

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

Том 12

№ 2

Vol. 12

100 ЛЕТ



ХРАНИМ ТРАДИЦИИ, ЖИВЕМ НАСТОЯЩИМ, СОЗДАЕМ БУДУЩЕЕ!

2021

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель

Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 12

№ 2

2021

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

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

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

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

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

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

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

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

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

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

Колтунович Т.Н., д.т.н., профессор, Люблинский технический университет (г. Люблин, Польша)

Комаров Ф.Ф., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко 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 имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь)
- Кэмп А.**, профессор Института фотоники Страсклайдского университета (г. Глазго, Великобритания)
- Матеос Х.**, к.ф.-м.н., доцент, университет Ровира и Вирхилий (г. Таррагона, Испания)
- Пилипенко В.А.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор, заместитель директора ГЦ «Белмикрoанализ» ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ» (г. Минск, Беларусь)
- Плескачевский Ю.М.**, член-корреспондент НАН Беларуси, д.т.н., профессор (г. Минск, Беларусь)
- Погребняк А.Д.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой нанoeлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)
- Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)
- Тимчик Г.С.**, д.т.н., профессор, декан приборостроительного факультета, Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (г. Киев, Украина)
- Це Ли**, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)
- Чижик С.А.**, академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)
- Шкадаревич А.П.**, академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТИЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)
- Юмашев К.В.**, д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

ISSN 2220-9506

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь».

Подписные индексы – 74835; 748352.

Ответственный секретарь редакции: Шахлевич Л.Н.

Редактор: Чабарова О.Л.

Набор и верстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений».

Подписано в печать 21.06.2021. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,77. Уч.-изд. л. 3,82. Тираж 100 экз.

Дата выхода в свет 23.06.2021. Заказ № 336.

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

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

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

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 12

№ 2

2021

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, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

EDITORIAL BOARD

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

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

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

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

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

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

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)*

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

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

Tomasz N. Koltunowicz, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Lublin University of Technology (Lublin, Poland)*

Fadey F. Komarov, *Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of the Elionics Laboratory, A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)*

Nikolay V. Kuleshov, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Petr V. Kuchynski, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Director of A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems, Belarusian State University (Minsk, Belarus)

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

Xavier Mateos, PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

Vladimir A. Pilipenko, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor, Deputy Director of the State Center «Belmicroanalysis» of JSC «INTEGRAL» – «INTEGRAL» Holding Managing Company (Minsk, Belarus)

Yuriy M. Pleskachevsky, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Engineering), Professor (Minsk, Belarus)

Alexander D. Pogrebnyak, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Department of Nanoelectronic, Sumy State University (Sumy, Ukraine)

Vladimir Ya. Raspopov, Doctor of Science (Engineering), Professor, Head of Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)

Gryhoriy S. Tymchyk, Doctor of Science (Engineering), Professor, Dean of the Faculty of Instrumentation Engineering, National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute» (Kyiv, Ukraine)

Tse Li, Deputy Director of Northeast Scientific Research Institute of Sensor Technology (Harbin, China)

Sergei A. Chizhik, Academician of National Academy of Sciences of Belarus, Professor, Doctor of Science (Engineering), the First Vice Chairman of the Presidium of the National Academy of Sciences of Belarus, Head of Micro- and Nanotechnics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

Alexey P. Shkadarevich, Academician of the 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)

ADDRESS:

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

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

<i>К.Н. Горбаченя, В.Э. Кисель, А.С. Ясюкевич, Е.В. Копорулина, Е.А. Волкова, В.В. Мальцев, Н.И. Леонюк, Н.В. Кулешов</i>	
Эрбиевый лазер, излучающий в области 1.5 мкм, с высокой выходной мощностью (in English)	91
<i>А.С. Момот, Р.М. Галаган, В.Ю. Глуховский</i>	
Автоматизированная система тепловой дефектометрии многослойных материалов на основе глубокого обучения (in English)	98
<i>Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская</i>	
Приборный ряд фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью (in English)	108
<i>А.А. Коломейцев, И.А. Затонов, М.И. Пищанская, П.Ф. Баранов, Д.П. Ильященко, Е.В. Верхотурова</i>	
Проектирование планарного феррозондового датчика по технологии печатных плат (in English)	117

Методы измерений, контроля, диагностики

<i>А.Р. Баев, А.Л. Майоров, Н.В. Левкович, Д.В. Шавловский, М.В. Асадчая</i>	
Влияние геометрии и граничных условий в области сцепления материалов на рассеяние ультразвуковых волн. Ч. 1. Теоретическое моделирование (in English)	124
<i>А.М. Водовозов</i>	
Нелинейное времяимпульсное преобразование в радиоизотопных приборах: анализ и возможности применения (in English)	133
<i>Г.А. Гусаков, Г.В. Шаронов</i>	
Повышение качества поверхности металлических зеркал-отражателей при наноразмерной алмазной лезвийной обработке (in English)	139
<i>Д.М. Малютин</i>	
Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа	146
<i>А.М. Тимофеев</i>	
Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов	156

CONTENTS

Measuring Instruments

<i>K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, E.V. Koporulina, E.A. Volkova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov</i>	
High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm	91
<i>A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii</i>	
Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry of Multilayer Materials.....	98
<i>R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeyeu, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya</i>	
Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity.....	108
<i>A.A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya, P.F. Baranov, D.P. Ilyaschenko, E.V. Verkhoturova</i>	
Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology.....	117

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

<i>A.R. Bayev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, D.V. Shavlovskiy, M.V. Asachaya</i>	
Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam. Part 1. Theoretical research.....	124
<i>A.M. Vodovozov</i>	
Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices: Analysis and Application Possibilities	133
<i>G.A. Gusakov, G.V. Sharonov</i>	
Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors Machined by Single Point Diamond Turning.....	139
<i>D.M. Malyutin</i>	
Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope (in Russian).....	146
<i>A.M. Timofeev</i>	
Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter (in Russian).....	156

High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm

K.N. Gorbachenya¹, V.E. Kisel¹, A.S. Yasukevich¹, E.V. Koporulina², E.A. Volkova², V.V. Maltsev², N.I. Leonyuk², N.V. Kuleshov¹

¹Center for Optical Materials and Technologies,
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

²M.V. Lomonosov Moscow State University,
Leninskie Gory, 1, Moscow 119991, Russia

Received 14.05.2021

Accepted for publication 16.06.2021

Abstract

Solid-state lasers emitting in the 1.5–1.6 μm spectral range are very promising for eye-safe laser range finding, ophthalmology, fiber-optic communication systems, and optical location. The aim of this work is the investigation of spectroscopic and laser properties of gain medium based on borate crystal for abovementioned lasers.

Spectroscopic and laser properties of Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystals with different concentrations of dopants were investigated. Polarized absorption and emission cross-section spectra were determined. The ytterbium-erbium energy transfer efficiency was estimated. The maximal energy transfer efficiency up to 97 % was obtained for Er(4 at.%),Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄ crystal.

The laser operation of heavily doped crystals with erbium concentration up to 4 at.% ($2.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) was realized. By using of Er(2 at.%),Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄ crystal a maximal continuous-wave (CW) output power of 1.6 W was obtained at 1522 nm with slope efficiency of 32 %. By using of Er(4 at.%),Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄ crystal a maximal peak output power up to 2.2 W with slope efficiency of 40 % was realized in quasi-continuous-wave regime of operation. The spatial profile of the output beam was close to TEM₀₀ mode with $M^2 < 1.2$ during all laser experiments.

Based on the obtained results, it can be concluded that Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystals are promising active media for lasers emitting in the spectral range of 1.5–1.6 μm for the usage in laser rangefinder and laser-induced breakdown spectroscopy systems, and LIDARs.

Keywords: erbium, ytterbium, borate crystals, diode-pumped, continuous-wave laser operation.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

Адрес для переписки:

Горбаченя К.Н.
Центр оптических материалов и технологий,
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: gorby @bntu.by

Address for correspondence:

Gorbachenya K.N.
Center for Optical Materials and Technologies,
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby @bntu.by

Для цитирования:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, E.V. Koporulina,
E.A. Volkova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov.
High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm .
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 91–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

For citation:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, E.V. Koporulina,
E.A. Volkova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov.
High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm .
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 91–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

Эрбиевый лазер, излучающий в области 1.5 мкм, с высокой выходной мощностью

К.Н. Горбаченя¹, В.Э. Кисель¹, А.С. Ясюкевич¹, Е.В. Копорулина², Е.А. Волкова²,
В.В. Мальцев², Н.И. Леонюк², Н.В. Кулешов¹

¹Центр оптических материалов и технологий,
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

²Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,
Ленинские горы, 1, г. Москва 119991, Россия

Поступила 14.05.2021

Принята к печати 16.06.2021

Твердотельные лазеры, излучающие в спектральной области 1.5–1.6 мкм, находят широкое применение в дальнометрии, офтальмологии, волоконно-оптических системах и оптической локации. Целью данной работы являлось исследование спектроскопических и генерационных свойств активной среды на основе кристалла бората для указанных лазеров.

Проведено исследование спектроскопических и генерационных свойств кристаллов Er, Yb:YAl₃(BO₃)₄ с различным содержанием ионов-активаторов. В результате определены спектры поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания в поляризованном свете. Проведена оценка эффективности переноса энергии от ионов иттербия на ионы эрбия. Максимальная эффективность переноса энергии достигала 97 % для кристалла Er(4 at.%), Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄.

Реализована лазерная генерация для кристаллов с высоким содержанием ионов эрбия до 4 ат.% ($2.2 \cdot 10^{20} \text{ см}^{-3}$). При использовании кристалла Er(2 at.%), Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄ получен непрерывный режим генерации с максимальной выходной мощностью до 1,6 Вт на длине волны 1522 нм при дифференциальной эффективности 32 %. В квазинепрерывном режиме генерации для кристалла Er(4 at.%), Yb(11 at.%):YAl₃(BO₃)₄ максимальная пиковая мощность достигала 2,2 Вт при дифференциальной эффективности по поглощённой мощности накачки 40 %. Профиль распределения интенсивности в поперечном сечении лазерного пучка хорошо аппроксимировался функцией Гаусса рассчитанное значение параметра распространения лазерного пучка M^2 не превышало 1,2, что соответствует TEM_{00} моде резонатора.

На основе полученных результатов, можно сделать вывод, что данные кристаллы являются перспективными активными средами, для лазеров, излучающих в спектральном диапазоне 1.5–1.6 мкм, для применения в составе систем лазерной дальнометрии, лазерно-искровой эмиссионной спектроскопии и лидаров.

Ключевые слова: эрбий, иттербий, бораты, диодная накачка, непрерывная лазерная генерация.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

Адрес для переписки:

Горбаченя К.Н.
Центр оптических материалов и технологий,
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: gorby@bntu.by

Address for correspondence:

Gorbachenya K.N.
Center for Optical Materials and Technologies,
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: gorby@bntu.by

Для цитирования:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, E.V. Koporulina,
E.A. Volkova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov.
High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 91–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

For citation:

K.N. Gorbachenya, V.E. Kisel, A.S. Yasukevich, E.V. Koporulina,
E.A. Volkova, V.V. Maltsev, N.I. Leonyuk, N.V. Kuleshov.
High Power Diode-Pumped Erbium Laser Emitting at Near 1.5 μm.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 91–97.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-91-97

Introduction

Laser radiation at 1.5–1.6 μm is located in the eye-safe wavelength range and sensitive region of Ge and InGaAs photodiodes. Other advantages of this radiation are high transparency in atmosphere and fused-silica waveguides. All this makes efficient solid-state laser sources emitting in this spectral range very attractive for compact laser range finding, optical location and fiber-optic communication systems.

The $^4I_{13/2} \rightarrow ^4I_{15/2}$ transition of erbium ions is a simple and reliable method for obtaining 1.5–1.6 μm laser operation. However, erbium ions suffer from low pump absorption at the wavelength of commercially available laser diodes near 980 nm. This fact obliges to use additional co-doping with ytterbium ions that strongly absorb pump radiation and transfer it to the erbium ions. For efficient operation of such Er-Yb co-doped lasers two main spectroscopic conditions should be satisfied. The first is short lifetime of the $^4I_{11/2}$ energy level that prevents up-conversion processes and depopulation of this level by means of energy back transfer. The second condition is high enough $^4I_{13/2}$ level lifetime to keep quite low laser threshold. These conditions are well satisfied in Er,Yb-glasses, but the glasses suffer from poor thermo-mechanical properties (thermal conductivity of $0.85 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$) [1], which limits the CW output power by a few hundred milliwatts. A maximal CW output power for Er,Yb-glasses didn't exceed 353 mW with slope efficiency of 26 % [2].

The borate crystals co-doped with erbium and ytterbium ions satisfy abovementioned spectroscopic characteristics and possess high thermo-mechanical properties (thermal conductivity of Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ is $7.7 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ and $6 \text{ W} \times \text{m}^{-1} \times \text{K}^{-1}$ along a and c axes, respectively) for efficient laser operation [3]. Room-temperature laser operation was demonstrated for following Er,Yb-codoped borate crystals: GdCa₄O(BO₃)₃ [4], LaSc₃(BO₃)₄ [5], YCa₄O(BO₃) [6], GdAl₃(BO₃)₄ [7, 8], LuAl₃(BO₃)₄ [9]. Efficient high power laser performance of diode-pumped Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ (YAB) crystals was demonstrated recently [10–12]. The maximal output power up to 1 W with slope efficiency of 35 % at several wavelengths between 1522 and 1602 nm was obtained using crystal with dopant concentrations of 1.5 at.% ($0.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) for erbium and 11 at.% ($6.0 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$) for ytterbium ions, respectively [10]. However, the optimization

of erbium concentration and determination of its influence on the laser performance for oxoborate crystals weren't performed. Here we present the investigation of the effect of erbium concentration on the laser performance of Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystals and as a result efficient laser operation at near 1.5 μm .

Crystal growth and spectroscopic properties

Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ single crystals with different erbium concentrations were grown by dipping seeded high-temperature solution growth at a cooling rate 0.2 °C–0.5 °C per day in the temperature range of 1060 °C–1000 °C using K₂Mo₃O₁₀-based flux [13]. As a result, Er,Yb:YAB crystals with high optical quality and the size up to 20×10×10 mm have been obtained. The concentrations of the dopants were measured by microprobe analysis to be $0.8 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (1.5 at.%), $1.1 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (2.0 at.%), $1.7 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (3.0 at.%) and $2.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (4.0 at.%) for erbium and $6.0 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (11 at.%) for ytterbium ions.

The polarized absorption cross-section spectra of Er,Yb:YAB crystal around 980 nm at room-temperature are depicted in Figure 1. The $^2F_{7/2} \rightarrow ^2F_{5/2}$ absorption band is centered at 976 nm with a maximum absorption cross-section of about $2.75 \times 10^{-20} \text{ cm}^2$ and bandwidth of 17 nm (FWHM) in σ polarization.

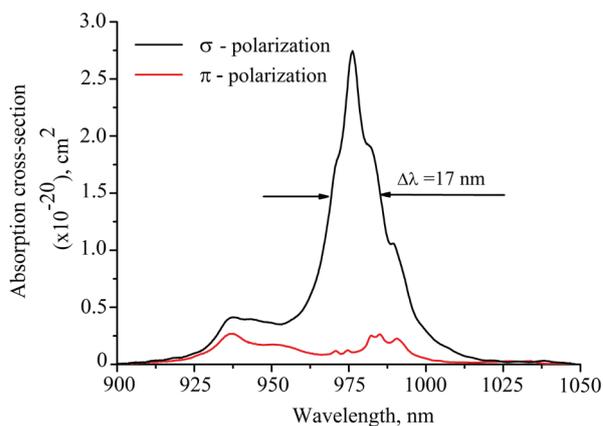


Figure 1 – Room-temperature polarized absorption spectra of Er,Yb:YAB crystal at 1 μm

The stimulated emission cross-section spectra calculated by the reciprocity method using the Stark energy level scheme of $^4I_{13/2}$ and $^4I_{15/2}$ manifolds [3] are plotted in Figure 2. A number of local maxima are observed in both σ and π polarizations.

The energy transfer efficiency was measured by the estimation of $^2F_{5/2}$ level lifetime shortening

in Er,Yb-codoped and Yb-single doped crystals according to the formula [6]:

$$\eta = k/\tau^{-1} = \tau(1/\tau - 1/\tau_0),$$

where k is the energy transfer rate, τ is the ytterbium $^2F_{5/2}$ level lifetime in Er,Yb-codoped crystal, and τ_0 is the ytterbium $^2F_{5/2}$ level lifetime in Yb single-doped crystal.

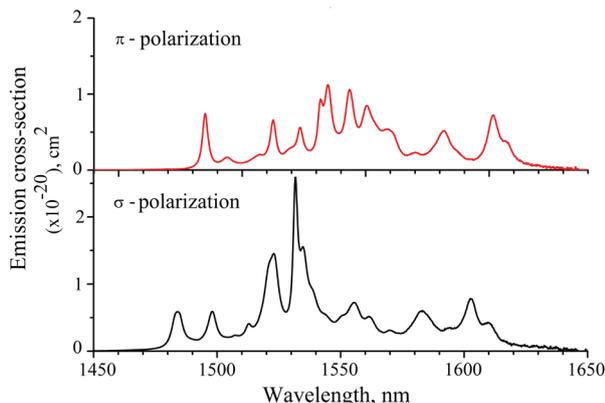


Figure 2 – Emission cross-section spectra of Er,Yb:YAB crystal near 1.5 μm

The values of energy transfer efficiencies in Er,Yb:YAB crystals with different erbium and constant ytterbium concentrations are shown in Table 1. The energy transfer efficiency amplifies with the increasing of erbium concentration up to the value of 97 % for Er(4 at.%),Yb(11 at.%)YAB crystal.

Table 1

The energy transfer efficiencies in Er,Yb:YAB crystals

Crystal	Er ³⁺ ions, at. %	Yb ³⁺ ions, at. %	² F _{5/2} , μs (Yb single-doped)	² F _{5/2} , μs (Yb,Er co-doped)	Energy transfer efficiency, %
	1.5			60	88
YAB	2.0	11.0	480	30	94
	3.0			20	96
	4.0			17	97

Laser experiments

The laser experiments were performed in Z-shaped cavity. The details of active elements used during laser experiments are plotted in Table 2.

The temperature of mounted on the thermoelectrically cooled copper heatsink active

elements was kept at 18 °C. As a pump source a 15 W fiber-coupled (Ø 105 μm, NA = 0.22) laser diode emitting near 976 nm was used. Pump beam was collimated by a 80 mm focal length doublet and then focused into 100 μm spot inside Er,Yb:YAB crystal with another 80 mm length doublet. The cavity-mode diameter at the active element was close to the pump beam waist. The output couplers with the transmittance of 1 %, 2 %, 5 % and 10 % were used during laser experiments. The setup for laser experiments is presented in Figure 3.

Table 2

The details of active elements

Crystal	Er ³⁺ ions, at. %	Yb ³⁺ ions, at. %	Width, mm	Orientation
	1.5			c-cut
YAB	2.0	11.0	1.5	c-cut
	3.0			c-cut
	4.0			a-cut

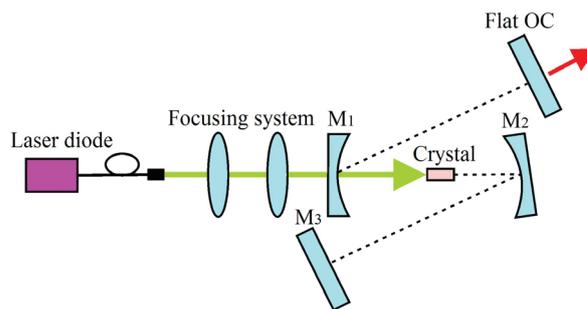


Figure 3 – Setup for laser experiments

The laser experiments were started with Er(1.5 at.%),Yb(11 at.%)YAB crystal, which was studied in our previous investigations [10, 14]. The best laser performance was demonstrated with 5 % output coupler transmittance. Input-output characteristics of continuous-wave laser are plotted in Figure 4. The laser threshold was measured to be about 1.5 W of absorbed pump power. The maximum CW output power of 1.2 W with slope efficiency near 26 % was obtained at 1522 nm at about 6.2 W of absorbed pump power. After further increasing of pump power, the rising of output laser power wasn't observed. It provides evidence for the influence of thermal load in the crystal on laser performance. To reduce the thermal load, laser experiments with quasi-CW (QCW) pumping were performed. By using a chopper with a duty cycle of 1:5 in the pumping channel, the maximal output peak power up to 2 W with slope efficiency of 35 % was obtained at the absorbed peak pump power of 7.3 W (Figure 4).

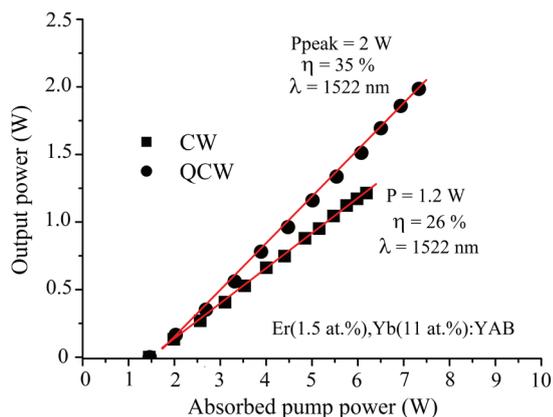


Figure 4 – Input-output characteristics of CW and QCW Er(1.5 at.%), Yb(11 at.%):YAB diode-pumped laser

For Er(2 at.%), Yb(11 at.%):YAB the CW laser emission with a slope efficiency of near 27 % was observed at 1543 nm and 1.7 W laser threshold of absorbed pump power; however at an absorbed pump power of more than 4 W the emission wavelength switched to 1522 nm and the slope efficiency was increased to 32 %. The maximal output power of 1.6 W was obtained in that case. The similar situation with switching of emission wavelength was observed for QCW regime of operation at an absorbed pump peak power of more than 5.5 W. The maximal output peak power of 2.7 W with slope efficiency up to 41 % was obtained at an absorbed pump peak power of more than 9 W (Figure 5). The wavelength switching can be explained by the laser wavelength dependence on the inversion density (or intracavity losses). The intracavity losses depend on the output coupler transmittance and thermal effects inside the pumped volume of the crystal. Changes in the losses during laser operation may lead to changing of the wavelengths [7, 15].

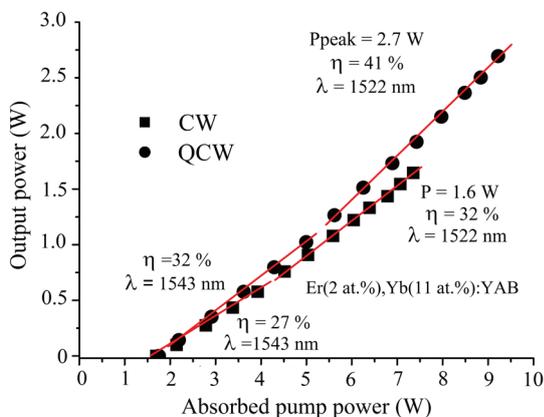


Figure 5 – Input-output characteristics of CW and QCW Er(2 at.%), Yb(11 at.%):YAB diode-pumped laser

Figure 6 shows input-output diagrams of CW and QCW Er(3 at.%), Yb(11 at.%):YAB diode-pumped laser. For CW operation the slope efficiency was reduced to 23 %. The maximal output power of 0.5 W in this case was limited by the damage of active element. To our mind, this damage can be caused by the residual internal stress for highly erbium doped crystals. To prevent destruction of the crystal further experiments were carried out with quasi-CW pumping. The maximal output peak power of 2.5 W with slope efficiency of 35 % was obtained at 1522 nm.

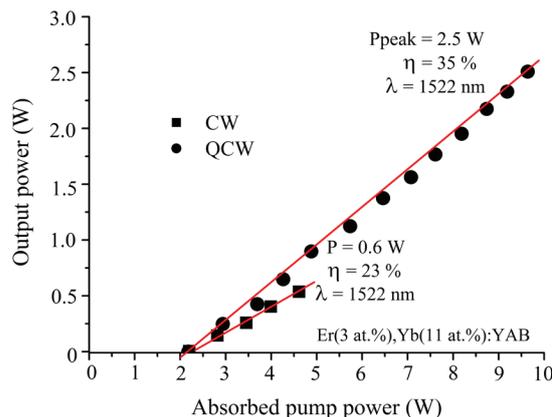


Figure 6 – Input-output characteristics of CW and QCW Er(3 at.%), Yb(11 at.%):YAB diode-pumped laser

Laser experiments in QCW regime of operation were held with available a-cut Er(4 at.%), Yb(11 at.%):YAB crystal. In case of usage c-cut and a-cut crystals the lasers demonstrate close slope efficiencies at the slightly different wavelengths (1522 and 1531 nm), respectively [10, 14]. The laser threshold was measured to be about 2.6 W of absorbed peak pump power. The maximum QCW output peak power of 2.2 W with slope efficiency near 40 % was obtained at 1531 nm at about 9 W of absorbed peak pump power (Figure 7).

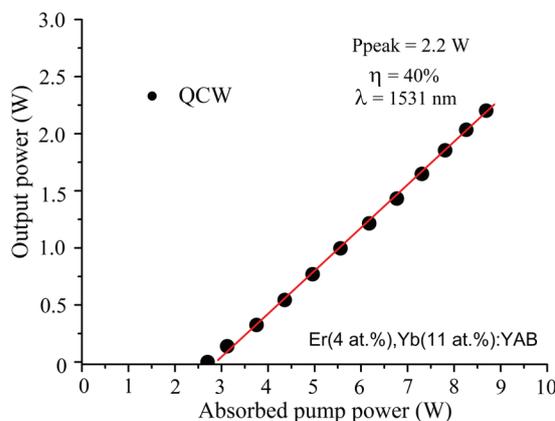


Figure 7 – Input-output characteristics of QCW Er(4 at.%), Yb(11 at.%):YAB diode-pumped laser

Laser characteristics of Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ crystals with different erbium concentrations are plotted in Table 3. The highest slope efficiency was demonstrated with the output coupler transmittance of 5 % for crystals with different erbium concentrations. The increasing of the laser threshold values up to

2.6 W for crystal with the erbium concentration of 4 at.% was observed. This fact is explained by the increasing of reabsorption losses because of quasi-three level scheme of laser operation. The spatial profile of the output beam was close to TEM₀₀ mode with $M^2 < 1.2$ during all laser experiments.

Table 3

Laser performance of Er,Yb:YAB crystal with different erbium concentrations

Crystal	Er ³⁺ ions, at. %	Yb ³⁺ ions, at. %	CW		QCW			
			P _{abs} , W	η, %	P _{max} , W	P _{abs} , W	η, %	P _{max} , W
YAB	1.5	11.0	1.4	26	1.2	1.4	35	2
	2.0		1.7	32	1.6	1.7	41	2.7
	3.0		2.2	23	0.6	2.2	35	2.5
	4.0		–	–	–	2.6	40	2.2

Conclusion

In conclusion, the effect of high erbium concentration on the laser performance of Er,Yb:YAB crystals was investigated. The results demonstrate that there is no degradation of QCW laser performance for erbium concentration up to $2.2 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ (4.0 at.%). It is rather different in comparison with Er,Yb-glasses where decreasing of laser slope efficiency begins from the erbium concentration of $1.0 \cdot 10^{20} \text{ cm}^{-3}$ [4]. Maximal CW output power of 1.6 W with slope efficiency of 32 % and QCW peak output power of 2.7 W with slope efficiency of 41 % was obtained for Er(2 at.%),Yb(11 at.%):YAB crystals. The obtained result shows the prosperity of Er,Yb:YAB crystal usage as an active medium of eye-safe 1.5–1.6 μm lasers for rangefinding applications.

Acknowledgements

This research was supported by Russian Science Foundation grant (project No. 19-12-00235).

References

1. Taccheo S., Sorbello G., Laporta P., Karlsson G., Laurell F. 230-mW diode-pumped single-frequency Er,Yb laser at 1.5 μm. *IEEE Photonics Technology Letters*, 2001, vol. 13, no. 1, pp. 19–21. DOI: 10.1109/68.903207
2. Danger T., Huber G., Denker B.I., Galagan B.I., Sverchkov S.E. Diode-pumped cw laser around 1.54 μm using Yb, Er-doped silico-boro-phosphat glass in

Conference on Lasers and Electro-Optics, D. Scifres and A. Weiner, eds., (Optical Society of America, 1998), paper CTuM71.

3. Tolstik N.A., Huber G., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. Excited state absorption, energy levels, and thermal conductivity of Er³⁺:YAB. *Appl. Phys. B*, 2008, vol. 92, no. 4, pp. 567–571.

DOI: 10.1007/s00340-008-3101-8

4. Denker B., Galagan B., Ivleva L., Osiko V., Sverchkov S., Voronina I., Hellstrom J.E., Karlsson G., Laurell F. Luminescent and laser properties of Yb,Er activated GdCa₄O(BO₃)₃ – a new crystal for eyesafe 1.5 micrometer lasers. *Appl. Phys. B*, 2004, vol. 79, no. 5, pp. 577–581. DOI: 10.1007/s00340-004-1605-4

5. Diening A., Heumann E., Huber G., Kuzmin O. High-power diode-pumped Yb, Er:LSB laser at 1.56 μm in Conference on Lasers and Electro-Optics (CLEO). Vol. 6 of 1998 OSA Technical Digest Series (Optical Society of America, 1998), pp. 299–300, paper CWM5.

6. Burns P., Dawes J., Dekker P., Pipper J., Jiang H., Wang J. Optimization of Er,Yb:YCOB for cw laser operation. *IEEE J. Quantum Electronics*, 2004, vol. 40, no. 11, pp. 1575–1582.

DOI: 10.1109/JQE.2004.834935

7. Gorbachenya K.N., Kisel V.E., Yasukevich A.S., Maltsev V.V., Leonyuk N.I., Kuleshov N.V. High efficient continuous-wave diode-pumped Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ laser. *Opt. Lett.*, 2013, vol. 38, pp. 2446–2448.

DOI: 10.1364/OL.38.002446

8. Chen Y., Lin Y., Gong X., Luo Z., Huang Y. Spectroscopic properties and laser performance of Er³⁺ and Yb³⁺ co-doped GdAl₃(BO₃)₄ crystal. *IEEE J. Quantum*

Electronics, 2007, vol. 43, no. 10, pp. 950–956.

DOI: 10.1109/JQE.2007.904308

9. Chen Y., Lin Y., Huang J., Gong X., Luo Z., Huang Y. Spectroscopic and laser properties of $\text{Er}^{3+}:\text{Yb}^{3+}:\text{LuAl}_3(\text{BO}_3)_4$ crystal at 1.5–1.6 μm . *Opt. Express*, 2010, vol. 18, no. 13, pp. 13700–13707.

DOI: 10.1364/OE.18.013700

10. Tolstik N.A., Kurilchik S.V., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Pilipenko O.V., Koporulina E.V., Leonyuk N.I. Efficient 1 W continuous-wave diode-pumped Er,Yb:YAl(BO₃)₄ laser. *Opt. Lett.*, 2007, vol. 32, no. 22, pp. 3233–3235.

DOI: 10.1364/OL.32.003233

11. Chen Y.J., Lin Y.F., Gong X.H., Luo Z.D., Huang Y.D. 1.1 W diode-pumped Er:Yb laser at 1520 nm. *Opt. Lett.*, 2008, vol. 32, no. 18, pp. 2759–2761.

DOI: 10.1364/OL.32.002759

12. Chen Y.J., Lin Y.F., Gong X.H., Tan Q.G., Luo Z.D., Huang Y.D. 2.0 W diode-pumped Er:Yb:YAl₃(BO₃)₄

laser at 1.5–1.6 μm . *Appl. Phys. Lett.*, 2006, vol. 89, pp. 241111.

DOI: 10.1063/1.2404969

13. Pilipenko O.V., Maltsev V.V., Koporulina E.V., Leonyuk N.I., Tolstik N.A., and Kuleshov N.V. Growth of (Er,Yb):YAl₃(BO₃)₄ laser crystals. *Crystallography Reports*, 2008, vol. 53, pp. 336–338.

DOI: 10.1134/S1063774508020260

14. Tolstik N.A., Kisel V.E., Kuleshov N.V., Maltsev V.V., Leonyuk N.I. Er,Yb:YAl₃(BO₃)₄ – efficient 1.5 μm laser crystal. *Appl. Phys. B*, 2009, vol. 97, no. 2, pp. 357–362.

DOI: 10.1007/s00340-009-3694-6

15. Loiko P.A., Mateos X., Kuleshov N.V., Pavlyuk A.A., Yumashev K.V., Petrov V., Griebner U., Aguiló M., Díaz F. Thermal-lens-driven effects in -cut Yb-and Tm-doped monoclinic KLu(WO₄)₂ crystals. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2014, vol. 50, pp. 1–8.

DOI: 10.1109/JQE.2014.2332496

Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry of Multilayer Materials

A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii

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

Received 12.03.2021

Accepted for publication 15.05.2021

Abstract

Currently, along with growth in industrial production, the requirements for product quality testing are also increasing. In the tasks of defectoscopy and defectometry of multilayer materials, the use of thermal non-destructive testing method is promising. At the same time, interpretation of thermal testing data is complicated by a number of factors, which makes the use of traditional methods of data processing ineffective. Therefore, an urgent task is to search for new methods of thermal testing that will automate the diagnostic process and increase information content of obtained results. The purpose of article is to use the advances in deep learning for processing results of active thermal testing of products made of multilayer materials and development of an automated system for thermal defectoscopy and defectometry of such products.

The proposed system consists of a heating source, an infrared camera for recording sequences of thermograms and a digital information processing unit. Three neural network modules are used for automated data processing, each of which performs one of the tasks: defects detection and classification, determination of the defect depth and thickness. The software algorithms and user interface for interacting with system are programmed in the NI LabVIEW development environment.

Experimental studies on samples made of multilayer fiberglass have shown a significant advantage of the developed system over using traditional methods for analyzing thermal testing data. The defect classification (determining the type) error on the test dataset was 15.7 %. Developed system ensured determination of defect depth with a relative error of 3.2 %, as well as the defect thickness with a relative error of 3.5 %.

Keywords: thermal testing, multilayer materials, deep learning.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

Адрес для переписки:

Момот А.С.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр-т Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: drewmomot@gmail.com

Address for correspondence:

Momot A.S.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: drewmomot@gmail.com

Для цитирования:

A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii.
Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry
of Multilayer Materials.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 98–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

For citation:

A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii.
Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry
of Multilayer Materials.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 98–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

Автоматизированная система тепловой дефектометрии многослойных материалов на основе глубокого обучения

А.С. Момот, Р.М. Галаган, В.Ю. Глуховский

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

Поступила 12.03.2021

Принята к печати 15.03.2021

На сегодняшний день, вместе с ростом темпов промышленного производства повышаются также и требования к контролю качества продукции. В задачах дефектоскопии и дефектометрии многослойных материалов перспективным является использование теплового метода неразрушающего контроля. В то же время, интерпретация данных теплового контроля усложнена рядом факторов, что делает использование традиционных методов анализа данных неэффективным. Поэтому актуальным заданием является поиск новых методов теплового контроля, которые позволят автоматизировать процесс диагностики и повысить информативность полученных результатов. Целью статьи являлось использование достижений в области глубокого обучения для обработки результатов активного теплового контроля изделий из многослойных материалов и разработка автоматизированной системы тепловой дефектоскопии и дефектометрии таких изделий.

Предлагаемая система состоит из источника нагрева, тепловизора для регистрации последовательностей термограмм и блока цифровой обработки информации. Для автоматизированной обработки данных используются три нейросетевых модуля, каждый из которых выполняет одну из задач: обнаружение и классификация дефектов, определение глубины залегания дефекта и его раскрытия (толщины). Программные алгоритмы и интерфейс взаимодействия с системой выполнены в среде разработки *NI LabVIEW*.

Экспериментальные исследования на образцах из многослойного стеклотекстолита показали значительное преимущество разработанной системы над методами, использующими традиционные алгоритмы анализа данных теплового контроля. Ошибка определения типа (классификации) дефекта на тестовом образце составила 15,7 %. Разработанная система обеспечила определение глубины дефекта с относительной погрешностью 3,2 %, а также толщины дефекта с относительной погрешностью 3,5 %.

Ключевые слова: тепловой контроль, композиционные материалы, глубокое обучение.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

Адрес для переписки:

Момот А.С.
Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»,
пр-т Победы, 37, г. Киев 03056, Украина
e-mail: drewmomot@gmail.com

Address for correspondence:

Momot A.S.
National Technical University of Ukraine
"Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute",
Peremohy Ave., 37, Kyiv 03056, Ukraine
e-mail: drewmomot@gmail.com

Для цитирования:

A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii.
Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry
of Multilayer Materials.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 98–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

For citation:

A.S. Momot, R.M. Galagan, V.Yu. Gluhovskii.
Deep Learning Automated System for Thermal Defectometry
of Multilayer Materials.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 98–107.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-98-107

Introduction

Nowadays, products made of multilayer and composite materials are widely used in various industries. In particular, composite materials are increasingly used in aircraft industry, from which the most responsible elements of aircraft construction are made. At the same time, there is a tendency to increase the requirements for product quality testing. Timely detection of hidden defects makes it possible to prevent significant material and sometimes human losses. Due to a number of advantages, methods of active thermal non-destructive testing (TNDT) are used in composite materials testing tasks. Therefore, it is important to create automated systems for determining characteristics of defects based on the results of active TNDT, which will have increased informativeness, reliability and accuracy of defectometry in conditions of significant levels of noise and complex internal structure of the object of testing (OT).

The results of multilayer materials testing are influenced by a large number of random factors due to changes in the properties of composites, which occur due to complexity of their manufacturing processes, a large number of types of possible defects that cannot be formalized, imperfect inspection methods and defectoscopic equipment. Features of properties and physical characteristics of multilayer materials complicate the use of many existing methods of TNDT, which use mainly deterministic models and their corresponding data processing methods. Such methods do not provide the necessary noise immunity, measurement accuracy and reliability of testing [1].

A rather limited number of scientific papers are devoted to the analysis of thermal fields for the purpose of automated simultaneous detection, classification of defects and determination of their parameters. Initial researches were aimed at performing defectometry by solving the inverse tasks of TNDT. With the development of modern technologies of digital data processing, development trends have shifted to the application of latest statistical methods and intelligent systems based on deep learning.

Today, classical methods of digital signal processing, such as Fourier transform or wavelet analysis, are used to analyze the data of active TNDT [2, 3]. In particular, the algorithm of dynamic thermal tomography is implemented with the use of these methods [4]. Another approach is based

on a comprehensive statistical analysis of the entire recorded sequence of thermograms, which uses the principal components analysis method [5]. Each of these methods has its advantages and disadvantages, but they are all used to solve a narrow range of tasks and are not universal and adaptive [6].

In [7, 8] the method of recognition of three-dimensional defects is described. It uses the method of degree of similarity estimating for surface thermal field of OT with the existing 3D surface models, which were obtained by numerical modeling of three-dimensional thermal conductivity task. This approach in practice demonstrates low adaptability, as it requires construction of mathematical models of OT for each new testing task.

The work [9] is devoted to the study of deep learning application for composites testing. Study shows results of processing experimental data on carbon fiber testing using two neural networks, which provide both qualitative detection of hidden defects and defectometry elements. The first neural network is designed to detect defective areas, and the second is used to classify defects by depth. The high efficiency of the neural network in both types of problems is proved.

The authors of [10] conducted a study of the effectiveness of method for determining defects depth in multilayer materials using deep learning. It is presented and implemented a new algorithm based on the use of a multilayer neural network to determine the depth of defects in real time. Study uses computer simulations to create an artificial data set. An experimental validation of neural networks efficiency was performed, which showed an up to 10 % error in determining defects depth at the level of 0.5 mm.

Analysis of existing publications shows that the use of modern intelligent systems allows to solve the problems of thermal defectometry with increased efficiency. Existing studies prove the prospects of using deep learning for defect classification and defectometry. The error in measuring defects depth by traditional methods reaches 7–10 %, while neural networks can reduce it to 2.5–3 %. At the same time, existing works do not provide a quantitative assessment of the effectiveness of determining defects thickness using deep learning. The authors mainly focus on solving one specific testing task, while the modern approach requires a comprehensive automated analysis of OT in order to describe it as fully as possible. Currently, there are no systems that in practice implement a simultaneous automated

solution to the problems of detecting defects of multilayer materials by the active thermal method, their classification and defectometry.

Thus, there is a need to develop new methods and automated testing systems for products made of multilayer materials. A large number of interconnected informative parameters, impossibility of linear separation of defects classes on diagnostic grounds, need for automation and increasing testing informativeness require to use the latest data processing systems, in particular, based on deep learning algorithms.

Physical principles of active thermal nondestructive testing

Dynamic thermal field is described by the function $T(x, y, \tau)$. During the active thermal non-destructive testing, the character of change in instantaneous temperature values over time at surface points of OT is considered. To obtain these dependences, the OT is heated by a heat source for a certain time. The process of heating and further cooling of OT is registered using a thermal imager. Resulting sequence of thermograms reflects the change in temperature field on the surface of the OT over time [11].

Considering the temperature dynamics at individual points (pixels) of thermograms, which correspond to the coordinates of OT surface, it is possible build a temperature profile – a chart of temperature change over time for this point (Figure 1). As a rule, in defect-free areas, the nature of temperature change is constant and is considered known. In this case, we can enter some reference temperature $T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau)$, which is considered defect-free. In the defect zone, the regular nature of the thermal field is disturbed and local temperature differences $T_d(x, y, \tau)$, occurs, which lead to a change in the temperature profile. Thus, it is possible to calculate the value of temperature difference between defective and defect-free areas:

$$\Delta T(x, y, \tau) = T_d(x, y, \tau) - T_{nd}(x_{nd}, y_{nd}, \tau).$$

The time τ_{opt} , at which the value of $\Delta T(x, y, \tau)$ in this area of OT becomes the maximum, is called the optimal time of testing:

$$\Delta T_{max}(x, y, \tau) = \Delta T_{max}(\tau_{opt}).$$

As the size of the defect increases, its heating rate decreases, which leads to a change in the shape

of the temperature profile. In particular, for deeper defects the value of ΔT_{max} decreases and the time of optimal observation τ_{opt} increases.

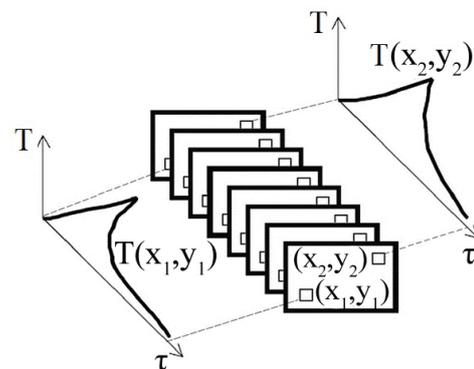


Figure 1 – Temperature profiles in different points of thermogram

Quality of obtained thermograms significantly depends on the characteristics of heat source and instrument for recording the thermal field. Ensuring uniform heating in practice is a difficult task, as the nature of heating is influenced by imperfections of the heat source and numerous external factors, such as influence of external emitters, air movement etc. Due to the anisotropy of characteristics, composite materials have different values of thermal conductivity along the coordinate axes, which leads to shape distortion of defects thermal imprints [12]. Therefore, task of testing process automating and finding new or improving existing testing methods that will provide high informativeness, reliability and accuracy in such conditions is relevant.

Automated system of thermal defectometry structure

Trends in the development of TNDT place the following requirements on testing systems: a high level of automation; high informativeness, speed and productivity of testing; versatility and high adaptability; high reliability of testing and accuracy of defectometry. To meet these requirements, it is necessary to use modern hardware and software. At the same time, the general scheme of active thermal testing remains unchanged. The object of testing is exposed by a heat source. Inside a solid, thermal energy is distributed in all directions due to the diffusion process. In the presence of hidden defects, the heat fluxes inside OT are redistributed, which leads to the appearance of specific temperature anomalies on its front and rear surfaces.

The temperature field of OT is observed and registered using an infrared camera. Temperature signals, presented in the form of thermograms, are transmitted to an automated data processing system on a PC to detect defects and determine their parameters [13].

The choice of testing scheme, characteristics of heat source and thermal imaging equipment significantly affect the diagnostic result. The efficiency of traditional methods of thermogram sequence processing directly depends on these factors. This reduces the versatility of testing systems that use standard data processing algorithms. In particular, changing the OT, heat source or thermal imager in many cases leads to the need for a complete recalculation of system parameters. The use of modern methods of TNDT data processing on the basis of deep learning allows you to add information about new OT or take into account changes in testing conditions without losing previous data. Because all information about network experience is contained in weights, retraining the system in the event of inspection of new objects or the appearance of new

types of defects will not necessitate changes in further data processing algorithms.

Based on the analysis of existing schemes of active thermal testing, it is possible to synthesize the scheme of realization of automated TNDT data processing system using an improved method of determining the defects characteristics. This method involves automated data analysis in three neural network modules. The modular structure facilitates construction and modification of the system and increases overall efficiency of its work by optimizing the settings of modules to solve specific problems [14].

General block diagram of the automated system for determining defects characteristics is shown in Figure 2. The system is universal and can be used for various testing schemes and regardless of the characteristics of heat source, infrared camera or OT parameters. The core of each neural network module uses a deep feedforward network. Software algorithms of the system are implemented in NI LabVIEW environment.

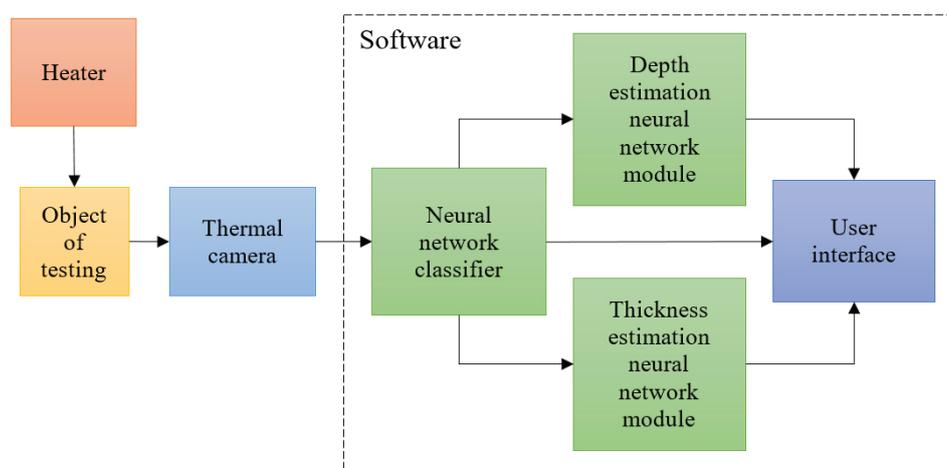


Figure 2 – The structure of proposed automated active thermal defectometry system

Experimental studies of the proposed system

In order to conduct experimental studies of the efficiency of automated thermal defectometry system, two training and one test sample of multilayer fiberglass were developed. This material is used as a structural for manufacture of critical parts with high strength. Developed samples are square plates of five layers fiberglass. Total thickness of each sample is 5 mm, the thickness of one layer is 1 mm. The side of the plate is 100 mm.

The scheme of the test sample is shown in Figure 3. It contains hidden artificial defects of

three types: air cavities (white in Figure 3), paper foreign inclusions (red) and aluminum third inclusions (blue). Defects have a square shape, the size of side is from 10 mm to 4 mm. Hidden artificial defects are located at depths of 1 to 3 mm and have different values of thickness: 1 mm, 2 mm or 3 mm.

The scheme of bilateral active TNDT was used during the experiment. The power of infrared heat source was 1 kW. To minimize the impact of thermal radiation from the heat source on results, a steel protective plate was used, which contains a hole and a mount for OT. The plate with OT was located at a distance of 100 mm from the heater. The distance

from OT to the infrared camera is 400 mm. Testo 876 infrared camera was used to record a sequence of thermograms.

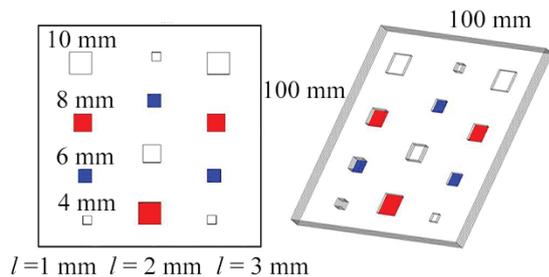


Figure 3 – Test sample scheme

The infrared camera and heat source are controlled by operator in manual mode. Ambient temperature during the experimental studies was 20 °C. At the beginning of experiment, the first thermogram was registered OT at the initial time. After turning on the infrared heater and putting it to work, recording of thermograms begins. Time interval between adjacent thermograms is 6 s. Heating and recording of the experimental sequence of thermograms was carried out for 120 s. After the thermograms recording procedure is completed, the heater is switched off. Experiment resulted in a sequence of 20 thermograms. Obtained results reflect the process of OT thermal field changing at the stage of heating.

Recorded thermogram sequences were exported to a PC. The initial processing of thermograms was carried out using proprietary Testo IRSoft software. The resolution of the each obtained thermogram is 320×240 pixels. Thermograms are stored as arrays of pixel temperatures. Based on the obtained results, a set of initial data for further processing is formed. The thermogram of test sample at the optimal time of testing is shown in Figure 4.

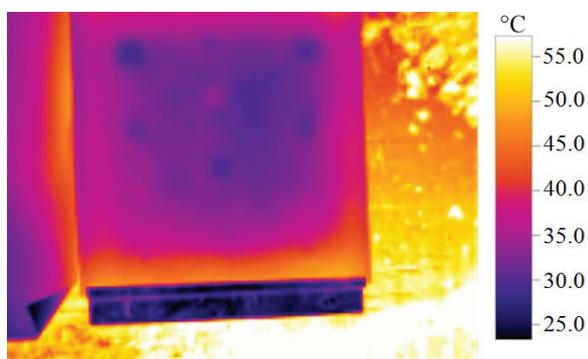


Figure 4 – Thermogram of the test sample at optimal time of testing

On the optimal thermogram it is possible to distinguish visually 8 thermal prints of artificial defects. Due to significant boundary effects, information on bottom row of defects is lost. In general, the OT thermogram is characterized by uneven heating, which complicates its automated processing by standard methods. Next, only the region of interest (which is directly OT) is considered.

Figure 5a shows samples of temperature profiles of the defect-free and defective areas for different types of defects, lying at a depth of 3 mm. An example of differential temperature signals from artificial defects of the test sample, which are located at different depths, is shown in Figure 5b.

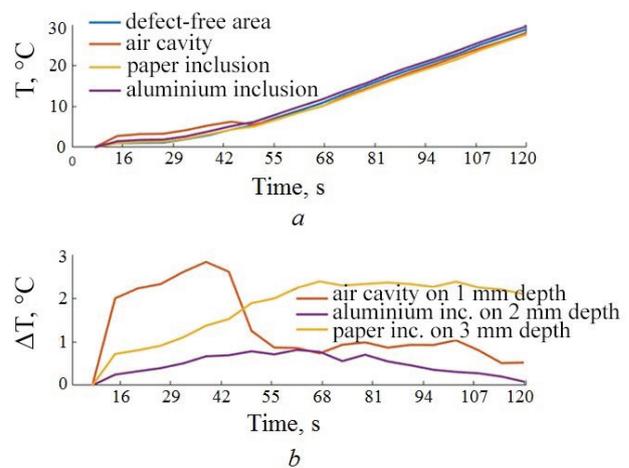


Figure 5 – Signals from the defect-free area and the defects of test sample: *a* – temperature profiles at a 3 mm depth; *b* – differential temperature signals at different depths

To form a set of training vectors for neural network modules, two training samples were developed and manufactured. The material, structure and geometric dimensions of the training samples correspond to similar parameters of test sample. The procedure of training samples testing took place according to the method and conditions described for the test sample. Training samples contain artificial internal defects in the form of air cavities, foreign aluminum and paper inclusions with different geometric dimensions, thickness and depth values. In total, 6 artificial models with different parameters were created for each type of defects.

As a result, a set of temperature profiles vectors with a total number of 6545 samples was formed. This set includes 3605 examples of temperature profiles from defect-free areas, 1414 profiles of defects in the form of air cavities, 1019 profiles of defects in the form of paper inclusions and

507 profiles of defects in the form of aluminum inclusions. Training dataset is characterized by a certain unevenness, which arose due to the limited number of training samples. The set of training vectors was divided into training/validation/test subsets in the proportion of 70 %/15 %/15 % respectively.

In order to process the experimental sequence of thermograms of the test sample, neural networks of appropriate modules for detection and classification,

determination of depth and thickness of defects were created and trained. To solve these tasks, it is advisable to choose the architecture of neural networks for the detection and classification of defects, which is shown in Figure 6. Architecture of networks for determining defects depth and thickness is similar. The input layer contains 20 neurons, which corresponds to the number of thermograms in sequence. The source layer contains 4 (according to the number of classes) or 1 neuron.

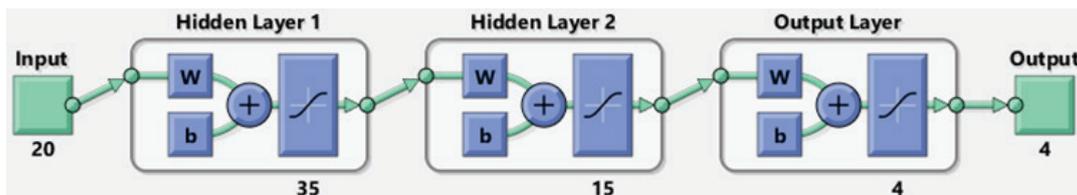


Figure 6 – Architecture of defect detection and classification neural network

The Levenberg-Markard algorithm was used as an optimizer. Loss function – MSE, metric – MAE. According to the training results, MAE of defects depth determination on the validation set was 0.028 mm, MAE of thickness determination was 0.019 mm.

The defects map, obtained by the results of work of trained neural network module for defects detection and classification, is shown in Figure 7. All 12 artificial defects were detected and unmistakably classified on the map. Defects color on the map corresponds to their depth.

The shape and size of the defects are close to true ones. In the image we can see some dots of incorrectly classified temperature profiles, which can be filtered by a median filter. In addition, Figure 7 also shows binary defect maps obtained using classical methods: optimal thermogram, Fourier and wavelet analysis methods, principal components analysis method (PCA), and dynamic thermal tomography (DTT). Visually it is possible to notice the increased efficiency of offered system on the basis of deep learning in comparison with classical methods.

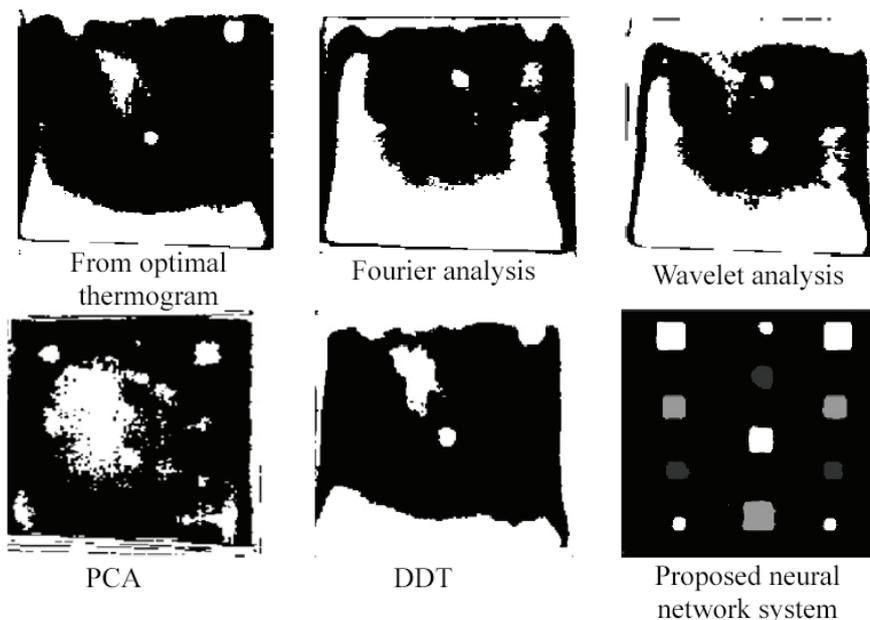


Figure 7 – The results of processing experimental data by traditional methods and using the proposed system

Figure 8 shows the thermal tomogram obtained by the DTT method and the image of test sample internal structure, which was built on the results of proposed system. At the defects boundaries there are negative edge effects in the form of anomalous

emissions. This effect can be eliminated using median filtering. In general, image of the internal structure is reliable. Quantitative evaluation of certain parameters and comparison of results with traditional methods is given below.

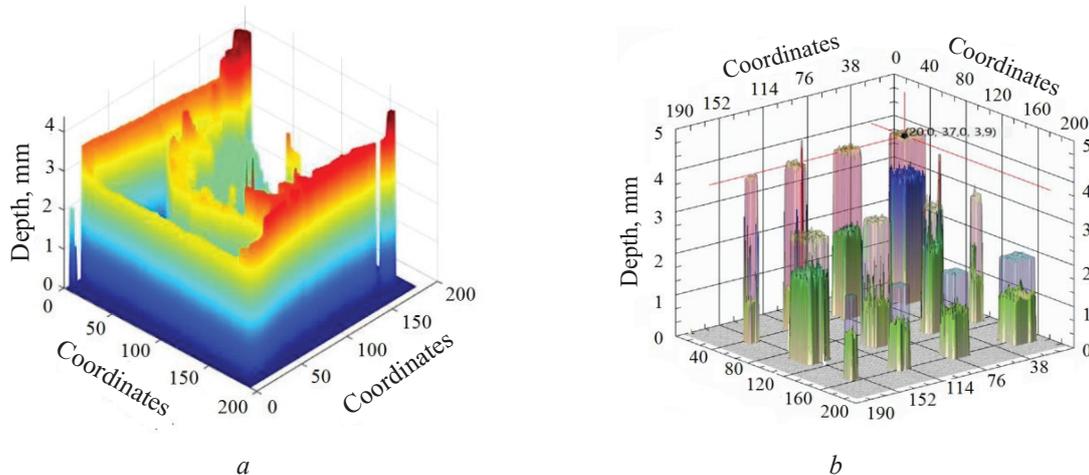


Figure 8 – Results of processing experimental data: *a* – thermal tomogram by DTT method; *b* – internal structure of the OT (by proposed system)

Discussion

According to the results of quantitative evaluation of effectiveness of defects detecting in test sample by different methods (Table), it is established that the best results are demonstrated

by developed automated system based on deep learning. In particular, the use of neural networks is only method by which it was possible to detect all 12 artificial defects and automatically classify them.

Table

Results of thermograms sequence processing by different methods

Criterion / method	Thermogram	Fourier analysis	Wavelet analysis	PCA	DTT	Neural network
The number of detected defects	8	10	7	11	8	12
Defect classification error, %	–	–	–	–	–	15.7
Tanimoto criterion, %	19.5	10.9	6.4	23.6	7.0	88.1
Depth estimation error, %	–	–	–	–	–	±3.2
Thickness estimation error, %	–	–	–	–	–	±3.5

The neural network module for defects detection and classification allows to determine the size of defects by their thermal imprints with the highest accuracy among considered methods. Temperature profiles were automatically classified with an error of 15.7 %. The value of Tanimoto criterion [15]

at 88.7 % confirms the high reliability of constructed defects map.

In considered conditions of testing the use of deep learning is the only method that gives chance to define defects depth effectively. Corresponding neural network module allows to determine the depth

of artificial defects of in test sample with a relative error within $\pm 3.2\%$. DTT method in a similar task showed negative results, which makes it impossible to assess the accuracy of determining defects depth.

Relative error in determining defects thickness by neural network module is $\pm 3.5\%$. Constructed thermal tomogram of the internal structure of sample is generally reliable, but at the boundaries of some defects there are negative boundary effects. Therefore, the thickness measurement must be performed at the central points of thermal imprints of the defects.

Consequently, the use of proposed automated system based on deep learning demonstrates the advantages of neural network modules over traditional methods in all testing tasks. Due to the high noise immunity and generalizing properties of neural networks, the presence of non-uniform heating has a weak effect on the efficiency of defects detection in multilayer materials and the accuracy of measuring their parameters.

Conclusion

In the paper offered to use the deep learning approach for automation of thermal defectometry of products from multilayer materials. The system for implementation of this method consists of three modules based on neural networks. Modules are designed to solve tasks of defects classification by type, determining their depth and thickness. Experimentally established that developed automated system allowed to detect and classify all artificial defects embedded in the test sample, and to estimate their depth with an error within $\pm 3.2\%$ and thickness with an error up to $\pm 3.5\%$. Defect maps constructed as a result of processing experimental data using the proposed system have a high reliability according to Tanimoto criterion (88.1%). In addition, the results of comparative analysis show that the developed system has an advantage over traditional methods in qualitative and quantitative indicators.

The main direction for further research is to optimize the architecture of neural networks of relevant system modules by using the latest advances in deep learning. In particular, it is proposed to introduce normalization and dropout layers into the network architecture, to change the training optimization algorithm and activation function of fully connected layers. An important task is also the formation of a wide training samples dataset with

different defects and materials configurations. This will expand the scope of developed automated system without the need to retrain neural networks for each individual task or type of multilayer material.

References

1. Galagan R.M. Analysis of application of neural networks to improve the reliability of active thermal NDT. *KPI Science News*, 2019, no. 1, pp. 7–14.

DOI: 10.20535/kpi-sn.2019.1.157374

2. Jiangang S. Analysis of data processing methods for pulsed thermal imaging characterisation of delaminations. *Quantitative InfraRed Thermography Journal*, 2013, vol. 10, pp. 9–25.

DOI: 10.1080/17686733.2012.757860

3. Ahmed J., Gao B., Woo W.L., Wavelet-Integrated Alternating Sparse Dictionary Matrix Decomposition in Thermal Imaging CFRP Defect Detection. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 2019, vol. 15, no. 7, pp. 4033–4043.

DOI: 10.1109/TII.2018.2881341

4. Vavilov V.P. Dynamic thermal tomography: Recent improvements and applications. *NDT&E International*, 2018, no. 135, pp. 129–141.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2014.09.010

5. Dudzik S. Analysis of the accuracy of a neural algorithm for defect depth estimation using PCA processing from active thermography data. *Infrared Physics & Technology*, 2013, no. 56, pp. 1–7.

DOI: 10.1016/j.infrared.2012.08.006

6. Balageas D., Maldague X., Burleigh D., Vavilov V.P., Oswald-Tranta B., Roche J.-M., Pradere C., Carlomagno G.M. Thermal (IR) and other NDT techniques for improved material inspection. *Journal of Nondestructive Evaluation*, 2016, vol. 35, no. 1, article 18, 17 p. **DOI:** 10.1007/s10921-015-0331-7

7. Marani R., Palumbo D., Reno V. Modeling and classification of defects in CFRP laminates by thermal non-destructive testing. *Composites Part B: Engineering*, 2018, no. 135, pp. 129–141.

DOI: 10.1016/j.compositesb.2017.10.010

8. Hellstein P., Szwedo M. 3D thermography in non-destructive testing of composite structures. *Measurement Science and Technology*, 2016, vol. 27, no. 12, article id. 124006. **DOI:** 10.1088/0957-0233/27/12/124006

9. Vavilov V.P., Nesteruk D.A. *Aktivnyj teplovoj kontrol' kompozicionnyh materialov s ispol'zovaniem nejronnyh setej* [Active thermal testing of composite materials using neural networks]. *Defektoskopiya* [Defectoscopy], 2011, no. 10, pp. 10–18 (in Russian).

10. Saeed N., Omar M.A., Abdulrahman Y. A neural network approach for quantifying defects depth,

for nondestructive testing thermograms. *Infrared Physics & Technology*, 2018, no. 94, pp. 55–64.

DOI: 10.1016/j.infrared.2018.08.022

11. Chulkov A.O., Nesteruk D.A., Vavilov V.P. An Automated Algorithm for Constructing Maps of Defects in Active Thermal Testing. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2019, vol. 55, pp. 617–621.

DOI: 10.1134/S1061830919080035

12. Vavilov V., Plesovskikh A., Chulkov A. A complex approach to the development of the method and equipment for thermal nondestructive testing of CFRP cylindrical parts. *Composites Part B: Engineering*, 2015, vol. 68, pp. 375–384.

DOI: 10.1016/j.compositesb.2014.09.007

13. Ciampa F., Mahmoodi P., Pinto F., Meo M. Recent Advances in Active Infrared Thermography for Non-Destructive Testing of Aerospace Components. *Sensors*, 2018, vol. 18(2), article id. 609.

DOI: 10.3390/s18020609

14. Momot A., Galagan R. Influence of architecture and training dataset parameters on the neural networks efficiency in thermal nondestructive testing. *Sciences of Europe*, 2019, no. 44, pp. 20–25.

15. Chulkov A.O. Analyzing efficiency of optical and THz infrared thermography in nondestructive testing of GFRPs by using the Tanimoto criterion. *NDT & E International*, 2021, vol. 117, article id. 102383.

DOI: 10.1016/j.ndteint.2020.102383

Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeyeu, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya

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

Received 22.04.2021

Accepted for publication 14.06.2021

Abstract

One of the ways to solve multiple problems of optical diagnostics is to use photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurities which form several energy levels with different charge states within the semiconductor's bandgap. Peculiarities of physical processes of recharging these levels make it possible to construct photodetectors with different functionality based on a range of simple device structures.

The aim of this work is to analyze peculiarities of conversion characteristics of single-element photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity, to systematize their properties and to represent structures of photovoltaic converters as a device structures suitable for implementation in measurement transducers of optical diagnostics systems.

Based on the analysis of the characteristics of the conversion characteristics of single-element photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity and the requirements for their design, a dash series of photovoltaic converters was developed for use in the measuring transducers of optical diagnostics systems. The possibility of constructing functional measuring transducers for multiparameter measurements of optical signals is shown.

Keywords: photovoltaic converter, device structure, deep impurity, conversion characteristic, measurement transducer.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeyeu, A.I. Svistun,
A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya.

Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors
with Intrinsic Photoconductivity.

Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 108–116.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

For citation:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeyeu,
A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya.

Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors
with Intrinsic Photoconductivity.

Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 108–116.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

Приборный ряд фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью

Р.И. Воробей, О.К. Гусев, А.Л. Жарин, К.В. Пантелеев, А.И. Свистун, А.К. Тявловский, К.Л. Тявловский, Л.И. Шадурская

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

Поступила 22.04.2021

Принята к печати 14.06.2021

Одним из способов решения многообразных задач оптической диагностики является использование фотоэлектрических преобразователей на основе полупроводников с собственной фотопроводимостью, слабо легированных глубокими примесями, формирующими несколько уровней с разными зарядовыми состояниями в запрещённой зоне. Особенности физических процессов перезарядки этих уровней позволяют создавать фотоприёмники с различными функциональными возможностями на основе ряда простых приборных структур.

Целью работы является анализ особенностей преобразовательных характеристик одноэлементных фотоэлектрических преобразователей на базе полупроводников с собственной фотопроводимостью, систематизация их свойств, и представление структур, представленных ФЭП в виде приборного ряда фотоэлектрических преобразователей для применения в измерительных преобразователях систем оптической диагностики.

На основе анализа особенностей преобразовательных характеристик одноэлементных фотоэлектрических преобразователей на базе полупроводников с собственной фотопроводимостью и требований к их конструкции разработан приборный ряд фотоэлектрических преобразователей для применения в измерительных преобразователях систем оптической диагностики. Показана возможность построения функциональных измерительных преобразователей для многопараметрических измерений оптических сигналов.

Ключевые слова: фотоэлектрический преобразователь, приборная структура, глубокая примесь, преобразовательная характеристика, измерительный преобразователь.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

Адрес для переписки:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Address for correspondence:

Тявловский К.Л.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeuev, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya.

Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity.

Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 108–116.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

For citation:

R.I. Vorobey, O.K. Gusev, A.L. Zharin, K.U. Pantsialeuev, A.I. Svistun, A.K. Tyavlovsky, K.L. Tyavlovsky, L.I. Shadurskaya.

Series of Photovoltaic Converters Based on Semiconductors with Intrinsic Photoconductivity.

Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 108–116.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-108-116

Introduction

Optical diagnostics tasks are associated with registration and analysis of optical radiation parameters which are formed during interaction of probing light with an object studied and light-scattering media. In some cases, the source of radiation is the object itself. At the same time functional capabilities of optical diagnostics systems and performance of their measurement transducers are largely determined by photovoltaic converters that convert one or several parameters of optical irradiation including absolute and relative intensity of spectral lines, half-width, shape of spectral lines, etc. [1–4]. Therefore implementation of photovoltaic converters (PVCs) based on semiconductors with intrinsic photoconductivity into measurement transducers for optical diagnostics is of great interest since that PVCs provide a set of new qualitative and quantitative characteristics using rather simple device structure [5].

The aim of this work is to analyze peculiarities of conversion characteristics of single-element photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity, to systematize their properties and to represent structures of presented PVC as a device structures range suitable for implementation in measurement transducers of optical diagnostics systems.

Fundamentals of photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photo-conductivity

Physical principles of operations of PVCs based on semiconductors with intrinsic photoconductivity [5] could be described as integration of processes inside sensitive region volume associated with sequential recharging of various charge states of deep impurity (Figure 1). In photodetectors with intrinsic photoconductivity slightly doped with a number of acceptor impurities [5] the impurity forms two or three deep levels in several charge states. In this case performance of device structure with deep multiply charged impurities is determined, at large, by recombination processes through impurity levels [5, 6].

Several energy levels participating in formation of PVC conversion characteristics (Figure 1) provide switching capability for energetic, spectral and transition sensitivity characteristics of PVC making it possible to switch between several

conversion subranges (regions). The physical nature of switching between different regions of conversion characteristics of PVC based on semiconductors with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep multiple charged impurity is due to a change in lifetime and mobility [5] of minority carriers resulting from their redistribution over recombination levels and adherence of multiple charged impurity. For PVCs based on semiconductors with acceptor impurity the shift in lifetime and recombination constant with level population change reaches several decimal orders of magnitude [5–7] while multiple charged donor impurity (Se, S, Zn for Silicon) produces shifts below 1%, which is due to the fact that the energy levels of the impurity are already filled (Figure 1, Se impurity).

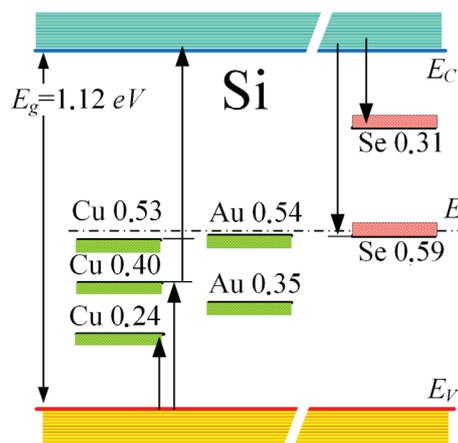


Figure 1 – Band diagram of Silicon doped with acceptor (Cu, Au) and donor (Se) impurities which form multiple charge levels, with the given values of the ionization energy

Formation of characteristics of PVCs with intrinsic photoconductivity based on semiconductors with a low concentration of deep multiply charged impurity is described by updated model of recombination processes for impurity with arbitrary number (i) of levels inside semiconductor's bandgap [5, 6]. The modeling¹ determines dependencies (1) of impurity levels population for different charge states and dependencies of majority and minority carriers' lifetime on the power density of optical radiation:

1. Shadurskaya L.I., Yarzhebbitskaya N.V. [Method for calculating the lifetime of nonequilibrium charge carriers in semiconductors with several types of defects]. *Teoreticheskaya i prikladnaya mehanika* [Theoretical and Applied Mechanics]: sc. art. collection. – Minsk, 2005, vol. 18, pp. 217–223 (in Russian).

$$\tau_n = \frac{\Delta n}{U_{n1} + U_{n2}}; \quad \tau_p = \frac{\Delta p}{U_{p1} + U_{p2}}. \quad (1)$$

PVC design is relatively simple and could be formed by photoresistive or surface-barrier device structure with different configuration of planar and/or two-sided system of electrodes some of which could be semitransparent or represent, for example, quarter-wave philter [4–5, 8]. The use of barrier regions (heterojunctions, Schottky barriers) in device structures makes it possible to obtain conversion characteristics with the inversion of sign. In this case the control action causing switching between different regions of conversion characteristics can be various factors [4–5, 9], including their combinations: input optical radiation intensity (internal control), lowering energy barrier height under photo-generated carriers injection through it (internal amplification of a barrier structure under forward bias), carriers injection from external bias source via additional electrode (external electrical control), recharging of multiply charged impurity levels by additional controlling optical radiation (external optical control). Functionality and conversion characteristics parameters of these PVCs could be controlled by appropriate choice of structure and basic semiconductor material, production technology, power supply and bias modes, additional optical radiation [5, 9].

PVCs with internal control

The most simple device structure that is formed by a bulk semiconductor with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurity forming several levels inside bandgap for different charge states (Figure 1) and an applied ohmic contacts in planar (Figure 2a) or two-sided (Figure 2b) structure corresponds to PVC with internal control.

Figure 3 shows energy conversion characteristics of PVC with intrinsic photoconductivity doped with multiple charged acceptor (lines *a* and *b* for different semiconductor and impurity materials – indices *i*, *j*) and donor (line *c*) impurities. For comparison the energy sensitivity characteristic of fotodetector based on semiconductor with impurity conductivity (*d*) is also shown. For a PVC based on a semiconductor with intrinsic photoconductivity doped with a singly charged impurity only region I of energetic sensitivity characteristic is implemented. Internal control of the conversion characteristics type (Figure 3) is realized due to the fact that at low

intensities of the optical signal [5] photoconductivity is caused by energy transition between the valence band and the lower energy level of the multiply charged impurity in the charge state (-1, -2) that forms sensitivity region I (Figure 3). With a further increase in the intensity of optical radiation the lower level becomes completely filled and photoconductivity is formed also by higher level in the charge state (-2, -3). This leads to lengthening of PVC energy characteristic (region II on Figure 3), on a logarithmic scale, about twice comparing with energy characteristic of photodetectors with impurity conductivity. Region III is transitional and is characterized by a nonlinear dependence of the photocurrent *i* on the optical radiation intensity *j*. In characteristic's regions I and II this dependence is linear. Significant increase of the dynamic range for PVCs with intrinsic photoconductivity is a positive property that determines the insensitivity of such PVCs to intense "flares" but it should be noted that absolute values of sensitivity of PVCs with intrinsic photoconductivity are lower than sensitivity of PVCs with impurity conductivity.

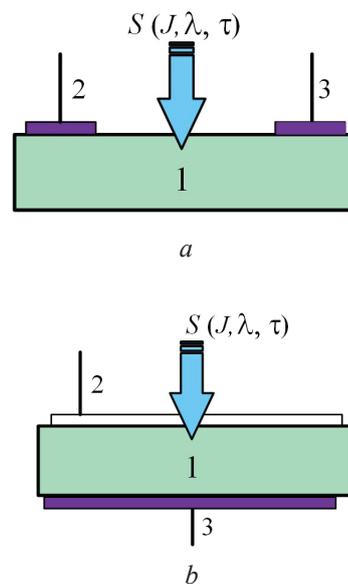


Figure 2 – Planar (*a*) and two-sided (*b*) device structures of a PVC with internal control: 1 – semiconductor with intrinsic photoconductivity slightly doped with deep impurity; 2, 3 – contacts; *S* – input optical signal

Switching between the sensitivity subrange, internally controlled by the intensity of the measured optical radiation itself leads not only to an increase in the dynamic range of the energy characteristic. The formation of subranges with different sensitivity due

to transitions between levels with different ionization energies leads also to the shift in the "red" border of PVC's spectral sensitivity. Combination of basic semiconductor material type (Silicon, Germanium, binary compositions) and impurity type (Fe, Pt, Au, Cu etc.) provides switching between spectral sensitivity characteristic types under the influence of the intensity of the input optical radiation with a different values of shift of sensitivity "red" border (Figure 4). Switching time between sensitivity subranges of PVC's energy and spectral conversion characteristics is determined by the lifetime constant of charge carriers.

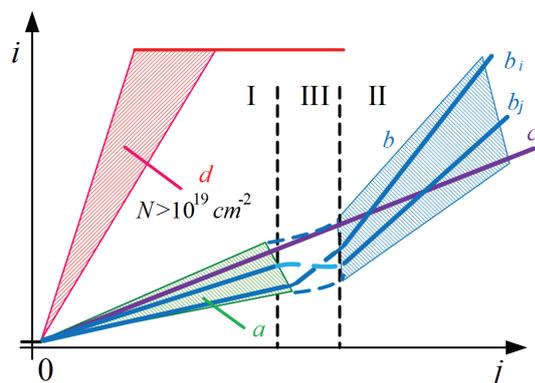


Figure 3 – PVC's energetic conversion characteristics

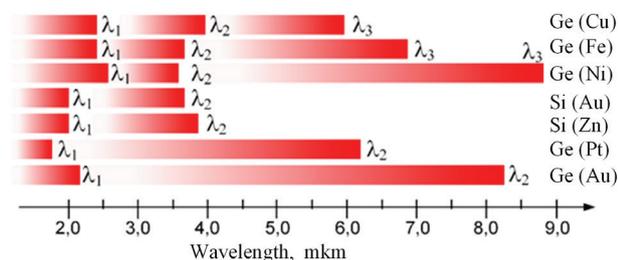


Figure 4 – Change of red border of spectral sensitivity for PVCs with multiply charged impurity centers for different materials

The use of optical filters in the form of films with a passband around wavelengths λ_1 and λ_2 makes it possible to form a single-element PVC with switchable narrowband spectral characteristics. Switching time between different characteristics is determined by the lifetime constant of charge carriers.

Note that switching between sensitivity subranges for all types of characteristics is realized only when using acceptor type impurities. Since the levels of the donor impurity are already filled at any injection level, the switching between subranges does not occur although the energy conversion characteristic of the PVC is lengthened (line *c* on Figure 3).

Photoresistive PVCs with external electrical control

Population of different levels of multiply charged impurity could be changed not only under the influence of changes in the intensity of the input optical radiation but also due to injection of charge carriers into photosensitive region via additional controlling electrode 4 (Schottky barrier) as shown on Figure 5.

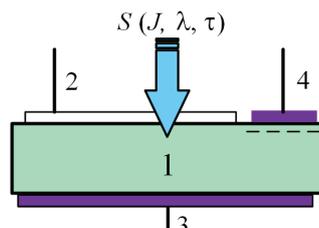


Figure 5 – Device structure of the PVC with external electrical control

The shape of conversion characteristics of PVCs with external electrical control does not differ from the characteristics of PVCs with internal control but switching between sensitivity subranges (Figures 3 and 4) can be performed at any time and at any intensity of the input optical radiation by passing a current through the control electrode.

Photoresistive PVCs with external optical control

Similarly to PVC with external electrical control, the population of the levels of a multiply charged impurity can be changed by additional optical radiation *M* (Figure 6). Switching between sensitivity subranges requires some threshold intensity of optical radiation *M* [5, 9]. The switching process is similar to that implemented in the previous device structures, and also occurs in a time determined by the lifetime constant of charge carriers. Since the processes of changes in the level population and carrier lifetime constants (1) do not depend on the physical nature of the cause of change in the level population, it is possible to implement combined optoelectronic control in one PVC device structure (Figure 6b).

Another device structure that makes it possible to significantly expand the range of realized parameters values by the use of the combined technology is a structure based on several semiconductor materials epitaxially grown on a common sapphire substrate.

Close values of a number of sapphire's and many semiconductor materials' parameters (crystal lattice constant, thermal expansion coefficients) make it possible to fabricate device structures based on dissimilar materials [10–13]. Figure 7 shows the basic device structure of a photovoltaic converter based on semiconductor 1 with a deep multiply charged

impurity which characteristics are controlled by optical radiation M generated by light-emitting diode 4–5. In this case the input optical signal S can be led into the PVC structure both from the side of the semiconductor layers S_1 , and through the substrate (S_2) since sapphire is also characterized by excellent optical properties in the near and middle IR optical range.

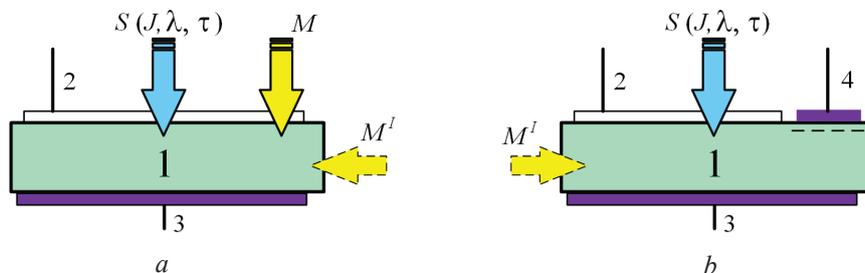


Figure 6 – Device structure of the PVC with external optical (a) and combined (b) control

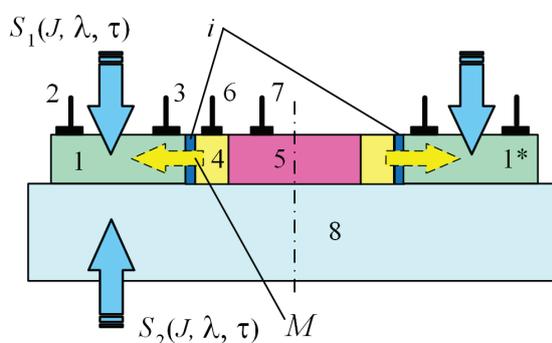


Figure 7 – Device structure that combines PVC structure with external optical control and a controlling light-emitting diode: 1 – PVC; 2, 3 – PVC contacts; 4–5 – light-emitting diode; 6, 7 – light-emitting diode contacts; 8 – sapphire substrate; S – measured optical signal; M – controlling optical signal; i – insulating immersion layer

Such a structure (Figure 7) allows combining the technologies of light-emitting devices based

on semiconductor compounds A^3B^5 , photodetector structures based on Si, Ge, Si: Ge and other materials, integral structures of amplifier and signal processing circuits and also "Non-Silicon" technologies on one substrate [12, 13]. This structure can also serve as a basis for designing functional PVCs.

PVC with internal amplification

In the PVC device structure shown on Figure 8 the main electrodes form Schottky barriers and a PVC itself is essentially a diode structure with a long base and a two oppositely connected Schottky diodes. When using barrier structures as PVC, optical modulation of the Schottky barrier height produces the effect of internal photocurrent multiplication [9, 14], which occurs at forward bias, in contrast to classic avalanche and other devices operating at reverse bias, and therefore at high bias voltages.

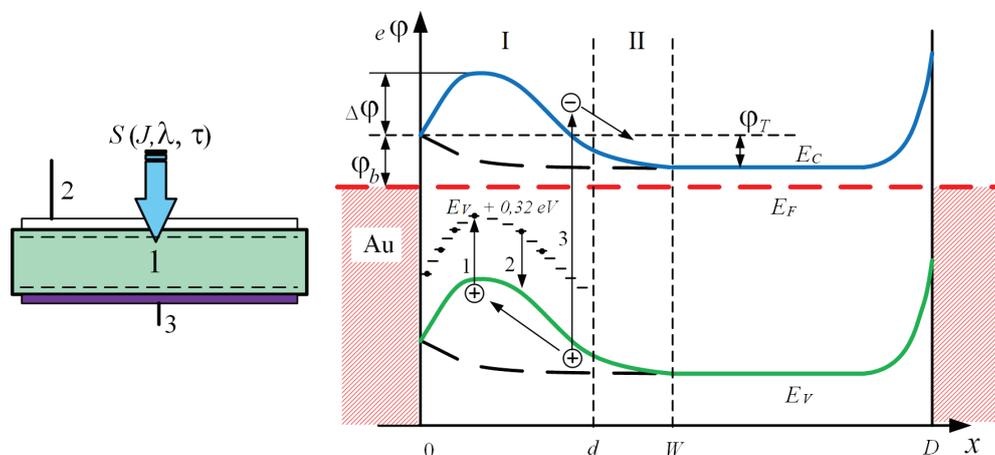


Figure 8 – Structure of a two-barrier photodetector with internal amplification in region I

Besides that a PVC design with oppositely connected barrier structures implements spectral response characteristic with a photovoltage sign inversion [5, 9]. In this case single-element two-barrier PVCs allow to measure the intensity of optical radiation with simultaneous determination of optical radiation wavelength just by changing the power supply mode of the photodetector without necessity to use any optical dispersing elements which greatly simplifies the design of the measuring transducer.

Functional PVCs

Forming the variety of single-element PVC characteristics (Figures 2, 4–8) not due to the complexity of the device structure, but due to the use of peculiar features of the multistage physical processes of recharging various deep impurities levels makes it possible to build multifunctional

sensors that utilize basic single-element PVC designs just by changing electrode configurations and bias feed schemes [5, 8–9].

The principle of position-sensitive photodetector (Figure 10) is based on the use of the lateral photovoltage measuring signal to determine the X and Y coordinates of the light spot and the position of the focused light spot to determine the Z coordinate [9]. The device structure has 5 contacts to get signals on X and Y coordinates and 2 contacts to form signal on Z coordinate of the light spot of object image. Photovoltage indices on PVC conversion characteristics correspond to structure's contact numbers.

Physical processes that determine the dependence of the lateral photovoltage between contacts 3–3* on the depth of the focused image also lead to photovoltage sign inversion on a spectral curve (Figure 9).

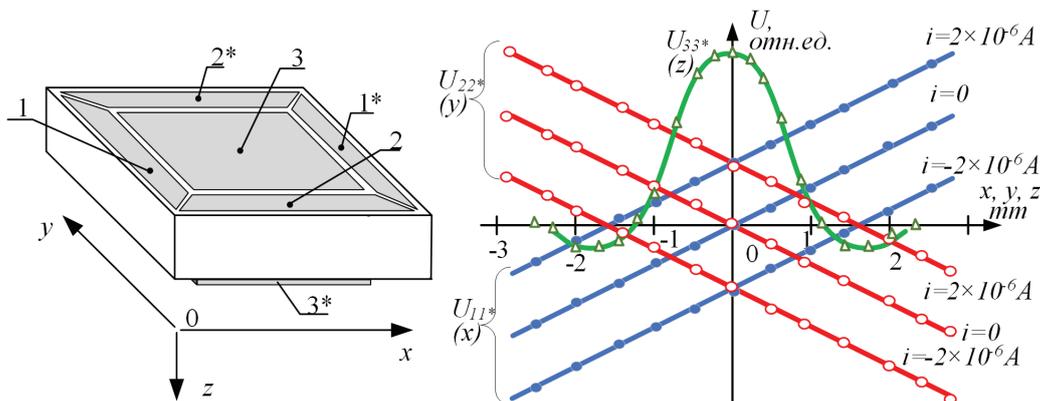


Figure 9 – Structure of a three-coordinate position-sensitive PVC and its characteristics

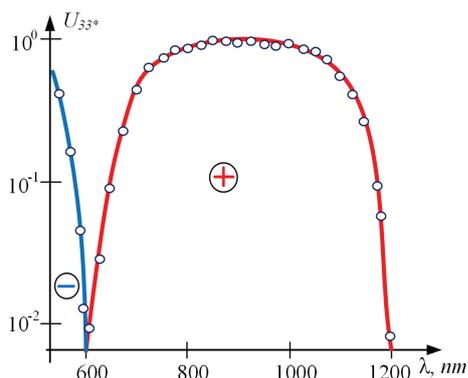


Figure 10 – Spectral characteristic of a three-coordinate position-sensitive PVC

PVC structure based on semiconductor with intrinsic photoconductivity that is shown on Figure 11 acts an optical comparator comparing two optical signals by such parameters as: optical radiation

intensity, monochromatic radiation wavelength, position and shape of the optical spot [5, 9] of optical signals S_1 and S_2 applied to different sides A and B of a single-element functional PVC.

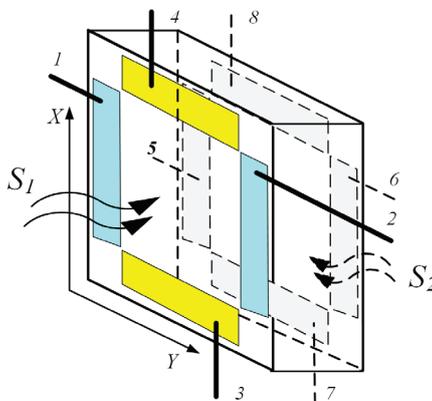


Figure 11 – Optoelectronic comparator based on single-element two-barrier coordinate-sensitive PVC

Since ionization of deep impurity with several energy levels for different charge states can occur under the influence of various factors, it is possible to design functional PVCs sensitive to input influences of various physical nature [4–5, 9] on a basis of given structures range of PVCs based on semiconductors with intrinsic photoconductivity. PVC performance could be Improved or modified by various technological methods, e. g. profiling the surface of the PVC to reduce the optical reflection coefficient.

Conclusion

Here was shown that device structures based on semiconductors with low concentration of deep impurity slightly doped with deep impurities forming several levels with different charge states within semiconductor's bandgap could be used to create photovoltaic converters with different functionality using basic device structures range.

Analysis of conversion characteristics peculiarities of single-element photovoltaic converters based on semiconductors with intrinsic photoconductivity and systematization of their performance and structures makes it possible to represent possible PVC structures range as following:

- PVCs with internal control;
- Photoresistive PVCs with external electrical control;
- Photoresistive PVCs with external optical control;
- PVCs with combined control;
- PVCs with internal amplification;
- Functional PVCs.

Using structures range of single-element PVC based on a semiconductor with intrinsic photoconductivity in measurement transducers for optical diagnostics provides measurement of both optical radiation parameters (intensity, wavelength) with automatic or controlled switching between measurement subranges and other physical quantities for functional PVCs.

Examples of constructing functional PVCs using a basic device structures range of single-element PVCs based on a semiconductor with intrinsic photoconductivity are shown.

References

1. Lysenko S.A. *Metody opticheskoy diagnostiki biologicheskikh ob"ektov* [Methods for Optical

Diagnostics of Biological Objects]. Minsk: BGU Publ., 2014, 231 p.

2. Filachev A.M., Taubkin I.I., Trishenkov M.A. *Fotopriemniki v optiko-ehlektronnykh priborakh i sistemakh* [Photodetectors in Optoelectronic Devices and Systems]. Moscow: Fizmatkniga Publ., 2016, 104 p.

3. Formozov B.N. *Aehrokosmicheskie fotopriemnye ustrojstva v vidimom i infrakrasnom diapazonakh* [Aerospace Photodetectors in the Visible and Infrared Ranges]. St. Petersburg: SPbGUAP Publ., 2002, 120 p.

4. Gusev O.K., Vorobey R.I., Zharin A.L., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L. *Metodologiya i sredstva izmerenij parametrov ob"ektov s neopredelennymi sostoyaniyami* [Methodology and Tools for Measuring Parameters of Objects in Uncertain States], ed. O.K. Gusev. Minsk: BNTU Publ., 2010, 582 p.

5. Vorobey R.I., Gusev O.K., Tyavlovsky A.K., Tyavlovsky K.L., Svistun A.I., Shadurskaya L.I., Yarzhebetskaya N.V., Kierczynski K. Photoelectric semiconductor converters with a large dynamic range. *Przeglad elektrotechniczny*, 2014, no. 5, pp. 5–78.

DOI: 10.12915/pe.2014.05.16

6. Bondar I.V., Rud V.Yu., Rud Yu.V. [Photovoltaic Effects in Cu(Al, In)/p-CuIn₃Se₅ Schottky Barriers]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Technology], 2007, vol. 41, no. 1, pp. 44–47 (in Russian).

7. Yashin A.N. [Applicability of the simplified Shockley-Reed-Hall model for semiconductors with various types of defects]. *Fizika i tekhnika poluprovodnikov* [Semiconductor Physics and Technology], 2005, vol. 39, no. 11, pp. 1331–1335. (in Russian).

8. Masol I.V., Osinsky V.I., Sergeev O.T. *Informatsionnye nanotekhnologii* [Informational Nanotechnology]. Kiev: Makros Publ., 2011, 560 p.

9. Gusev O.K., Tyavlovsky K.L., Vorobey R.I., Svistun A.I., Shadurskaya L.I. [Intrinsic Semiconductor-Based Photodetectors for Measurement Transducers Construction]. *Metrologiya i priborostroyeniye* [Metrology and Instrument Engineering], 2017, no. 2, pp. 34–42 (in Russian).

10. Andreou A.G., Kalayjian Z.K., Apsel A., Pouliquen P.O., Athale R.A., Simonis G., Reedy R. Silicon on sapphire CMOS for optoelectronic microsystems. *Circuits and Systems*, 2001, vol. 1, pp. 22–30.

DOI: 10.1109/7384.963464

11. Kozlov Yu.F., Zotov V.V. *Struktury kremniya na sappfire: tekhnologiya, svoystva, metody kontrolya, primenenie* [Silicon on Sapphire structures: Technology, Properties, Methods of Control, Applications]. Moscow: MIET Publ., 2004, 380 p.

12. Vityaz P.A., Svidunovich N.A., Kuis D.V. *Nanomaterialovedenie* [Nanomaterials Science]. Minsk: Vysheyshaya Shkola Publ., 2015, 511 p.

13. Wado H., Ohtani K., Ishida M. Epitaxial growth of SiGe on Al₂O₃ using Si₂H₆ gas and Ge solid source molecular beam epitaxy. *J.Crystl.Growth*, 1996, vol. 169,

pp. 457–462. **DOI:** 10.1016/S0022-0248(97)80004-8

14. Khudaverdyan S.Kh. Photo-detecting characteristics of double barrier structures. *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research A.*, 2003, vol. 504, iss. 1–3, pp. 350–353.

DOI: 10.1016/S0168-9002(03)00768-X

Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology

A.A. Kolomeitsev¹, I.A. Zatonov¹, M.I. Pischanskaya¹, P.F. Baranov¹, D.P. Ilyaschenko^{2,3},
E.V. Verkhoturova⁴

¹Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30a, Tomsk 634050, Russia

²Yurga Institute of Technology National Research Tomsk Polytechnic University,
Leningradskaya str., 26, Yurga 652055, Russia

³Institute of Strength Physics and Materials Science of Siberian Branch Russian Academy of Sciences,
Academic Ave., 2/4, Tomsk 634055, Russia

⁴Irkutsk National Research Technical University,
Lermontov str., 83, Irkutsk 664074, Russia

Received 12.04.2021

Accepted for publication 26.05.2021

Abstract

The development of novel methods, scientific devices and means for measuring magnetic fields generated by ultra-low current is among promising directions in the development of medical equipment and instruments for geodetic surveys and space exploration. The present work is to develop a small sensor capable of detecting weak magnetic fields, which sources are biocurrents, radiation of far space objects and slight fluctuations of the geomagnetic field. Scientists estimate the strength of such magnetic fields as deciles of nanotesla.

The key requirements for the sensors of ultra-low magnetic field are: resolution, noise level in the measurement channel, temperature stability, linearity and repeatability of the characteristics from one produced item to another. The aforementioned characteristics can be achieved by using planar technologies and microelectromechanical systems (MEMS) in such advanced sensors.

The work describes a complete R&D cycle, from creating the computer model of the sensor under study to manufacturing of a working prototype. To assess the effect of the geometry and material properties, the Jiles–Atherton model is implemented which, unlike the majority of the models used, allows considering the non-linearity of the core, its hysteresis properties and influence of residual magnetization.

The dimensions of the developed sensor are 40×20×5 mm, while the technology allows its further diminishment. The sensor has demonstrated the linearity of its properties in the range of magnetic field strength from 0.1 nT to 50 μT for a rms current of excitation of 1.25 mA at a frequency of 30 kHz. The average sensitivity for the second harmonic is 54 μV/nT.

Keywords: magnetometer, planar fluxgate, magnetic induction, Jiles–Atherton model, printed circuit board.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

Адрес для переписки:

Ильященко Д.П.
Юргинский технологический институт (филиал) Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
ул. Ленинградская, 26, г. Юрга 652055, Россия
e-mail: mita8@rambler.ru

Address for correspondence:

Ilyaschenko D.P.
Yurga Institute of Technology National Research Tomsk
Polytechnic University,
Leningradskaya st., 26, Yurga 652055, Russia
e-mail: mita8@rambler.ru

Для цитирования:

A.A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya, P.F. Baranov,
D.P. Ilyaschenko, E.V. Verkhoturova.

Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology.

Приборы и методы измерений.

2021. – Т. 12, № 2. – С. 117–123.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

For citation:

A.A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya, P.F. Baranov,
D.P. Ilyaschenko, E.V. Verkhoturova.

Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology.

Devices and Methods of Measurements.

2021, vol. 12, no. 2, pp. 117–123.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

Проектирование планарного феррозондового датчика по технологии печатных плат

А.А. Коломейцев¹, И.А. Затонов¹, М.И. Пищанская¹, П.Ф. Баранов¹, Д.П. Ильященко^{2,3},
Е.В. Верхотурова⁴

¹Томский политехнический университет,
пр-т Ленина, 30а, г. Томск 634050, Россия

²Юргинский технологический институт (филиал) Национального исследовательского
Томского политехнического университета,
ул. Ленинградская, 26, г. Юрга 652055, Россия

³Институт физики прочности и материаловедения Сибирского отделения Российской академии наук,
пр-т Академический, 2/4, г. Томск 634055, Россия

⁴Иркутский национальный исследовательский технический университет,
ул. Лермонтова, 83, г. Иркутск 664074, Россия

Поступила 12.04.2021

Принята к печати 26.05.2021

Разработка новых методов, научных приборов и средств для измерения магнитных полей, создаваемых сверхслабыми токами, является одним из перспективных направлений в развитии медицинской техники, геодезических и космических исследований. Целью данной работы являлась разработка малогабаритного датчика, способного детектировать слабые магнитные поля, источниками которых могут быть биотоки, излучения далёких космических объектов и слабые флуктуации магнитного поля земли. Учёные оценивают величины таких магнитных полей в десятые доли нанотесла.

Среди ключевых требований к датчикам сверхслабого магнитного поля можно отнести разрешающую способность, уровень шумов в измерительном канале, температурную стабильность, линейность и повторяемость характеристик от изделия к изделию. Предлагается добиться этих характеристик путём применения планарных технологий и микроэлектромеханических систем при изготовлении современных датчиков.

В работе описан полный цикл исследования, от создания компьютерной модели исследуемого датчика до изготовления рабочего прототипа. Для оценки влияния геометрических параметров и влияния свойств материала использована модель Джилса–Атертона, которая, в отличие от большинства используемых моделей, позволяет учесть нелинейность сердечника, его гистерезисные свойства и влияние остаточной намагниченности.

Габариты разработанного датчика составляют 40×20×5 мм и технически возможно его уменьшение. Разработанный датчик продемонстрировал линейность характеристик в диапазоне от 0,1 нТл до 50 мкТл при среднеквадратическом токе возбуждения 1,25 мА на частоте 30 кГц. Усреднённый коэффициент преобразования по второй гармонике составляет 54 мкВ/нТл.

Ключевые слова: магнитометр, планарный феррозондовый датчик, магнитная индукция, модель Джилса–Атертона, печатная плата.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

Адрес для переписки:

Ильященко Д.П.
Юргинский технологический институт (филиал) Национального
исследовательского Томского политехнического университета,
ул. Ленинградская, 26, г. Юрга 652055, Россия
e-mail: mita8@rambler.ru

Address for correspondence:

Ilyaschenko D.P.
Yurga Institute of Technology National Research Tomsk
Polytechnic University,
Leningradskaya st., 26, Yurga 652055, Russia
e-mail: mita8@rambler.ru

Для цитирования:

A.A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya, P.F. Baranov,
D.P. Ilyaschenko, E.V. Verkhoturova.
Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 117–123.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

For citation:

A.A. Kolomeitsev, I.A. Zatonov, M.I. Pischanskaya, P.F. Baranov,
D.P. Ilyaschenko, E.V. Verkhoturova.
Designing a Planar Fluxgate Using the PCB Technology.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 117–123.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-117-123

Introduction

The measurement of magnetic fields is among crucial problems in the fields of space and geophysical studies [1–2], systems for navigation, orientation and stabilization [3], in quantum computer shields [4–6], magnetic resonance imaging, visualization of brain functions, fault detection and non-destructive testing [7] and many other areas. One more example of magnetometer implementation is a magnetic vacuum system that allows minimizing the influence of external magnetic fields on electronics. Such systems use passive and active methods for shielding magnetic fields. Passive methods are based on the shields from materials with high magnetic permeability. In active methods, the magnetic field is compensated using a system of coils. The coils are a part of a system with feedback; the magnetic field strength is measured by the sensors located in the vicinity of the shielded object. To measure absolute magnetic field strength, magnetic vacuum systems primarily use fluxgate magnetometers; however, the increased quality of magnetic vacuum requires improved characteristics, in particular, the fluxgate sensitivity.

Another important field where fluxgates are used is magnetocardiography [8–10], which differs from widely used electrocardiography by its non-invasive character and high sensitivity.

Existing SQUID-based magnetocardiographers [11] provide high-quality diagnostics of cardiovascular diseases; however, such complexes are affordable only for a small range of diagnostic and treatment centers. This substantiates the issue of the development of a sensitive magnetic measuring sensor with a lower price as compared to SQUID-magnetometers. In a number of articles, the researchers have confirmed the possibility of applying fluxgates for measuring the parameters of cardiac activity [12–14]. One of the advantages of fluxgates is the possibility of its miniaturization and manufacturing by PCB or MEMS technology.

The present article describes a prototype of a generic fluxgate manufactured by the PCB technology.

Fluxgate design

When creating a generic fluxgate sensor, to achieve maximum sensitivity and minimal noise level, three directions can be distinguished:

- optimization of the planar geometry of the sensor;
- enhancement of the methods for its excitation and processing of the measurement information;
- implementation of novel nanostructured materials for the magnetic core of the fluxgate.

In current work we chose the direction connected with the optimization of the planar model of the sensor geometry. Figure 1 depicts the planar design of the fluxgate. The dimensions of the sensor are $40 \times 28 \times 2$ mm.

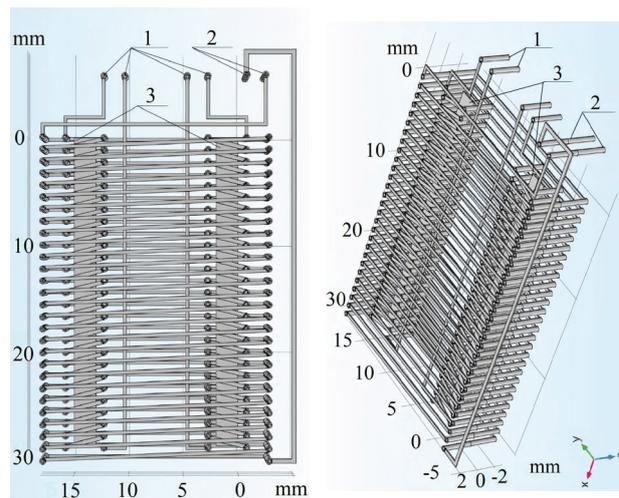


Figure 1 – Fluxgate 3D model: 1 – excitation coils; 2 – measurement coil; 3 – ferromagnetic core

The key element of the fluxgate is the ferromagnetic core. The material of the core was a strip from FINEMET® FT-3H amorphous alloy (Hitachi Metals, Ltd., Japan). The chosen material possesses high permeability, which will allow decreasing the excitation current. In addition, high permeability promotes high induction, while high resistivity decreases eddy-current losses.

To assess the operability of the suggested design, a finite-element modeling was performed in COMSOL software (COMSOL, Inc., Sweden).

The hysteresis properties of the core material were presented using the Jiles–Atherton hysteresis model. Table 1 contains the model parameters presented as diagonal matrices.

Figure 2 presents the magnetization curve plotted for the implemented core material.

At the first stage of modeling, a sinusoidal current of 1.5 mA with a frequency of 25 kHz was fed to the excitation coil of the fluxgate with constant magnetic induction of $9 \mu\text{T}$ along the sensitivity axis of the fluxgate. Figure 3 plots the dependence of the induced EMF in the fluxgate excitation

coil on time and input voltage in the pickup coil. For illustrative purposes, the temporal dependence

of the induced EMF amplitude is shown at a scale of 1:1000.

Table 1

Jiles–Atherton model parameters of Finemet FT-3H core

Parameter	Value	Unit
Interdomain coupling: α	{4.33, 3.952, 4.33}	$\times 10^{-6}$
Saturation magnetization: M_s	{1.31, 1.33, 1.31}	A/mm
Domain wall density: a	{3.8, 3.11, 3.8}	A/m
Magnetization reversibility: c	{736, 652, 736}	$\times 10^{-3}$
Pinning loss: k	{4.11, 3.38, 4.11}	A/m

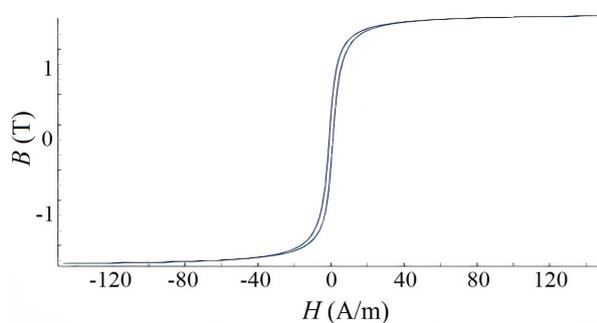


Figure 2 – Hysteresis loop for the core from FINEMET® FT-3H material

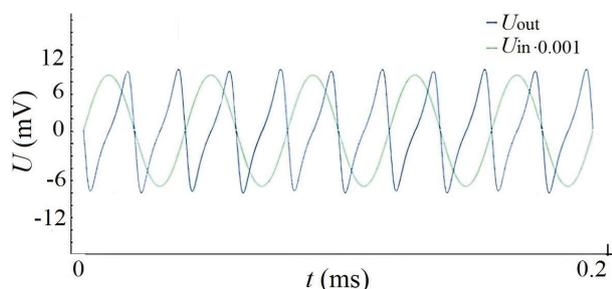


Figure 3 – Input and output signal timing behavior at exciting current of 1.5 mA

Evidently, the output signal of the fluxgate is dominated by the second harmonic of the excitation signal frequency. Over an equal time period, the number of peaks of the output signal is twice larger than that of the input signal. Therefore, the operability of the model is confirmed in line with the conventional differential fluxgate operation theory.

Figure 4 shows the fluxgate output signal spectrum recorded at various values of acting magnetic induction. The excitation conditions are the same.

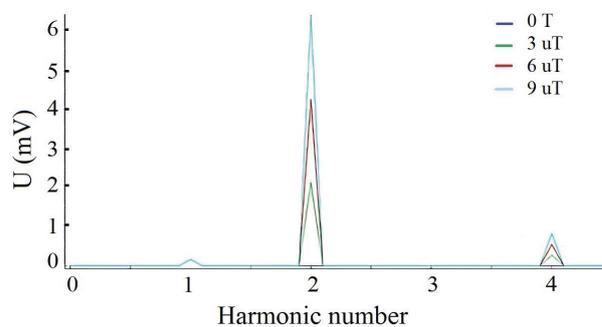


Figure 4 – Dependence of spectral characteristic of the output signal on the ambient field strength at an excitation current of 1.5 mA

Obviously, the amplitude of the second harmonic linearly depends on the ambient magnetic field strength. Interestingly, the signal spectrum also contains the fourth harmonic which also depends on the ambient magnetic field strength.

Therefore, the modeling results have confirmed the operability of the design.

Experimental specimen manufacturing

The experimental specimen of the planar fluxgate was manufactured as follows.

Using the PCB technology, four separate printed circuit boards were made on a textile laminate substrate: two identical boards with excitation coils and two identical boards with pickup coils. The topology of the printed circuit boards is presented in Figure 5.

The conductors on the printed circuit boards were made from copper and then coated by a terne layer.

Figures 6a and 6b demonstrate the photographs of the manufactured circuit boards with the elements of the planar fluxgate.

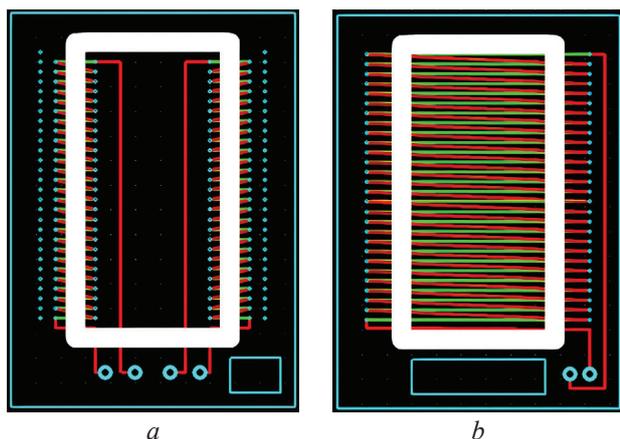


Figure 5 – Planar fluxgate printed circuit board topology of exciting (a) and measurement (b) coils. Red lines indicate conductors on the top layer of the printed circuit board, green lines indicate conductors on the bottom layer of the printed circuit board, cyan lines indicate vias, white lines indicate a ferromagnetic core

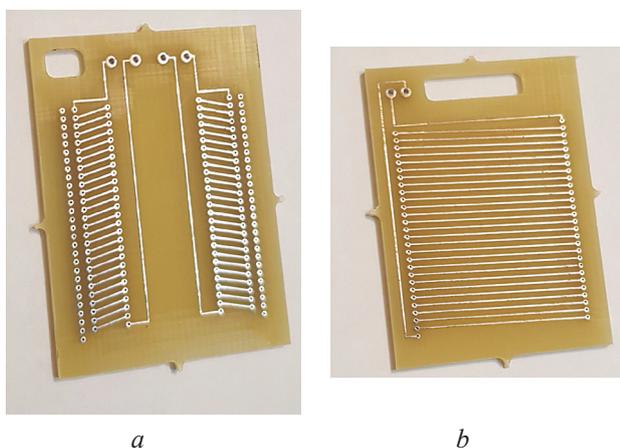


Figure 6 – Photographs of the manufactured printed circuit boards with the elements of the planar fluxgate: a – printed circuit board with excitation coil; b – printed circuit board with pickup coil

The ferromagnetic core produced from FINEMET® FT-3H material by mechanical cutting was adhered to the opposite side of the first board with the excitation coil. The adhesive used was LOCTITE® STYCAST 2850FT (Henkel AG & Co. KGaA, Germany). To cure the adhesive, LOCTITE® Catalyst 24 LV (Henkel AG & Co. KGaA, Germany) hardener was used with a ratio of the adhesive to the hardener of 100:6. The duration of complete curing was about 36 hours. The adhesive was cured in a vacuum chamber at a pressure no more than 10^{-6} atm.

To manufacture proper excitation coil, the first board with the excitation coil and adhered core was sandwiched with the second board with the excitation coil. The excitation coils on the two boards were

connected through the vias. Then, the boards were soaked with the LOCTITE® STYCAST 2850FT adhesive with further curing in the vacuum chamber at a pressure less than 10^{-6} atm.

After curing, the bonded boards with the excitation coil were sandwiched from the both sides with the boards with the elements of the pickup coil. The boards were connected with the elements of the pickup coil through the vias by a copper wire with a diameter of 0.05 mm.

Experimental

The performance test of the sensor included the experimental determination of the dependence of the second harmonic amplitude in the fluxgate output signal on the amplitude and frequency of the excitation current under a magnetic field strength of $45 \mu\text{T}$ induced by a system of axial coils [15]. The experimental scheme is presented in Figure 7.

The scheme in Figure 7 includes a Fluke 5520A Multi-Product Calibrator (Fluke Corporation, USA) that was used to excite the fluxgate with a sine signal with a preset amplitude and frequency. A multimeter Agilent 3458A (Agilent Technologies, USA) was used to measure the excitation current of the fluxgate. A PXI-1042Q platform (NI, USA) with a PXI-5124 module (NI, USA) was used to digitize and analyze the spectrum of the fluxgate excitation signal and its output voltage (amplified beforehand through the amplification section of the synchronous amplifier [16]) proportional to the measured magnetic induction. The experimental data are given in Table 2.

Following the data from Table 2, the maximum sensitivity was achieved at a frequency of fluxgate excitation of 30 kHz with an rms current of excitation of 1.25 mA.

To determine the sensitivity and the measurement range, the fluxgate was placed in the center of the system of axial coils [15]. A high-precision current source was used to set a direct current amplitude flowing through the system of coils, so the magnetic field induction in the center of the system would vary from 0.1 nT to $50 \mu\text{T}$. All the measurements of the amplitude of the second harmonic in the fluxgate output signal were averaged. To do so, 1000 measurements were automatically registered at a set current value and then averaged.

The measured amplitudes of the second harmonic in the fluxgate output voltage varying with the magnetic induction are presented in Table 3.

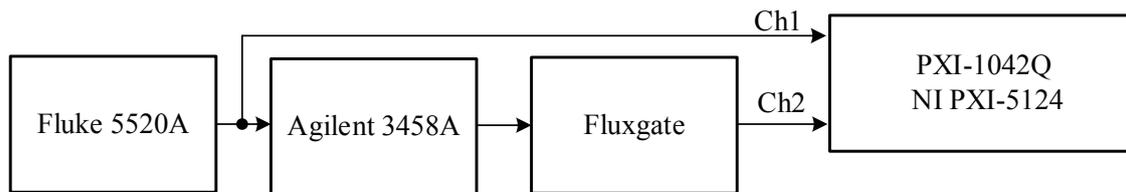


Figure 7 – Block diagram of the fluxgate testing

Table 2

Dependence of the amplitude of the second harmonic on the amplitude and frequency of the excitation current

Frequency [kHz]	Current [mA]					
	0.25	0.5	0.75	1.0	1.25	1.5
	Voltage [V]					
20	0.13	0.42	1.23	2.05	2.42	2.38
30	0.19	0.57	1.32	2.14	2.56	2.52
40	0.15	0.39	1.22	2.03	2.36	2.29
50	0.09	0.12	0.17	0.27	0.34	0.29
60	0.05	0.11	0.13	0.19	0.22	0.15
70	0.01	0.05	0.07	0.18	0.21	0.19
80	0.008	0.021	0.056	0.17	0.19	0.16
90	0.007	0.019	0.051	0.14	0.17	0.15
100	0.006	0.012	0.037	0.13	0.15	0.12

Table 3

Amplitudes of the second harmonic in the fluxgate output voltage varying with the magnetic induction

Magnetic induction [μT]	0.0001	0.001	0.005	0.01	0.05	0.1	0.5
Voltage [mV]	0.0052	0.0548	0.261	0.542	2.71	5.68	28.3
Magnetic induction [μT]	1	5	10	20	30	40	50
Voltage [V]	0.0564	0.268	0.545	1.082	1.623	2.165	2.641

Following the analysis of the data from Table 3, the fluxgate is suitable for measuring the magnetic induction up to $50 \mu\text{T}$. Its characteristics remain linear in the range of measured induction from 0.1 nT up to $50 \mu\text{T}$. The average sensitivity for the second harmonic is $54 \mu\text{V/nT}$.

Conclusion

A computer model was elaborated that allows assessing the sensitivity of the developed magnetic field sensor with due consideration of the hysteresis properties of the material. Based on the technological

capabilities, the models were developed that allow manufacturing the elements of excitation and pickup coils using the PCB technology. At present stage, the dimensions of the sensor are $40 \times 20 \times 5 \text{ mm}$.

A working sensor prototype was manufactured. The technological process of device assembly was developed. The measurement scheme was developed and the sensor's sensitivity was tested.

The optimal frequency and excitation current were determined that allow achieving the maximum sensitivity of the sensor. The measurement range of the developed sensor was estimated.

The conclusion on the viability of fluxgate implementation for measuring weak magnetic fields was made, including in magnetocardiography, geodesy and space exploration.

Further decrease of the width of the printed conductors that compose the excitation coils and the pickup coil of the converter with the increase of their density on the circuit board will increase the induction and excitation frequency keeping the excitation current amplitude unchanged. Further improvement of the cutting and leaching technology for the ferromagnetic core is necessary to decrease the converter noise and manufacture identical fluxgates using the technology of microelectromechanical systems.

Acknowledgments

The investigation was performed at Tomsk Polytechnic University within the Programme for Promoting the Competitiveness and with the support of the Russian Foundation for Basic Research (RFBR) (project no. 19-37 90061) and Grant № MK-873.2020.8 of the President of the Russian Federation.

References

1. Ripka P. Magnetic Sensors and Magnetometers. Boston, Artech house, 2000, 494 p.
2. Carr C. The Double Star magnetic field investigation. *Ann. Geophys.*, 2005, no. 23, pp. 2713–2732. DOI: 10.5194/angeo-23-2713-2005
3. Can H., Topal U. Design of Ring Core Fluxgate Magnetometer as Attitude Control Sensor for Low and High Orbit Satellites. *Journal of Superconductivity and Novel Magnetism March*, 2015, vol. 28, no. 3, pp. 1093–1096. DOI: 10.1007/s10948-014-2788-5
4. Johnson M.W., Amin M.H., Gildert S., Lan-ting T., Hamze F., Dickson N., Harris R., Berkley A.J., Johansson J., Bunyk P., Chapple E.M., Enderud C., Hilton J.P., Karimi K., Ladizinsky E., Ladizinsky N., Oh T., Perminov I., Rich C., Thom M.C., Tolkacheva E., Truncik C.J., Uchaikin S., Wang J., Wilson B., Rose G. Quantum annealing with manufactured spins. *Nature*, 2011, vol. 473, no. 7346, pp. 194–198. DOI: 10.1038/nature10012
5. Uchaikin S., Likhachev A., Cioata F., Perminov I., Sanghera H., Singh I., Spear P., Chavez P., Han X., Petroff C., Rich C. Sample 3D magnetometer for a dilution refrigerator. *Journal of Physics Conference Series*, 2012, vol. 400, pp. 052037. DOI: 10.1088/1742-6596/400/5/052037
6. Uchaikin S.V. Fluxgate Magnetometer for Cryogenics. In Proc. of the 21st International Conference on Low Temperature Physics (LT21), *Czechoslovak Journal of Physics*, 1996, pp. 2809.
7. Sukhanov D.Y. [Magnetic introscopy with a magnetic sensor array]. *Izvestiya vishih uchebnykh zavedeniy. Fizika* [Izvestiya vyshin educational institutions. Physics], 2013, vol. 56, no. 8/2, pp. 23–26 (in Russian).
8. Fagaly R.L. Superconducting quantum interference device instruments and applications. *Rev. Sci. Instrum.*, 2006, vol. 77, no. 10, pp. 101101-101101-45. DOI: 10.1063/1.2354545
9. Shirai Y., Hirao K., Shibuya T., Okawa S., Hasegawa Y., Adachi Y., Sekihara K., Kawabata S. Magnetocardiography using a magnetoresistive sensor array. *Int Heart J.*, 2019, vol. 60, no. 1, pp. 50–54. DOI: 10.1536/ihj.18-002.
10. Karo H., Sasada I., Magnetocardiogram measured by fundamental mode orthogonal fluxgate array. *J. Appl. Phys.*, 2015, vol. 117, no. 17, pp. 17B322. DOI: 10.1063/1.4918958
11. Adachi Y., Higuchi M., Oyama D., Haruta Y., Kawabata S., Uehara G. Calibration for a multichannel magnetic sensor array of a magnetospinography system. *IEEE Trans. Magn.*, 2014, vol. 50, no. 11, pp. 1–4. DOI: 10.1109/TMAG.2014.2326869
12. Harada S., Sasada I., Hang F. Development of a One Dimensional Fluxgate Array and Its Application to Magnetocardiogram Measurements. Electronics and Communications in Japan, Translated from Denki Gakkai Ronbunshi, 2015, vol. 98, no. 4. DOI: 10.1002/ecj.11645
13. Vetoshko P.M., Gusev N.A., Chepurnova D.A., Samoilova E., Zvezdin A., Korotaeva A., Belotelov V. Rat Magnetocardiography Using a Flux-Gate Sensor Based on Iron Garnet Films. *Biomed Eng.*, 2016, vol. 50, pp. 237–240. DOI: 10.1007/s10527-016-9628-9
14. Gusev N.A., Vetoshko P.M., Kuzmichev A.N., Chepurnova D., Samoilova E., Zvezdin A., Korotaeva A., Belotelov V. Ultra-Sensitive Vector Magnetometer for Magnetocardiographic Mapping. *Biomed Eng.*, 2017, vol. 51, pp. 157–161. DOI: 10.1007/s10527-017-9705-8
15. Baranova V.E., Baranov P.F., Muravyov S.V., Uchaikin S. The Production of a Uniform Magnetic Field Using a System of Axial Coils for Calibrating Magnetometers. *Meas Tech.*, 2015, vol. 58, pp. 550–555. DOI: 10.1007/s11018-015-0752-9
16. Baranov P., Borikov V., Ivanova V., Duc B.B., Uchaikin S., Liu C.-Y. Lock-in amplifier with a high common-mode rejection ratio in the range of 0.02 to 100 kHz. *ACTA IMEKO*, 2019, vol. 8, no. 1. DOI: 10.21014/acta_imeko.v8i1.672

Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam. Part 1. Theoretical Research

A.R. Bayev¹, A.L. Mayorov¹, N.V. Levkovich², D.V. Shavlovskiy³, M.V. Asadchaya¹

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

²*Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus*

³*Beltogas SPA,
Vera Horuzhei str., 3, Minsk 220005, Belarus*

Received 08.04.2021

Accepted for publication 02.06.2021

Abstract

The improvement of efficiency, reliability and productivity of ultrasonic testing of objects with cohesion between materials connected by welding, soldering, gluing, etc. is an important problem of the modern production technologies. The purpose of the paper is to determine in 3D space the conditions for increasing the sensitivity and reliability of the flaw detection in the cohesion zone between materials when the form of defect interface can be different.

In the first part of the theoretical study the features of the formation of the acoustic fields of ultrasonic waves scattered from solid's interface when spot of an acoustic beam crosses the boundary of the defective region in the shape of an ellipse or a long strip have been investigated. In this case, the boundary conditions in the defect area change discretely or linearly.

It was suggested to use a phase shift between reflected waves from the defect and defect-free interfaces as the more informative parameter depending on the cohesion between materials. There is shown that there are conditions to achieve sufficiently high sensitivity detection of interface defects when the scattered waves receiving are to be at angles outside the main directivity lobe of the scattering field pattern. The evolution features of the scattering field structure which are needed for the development of the method of evaluation the cohesion of materials have been got.

Keywords: ultrasonic waves, diagram directivity (DD), reflection, wave scattering.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

A.R. Bayev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, D.V. Shavlovskiy,
M.V. Asadchaya.
Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion
between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam.
Part 1. Theoretical Research.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 124–132.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

For citation:

A.R. Bayev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, D.V. Shavlovskiy,
M.V. Asadchaya.
Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion
between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam.
Part 1. Theoretical Research.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 124–132.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

Влияние геометрии и граничных условий в области сцепления материалов на рассеяние ультразвуковых волн. Ч. 1. Теоретическое моделирование

А.Р. Баев¹, А.Л. Майоров¹, Н.В. Левкович², Д.В. Шавловский³, М.В. Асадчая¹

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

²Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

³ГПО по топливу и газификации «Белтопгаз»,
ул. В. Хоружей, 3, г. Минск 220005, Беларусь

Поступила 08.04.2021

Принята к печати 02.06.2021

Повышение эффективности, надёжности и производительности ультразвукового контроля соединения материалов сваркой, пайкой, склеиванием и др. является важной народнохозяйственной задачей. Цель работы состояла в установлении условий повышения чувствительности и достоверности обнаружения дефектов сцепления материалов на основе моделирования полей ультразвуковых мод, рассеянных дефектами разной геометрии.

Впервые в максимальном приближении выполнен расчёт и анализ полей рассеяния ультразвуковых волн при перемещении пятна акустического луча в виде эллипса или длинной полосы относительно дефектной области с дискретными и плавно изменяющимися в ней граничными условиями. Для характеристики последних с точки зрения взаимодействия упругой волны с границей сред предложено использовать преимущественно фазовый сдвиг θ между волнами, рассеянными от дефектной и бездефектной границы, существенно сказывающийся на изменении параметров результирующего поля рассеяния в его периферийной зоне. Т. е., θ является важным параметром, характеризующим степень сцепления материалов и оказывающим преобладающее влияние на чувствительность предлагаемого метода обнаружения слабо выявляемых дефектов.

Установлены особенности эволюции структуры полей рассеяния, являющиеся первичными для разработки методик контроля сцепления материалов предложенным методом. При достаточно малых значениях угла приёма ультразвуковых колебаний в меридиональной плоскости максимум чувствительности измерений достигается в динамическом режиме и приёме рассеянных волн под азимутальными углами, соответствующими 1-му экстремуму диаграммы направленности поля рассеяния опорного акустического луча.

Ключевые слова: диаграмма направленности, неразъёмное соединение, рассеяние упругих волн.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

Адрес для переписки:

Баев А.Р.

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

Address for correspondence:

Bayev A.R.

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

Для цитирования:

A.R. Bayev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, D.V. Shavlovskiy,
M.V. Asadchaya.

Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion
between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam.
Part 1. Theoretical Research.

Приборы и методы измерений.

2021. – Т. 12, № 2. – С. 124–132.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

For citation:

A.R. Bayev, A.L. Mayorov, N.V. Levkovich, D.V. Shavlovskiy,
M.V. Asadchaya.

Influence of Geometry and Boundary Conditions in Area of Cohesion
between Materials on the Reflection of an Ultrasonic Beam.
Part 1. Theoretical Research.

Devices and Methods of Measurements.

2021, vol. 12, no. 2, pp. 124–132.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-124-132

Introduction

The development of effective methods and means of ultrasonic testing of permanent joints (metal-to-metal, metal-to-nonmetal, nonmetal-to-nonmetal) allowing a reliable and safe functioning of critical technical facilities in heating, construction and operation of gas pipelines, in the chemical industry, at enterprises of the auto-tractor construction, instrument engineering and others is very relevant. At the same time high reliability and sensitivity of testing of weakly detectable by ultrasonic methods defective areas of material joining (for example, material sticking faults) in welding, spraying, brazing, gluing and others, is an important applied task [1].

Traditional methods of ultrasonic testing of fixed assemblies mostly use "direct" amplitude methods consisting in determining of amplitude differences of acoustic signal passed or reflected from a defective ($S \subset S_D$) and non-defective ($S \subset S_N$) surfaces of contacting surfaces. For this purpose ultrasonic volume waves probing the object by echoing, echoing, as well as shadowing can be used. On the other hand, quality of adhesion of materials characterized by stress tensor (σ_{ik})_{*j*} and displacement value of wave (ξ_i) on contacting surfaces both during manufacturing and operation of the object can be estimated by time variations of surface, plate waves, their amplitude, phase [2–4]. And in [3, 4] detection of splits in objects with high attenuation coefficient in polymer composites and in multilayer adhesive structures, where low-frequency plate mode is used as a probe, and their velocity decreases as a result of diffraction scattering on splits depending on "damage" of the object, are considered. If comfortable measurement conditions are provided, including the condition of the object's contact surface, its geometry, inspection performance requirements and the instrumentation used, interferometric measurement schemes are sufficiently sensitive to assess the quality of material adhesion or coating thickness gauging [5, 6].

It should be noted that combined methods realized by using optoacoustic excitation of ultrasonic waves and their receiving by both contact and non-contact methods – are promising in solving the above problems [7, 8]. In particular at pulse-laser action a wide spectrum of waves interacting with a defect area is excited in the object. At the same time the "selectivity" effect allows the detection of

poorly detectable defect areas based on the signal-response spectrum data. Increase of the method's efficiency could be achieved by means of receiving Lamb waves in simple electromagnetic-acoustic way [8], if of course, the object is o a double-layer plate with characteristic thickness $h_i \geq \lambda_L$, where λ_L is maximum possible Lamb wave length. It should be noted that by changing the configuration of receiver measuring coil it is possible to search for the elastic modes which are the most sensitive to defects of splitting.

Analysis of the above methods of quality testing of solid state joints shows that their sensitivity is not high enough when using traditional measuring methods, while the use of interferometer, phase-frequency methods and laser technology significantly complicates the conditions of testing. It concerns requirements to geometry of objects, state of their surface, etc. The authors [9] on the basis of deterministic approach in 2D formulation develop the method of detecting weakly detectable defects, when the phase shift between the waves scattered at the defect and defect free boundary magnitude of $\theta = \pi/4 - \pi$. In [10] the ultrasonic scattering fields in three-dimensional space - in different planes of the directional cross section of the ultrasonic scattering field DD, characterized by equatorial ($\psi = 0 - \pi$) and azimuthal ($\psi = 0 - \pi/2$) angles are investigated. Moreover, the phase shift between the waves scattered at the same at the defective and defect-free boundaries time is constant and its value varies in the range of $\theta = \pi/4 - \pi$.

The aim of this part of the research is to carry out a theoretical qualitative analysis of the acoustic channel including the formation of reflected fields of ultrasonic waves (UW) from a heterogeneous boundary plane surface $S^* = S_D + S_N$ characterized by different profile of S_D boundary and phase shift between the reflected waves and to determine the optimum conditions for their detection and achieve maximum sensitivity.

Note that the informative signal at the receiving ultrasonic probe is formed only when a moving spot of incident beam on the interface intersects defect's boundary or defect is inside the spot. Thus, we have possibility to observe the more substantial changing of the UW side lobes structure. Below the peculiarities of acoustic scattering field formation $\Phi(\varphi, \psi)$ are studied for the case, when the defect surface S_D has the form of ellipse with eccentricity ($\varepsilon = a/b = 0.3-3$) and

area ratio $S_{D0} = S_D/S_0 = 0-0.1$ or as a strip, where S_0 is the acoustic beam (AB) cross-section area of its spot, and the phase shift between the scattered waves changes in the range $\theta = 0-\pi$. And this variation is not only discrete, but also linear, which is characteristic for cases of imperfect execution of some joining technologies of materials. The conditions for choosing the optimal scheme of sounding are specified.

Analysis of peculiarities of acoustic channel

At this stage of development of suggested method of diagnosing state (coupling) of contacting materials, mainly aimed at studying peculiarities of influence of geometry of defect area and its position on formed ultrasonic scattering field. Also important is the problem of detecting such defects when the strength of "seizure" or adhesion of materials in the defective area changes depending on the coordinates $\{x, y\} \subset S_D$. I. e. at characteristic angles of incidence of elastic waves on the local zone we should expect changes in phase shift, which is a function of $\theta = \theta(\sigma_{ik}, \mathfrak{R}_i, C_1, C_2, \beta)$. And this should have some effect on the scattering field under study. Thus the subject of the present studies are peculiarities of DD formation in space of scattering ultrasonic waves when a spot of an acoustic beam with moving relative to the boundary of the defective surface having the form of an ellipse with varied eccentricity $\varepsilon = 0.3-3$ or a long strip. In this case the boundary conditions in the area of wave incidence on the defect change discretely or linearly vs. distance from the sport boundary in x direction, where a and b are axes of an ellipse (Figure 1a).

When variant II is implemented, the problem under consideration is represented as a superposition of the fields of the two sources:

$$J = J_1 + J_2 = A_0 S_0 K_{R0} F_0(\psi, \varphi) + A_0 S_D [K_R F_{D0}(\psi, \varphi, \theta(x)) - K_{R0} F_{01}(\psi, \varphi)], \quad (1)$$

where A_0 is the amplitude of the acoustic wave incident on the media boundary; K_R and K_{R0} the ultrasonic reflection coefficients from the defect-free and defect bonded area of the materials, respectively; J is the resultant scattering field of the ultrasonic beam incident on the boundary surface with the defect $S_0 = S_D + S_N$, F_0, F_{01}, F_{D0} – are the corresponding normalized integral functions where $F_{01} \equiv F_0$ is for the $S \subset S_D$.

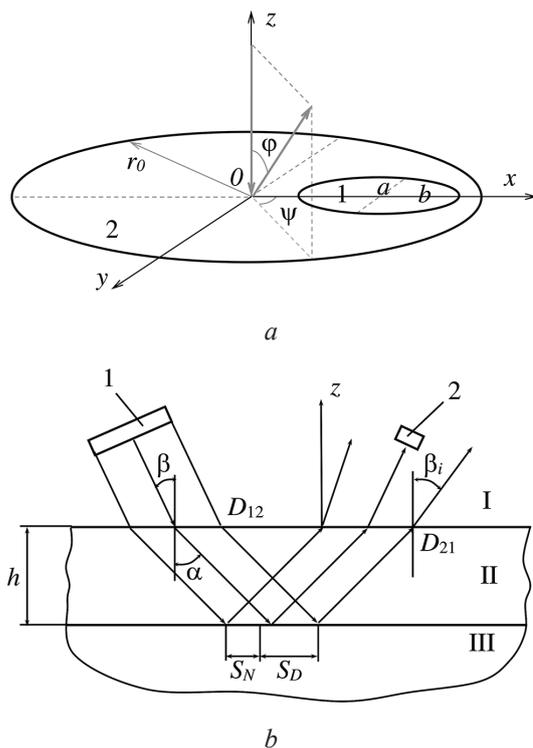


Figure 1 – Illustration for the theoretical analysis and calculation of the ultrasonic reflected waves from

For numerical calculation in axial approximation of acoustic fields, obtained at ultrasonic reflection from adhesion surface of materials with defect of different profile integral expressions obtained below were used. This allowed us to reveal specific features of ultrasonic wave (UW) field variations scattered in the presence of a simulated defect area S_D of different geometry (Figures 4.2–4.4), including an ellipse, a long strip of width $b < r_0$ and a semi-infinite plane. Further by numerical experiment the search of such conditions is carried out, at which the possibility of revealing of defects of incoherence with the minimum possible reflectivity is realized. For this purpose we suggest to use those regions of scattering fields (or angles of UW receiving), where the minimum and maximum of the first order angles of DD ($\varphi_{\min 1}, \varphi_{\max 1}$) are located in the equatorial plane of DD section. We suggest to measure values of scattering field amplitudes in its vicinity and to use the amplitude of $A_{\max 1}$ as well as (for comparison) the value of the zero-order maximum $A_{\max 0}$. Dimensionless parameters are used as informative ones characterizing the sensitivity of the method and its effectiveness:

$$A^* = \{ |\Delta A(\varphi_{\min 1})| / A_{\max 1}, |\Delta A(\varphi_{\max 1})| / A_{\max 1}, |\Delta A(\varphi_{\max 0})| / A_{\max 0} \}.$$

The scattering of ultrasonic waves when acoustic beam spot intersects defect boundary

In this case the calculation of the summary scattered field is realized according to formula (1) but it is necessary to take into account the changing of the defect's boundary to intersect the boundary of the acoustical spot S_0 .

The results of numerical calculations of the considered acoustic fields, including the characteristic dependences of amplitude parameters $|\Delta A|/A_{\max}$ on the geometry of the defect area, its position relative to the acoustic beam spot and the phase shift θ between the scattered UW on the defective and non-defective surface of the material interface are presented below. Figures 2 and 3 present the amplitude characteristics of the UW scattering field depending on the position of the defect area centre in the form of ellipse with different eccentricity, determined in the equatorial planes of the DD $\psi = 0 - \pi/2$ for the indicated receiving angles at different values of the phase shift. Note that the indicated amplitude parameter $|\Delta A|/A_{\max}$, in fact, characterizes the sensitivity of the measurement method for various input-receive conditions of the UW. Figures 4 and 5 show data on the maximum sensitivity of the method, depending on the position of the defect area when its geometry and phase shift θ are changed. The data on the effect of a more complicated adhesion mechanism, characterized by a linear change in the value in the direction normal to the boundary of the defect area, which has the shape of a long strip, is illustrated in Figure 6.

When variant II is implemented (defect surface – long strip), the phase shift, where is the coordinate of a point on the surface of the SD defect, counted in its plane normal to the amplitude characteristics of the UW scattering field depending on the position of the defect area centre in the form of ellipse with different eccentricity, determined in the equatorial planes of the DD $\psi = 0 - \pi/2$ for the receiving angles at different values of the phase shift. Note that the indicated amplitude parameter $|\Delta A|/A_{\max}$ in fact characterizes the sensitivity of the measurement method for various input-receive conditions of the UW. Figures 4 and 5 show data on the maximum sensitivity of the method depending on the position of the defect area when its radius and phase shift θ are changed. The data on the effect of a more complex material coupling mechanism characterized by a

linear change in the value in the direction normal to the boundary of the defect area, which has the shape of a long strip, is illustrated in Figure 6.

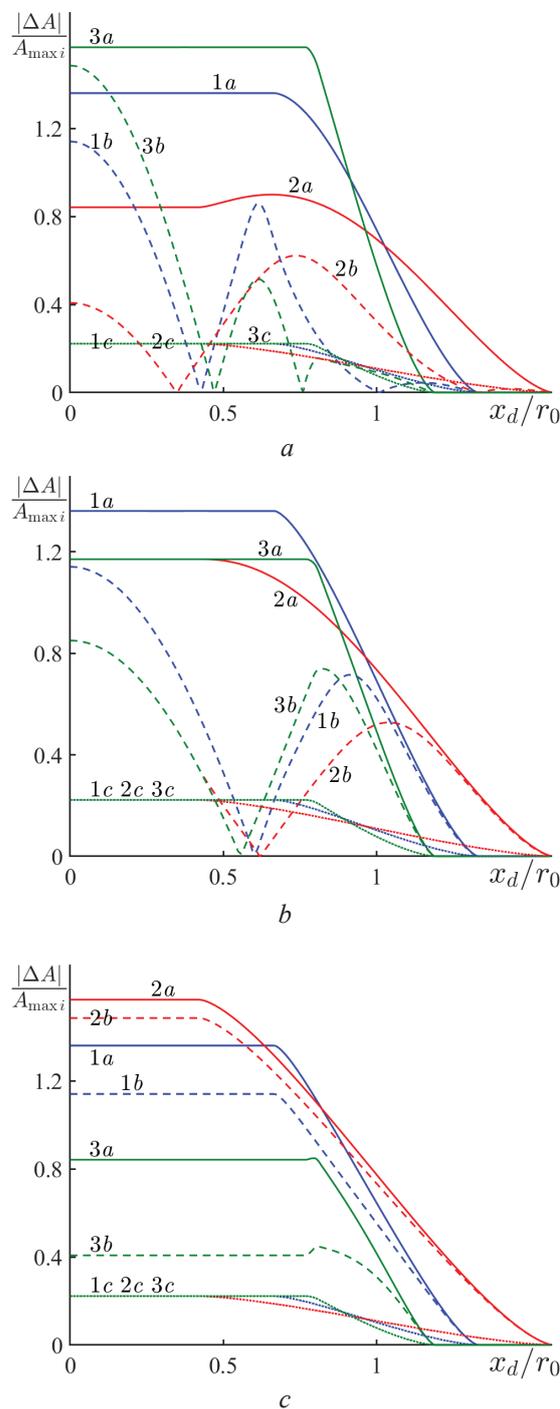


Figure 2 – Amplitude characteristics of the ultrasonic scattering field vs the position of the defect area centre in the form of ellipse, determined for $\psi = 0$ (a), $\pi/4$ (b), $\pi/2$ (c) and different angles of wave reception φ at phase shift $\theta = \pi$: eccentricity of the ellipse $\varepsilon = 1$ (1), 3 (2), 1/3 (3); angle of the UW reception $\varphi = \varphi_{\min 1}$ (a), $\varphi_{\max 1}$ (b), $\varphi_{\max 0}$ (c); $r_0/\lambda = 5$; $S_D/S_0 = 1/9$

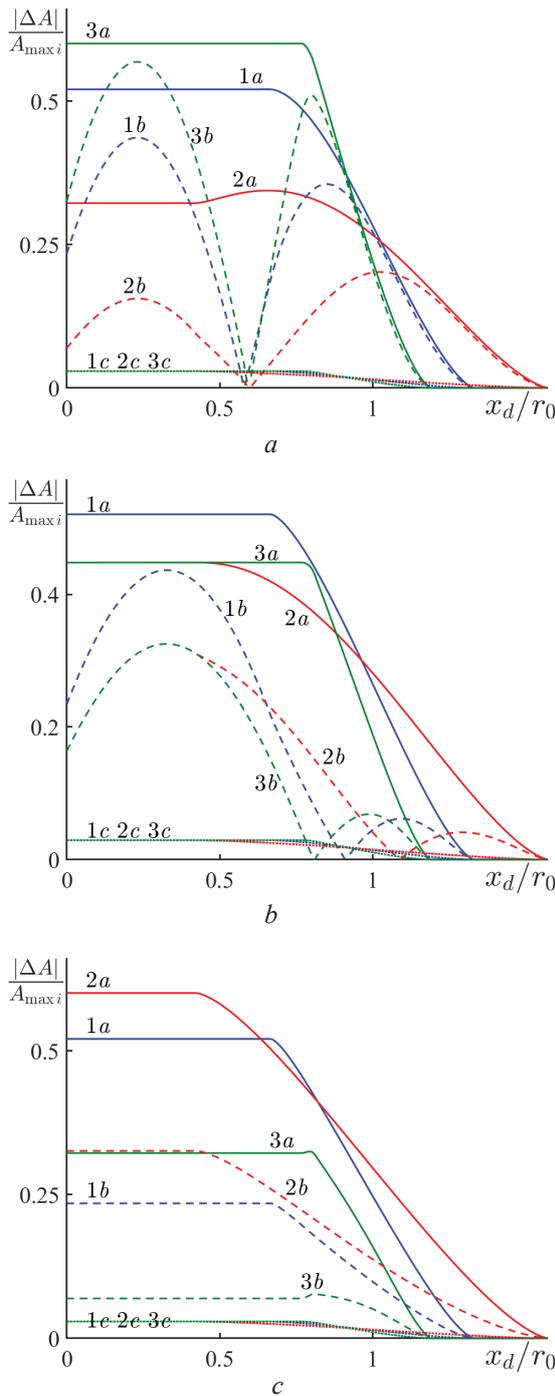


Figure 3 – Amplitude characteristics of the ultrasonic scattering field vs the position of the defect area centre in the form of ellipse, determined for $\psi = 0$ (a), $\pi/4$ (b), $\pi/2$ (c) and different angles of wave reception φ at the phase shift $\theta = \pi/4$: eccentricity of the ellipse $\varepsilon = 1$ (1), 3 (2), $1/3$ (3); angle of the UW reception $\varphi = \varphi_{\min 1}$ (a), $\varphi_{\max 1}$ (b), $\varphi_{\max 0}$ (c); $r_0/\lambda = 5$; $S_D/S_0 = 1/9$

The presented results of theoretical analysis of the influence of geometrical parameters of the model defect area on the generated acoustic

scattering field of UW at its relative crossing by the spot of the acoustic beam convincingly indicate the effectiveness of the suggested method of evaluation the adhesion quality of materials which consists in the application of a "non-mirror scheme" of UW radiation-receiving. Those, not only the angles of UW radiation and receiving but also the planes of incidence of the source and receiver of the ultrasonic probe may not coincide.

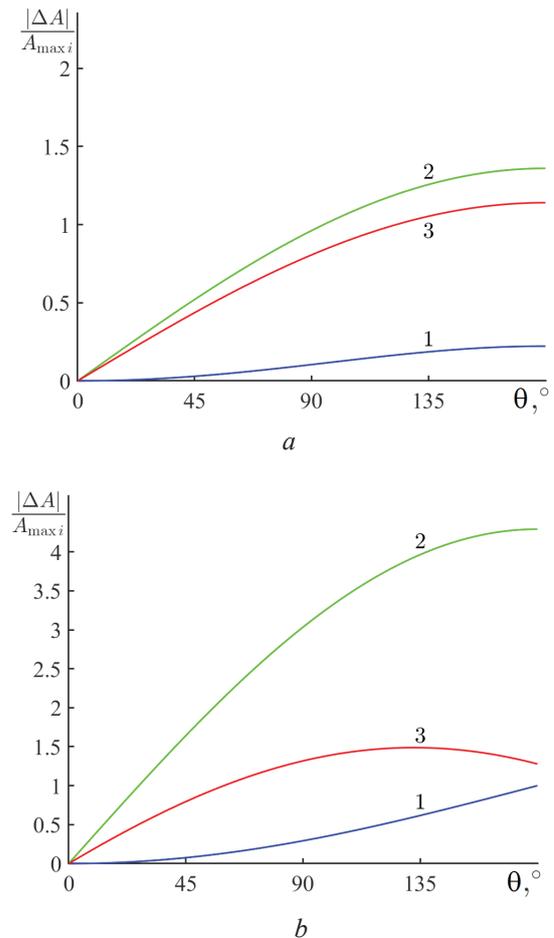


Figure 4 – Maximum variation of ultrasonic amplitude at displacement of acoustic beam spot relative to the centre of circular defect (a) and half-plane boundary (b) as a function of phase shift of waves scattered from the defect: angle of ultrasonic reception in equatorial plane $\psi = 0$: $\varphi = \varphi_{\max 0}$ (1), $\varphi_{\min 1}$ (2), $\varphi_{\max 1}$ (3), $r_0/\lambda = 5$; $S_D/S_0 = 1/9$

In case of orientation of the major axis of the ellipse a (or "elongation") of the defect along the x -axis ($\varepsilon = a/b > 1$) it is preferable to receive UW in the plane determined by equatorial angle $\psi \rightarrow \pi/2$ for $\varphi \rightarrow \{\varphi_{\max 1}, \varphi_{\min}\}$. But if the major axis of the ellipse a directed along the y -axis then the situation is the more preferable for ultrasonic receiving if $\psi \rightarrow 0$. A similar tendency is maintained when the

phase shift between scattered waves in a varying range $(1/8-1)\pi$. The sensitivity of the suggested method can significantly (by more than order of magnitude) exceed the traditional "mirror" version of testing. (The latter is implemented for radiation-receiving) conditions at angles close to each other). As seen from figures 2–5 the absolute value of $\delta_A = |\Delta A|/A_{\max i}$ can be up to ~ 10 and more times. With decreasing the defect area S_D and phase shift $\theta \sim \pi$ the value of amplitude A mostly decreases irrespective of the equatorial angle. At the same time, at phase shift $\theta \sim \pi$ and $r/R > 0.6$, the ambiguity of measurement can be observed if the ultrasonic receiving is performed when $\phi \rightarrow \phi_{\max i}$ (Figure 5).

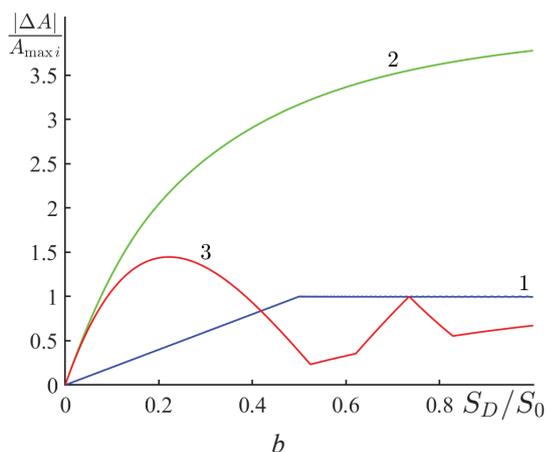
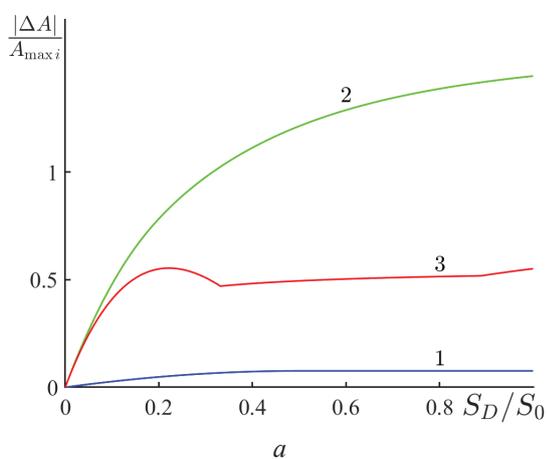


Figure 5 – Maximum signal change when the acoustic beam spot is displaced relative to the centre of a circular defect as a function of its radius and phase shift $\theta = \pi/4$ (a); π (b); angle of ultrasonic reception in the equatorial plane: $\phi = \phi_{\max 0}$ (1), $\phi_{\min 1}$ (2), $\phi_{\max 1}$ (3); $r_0/\lambda = 5$

It is noteworthy that in the case of defect modeling in the form of a strip with a linearly varying phase shift (Figure 6), which is typical

for poorly detectable defects occurring in various material joining technologies, the maximum sensitivity is achieved exactly when ultrasonic scanning is received in the equatorial plane of the DD section $\psi = \pi/2$ and azimuth angles close to $\phi \rightarrow \phi_{\min 1}$. Thus, in comparison with the mentioned classical method, the calculated sensitivity of the suggested method is almost ~ 50 times greater when the varying value of the phase shift between the waves scattered from the defect-free and defect material boundaries $\phi = \pi/4$.

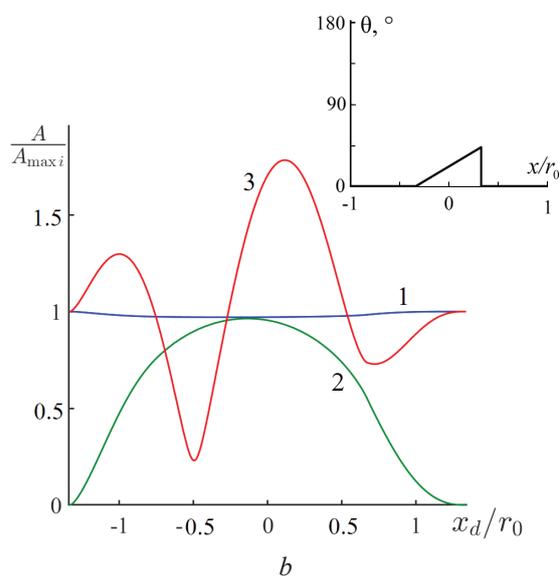
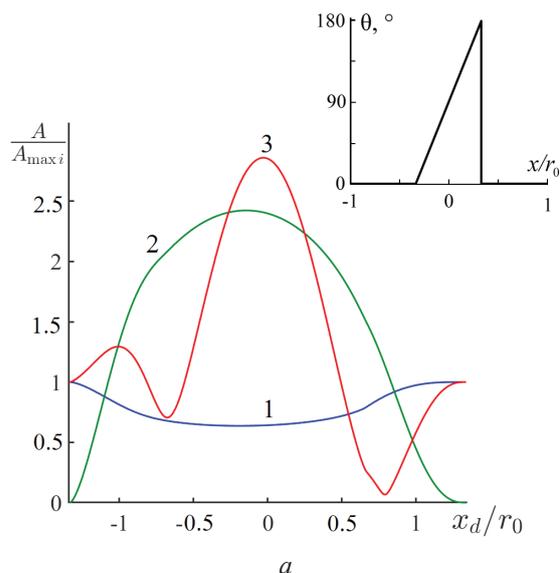


Figure 6 – Characteristic signal amplitude dependence of ultrasonic scattering field vs displacement of the acoustic beam spot centre relative to the defect area in the form of a long strip with a linear change in phase shift in the x direction: $\max(\theta) = \pi$ (a); $\pi/4$ (b); $\phi = \phi_{\max 0}$ (1); $\phi_{\min 1}$ (2); $\phi_{\max 1}$ (3); $r_0/\lambda = 5$; defect width is of $b = 2/3r_0$

Thus, based on these calculations and theoretical analysis, the maximum sensitivity of the method is achieved both by optimizing the parameters of the acoustic channel in order to achieve the maximum, and, importantly, by receiving the scattered signal at the above characteristic angles of the primary DD diagram of the scattering field, including ψ and φ . If we consider the diagnostic state of the adhesion quality of materials according to the scheme shown in Figure 1b, then in describing the acoustic path it is necessary to take into account the features of the ultrasonic traverse through the outer boundaries of the object, accompanied by energy loss and the shift of the acoustic beam due to refraction on the boundaries. For example, when the echo method used an acoustical signal passes twice only one external surface of the object I. With weak divergence of acoustic beams scattered from defective and defect-free surfaces in the layer of object II, the condition must be fulfilled:

$$0.5 hf(n \cos \alpha C_2) > 1, \quad h/L \ll 1,$$

where L is the distance from the surface I of the object to the receiving point of UW.

In this case, as a result of refraction of the acoustic beam at the interface I the transverse size of the acoustic beam changes in $\cos\beta/\cos\alpha$ time. Finally, the scattering field formation process takes place exactly in the area I. If this condition is not met, then the scattered waves incident at different angles α_i at the interface I will undergo a change in amplitude due to the dependence $D_{21} = D_{21}(\alpha_i)$. As a more detailed analysis of this phenomenon shows, it will only affect some variation in the amplitude-angle characteristics of the scattering field which must be taken into account when designing the measurement technique and positioning the receiver probe with respect to the object surface.

Conclusion

A theoretical model for detection of poorly detectable adhesion defects based on optimization of apertures and phases of imaginary ultrasonic sources scattered by inhomogeneous boundary including defects as a long strip and ellipse with variable eccentricity ($3-1/3$), presence of discrete and linearly variable phase shift between waves scattered by defect and defect-free area is developed in axial approximation.

Evolution features of the scattering field structure, which are primary for the development of techniques to evaluate the adhesion of materials by the specified method, have been found. It is shown that with sufficiently small values the maximum sensitivity of the method is achieved in a dynamic way and receiving of scattered waves under the azimuthal angles corresponding to the first extremums of the directivity diagram of the scattering field of the reference signal (in the absence of defect).

In the case of numerical simulation of defects in the form of a band with a linearly changing phase shift, which is typical for weakly detectable defects, the maximum sensitivity of the method is achieved when receiving waves in the equatorial plane of the scattering field of directivity diagram section $\psi = \pi/2$ and in the neighborhood of the azimuthal angle of minimum of the first order. It is shown that in comparison with traditional methods the sensitivity of control of poorly detectable defects in conditions when the phase shift between the waves reflected from the defect and non-defective surface is tens of degrees.

Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research of the Republic of Belarus, project No. 136.

References

1. Nondestructive Testing: Handbook: In 7 vols. Klyuev. Vol. 3. Moscow: Mashinostroenie, 2003, 864 p.
2. Kim H.-J., Song S.-J., Kim D.-Y., Kwon S.-D. Evaluation of thin coating layers using Rayleigh-like waves. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Golden, Colorado, 22–27 July 2007, vol. 927, iss. 1, pp. 1066–1073.
DOI: 10.1063/1.2902550
3. Adamyan Yu.E., Belov A.A., Greshnevnikov K.V., Zhabko G.P., Kolodkin I.S., Krivosheev S.I., Magazhinov S.G., Svechnikov E.L., Titkov V.V. Identification of transverse material boundaries in multilayer anthropogenic structures. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2016, vol. 52, no. 4, pp. 185–196.
DOI: 10.1134/S106183091604001X
4. Murashov V.V., Sliussarev M.V. Detection of cracks in parts made of polymer composites and multilayer glued structures by low-frequency acoustic method. *Defectoscopy*, 2016, no. 6, pp. 27–34.
5. Santo J.B., Santon M.J. Ultrasonic interferometry for the evaluation of thickness and adhesion of thin layers.

Abstracts of 4th International Conference on NDT, China, Greece, 2007, p. 22.

6. Chambers J.K., Tucker J.R. Boundline analysis using swept-frequency ultrasonic spectroscopy. *Insight*, 1999, vol. 41, no. 3, pp. 151–155.

7. Kruger S.E., Lord M., Levesque D., Bakker A.J. Detection of kissing bond in extruded aluminum by laser-ultrasound. *Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation*, Golden, Colorado, 22–27 July 2007, vol. 975, iss. 1, pp. 279–285.

DOI: 10.1063/1.2902670

8. Gurevich S.Yu., Petrov Yu.V., Golubev E.V., Shulginov A.A. EMA registration of ultrasonic Lamb waves excited by laser nanopulses. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2013, vol. 49, no. 8,

pp. 431–435.

DOI: 10.1134/S1061830913080056

9. Baev A.R., Asadchaya M.V. Part 1. Features of acoustic beam reflection from a surface with non-uniform boundary conditions. Part 1. Theoretical analysis. *Russian Journal of Nondestructive Testing*, 2010, vol. 46, no. 8, pp. 3–17. **DOI:** 10.1134/S1061830910080012

10. Baev A.R., Levkovich N.V., Mayorov A.L., Asadchaya M.V. *Rasseyanie uprugih voln neodnorodnoj granicej pri akusticheskom kontrole neraz"yomnyh soedinenij* [Scattering of Elastic Waves by an Inhomogeneous Boundary in the Acoustic Testing of Permanent Joints]. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 360–372 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2019-10-4-360-372

Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices: Analysis and Application Possibilities

A.M. Vodovozov

Vologda State University,
Lenin str, 15, Vologda 160000, Russia

Received 09.03.2021

Accepted for publication 18.05.2021

Abstract

The paper considers the operation of radioisotope measuring devices under dynamic conditions, when the Poisson pulse flux at the output of the radiation detector becomes unsteady and the nonlinearity of the calibration curve of the device, the stochasticity of the radiation signal and the inertia of the meter significantly complicate the task of estimating the measured physical parameter. of the device and analysis of the possibility of its application for linearization of the characteristics of the device, increasing the speed of the devices and solving the measuring problem in real time.

The process of nonlinear transformation of the radiation signal in the system is analyzed on the basis of the assumption about the exponential distribution of the intervals between the pulses of the information flow at the output of the radiation detector. A generalized algorithm for the synthesis of a given transformation function of a time-pulse computing device of a radioisotope device has been developed according to its mathematical description. To describe the transformation function given by a set of points, it is proposed to use its approximation by a power series.

The proposed calculation formulas are verified by modeling in the Scilab program on a specific example of linearization of the curve of a radioisotope altimeter with a given tabular calibration characteristic. The results obtained confirm the expediency of using time-pulse computing devices for linearizing the conversion curve of radioisotope devices in real time.

Carrying out calculations according to the proposed algorithms by means of modern microelectronics opens up new possibilities for expanding the field of application of radioisotope devices in dynamic problems of industrial flaw detection, measuring the parameters of object movement, thickness of rolled products and coatings, in devices for continuous monitoring of liquid media.

Keywords: radioisotope device, nonlinearity, linearization, exponential distribution, time-pulse conversion.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

Адрес для переписки:

Водовозов А.М.
Вологодский государственный университет,
ул. Ленина, 15, г. Вологда 160000, Россия
e-mail: am.vodovozov@gmail.com

Address for correspondence:

Vodovozov A.M.
Vologda State University,
Lenin str, 15, Vologda 160000, Russia
e-mail: am.vodovozov@gmail.com

Для цитирования:

А.М. Vodovozov.
Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices:
Analysis and Application Possibilities.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 133–138.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

For citation:

A.M. Vodovozov.
Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices:
Analysis and Application Possibilities.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 133–138.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

Нелинейное времяимпульсное преобразование в радиоизотопных приборах: анализ и возможности применения

А.М. Водовозов

Вологодский государственный университет,
ул. Ленина, 15, г. Вологда 160000, Россия

Поступила 09.03.2021

Принята к печати 18.05.2021

Рассмотрена работа радиоизотопных измерительных приборов в динамических условиях, когда пуассоновский поток импульсов на выходе детектора излучения становится нестационарным, а нелинейность градуировочной характеристики прибора, стохастичность радиационного сигнала и инерционность измерителя существенно усложняют задачу оценки измеряемого физического параметра. Целью работы являлась разработка алгоритмов нелинейного времяимпульсного преобразования пуассоновского процесса в структуре радиоизотопного прибора и анализ возможности его применения для линеаризации характеристики прибора, повышения быстродействия приборов и решения измерительной задачи в режиме реального времени.

Проанализирован процесс нелинейного преобразования радиационного сигнала в системе на основе предположения об экспоненциальном распределении интервалов между импульсами информационного потока на выходе детектора излучения. Разработан обобщённый алгоритм синтеза заданной функции преобразования времяимпульсного вычислительного устройства радиоизотопного прибора по её математическому описанию. Для описания функции преобразования, заданной множеством точек, предлагается использовать её аппроксимацию степенным рядом.

Предложенные расчётные формулы проверены моделированием в программе *Scilab* на конкретном примере линеаризации характеристики радиоизотопного высотомера с заданной таблично градуировочной характеристикой. Полученные результаты подтверждают целесообразность использования времяимпульсных вычислительных устройств для линеаризации характеристики преобразования радиоизотопных приборов в режиме реального времени.

Проведение вычислений по предложенным алгоритмам средствами современной микроэлектроники открывает новые возможности для расширения области применения радиоизотопных приборов в динамических задачах промышленной дефектоскопии, измерения параметров движения объектов, толщины проката и покрытий, в устройствах непрерывного контроля жидких сред.

Ключевые слова: радиоизотопный прибор, нелинейность, линеаризация, экспоненциальное распределение, времяимпульсное преобразование.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

Адрес для переписки:

Водовозов А.М.
Вологодский государственный университет,
ул. Ленина, 15, г. Вологда 160000, Россия
e-mail: am.vodovozov@gmail.com

Address for correspondence:

Vodovozov A.M.
Vologda State University,
Lenin str, 15, Vologda 160000, Russia
e-mail: am.vodovozov@gmail.com

Для цитирования:

А.М. Водовозов.
Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices:
Analysis and Application Possibilities.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 133–138.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

For citation:

A.M. Vodovozov.
Nonlinear Pulse-Time Conversion in Radioisotope Devices:
Analysis and Application Possibilities.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 133–138.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-133-138

Introduction

In severe operating conditions, radioisotope measuring devices such as thickness gauges, altimeters, density meters, level gauges, often significantly outperform their competitors, which use different physical principles to solve the problem. Despite the radiation hazard and the complexity of operation, they still remain indispensable in solving numerous problems in the field of non-destructive testing of complex technological processes [1–6].

All radioisotope devices use an indirect measurement method. In them, the desired value of the measured physical parameter is determined based on the transformations of the radiation detector signal associated with the measured physical quantity of the nonlinear calibration curve. The calibration curve in such devices is established experimentally or theoretically based on the results of studies of physical processes in static operating modes. The output variable of the calibration curve is the intensity (average frequency) of the pulse stream formed at the output of the ionizing radiation detector. The latter is considered to be the simplest Poisson flow with the properties of stationarity, ordinariness, and absence of aftereffect.

In the existing practice of constructing radioisotope measuring devices [1–2, 7], the measurement process is reduced to assessing the flux intensity λ followed by calculating the nonlinear function of the reciprocal calibration curve of the sensor. The estimation of the flow intensity, in turn, is performed by quantizing the process in time and counting the number of fixed pulses N for the selected quantization interval T according to the formula $\lambda = N/T$. The quantization interval T is selected based on the requirements for the value of the statistical error of the meter. In accordance with the assumptions about the Poisson distribution of the information signal, the statistical error of this information processing process is inversely proportional to the duration of the quantization interval. A typical conversion algorithm is valid for slowly changing processes and is completely unsuitable for measurements under dynamic conditions when the measured value changes over time.

In dynamic modes, the operation of a radioisotope measuring device changes significantly, the flow of pulses at the detector

output becomes unsteady, and in a typical signal processing process, many contradictions appear, leading to distortion and loss of information in the channel. In this case, it is necessary to consider not the intensity (average frequency) of the random flow, but its instantaneous density as the information parameter of the Poisson flow. The estimate of the flow intensity carries a dynamic error associated with averaging the process over time. Here a conflict arises between the requirements for minimizing the statistical and dynamic errors of the meter, since the dynamic measurement errors always increase with an increase in the quantization interval [8].

If we assume that the time-varying input variable (measurable value) has a limited spectrum, then, according to the Kotelnikov–Shannon sampling theorem [9], it can be absolutely accurately represented by a set of individual values (samples) following at equal intervals, provided that the repetition rate of these samples is at least twice the upper limit of the signal spectrum. Based on this position, it would be possible to choose the quantization interval in the system according to the formula $T \leq 1/2f_{\max}$, where f_{\max} is the maximum frequency in the spectrum of the useful signal.

However, the nonlinear transformation inherent in the calibration curve of the device significantly expands the spectral composition of the information signal towards higher harmonics, the problem of determining the upper limit of the spectrum f_{\max} becomes dependent on the type of nonlinearity and, for this reason, difficult to solve. For these reasons, the requirement to linearize the static characteristics of a radioisotope meter used to estimate the parameters of objects under dynamic conditions can be considered mandatory. The problem of linearizing the characteristics of radioisotope measuring systems is formulated similarly to the same problems in systems of other types – when processing a radiation signal, it is necessary to calculate the conversion function in real time, which is reciprocal to the calibration curve of the meter. The article proposes to solve this problem using the methods of pulse time conversion, which provides fast calculations in real time.

The purpose of the research was the development of algorithms for the nonlinear pulse-time transformation of the Poisson process in the structure of a radioisotope device and the analysis of

the possibility of its application for linearization of the characteristics of the device.

Pulse-time transformation of the Poisson process

The maximum operating speed of a radioisotope meter can provide a transition from counting pulses at the output of a radiation detector to measuring time intervals t between pulses, as is done in computing devices that perform time-to-pulse conversions [10]. In such calculators, all conversions are started at the moments when each new pulse appears at the output of the radiation detector and are performed as a function of the measured interval t . As a result, with further averaging, calculations in the function of the flux intensity λ can be replaced by calculations in the function of the average time interval $\tau = 1/\lambda$.

The time intervals t between the pulses of the Poisson flow are random quantities obeying the exponential distribution law [11]:

$$p(t) = \lambda \exp(-\lambda t) = \exp(-t/\tau) / \tau, \quad (1)$$

where $p(t)$ is the probability of occurrence in the stream of pulses of the interval t ; λ is the flow rate; $\tau = 1/\lambda$ is the average value (mathematical expectation) of the intervals between pulses.

Pulse-time conversion of a stream implies that the calculation of a given nonlinear function is performed at the moments of occurrence of each event without any signal filtering. In this case, the filtering problem is solved after a nonlinear transformation and is reduced to evaluating the mathematical expectation of the signal at the output of the time-pulse converter. The mathematical expectation of the signal at the output of the nonlinear converter $F(\tau)$ can be calculated by the formula:

$$F(\tau) = \int_0^{\infty} p(t) f(t) dt, \quad (2)$$

where $f(t)$ is a nonlinear function calculated by the time-pulse converter in each interval t .

Equations (1) and (2) give a general formula for calculating the conversion function of the pulse-time converter:

$$F(\tau) = \frac{1}{\tau} \int_0^{\infty} f(t) \exp(-t/\tau) dt = \frac{1}{\tau} L\{f(t)\}, \quad (3)$$

where $L\{f(t)\}$ is the Laplace transform of the function $f(t)$.

In this case, the function $f(t)$ acts as the original of the Laplace transform, and the construction of a time-pulse computing device is reduced to the search for the original $f(t)$ according to a given mathematical description of the transformation function $F(\tau)$. For a number of specific functions, this problem can be solved directly using the tables of Laplace transforms [12] using the shift, similarity theorem and damping theorems.

Practical implementation of the algorithm

Unfortunately, the physical theory of the interaction of radioactive radiation with matter does not provide sufficient solutions that would meet the technological requirements of modern production with an acceptable error. The calibration curve of a radioisotope device, which describes the dependence of the intensity of the pulse flux at the output of the radiation detector on the measured parameter of the material, is associated with complex processes of multiple reflection and absorption of radiation in the substance and, for this reason, is always nonlinear. A common way to describe the transformation function of the information processing in a radioisotope device is its direct experimental calibration, and to select a more or less adequate calculation model of the transformation function $F(\tau)$, the mathematical apparatus for approximating experimental data is used.

Here the most important is the problem of choosing a class of a suitable approximating function that can be implemented by means of a pulse-time conversion takes into account the previously obtained equation (3). Equation (3), which contains the Laplace transform, is valid only for linear and nonlinear functions $f(t)$ satisfying the conditions for the existence of an image: for functions with real and zero poles, integrable on any finite positive interval of the t axis; taking zero values for all negative values of t and increasing no faster than the exponential function. Of the set of functions satisfying these conditions, the most interesting is the power transformation function $F(\tau) = \tau^n$, to which the original also corresponds in the form of a power function $f(t) = t^n/n!$. Therefore, the solution to the problem can be an approximation of the transformation function of the computing device $F(\tau)$ with a power series:

$$F(\tau) = \sum_{n=0}^K a_n \tau^n, \quad (4)$$

where the number of terms of the series K and its coefficients $a_n (n = 0 \dots N)$ are determined by the given error and the chosen approximation method.

To implement the transformation according to equation (4), it is necessary to use a time-pulse device, which reproduces the function in the form of a series in each cycle of calculations:

$$f(\tau) = \sum_{n=0}^K \frac{a_n}{n!} t^n. \quad (5)$$

Linearization of the characteristics of a radioisotope altimeter

As an example of using the proposed technique, let us consider the problem of linearizing the characteristics of a radioisotope altimeter, for which the dynamic mode of operation is relevant. The calibration curve of the altimeter $\lambda(H)$ is given in [13]. The meter operates in the range of heights $H = 0.5 \div 9$ m with changes in the pulse flow intensity in the range $\lambda = 500 \div 5000$ Hz (Figure 1).

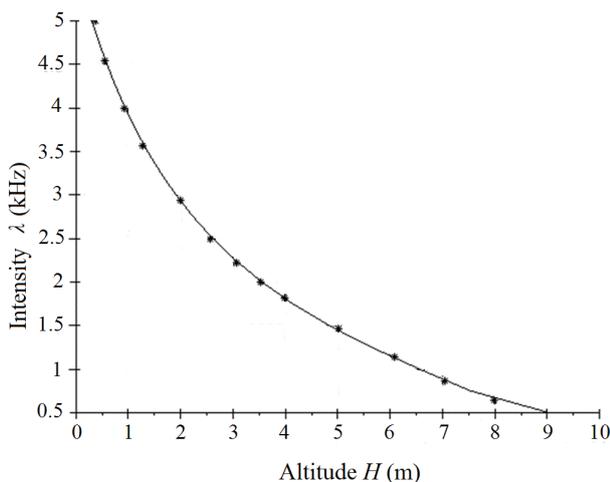


Figure 1 – Calibration curve of a radioisotope altimeter

The transformation function of the computing device $F(\tau)$ in the form of a power series (4) of the third order with coefficients $a_0 = -2.66$, $a_1 = +16.64$, $a_2 = -9.43$, $a_3 = 2.02$ calculated on the given dataset using the least squares method and is shown in Figure 2.

The simulation of the pulse-time conversion process was carried out in the Scilab program [14], where a set of random intervals with an exponential distribution was generated, processed according to formula (5) and filtered subsequently. Figure 3 shows the linearized meter response obtained by averaging over 1000 tests.

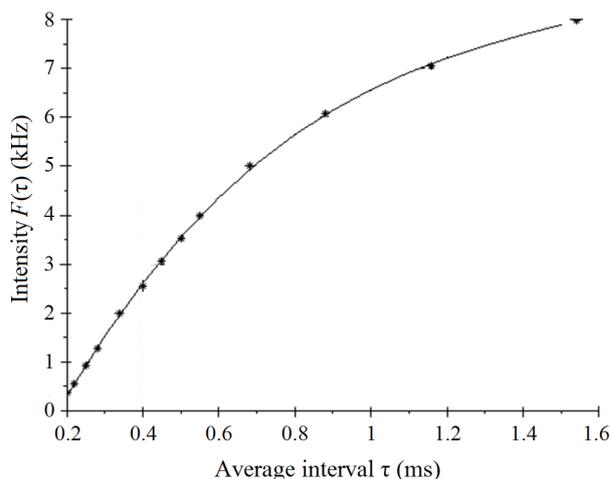


Figure 2 – Pulse-time converter conversion function

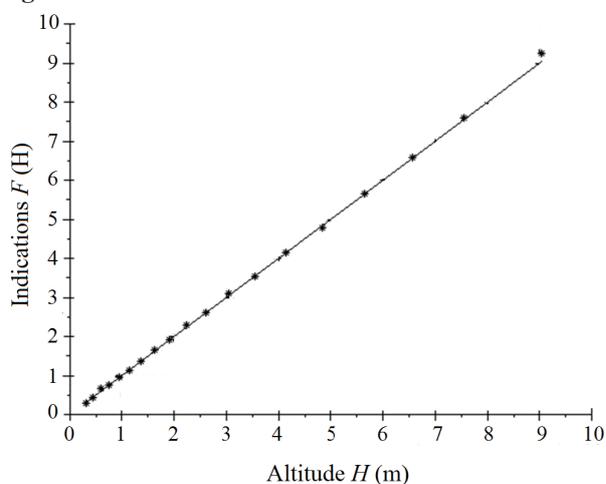


Figure 3 – Linearized altimeter curve

The altimeter curve formed as a result of the research is linear, which proves the validity of the hypothesis about the possibility of using the pulse-time conversion of the radiation signal to linearize the meter curve.

Conclusion

The results obtained confirm the possibility of using time-pulse functional converters to linearize the conversion curve of radioisotope measuring devices in real time. Carrying out calculations according to the proposed algorithms by means of modern microelectronics opens up new possibilities for expanding the field of application of radioisotope systems towards dynamic measurements in problems of industrial flaw detection, in devices for measuring the height, thickness of rolled products, thickness of coatings, in continuous liquid media monitors, etc. At the same time, the issues of implementing the proposed algorithms by means of microprocessor

technology and controllers that are part of radioisotope devices and solve the problems of filtering a useful signal become relevant.

References

1. Basova E.V., Chasovskikh V.P. *Ispol'zovanie radioizotopnykh tolshchinomerov dlya opredeleniya tolshchiny pristenochnykh otlozhenii na vnutrennikh stenkakh tsyklona* [Use of radio isotope devices for defining the thickness of adjournment on internal walls of the cyclone]. *Fundamental'nye issledovaniya* [Fundamental research], 2011, no. 12–4, pp. 760–765.
2. Kuzelev N.R., Egolin Ya.G. *Datchiki FGUP «VNIITFA» dlya system kontrolya i upravleniya tekhnologicheskimi protsessami* [Fsue "VNIITFA" sensors for monitoring and control systems of technological processes]. *Voprosy atomnoi nauki itekhniki. Seriya: Tekhnicheskaya fizika i avtomatizatsiya* [Questions of atomic science and technology. Series: Technical Physics and Automation], Moscow, Nauchno-issledovatel'skii institute tekhnicheskoi fiziki i avtomatizatsii Publ., 2005, pp. 6–11 (in Russian).
3. Bochenin V.I. Radioisotope method for monitoring the level of wear for protective coatings made from chromium and aluminum on gas turbine blades. *Measurement Techniques*, 2006, vol. 49, no. 10, pp. 1007–1010. DOI: 10.1007/s11018-006-0227-0
4. Beigzadeh A., Vaziri R., Afaride H. Measurement of temperature dependence of water density using the tool designed gamma densitometer. *Iranian Journal of Physics Research*, 2019, vol. 19, no. 3, pp. 529–535.
5. Yermakov O.L., Lisovskiy G.A., Kuchinskiy P.V., Titovitskiy I.A. *Povysheniye tochnosti izmereniy radioizotopnogo plotnomera* [Increasing the accuracy of radio isotope measurements density]. *Pribory i metody izmerenii* [Devices and Methods of Measurements], 2015, vol. 1, no. 10, pp. 70–75 (in Russian).
6. Vodovozov A.M. Linearization of the static characteristics of a radioisotope density meter. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 950–954. DOI: 10.1007/s11018-018-1531-1
7. Vodovozov A.M. Digital processing of measurement information in radioisotope devices. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 61, pp. 177–181. DOI: 10.1007/s11018-018-1406-5
8. Sobolev V.I. On the correspondence between dynamic and static errors in data measurement systems. *Measurement Techniques*, 2014, vol. 57, pp. 247–254. DOI: 10.1007/S11018-014-0440-1
9. Troshchenkov A.I. *Teorema Kotelnikova–Shennona i prakticheskoye ispol'zovaniye tselykh funktsiy dlya predstavleniya signala na priyemnoy storone* [Kotelnikov–Shannon theorem and practical use of entire functions for signal representation on the receiving side]. *Raketno-kosmicheskoye priborostroyeniye i informatsionnyye sistemy* [Rocket and Space Instrument Engineering and Information Systems], 2018, vol. 5, iss. 1, pp. 81–85. DOI: 10.30894/issn2409-0239.2018.5.1.81.85
10. Vodovozov A.M. Nonlinear real-time problems in stochastic system with Poisson component. *Journal of Instrument Engineering*, 2020, vol. 63, no. 6, pp. 501–506 (in Russian).
11. Kingman D. *Poisson Processes*. Moscow, MTsNMO, 2007.
12. Shynk J.J. *Mathematical Foundations for Linear Circuits and Systems in Engineering*. Santa Barbara, University of California, 2016.
13. Malykhina G.F., Kislitsyna I.A. *Izmerenie parametrov dvizheniya s ispol'zovaniem neironnykh setei* [Measurement of motion parameters using neural networks]. *Nauchno-tekhnicheskije vedomosti Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo politekhnicheskogo universiteta. Informatika. Telekommunikatsii. Upravlenie* [Scientific and technical bulletins of the St. Petersburg State Polytechnic University. Informatics. Telecommunications. Control], 2015, no. 5 (229), pp. 59–68. DOI: 10.5862/JCSTCS.229.6
14. Alekseev E.R., Chesnokova O.V., Rudchenko E.A. *Scilab: Reshenie inzhenernykh i matematicheskikh zadach* [Scilab: Solution of engineering and mathematical problems], Moscow, ALTLinux; BINOM. Laboratoriya znaniy, 2008.

Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors Machined by Single Point Diamond Turning

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov

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

Received 14.07.2020

Accepted for publication 26.05.2021

Abstract

Improving the technology of diamond turning of aluminum alloys is of great importance for expanding the application areas of metal-optical products based on aluminum in aerospace technology. The aim of this work was to study the effect of surface inhomogeneities of the initial aluminum alloy substrates on their optical and mechanical characteristics and to determine ways of improving the quality of aluminum reflector mirrors manufactured using nanoscale single point diamond turning.

The investigated reflector mirrors were made from AMg2 aluminum alloy. The optical surface treatment was carried out on a precision turning lathe with an air bearing spindle using a special diamond cutter with a blade radius of $\leq 0.05 \mu\text{m}$. The analysis of the surface structure of the AMg2 alloy substrates was carried out by scanning electron microscopy/electron microprobe. The quality control of the surface treatment of the manufactured reflector mirrors was carried out by atomic force microscopy. The reflectivity and radiation resistance of these samples were also investigated.

It is shown that an important problem in the manufacture of optical elements from aluminum alloys is the inhomogeneity of the structure of the initial material, associated with the presence of intermetallic inclusions. Heat treatment of the AMg2 alloy substrates at $T \geq 380 \text{ }^\circ\text{C}$ makes it possible to improve the quality of surface and the radiation resistance of aluminum mirrors both by removing mechanical stresses and by partially homogenizing the starting material. The optimum is heat treatment at the maximum allowable temperature for the AMg2 alloy $T = 540 \text{ }^\circ\text{C}$, as a result of which there is a complete disappearance of intermetallic inclusions with an increased magnesium content. The use of high-temperature heat treatment of AMg2 alloy substrates allows, in comparison with unannealed samples, to reduce the surface roughness from 1.5 to 0.55 nm, to increase the reflectivity of mirrors at a wavelength of 1064 nm from 0.89 to 0.92, and to increase the laser damage threshold from 3.5 to 5 J/cm².

Keywords: aluminum alloys, single point diamond turning, reflecting mirrors, laser damage threshold.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

Адрес для переписки:

Шаронов Г.В.
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: sharonov@hotmail.ru

Для цитирования:

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov.
Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors
Machined by Single Point Diamond Turning.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 139–145.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

Address for correspondence:

Sharonov G.V.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: sharonov@hotmail.ru

For citation:

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov.
Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors
Machined by Single Point Diamond Turning.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 139–145.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

Повышение качества поверхности металлических зеркал-отражателей при наноразмерной алмазной лезвийной обработке

Г.А. Гусаков, Г.В. Шаронов

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

Поступила 14.07.2020

Принята к печати 26.05.2021

Совершенствование технологии алмазного точения алюминиевых сплавов имеет важное значение для расширения областей применения металлооптических изделий на основе алюминия в авиационно-космической технике. Целью настоящей работы являлось исследование влияния неоднородностей структуры поверхности исходных подложек из алюминиевого сплава на их оптические и механические характеристики и определение путей повышения качества алюминиевых зеркал-отражателей, изготавливаемых с использованием наноразмерной алмазной лезвийной обработки.

Исследованные зеркала-отражатели изготавливались из алюминиевого сплава АМг2. Оптическая обработка поверхности производилась на прецизионном токарном станке со шпинделем на воздушном подшипнике с использованием специального алмазного резца с радиусом закругления лезвия менее 0,05 мкм. Анализ структуры поверхности подложек из сплава АМг2 проводился методами растровой электронной микроскопии/электронного микрозонда. Контроль качества обработки поверхности изготовленных зеркал-отражателей осуществлялся методом атомно-силовой микроскопии. Исследовались также отражательная способность и лучевая прочность данных образцов.

Показано, что важной проблемой при изготовлении оптических элементов из алюминиевых сплавов является неоднородность структуры исходного материала, связанная с наличием интерметаллидных включений. Термообработка подложек из сплава АМг2 при $T \geq 380$ °С позволяет улучшить качество обработки поверхности и лучевую прочность алюминиевых зеркал как за счёт снятия механических напряжений, так и за счёт частичной гомогенизации исходного материала. Оптимальной является термообработка при максимально допустимой для сплава АМг2 температуре $T = 540$ °С, в результате которой происходит полное исчезновение интерметаллидных включений с повышенным содержанием магния. Применение высокотемпературной термообработки подложек позволяет, по сравнению с неотожжёнными образцами, снизить шероховатость поверхности с 1,5 до 0,55 нм, повысить отражательную способность зеркал на длине волны 1064 нм с 0,89 до 0,92 и повысить лучевую прочность с 3,5 до 5 Дж/см².

Ключевые слова: алюминиевые сплавы, алмазное наноточение, зеркала-отражатели, лучевая прочность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

Адрес для переписки:

Шаронов Г.В.
Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко
Белорусского государственного университета,
ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь
e-mail: sharonov@hotmail.ru

Address for correspondence:

Sharonov G.V.
A.N. Sevchenko Research Institute of Applied Physical Problems,
Belarusian State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: sharonov@hotmail.ru

Для цитирования:

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov.
Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors
Machined by Single Point Diamond Turning.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 139–145.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

For citation:

G.A. Gusakov, G.V. Sharonov.
Improving of Surface Quality of Metal Reflector Mirrors
Machined by Single Point Diamond Turning.
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 139–145.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-139-145

Introduction

Analysis of the technical state of various industries associated with the use of modern structural composite materials, ceramics, non-ferrous metals and alloys for the manufacture of super-precision products shows that the most effective processing method is diamond turning technology, when deviations in the shape and roughness of the processed surface should be within the nanometer range (≤ 5 nm) [1–3].

At present, the technology of single point diamond turning with nanoscale roughness is widely used in the manufacture of metal-optical products, primarily, reflector mirrors for transporting powerful laser energy flows [4–6]. Strict requirements are imposed on metals in the manufacture of reflector-mirrors with high radiation resistance: minimum values of physical, chemical and induced inhomogeneities; low-level of internal stress; good polishability; high reflectivity; high thermal conductivity and minimum coefficient of linear expansion. Due to good machinability, aluminum alloys of the AMg2 and AMg6 types are often used for the manufacture of reflector mirrors [5–10]. These alloys are the preferred material for mirrors in aerospace engineering [5–7].

In the manufacture of metal-optical products, the main attention is paid to the issues of ensuring the accuracy of the shape and reducing the surface roughness [5–10]. At the same time, inhomogeneities of the surface structure and residual internal stresses inherent in aluminum alloys [6, 10] can significantly affect the optical and working characteristics of reflector mirrors, especially in the case of high-power laser radiation. However, these problems are covered to a much lesser extent [11–13].

The aim of this work was to study the effect of surface heterogeneities of the AMg2 aluminum alloy substrates on their optical and mechanical characteristics and to determine a ways to improve the quality of aluminum reflector mirrors manufactured using single point diamond turning.

Research methods

The investigated reflector mirrors were made from AMg2 aluminum alloy. The original billets were discs 100 mm in diameter and 8 mm thick. Preliminary machining of the surface was carried out with a carbide cutter. In order to remove residual mechanical stresses and homogenizing of

the substrates surface they were heat treated in air in the temperature range from 200 to 540 °C. The duration of annealing was 10 h, followed by cooling in an oven. The maximum annealing temperature was limited by the melting of the AMg2 alloy. The final optical surface treatment was carried out on a precision lathe MK 6501 (Belarus) with an air bearing spindle using a special diamond cutter with a blade radius less than 0.05 μm .

The analysis of the surface condition of the initial billets from the AMg2 alloy and the billets subjected to mechanical-thermal treatment was carried out by scanning electron microscopy (SEM) / electron microprobe using a LEO 1455 VP electron microscope (Carl Zeiss, Germany) with an Aztec Energy Advanced X-Max 80 attachment. (Oxford Instruments, UK). In addition, the microhardness of the samples was measured using a PMT3 microhardness tester. The quality control of the surface treatment of the manufactured reflector mirrors was carried out by atomic force microscopy (AFM) on a Solver P47 Pro scanning microscope (NT-MDT, Russia). The reflectivity of the mirrors in the spectral range 200 ... 2500 nm was monitored on a precision spectrometer Lambda1050 (Perkin Elmer, USA). The study of the reflector mirrors laser damage threshold was carried out using pulsed radiation ($\lambda = 1.064$ μm , $\tau = 20$ ns) of the YAG:Nd³⁺ laser model LS-2137 (Lotis-TII, Belarus). The laser pulse energy was recorded using an IMO-3 energy meter (Etalon, Russia). Sony ICX415AL CCD image sensor was used to control the spatial distribution of energy in the laser spot. The measurements were carried out in the single-pulse mode. The average energy density of laser radiation on the sample surface varied in the range from 0.5 to 15 J/cm².

Results and discussion

According to the data of the electron microprobe, the averaged chemical composition of the initial alloy corresponds to the AMg2 grade. However, it is characterized by the presence of intermetallic inclusions, the size of which reaches 10 microns (Figure 1, sample No. 1). The first type of inclusions (light areas in Figure 1) has the composition Al_{4,5}FeMn_{0,2}. The second type (dark areas) has the composition Al₃MgSi. The hardness of these inclusions differs significantly from the hardness of the aluminum matrix, which negatively affects the quality of the surface treatment. In addition, the presence of intermetallic inclusions

on the surface of the substrates can reduce their radiation resistance. Hence, it is necessary to carry out preliminary homogenizing annealing of the aluminum alloy billets in order to reduce the inhomogeneity of the impurities distribution. For the AMg2 alloy, the recommended homogenizing annealing temperatures are in the range of 510 ... 540 °C. In addition, in the machining

of AMg2 alloy intermediate recrystallization anneals are usually used to partially or completely soften the material and increase its plasticity. Recommended temperature ranges of annealing are 150... 200 and 350... 420 °C. Based on the above, for the experiments, we have chosen the following temperatures for preliminary heat treatment of the AMg2 alloy billets: 200, 380 and 540 °C.

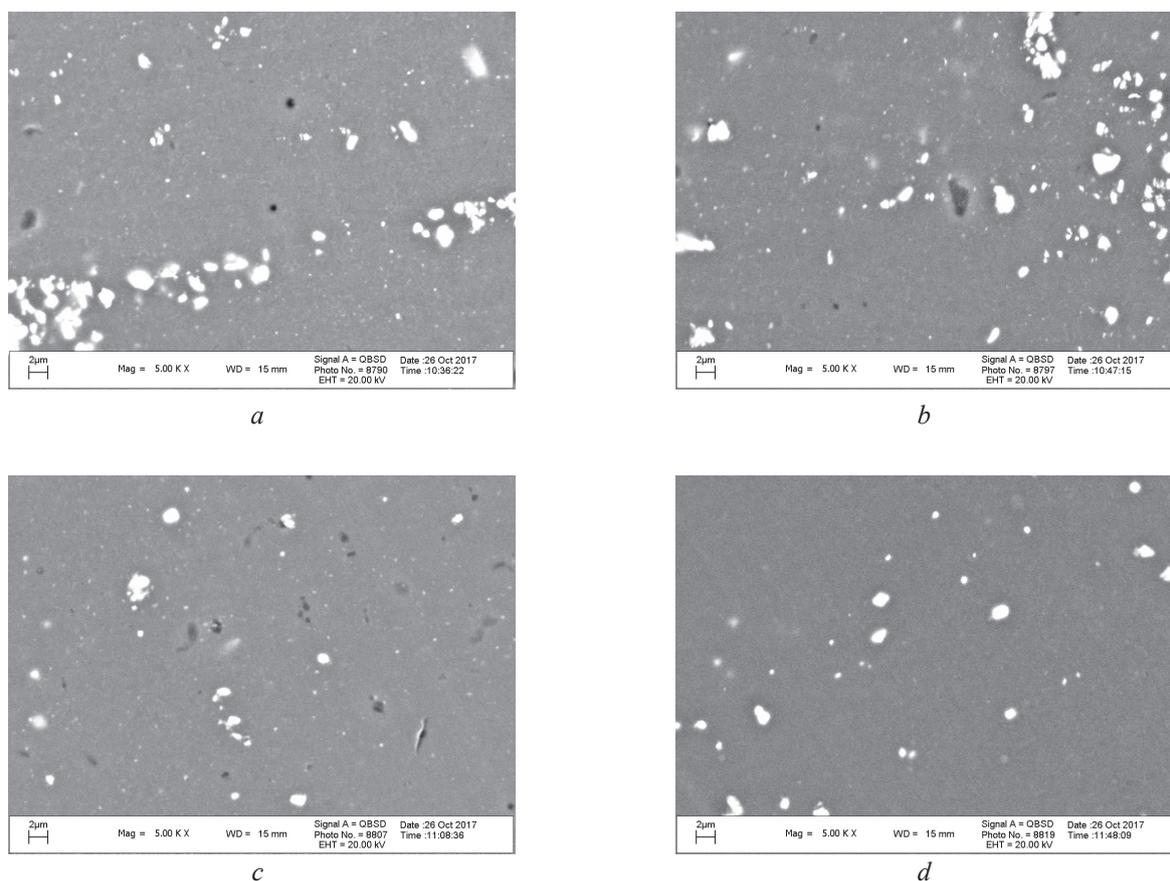


Figure 1 – Microphotographs of the surface of the initial sample of aluminum alloy AMg2 (a) and samples after annealing at various temperatures: b – 200 °C; c – 380 °C; d – 540 °C

The effect of preliminary heat treatment on the size and composition of intermetallic inclusions in the AMg2 alloy is shown in Figure 1. It can be seen that annealing at $T = 200$ °C does not affect the size and composition of intermetallic inclusions (Figure 1, sample No. 2). At $T = 380$ °C, a decrease the size of inclusions with an high magnesium content is observed. For inclusions with a high iron content, no changes are observed (Figure 1, sample No. 3). As a result of annealing at $T = 540$ °C, inclusions with a high magnesium content disappear completely. Inclusions with a high iron content are preserved, but they are somewhat reduced in size (Figure 1, sample No. 4).

Figure 2 shows the effect of preliminary heat treatment on the microhardness of aluminum alloy substrates. The initial alloy is in a cold-worked state, therefore, for it a noticeable decrease in microhardness with an increase in the load is observed (sample No. 1). Homogenizing annealing at $T \geq 200$ °C leads to softening of the surface of the initial alloy (sample No. 2). The microhardness of the samples decreases with an increase in the annealing temperature up to 380 °C (sample No. 3). A further increase in the annealing temperature does not lead to a noticeable change in the microhardness (sample No. 4).

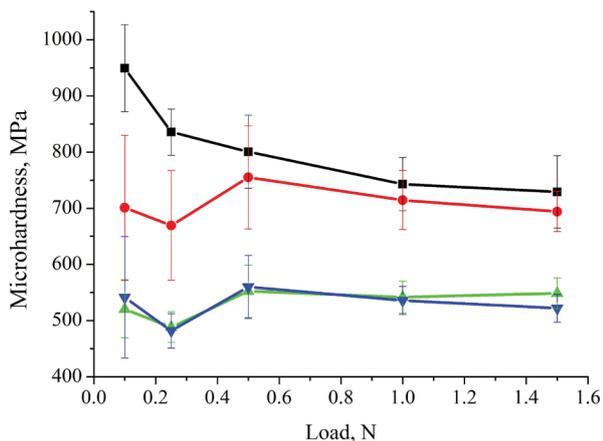


Figure 2 – Microhardness versus load for the investigated samples of substrates made of aluminum alloy AMg2, heat-treated at various temperatures: (■) – initial sample; (●) – T = 200 °C; (▲) – T = 380 °C; (▼) – T = 540 °C

After homogenizing annealing, all substrate samples underwent superfinishing treatment using nanoscale single point diamond turning to obtain optical surface clarity. The surface roughness of the manufactured reflector mirrors was studied using an atomic force microscopy. The measurement results are shown in the table and in Figure 3. It is clear that homogenizing annealing has a positive effect on the surface finish of the AMg2 alloy with a diamond turning. So for the original sample No. 1, not subjected to annealing, after finishing, the measured value of the surface roughness R_a is 1.5 nm. For a sample annealed at T = 200 °C, R_a = 1.1 nm. For samples No. 3 and No. 4, annealed at T ≥ 380 °C, the surface roughness R_a is less than 1 nm.

Table

Values of the surface roughness of the experimental samples depending on the heat treatment modes

№	R_a , nm	R_q , nm
1(initial)	1.5	2.0
2(200 °C, 10 h.)	1.1	1.7
3(380 °C, 10 h.)	0.65	0.84
4(540 °C, 10 h.)	0.55	0.75

A decrease in surface roughness naturally leads to an increase in the reflectivity of the manufactured mirrors. So for a sample annealed at T = 540 °C, the reflection coefficient at a wavelength of 1064 nm increases compared to the original sample from 0.89 to 0.92, and at a wavelength of 532 nm – from 0.86 to 0.89.

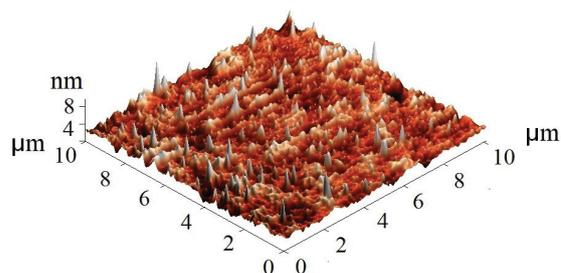


Figure 3 – Atomic force microscopy image of the surface relief of specimen of mirror No. 4 with R_a = 0.55 nm

For the manufactured reflector mirrors, tests for laser-induced damage threshold were carried out. The measurements were carried out in the mode of single laser pulses with a duration of 20 ns. The diameter of the laser spot on the mirror surface was 2.2 mm. The pulse energy was varied in the range from 70 to 300 mJ. Taking into account the real spatial distribution of energy in the laser spot, the energy density on the mirror surface varied in the range from 0.5 to 15 J/cm². An example of determining of the mirror surface damage threshold under the action of laser radiation is shown in Figure 4. It can be seen that the laser we used has a substantially nonuniform energy distribution over the cross section of the laser spot. This pattern is typical for commercial solid-state lasers. For a pulse with an energy of 100 mJ (Figure 4b), the power density of laser radiation varies over the spot cross section in the range of 0.5...8.0 J/cm². The average energy density W_a is 2.4 J/cm². For a pulse with an energy of 270 mJ (Figure 4d), the power density varies within the range of 1.25... 13.00 J/cm², and W_a = 6.5 J/cm². Analysis of the distribution of damage on the mirror surface (Figures 4a and 4c) for several laser pulses with different energies allows to determine the threshold energy of laser radiation with high accuracy.

According to the test results, it was found that for the initial aluminum alloy (sample No. 1), the threshold energy density of laser radiation is 3.5 J/cm². This value significantly exceeds the damage threshold of ≈ 1 J/cm² recorded for aluminum substrates subjected to abrasive or electrochemical polishing [13–14]. It is obvious that an increase in the radiation resistance of aluminum reflector mirrors is provided by a decrease in the surface roughness and an increase in its reflectivity. Thus, the promising nature of single-point diamond turning as a highly efficient method of forming optical surfaces on aluminum alloys has been confirmed.

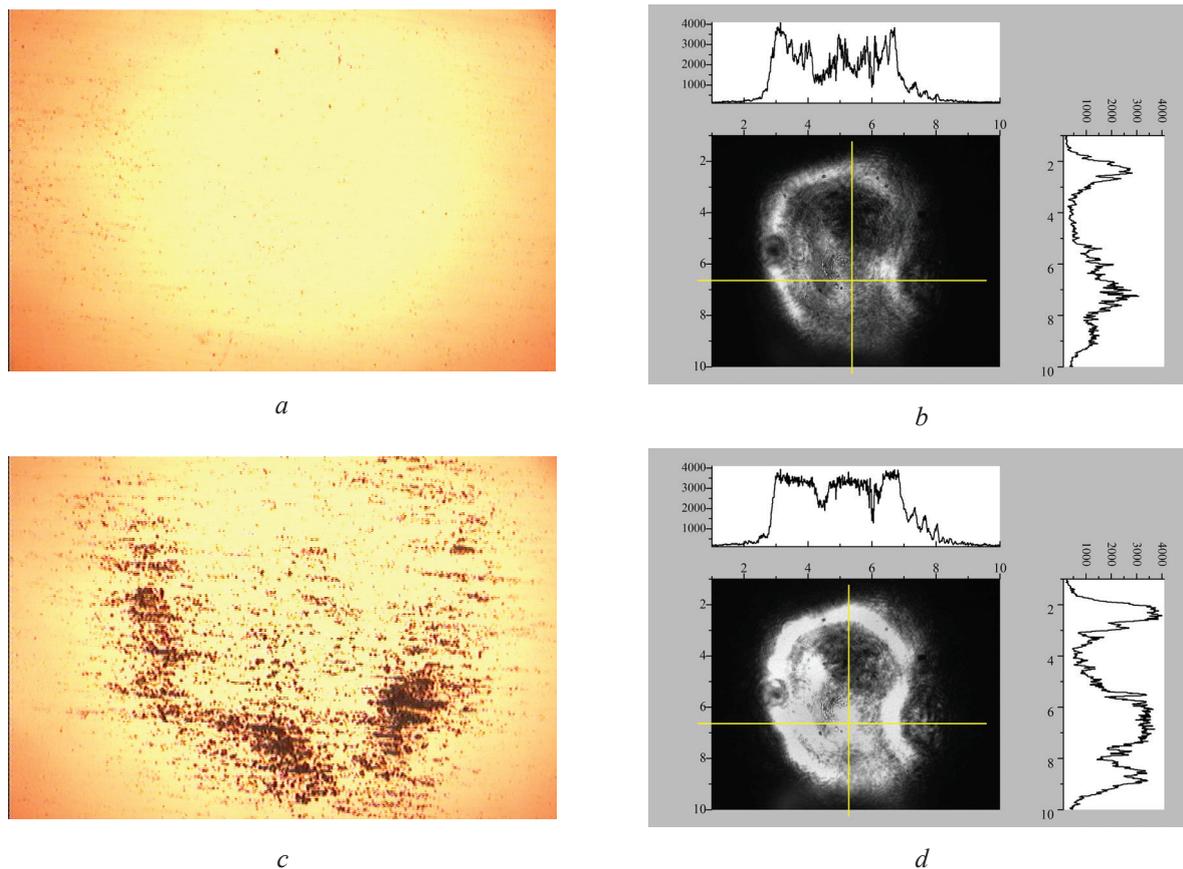


Figure 4 – Image of the surface of mirror No. 4 after exposure to a laser pulse with an energy of 100 (a) and 270 mJ (c), the spatial distribution of energy in the laser spot at a pulse energy of 100 (b) and 270 mJ (d)

Heat treatment of substrates in the temperature range from 200 to 380 °C does not lead to a noticeable change of the reflector mirrors damage threshold. So for samples No. 2 and No. 3, threshold energy densities are in the range of 3.5...4.0 J/cm². For a sample annealed at T = 540 °C, the threshold energy density is about 5 J/cm², which is ≈ 30 % higher than for the original sample. Detailed studies of the nature of the high-power laser pulses destruction of the mirrors surface manufactured

using the single-point diamond turning technology from initial AMg2 aluminum alloy show that degradation begins in the areas of localization of intermetallic inclusions. Thus, the increase the laser damage threshold of the sample annealed at T = 540 °C compared to the initial alloy can be associated with its partial homogenization.

The obtained results were used in the manufacture of various metal-optical products from aluminum alloys with increased radiation resistance (Figure 5).

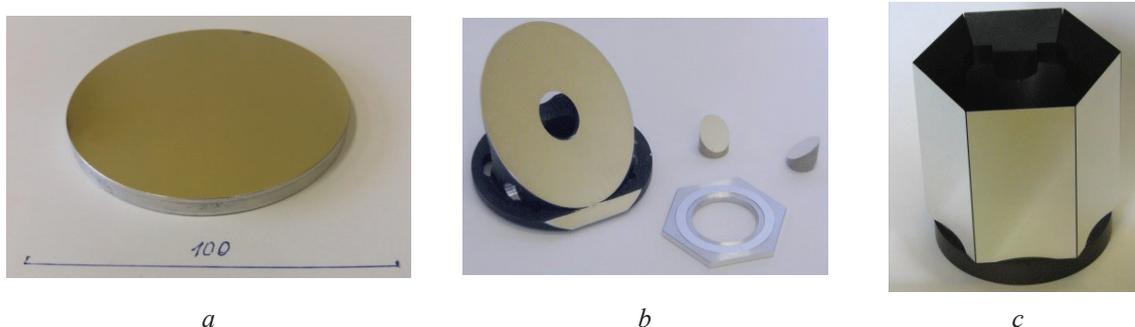


Figure 5 – Optical products from aluminum alloys manufactured at Research Institute of Applied Physical Problems: a – laser mirrors with high radiation resistance; b – corner reflectors and scanners; c – multifaceted prism mirrors for video surveillance systems

Experimental operation of these products shows that the combination of technologies for preliminary heat treatment of aluminum alloy billets and single-point diamond turning makes it possible to increase the competitiveness of manufactured optical elements and expand their application areas.

Conclusion

Investigations of the influence of inhomogeneities of the surface structure of AMg2 aluminum alloy substrates on their optical and mechanical characteristics have been carried out and the ways of improving the quality of aluminum reflector mirrors manufactured using the single-point diamond turning have been determined.

It is shown that an important problem in the manufacture of optical elements from aluminum alloys is the inhomogeneity of the structure of the initial material, associated with the presence of intermetallic inclusions. Preliminary annealing of billets from AMg2 alloy at $T \geq 380$ °C makes it possible to improve the surface treatment quality and the laser damage threshold of aluminum mirrors both by removing mechanical stresses and by partially homogenizing the initial material. The optimum is heat treatment at the maximum allowable temperature for the AMg2 alloy $T = 540$ °C, as a result of which there is a complete disappearance of intermetallic inclusions with an increased magnesium content.

Experimental studies have shown the possibility of obtaining mirror roughness $R_a = 0.55$ nm and the laser damage threshold of about 5 J/cm^2 . Based on the obtained results a technology of aluminum alloys single-point diamond turning for the manufacture of metal-optical products with high radiation resistance has been developed.

References

1. Gorokhov V., Zakharevich E., Skvortsova M. *Povyshenie tochnosti detaley metalloptiki pri almaznom tochenii na ul'trapretsizionnom oborudovanii* [Accuracy improvement of metal-optical parts during diamond turning on ultra-precision equipment]. *Fotonika* [Photonics], 2014, no. 1, pp. 118–123 (in Russian).
2. Davim J.P., Jackson J.M. *Nano and Micromachining*. London: ISTE, Wiley, 2009, 312 p.
3. Kumar K., Zindani D., Kumari N., Davim J.P. *Micro- and Nano-Machining of Engineering Materials: Recent Developments*. Springer, 2018, 150 p.
4. Guregian J.J., Pepi J.W., Schwalm M., Azad F. Material trades for reflective optics from a systems engineering perspective. *Proc. SPIE*, 2003, vol. 5179, pp. 85–96. DOI: 10.1117/12.511537
5. Vukobratovich D., Schaefer J.P. Large stable aluminum optics for aerospace applications. *Proc. SPIE*, 2011, vol. 8125, p. 81250T. DOI: 10.1117/12.892039
6. Zhang J., Zhang X., Tan S., Xie X. Design and Manufacture of an Off-axis Aluminum Mirror for Visible-light Imaging. *Current Optics and Photonics*, 2017, vol. 1, no. 4, pp. 364–371. DOI: 10.3807/COPP.2017.1.4.364
7. Schaefer J.P. Advanced metal mirror processing for tactical ISR systems. *Proc. of SPIE*, 2013, vol. 8713, pp. 871306-1-871306-10. DOI: 10.1117/12.2015496
8. Li L.H., Yu N.H., Chan C.Y., Lee W.B. Al6061 surface roughness and optical reflectance when machined by single point diamond turning at a low feed rate. *PLoS ONE*, 2018, vol. 13, no. 4, p. e0195083. DOI: 10.1371/journal.pone.0195083
9. Otieno T., Abou-El-Hossein K. Molecular dynamics analysis of nanomachining of rapidly solidified aluminium. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2017, vol. 94, pp. 121–131. DOI: 10.1007/s00170-017-0853-5
10. Steinkopf R., Gebhardt A., Scheiding S., Rohde M., Stenzel O., Glied S., Giggel V., Löscher H., Ullrich G., Rucks P., Duparre A., Risse S., Eberhardt R., Tünnermann A. Metal mirrors with excellent figure and roughness. *Proc. SPIE*, 2008, vol. 7102, p. 71020C. DOI: 10.1117/12.797702
11. Tillack M.S., Pulsifer J.E. Development of Damage-Resistant Metal Mirrors for Laser-IFE. IEEE 22nd Symposium on Fusion Engineering, 2007. DOI: 10.1109/fusion.2007.4337952
12. Revela P., Khanfira H., Fillit R.-Y. Surface characterization of aluminum alloys after diamond turning. *J. of Materials Processing Technology*, 2006, vol. 178, pp. 154–161. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2006.03.169
13. Liu W., Sun M., Guo Y., Jiao Z., Wu R., Pan X. Ablation characteristics of aluminium alloy and stainless steel induced by picoseconds laser pulses. *Proc. SPIE*, 2019, vol. 11063, p. 110631B. DOI: 10.1117/12.2539907
14. Zaghoul M., Tillack M., Mau T.K. Laser-induced damage of metal mirrors under long-term exposure at shallow angle of incidence. IEEE 19th Symposium on Fusion Engineering, 2002, pp. 272–275. DOI: 10.1109/FUSION.2002.1027693

Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа

Д.М. Малютин

Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия

Поступила 30.03.2021

Принята к печати 02.06.2021

Разработка волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является одним из перспективных направлений развития гироскопических датчиков угловой скорости. ВТГ с позиций технологии изготовления, системы настройки и управления, а также точностных характеристик имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами гироскопов. При разработке ВТГ стремятся уменьшить собственный уход гироскопа, смещения нулевого сигнала, нелинейность масштабного коэффициента в рабочем интервале температур. Однако при создании прибора зачастую не уделяется должного внимания существующим возможностям повышения динамической точности гироскопа за счёт разработки перспективных структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации. Решение этой проблемы и являлось целью работы.

С использованием методов теории автоматического регулирования выполнены исследования динамики волнового твердотельного гироскопа с металлическим резонатором и пьезоэлементами в режиме замкнутого контура компенсации кориолисового ускорения. Пьезоэлементы выполняют функции датчиков перемещений и силы.

Предложены и рассмотрены два перспективных структурных решения построения контуров регулирования и обработки информации ВТГ. Установлены соотношения для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих повышение динамической точности гироскопа. В первом случае предложенная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. Во втором случае предложенной структуре построения ВТГ соответствует передаточная функция относительной погрешности измерения с астатизмом второго порядка, а абсолютная погрешность измерения в полосе частот 10 Гц не превышает 0,1 %.

Ключевые слова: волновой твердотельный гироскоп, структурные решения, динамическая точность.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Адрес для переписки:

Малютин Д.М.
Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.
Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Д.М. Малютин.
Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 146–155.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

For citation:

D.M. Malyutin.
[Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 146–155 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope

D.M. Malyutin

Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia

Received 30.03.2021

Accepted for publication 02.06.2021

Abstract

The development of wave solid-state gyroscopes (VTG) is one of the promising areas of development of gyroscopic angular velocity sensors. VTG from the standpoint of manufacturing technology, tuning and control systems, as well as accuracy characteristics, has a number of advantages compared to other types of gyroscopes. When developing VTG, they strive to reduce the gyroscope's own care, zero signal bias, and the non-linearity of the scale factor in the operating temperature range. However, when creating the device, due attention is often not paid to the existing opportunities to improve the dynamic accuracy of the gyroscope by developing promising structural solutions for building control circuits and information processing. The solution to this problem was the goal of the work.

Using the methods of the theory of automatic control, the dynamics of a wave solid-state gyroscope with a metal resonator and piezoelectric elements in the closed-loop mode of Coriolis acceleration compensation are studied. Piezoelectric elements perform the functions of displacement and force sensors.

Two promising structural solutions for constructing VTG control and information processing circuits are proposed and considered. Relations are established for selecting the parameters of the links of these contours, which provide an increase in the dynamic accuracy of the gyroscope. In the first case, the proposed structure for constructing the VTG allows us to significantly reduce the dynamic errors caused by the difference in the scale coefficient of the VTG at different frequencies of the measured angular velocity in the bandwidth. Such a structure for constructing a VTG can be recommended when solving a measurement problem in which it is necessary to accurately measure the angular velocity, and the phase lag of the output signal in relation to the measured angular velocity is of secondary importance. In the second case, the proposed structure of the VTG construction corresponds to the transfer function of the relative measurement error with second-order astatism, and the absolute measurement error in the frequency band of 10 Hz does not exceed 0.1 %.

Keywords: wave solid-state gyroscope, structural solutions, dynamic accuracy.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Адрес для переписки:

Мalyutin Д.М.
Тульский государственный университет,
пр-т Ленина, 92, г. Тула 300012, Россия
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Address for correspondence:

Malyutin D.M.
Tula State University,
Lenin Ave., 92, Tula 300012, Russia
e-mail: MalyutinDM@yandex.ru

Для цитирования:

Д.М. Мalyutin.
Структурные решения, обеспечивающие увеличение динамической точности волнового твердотельного гироскопа.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 146–155.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

For citation:

D.M. Malyutin.
[Structural Solutions that Increase the Dynamic Accuracy of a Wave Solid-State Gyroscope].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 145–155 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-146-155

Введение

Разработка волновых твердотельных гироскопов (ВТГ) является одним из перспективных направлений развития гироскопических датчиков угловой скорости. В ВТГ, функционирующим в режиме датчика угловой скорости, реализуется удержание стоячей волны относительно корпуса гироскопа, а вторичная волна, возникающая при вращении основания, компенсируется. Сила компенсации содержит информацию об угловой скорости вращения основания. При этом обеспечивается широкая полоса пропускания гироскопа и высокая чувствительность. ВТГ с позиций технологии изготовления, системы настройки и управления, а также точностных характеристик имеет ряд преимуществ по сравнению с другими видами гироскопов: полностью отсутствуют вращающиеся части, малое количество компонентов конструкции, поэтому рабочий ресурс прибора оказывается очень большим (от 15000 часов и более); способность переносить большие перегрузки; компактность; небольшая масса и габариты; сохранение инерциальной информации при кратковременном отключении электропитания; низкая энергоёмкость; малое время готовности; слабая зависимость от температуры окружающей среды при выполнении определенных конструктивных и технологических условий; стойкость к ионизирующему излучению с высокой энергией [1].

За рубежом [2–7] и в России [8–13] ведутся исследования и разработки ВТГ с различными формами резонаторов. ВТГ с объёмным резонатором (полусферическим или цилиндрическим) имеют характеристики точности (дрейф, нестабильность масштабного коэффициента и др.), достаточные для использования их в информационно-измерительных системах и инерциальных навигационных системах различных классов точности [2–4]. У резонаторов из металла уровень внутреннего трения больше, чем у резонаторов из кварцевого стекла. Характеристики резонаторов из металла хуже, чем у резонаторов из кварцевого стекла. Однако у ВТГ с металлическими резонаторами к настоящему времени уже достигнут уровень нестабильности смещения нуля 0,1–15 град/ч и они имеют значительно меньшую себестоимость, чем ВТГ с резонатором из кварцевого стекла, что обуславливает дальнейшую перспективу улучшения их характеристик и применения.

При совершенствовании ВТГ большое внимание уделяется вопросам разработки конструкции чувствительного элемента, технологии его изготовления и балансировки. Перспективные конструкции чувствительных элементов ВТГ с металлическим резонатором [6, 9] имеют чаще всего цилиндрическую форму, на донную поверхность которой наклеены пьезоэлементы, используемые для возбуждения и измерения колебаний. Конструкция, позволяющая уменьшить габаритные размеры ВТГ без уменьшения размеров резонатора, приведена в работе [6]. В работе [9] показано, что для изготовления высокодобротного металлического резонатора ВТГ с заданными свойствами хорошим выбором является прецизионный сплав 21НКМТ-ВИ. Устранение дефектов изготовления резонатора, которые приводят к разночастотности и разнодобротности, достигается балансировкой. Базовым методом является балансировка по 4-й форме распределения дефектов масс, а последним этапом является калибровка, в результате которой производится окончательное определение параметров системы управления.

При разработке ВТГ стремятся, уменьшить собственный дрейф гироскопа [10], смещения нулевого сигнала, нелинейность масштабного коэффициента в рабочем интервале температур [11]. Однако при создании прибора [12] зачастую не используются существующие потенциальные возможности повышения динамической точности гироскопа за счёт разработки перспективных структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации.

Целью статьи являлась разработка структурных решений построения контуров регулирования и обработки информации ВТГ, установление соотношений для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих повышение динамической точности гироскопа.

Динамика волновых твердотельных гироскопов

В работе [13] рассмотрена динамика ВТГ в режиме замкнутого контура компенсации кориолисова ускорения. Структурная схема ВТГ представлена на рисунке 1.

Для определения параметров контуров регулирования ВТГ в режиме датчика угловой скорости (ДУС) использовалась передаточная функция разомкнутой системы ВТГ

с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала [13]:

$$W_{raz}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} k_{pz} T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{(T_{wtg} p + 1) p} \quad (1)$$

Для определения полосы пропускания и динамической точности использована передаточная

функция замкнутой схемы ВТГ в режиме ДУС с пропорционально-интегральным регулятором по огибающей выходного сигнала:

$$W_{zam1}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1} \quad (2)$$

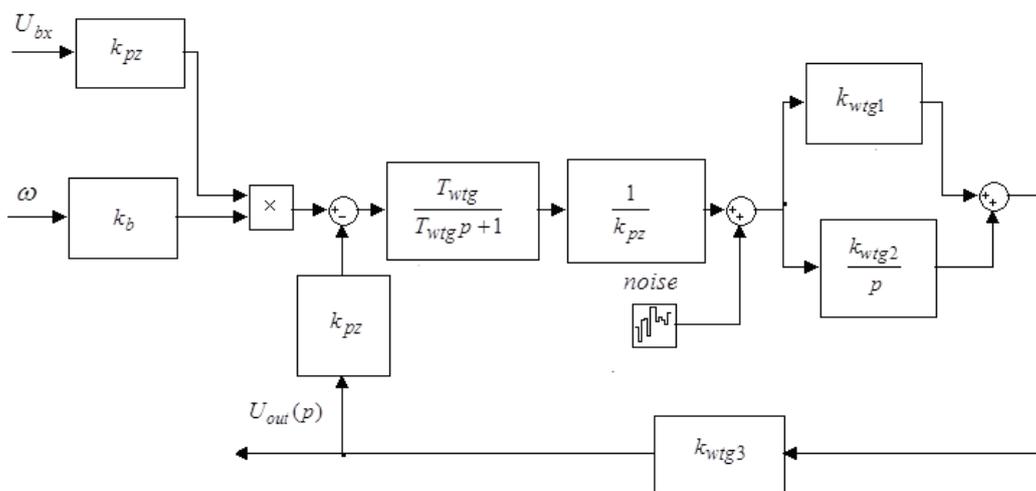


Рисунок 1 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: k_b – коэффициент Брайана; U_{bx} – входное напряжение; k_{wtg1} , k_{wtg2} , k_{wtg3} – коэффициенты передачи в контурах регулирования волнового твердотельного гироскопа; T_{wtg} – постоянная времени чувствительного элемента волнового твердотельного гироскопа; k_{pz} – коэффициент передачи пьезоэлементов; ω – измеряемая угловая скорость; U_{out} – напряжение на выходе волнового твердотельного гироскопа

Figure 1 – Wave solid-state gyroscope block diagram: k_b – coefficient Brian; U_{bx} – input voltage; k_{wtg1} , k_{wtg2} , k_{wtg3} – transfer coefficients in the loop wave solid-state gyroscope; T_{wtg} – the time constant of the sensing element wave solid-state gyroscope; k_{pz} – the transmission coefficient of the piezoelectric elements; ω – the measured angular velocity; U_{out} – the output voltage wave solid-state gyroscope

Введём обозначение ω_{izm} – измеренная угловая скорость, тогда:

$$W_{zam2}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1}; \quad (3)$$

$$W_{zam3}(p) = \frac{\omega(p) - \omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p + \frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} \right) p}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^2 + \frac{(T_{wtg} k_{wtg1} k_{wtg3} + 1)}{T_{wtg} k_{wtg2} k_{wtg3}} p + 1} \quad (4)$$

На основании передаточных функций (1), (2) построены логарифмические амплитудно-

фазовые частотные характеристики (ЛАФЧХ) разомкнутой (рисунок 2) и замкнутой (рисунок 3) систем ВТГ в режиме ДУС с пропорционально-интегральным регулятором при следующих параметрах прибора [13]: $k_b = 0,4$; $U_{bx} = 1$ В; $k_{wtg1} = 1$; $k_{wtg2} = 100$; $k_{wtg3} = 800$; $T_{wtg} = 1,6$ с.

Согласно рисунку 2 система устойчива, запас по фазе в разомкнутой системе составляет $73,4^\circ$.

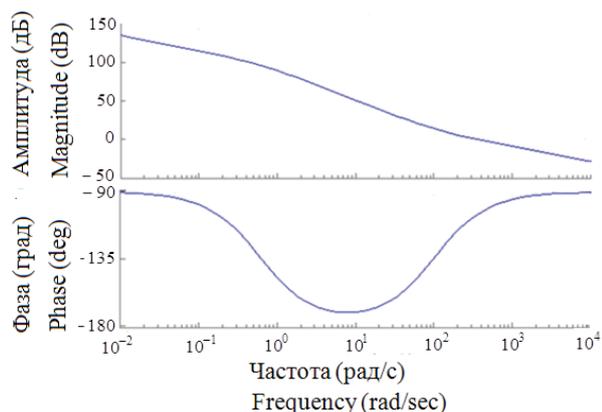


Рисунок 2 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика разомкнутой системы волнового твердотельного гироскопа с пропорционально-интегральным регулятором

Figure 2 – Logarithmic amplitude phase frequency response of an open-loop wave solid-state gyroscope system with a proportional-integral controller

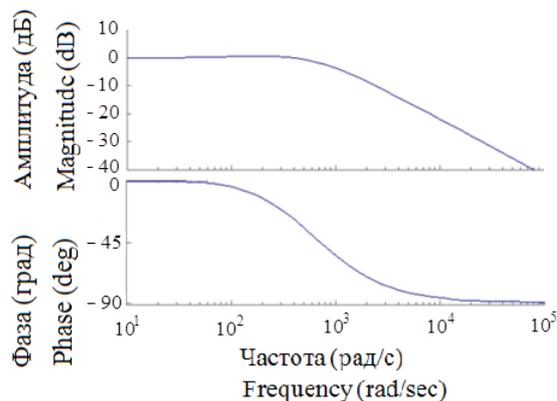


Рисунок 3 – Логарифмическая амплитудно-фазовая частотная характеристика замкнутой системы волнового твердотельного гироскопа с пропорционально-интегральным регулятором

Figure 3 – Logarithmic amplitude phase frequency response of the closed wave solid-state gyroscope system with a proportional-integral controller

С целью уменьшения динамической погрешности гироскопа выходной сигнал подадим на вход корректирующего звена с передаточной функцией вида:

$$W(p) = \frac{U_{out1}(p)}{U_{out}(p)} = \frac{1}{T_{kz}p + 1}, \quad \text{где } T_{kz} = \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}}.$$

Структурная схема ВТГ в этом случае представлена на рисунке 4.

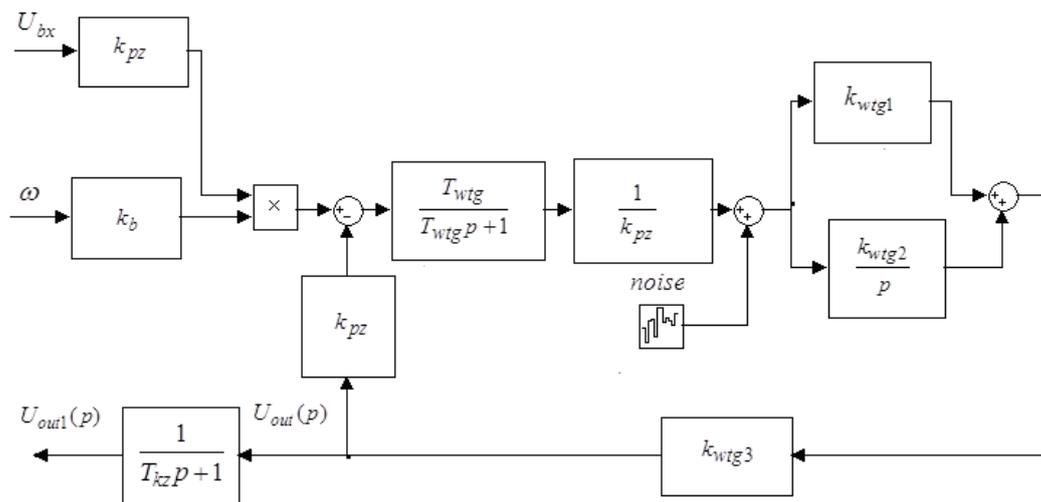


Рисунок 4 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: U_{out1} – напряжение на выходе волнового твердотельного гироскопа после коррекции; T_{kz} – постоянная времени корректирующего звена, остальные обозначения приведены в подписи к рисунку 1

Figure 4 – Wave solid-state gyroscope block diagram: U_{out1} – output voltage of the wave solid-state gyroscope after correction; T_{kz} – the time constant of the correction link, the remaining designations are given in the caption to Figure 1

Кроме того, потребуем выполнения условия:

$$2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} = \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} + \frac{1}{T_{wtg}k_{wtg1}k_{wtg3}}.$$

Отсюда:

$$k_{wtg3} \approx 4\xi^2 k_{wtg2} / k_{wtg1}^2, \quad \text{где } \xi = 0,707. \quad (5)$$

Передаточные функции ВТГ принимают вид:

$$W_{zam4}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx}}{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}} p^2 + 2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} p + 1}; \quad (6)$$

$$W_{zam5}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{1}{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}} p^2 + 2\xi \sqrt{\frac{1}{k_{wtg2}k_{wtg3}}} p + 1}. \quad (7)$$

В этом случае передаточная функция ВТГ (6) эквивалентна передаточной функции фильтра Баттерворта второго порядка и имеет максимально плоскую ЛАЧХ в полосе пропускания гироскопа. Кроме того удаётся уменьшить амплитуду шумовой составляющей выходного сигнала в полосе частот выше частоты $\omega_1 = \frac{k_{wtg2}}{k_{wtg1}}$.

Рассмотренная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. На рисунке 5 представлены ЛАЧХ, построенные на основании (3) и (7), а на рисунке 6 – графики переходных процессов, построенные на основании (3) и (7) как реакция на ступенчатое воздействие с амплитудой 1 рад/с. В случае (7) параметры системы определены с учётом соотношения (5) и равны: $k_b = 0,4$; $U_{bx} = 1$ В, $k_{wtg1} = 1$, $k_{wtg2} = 500$, $k_{wtg3} = 980$, $T_{wtg} = 1,6$ с.

Эффективность предложенной схемы построения ВТГ можно проиллюстрировать следующим примером. В случае (3) масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с, отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости на 8,5 %. В случае (7) масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с, отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости всего лишь на 0,2 %.

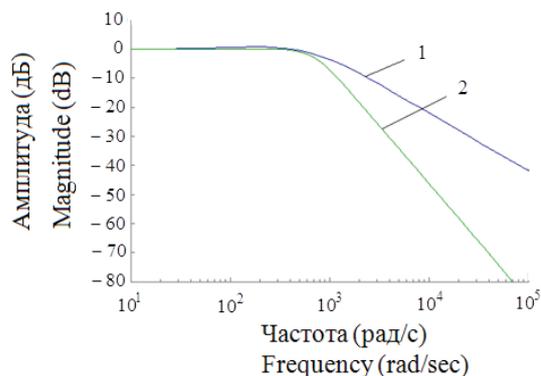


Рисунок 5 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика замкнутой системы: 1 – в соответствии с передаточной функцией (3); 2 – в соответствии с передаточной функцией (7)

Figure 5 – Logarithmic amplitude-frequency response of a closed system: 1 – in accordance with the transfer function (3); 2 – in accordance with the transfer function (7)

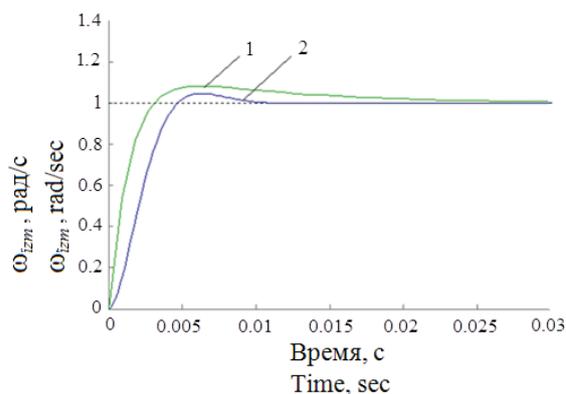


Рисунок 6 – Графики переходных процессов: 1 – в соответствии с передаточной функцией (3); 2 – в соответствии с передаточной функцией (7)

Figure 6 – Transition graphs: 1 – in accordance with the transfer function (3); 2 – in accordance with the transfer function (7)

В том случае, когда нельзя пренебречь фазовым отставанием выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости и в тоже время необходимо минимизировать по-

грешность измерения угловой скорости в полосе пропускания, может быть рекомендована структура построения ВТГ, приведённая на рисунке 7.

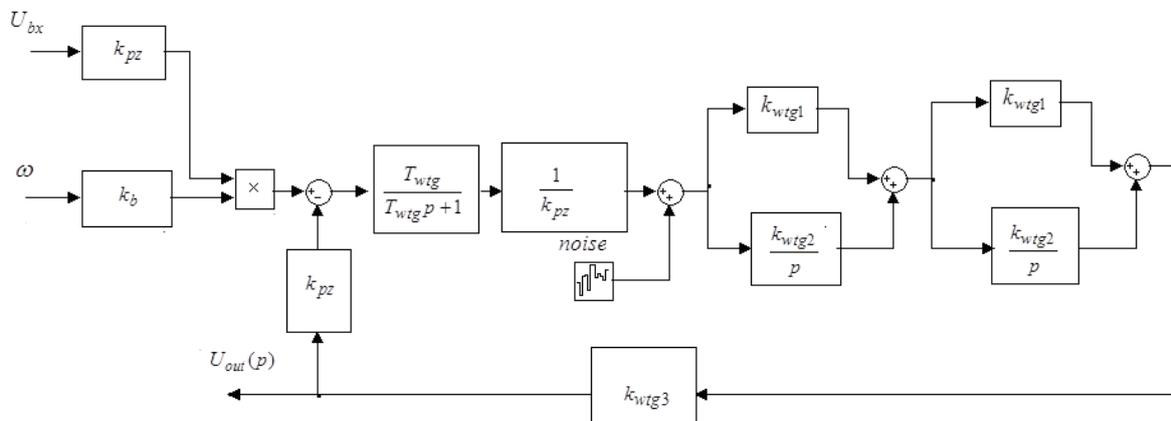


Рисунок 7 – Структурная схема волнового твердотельного гироскопа: в отличие от рисунка 1 применено последовательное включение двух изодромных звеньев с параметрами k_{wtg1} , k_{wtg2} , остальные обозначения приведены в подписи к рисунку 1

Figure 7 – Wave solid-state gyroscope block diagram: in contrast to Figure 1 the sequential inclusion of two isodromic links with the parameters k_{wtg1} , k_{wtg2} is applied, the remaining designations are given in the caption to Figure 1

При этом справедливы передаточные функции (8), (9), (10):

$$W_{zam6}(p) = \frac{U_{out}(p)}{\omega(p)} = \frac{k_b U_{bx} \left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}; \quad (8)$$

$$W_{zam7}(p) = \frac{\omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{\left(\frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1 \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}; \quad (9)$$

$$W_{zam8}(p) = \frac{\omega(p) - \omega_{izm}(p)}{\omega(p)} = \frac{p^2 \left(\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p + \frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} + \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} \right)}{\frac{1}{k_{wtg2} k_{wtg3}} p^3 + \left(\frac{1}{T_{wtg} k_{wtg2}^2 k_{wtg3}} + \frac{k_{wtg1}^2}{k_{wtg2}^2} \right) p^2 + 2 \frac{k_{wtg1}}{k_{wtg2}} p + 1}. \quad (10)$$

Передаточная функция относительной погрешности измерения (10) имеет нуль второго порядка в точке $p = 0$, что соответствует астатизму второго порядка. ЛАФЧХ передаточной функции (4) и (10) представлены на рисунке 8.

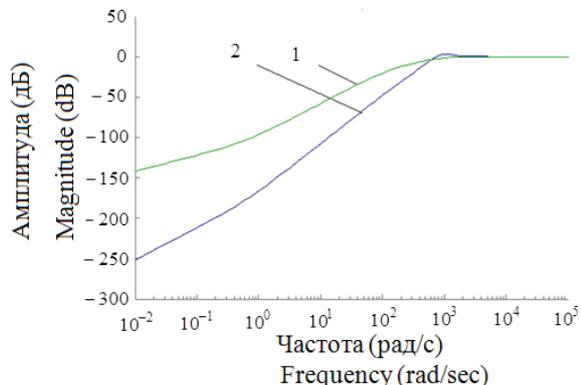


Рисунок 8 – Логарифмическая амплитудно-частотная характеристика передаточной функции относительной погрешности измеряемой величины: 1 – в соответствии с передаточной функцией (4); 2 – в соответствии с передаточной функцией (10)

Figure 8 – Logarithmic amplitude-frequency response of the transfer function of the relative error of the measured value: 1 – in accordance with the transfer function (4); 2 – in accordance with the transfer function (10)

Графики измеряемой угловой скорости с амплитудой 1 рад/с и частотой 62,8 рад/с и абсолютной погрешности измерения для структурных схем на рисунке 1 и рисунке 7 представлены соответственно на рисунке 9 и рисунке 10.

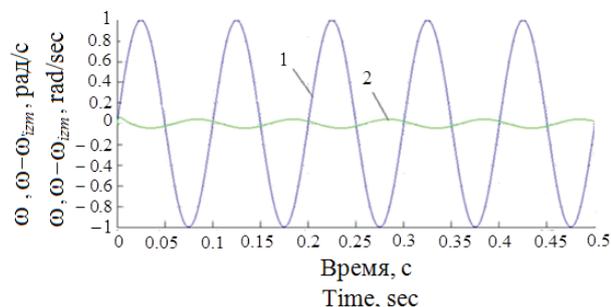


Рисунок 9 – Графики временных зависимостей измеряемой угловой скорости (1) и абсолютной погрешности измерения (2) для структурной схемы на рисунке 1

Figure 9 – Graphs of the time dependences of the measured angular velocity (1) and the absolute measurement error (2) for the block diagram in Figure 1

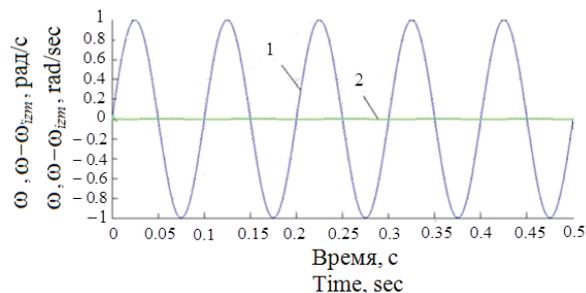


Рисунок 10 – Графики временных зависимостей измеряемой угловой скорости (1) и абсолютной погрешности измерения (2) для структурной схемы на рисунке 7

Figure 10 – Graphs of the time dependences of the measured angular velocity (1) and the absolute measurement error (2) for the block diagram in Figure 7

Если на рисунке 9 абсолютная погрешность измерения угловой скорости составляет 4,3 %, то на рисунке 10 абсолютная погрешность измерения угловой скорости составляет всего лишь 0,1 %.

Заключение

Предложены и рассмотрены два перспективных структурных решения построения контуров регулирования и обработки информации волновых твердотельных гироскопов (ВТГ). Установлены соотношения для выбора параметров звеньев этих контуров, обеспечивающих увеличение динамической точности гироскопа.

В первом случае предложенная структура построения ВТГ позволяет существенно уменьшить динамические погрешности, обусловленные различием масштабного коэффициента ВТГ при различных частотах измеряемой угловой скорости в полосе пропускания. Такая структура построения ВТГ может быть рекомендована при решении измерительной задачи, в которой необходимо точно измерить величину угловой скорости, а фазовое отставание выходного сигнала по отношению к измеряемой угловой скорости имеет второстепенное значение. Масштабный коэффициент ВТГ при измерении угловой скорости, изменяющейся по гармоническому закону с частотой 200 рад/с отличается от масштабного коэффициента ВТГ при измерении постоянной угловой скорости всего лишь на 0,2 %.

Во втором случае предложенной структуре построения ВТГ соответствует передаточная функция относительной погрешности измерения,

которая имеет нуль второго порядка в точке $p = 0$, что соответствует астатизму второго порядка, а абсолютная погрешность измерения в полосе частот 10 Гц не превышает 0,1 %.

Список использованных источников

1. Волчихин И.А. Волновые твердотельные гироскопы (аналитический обзор) / И.А. Волчихин [и др.] // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2017. – № 9–2. – С. 59–78.

2. Делэйе Ф. Бортовая инерциальная система координат Spasenaute для европейской ракеты-носителя «Ариан-6» на основе волнового твердотельного гироскопа / Ф. Делэйе // Гироскопия и навигация – 2018. – № 4 (103). – С. 3–13.

DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013

3. Мейер Д. Измерительная навигационная система на основе миниатюрного волнового твердотельного гироскопа / Д. Мейер, Д. Розелле // Гироскопия и навигация. – 2012. – № 3 (78). – С. 45–54.

4. Жанруа А. Волновой твердотельный гироскоп и его применение в морском приборостроении / А. Жанруа, А. Буве, Ж. Ремиллье // Гироскопия и навигация. – 2013. – № 4 (83). – С. 24–34.

5. Asadian M.H., Wang Y., Shkel A.M., Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, pp. 1380–1383.

6. United States Patent № US009322655B2, 26.04.2016. Axially symmetrical coriolis force gyroscope (varlants) / Valery Valerianovich Chikovani, Kiev (UA); Yurii Alekseevich Yatzenko, Kiev (UA)

7. United States Patent № USOO6474,161B1, 5.11.2002. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof / Alain Jeanroy (FR), Pierre Leger, (FR).

8. Raspopov V.Ya. Tuning and calibration of a coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator to operate in angular rate sensor mode / V.Ya. Raspopov [et al.] // *Gyroscopy and Navigation*, 2020, vol. 11, pp. 34–40.

DOI: 10.1134/S2075108720010113

9. Распопов В.Я. Конкурентоспособный волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов, А.В. Ладонкин, В.В. Лихошерст // Мехатроника, автоматизация, управление. – 2018. – № 4. – С. 777–787.

DOI: 10.17587/mau.ig.777-787

10. Трутнев Г.А. Компенсация дрейфа твердотельного волнового гироскопа / Г.А. Трутнев [и др.] // Вестник ИЖГТУ им. М.Т. Калашникова. – 2018. – Том 21, № 3. – С. 198–204.

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-198-204

11. Трутнев Г.А. Нелинейность масштабного коэффициента волнового твердотельного гироскопа / А.Г. Трутнев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2018. – Т. 16, № 4. – С. 138–134.

DOI: 10.22213/2410-9304-2018-4-138-144

12. Распопов В.Я. Волновой твердотельный гироскоп с металлическим резонатором / В.Я. Распопов [и др.]. – Тула, 2018. – 189 с.

13. Королев М.Н. Исследование динамических характеристик гироскопического стабилизатора на волновом твердотельном гироскопе / М.Н. Королев, Д.М. Малютин // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. – 2019. – № 8. – С. 129–135.

References

1. Volchihin I.A., Volchihin A.I., Malyutin D.M., Matveev V.V., Raspopov V.Ja., Teluhin S.V., Svedov A.P. [Wave solid-state gyroscopes (analytical review)]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical], 2017, no. 9–2, pp. 59–78 (in Russian).

2. Delaye F. [On-board inertial coordinate system Spasenaute for the European launch vehicle "Ariane-6" based on a wave solid-state gyroscope]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2018, no. 4 (103), pp. 3–13 (in Russian).

DOI: 10.17285/0869-7035.2018.26.4.003-013

3. Meier D., Rozelle D. [Measuring navigation system based on a miniature wave solid-state gyroscope]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2012, no. 3 (78), pp. 45–54 (in Russian).

4. Janrua A., Buve A., Remille G. [Wave solid-state gyroscope and its application in marine instrumentation]. *Giroskopiya i navigaciya* [Gyroscopy and navigation], 2013, no. 4 (83), pp. 24–34 (in Russian).

5. Asadian M.H., Wang Y., Shkel A.M. Development of 3D Fused Quartz Hemi-Toroidal Shells for High-Q Resonators and Gyroscopes. *IEEE/ASME Journal of Microelectromechanical Systems*, 2019, pp. 1380–1383.

6. United States Patent № US009322655B2, 26.04.2016. Axially symmetrical coriolis force gyroscope (varlants) / Valery Valerianovich Chikovani, Kiev (UA); Yurii Alekseevich Yatzenko, Kiev (UA).

7. United States Patent № USOO6474,161B1, 5.11.2002. Gyroscopic sensor and rotation measurement apparatus constituting an application thereof / Alain Jeanroy (FR), Pierre Leger, (FR).

8. Raspopov V.Ya., Alaluev R.V., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V., Shepilov S.I. [Tuning and calibration of a coriolis vibratory gyroscope with a metal resonator to operate in angular rate sensor mode]. *Giroskopiya i*

navigaciya [Gyroscopy and navigation], 2020, vol. 11, pp. 34–40 (in Russian).

DOI: 10.1134/S2075108720010113

9. Raspopov V.Ya., Ladonkin A.V., Likhosherst V.V. [Competitive wave solid-state gyroscope with a metal resonator]. *Mekhatronika, avtomatizaciya, upravlenie* [Mechatronics, Automation, Control], 2018, no. 4, pp. 777–787 (in Russian). **DOI:** 10.17587/mau.ig.777-787

10. Trutnev G.A., Nazarov S.B., Perevozchikov K.K., Shenyatsky A.V. [Compensation of the drift of a solid-state wave gyroscope]. *Vestnik IZHGTU im. M.T. Kalashnikova* [Vestnik IGTU], 2018, vol. 21, no. 3, pp. 198–204 (in Russian).

DOI: 10.22213/2413-1172-2018-3-198-204

11. Trutnev G.A. [Nonlinearity of the scale coefficient of a wave solid-state gyroscope]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent systems in production], 2018, vol. 16, no. 4, pp. 138–134 (in Russian).

DOI: 10.22213/2410-9304-2018-4-138-144

12. Raspopov V.Ya., Volchikhin I.A., Volchikhin A.I. Wave solid-state gyroscope with a metal resonator. Tula, 2018, 189 p.

13. Korolev M.N. Malyutin D.M. [Research of dynamic characteristics of a gyroscopic stabilizer in a wave solid-state gyroscope]. *Izvestiya Tul'skogo gosudarstvennogo universiteta. Tekhnicheskie nauki* [Proceedings of the Tula State University. Technical], 2019, no. 8, pp. 129–135 (in Russian).

Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов

А.М. Тимофеев

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

Поступила 28.04.2021

Принята к печати 11.06.2021

При измерении маломощных оптических сигналов приёмные модули каналов однофотонной связи должны обеспечивать наименьшие потери передаваемой информации. В этой связи целесообразно использовать счётчики фотонов, которые являются высокочувствительными, однако характеризуются ошибками регистрации данных. Поэтому цель работы – исследовать влияние интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче двоичных символов «0» на вероятность стирания этих символов в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины.

На основе методики уменьшения потерь информации определены нижний и верхний пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ и двоичных символов «1» $P_{st1}(N)$, при которых вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ минимальная.

Экспериментальные результаты показали, что для достижения минимальной вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0) = 0,11 \cdot 10^{-2}$ важно подбирать не только интенсивность используемого оптического излучения J_0 , но и напряжение питания лавинного фотоприёмника $U_{пит}$, при которых мёртвое время счётчика фотонов минимально, а его квантовая эффективность регистрации максимальна: $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и $U_{пит} = 52,54$ В.

Ключевые слова: счётчик фотонов, канал однофотонной связи, вероятность ошибочной регистрации двоичных символов.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 156–165.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

For citation:

A.M. Timofeev.
[Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 156–165 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter

A.M. Timofeev

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

Received 28.04.2021

Accepted for publication 11.06.2021

Abstract

Receiving modules of single-photon communication channels should provide the least loss of transmitted information when measuring low-power optical signals. In this regard, it is advisable to use photon counters. They are highly sensitive, but are characterized by data logging errors. Therefore, the purpose of this work was to investigate the effect of the intensity of the recorded optical radiation during the transmission of binary symbols «0» on the probability of erasing these symbols in a single-photon communication channel containing a photon counter based on an avalanche photodetector as a receiving module with a passive avalanche suppression scheme.

The lower and upper threshold levels of pulses recorded at the output of the photon counter, as well as the statistical distributions of the mixture of the number of dark and signal pulses at the output of the photon counter when registering binary symbols «0» $P_{st0}(N)$ and «1» $P_{st1}(N)$ were determined. For this, a technique was used to reduce information loss. As a result, the minimum probability of erasing binary symbols «0» $P(-/0)$ was achieved.

The performed experimental results showed that to achieve the minimum probability of erasing binary symbols «0» $P(-/0) = 0,11 \cdot 10^{-2}$, it is important to select not only the intensity of the used optical radiation J_0 , but also the supply voltage of the avalanche photodetector U , at which the dead time of the photon counter is minimal, and its quantum detection efficiency is maximum: $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ rel. units and $U = 52,54$ V.

Keywords: photon counter, single-photon communication channel, probability of erroneous registration of binary symbols.

DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

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

Для цитирования:

А.М. Тимофеев.
Измерение вероятности стирания двоичного символа «0» в однофотонном асинхронном канале связи с приёмником на основе счётчика фотонов.
Приборы и методы измерений.
2021. – Т. 12, № 2. – С. 156–165.
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

For citation:

A.M. Timofeev.
[Measurement of the Probability of a Binary Symbol «0» Erasing in a Single-Photon Asynchronous Communication Channel with a Receiver Based on a Photon Counter].
Devices and Methods of Measurements.
2021, vol. 12, no. 2, pp. 156–165 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2021-12-2-156-165

Введение

При построении современных систем связи важно обеспечивать достаточно высокую надёжность используемых для этого технических средств [1, 2]. Это становится критически важным в случаях, когда при передаче и приёме информации требуется решить определённые задачи в сфере информационной безопасности (например, гарантировать конфиденциальность передаваемых данных, их целостность и пр.). Решение таких задач носит, как правило, комплексный характер и может быть достигнуто за счёт использования каналов однофотонной связи [3–10].

Отметим, что в каналах однофотонной связи каждый двоичный бит (символ) передаётся посредством предельно слабого оптического излучения со средним числом фотонов не более нескольких десятков. Использование столь слабого оптического излучения позволяет обеспечить абсолютную скрытность и конфиденциальность передаваемой информации за счёт применения квантово-механического ресурса при кодировании передаваемых данных. При этом регистрация оптического излучения в каналах однофотонной связи возможна посредством высокочувствительных приёмных модулей, таких, как счётчики фотонов [4–16]. Однако счётчики фотонов ввиду неидеальности своих характеристик могут приводить к ошибкам при передаче информации, в результате чего уровень информационной безопасности системы связи может быть уменьшен, а также снижена её пропускная способность [17]. Причиной таких ошибок является, в частности, мёртвое время счётчика фотонов, которое приводит к так называемым «просчётам».

Мёртвое время счётчика фотонов – это время, в течение которого счётчик фотонов не чувствителен к падающему на него оптическому излучению [7, 8].

Одним из критериев оценки надёжности канала однофотонной связи, содержащего в качестве приёмного модуля счётчик фотонов, является вероятность ошибочной регистрации данных [4, 5]. Исследования, выполненные в работах [17, 18], показали, что применительно к каналам однофотонной связи вероятность ошибочной регистрации данных определяется двумя составляющими: вероятностью стирания двоичного символа, а также вероятностью регистрации разноименных символов.

Вероятность стирания двоичного символа – это вероятность того, что при передаче двоичного символа («0» или «1») на выходе канала связи не будет зарегистрирован ни символ «0», ни символ «1» [17–20].

В случае передачи двоичного символа «0» под вероятностью регистрации разноименных символов будем понимать вероятность регистрации на выходе канала связи символа «1» при наличии символа «0» на входе канала связи $P(1/0)$, а в случае передачи двоичного символа «1» – вероятность регистрации на выходе канала связи символа «0» при наличии символа «1» на входе канала связи $P(0/1)$ [17–20].

Вероятность стирания двоичного символа может иметь место как при передаче двоичного символа «0», так и при передаче двоичного символа «1», и зависит от интенсивности регистрируемого оптического излучения. Однако в литературных источниках отсутствует оценка влияния интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче информации в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов, на вероятность стирания двоичного символа.

Объектом исследования являлся асинхронный двоичный несимметричный однородный волоконно-оптический канал связи без памяти и со стиранием, содержащий в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника ФД-115Л, включённый по схеме пассивного гашения лавины. Выбор в качестве объекта исследования такого канала связи обусловлен тем, что волоконно-оптический канал характеризуется наибольшей пропускной способностью по сравнению с другими средами передачи данных, например, металлическими проводами, открытым пространством и пр. Асинхронный способ передачи и приёма информации не требует наличия дополнительных линий связи для передачи и приёма синхроимпульсов [17–20]. Схема пассивного гашения имеет меньшую погрешность измерений регистрируемого излучения благодаря отсутствию принудительного гашения лавинного пробоя, что выгодно её отличает от других схем – активного гашения и импульсного смещения p - n -перехода (со стробированием). Фотоприёмники ФД-115Л используются для работы в ближнем ИК-диапазоне и за счёт применяемого при их изготовлении кремниевого полупроводникового материала характеризуются меньшими шумами, связанными с умножением носителей, и лучшей

пороговой чувствительностью по сравнению с германиевыми и галлиевыми фотоприёмниками. Также следует отметить, что кремниевые лавинные фотоприёмники позволяют реализовывать режим счёта фотонов при комнатных температурах [8, 21–27].

Предметом исследования являлось установление влияния таких параметров лавинного фотоприёмника, как интенсивность регистрируемого оптического излучения и напряжение питания, на вероятность стирания двоичных данных в канале однофотонной связи.

Целью данной работы являлось исследование влияния интенсивности регистрируемого оптического излучения при передаче двоичных символов «0» на вероятность стирания этих символов в канале однофотонной связи, содержащем в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины.

Выражение для оценки вероятности стирания двоичных символов «0»

Дальнейшие рассуждения будут основаны на том, что передача информации осуществляется по однофотонному каналу связи двоичными символами («0» и «1») в течение длительности времени τ_b . Причём при передаче символов «0» и «1» используются оптические сигналы мощностью W_1 и W_2 соответственно ($W_1 < W_2$), которые содержат от одного до нескольких десятков фотонов и транслируются в канал связи в течение времени однофотонной передачи $\Delta t = \tau_b / 2$, а приём – с помощью счётчика фотонов, выполненного на базе лавинного фотоприёмника, включённого по схеме пассивного гашения лавины [8]. Следовательно, в течение времени $t_3 = \tau_b / 2$ данные в канал связи не передаются, т. е. между каждой парой символов находится так называемый «защитный» временной интервал. Поскольку символы «0» и «1» передаются импульсами различной мощности, то на выходе счётчика фотонов за время Δt формируется различное количество электрических импульсов, которое будет прямо пропорционально мощности оптического излучения. Всеми потерями информации, за исключением потерь в счётчике фотонов, пренебрегаем.

Вероятность стирания двоичных символов «0» для рассматриваемого канала связи равна [18]:

$$P(-/0) = \sum_{N=0}^{N_1-1} \frac{[(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]^N \exp[-(n_t + n_{s0})(\Delta t - \tau_d)]}{N!} = \sum_{N=0}^{N_1-1} P_{st0}(N), \quad (1)$$

где N_1 – нижний пороговый уровень регистрации; n_t – средняя скорость счёта темновых импульсов на выходе счётчика фотонов; n_{s0} – средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0»; Δt – среднее время однофотонной передачи; τ_d – средняя длительность мёртвого времени продлевающегося типа; $P_{st0}(N)$ – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0».

Нижний пороговый уровень регистрации – это наименьшее число зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0».

При регистрации импульсов в количестве, меньшем N_1 , принимается решение, что символ отсутствует [17, 18].

Темновые и сигнальные – это импульсы, которые появляются на выходе счётчика фотонов соответственно в отсутствии оптического сигнала и в результате воздействия фотонов регистрируемого излучения [8].

Скорость счёта темновых импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приёмного модуля в единицу времени, когда регистрируемое оптическое излучение отсутствует [7, 8]. Скорость счёта сигнальных импульсов определяется как число импульсов, формирующихся на выходе приёмного модуля в единицу времени при воздействии фотонов излучения. Для оценки скоростей счёта темновых и сигнальных импульсов используют их средние значения n_t и n_{s0} соответственно [7, 8].

Важно также отметить, что поскольку счётчик фотонов построен на базе лавинного фотоприёмника с включением по схеме пассивного гашения лавины, он характеризуется мёртвым временем продлевающегося типа [8]. Длительность мёртвого времени продлевающегося типа зависит от интенсивности оптического излучения, поэтому для оценки этого времени используют его среднее значение [8]. Учитывая то, что регистрирующая аппаратура, входящая в состав счётчика фотонов, как правило, имеет мёртвое время, много меньшее, чем мёртвое время

лавинного фотоприёмника [8], длительностью мёртвого времени регистрирующей аппаратуры пренебрегаем и при дальнейших рассуждениях его рассматривать не будем.

Описание методики проведения экспериментальных исследований

Статистические распределения, входящие в выражение (1), могут быть получены с использованием установки, структурная схема которой представлена и описана в [28], поэтому в данной работе она не приведена. Расчёт нижнего порогового уровня регистрации N_1 выполнялся в соответствии с методикой [28] с выбором в качестве критерия для её реализации минимального значения:

$$K_P = \frac{1 - \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) + \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}{1 + \sum_{N=N_1}^{N_2} P_{st0}(N) - \sum_{N=0}^{N_2} P_{st1}(N)}, \quad (2)$$

где N_2 – верхний пороговый уровень регистрации; $P_{st1}(N)$ – статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «1».

Верхний пороговый уровень регистрации – это наибольшее число зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, при котором делается вывод, что передан символ «0». При превышении зарегистрированных импульсов числа N_2 делается вывод, что передан символ «1» [28].

При реализации методики уменьшения потерь информации [28] начальное значение критерия K_P выбиралось равным 10^3 , которое устанавливалось на первом этапе формирования массивов данных статистических распределений смеси числа темновых и сигнальных импульсов $P_{st}(N)$ и интенсивностей оптических сигналов J , а также на третьем этапе определения интенсивности оптического сигнала для передачи двоичных символов «1». Отметим, что при выполнении методики [28] также допускается использовать в качестве критерия наибольшее значение K_P^{-1} , однако в этом случае на первом и третьем её этапах в качестве начального значения критерия K_P необходимо устанавливать значение 10^{-3} .

Таким образом, входными параметрами являлись [28]:

$$P_{st}(N) = \{P_{st}(N)^{(1)}, P_{st}(N)^{(2)}, P_{st}(N)^{(i)}, \dots, P_{st}(N)^{(m)}\}; \quad (3)$$

$$J = \{J^{(1)}, J^{(2)}, J^{(i)}, \dots, J^{(m)}\}, \quad (4)$$

где $P_{st}(N)^{(i)}$ – i -ое статистическое распределение смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов, соответствующее i -ой интенсивности оптического сигнала $J^{(i)}$, $i = 2 \div m$ (m определяется объёмом накопленных данных числа импульсов).

Выходными параметрами являлись пороговые уровни зарегистрированных импульсов N_1 и N_2 и статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ и двоичных символов «1» $P_{st1}(N)$. Также выходными параметрами являлись интенсивности регистрируемых оптических излучений при передаче двоичных символов «0» J_0 и двоичных символов «1» J_1 , соответствующие $P_{st}(N)^{(i'_0)}$, $J^{(i'_0)}$ и $P_{st}(N)^{(i'_1)}$, $J^{(i'_1)}$, которые выбирались из массивов данных (3) и (4) в порядке, предусмотренном методикой уменьшения потерь информации [28]. Рассчитать вероятность стирания двоичных символов «0» можно путём подстановки в формулу (1) статистических распределений $P_{st0}(N)$ при выбранном значении N_1 .

Экспериментальные результаты и их обсуждение

Выполнены исследования зависимости вероятности стирания двоичных символов «0» от интенсивности оптического сигнала, используемого для передачи этих символов, проиллюстрированные на рисунке 1.

Нижний и верхний пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$ определялись по методике, описанной выше. Расчёт вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ выполнен путём подстановки статистических распределений $P_{st0}(N)$ и нижнего порогового уровня зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов N_1 в формулу (1). Измерения проводились при различных значениях напряжения питания лавинного фотоприёмника

с использованием установки [28]. Отметим, что для реализации режима счёта фотонов напряжения питания лавинного фотоприёмника выбирались вблизи напряжения его лавинного пробоя, которое определялось по методике [8] и составляло 52,71 В. Интенсивности оптических излучений J_0 , используемых для передачи двоичных символов «0», нормированы на максимальное значение из исследуемого диапазона. Все исследования проводились при температуре 293 К.

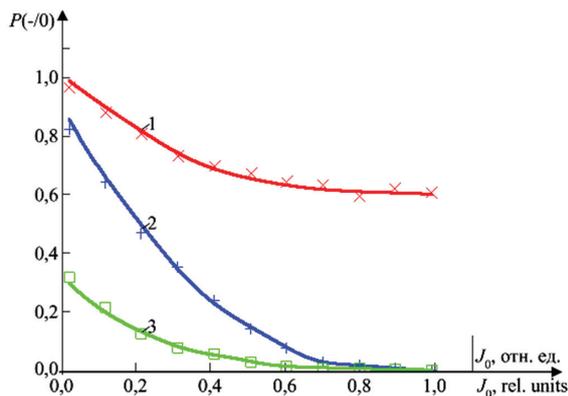


Рисунок 1 – Зависимость вероятности стирания двоичных символов «0» от интенсивности оптического сигнала, используемой для передачи этих символов; напряжение питания лавинного фотоприёмника ФД-115Л: 1 – $\times U_{\text{пит}} = 52,48$ В; 2 – $+ U_{\text{пит}} = 52,54$ В; 3 – $- U_{\text{пит}} = 52,65$ В

Figure 1 – Dependence of the probability of erasure of binary symbols «0» on the intensity of the optical signal used to transmit these symbols; supply voltage of the FD-115L avalanche photodetector: 1 – $\times U = 52.48$ V; 2 – $+ U = 52.54$ V; 3 – $- U = 52.65$ V

Из результатов, представленных на рисунке 1, видно, что каждая из зависимостей $P(-/0)$ от J_0 имеет схожие тенденции изменения для всех исследуемых напряжений питания лавинного фотоприёмника. С увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения, после чего практически не меняются. Это весьма хорошо согласуется с результатами математического моделирования рассматриваемого канала связи, полученными в работе [18] при исследовании зависимостей $P_{\text{out}}(n_{s0})$, и объясняется следующим.

При небольших значениях интенсивностей оптического сигнала J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} не велика.

Следовательно, вероятность регистрации на выходе счётчика фотонов импульсов в количестве, равном нижнему пороговому уровню регистрации N_1 или большем, чем N_1 , также мала. В результате вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ весьма высока (см. рисунок 1).

С увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» растёт. Это приводит к увеличению вероятности регистрации на выходе счётчика фотонов импульсов, равном или большем N_1 , поэтому зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения.

Важно отметить, что при прочих равных параметрах приёма вероятность стирания двоичных символов «0», соответствующая наименьшей из исследуемого диапазона интенсивности оптического сигнала $J_0 = 1,79 \cdot 10^{-2}$ отн. ед., уменьшается с увеличением напряжения питания лавинного фотоприёмника и равна: $98,85 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $85,67 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $29,83 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Объясняется это ростом средней скорости счёта темновых импульсов на выходе счётчика фотонов n_t при увеличении напряжения питания лавинного фотоприёмника. Такой рост способствует увеличению средней скорости счёта смеси темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{st0} , равной $(n_t + n_{s0})$. В этом случае максимум статистического распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов $P_{st0}(N)$ при передаче символов «0» смещается в сторону больших значений N при одинаковой интенсивности J_0 , но более высоком напряжении питания лавинного фотоприёмника [18].

Отметим, что указанные особенности изменения статистических распределений $P_{st0}(N)$, проявляющиеся с ростом напряжения питания лавинного фотоприёмника, полученные по результатам выполненных экспериментальных исследований, имели схожий вид с теоретическими распределениями [18], поэтому в данной работе распределения $P_{st0}(N)$ не приведены.

В результате при прочих равных параметрах приёма с ростом напряжения питания лавинного фотоприёмника $U_{\text{пит}}$ вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ уменьшается.

Причём это наблюдается во всём диапазоне интенсивности оптического сигнала, на кото-

ром зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают вплоть до своего наименьшего значения (см. рисунок 1). Так, например, при интенсивности оптического сигнала $J_0 = 30,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. вероятность стирания двоичных символов «0» равна: $74,19 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $34,46 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $8,26 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Установлено, что при прочих равных параметрах приёма с увеличением напряжения питания лавинного фотоприёмника минимальная вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$, полученная в исследуемом диапазоне интенсивности оптического сигнала, уменьшается, однако затем растёт: $60,01 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; $0,11 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; $0,21 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Это обусловлено тем, что при увеличении напряжения питания лавинного фотоприёмника мёртвое время счётчика фотонов уменьшается, переходя в насыщение, а квантовая эффективность регистрации вначале растёт и после достижения максимальной величины уменьшается [8].

По этим же причинам наименьшая интенсивность оптического сигнала J_0 , при достижении которой зависимости $P(-/0)$ от J_0 переходят в насыщение, с ростом $U_{\text{пит}}$ при прочих равных параметрах приёма также вначале увеличивается, однако затем снижается. Так, например, насыщение зависимостей $P(-/0)$ от J_0 , которое определялось по 5%-ному отклонению вероятности $P(-/0)$ от её минимального значения для соответствующего напряжения питания лавинного фотоприёмника, наблюдалось при $J_0 \geq 60,56 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,48$ В; при $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,54$ В; при $J_0 \geq 98,74 \cdot 10^{-2}$ для $U_{\text{пит}} = 52,65$ В.

Заключение

Применительно к асинхронному двоичному несимметричному однородному волоконно-оптическому каналу связи без памяти и со стиранием, содержащему в качестве приёмного модуля счётчик фотонов на базе лавинного фотоприёмника ФД-115Л с включением по схеме пассивного гашения лавины, выполнена оценка влияния интенсивности оптического сигнала J_0 , используемого для передачи двоичных символов «0», на вероятность стирания этих символов $P(-/0)$.

На основе методики уменьшения потерь информации определены нижний N_1 и верх-

ний N_2 пороговые уровни зарегистрированных на выходе счётчика фотонов импульсов, а также статистические распределения смеси числа темновых и сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при регистрации двоичных символов «0» $P_{st0}(N)$, при которых вероятность стирания этих символов $P(-/0)$ минимальная.

Выполненные экспериментальные результаты показали, что для уменьшения вероятности стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ важно подбирать не только интенсивность используемого оптического излучения J_0 , но и напряжение питания лавинного фотоприёмника $U_{\text{пит}}$. Это позволяет достичь минимальных потерь информации в исследованном канале связи.

Установлено, что с увеличением интенсивности оптического сигнала J_0 зависимости $P(-/0)$ от J_0 спадают и, достигая своего наименьшего значения, переходят в насыщение. Спад зависимости $P(-/0)$ от J_0 происходит в диапазоне интенсивности оптического сигнала J_0 , на котором с ростом J_0 средняя скорость счёта сигнальных импульсов на выходе счётчика фотонов при передаче символов «0» n_{s0} увеличивается. Определено, что в таком диапазоне интенсивностей оптического сигнала J_0 вероятность стирания двоичных символов «0» $P(-/0)$ уменьшается с ростом $U_{\text{пит}}$ при прочих равных параметрах приёма.

Получено, что минимальная вероятность ошибочной регистрации двоичных символов «0» для исследованного канала связи равна $0,11 \cdot 10^{-2}$ и соответствует $J_0 \geq 98,94 \cdot 10^{-2}$ отн. ед. и $U_{\text{пит}} = 52,54$ В, при которых мёртвое время счётчика фотонов минимально, а его квантовая эффективность регистрации максимальна.

Результаты, полученные в данной работе, могут быть использованы при создании систем квантово-криптографической асинхронной связи, содержащих в качестве приёмных модулей счётчики фотонов с мёртвым временем продлевающегося типа и характеризующихся низкой вероятностью ошибок легитимного приёмного оборудования.

Автору настоящей работы представляются весьма актуальными исследования, направленные на обоснование выбора лавинного фотоприёмника, используемого при построении счётчика фотонов. Такие фотоприёмники могут отличаться как по структуре полупроводниковых областей, так и по площади фоточувствительной поверхности. В этой связи в ходе дальнейших комплексных исследований планируется опре-

делить, как эти параметры влияют на вероятность ошибочной регистрации двоичных данных применительно к асинхронному двоичному несимметричному однородному однофотонному каналу связи без памяти и со стиранием.

Список использованных источников

1. *Дмитриев С.А.* Волоконно-оптическая техника: современное состояние и новые перспективы / С.А. Дмитриев, Н.Н. Слепов. – 3-е изд. – М.: Техносфера, 2010. – 608 с.

2. *Щеглов А.Ю.* Анализ и проектирование защиты информационных систем. Контроль доступа к компьютерным ресурсам: методы, модели, технические решения / А.Ю. Щеглов. – СПб.: Профессиональная литература, 2017. – 416 с.

3. *Vacca J.R.* Managing Information Security. – 2nd Edition / J.R. Vacca. – Elsevier Inc: Waltham, 2014. – 372 p. DOI: 10.1016/C2011-0-08782-3

4. *Тимофеев А.М.* Влияние времени однофотонной передачи информации на вероятность ошибочной регистрации данных асинхронных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник ТГТУ. – 2019. – Т. 25. – № 1. – С. 36–46. DOI: 10.17277/vestnik.2019.01.pp.036-046

5. *Yiannopoulos K., Sagias N.C., Boucouvalas A.C.* On the photon counting error probability and its application in optical wireless communications. Physical Communication. – 2019. – Vol. 36. – Pp. 100756–100764. DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100756

6. *Тимофеев А.М.* Влияние времени однофотонной передачи информации на достоверность ее приема в квантово-криптографическом канале связи / А.М. Тимофеев // Системный анализ и прикладная информатика. – 2019. – № 1. – С. 67–72. DOI: 10.21122/2309-4923-2019-1-67-72

7. *Килин С.Я.* Квантовая криптография: идеи и практика / С.Я. Килин; под ред. С.Я. Килин, Д.Б. Хорошко, А.П. Низовцев. – Минск: Белорусская наука, 2007. – 391 с.

8. *Гулаков И.Р.* Фотоприемники квантовых систем: монография / И.Р. Гулаков, А.О. Зеневич. – Минск: УО ВГКС, 2012. – 276 с.

9. *Калачев А.А.* Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 1 / А.А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 1. – С. 88–98. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

10. *Калачев А.А.* Элементная база дальнедействующей квантовой связи. Часть 2 / А.А. Калачев // Фотоника. – 2017. – № 2. – С. 80–88. DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.80.88

11. *Cova S.D., Ghioni M.* Single-photon counting detectors. IEEE Photonics Journal. – 2011. – Vol. 3, no. 2. –

Pp. 274–277. DOI: 10.1109/JPHOT.2011.2130518

12. *Hu S.* 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM / S. Hu [et al.] // Optics Express. – 2018. – Vol. 26, no. 17. – Pp. 21685–21699. DOI: 10.1364/OE.26.021685

13. *Bourennane M.* Single-photon counters in the telecom wavelength region of 1550 nm for quantum information processing / M. Bourennane [et al.] // Journal of Modern Optics. – 2001. – Vol. 48, no. 13. – Pp. 1983–1995. DOI: 10.1080/09500340110075131

14. *Hong Z.* Photon-counting underwater optical wireless communication for reliable video transmission using joint source-channel coding based on distributed compressive sensing / Z. Hong [et al.] // Sensors. – 2019. – Vol. 19, no. 5. – Pp. 1042–1054. DOI: 10.3390/s19051042

15. *Zadeh I.E.* Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution / I.E. Zadeh [et al.] // APL Photonics. – 2017. – Vol. 2. – Pp. 111301-1–111301-7. DOI: 10.1063/1.5000001

16. *Zhang J.* Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication / J. Zhang [et al.] // Light: Science & Applications. – 2015. – Vol. 4. – Pp. 1–13. DOI: 10.1038/lsa.2015.59

17. *Тимофеев А.М.* Скорость передачи информации однофотонного канала связи с приемным модулем на основе счетчика фотонов с мертвым временем продлевающегося типа / А.М. Тимофеев // Труды БГТУ. Сер. 3, Физико-математические науки и информатика. – 2019. – № 2. – С. 79–86.

18. *Тимофеев А.М.* Оценка влияния продлевающегося мертвого времени счетчика фотонов на вероятность ошибочной регистрации данных квантово-криптографических каналов связи / А.М. Тимофеев // Вестник связи. – 2018. – № 1. – С. 56–62.

19. *Клюев Л.Л.* Теория электрической связи: учебник / Л.Л. Клюев. – Минск: Техноперспектива, 2008. – 423 с.

20. *Биккенин Р.Р.* Теория электрической связи / Р.Р. Биккенин, М.Н. Чесноков. – М.: Издательский центр «Академия», 2010. – 336 с.

21. *Privitera S.* Single photon avalanche diodes: towards the large bidimensional arrays / S. Privitera [et al.] // Sensors. – 2008. – Vol. 8. – Pp. 4636–4655. DOI: 10.3390/s8084636

22. *Campajola M.* Proton induced dark count rate degradation in 150-nm CMOS single-photon avalanche diodes / M. Campajola [et al.] // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment. – 2019. – Vol. 947. – Pp. 162722–162728. DOI: 10.1016/j.nima.2019.162722

23. Stipčević M. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range / M. Stipčević [et al.] // *Optics Express*. – 2010. – Vol. 18. – Pp. 17448–17459.

DOI: 10.1364/OE.18.017448

24. Nuriyev S. Performance of a new generation of micropixel avalanche photodiodes with high pixel density and high photon detection efficiency / S. Nuriyev [et al.] // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Vol. 912. – Pp. 320–322.

DOI: 10.1016/j.nima.2017.12.006

25. Stucki D. Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs/InP APDs / D. Stucki [et al.] // *Journal of Modern Optics*. – 2001. – Vol. 48, no. 13. – Pp. 1967–1981.

DOI: 10.1080/09500340108240900

26. Castelletto S.A. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array / S.A. Castelletto [et al.] // *Journal of Modern Optics* – 2007. – Vol. 54. – Pp. 337–352.

DOI: 10.1080/09500340600779579

27. Prochazka I. Single photon detector package with sub-picosecond limiting precision and stability / I. Prochazka, J. Blazej, J. Kodet // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*. – 2018. – Vol. 912. – Pp. 213–216.

DOI: 10.1016/j.nima.2017.11.044

28. Тимофеев А.М. Оценка влияния интенсивности оптического сигнала на вероятность ошибочной регистрации данных в однофотонном канале связи / А.М. Тимофеев // *Информатика*. – 2021. – Т. 18. – № 2. – С. 84–94.

DOI: 10.37661/1816-0301-2021-18-2-84-94

References

1. Dmitriev S.A., Slepov N.N. *Volokonno-opticheskaya tehnika: sovremennoe sostoyanie i novyye perspektivy* [Fiber optic technology: current state and new perspectives]. – 3rd ed. – Moscow, Technosphere Publ., 2010, 608 p.

2. Scheglov A.Yu. *Analiz i proektirovanie zaschityi informatsionnykh sistem. Kontrol dostupa k kompyuternym resursam: metodyi, modeli, tehnicheckie resheniya* [Analysis and design of information systems protection. Control of access to computer resources: methods, models, technical solutions]. St. Petersburg, Professional literature, 2017, 416 p.

3. Vacca J.R. *Managing Information Security*. – 2nd Edition. – Elsevier Inc, Waltham, 2014, 372 p.

DOI: 10.1016/C2011-0-08782-3

4. Timofeev A.M. [The effect of single photon transmission time on the probability of erroneous registration of asynchronous data of quantum cryptographic communication channels]. *Vestnik TGTU* [Transactions TSTU], 2019, vol. 25, no. 1, pp. 36–46 (in Russian). **DOI:** 10.17277/vestnik.2019.01.pp.036-046

5. Yiannopoulos K., Sagias N.C., Boucouvalas A.C. On the photon counting error probability and its application in optical wireless communications. *Physical Communication*, 2019, vol. 36, pp. 100756–100764.

DOI: 10.1016/j.phycom.2019.100756

6. Timofeev A.M. [The influence of the time of single photon transmission of information on the reliability of its reception in a quantum cryptographic communication channel]. *Sistemnyy analiz i prikladnaya informatika* [System analysis and applied information science], 2019, no. 1, pp. 67–72 (in Russian).

DOI: 10.21122/2309-4923-2019-1-67-72

7. Kilin S.Ya. *Kvantovaya kriptografiya: idei i praktika* [Quantum cryptography: ideas and practices]. Minsk, Belarus. Sci Publ., 2007, 391 p.

8. Gulakov I.R., Zenevich A.O. *Fotopriemniki kvantovykh sistem: monografiya* [Photodetectors of quantum systems: monograph]. Minsk, EI HSCC, 2012, 276 p.

9. Kalachev A.A. [Components of long-distance quantum communication. Part 1]. *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 1, pp. 88–98 (in Russian).

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.61.1.88.98

10. Kalachev A.A. [Components of long-distance quantum communication. Part 1]. *Fotonika* [Photonics], 2017, no. 2, pp. 80–88 (in Russian).

DOI: 10.22184/1993-7296.2017.62.2.80.88

11. Cova S.D., Ghioni M. Single-photon counting detectors. *IEEE Photonics Journal*, 2011, vol. 3, no. 2, pp. 274–277. **DOI:** 10.1109/JPHOT.2011.2130518

12. Hu S., Mi L., Zhou T., Chen W. 35.88 attenuation lengths and 3.32 bits/photon underwater optical wireless communication based on photon-counting receiver with 256-PPM. *Optics Express*, 2019, vol. 26, no. 17, pp. 21685–21699. **DOI:** 10.1364/OE.26.021685

13. Bourennane M., Karlsson A., Pena J.C., Mathés M. Single-photon counters in the telecom wavelength region of 1550 nm for quantum information processing. *Journal of Modern Optics*, 2001, vol. 48, no. 13, pp. 1983–1995. **DOI:** 10.1080/09500340110075131

14. Hong Z., Yan Q., Li Z., Zhan T., Wang Y. Photon-counting underwater optical wireless communication for reliable video transmission using joint source-channel coding based on distributed compressive sensing. *Sensors*, 2019, vol. 19, no. 5, pp. 1042–1054.

DOI: 10.3390/s19051042

15. Zadeh I.E., Los J.W.N., Gourgues R.B.M., Steinmetz V., Bulgarini G., Dobrovolskiy S.M., Zwiller V.,

- Dorenbos S.N. Single-photon detectors combining high efficiency, high detection rates, and ultra-high timing resolution. *APL Photonics*, 2017, vol. 2, pp. 111301–1–111301-7. **DOI:** 10.1063/1.5000001
16. Zhang J., Itzler M.A., Zbinden H., Pan J.-W. Advances in InGaAs/InP single-photon detector systems for quantum communication. *Light: Science & Applications*, 2015, vol. 4, pp. 1–13. **DOI:** 10.1038/lsa.2015.59
17. Timofeev A.M. [Information transfer rate of a single photon communication channel with a receiver module based on a photon counter with a dead time of a prolonged type]. *Trudyi BGTU. Ser. 3, Fiziko-matematicheskie nauki i informatika* [Proceedings of BSTU. Issue 3. Physics and mathematics. Informatics], 2019, no. 2, pp. 79–86 (in Russian).
18. Timofeev A.M. [Estimation of the photons counter lasting dead time influence on the probability of erroneous data registration of quantum-cryptographic communication channels]. *Vestnik svyazi* [Communication bulletin], 2018, no. 1, pp. 56–62 (in Russian).
19. Klyuev L.L. *Teoriya elektricheskoy svyazi: uchebnyk* [The theory of electrical communication: textbook]. Minsk: Techn.Perspect. Publ., 2008, 423 p.
20. Bikkenin R.R., Chesnokov M.N. *Teoriya elektricheskoy svyazi* [The theory of electrical communication]. Moscow, Publ. Cent «Academy», 2010, 336 p.
21. Privitera S., Tudisco S., Lanzano L., Musumeci F., Pluchino A., Scordino A., Campisi A., Cosentino L., Finocchiaro P., Condorelli G., Mazzillo M., Lombardo S., Sciacca E. Single photon avalanche diodes: towards the large bidimensional arrays. *Sensors*, 2008, vol. 8, pp. 4636–4655. **DOI:** 10.3390/s8084636
22. Campajola M., Capua F.D., Fiore D., Sarnelli E., Aloisio A. Proton induced dark count rate degradation in 150-nm CMOS single-photon avalanche diodes. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2019, vol. 947, pp. 162722–162728. **DOI:** 10.1016/j.nima.2019.162722
23. Stipčević M., Skenderović H., Gracin D. Characterization of a novel avalanche photodiode for single photon detection in VIS-NIR range. *Optics Express*, 2010, vol. 18, pp. 17448–17459. **DOI:** 10.1364/OE.18.017448
24. Nuriyev S., Ahmadov F., Sadygov Z., Akberov R., Ahmadov G., Abbasov . Performance of a new generation of micropixel avalanche photodiodes with high pixel density and high photon detection efficiency. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 912, pp. 320–322. **DOI:** 10.1016/j.nima.2017.12.006
25. Stucki D., Ribordy G., Stefanov A., Zbinden H., Rarity J.G., Wall T. Photon counting for quantum key distribution with Peltier cooled InGaAs/InP APDs. *Journal of Modern Optics*, 2001, vol. 48, no. 13, pp. 1967–1981. **DOI:** 10.1080/09500340108240900
26. Castelletto S.A., Degiovanni I.P., Schettini V., Migdall A.L. Reduced deadtime and higher rate photon-counting detection using a multiplexed detector array. *Journal of Modern Optics*, 2007, vol. 54, pp. 337–352. **DOI:** 10.1080/09500340600779579
27. Prochazka I., Blazej J., Kodet J. Single photon detector package with sub-picosecond limiting precision and stability. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, 2018, vol. 912, pp. 213–216. **DOI:** 10.1016/j.nima.2017.11.044
28. Timofeev A.M. [Assessment of the influence of the intensity of the optical signal on the probability of erroneous data registration in a single-photon communication channel]. *Informatika* [Informatics], 2021, vol. 18, no. 2, pp. 84–94 (in Russian). **DOI:** 10.37661/1816-0301-2021-18-2-84-94

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows, набор – сплошным текстом (без деления на колонки). Объем статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: индекс УДК, название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звездочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200–250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и четким. Необходимо придерживаться единообразия техники исполнения однотипных иллюстраций. Рисунок должен располагаться после абзаца, содержащего ссылку на него. Не допускается размещение рисунков в конце подраздела и статьи. Изобразительный материал вставляется в текст статьи, а также дается в виде отдельных файлов (**формат tif, jpg, разрешение не менее 300 dpi**). Текст на рисунках набирается основной гарнитурой; размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются

строчными курсивными латинскими буквами – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма. Во всех случаях на рисунках должен быть приведен масштаб.

8. У графиков, имеющих числовые значения по осям, рамки должны быть открыты, а засечки направлены внутрь рамки. На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы. Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначения переменной и единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

9. Полутонные фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и четкими. Недопустимо нанесение средствами MS Word каких-либо элементов поверх вставленного в файл рукописи рисунка (стрелки, подписи) ввиду большого риска их потери на этапах редактирования и вёрстки. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8–8,5 см (на одну колонку), 17–17,5 см (на две колонки) или 23 см (во весь лист). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 2–2,5 мм, элементы схем 3–5 мм, отдельные точки 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 0,5–1 мм.

11. Надписи и обозначения на иллюстрациях следует располагать так, чтобы они не соприкасались ни с какими её частями. На задний план иллюстрации желательно не добавлять серый (цветной) фон или сетки.

12. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

13. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

14. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

15. Набор формул должен проводиться в редакторе MathType целиком. Набор формул из составных элементов не допускается, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

16. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: полный – 10 пт, подстрочный – 9 пт, под-подстрочный – 7 пт, символ – 14,5 пт, подсимвол – 12,5 пт. Стили: текст, функция, число, кириллица – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

17. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), единицы измерения (Вт, Дж, В, кг и др.), кириллические буквы, сокращения от русских слов (q_{cp}); обозначения химических элементов и соединений (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

18. Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. В расшифровке формул, которая начинается словом

«где», символы и их порядок должны соответствовать символам и их порядку следования в формулах.

19. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

20. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

21. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

22. 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.

23. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

24. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain «squeeze» from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without *DOI* number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %/

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Индексы:
74835; 748352