedings of the SEM Annual Conference June 7-10, 2010, Indianapolis, Indiana USA*.
7. Im J., Jensen J.R. and Tullis J.A. Object-based change detection using correlation image analysis and image segmentation. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 29, no. 2, 20 January 2008, pp. 399–423.
8. Okhandiara R.R., Rajub P.L.N., Bijkerk W. Neighborhood correlation image analysis technique for change detection in forest landscape. *The International Archives of the 95 Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, vol. XXXVII, part. B8, Beijing 2008.
9. Bardachenko A.N. Features of the linear and angular measurements of the rifling traces on the bullets using modern microscopic equipment. *News of Saratov University. New series. Ser. Economy. Management. Law*. vol. 14, no. 1, h. 1, 2014, pp. 216–218 (in Russian).
10. Myron Z. Brown, Darius Burschka, Gregory D. Hager. *Advances in Computational Stereo. IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, vol. 25, no. 8, 2003, pp. 993–1008.
11. Szeliski R. *Computer Vision: Algorithms and Applications*. Springer, 2010, 957 p.
12. Horn B. *Robot vision*. MIT. Press Cambridge, MA, 1986, 503 p.
13. Wang S., Wang X., Chen H. A stereo video segmentation algorithm combining disparity map and frame difference *3rd International Conference on Intelligent System and Knowledge Engineering*, vol. 1, 2008, pp. 1121–1124.
14. Ackermann F. Digital image correlation – performance and potential application in photogrammetry. *Photogrammetria*, 1984, vol. 11, 64, pp. 429–439.
15. William H. Press *Numerical recipes in C: the art of scientific computing*. Cambridge University Press, 2nd ed., 1995, 994 p.
16. Kenhi Ogawa. Optical distance measurement device using image sensors for determining distance to symmetric objects. Patent US, no. 5432594, 1995.
17. Kozlov V.L., Moroz I.A., Rybis A.S. *Izmeritel' rasstoyanii na cifrovoj fotokamere dlya kriminalisticheskikh ekspertiz* [Distances measuring instrument on a digital camera for criminalist examinations]. Patent BY, no. 8572, 2012.
18. Kozlov V.L., Vasilchuk A.S. Sub pixel image processing for distance measurement on the base of digital camera // *Pribory i metody izmerenij*. 2012, no. 1 (4), pp. 115–120 (in Russian).
19. Kozlov V.L., Rybis A.S., Ropot R.M. *Ustrojstvo dlya sravneniya cifrovykh izobrazhenij ottiskov pechatej i shtampov dlya kriminalisticheskikh ekspertiz* [The device for comparing of digital prints images of seals and stamps for criminal examinations]. Patent BY, no. 10722, 2015.

УДК [621.384.64:539.1.089.6]: 615.849.1

Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя. Часть 1. Зависимость от механических параметров штатива

Титович Е.В.¹, Киселев М.Г.²

¹РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, агрогородок Лесной, Минский район, Минская область, Беларусь

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

Поступила 17.06.2015

Принята к печати 03.11.2015

Для обеспечения радиационной безопасности онкологических пациентов требуется обеспечить постоянство функциональных характеристик медицинских линейных ускорителей электронов, которые влияют на точность подведения дозы. С этой целью проводятся процедуры контроля их качества, в число которых входит калибровка радиационного выхода линейного ускорителя, ошибка в установлении опорного значения дозы при проведении которой не должна превышать 2 %. Целью работы являлась разработка методики определения ошибки при установлении этой величины в зависимости от механических параметров штатива. Для решения поставленных задач проведены дозиметрические измерения дозовых распределений линейного ускорителя «Трилоджи» № 3567, на основании которых получены зависимости ошибки в определении опорного значения дозы от точности установки нулевого положения штатива ускорителя и величины девиации изоцентра вращения штатива ускорителя. Установлено, что наибольшее влияние на величину ошибки оказывает смещение изоцентра вращения штатива в плоскости, перпендикулярной плоскости падения радиационного пучка (до 3,64 % для энергии 6 МэВ). Ошибки, обусловленные наклоном штатива и девиацией его изоцентра в плоскости падения пучка, были максимальны для энергии 18 МэВ и достигали –0,7 % и –0,9 % соответственно. Таким образом, имеется возможность выразить результаты периодического контроля качества штатива линейного ускорителя в единицах дозы и использовать их при проведении комплексной оценки возможности клинического использования линейного ускорителя для облучения онкологических пациентов при условии разработки методик, позволяющих провести анализ влияния остальных его технико-дозиметрических параметров на ошибку в дозе.

Ключевые слова: лучевая терапия, калибровка радиационного выхода линейного ускорителя, ошибки в опорном значении дозы, штатив линейного ускорителя.

Адрес для переписки:

Титович Е.В.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, агрогородок Лесной, Минский район,
Минская область, Беларусь
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Address for correspondence:

Tsitovich Y.V.
N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040, Lesnoy, Minsk District, Belarus
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Для цитирования:

Титович Е.В., Киселев М.Г.
Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя.
Часть 1. Зависимость от механических параметров штатива
Приборы и методы измерений,
2015. – Т. 6, № 2. – С. 230–238

For citation:

Tsitovich Y.V., Kiselev M.G.
Technique of estimation of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure.
Part 1. Dependence of the mechanical parameters of linac's gantry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 230–238

Введение

В современной лучевой терапии (ЛТ) главным критерием качества лучевого лечения пациентов является необходимость подведения терапевтической дозы с высокой точностью. В [1] определены предельно допустимые ошибки в величине поглощенной дозы, доставляемой пациентам радиационными пучками. Ошибка в установлении опорного значения дозы в течение периода эксплуатации радиотерапевтического оборудования, в частности медицинских линейных ускорителей (ЛУ) электронов, вызванная изменениями их рабочих характеристик, не должна превышать 2 % для достижения порога в ± 5 % точности доставки дозового распределения пациентам с учетом всех ошибок, возникающих на этапах предлучевой подготовки и лучевого лечения [2, 3].

Известны рекомендации, включая международные, в области контроля качества (КК) ЛУ, направленные на уменьшение интегральной ошибки в дозе, доставляемой пациентам [4, 5, 6]. Основным недостатком данных программ КК ЛУ является то, что методики оценки результатов КК не являются оптимальными в области, касающейся вынесения решения о возможности дальнейшей клинической эксплуатации обследуемых ЛУ, поскольку используют в качестве приемлемости не дозовые величины. Существующие предельно допустимые отклонения характеристик линейных ускорителей не учитывают параметры пациентов и опухолей и, что особенно важно, не определяют ошибки в отпускаемом дозовом распределении, а лишь предполагают, что ошибки в дозе при облучении пациента не превышают 5 % при соблюдении требований протокола КК. Следует отметить, что данные работы противоречат друг другу в отношении частоты проверок, применяемых для этих приборов и вспомогательного оборудования.

Цель работы – разработка методики определения ошибки в полученном при калибровке радиационного выхода (РВ) медицинских ЛУ опорном значении дозы в зависимости от механических параметров штатива как механизма, предположительно оказывающего наибольший вклад в ошибки при калибровке РВ ЛУ [7, 8]. При этом результаты периодического КК штатива ЛУ должны быть выражены в единицах поглощенной дозы, что позволит использовать единые дозовые критерии оценки результатов КК штатива для любого из используемых на сегодняшний день медицинских ЛУ и исключить возможность превышения предельно до-

пустимой ошибки в величине поглощенной дозы, доставляемой пациенту радиационными пучками.

Результаты исследований

В 2014 г. авторами разработана инструкция¹, содержащая, в частности, методики проведения дозиметрических измерений поглощенной дозы фотонов в стандартных условиях

Для определения и настройки величины опорного значения дозы ЛУ использовалась процедура калибровки РВ согласно протоколу КК ЛУ, утвержденному Министерством здравоохранения Республики Беларусь [9], инструкции¹ и международным рекомендациям [10]. В дальнейшем при проведении лечебных процедур все значения отпускаемых ускорителем доз нормировались на величину поглощенной дозы на глубине максимума ионизации в воде 1 сГр. – 1 мониторинговая единица (1 МЕ).

На основании методов дозиметрических измерений, изложенных в инструкции¹, авторами, с использованием трехмерного анализатора дозового поля, проведены дозиметрические измерения дозовых распределений ЛУ «Трилоджи» № 3567, установленного в ГУ «РНПЦ ОМР им. Н.Н. Александрова», в частности, измерены процентно-глубинные дозовые распределения (ПГД) для радиационных полей размерами 8×8 см, 10×10 см и 12×12 см, коэффициенты радиационного выхода (КРВ) для квадратных радиационных полей со стороной от 8 до 12 см с шагом 1 см, а также профильные дозовые распределения на опорной глубине ($d = 100$ мм) для поля 40×40 см (по результатам экспериментов установлено отсутствие случайных погрешностей при определении значений с точностью 0,1 % для исследуемого диапазона на экспериментальных данных).

Количество МЕ, необходимое для доставки известного значения поглощенной дозы на глубину максимума ионизации, определялось по формуле [4]:

$$ME_{cal} = \frac{D_{ref} \cdot 100}{K \times PDD_d \times OF(r_{sq}) \times K_{SSD} \times BOO_d(r)}, \quad (1)$$

где ME_{cal} – РВ ЛУ; D_{ref} – поглощенная доза в стандартных условиях на глубине d (для случая калибровки радиационного выхода $d = Z_{ref}$) в воде для качества излучения Q , $K = 1$ сГр/МЕ; PDD_d – значе-

¹ Титович, Е.В. Методы дозиметрического сопровождения высокотехнологичной лучевой терапии / Е. В. Титович, И.Г. Тарутин, Г.В. Гацкевич // Инструкция по применению № 092-0914 утверждена Минздравом 23.12.2014)

ние ПД, определяется как частное от деления поглощенной дозы на глубине d (для случая калибровки радиационного выхода $d = Z_{ref}$) к дозе на опорной глубине (для случая калибровки радиационного выхода глубине залегания максимума ионизации d_{max}), выраженное в процентах; $OF(r_{sq})$ – коэффициент радиационного выхода, представляющий собой отношение мощности дозы на опорной глубине для поля со стороной эквивалентного квадратного поля (r_{sq}) к мощности дозы в той же точке в поле опорных размеров 10×10 см; K_{SSD} – коэффициент, учитывающий изменение плотности потока фотонного пучка с изменением расстояние источник–поверхность (РИП), вычисляется по формуле:

$$K_{SSD} = \left(\frac{SCD}{SSD + d_{max}} \right)^2, \quad (2)$$

где SCD – расстояние источник–точка калибровки; SSD – расстояние источник–поверхность воды в измерительном фантоме; d_{max} – глубина залегания максимума ионизации; $BOO_d(r)$ – отношение дозы в точке вне оси симметрии на глубине d (для случая калибровки радиационного выхода $d = Z_{ref}$) и расстоянии от оси r к дозе симметричного поля на глубине d на оси. Значения $BOO_d(r)$ получены авторами из измеренных профильных распределений дозы.

С использованием национального протокола КК авторами определены характеристики штативов ЛУ, отклонение значений которых от опорного может привести к возникновению ошибки при калибровке РВ ЛУ и таким образом повлиять на точность доставки дозы онкологическим пациентам [9]:

- точность установки нулевого положения штатива ускорителя;
- девиация изоцентра вращения штатива ускорителя.

Все расчеты проводились для фотонного излучения с энергиями 6 и 18 МэВ в условиях гомогенности среды и симметричности радиационных полей.

Точность установки нулевого положения штатива линейного ускорителя

При калибровке РВ ЛУ в соответствии со стандартными условиями проведения дозиметрических измерений (см. инструкцию¹) штатив устанавливается в опорное положение 0° (шкала IEC). Для установления зависимости величины ошибки в полученном при калибровке РВ ЛУ опорном значении дозы от ошибки установки нулевого положения штатива ЛУ точке P_0 , расположенной в изоцентре вращения штатива присвоены координаты

$X_{P_0} = 0$ и $Y_{P_0} = 0$ (мм). Таким образом, точка расположения источника ионизирующего излучения (ИИ) (точка T_0) имеет координаты $X_{T_0} = 0$; $Y_{T_0} = 1000$, а положение опорной точки измерительного детектора (точка d_0) $X_{d_0} = 0$; $Y_{d_0} = -100$. Схематическое отображение процедуры калибровки радиационного выхода линейного ускорителя представлено на рисунке 1.

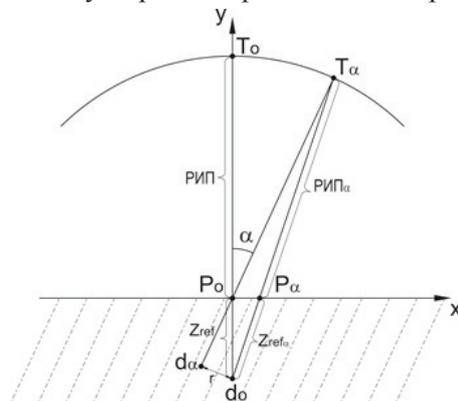


Рисунок 1 – Схема проведения калибровки радиационного выхода линейного ускорителя: T_0 – точка расположения источника ионизирующего излучения при угле наклона штатива 0° ; d_0 – положение опорной точки измерительного детектора при угле наклона штатива 0° ; P_0 – точка изоцентра вращения штатива; T_α – точка расположения источника ионизирующего излучения при угле наклона штатива α ; d_α – положение опорной точки измерительного детектора при угле наклона штатива α ; r – смещение положения опорной точки измерительного детектора при угле наклона штатива α ; P_α – точка входа радиационного пучка в воду для смещения r ; РИП – расстояние источник–поверхность при угле наклона штатива 0° ; РИП $_\alpha$ – расстояние источник–поверхность при угле наклона штатива α ; Z_{ref} – глубина залегания опорной точки измерительного детектора при угле наклона штатива 0° ; $Z_{ref\alpha}$ – глубина залегания опорной точки измерительного детектора при угле наклона штатива α

Figure 1 – Scheme of the radiation output calibration of the linear accelerator: T_0 – point location of the source of ionizing radiation at an angle of inclination of the gantry 0° ; d_0 – the position of the reference point of the measuring detector at an angle of inclination of the gantry 0° ; P_0 – point of the gantry rotation isocenter; T_α – point location of the source of ionizing radiation at an angle of inclination of the gantry α ; d_α – position of the reference point of the measuring detector at an angle of inclination of the gantry α ; r – displacement of the reference point of the measuring detector at an gantry inclination angle α ; P_α – the beam entry point to the water to displacement value r ; SSD – source to surface distance at an angle of inclination of the gantry 0° ; SSD_α – source to surface distance at an angle of inclination of the gantry α ; Z_{ref} – the depth of the reference point of the measuring detector at an angle of inclination of the gantry 0° ; $Z_{ref\alpha}$ – the depth of the reference point of the measuring detector at an angle of inclination of the gantry α

Координаты источника ИИ при возникновении ошибки в установке нулевого положения штатива ЛУ на угол α (точка T_α):

$$X_{T_\alpha} = SSD \times \sin \alpha, \quad (3)$$

$$Y_{T_\alpha} = SSD \times \cos \alpha, \quad (4)$$

где $SSD = 1000$ мм.

Координаты опорной точки измерения при вращении штатива ЛУ на угол α (точка d_α):

$$X_{d_\alpha} = X_{d_0} - (SSD + Z_{ref}) \times \sin \alpha, \quad (5)$$

$$Y_{d_\alpha} = Y_{d_0} - (SSD + Z_{ref}) \times \cos \alpha, \quad (6)$$

где $SSD = 1000$ мм; $Z_{ref} = 100$ мм.

Смещение (r) положения опорной точки измерительного детектора в стандартных условиях от точки пресечения осей симметрии радиационного пучка при вращении штатива ЛУ определяется выражением:

$$r = \sqrt{(X_{d_\alpha} - X_{d_0})^2 + (Y_{d_\alpha} - Y_{d_0})^2}. \quad (7)$$

Координаты точки входа (точка P_α) пучка в воду для смещения (r) по горизонтальной оси положения опорной точки измерительного детектора получены авторами из формул:

$$X_{P_\alpha} = \text{tg}(\arccos(\frac{SSD + Z_{ref} - Y_{T_0} + Y_{T_\alpha}}{\sqrt{(X_{T_\alpha} - X_{d_0})^2 + (Y_{T_\alpha} - Y_{d_0})^2}})) \times Z_{ref}, \quad (8)$$

$$Y_{P_\alpha} = Y_{P_0}. \quad (9)$$

Значение РИП при вращении штатива (SSD_α) определено из выражения:

$$SSD_\alpha = \sqrt{(X_{T_\alpha} - X_{P_\alpha})^2 + (Y_{T_\alpha} - Y_{P_\alpha})^2}. \quad (10)$$

При изменении РИП происходит изменение ПГД [4]. Фактор изменения величины поглощенной дозы на глубине d при изменении РИП при вращении штатива ЛУ (F_α) определен из выражения:

$$F_\alpha = \left(\frac{SSD_\alpha + d_m}{SSD + d_m} \right)^2 \times \left(\frac{SSD + d}{SSD_\alpha + d} \right)^2, \quad (11)$$

где d – глубина точки измерения; d_m – глубина максимума ионизации для данной энергии ИИ.

Глубина залегания опорной точки измерительного детектора при изменении углов наклона штатива ускорителя (Z_{ref}) получена из выражения:

$$Z_{ref\alpha} = \sqrt{(X_{P_\alpha} - X_{d_0})^2 + (Y_{P_\alpha} - Y_{d_0})^2}. \quad (12)$$

При отклонении штатива ЛУ от нулевого положения изменяется значение коэффициента качества радиационного пучка k_Q , характеризующего проникающую способность фотонного излучения. С использованием полученных из таблиц [10] значений k_Q для различных углов наклона штатива ускорителя ($k_{Q\alpha}$), с помощью методологии, изложенной в инструкции¹, определены изменения величины D_{ref} . Таким образом, установлено, что ошибки установки нулевого положения штатива ЛУ приведут к возникновению ошибок при определении опорного значения поглощенной дозы ввиду изменения РИП, глубины залегания точки измерений и изменения положения точки измерения по горизонтальной оси.

При помощи экспериментально измеренных авторами профильных дозовых распределений для значений r , полученных с использованием формул (3)–(7), путем интерполяции получены значения коэффициента $BOO_d(r)_\alpha$, характеризующего отношение дозы в точке вне оси на опорной глубине (d) и расстоянии от пересечения осей радиационного пучка (r) к дозе симметричного поля на той же глубине в точке пересечения осей симметрии радиационного пучка для углов наклона штатива (α) от 0 до 5°. Значения коэффициента $BOO_d(r)_\alpha$ при различных α изменяются от 1 до 1,0054 для 6 МэВ и от 1 до 1,0069 для 18 МэВ.

При помощи экспериментально измеренных ПГД с использованием формул (11) и (12) получены значения коэффициента F_α для углов наклона штатива (α) от 0 до 5°. Выявлено, что изменениями значений коэффициентов F_α и $k_{Q\alpha}$ можно пренебречь (изменяются менее чем на 1,0001).

С использованием формулы (2) и значений измеренных экспериментально ПГД определены значения коэффициента K_{SSD} для углов наклона штатива ЛУ от 0 до 5° ($K_{SSD\alpha}$). Выявлено, что значения коэффициента $K_{SSD\alpha}$ изменяются от 1 до 1,0013 для обеих энергий фотонов.

С использованием полученных экспериментально значений ПГД путем интерполяции рассчитаны значения ПГД на глубине $Z_{ref\alpha}$ для углов наклона штатива ускорителя от 0 до 5°. Установлено, что отношение ПГД на глубине $Z_{ref\alpha}$ ($PDD_{Zref\alpha}$) к таковому значению на глубине Z_{ref} (PDD_{Zref}) при изменении углов наклона штатива ускорителя (α) от 0 до 5° изменяются от 1 до 0,998 для 6 МэВ и от 1 до 0,999 для 18 МэВ.

Коэффициент K_{grcal} , учитывающий влияние угла наклона штатива на значение ME_{cal} , определен из выражения:

$$K_{grcal} = \frac{ME_{cal}}{ME_{grcal\alpha}} = BOO_d(r)_\alpha \times \frac{PDD_{z_{ref}\alpha}}{PDD_{z_{ref}}} \times K_{SSD\alpha}, \quad (13)$$

где ME_{cal} – истинное значение РВ ЛУ (нулевое положение штатива ЛУ); $ME_{grcal\alpha}$ – значение РВ ЛУ при наклоне штатива ускорителя на угол α .

С использованием выражения (1) авторами определена величина изменения опорного значения дозы (ME_{cal}) ЛУ при ненулевом положении штатива ускорителя (изменение углов наклона штатива ускорителя от 0 до 5°) по отношению к таковому значению в стандартных условиях (см. инструкцию¹⁾). Результаты представлены на рисунке 2.

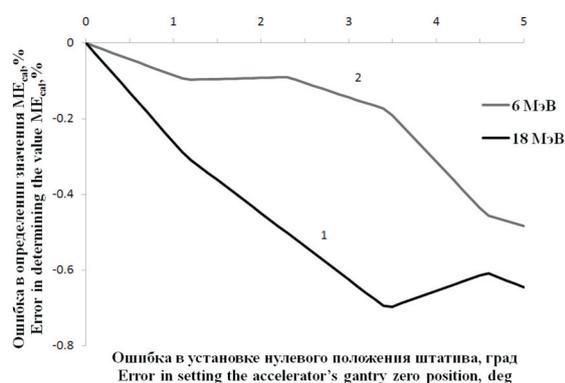


Рисунок 2 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы линейного ускорителя от ошибки в установке нулевого положения штатива ускорителя для фотонов с энергиями 18 МэВ (1) и 6 МэВ (2)

Figure 2 – Dependence of the error in determining the reference dose value of linac on the error in setting the zero position of the accelerator's gantry for photons with energies of 18 MeV (1) and 6 MeV (2)

Таким образом, ошибка в определении ME_{cal} имеет сложную форму зависимости от угла вращения штатива ЛУ и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносит коэффициент $BOO_d(r)_\alpha$. Максимальное значение ошибки составило $-0,7\%$ для энергии 18 МэВ.

Девияция изоцентра вращения штатива ускорителя

Девияция изоцентра вращения штатива происходит по трем осям: ось штатив–пол (z-вертикальная); ось штатив–лечебный стол (y-сагиттальная); ось поперек лечебного стола (x-латеральная).

Для установления зависимости ошибки в полученном при калибровке РВ медицинских ЛУ опорном значении дозы от величины девиации

изоцентра вращения штатива ЛУ авторами проведены исследования возможного смещения для каждой из осей.

Девияция изоцентра вращения штатива по сагиттальной и латеральной осям вызовет смещение положения измерительного детектора от изоцентра радиационного пучка без изменения РИП дозиметрической системы. Таким образом, установлено, что смещение по этим осям приведет к возникновению ошибок при определении опорного значения дозы ввиду изменения коэффициента $BOO_d(r)$ (формула (1)).

Суммарное отклонение от точки пересечения осей симметрии радиационного пучка в случае такого смещения (r_{giso}) определено из выражения:

$$r_{giso} = \sqrt{x_{giso}^2 + y_{giso}^2}, \quad (14)$$

где x_{giso} и y_{giso} – смещение положения опорной точки измерительного детектора от точки пересечения осей симметрии радиационного пучка.

При помощи экспериментально измеренных авторами профильных дозовых распределений для значений r_{giso} , полученных с использованием формулы (14), путем интерполяции получены значения коэффициента $BOO_d(r_{giso})_{gisoxy}$, характеризующего отношение дозы в точке вне оси на опорной глубине и расстоянии от пересечения осей радиационного пучка r_{giso} к дозе симметричного поля на той же глубине в точке пересечения осей симметрии радиационного пучка. Значения коэффициента $BOO_d(r_{giso})_{gisoxy}$ определены для величин отклонения положения опорной точки измерительного детектора от точки пересечения осей симметрии радиационного пучка из диапазона от 0 до 10 мм для каждой из рассматриваемых осей радиационного пучка ЛУ.

Из выражения (15) определен коэффициент $K_{gisoxycal}$, учитывающий влияние на значение ME_{cal} смещения изоцентра вращения штатива ускорителя по сагиттальной (x) и латеральной (y) осям:

$$K_{gisoxycal} = \frac{ME_{cal}}{ME_{gisocalxy}} = BOO_d(r_{giso})_{gisoxy}, \quad (15)$$

где ME_{cal} – истинное значение РВ ЛУ (изоцентр не смещен); $ME_{gisocalxy}$ – значение РВ ЛУ при смещении изоцентра вращения штатива ЛУ на величины x и y по сагиттальной и латеральной осям соответственно.

Выявлено, что отношение значения коэффициентов $BOO_d(r_{giso})_{gisoxy}$ и $K_{gisoxycal}$ при изменении величины отклонения положения опорной точки

измерительного детектора от точки пересечения сагиттальной и латеральной осей радиационного пучка от 0 до 10 мм изменяются от 1 до 1,008 для 6 МэВ и от 1 до 1,009 для 18 МэВ. Результаты представлены на рисунке 3.



Рисунок 3 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы линейного ускорителя от смещения изоцентра вращения штатива в плоскости падения радиационного пучка для фотонов с энергиями 18 МэВ (1) и 6 МэВ (2)

Figure 3 – Dependence of the error in the determination of the dose reference value on the linear accelerator's gantry rotation isocenter displacement in the plane of incidence of the radiation beam for photons with energies of 18 MeV (1) and 6 MeV (2)

Таким образом, ошибка в определении ME_{cal} имеет сложную форму зависимости от величины отклонения положения опорной точки измерительного детектора от точки пересечения сагиттальной и латеральной осей радиационного пучка и отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносит коэффициент $BOO_d(r_{giso}, g_{isoz})$. Максимальное значение ошибки составило $-0,9\%$ для энергии 18 МэВ.

Девиация изоцентра вращения штатива по вертикальной оси вызовет изменение РИП без изменения величины смещения измерительного детектора от изоцентра радиационного пучка в плоскости, перпендикулярной направлению его падения. Таким образом, установлено, что смещение по вертикальной оси приведет к возникновению ошибки при определении опорного значения дозы при проведении процедуры калибровки радиационного выхода линейного ускорителя, так как изменится значение коэффициентов K_{SSD} и F из формулы (1), а также коэффициента k_Q . Для выявления ошибок в дозе при калибровке РВ в зависимости от величины смещения изоцентра вращения штатива по вертикальной оси авторами с использованием формулы (2) вычислены значения

K_{SSD} для случаев отклонения изоцентра вращения штатива ускорителя от вертикальной оси ($K_{SSDg_{isoz}}$) и определено влияние изменения значения коэффициента $K_{SSDg_{isoz}}$ на калибровку РВ ускорителя по формуле (1). При изменении РИП происходит изменение ПГД. Величина влияния этого процесса на измеренное значение дозы ($F_{g_{isoz}}$) определена по формуле (11).

Выявлено, что изменение положения изоцентра вращения штатива ускорителя по вертикальной оси в диапазоне расстояний от 980 до 1020 мм от источника ионизирующего излучения приведет к изменениям значений $K_{SSDg_{isoz}}$ от 1,0406 до 0,9617 и $F_{g_{isoz}}$ – от 1,0031 до 0,997 для фотонов 6 МэВ и 18 МэВ. Значения $k_{Qg_{isoz}}$ в этом случае изменяются от 1,0003 до 0,9997 для фотонов 6 МэВ и от 1,0009 до 0,9991 для фотонов 18 МэВ.

Из выражения (16) определен коэффициент $K_{g_{isozcal}}$ учитывающий влияние на значение ME_{cal} смещения изоцентра вращения штатива ускорителя по вертикальной (z) оси. Результаты представлены на рисунке 4.

$$K_{g_{isozcal}} = \frac{ME_{cal}}{ME_{isocalz}} = \frac{K_{SSDg_{isoz}} \times F_{g_{isoz}}}{K_{Qg_{isoz}}}, \quad (16)$$

где ME_{cal} – истинное значение РВ ЛУ (изоцентр не смещен); ME_{isocalz} – значение РВ ЛУ при смещении изоцентра вращения штатива ЛУ перпендикулярно плоскости падения радиационного пучка.

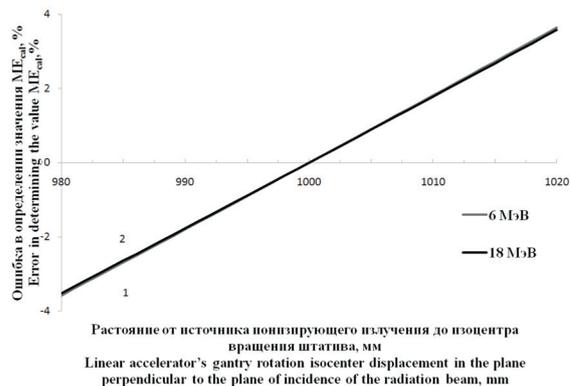


Рисунок 4 – Зависимость ошибки в определении опорного значения дозы линейного ускорителя от величины смещения изоцентра вращения штатива ускорителя в плоскости, перпендикулярной плоскости падения радиационного пучка для фотонов с энергиями 6 МэВ (1) и 18 МэВ (2)

Figure 4 – Dependence of the error in the determination of the dose reference value on the linear accelerator's gantry rotation isocenter displacement in the plane perpendicular to the plane of incidence of the radiation beam for photons with energies of 6 MeV (1) and 18 MeV (2)

Таким образом, установлено, что ошибка в определении ME_{cal} имеет выраженную линейную зависимость от величины смещения изоцентра вращения штатива ЛУ перпендикулярно плоскости падения радиационного пучка и практически не отличается для двух энергий фотонов. Основной вклад в величину ошибки вносит коэффициент $K_{SSD_{gisoz}}$. Значение ошибки изменялось от $-3,57$ до $3,64$ % в диапазоне расстояний от источника ионизирующего излучения до изоцентра вращения штатива от 980 мм до 1020 мм для 6 МэВ и от $-3,51$ до $3,58$ % в диапазоне расстояний от источника ионизирующего излучения до изоцентра вращения штатива от 980 до 1020 мм для 18 МэВ.

Заключение

Разработана оригинальная методика определения ошибки в полученном при калибровке радиационного выхода медицинских линейных ускорителей опорном значении дозы, возникающей при отклонениях механических характеристик штатива.

С использованием разработанной методики и результатов экспериментальных дозиметрических измерений получены зависимости величины возникающей ошибки от установки нулевого положения штатива ускорителя и девиации изоцентра вращения штатива ускорителя по каждой из осей. Установлено, что наибольшее влияние на величину ошибки оказывает смещение изоцентра вращения штатива в плоскости, перпендикулярной плоскости падения радиационного пучка (до $3,64$ %).

Для проведения комплексной оценки возможности клинического использования линейного ускорителя для облучения пациентов необходимо проведение дальнейших исследований и разработка методик, позволяющих провести анализ влияния всех его характеристик и дозиметрических параметров его радиационных пучков на ошибку

в дозе при калибровке радиационного выхода линейных ускорителей и, непосредственно, при облучении пациентов.

Список использованных источников

1. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures, International Commission On Radiation Units And Measurements. – Washington, D.C.: ICRU, 1976. – Rep. 24.
2. Тарутин, И.Г. Радиационная защита при медицинском облучении / И.Г. Тарутин. – Минск : Вышэйшая школа, 2005. – 324 с.
3. Mijnheer, B.J. Reply to precision and accuracy in radiotherapy / B. J. Mijnheer. – Radiotherapy and Oncology. – 1989. – Vol. 14, № 2. – P. 163–167.
4. Khan, F.M. The Physics of Radiation Therapy / F.M. Khan. – 4th ed. – Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2010. – 531 p.
5. Klein, E.E. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators / E.E. Klein, J. Hanley, J. Bayouth [et al.] // Medical physics. – 2009. – Vol. 36, № 9. – P. 4197–212.
6. Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics, Quality control of medical electron accelerators. – SSRMP, 2003, recommendation. – No. 11. – P. 1–31.
7. Steenhuijsen, J. EP-1388 Delivery accuracy of treatment plans for dose painting by numbers / J. Steenhuijsen [et al.] // Radiotherapy & Oncology. – 2012. – Vol. 103, Suppl. № 1. – P. S527.
8. World Health Organization, Quality Assurance in Radiotherapy. – Geneva : WHO, 1988.
9. Тарутин, И.Г. Контроль качества медицинских ускорителей электронов / И.Г. Тарутин, А.Г. Страх, Г.В. Гацкевич // Контроль качества в лучевой терапии и лучевой диагностике : сб. / под ред. Г.В. Гацкевича, И.Г. Тарутина. – Минск : Полипринт, 2009. – С. 31–66.
10. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy/ An international Code of Practice for Dosimetry Based on Gantrys of Absorbed dose to Water // IAEA. Technical Report Series. – № 398. – Vienna, 2000.

Technique of estimation of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure. Part 1. Dependence of the mechanical parameters of linac's gantry

Tsitovich Y.V.¹, Kiselev M.G.²

¹N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040, Lesnoy, Minsk District, Belarus

²Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, 220050, Minsk, Belarus

Received 17.06.2015

Accepted for publication 03.11.2015

Abstract. To ensure the safety of radiation oncology patients needed to provide a consistent functional characteristics of the medical linear electron accelerators, which affect the accuracy of dose delivery. To this end, their quality control procedures, which include the calibration of radiation output of the linear accelerator, the error in determining the dose reference value during which must not exceed 2 %, is provided. The aim is to develop a methodology for determining the error in determining this value, depending on the mechanical characteristics of the linac's gantry. To achieve the objectives have been carried out dosimetric measurements of Trilogy S/N 3567 linac dose distributions, on the basis of which dose errors depending on the accuracy setting the zero position of the gantry and the deviation of the gantry rotation isocenter were obtained. It was found that the greatest impact on the value of the error has gantry rotation isocenter deviation in a plane perpendicular to the plane of incidence of the radiation beam (up to 3,64% for the energy of 6 MeV). Dose errors caused by tilting the gantry and its isocenter deviation in the plane of incidence of the beam were highest for 18 MeV energy and reached –0,7 % and –0,9 % respectively. Thus, it is possible to express the results of periodic quality control of the linear accelerator gantry in terms of dose and use them to conduct a comprehensive assessment of the possibility of clinical use of a linear accelerator for oncology patients irradiation in case of development of techniques that allow to analyze the influence of the rest of its technical and dosimetric parameters for error in dose.

Keywords: radiation therapy, linear accelerator radiation output calibration procedure, error in the reference value of the absorbed dose, linac's gantry.

Адрес для переписки:

Титович Е.В.
РНПЦ онкологии и медицинской радиологии им. Н.Н. Александрова,
223040, агрогородок Лесной, Минский район,
Минская область, Беларусь
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Address for correspondence:

Tsitovich Y.V.
N.N. Alexandrov National Cancer Centre of Belarus,
223040, Lesnoy, Minsk District, Belarus
e-mail: e.v.titovich@gmail.com

Для цитирования:

Титович Е.В., Киселев М.Г.
Методика определения ошибки в опорном значении дозы при калибровке радиационного выхода линейного ускорителя.
Часть 1. Зависимость от механических параметров штатива
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 230–238

For citation:

Tsitovich Y.V., Kiselev M.G.
Technique of estimation of error in the reference value of the dose during the linear accelerator radiation output calibration procedure.
Part 1. Dependence of the mechanical parameters of linac's gantry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 230–238

References

1. International Commission On Radiation Units And Measurements. Determination of Absorbed Dose in a Patient Irradiated by Beams of X or Gamma rays in Radiotherapy Procedures. *Washington, D.C: ICRU*, 1976, rep. 24.
2. Tarutin I.G. *Radiacionnaya zaschita pri medicinskom obluchenii* [Radiation protection during medical irradiation]. Minsk, Vysheishaya Shkola Publ., 2005, 324 p. (in Russian).
3. Mijnheer, B.J. Reply to precision and accuracy in radiotherapy. *Radiotherapy and Oncology*, 1989, vol. 14, no. 2, pp. 163–167.
4. Khan, F.M. *The Physics of Radiation Therapy*. 4th ed. Philadelphia : Lippincott Williams & Wilkins, 2010, 531 p.
5. Klein, J. Hanley, J. Bayouth E. E. et al. Task Group 142 report: quality assurance of medical accelerators. *Medical physics*, 2009, vol. 36, no. 9, pp. 4197–212.
6. Swiss Society of Radiobiology and Medical Physics, Quality control of medical electron accelerators. SSRMP, 2003, recommendation, no. 11, pp. 1–31.
7. Steenhuijsen, J. Delivery accuracy of treatment plans for dose painting by numbers. *Radiotherapy & Oncology*, 2012, vol. 103, suppl. No. 1, pp. S527.
8. World Health Organization. Quality Assurance in Radiotherapy. Geneva: WHO, 1988.
9. Tarutin I.G., Gackevich G.V. *Kontrol' kachestva v luchevoj terapii i luchevoj diagnostike* [Quality control of radiation therapy and medical imaging]. Minsk, Polyprint publ., 2009, pp. 31–66 (in Russian).
10. IAEA. Absorbed dose determination in external beam radiotherapy. An international Code of Practice for Dosimetry Based on Gantryyards of Absorbed dose to Water. *Technical Report Series*. № 398, Vienna, 2000.

УДК 614.841

Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование

Невдах В. В.

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

Поступила 07.04.2015

Принята к печати 19.10.2015

С помощью программы *FDS* выполнено компьютерное моделирование начальной стадии пожаров в закрытом помещении объемом $\approx 60 \text{ м}^3$ с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м. Моделировались пожары с различной скоростью роста по квадратичному закону. Быстроразвивающимся пожаром считался пожар, величина тепловыделения которого 1055 кВт достигалась за 100 с, медленноразвивающимся – за 500 с. Изучалась динамика тепловыделения и пространственных распределений температуры, затемнения и изменения давления воздуха – факторов пожара, детектируемых извещателями. Установлено, что зависимость тепловыделения от времени, начиная с момента возникновения пожара и до его затухания, состоит из двух этапов. На первом этапе, который происходит с нарастанием тепловыделения с заданной скоростью, пламенное горение происходит только в области источника. На втором этапе, который характеризуется нерегулярными пульсациями тепловыделения, пламенное горение происходит в разных местах слоя дыма из-за его самовоспламенения. Длительность второго этапа увеличивается при уменьшении скорости роста пожара и увеличении высоты расположения источника. Получено, что все пространство помещения может быть разделено по высоте на слои, характеризующиеся своими значениями температуры и затемнения воздуха, их градиентами и наличием в них областей самовоспламенения. Толщины этих слоев, градиенты температуры и затемнения в слоях зависят от скорости роста пожара и высоты расположения его источника. Также получено, что пространственные распределения температуры и давления воздуха имеют противоположные градиенты по высоте, величины которых зависят от скорости роста и высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

Ключевые слова: моделирование пожара, пожарные извещатели, динамика тепловыделения, температура воздуха, затемнение.

Адрес для переписки:

Невдах В.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: psf@bntu.by

Address for correspondence:

Nevdakh V.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: psf@bntu.by

Для цитирования:

Невдах В. В.
Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 239–248

For citation:

Nevdakh V. V.
Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 239–248

Введение

Опыт показывает, что успешная эвакуация и другие действия по ликвидации опасности для людей и материальных ценностей в случае возникновения пожара в помещении, возможны только на первом, начальном, этапе его развития. Поэтому основной задачей систем пожарной сигнализации является как можно более раннее обнаружение возникновения пожара. Известно, что на динамику начального этапа пожаров в помещениях оказывают существенное влияние ряд параметров, таких как мощность пожара и скорость его развития, высота расположения источника возгорания над уровнем пола, наличие естественной вентиляции помещения – сечение и высота расположения вентиляционного отверстия [1–3]. После возникновения пламенного горения большинство пожаров растут с ускорением, достигают состояния, характеризующегося максимальной мощностью тепловыделения, и затем входят в стадию затухания из-за ограниченного количества кислорода или горючего материала. Скорость развития пламенного пожара в помещении определяется типом горючего материала, его формой и расположением, геометрией помещения, наличием вентиляции. При разной скорости роста пожара наблюдается различная динамика опасных факторов пожара.

При описании динамики начального этапа пожара в помещении скорость его развития обычно характеризуется временем, необходимым для достижения заданной мощности тепловыделения Q^* после начала горения стабильным пламенем. Исследования показали, что мощность тепловыделения Q большинства пожаров может быть выражена так называемой моделью степенного закона развития пожара [4]:

$$Q = \frac{Q^*}{t_g^2} (t - t_0)^2, \text{ (кВт)} \quad (1)$$

где t_0 – время появления стабильного пламени (с), t – текущее время (с), t_g – время (с), которое должно пройти с момента возникновения стабильного пламени до достижения заданной величины мощности тепловыделения. До момента t_0 горючие материалы могут тлеть, но не будет стабильного пламенного горения. Выражение (1) обычно записывается в виде:

$$Q = \alpha (t - t_0)^2, \quad (2)$$

где $\alpha = Q^* / t_g^2$ (кВт/с²) – скорость роста пожара.

По скорости роста пожары в помещении принято классифицировать на медленные, средние и быстроразвивающиеся с момента времени, когда появляется установившееся пламя, до момента достижения мощности тепловыделения $Q^* = 1055$ кВт (см. таблицу).

Таблица / Table

Классификация пожаров по скорости роста Classification of fires with respect to its growth rate

Скорость роста пожара Fire growth rate	Время роста Growth time $t_g, \text{ c / s}$	$\alpha, \text{ кВт/с}^2$ kW/s^2
Быстрая /Fast	$t_g < 150$	$\alpha > 0.047$
Средняя /Medium	$150 \leq t_g < 400$	$0.0066 < \alpha \leq 0.47$
Медленная /Slow	$t_g \geq 400$	$\alpha \leq 0.0066$

Начальные этапы пожаров в помещениях исследовались как теоретически при компьютерном моделировании пожаров [5–9], так и при экспериментальном моделировании тестовых и полномасштабных пожаров [10–13]. Следует отметить, что экспериментальные результаты, получаемые для пожаров в закрытых помещениях, не всегда согласуются с модельными расчетами. Это является следствием того, что с теплофизической точки зрения пожар в помещении является нелинейной системой, в которой протекают сложные процессы тепло- и массопереноса, динамика которых изучена недостаточно. Кроме того, для описания динамики пожара используются различные параметры – среднеобъемная температура воздуха, массовая скорость горения и величина тепловыделения или мощность пожара (см., например, [1–3]). Но все эти параметры по-разному меняются со временем на начальном этапе пожара, и это затрудняет правильное понимание его динамики и выбор извещателей для систем пожарной сигнализации.

Целью настоящей работы являлось компьютерное моделирование с помощью программы *FDS* динамики факторов пожара, детектируемых пожарными извещателями, на начальной стадии пожаров с различными скоростями развития в закрытом помещении.

Модель помещения и условия моделирования пожара

Моделирование пожара осуществлялось с помощью программы *Fire Dynamics Simulator*

(version 5), в которой реализована полевая модель пожара [14]. С помощью специального графического интерфейса *PyroSim* в прямоугольной расчетной сетке с кубическими ячейками с ребром 0,1 м была создана трехмерная модель закрытого помещения – с размерами $4,5 \times 5,1 \times 3,0$ м.

В качестве материала для пола толщиной 0,3 м и потолка комнаты толщиной 0,2 м был выбран бетон, а для стен толщиной также 0,2 м – кирпич. В комнате имелись расположенные в противоположных стенах застекленное окно размерами $1,0 \times 1,4$ м и деревянная дверь размерами $0,75 \times 2,0$ м. В модели использовались справочные значения параметров, определяющих тепловую инерцию конструкционных материалов комнаты – плотностей, удельных теплоемкостей и коэффициентов теплопроводности.

Источник пожара размерами $0,5 \times 0,5$ м последовательно располагался на полу и на высоте 2 м от уровня пола на расстоянии 0,8 м от стены с дверью. Детектируемыми параметрами пожара были: массовая скорость горения материала (в кг/с); величина тепловыделения пожара (в кВт); температура воздуха в помещении (в °С); затемнение (в %/м) и изменение давления воздуха в помещении относительно начального атмосферного (в Па). Температура и задымление воздуха контролировались наборами соответствующих датчиков температуры и дыма (по 17 штук в каждом наборе), расположенных по вертикальной оси с интервалом 0,15 м, нижние из которых размещались на высоте 0,09 м над уровнем пола, верхние – на высоте 2,49 м от уровня пола, т.е. на расстоянии 0,01 м ниже уровня потолка. Ось датчиков находилась на расстоянии 0,2 м от стены комнаты с окном. Датчики давления воздуха располагались на высоте 0,09 и 2,49 м.

Для удобства работы с моделью и наблюдения за развитием пожара с помощью специальной программы визуализации данных *SmokeView* [15] потолок и стены комнаты были сделаны частично прозрачными.

Результаты моделирования и их обсуждение

В соответствии с таблицей были выбраны следующие скорости роста пожара α : для быстрого пожара $\alpha_f = 0,1055$ кВт/с², для среднего $\alpha_m = 0,01688$ кВт/с² и для медленного $\alpha_{sl} = 0,00422$ кВт/с². При этом расчетные длительности пожара t_g до достижения источником мощно-

сти тепловыделения $Q^* = 1055$ кВт составляли 100, 250 и 500 с соответственно. Время моделирования составляло 500 с для всех трех пожаров и начиналось с момента, когда тепловыделение источника достигало величины 10 кВт, при которой наблюдалось стабильное пламя. Динамика изменения массовой скорости расхода горючего материала для этих пожаров показана на рисунке 1.

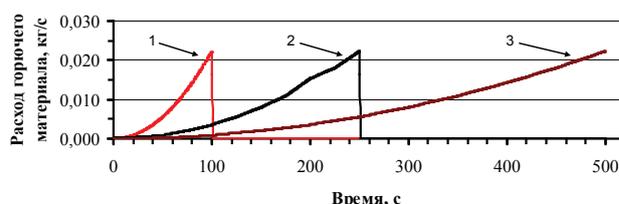


Рисунок 1 – Зависимость массового расхода горючего материала от времени при быстрой (1), средней (2) и медленной (3) скоростях горения источника пожара

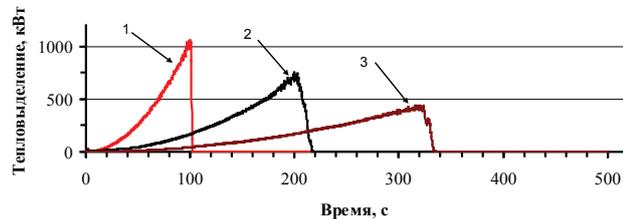
Figure 1 – Mass burning rates vs. time for fast (1), medium (2) and slow (3) fires

Моделирование показало, что, как и в случае стационарных пожаров (см., например, [10]), для всех скоростей роста пожара наблюдается сильная зависимость динамики тепловыделения от высоты расположения источника пожара. На рисунках 2а и 2б показана динамика тепловыделения для трех скоростей роста пожара с источником пожара, расположенным на полу и на высоте 2 м от уровня пола, соответственно, закрытой комнаты.

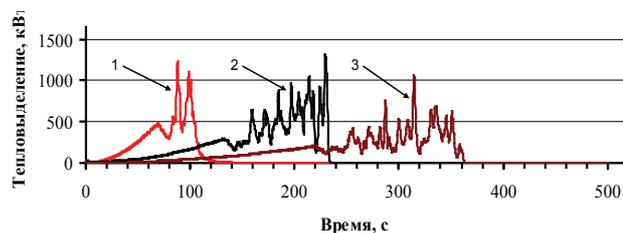
Из рисунка 2а видно, что при пожаре с источником, расположенным на полу, в используемой модели помещения мощность тепловыделения источника 1055 кВт была достигнута только при быстром пожаре. Также видно, что чем медленнее скорость роста пожара, тем меньшая достигается максимальная мощность тепловыделения и тем раньше начинается затухание пламенного пожара, обусловленное ограниченным количеством кислорода в помещении и изменением условий протекания процессов горения. При медленном пожаре было достигнуто максимальное тепловыделение менее 500 кВт.

Моделирование показало, что при быстром росте пожара на этапе нарастания тепловыделения пламенное горение происходит в области источника и только в конце этого этапа создаются условия для самовоспламенения в областях дыма, близких к источнику. Однако к этому времени в моделируемом помещении остается мало кислорода, поэто-

му происходит быстрое затухание процессов пламенного горения как в области источника, так и в прилегающих к нему областях дыма, и связанное с этим уменьшение суммарного тепловыделения.



a



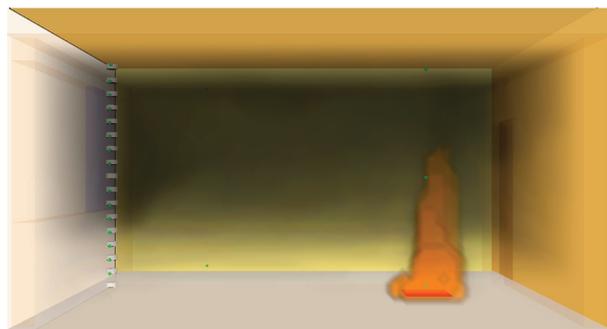
b

Рисунок 2 – Зависимость тепловыделения от времени при быстрой (1), средней (2) и медленной (3) скоростях роста пожара с источником, расположенным на полу (*a*) и высоте 2 м (*b*)

Figure 2 – Heat release rate vs. time for fast (1), medium (2) and slow (3) fires with burner on a floor (*a*) and 2 m above floor (*b*)

Если источник пожара поднят над уровнем пола на высоту 2 м, то при любой скорости роста пожара его характер изменяется – пожар протекает в два этапа и его общая продолжительность увеличивается. Длительность первого этапа, когда пламенное горение происходит только в области источника, сокращается, а второго этапа, когда пламенное горение – самовоспламенение возникает в разных местах слоя дыма, наоборот, увеличивается. На этом этапе наблюдаются пульсации в тепловыделении, амплитуда которых может превышать величину заданного тепловыделения источника 1055 кВт (рисунок 2*b*).

На рисунках 3*a–3d* для сравнения приведены картины быстрого и медленного пожаров в закрытой комнате с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м в моменты достижения одинаковой величины тепловыделения ≈ 490 кВт. Из этих рисунков видно, что картины пожаров во всех четырех рассматриваемых случаях сильно различаются.



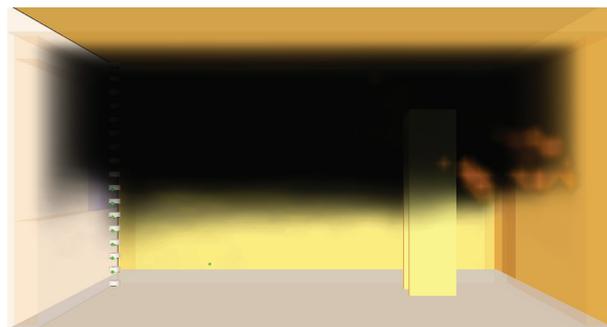
a



b



c



d

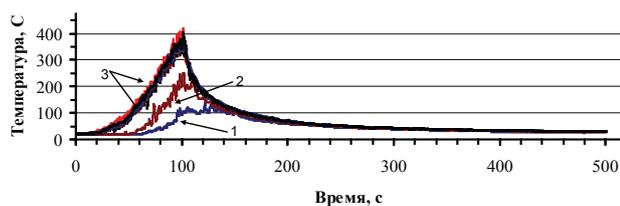
Рисунок 3 – Картины быстрого (*a* – на 64-й, *b* – на 66-й с) и медленного (*c* – на 321-й с, *d* – на 272-й с) пожаров в закрытой комнате с источником, расположенным на полу (*a*, *c*) и высоте 2 м (*b*, *d*)

Figure 3 – Pictures of fast fires (at 64 s (*a*) and 66 s (*b*)) and slow fires (at 321 s (*c*) and 272 s (*d*)) with a burner on a floor (*a*, *c*) and 2 m above floor (*b*, *d*)

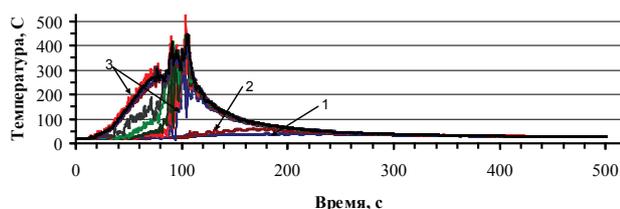
Из рисунков 3а и 3б видно, что при быстром пожаре времена достижения одинакового тепловыделения на первом этапе пожара практически не зависят от высоты расположения источника, но в случае пожара с источником на высоте 2 м дым сосредотачивается в припотолочном слое намного меньшей толщины, чем в случае пожара с источником на полу. Из рисунков 3с и 3д видно, что на моменты достижения того же уровня тепловыделения при медленном пожаре, что и при быстром, помещение оказывается заполненным дымом гораздо сильнее в обоих случаях – когда источник пожара на полу и на высоте 2 м.

Различия в картинах пожаров, показанных на рисунках 3а–3д, обусловлены различиями в динамике тепловыделения быстрых и медленных пожаров с разной высотой расположения источников.

Изменение пространственного распределения температуры воздуха в помещении при быстрых пожарах с источником на полу и на высоте 2 м иллюстрируют рисунки 4а и 4б.



а



б

Рисунок 4 – Зависимость температуры воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при быстром пожаре с источником на полу (а) и на высоте 2 м (б)

Figure 4 – Indoor air temperatures vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for fast fire with burner on a floor (а) and 2 m above floor (б)

При пожаре с источником на полу в верхней зоне помещения между высотами 1,29 и 2,49 м формируется слой наиболее нагретого воздуха,

температура которого нарастает с течением времени, но имеет небольшой, практически не меняющийся со временем вертикальный градиент. Ниже этого слоя находится слой воздуха, имеющий увеличивающийся с течением времени вертикальный градиент температуры. В нижней части этого слоя на высоте 0,09 м над уровнем пола температура воздуха начинает увеличиваться примерно через минуту после начала пожара (рисунок 4а).

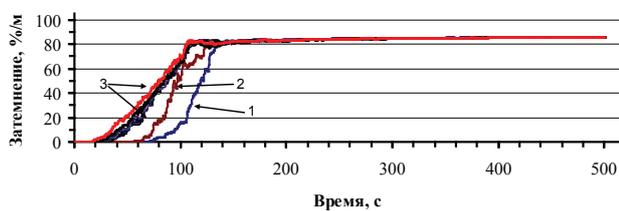
В течение первого этапа быстрого пожара с источником на высоте 2 м верхний слой воздуха нагревается быстрее, чем при пожаре с источником на полу, но его толщина заметно уменьшается – он находится между высотами 2,04 и 2,49 м. Одновременно в нижней зоне помещения – между полом и высотой 0,54 м – остается слой воздуха, температура которого не меняется. На этом этапе пожара слой воздуха между высотами 0,54 и 2,04 м имеет быстро растущий вертикальный градиент температуры (рисунок 4б).

Самовоспламенение, хаотически возникающее в различных областях слоя дыма на втором этапе быстрого пожара, приводит к хаотическому повышению температуры воздуха в этих областях, что вызывает усиление газодинамических процессов в верхней зоне помещения, приводящих к перемешиванию воздуха. В результате по всей высоте слоя воздуха между высотами 1,29 и 2,49 м наблюдаются сильные пульсации температуры. С уменьшением высоты до уровня 0,54 м амплитуды пульсаций температуры ослабевают (рисунок 4б).

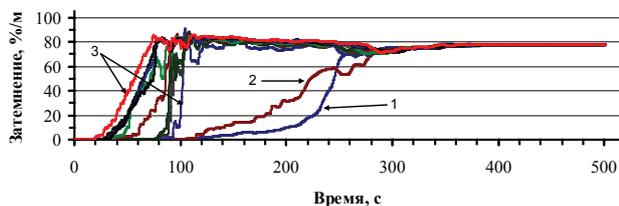
Динамика пространственного распределения дыма в помещении при быстрых пожарах с источником на полу и на высоте 2 м показана на рисунках 5а и 5б). Из этих рисунков видно, что изменение пространственного распределения дыма в помещении коррелирует с изменением пространственного распределения температуры воздуха. При быстром пожаре с источником на высоте 2 м максимальная величина затемнения достигается раньше; при этом дым опускается вниз медленнее, чем при пожаре с источником на полу, и появляется на высоте 0,54 м только в конце второго этапа пожара. В слое дыма между высотами 1,29 и 2,49 м наблюдаются сильные пульсации величины затемнения, обусловленные процессами самовоспламенения дыма (см. рисунок 5б).

Динамика пространственного распределения температуры воздуха в помещении при медленных пожарах с источником на полу и на высоте 2 м показана на рисунках 6а и 6б.

Из этих рисунков видно, что при пожаре с источником на полу, как и в случае быстрого пожара, наиболее нагретым оказывается верхний слой воздуха между высотами 1,29 и 2,49 м. В этом слое практически отсутствует вертикальный градиент температуры. Так как пламенное горение происходит в основном в области источника, то сильных колебаний температуры воздуха в стороне от источника, где находятся датчики, не наблюдается. И только в конце пожара в области нижней границы дыма наблюдаются небольшие области самовоспламенения, что находит отражение в появлении пульсаций температуры воздуха на высоте 0,09 м (см. зависимость 1 на рисунке 6а).



a



b

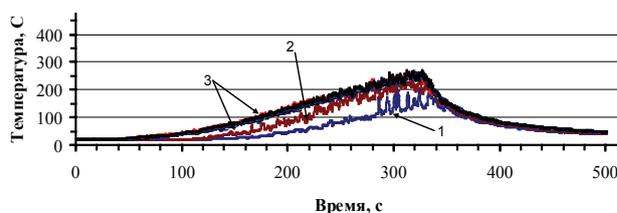
Рисунок 5 – Зависимость затемнения воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при быстром пожаре с источником на полу (a) и на высоте 2 м (b)

Figure 5 – Indoor smoke obscuration vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for fast fire with burner on a floor (a) and 2 m above floor (b)

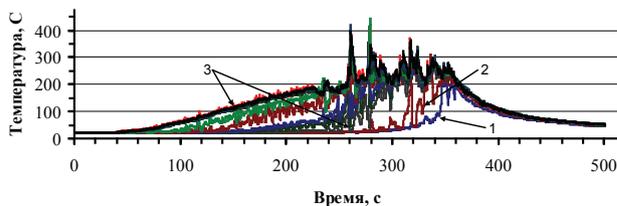
На первом этапе медленного пожара с источником на высоте 2 м воздух под потолком нагревается быстрее, чем с источником на полу, однако слой наиболее нагретого воздуха с практически отсутствующим вертикальным градиентом температуры, как и при быстром пожаре, значительно тоньше. Из сравнения рисунков 6а и 6б видно, что на этом этапе пожара нижние слои воздуха нагреваются намного медленнее.

На втором этапе пожара возникающее в различных местах слоя дыма самовоспламенение

приводит к появлению пульсаций температуры воздуха на разных высотах вплоть до высоты 0,54 м, амплитуда которых может в разы превышать максимальную температуру, достижимую на первом этапе. Это усиливает газодинамические возмущения в помещении и ведет к перемешиванию воздуха и выравниванию его температуры по высоте (см. рисунок 6б).



a



b

Рисунок 6 – Зависимость температуры воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при медленном пожаре с источником на полу (a) и на высоте 2 м (b)

Figure 6 – Indoor air temperatures vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for slow fire with burner on a floor (a) and 2 m above floor (b)

Изменение пространственного распределения дыма в помещении на начальном этапе медленных пожаров с источником на полу и на высоте 2 м показано на рисунках 7а и 7б. Из этих рисунков видно, что заполнение помещения дымом при таких пожарах происходит по-разному.

При пожаре с источником на полу максимальное затемнение в верхней зоне помещения достигается к концу первого этапа пожара, когда помещение оказывается практически полностью заполнено однородным слоем дыма. На втором этапе этого пожара самовоспламенение дыма возникает только на нижней границе слоя дыма (см. рисунки 7а и 3с).

При пожаре с источником на высоте 2 м максимальная величина затемнения меньше, достига-

ется заметно раньше – к концу первого этапа пожара, и при этом дым опускается вниз медленнее, чем при пожаре с источником на полу. На втором этапе пожара наблюдаются интенсивные пульсации затемнения, вызванные газодинамическими возмущениями, которые обусловлены процессами самовоспламенения дыма. По мере увеличения толщины слоя дыма процессы самовоспламенения локализуются в его нижней части, и в конце этапа пульсации затемнения наблюдаются только на нижней границе слоя дыма (см. рисунки 7*b* и 3*d*).

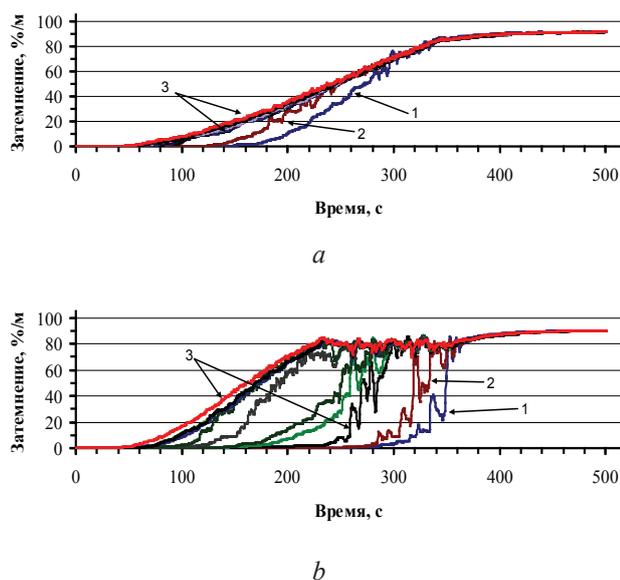


Рисунок 7 – Зависимость затемнения воздуха в помещении от времени на высотах 0,09 (1), 0,54 (2) и в слое между высотами 1,29 и 2,49 м (3) при медленном пожаре с источником на полу (а) и на высоте 2 м (б)

Figure 7 – Indoor smoke obscuration vs. time at heights 0,09 (1), 0,54 (2), into a layer between 1,29 and 2,49 m (3) for slow fire with burner on a floor (а) and 2 m above floor (б)

Следует отметить, что возникающие в слое дыма области самовоспламенения и соответствующие пульсации температуры воздуха, наблюдаемые при пожарах с источником, расположенным над уровнем пола, делают такие пожары наиболее опасными при эвакуации людей из помещений.

На рисунках 8*a* и 8*b* показано, как меняется давление воздуха внизу над полом иверху под потолком закрытого помещения в стороне от источника относительно начального атмосферного давления в процессе моделируемых пожаров.

Работа источника пожара и описанные выше различия в пространственном распределении температуры воздуха при быстром и медленном по-

жарах с источником на полу и на высоте 2 м приводят к установлению в помещении сильно различающихся пространственных распределений давления воздуха при таких пожарах. Из рисунков видно, что при всех пожарах давление воздуха внизу над полом выше, чем давление под потолком. Из рисунков 4, 6 и 8 видно, что при работе источника пожара в помещении устанавливаются пространственные распределения температуры и давления воздуха с противоположными градиентами, величины которых зависят от высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

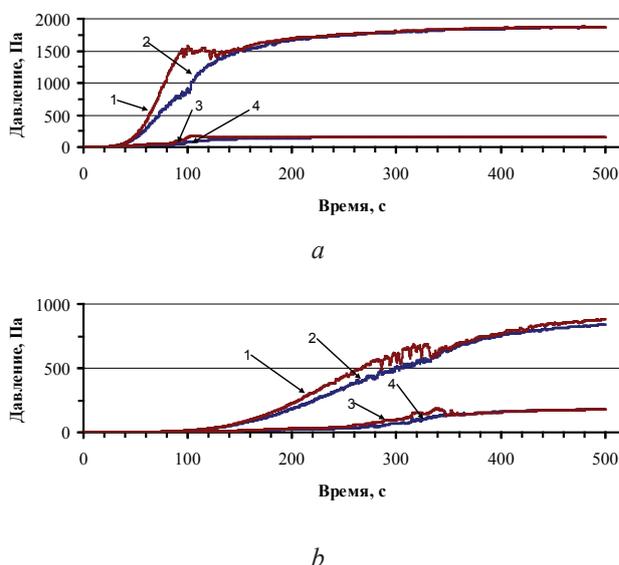


Рисунок 8 – Зависимость изменения давления воздуха в закрытой комнате на высоте 0,09 (1, 3) и 2,49 м (2, 4) с источником на полу (1, 2) и высоте 2 м (3, 4) при быстром (а) и медленном (б) пожарах

Figure 8 – Variations of air indoor pressure vs. time at heights 0,09 (1, 3) and 2,49 m (2, 4) above floor during fast (а) and slow (б) fire with burner on a floor (1, 2) and 2 m above floor (3, 4)

Заключение

В работе с помощью программы *FDS* выполнено компьютерное моделирование начальной стадии пожаров в закрытом помещении, имеющих различную скорость роста, с источником, расположенным на полу и на высоте 2 м. Быстроразвивающимся пожаром считался пожар, мощность тепловыделения которого 1055 кВт достигалась

за 100 с, медленно развивающимся – за 500 с. Моделирование показало, что скорость роста пожара оказывает сильное влияние на динамику его детектируемых факторов – величины тепловыделения, пространственных распределений температуры, затемнения и изменения давления воздуха. При всех рассмотренных скоростях нарастания пожаров, протекающих в закрытом помещении по сценарию пожара, контролируемого содержанием кислорода, зависимость тепловыделения от времени, начиная с момента возникновения пожара до его затухания, можно разделить на два этапа: первый этап, который происходит с нарастанием тепловыделения с заданной скоростью и характеризуется пламенным горением только в области источника, и второй этап, характеризующийся нерегулярными пульсациями тепловыделения и возникновением самовоспламенения в разных местах слоя дыма. Длительность второго этапа увеличивается при уменьшении скорости роста пожара и увеличении высоты расположения источника. Различия в динамике тепловыделения при быстрых и медленных пожарах с разной высотой расположения источника обуславливают различия в динамике пространственного распределения температуры, затемнения и давления воздуха в помещении при таких пожарах. Моделирование также показало, что все пространство помещения может быть разделено по высоте на слои, характеризующиеся своими значениями температуры и затемнения воздуха, их градиентами и наличием в них областей самовоспламенения. Толщины этих слоев, градиенты температуры и затемнения в слоях зависят от скорости роста пожара и высоты расположения его источника.

Также получено, что при пожаре в закрытом помещении устанавливаются пространственные распределения температуры и давления воздуха с противоположными градиентами по высоте, величины которых зависят от скорости роста и высоты расположения источника пожара. Максимальное по величине изменение давления воздуха и максимальный обратный градиент по высоте этого изменения происходит при быстром пожаре с источником на полу.

Полученные в настоящей работе результаты моделирования следует учитывать при выборе извещателей для разрабатываемых систем пожарной сигнализации для помещений, имеющих различную пожарную нагрузку, а также при расчетах времени эвакуации людей из таких помещений.

Список использованных источников

1. *Drysdale, D.* An introduction to fire dynamics / *D. Drysdale*. – Third edition. – Wiley, 2011. – 551 p.
2. *Кошмаров, Ю.Л.* Прогнозирование опасных факторов пожара в помещении / Ю.Л. Кошмаров. – М. : Академия ГПС МВД России, 2000. – 118 с.
3. *Молчадский, И.С.* Пожар в помещении / И.С. Молчадский. – М. : ВНИИПО, 2005. – 456 с.
4. *Ohlemiller, T.J.* Smoldering combustion. Chapter 9 in SFPE Handbook of fire protection engineering / *T.J. Ohlemiller*. – 3rd Edition: – 2002. – P. 200–210.
5. Experimental and theoretical model of flashover / P.G. Holborn [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 1993. – Vol. 21, № 3. – P. 257–266.
6. A model of instability and flashover / A.N. Beard [et al.] // *Journal of Applied Fire Science*. – 1994. – V. 4, № 1. – P. 3–16.
7. The effect of model parameters on the simulation of fire dynamics / W. Jahn [et al.] // *Fire Safety Science*. 2008. – V. 9. – P. 1341–1352.
8. *Novozhilov, V.* Non-linear dynamical model of compartment fire flashover / V. Novozhilov // *Journal of Engineering Mathematics*. – 2010. – Vol. 67, № 4. – P. 387–400.
9. *Невдах, В.В.* Моделирование начального этапа стационарного пламенного пожара в закрытом помещении / В.В. Невдах, А.А. Антошин, И.Е. Зуйков // *Наука и техника*. – 2014. – № 3. – С. 28–35.
10. Experimental and theoretical model of flashover / P.G. Holborn [et al.] // *Fire Safety Journal*. – 1993. – Vol. 21, № 3. – P. 257–266.
11. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires / I.R. Thomas [et al.] // *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007. – Vol. 17, № 2. – P. 85–102.
12. *Beard, A.N.* Flashover and boundary properties / A.N. Beard // *Fire Safety Journal*. – 2010. – Vol. 45, № 2. – P. 116–121.
13. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings / A. Poulsen [et al.] // *Fire Technology*. – 2012. – Vol. 48, № 2. – P. 419–439.
14. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2008. – 92 p.
15. *Forney, G.* User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Special Publication 1017-1 / G. Forney. – Washington : U.S. Government Printing Office, 2008. – 142 p. 13. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings / A. Poulsen [et al.] // *Fire Technology*. 2012. – V. 48, №2. – P. 419–439.
14. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5 / K. McGrattan [et al.]. – Gaithersburg, MA, 2008. – 92 p.
15. Forney, G. User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Special Publication 1017-1 / G. Forney. – Washington: U.S. Government Printing Office, 2008. – 142 p.

Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation

Nevdakh V.V.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus

Received 07.04.2015

Accepted for publication 19.10.2015

Abstract. Computer simulation of the initial fire stages in closed compartment with the volume of $\approx 60 \text{ m}^3$ and with a burner on a floor and 2 m above floor have been carried using FDS software. Fires with different t^2 -power low heat release rates have been modeled. Fires which growth times to reach 1055 kW were 100 s and 500 s have been considered as fast and slow fires respectively. Dynamics of heat release rates and detected fire factors such as spatial distributions of air temperature, smoke obscuration and variations of indoor pressure have been studied. It has been obtained that dynamics of heat release rates of the initial fire stages in closed compartment consists of two stages. During the first stage the heat release rate is proportional to mass burning rate and flaming occurs only above a burner. At the second stage dynamics of heat release rates has a form of irregular in amplitude and duration pulsations, which are caused by self-ignition in the smoke layer. The compartment air volume may be layered with respect to the height and every layer has its oven temperature, smoke obscuration, self-ignition areas have been shown. The layer thickness, gradients of temperature and obscuration depend on a fire growth rate and on a burner height above floor have been concluded. The spatial distributions of air temperature and pressure variation have the opposite gradients on a height have been obtained. Maximal pressure variation and its gradient occurs under the fast fire with a burner on a floor have been obtained too.

Keywords: fire simulation, fire detector, heat release rate dynamics, air temperature, smoke obscuration.

Адрес для переписки:

Невдах В.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь
e-mail: psf@bntu.by

Address for correspondence:

Nevdakh V.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, 220013, Minsk, Belarus
e-mail: psf@bntu.by

Для цитирования:

Невдах В. В.
Динамика факторов пожара, детектируемых извещателями, в закрытом помещении: моделирование
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 239–248

For citation:

Nevdakh V. V.
Dynamics of detected fire factors in closed compartment: computer simulation
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 239–248

References

1. Drysdale D. An introduction to fire dynamics. Third edition. Chichester, Wiley, 2011. 551 p.
2. Koshmarov Yu.L. *Prognozirovaniye opasnykh faktorov pozhara v pomescheniyi* [Danger factor forecasting of fire in premises]. Moscow, State fire academy of EMERCOM of Russia Publ., 2000. 118 p. (in Russian)
3. Molchadsky L.S. *Pozhar v pomescheniyi* [Fire in premises]. Moscow, All-Russian Scientific-Research Institute for Fire Protection [VNIPO] Publ., 2005. 456 p. (in Russian)
4. Ohlemiller T.J. Smoldering combustion. Chapter 9 in SFPE handbook of fire protection engineering. 3rd Edition, DiNenno, P. J.; Drysdale, D.; Beyler, C. L.; Walton, W. D., Editors. 2002. pp. 200–210.
5. Holborn P.G., Bishop S.R., Drysdale D.D., Beard A.N. Experimental and theoretical model of flashover. *Fire Safety Journal*. 1993. vol. 21, no. 3. pp. 257–266.
6. Beard A.N., Drysdale D.D., Holborn P.G., and Bishop S.R. A model of instability and flashover. *Journal of Applied Fire Science*. 1994. vol. 4, no. 1. pp. 3–16.
7. Jahn W., Rein G., Torero J.L. The effect of model parameters on the simulation of fire dynamics. *Fire Safety Science*. 2008. vol. 9. pp. 1341–1352.
8. Novozhilov V. Non-linear dynamical model of compartment fire flashover. *Journal of Engineering Mathematics*. 2010. vol. 67, no. 4. pp. 387–400.
9. Nevdakh V.V., Antoshin A.A., Zuikov I.E. Initial stage simulation of stationary flaming fire in the closed compartment. *Nauka i Tekhnika*, 2014, no. 3, pp. 28–35 (in Russian)
10. Holborn P.G., Bishop S.R., Drysdale D.D. and Beard A.N. Experimental and theoretical model of flashover. *Fire Safety Journal*. 1993. vol. 21, no. 3. pp. 257–266.
11. Thomas I.R., Moinuddin K.A.M., Bennets I.D. The effect of fuel quantity and location on small enclosure fires. *Journal of Fire Protection Engineering*. 2007. vol. 17, no. 2. pp. 85–102.
12. Beard A.N. Flashover and boundary properties. *Fire Safety Journal*. 2010. vol. 45, no. 2. pp. 116–121.
13. Poulsen A., Jomaas G. Experimental study on the burning behavior of pool fires in rooms with different wall linings. *Fire Technology*. 2012. vol. 48, no. 2. pp. 419–439.
14. McGrattan K., Baum H., Rehm R., Mell W., McDermott R. Fire Dynamics Simulator (Version 5) Technical Reference Guide Volume 1: Mathematical model, NIST Special Publication 1018-5. Gaithersburg, MA, 2008. 92 p.
15. Forney G. User's Guide for Smokeview Version 5: A Tool for Visualizing Fire Dynamics Simulation Data, NIST Special Publication 1017-1. Washington: U.S. Government Printing Office, 2008. 142 p.

УДК 621.382: 535.376

Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии

Нисс В.С.¹, Васьков О.С.¹, Турцевич А.С.², Керенцев А.Ф.², Кононенко В.К.³

¹Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013, г. Минск, Беларусь

²ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. И.П. Казинца, 121А, 220108, г. Минск, Беларусь

³Белорусский государственный университет,
ул. Курчатова, 5, 220064, г. Минск, Беларусь

Поступила 24.11.2014

Принята к печати 07.09.2015

Температурный режим работы электронной аппаратуры определяет надежность и стабильность оборудования. Это приводит к необходимости детального теплового анализа полупроводниковых приборов. Цель работы – оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов в пластмассовых корпусах ТО-252 и ТО-126 методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии. Тепловые постоянные элементов приборов и распределение структуры теплового сопротивления определены в виде дискретного и непрерывного спектров с использованием ранее разработанного релаксационного импеданс-спектрометра. Непрерывный спектр рассчитан на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, дискретный – модели Кауера. Структура теплового сопротивления образцов представлялась в виде шестизвенной электротепловой RC-модели. Анализ растекания теплового потока в исследуемых структурах проводился на основе концепции температуропроводности. Для транзисторных структур определены площадь и распределение сечения теплового потока. На основе проведенных измерений оценены тепловые параметры мощных биполярных транзисторов, в частности, структура их теплового сопротивления. Для всех измеренных образцов выявлено, что тепловое сопротивление слоя посадки кристалла вносит определяющий вклад во внутреннее тепловое сопротивление транзисторов. В переходном слое на границе полупроводник–припой тепловое сопротивление возрастает из-за изменения механизма теплопереноса. Наличие дефектов в этой области в виде отслоений припоя, пустот и трещин приводит к дополнительному росту теплового сопротивления в результате уменьшения активной площади переходного слоя. Метод тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии позволяет эффективно контролировать распределение тепловых потоков в мощных полупроводниковых приборах, что необходимо для совершенствования конструкции, повышения качества посадки кристаллов изделий силовой электроники с целью снижения их перегрева.

Ключевые слова: биполярный транзистор, тепловое сопротивление, сечение теплового потока, качество посадки, дефект припоя.

Адрес для переписки:

Васьков О.С.

Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Беларусь
e-mail: etf@bntu.by

Address for correspondence:

Vaskou A.S.

Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013 Minsk, Belarus
e-mail: etf@bntu.by

Для цитирования:

Нисс В.С., Васьков О.С., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К.
Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов
методом тепловой релаксационной дифференциальной
спектроскопии
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256

For citation:

Niss V.S., Vaskou A.S., Turtsevich A.S., Kerentsev A.F., Kononenko V.K.
Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors
by the method of thermal relaxation differential spectrometry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 249–256

Введение

Температурный режим работы электронной аппаратуры определяет надежность и стабильность оборудования, так как перегрев кристалла полупроводниковых приборов приводит к быстрой деградации их характеристик и резкому снижению времени работы или их отказу. Эффективный отвод тепла из активной области мощных полупроводниковых приборов при непрерывном росте плотности монтажа таких изделий и существующем уровне технологии посадки кристаллов на теплоотводящее основание является сложной задачей. Это обуславливает необходимость контроля и детального анализа тепловых потоков в силовых полупроводниковых приборах, что позволяет получать информацию о структуре внутреннего теплового сопротивления контролируемого изделия, т.е. о тех участках и элементах внутренней конструкции, которые вносят наибольший вклад в его полное тепловое сопротивление.

Доминирующие позиции на рынке оборудования для анализа структуры теплового сопротивления полупроводниковых приборов занимает компания *MicRed* международного консорциума *Mentor Graphics Corporation (US)* с тепловым тестером (*Thermal transient tester*) *T3Ster*. Метод дифференциальных структурных функций, применяемый *T3Ster* для анализа сложных электротепловых цепей, признан стандартом для таких измерений. Оборудование *T3Ster* внедрено на большинстве крупнейших предприятий производителей изделий полупроводниковой электроники и используется, в частности, для оценки тепловых параметров мощных светодиодов, силовых МОП-транзисторов [1].

Метод, разработанный *MicRed*, основывается на рассчитываемых из временной релаксации динамического теплового импеданса измеряемых образцов так называемых кумулятивной и дифференциальной структурных функций. Затем из их анализа определяются эквивалентные электротепловые модели, которые, как считают разработчики *T3Ster*, соответствуют реальной физической структуре теплового сопротивления измеряемого объекта. Данный метод основан на сложных многоступенчатых преобразованиях, что приводит к накоплению систематических ошибок и, как следствие, потере точности. Основные недостатки данного метода отмечались, к примеру, в работах фирмы *IBM* [2]. Другой недостаток оборудования *T3Ster* – высокая стоимость, составляющая порядка 150 000 \$ USA за один комплект.

Цель работы – оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов в пластмассовых корпусах TO-252 и TO-126 методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии (ТРДС). Это позволит повысить качество и надежность транзисторов, снизить затраты при их производстве и испытании.

Методика измерений

Измерения теплового сопротивления транзисторов обычно основаны на контроле термозависимого параметра, в качестве которого могут быть использованы прямое напряжение перехода эмиттер–база, прямое напряжение перехода защитного диода, сопротивление открытого канала, напряжение затвор–исток. Тепловые постоянные элементов приборов и распределение структуры теплового сопротивления определены в виде дискретного и непрерывного спектров с использованием релаксационного импеданс-спектрометра [3].

Детальные исследования тепловых характеристик полупроводниковых приборов проведены методом ТРДС, хорошо зарекомендовавшим себя при анализе тепловых параметров внутренних элементов гетеролазеров, светодиодов и транзисторов [4–7]. Релаксация прямого напряжения на диоде измеряется при подаче на исследуемый образец ступенчатого импульса тока длительностью в интервале от 10 мкс до 100 с. С учетом предварительно полученного температурного коэффициента напряжения (K -фактора) находится температура перегрева активной области прибора. Регистрация изменений напряжения осуществляется с временным разрешением 2 мкс. При этом максимальное количество точек регистратора достигает 250 000.

Из временной зависимости температуры перехода при нагреве прямым током находятся дискретный и дифференциальный спектры теплового сопротивления R_{th} прибора, значения тепловой емкости C_{th} и постоянной времени тепловой релаксации τ . Для уточнения величины полного теплового сопротивления R_{jc} использован также метод структурных функций согласно стандарту *JESD51-14* [8].

Из анализа временной зависимости температуры активной области транзистора находится внутреннее тепловое сопротивление прибора и его структура в виде дискретного и непрерывного (дифференциального) спектра (зависимости от времени тепловой релаксации).

Анализ растекания теплового потока в исследуемых структурах проводился на основе концепции температуропроводности (тепловой эффузии). Из послойных значений компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} определена активная площадь сечения теплового потока S_a транзисторных структур и профиль ее распределения [6, 7].

Структура теплового сопротивления образцов представлялась в виде шестизвенной электротепловой RC -модели. Дифференциальный спектр определяется на основе производных высшего порядка динамического теплового импеданса и соответствует модели Фостера, а дискретный – модели Кауэра. Два вида спектров (непрерывной и дискретный) теплового сопротивления используются для анализа и уточнения компонентов теплового сопротивления в рамках электротепловой модели Фостера [9] и более точной и адекватной модели Кауэра [10].

Релаксационный метод основан на анализе переходных электрических процессов, связанных

с разогревом полупроводникового прибора проходящим через него током. Временные зависимости изменения напряжения на p - n -переходе, которые дают возможность анализа путей прохождения теплового потока по элементам структуры, получают при помощи импеданс-спектрометра, схема которого показана на рисунке 1.

При помощи релаксационного спектрометра теплового сопротивления определяются следующие параметры: временная зависимость температуры активной области полупроводниковых приборов при различных значениях прямого тока; внутреннее тепловое сопротивление прибора и его структура в виде дифференциального и дискретного спектров на временной области; параметры тепловых RC -цепей для схемы Фостера; параметры тепловых RC -цепей для схемы Кауэра.

Релаксационный импеданс-спектрометр может быть использован для измерений и анализа электрических и тепловых параметров светодиодов и полупроводниковых лазеров, полевых и би-

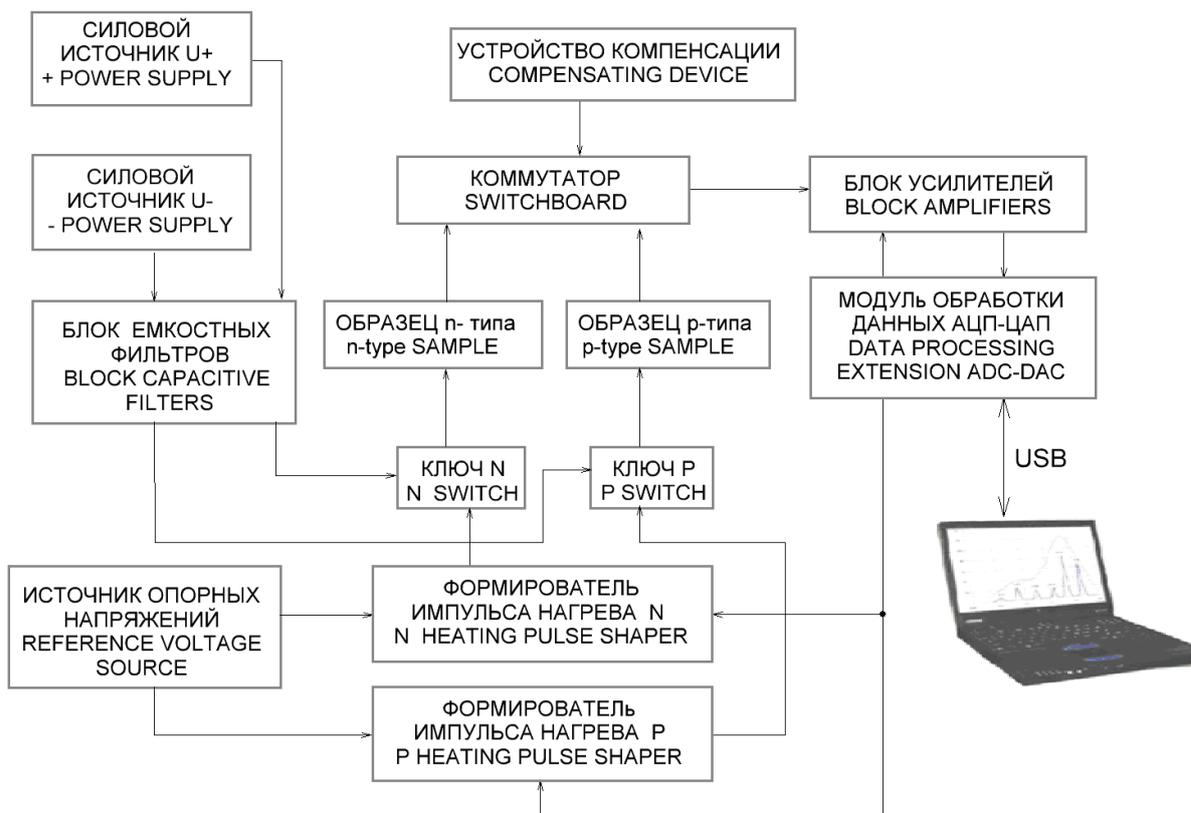


Рисунок 1 – Схема релаксационного импеданс-спектрометра для измерений и анализа электротепловых процессов в полупроводниковых приборах

Figure 1 – Diagram of relaxation impedance-spectrometer for measurements and analysis of electro thermal processes in semiconductor devices

полярных транзисторов, полупроводниковых диодов и структур на их основе.

Основу импеданс-спектрометра составляет 16-разрядный АЦП. На полупроводниковый прибор подаются импульсы тока в виде ступенек. В каждый момент времени из изменения напряжения на $p-n$ -переходе с использованием K -фактора рассчитывается температура перегрева активной области прибора. Величина K -фактора представляет собой изменение напряжения на переходе при изменении температуры на 1 К при фиксированном токе. Значения K -фактора получаются на основе анализа импульсных вольтамперных характеристик (ВАХ), при которых не допускается разогрев образца собственным током, для температурного интервала 20–85 °С. Импульсные ВАХ измеряются с использованием импульсов напряжения прямоугольной формы длительностью от 1 до 100 мкс с частотой следования 1 кГц.

Тепловые параметры транзисторов

Спектры ТРДС получены при естественном охлаждении измеряемых транзисторов в воздушном пространстве. Параметры транзисторов разных производителей приведены в таблице. Здесь геометрическая площадь кристаллов транзисторов $S_{кр}$ определена при их вскрытии, а внутреннее тепловое сопротивление (переход – корпус) приборов R_{jc} и активная площадь теплового потока S_a определяются оригинальным методом ТРДС.

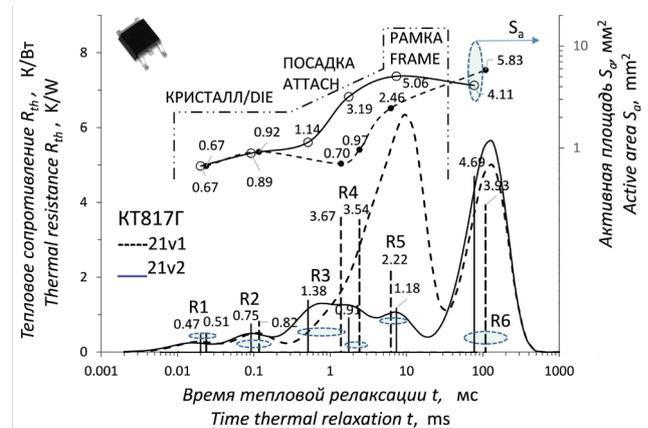
Таблица / Table

Параметры транзисторов разных производителей (R_{jc} – тепловое сопротивление переход-корпус, S_a – активная площадь сечения теплового потока, $S_{кр}$ – площадь кристалла)

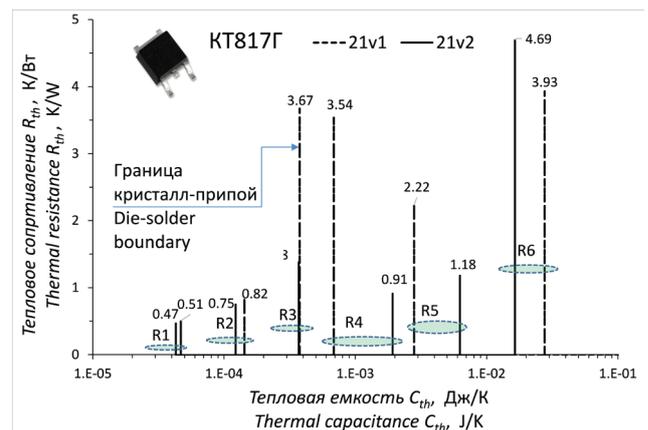
Parameters of transistors of different manufacturers (R_{jc} – thermal resistance junction-case, S_a – active square of thermal flow cross-section, $S_{кр}$ – square crystal)

Наименование Name	Тип Type	Корпус Case	R_{jc} К/Вт K/W	S_a мм ² mm ²	$S_{кр}$ мм ² mm ²
MJD44H11	n-p-n	TO252	2,7	2,35	4,20
KT817Г			4,6	1,03	2,25
2N5191		TO126	5,5	0,81	1,96
KT817А			10,4	0,64	2,25

Спектры ТРДС и сравнение транзисторов KT817Г (корпус TO252), изготовленных с разным качеством монтажа кристаллов, представлены на рисунке 2. Корпус TO-252 ограничивает рассеиваемую мощность $P < 3$ Вт при допустимой температуре перегрева кристаллов 150 °С [11].



a



b

Рисунок 2 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления $R_{th}(t)$ и профиль эффективной площади S_a транзисторов KT817Г 21v1 и 21v2 в корпусе TO-252 с разным качеством посадки кристаллов (a); соотношения компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} (b)

Figure 2 – Differential (continuous) and discrete (vertical lines) spectra of the thermal resistance $R_{th}(t)$ and the profile of the effective area S_a of the transistors KT817G 21v1 and 21v2 in a frame TO-252 with different planting quality of crystals (a); ratio of components of the thermal resistance R_{th} and thermal capacity C_{th} (b)

На рисунке 3 представлены спектры ТРДС транзисторов KT817А (корпус TO126), показана связь послыоного теплового сопротивления R_{th} с

последней тепловой емкостью C_{th} транзисторов и изменение площади сечения S_a при распространении теплового потока.

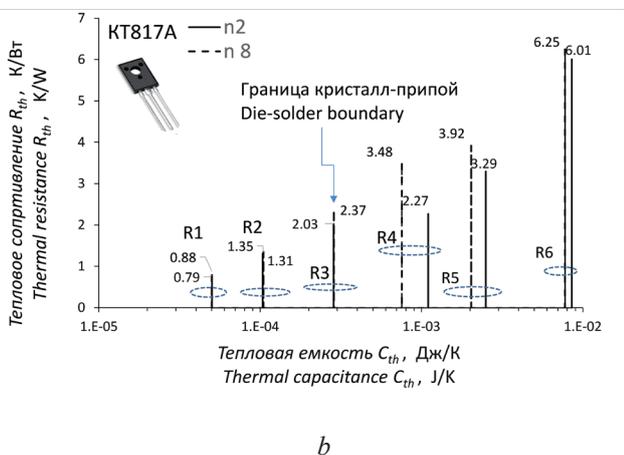
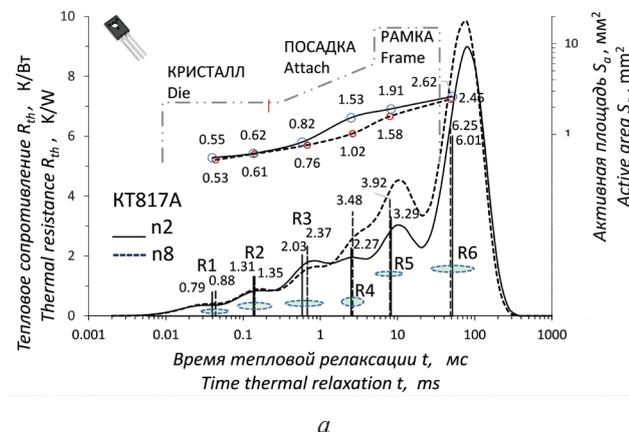


Рисунок 3 – Дифференциальный (непрерывный) и дискретный (вертикальные линии) спектры теплового сопротивления $R_{th}(t)$ и профиль площади $S_a(t)$ транзисторов KT817A n2 и n8 в корпусе TO-126 с разным качеством посадки кристаллов (a); соотношение компонентов теплового сопротивления R_{th} и тепловой емкости C_{th} (b)

Figure 3 – Differential (continuous) and discrete (vertical lines) spectra of the thermal resistance $R_{th}(t)$ and square profile $S_a(t)$ of transistors KT817A n2 and n8 in a frame TO-126 with different planting quality of crystals (a); ratio of components of the thermal resistance R_{th} and thermal capacity C_{th} (b)

Дискретные спектры шестого порядка соответствуют участкам с переходным тепловым сопротивлением от кристалла транзистора к корпусу и обозначены R1–R6. Участки, обозначенные R1, R2, идентифицируются как область кристалла; R3–R5 – припой и рамка выводная; R6 – начальная часть переходного сопротивления корпус–внешняя среда.

Обсуждение результатов

В переходном слое на границе полупроводник–припой тепловое сопротивление возрастает из-за изменения механизма теплопереноса. Наличие дефектов в этой области в виде отслоения припоя, пустот и трещин приводит к дополнительному росту теплового сопротивления в результате уменьшения активной площади переходного слоя.

В то же время тепловая емкость этого слоя существенно не изменяется, так как емкость переходного субмикронного слоя мала и при измерениях суммируется с емкостью кристалла. Этому критерию соответствует пик R3 на рисунках 2b и 3b, что позволяет связать его с границей кристалл–припой.

Пик R6 соответствует области резкого возрастания теплового сопротивления у всех образцов, что позволяет идентифицировать его как переходной слой корпус прибора–окружающая среда (воздух).

Спектры транзисторов 21v1 и 21v2 типа KT817Г (рисунок 1) различаются наибольшим разбросом теплового сопротивления в диапазоне R3–R4, в области границы кристалл припой и в слое припоя. Транзисторы типа 2N5192 и MJD44H11 (на рисунке не представлены) имеют качественно сходные спектры с KT817Г, а величина внутреннего теплового сопротивления в них коррелирует с размерами кристалла (таблица). В транзисторах KT817A n2 и n3 на рисунке 3 наблюдаются существенные изменения R_{th} в диапазоне значений R4–R5, что возможно свидетельствует о наличии объемных дефектов (пустот и полостей) в зоне посадки кристалла прибора.

Заключение

Проведена оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов, в частности структуры их теплового сопротивления, методом тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии. Установлено следующее.

Метод тепловой релаксационной дифференциальной спектроскопии позволяет эффективно контролировать распределение тепловых потоков в мощных полупроводниковых приборах, что необходимо для совершенствования конструкции, повышения качества посадки кристаллов изделий силовой электроники с целью снижения их перегрева.

У всех измеренных образцов тепловое сопротивление слоя посадки кристалла (R3–R4) вносит определяющий вклад во внутреннее тепловое сопротивление транзисторов.

Транзисторы КТ817Г имеют уровень теплового сопротивления переход–корпус в пределах 4,6 К/Вт.

Для образцов КТ817А уровень теплового сопротивления переход–корпус существенно выше и составляет 10,2 К/Вт.

Список использованных источников

1. *Farkas, G.* Thermal investigation of high power optical devices by transient testing / G. Farkas [et al.] // *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on.* – 2005. – Vol. 28, No. 1. – P. 45–50.

2. *Smith, B.* Utility of transient testing to characterize thermal interface materials / B. Smith [et al.] // *EDA Publishing THERMINIC.* – 2007. – P. 6–11.

3. *Бумай, Ю.А.* Релаксационный импеданс-спектрометр тепловых процессов / Ю.А. Бумай [и др.] // *Электроника инфо.* – 2010. – № 3. – С. 58–59.

4. *Bumai, Yu.A.* Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes / Yu.A. Bumai, A.S. Vaskou,

V.K. Kononenko // *Metrology and Measurement Systems.* – 2010. – Vol. 17, No. 1. – P. 39–46.

5. *Васьков, О.С.* Метод тепловой релаксационной спектроскопии и определение параметров светодиодов / О.С. Васьков, В.К. Кононенко, В.С. Нисс // *Докл. БГУИР.* 2011. – № 4. – С. 74–79.

6. *Турцевич, А.С.* Исследование качества пайки кристаллов мощных транзисторов релаксационным импеданс-спектрометром / А.С. Турцевич [и др.] // *Технология и конструирование в электронной аппаратуре.* – 2012. – № 5. – С. 44–47.

7. *Васьков, О.С.* Диагностика технологических характеристик мощных транзисторов с помощью релаксационного импеданс-спектрометра тепловых процессов / О.С. Васьков [и др.] // *Изв. вузов. Материалы электронной техники.* – 2014. – № 1. – С. 47–52.

8. *Pape, H.* Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance / H. Pape [et al.] // *Microelectron. Reliability.* 2012. – Vol. 52, No. 7. – P. 1272–1278.

9. *Foster, R.M.* A reactance theorem / R.M. Foster // *Bell Syst. Tech. J.* 1924. – Vol. 3. м P. 259–267.

10. *Cauer, W.* Die siebschaltungen der fermmeldetechnik / W. Cauer // *Math. und Mechanik / Angew Z.* – 1930. – Vol. 10, No. 5. – P. 425–433.

11. *Gulino, R.* Guidelines for using ST's MOSFET SMD packages / R. Gulino // *Application Note AN1703.* STMicroelectronics. – 2003. – P. 1/22–22/22.

Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors by the method of thermal relaxation differential spectrometry

Niss V.S.¹, Vaskou A.S.¹, Turtsevich A.S.², Kerentsev A.F.², Kononenko V.K.³

¹Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013, Minsk, Belarus

²JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company,
str. I.P. Kazintsa, 121A, 220108, Minsk, Belarus

³Belarusian State University,
str. Kurhatova, 5, 220064, Minsk, Belarus

Received 24.11.2014

Accepted for publication 07.09.2015

Abstract. Thermal performance of electronic devices determines the stability and reliability of the equipment. This leads to the need for a detailed thermal analysis of semiconductor devices. The goal of the work is evaluation of thermal parameters of high-power bipolar transistors in plastic packages TO-252 and TO-126 by a method of thermal relaxation differential spectrometry. Thermal constants of device elements and distribution structure of thermal resistance defined as discrete and continuous spectra using previously developed relaxation impedance spectrometer. Continuous spectrum, based on higher-order derivatives of the dynamic thermal impedance, follows the model of Foster, and discrete to model of Cauer. The structure of sample thermal resistance is presented in the form of six-chain electro-thermal RC model. Analysis of the heat flow spreading in the studied structures is carried out on the basis of the concept of thermal diffusivity. For transistor structures the area and distribution of the heat flow cross-section are determined. On the basis of the measurements the thermal parameters of high-power bipolar transistors is evaluated, in particular, the structure of their thermal resistance. For all of the measured samples is obtained that the thermal resistance of the layer planting crystal makes a defining contribution to the internal thermal resistance of transistors. In the transition layer at the border of semiconductor-solder the thermal resistance increases due to changes in the mechanism of heat transfer. Defects in this area in the form of delamination of solder, voids and cracks lead to additional growth of thermal resistance caused by the reduction of the active square of the transition layer. Method of thermal relaxation differential spectrometry allows effectively control the distribution of heat flow in high-power semiconductor devices, which is important for improving the design, improve the quality of landing crystals of power electronics products to reduce overheating.

Keywords: bipolar transistor, thermal resistance, heat flow cross-section, die attachment quality, solder defect.

Адрес для переписки:

Васьков О.С.
Белорусский национальный технический университет,
пр. Независимости, 65, 220013 г. Минск, Республика Беларусь
e-mail: etf@bntu.by

Address for correspondence:

Vaskou A.S.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave, 65, 220013 Minsk, The Republic of Belarus
e-mail: etf@bntu.by

Для цитирования:

Нисс В.С., Васьков О.С., Турцевич А.С., Керенцев А.Ф., Кононенко В.К.
Оценка тепловых параметров мощных биполярных транзисторов
методом тепловой релаксационной дифференциальной
спектрометрии
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 249–256

For citation:

Niss V.S., Vaskou A.S., Turtsevich A.S., Kerentsev A.F., Kononenko V.K.
Estimation of thermal parameters of power bipolar transistors
by the method of thermal relaxation differential spectrometry
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 249–256

References

1. Farkas G., van Voorst Vader Q., Poppe A., Bog-nar G. Thermal investigation of high power optical devices by transient testing. *Components and Packaging Technologies, IEEE Transactions on*, 2005, vol. 28, no. 1, pp. 45–50.
2. Smith B., Brunschwiler T., Michel B. Utility of transient testing to characterize thermal interface materials. *EDA Publishing THERMINIC 2007*, Budapest, 2007, pp. 6–11.
3. Bumai Yu.A., Vas'kov O.S., Kononenko V.K., Loma-ko V.M. Relaxation impedance spectrometer of thermal processes. *Elektronika info*, 2010, no. 3, pp. 58–59 (in Russian).
4. Bumai Yu.A., Vaskou A.S., Kononenko V.K. Measurement and analysis of thermal parameters and efficiency of laser heterostructures and light-emitting diodes. *Metrology and Measurement Systems*, 2010, vol. 17, no. 1, pp. 39–46.
5. Vaskou A.S., Kononenko V.K., Niss V.S. Thermal relaxation spectrometry method and determining the parameters of light-emitting diodes. *Dokl. BGUIR*, 2011, no. 4, pp. 74–79 (in Russian).
6. Turtsevich A.S., Rubtsevich I.I., Solov'yov Ya.A., Vas'kov O.S., Kononenko V.K., Niss V.S., Kerentsev A.F. The investigation of quality of power-transistor crystals soldering by a transient impedance-spectrometer. *Technology and Designing in Electronic Equipment*, 2012, no. 5, pp. 44–47 (in Russian).
7. Vaskou A.S., Niss V.S., Kononenko V.K., Turtsev-ich A.S., Rubtsevich I.I., Solov'ev Ya.A., Kerentsev A.F. Diagnostics of technological characteristics of high-power transistors using relaxing impedance spectrometry of thermal processes. *Izv. Vuz. Materials Electron. Techn.*, 2014, vol. 17, no. 1, pp. 47–52 (in Russian).
8. Pape H., Schweitzer D., Chen L., Kutscherauer R., Walder M. Development of a standard for transient measurement of junction-to-case thermal resistance. *Microelec-tron. Reliability*, 2012, vol. 52, no. 7, pp. 1272–1278.
9. Foster R.M. A reactance theorem. *Bell Syst. Tech. J.* 1924, vol. 3, pp. 259–267.
10. Cauer W. Die siebschaltungen der fermmeldetechnik. *Z. Angew. Math. und Mechanik*, 1930, vol. 10, no. 5, pp. 425–433.
11. Gulino R. Guidelines for using ST's MOSFET SMD packages. *Application Note AN1703. STMicroelec-tronics*, 2003, pp. 1/22–22/22.

УДК 53.088.23

Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа

Мачехин Ю.П., Курской Ю.С.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, Харьков, Украина

Поступила 06.07.2015

Принята к печати 03.11.2015

В статье рассмотрен вопрос измерения динамических переменных открытых нелинейных динамических систем. К нелинейным динамическим системам можно отнести большинство из реальных систем окружающего мира физического и биологического происхождения. В таких системах вследствие диссипации образуются пространственные, временные и пространственно-временные структуры, возможны коллективные эффекты, связанные с процессами самоорганизации и эволюции. Целью работы являлось составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем. Для решения этой задачи предложено использовать методы интервальной математики. Показано, что измерение и анализ результатов измерения величин со сложным хаотичным поведением находятся за рамками классических метрологических подходов, отображенных в нормативных документах, таких как *GUM*. Это обусловлено несоответствием используемых математических и физических подходов процессам, протекающим в реальных динамических системах. Для измерения характеристик нелинейных динамических систем разработаны специальные модели измерения и анализа результатов измерений, основанные на теории открытых систем, теории динамического хаоса и теории информации. В качестве инструментов оценки состояния систем предлагается использовать фрактальные, временные и энтропийные шкалы. В результате исследования получены уравнения измерения энтропии Шеннона отдельной динамической переменной и всей нелинейной динамической системы на основе интервальных представлений результатов измерения. Уравнения, составленные таким образом, содержат точные решения и дают возможность полного учета неопределенностей. Полученные результаты дополняют предложенные ранее модели измерения и анализа результатов измерения динамических переменных нелинейных динамических систем.

Ключевые слова: нелинейная динамическая система, уравнение измерения, интервальные величины, энтропия Шеннона.

Адрес для переписки:

Курской Ю.С.

Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, Харьков, Украина
e-mail: kurskoy@rambler.ru

Address for correspondence:

Kurskoy Yu.S.

Kharkov National University of Radioelectronics,
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine
e-mail: kurskoy@rambler.ru

Для цитирования:

Мачехин Ю.П., Курской Ю.С.

Составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 257–263

For citation:

Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S.

The compilation of Shannon entropy measurement equation for nonlinear dynamic systems using the interval analysis methods
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 257–263

Введение

Общепризнанным методом выражения и оценки неопределенности измерений является метод, предлагаемый Руководством по выражению неопределенности измерения (*GUM*) [1]. В случае, когда его применение невозможно, рекомендуется использовать метод Монте-Карло, изложенный в дополнении к *GUM* [2]. Оба метода подтвердили свою эффективность при измерениях в линейных или линеаризованных системах. Трудности возникают при измерениях в нелинейных динамических системах (НДС).

Физический и математический аппараты, положенные в основу методов [1, 2], не всегда адекватны процессам, протекающим в открытых НДС со сложным, например хаотичным, характером поведения. В таких системах вследствие диссипации образуются пространственные, временные и пространственно-временные структуры, возможны коллективные эффекты, связанные с процессами самоорганизации и эволюции. К НДС можно отнести большинство из реальных систем окружающего мира — живые организмы и экосистемы, вихри в атмосфере и океане, лазеры и др. [3, 4].

Задачи измерения в НДС являются новыми и сложными метрологическими задачами, которые можно выделить в отдельное новое направление — «нелинейная метрология». Подходы и методы, разрабатываемые для измерения в таких системах, сегодня востребованы в физике, инженерии, медицине, экономике, биологии [5]. В этом направлении разработаны модели измерения [6] и анализа результатов измерений характеристик НДС [7], основанные на теории открытых систем, теории динамического хаоса и теории информации. В качестве инструментов оценки состояния НДС предлагается использовать фрактальные, временные и энтропийные шкалы [8, 9].

Целью работы являлось составление уравнения измерения энтропии Шеннона нелинейных динамических систем с использованием методов интервального анализа. Для достижения цели выполнен анализ возможностей классических методов выражения и оценки неопределенности измерений, а также подходов к составлению уравнений измерения, изложенных в *GUM* [1] и дополнении [2].

Условия составления уравнения измерения

В большинстве случаев на практике имеют дело с косвенными измерениями. Поэтому состав-

ление уравнения измерения является ключевым этапом процедуры оценки неопределенности. При этом для определения искомой величины Y необходимо измерить значения N входных величин X_i , связанных с Y функциональной зависимостью:

$$Y = f(X_1, \dots, X_N). \quad (1)$$

Входные величины X_i при этом могут быть функциями других величин. В случае временных зависимостей имеют дело с измерением динамических переменных (ДП) $X_i(t)$ и уравнение измерения (1) принимает вид:

$$Y(t) = f[X_1(t), \dots, X_N(t)].$$

Уравнение измерения, наряду с входными величинами, должно содержать константы, а также величины, влияющие на их значения. При этом входные величины могут иметь как линейную, так и нелинейную зависимость от времени:

$$F[X_1(t_0), \dots, X_N(t_0)] \rightarrow [X_1(t_i), \dots, X_N(t_i)],$$

где X_i — значение X_i в начальный момент времени t_0 ; $X_i(t_i)$ — значение X_i в момент времени t_i ; F — временная зависимость ДП.

Определение временной зависимости F является стандартной задачей динамических измерений [10]. Знание $X_i(t)$ позволяет прогнозировать значения $X_i(t)$ в любой момент времени. Исходя из этого, уравнение измерения (1) можно представить в виде:

$$Y(t) = f\{F[X_1(t_0), \dots, X_N(t_0)], t\}. \quad (2)$$

В руководстве [1] очерчены рамки применения *GUM*. Предполагается, что согласно уравнению (1) существует способ определения Y по результатам измерения входных величин X_i и полученное при этом значение Y — единственное. При этом в случае НДС результат определения — может характеризоваться рядом значений, заполняющих сложным образом интервал значений $Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$.

Входные величины X_i в *GUM* ассоциируются со случайными величинами. Допускается, что они (все или часть из них) могут быть связаны между собой, однако *GUM* рассматривает преимущественно независимые случайные величины. Для описания связанных величин руководство допускает использование совместных распределений. Считается, что результаты многократных измерений входных величин описываются распределением Гаусса при оценке неопределенности по типу *A* и прямоугольным распределением при оценке неопределенности по типу *B* [1].

При этом входные величины X_i НДС не всегда могут быть представлены случайными величинами. Как правило, они представляют собой немарковские величины, связаны между собой и подвержены влиянию извне даже слабых флуктуаций. Динамика ДП НДС имеет сложный характер, поэтому априори утверждать, что входные величины и результат измерения имеют гауссово или прямоугольное распределение нельзя. Ключевой элемент классической теории измерения – эргодическая гипотеза – в случае НДС с хаотичным поведением не подтверждается [11].

Когда применение *GUM* дает некорректные результаты измерения, например, вследствие сложности уравнения измерения (1), для оценки неопределенности предлагается использовать метод Монте-Карло, изложенный в приложении к *GUM* [2]. Метод рекомендуется использовать, когда линеаризация уравнения измерения (1) не обеспечивает адекватного представления о процессе, а распределение выходной величины не может быть описано нормальным распределением или масштабированным смещенным t -распределением. Преимущество данного метода заключается в том, что предлагаемая трансформация распределений входных величин позволяет всегда получить распределение вероятностей выходной величины на основе распределений входных величин.

Метод Монте-Карло применим для выражения неопределенности измерения хорошо определенной физической величины, характеризуемой единственным значением. Он всегда дает корректные результаты в случае линейного уравнения измерения. Функция измерения $f(X_1, X_2, \dots, X_N)$ должна иметь непрерывную производную по компонентам входных величин X_i в окрестностях оценок x_i . Функция распределения для выходной величины Y непрерывна и строго возрастающая. Плотность распределения вероятностей Y имеет единственный максимум и др. При этом в случае измерений в сложных динамических системах измеряемая величина ведет себя нелинейным образом, не может быть определена единственным значением, а плотность распределения имеет больше одного максимума.

Таким образом, сопоставление возможностей *GUM* [1] и метода Монте-Карло [2] со свойствами реальных НДС приводит к выводу о необходимости создания специальных подходов к измерению в таких системах и выборе адекватного математического аппарата и составлению уравнения измерения.

О необходимости индивидуального подхода к неординарным метрологическим задачам говорят сами составители *GUM*, декларируя, что оценку неопределенности не следует рассматривать как стандартную задачу, требующую применения типовых математических процедур. Успех решения этой задачи зависит от понимания физики и критического анализа протекающих процессов [1].

Для составления уравнения измерения ДП НДС необходимо учитывать следующие условия. Результат измерения Y характеризуется рядом значений, заполняющих сложным образом интервал значений $Y_{min} \leq Y \leq Y_{max}$. Значения каждой из N входных величин X_i находятся в интервалах $X_i^{min} \leq X_i \leq X_i^{max}$. Закон распределения входных величин в рамках интервала неизвестен. Таким образом, как результат измерения, так и входные величины представляют собой интервальные величины с неизвестным законом распределения.

Применение методов интервальной математики

В качестве математического аппарата для составления уравнения измерения и анализа результатов измерения ДП НДС предлагается использовать методы интервальной математики [12]. Такой выбор обусловлен интервальным характером значений ДП реальных НДС.

Основная идея интервального анализа заключается в замене арифметических операций и вещественных функциональных преобразований вещественных чисел интервальными операциями и функциями, преобразующими интервалы, содержащие эти числа. Ценность интервальных решений заключается в том, что они содержат точные решения исходных задач, дают возможность полного учета неопределенностей начиная с неточных данных уравнения измерения и заканчивая ошибками округления [11].

При изучении НДС сталкиваются как с прямыми измерениями при измерении ДП, так и с косвенными при измерении общих характеристик системы. К примеру, если объектом изучения является организм человека, то прямыми измерениями можно оценить такие характеристики, как частота пульса, артериальное давление, температура тела и прочие [8]. Измерение времени возвращения возбужденной ДП в равновесное состояние, как и измерение информационной энтропии, выполняется косвенно и требует составления уравнения измерения вида (2).

Рассмотрим уравнение измерения информационной энтропии сложной системы. Информационная энтропия, или энтропия Шеннона, H является функцией состояния системы и описывается выражением вида:

$$H = -\sum_i p(x_i) \ln p(x_i), \quad (3)$$

где $p = p(x_i)$ – плотность распределения вероятности величины x_i ; X – оценка значения ДП X_i .

В случае измерения постоянной физической величины X энтропия характеризует качество измерительного эксперимента, при этом закон распределения считается нормальным. При измерении ДП энтропия содержит информацию и о качестве измерения и об ее распределении. Наибольшей трудностью при определении энтропии НДС является определение закона распределения $p(x_i)$ изучаемой величины. Для решения этой задачи предлагается использовать подходы интервального анализа, а именно гистограммную арифметику [9].

Если НДС характеризуется набором из N ДП X_p , то в результате измерений и оценки результатов измерения ДП будут получены N интервалов значений $[x_i^{min}, x_i^{max}]$, где $[x_i^{min}, x_i^{max}]$ представляет собой интервал оценок значений $[X_i^{min}, X_i^{max}]$. Значения x_i заполняют интервал $[x_i^{min}, x_i^{max}]$ неравномерно, сложным образом, отличным от классических законов распределения.

Согласно положениям интервальной математики плотность распределения интервальных значений x_i может быть задано кусочно-постоянной функцией x_p , результаты измерений x_i образуют интервалы постоянных значений функции $p(x_i)$. Такие случайные величины называются гистограммными числами или гистограммами. Требуется определить функцию плотности вероятности p_x величины x_i с заданной точностью в классе кусочно-постоянных функций – гистограмм. Использование гистограммного выражения ДП позволяет определить наиболее вероятные участки попадания неизвестных X_i .

Интервал значений $x_i [x_i^{min}, x_i^{max}]$ разобьем на K частей размером d_i^k , $k = 1, \dots, K$. Разбиение выполняется таким образом, чтобы интервальные значения d_k и d_{k+1} считались не связанными между собой. Тогда плотность вероятности попадания X_i в интервал $[d_k, d_{k+1}]$ определяется выражением:

$$p_{Xki} = \frac{2}{d_{k+1} - d_k} \int_{d_k}^{d_{k+1}} p(x_i) dx. \quad (4)$$

Совокупность из K значений, полученных согласно (4), представляет собой гистограмму плотностей вероятностей разной протяженности по оси значений X_i .

Для определения плотности вероятности на интервалах d_k воспользуемся рекомендацией дополнения к GUM [2] о том, что при отсутствии дополнительной информации о величине, в соответствии с принципом максимума энтропии [12] случайная величина может быть описана криволинейно-трапецеидальным распределением. Если значения d_k и d_{k+1} известны с точностью до интервалов $(a \pm d)$ и $(b \pm d)$ соответственно, выражение для криволинейно-трапецеидального распределения примет вид:

$$p(x) = \frac{1}{4d} \max \left(\ln \frac{w+d}{\max(|x-h|, w-d)}, 0 \right), \quad (5)$$

где $h = (a \pm b)/2$; $w = (b - a)/2$.

Из выражений (3)–(5) можно найти вклад в значение энтропии отдельной ДП X_i :

$$H(X_i) = -p_{Xki} \ln p_{Xki}. \quad (6)$$

Если ДП системы не связаны между собой, выполняется принцип аддитивности энтропии

всей системы $H = \sum_i^N H(X_i)$, иначе должна быть

определена совместная плотность распределения результатов измерения и введено понятие условной энтропии системы.

Полученные уравнения измерения энтропии Шеннона (3)–(6) содержат точные решения исходных задач и дают возможность полного учета неопределенностей, включая неточные исходные данные.

Заключение

В работе получила развитие задача создания теоретических основ измерений характеристик нелинейных динамических систем.

Показано, что измерение величин со сложным поведением находится за рамками классических метрологических методов, закрепленных в нормативных документах, таких как GUM и приложения к нему, использующему метод Монте-Карло. Это обусловлено несоответствием используемых математических и физических подходов процессам реальных динамических систем.

Предложено использовать методы интервальной математики для составления уравнения изме-

рения динамических переменных открытых нелинейных динамических систем.

Выбор обусловлен интервальным характером значений измеряемых динамических переменных. Ценность интервальных решений заключается в том, что они содержат точные решения исходных задач и дают возможность полного учета неопределенностей, включая неточные данные уравнения измерения.

Получены уравнения измерения энтропии Шеннона отдельной динамической переменной и всей нелинейной динамической системы на основе интервальных представлений результатов измерения.

Описанные результаты дополняют предложенные ранее модели измерения и анализа результатов измерения динамических переменных нелинейных динамических систем.

Список использованных источников

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 Uncertainty of measurement. – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement: стандарт / ISO, Женева, 27.08.2009.
2. ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl.1:2008/Cor.1:2009 Uncertainty of measurement. – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method – Technical Corrigendum 1: стандарт / ISO, Женева, 07.05.2009.
3. Шустер, Г. Детерминированный хаос: Введение / Г. Шустер ; пер. с нем. – М. : Мир, 1988. – 253 с.
4. Трубецков, Д.И. Введение в теорию самоорганизации открытых систем / Д.И. Трубецков, Е.С. Мчедлова, Л.В. Красичков. – М.: Физматлит, 2005. – 200 с.
5. Fisher, W.P. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital / W.P. Fisher // New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital: materials of 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement. – Annecy, France. – 2008. – P. 51–58.
6. Мачехин, Ю.П. Модель измерения параметров нелинейных динамических систем / Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // Системы обработки информации. – 2012. – № 1 (99). – С. 169–175.
7. Мачехин, Ю.П. Анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах / Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // Системы обработки информации. – 2012. – № 7 (105). – С. 117–122.
8. Мачехин, Ю.П. Фрактальная шкала для временных рядов результатов измерений / Ю.П. Мачехин // Измерительная техника. – 2008. – № 8. – С. 40–43;
9. Мачехин, Ю.П. Фрактально-энтропийный анализ результатов измерений в нелинейных динамических системах // Ю.П. Мачехин, Ю.С. Курской // Измерительная техника. – 2014. – № 6. – С. 18–21.
10. Грановский, В.А. Динамические измерения. Основы метрологического обеспечения / В.А. Грановский. – Л.: Энергоатомиздат. Ленинградское отделение, 1984. – 224 с.
11. Добронец, Б.С. Интервальная математика / Б.С. Добронец. – Красноярск : СФУ, 2007. – 216 с.
12. Шеннон, К. Работы по теории информации и кибернетике / К. Шеннон. – М. : ИИЛ, 1963. – 832 с.

The compilation of Shannon entropy measurement equation for nonlinear dynamic systems by using the interval analysis methods

Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S.

*Kharkov National University of Radioelectronics
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine*

Received 06.07.2015

Accepted for publication 03.11.2015

Abstract. The article considers the issue of measurement of dynamic variables of open nonlinear dynamical systems. Most of real physical and biological systems in the surrounding world are the nonlinear dynamic systems. The spatial, temporal and spatio-temporal structures are formed in such systems because of dissipation. The collective effects that associated with the processes of self-organization and evolution are possible there too. The objective of this research is a compilation of the Shannon entropy measurement equations for case of nonlinear dynamical systems. It's proposed to use the interval mathematics methods for this. It is shown that the measurement and measurement results analysis for variables with complex dynamics, as a rule, cannot be described by classical metrological approaches, that metrological documents, for example GUM, contain. The reason of this situation is the mismatch between the classical mathematical and physical approaches on the one hand and processes that occur in real dynamic systems on the other hand. For measurement of nonlinear dynamical systems variables the special measurement model and measurement results analysis model are created. They are based on Open systems theory, Dynamical chaos theory and Information theory. It's proposed to use the fractal, entropic and temporal scales as tools for evaluation of a systems state. As a result of research the Shannon entropy measurement equations, based on interval representations of measurement results. are created, like for an individual dynamic variable as for nonlinear dynamic system. It is shown that the measurement equations, based on interval mathematics methods, contains the exact solutions and allows take into account full uncertainty. The new results will complement the measurement model and the measurement results analysis model for case of nonlinear dynamic systems.

Keywords: nonlinear dynamic system, measurement equation, interval variables, Shannon entropy.

Адрес для переписки:

*Курской Ю.С.
Харьковский национальный университет радиоэлектроники,
пр. Ленина, 14, 61166, Харьков, Украина
e-mail: kurskoy@rambler.ru*

Address for correspondence:

*Kurskoy Yu.S.
Kharkov National University of Radioelectronics,
Lenin Ave., 14, 61166, Kharkov, Ukraine
e-mail: kurskoy@rambler.ru*

Для цитирования:

*Мачехин Ю.П., Курской Ю.С.
Составление уравнения измерения энтропии Шеннона
нелинейных динамических систем с использованием
методов интервального анализа
Приборы и методы измерений
2015. – Т. 6, № 2. – С. 257–263*

For citation:

*Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S.
The compilation of Shannon entropy measurement equation
for nonlinear dynamic systems using the interval analysis
methods
Devices and Methods of Measurements
2015, vol. 6, No. 2, pp. 257–263*

References

1. ISO/IEC Guide 98-1:2009 Uncertainty of measurement – Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement: standard / ISO, Geneva, 27.08.2009.
2. ISO/IEC Guide 98-3:2008/Suppl.1:2008/Cor.1:2009 Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995) – Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method – Technical Corrigendum 1: standard / ISO, Geneva, 07.05.2009.
3. Shuster H. Determinirovannyj haos, vvedeniye [Deterministic chaos An Introduction]. Moscow, Mir Publ., 1988, 253 p. (in Russian).
4. Trubeckov D.I., Mchedlova E.S., Krasavchikov L.V. Vvedeniye v teoriyu samoorganizatsii otkrytykh sistem [Introduction to the self-organization theory for open systems]. Moscow, Fizmatlit Publ., 2005, 200 p. (in Russian).
5. Fisher W.P. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital. New metrological horizons: invariant reference standards for instruments measuring human, social, and natural capital: materials of 12th IMEKO TC1 & TC7 Joint Symposium on Man Science & Measurement, Annecy, France, 2008, pp. 51–58.
6. Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S. [Model of measurement of nonlinear dynamic systems parameters]. Sistemy obrabotki informacii, 2012, no. 1 (99), pp.169–175 (in Russian).
7. Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S. [Analysis of measurements results in nonlinear dynamic systems]. Sistemy obrabotki informacii, 2012, no. 7 (105), pp. 117–122 (in Russian).
8. Machekhin Yu.P. Fractal scale for measurement time series. Measurement Techniques, 2009, vol. 52, no. 8, pp. 835–840.
9. Machekhin Yu.P., Kurskoy Yu.S. Fractal-entropy analysis of measurement results in nonlinear dynamical systems. Measurement Techniques, 2014, vol. 57, no. 6, pp. 609–614.
10. Granovckiy V.A. Dinamicheskiye izmereniya. Osnovy metrologicheskogo obespecheniya [Dynamic measurement. Fundamentals of metrological support], Leningrad, Energoatomizdat Publ., 1984, 224 p. (in Russian).
11. Dobronetc B.C. Intervalnaya matematika [Interval mathematics], Krasnoyarsk, SFU, 2007, 216 p. (in Russian).
12. Shannon K. Raboty po teorii informatsii i kibernetike [Works on information theory and cybernetics], Moscow, IIL, 1963, 832 p. (in Russian).

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции по оформлению диссертации, автореферата и публикаций по теме диссертаций», утвержденной постановлением президиума государственной ВАК РФ от 24.12.1997 г. № 178 (в редакции с изменениями и дополнениями постановления ВАК РФ от 22.02.2006 г. № 2 и постановления ВАК РФ от 15.08.2007 г. № 4).

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языках и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят 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.

5. На первой странице указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается адрес электронной почты), название и почтовый адрес организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200 – 250 строк), ключевые слова (не более пяти), введение, 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 английском и русском языках.

6. Аннотация должна быть информативной, содержательной и структурированной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Фотографии должны быть контрастными; рисунки, графики и диаграммы – четкими. Фотографии представляются в электронном виде в формате TIFF, JPG, СМУК с разрешением не менее 300 dpi. Все рисунки должны быть с подрисовочными подписями и пронумерованы. 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, использованные на рисунке, должны быть расшифрованы в подрисовочной подписи.

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 формул Microsoft Equation Editor,

номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

Отдельные строчные греческие и иные специальные символы набираются в тексте статьи гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **прямо** набираются греческие и русские буквы, математические символы, символы химических элементов, индексы (верхние и нижние), являющиеся сокращением слов; **курсивом** набираются латинские буквы – переменные, символы физических величин (в том числе и в индексе); **жирным** шрифтом набираются векторы (стрелки вверх не ставятся).

12. Список использованных источников приводится на русском и английском языках в конце статьи и должен содержать полные библиографические данные. Список составляется в порядке упоминания ссылок по тексту. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Количество ссылок должно быть не менее 10 (не рекомендуется давать ссылки на учебные пособия, материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, интернет-ресурсы).

13. Авторы на отдельной странице представляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес для переписки, номера телефонов, факсимильной и 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. 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.

Индексы:
74835; 748352