# ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

# DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Nº 1

Vol. 14

Том 14

2023

# 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 14

#### Nº 1

2023

#### 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, профессор кафедры «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

#### РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика и оптотехника» 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 итата 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.**, академик 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.**, член-корреспондент НАН Беларуси, 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 «Белмикроанализ» 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 наноэлектроники Сумского* государственного университета (г. Сумы, Украина)

**Распопов В.Я.**, д.т.н., профессор, профессор кафедры «Приборы управления» Тульского государственного университета (г. Тула, Россия)

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 НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

Юмашев К.В., д.ф.-м.н., профессор, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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 27.03.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,49. Уч.-изд. л. 6,25. Тираж 100 экз. Дата выхода в свет 30.03.2023. Заказ № 218. Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 02330/74 от 03.03.2014. Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет

пр-т 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

© «Приборы и методы измерений», 2023

# 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 14

#### Nº 1

2023

#### 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, Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

#### EDITORIAL BOARD

**Vladimir A. Alekseev**, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Physics and Optical Engineering, 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**, Academician 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**, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, 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. Pogrebnjak**, 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, Control Devices Department, Tula State University (Tula, Russia)

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

**Sergei A. Chizhik**, Academician of the 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

© «Devices and Methods of Measurements», 2022

### СОДЕРЖАНИЕ

### Средства измерений

А.А. Ломако, А.В. Гуторов, Н.Г. Щербаков, П.В. Ивуть	
Получение фотоспектральных данных с использованием беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования (in English)	7
В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина, К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме	
синусоидальное возбуждение – отклик	18
В.Е. Орехова, В.Э. Кисель, К.А. Орехов	
Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров, работающих в широком диапазоне температур	27
Методы измерений, контроля, диагностики	

Н.А. Поклонский, А.И. Ковалев, К.В. Усенко, Е.А. Ермакова, Н.И. Горбачук, С.Б. Ластовский Импеланс инлуктивного типа барьерных структур Мо/л-Si. облучённых альфа-	
частицами (in English)	38
М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова	
Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки	44
И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов	
Расчёт параметров призменного дефлектора лазерного сканера	54
А.С. Сизиков, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.П. Попков	
Видеоспектральные методы и средства мониторинга контролируемых параметров лесных пожаров и аварий, связанных с разливом нефтепродуктов	62

### **CONTENTS**

### **Measuring Instruments**

A.A. Lamaka, A.V. Gutarau, N.G. Shcherbakou, P.V. Ivuts Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle	7
U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu, A.L. Zharin	
Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation – Response (in Russian)	18
V.E. Orekhova, V.E. Kisel, K.A. Orekhov	
Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating over Wide Temperature Range (in Russian)	27
Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics	
N.A. Poklonski, A.I. Kovalev, K.V. Usenko, E.A. Ermakova, N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovski Inductive Type Impedance of Mo/n-Si Barrier Structures Irradiated with Alpha Particles	38
M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line (in Russian)	44
I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner (in Russian)	54
A.S. Sizikov, Y.V. Belyaev, I.M. Tsykman, A.P. Popkov Video Spectral Methods and Tools for Monitoring of Controlled Parameters of Forest Fires and Oil Spill Accidents (in Russian)	62

# Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle

#### A.A. Lamaka, A.V. Gutarau, N.G. Shcherbakou, P.V. Ivuts

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

Received 10.10.2022 Accepted for publication 23.01.2023

#### Abstract

Study of the Earth's surface objects reflectance characteristics with unmanned aerial vehicles is one of the most actual remote sensing trends. Aim of this work was to develop a method for obtaining of photospectral data using unmanned aerial spectrometry vehicle.

An adaptation of the cameras spatial resolution evaluating technique based on a specialized target photographic fixation was proposed. A method for synchronizing of the camera and spectrometer of the videospectral device was also proposed. It was based on an experiment with spectra and screen images recording. Different colors were sequentially displayed on the screen. The percentage contribution of each of colors to the "mixed" spectra was calculated. So the out-of-sync time estimation became possible. In addition the work proposed the method for combining images and spectra with their merging into photospectral images. The method allows to consider the aircraft displacement when linking the spectrometer field of view to the RGB image. The way for photospectral images combining based on the images key points detectors was also proposed.

Spatial resolutions for 3 aerial vehicle cameras were obtained. The study showed that the spatial resolution decrease of *Zenmuse H20T* caused by the device carrier movement with a speed of up to 5 m/s can be ignored. The videospectral device camera and spectrometer out-of-sync time was evaluated. An automatic merging of a set of images using key points detection was made. The spectrometry areas were linked to the panoramic image. The reflectance coefficients were obtained for each of the areas in the range of 350-900 nm. The areas to image linking accuracy was  $84.9\pm11.6$  %.

A discrepancy between the angular spatial resolution values got experimentally and theoretically was revealed as a result of the cameras spatial resolution evaluating. This indicates the importance of the imaging equipment spatial resolution experimental evaluation. The videospectral device spectrometer and observation camera out-of-sync time evaluation made it possible to correct the data recording time. This led to the timing error standard deviation reduction from 142 ms to 15 ms. The way for the unmanned aerial spectrometry vehicle data obtaining in a photospectral representation was developed. The proposed methods and techniques can be used in similar unmanned systems.

Keywords: UAV, spectrometer, spatial resolution, software synchronization, image connection.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17

Address for correspondence:
Lamaka A.A.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian
State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: alekseylomako@gmail.com
For citation:
A.A. Lamaka, A.V. Gutarau, N.G. Shcherbakou, P.V. Ivuts.
Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial
Spectrometry Vehicle.
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 1, pp. 7–17.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17

### Получение фотоспектральных данных с использованием беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования

#### А.А. Ломако, А.В. Гуторов, Н.Г. Щербаков, П.В. Ивуть

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

Поступила 10.10.2022 Принята к печати 23.01.2023

Исследование отражательных характеристик объектов на поверхности Земли с использованием беспилотных летательных аппаратов является одним из развивающихся направлений в дистанционном зондировании Земли. Целью работы являлась разработка способа получения фотоспектральных данных с использованием беспилотного комплекса авиационного спектрометрирования.

Предложена адаптация методики определения пространственной разрешающей способности камер на основе фотофиксации специализированной миры. Также предложен способ синхронизации камеры и спектрометра видеоспектрального комплекса, основанный на проведении эксперимента по регистрации спектров и изображений экрана, где последовательно отображаются различные цвета. Предложен способ комбинирования изображений и спектров с объединением их в единое фотоспектральное изображение. Способ позволяет учитывать смещение летательного аппарата при привязке поля зрения спектрометра к изображению. Предложен способ объединения фотоспектральных изображений, основывающийся на сшивке изображений по особым точкам.

Получены угловые разрешающие способности для 3 камер из состава беспилотного комплекса. Показано, что при движении беспилотного комплекса со скоростью до 5 м/с ухудшение разрешающей способности камеры Zenmuse H20T, вызванное движением носителя аппаратуры, можно не учитывать. Определено время рассинхронизации работы камеры и спектрометра из состава видеоспектрального комплекса. Проведена автоматическая сшивка ряда изображений по особым точкам с привязкой к сшитому изображению областей спектрометрирования (относительная точность привязки к изображению – 84,9±11,6 %). Для каждой из областей спектрометрирования получены коэффициенты спектральной яркости в диапазоне 350–900 нм.

В исследовании выявлено расхождение экспериментальных и теоретических значений углового пространственного разрешения, что свидетельствует о важности проведения экспериментальной оценки пространственного разрешения съёмочной аппаратуры. Определение времени рассинхронизации спектрометра и обзорной камеры видеоспектрального комплекса позволило осуществить коррекцию времени регистрации данных, что привело к уменьшению среднеквадратичной величины ошибки синхронизации со 142 мс до 15 мс. Разработан способ получения данных БЕКАС в фотоспектральном представлении.

**Ключевые слова:** БПЛА, спектрометр, пространственное разрешение, программная синхронизация, сшивка изображений.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Lamaka A.A.	Lamaka A.A.
A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian	A.N. Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian
State University,	State University,
Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus	Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus
e-mail: alekseylomako@gmail.com	e-mail: alekseylomako@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
A.A. Lamaka, A.V. Gutarau, N.G. Shcherbakou, P.V. Ivuts.	A.A. Lamaka, A.V. Gutarau, N.G. Shcherbakou, P.V. Ivuts.
Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial	Photospectral Data Obtaining with the Unmanned Aerial
Spectrometry Vehicle.	Spectrometry Vehicle.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 7–17.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 7–17.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-7-17

#### Introduction

Surface images recorded using unmanned aerial vehicles (UAVs) are widely used in the modern world, along with data obtained using space-based remote sensing equipment [1].

Remote sensing using UAVs has its advantages compared to satellite systems: high spatial resolution, high speed of information acquisition, ease of use, no cloud cover influence, low cost [2]. UAV data is currently widely used in agriculture and forestry [3–5]. As a result, UAV data acquisition and processing techniques are developing rapidly.

The devices with multispectral cameras are the most widely used among UAVs [1]. Such systems have a set of undeniable advantages, for example, the possibility of obtaining geographically referenced images of vegetation indices for vast areas. At the same time, multispectral systems allow recording data for subsequent analysis only for a limited number of vegetation indices. It is caused, firstly, by limited number of spectral bands and, secondly, by vast bandwidths.

The development of videospectral systems allowing to record high spectral resolution spectra combined with the underlying surface images is one of the approaches to expand the scope of remote sensing data obtained using UAVs. The unmanned aerial spectrometry vehicle (UASV) became such a system [6]. The final stage in the vehicle development was the technical characteristics analysis: the resolution of the spectrometer and observation camera, the system modules angle of view, the system modules level of synchronization, etc.

To date, there are no state standards for evaluating the angular spatial resolution per pixel of aerial photosystems. At the same time, there is a technique describing a way of the spatial resolution evaluating based on a flight experiment results [7]. However, this technique does not describe the requirements for the target intended to evaluate the spatial resolution and allows to find only the linear resolution of the system without assessing the uncertainties. As a result, it needs to be supplemented and adapted for use in systems like the UASV.

There are no studies describing modules synchronism level in systems like the UASV. Very little attention is paid to videospectral systems due to the difficulty of obtaining data from such systems in a representation convenient for analysis (for example, a geotagged RGB-image with a well-defined area on it corresponding to a surface reflectance spectrum). To obtain such a representation, it is necessary to apply data preprocessing methods, including modules synchronization, georeferencing, correction of distortion effects in images. In addition, there is a task of images combining with the use of computer vision libraries. This task becomes more difficult when spectrometer and camera exposition times are considerably different.

There are several tasks that this study solved: elaboration and applying of the observation camera spatial resolution evaluating methodology based on the flight experiment results; development of the method for the data of the spectrometry vehicle spectrometer and observation camera synchronizing; development of the method for obtaining the UASV data in a presentation convenient for analysis. Thus, the aim of the study was to develop the method for obtaining a photospectral data using the UASV.

#### **Devices and methods**

The UASV in the configuration used is based on the UAV DJI Matrice 300 RTK (Real Time Kinematic). The positioning accuracy of it, when the RTK system is on, is  $1 \text{ sm} \pm 1 \text{ mm/km}$  in horizontal axes and  $1.5 \text{ sm} \pm 1 \text{ mm/km}$  in vertical axes (hovering accuracy in P-GPS mode is  $\pm 0.5 \text{ m}$ )<sup>1</sup>. The videospectral device (VSD) and the Zenmuse H20T quad-sensor camera on a stabilizing gimbal<sup>2</sup> can be installed on the UAV simultaneously or separately (Figure 1).

The VSD (Figure 2) includes the single-board computer (SBC) *Raspberry Pi* 4 *Model*  $B^3$ . It controls in automatic mode the observation camera (Raspberry Pi Camera) and the spectrometer (connected through the microcontroller *STM32F*405*RGT*6<sup>4</sup>) mounted coaxially. The observation camera allows to register RGB-images with resolution up to  $2592 \times 1944$  pixels in photography mode. The spectrometer optical scheme is built according to the Rowland scheme [8] based on a concave diffraction

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> UAV DJI Matrice 300 RTK: https://www.dji.com/ matrice-300

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup> DJI Zenmuse H20T: https://www.dji.com/zenmuseh20-series

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup> Raspberry Pi 4: https://www.raspberrypi.com/ products/raspberry-pi-4-model-b

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> Microcontrollers & Microprocessors: Highperformance foundation line (STM32F405RG): https:// www.st.com/en/microcontrollers-microprocessors/ stm32f405rg.html

grating with an additional flat mirror to reduce the dimensions. The spectral range of the spectrometer is 350–900 nm, the spectral resolution is 4 nm.

The spectrometer angular field of view (FOV) is  $0.7 \times 1.2$  degrees, the observation camera FOV is  $15 \times 27$  degrees.



Figure 1 – The unmanned aerial spectrometry vehicle general form (a), Zennuse H20T camera with a stabilizing gimbal (b)

The VSD also includes a power supply module with 10 Ah capacity. The body of the VSD is made using three-dimensional printing with three types of filaments for various parts.

The data registered by the VSD are preprocessed and stored on the flash drive connected to the SBC. The UASV output data is a video sequence of data divided by directories (30 frames per second,  $1920 \times 1080$  pixels) and data registered with the spectrometer (the recording frequency depends on the exposure of the spectrometer and is about 10 spectra/s). Geographic location data during measurements is recorded and stored on the flash drive connected directly to the UAV.



**Figure 2** – 3D image of the videospectral device construction. Left view (*a*), bottom view (*b*): 1 – single-board computer; 2 – USB flash memory; 3 – spectrometer lens; 4 – camera lens; 5 – spectrometer block; 6 – battery; 7 – power switch; 8 – stop shooting button

#### *The observation camera spatial resolution evaluation*

The information from the article on the aerial photosystems linear resolution per pixel estimating methodology based on the flight tests [7] were taken as a basis to determine the spatial resolution of the UASV cameras. It was complemented with recommendations described in the state standards for the resolution evaluating methods and photogrammetry techniques<sup>5</sup>.

The first step for holding an experiment to evaluate the spatial resolution in flight conditions

Method for determining the photographic resolving power (GOST 2819-84, in Russian)

<sup>&</sup>lt;sup>5</sup> Photogrammetry. Requirements for creating oriented aerial images for building stereo models of built-up areas (GOST R 58854-2020, in Russian);

is to determine the theoretical linear resolution per pixel using the formula:

$$L_0 = \frac{H}{f} \cdot \delta, \tag{1}$$

where  $L_0$  is theoretical linear resolution per pixel; *H* is shooting height; *f* is camera lens focal length;  $\delta$  is pixel size in the camera matrix.

It is necessary to make a target for experimental evaluation of the camera spatial resolution based on the theoretical values calculated with the formula (1)for all cameras needed. The minimum distance between alternating white strokes has to be equal to the calculated value  $L_0$  for a given flight altitude, and the maximum distance between alternating white strokes has to be equal to the expected experimental  $L_0$  value for a given flight altitude. It is important to note that formula (1) is a rough below estimation of the camera spatial resolution. For more accurate calculations, in addition to the focal length of the camera lens, the shooting height and the physical size of the matrix pixel it is needed to consider the area, diameter and transmission of the input lens, the specific detectivity of the photodetector, as well as the speed of the UAV during the experiments [9].

The UASV incorporates several cameras, which resolutions are needed to be evaluated experimentally: the VSD observation camera and the Zenmuse H20T camera including observation, wide-angle and radiometric thermal cameras. The Zenmuse H20T observation camera is a zoom camera, so it stands out from the general list. As a result, it was not included it in the current analysis. It is necessary to calculate the  $L_0$  value for heights of 50 and 200 m using the formula (1) for all the cameras (minimum and maximum flight altitude to evaluate the spatial resolution in this study). After that, it is necessary to choose extremum  $L_0$  values. These values will be the basis for the line width border values in the target.

The cameras parameters, as well as the theoretical linear resolutions for various flight altitudes, are shown in Table 1 ( $L_0^{50}$  is the theoretical linear resolution per pixel for 50 m altitude,  $L_0^{200}$  is the theoretical linear resolution per pixel for 200 m altitude).

In general, the target should consist of a set of line groups with different frequencies. Each group consists of five light parallel lines on a dark background. The spacing width between the lines must be equal to the line width in the group. The line length to width ratio is constant and equal to 10. Wherein the width of the lines in the target should decrease from the previous group to the next in a geometric progression with a 0.91 denominator.

Table 1

Cameras parameters and theoretical linear resolutions for different unmanned aerial spectrometry vehicle flight altitudes

Camera	<i>f</i> , mm	δ, mkm	$L_0^{50}$ , mm	$L_0^{200}$ , mm
VSD Overview Camera	8.00	1.40	8.75	35.00
Zenmuse H20T (Wide)	4.50	2.38	26.51	105.70
Zenmuse H20T (Thermal)	13.50	9.80	36.30	145.18

A chart target based on the data from Table 1 was designed. The minimum and maximum distances between white lines was respectively 32 mm and 100 mm. As a result, the target consists of 13 groups of lines. The width of lines depending on the group number is presented in Table 2. The general view of the chart target is shown in Figure 3.

Table 2

The chart target lines width depending on the group number

Group nu	Group number (N)		2	3	4	5	6
Line wid	th $(l)$ , mm	100	91	82	75	69	62
Ν	7	8	9	10	11	12	13
<i>l</i> , mm	57	52	47	43	39	35	32
					,		

**Figure 3** – General view of the chart target for the unmanned aerial spectrometry vehicle cameras spatial resolution evaluating

The cameras spatial resolution evaluating experiment have to be carried out in the absence of shading the measurement area surface with any objects [7]. Spatial resolution measurement is performed on at least 20 target images for each altitude. Four independent decryption operators are recommended for image analysis. The work of the operators is to recognize groups of lines with all lines differ along their entire length.

Next, the experimental angular resolution of the cameras is determined by the formula:

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{l}{H} \cdot \frac{180}{\pi},\tag{2}$$

where  $\theta$  is the experimental angular resolution for a group of lines; *l* is the target line width from the group of lines recognized by the operator; *H* is the UAV flight altitude.

It is necessary to recognize the tightest groups of lines in each of the images for a given flight altitude, and then calculate the average value and the standard deviation (SD) of the experimental angular resolution per pixel over the entire set of images from a given camera at a given flight altitude. At the same time, since the flight speed of the UAV affects the resolution ([9]), in this study measurements were carried out both in static mode (when the UAV was at one point during the shooting) and in dynamic mode (when the UAV was moving during the shooting).

This study realizes statistical processing of the results on the basis of state standards in the field of laboratory measurements evaluation<sup>6</sup>. At the first stage, it was estimated that the measurement results fell into the critical range at a 95 % confidence level for the number of independent estimates equal to the number of decryption operators. Then the average or median value (depending on the scope of all operators results) for all processing results for each group was calculated. If several independent groups of measurements were obtained to evaluate the spatial resolution at a given altitude (for example, with different lighting conditions), the Cochran criterion statistics were calculated. As a result, measurement groups with outlier characteristics were excluded. After that, the values of angular resolutions obtained for different flight altitudes were averaged. The number of independent degrees of freedom in the evaluation of extended uncertainties was chosen equal to the total number of decrypted images for all groups of measurements for a particular camera. The coverage ratio was evaluated based on this.

## The unmanned aerial spectrometry vehicle modules data synchronization

The task of synchronizing the spectrometer and the VSD observation camera was the next task needed to solve for the UASV thematic data processing possibility. This was necessary for accurate binding of the spectrometry area to the RGB image both recorded by the VSD. The highest level of synchronization could be achieved with hardware methods, but they were not available with current UASV realization. Therefore, a software method of equipment synchronization was chosen in this work.

The VSD registers the observation camera video with a 30 Hz frequency and spectra with a 10 Hz frequency in flight mode. Subsequently, the registered data is processed: the observation camera data is matched to the spectrometer data. Each data set corresponds to the registration time related with the SBC time. However, both data sources have their own delays. The out-of-sync time is determined here as the time difference between the own delays of two data sources.

In addition, it is important to check the constancy of such a time difference over a long period of measurements ( $\approx$ 30 min).

The new additional software module designed for various colors photo images broadcasting on a screen was created to solve the problem. In this case it was possible to make a videospectral data registration using the VSD in laboratory conditions. A certain screen changing colors frequency could be set. Then it was possible to evaluate the out-of-sync time of the VSD observation camera and the VSD spectrometer.

Eight colors in RGB color gradation were selected for the experiment: (0,0,0); (255, 255, 255); (255,0,0); (0, 255, 255); (0, 255,0); (255,0, 255); (0,0, 255); (255, 255,0). The spectrometer exposure time  $t_c$  was fixed and was equal to 100 ms. The color change period on the screen T was selected to be 5 s to register spectrum corresponding to a signal of one color (without mixing due to time offset) at the first stage of measurements. The period T was fixed at 100 ms at the next stage.

Spectra registered during the measurements were "mixed" from initially selected color pairs due

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup> Accuracy (trueness and precision) of measurements methods and results: Part 2 – Basic method for the determination of repeatability and reproducibility of a standard measurement method (ISO 5725-2:1994/ Cor.1:2002); Part 6 – Use in practice of accuracy values (ISO 5725-6:1994/Cor.1:2001);

Uncertainty of measurement: Part 3 – Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC Guide 98 - 3:2008)

to time displacement. The percentage contribution of each of the colors to the "mixed" spectra was calculated with the method for evaluating the composition of a spectrum mixture (active set algorithm, [10]). Thus, the out-of-sync time needed could be estimated.

#### Images and spectra merging

Two RGB images are allocated for each spectrum: a frame of the beginning and a frame of the end of spectrometry. These are two images shifted relative to each other in time by the spectrometer exposure value (with an error caused by the out-of-sync time).

Merging of two images described above with common panoramic image generation can be made after radial and tangential distortion effects correction (for example, with the use of ChArUco method, [11]). This merging task was performed using the method of forming panoramic images based on key points detection [12]. Special algorithms (detectors) were used for this. The numerical characteristics of key points in doing so are determined using other computing algorithms descriptors, where a descriptor is a kind of mathematical construct (usually a vector) that describes a key point in some way and allows to compare different points with each other [11]. The ORB detector (Oriented FAST and Rotated BRIEF), the FREAK descriptor (Fast Retina Key-point) and the Hamming matching method were used as algorithms for searching and describing key points [11]. A panoramic image merged from two frames is the result of this stage.

The part of image matching to the spectrometry area can be defined for any image registered with the VSD since the spectrometer FOV is rigidly connected with the observation camera FOV. In this case, for the panoramic image obtained at the previous stage, two regions can be distinguished. The actual spectrometry region bound to the RGB image becomes known after combining such regions (with the inclusion of the entire area between them).

The steps described above were repeated for the data set registered during the experiment. Comparison of videospectral data and UAV location data by timestamps was the last stage of UASV data preprocessing. Thus, each panoramic image was assigned with the coordinate of the UAV for the further photospectral data geotagging possibility.

## Results of experimental studies and their discussion

The flight experiment was conducted on the territory of the educational geographical station of Belarusian State University "Western Berezina" to evaluate the spatial resolution of the cameras from the UASV on November 6–11, 2022. Data recording altitudes varied from 50 to 200 m (different cameras require different shooting altitudes due to different theoretical spatial resolutions). The values calculated with the use of Table 1 and experimentally obtained angular spatial resolution values estimation ( $\theta$ ) and their SD ( $\sigma$ ) for various cameras are presented in Table 3.

Table 3 shows that theoretical cameras spatial resolution may differ significantly from the experimental value. Thus, the theoretical resolution differs from the experimental one for the Zenmuse H20T wide-angle camera by 30 %. Meanwhile, the relative extended uncertainty of angular resolution for 95 % confidence probability was 14 %. The theoretical resolution for the Zenmuse H20T thermal imaging camera differs from the experimental one by 20 %. The relative extended uncertainty of angular resolution for 95 % confidence was 7.7 %. Various factors may be the reason for the differences in theoretical and experimentally obtained resolutions: features of the frequency-contrast characteristics, the quality of the lens, the accuracy of its installation, as well as the influence of external factors.

An experiment to evaluate the spatial angular resolution was also conducted while the UAV is moving at a speed of 5 m/s in addition to the static mode experiment. Further sequential measurements were carried out in static and dynamic modes in similar light conditions. The results of the resolution estimates for the Zenmuse H20T cameras ( $\theta$ ) and their SD ( $\sigma$ ) are shown in Table 4.

Table 4 shows that angular spatial resolution relative difference for various measurement modes was 6.9 % for a thermal camera and 1.6 % for a wide-angle camera. Meanwhile, standard deviations of the values were comparable or higher than the resolution difference. This suggests that the spatial resolution deterioration caused by the shooting equipment carrier movement at a speed of up to 5 m/s can be ignored in experiments with the *Zenmuse* H20T camera.

Table 3

Camera	VSD Observ (103	ation Camera 80p)	Zenmuse H	20T (Wide)	Zenmuse H2	OT (Thermal)
	θ, deg.	σ, deg.	θ, deg.	σ, deg.	θ, deg.	σ, deg.
Theoretical resolution	0.0100	_	0.0303	_	0.0416	_
Experimental resolution	0.0211	0.0016	0.0392	0.0028	0.0499	0.0020

## Comparative table of theoretical and experimental angular spatial resolution values for different cameras in static mode

#### Table 4

Angular spatial resolution values in static and dynamic modes experimental results

Camera	Zenmuse H20T (Wide)		Zenmus (The	se H20T rmal)
	θ, deg.	σ, deg.	θ, deg.	σ, deg.
Static mode	0.0473	0.0027	0.0485	0.0016
Dynamic mode	0.0481	0.0046	0.0520	0.0032

An experiment to find out-of-sync time for the VSD observation camera and the VSD spectrometer was made. The measurements of the timevarying test screen were carried out. Spectra of "pure" colors were recorded, as well as "mixed" from pairs of initially selected colors due to time displacement.

The out-of-sync time evaluation is shown by the example of a mixture of two colors pair spectrum: (0,255,255) and (0,255,0). Figure 4 shows spectrum of screen with colors (0,255,255) and (0,255,0) in "pure" (Figure 4a) and "mixed" (Figure 4b) forms. Figure 5 shows a time diagram corresponding to the registration of spectrum shown in Figure 4b. Time moments  $t_1$ ,  $t_2$  and  $t_4$  shown in this figure are the moments of color change in camera images. Time moments  $t_3$  and  $t_5$  are the moments of the beginning and the end of spectrometry. The percen-tage of the energy component in the spectrum can be used as a percentage of the particular color type re-gistration time for time shifting evaluation, because the color change period T was equal to the spectro-meter exposure time  $t_c$  in the experiment. Thus, it is possible to evaluate the out-of-sync time for each spectrum in the recorded data series.



**Figure 4** – "Pure" (*a*) and "mixed" (*b*) spectra registered in the out-of-sync time evaluating experiment



Figure 5 – Unsynchronized data registration timing diagram

Data registration have been carrying out for 30 min. After analyzing the entire volume of information, it was found out that the out-of-sync time was on average 128 ms. It changed by an average of 15 ms during the entire time of the experiment. Thus, the FOV displacement caused by a synchronization error (Figure 6) was average from 0.71 pixels at a UAV speed (V) of 1 m/s (with a SD  $\sigma_t^x$  equal to 0.56 pixels) to 3.56 pixels at a UAV speed of 5 m/s (with a SD  $\sigma_t^x$  equal to 2.79 pixels). The FOV displacement  $\Delta y_t$  (with a SD  $\sigma_t^y$ ) in the direction perpendicular to the average velocity vector may be caused by the UAV roll angles changes (the vibration isolation used in the UASV design at the VSD installation site is not enough to compensate for the UAV rolls), as well as wind load. This calculation assumes that the displacement velocity in the direction perpendicular to the average velocity vector is equal to the modulus of the average specified UAV flight speed. In this case, with the flight altitude of 100 m, the UAV speed of 1 m/s and the spectrometer exposure of 100 ms, the FOV position relative accuracy considering synchronization errors was:

$$\varepsilon_{t} = \left(\frac{S - 2\Delta S_{t}^{x} - 2\Delta S_{t}^{y}}{S + 2\Delta S_{t}^{x} + 2\Delta S_{t}^{y}}\right) \pm k \left(1 - \frac{S - 2\Delta S_{\sigma}^{x} - 2\Delta S_{\sigma}^{y}}{S + 2\Delta S_{\sigma}^{x} + 2\Delta S_{\sigma}^{y}}\right) =$$
(3)  
= 0.937 ± 0.099,

where *S* is the area of the spectrometer's FOV (in pixels) after its binding to the RGB image;  $\Delta S_t^{x,y}$  is the spectrometer FOV area change caused by displacement due to synchronization errors;  $\Delta S_{\sigma}^{x,y}$  is the spectrometer FOV area change caused by

the uncertainty of the FOV displacement; k is coverage factor for 95 % confidence probability used in the extended measurement uncertainty calculation.



**Figure 6** – Uncertainty of binding the spectrometer field of view to the RGB image during the UAV movement: 1 – spectrometer field of view in the data registration start moment; 2 – spectrometer field of view in the data registration end moment; w – spectrometer field of view size in the UAV flight direction;  $\Delta w$  – spectrometer field of view bias caused by UAV movement

Videospectral data registered in flight experiment needed to be preprocessed. The video sequence data were converted first to pairs of images, and then to the form of geographically linked panoramic images. The direction and magnitude of the offset between the two images allow determining the position of the spectrometer FOV in the panoramic image (Figure 7), since the spectrometry area is linked to each of the images with an accuracy determined only by the VSD synchronization. It is also possible to generate a panoramic image with several spectrometry regions attached to it after merging together several images (Figure 8).



**Figure 7** – Combining images with the spectrometry areas linking: 1 – spectrometrication starting frame; 2 – spectrometrication ending frame



**Figure 8** – Videospectral device data combining: connected image (a) and reflectance spectra corresponding selected areas (b)

Ground-based registration of solar radiation reflection spectra from the *MS*-10 milk glass was carried out using the *FSR*-02 photospectroradiometer with the "*Calibrovka*" hardware-software system [13]. It was made synchronously with flight measurements in the flight area and was needed to obtain the spectral brightness coefficients based on the spectrometry results. The *FSR*-02 photospectroradiometer has spectral resolution and spectral range similar to the VSD spectrometer. The data of both spectrometers was recalculated into the energy brightness spectral density values using their radiometric calibrations. After that, the spectral brightness coefficients spectra of the underlying surfaces were calculated.

Methods based on the use of key points detectors and descriptors cope well with the task of merging images into a panoramic image. The average deviation of the offset between key points  $\Delta x_m$  when

merging images accounting the shooting equipment distortion correction, is 2.29 pixels (with a SD  $\sigma_m$ equal to 1 pixel). It is 1.53 pixels (with a SD of 0.48 pixels) while determining the displacement magnitude in the region close to the spectrometry area. These values include the displacement both along the axis collinear to the average velocity vector and along the axis perpendicular to this vector. Then, by analogy with (3), at the flight altitude of 100 m, the UAV speed of 1 m/s and the spectrometer exposure of 100 ms, the FOV position relative accuracy considering merging errors was:

$$\varepsilon_m = \left(\frac{S - 2\Delta S_m}{S + 2\Delta S_m}\right) \pm k \left(1 - \frac{S - 2\Delta S_\sigma^x}{S + 2\Delta S_\sigma^x}\right) = 0.910 \pm 0.058, \quad (4)$$

where  $\Delta S_m$  is changes in the spectrometer's FOV area caused by displacement due to merging errors.

The dependence function of the general uncertainty value of the spectrometer FOV binding to the RGB image was taken as the sum of independent variables: a variable considering merging errors and a variable considering synchronization errors. In this case, basing on (3) and (4), the total relative accuracy of the spectrometer FOV to the RGB image binding was:

 $\varepsilon = 0.849 \pm 0.116.$ 

#### Conclusion

The adaptation of existing techniques and recommendations for the spatial resolution of UAV cameras determining was carried out in the course of flight experiments with the unmanned aerial spectrometry vehicle. It consisted in considering several standards for determining the characteristics of photosystems, in the transition from determining the linear resolution per pixel to determining the angular resolution. It also allowed evaluating the accuracy of measurement results. The discrepancy between the experimentally obtained values and the theoretical values of the angular spatial resolution calculated on the cameras factory characteristics basis was revealed as a result of determining the unmanned aerial spectrometry vehicle cameras spatial resolution. This suggests the need for an experimental assessment of the shooting equipment spatial resolution to identify the real characteristics of the cameras. The proposed adaptation of the spatial resolution estimation technique can be used in systems similar to the unmanned aerial spectrometry vehicle.

The spectrometer and the videospectral device observation camera out-of-sync time was determined using the developed method of software synchronization. The out-of-sync time was 128 ms. This made it possible to correct the time of data registration, which led to a decrease in the standard deviation value of the synchronization error from 142 ms to 15 ms. The proposed way of out-of-sync time estimation for various sensors of videospectral systems can be used in systems similar to the unmanned aerial spectrometry vehicle.

A method for obtaining the unmanned aerial spectrometry vehicle data in the photospectral representation was developed in the course of the study. It provides the spectrometer field of view to RGB images binding with a relative accuracy of  $84.9\pm11.6$ %. Combining a set of photospectral images into a single cross-linked image allows the formation of sparse hyperspectral images. Thus, the unmanned aerial spectrometry vehicle is a promising system for getting remote sensing data for a wide range of the Earth surface studying and monitoring tasks.

#### References

1. Lu H., Fan T., Ghimire P., Deng L. Experimental Evaluation and Consistency Comparison of UAV Multispectral Minisensors. *Remote Sens.*, 2020, no. 12(16), pp. 2542. **DOI:** 10.3390/rs12162542

2. Iizuka K., Itoh M., Shiodera S., Matsubara T., Dohar M., Watanabe K. Advantages of unmanned aerial vehicle (UAV) photogrammetry for landscape analysis compared with satellite data: A case study of postmining sites in Indonesia. *Cogent Geosci*, 2018, vol. 4, pp. 1498180. **DOI:** 10.1080/23312041.2018.1498180

3. Dash J.P., Watt M.S., Pearse G.D., Heaphy M., Dungey H.S. Assessing very high-resolution UAV imagery for monitoring forest health during a simulated disease outbreak. *ISPRS J. Photogramm*, 2017, vol. 131, pp. 1–14. **DOI:** 10.1016/j.isprsjprs.2017.07.007

4. Bendig J., Yu K., Aasen H., Bolten A., Bennertz S., Broscheit J., Gnyp M.L., Bareth G. Combining UAVbased plant height from crop surface models, visible, and near infrared vegetation indices for biomass monitoring in barley. *Int. J. Appl. Earth Obs.*, 2015, vol. 39, pp. 79–87. **DOI:** 10.1016/j.jag.2015.02.012

5. Candiago S., RemondinoF., De Giglio M., Dubbini M., Gattelli M. Evaluating Multispectral Images and Vegetation Indices for Precision Farming Applications from UAV Images. *Remote Sens.*, 2015, vol. 7, pp. 4026– 4047. **DOI:** 10.3390/rs70404026

6. Gutarau A.V., Lamaka A.A., Belyaev B.I., SosenkoV.A., Ivut P.V. Unmanned Aerial Spectrometry Vehicle. The 8<sup>th</sup> Belarussian Space Congress: materials, Minsk, 2022, October 25–27, vol. 1, pp. 129–132 (in Russian).

7. Molchanov A.S. Methodology of evaluation of linear permit per pixel of aerophotosystems of military purpose when conducting flight tests. *Izvestia vuzov. Geodesy and Aerophotosurveying*, 2018, vol. 62(4), pp. 390– 396 (in Russian).

**DOI** 10.30533/0536-101X-2018-62-4-390-396

8. Peisahson I.V. Optics of Spectral Instruments. Ed. 2<sup>nd</sup>, add. and reworked. Instruments with concave diffraction gratings. Leningrad: Mashinostroenie Publ., 1975, Ch. 6, pp. 222–227.

9. Katkovsky L.V. Calculation of objects thermal imaging parameters from unmanned aerial vehicles. *Doklady BGUIR*, 2020, vol. 18(2), pp. 53–61 (in Russian). **DOI:** 10.35596/1729-7648-2020-18-2-53-61

10. Box and linearly constrained optimization [Electronic resource]. ALGLIB – Optimization (nonlinear and quadratic). Avialable at: https://www.alglib.net/optimization/boundandlinearlyconstrained.php. (accessed: 01.09.2022).

11. Kaehler A., Bradski G. Learning OpenCV 3. Published by O'Reilly Media, Inc., 1005 Gravenstein Highway North, Sebastopol, CA, 2016, pp. 511–583.

12. Lamaka A.A. Considering camera distortion panoramic images forming method for unmanned aerial vehicle multispectral data. *Journal of the Belarusian State University. Physics*, 2022, vol. 2, pp. 60–69 (in Russian). **DOI:** 10.33581/2520-2243-2022-2-60-69

13. Katkouski L.V. Hardware-software system "Calibrovka" for ground-based spectrometry of the underlying surface and atmosphere. The 7<sup>th</sup> Belarussian Space Congress: materials, Minsk, 2017, October 25–27, vol. 2, pp. 36–40 (in Russian).

## Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

#### В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина, К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин

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

Поступила 08.02.2023 Принята к печати 15.03.2023

Измерительные приборы и системы, содержащие датчики, требующие синусоидальное возбуждающее воздействие, широко используются в информационно-измерительной технике как в производственных условиях, так и в исследовательской практике. В качестве примеров можно привести различные типы металлоискателей, вихретоковые дефектоскопы, анализаторы жидких сред, электрометры с динамическим конденсатором и др. Целью работы являлась разработка оптимальной архитектуры и алгоритмов работы интеллектуальных сенсоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

В настоящей работе описан предложенный авторами подход к построению интеллектуальных сенсоров на базе современных микроконтроллеров, отличительной особенностью которого является непрерывная генерация синусоидальных воздействий и считывание откликов в фоновом режиме, а также выставление флагов готовности для обработки данных в основном процессе микропроцессора, что обеспечивает бесперебойное выполнение фоновых процессов, главным из которых является генерация синусоидального возбуждающего воздействия.

подход опробован при разработке систем картирования Данный поверхностей зарядочувствительными методами, такими как зонд Кельвина, на основе динамического конденсатора, и зонд поверхностной фото-ЭДС для случая полупроводников.

Ключевые слова: интеллектуальный сенсор, синусоидальное возбуждение – отклик, вибрирующий конденсатор, зонд Кельвина, зонд поверхностной фото ЭДС.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Жарин А.Л.	Zharin A.L.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com	e-mail: anatoly.zharin@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина,	U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu,
К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин.	A.L. Zharin.
Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих	[Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal
по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.	Excitation – Response].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 18–26.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 18–26 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

## **Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation - Response**

U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu, A.L. Zharin

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

Received 08.02.2023 Accepted for publication 15.03.2023

#### Abstract

Measuring devices and systems containing sensors that require sinusoidal excitation are widely used in information and measurement technology both in production conditions and in research practice. Examples include various types of metal detectors, eddy current flaw detectors, analyzers of liquid media, electrometers with a dynamic capacitor, etc. The aim of the work was to develop the optimal architecture and algorithms for the operation of intelligent sensors intended for use in measuring systems operating according to the sinusoidal excitation – response scheme.

This paper describes the approach proposed by the authors to the construction of intelligent sensors based on modern microcontrollers, the distinctive feature of which is the continuous generation of sinusoidal excitation and reading responses in the background, as well as setting the readiness flags for data processing in the main process of the microprocessor, which ensures uninterrupted execution of background processes, the main of which is the generation of a sinusoidal excitatory action.

This approach has been tested in the development of charge-sensitive surface mapping systems, such as the Kelvin probe based on a vibrating capacitor, and the surface photo voltage probe for the case of semiconductors.

**Keywords:** intelligent sensors with sinusoidal excitation - response, vibrating capacitor, Kelvin probe, surface photo voltage probe.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Zharin A.L.	Zharin A.L.
Belarusian National Technical University,	Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com	e-mail: anatoly.zharin@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
В.А. Микитевич, А.И. Свистун, А.В. Самарина,	U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, A.V. Samarina, K.U. Pantsialeyeu,
К.В. Пантелеев, А.Л. Жарин.	A.L. Zharin.
Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих	[Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal
по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.	Excitation – Response].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 18–26.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 18–26 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-18-26

#### Введение

Чаще всего понятие «интеллектуальный сенсор» используется для обозначения датчиков нового поколения, которые используют современные вычислительные возможности и более сложные алгоритмы обработки информации, позволяющие улучшить их функциональные характеристики. Современные интеллектуальные сенсоры обладают такими уникальными свойствами как самокалибровка, самодиагностика и адаптация, способностью а также компенсировать изменения внешней среды. Исходя из анализа получаемых данных интеллектуальный сенсор позволяет обеспечивать истинность измерений и возможность взаимодействия с интеллектуальными другими устройствами. Информационная обработка обеспечивает улучшение и интерпретацию собранных данных, а также максимизацию эффективности системы посредством нормирования и сжатия данных, обнаружение события и принятие решения [1-2].

Появление на рынке быстродействующих и недорогих встроенных микропроцессорных средств привело к появлению нового поколения сенсоров, в состав которых входит микропроцессор. Такие интеллектуальные сенсоры позволяют осуществлять сложную обработку полученных сигналов с учётом нелинейностей и посторонних влияний, а также извлекать из них полезную информацию более высокого уровня. Интеллектуальные сенсоры также позволяют рациональное изменение режимов работы на основе анализа получаемых сигналов. Кроме того, они обеспечивают дуплексную передачу информации через шины локального управления, что может быть использовано для передачи полученных данных, изменения конфигурации и удалённого тестирования и калибровки интеллектуальных сенсоров.

Измерительные приборы И системы, содержащие датчики, требующие синусоидальвозбуждающее воздействие, ное широко используются в информационно-измерительной технике как в производственных условиях, так и в исследовательской практике. В качестве примеров можно привести различные типы металлоискателей, вихретоковых анализаторов металлов, анализаторов жидких сред, электрометров с динамическим конденсатором и др.

Целью настоящей работы являлась разработка оптимальной архитектуры и алгоритмов работы интеллектуальных сенсоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

#### Обобщенная архитектура сенсоров, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

На рисунке 1 представлена обобщённая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение - отклик. В таких устройствах генератор возбуждения (3) задаёт требуемую частоту синусоидальных колебаний, которые с помощью драйвера (1) создают синусоидальное возбуждение физических параметров образца. Отклик физических параметров на возбуждение регистрируется соответствующим датчиком и усиливается предусилителем (2). Далее сигнал подаётся на фазочувствительный усилитель (4), на который также подаётся опорный сигнал от генератора возбуждения (3). Как правило, фазочувствительный усилитель осуществляет синхронное детектирование сигнала и последующее интегрирование, т. е. на его выходе получается напряжение, пропорциональное амплитуде переменного сигнала, причём увеличение времени интегрирования помехозащищённость увеличивает системы.



Рисунок 1 – Обобщённая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик: 1 – драйвер возбуждения; 2 – предусилитель; 3 – генератор возбуждения; 4 – фазочувствительный усилитель – интегратор; 5 – микропроцессор или ПК с платой сбора данных

**Figure 1** – Generalized structure of measuring devices with sinusoidal excitation – response: 1 – excitation driver; 2 – preamplifier; 3 – excitation generator; 4 – phasesensitive amplifier – integrator; 5 – microprocessor or PC with data acquisition board

Полученное напряжение далее оцифровывается ΑЦΠ микроконтроллера или платой сбора данных (Data Acquisition Board) персонального компьютера (5). Затем полученная информация обрабатывается компьютером и/или микроконтроллером. По сути, в таких системах основная обработка сигналов осуществляется средствами аналоговой электроники, а уже полученная информация о параметрах синусоидального отклика (амплитуде и, при необходимости, фазе) оцифровывается для дальнейшей обработки и визуализации.

Такой подход к построению измерительных устройств имеет достаточно сложную И архитектуру, аналоговые громоздкую цепи подвержены действию шумов и наводок, а также они имеют низкое быстродействие из-за необходимости интегрирования сигналов. Быстродействие особенно важно в случае применения таких измерительных устройств в сканирующих системах, позволяющих картировать измеряемый параметр.

#### Архитектура интеллектуальных сенсоров, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

С выходом на рынок 32 разрядных микроконтроллеров с ядром Кортекс (Cortex) V разработчиков измерительной техники открылись новые возможности, что позволяет полностью изменить архитектуру измерительных устройств. В таких микроконтроллерах помимо мощного 32 разрядного вычислительного ядра (СРИ), позволяющего обработку вплоть до 64 разрядных чисел с плавающей запятой, содержится широкий набор аналоговых и цифровых периферийных устройств. Кроме того, в них появились модули, которые ранее имелись только в процессорах персональных компьютеров, а именно арифметический сопроцессор, многоканальный прямой доступ к памяти (DMA) и сложный многоуровневый обработчик прерываний. Это позволяет использовать связки периферийных устройств в фоновом режиме без участия СРИ, т. е. контроллер *DMA* используется для высокоскоростного перемещения данных между периферией и/или памятью без участия СРИ.

В настоящей работе использован микроконтроллер компании *ST Microelectronics*  из низко потребляющего семейства *STM32L4*, а именно *STM32L476* [3, 4]. Выбор низко потребляющего микроконтроллера обусловлен более низким уровнем собственных электромагнитных шумов по сравнению с базовыми. Кроме того, в нём значительно расширен функционал периферийных устройств, и, что особенно важно, введён аппаратный оверсамплинг аналого-цифровых преобразователей (*ADC*) позволяющий увеличить разрядность со стандартных 12 до 16 бит, т. е. повысить точность измерений.

Использование микроконтроллера позволяет изменить традиционную схему измерений. В нашем случае позволяет непрерывно генерировать синусоидальное возбуждения с одновременной оцифровкой отклика И полученные массивы данных обрабатывать в едином усилительно обрабатывающем тракте для получения конечных результатов. Такой подход исключает погрешности, присущие традиционным измерителям, и может быть использован В различных устройствах, работающих по схеме возбуждение – отклик, например, в измерителях контактной разности потенциалов с динамическим конденсатором (зонд Кельвина).

На рисунке 2 представлена предлагаемая схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик с использованием микроконтроллера *ST*-*M32L476*. При её разработке ставилась задача максимального использования периферийных устройств микропроцессора для упрощения внешних аналоговых электронных узлов.

Из внешних аналоговых узлов оставлены только такие специфические, как предусилитель датчика и драйвер возбуждения. В свою очередь используется внутренние операционные усилители с программным управлением коэффициентом усиления микропроцессором, сигнал с которых подаётся на внутренний АЦП (7), где осуществляется оцифровка нескольких заданных периодов синусоидального сигнала. Частота возбуждения задаётся таймером (6), а синусоидальное возбуждающее напряжение генерируется с использованием предзагруженной таблицы одного периода синуса ( $N_{sin} = 128$  точек и более), данные с которого через канал 1 прямого доступа к памяти (3) и под управлением таймера подаются на генератор широтно-импульсной модуляции (ШИМ) или на ЦАП (4). Выбор ШИМ предпочтителен, т. к. в этом случае создаётся меньше электромагнитных наводок с частотой возбуждения. Таймер генерирует импульсы запуска как генератора ШИМ, так и АЦП, причём ШИМ запускается задним фронтом запускающего импульса, а АЦП – передним [5]. В таком случае АЦП работает с установившемся значением сигнала.

В соответствии с предустановленным числом периодов ( $N_{periods}$ ) накопления данных АЩП осуществляет  $N_{sin} \times N_{periods}$  отсчётов,

при этом полученные значения через канал 2 прямого доступа к памяти (8) заполняют буфер данных (9). Указанные выше процедуры выполняются в фоновом режиме без участия процессора (10). По окончании заполнения буфера данных выставляется флаг готовности данных, который постоянно проверяется процессором. В случае готовности данных процессор приступает к их обработке, а фоновые процессы продолжают отрабатывать получение следующего пакета данных не зависимо от работы процессора.



Рисунок 2 – Схема измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик с использованием микроконтроллера *STM*32L476: 1 – драйвер возбуждения; 2 – предусилитель; 3 – канал 1 прямого доступа к памяти; 4 – генератор широтно-импульсной модуляции или цифроаналоговый преобразователь; 5 – таблица синусоидального сигнала; 6 – таймер; 7 – аналого-цифровой преобразователь с программируемым усилителем на входе; 8 – канал 2 прямого доступа к памяти; 9 – буфер промежуточных данных; 10 – процессор; 11 – буфер готовых данных; 12 – канал 3 прямого доступа к памяти; 13 – модуль вывода данных и получения команд

**Figure 2** – The structure of measuring devices with sinusoidal excitation – response using the STM32L476 microcontroller: 1 – excitation driver; 2 – preamplifier; 3 – channel 1 of direct memory access; 4 – pulse-width modulation generator or digital-to-analog converter; 5 – table of sinusoidal signal; 6 – timer; 7 – analog-to-digital converter with a programmable gain amplifier at the input; 8 – channel 2 of direct memory access; 9 – intermediate data buffer; 10 – processor; 11 – ready data buffer; 12 – channel 3 of direct memory access; 13 – module for data exchange and receiving commands

После окончания обработки данных процессор буфер заполняет готовых данных (11) и выставляет флаг готовности, который инициализирует запуск модуля вывода данных (13) через канал 3 прямого доступа к памяти (12). Таким образом, процесс передачи данных на внешние устройства также осуществляется в фоновом режиме параллельно с работой процессора и фонового процесса получения следующего пакета данных.

Модуль вывода данных И получения команд (13) постоянно находится в состоянии ожидания внешних команд, при получении которых он с помощью ещё одного канала прямого доступа к памяти размещает их соответствующий В буфере И выставляет флаг. Процессор при обнаружении флага дешифрирует и выполняет команды, что также не влияет на выполнение основного фонового процесса.

#### Базовые алгоритмы микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик

Обычно в микроконтроллерных устройствах для считывания, обработки, вывода данных и др. используется тактирование системным таймером (SysTick), а в более сложных системах используются различные операционные системы реального времени (RTOS). В нашем случае необходим главный процесс, а именно, генерирование синусоидального возбуждесинхронной ния с оцифровкой отклика. Синусоидальное возбуждение должно быть непрерывным, что особенно важно в системах обладающей инерцией. Такими системами являются датчики с механическим возбуждением, например, камертонные датчики, пьезодатчики, измерители с динамическим конденсатором и др., работающие на частоте механического резонанса. В таких датчиках даже кратковременные перерывы или сдвиги фазы возбуждающего воздействия могут приводить к сбоям в работе измерительных систем.

В данной измерительной системе авторами предлагается отказаться от традиционных системных таймеров и операционных систем реального времени, а для тактирования использовать периоды колебаний основного процесса, т. е. возбуждающего воздействия. Кроме того, после окончания заданного числа периодов  $(N_{periods} = 4 \text{ и более})$  в памяти микроконтроллера будет заполнен буфер данных ( $N_{sin} \times N_{periods}$  точек), из которых средствами цифровой обработки данных (DSP) могут рассчитываться необходимые параметры периодического сигнала, а также, в случае необходимости, возможно производить предварительную фильтрацию и нормализацию данных. Такой подход позволяет получать статистически обработанные параметры сигнала такие, как амплитуда и фаза, а также, в случае необходимости, его спектральные характеристики.

На рисунке 3 представлены базовые алгоритмы программного обеспечения микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик.

После включения микроконтроллера происходит конфигурация его тактовой частоты, а затем конфигурация портов ввода/вывода, таймера, контроллеров прямого доступа памяти и прерываний, АЦП, аналогового сторожевого компаратора, ЦАП, модуля вывода/вывода данных и др. Также инициализируются необходимые флаги, переменные и буферы. Производится запуск фоновых процессов и контроллера прерываний.

Подпрограммы прерываний (*ISP*) выполняют только минимально необходимый набор команд и выставляют соответствующий флаг для дальнейшей обработки процессором.

Если в процессе измерительного цикла возникает одно или более прерывание от аналогового сторожевого компаратора (*ISR ADC AWD*), свидетельствующее о превышении сигналом заданного уровня, процессор уменьшает коэффициент усиления внутренних операционных усилителей, т. е. выполняет само подстройку.

После выполнения конфигурации и запуска необходимой периферии и фоновых процессов программа уходит в бесконечный цикл, в котором на максимальной скорости процессора производится опрос флагов. При обнаружении активного флага он сбрасывается и выполняется соответствующая подпрограмма обработки, после выполнения которой проверка остальных флагов прекращается и начинается следующий цикл опроса флагов. Таким образом, за один цикл проверки выполняется обработка только одного активного флага, благодаря чему осуществляется разделение подпрограмм обработки флагов по времени. Флаги в программе расположены порядке их значимости, что позволяет В установить чёткую иерархию их обработки.

Интеллектуальный сенсор может работать как в непрерывном режиме, так и по запросу из вне через интерфейс ввода/вывода. В непрерывном режиме после выполнения измерительного цикла осуществляется запуск следующего измерительного цикла, т. е. внешнее устройство получает данные после окончания каждого измерительного цикла. В зависимости от полученной через интерфейс ввода/вывода команды конфигурации автоматический запуск прекращается, и запуск осуществляется от внешнего запроса. Такой режим необходим в сканирующих системах при картировании измеряемого параметра, где запуск измерительного цикла должен осуществляться после окончания перемещения датчика.



Рисунок 3 – Базовые алгоритмы микроконтроллера для реализации измерительных устройств, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик: РWM – генератор широтно-импульсной модуляции; TIM – таймер; ADC – АЦП; DMA – контроллер прямого доступа к памяти; USART – модуль ввода/вывода данных; AWG – аналоговый сторожевой компаратор; ISR – прерывание

**Figure 3** – Basic microcontroller algorithms for the implementation of measuring devices with sinusoidal excitation – response: PWM – pulse-width modulation generator; TIM – timer; ADC – analog to digital convertor; DMA – direct memory access controller; USART – data input/output module; AWG – analog watchdog comparator; ISR – interrupt

В настоящей работе рассмотрена только базовая структура сенсоров на базе микроконтроллеров серии STM32L4. Однако такие микроконтроллеры имеют много интересных с точки зрения измерительной техники особенностей и периферийных устройств.

В работе в качестве примера использован USART для связи с внешними устройствами, однако микроконтроллеры поддерживают практические все известные интерфейсы включая USB. Кроме того, они имеют контроллер дисплея с сенсорным управлением, т. е. устройства могут быть автономными с выводом результатов на собственный дисплей как в числовом, так и в графическом представлении.

особенностью Важными микроконтроллеров данной серии является гибкая система тактирования, динамическое управление пимножество режимов пониженного танием, потребления, набор специализированной периферии для работы в спящих режимах. Это позволяет не только снизить энергопотребление, но и снизить уровень собственных шумов, что непосредственно влияет на погрешность измерений.

Интересной особенностью с точки зрения измерительной техники является появление нового модуля *DFSDM* [6], т. е. модуля цифрового интерфейса сигма-дельта-модуляторов, который в паре с микросхемой внешнего аналогового интерфейсом работает как обычный АЦП. Микросхему аналогового интерфейса можно непосредственной размещать В близости от источника сигнала и подключать его к микропроцессору двухпроводным цифровым каналом. Это позволяет значительно снизить уровень шумов микропроцессора, действующих на источник сигнала и предусилитель. Обычно разрешение внутренних АЦП микропроцессоров ограничивается 12-16 битами, т. к. высокий уровень их собственных шумов делает увеличение разрешения бессмысленным. Разрешение АЦП на базе DFSDM ограничено только временем преобразования и может достигать 24 бит и более. Модуль DFSDM поддерживает типичные для АЦП функции: аналоговый сторожевой компаратор, детектор предельных значений и коррекцию смещения.

#### Заключение

Описаны предлагаемые авторами принципостроения интеллектуальных сенсоров ΠЫ на базе современных микропроцессоров, предназначенных для использования в измерительных системах, работающих по схеме синусоидальное возбуждение - отклик, отличительной особенностью которых является непрерывная генерация возбуждения и считывание откликов в фоновом режиме, а также выставление флагов готовности для обработки данных в основном процессе микропроцессора, что обеспечивает бесперебойное выполнение фоновых процессов.

Данный подход опробован при разработке систем картирования поверхностей зарядочувствительными методами, такими как зонд Кельвина, на основе динамического конденсатора, и зонд поверхностной фото-ЭДС для случая полупроводников [7–10].

В зависимости от особенностей различных сенсоров предложенная архитектура и окончательная обработка получаемых данных может значительно отличаться. Однако практически все необходимые изменения могут быть внесены на программном уровне, без значительных изменений аппаратной части. Это значительно упрощает процесс разработки и модификации различных сенсоров.

#### Список использованных источников

1. Войтович И.Д. Интеллектуальные сенсоры / И.Д. Войтович, В.М. Корсунский // ИНТУИТ. – 2016. – 1164 с.

2. *Ратхор Т*. Цифровые измерения. АЦП/ЦАП. / Т. Ратхор // Техносфера. – 2006. – 392 с.

3. *Иванов Р.* Семейство микроконтроллеров stm32l4. DSP с батарейным питанием / Р. Иванов // Вестник Электроники. – 2015. – № 4. – С. 10–17.

4. RM0351. Reference manual. STM32L4x5 and STM32L4x6 advanced ARM®-based 32-bit MCUs [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www. st.com/en/microcontrollers-microprocessors/stm32l4-se-ries.html (дата доступа: 04.03.2023).

5. Руководство по использованию обычных таймеров STM32 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://microsin.net/programming/arm/an4776-general-purpose-timer-cookbook.html (дата доступа: 04.03.2023).

6. Знакомство с цифровым интерфейсом сигмадельта-модуляторов микроконтроллеров STM32. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www. compel.ru/lib/136833 (дата доступа: 04.03.2023).

7. Пантелеев К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7, № 2. – С. 136–144.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

8. *Zharin A*. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers / A. Zharin, K. Pantsialeyeu, A. Svistun, K. Tyavlovsky // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 4/3, pp. 17–21.

9. *Tyavlovsky A*. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters / A. Tyavlovsky, A. Zharin, V. Mikitsevich, R. Vorobey // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 4/11, pp. 47–51.

10. *Pantsialeyeu K.* Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface / K. Pantsialeyeu, A. Zharin, V. Mikitsevich, O. Gusev // Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering, 2020, vol. 2, iss. 5/2, pp. 11–14.

#### References

1. Voytovich I.D., Korsunsky V.M. *Intellektual'nyye* sensory: uchebnoye posobiye [Intelligent sensors: textbook], 2<sup>nd</sup> ed. Moscow: INTUIT Publ., 2016, 1164 p. 2. Rathor T. *Tsifrovyye izmereniya*. *ATSP/TSAP* [Digital measurements. ADC/DAC]. Moscow: Technosphere Publ., 2006, 392 p.

3. Ivanov R. Semeystvo mikrokontrollerov stm32l4. DSP c batareynym pitaniyem [Family of stm32l4 microcontrollers. Battery powered DSP]. Vestnik Elektroniki [Bulletin of Electronics], 2015, no. 4, pp. 10–17 (in Russian).

4. *RM0351. Reference manual. STM32L4x5 and STM32L4x6 advanced ARM®-based 32-bit MCUs.* [Electronic Resource]. Available at: https://www.st.com/resource/en/reference\_manual/rm0351-stm-32l47xxx-stm32l48xxx-stm32l49xxx-and-stm32l4axxx-advanced-armbased-32bit-mcus-stmicroelectronics.pdf (accessed 04.03.2023).

5. Rukovodstvo po ispol'zovaniyu obychnykh taymerov STM32 [STM32 Conventional Timer Usage Guide]. [Electronic Resource]. Available at: http://microsin.net/programming/arm/an4776-general-purpose-timercookbook.html (accessed 04.03.2023) (in Russian).

6. Znakomstvo s tsifrovym interfeysom sigma-del'tamodulyatorov mikrokontrollerov STM32 [Familiarity with the digital interface of sigma-delta modulators of STM32 microcontrollers]. [Electronic Resource]. Available at: https://www.compel.ru/lib/136833 (accessed 04.03.2023) (in Russian).

7. Pantsialeyeu K.U., Svistun A.I., Tyavlovsky A.K., Zharin A.L. Digital contact potential difference probe. *Devices and Methods of Measurements*, 2016, vol. 7, no. 2, pp. 136–144 (in Russian).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

8. Zharin A., Pantsialeyeu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4/3, pp. 17–21.

9. Tyavlovsky A., Zharin A., Mikitsevich V., Vorobey R. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 4/11, pp. 47–51.

10. Pantsialeyeu K., Zharin A., Mikitsevich V., Gusev O. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2020, vol. 2, iss. 5/2, pp. 11–14.

# Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров, работающих в широком диапазоне температур

В.Е. Орехова<sup>1</sup>, В.Э. Кисель<sup>2</sup>, К.А. Орехов<sup>1</sup>

<sup>1</sup>ОАО «Пеленг», ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь <sup>2</sup>НИЦ оптических материалов и технологий, Белорусский национальный технический университет, пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь

Поступила 06.02.2023 Принята к печати 10.03.2023

Представлен прототип импульсного лазера на кристалле иттрий-алюминиевого граната с ионами Nd<sup>3+</sup> (Nd:YAG) с диодной накачкой, излучающего на длине волны 1064 нм, для применения в составе дальномеров авиационного базирования и атмосферных лидаров без применения дорогостоящих компонентов и технологий производства.

Проведён расчёт выходной энергии импульса лазерного излучения в режиме активной модуляции добротности. Получены пространственные характеристики лазерного излучения и зависимость энергии лазерного импульса от энергии импульса накачки при комнатной температуре. Приведены результаты измерений энергии лазерного импульса излучателя с диодной накачкой для частот следования 1; 4; 12,5; 22 Гц в течение 2 мин в температурном диапазоне от -40 до +50 °C. Стабилизация температуры матриц лазерных диодов обеспечивалась применением элемента Пельтье с максимально возможной мощностью охлаждения 30 Вт.

В исследованных диапазонах частот следования лазерных импульсов и температур окружающей среды были достигнуты значения энергии лазерного импульса не менее 80 мДж. Расходимость при комнатной температуре не превышает 1,9 мрад.

Ключевые слова: лазерный дальномер, Nd:YAG, активная модуляция добротности, диодная накачка.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Орехова В.Е.	Orekhova V.E.
ОАО «Пеленг»,	JSC «Peleng»,
ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь	Makayonka str., 25, г. Minsk 220114, Belarus
e-mail: vikawatutsina@gmail.com	e-mail: vikawatutsina@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
В.Е. Орехова, В.Э. Кисель, К.А. Орехов.	V.E. Orekhova, V.E. Kisel, K.A. Orekhov.
Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров,	[Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating
работающих в широком диапазоне температур.	over Wide Temperature Range].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 27–37.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 27–37 (in Russian).
<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

## **Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating** over Wide Temperature Range

#### V.E. Orekhova<sup>1</sup>, V.E. Kisel<sup>2</sup>, K.A. Orekhov<sup>1</sup>

<sup>1</sup>JSC «Peleng»,

Makayonka str., 25, c. Minsk 220114, Belarus <sup>2</sup>Center for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University, Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus

Received 06.02.2023 Accepted for publication 10.03.2023

#### Abstract

A prototype of a pulsed diode-pumped laser based on Neodymium-doped Yttrium Aluminum Garnet (Nd:YAG) crystal emitting at 1064 nm is presented for use in airborne rangefinders and atmospheric LIDARs without use of expensive production technologies and components.

Actively Q-Switched laser pulse energy was estimated. Spatial characteristics of laser beam and dependence of pulse energy on the pump pulse energy were obtained at room temperature. Results of diodepumped laser pulse energy measurements are provided within 2 min for pulse repetition rates of 1, 4, 12.5, 22 Hz at ambient temperature range from -40 to +60 °C. Laser diode arrays temperature stabilization was achieved by the use of Peltier module with cooling capacity of 30 W.

Pulse energy values not less than 80 mJ were achieved in the studied ranges of ambient temperature and pulse repetition rate. Laser beam divergence at room temperature does not exceed 1.9 mrad.

Keywords: laser rangefinder, Nd:YAG, active Q-Switching, diode pumping.

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Орехова В.Е.	Orekhova V.E.
ОАО «Пеленг»,	JSC «Peleng»,
ул. Макаёнка, 25, г. Минск 220114, Беларусь	Makayonka str., 25, г. Minsk 220114, Belarus
e-mail: vikawatutsina@gmail.com	e-mail: vikawatutsina@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
В.Е. Орехова, В.Э. Кисель, К.А. Орехов.	V.E. Orekhova, V.E. Kisel, K.A. Orekhov.
Импульсный лазер с диодной накачкой для дальномеров,	[Diode-Pumped Laser for Rangefinders Operating
работающих в широком диапазоне температур.	over Wide Temperature Range].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 27–37.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 27–37 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-27-37

#### Введение

Импульсные твердотельные лазеры ближнего ИК-диапазона применяются в качестве передающей части в системах дистанционного зондирования и исследования атмосферы [1]. Мощные лазеры на основе кристалла Nd:YAG с диодной накачкой с энергией в импульсе более 50 мДж получили широкое использование в импульсных лазерных дальномерах для применения на борту вертолетов или беспилотных летательных аппаратов с дальностью измерений 20 км [2-4], в активных оптических ОТ системах [5], а также в качестве передающей части и задающего генератора в системе генератор-усилитель в аэрозольных лидарах [6, 7]. Для указанных применений расходимость излучения после расширяющего телескопа обычно не превышает 0,3-0,5 мрад. Основными преимуществами таких дальномеров является их компактность и портативность, а также возможность применения в полевых условиях [3] с сохранением значений выходных параметров лазера.

В зависимости от типа и условий применения частота следования лазерных импульсов может составлять от 1 до 20–30 Гц [8, 9]. Разработка лазера в таком случае требует сохранения выходных параметров прибора в течение цикла из серии импульсов при различных частотах следования. Требуется также обеспечить устойчивость оптической системы лазера к воздействию вибраций и изменениям температуры окружающей среды.

лазерах часто применяют B активный элемент на основе кристалла Nd:YAG в форме параллелепипеда с параллельными входной и выходной гранями, расположенными относительно падающего луча под углом, близким или равном углу Брюстера [10-14] с поперечной односторонней накачкой для обеспечения высокой эффективности и диапазона частоты следования импульсов от нескольких герц до нескольких десятков герц. При этом следование правилам отбора кристалла Nd:YAG [15] и технология сборки квантрона могут приводить к значительному повышению себестоимости квантрона в сравнении с цилиндрическими активными элементами. Для обеспечения стабильной работы лазера часто применяется резонатор на основе двух призм

Порро с поляризационным выводом излучения [13, 16–18]. В таком случае предъявляются повышенные требования к технологии изготовления и лучевой прочности граней призм Порро.

В данной работе представлены результаты исследования оптической схемы резонатора импульсного лазера на основе линейной П-образной конфигурации с триппель-призмой и квантроном на основе цилиндрического кристалла Nd:YAG диаметром 4 мм с поперечной диодной накачкой. Выбранная оптическая схема направлена на реализацию компактного лазера, не требующего применения дорогостоящих и высокотехнологичных компонентов, а также с сопоставимыми известным аналогам значениями выходных параметров лазерного излучения в диапазоне частот 1-22 Гц и при работе в широком температурном диапазоне окружающей среды (от -40 до +60 °C).

#### Схема лазера

Схема лазерного резонатора приведена на рисунке 1. Резонатор помещён в герметичный корпус, излучение выводится через защитное стекло. Резонатор длиной 450 мм образован двумя плоскими глухим и выходным зеркалами, выполненными на одной подложке 1 и триппель-призмой 7. Работу в режиме активмодуляции добротности обеспечивает ной электрооптический затвор 2, состоящий из поляризатора 5, ячейки Поккельса 4 на основе кристаллов RKTP и четверть-волновой фазовой пластинки 3. Для компенсации набега фаз, возникающего в поляризованном излучении в резонаторе в результате прохождения через триппель-призму, в резонатор дополнительно установлена четвертьволновая пластина. Юстировка резонатора производится поворотами вокруг оптической оси пары равных по величине оптических клиньев.

Квантрон 9 состоит из механически развязанных узла матриц лазерных диодов и узла медного отражателя с активным элементом. Узел матриц накачки представляет тонкую медную пластину с закреплёнными на ней датчиком температуры и тремя матрицами лазерных диодов с максимальной оптической мощностью 800 Вт, установленную на боковую стенку корпуса лазера изнутри. С внешней стороны к стенке корпуса напротив матриц установлен элемент Пельтье с максимально возможной мощностью охлаждения 30 Вт. Использование элемента Пельтье при работе лазера позволяет стабилизировать температуру теплостока лазерных диодных матриц и обеспечить стабильность спектрального состава излучения накачки.



Рисунок 1 – Оптическая схема лазера: 1 – глухое и выходное зеркала на одной подожке; 2 – электрооптический затвор; 3 – четвертьволновая пластина; 4 – ячейка Поккельса; 5 – поляризатор; 6 – юстировочные клинья; 7 – триппель-призма; 8 – активный элемент; 9 – квантрон; 10 – защитная диафрагма активного элемента

**Figure 1** – Laser optical scheme: 1 – rear and output mirrors on glass substrate; 2 – electro-optic Q-switch; 3 – quarter-wave plate; 4 – Pockels cell; 5 – polarizer; 6 – alignment Risley prism pair; 7 – corner cube prism; 8 – laser crystal; 9 – pump module; 10 – laser crystal optical aperture

Активный элемент квантрона на основе кристалла Nd:YAG с концентрацией ионов Nd<sup>3+</sup> 0,9 ат.%, диаметром 4 мм и длиной 70 мм имеет полностью кондуктивное охлаждение через боковую поверхность. Контакт поверхности активного элемента и поверхностей деталей узла отражателя обеспечивается через слой кремнийорганического теплопроводящего материала. Детали узла отражателя выполнены таким образом, что отведение тепла с боковой поверхности кристалла происходит через 4 цилиндрические области длиной не менее 5 мм, расположенные между тремя областями боковой поверхности кристалла для накачки, напротив которых расположены матрицы накачки и отражатель, а также возле торцов кристалла.

#### Расчёт необходимой энергии накачки

В режиме активной модуляции добротности величина энергии накачки, необходимая для получения импульса определённой энергии, зависит от величины коэффициента отражения выходного зеркала лазера р. При этом предпочтительны низкие значения р для снижения внутрирезонаторной интенсивности излучения на поверхностях оптических элементов и, соответственно, повышения надёжности прибора.

Для определения оптимальной величины р и минимальной мощности матриц накачки был проведён расчёт выходной энергии лазера для различных значений р (рисунок 2) энергии накачки (рисунок 3). Расчёт И решения балансных проводился методом уравнений согласно [19]. Изменение инверсии населённости И потока фотонов внутри резонатора для четырёхуровневой cxeмы кристалла Nd:YAG можно описать как:

$$\frac{d\Phi}{d\tau} = (\eta - 1)\Phi; \tag{1}$$

$$\eta(\tau) = \eta_0 - \int_0^{\tau} \gamma(\tau - \tau') \eta(\tau') \Phi(\tau') d\tau', \qquad (2)$$

где  $\Phi = \phi/\phi_0$ , где  $\phi$  – плотность фотонов в резонаторе, м<sup>-3</sup>,  $\phi_0 = 1/c\sigma_s t_c$ , где c – скорость света, м/с,  $\sigma_s$  – поперечное сечение стимулирован- $M^2$ ,  $t_c = t_r / (\ln(1/R) + L) - L$ испускания, ного время жизни фотона в резонаторе, с,  $t_r$  – время полного обхода резонатора, с, L-отнопассивные потери сительные резонатора;  $\tau = t/t_c$  – время в относительных величинах, t — время, где прошедшее с момента  $\eta = n/n_t$  – относительоткрытия затвора, с; ная плотность инверсии населённостей, где *n* – плотность инверсии населённостей, м<sup>-3</sup>,  $n_t = (\ln(1/\rho) + L)/2\sigma_s l$  – пороговая плотность инверсии населённостей, где *l*-длина накаобласти активного элемента, м; чиваемой  $\eta_0 = n_i / n_t$ , где  $n_i$  – начальная пороговая инверсия населённостей в момент открытия затвора, м<sup>-3</sup>;  $\gamma(\tau)$  определяются как:

$$\eta_i = W \cdot t_{up} \cdot (1 - e^{-t_{pump}/t_{up}});$$
(3)

$$\gamma(\tau) = f_a + (1 - f_a)e^{-\Gamma\tau} + e^{-\frac{\Gamma}{30}\tau} \left(f_b + (1 - f_b)e^{-\Gamma\tau}\right), \quad (4)$$

где  $W = P_{pump} \cdot k_{pump} \cdot n_{qeff} / hv_p \cdot A_c l$  – скорость накачки, с<sup>-1</sup>·м<sup>-3</sup>,  $P_{pump}$  – мощность источника накачки, Вт,  $k_{pump}$  – эффективность поглощения мощности накачки,  $n_{qeff} = 0.87$  – квантовая эффективность накачки Nd:YAG [20],  $h = 6,626 \cdot 10^{34}$  Дж·с – постоянная Планка,  $v_p$  – частота излучения накачки, Гц,  $A_c$  – площадь торцов лазерного кристалла,  $M^2$ ;  $t_{up}$  – радиационное время жизни, с;  $t_{pump}$  – длительность импульса накачки, с;  $f_a = 0,41$  – эффективность заселения верхнего лазерного уровня;  $f_b = 0,19$  – эффективность заселения нижнего лазерного уровня;  $\Gamma = \gamma_t \cdot t_c$ ,  $\gamma_t = 1/t_t$ , с<sup>-1</sup>, где  $t_t = 5 \cdot 10^{-9}$  с – время термализации нижних и верхних лазерных подуровней [19].

Численное решение уравнений (1), (2) определялось методом конечных разностей как:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{m+1} \\ \eta_{m+1} \end{bmatrix} = \\ = \begin{bmatrix} 1 - (\eta_m - 1)\frac{\delta\tau}{2} & -\Phi_m \frac{\delta\tau}{2} \\ \frac{\delta\tau \cdot \eta_m \cdot \gamma(0)}{2} & 1 + \frac{\delta\tau \cdot \Phi_m \cdot \gamma(0)}{2} \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \Phi_m \left(1 - \frac{\delta\tau}{2}\right) \\ \eta_0 - \delta\tau \sum_{k=0}^m \gamma \left(\delta\tau (m+1-k)\right) \eta_k \Phi_k \end{bmatrix},$$
(5)

где m – порядковый номер дискретно определяемой величины;  $\delta \tau$  – шаг по времени в относительных величинах, с<sup>-1</sup>. Выходная энергия лазерного излучения *E* определяется как:

$$E = \frac{h\nu \cdot A}{2\sigma} \ln\left(\frac{1}{R}\right) \delta \tau \sum_{m} \Phi_{m}, \qquad (6)$$

где v-частота лазерного излучения, Гц;  $A = \pi d^2 g/4$ , м<sup>2</sup>, где d-эффективный диаметр активной области торцов лазерного кристалла, м, g-относительный объём моды в активном элементе.



Рисунок 2 – Расчётные значения энергии лазерного импульса в режиме модуляции добротности в зависимости от коэффициента отражения выходного зеркала р. Величина энергии импульса накачки составляла 0,487 Дж

**Figure 2** – Calculated laser pulse energy values in Qswitched mode depending on the reflectivity of the output mirror  $\rho$ . Pump pulse energy value amounts 0.487 J

Значения постоянных, использованных для расчёта, и параметры системы приведены в таблице 1.

При расчётах эффективный диаметр активной области торцов лазерного кристалла принят равным 3,6 мм ввиду ограничения защитной диафрагмой, относительные пассивные потери в резонаторе – 0,1, длительность накачки – 230 мкс, расчётная эффективность накачки принята равной 0,65, относительный объём моды в активном элементе – 0,7, длительность накачки выбрана равной 230 мкс.

Таблица 1/ Table 1

#### Параметры системы

#### System parameters

N⁰	Параметр	Значение	
	Parameter	Value	
1	Время жизни возбужденного состояния верхнего лазерного уровня Nd: YAG, c [19]	220 10-6	
	Nd:YAG upper-state lifetime, s [19]		
2	Поперечное сечение стимулированного излучения Nd:YAG, м <sup>2</sup> [19]	$6.5 \cdot 10^{-23}$	
	Nd:YAG stimulated emission crossection, m <sup>2</sup> [19]		
3	Энергия фотона накачки, Дж	$2.4 ( 10^{-19} )$	
	Pump photon energy, J	2.40.10	
4	Энергия фотона выходного излучения, Дж	$1.87 \cdot 10^{-19}$	
	Laser photon energy, J		

Из рисунка 2 видно, что для фиксированной величины энергии накачки 0,49 Дж расчётная величина энергии импульса растёт

с увеличением коэффициента отражения зеркала до  $\rho = 0,45$ . Максимальная плотность энергии внутри резонатора *J*, Дж/см<sup>2</sup>, равна [21]:

$$J = \frac{E_{out}}{\pi \left(\frac{d}{2}\right)^2} \cdot \frac{1+\rho}{1-\rho},\tag{7}$$

где  $E_{out}$  – выходная энергия излучения, Дж.

С учётом размеров рабочей области активного элемента, требуемой величины энергии импульса, величины лучевой прочности оптических компонентов, типичные значения которой не превышают 10 Дж/см<sup>2</sup>, а также с учётом неравномерности распределения интенсивности излучения в пучке, с целью снижения требований к лучевой прочности для оптических компонентов резонатора коэффициент отражения р принят равным  $\rho = 0,25$ .

## Результаты исследования при комнатной температуре

На рисунке 3 приведена зависимость экспериментально полученной величины выходной энергии лазера в зависимости от величины энергии накачки при длительности импульса накачки 230 мкс для  $\rho = 0,25$ .



Рисунок 3 – Расчётная и измеренная зависимости энергии импульса в режиме модуляции добротности от энергии импульса накачки при  $\rho = 0,25$ . Экспериментальные данные получены при установленной температуре на датчике элемента Пельтье 35 °C при комнатной температуре, при частоте следования импульсов 4 Гц

**Figure 3** – Calculated and measured dependencies of pulse energy in Q-Switched mode on pump pulse energy for  $\rho = 0.25$ . Experimental data were acquired at room temperature and with 35 °C set temperature of thermistor near Peltier module, for pulse repetition rate 4 Hz

Исследования проводились при стабилизации температуры теплостока матриц лазерных диодов при оптимальном значении 35±0,5 °C, соответствующем центральной длине волны спектра излучения накачки 806 нм. Пороговая энергия накачки составляет 0,189 Дж.

Для энергии накачки 0,49 Дж величина энергии импульса выходного лазерного излучения составляет 84 мДж, оптический КПД η = 17,4 %.

В таблице 2 приведены изображения излучения в ближней и дальней зоне в конце серии лазерных импульсов длительностью 2 мин. Различия профилей излучения в ближней зоне для различных частот следования отражают зависимость модового состава от величины установившейся термолинзы в лазеркристалле, вызывающей ном смещение параметров резонатора в более устойчивую область, в результате чего увеличивается расходимость из-за увеличения количества поддерживаемых резонатором мод высоких порядков. В дальнейшем установка снаружи лазерного резонатора в ходе лазерного пучка телескопа с увеличением не более 0,16 позволит снизить расходимость лазерного излучения до 0,3 мрад.

## Результаты исследования выходных параметров при температуре -40...+60 °C

Проведены измерения энергии лазерного импульса при работе в термокамере при температуре окружающей среды -40, -10, +5, +17, +25, +35, +45, +60 °С. На рисунке 4 приведены усреднённые измеренные значения энергии лазерного импульса и её среднеквадратичные отклонения в течение цикла из серии импульсов при величине энергии накачки 0,487 мДж и при температуре окружающей среды от -10 до +60 °С. На рисунках 5*a*-5*d* приведены результаты измерения энергии лазерного импульса излучения в течение цикла из серии импульсов при величине энергии накачки 0,49 мДж для частот следования лазерных импульсов 1 Гц; 4 Гц; 12,5 Гц; 22 Гц соответственно.

рисунках 5a-5dнаблюдать Ha можно периодические колебания энергии, вызванные колебаниями длины волны накачки ИЗ-За периодических изменений величины тепловой мощности, выделяемой элементами Пельтье. потребляемой Колебания мощности могут возникать и поддерживаться термоконтроллером из-за наличия некоторой временной задержки между появлением теплового потока с рабочей стороны элементов Пельтье и моментом регистрации его температурным датчиком узла матриц из-за высокого термического сопротивления конструкции корпуса и узла матриц.

#### Таблица 2/ Table 2

Пространственные характеристики пучка излучения моноимпульса при комнатной температуре при установленной температуре на датчике элемента Пельтье 35 °C

Spatial characteristics of laser beam at room temperature and with 35 °C set temperature of thermistor near Peltier module

Частота следования импульсов, Гц Pulse repetition	1	4	12.5	22
Профиль излучения в ближней зоне				
Near field spatial intensity distribu- tion of the laser beam				
Профиль излучения в дальней зоне				
Far field spatial intensity distribu- tion of the laser beam				
Расходимость, мрад	1.2	1.2	1.5	1.8

Divergence, mrad



Рисунок 4 – Среднее значение энергии лазерного импульса излучения (ось слева) и среднеквадратическое отклонение энергии (ось справа) для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц при различных температурах окружающей среды

**Figure 4** – Mean pulse energy (left axis) and pulse energy standard deviation (right axis) for pulse repetition rates 1; 4; 12,5; 22 Hz at different ambient temperatures

Из рисунков 5a-5d видно, что энергия импульса лазера достигает 80 мДж менее чем через 2 с после начала работы лазера.

Из графиков изменений энергии на рисунках 5a-5c видно, что для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5 Гц наблюдается стабилизация среднего значения выходной энергии лазерного импульса в течение не более чем 10 с после момента включения. Аналогично из рисунка 5d для частоты 22 Гц в течение не более чем 6 с после момента включения рост энергии лазерного импульса сменяется постепенным снижением.

Описанная динамика изменений отражает процесс установления стационарной термолинзы в лазерном кристалле, при этом в первом случае распределение температуры в узле отражателя и активного элемента можно считать стационарным, а во втором случае для более высокой частоты следования лазерных импульсов избыток тепла отводится недостаточно эффективно, из-за чего происходит разогрев активного элемента. Постепенное снижение энергии лазерного импульса излучения вызвано ростом температуры лазерного кристалла, что приводит к уменьшению поперечных сечений поглощения и стимулированного испускания [22] Nd:YAG.

Пониженное значение энергии в течение первой секунды работы при частотах следования лазерных импульсов 12,5 Гц и 22 Гц вызваны особенностью работы электронных блоков лазера, а именно частичным разрядом конденсаторов блока заряда, и могут быть устранены.

Для всех исследованных частот следования лазерных импульсов энергия лазерного импульса достигает 80 мДж менее чем через 2 с после начала работы лазера. Для частоты следования лазерных импульсов до 12,5 Гц спустя 10 с после включения тепловые процессы внутри лазера достигают стационарного состояния, устанавливаются постоянные значения выходных характеристик.



Рисунок 5 – График изменения выходной энергии лазерного импульса со временем при температурах окружающей среды -10, 5, 17, 25, 35, 45, 60 °С в течение 2 мин для частоты следования импульсов: a - 1 Гц; b - 4 Гц; c - 12,5 Гц; d - 22 Гц

**Figure 5** – Graph of the change in the output energy of a laser pulse over time at ambient temperatures -10, 5, 17, 25, 35, 45, 60 °C within 2 min for pulse repetition rate: a - 1 Hz; b - 4 Hz; c - 12.5 Hz; d - 22 Hz

Из рисунков 5a-5d видно, что при температуре -10 °C выходная энергия составляет менее 80 мДж. Это вызвано сдвигом длины волны излучения накачки из-за снижения температуры излучающей площадки матриц лазерных диодов при сохранении температуры на датчиках возле теплостока. Снижение температуры матриц лазерных диодов при пониженной температуре окружающей среды происходит из-за конечной величины теплового сопротивления стенки корпуса лазера и алюминиевой пластины для крепления матриц, расположенных между матрицами и температурным датчиком элемента Пельтье. Среднее значение энергии лазерного импульса излучения  $E_{mean}$  и среднеквадратическое отклонение энергии  $\sigma$  при температуре окружающей среды -40 °C для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц

Mean pulse energy value  $E_{mean}$  and pulse energy standard deviation  $\sigma$  at ambient temperature -40 °C for pulse repetition rates 1, 4, 12.5, 22 Hz

Частота следования лазерных импульсов Pulse repetition rate	1	4	12.5	22
Е <sub>теап</sub> , мДж Е <sub>теап</sub> , mJ	80.8	85.1	85.3	81.5
σ, мДж σ, mJ	1.0	1.2	1.5	1.5

Были проведены измерения значений выходной энергии излучения при частоте следования лазерных импульсов 4 Гц при температуре окружающей среды -10 °С для исходной величины энергии накачки 0,49 Дж и при повышении её на 5 % до 0,51 Дж (рисунок 6). Также были проведены измерения выходной энергии лазерных импульсов при температуре окружающей среды -40 °С (рисунок 7, таблица 3).



Рисунок 6 – Выходная энергия лазерного излучения для величины импульса накачки 0,51 Дж (красный) и 0,49 Дж (синий) для частоты следования лазерных импульсов 4 Гц при температуре окружающей среды -10 °С в течение 2 мин

Figure 6 – Laser pulse energy for pump pulse energy 0.51 mJ (red) and 0.49 (blue) for pulse repetition rate 4 Hz at ambient temperature -10  $^{\circ}C$ 



Рисунок 7 – Выходная энергия лазерного излучения для величины импульса накачки 0,51 Дж для частот следования лазерных импульсов 1 Гц; 4 Гц; 12,5 Гц; 22 Гц при температуре окру-жающей среды -40 °C в течение 2 мин

**Figure 7** – Laser pulse energy for pump pulse energy 0.51 mJ for pulse repetition rates 1, 4, 12.5, 22 Hz at ambient temperature -10 °C within 2 min

Среднее значение энергии лазерного импульса при температуре окружающей среды -10 °С для энергии накачки 0,49 Дж и 0,51 Дж для частоты следования лазерных импульсов 4 Гц составляет соответственно 81,4 мДж и 85,9 мДж. Среднее значение энергии лазерного импульса при температуре окружающей среды -40 °С для энергии накачки 0,51 Дж для частот следования лазерных импульсов 1; 4; 12,5; 22 Гц составляет не менее 80 мДж.
Таким образом, значение выходной энергии лазера в условиях пониженной температуры может быть повышено за счёт увеличения энергии накачки.

#### Заключение

Проведён расчёт энергии импульса лазерного излучения, определена оптимальная величина коэффициента отражения выходного зеркала лазерного резонатора. Исследована величина энергии лазерного импульса при функционировании при комнатной температуре и в термокамере в широком диапазоне температур окружающей среды. Проведенные исследования позволили определить требования к источнику накачки и к характеристикам элемента Пельтье, а также кратность телескопа для рассматриваемого импульсного лазера.

Использованный подход позволил реализовать прототип лазера, способный функционировать в диапазоне частот следования лазерных импульсов 1–22 Гц в течение не менее 2 мин в диапазоне температур окружающей среды -40...+60 °С. Энергия лазерных импульсов составляет не менее 80 мДж при энергии импульса накачки не более 0,51 Дж.

В дальнейшем габариты исследуемой системы могут быть уменьшены за счёт сокращения длины резонатора, а также оптимизации конструкции.

#### Список использованных источников/ References

1. Sabatini R., Richardson M.A., Gardi A., Ramasamy S. Airborne laser sensors and integrated. *Progress in Aerospace Sciences*, vol. 79, Nov, 2015, pp. 15–53. **DOI:** 10.1016/j.paerosci.2015.07.002

2. RichardsonM. Laser systems overview: General. Airborne Laser Systems Testing and Analysis. Dr. Mark A. Richardson. *Swindon*, 2010, Ch. 2.1, pp. 2–1.

3. Bahuguna K.C., Sharma P., Vasan N.S., Gaba S.P. Laser Range Sensors. *Defence Science Journal*, 2007, vol. 57, no. 3, pp. 881–890. **DOI:** /10.14429/dsj.57.1827

4. Долгих А.Е. Модель авиационного импульсного лазерного дальномера, работающего по аэродинамическим объектам / А.Е. Долгих, П.М. Жидков // Труды МАИ. Сер. Системный анализ, управление и обработка информации. – 2018. – № 100.

Dolgih A.E., Zhidkov P.M. Model aviacionnogo impulsnogo lazernogo dalnomera, rabotayushego po aero*dinamicheskim obektam* [Model of an aviation pulsed laser rangefinder operating on aerodynamic objects]. *Trudy MAI. Ser. Sistemnyj analiz, upravlenie i obrabotka informacii* [Proceedings of MAI. Ser. System analysis, management and information processing], 2018, no. 100 (in Russian).

5. Coney A.T., Beecher S., Damzen M.J., Elder I. High-energy Q-switched Nd:YAG oscillator and amplifier development for large-mode, low-alignment sensitivity applications. *Laser Physics Letters*, 2022, vol. 19, no. 8, p. 085001. **DOI:** 10.1088/1612-202X/ac73f9

6. Sicard M., Molero F., Guerrero-Rascado J.L., Pedrós R., Expósito F.J., Córdoba-Jabonero C., ..., Moreno J.M. Aerosol Lidar Intercomparison in the Framework of SPALINET – The Spanish Lidar Network: Methodology and Results. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, vol. 47, no. 10, pp. 3547–3559. **DOI:** 10.1109/TGRS.2009.2021525

7. Ryabtsev G.I., Bogdanovich M.V., Grigor'ev A.V., Kabanov V.V., Kostik O.E., Lebiadok Y.V., ..., Tsitavets U.S. Powerful all-solid-state multiwave laser for aerosol lidars. *Opticheskii Zhurnal*, 2014, vol. 81, pp. 20–25. **DOI:** 10.1364/JOT.81.000571

8. A.G.V. de Brum, F.C. da Cruz Reviewed plan of the ALR, the laser rangefinder for the ASTER deep space mission to the triple asteroid 2001-SN263. *Journal of Physics: Conference Series*, XVIII Brazilian Colloquium on Orbital Dynamics 28 November to 2 December 2016, vol. 911, 012016.

**DOI:** 10.1088/1742-6596/911/1/012016

9. Gerken M., Fritze J., Münzberg M., Weispfenning M. Military reconnaissance platform for the spectral range from the visible to the MWIR. *Infrared Technology and Applications XLIII: Proc. of SPIE*, 2019, vol. 10177, pp. 85–100. **DOI:** 10.1117/12.2264440

10. Ma X., Bi J., Hou X., Chen W. High efficiency diode-pumped slab oscillator and amplifier for spacebased application. *J. Optics & Laser Technology*, 2011, vol. 43, no. 3, pp. 559–562.

**DOI:** 10.1016/j.optlastec.2010.07.016

11. Huang Y.J., Huang B.Y., Lin Y.C., Wang T.D., Tai P.T. Development of a high-energy Q-switched slab laser for targeting designation. *Proc. of SPIE, Electro-Optical and Infrared Systems: Technology and Applications XV*, 2018, vol. 10795, pp. 148–153. **DOI:** 10.1117/12.2325287

12. Coyle D.B., Kay R.B., Stysley P.R., Poulios D. Efficient, reliable, long-lifetime, diode-pumped Nd:YAG laser for space-based vegetation topographical altimetry. *Applied Optics*, 2004, vol. 43, no. 27, pp. 5236–5242. **DOI:** 10.1364/AO.43.005236

13. Coyle D.B., Kay R.B., Lindauer S.J. Design and performance of the vegetation canopy Lidar (VCL) laser

transmitter. *IEEE Aerospace Conference Proceedings*, 2002, vol. 3, p. 3. **DOI:** 10.1109/AERO.2002.1035282

14. Frese E.A. Component-level selection and qualification for the Global Ecosystem Dynamics Investigation (GEDI) laser altimeter transmitter. *Proc. of SPIE*, *Laser Radar Technology and Applications XXIII*, 2018, vol. 10636, pp. 184–193. **DOI:** 10.1117/12.2304032

15. White A.L. Wavelength Selection and Wide-Temperature-Range Operation of Neodymium-Doped Lasers: Thesis presented for the degree of Engineering Doctorate in Photonics. *Laser Cavity Design. Heriot-Watt University School of Engineering and Physical Sciences*, 2014, Ch. 1.1.4, p. 16.

16. Krebs D., Novo-Gradac A.-M., Li S., Lindauer S., Afzal R., Anthony W. Compact, passively Q-switched Nd:YAG laser for the MESSENGER mission to Mercury. *Applied Optics*, 2005, vol. 44, no. 9, pp. 1715–1718. **DOI:** 10.1364/ao.44.001715

17. Wei Xie Temperature insensitive high energy Q-switched Nd:YAG slab laser. *Laser Phys. Lett.*, 2017, vol. 14, no. 6, p. 5. **DOI:** 10.1088/1612-202X/aa6c7d8

18. McCarthy J.C., Young Y.E., Day R.C., Konves J., Ketteridge P.A., Snell K., Chicklis E.P. Athermal,

Lightweight, Diode-Pumped, 1 micron Transmitter. *Proc.* of SPIE Solid State Lasers XIV, San Jose, Lasers and Applications in Science and Engineering, 2005, vol. 5707, pp. 237–242.

#### **DOI:** 10.1117/12.589994

19. Degnan J.J., Coyle D.B., Kay R.B. Effects of thermalization on Q-switched laser properties. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1998, vol. 34, iss. 5, pp. 887–899. **DOI:** 10.1109/3.668777

20. Koechner W. Nd:YAG. Solid-State Laser Engineering. Dr. Walter Koechner, 6 ed., Round Hill Publ., 2006, ch. 4.1.2, pp. 54–61.

21. Lin Bo, Lee H.S., Prasad C.R. Temporal behavior of the laser pulse for intracavity optical parametric oscillator. *Optics Express*, 2007, vol. 15, no. 8, pp. 4902–4908.

**DOI:** 10.1364/OE.15.004902

22. Yoon S.J., Mackenzie J.I. Implications of the temperature dependence of Nd:YAG spectroscopic values for low temperature laser operation at 946 nm. *Proc. of SPIE*, Laser Sources and Applications II, 2014, p. 8, vol. 9135, p. 913503.

DOI: 10.1117/12.2054333

# Inductive Type Impedance of Mo/*n*-Si Barrier Structures Irradiated with Alpha Particles

N.A. Poklonski<sup>1</sup>, A.I. Kovalev<sup>1</sup>, K.V. Usenko<sup>1</sup>, E.A. Ermakova<sup>1,2</sup>, N.I. Gorbachuk<sup>1</sup>, S.B. Lastovski<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Belarusian State University, Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus <sup>2</sup>SSPA "Scientific-Practical Materials Research Centre of NAS of Belarus", P. Brovki str., 19, Minsk 220072, Belarus

*Received 10.02.2023 Accepted for publication 14.03.2023* 

In silicon microelectronics, flat metal spirals are formed to create an integrated inductance. However, the maximum specific inductance of such spirals at low frequencies is limited to a value of the order of tens of microhenries per square centimeter. Gyrators, devices based on operational amplifiers with approximate-ly the same specific inductance as spirals, are also used. Despite the fact that such solutions have been introduced into the production of integrated circuits, the task of searching for new elements with high values of specific inductance is relevant. An alternative to coils and gyrators can be the effect of negative differential capacitance (i.e., inductive type impedance), which is observed in barrier structures based on silicon.

The purpose of the work is to study the low-frequency impedance of Schottky diodes (Mo/n-Si) containing defects induced by  $\alpha$ -particles irradiation and determination of the parameters of these defects by methods of low-frequency impedance spectroscopy and DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy).

Unpackaged Schottky diodes Mo/*n*-Si (epitaxial layer of 5.5 µm thickness and resistivity of 1 Ohm·cm) produced by JSC "Integral" are studied. Inductance measurements were carried out on the as manufactured diodes and on the diodes irradiated with alpha particles (the maximum kinetic energy of an  $\alpha$ -particle is 5.147 MeV). The impedance of inductive type of the Schottky diodes at the corresponding DC forward current of 10 µA were measured in the AC frequency range from 20 Hz to 2 MHz. DLTS spectra were used to determine the parameters of radiation-induced defects. It is shown that irradiation of diodes with alpha particles produces three types of radiation-induced defects: *A*-centers with thermal activation energy of  $E_1 \approx 190$  meV, divacancies with activation energies of  $E_2 \approx 230$  meV and  $E_3 \approx 410$  meV, and *E*-centers with activation energy of  $E_4 \approx 440$  meV measured relative to the bottom of *c*-band of silicon.

**Keywords:** Schottky diode on silicon, negative differential capacitance, alpha irradiation, *A*-centers, *E*-centers, divacancies.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Поклонский Н.А.	Poklonski N.A.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by	e-mail: poklonski@bsu.by
Для цитирования:	For citation:
N.A. Poklonski, A.I. Kovalev, K.V. Usenko, E.A. Ermakova,	N.A. Poklonski, A.I. Kovalev, K.V. Usenko, E.A. Ermakova,
N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovski.	N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovski.
Inductive Type Impedance of Mo/n-Si Barrier Structures	Inductive Type Impedance of Mo/n-Si Barrier Structures
Irradiated with Alpha Particles.	Irradiated with Alpha Particles.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 38–43.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 38–43.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43

### Импеданс индуктивного типа барьерных структур Мо/*n*-Si, облучённых альфа-частицами

Н.А. Поклонский<sup>1</sup>, А.И. Ковалев<sup>1</sup>, К.В. Усенко<sup>1</sup>, Е.А. Ермакова<sup>1,2</sup>, Н.И. Горбачук<sup>1</sup>, С.Б. Ластовский<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь <sup>2</sup> ГО «НПЦ НАН Беларуси по материаловедению», ул. П. Бровки, 4, г. Минск 220072, Беларусь

Поступила 10.02.2023 Принята к печати 14.03.2023

В кремниевой микроэлектронике для создания интегральной индуктивности формируют плоские металлические спирали. Однако максимальная удельная индуктивность таких спиралей на низких частотах ограничена значением порядка десятков микрогенри на квадратный сантиметр. Используются также гираторы – устройства на основе операционных усилителей, примерно с такой же удельной индуктивностью, как и спирали. Несмотря на то, что такие решения внедрены в производство интегральных микросхем, актуальной является задача поиска новых элементов с большими значениями удельной индуктивности. Альтернативой спиралям и гираторам может стать эффект отрицательной дифференциальной ёмкости (т. е. импеданса индуктивного типа), наблюдаемый в барьерных структурах на кремнии.

Цель работы – исследование низкочастотного импеданса диодов Шоттки (Mo/*n*-Si), содержащих радиационные дефекты, создаваемые α-частицами, и определение параметров этих дефектов методами низкочастотной импедансной спектроскопии и спектроскопии DLTS (Deep Level Transient Spectroscopy).

Исследованы бескорпусные диоды Шоттки 5.5КЭФ-1 (Мо/*n*-Si) производства ОАО «Интеграл». Измерения индуктивности проводились на исходных диодах и на диодах, облучённых альфачастицами (максимальная кинетическая энергия  $\alpha$ -частицы 5.147 МэВ). В интервале частот переменного тока от 20 Гц до 2 МГц измерен импеданс индуктивного типа диодов при постоянном прямом токе 10 мкА. Для определения параметров радиационных дефектов измерялись спектры DLTS. Показано, что при облучении диодов Шоттки альфа-частицами образуется три типа радиационных дефектов: *А*-центры с энергией термической активации  $E_1 \approx 190$  мэВ, дивакансии с энергиями активации  $E_2 \approx 230$  мэВ и  $E_3 \approx 410$  мэВ и *E*-центры с энергией активации  $E_4 \approx 440$  мэВ, отсчитанные от дна *с*-зоны кремния.

**Ключевые слова:** диод Шоттки на кремнии, отрицательная дифференциальная емкость, альфаоблучение, *А*-центры, *E*-центры, дивакансии.

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Поклонский Н.А.	Poklonski N.A.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: poklonski@bsu.by	e-mail: poklonski@bsu.by
Для цитирования:	For citation:
N.A. Poklonski, A.I. Kovalev, K.V. Usenko, E.A. Ermakova,	N.A. Poklonski, A.I. Kovalev, K.V. Usenko, E.A. Ermakova,
N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovski.	N.I. Gorbachuk, S.B. Lastovski.
Inductive Type Impedance of Mo/n-Si Barrier Structures	Inductive Type Impedance of Mo/n-Si Barrier Structures
Irradiated with Alpha Particles.	Irradiated with Alpha Particles.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 38–43.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 38–43.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-38-43

#### Introduction

In silicon microelectronics, flat film spirals of round or rectangular shape are formed to create an integrated inductance. However, the maximum specific inductance of such spirals at low frequencies is limited to a value of the order of tens of microhenries per square centimeter, while their diameter can be of several millimeters [1]. Another way to create an integrated inductance is gyrators – devices based on operational amplifiers that imitate inductance [2, 3]. Despite the fact that such solutions have been introduced into the production of integrated circuits, the task of searching for new elements with inductive impedance is relevant. This will allow more rational use of the useful area of the microcircuits.

An alternative to film coils can be the effect of negative differential capacitance [4, 5], which is observed in various semiconductor structures: silicon photodiodes irradiated with neutrons, multilayer heterostructures, chalcogenide films, transistor structures, metal–semiconductor interfaces, etc. [6]. Note that, in metal–semiconductor barrier structures, hopping conduction via defects is observed in the forward biased space charge region of semiconductor [7].

The purpose of the work is to study the lowfrequency impedance of Schottky diodes (Mo/n-Si) with radiation-induced defects for different fluences of  $\alpha$ -particles and determination of the parameters of radiation-induced defects by DLTS spectroscopy.

#### **Studied structures**

Unpackaged Schottky diodes Mo/n-Si (epitaxial 5.5  $\mu$ m thick layer and resistivity of 1 Ohm·cm) produced by JSC "Integral" were studied [8]. Diodes were fabricated on wafers of monocrystalline silicon of *n*-type electrical conductivity doped with antimony and grown by the Czochralski method. The resistivity of the wafers was 0.01 Ohm cm at the laboratory conditions. The thickness of the wafers was 460 µm. An *n*-type 5.5 µm thick silicon layer was epitaxially grown on the substrate. Then, 0.3 µm thick molybdenum (Mo) layer was deposited in a vacuum (see Figure 1a and Table). The ohmic contact was formed by deposition of aluminum (Al) 3.3 µm thick layer on molybdenum. On the reverse side, an ohmic contact was formed by deposition of Ti/Ni/Ag (0.1/0.5/0.6 µm) metal electrode. Then the wafer was cut into chips (unpackaged barrier structures). After measuring the



**Figure 1** – Cross section of a Schottky diode (*a*) and equivalent electrical circuit (*b*) of an irradiated diode under forward bias  $U_{dc} = 50-100 \text{ mV} (I_{dc} = 10 \text{ }\mu\text{A})$ 

initial characteristics, the diodes were irradiated with an uncollimated beam of alpha particles (decay energy of 5.147 MeV) with fluence from  $3.6 \cdot 10^{11}$  to  $2.1 \cdot 10^{14}$  cm<sup>-2</sup>. The projective range of  $\alpha$ -particles in silicon did not exceed 24 µm. The surface activity of the source was  $2 \cdot 10^7$  Bq·cm<sup>-2</sup>. The diode equivalent circuit describing Z(f) dependences at  $I_{dc} =$ = 10 µA is shown in Figure 1*b* (see also [9]).

#### Measurement results and their discussion

The dependences of the real Z' and imaginary Z'' parts of the impedance Z = Z' + iZ'' on the AC frequency f (in the range from 20 Hz to 2 MHz) and

Table

The main characteristics of the studied Mo/n-SiSchottky diodes at the laboratory conditions

Parameter	Value		
Electrical resistivity of the <i>n</i> -type silicon epitaxial layer doped with phosphorus, Ohm·cm		1	
Epitaxial layer thickness $d_{e}$ , $\mu m$		5.5	
Molybdenum layer thickness $d_{Mo}$ , $\mu m$		0.3	
Diode thickness $d$ , $\mu$ m		460	
Barrier (transition) area, mm <sup>2</sup>		5.25	
Barrier capacitance $C_b$ , nF	0.95	1.25	1.48

DC bias voltage  $U_{dc}$  (in the range from 0 to 400 mV) were measured on an Agilent E4980A LCR meter. AC signal amplitude was  $U_{ac} = 40$  mV. When measuring the impedance Z, the diodes were kept in the dark at room temperature. DC forward current  $I_{dc}$  through the diodes varied from 0 to 10 mA; the characteristics were chosen at  $I_{dc} = 10 \mu$ A with the highest value of the "inductive type" impedance. The calculation of the diode inductance L was carried out according to the methods [9–11] using a series equivalent *LR*-circuit (see, e.g., [12]).

Figure 2a,b,c shows the frequency dependences of the inductance for diodes with the concentration of doping impurity (phosphorus) in the epitaxial layer:  $3.10^{15}$ ,  $4.7.10^{15}$ ,  $7.10^{15}$  cm<sup>-3</sup>, corresponding to the values of the barrier capacitance:  $C_{\rm b} = 0.95$ , 1.25, 1.48 nF. The barrier capacitance of the diodes and the concentration of phosphorus in the *n*-Si epitaxial layers were determined from measurements of the capacitance-voltage characteristics at the frequency of 1 MHz under the diode reverse bias of up to 10 V. For the first group of doping (Figure 2a), after irradiation, a significant increase in low-frequency inductance is observed, which then decreases with the fluence of  $\alpha$ -particles. For all groups of diodes (Figure 2*a*,*b*,*c*) for fluences  $\Phi = 1.\overline{7 \cdot 10^{13}}$  and  $3.5 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  there is a decrease in the low-frequency inductance with the transition of the impedance to the capacitive type. When the fluence  $\Phi = 5.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  was reached, all three groups acquired an inductive impedance in the low-frequency region.

The maximum low-frequency inductance in both the virgin and irradiated Schottky diodes was found for the value of stationary current  $I_{dc} \approx 10 \ \mu\text{A}$ excited in them. According to Figure 2a,b,c the dependence of the inductance L on the frequency f of the measuring signal for  $I_{dc} \approx 10 \ \mu\text{A}$  has two extremes: the first (indicated by the Roman numeral Iand marked by a dashed line) in the low-frequency region (75 Hz), the second (indicated by the Roman number II and marked with a dashed line) in the region (1–10 kHz) with capacitive impedance. (The negative inductance of a two-terminal network corresponds to the capacitance.)

So: i) the inductive contribution to the impedance of the diodes (*I* region) non-monotonically depends on the fluence of  $\alpha$ -particles and decreases with the concentration of doping impurity (phosphorus); ii) the capacitive contribution to the impedance of the diodes (*II* region) increases with the



**Figure 2** – Frequency dependences of the inductance *L* of three diodes with different barrier capacitance  $C_{\rm b}$ . Numbers of curves correspond to fluences of  $\alpha$ -particles  $\Phi$ ,  $10^{13}$  cm<sup>-2</sup>: 0 (#1); 1.7 (#2); 3.5 (#3); 5.2 (#4). The concentration of phosphorus atoms in the epitaxial silicon layer,  $10^{15}$  cm<sup>-3</sup>: 3 (*a*); 4.7 (*b*); 7 (*c*). Values of L < 0 correspond to the capacitive type of impedance

irradiation fluence and the concentration of phosphorus atoms.

Radiation-induced defects in diodes irradiated with  $\alpha$ -particles were studied by DLTS spectroscopy [13–16] on CE-7C capacitance spectrometer in the temperature range from 80 to 300 K. DLTS spectra were recorded for diode irradiated with fluence of  $\alpha$ -particles  $\Phi \approx 3.6 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-2</sup>. The spectra were measured at the following setup parameters: filling pulse amplitude +5 V and duration 10 ms, reverse bias voltage –6 V, emission velocity window 19 s<sup>-1</sup>.



**Figure 3** – DLTS spectra of the diode irradiated with  $\alpha$ -particles with fluence  $\Phi \approx 3.6 \cdot 10^{11} \text{ cm}^{-2}$  ( $C_b = 1.48 \text{ nF}$ ; see also Table and Figure 2*c*): after irradiation (spectrum *I*); after annealing at 150 °C for 30 min (spectrum 2)

Figure 3 shows DLTS spectrum of diode irradiated with  $\alpha$ -particles with fluence  $\Phi \approx 3.6 \cdot 10^{11}$  cm<sup>-2</sup> (spectrum *1*) and DLTS spectrum of the same diode after 30 min annealing at the temperature of 150 °C (spectrum *2*).

Spectrum *I* shows DLTS peaks labeled  $E_1$ ,  $E_2$ ,  $E_3$ , and  $E_4$ . Each peak is associated with the emission of electrons from deep levels of radiationinduced defects. For each peak, from the Arrhenius dependences for deep levels, the values of the activation energy and the electron capture cross section were obtained. Peak  $E_1$  corresponds to electron emission from the level  $E_c - 0.19$  eV and capture cross section  $\sigma_n = 1.4 \cdot 10^{-15}$  cm<sup>-2</sup>, peak  $E_2$  corresponds to  $E_c - 0.23$  eV and  $\sigma_n = 1.4 \cdot 10^{-15}$  cm<sup>-2</sup>. The overlap of peaks  $E_3$  and  $E_4$  in spectrum *I* does not allow one to correctly determine the parameters of the corresponding defect levels.

Comparison of the obtained results with the literature data [13, 15] allows us to conclude that the  $E_1$  peak corresponds to the deep level of the *A*-center, which is an "interstitial oxygen – vacancy" pair  $(O-V)^{-/0}$ . The  $E_2$  peak belongs to the shallow divacancy level  $(V-V)^{=/-}$ . The  $E_3$  peak is most likely associated with the emission of electrons from the deep divacancy level  $(V-V)^{-/0}$  and corresponds to  $E_c - 0.41$  eV and  $\sigma_n = 1.7 \cdot 10^{-15}$  cm<sup>-2</sup> [13, 15, 16].

The concentration of phosphorus doping impurity in the *n*-region of the studied Schottky diode is  $4.7 \cdot 10^{15}$  cm<sup>-3</sup>. At such dopant concentrations, along with the interstitial oxygen atoms, the phosphorus atoms also provide sinks for vacancies generated by alpha particles during irradiation [13, 17]. Therefore, the  $E_4$  peak most likely corresponds to the

electron emission from the deep level  $E_c - 0.44$  eV and  $\sigma_n = 1.7 \cdot 10^{-15}$  cm<sup>-2</sup> of the phosphorus–vacancy defect (P–V)<sup>-/0</sup>, i.e. *E*-center. To test this assumption, the irradiated diode was annealed, since it is known that annealing temperature of the *E*-center in about 150 °C [17]. Spectrum 2 in Figure 3 was recorded after annealing the irradiated sample at temperature of 150 °C for 30 min. It can be seen from this spectrum that the  $E_4$  peak disappears after the heat treatment and only the  $E_3$  peak remains.

#### Conclusion

It has been established that in the studied range of fluences of irradiation with  $\alpha$ -particles (up to  $\Phi = 5.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$ ) Schottky diodes have a nonmonotonic dependence of the inductance L on the fluence of  $\alpha$ -particles. A significant increase in the inductance L for  $f \approx 75$  Hz is observed (e.g., by an order of magnitude at fluence  $\Phi \approx 5.2 \cdot 10^{13} \text{ cm}^{-2}$  of  $\alpha$ -particles). All irradiated diodes have capacitive impedance for  $f \approx 1$  kHz. It is shown that the capacitance and inductance of irradiated Schottky diodes (Mo/n-Si) depend on the concentration of the doping impurity (phosphorus atoms). The maximum specific inductance observed on diodes irradiated with  $\alpha$ -particles, measured at frequency f = 75 Hz, is  $\approx 2.5$  H/cm<sup>2</sup>. This far exceeds the typical value of  $\approx 10 \,\mu\text{H/cm}^2$  for flat metal film inductors.

It has been shown that three types of radiationinduced defects prevail in the diodes irradiated with  $\alpha$ -particles: *A*-centers (a vacancy of a silicon atom in the crystal matrix and an oxygen atom), divacancies, and *E*-centers (a vacancy and a phosphorus atom). The latter are annealed at 150 °C for 30 min.

#### Acknowledgments

This work was supported by the Belarusian National Research Program "Materials Science, New Materials and Technologies".

#### References

1. Zhigal'skii A.A. *Proektirovanie i konstruirovanie mikroskhem* [Design and construction of microcircuits]. Tomsk, TUSUR Publ., 2007, 195 p.

2. Svirid V.L. *Proektirovanie analogovykh mikroelektronnykh ustroistv* [Design of analog microelectronic devices]. Minsk, BSUIR Publ., 2013, 296 p.

3. Classic circuits. *Electronics (50 Years Special Commemorative Issue)*, 1980, vol. 50, no. 9, pp. 436–442.

4. Penin N.A. Negative capacitance in semiconductor structures. *Semiconductors*, 1996, vol. 30, no. 4, pp. 340–343.

5. Poklonski N.A., Shpakovski S.V., Gorbachuk N.I., Lastovskii S.B. Negative capacitance (impedance of the inductive type) of silicon  $p^+$ –n junctions irradiated with fast electrons. *Semiconductors*, 2006, vol. 40, no. 7, pp. 803–807. **DOI:** 10.1134/S1063782606070128

6. Gorbachuk N.I., Poklonski N.A., Marochkina Ya.N., Shpakovski S.V. Effect of hole extraction from the base region of a silicon p-n-p transistor on its reactive impedance. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 4, pp. 322–330 (in Russian).

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-4-322-330

7. Bochkareva N.I., Voronenkov V.V., Gorbunov R.I., Virko M.V., Kogotkov V.S., Leonidov A.A., Vorontsov-Velyaminov P.N., Sheremet I.A., Shreter Yu.G. Hopping conductivity and dielectric relaxation in Schottky barriers on GaN. *Semiconductors*, 2017, vol. 51, no. 9, pp. 1186– 1193. **DOI:** 10.1134/S1063782617090068

8. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Lapchuk N.M. *Fizika elektricheskogo kontakta metall/poluprovodnik* [Physics of electrical contact metal/semiconductor]. Minsk, BSU Publ., 2003, 52 p.

9. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I., Shpakovski S.V., Lastovskii S.B., Wieck A. Equivalent circuit of silicon diodes subjected to high-fluence electron irradiation. *Technical Physics*, 2010, vol. 55, no. 10, pp. 1463–1471. **DOI:** 10.1134/S1063784210100117 10. Tooley M. Electronic Circuits: Fundamentals and Applications. London, Routledge, 2020, xii+510 p. **DOI:** 10.1201/9780367822651

11. Poklonski N.A., Gorbachuk N.I. *Osnovy impedansnoi spektroskopii kompozitov* [Fundamentals of impedance spectroscopy of composites]. Minsk, BSU Publ., 2005, 130 p.

12. Ng K.K. Complete Guide to Semiconductor Devices. New York, Wiley-IEEE Press, 2002, xxiv+740 p.

13. Lang D.V. Deep-level transient spectroscopy: A new method to characterize traps in semiconductors. *J. Appl. Phys.*, 1974, vol. 45, no. 7, pp. 3023–3032. **DOI:** 10.1063/1.1663719

14. Vavilov V.S., Kekelidze N.P., Smirnov L.S. *Deistvie izluchenii na poluprovodniki* [Effect of radiation on semiconductors]. Moscow, Nauka Publ., 1988, 192 p.

15. Bourgoin J., Lannoo M. Point Defects in Semiconductors II. Experimental Aspects. Berlin, Springer, 1983, xvi+295 p. **DOI:** 10.1007/978-3-642-81832-5

16. Dedovich H.H., Kuzminykh V.A., Lazarchik A.N., Lomako V.M., Pranovich V.I., Romanov A.F. [Digital capacitance spectrometer CE-6]. Materials and Structures of Modern Electronics: Proc. of III Int. Sci. Conf., Minsk, 25–26 Sep., 2008, ed. V.B. Odzhaev (ed.-in-chief) et al., Minsk, BSU Publ., 2008., pp. 16–19 (in Russian).

17. Kozlov V.A., Kozlovskii V.V. Doping of semiconductors using radiation defects produced by irradiation with protons and alpha particles. *Semiconductors*, 2001, vol. 35, no. 7, pp. 735–761 **DOI:** 10.1134/1.1385708

# Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки

М.Р. Зарипов<sup>1</sup>, В.А. Алексеев<sup>2</sup>, А.И. Кириллов<sup>1</sup>, А.В. Офицерова<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

<sup>2</sup>Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова, ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 09.12.2022 Принята к печати 18.01.2023

Широкое распространение в настоящее время автономных лазерных систем предполагает снижение энергии питания, потребляемой входящими в их состав лазерными источниками, при одновременном повышении их выходных энергетических характеристик. Целью настоящей работы являлось практическое подтверждение возможности сложения лазерных пучков в системах, построенных на основе кольцевой линии задержки.

Изготовлена экспериментальная установка, реализующая принцип схемы синхронного сложения лазерных пучков на кольцевой волоконно-оптической линии задержки, разработанной ранее авторами. Представлена схема изготовленной установки, подробно описан её принцип действия и рассмотрен её состав. Отмечено, что для достижения поставленной цели выполнялись измерения электрических сигналов, снимаемых с фотоприёмного устройства установки, и отводимой сплиттером доли мощности лазерного излучения, сформированного в волоконно-оптическом тракте установки. Приведены результаты измерений в виде осциллограмм временных зависимостей электрических сигналов фотоприёмного устройства и значений мощности на выходе сплиттера. Представлены графики зависимости мощности вывода и мощности циркуляции от мощности исходного лазерного пучка, вводимого в установку.

Анализ результатов показал, что в кольцевой волоконно-оптической линии задержки происходит сложение лазерных пучков. При этом установлено, что предложенная схема обеспечивает увеличение мощности исходного пучка в 1,05...1,11 раз.

**Ключевые слова:** лазерный источник излучения, сложение лазерных пучков, кольцевая волоконная линия задержки.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Зарипов М.Р.	Zaripov M.R.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия	Academy of Sciences,
e-mail: zaripov.istu@gmail.com	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
	e-mail: zaripov.istu@gmail.com
	For situations
Для цитирования.	For challon:
М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.	M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.
<i>Для цитирования.</i> <i>М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.</i> Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой	M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova. [Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].
Для цитерования. М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова. Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки.	M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova. [Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line]. Devices and Methods of Measurements.
Для цитерования. М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова. Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки. Приборы и методы измерений.	<ul> <li>M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.</li> <li>[Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].</li> <li>Devices and Methods of Measurements.</li> <li>2023, vol. 14, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).</li> </ul>
Для цитрования. <i>М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.</i> Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки. Приборы и методы измерений. 2023. – Т. 14, № 1. – С. 44–53.	<ul> <li>M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.</li> <li>[Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].</li> <li><i>Devices and Methods of Measurements</i>.</li> <li>2023, vol. 14, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).</li> <li>DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53</li> </ul>

# **Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line**

M.R. Zaripov<sup>1</sup>, V.A. Alekseev<sup>2</sup>, A.I. Kirillov<sup>1</sup>, A.V. Oficerova<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia

<sup>2</sup>Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

*Received 09.12.2022 Accepted for publication 18.01.2023* 

#### Abstract

At present time widespread use of autonomous laser systems supposes reducing of supply energy, consumed by laser sources that are included in their composition and at the same time increasing of their output energy characteristics. The objective of this work was practical confirmation of possibility of laser beam combining in systems based on a ring delay line.

The experimental setup that implements the principle of synchronous laser beam combining scheme on the ring fiber-optic delay line, developed by authors earlier, is made. The schematic diagram of the manufactured setup is presented, its operation principle is described in detail and its composition is considered. It is noted that in order to achieve the objective measurements of electrical signals received from the photodetector of the setup and measurements of the part of laser radiation power removed by the splitter and formed in the fiber-optic path of the setup are performed. Results of measurements are presented as the waveforms of electrical signals from the photodetector and of power values at the output of the splitter. Plots of dependence of the output power and the circulation power on the power of the initial laser beam introduced into the setup are presented.

Analysis of results showed that the laser beam combining occurs in the ring fiber-optic delay line. Besides, it was found that the proposed scheme provides an increase in the power of the initial beam by 1.05...1.11 times.

Keywords: laser source, laser beam combining, ring fiber-optic delay line.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Зарипов М.Р.	Zaripov M.R.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия	Academy of Sciences,
e-mail: zaripov.istu@gmail.com	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
	e-mail: zaripov.istu@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
М.Р. Зарипов, В.А. Алексеев, А.И. Кириллов, А.В. Офицерова.	M.R. Zaripov, V.A. Alekseev, A.I. Kirillov, A.V. Oficerova.
Исследование сложения лазерных пучков в кольцевой	[Research of Laser Beam Combining in Ring Fiber-Optic Delay Line].
волоконно-оптической линии задержки.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 44–53 (in Russian).
2023. – T. 14, № 1. – C. 44–53.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-44-53	

#### Введение

К настоящему существенно моменту расширился парк автономных лазерных систем и комплексов различного назначения: экологического, военного, технологического. Их примером могут служить ряд комплексов экологического мониторинга, применяемых для обнаружения загрязнений в атмосфере и водной среде, наблюдения за погодными явлениями, контроля состава сточных вод на промышленных предприятиях и очистных сооружениях, приборы военного назначения, в том числе транспортируемые на беспилотных летательных аппаратах или переносные устройства, лидары и средства наведения высокоточных боеприпасов на цель, компактные портативные технологические лазерные установки И другие лазерные системы, которые работают в условиях ограничения энергопитания [1, 2]. Актуальным для них является повышение эффективности их работы (увеличение глубины зондирования сред, что повышает дальность действия системы, расширяет климатические работы, снижает вероятность условия ложного срабатывания и др.) без возрастания потребляемой энергии питания или сохранение их эффективности на прежнем уровне при увеличении времени автономной работы при условии использования одного и того же источника питания.

В связи с этим возникает задача создания экономичных импульсных лазерных источников с существенным повышением амплитуды импульса лазерного излучения без дополнительных энергетических затрат на обеспечение их питания. Такие лазеры могут найти широкое применение во всех автономных системах, исключающих возможность дополнительных энергозатрат и работающих в условиях экономии потребляемой электрической энергии.

К настоящему времени существует большое количество практических и теоретических работ [3–9], посвящённых решению вопроса о повышении амплитуды лазерного импульса и направленных на реализацию следующих групп способов:

– компрессия лазерных импульсов [3, 4], результатом которой является уменьшение длительности импульса, при этом происходит перераспределение энергии одного лазерного импульса в пределах его длительности и не происходит увеличение энергии импульса;

– применение оптических усилителей [5, 6], в состав которых входят усиливающие активные среды, которые требуют использования собственных систем накачки и дополнительных источников питания соответственно, но при этом происходит увеличение энергии и амплитуды импульса;

– сложение пучков лазерного излучения [7– 9], которое предполагает использование нескольких лазерных источников, при этом не всегда соблюдается синхронное суммирование импульсов лазерного излучения (за исключением когерентных способов), а импульсы, как правило, не идентичны по длительности и амплитуде.

Очевидно, что применение последних двух из указанных способов сопряжено с увеличением энергии питания, которая будет потребляться либо несколькими устройствами накачки в оптических усилителях, либо совокупностью лазерных источников в системах сложения пучков. Кроме того, повышение амплитуды лазерного импульса не всегда допустимо за счёт его компрессии, так как уменьшение длительности импульса может привести к изменению механизма воздействия излучения на объект для силовых лазерных установок или изменению точностных характеристик лазерных устройств мониторинга и, как следствие, нарушению функционирования автономной лазерной системы в целом.

Очевидно, что наилучшим решением в данном случае может стать перераспределение энергии не в пределах одного импульса, как это происходит в случае компрессии импульсов, а в пределах серии N импульсов и её концентрации в одиночном импульсе без изменения его длительности и дополнительного потребления энергии питания. Такой способ повышения амплитуды лазерного импульса был реализован авторами в виде синхронного сложения N импульсов лазерного излучения, формируемых одним источником. При этом был разработан ряд схемных решений [10, 11].

Целью настоящей работы являлось практическое подтверждение возможности сложения лазерных пучков в системах, построенных на основе кольцевой линии задержки.

#### Экспериментальная установка

Одной из наиболее простых в плане практической реализации стала схема с так называемой кольцевой волоконно-оптической линией задержки [11], так как в ней, в отличие от систем [10], не требуется применение множества волоконно-оптических линий задержки, длины которых должны точно подгоняться для обеспечения синхронного сложения лазерных пучков. Авторами изготовлена экспериментальная установка, которая по своему конструктивному исполнению соответствует варианту системы с одиночной волоконной линией кольцевой оптической задержки, формируемой на основе волоконно-оптического сумматора  $2 \times 1$  (далее – BOC  $2 \times 1$ ) и волоконно-оптического коммутатора 1×2 (далее – ВОК 1×2).

Следует отметить, что максимальная длительность суммарного импульса, φopмируемого на выходе из таких систем, будет связана с оптической длиной пути излучения в «кольце» задержки и при типичных дливолоконных световодов BOK 1×2 нах И ВОС 2×1 порядка 1 м составит не более 10 нс. Это свидетельствует о необходимости применения в составе системы дорогостоящих электрооптических ВОК 1×2 с временами переключения порядка единиц наносекунд. Однако доступные для изготовления установки электромеханические ВОК 1×2 не обладали таким быстродействием (минимальное время переключения, применяемого В установке ВОК 1×2, не более 3 мс) и, следовательно, не могли обеспечить вывод таких коротких лазерных импульсов. Поэтому разработанная экспериментальная установка предназначена только для подтверждения возможности сложения пучков в кольцевой линии задержки.

Схема разработанной установки представлена на рисунке 1. Установка действует образом. Основной лазерный следующим источник с волоконным выходом 1 соединён с входом А ВОС 2×12, через который сформированный лазером исходный пучок излучения вводится в кольцевую волоконно-оптическую линию задержки. При этом BOC 2×1, в отличие от исходного конструктивного исполнения исследуемой системы, подключается к входу ВОК 1×24 не напрямую, а через волоконный сплиттер 1×23. Сплиттер выполняет В установке функцию светоделительного элемента и разделяет пучок, поступивший на его вход, в соотношении 95:5. Причём 5 % энергии пучка, вошедшего отводится через выход сплиттер, Α. в а оставшаяся доля энергии остаётся в рабочей части установки. Выход В сплиттера подключён к входу ВОК 1×2, при этом поступивший в волоконное «кольцо» лазерный пучок через выход A BOK 1×2 проходит на вход BВОС 2×1 и продолжает распространяться в кольцевой задержке при подаче на ВОК 1×2 сигнала высокого логического уровня с блока управления 6. Таким способом обеспечивается циркуляция наложенных друг на друга лазерных пучков в кольцевом элементе задержки и их сложение с каждым следующим исходным лазерным пучком, введённым через первый вход ВОС 2×1. Процесс накопления энергии излучения идет до тех пор, пока суммарный пучок в «кольце» не будет выведен через выход В ВОК 1×2 при переключении коммутатора по сигналу низкого логического уровня с блока управления 6.

При выполнении измерений с помощью осциллографа излучение, отводимое через выход А сплиттера 3, поступает на первое фотоприёмное устройство с волоконным входом (далее – ФПУ-1) 5. При этом ФПУ-1 преобразует оптическое излучение в электрический сигнал, который поступает на осциллограф для его измерения и последующего анализа. Причём при переключении ВОК 1×2 на вывод излучения наружу из установки через его выход В ФПУ-1 позволит зарегистрировать сигнал, пропорциональный мощности излучения исходного пучка (далее – сигнал вывода). Вместе с тем переключение ВОК 1×2 на циркуляцию излучения в волоконном «кольце» через его выход А обеспечит регистрацию ФПУ-1 сигнала, пропорционального мощности суммарного пучка (далее - сигнал циркуляции). Для снижения влияния температурного дрейфа ФПУ-1 в состав установки добавлено второе фотоприёмное устройство с волоконным входом (далее – ФПУ-2) 7, включённое электрическую схему встречно ФПУ-1. В ФПУ-2 Ha оптический вход поступает непрерывное излучение опорного лазера 8. Для лучшей термокомпенсации ФПУ-1 и ФПУ-2 должны располагаться рядом. Аналогично, лазеры 1 и 8 также размещались рядом. Для уменьшения уровня электромагнитных помех измерения выполнялись с помощью дифференциального пробника. Таким образом, сигнал  $U_m$ , регистрируемый от ФПУ-1 и ФПУ-2 с помощью осциллографа (далее – регистрируемый сигнал), представляет собой разность сигнала  $U_r$ , формируемого ФПУ-2 (далее – опорный сигнал), и сигнала  $U_o$ , формируемого ФПУ-1 (далее – основной сигнал):

$$U_m = U_r - U_o. \tag{1}$$

Поэтому в дальнейшем при обработке осциллограмм следует учитывать, что получаемые сигналы вывода и циркуляции будут в итоге инвертированы относительно основных сигналов, формируемых ФПУ-1.



Рисунок 1 – Схема экспериментальной установки: 1 – основной лазерный источник; 2 – 2×1 волоконнооптический сумматор; 3 – волоконный сплиттер 95:5; 4 – 1×2 волоконно-оптический коммутатор; 5 – первое фотоприёмное устройство; 6 – блок управления; 7 – второе фотоприёмное устройство; 8 – опорный лазерный источник

**Figure 1** – Schematic diagram of the experimental setup: 1 – main laser source;  $2 - 2 \times 1$  fiber-optic combiner; 3 -fiber-optic splitter 95:5;  $4 - 1 \times 2$  fiber-optic switch; 5 -first photodetector; 6 -control circuit; 7 -second photodetector; 8 -reference laser source

Непосредственное измерение мощности лазерного излучения осуществлялось с помощью волоконно-оптического мультиметра (далее -ВОМ), который оптически подключался к выходу А сплиттера 3 вместо ФПУ-1 с помощью коннектора FC/UPC. Причём при переключении BOK 1×2 на вывод излучения наружу из установки через его выход В с помощью ВОМ будет измерена мощность, соответствующая доле мощности излучения исходного пучка (далее – мощность вывода). Вместе с тем переключение ВОК 1×2 на циркуляцию излучения в волоконном «кольце» через его выход А обеспечит измерение с помощью ВОМ мощности, соответствующей доле мощности суммарного пучка (далее - мощность циркуляции). Сравнение результатов измерений, полученных с помощью ВОМ, в виде мощностей вывода и циркуляции позволит количественно оценить возможность сложения лазерных пучков в кольцевой волоконно-оптической линии задержки.

В качестве основного лазера 1 и опорного лазера 8 используются лазерные диоды с одномодовым волоконным выходом *LSDLD*155-4-*S*. способные генерировать импульсное непрерывное или излучение. Роль ВОС 2×1 2 выполняет сплиттер 50:50 FBT-MM-62.5/125-5050, развёрнутый так, что излучение вводится через его два многомодовых волоконных выхода, а выводится через многомодовый волоконный вход. В качестве волоконного сплиттера 3 в установке применялся сплиттер 95:5 FBT-MM-62.5/125-0595. В роли ВОК 1×2 4 выступал электромеханический ВОК с поворотным микрозеркалом FSW-2-L-15-90-10-FA. Приём излучения осуществляется с помощью ФПУ-1 5 и ФПУ-2 7, в качестве которых используются InGaAs фотодиоды с одномодовым волоконным входом BLPD-PFA1-60BR. Блок управления 6 реализован на основе электронного ключа ADG736, контролируемого одноплатным компьютером Raspberry Pi Zero. С помощью этих компонент осуществлялась подача напряжений высокого и низкого уровней на электрический вход ВОК 1×2, чтобы обеспечить его переключение между выходами А и В.

Несмотря на полностью волоконное исполнение установки, внешнее фоновое оптическое излучение естественных и искусственных источников света проникает в кварцевый волоконный световод (далее –

ВС), рассеиваясь на его защитной полимерной оболочке. Помимо этого, изменение температуры ВС, происходящее из-за изменения температуры окружающего воздуха и нагрева под действием падающих на ВС солнечных лучей, приводит к случайному изменедлины BC компонент установки. нию Следствием всего этого становятся искажение и случайные колебания оптических сигналов циркуляции и вывода и, как следствие, измеряемого с помощью осциллографа электрического сигнала. Чтобы снизить влияние данных факторов на ВС, экспериментальная установка при выполнении измерений помещалась в оптическую камеру, представлявшую собой помещение с гладкими чёрными стенками, в котором исключалось распространение внешнего фонового излучения.

Для качественной оценки возможности сложения лазерных пучков в системе с кольцевой линией оптической задержки осуществлялись измерения регистрируемого сигнала  $U_m$  и сигнала переключения  $U_s$ , поступающего с блока управления на ВОК 1×2. Для этого применялся цифровой четырёхканальный цифровой осциллограф *MSO*64. При этом одновременно на первом канале осциллограф а регистрировался сигнал  $U_m$ , а на втором – сигнал  $U_s$ . Это необходимо для определения на осциллограмме временных участков,



соответствующих оптическим сигналам цир-куляции и вывода.

Для количественной оценки возможности сложения лазерных пучков в исследуемой системе с волоконным «кольцом» осуществлялись измерения мощности лазерного излучения. Для этого применялся *BOM FF*-3217*A*.

#### Результаты и обсуждение

Выполненные с помощью осциллографа измерения позволяют качественно оценить возможность сложения лазерных пучков в системах с кольцевой волоконной линией задержки. Это было обеспечено за счёт регистрации временных зависимостей сигналов  $U_s(t)$  (рисунок 2, зависимость 3) и  $U_m(t)$  (рисунок 2, зависимость 4) в виде осциллограмм при интервалах переключения между сигналами циркуляции и вывода 5 мс (рисунок 2*a*) и 50 мс (рисунок 2*b*).

Установленная цена деления горизонтальной развёртки составила 10 мс (рисунок 2*a*) и 100 мс (рисунок 2*b*), вертикальной развёртки первого канала — 0,5 В и вертикальной развёртки второго канала — 20 мВ. При этом во время проведения измерений с помощью программы управления задавался период переключения между выходами ВОК 1×2 10 мс и 100 мс.



**Рисунок 2** – Снимок экрана осциллографа при интервалах переключения 5 мс (*a*) и 50 мс (*b*): 1 – временной участок сигнала вывода  $U_{m1}$ ; 2 – временной участок сигнала циркуляции  $U_{m2}$ ; 3 – сигнал переключения  $U_s(t)$ ; 4 – регистрируемый сигнал  $U_m(t)$ 

**Figure 2** – Oscilloscope screenshot for switch times 5 ms (*a*) and 50 ms (*b*): 1 – temporal section of output signal  $U_{m1}$ ; 2 – temporal section of circulation signal  $U_{m2}$ ; 3 – switch signal  $U_s(t)$ ; 4 – registered signal  $U_m(t)$ 

В пределах временного участка 1 на ВОК  $1 \times 2$  подаётся сигнал  $U_s(t)$  низкого логического уровня, это свидетельствует о том, что ВОК  $1 \times 2$  переключён на волоконный выход *B*, а на ФПУ-1 поступает оптический сигнал вывода, т. е. сложения лазерных пучков в волоконном «кольце» установки не происходит. При этом на первом канале осциллографа регистрируется сигнал величиной  $U_m = U_{m1}$ . На временном участке 2 можно заметить, что на электрический вход ВОК 1×2 поступило управляющее напряжение U<sub>s</sub> высокого уровня, а значит, ВОК 1×2 переключился на волоконный выход А, соединённый с входом В ВОС 2×1. При этом на первом канале осциллографа регистрируется сигнал величиной  $U_m = U_{m2}$ .

С учётом того, что основной сигнал U<sub>a</sub>, формируемый ФПУ-1, инвертирован относительно сигнала U<sub>m</sub>, регистрируемого осциллографом, справедливым будет утверждение, что основной сигнал циркуляции (участок 2 на рисунке 2) превышает основной сигнал вывода (участок 1 на рисунке 2):  $U_{o2} > U_{o1}$ . Известно, что величина электрического сигнала U<sub>a</sub>, сформированного фотодиодом, прямо пропорциональна мощности Р поступающего на него оптического излучения. Таким образом, приведённые осциллограммы наглядно демонстрируют превышение мощности циркуляции над мощностью вывода, что в свою очередь свидетельствует о сложении лазерных пучков в кольцевой линии задержки разработанной системы.

Помимо этого, были проведены измерения в эксплуатационных условиях на установке, извлечённой из оптической камеры, т. е. в условиях воздействия на её компоненты излучения внешних естественных и искусственных источников света и при отсутствии термостабилизации. При этом получен ряд осциллограмм (рисунок 3).

По осциллограммам на рисунке 3 видно, что в эксплуатационных условиях регистрируемый сигнал  $U_m(t)$  становится нестабильным, причём его изменение происходит главным образом на временных участках 2, соответствующих сигналу циркуляции  $U_{m2}$ . Для наглядности приведены осциллограммы сигнала  $U_m(t)$  для разных случаев. На рисунке 3*a* видно, что сигнал  $U_m(t)$  изменяется от времени с сигналом  $U_s(t)$  так же, как на рисунке 2, что

свидетельствует о сложении лазерных пучков в кольцевой линии задержки для этого случая. Однако на рисунке 3b можно заметить, что величина сигнала  $U_{m2}$  на участке 2 существенно изменилась по сравнению с предыдущим случаем (рисунок 3a) так, что стало выполняться неравенство  $U_{m2} > U_{m1}$ , а это, в свою очередь, говорит об уменьшении основного сигнала циркуляции относительно основного сигнала вывода  $U_{o2} < U_{o1}$  и, как следствие, отсутствии сложения лазерных пучков в этом случае. На временном участке 5 последней осциллограммы (рисунок 3c) можно увидеть переход от случая, показанного на рисунке 3b, к случаю со сложением пучков (рисунок 3a).

Такое нестабильное развитие сигнала  $U_m(t)$ в эксплуатационных условиях подтверждает необходимость размещения волоконнооптических компонент внутри защитного светонепроницаемого корпуса при изготовлении в дальнейшем прототипов системы сложения лазерных пучков на кольцевой линии задержки.

Ранее в [11] авторами было показано, что энергетическая эффективность системы С кольцевой волоконной задержкой не нарастает бесконечно с увеличением числа циркуляций в ней, а стремится к некоторому предельному значению  $\eta_L$ , которое зависит от величины потерь в системе. Причём в схеме с ВОС 2×1 и ВОК 1×2 это значение достигалось уже при числе циркуляций N от 25 до 34. С учётом того, что длина кольцевого волоконного участка экспериментальной установке составляет В не менее 6 м, можно достоверно сказать, что предельное значение η<sub>L</sub> будет достигнуто в эксперименте за время не менее 0,1 мкс. Принимая во внимание, что ВОК 1×2, применяемый в составе установки, имеет время переключения не меньше 3 мс, можно уверенно утверждать, что в системе в процессе циркуляции будет всегда формироваться излучение с предельной мощностью P<sub>N</sub>, которая может быть зарегистрирована с помощью ВОМ.

Для количественной оценки в изготовленной установке, собранной по схеме на рисунке 1, осуществлялись прямые измерения мощностей циркуляции  $P_c$  и вывода  $P_{ex}$ , формируемых на выходе A сплиттера, при условии, что мощность вводимого в систему излучения от лазера 1  $P_0$  изменялась. Авторами было выполнено по 6 измерений мощностей  $P_c$  и  $P_{ex}$  при  $P_0$ , установленной в пределах от 2 до 4,5 мВт с шагом 0,5 мВт. Данные результаты сопоставлены в графическом виде на рисунке 4,

для приведённых точек измерений выполнена аппроксимация функциями  $P_c(P_0)$  и  $P_{ex}(P_0)$ , демонстрирующими ожидаемую линейную зависимость измеренных мощностей.



**Рисунок 3** – Снимок экрана осциллографа, полученный для установки в эксплуатационных условиях, при наличии сложения лазерных пучков в кольцевой линии задержки (*a*), при отсутствии этого сложения (*b*) и при возникновении этого сложения (*c*): 1 – временной участок сигнала вывода  $U_{m1}$ ; 2 – временной участок сигнала циркуляции  $U_{m2}$ ; 3 – сигнал переключения  $U_s(t)$ ; 4 – регистрируемый сигнал  $U_m(t)$ ; 5 – временной участок уменьшения сигнала циркуляции  $U_{m2}$  и возникновения сложения лазерных пучков

**Figure 3** – Oscilloscope screenshot, obtained for setup in operation conditions, with the presence of laser beam combining in the ring delay line (a), without this combining (b) and in case when this combining begins (c): 1 – temporal section of output signal  $U_{m1}$ ; 2 – temporal section of circulation signal  $U_{m2}$ ; 3 – switch signal  $U_s(t)$ ; 4 – registered signal  $U_m(t)$ ; 5 – temporal section of the decrease in the circulation signal  $U_{m2}$  and the onset of laser beam combining

Как расположение точек, соответствующих мощности  $P_c$ , выше точек  $P_{ex}$ , так и увеличение угла наклона линейной характеристики  $P_c(P_0)$  относительно зависимости  $P_{ex}(P_0)$  на рисунке 4 также свидетельствуют о наличии процесса сложения лазерных пучков в кольцевой линии задержки. Причём результаты прямых измерений показали, что мощность циркуляции  $P_c$ , пропорциональная предельной

мощности суммарного пучка  $P_N$ , больше мощности вывода  $P_{ex}$ , пропорциональной мощности исходного пучка, в 1.05...1.11 раз. Величина этого увеличения, называемого также предельным коэффициентом энергетической эффективности системы синхронного сложения, ранее в [11] достигала 2 по результатам моделирования подобной системы.



**Рисунок 4** – Измеренные мощности циркуляции  $P_c$ и мощности вывода  $P_{ex}$  в зависимости от выходной мощности лазерного источника  $P_0$ 

**Figure 4** – Measured circulation power  $P_c$  and output power  $P_{ex}$  depended on the output power of laser source  $P_0$ 

Такое отличие расчётного коэффициента от полученного на практике свидетельствует о необходимости дальнейшего совершенствования установки, которое должно пойти по нескольким путям. Среди них следует выделить: применение волоконно-оптических устройств и ВС высокого качества с меньшим коэффициентом внутренних потерь; использование коннекторов с улучшенной обработкой торцов заделанных в них ВС, обеспечивающей более высокий коэффициент передачи излучения между ВС; совершенствование компоновочной схемы, в которой при размещении компонент установки будет существенно уменьшено число участков с перегибом ВС, а также увеличен радиус сгиба ВС на таких участках.

#### Заключение

Представлена экспериментальная установка, реализующая действие разработанной авторами схемы синхронного сложения лазерных пучков в кольцевой волоконной линии задержки и предназначенная для демонстрации этого сложения. Путём сравнения измеренных мощности излучения, распространяющегося внутри кольцевой линии задержки установки, и мощности излучения, выводимого без циркуляции в ней, подтверждён факт сложения лазерных пучков в такой системе.

Измерения в эксплуатационных условиях продемонстрировали существенную нестабильность сигнала циркуляции и подтвердили необходимость размещения волоконнооптических компонент системы синхронного сложения пучков в закрытом светонепроницаемом корпусе.

Показано, что возрастание мощности излучения, которое зависит от уровня оптических потерь в элементах установки, при его циркуляции в линии задержки происходит в 1.05...1.11 раз. А это, в свою очередь, свидетельствует о возможности создания на практике устройств с синхронным сложением лазерных пучков, как на одиночной кольцевой волоконной линии задержки, так и на множестве линий задержки, которые могут быть использованы для повышения энергетической эффективности автономных лазерных систем.

Следует отметить, что указанные выше результаты достигнуты с применением стандартных серийно изготавливаемых волоконнооптических компонент и устройств, используемых в сетях связи, без внедрения в изготовленную установку специальных волоконнооптических узлов с пониженным уровнем оптических потерь. Кроме того, непосредственное сложение лазерных пучков и их ввод в волоконное «кольцо» в установке осуществлялись с помощью обычного сплиттера, развёрнутого в обратную сторону по ходу распространения пучка. Все это говорит об открывающихся перспективах дальнейшего увеличения на практике энергетической эффективности и, как следствие, мощности циркуляции за счёт применения компонент с улучшенными характеристиками и снижения потерь в данной системе.

Авторами планируется доработка cyществующей установки путём замены электромеханического ВОК 1×2 на электрооптический ВОК 1×2 с высоким быстродействием и проведение с помощью неё измерений коэффициента энергетической эффективности системы синхронного сложения, построенной на основе волоконного «кольца». Вместе с тем, такая доработка даёт также возможность создания прототипа лазерного источника, в котором повышение энергетической эффективности происходит без увеличения потребляемого им электропитания.

#### Список использованных источников

1. *Агеев Б.Г.* Лазерный двухканальный газоанализатор/Б.Г. Агеев, А.Н. Грицута, А.В. Климкин [и др.] // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 10. – С. 956–959. **DOI:** 10.1070/QEL16438

2. *Кульчин Ю.Н.* Фотонные методы и технологии мониторинга океана и атмосферы / Ю.Н. Кульчин, С.С. Вознесенский, Е.Л. Гамаюнов [и др.] // Квантовая электроника. – 2020. – Т. 50. – № 5. – С. 475–488. **DOI:** 10.1070/QEL17222

3. Хазанов Е.А. Нелинейное сжатие сверхмощных лазерных импульсов: компрессия после компрессора / Е.А. Хазанов, С.Ю. Миронов, Ж. Муру // Успехи физических наук. – 2019. – Т. 189. – № 11. – С. 1173–1200. **DOI:** 10.3367/UFNr.2019.05.038564

4. Хазанов Е.А. Повышение временного контраста и мощности фемтосекундных лазерных импульсов с помощью оптического клина с кубической нелинейностью / Е.А. Хазанов // Квантовая электроника. – 2021. – Т. 51. – № 5. – С. 433–436. **DOI:** 10.1070/QEL17551

5. *Goldberg L.* High-power, near-diffraction-limited large-area traveling-wave semiconductor amplifiers / L. Goldberg, D. Mehuys, M.R. Surette, D.C. Hall // IEEE Journal of Quantum Electronics, 1993, vol. 29, no. 6, pp. 2028–2043. **DOI:** 10.1109/3.234466

6. *Webb B*. Divided-pulse amplification to the joule level / B. Webb, A. Azim, N. Bodnar, M. Chini, L. Shah, M. Richardson // Optics Letters, 2016, vol. 41, no. 13, pp. 3106–3109. **DOI:** 10.1364/OL.41.003106

7. Sprangle P. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications / P. Sprangle, A. Ting, J. Penano, R. Fischer, B. Hafizi // IEEE Journal of Quantum Electronics, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 138–148.

**DOI:** 10.1109/JQE.2008.2002501

8. *Трикшев А.И.* Фазировка двух усилительных каналов при когерентном сложении лазерных пуч-ков суммарной мощностью 60 Вт / А.И. Трикшев, Ю.Н. Пырков, В.Б. Цветков // Квантовая электроника. – 2017. – Т. 47. – № 11. – С. 1045–1048. **DOI:** 10.1070/QEL16433

9. Brignon A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.

10. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности источника импульсного лазерного излучения с применением оптических линий задержки / В.А. Алексеев, А.С. Перминов, С.И. Юран // Оптический журнал. – 2018. – Т. 85. – № 12. – С. 8–14. **DOI:** 10.17586/1023-5086-2018-85-12-08-14

11. Алексеев В.А. Повышение пиковой мощности импульсного источника лазерного излучения с применением кольцевой волоконной линии задержки / В.А. Алексеев, М.Р. Зарипов, А.С. Перминов [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2019. – Т. 10. – № 2. – С. 151–159.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

#### References

1. Ageev B.G., Gritsuta A.N., Klimkin A.V., Kuryak A.N., Osipov K.Yu., Ponomarev Yu.N., Simonova G.V. Laser two-channel gas analyser. *Quantum Electronics*, 2017, vol. 47, no. 10, pp. 956–959.

**DOI:** 10.1070/QEL16438

2. Kulchin Y.N., Voznesensky S.S., Gamayunov E.L., Golik S.S., Ilyin A.A., Kamenev O.T., Nikitin A.I., Pavlov A.N., Popik A.Yu., Romashko R.V., Subbotin E.P. Photonic methods and technologies for monitoring the ocean and atmosphere. *Quantum Electronics*, 2020, vol. 50, no. 5, pp. 475–488. **DOI:** 10.1070/QEL17222

3. Khazanov E.A., Mironov S.Y., Mourou G.A. Nonlinear compression of high-power laser pulses: compression after compressor approach. *Uspekhi fizicheskih nauk* [Physics-Uspekhi], 2019, vol. 62, no. 11, pp. 1096– 1124 (in Russian). **DOI:** 10.3367/ufne.2019.05.038564

4. Khazanov E.A. Enhancing the time contrast and power of femtosecond laser pulses by an optical wedge with cubic nonlinearity. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2021, vol. 51, no. 5, pp. 433–436 (in russian). **DOI:** 10.1070/QEL17551

5. Goldberg L., Mehuys D., Surette M.R., Hall D.C. High-power, near-diffraction-limited large-area travelingwave semiconductor amplifiers. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 1993, vol. 29, no. 6, pp. 2028–2043. **DOI:** 10.1109/3.234466

6. Webb B., Azim A., Bodnar N., Chini M., Shah L., Richardson M. Divided-pulse amplification to the joule level. *Optics Letters*, 2016, vol. 41, no. 13, pp. 3106–3109. **DOI:** 10.1364/OL.41.003106

7. Sprangle P., Ting A., Penano J., Fischer R., Hafizi B. Incoherent Combining and Atmospheric Propagation of High-Power Fiber Lasers for Directed-Energy Applications. *IEEE Journal of Quantum Electronics*, 2009, vol. 45, no. 2, pp. 138–148.

**DOI:** 10.1109/JQE.2008.2002501

8. Trikshev A.I., Pyrkov Y.N., Tsvetkov V.B. Phasing of two amplifier channels for the coherent combining of laser beams with a total power of 60 W. *Kvantovaya elektronika* [Quantum Electronics], 2017, vol. 47, no. 11, pp. 1045–1048. **DOI:** 10.1070/QEL16433

9. Brignon A. Coherent laser beam combining. Weinheim: Wiley-VCH, 2013, 509 p.

10. Alekseev V.A., Perminov A.S., Yuran S.I. Increasing the peak power of a pulsed laser source using optical delay lines. *J. Opt. Technol.*, 2018, vol. 85, no. 12, pp. 746–751. **DOI:** 10.1364/JOT.85.000746

11. Alekseev V.A., Zaripov M.R., Perminov A.S., Sitnikova E.A., Usol'tsev V.P., Yuran S.I. Increasing of Pulsed Laser Source Peak Power by Use of Ring Fiber-Optic Delay Line. *Devices and Methods of Measurements*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 151–159 (In Russian). **DOI:** 10.21122/2220-9506-2019-10-2-151-159

53

# Расчёт параметров призменного дефлектора лазерного сканера

#### И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов

Удмуртский федеральный исследовательский центр Уральского отделения Российской академии наук, ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия

Поступила 11.02.2022 Принята к печати 12.01.2023

Призменный дефлектор, представляющий собой многогранную призму с отражающими гранями, является наиболее распространённым сканирующим элементом, который позволяет производить быстрое заполнение широкой области сканирования импульсами лазерного излучения по одной координате. Параметры призменного дефлектора связаны с характеристиками лазерного излучения, параметрами сканируемой области и положением дефлектора, а также ограничены различными факторами, например, требованиями безопасности или временем сканирования. Целью работы являлся анализ взаимосвязи параметров сканирующей системы (таких как угол подачи излучения на грань призменного дефлектора, диаметр лазерного пучка) с конструктивными параметрами её сканирующего элемента – призменного дефлектора.

Рассмотрен вариант расчёта частоты следования лазерных импульсов через количество лазерных пятен и их коэффициент перекрытия. Предложен метод расчёта характеристик призменного дефлектора, исходя из внешних параметров, таких как угол подачи излучения на грань и ширины гауссова пучка на выходе из оптической системы с размерами, безопасными для человеческого глаза. Приведены параметры призменных дефлекторов в зависимости от числа отражающих граней. Показана зависимость размера дефлектора от угла подачи излучения на отражающую грань.

При проектировании призменного дефлектора лазерного сканера, предназначенного для заполнения некоторой области сканирования с требуемым угловым размером  $\sigma$ , варьируя такие параметры как количество граней *m* и угол подачи  $\alpha$ , можно добиться оптимальных для поставленной задачи характеристик дефлектора и режима сканирования.

Ключевые слова: лазерное сканирование, сканер, призменный дефлектор, сканирующая система.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гусаров И.Е.	Gusarov I.E.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия	Academy of Sciences,
e-mail: gusarovie@udman.ru	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
	e-mail: gusarovie@udman.ru
Для цитирования:	For citation:
И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов.	I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov.
Расчёт параметров призменного дефлектора лазерного сканера.	[Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 54–61.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 54-61 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61	<b>DOI:</b> 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

# **Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner**

#### I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov

*Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia* 

Received 11.02.2022 Accepted for publication 12.01.2023

#### Abstract

The prism deflector which is a multifaceted prism with reflective facets is the most common scanning element that allows to quickly fill a wide scanning area with laser radiation pulses along one coordinate. The parameters of a prismatic deflector are related to the characteristics of the laser radiation of the scanned area parameters and of the deflector position, and are also limited by various factors, such as safety requirements or scanning time. The aim of this work was to analyze the relationship between the external operating conditions of a laser scanning system and the internal design parameters of a prism deflector.

A variant of calculating of laser pulses frequency by the number of spots and their overlap coefficient is considered. A method for calculating of a prism deflector characteristics based on external parameters, such as the angle of incidence of radiation to the facet and the width of the Gaussian beam with dimensions that are safe for a human eye is proposed. Prismatic deflectors parameters are proposed depending on the number of reflecting facets. Dependence of a deflector size on the angle of radiation incidence to the reflecting face is shown.

When designing a prismatic deflector of a laser scanner used to fill a certain scanning area with the required angular size  $\sigma$  by varying such parameters as the number of faces *m* and the feed angle  $\alpha$  it is possible to achieve optimal deflector characteristics and scanning mode for the task.

Keywords: laser scanning, scanner, prismatic deflector, scanning system.

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-54-61

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гусаров И.Е.	Gusarov I.E.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия	Academy of Sciences,
e-mail: gusarovie@udman.ru	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
	e-mail: gusarovie@udman.ru
Для цитирования:	For citation:
И.Е. Гусаров, А.И. Калугин, М.Ю. Альес, Е.А. Антонов.	I.E. Gusarov, A.I. Kalugin, M.Yu. Alyes, E.A. Antonov.
Расчёт параметров призменного дефлектора лазерного сканера.	[Calculation of Parameters of Prism Deflector for Laser Scanner].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 1. – C. 54–61.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 54-61 (in Russian).

#### Введение

Лазерное сканирование широко применяется для решения самых разных задач в промышленности, архитектуре, медицине, геодетранспорте [1-4]. Ключевой зии, проблемой лазерного сканирования является последовательное зондирование сканируемого пространства с заданными угловыми размерами импульсным лазерным излучением. Данный вопрос подробно рассмотрен в работе [5]. В зависимости от внешних условий к лазерным сканерам предъявляются разные требования. В связи с этим существует много видов сканеров с различным принципом действия: отражательные (с осциллирующим или вращаюдефлектором), щимся преломляющие, голографические, акусто- и электрооптические [6, 7]. Каждый видов сканеров ИЗ обладает определёнными достоинствами и недостатками. Одним из самых распространённых оптомеханических элементов являетпризменный (полигональный) дефлек-СЯ тор (ПД), с помощью которого осуществляется заполнение сканируемого пространства по одной координате. Его преимуществами являются быстрота и возможность сканирования широких полей.

дефлектор Призменный представляет собой вращающуюся многогранную призму с отражающими гранями, выполненную из стекла, металла или пластика с технологическим отверстием для крепления элемента на ось вращения. В большинстве работ анализ параметров ПД производился при условии падения коллимированного лазерного пучка с заданным диаметром в заданную точку грани ПД [8-10]. В работе [11] предложен усовершенствованный метод расчёта ПД с учётом расходимости пучка. В работе [12] показано, ЧТО при произвольном выборе места падения пучка на грань возникает проблема обратного отражения части пучка. Для исправления этого недостатка необходимо ограничить диапазон возможных положений коллимирующего объектива относительно ПД. Но при этом увеличивается та часть грани ПД, которая оказывается не используемой.

Еще одной проблемой является однородность распределения пятен по сканируемому полю. Как показано в работах [13, 14], распределение лазерных пятен в плоскости сканирования оказывается неравномерным. Более того, форма поперечного сечения пучка также претерпевает изменения. Частично эта проблема решается применением специальных объективов с F-Theta линзами, но только на малых расстояниях. Кроме того, при сканировании двумерного поля требуется синхронизация времени испускания импульсов с вращением ПД, чтобы совпадало положение первых пятен каждой строки [15]. Таким образом, параметры ПД оказываются связаны с характеристиками лазерного излучения (диаметр пучка, частота импульсов, угол подачи излучения), положением и угловым размером сканируемого поля. Однако не учтено, что сами эти параметры могут быть ограничены различными факторами, например, требованиями безопасности лазерного излучения при сканировании в открытом пространстве (геодезия, архитектура, транспорт, экология и др.) или временем сканирования (системы сканирования в режиме реального времени). Подобные ограничения требуют нахождения оптимальных значений параметров ПД.

Целью настоящей работы являлся анализ взаимосвязи параметров сканирующей системы (таких как угол подачи излучения на грань ПД, диаметр лазерного пучка) с конструктивными параметрами её сканирующего элемента – призменного дефлектора.

#### Параметры призменного дефлектора

Основными параметрами ПД являются количество отражающих граней т, относительная длительность цикла или коэффициент полезного использования грани С [6, 7], угол подачи лазерного излучения на грань α, расстояние от центра отражающей грани до точки подачи излучения s, радиус вписанной окружности R и ширина грани h (рисунок 1). К внешним условиям можно отнести требуемый угол сканирования σ, энергетический диаметр пучка D (под энергетическим радиусом пучка w = D/2 будем понимать расстояние от оси пучка до точки, в которой интенсивность пучка падает в е раз), качество сканирования пространства, определяемое степенью полнения пространства лазерными пятнами, расстояние до зондируемого пространства *l*, время построения отдельной строки t<sub>1</sub>.



Рисунок 1 – Схема работы сканера с призменным дефлектором: 1 – лазер; 2 – призменный дефлектор в начальном и 3 – в конечном положениях (*a*); призменный дефлектор (вид сбоку) (*b*)

**Figure 1** – Scheme of operation of the scanner with prismatic deflector: 1 - laser; 2 - prismatic deflector in the initial position; 3 - prismatic deflector in the final position (*a*); prismatic deflector (side view) (*b*)

При лазерном зондировании важную роль играет распределение лазерных импульсов в пространстве. От этого распределения зависит качество и быстрота сканирования. Очевидно, что при увеличении числа импульсов и плотности их расположения возрастает степень детализации зондируемого пространства, но также это приводит к росту частоты испускания импульсов и повышению требований к точности изготовления сканирующих элементов. Степень заполнения пространства можно оценить с помощью коэффициента перекрытия пятен η. Под коэффициентом перекрытия лазерных пятен будем понимать отношение длины перекрытия х двух соседних пятен к диаметру лазерного пятна в плоскости сканирования  $D_1$  (рисунок 2):

$$\eta = \frac{x}{D_l}.$$

В случае отсутствия перекрытия расстояние *x* становится отрицательным. При увеличении длины перекрытия лазерных пятен и, как следствие, коэффициента перекрытия η, уменьшается площадь слепой зоны и повышается качество сканирования.



**Рисунок 2** – Варианты перекрытия лазерных пятен: *а* – касающиеся пятна; *b* – пятна лазерного излучения без перекрытия; *с* – пятна лазерного излучения с перекрытием

Figure 2 – Options for overlapping laser spots: a – touching spots; b – laser spots without overlap; c – laser spots with overlap

Полное число лазерных импульсов для построения строки равно:

$$N = \frac{l\sigma}{D_l(1-\eta)},$$

а частота следования импульсов:

$$\mathbf{v} = \frac{N}{t_l}.$$

Диаметр лазерного пучка D на выходе из сканирующей системы может значительно отличаться от  $D_l$ , особенно при больших

расстояниях *l*. Чаще всего внутри лазерного сканирующего устройства применяется гауссов пучок в ближней зоне. Тогда вне устройства на малых расстояниях зондирования расходимостью пучка можно пренебречь и считать диаметр пучка равным его диаметру на выходе из оптической системы. Так как расходимость лазерного пучка, как правило, очень мала, то наиболее опасной с точки зрения лазерной безопасности следует считать область вблизи лазерной установки, так как диаметр пучка данном В случае является наименьшим,

а плотность мощности излучения наибольшей. Поэтому минимально допустимый размер ширины пучка w ограничивается требованиями безопасного воздействия лазерного излучения на человека. Исходя из предельно допустимой мощности лазерного излучения  $P_{\rm max}$  и мощности гауссова пучка, заключённой в некотором радиусе  $R_0$ , равном радиусу облучённого участка, очевидно неравенство:

$$P_{\max} \ge P_{laser} \left( 1 - e^{-\frac{R_0^2}{w^2}} \right), \tag{1}$$

где  $P_{laser}$  – полная мощность пучка.

Так как наиболее сильному воздействию подвержены глаза человека, то в качестве  $R_0$  обычно берётся радиус зрачка глаза. Из соотношения (1) безопасная ширина лазерного пучка определяется как:

$$w \ge R_0 \sqrt{\frac{1}{\ln\left(\frac{P_{laser}}{P_{laser} - P_{max}}\right)}}.$$

Практически ширина грани ПД должна быть больше *w*, так как на краях может происходить дифракция пучка. Если обозначить потери мощности лазерного излучения на краях как δ, то ширину грани можно оценить с помощью соотношения:

$$h = 2w \sqrt{\ln \frac{1}{\delta}}.$$

При вращении ПД возникают положения призмы, когда лазерное пятно частично попадает на две соседние грани, вследствие чего наблюдаются два паразитных явления: обрезание части пучка, отражающегося от рабочей грани, и отражение в обратном направлении части пучка от соседней грани. Для решения проблемы обратного отражения применяются два метода. Как показано в работе [12], можно рассчитать такое начальное положение места падения пучка на грань, что обратно отражённое излучение будет направлено мимо объектива лазера. С другой стороны, можно срезать углы призмы дефлектора или покрыть матовой чёрной краской. В любом случае, происходит уменьшение полезной длины грани. Для учёта этого эффекта вводят коэффициент полезного использования,

который представляет собой отношение полезной длины грани к её полной длине:

$$C = \frac{L_{ef}}{L},$$

где  $L_{ef}$  – полезная длина грани; L – полная длина грани.

Приведённая формула мало применима к реальным расчётам призменного дефлектора. Это связано с тем, что параметр  $L_{ef}$  потребует точного определения, что затрудняется фактом постоянного изменения размера проекции лазерного пучка на отражающую грань ПД и, как следствие, коэффициента перекрытия пятен на грани. Поэтому удобнее связать коэффициент C с числом граней:

$$C = \frac{m\sigma}{4\pi}.$$
 (2)

В то же время, из [6] известно, что минимальная длина грани дефлектора равна:

$$L = \frac{D'}{1 - C},\tag{3}$$

где  $D' = h/\cos \alpha$  — максимальный размер проекции лазерного пятна диаметром *h* на грани ПД.

Зная длину граней и их количество, можно перейти к расчёту радиуса вписанной в ПД окружности *R*:

$$R = \frac{L}{2 \operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{m}\right)}.$$
(4)

Крайнее положение пятна лазерного излучения на грани дефлектора можно определить как:

$$s = RC \operatorname{tg} \frac{\beta}{2},$$

где  $\beta = 2\pi/m$  – угол развёртки грани.

Помимо геометрических характеристик, стоит остановиться на таком параметре, как частота вращения призменного дефлектора вокруг своей оси на вале двигателя. Данную величину можно легко выразить через время построения одной строки:

$$v_p = \frac{1}{mt_l}.$$

Таким образом, исходя из внешних требований к размерам области сканирования и безопасности сканирования, при проектировании призменного дефлектора лазерного сканера однозначно и точно определяются все его конструктивные параметры, кроме числа граней *m*. Однако для данного параметра существует верхняя граница значений, которая следует из выражения (2):

$$m < \frac{4\pi}{\sigma}.$$
 (5)

# Моделирование параметров призменного дефлектора

Рассмотрим влияние на параметры ПД внешних условий сканирования. Расчёты характеристик ПД при угле развёртки строки сканирования  $\sigma = \pi/2$ , угле подачи излучения  $\alpha = \pi/3$ , требуемой ширине грани h = 5 мм и времени построения строки сканирования  $t_l = 1$  с приведены в таблице.

Видно, что при приближении количества граней к максимальному значению увеличивается коэффициент полезного использования грани, но одновременно с этим происходит увеличение габаритных размеров ПД и уменьшение частоты вращения. Коэффициент С определяет также время перехода с одной грани на другую, т. е. время перехода с одной строки сканирования на другую. При больших коэффициентах время перехода значительно сокращается, что может вызывать проблемы с кадровой развёрткой. Помимо этого, исходя из условия (5), следует, что при увеличении угла развёртки кадра уменьшается максимальное количество отражающих граней дефлектора. Также на габаритные размеры дефлектора влияет угол подачи лазерного излучения.

Рост значения угла падения α, как видно из соотношений (3) и (4), приводит к увеличению габаритных размеров дефлектора, что влияет на общую компоновку системы. Зависимость

Результаты расчёта призменных дефлекторов

**Results of calculation of prismatic deflectors** 

величины радиуса вписанной окружности R от угла подачи излучения  $\alpha$  при различных значениях m приведена на рисунке 3. Как видно из графика, при небольших значениях  $\alpha$  габаритные размеры ПД изменяются незначительно. Однако при дальнейшем увеличении угла для дефлекторов с большим количеством граней наблюдается резкое увеличение радиуса вписанной окружности при приближении  $\alpha$  к  $\pi/2$ . С другой стороны, при небольших значениях угла подачи  $\alpha$  выходное окно лазера будет находиться в границах угла развёртки сканирования  $\alpha$ , тем самым мешая построению строки. Следовательно, можно выделить нижнюю и верхнюю границы для значений  $\alpha$ :



**Рисунок 3** – Зависимость радиуса вписанной окружности R от угла подачи излучения  $\alpha$  при различных значениях граней m: 1 - m = 3; 2 - m = 4; 3 - m = 5; 4 - m = 6

**Figure 3** – Dependence of the value of the radius of the inscribed circle *R* on the angle of radiation supply  $\alpha$  for various values of *m*: 1 - m = 3; 2 - m = 4; 3 - m = 5; 4 - m = 6

Таблица /Table

Количество	Коэффициент	Длина грани, мм	Радиус вписанной	Частота вращения
граней	полезного	Face length, mm	окружности, мм	призменного
Number	использования грани		Inscribed circle	дефлектора, Гц
of facets	Coefficient beneficial use of facet		radius, mm	Rotation frequency of prism deflector, Hz
				p,
3	0.375	16	4.62	0.67
4	0.500	20	10	0.50
5	0.625	27	18	0.40
6	0.750	40	35	0.33
7	0.875	80	83	0.29

Таким образом, угол подачи α оказывается заметно ограничен. Особенно сильно это ограничение проявляется для ПД с большим количеством граней.

#### Заключение

Проведён анализ взаимосвязи параметров сканирующего устройства с конструктивными параметрами призменного дефлектора. При проектировании призменного дефлектора лазерного сканера, предназначенного для заполнения некоторой области сканирования с требуемым угловым размером σ, варьируя такие параметры как количество граней *m* и угол подачи α, можно добиться оптимальных для поставленной задачи характеристик дефлектора и режима сканирования.

#### Список использованных источников

1. *Низаметдинов Н.Ф.* Лазерное сканирование и аэрофотосъемка с БПЛА в исследовании структуры лесотундровых древостоев Хибин / Н.Ф. Низаметдинов, П.А. Моисеев, И.Б. Воробьев // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2021. – № 4(382). – С. 9–22.

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

2. Новиков В.В. Воздушное лазерное сканирование на базе БПЛА для изучения объектов археологии в Европейской части России / В.В. Новиков // Поволжская Археология. – 2022. – № 1(39). – С. 232–246.

#### DOI: 10.24852/pa2022.1.39.232.246

3. Калугин А.И. Лазерная локационная система обнаружения и распознавания малоразмерных объектов / А.И. Калугин, М.Р. Зарипов, Е.А. Антонов // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 1. – С. 9–14.

#### DOI: 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14

4. *Singh A*. A comprehensive study of auxiliary arrangements for attaining omniderectionality in additive manufacturing machine tools / A. Singh [et al.] // Journal of manufacturing science and engineering, 2020, vol. 143, pp. 050802-1–050802-17.

DOI: 10.1115/1.4049094

5. *Соломатин В.А.* Пространственно-частотные характеристики лазерных сканеров / В.А. Соломатин // Оптический журнал. – 2020. – Т. 87. – № 4. – С. 19–27. **DOI:** 10.17586/1023-5086-2020-87-04-19-27

6. *Marshall G.F.* Handbook of optical and laser scanning, second edition / G.F. Marshall, G.E. Stutz // Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.

7. *Beiser L.* Unified optical scanning technology / L. Beiser // John Wiley and Sons, 2003, 191 p.

8. *Duma V.-F.* Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT / V.-F. Duma // Proc. SPIE, Design and Quality for Biomedical Technologies X, 14 March 2017, vol. 10056, pp. 100560P-1–100560P-11.

#### **DOI:** 10.1117/12.2251023

9. *Duma V.-F.* Numerical and experimental study of the characteristic functions of polygon scanners / V.-F. Duma, M. Nicolov // Proc. SPIE, Modeling Aspects in Optical Metrology II, 17 June 2009, vol. 7390, pp. 739015-1–739015-9.

#### **DOI:** 10.1117/12.827443

10. *Duma V.-F.* Polygon mirror scanners in biomedical imaging: a review / V.-F. Duma, A.G. Podoleanu // Proc. SPIE, Optical Components and Materials X, 11 March 2013, vol. 8621, pp. 86210V-1–86210V-9. **DOI:** 10.1117/12.2005065

11. *Varughese K*. Flattening the field of postobjective scanners by optimum choice and positioning of polygons / K. Varughese, K. Krishna // Appl. Opt., 1993, vol. 32, pp. 1104–1108. **DOI:** 10.1364/AO.32.001104

12. *Hoang H.-M.* Non-back-reflecting polygon scanner with applications in surface cleaning / H.-M. Hoang // Opt. Express, 2021, vol. 29, pp. 32939–32950.

**DOI:** 10.1364/OE.438850

13. *Li Y*. Asymmetric distribution of the scanned field of a rotating reflective polygon / Y. Li, J. Katz // Appl. Opt., 1997, vol. 36, pp. 342–352.

#### DOI: 10.1364/ AO.36.000342

14. *Артамонов С.И*. Выбор сканера для лазерной локационной системы / С.И. Артамонов [и др.] // Оптический журнал. – 2016. – Т. 83. – № 9. – С. 51–58.

15. *De Loor R*. Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications / R. De Loor // Physics Procedia, 2013, vol. 41, pp. 544– 551. **DOI:** 10.1016/ j.phpro.2013.03.114

#### References

1. Nisametdinow N.F., Moiseev P.A., Vorobiev I.B. [Laser scanning and aerial photography with UAV in studying the structure of forest-tundra stands in the Khibiny Mountains]. *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. Lesnoj zhurnal* [Russian Forestry Journal], 2021, no. 4, pp. 9–22 (in Russian).

DOI: 10.37482/0536-1036-2021-4-9-22

2. Novikov V.V. [UAV lidar investigation archeology sites in European part of Russia]. *Povolzhskaya arheologiya* [The Volga River region archeology], 2022, no. 1, pp. 232–246 (in Russian).

DOI: 10.24852/pa2022.1.39.232.246

3. Kalugin A.I., Zaripov M.R., Antonov E.A. [Laser locator for detection and recognition of small objects]. *Intellektual'nye sistemy v proizvodstve* [Intelligent Systems in Manufacturing], 2020, vol. 18, no. 1, pp. 9–14 (in Russian). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-1-9-14

4. Singh A., Negi S., Kapil S., Karunakaran K.P., Das M. A comprehensive study of auxiliary arrangements for attaining omniderectionality in additive manufacturing machine tools. *Journal of manufacturing science and engineering*, 2020, vol. 143, pp. 050802-1–050802-17. **DOI:** 10.1115/1.4049094

5. Solomatin V.A. [Spatial-frequency characteristics of laser scanners]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2020, vol. 87, no. 4, pp. 19–27 (in Russian). **DOI:** 10.17586/1023-5086-2020-87-04-19-27

6. Marshall G.F., Stutz G.E. Handbook of optical and laser scanning, second edition. Taylor and Francis Group, 2014, 789 p.

7. Beiser L. Unified optical scanning technology. John Wiley and Sons, 2003, 191 p.

8. Duma V.-F. Analysis of polygonal mirror scanning heads: from industrial to high-end applications in swept sources for OCT. *Proc. SPIE, Design and Quality for Biomedical Technologies X*, 14 March 2017, vol. 10056, pp. 100560P-1–100560P-11.

**DOI:** 10.1117/12.2251023

9. Duma V.-F., Nicolov M. Numerical and experimental study of the characteristic functions of polygon scanners. *Proc. SPIE, Modeling Aspects in Optical Metrology II*, 17 June 2009, vol. 7390, pp. 739015-1–739015-9. **DOI:** 10.1117/12.827443

10. Duma V.-F., Podoleanu A.G. Polygon mirror scanners in biomedical imaging: a review. *Proc. SPIE, Optical Components and Materials X*, 11 March 2013, vol. 8621, pp. 86210V-1–86210V-9. **DOI:** 10.1117/12.2005065

11. Varughese K., Krishna K. Flattening the field of postobjective scanners by optimum choice and positio-

ning of polygons. *Appl. Opt.*, 1993, vol. 32, pp. 1104–1108. **DOI:** 10.1364/AO.32.001104

12. Hoang H.-M., Choi S., Park C., Choi J., Ahn S.H., Noh J. Non-back-reflecting polygon scanner with applications in surface cleaning. *Opt. Express*, 2021, vol. 29, pp. 32939–32950. **DOI:** 10.1364/OE.438850

13. Li Y., Katz J. Asymmetric distribution of the scanned field of a rotating reflective polygon. *Appl. Opt.*, 1997, vol. 36, pp. 342–352. **DOI:** 10.1364/ AO.36.000342

14. Artamonov S.I., Gryaznov N.A., Kuprenyuk V.I., Romanov N.A., Sosnov E.N. [Choosing a scanner for a laser location system]. *Opticheskij zhurnal* [Journal of Optical Technology], 2016, vol. 83, no. 9, pp. 51–58 (in Russian).

15. De Loor R. Polygon Scanner System for Ultra Short Pulsed Laser Micro-Machining Applications. *Physics Procedia*, 2013, vol. 41, pp. 544–551. **DOI:** 10.1016/ j.phpro.2013.03.114

## Видеоспектральные методы и средства мониторинга контролируемых параметров лесных пожаров и аварий, связанных с разливом нефтепродуктов

А.С. Сизиков<sup>1</sup>, Ю.В. Беляев<sup>2</sup>, И.М. Цикман<sup>2</sup>, А.П. Попков<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Научно-исследовательский институт пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь, ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь

<sup>2</sup>Институт прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета, ул. Курчатова, 7, г. Минск 220045, Беларусь

Поступила 08.02.2023 Принята к печати 10.03.2023

В статье приведены основные результаты создания комплекса «Визир» для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов, указаны его назначение, состав и основные технические параметры.

Рассмотрены результаты спектрально-поляризационных исследований характеристик образцов, имитирующих объекты (загрязнения) чрезвычайных ситуаций природного (лесные пожары) и техногенного (разлив нефтепродуктов) характера, выполненных на данном комплексе с использованием поляризационных насадок при различных условиях (углах освещения, наблюдения, концентрации загрязняющих веществ, времени, прошедшем после загрязнения, степени термического повреждения древесины). Использование полученных результатов позволяет до 2-х раз повысить точность идентификации объектов мониторинга зон чрезвычайных ситуаций.

Изложены основные положения двух разработанных методик. Первая – методика определения контролируемых параметров лесных пожаров посредством авиационного мониторинга, позволяющая в диапазоне длин волн от 0,5 мкм до 0,7 мкм регистрировать максимальные значения степени поляризации отражённого излучения для гари 30–40 % и для горельника 15–20 %. Вторая – методика определения контролируемых параметров техногенных чрезвычайных ситуаций, связанных с разливом нефтепродуктов, посредством авиационного мониторинга, позволяющая регистрировать максимальные значения степени поляризации нефтяного разлива на воде: 40–50 % при оптимальных углах наблюдения, близких к зеркальным по отношению к углу падения солнечного излучения.

Разработанные методики внедрены в деятельность Министерства чрезвычайных ситуаций Республики Беларусь для принятия правильных управленческих решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций и их последствий.

Ключевые слова: мониторинг, чрезвычайные ситуации, спектральные характеристики.

Адрес для переписки: Address for correspondence: Сизиков А.С. Sizikov A.S. НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций The Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, МЧС Республики Беларусь, Research Institute of Fire Safety and Emergencies ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь str. Soltysa, 183a, Minsk 220046, Belarus e-mail: aquarey@yandex.ru e-mail: aquarey@yandex.ru Для цитирования: For citation: A.S. Sizikov, Y.V. Belyaev, I.M. Tsykman, A.P. Popkov. А.С. Сизиков, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.П. Попков. Видеоспектральные методы и средства мониторинга [Video Spectral Methods and Tools for Monitoring of Controlled контролируемых параметров лесных пожаров и аварий, Parameters of Forest Fires and Oil Spill Accidents]. связанных с разливом нефтепродуктов. Devices and Methods of Measurements. 2023, vol. 14, no. 1, pp. 62–70 (in Russian). **DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70 Приборы и методы измерений. 2023. – T. 14, № 1. – C. 62–70. DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70

**DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70

# Video Spectral Methods and Tools for Monitoring of Controlled Parameters of Forest Fires and Oil Spill Accidents

A.S. Sizikov<sup>1</sup>, Y.V. Belyaev<sup>2</sup>, I.M. Tsykman<sup>2</sup>, A.P. Popkov<sup>2</sup>

<sup>1</sup>The Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus, Research Institute of Fire Safety and Emergencies, str. Soltysa, 183a, Minsk 220046, Belarus

<sup>2</sup>*A.N.* Sevchenko Institute of Applied Physical Problems of Belarusian State University, Kurchatov str., 7, Minsk 220045, Belarus

Received 08.02.2023 Accepted for publication 10.03.2023

#### Abstract

The main results of the creation of the domestic complex "Vizir" for measuring bidirectional spectropolarization reflection coefficients and brightness of natural and artificial objects were presented in the article. Its purpose, composition and main technical parameters were indicated.

Spectral-polarization studies of the characteristics of samples that simulates objects (pollution) of natural (forest fires) and man-made (oil spills) emergencies were performed with the help of complex "Vizir" using polarizing nozzles under various conditions (angles of illumination, observation, pollution concentration, the time that passed since the contamination, the degree of wood thermal damage). The results of studies made it possible to increase the accuracy of identification of monitoring objects in emergency zones up to two times.

The main provisions of the two developed methods were outlined. The first method was methodology for determination of the controlled parameters of forest fires by means of aviation monitoring, which makes it possible to record the maximum values of the degree of polarization of reflected radiation for coal 30–40 % and for semi-coal 15–20 % in the wavelength range from 0.5 to 0.7  $\mu$ m. The second one was methodology for determination of the controlled parameters of man-made emergencies with oil spills by means of aviation monitoring, which makes it possible to record the maximum values of the degree of polarization of an oil spill on water: 40–50 % at optimal view angles close to specular in relation to the angle of solar radiation incidence.

The developed methods were introduced into the activities of the Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus to make the right management decisions to eliminate emergency situations and their consequences.

Keywords: monitoring, emergency situations, spectral characteristics.

#### DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Сизиков А.С.	Sizikov A.S.
НИИ пожарной безопасности и проблем чрезвычайных ситуаций	The Ministry for Emergency Situations of the Republic of Belarus,
МЧС Республики Беларусь,	Research Institute of Fire Safety and Emergencies
ул. Солтыса, 183а, г. Минск 220046, Беларусь	str. Soltysa, 183a, Minsk 220046, Belarus
e-mail: aquarey@yandex.ru	e-mail: aquarey@yandex.ru
Для цитирования:	For citation:
А.С. Сизиков, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.П. Попков.	A.S. Sizikov, Y.V. Belyaev, I.M. Tsykman, A.P. Popkov.
Видеоспектральные методы и средства мониторинга	[Video Spectral Methods and Tools for Monitoring of Controlled
контролируемых параметров лесных пожаров и аварий,	Parameters of Forest Fires and Oil Spill Accidents].
связанных с разливом нефтепродуктов.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 1, pp. 62–70 (in Russian).
2023. – T. 14, № 1. – C. 62–70.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-1-62-70	

#### Введение

Технические средства дистанционного Земли зондирования (ДЗЗ) успешно разрабатываются внедряются в Республике И Беларусь, в том числе для определения контролируемых параметров чрезвычайных ситуаций (ЧС) природного и техногенного характера [1]. При этом для повышения качества осуществления авиационного мониторинга данных ЧС необходимо развитие и укрепление методической и методологической базы с её обязательным научным обоснованием. Для принятия правильных управленческих решений по предупреждению и ликвидации ЧС и их последствий данных, получаемых с помощью средств фото- и видеофиксации с борта летательного аппарата (ЛА) в обычном видимом диапазоне оказывается недостаточно, так как не всегда удаётся верно идентифицировать зону ЧС, её границы или объект ЧС. Например, при визуальном наблюдении с борта ЛА принципиально отличить пятно выжженной травы (при лесном пожаре) от разлива нефтепродуктов на верхнем слое почвы (при аварии, связанной с разливом нефтепродуктов) не всегда представляется возможным. Также крайне сложно с борта ЛА определить площадь и границы лесных площадей с древостоем, погибшим (гарь) и частично погибшим (горельник) [2, 3] в результате пожара, при контроле послепожарной обстановки. Поэтому особое внимание было уделено вопросам идентификации зон и объектов ЧС с учётом их индивидуальных спектральных характеристик, получаемых путём осуществления авиационного мониторинга. Данные спектрально-поляризационного мониторинга зон и объектов ЧС необходимы для верной оценки складывающейся оперативной обстановки и принятия правильного управленческого решения по ликвидации ЧС и их последствий.

Для исследования спектральных характеристик природных и искусственных объектов за рубежом применяются различные трёхмерные гониометры для измерения двунаправленных коэффициентов спектральной яркости или отражения, которые используются как в полевых, так и в лабораторных условиях, например Швейцарский Полевой Гониометр (*FIGOS*) и его модификация – *LAGOS* для измерения уже в лабораторных условиях [4], гониометрический комплекс GRASS (Gonio Radiometric Spectrometer System), разработанный в National Physical Laboratory (NPL), Teddington, UK [5, 6], роботизированный гониометр, выполненный в лаборатории геоинформации и дистанционного зондирования Нидерландского Университета Wageningen [7] и др. Однако основным недостатком полевых гониометров является то, что во время проведения исследований часто имеют место атмосферные эффекты и нежелательные временные изменения освещённости, которые должны быть приняты во внимание. А в лабораторных условиях, как правило, обеспечивается коническая форма потока искусственного освещения, что ведёт к неоднородности освещаемой области, и, следовательно, к необходимости корректировки получаемых данных. Кроме того, конструкции данных гониометрических установок не предполагают использование поляризационных насадок, тем самым значительно снижая информативность получаемых в исследованиях данных.

Целью работы являлось создание отечественного комплекса для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов с возможностью использования поляризационных насадок. проведение на нём исследований образцов, имитирующих объекты (загрязнения) ЧС природного (лесные пожары) и техногенного (разлив нефтепродуктов) характера, и разработка на основании полученных результатов исследований соответствующего методического обеспечения для определения контролируемых параметров указанных ЧС при осуществлении авиационного мониторинга.

#### Основная часть

Для исследования особенностей отражательных характеристик объектов ЧС был создан отечественный комплекс для измерений спектрополяризационных двунаправленных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов «Визир» (рисунок 1), включающий измерительный модуль (1) на основе спектрометров, охватывающих диапазон длин волн от 350 до 2500 нм и выполненных с возможностью использования поляризационных насадок [8]. Измерительный модуль (1) расположен на качающейся штанге (2), установленной на поворотной платформе (3), вследствие чего могут меняться как зенитный (в вертикальной плоскости), так и азимутальный (горизонтальный) углы визирования (положения измерительного модуля) от 0 до ±90° при регистрации отражённого от объектов излучения.



Рисунок 1 – Внешний вид комплекса «Визир»: 1 – измерительный модуль; 2 – штанга; 3 – поворотная платформа; 4 – предметный столик; 5 – осветитель с охлаждением

**Figure 1** – Appearance of the complex "Vizir": 1 – measuring module; 2 – rod; 3 – turntable; 4 – subject table; 5 – illuminator with cooling

Эталонная поверхность и исследуемые образцы, имитирующие реальные объекты ЧС, размещаются на подвижном предметном столике (4). Для приближения к реальным условиям съёмки система коллимированного освещения (5) установлена на поворотной раме, которая может наклоняться на угол, соответствующий зенитному углу солнечного освещения. Полученные на комплексе результаты исследований используются для верификации данных дистанционного зондирования ЧС, что позволяет повысить достоверность данных авиационного мониторинга зон ЧС [3].

Отметим, что оригинальность конструкции комплекса обусловлена использованием кранштативов для перемещения источника освещения и измерительного модуля в вертикальной плоскости, а новизной разработанного комплекса является использование при исследованиях поляризационных насадок, что позволяет проводить поляризационные измерения, возможность которых отсутствует в известных зарубежных аналогах [9].

В результате выполненных, в том числе комплексе «Визир» [10], исследований на спектрально-поляризационных характеристик образцов, имитирующих объекты (загрязнения) ЧС природного (лесные пожары) и техногенного (разлив нефтепродуктов) характера, при различных условиях (углах освещения, наблюдения, концентрации загрязняющих веществ, времени, прошедшем после загрязнения, степени термического повреждения древесины) определено, что разделение крикоэффициентов спектральной яркости вых исследуемых загрязненных нефтепродуктами образцов в зависимости от времени наблюдения практически отсутствует и процентное содержание нефти в диапазоне 5-15 % также практически не влияет на измеряемые спектральные зависимости, а наиболее информативным спектральным диапазоном таких интервал измерений является 600-850 нм с зенитными углами визирования от 0 до 40°. Установлено, что степень поляризации отражённого излучения зависит от полноты сгорания древесных элементов. При сгорании древесины до угольной фазы степень поляризации увеличивается практически в 2 раза и максимальные значения степени поляризации отражённого излучения (30-40 % для гари и 15-20 % для горельника) регистрируются в диапазоне длин волн от 500 до 700 нм в плоскости солнечного вертикала (в плоскости, в которой находятся объект наблюдения, регистрирующая аппаратура и Солнце, в чью сторону направлен курс ЛА при углах визирования, близких по значению, но противоположных по знаку к зенитному положению Солнца, освещающего исследуемую территорию (рисунок 2). Степень поляризации нефтяного разлива на воде максимальна (40-50 %) при наблюдении в плоскости солнечного вертикала при углах, близких к зеркальному углу по отношению к углу падения солнечного излучения (рисунок 3).

Использование полученных результатов позволяет повысить до 2-х раз достоверность данных авиационного мониторинга зон ЧС природного и техногенного характера для принятия правильного управленческого решения по их ликвидации [6].

На основании полученных результатов разработаны, утверждены и внедрены в практическую деятельность государственного авиационного аварийно-спасательного учреждения (ГААСУ) «АВИАЦИЯ» МЧС Республики Беларусь методика определения контролируемых параметров лесных пожаров посредством авиационного мониторинга И методика определения контролируемых параметров ЧC, техногенных связанных с разливом нефтепродуктов, посредством авиационного мониторинга. Данные методики позволяют

определять контролируемые параметры указанных ЧС в соответствии с требованиями СТБ 1404-2003 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг аэрокосмический. Номенклатура контролируемых параметров чрезвычайных ситуаций» и СТБ 1408-2003 «Безопасность в чрезвычайных ситуациях. Мониторинг и прогнозирование лесных пожаров. Общие требования».



**Рисунок 2** – Степень поляризации отражённого излучения при различных углах визирования от повреждённых огнём древесных элементов (*a*, *b*) и от крупных элементов сгоревшей древесины (уголь; *c*, *d*): *a*, *c* – в плоскости солнечного вертикала; *b*, *d* – в плоскости, перпендикулярной плоскости солнечного вертикала

**Figure 2** – The degree of polarization of the reflected radiation at different viewing angles from fire-damaged wood elements (a, b) and from large elements of burnt wood (coal; c, d): a, c – in the plane of the solar vertical; b, d – in a plane perpendicular to the plane of the solar vertical



**Рисунок 3** – Степень поляризации отражённого излучения от разлива нефти на водной поверхности при различных углах визирования: *а* – в плоскости солнечного вертикала; *b* – в плоскости, перпендикулярной плоскости солнечного вертикала

**Figure 3** – The degree of polarization of the reflected radiation from an oil spill on the water surface at different viewing angles: a – in the plane of the solar vertical; b – in the plane perpendicular to the plane of the solar vertical

В разработанных методиках рекомендованы конкретные условия для определения контролируемых параметров ЧС природного (лесные пожары) и техногенного (связанные с разливом нефтепродуктов) характера (в частности, пролёты следует осуществлять в плоскостях солнечного вертикала и в перпендикулярном к нему направлении).

Для выявления загрязнений нефти на участках, покрытых травянистой растительностью, рекомендации следующие: при проспектральной лётах ЛА co съёмочной аппаратурой без поляризационной насадки В плоскости, перпендикулярной плоскости солнечного вертикала (рисунок 4), измерение необходимо выполнять при углах визирования аппаратуры, близких к надиру (рисунок 5) интенсивность отражённого излучения от участков, загрязнённых нефтью, будет в 2-3 раза ниже в диапазоне длин волн 350-900 нм, чем от не загрязнённых участков с аналогичным проективным покрытием.



**Рисунок 4** – Схема пролёта летательного аппарата. В плоскости, перпендикулярной плоскости солнечного вертикала, курс летательного аппарата перпендикулярен направле-нию на Солнце, угол α = 90°

**Figure 4** – Aircraft flight plan. In a plane perpendicular to the plane of the solar vertical, the course of the aircraft is perpendicular to the direction to the Sun, angle  $\alpha = 90^{\circ}$ 

При этом соотношение величин сигналов спектральной зависимости отражённого солнечного излучения в области спектра 950 нм и 450 нм для загрязнённых нефтью участков будут в 1,3–1,8 раза ниже, чем для не загрязнённых нефтью травяных участков.

При измерениях разливов нефти на воде [11– 14] следует использовать поляризационные насадки для всех измерительных каналов с ориентацией осей поляризации поляроидов (угол между осью поляризационного фильтра и курсом ЛА) – 0°, 45°, 90° и выполнять следующие условия: при пролёте в плоскости солнечного вертикала измерения необходимо проводить на углах близких к зеркальному углу (по отношению к углу падения солнечного излучения), степень поляризации для участков разлитой на воде нефти будет выше, чем для чистых участков воды, и будет достигать значений до 50 %.



**Рисунок 5** – Схема пролёта летательного аппарата. Измерение в надир осуществляется под прямым углом к исследуемому объекту, угол  $\delta = 90^{\circ}$ 

Figure 5 – Aircraft flight plan. Measurement in nadir is carried out at a right angle to the object under study, angle  $\delta = 90^{\circ}$ 

При оценке послепожарной обстановки для уточнения площади гари необходимо выполнить поляризационные измерения аппаратурой, установленной на ЛА, при следующих условиях:

 – ЛА выполняет облёт в плоскости солнечного вертикала по направлению к Солнцу и регистрируемому участку;

– для измерений максимальных значений степени поляризации оптическая ось спектральной аппаратуры при регистрации отражённого от исследуемой площади сгоревшего леса излучения должна располагаться (рисунок 6) под углом, близким к зеркальному углу по отношению к углу падения солнечного излучения, при этом:

а) регистрация излучения выполняется в диапазоне длин волн от 0,48 мкм до 0,72 мкм с использованием трёх идентичных каналов (при невозможности – минимум двух) с разными положениями поляризационного фильтра (угол между осью поляризационного фильтра и курсом ЛА – 0°, 45° и 90° (0° и 90°) (рисунок 7);

б) измерения тремя (двумя) каналами (спектрометрами) выполняются одновременно

с пространственной ориентацией в одну и ту же точку на поверхности земли;

– при необходимости выполняются измерения с борта ЛА минимальных значений степени поляризации с угловой ориентацией аппаратуры в надир ( $\theta_2 = 0^\circ$ ), или близким к нему углом с выполнением условий а) и б).



**Рисунок 6** – Схема пролёта летательного аппарата. Угол наклона Солнца к вертикали  $\theta_1$  равен зенитному углу  $\theta_2$  (углу к надиру), под которым следует располагать аппаратуру

**Figure 6** – Aircraft flight plan. The angle of inclination of the Sun to the vertical  $\theta_1$  is equal to the zenith angle  $\theta_2$  (the angle to the nadir) under which the equipment should be located



**Рисунок 7** – Схема пролёта летательного аппарата. Угол между осью поляризационного фильтра и курсом летательного аппарата  $\gamma_1 = 0^\circ$  (направление оси совпадает с курсом),  $\gamma_2 = 45^\circ$  и  $\gamma_3 = 90^\circ$ 

**Figure 7** – Aircraft flight plan. The angle between the polariza-tion filter axis and the aircraft heading is  $\gamma_1 = 0^\circ$  (the direction of the axis coincides with the heading),  $\gamma_2 = 45^\circ$  and  $\gamma_3 = 90^\circ$ 

По значению степени поляризации излучения от объекта мониторинга уточняется площадь повреждения лесного пожара: для поверхности полностью сгоревшего древостоя (гари) значения степени поляризации излучения будут более чем в два раза превышать соответствующие значения от поверхности частично погибшего леса (горельник).

#### Заключение

Создан комплекс для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения И яркости природных и искусственных объектов. Он отличается от зарубежных аналогов тем, что содержит измерительный модуль на основе спектрометров диапазона длин волн 350-1050 нм и диапазона длин волн 1050-2500 нм, который возможностью использования выполнен с поляризационных насадок, а также раму и штангу для перемещения в вертикальной плоскости источника коллимированного излучения и измерительного модуля. Комплекс имеет вращающиеся платформу с шаговым двигателем и лабораторный стол для размещеисследуемых образцов, имитирующих ния реальные объекты чрезвычайных ситуаций. Комплекс обеспечивает возможность получения их спектральных характеристик для верификации данных дистанционного зондирования Земли, что позволяет повысить достоверность данных авиационного мониторинга 30H чрезвычайных ситуаций.

На разработанном комплексе с использованием поляризационных насадок при различных условиях (углах освещения, наблюдения, концентрации загрязняющих веществ, времени, прошедшем после загрязнения, степени термического повреждения древесины) для верификации данных дистанционного зондирования Земли проведены исследования спектрально-поляризационных характеристик реальные образцов, имитирующих объекты чрезвычайных ситуаций (разливы нефтелесного продуктов, последствия пожара). Использование полученных результатов позволяет до 2-х раз повысить точность идентификации объектов мониторинга зон чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера для принятия правильного управленческого решения по их ликвидации.

Впервые разработана методика определения контролируемых параметров лесных пожаров посредством авиационного мониторинга. Она основана на результатах научных исследований по определению спектрально-поляризационных характеристик лабораторных образцов объектов, возникающих вследствие чрезвычайных ситуаций природного характера (лесные пожары). Разработанная методика позволяет в диапазоне длин волн от 0,5 мкм до 0,7 мкм регистрировать максимальные значения степени поляризации отражённого излучения для гари: 30-40 % и для горельника: 15-20 %. Использование методики способствует принятию правильных управленческих решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций и их последствий. Методика внедрена в практическую деятельность государственного авиационного аварийноспасательного учреждения «АВИАЦИЯ» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

Впервые разработана методика определения контролируемых параметров техногенных чрезвычайных ситуаций, связанных с разливом нефтепродуктов, посредством авиационного мониторинга. Она основана на результатах научных исследований по определению спектрально-поляризационных характеристик исследуемых лабораторных образцов объектов (загрязнений), возникающих вследсттехногенных чрезвычайных ситуаций, вие связанных с разливом нефтепродуктов. Разработанная методика позволяет регистрировать максимальные значения степени поляризации излучения, отражённого от нефтяного разлива на воде: 40-50 % при оптимальных углах наблюдения, близких к зеркальным по отношению к углу падения солнечного излучения. Испольспособствует зование методики принятию правильных управленческих решений по ликвидации чрезвычайных ситуаций и их последствий. Методика внедрена в практическую деятельность государственного авиационного аварийно-спасательного учреждения «АВИА-ЦИЯ» Министерства по чрезвычайным ситуациям Республики Беларусь.

#### Список использованных источников

1. Беляев Б.И. Оптическое дистанционное зондирование / Б.И. Беляев, Л.В. Катковский. – Минск: БГУ, 2006. – 455 с.

2. ГОСТ 17.6.1.01-83. «Охрана природы. Охрана и защита лесов. Термины и определения».

3. Волокитина А.В. Методические аспекты характеристики лесных участков после пожара /

А.В. Волокитина // Вестник Томского государственного университета. Биология. – 2015. – № 3. – С. 84– 98. **DOI:** 10.17223/19988591/31/7

4. Stefan Sandmeier, Willy Sandmeier, Klaus I. Itten, Michael E. Schaepman and Tobias W. Kellenberger. The Swiss Field-Goniometer System (FIGOS) [Электронный pecypc]. – Режим доступа: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/files/content/abteilungen/rsl1/Spe1995/IGARSS95. pdf (дата доступа: 19.01.2018).

5. Gonio Radiometric Spectrometer System (GRASS) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www. npl.co.uk/science-technology/earth-observation-climate/ facilities/gonio-radiometric-spectrometer-system-grass (дата доступа: 19.01.2018).

6. *Pegrum-Browning H., Fox N., Milton E.* The NPL Gonio RAdiometric Spectrometer System (GRASS). Proceedings of the remote sensing and photogrammetry society conference 2008 "Measuring change in the Earth system". University of Exeter, 15-17 September 2008 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://eprints. soton.ac.uk/63464/1/81\_63-81-NPL-GRASS.pdf (дата доступа: 19.01.2018).

7. Peter P.J. Roosjen, Jan G.P.W. Clevers, Harm M. Bartholomeus, Michael E. Schaepman, Gabriela Schaepman-Strub, Henk Jalink, Rob van der Schoor, Arjan de Jong. A Laboratory Goniometer System for Measuring Reflectance and Emittance Anisotropy. Article (PDF Available) in Sensors 12(12):17358-71 December 2012 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www. researchgate.net/publication/235740443\_A\_Laboratory\_ Goniometer\_System\_for\_Measuring\_Reflectance\_and\_ Emittance\_Anisotropy (дата доступа: 19.01.2018).

8. Сизиков А.С. Создание отечественного комплекса «Визир» для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов / А.С. Сизиков, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман // СNBOP «Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza / Safety & Fire Technique». – 2018. – № 2(50) – С. 28–37.

#### **DOI:**10.12845/bitp.50.2.2018.2

9. Комплекс для измерений двунаправленных спектрополяризационных коэффициентов отражения и яркости природных и искусственных объектов: пат. 11965 Респ. Беларусь, МПК G 01J 3/02 (2006.01) / Б.И. Беляев, Ю.В. Беляев, И.М. Цикман, А.С. Сизиков; заявитель: НИИ ПБиЧС МЧС Республики Беларусь, НИИ ПФП им. А.Н. Севченко БГУ - № и 20180268; заявл. 12.10.2018; опубл. 01.02.2019 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. – 2019. – № 2(127). – С. 188–189.

10. Сизиков А.С. Определение спектрополяризационных характеристик загрязнений поверхности Земли, возникающих вследствие чрезвычайных ситуаций, с помощью измерительного комплекса «ВИЗИР» / А.С. Сизиков [и др.] // Чрезвычайные ситуации: предупреждение и ликвидация. – 2019. – № 2(46) – С. 102–116.

11. Есин Н.И. Динамика нефтяного пятна при его растекании по водной поверхности / Н.И. Есин, Н.Н. Загриценко, Э.Н. Потетюнко // Успехи современного естествознания. – 2009. – № 10. – С. 43–45.

12. Оптико-физические средства исследования океана // Под ред. Е.Г. Пащенко. – Л.: Судостроение, 1984. – 264 с.

13. Шевелева Т.Ю. Интерференционные методы обнаружения и измерения толщины нефтяной пленки на море // Оптика моря и атмосферы. – JL: ГОИ, 1988. – С. 443–444.

14. Жевлаков А.П. Дистанционное измерение толщины пленки нефтепродуктов на поверхности воды с использованием эксимерного лазера / А.П. Жевлаков [и др.] // Известия Академии наук. Серия физическая. – 1994. – Т. 58. – № 2. – С. 175–179.

#### References

1. Belyaev B.I., Katkovsky L.V. Optical remote sensing. Minsk: BSU, 2006, 455 p.

2. GOST 17.6.1.01-83. Protection of Nature. Protection and protection of forests. Terms and Definitions.

3. Volokitina A.V. Methodological aspects of the characteristics of forest areas after the fire. *Bulletin of the Tomsk State University*. *Biology*, 2015, no. 3, pp. 84–98 (in Russian). **DOI:** 10.17223/19988591/31/7

4. Stefan Sandmeier, Willy Sandmeier, Klaus I. Itten, Michael E. Schaepman, Tobias W. Kellenberger. The Swiss Field-Goniometer System (FIGOS) [Electronic resource]. Available at: http://www.geo.uzh.ch/fileadmin/ files/content/abteilungen/rs11/Spe1995/IGARSS95.pdf (accessed: 19.01.2018).

5. Gonio Radiometric Spectrometer System (GRASS) [Electronic resource]. Available at: http://www.npl.co.uk/science-technology/earth-observation-climate/facilities/gonio-radiometric-spectrometer-system-grass (accessed: 19.01.2018).

6. Pegrum-Browning H., Fox N., Milton, E. The NPL Gonio RAdiometric Spectrometer System (GRASS). Proceedings of the remote sensing and photogrammetry society conference 2008 "Measuring change in the Earth system". University of Exeter 15–17 September 2008 [Electronic resource]. Available at: http://eprints.soton. ac.uk/63464/1/81\_63-81-NPL-GRASS.pdf (accessed: 19.01.2018).

7. Peter P.J. Roosjen, Jan G.P.W. Clevers, Harm M. Bartholomeus, Michael E. Schaepman, Gabriela Schaepman-Strub, Henk Jalink, Rob van der Schoor, Arjan de Jong. A Laboratory Goniometer System for Measuring Reflectance and Emittance Anisotropy. Article (PDF Available) in Sensors 12(12):17358-71 December 2012 [Electronic resource]. Available at: https://www.researchgate.net/publication/235740443\_A\_Laboratory\_Goniometer\_System\_for\_Measuring\_Reflectance\_and\_Emittance\_Anisotropy (accessed: 19.01.2018).

8. Sizikov A.S., Belyaev Yu.V., Tsikman I.M. Creation of the domestic complex "Vizir" for measurements of bidirectional spectropolarization reflection coefficients and brightness of natural and artificial objects. *CNBOP "Bezpieczeństwo i Technika Pożarnicza. Safety & Fire Technique*", 2018, vol. 50, iss. 2, pp. 28–37.

**DOI:**10.12845/bitp.50.2.2018.2

9. Belyaev B.I., Belyaev Yu.V., Tsikman I.M., Sizikov A.S. Complex for measuring bidirectional spectropolarization reflection coefficients and brightness of natural and artificial objects: Pat. 11965 Rep. Belarus, IPC G 01J 3/02 (2006.01); applicant: NII PBi-ChS Ministry of Emergency Situations of the Republic of Belarus, NII PFP them. A.N. Sevchenko BSU. No. u 20180268; dec. 10/12/2018; publ. 02/01/2019 // Official Bull. / Nat. intellectual property center, 2019, no. 2(127), pp. 188–189.

10. Sizikov A.S., Beliaev Y.V., Tsykman I.M., Bruchkouskaya S.I. Determination of Spectropolarization Characteristics of the Earth's Surface Pollution Arising as a Result of Emergencies Using the VIZIR Measuring Complex. *Emergency situations: prevention and liquidation*, 2019, no. 2(46), pp. 102–116 (in Russian).

11. Esin N.I., Zagritsenko N.N., Potetyunko E.N. Dynamics of an oil slick as it spreads over the water surface. *Successes of modern natural science*, 2009, no. 10, pp. 43–45 (in Russian).

12. Optical-Physical Means of Ocean Research, Ed. E.G. Pashchenko. L .: Shipbuilding Publ., 1984, 264 p.

13. Sheveleva T.Yu. Interference methods for detecting and measuring the thickness of an oil film at sea. *Optics of the Sea and Atmosphere. JL: GOI*, 1988, pp. 443–444 (in Russian).

14. Zhevlakov A.P., Leshchenko D.O., Pakkonen S.A. Remote measurement of oil film thickness on water surface using an excimer laser. *Proceedings of the Academy of Sciences. Physical series*, 1994, vol. 58, no. 2, pp. 175–179 (in Russian).

### ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РБ 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). Объём 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: название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звёздочкой 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 чётким. 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 даётся 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 – «а», «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 приведён 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. Полутоновые 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 чёткими. 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
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, греческй 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 вверху 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. 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 descripted.

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 taped 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.

