

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

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS
OF MEASUREMENTS

№ 1 (16)
2025

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 16

№ 1

2025

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, заведующий кафедрой
«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. Калашиникова (г. Ижевск, Россия)

Анищик В.М., д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры физики твёрдого тела и нанотехнологий
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., член-корреспондент Латвийской академии наук, д.т.н., профессор, Институт механики и
машиностроения Рижского технического университета (г. Рига, Латвия)

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

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

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

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

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

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

Комаров Ф.Ф., 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)

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)

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, главный научный сотрудник НИЦ оптических материалов и технологий филиала Белорусского национального технического университета «Научно-исследовательский политехнический институт» (г. Минск, Беларусь)

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

В соответствии с решением ВАК от 08.07.2011 г. №13/1 журнал включён в Перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований;
научное направление: **технические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика); физико-математические (приборостроение, метрология и информационно-измерительные приборы и системы; электроника; физика)**
(приказ ВАК Республики Беларусь от 06.02.2024 г. №30 с изменениями от 23.05.2024 г. №124)

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь» (подписные индексы – 74835; 748352);
в Российской Федерации – через подписные каталоги:
ООО «Прессинформ», ООО «Кризйтив Сервис Бэнд», ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

Ведущий научный редактор: Шахлевич Л.Н.
Технический редактор: Чабарова О.Л.

Набор и вёрстка выполнены в редакции журнала «Приборы и методы измерений».
Подписано в печать. 2025. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.
Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,93. Уч.-изд. л. 6,42. Тираж 50 экз.
Дата выхода в свет: . Заказ № .

Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 38200000006896 от 03.03.2014.
Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет
пр-т Независимости, 65, корп. 17, комн. 432,
220013, г. Минск, Республика Беларусь,
тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder
Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 16

№ 1

2025

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, Head of 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 and Nanotechnology, 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, *Corresponding Member of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, 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)*

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)*

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, Principal Research Scientist of Research Centre for Optical Materials and Technologies, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

ADDRESS:

Belarusian National Technical University
Nezavisimosty Ave., 65, Building 17, Room 432
Minsk 220013, Belarus
Tel.: +375 (17) 293 96 67, fax: +375 (17) 292 67 94
e-mail: pimi@bntu.by
<http://pimi.bntu.by>

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

Атул Р. Чаудхари, Дипак П. Патил

Микрополосковая патч-антенна диапазонов WiMAX, ISM и L для применения в сетях стандарта Sub-6 GHz. Обзор (<i>in English</i>).....	7
---	---

А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель

Моделирование лазеров на основе иттербий-эрбиевого стекла с пассивной модуляцией добротности при поперечной накачке линейками лазерных диодов (<i>in English</i>).....	24
--	----

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский

Конструктивно-схемотехнические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения.....	35
---	----

Методы измерений, контроля, диагностики

А.Л. Жарин, И.В. Гасенкова, А.К. Тявловский, Н.И. Мухуров, С.И. Спицкий

Выявление скрытых дефектов алюминиевых подложек для сенсорных устройств после термомеханической обработки с помощью сканирующего зонда Кельвина (<i>in English</i>).....	47
--	----

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова

Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях.....	55
---	----

Е.А. Кульченков, А.А. Демидов, С.Б. Рыбалка

Исследование влияния топологии интегральной микросхемы стабилизатора напряжения на его радиационную стойкость (<i>in English</i>).....	63
--	----

Д.И. Бринкевич, Е.В. Гринюк, В.С. Просолович, С.Д. Бринкевич, В.В. Колос, О.А. Зубова

Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия фоторезистивных плёнок на кремнии.....	69
--	----

CONTENTS

Measuring Instruments

<i>Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil</i> Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L-band for Sub-6 GHz Application. Review.....	7
<i>A.S. Yasukevich, V.E. Kisel</i> Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse Pumping by Linear Laser Diode Arrays.....	24
<i>O.V. Dvornikov, U.N. Bakhur, A.G. Bakhir, U.M. Lazouski, V.A. Tchekhovski</i> Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis (in Russian).....	35

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

<i>A.L. Zharin, I.V. Gasenkova, A.K. Tyavlovsky, N.I. Mukhurov, S.I. Spitskiy</i> Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning Kelvin Probe.....	47
<i>T.A. Bokova, A.G. Meluzov, N.S. Volkov, R.V. Sumin, M.D. Pogorelov, T.K. Zyryanova</i> Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal Heat Carriers (in Russian).....	55
<i>E.A. Kulchenkov, A.A. Demidov, S.B. Rybalka</i> Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit Topology on its Radiation Hardness.....	63
<i>D.I. Brinkevich, E.V. Grinyuk, V.S. Prosolovich, S.D. Brinkevich, V.V. Kolos, O.A. Zubova</i> Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive Films on Silicon (in Russian).....	69

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L-band for Sub-6 GHz Application. Review

Atul R. Chaudhari¹, Dipak P. Patil²

¹Sandip Institute of Technology and Research Centre,
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India

²Sandip Institute of Engineering and Management,
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India

Received 25.06.2024

Accepted for publication 30.12.2024

Abstract

In rapid deployments of next generation wireless communication system, the demand for high speed data, capacity, high reliability, low latency and increased flexibility. Rigorous research in the field of 5G technology. Sub-6 GHz mid-band spectrum fetches the attention of the researchers due to its estimable ease of deployment in the existing infrastructure. 5G Sub-6 GHz band finds massive applications in fields of wireless communication. The Sub-6 GHz wireless bands are assigned for various applications. This article gives inclusive review of current state-of-art of antenna for 5G Sub-6 GHz technology. Different design techniques and methods of antenna to Sub-6 GHz are summarized in the literature, to overcome the antenna design challenges.

Keywords: WiMAX, ISM-band, L-band, Sub-6 GHz, and 5G

Адрес для переписки:

Дипак П. Патил
Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,
Тримбак-роуд, г. Насик 422213, Индия
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

Address for correspondence:

Dipak P. Patil
Sandip Institute of Engineering and Management,
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

Для цитирования:

Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil.
Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L band for Sub-6 GHz
Application. Review
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 7–23.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

For citation:

Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil.
Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L band for Sub-6 GHz
Application. Review
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):7–23.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

Микрополосковая патч-антенна диапазонов WiMAX, ISM и L для применения в сетях стандарта Sub-6 GHz. Обзор

Атул Р. Чаудхари¹, Дипак П. Патил²

¹Институт технологий и исследовательский центр имени Сандипа,
Тримбак-роуд, г. Насик, 422213, Индия

²Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,
Тримбак-роуд, г. Насик, 422213, Индия

Поступила 25.06.2024

Принята к печати 30.12.2024

Быстрое развитие беспроводных систем связи следующего поколения выдвигает требования по высокоскоростной передаче данных, пропускной способности, высокой надёжности, низким задержкам и повышенной гибкости. Основные исследования при этом сосредоточены в области технологии 5G. Средний диапазон частот до 6 ГГц привлекает внимание исследователей вследствие простоты его реализации на базе существующей инфраструктуры. Диапазон Sub-6 GHz (ниже 6 ГГц) стандарта 5G находит широкое применение в технике беспроводной связи. Полосы частот ниже 6 ГГц назначены для различных приложений. В статье дан обзор текущего состояния антенн для технологии 5G для диапазона ниже 6 ГГц. На основе литературных данных выполнено обобщение методов проектирования и применения антенн диапазона ниже 6 ГГц, направленное на преодоление известных проблем их проектирования.

Ключевые слова: WiMAX, ISM-диапазон, L-диапазон, диапазон ниже 6 GHz, 5G

Адрес для переписки:

Дипак П. Патил
Институт инженерии и менеджмента имени Сандипа,
Тримбак-роуд, г. Насик 422213, Индия
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

Address for correspondence:

Dipak P. Patil
Sandip Institute of Engineering and Management,
Trimbak Road, Nashik, Maharashtra, 422213, India
e-mail: dipakpatil25@gmail.com

Для цитирования:

Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil.
Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L band for Sub-6 GHz
Application. Review
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 7–23.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

For citation:

Atul R. Chaudhari, Dipak P. Patil.
Microstrip Patch Antenna in WiMAX, ISM and L band for Sub-6 GHz
Application. Review
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):7–23.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-7-23

1. Introduction

In the modern era, the prominent increase of wireless devices, insufficient bandwidth and limited channel capacity has substantially promoted efforts to develop advanced standards for communication networks. Consequently, the development of next generation means much better channel capacity and higher data rates. As the demand for capacity in mobile broadband communications grows year after year, wireless carriers must be prepared to support a thousand-fold increase in total mobile traffic by 2020, necessitating researchers to seek greater capacity and new wireless spectrum beyond the 4G standard [1].

5G technologies not only provides greater reliability, higher data rates up to 20 Gbps and reduced power consumption to meet the massive increase in connected devices but also promises to increase the visions of emerging technologies such as virtual reality and smart cities [2]. According to wireless network statistics, global mobile traffic increased by around 70 % [3]. In 5G to increase the data rate, utilizing the frequency bands with wider channel bandwidth are been considered in future mobile communication [4]. The antennas are playing the vital role requiring cellular connectivity with high-speed and large quantity data transferring capabilities to demonstrate superior performance and are designed to meet the reliability needs of the applications, to satisfy the requirements. The antenna must adhere to specific standards approved by regulatory organizations like the European Telecommunications Standards Institute in order to operate across a given frequency range and the Federal Communications Commission of the United States [5].

While designing antennas certain parameters to be considered. Antenna parameters can be classified mainly into two categories. Radiation characteristics are critical for antenna design, system performance analysis, interference mitigation, antenna selection, and signal reception and transmission optimization. Electrical parameters give important information about an antenna's performance, impedance matching, efficiency, and noise characteristics, to ensure efficient power transmission, minimize signal reflections, improve signal quality, optimize system performance, reduce interference, and enhance the overall communication system effectiveness, the major focus in 5G technology are data throughput, forward error correction, access technology, latency, spectrum efficiency, and connection reliability. 5G is

a global wireless network standard that succeeds 4G. The fifth-generation (5G) communication system is a promising technology that fulfils the increasing requirements of data rates and also enables its integration with various services [6]. The rapid increase of mobile data growth and the use of smart phones are creating unprecedented challenges for wireless service providers to overcome a global bandwidth shortage, to meet the future's fast expanding traffic demands, 5G systems should be able to provide considerable improvements in cell capacity and boost user data rates [7].

2. Towards Sub-6 GHz

The 5G network is not only limited to smart phones but it is also used in robots, agriculture, machines, smart cars, medical applications, and several other things. 5G able to provide immediate and real-time access to data. The time required for information process is comparatively faster than 4G. 5G technology covers the low, mid, and high bands. Low band covers less than 1 GHz, mid-bands covers 1 GHz to 6 GHz is considered as a Sub-6 GHz wireless bands. Finally, high bands are referred as millimeter wave (mm-Wave). Implementation of mm-wave devices is expensive as mm wave are high-frequency waves, they can only cover very short ranges, A Sub-6 GHz (mid band) is the main focus of researchers, the Sub-6 GHz, as it has a lower frequency range, is limited in terms of speed, in comparison of mm wave, but offers a longer range which makes it more suitable for real-world implementation. The Sub-6 GHz band is separated into various frequency bands, each with its own set of applications such as cellular networks, Wi-Fi, Bluetooth, and other wireless communication technologies. the most regularly utilised Sub-6 GHz frequency bands are, 700 MHz Band, frequencies in this band range from 698 MHz to 806 MHz and are widely utilised for cellular networks, including 4G LTE and 5G deployments. The 800 MHz band, which ranges from 824 MHz to 894 MHz, is widely utilized for cellular services in many parts of the world. 900 MHz Band, this band, which has frequencies spanning from 890 MHz to 960 MHz, is used for a variety of applications such as cellular networks, RFID, and industrial wireless systems. The 2.4 GHz band is commonly used for Wi-Fi, Bluetooth, and other short-range wireless communication technologies, with frequencies rang-

ing from 2.4 GHz to 2.4835 GHz. In 5 GHz Band, frequencies range from 5.150 GHz to 5.925 GHz and are used for Wi-Fi networks, particularly in the 5 GHz Wi-Fi protocols (802.11a/n/ac/ax). The 5.8 GHz band, which ranges from 5.725 GHz to 5.875 GHz, is extensively used for wireless communication systems such as Wi-Fi and point-to-point microwave communications. Bandwidth is the key parameter to enhancing capacity and data rates in wireless communication [8]. To achieve the higher data rates higher bandwidth is required [9]. WiMax has three allocated frequency bands. The low band (2.5–2.8 GHz), the middle band (3.2–3.8 GHz) and the upper band (5.2–5.8 GHz) [10], which lies in the Sub-6 GHz bands. The features of high data rate, higher mobility and multi-device connectivity, WiMAX technology is extensively used [11]. Industrial, scientific and medical (ISM) 5G Sub-6 GHz band, particularly at the frequency of 3.5 GHz. L-band refers to the operating frequency range of 1–2 GHz in the radio spectrum. The L band is one of the chief operating ranges used by various applications such as radars, global positioning systems (GPS). Researchers have proposed many kinds of antennas for WiMAX, 2.45 GHz ISM-band and 3.5 GHz 5G Sub-6 GHz band. Sub-6 GHz has ushered in a new era of connectivity and innovation, enabling cloud computing, smart traffic systems, AI services, automated industrial infrastructure, robotics, HD live streaming, virtual reality, augmented reality, space and astronomy, smart-home, and smart transportation [12]. Most antennas for lower 5G bands are either integrated with prior bands, in recent years, antennas have been studied extensively to solve the requirements that are associated with 5G antennas.

3. Antenna challenges specific to Sub-6 GHz WiMAX, ISM and L band

Practical design considerations specific to the target frequency bands and applications considerations are critical for the successful deployment and operation of wireless communication systems, some of these are.

3.1. Bandwidth enhancement

Microstrip patch antennas are typically narrow-band due to their inherent physical and operational properties that includes, high-Q factor, dielectric loading, surface wave losses. A variety of tech-

niques have been used to improve the bandwidth, such as cutting slots inside the patch [13], employing aperture coupled feeding network [14], building shorting walls [15], applying parasitic strips around the patch [16], hybrid-coupling method [17]. These approaches are effective for extending the bandwidth of microstrip patch antennas, but they introduce additional challenges in terms of miniaturization, gain, and radiation performance. Increasing substrate thickness, it introduces new issues in terms of the fringing fields at the edges of the microstrip patch are increased; it also can cause increased surface wave losses and can degrade the radiation pattern [18]. As per the Shannon capacity theorem the data rates are directly proportional to the bandwidth.

3.2. Interference and coexistence

Dealing with the possibility of interference from other users or systems operating in the same spectrum is an inherent part of operating in shared frequency bands, such as ISM bands. Techniques to reduce interference and enhance cohabitation with nearby systems should be considered during antenna design.

3.3. Integration and ompatibility

It is necessary to incorporate antennas into the overall design of the system in a seamless manner, taking into consideration aspects such as the form factor, the mounting options, and the compatibility with other components of the system, such as transceivers and radio frequency front devices.

3.4. Specific absorption rate

Specific absorption rate (SAR) is a measurement of the rate at which energy is absorbed by the human body when exposed to an electromagnetic field of radio frequency [19]. The human tissues convert the electromagnetic energy into heat which in turn causes the rise of temperature or thermal effects in the body. According to IEEE C95.1:2005, the safety limit to SAR has been set to '2'W/kg per 10 g of biological human tissue. The SAR values need to be very low as much as possible [20]. Electromagnetic radiations can have temporary as well as permanent effects on the health of human leading to most severe diseases in many cases [21]. Antenna positioning, shielding frequency selective networks techniques used to minimize the SAR value.

3.5. Miniaturization

Miniaturization of microstrip antennas is important by considering the reasons, demand for low-cost compact the electronic and radio-frequency portable devices [22], like Smartphones, tablets, and wearable technology, space constraints in many compact and lightweight applications, satellites, drones, IoT devices. It has the potential to increase their performance and usefulness; there are numerous methods to be considered in miniaturization. Use of a substrate with a high electric permittivity [23], is a most common technique, it having some limitations like decreases the bandwidth and the antenna radiation efficiency due to surface waves are excitation. Shorting wall [24], shorting pin [25], also plays an important role in miniaturization.

3.6. Multiband

Increase in demand of wireless systems and services operating at multiple frequencies, multiband antennas are designed to operate effectively in various frequency band. Interference between the different frequency bands, impedance matching and size of an antenna are the challenges [26], which can affect the performance of the antenna. Slot on radiation patch is simple technique for the multi-band operation; metamaterial-loaded antennas [27], slot stepped-impedance resonators [28], techniques help to perform at multiple bands.

3.7. Polarization

Polarization diversity can effectively improve the link quality for reducing multipath fading loss, increase the system capacity through reusing a frequency, and offer a useful polarization modulation for radio frequency identification.

3.8. Isolations

The ever-increasing demand for superior data rates, large channel capacity to provide multiple input multiple output (MIMO) technology is considered [29], the co-frequency and co-polarized antenna elements are arranged compactly, since some of their power can interact and cause interference to the nearby antennas that lowers their efficiency [30], which will degrade the performance of MIMO antennas, including dependable channel capacity, poor spatial correlation, and a high signal-to-interference-pulse-

noise-ratio [31]. The terms port-to-port isolation and cross-polarization discrimination, are generally used to measure the antenna separation with its two polarizations, cross-coupling between their two signal ports degrading antenna diversity gain [32].

4. Techniques for enhancing antenna performance in the Sub-6 GHz WiMAX, ISM and L-band

To cover the Sub-6 GHz bands, antennas with multiband capability and a large frequency ratio are of great importance, along with maintaining low profile, a steady radiation pattern, good polarization purity, bandwidth, gain, efficiency, reduction in the mutual coupling, and compact size are challenging task [33]. The purpose of ongoing research is to address these challenges.

4.1. Multi elements

A thin monolithic antenna array has been proposed for on-body applications at the 5G Sub-6 GHz band as an evolution of the traditional comb-line array. The proposed layout offers better performance in terms of efficiency and gain as well as a miniaturized footprint. The antenna is robust against positioning over the body. Furthermore, the smallest $4\text{ cm} \times 4\text{ cm} \times 0.1\text{ cm}$ configuration proved to be conformable to curved surfaces, with almost invariable input impedance and gain [34]. These can be regarded as a simplified form of Krauss' grid, where the transmission lines connecting the top of the vertical radiating pieces are eliminated, resulting in advantages in terms of bandwidth and cross-polarization level [35]. Lightweight, interoperable, and easy-to-integrate antennas. $19.5\text{ mm} \times 26.5\text{ mm}$ 1x2 array patch. Working frequency is 3.5 GHz. return loss -12.54 dB, impedance bandwidth 66.5 MHz, VSWR 1.6, gain 5.5 dB [36]. Two orthogonal dipoles that are excited with a phase shift of 90° , to radiate both RHCP & LHCP polarizations, by using a 900 hybrid couple, by adding monopole fence the antenna shows a stable gain. Circular polarized dual-band antenna for WLAN/Wi-MAX application is reported in [37]. Square patch and square ring is arranged in the antenna patch. Transmission line feed strip should be arranged diagonally to achieve both RHCP & LHCP, the circularly polarized (CP) is somewhat depends upon the feeding angle and the feeding location is observed. 8-element dual-band MIMO dual-band

8-element MIMO antenna for 5G smartphone applications has been successfully investigated antenna operating in the 5G new radio band n77, antenna efficiencies better than 53 % [38]. Multi-element antennas, such as patches or dipoles, can be configured in multiple topologies on a single substrate, including linear arrays, planar arrays, and non-uniform arrangements. To enhance bandwidth [39], gain, directivity and radiation characteristics [40].

Patch antennas are popular for their simplicity and compactness, yet they possess certain limitations. Using multiple elements in patch antenna designs is a crucial strategy for enhancing antenna performance. By appropriately configuring multiple elements and optimizing them, these antennas satisfy the increasing demands of modern communication. Table 1 summarizes the various antennas design techniques and their enhancements in antenna performance.

Table 1

Analysis of the multiple elements in patch antenna to improve the performance

Ref	Method	Findings	Research Gap
34	Array	Miniaturized array has an efficiency 6 dB higher and an area 80 % smaller	Isolation, SAR
35	Array grid	Gain-bandwidth relationship:	Cross Polarization
36	Array	Simple to integrate	Bandwidth
37	Two orthogonal dipoles excited with a 90° phase shift	CP is somewhat depends upon the feeding angle and the feeding location	Cross Polarization
38	8-element MIMO	Good reflection coefficients, antenna efficiencies	Isolation

Summary of multielement research to increase patch antenna performance

Multielements in patch antennas provide improved bandwidth, spatial diversity, and enhanced gain.

4.2. Mutual coupling reduction techniques

Generally, the decoupling methods used to suppress or weaken the currents between antenna elements, which can be realized by using metamaterials, defected ground structure (DGS) & slot/s. In other technique an additional coupling path is introduced to cancel out the coupling current between antenna elements, so high isolation will be possible using electromagnetic band gap (EBG), parasitic elements [41], decoupling networks [42] and neutralization lines [43].

4.2.1. Parasitic element

Parasitic elements in microstrip antennas positioned in such a way that they can interact with the electromagnetic fields generated by the active patch to modify the radiation pattern, impedance, and other characteristics of the antenna. To reduce mutual coupling, a parasitic element is loaded between the MIMO antenna elements [44]. By properly designing parasitic elements, the coupling between two two-element arrays was reduced. The parasitic elements positioned on both sides of the driven patch for a symmetrical geometry and better mutual coupling reduction, with the same center spacing between two elements offered the isolation of more than 20 dB [45]. Letter presents in [46] dual-polarization wideband Sub-6 GHz suspended patch antenna for 5G base station, to operate in a 3.3–3.8 GHz band for 5G base stations application. The dual port antenna consist of a parasitic patch, two modified L-probe feeds, and a vertical metal wall. The parasitic patch contributes for enhancement of impedance bandwidth and isolation. The port isolation depends on the spacing between the metal wall and the capacitive driven main patch. To create $\pm 45^\circ$ slant dual polarization for diversity, the excitation of main patch by two modified L-probe feeds. The antenna provides $|S_{11}|, |S_{22}| < -10$ dB and $|S_{11}|, |S_{22}| < -15$ dB impedance bandwidths of 45 % and 36 %, respectively, with port isolation $|S_{21}| < -30$ dB, has a gain of 8.95 ± 0.25 dBi.

4.2.2. Decoupling network

A decoupling network connected to the antenna array, reactive components (like inductors and capacitors) can be used between closely spaced antenna ports to increase isolation between them. By interconnecting the feeding lines through lumped

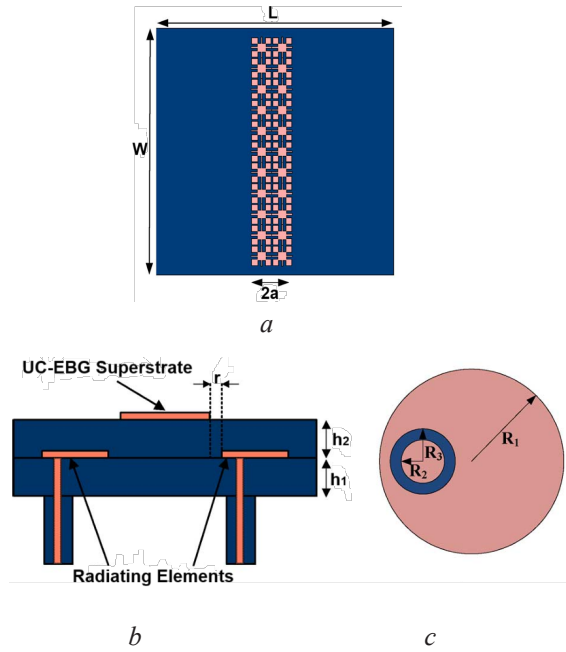


Figure 2 – Electromagnetic band gap. Superstrate based antenna for mutual coupling reduction: *a* – top view; *b* – side view; *c* – radiating element [62]

4.2.5. Neutralisation line

Neutralization line (NL) is designed such that, the current by NL is out of phase with the coupling current so these currents cancel each other. By addition of NL on the MIMO antenna can be helpful in achieving miniaturisation and compactness [64]. A printed dual-antenna decoupled by three NLs operating at the GSM1800, GSM1900, UMTS, LTE2300, LTE2500, and 2.4-GHz WLAN bands, the measured mutual coupling between the two antenna elements is lower than -15 dB, diversity gains of nearly 10 dB [65].

When working with multi-element patch antennas, you need to know how to lower mutual coupling. By making sure that the elements work separately, these techniques improve the antenna's gain, bandwidth, and efficiency, making it work better in communication systems. There are different techniques to lower the mutual coupling between the elements; their findings and gaps are listed in Table 2.

Table 2

Analysis of the techniques used to reduce mutual coupling in patch antenna

Ref	Method	Findings	Research gap
44	Parasitic element	A dual-band MIMO antenna ECC <0.001	Isolation improvement
45	Parasitic element	Two MIMO antennas, isolation of more than 20 dB	Bandwidth
48	Decoupling network	Through lumped capacitors, feeding lines can be connected to compensate mutual coupling	Gain
49	Decoupling network	Co-polarization isolation of the antenna array was improved by 24 dB isolation at 3.6 GHz	Bandwidth
50	Decoupling network	Coupling reduced to below -58 dB	Return loss
53	DGS	Rogers RT5880 substrate, reflection coefficient of -52.06 dB	Gain
54	Parasitic strips	Corner capacitive coupling elements for matching purpose, 201 MHz bandwidth WiMAX band	Bandwidth
56	DGS	Designed on a Rogers RT5880 for WiMAX band, bandwidth of 2.56 GHz, DGS is used for improvement of radiation properties	Gain
58	DGS, array	Operating at 5.8 GHz (ISM band), size @ 30 %.	Gain
62	EBG	Minimize element separation and mutual coupling, Mutual coupling between patch antennas can indeed affect their directivity	Bandwidth
65	Neutralization lines	Operates at 2.4 GHz band with bandwidth of 1.3 GHz, mutual coupling is lower than 15 dB	Gain ECC

Summary of various strategies to reduce mutual coupling

- By deliberately placing an electromagnetic field around the antenna, parasitic elements can manipulate the radiation pattern, resulting in enhanced directivity.
- Decoupling networks ensure appropriate impedance matching by isolating each element, hence preserving the impedance characteristics of each element.
- In order to suppress or enable particular frequencies to propagate, DGS create bandgaps. An antenna's operational bandwidth can be increased with the help of frequency selectivity by reducing the presence of undesirable resonances and harmonics.
- EBG structures work by introducing controlled variations in the ground plane or substrate of patch antennas, leading to improvements in mutual coupling reduction, surface wave suppression.

4.3. Slot technique

The distribution of the electric current on the patch surface is affected by the presence of slots in the patch, that alter the current path and the patch's effective length and width, that changing its resonant frequency and impedance properties, to improve the bandwidth & other parameters. The shape and size of the slot is important parameters that affect the antenna performance. There are a number of ways that have been described to increase the impedance bandwidth of printed slot antennas. The antenna bandwidth is increased by creating many fractal-shaped slots in the main slot's corners in order to achieve multiresonance behaviour [66]. A wide-slot antenna with a fractal-shaped slot is proposed, increased bandwidth is 2.4 GHz at operating frequencies around 4 GHz, also achieved a 2-dB gain [67]. Some slot antennas have a finite bandwidth that is insufficient for more applications [68]. An open slot antenna with nonsymmetric ground is used to minimise the size and to increase the bandwidth [69]. Enhancement of gain and bandwidth in a microstrip patch antenna is achieved through the incorporation of a rectangular slot in the patch and the deposition of nanomaterials in the slot area, intended for WLAN applications. The enhancement in antenna performance results from the incorporation of capacitance between the two distinct nanomaterials [70]. Several slot shapes, in addition to square, rectangular, circular, and regular forms, which includes; binomial-curved [71]. Isosceles triangular slot [72]. Ring

slot [73], have been designed to boost the bandwidth. Paper [74] presents a compact slotted patch hybrid-mode antenna for Sub-6 GHz Communication, for the microbase stations in the band 3.0–5.0 GHz with centre frequency 4.0 GHz. The proposed antenna is composed of a slotted rectangular patch, a feeding dipole, and a balun. To achieve a compact size from $0.90\lambda_0 \times 0.78\lambda_0$ to $0.48\lambda_0 \times 0.31\lambda_0$. A sequentially excitation of the three modes is used, as a patch slot and dipole share the same radiator that helps to reduce the size. The author uses the dimensions controlling techniques of strips and slots to change the field distribution of a patch antenna that helps to improve the bandwidth enhancement. The antenna provides the impedance bandwidth of 53.797 %, radiation efficiency at 4.6 GHz maximum of 90.00 %, an average antenna gain of 8.00 dBi. In [75], author implemented miniaturized dual-frequency linear polarization diversity antenna in L and WiMAX bands for IoT applications. Slot loading technique is used in patches to reduce side lobe levels which help in stabilizing the radiation patterns, the feed points are place mutually perpendicular to each other at an equal distance to achieve the better isolation and pure orthogonality. The antenna provides impedance bandwidth 200 MHz at 1.575 GHz. WiMAX band 3.4–3.6 GHz centered at 3.5 GHz. The measured return loss is -30 dB and -24 dB for lower and upper bands respt. The maximum gain in boresight direction is 3.15 dBic, and the peak gain for WiMAX band is 4.3 dBi. A square concentric slot-based octaband shared radiating aperture for both Sub-6 GHz as well as mm-wave bands antenna is presented in [76] for 1.05–1.23 GHz, 1.4–1.55 GHz, 1.9–2.3 GHz, 2.3–2.7 GHz, 3.1–3.7 GHz, 4.04–4.511 GHz, 4.83–5.2 GHz, and 5.66–6.151 GHz of Sub-6 GHz the band and the mm wave band covers 27.4–28.4 GHz for IoT application. The proposed antenna is with the bandwidth about 1 GHz. Length of the feed line plays important role in input impedance matching.

4.4. Materials

Material advancements make patch antennas more efficient, compact, and versatile. These materials have distinct magnetic properties, such as high magnetic permeability, low electrical conductivity, and the ability to operate at high frequencies, in which size and performance are critical factors. Shorting pins improve the electrical and structural properties of patch antennas, making them more efficient, compact, and capable of handling multiple

frequencies. The findings & gaps are summarized in Table 3.

Table 3

Analysis of slot, strips and metamaterial approaches employed to enhance the performance of patch antennas

Ref	Method	Findings	Research gap
66	Slots	Slots are added in the corners of the main slot improvement in bandwidth is observed	
70	Slots	Isolations 21 dB, operating frequency bands of 2.73–3.12 GHz and 4.324.68 GHz with the peak gains of 4 dBi, efficiencies 80 % with ECC <0.004	Gain
74	Strips & slots	Bandwidth of 2.36 GHz, operating frequency band of 3.0–5.0 GHz. strips and slots to modify patch antenna field distribution to enhance bandwidth	Impedance matching
80	Meta-material	MIMO antenna operates in 5.68–6.05 GHz with a peak gain of 7.98 dBi	Bandwidth

Summary slot, strips and metamaterial approaches employed to enhance the performance of patch antennas

- Slots introduce alternative resonance modes and alter the current distribution along the patch antenna, resulting in an increase in bandwidth, are utilised to manipulate and regulate the emission pattern of patch antennas.

- Metamaterials provide various benefits for patch antennas reducing their size. However, they may have restricted tunability in comparison to traditional antennas due to their fixed features that are not easily adjustable.

5. Additional methods and corresponding efforts to enhance patch antenna performance

A dual-band wideband CP microstrip antenna is proposed for Sub-6 GHz application the antenna consists of an a non-centered L-shaped radiator and two circular strips at left and right corners on

the lower ground, to achieve the right-handed circular polarization for Wi-Fi (2.4–2.48 GHz) and n77 (3.3–4.2 GHz) band to achieve the characteristics of high frequency circular polarization and broaden the axial ratio bandwidth. Two circular strips added to the ground and an asymmetric feed structure provide a 90° phase difference to achieve the high frequency circular polarization. Adjusting the dimensions and center position of the two circular strips used for the impedance matching and broaden bandwidth of the antenna [82]. A bidirectional, circularly polarized antenna with a miniaturized design in WLAN 2.4/3.65-GHz, WiMAX 2.3/2.5-GHz. The antenna consists of a hexagonal slot, a hexagonal patch, ten meander tips, and rectangular corner notches to achieve broad impedance and axial ratio bandwidth. The antenna has a –10-dB impedance bandwidth of 89.7 % (1.60–4.20 GHz) and a 3-dB axial ratio bandwidth of 70.5 % (1.80–3.76 GHz). The peak realized gain in the boresight direction is 3.65 dBi [83].

Xiaojun Tang et. al. [84]. Introduced bandwidth enhancement of a compact dual-polarized antenna for Sub-6G Hz 5G CPE, achieved better bandwidth than the cross-dipole antennas implemented in [85]. Crossed-dipoles generally exhibit narrow impedance bandwidth. To enlarge it, sometimes diamond-shaped metal dipoles are adopted [86], the ultra-wideband dual-polarized antenna for fifth generation (5G) compact antenna is investigated and designed for bandwidth enhancement by using a double-loop-dipole structure consisting pairs of perpendicularly cross-feeding structures the radiators serve as +45°/–45° polarization. The radiating structure consist of two baluns are used to excite the radiators at the top by connecting to the small semicircle loop for improvement of frequency bandwidth, the antenna consists of octagonal loop and coupled small semicircle loop etched on the top and bottom of the substrate, and the co-planar-slot feeding concept which helps to the improves the impedance matching. Antenna has a wide bandwidth of 86 % from 2.2 to 5.5 GHz with the VSWR less than 1.8, high polarization isolation of 25 dB, and stable radiation patterns over the desired frequencies of 2.3–5.2 GHz. It is best suited in impedance bandwidth improvement for Sub-6 GHz 5G applications.

Planar four-port dual circularly-polarized MIMO antenna for Sub-6 GHz Band for 3.4–3.8 GHz is implemented on the FR-4 substrate. An open slot ground plane integrated with two rectangular arms for realizing circular polarization. Opposite facing

with equal amplitude and 90° phase difference in two rectangular arms to obtain the CP. To improve the 3-dB axial ratio beamwidth I-shaped strip is used [87]. A four-port MIMO array antenna system to operate within a frequency range of 3.2–5.75 GHz to serve in 5G new radio Sub-6 GHz n77/n78/n79 and 5 GHz WLAN with high isolation between ports is introduced, uses four methods of reducing mutual coupling and compare the performances of each method, the best method is EBG because it has high isolation due to extra capacitance in the circuit [88].

Zhong Yu et al. in [89], implemented MIMO antenna with the use of decoupling mechanism, with polarization diversity for Sub-6 GHz band, consisting a pair of RHCP and LHCP. Element decoupling and position concept is used for antenna isolation, axial ratio bandwidth and for compactness, in an orthogonal connection of I and II-shaped metal strips, which realizes the circular polarization characteristics. Inter-element isolation is less than –16 dB, impedance bandwidth of 520 MHz is achieved for 3.45 GHz & envelope correlation coefficient (ECC) less than 0.07.

Insha Ishteyaq et al. [90] 8-element and orthogonally polarized annular slot element is presented for Sub-6 GHz 5G application on epoxy FR-4 substrate, to achieve the isolation between the feeding ports is by placing the antenna with split ring resonators perpendicular to the annular slots, the current density flow pattern focused to reduce the mutual coupling between the elements that helps to the improved isolation of 21 dB, in the operating frequency bands of 2.73–3.12 GHz and 4.324.68 GHz with the peak gains of 4 dBi, efficiencies around 80 % with ECC <0.004.

The antenna proposed for wireless applications in the ISM 2.5 GHz/WiMax 3.5 GHz/WLAN 5.2 GHz/ISM 5.8 GHz frequency bands for mobile communication, specifically for 4G LTE and Sub-6 GHz 5G spectrum, use the RT duroid 5870 substrate. The slots are strategically utilised to incorporate a combination of modal behaviour, effectively capturing numerous relevant frequency ranges with accurate radiation alignment. is reported in [91]. To achieve multiband antennas various techniques described in [92]. Parasitic elements patch antenna with proximity-coupled V-slotted rectangular patch implemented in [93], proposed antenna used the loading method of multiple shapes slots on the patch with slant by 45° is cut at the central region improves matching at each excited frequency and consequently improves the operating bandwidth.

Reduction in degradation of signals due to fading or multipath interferences and orientation of transmitting and reception antenna needed circular polarized antennas for satellite systems because the circularly polarized antennas are more protected to faradays rotation effect caused in ionosphere. A design of a dual circular polarized crossed-dipole antenna for L-band applications (1.1–1.6 GHz) with antenna gain and polarization purity is implemented in [94]. Patch antenna performance can be improved through a variety of methods, each focusing on a specific aspect. Each effort contributes to the development of high-performance antennas suitable for modern communication systems. These methods help to address issues such as compactness, efficiency, and multi-band operation. Table 4 contains a concise summary.

Table 4

Analysis of additional methods and corresponding efforts to enhance patch antenna performance

Ref.	Method	Findings	Re-search Gap
83	Circular strips are utilized for circular polarization	Asymmetric feed arrangement creates a 90° phase difference, bandwidth of 1.1 GHz	Band-width
86	A double-loop-dipole structure, cross-feeding structures for Sub-6 GHz of 5G applications	Bandwidth of 3.3 GHz	Gain
90	Split Ring Resonators	The current density flow pattern is designed to minimize mutual coupling and provide an isolation of 21 dB within the frequency ranges of 2.73–3.12 GHz and 4.32–4.68 GHz, with peak gains of 4 dBi	Band-width

Summary of research findings from other techniques improve the performance of patch antenna

• Strips, which function similarly to tuning stubs, are frequently utilised. Strips can increase the bandwidth of the patch antenna and aid in achieving impedance matching.

• Cross-feeding structures improve patch antenna performance by controlling radiation characteristics, permitting multiband operation, and reducing mutual coupling.

• SRRs help shrink patch antennas. The antenna structure can be lowered in size without sacrificing performance.

Table 5

Comprehensive investigation of several techniques, including their benefits and constraints

Method	Advantages	Limitations
DGS	• The antenna's operational bandwidth is increased, impedance matching and frequency coverage are enhanced and undesired resonances and harmonics are suppressed. • The performance of the array is improved in terms of the control of the radiation pattern and the efficiency – Makes it possible to construct antenna arrays that are economical and compact.	• Difficulties associated with frequency sensitivity. • In certain instances, there is a limited improvement of the bandwidth; sensitivity to the characteristics of the substrate and fabrication tolerances.
Metamaterial	• The antenna's operational bandwidth is increased; impedance matching and frequency coverage are enhanced. • Multi-band operation is made possible. • Improves antenna performance in settings with high surface wave propagation. • Increases antenna efficiency and allows for better control of radiation patterns.	• Construction can be difficult and expensive, and there is a possibility of limited bandwidth augmentation under some circumstances. • Complex design and optimization are necessary.
Parasitic element	• Gain enhancement – Beam shaping – Bandwidth adjustment. • Mutual coupling reduction.	• Requires precise positioning and sizing of elements. • Sensitivity to surrounding environment. • Additional complexity in design and tuning.
Decoupling network	Enhances the isolation of antennas and decreases the mutual coupling between elements, resulting in improved radiation efficiency and pattern shaping.	• Different frequency bands may affect decoupling network effectiveness. • Integrating the decoupling network with antenna elements while retaining compactness and structural integrity is difficult in miniaturised systems.
EBG	Reduces mutual coupling – Improves radiation pattern control – Enhances bandwidth – Size reduction.	• The design complexity of a system can be influenced by its sensitivity to fabrication tolerances. • Can result in extra losses and impedance mismatches.
Slots	The enhancement of the bandwidth, the improvement of the radiation properties. Reduction of surface waves, and the compact design.	• Optimization that is difficult to understand. • Improvement in bandwidth that is limited in some circumstances. • Sensitivity to fabrication tolerances.

Summary of the pros and cons of the approaches taken to enhance the patch antenna's performance

To successfully improve the performance of patch antennas for ISM, L and WiMAX band applications, need to know the benefits and drawbacks of each method for the frequency bands you are interested in. It is possible to achieve significant enhancements to antenna performance, by carefully choosing and integrating diverse approaches. To get the best possible performance from these methods in real-world applications across multiple frequency bands, however, problems like complicated fabrication, narrowband operation, and sensitivity to changes in the substrate must be carefully addressed.

Conclusion

This article addresses antenna performance and challenges in the Sub-6 GHz band of 5G. Identifies the microstrip antenna requirements for applications operating in the WiMAX, ISM, and L-band Sub-6 GHz bands. Authors pays particular importance on mutual coupling, wideband, radiation characteristics, and high-speed processing capability. There is a need for more compact antennas that have a high gain and wideband. Emphasizes the significant necessity of multiple input and output antennas.

References

1. Nokia Siemens Networks. (2011). 2020: Beyond 4G: Radio Evolution for the Gigabit Experience, Espoo, Finland [Online]. Available: [http://www.nokiasiemensnetworks.com/file/15036/2020-beyond-4gradio evolution-for-the-gigabit-experience](http://www.nokiasiemensnetworks.com/file/15036/2020-beyond-4gradio%20evolution-for-the-gigabit-experience).
2. Yang Z, Jianjun L, Faqiri H, Shafik W, Talal Abdulrahman A, Yusuf M, Sharawy AM. Green internet of things and big data application in smart cities development. *Hindawi Complexity*; 2021 (2021). DOI: [org/10.1155/2021/4922697](https://doi.org/10.1155/2021/4922697)
3. Cisco. Visual Networking Index. White paper, Feb. 2015 [Online]. Available: www.Cisco.com.
4. Liu D, Hong W, Rappaport TS, Luxey C, Hong W. What will 5G Antennas and Propagation Be? *IEEE Transactions on Antennas and Propaga*. 2017; 65(12):6205-6212. DOI: [10.1109/TAP.2017.2774707](https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2774707)
5. Teubner LK, Henkel J, Bekkers R. Industry consortia in mobile telecommunications standards setting: purpose, organization and diversity. *Telecommun Policy*. 2021;45(3):102059.
6. Mamta Agiwal, Abhishek Roy, and Navrati Saxena. Next Generation 5G Wireless Networks: A Comprehensive Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(3):1617-1655. DOI: [10.1109/COMST.2016.2532458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458)

7. Pi Z, Khan F. An introduction to millimeter-wave mobile broadband systems. *IEEE Commun. Mag*. 2011;49(6):101-107. DOI: [10.1109/MCOM.2011.5783993](https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783993)
8. Ikram M. Multi-Functional Antenna Structures for 4G/5G Wireless Communication Devices. Ph.D. Thesis, The University of Queensland, Brisbane, Australia, 2021.
9. Rajatheva N, Atzeni I, Bjornson E, Bourdoux A, Buzzi S, Dore JB, Erkucuk S, Fuentes M, Guan K, Hu Y, [et al.]. White paper on broadband connectivity in 6G. *arXiv* 2020, *arXiv:2004.14247*. DOI: [10.48550/arXiv.2004.14247](https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.14247)
10. Barun Mazumdar, Ujjal Chakraborty, Aritra Bhowmik, S.K.Chowdhury. Design of Compact Printed Antenna for WiMAX & WLAN Applications. *Procedia Technology*. 2012;(4):87-91. DOI: [10.1016/j.protcy.2012.05.011](https://doi.org/10.1016/j.protcy.2012.05.011)
11. Rajeshkumar V, Raghavan S. A Compact Metamaterial Inspired Triple Band Antenna for Reconfigurable WLAN/WiMAX Applications. *International Journal of Electronics and Communications (AEÜ)*. 2015;69(1):274-280. DOI: [10.1016/j.aeue.2014.09.012](https://doi.org/10.1016/j.aeue.2014.09.012)
12. Yalavarthi UD, Rukmini MSS, Madhav BT. A compact conformal printed dipole antenna for 5G based vehicular communication applications. *Progress In Electromagnetics Research C*. 2018;85:191-208. DOI: [10.2528/pierc18041906](https://doi.org/10.2528/pierc18041906)
13. Deshmukh AA, Ray KP. Compact broadband slotted rectangular microstrip antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett*. 2009;8:1410-1413. DOI: [10.1109/LAWP.2010.2040061](https://doi.org/10.1109/LAWP.2010.2040061)
14. Jia Y, Liu Y, Gong S. Slot-coupled broadband patch antenna. *Electron. Lett*. 2015;51(6):445-447. DOI: [10.1049/el.2014.3905](https://doi.org/10.1049/el.2014.3905)
15. Chi YC, Chan CH, Luk KM. Study of a small wide-band patch antenna with double shorting walls. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett*. 2004;3:230-231. DOI: [10.1109/LAWP.2004.836579](https://doi.org/10.1109/LAWP.2004.836579)
16. Wi SH, Lee YS, YookJG. Wideband microstrip patch antenna with U-shaped parasitic elements. *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2007;55(4):1196-1199. DOI: [10.1109/TAP.2007.893427](https://doi.org/10.1109/TAP.2007.893427)
17. Ray KP, Kumar G, Lodwal HC. Hybrid-coupled broadband triangular microstrip antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag*. 2003;51(1):139-141. DOI: [10.1109/TAP.2003.808541](https://doi.org/10.1109/TAP.2003.808541)
18. Balanis CA. *Antenna Theory: Analysis and Design*, 3rd ed. Hoboken, NJ, USA: Wiley Interscience, 2005.
19. Wang H, Zhang R, Luo Y, Yang G. Compact eight-element antenna array for triple band MIMO operation. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*. 2016;18(3):1617-1655. DOI: [10.1109/COMST.2016.2532458](https://doi.org/10.1109/COMST.2016.2532458)

tion in 5G mobile terminals. *IEEE Access*. 2020;8:19433-19449. **DOI:** 10.1109/ACCESS.2020.2967651

20. Ojaroudi Parchin N, Al-Yasir YIA, Ali AH, Elf-ergani I, Noras JM, Rodriguez J, Abd-Alhameed RA. Eight-element dual-polarized MIMO slot antenna system for 5G smartphone applications. *IEEE Access*. 2019;7. **DOI:** 10.1109/ACCESS.2019.2893112

21. Fields RFE. IEEE standard for safety levels with respect to human exposure to radio frequency electromagnetic fields, 3 kHz to 300GHz. *IEEE Standard*. 2005;C 95.1. **DOI:** 10.1109/IEEESTD.2006.99501

22. Colburn JS, Rahmat-Samii Y. Patch antennas on externally perforated high dielectric constant substrates. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1999;47(12):1785-1794. **DOI:** 10.1109/8.817654

23. Farhad Farzami, Keyvan Forooraghi, Majid Noroozariab. Miniaturization of a Microstrip Antenna Using a Compact and Thin Magneto-Dielectric Substrate. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2011;10:1540-1542. **DOI:** 10.1109/LAWP.2011.2181968

24. Pinhas S, Shtrikman S. Comparison between computed and measured bandwidth of quarter-wave microstrip radiators. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1988;36(11):1615-1616. **DOI:** 10.1109/8.9713

25. Waterhouse R. Small microstrip patch antenna. *Electron. Lett.* 1995;31(8):604-605.

26. Deshmukh AA, Ray KP. Multi-Band Rectangular Microstrip Antennas. *Microwave and Optical Technology Letters*. 2007;49(11):2757-2761. **DOI:** 10.1002/mop.22880

27. Cao W, Zhang B, Liu A, Yu T, Guo D, Pan X. Multifrequency and dual-mode patch antenna based on electromagnetic bandgap (EBG) structure. *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2012;60(12):6007-6012. **DOI:** 10.1109/TAP.2012.2211554

28. Chen S-W, Wang D-Y, Tu W-H. Dual-band/tri-band/broadband CPW-fed stepped-impedance slot dipole antennas. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014;62(1):485-490. **DOI:** 10.1109/TAP.2013.2287523

29. Foschini GJ. 'Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas. *Bell Labs Tech. J.* 1996;1(2):41-59. **DOI:** 10.1002/bltj.2015

30. Jensen MA, Wallace JW. A review of antennas and propagation for MIMO wireless communications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2004;52(11):2810-2824. **DOI:** 10.1109/TAP.2004.835272

31. Li X, Nie Z-P. Mutual coupling effects on the performance of MIMO wireless channels. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2004;3:344-347. **DOI:** 10.1109/LAWP.2004.840252

32. Shuhei Yamada, Debabani Choudhury, Chintan Thakkar, Anandaroop Chakrabarti, Kaushik Dasgupta, Saeid Daneshgar, and Bryce D. Horine. Cross-Polariza-

tion Discrimination and Port-to-Port Isolation Enhancement of Dual-Polarized Antenna Structures Enabling Polarization MIMO. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2019;18(11):2409-2413.

DOI: 10.1109/lawp.2019.2928257

33. Zhang JF, Cheng YJ, Ding YR, Bai CX. A dual-band shared aperture antenna with large frequency ratio, high aperture reuse efficiency, and high channel isolation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019;67(2):853-860.

DOI: 10.1109/TAP.2018.2882697

34. Cecilia Occhiuzzi, Jack D. Hughes, Francesco R. Venturi, John Batchelor, and Gaetano Marrocco. Folded Comb-Line Array for Backscattering-Based Bodycentric Communications in the 5G Sub-6 GHz Band. *IEEE Transactions on Antennas And Propagation*. 2022;70(7):6036-6041. **DOI:** 10.1109/TAP.2022.3161287

35. Zhang B and Zhang YP. Analysis and synthesis of millimeter-wave microstrip grid-array antennas. *IEEE Antennas Propag. Mag.* 2011;53(6):42-55.

DOI: 10.1109/MAP.2011.6157713

36. Irfansyah A, Harianto BB, Pambudiyatno N. Design of Rectangular Microstrip Antenna 1x2 Array for 5G Communication. *Journal of Physics*.

DOI: 10.1088/1742-6596/2117/1/012028

37. Subhrakanta Behera, Debaprasad Barad. Circular polarized dual-band antenna for WLAN/Wi-MAX application. *Int J RF and Microwave Comp Aid Eng.* 2016;1-7.

DOI: 10.1002/mmce.21046

38. Lun Cui, Jingli Guo, Ying Liu, and Chow-Yen-Desmond Sim. An 8-Element Dual-Band MIMO Antenna with Decoupling Stub for 5G Smartphone Applications. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*. 2019;18(10). **DOI:** 10.1109/LAWP.2019.2937851

39. Wang Y, Wang H, Yang G. Design of dipole beam-steering antenna array for 5G handset applications. in *Proc. Prog. Electromagn. Res. Symp.* 2016;2450-2453.

DOI: 10.1109/PIERS.2016.7735012

40. Hong W, Ko ST, Lee Y, Back KH. Compact 28 GHz antenna array with full polarization flexibility under yaw, pitch, roll motions. in *Proc. 9th Eur. Conf. Antennas Propag.*, 2015;1-3.

41. Li Z, Du Z, Takahashi M, Saito K, Ito K. Reducing mutual coupling of MIMO antennas with parasitic elements for mobile terminals. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2012;60(2):473-481. **DOI:** 10.1109/TAP.2011.2173432

42. Zou X-J, Wang G-M, Wang Y-W, Li H-P. An efficient decoupling network between feeding points for multielement linear arrays. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2019;67(5):3101-3108.

DOI: 10.1109/TAP.2019.2899039

43. Zhang S, Pedersen GF. Mutual coupling reduction for UWB MIMO antennas with a wideband neutralization line. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2016;15:166-169. **DOI:** 10.1109/LAWP.2015.2435992

44. Musa Hussain, Wahaj Abbas Awan, Esraa Musa Ali, Mohammed S. Alzaidei, Mohammad Alsharef, Dalia H. Elkamchouchi, Abdullah Alzahrani and Mohamed Fathy Abo Sree. Isolation Improvement of Parasitic Element-Loaded Dual-Band MIMO Antenna for mm-Wave Applications. *Micromachines*. 2022;13(10):2-14.
DOI: 10.3390/mi13111918
45. Huy Hung Tran and Nghia Nguyen-Trong. Performance Enhancement of MIMO Patch Antenna Using Parasitic Elements. *IEEE Access*. 2021;9:30011-30016.
DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3058340
46. Mehmet Ciydem, Emre A. Miran. Dual-Polarization Wideband Sub-6 GHz Suspended Patch Antenna for 5G Base Station. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*. 2020;19(7):1142-1146.
DOI: 10.1109/LAWP.2020.2991967
47. Fan ST, Yin YZ, Lee B, Hu W, Yang X. Bandwidth Enhancement of a Printed Slot Antenna with a Pair of Parasitic Patches. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2012;11:1230-1233. **DOI:** 10.1109/LAWP.2012.2224311
48. Hannan P, Lerner D, Knittel G. Impedance matching a phased array antenna over wide scan angles by connecting circuits. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 1965;13(1):28-34. **DOI:** 10.1109/TAP.1965.1138365
49. Mengting Yang, Changrong Liu, and Xueguan Liu. Design of π -Shaped Decoupling Network for Dual-Polarized Y-Probe Antenna Arrays. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2022;21(6):1129-1133.
DOI: 10.1109/LAWP.2022.3158991
50. Run-Liang Xia, Shi-Wei Qu, Peng-Fa Li, Qi Jiang, and Zai-Ping Nie. An Efficient Decoupling Feeding Network for Microstrip Antenna Array. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2015;14:871-874.
DOI: 10.1109/LAWP.2014.2380786
51. Khandelwal MK, Kanaujia BK, Kumar S. Defected ground structure: Fundamentals, analysis, and applications in modern wireless trends. *Int. J. Antennas Propag.* 2017;1-22. **DOI:** 10.1155/2017/2018527
52. Mishra B, Verma RK, Yashwanth N, Singh RK. A review on microstrip patch antenna parameters of different geometry and bandwidth enhancement techniques. *Int. J. Microwave and Wireless Techn.* 2021;1-22.
DOI: 10.1017/S1759078721001148
53. Rezvani M, Asadpor L, Vahedpour R. A compact dual-band microstrip monopole antenna for WiMAX and WLAN applications. *5th Iranian Conf. Eng. Electromagn.* 2017;1-4.
54. Parbat RS, Tambe AR, Kadu MB, Labade RP. Dual polarized triple band 4₄ MIMO antenna with novel mutual coupling reduction approach. in *Proc. IEEE Bombay Sect. Symp. (IBSS)*, 2015;1-6.
DOI: 10.1109/IBSS.2015.7456633
55. Hanae Elftouh, Naima A. Touhami, Mohamed Aghoutane, Safae El Amrani, Antonio Tazon, and Mohamed Boussous. Miniaturized Microstrip Patch Antenna with Defected Ground Structure. *Progress In Electromagnetics Research C*. 2014;55:25-33.
DOI: 10.2528/PIERC14092302
56. Liton Chandra Paul, Sajeeb Chandra Das, Tithi Rani, S.M. Muyeen, Sk. A. Shezan & Md. Fatin Ishraque. A slotted plus-shaped antenna with a DGS for 5G Sub-6 GHz/WiMAX applications. *Heliyon-Cell Press*. 2022;8.
DOI: 10.1016/j.heliyon.2022.e12040
57. Qiuyan Liang, Hanieh Aliakbari, Member, Buon Kiong Lau. Co-Designed Millimeter-Wave and Sub-6 GHz Antenna for 5G Smartphones. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters*. 1999;21(10):1995-1999.
DOI: 10.1109/LAWP.2022.3187782
58. Karen N. Olan-Nunez, Roberto S. Murphy-Arteaga, And Edgar Colin-Beltran. Miniature Patch and Slot Microstrip Arrays for IoT and ISM Band Applications. *IEEE Access*. 2020;8:102846-1028-102854.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998739
59. Debatosh Guha, Manotosh Biswas, and Yahia M.M. Antar. Microstrip Patch Antenna With Defected Ground Structure for Cross Polarization Suppression. *IEEE Antennas And Wireless Propag. Lett.* 2005;4:455-458. **DOI:** 10.1109/LAWP.2005.860211
60. Yang F, Rahmat-Samii Y. Microstrip antennas integrated with electromagnetic band-gap (EBG) structures: A low mutual coupling design for array applications. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2003;51:2936-2946.
DOI: 10.1109/TAP.2003.817983
61. Hitachi's Research & Development. EBG Structure. Accessed: July 13, 2023. [Online]. Available: http://www.hitachi.com/rd/portal/glossary/e/ebg_structure.html.
62. Hossein Sarbandi Farahani, Mehdi Veysi, Manouchehr Kamyab, and Alireza Tadjalli. Mutual Coupling Reduction in Patch Antenna Arrays Using a UC-EBG Superstrate. *IEEE Antenna Wireless Propag. Lett.* 2010;9:57-59. **DOI:** 10.1109/LAWP.2010.2042565
63. Martin Coulombe, Sadegh Farzaneh Koodiani, and Christophe Caloz. Compact Elongated Mushroom (EM)-EBG Structure for Enhancement of Patch Antenna Array Performances. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2010;58(4):1076-1086.
DOI: 10.1109/TAP.2010.2041152
64. Xue C-D, Zhang XY, Cao YF, Hou Z, Ding CF. MIMO antenna using hybrid electric and magnetic coupling for isolation enhancement. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2017;65(10):5162-5170.
DOI: 10.1109/TAP.2017.2738033
65. Yan Wang and Zhengwei Du. A Wideband Printed Dual-Antenna With Three Neutralization Lines for Mobile Terminals. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014;62(3):1495-1500.
DOI: 10.1109/TAP.2013.2295226

66. Eskandari H, Booket MR, Kamyab M, Veysi M. Investigation on a class of wideband printed slot antenna. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2010;9:1221-1224. **DOI:** 10.1109/LAWP.2010.2100360
67. Wen-Ling Chen, Guang-Ming Wang, and Chen-Xin Zhang. Bandwidth Enhancement of a Microstrip-Line-Fed Printed Wide-Slot Antenna With a Fractal-Shaped Slot. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2009;57(7):2176-2179. **DOI:** 10.1109/TAP.2009.2021974
68. WeiXing Liu, YinZeng Yin, WenLong Xu, and ShaoLi Zuo. Compact Open-Slot Antenna With Bandwidth Enhancement. *IEEE Antenna Wireless Propag. Lett.* 2011;10:850-853. **DOI:** 10.1109/LAWP.2011.2165197
69. Wen-Shan C, Kuang-Yuan K. Broadband design of the non-symmetric ground $\lambda/4$ open slot antenna with small size. *Microw. J.* 2007;50:110-121. **DOI:** 10.1109/APS.2006.1711123
70. Parismita A. Kashyap, Kumaresh Sarmah, Indrani Dakua, Sunandan Baruah. Gain and bandwidth enhancement of slotted microstrip antenna using metallic nanofilms for WLAN applications. *Journal of King Saud University - Science.* 2023;35(1). **DOI:** 10.1016/j.jksus.2022.102374
71. Liang XL, Denidni TA, Zhang LN, Jin RH, Geng JP, Yu Q. Printed binomial -curved slot antennas for various wideband applications. *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.* 2011;59(4):1058-1065. **DOI:** 10.1109/TMTT.2011.2113990
72. Chen WS, Hsieh FM. A broadband design for a printed isosceles triangular slot antenna for wireless communications. *Microw. J.* 2005;48(7):98-112.
73. Ma TG, TsengCH. An ultrawide band coplanar waveguide-fed tapered ring slot antenna. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2006;54(4):1105-1110. **DOI:** 10.1109/TAP.2006.872562
74. Bei Huang, Mochao Li, Weifeng Lin, Jun Zhang, Gary Zhang, and Fugen Wu. A Compact Slotted Patch Hybrid-Mode Antenna for Sub-6 GHz Communication. *International Journal of Antennas and Propagation.* 2020;2020(1). **DOI:** 10.1155/2020/8262361
75. Pruthi Kulkarni, Raju Srinivasan. Compact polarization diversity patch antenna in L and WiMAX bands for IoT applications. *International Journal of Electronics and Communications.* 2021;136:153772. **DOI:** 10.1016/j.aecue.2021.153772
76. Rifaqat Hussain. Shared-Aperture Slot-Based Sub-6-GHz and mm-Wave IoT Antenna for 5G Applications. *IEEE Internet of Things Journal.* 2021;8(13):10807-10814. **DOI:** 10.1109/JIOT.2021.3050383
77. Radisic V, Chew ST, Qian Y, Itoh T. High-efficiency power amplifier integrated with antenna. *IEEE Microw. Guided Wave Lett.* 1997;7(2):39-41. **DOI:** 10.1109/75.553052
78. Zahid L, Abu Bakar H, Abdul Rani KN, Sabapathy T, Jamlos MA, Rejab MRA, Musa KS, Hamzah D, Bahari N, Che Yob R. Artificial Magnetic Conductor to Enhance Microstrip Patch Textile Antenna Performance for WiMAX Application. 1st International Conference on Science, Engineering and Technology (ICSET) 2020. **DOI:** 10.1088/1757-899X/932/1/012076
79. Woncheol Lee, Yang-Ki Hong, Minyeong Choi, Hoyun Won, Jaejin Lee, Seong-Ook Park, Seok Bae, Hwan-Sik Yoon. Ferrite-Cored Patch Antenna With Suppressed Harmonic Radiation. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2018;66(6):3154-3159. **DOI:** 10.1109/TAP.2018.2816778
80. Robert Mark, Neha Rajak, Kaushik Mandal, Sooma Das. Metamaterial based superstrate towards the isolation and gain enhancement of MIMO antenna for WLAN application. *Elsevier International Journal of Electronics and Communications.* 2019;144-152. **DOI:** 10.1016/j.aecue.2019.01.011
81. Md. Abu Sufian, Niamat Hussain, Hussain Askari, Seong Gyoong Park, Kook Sun Shin, Nam Kim. Isolation Enhancement of a Metasurface-Based MIMO Antenna Using Slots and Shorting Pins. *IEEE Access.* 2021;9:73533-73543. **DOI:** 10.1109/ACCESS.2021.3079965
82. Zhong Yu, Leiyan Huang, Qi Gao, Bingwen He. A Compact Dual-Band Wideband Circularly Polarized Microstrip Antenna for Sub-6G Application, *Progress In Electromagnetics Research Letters.* 2021;100:99-107. **DOI:** 10.2528/PIERL21082702
83. Mason Moore ZI, Lim S. A size-reduced, broadband, bidirectional, circularly polarized antenna for potential application in WLAN, WiMAX, 4G, and 5G frequency bands. *Progress In Electromagnetics Research C.* 2021;114:1-11. **DOI:** 10.2528/PIERC21051801
84. Xiaojun Tang, Haidong Chen, Bin Yu, Wenquan Che. Bandwidth Enhancement of a Compact Dual-Polarized Antenna for Sub-6G 5G CPE. *IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters.* 2022;21(10):2015-2019. **DOI:** 10.1109/LAWP.2022.3188751
85. Ye LH, Li YJ, Wu D-L. Dual-wideband dual-polarized dipole antenna with T-shaped slots and stable radiation pattern. *IEEE Antennas Wireless Propag. Lett.* 2022;21(3):610-614. **DOI:** 10.1109/LAWP.2021.3139454
86. Bao Z, Nie Z, Zong X. A novel broadband dual-polarization antenna utilizing strong mutual coupling. *IEEE Trans. Antennas Propag.* 2014;62(1):450-454. **DOI:** 10.1109/TAP.2013.2287010
87. Shobhit Saxena, Binod Kumar Kanaujia, Santanu Dwari, Sachin Kumar, Hyun Chul Choi and Kang Wook Kim. Planar Four-Port Dual Circularly-Polarized MIMO Antenna for Sub-6 GHz Band. *IEEE Access.* 2020;8:90779-90791. **DOI:** 10.1109/ACCESS.2020.2993897
88. Amany A. Megahed, Mohamed Abdelazim, Ehab H. Abdelhay, and Heba Y.M. Soliman. Sub-6 GHz Highly Isolated Wideband MIMO Antenna Arrays. *IEEE*

Access. 2022;10:19875-19889.

DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3150278

89. Zhong Yu, Leiyan Huang, Qi Gao, Yan-ping Chen, A Compact Microstrip Four Port Dual Circularly Polarized MIMO Antenna for Sub-6G Application. Progress In Electromagnetics Research C. 2022;119:145-159. **DOI:** 10.2528/PIERC22020602

90. Insha Ishteyaq, Issmat S. Masoodi, Khalid Muzaffar. Eight-Port Double Band Printed MIMO Antenna Investigated for Mutual-Coupling and SAR Effects for Sub-6GHz 5G Mobile Applications. Progress In Electromagnetics Research C. 2021;113:111-122.

DOI: 10.2528/PIERC21050305

91. Tanmoy Sarkar, Abhijyoti Ghosh, Subhradeep Chakraborty, Singh LLK, Sudipta Chattopadhyay. Employment of mixed mode in single-layer microstrip antenna for ISM/WiMAX/WLAN/4G/Sub 6 GHz 5G mobile communication. Journal of Electromagnetic Waves

and Applications. 2020;34(7).

DOI: 10.1080/09205071.2020.1759463

92. Asadpor L, Nazari F. Two layer reconfigurable coaxial-fed antenna for S-band and GPS applications. Microw Opt Technol Lett. 2017;59(9):2141-2147.

DOI: 10.1002/mop.30691

93. Varma R, Ghosh J. Multi-band proximity coupled microstrip antenna for wireless applications. Microw Opt Technol Lett. 2018;60(2):424-428.

DOI: 10.1002/mop.30985

94. Harine Govindarajan, Santi C. Pavone, Loreto Di Donato, Paolo Di Mariano, Giuseppe Distefano, Patrizia Livreri, Prabagarane Nagaradjane, Concetto Squadrito, and Gino Sorbello. Design of a Compact Dual Circular-Polarized Antenna for L-Band Satellite Applications. IEEE Antennas And Wireless Propagation Letters. 2020;19(4):547-551.

DOI: 10.1109/LAWP.2020.2971322

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse Pumping by Linear Laser Diode Arrays

A.S. Yasukevich, V.E. Kisel

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

Received 02.12.2024

Accepted for publication 08.01.2025

Abstract

A mathematical model of a passively Q-switched solid-state laser based on ytterbium and erbium co-doped active media with transverse pumping by linear laser diode arrays has been developed. The gain in the laser is calculated using rate equations taking into account the space-time dependence of the pump radiation intensity in the laser element. The output laser characteristics, the pulse energy, the peak pulse power and the pulse duration, are calculated using analytical equations obtained for a passively Q-switched solid-state laser in the approximation of a "slow" saturable absorber. The model allows one to find the range of parameters of the active element, passive modulator, resonator, and pumping system at which the generation threshold is reached and the laser generates pulses with the required energy and duration. Modeling results were used for the experimental development of lasers with an active element based on phosphate glass doped by ytterbium and erbium ions. The energy and duration of the output light pulses were ≈ 1 mJ, ≈ 40 ns, and ≈ 2 mJ and ≈ 20 ns, depending on the content of ytterbium and erbium ions in the active element, as well as on the initial transmission of the passive modulator and the resonator parameters.

Keywords: mathematical model of a passive Q-switched solid-state laser, Yb^{3+} and Er^{3+} ions co-doped phosphate glasses, transverse laser pumping by using linear laser diode arrays

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.
НИИЦ оптических материалов и технологий, БНТУ,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.
Research Center for Optical Materials and Technologies, BNTU,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatol@bntu.by

Для цитирования:

Yasukevich AS, Kisel VE.
Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse
Pumping by Linear Laser Diode Arrays.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 24–34.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

For citation:

Yasukevich AS, Kisel VE.
Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse
Pumping by Linear Laser Diode Arrays.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):24–34.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

Моделирование лазеров на основе иттербий-эрбиевого стекла с пассивной модуляцией добротности при поперечной накачке линейками лазерных диодов

А.С. Ясюкевич, В.Э. Кисель

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

Поступила 02.12.2024

Принята к печати 08.01.2025

Разработана математическая модель твердотельного лазера с пассивной модуляцией добротности на основе активных сред со-легированных иттербием и эрбием, с поперечной накачкой линейками лазерных диодов. Усиление в лазере рассчитывается с использованием скоростных уравнений с учётом пространственно-временной зависимости интенсивности излучения накачки в лазерном элементе. Выходные характеристики лазера, энергия импульса, пиковая мощность импульса и его длительность, рассчитываются с использованием аналитических уравнений, полученных для твердотельного лазера с пассивной модуляцией добротности в приближении «медленного» насыщающегося поглотителя. Модель позволяет найти диапазон параметров активного элемента, пассивного модулятора, резонатора и системы накачки, при которых достигается порог генерации и лазер генерирует импульсы с требуемой энергией и длительностью. Результаты моделирования использованы для экспериментальной разработки лазеров с активным элементом на основе фосфатного стекла, со-активированного ионами иттербия и эрбия. Энергия и длительность выходных световых импульсов составляли ≈ 1 мДж, ≈ 40 нс и ≈ 2 мДж и ≈ 20 нс в зависимости от содержания ионов иттербия и эрбия в активном элементе, а также от начального пропускания пассивного модулятора и параметров резонатора.

Ключевые слова: математическая модель твердотельного лазера с пассивной модуляцией добротности, фосфатные стекла, со-активированные ионами Yb^{3+} and Er^{3+} , поперечная накачка лазеров линейками лазерных диодов

Адрес для переписки:

Ясюкевич А.С.
НИЦ оптических материалов и технологий, БНТУ,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: anatol@bntu.by

Address for correspondence:

Yasukevich A.S.
Research Center for Optical Materials and Technologies, BNTU,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatol@bntu.by

Для цитирования:

Yasukevich AS, Kisel VE.
Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse Pumping by Linear Laser Diode Arrays.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 24–34.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

For citation:

Yasukevich AS, Kisel VE.
Modeling of Passive Q-Switched Yb, Er Glass Lasers with Transverse Pumping by Linear Laser Diode Arrays.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):24–34.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-24-34

Introduction

Lasers based on ytterbium- and erbium-doped glasses generating nanosecond light pulses in the spectral range of 1.5 μm are of great interest for ranging, see, e.g. [1–7]. To obtain pulses with an energy of several millijoules, a transverse pumping scheme is often used with radiation from flash-lamps or laser diode arrays (LDAs). Currently, there are a number of commercially available LDAs with radiation power of several tens of watts in a spectral range matched with the absorption lines of ytterbium ions. Use of LDAs allows for reduction in the thermal load on the active element, an increase in the durability of laser operation, and creation of a more compact laser design compared to lamp analogs.

Ytterbium ions, which have intense absorption lines in the 940 nm region in phosphate glasses, absorb pump radiation and nonradiatively transfer excitation energy to erbium ions according to the scheme ${}^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{15/2}(\text{Er}^{3+}) \rightarrow {}^2F_{7/2}(\text{Yb}^{3+}) + {}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$, see Figure 1. Fast relaxation (a few microseconds) of erbium ions to the upper laser level ${}^4I_{11/2} \rightarrow {}^4I_{13/2}$ allows to reduce losses due to up-conversion from the ${}^4I_{11/2}$ level.

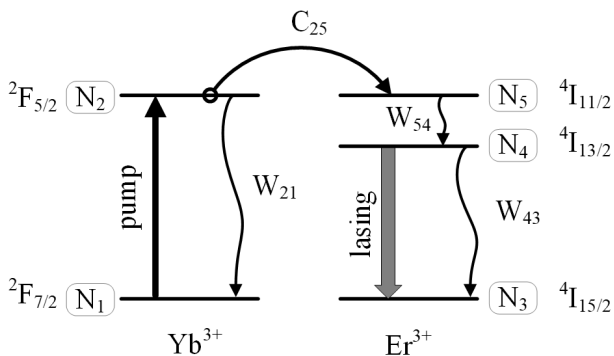


Figure 1 – Scheme of energy levels of Yb^{3+} and Er^{3+} ions involved in the process of pumping ${}^2F_{7/2} \rightarrow {}^2F_{5/2}$ and lasing ${}^4I_{13/2} \rightarrow {}^4I_{15/2}$ as well as the scheme of the excitation energy transfer ${}^2F_{5/2}(\text{Yb}^{3+}) \rightarrow {}^4I_{11/2}(\text{Er}^{3+})$. N_α is the population of the α -th energy level ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$)

$\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ (Co:MALO) crystals are widely used in solid-state lasers with passive Q-switching in the 1.5 μm spectral region as materials for saturable absorbers. Technology for their growth is well developed, and the spectroscopic characteristics have been studied in detail [8]. Therefore, for lasers under consideration, thin plane-parallel plates of Co:MALO were used as passive modulators.

Efficiency of a transverse pumped laser depends largely on matching of the volume of the lasing mode

and the volume of the active medium in which the gain is created using pump radiation. As a rule, the laser cavity is designed so that the spatial distribution of the lasing intensity is close to the TEM_{00} mode. As for the spatial distribution of the pump radiation in the active medium, the situation is more complicated. This distribution depends significantly on the relative position of the active element and the LDAs, geometry of the active element, presence of a focusing system, and other factors. Many works are devoted to studying characteristics of transverse pumped solid-state ytterbium-erbium lasers and optimizing their design, see, e.g. [3, 9–18].

One of the important areas of research into such lasers is mathematical modeling of their operation. In [14], characteristics of a passive Q-switched laser based on ytterbium-erbium glass pumped by linear LDAs were studied. The results of numerical modeling of spatial distribution of the density of the absorbed pump radiation power over the active element at different distances between the active element and LDAs are presented. In [15] and [16], mathematical models of passive Q-switched lasers based on a system of rate equations that take into account up-conversion transitions in erbium ions and the presence of "unpumped" regions in the active element were proposed. In [15], overlap of the volume in the active medium where the gain has been created with the volume of the generated radiation is taken into account in the absorbed power of the pump radiation. In a more complete model [16], the spatial distribution of the inverse population at the laser transition of erbium ions was calculated in the geometric optics approximation without focusing the radiation of linear LDAs onto the surface of the active element. Then, the inverse population was averaged over the cross-sectional area of the generated radiation mode. Active elements in the form of rectangular parallelepipeds and cylinders were considered.

In this paper, we use an approach to modeling the operation of ytterbium-erbium glass lasers with transverse pumping by linear LDAs radiation, based on the results of [19], where a number of analytical expressions were obtained for calculating the output characteristics of a passive Q-switched laser based on a quasi-three-level active medium with a "slow" saturable absorber. Here it is assumed that the relaxation time of the passive modulator, τ_{sa} , is much longer than the duration of the generated pulses, τ_l , which is quite true in our case, $\tau_{sa} \approx 300$ ns [8] and $\tau_l \approx 10 \div 50$ ns. Within the framework of the system

of rate equations with parameters depending on spatial coordinates, the time dependence of the average-weighted gain coefficient by the mode volume of the generated radiation is calculated. This allows us to check the fulfillment of threshold conditions in the laser and to determine the time delay between the start of the pump pulse and the start of the generation pulse.

2. Laser model

2.1. Scheme of the laser with transversal pumping

Scheme of a passive Q-switched, transverse pumped laser is shown in Figure 2. The generated laser radiation propagates along the Y axis, the pump radiation propagates along the Z axis.

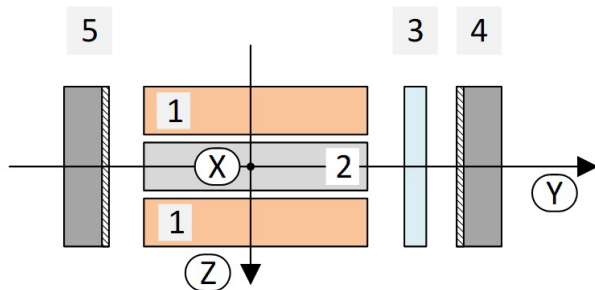


Figure 2 – Scheme of the passive Q-switched laser: 1 – the linear LDA; 2 – the active element; 3 – the passive Co:MALO modulator; 4 and 5 – the OC and HR mirrors of the resonator, respectively

Transverse pumping is carried out by uncollimated radiation beams of two linear LDAs, see Figure 3. This pumping scheme seems simpler from the point of view of practical implementation, since it does not require additional collimating optical elements.

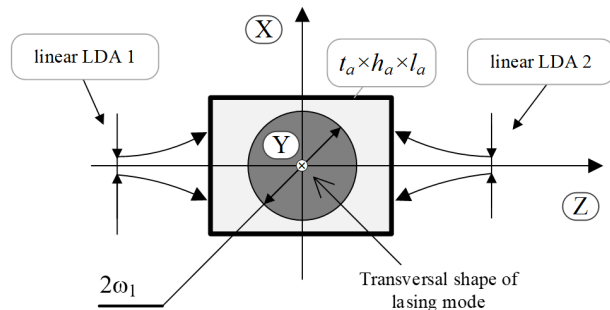


Figure 3 – General scheme of pumping without collimation of radiation of linear LDAs. t_a , h_a and l_a are the width, height and length of the active element, respectively, $2\omega_1$ is the Gaussian diameter of the fundamental mode of the generated radiation at the level of $1/e^2$

As a source of optical pumping, we will consider a linear LDA in the form of a strip with dimensions of $1\ \mu\text{m} \times 10\ \text{mm}$, emitting light at a wavelength of λ_p . The spatial characteristics of such light sources are characterized by the so-called "fast" and "slow" axes. The "fast" axis is directed perpendicular to the emitting strip, in the direction of this axis the divergence of the light beam is determined by diffraction on its aperture. Along the "slow" axis, which is directed along the emitting strip, the spatial characteristics of the pump beam are described in the approximation of geometric optics. In future calculations, the divergence of light along this "slow" axis will not be taken into account.

Calculation of the spatial distribution of pump radiation in the volume of the active medium at a certain point in time is carried out under the following assumptions:

- pump radiation beam in the XZ plane is Gaussian-like, the optical quality of the beam is described by the parameter M^2 ;
- shape of the distribution of the pump beam intensity as it propagates along the Z axis remains unchanged;
- width $\omega_p(z)$ of the pump beam along the Z axis is calculated using the ABCD method [20].

2.2. Basic equations and formulas for calculating the gain coefficient

To perform numerical calculations a grid of spatial coordinates is constructed in the volume of the active element by dividing it into planes parallel to the Y axis and perpendicular to the X and Z axes, see Figure 4, $[x, z]_{i,j} = x_i, z_j$, $i = 1 \dots N_x$, $j = 1 \dots N_z$. Here N_x and N_z are the number of partitions into layers perpendicular to the X and Z axes, respectively.

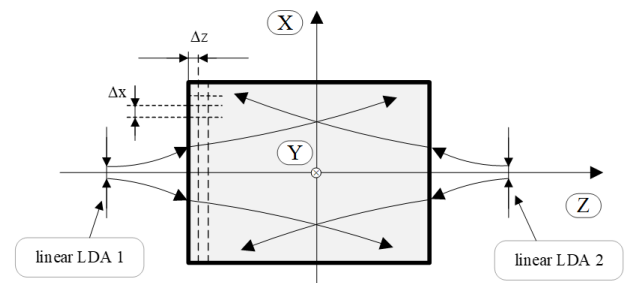


Figure 4 – Pumping scheme without collimation of radiation from linear LDAs with partition of the active element into layers parallel to the Y axis and perpendicular to the X and Z axes

Next, a time grid is constructed as a set of time moments t_k , separated by time intervals Δt ,

$k = 1 \dots N_t$, where N_t is the number of partitions of the pump pulse of duration t_p . The value of Δt is much less than the relaxation time of energy levels of ytterbium and erbium ions. The space-time grid allows one to introduce arrays of energy level populations, see Figure 1, the elements of which can be written as $[N_\alpha]_{i,j,k} = N_\alpha(x_i, z_j, t_k)$, ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$).

Let us briefly describe the algorithm for calculating the average-weighted gain coefficient by the volume of the lasing mode at different moments of time $\bar{k}_l(t_k) = [k_l]_k$ at the pumping stage. When the pump beam from the first linear LDA passes through the active element at time t_k , see Figure 4, the pump radiation intensity distribution in the volume of the active element $I_p(x_i, z_j, t_k)$ is described by the array $[I_p]$, the elements of which have the following form:

$$[I_p]_{i,j,k} = [P]_{j,k} [\Pi]_{i,j}, \quad (1)$$

where $[P]_{j,k} = P(z_j, t_k)$ is the pump power array element; $[\Pi]_{i,j} = \Pi(x_i, z_j)$ is the array element that determines the pump beam profile in the XZ plane in the active element:

$$\Pi(x_i, z_j) = \left(\sqrt{\frac{\pi}{2}} l_a \omega_p(z_j) \right)^{-1} \exp \left(-\frac{2x_i^2}{\omega_p^2(z_j)} \right). \quad (2)$$

The change in the intensity of the pump beam as it propagates along the Z axis over a distance Δz at time t_k is described by the array $[\Delta I_p]$ with elements:

$$[\Delta I_p]_{i,j,k} = -[k_p]_{i,j,k} [I_p]_{i,j,k} \Delta z, \quad (3)$$

where $[k_p]_{i,j,k} = \sigma_{abs}^p [N_1]_{i,j,k} - \sigma_{em}^p [N_2]_{i,j,k}$ is the array element of the absorption coefficient of pump radiation; σ_{abs}^p and σ_{em}^p are the absorption and stimulated emission cross sections at the pump radiation wavelength λ_p . The pump beam power in the layer with the coordinate $z_{j+1} = z_j + \Delta z$ is calculated as:

$$[P]_{j+1,k} = [P]_{j,k} + \sum_i [\Delta I_p]_{i,j,k} l_a \Delta x, \quad (4)$$

and, accordingly, the elements of the pump beam intensity array in this layer have the form:

$$[I_p]_{i,j+1,k} = [P]_{j+1,k} [\Pi]_{i,j+1}. \quad (5)$$

Thus, the array of pump radiation intensities in the volume of the active element at time t_k is calculated.

After this, the elements of the population arrays of ytterbium and erbium ions energy levels are recalculated. For this, a system of rate equations, see e. g. [21], in the form of a system of finite difference equations is used:

$$\frac{[\Delta N_2]_{i,j,k}}{\Delta t} = [k_p]_{i,j,k} [\phi_p]_{i,j,k} - W_{21} [N_2]_{i,j,k} - C_{25} [N_2]_{i,j,k} [N_3]_{i,j,k}; \quad (6)$$

$$\frac{[\Delta N_3]_{i,j,k}}{\Delta t} = -C_{25} [N_2]_{i,j,k} [N_3]_{i,j,k} + (W_{43}^0 + C[N_4]_{i,j,k}) [N_4]_{i,j,k}; \quad (7)$$

$$\frac{[\Delta N_4]_{i,j,k}}{\Delta t} = W_{54} [N_5]_{i,j,k} - (W_{43}^0 + C[N_4]_{i,j,k}) [N_4]_{i,j,k}; \quad (8)$$

$$\frac{[\Delta N_5]_{i,j,k}}{\Delta t} = C_{25} [N_2]_{i,j,k} [N_3]_{i,j,k} - W_{54} [N_5]_{i,j,k}, \quad (9)$$

where h is Planck's constant; ν_p is the pump radiation frequency; $[\phi_p]_{i,j,k} = [I_p]_{i,j,k} / (h\nu_p)$.

Meaning of quantities describing the relaxation of excited levels of ytterbium and erbium ions, as well as the excitation energy transfer between them, is explained in Figure 1. Note that the probability W_{43} of the upper laser level $^4I_{13/2}$ relaxation, is understood as the total probability, i. e. the sum of the probability of relaxation W_{43}^0 to the level $^4I_{15/2}$ and the probability of up-conversion relaxation $C[N_4]_{i,j,k}$ [6], see also equations (7) and (8).

The system of equations (6)–(9) is solved numerically, and the changed values of the elements of the ytterbium and erbium ion levels population arrays $[\tilde{N}_\alpha]_{i,j,k}$, ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$) due to the interaction with the pump radiation from one of the linear LDA over the time interval Δt are calculated as:

$$\begin{aligned} [\tilde{N}_2]_{i,j,k} &= [N_2]_{i,j,k} + [\Delta N_2]_{i,j,k}; \\ [\tilde{N}_3]_{i,j,k} &= [N_3]_{i,j,k} + [\Delta N_3]_{i,j,k}; \\ [\tilde{N}_4]_{i,j,k} &= [N_4]_{i,j,k} + [\Delta N_4]_{i,j,k}; \\ [\tilde{N}_5]_{i,j,k} &= [N_5]_{i,j,k} + [\Delta N_5]_{i,j,k}. \end{aligned} \quad (10)$$

The distribution of the pump radiation intensity from the second linear LDA is calculated using relations (1)–(5), with the difference that the populations of the ytterbium and erbium ion levels that were established after interaction with the radiation from the first linear LDA over a time interval of Δt are used, (10). Then by using equations (6)–(9) the arrays $[\Delta \tilde{N}_\alpha]_{i,j,k}$, ($\alpha = 1, 2, 3, 4, 5$) are calculated and the populations of the energy levels for the time moment $t_{k+1} = t_k + \Delta t$ are recalculated:

$$\begin{aligned} [N_2]_{i,j,k+1} &= [\tilde{N}_2]_{i,j,k} + [\Delta \tilde{N}_2]_{i,j,k}; \\ [N_3]_{i,j,k+1} &= [\tilde{N}_3]_{i,j,k} + [\Delta \tilde{N}_3]_{i,j,k}; \\ [N_4]_{i,j,k+1} &= [\tilde{N}_4]_{i,j,k} + [\Delta \tilde{N}_4]_{i,j,k}; \\ [N_5]_{i,j,k+1} &= [\tilde{N}_5]_{i,j,k} + [\Delta \tilde{N}_5]_{i,j,k}. \end{aligned} \quad (11)$$

At the initial moment of time, the values of the population arrays elements in the active element have the following values: $[N_1(t=0)]_{i,j} = N_{Yb}$, $[N_2(t=0)]_{i,j} = 0$, $[N_3(t=0)]_{i,j} = N_{Er}$, $[N_4(t=0)]_{i,j} = 0$, $[N_5(t=0)]_{i,j} = 0$, $i = 1..N_x$, $j = 1..N_z$. Here N_{Yb} and N_{Er} are the concentrations of ytterbium and erbium ions, respectively.

Elements of the upper and lower laser levels population arrays allow one to calculate the elements of the gain coefficient array of the generated radiation at the wavelength of λ_l at the time t_{k+1} :

$$[k_l]_{i,j,k+1} = \sigma_{em}^l [N_4]_{i,j,k+1} - \sigma_{abs}^l [N_3]_{i,j,k+1}. \quad (12)$$

The average-weighted gain coefficient by the volume of the generated radiation mode at time t_{k+1} is calculated as follows:

$$\bar{k}_l(t_{k+1}) = [k_l]_{k+1} = \frac{\Delta x \Delta z l_a}{V_l} \sum_{i,j} [k_l]_{i,j,k+1} [\Lambda]_{i,j}, \quad (13)$$

where $[\Lambda]_{i,j} = \exp(-2(x_i^2 + z_j^2)/\omega_l^2)$ is the Gaussian function that describes the fundamental mode of the generated radiation; $V_l = (\pi\omega_l^2 l_a)/2$ is the effective volume of the generated mode.

This algorithm allows one to calculate the average-weighted gain coefficient as a function of time, $\bar{k}_l(t_k) = [k_l]_k$, during the entire pump pulse. The gain coefficient corresponding to the end of the pump pulse will be denoted as $k_l^{\max}$.

It should be noted that the proposed algorithm for calculation the gain in the active element allows us to determine values of parameters of the active medium, resonator and pumping system at which the generation threshold is reached, which correlate well with the experimentally obtained results, see below section 3 of the article.

2.3. Equations for calculating the output characteristics of a laser

To start the formation of a single pulse in solid-state lasers with passive Q-switching, the gain coefficient must be equal to the initial coefficient of total losses in the resonator (the condition for reaching the "first threshold") [8]. In [19], it was shown that this condition can be written as $\bar{k}_l(t) = \sigma_l N_l^i$, where $\sigma_l = \sigma_{abs}^l + \sigma_{em}^l$, and the parameter N_l^i determines the volumetric average population of the upper laser level at the initial moment of formation of the laser pulse:

$$N_l^i = \frac{k_L l_a - \ln(T_0)}{\sigma_l l_a}. \quad (14)$$

Here $k_L = -[\ln(1-T_{out}) + \ln(1-L)]/(2l_a)$ is the resonator total loss coefficient; T_{out} is the output mirror transmission coefficient; L is the passive resonator loss; T_0 is the initial transmission of the saturable absorber.

In our case, the laser operates in the single pulse regime, and therefore it is sufficient that the following condition is satisfied by the end of the pump pulse to reach the "first threshold":

$$k_{\max}^l / \sigma_l > N_l^i. \quad (15)$$

Parameters of the single pulse generated by the laser, according to [19], can be calculated as follows. Laser output pulse energy:

$$E_{out} = V_l k_{act} h\nu_l \frac{1}{\sigma_l} \ln(N_l^i / N_l^f), \quad (16)$$

where $k_{act} = -\ln(1-T_{out})/(2l_a)$ is the coefficient of active loss of the resonator.

Peak power of the light pulse at the laser output is:

$$P_{out}^{peak} = V_l k_{act} \Phi_l(N_l^i). \quad (17)$$

The laser pulse duration τ_l is calculated using the formula:

$$\tau_l = E_{out} / P_{out}^{peak}. \quad (18)$$

The parameters N_l^i , N_l^f and $\Phi_l(N_l^i)$ required to calculate the laser output characteristics from (16), (17) and (18), can be found from equations (19), (20), (21) [19]:

$$\frac{N_l^f}{N_l^i} - \frac{N_l^0}{N_l^i} - \left(1 - \frac{N_l^0}{N_l^i}\right) \left(\frac{N_l^f}{N_l^i}\right)^\alpha = 0; \quad (19)$$

$$1 - \frac{N_l^f}{N_l^i} + \frac{N_l^0}{N_l^i} \ln\left(\frac{N_l^f}{N_l^i}\right) - \frac{1}{\alpha} \left(1 - \frac{N_l^0}{N_l^i}\right) \left[1 - \left(\frac{N_l^f}{N_l^i}\right)^\alpha\right] = 0; \quad (20)$$

$$\Phi_l(N_l^i) = \frac{c\mu}{n} \left[\frac{N_l^i - N_l^f - \frac{k_L l_a + \beta \ln\left(\frac{1}{T_0}\right)}{l_a \sigma_l} \ln\left(\frac{N_l^f}{N_l^i}\right)}{(1-\beta) \ln\left(\frac{1}{T_0}\right) - \frac{1}{l_a \sigma_l \alpha} \left(1 - \left(\frac{N_l^f}{N_l^i}\right)^\alpha\right)} \right], \quad (21)$$

where $\alpha = (\xi \sigma_{gs})/\sigma_l$; $\beta = \sigma_{es}/\sigma_{gs}$; $N_l^0 = (k_L l_a + \beta \ln(1/T_0))/(l_a \sigma_l)$; $\Phi_l(N_l^i)$ is the peak lasing photon flux N_l^f and N_l^i are the effective populations of the upper laser level corresponding to the peak value of the generated photon flux and the end of the generation pulse, respective-

ly; σ_{gs} , σ_{es} are the absorption cross-sections from the ground and excited states of the saturable absorber, respectively; $\xi = A_l/A_{sa}$ is the ratio of the effective area of the generation mode in the active medium and the passive modulator; c is the speed of light in vacuum; n is the refractive index of the active medium; $\mu = (nl_a)/l_{cav}$ is the filling factor of the resonator; l_{cav} is the optical length of the resonator.

3. Calculation of generation characteristics of Yb, Er phosphate glass lasers in passive Q-switch regime. Comparison with experimental data

Mathematical model of the laser proposed in this work was used in the development of passive Q-switched lasers with a phosphate glass active elements with ytterbium and erbium ions using a thin plate of Co^{2+} :MALO as saturable absorber

with transverse pumping by radiation from linear LDAs.

Geometrical dimensions of active elements are as follows length $l_a = 10$ mm, thickness $t_a = 1$ mm and height $h_a = 2$ mm. The main spectroscopic parameters of ytterbium and erbium ions in the active medium are given in Table 1.

Wavelengths of pump λ_p and laser λ_l radiation are 940 nm and 1540 nm, respectively. The absorption cross section from the ground σ_{gs} and excited σ_{es} states of the saturable absorber Co^{2+} :MALO is $\approx 4.0 \cdot 10^{-23} \text{ m}^2$ and $> 3.0 \cdot 10^{-24} \text{ m}^2$, respectively [8]. Thickness of the passive modulator is 0.5 mm. As can be seen from the presented data, $\sigma_{es} \ll \sigma_{gs}$ and $\sigma_{gs} > \sigma_{em}^l + \sigma_{abs}^l$, which means that the "second threshold" is fulfilled, when the absorption of the passive modulator is saturated firstly, and then the gain of the active medium is. This ensures the generation of a laser pulse [8].

Table 1

Spectroscopic parameters of ytterbium and erbium ions in phosphate glass

Yb ³⁺ (*)					Er ³⁺ [6]			
W_{21}, s^{-1}	$\sigma_{abs}^p, \text{m}^{-2}$	$\sigma_{em}^p, \text{m}^{-2}$	W_{43}^0, s^{-1}	$C, \text{m}^3/\text{s}$	W_{54}, s^{-1}	$C_{25}, \text{m}^3/\text{s}$	$\sigma_{abs}^l, \text{m}^{-2}$	$\sigma_{em}^l, \text{m}^{-2}$
833	$0.27 \cdot 10^{-24}$	$0.5 \cdot 10^{-25}$	125	10^{-24}	$5 \cdot 10^5$	$4.1 \cdot 10^{-22}$	$8 \cdot 10^{-25}$	$8 \cdot 10^{-25}$

(*) our measurements.

For ease of comparison of calculated results with experimental data, the radiation power P_p of the linear LDA is presented as a function of the current I_{LD} feeding the LDA:

$$P_p = KI_{LD} + B,$$

where $K = 1.25 \text{ W/A}$ and $B = -25 \text{ W}$. Current I_{LD} is measured in amperes.

Calculations by the ABCD method show that the Gaussian radius of the generated beam in the active element changes by less than 1 %. The saturable absorber was located near the active element. Therefore, this radius was constant along the length of the active element and the saturable absorber.

Figure 5 shows results of laser operation modeling with erbium and ytterbium ion concentrations in the active element $N_{\text{Er}} = 0.5 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$ and $N_{\text{Yb}} = 2.1 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$ (element "A"). The initial transmission of the passive modulator $T_0 = 95.5 \%$, the geometric length of the resonator is 90 mm, the distance from the linear LDAs to the side surfaces of the

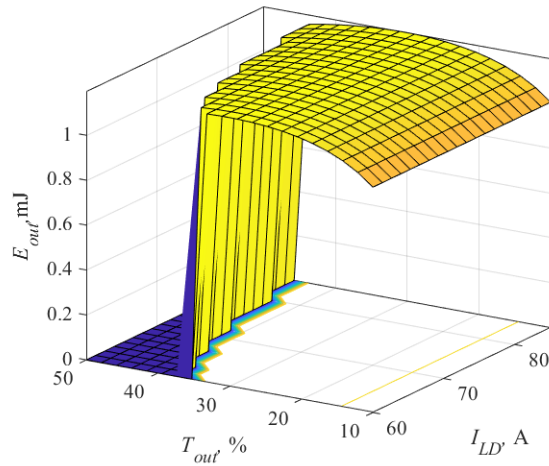
active element is 0.6 mm, the pump pulse duration is 2 ms, the Gaussian radius of the generated radiation beam is $\omega_l = 380 \text{ } \mu\text{m}$.

Table 2 presents the calculated and experimental values of E_{out} and τ_l of the passive Q-switched laser based on active element "A" at different values of the output mirror transmission and the current of the linear LDAs.

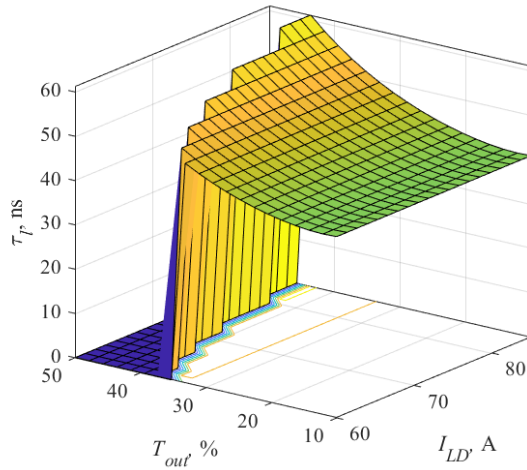
Table 2

Calculated and experimental characteristics of the laser based on the active element "A". The experimental values of the parameters are given in brackets

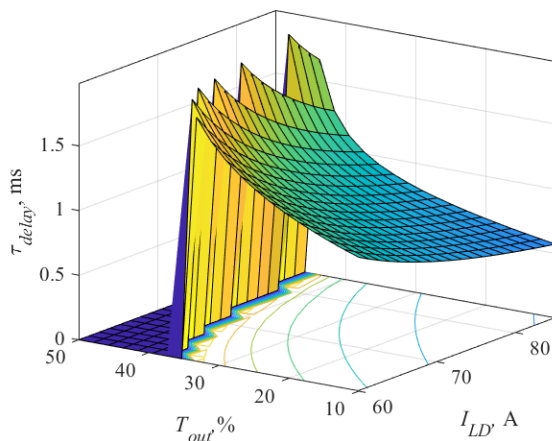
$T_{out}, \%$	I_{LD}, A	E_{out}, mJ	τ_l, ns
10	60	1.0 (1.1)	40.9 (43.4)
15	70	1.1 (1.2)	41.0 (43.3)
20	80	1.2 (1.2)	42.3 (42.6)
27.5	85	1.2 (1.4)	45.7 (41.5)



a



b



c

Figure 5 – Calculated characteristics of a laser based on the active element "A" depending on I_{LD} and T_{out} : a, b – energy E_{out} , and duration τ_l of the output pulse,

respectively; c – time delay between the start of the pump pulse and the start of the generation pulse τ_{delay}

Calculations of lasers' parameters based on active element with ytterbium and erbium ion concentrations $N_{Er} = 0.7 \cdot 10^{26} \text{ m}^{-3}$ and $N_{Yb} = 3.5 \cdot 10^{27} \text{ m}^{-3}$ (element "B") with initial transmissions of passive modulators $T_0 = 95.5 \%$ and 91.5% were also performed. The distance from the linear LDAs to the side surface of the active element is 0.7 mm , the geometric length of the resonator is 90 mm . The Gaussian radii of the generated radiation beams are given in Table 3, the pump pulse duration is 2.5 ms .

Table 3

Output characteristics of lasers with the element "B", at $T_0 = 95.5 \%$ and 91.5% . Experimental data are given in brackets

$T_0, \%$	$\omega_l, \mu\text{m}$	$T_{out}, \%$	I_{LD}, A	E_{out}, mJ	τ_l, ns
95.5	380	20	57.5	1.16 (1.05)	42.3 (43.5)
		27.5	62.5	1.19 (1.15)	45.7 (42.5)
91.5	360	20	67.5	1.9 (2.1)	21.2 (25)
		27.5	72.5	2.0 (2.2)	21.2 (23)

Figures 6 and 7 show results of lasers' modeling with the active element "B" and passive modulators with $T_0 = 95.5 \%$ and 91.5% .

Table 3 shows the results of calculations of the parameters of lasers with the active element "B" for some values of the initial transmission of the passive modulator, the transmission of the output mirror and the current of the linear LDAs in comparison with experimentally obtained data.

The graphical dependencies of the laser characteristics presented in Figure 5–7 allow one to determine the range of T_{out} and I_{LD} values at which the generation threshold is reached at a given value of T_0 . Also, from these graphs, one can determine the values of T_{out} for obtaining the maximum energy of the generated pulse or its minimum duration.

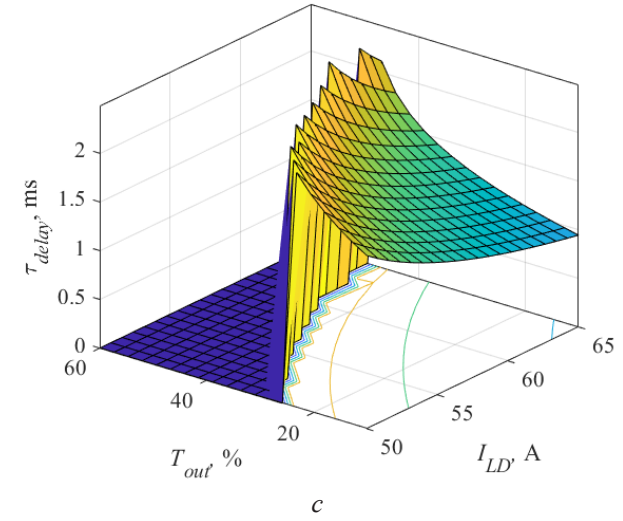
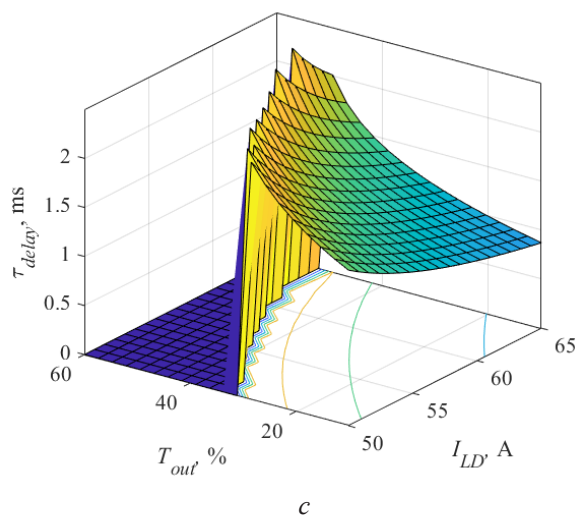
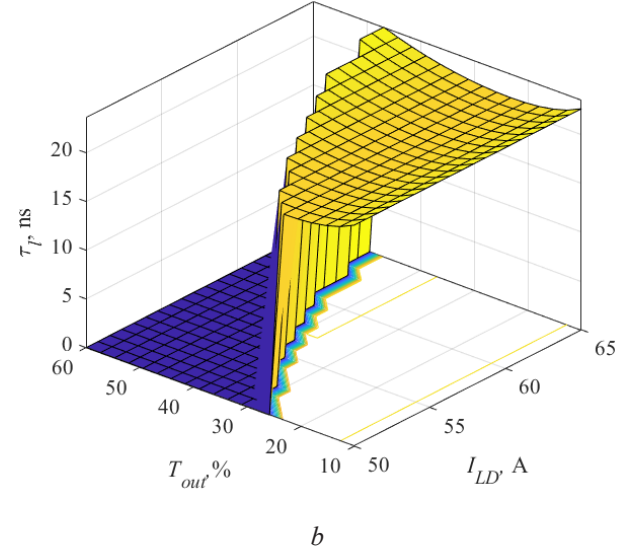
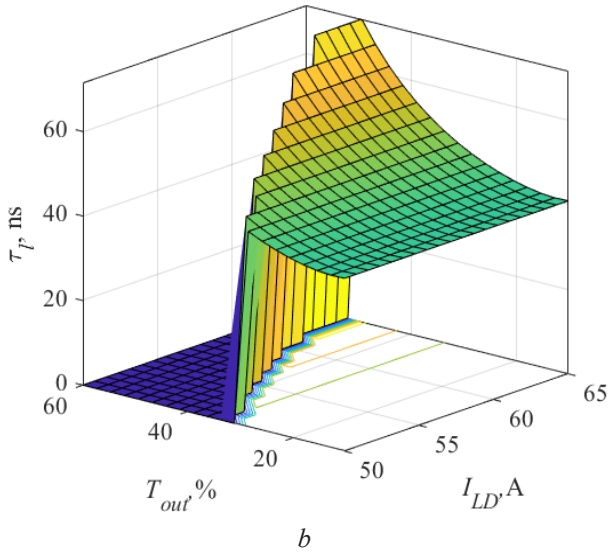
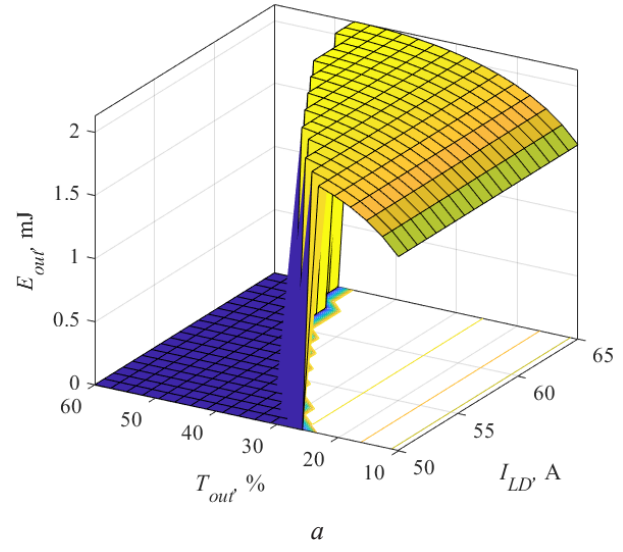
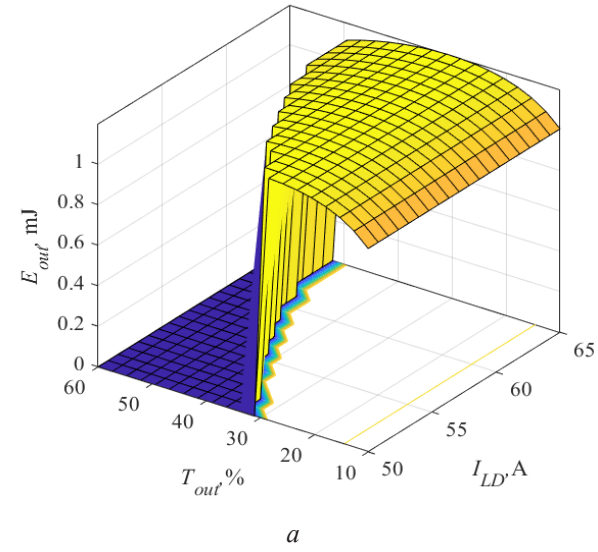


Figure 6 – Output characteristics of the laser based on the active element "B", $T_0 = 95.5\%$, depending on I_{LD} and T_{out} : a, b – energy E_{out} , and duration τ_l of the output pulse, respectively; c – time delay between the start of the pump pulse and the start of the generation pulse τ_{delay}

Figure 7 – Output characteristics of the laser based on the active element "B", $T_0 = 91.5\%$, depending on I_{LD} and T_{out} : a, b – energy E_{out} , and duration τ_l of the output pulse, respectively; c – time delay between the start of the pump pulse and the start of the generation pulse τ_{delay}

Analysis of results presented in Tables 2 and 3 shows that the calculated values of the lasers' output characteristics under study are in good quantitative agreement with the experimental data.

Conclusion

A mathematical model of a passively Q-switched solid-state laser based on ytterbium and erbium co-doped active media with transverse pumping by linear laser diode arrays has been developed. The gain in the laser is calculated using rate equations taking into account the space-time dependence of the pump radiation intensity in the laser element. Laser output characteristics are calculated using analytical equations obtained for a passively Q-switched laser in the approximation of a "slow" saturable absorber. The model allows one to find the range of parameters of the active element, passive modulator, resonator, and pumping system at which the generation threshold is reached and the laser generates pulses with the required energy and duration.

Modeling results were used for experimental development of lasers with active element based on phosphate glass doped by ytterbium and erbium ions. The energy and duration of the output light pulses were ≈ 1 mJ, ≈ 40 ns, and ≈ 2 mJ and ≈ 20 ns, depending on the content of ytterbium and erbium ions in the active element, as well as on the initial transmission of the passive modulator and the resonator parameters.

Within the framework of the developed model parameters of a laser with several active elements with different concentrations of ytterbium and erbium ions as well as with different parameters of the resonator and LDAs can be optimized to obtain generated pulses with the required energy and duration.

References

1. Mlynchak J, Kopchynski K, Mierchyk Z [et al.]. Practical application of pulsed "eye-safe" microchip laser to laser rangefinders. *Opto-Electronics Review*. 2013;21(3):332-337.
DOI: 10.2478/s11772-013-0098-2
2. Besogonov VV, Improvement of laser rangefinders with pulse energy safe for human eyes. *Measurement Techniques*. 2017;60(8):801-805.
DOI: 10.1007/s11018-017-1273-5
3. Bondarenko DA, Karasik VE, Magdich LN [et al.]. Compact diode-pumped erbium-doped laser with acousto-optic Q-modulation. *Vestnik MGTU named after N.E. Bauman, ser. Priborostroenie*. 2017;5:14-30.
DOI: 10.18698/0236-3933-2017-5-14-30
4. Gapontsev VP, Matitsin SM, Isineev AA [et al.]. Erbium glass lasers and their applications. *Optics and Laser Technology*. 1982;14(4):189-196.
DOI: 10.1016/0030-3992(82)90095-0
5. Gapontsev VP, Matitsin SM, Isineev AA. Channels of energy losses in erbium laser glasses in the stimulated emission process. *Optics Communications*. 1983;46(3-4):226-230.
DOI: 10.1016/0030-4018(83)90283-3
6. Karlsson G, Pasiskevicius V, Laurell FJ [et al.]. Diode-pumped Er-Yb:glass laser passively Q switched by use of $\text{Co}^{2+}:\text{MgAl}_2\text{O}_4$ as a saturable absorber. *Appl. Opt.* 2000;39:6188-6192.
DOI: 10.1364/AO.39.006188
7. Karlsson G, Laurell F, Tellefsen J [et al.]. Development and characterization of Yb-Er laser glass for high average power laser diode pumping. *Appl Phys B*. 2002;75:41-46.
DOI: 10.1007/s00340-002-0950-4
8. Malyarevich AM, Yumashev KV. Solid-state bleachable media. Minsk, BNTU, 2008. 204 p.
9. Koechner W. Solid State Laser Engineering, 6th ed. Springer, 2006. 750 p.
DOI: 10.1007/0-387-29338-8
10. Hutchinson JA, Allik TH. Diode array-pumped Er, Yb: Phosphate glass laser. *Applied Physics Letters*. 1992;60:1424.
DOI: 10.1063/1.107310
11. Georgiou E, Musset O, Boquillon JP. High-efficiency and high-output pulse energy performance of a diode-pumped Er:Yb:glass 1.54- μm laser. *Appl. Phys. B*. 2000;70:755-762.
DOI: 10.1007/s003400000206
12. Levoshkin A, Petrov A, Montagne JE. High-efficiency diode-pumped Q-switched Yb:Er:glass laser. *Optics Communications*. 2000;185:399-405.
DOI: 10.1016/S0030-4018(00)01012-9
13. Ryabtsev GI, Bezyazychnaya TV, Parastchuk VV [et al.]. Spectral and temporal properties of diode-pumped Er, Yb: glass laser. *Optics Communications*. 2005;252:301-306.
DOI: 10.1016/j.optcom.2005.04.036
14. Bykov VN, Izyneev AA, Sadovoi AG. Transversely diode-pumped passively Q-switched erbium glass laser emitter. *Quantum Electronics*. 2008;38(3):209-212.
DOI: 10.1070/QE2008v038n03ABEH013588
15. Ryabtsev GI, Bezyazychnaya TV, Bogdanovich MV [et al.]. Optimized diode-pumped passive Q-switched ytterbium-erbium glass laser. *Applied Physics B*. 2012;108:283-288.
DOI: 10.1007/s00340-012-5036-3

16. Ryabtsev GI, Bogdanovich MV, Grigor'ev AV [et al.]. Efficiency of laser-diode-array side pumping of a passively Q-switched erbium laser. *J. Opt. Technol.* 2015;82(9):576-581. **DOI:** 10.1364/JOT.82.000576

17. Vitkin VV, Polyakov VM, Kharitonov AA [et al.]. Side Diode Pumped Ultra-Compact Er:Glass Laser, International Conference on Photonics Solutions 2015, ed. N. Chattham, A. Pattanaporkratana, S. Chiangga, S. Sumriddetchkajorn, Proc. of SPIE. Vol. 9659, 965919. **DOI:** 10.1117/12.2195720

18. Batura EO, Bogdanovich MV, Grigor'ev AV [et al.]. Single-frequency transversally diode pumped Yb,Er-laser with passive Q-switching unit, *Journal of Applied*

Spectroscopy. 2021;88(1);48-54.

DOI: 10.1007/s10812-021-01139-x

19. Kisel VE, Yasyukevich AS, Kondratyuk NV [et al.]. Diode-pumped passively Q-switched high-repetition-rate Yb microchip laser. *Quantum Electronics.* 2009;39(11):1018-1022.

DOI: 10.1070/QE2009v039n11ABEH014151

20. Hodgson N. and Weber H. *Optical Resonators.* Springer-Verlag London. 1997:659 p.

21. Gorbachenya KN, Kisel VE, Yasukevich AS [et al.]. Monolithic 1.5 μm Er,Yb:GdAl₃(BO₃)₄ eye-safe laser. *Optical Materials.* 2019;88:60-66.

DOI: 10.1016/j.optmat.2018.11.006

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

Конструктивно-схемотехнические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения

О.В. Дворников¹, В.Н. Бахур¹, А.Г. Бахир¹, В.М. Лозовский¹, В.А. Чеховский²

¹Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь

²Институт ядерных проблем Белорусского государственного университета,
ул. Бобруйская, 11, г. Минск 220006, Беларусь

Поступила 21.11.2024

Принята к печати 03.01.2025

В радиоэлектронной аппаратуре часто необходимо оценивать уровень электрических сигналов различной формы, наиболее адекватной характеристикой которых является среднеквадратическое значение напряжения V_{RMS} . Для определения V_{RMS} предпочтительно применение преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ) на основе термоэлектрических преобразователей. Известны электрические схемы ПСКЗ с термоэлектрическими преобразователями и сформулированы рекомендации по выбору компонентов для минимизации погрешности преобразования. Однако малая величина погрешности преобразования не является единственным требованием, предъявляемым к ПСКЗ в радиоэлектронной аппаратуре. Обычно необходим поиск компромиссного сочетания набора параметров. Целью работы являлась выработка рекомендаций по схемотехническому и конструктивному синтезу ПСКЗ с разным сочетанием технико-экономических параметров. В статье приведены результаты оценки основных параметров компонентов ПСКЗ, определяющих погрешность, устойчивость к механическим и радиационным воздействиям, стоимость при малосерийном производстве. Сравнение компонентов проведено на основе экспериментальных данных и представлено в виде таблиц и графиков результатов измерений, использование которых позволяет провести синтез измерительных преобразователей напряжения с различным сочетанием технико-экономических показателей. Сформулированы конкретные рекомендации по проектированию трёх типов измерительных преобразователей: дешёвого со средним уровнем параметров, прецизионного, радиационно-стойкого.

Ключевые слова: термоэлектрический преобразователь, преобразователь переменного напряжения в постоянное, измерение среднеквадратического значения, измерение переменного напряжения

Адрес для переписки:

Дворников О.В.
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Address for correspondence:

Dvornikov O.V.
Minsk Research Instrument-Making Institute
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.
Конструктивно-схемотехнические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 35–46.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

For citation:

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA.
Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):35–46. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-45

Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis

O.V. Dvornikov¹, U.N. Bakhur¹, A.G. Bakhir¹, U.M. Lazouski¹, V.A. Tchekhovski²

¹JSC "Minsk Research Instrument-Making Institute"

Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus

²Institute for Nuclear Problems of Belarusian State University

Bobruiskaya str., 11, Minsk 220006, Belarus

Received 21.11.2024

Accepted for publication 03.01.2025

Abstract

In electronic equipment it is often necessary to estimate the level of electrical signals of various shapes, the most adequate characteristic of which is the root-mean-square value of voltage V_{RMS} . It is preferable to use alternating current-to-direct current converters by the root-mean-square value (so called RMS-DC converter) based on thermoelectric converters to determine V_{RMS} for which electrical circuits have been developed and recommendations for selecting components to minimize the conversion error have been formulated. However a small value of the conversion error is not the only requirement for the RMS-DC converters in electronic equipment. It is usually necessary to search for a compromise combination of a set of parameters. The aim of the work is to develop recommendations for the circuit and design synthesis of RMS-DC converters with different combinations of technical and economic parameters. The article presents results of the RMS-DC converter components main parameters assessing that determine the error, resistance to mechanical and radiation effects, and the cost in small-scale production. Comparison of components is carried out on the basis of experimental data, presented in the form of tables and graphs based on the results of measurements, use of which allows for synthesis of measuring voltage converters with various combinations of technical and economic parameters. Specific recommendations for selection of components for three types of measuring converters: inexpensive with an average level of parameters, precision, radiation-resistant are formulated.

Keywords: thermoelectrical converter, RMS-DC converter, RMS measurement, AC voltage measurement

Адрес для переписки:

Дворников О.В.
Минский научно-исследовательский приборостроительный институт,
ул. Я. Коласа, 73, г. Минск 220113, Беларусь
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Address for correspondence:

Dvornikov O.V.
Minsk Research Instrument-Making Institute
Ya. Kolas str., 73, Minsk 220113, Belarus
e-mail: oleg_dvornikov@tut.by

Для цитирования:

О.В. Дворников, В.Н. Бахур, А.Г. Бахир, В.М. Лозовский, В.А. Чеховский.
Конструктивно-схематические особенности синтеза измерительных преобразователей напряжения. Приборы и методы измерений. 2025. Т. 16. № 1. С. 35–46.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

For citation:

Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA.
Design and Circuitry Features of the Measuring Voltage Converters Synthesis. *Devices and Methods of Measurements*. 2025;16(1):35–46. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-35-46

Введение

В радиоэлектронной аппаратуре (РЭА) часто необходимо оценивать уровень электрических сигналов различной формы, таких как: синусоидальные или прямоугольные с постоянной составляющей, последовательности импульсов, случайные и др.

Наиболее адекватной характеристикой таких сигналов является среднеквадратическое значение напряжения V_{RMS} , для определения которого предпочтительно применение преобразователей переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения (ПСКЗ) на основе термоэлектрических преобразователей (ТЭП) [1].

В последнее время были разработаны типовые схемотехнические решения ПСКЗ и сформулированы рекомендации по выбору операционных усилителей (ОУ) и ТЭП для минимизации погрешности преобразования [1, 2]. Однако малая величина погрешности преобразования не является единственным требованием, предъявляемым к ПСКЗ. Обычно необходим поиск компромиссного

сочетания погрешности преобразования, допустимого спектра частот входного сигнала, массогабаритных параметров, стоимости изготовления при малосерийном производстве, устойчивости к внешним воздействующим факторам: температуре, проникающей радиации (ПР), механическим воздействиям.

Целью работы являлась выработка рекомендаций по конструктивному и схемотехническому синтезу ПСКЗ с разным сочетанием технико-экономических параметров.

Типовые электрические схемы

Экспериментально апробированная электрическая схема измерительного ПСКЗ приведена на рисунке 1, а особенности её работы и методика схемотехнической оптимизации подробно рассмотрены в [1, 2]. Заметим, что минимальная погрешность ПСКЗ обеспечивается при относительно больших значениях V_{RMS} , поэтому на вход (узел *in* на рисунке 1) целесообразно подавать напряжение через входной усилитель, изображенный на рисунке 2.

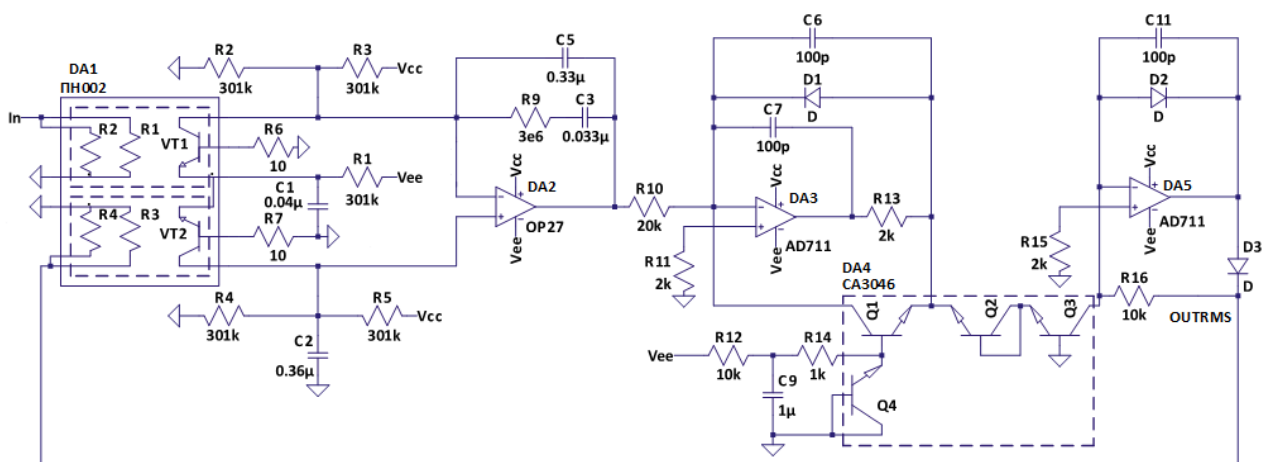


Рисунок 1 – Упрощенная электрическая схема измерительного преобразователя переменного напряжения

Figure 1 – Simplified electrical circuit of the measuring alternating current voltage converter

Показанные на рисунках 1, 2 электрические схемы могут быть применены без изменений, однако, в некоторых случаях не смогут обес-

печить требуемый уровень технико-экономических параметров разрабатываемой РЭА без правильного выбора используемых компонентов.

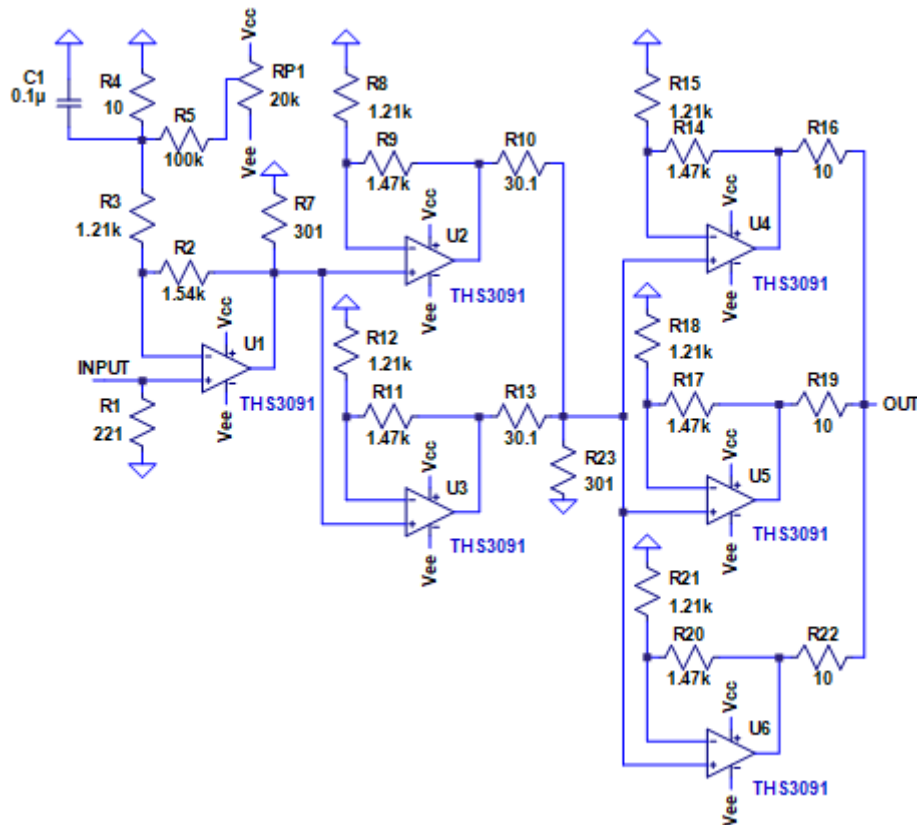


Рисунок 2 – Упрощенная электрическая схема входного усилителя

Figure 2 – Simplified electrical circuit of the input amplifier

Выбор термоэлектрического преобразователя

Термоэлектрический преобразователь DA1 на рисунке 1 содержит два одинаковых полупроводниковых кристалла, каждый из которых включает *n-p-n*-транзистор и нагревательные резисторы. В ТЭП ПН002-01, ПН002-02 имеется два поликремниевых резистора с сопротивлением 350 ± 70 Ом и 250 ± 50 Ом соответственно, в ПН002-03 – один полупроводниковый резистор с сопротивлением 300 ± 60 Ом. Кристаллы могут быть размещены на теплоизолирующей эбонитовой подложке толщиной 400 мкм в 16-ти выводном корпусе Н04.16-1, в этом случае ТЭП будет представлять собой микросхему, или на теплоизолирующей полиимидной плёнке толщиной 50 мкм при реализации ТЭП в виде микросборки [1]. Так как теплопроводность полиимидной плёнки сравнима с теплопроводностью эбонита, но толщина почти в 8 раз меньше, то рассеиваемая нагревательным резистором мощность должна в большей степени на-

гревать термочувствительный транзистор в микросборке из-за уменьшения теплоотвода от кристалла в окружающую среду.

Необходимость реализации двух конструкций ТЭП объясняется тем, что микросхемы обычно обеспечивают высокий уровень стойкости к механическим воздействиям*, а требования по стойкости к внешним воздействующим факторам микросборок устанавливаются в соответствии с техническими требованиями к конкретной РЭА и поэтому могут быть существенно ниже**,***, как показано в таблице 1. В тоже время коэффициент термоэлектрического преобразования мощности, рассеиваемой на нагревательных резисторах, в напряжение на прямосмещенном эмиттерном переходе *n-p-n*-транзистора больше для

* Микросхемы интегральные. Общие технические условия. ГОСТ 18725-83.

** Микросборки. Общие технические условия. ГОСТ 28431-90

*** Средства измерений электрических и магнитных величин. Общие технические условия. ГОСТ 22261-94.

микросборки. Статические, динамические параметры и стойкость к воздействию ПР обусловлена, в основном, характеристиками полупроводниковых кристаллов и не зависит от конструктивного исполнения ТЭП.

При выборе конкретного исполнения ТЭП следует принимать во внимание информацию, содержащуюся в таблице 2, и результаты измерений погрешности преобразования ПСКЗ на рисунках 3, 4.

Таблица 1 / Table 1

Требования к допустимым механическим воздействиям

Requirements for permissible mechanical impacts

Вид механического воздействия Type of mechanical action	Микросхемы ГОСТ 18725-83. Integrated circuits. GOST 18725-83	Микросборки ГОСТ 22261-94 Microassemblies. GOST 22261-94
– синусоидальная вибрация / sinusoidal vibration		
1) диапазон частот, Гц / frequency range, Hz	от 1 до 2000	от 10 до 150
2) амплитуда ускорения, м.с ⁻² (g) acceleration amplitude, m.s ⁻² (g)	200(20)	40(4)
– механический удар одиночного действия: single action mechanical impact		
1) пиковое ударное ускорение, м.с ⁻² (g) peak impact acceleration, m.s ⁻² (g)	1500(150)	250(25)
2) длительность удара, мс / impact duration, ms	от 0.1 до 2.0	6
– механический удар многократного действия: multiple action mechanical impact		
1) пиковое ударное ускорение, м.с ⁻² (g) peak impact acceleration, m.s ⁻² (g)	1500 (150)	500(50)
2) длительность удара, мс / impact duration, ms	от 1 до 5	3
– линейное ускорение, м.с ⁻² (g) linear acceleration, m.s ⁻² (g)	5000 (500)	–

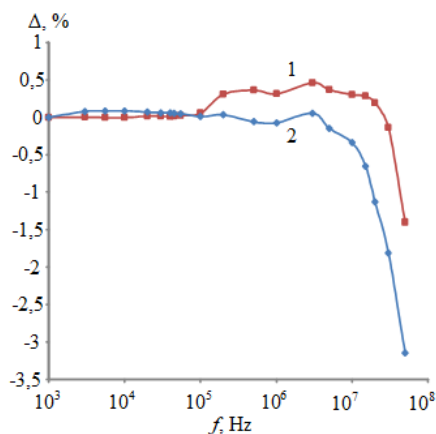


Рисунок 3 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики преобразователя переменного напряжения при использовании: 1 – термоэлектрического преобразователя варианта 1 и $V_{RMS} \approx 2$ В; 2 – термоэлектрического преобразователя варианта 3 и $V_{RMS} \approx 1,25$ В

Figure 3 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic of the alternating current voltage converter when using: 1 – thermoelectric converter option 1 and $V_{RMS} \approx 2$ V; 2 – thermoelectric converter option 3 and $V_{RMS} \approx 1,25$ V

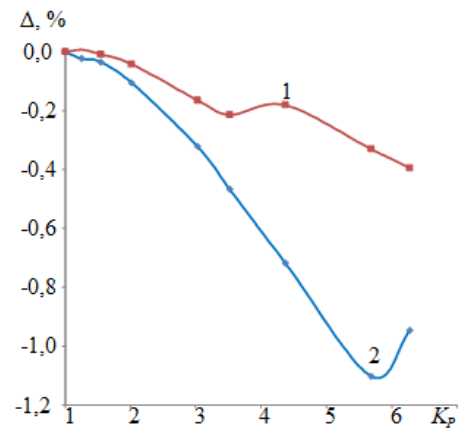


Рисунок 4 – Зависимость погрешности преобразователя переменного напряжения с термоэлектрическим преобразователем варианта 1 от коэффициента амплитуды K_p : 1 – $V_{RMS} \approx 1,2$ В; 2 – $V_{RMS} \approx 1,8$ В

Figure 4 – Dependence of the alternating current voltage converter's error with a thermoelectric converter of option 1 on the peak factor K_p : 1 – $V_{RMS} \approx 1.2$ V; 2 – $V_{RMS} \approx 1.8$ V

Таблица 2 / Table 2

Основные технико-экономические параметры термоэлектрических преобразователей

Main technical and economic parameters of thermoelectric converters

Вариант / Option	1	2	3
Тип прибора Device type	микросборка microassembly	микросхема integrated circuit	микросборка microassembly
Особенности конструкции Design features	полиимидная подложка, два параллельно соединенных поликремниевых нагревательных резистора polyimide substrate, two parallel-connected polysilicon heating resistors	эбонитовая подложка, два параллельно соединенных поликремниевых нагревательных резистора ebonite substrate, two parallel connected polysilicon heating resistors	полиимидная подложка, один полупроводниковый нагревательный резистор polyimide substrate, one semiconductor heating resistor
Сопротивление нагревательного резистора, Ом Heating resistor resistance, Ohm	146	155	328
Коэффициент термоэлектрического преобразования, мВ/мВт Thermoelectric conversion coefficient, mV/mW	3.18	3.12	2.73
Стойкость к механическим воздействиям Resistance to mechanical impacts	низкая, ГОСТ 22261-94 low, GOST 22261-94	высокая, ГОСТ 18725-83 high, GOST 18725-83	низкая, ГОСТ 22261-94 low, GOST 22261-94
Допустимая поглощенная доза гамма-излучения, Мрад Permissible absorbed dose of gamma radiation, Mrad	0.5	0.5	0.5
Ориентировочная стоимость, \$ Estimated cost, \$	82.24	22.94	82.24

Выбор операционного усилителя для измерительного преобразователя переменного напряжения

Схемотехническое моделирование ПСКЗ на рисунке 1 позволило установить, что [2]:

– наиболее значительно влияет на работоспособность и погрешность ПСКЗ при малых входных сигналах напряжение смещения нуля V_{OFF} входного дифференциального каскада на ТЭП DA1, а вторым по значимости фактором является напряжение смещения нуля ОУ интегратора DA2;

– применение конденсаторов в цепях обратной связи ОУ накладывает ограничение на допустимую величину их входного тока;

– при использовании высокоомных резисторов в коллекторах $n-p-n$ -транзисторов ТЭП DA1 следует максимально уменьшать входной ток и разность входных токов ОУ DA2.

Использование ОУ типа OP27, AD711 в схеме ПСКЗ обусловлено только их широким распространением, доступностью в приобретении и низкой стоимостью. При необходимости, вместо OP27 можно применять любой прецизионный ОУ с малым входным током и шумами, например, ADA4522, а вместо AD711 –

двухканальный ОУ с входными полевыми транзисторами, управляемыми p - n -переходом (junction field-effect transistor, JFET).

Проблемы возникают при выборе ОУ для радиационно-стойкого ПСКЗ т. к.:

- напряжение смещения нуля КМОП ОУ значительно изменяется при воздействии гамма-излучения [3]. В КМОП ОУ со стабилизацией прерыванием (chopper stabilised amplifiers) обеспечивается минимальное значение напряжения смещения нуля даже при воздействии ПР [4], однако такие ОУ характеризуются большим временем восстановления после перегрузки. Кроме того, КМОП ОУ обычно имеют повышенный уровень низкочастотного шума, значительно возрастающий при воздействии гамма-облучения;

- малые входные токи в ОУ с биполярными транзисторами часто получают либо путём применения цепей компенсации входного тока (OP27), либо при малых коллекторных токах входных транзисторов (LM158). Оба этих способа не обеспечивают сохранение малого входного тока при воздействии ПР из-за значительного падения коэффициента усиления базового тока в схеме с общим эмиттером β , кроме того, различного для n - p - n - и p - n - p -транзисторов [5, 6];

- в ОУ с входными JFET при воздействии гамма-излучения наблюдается существенное увеличение входного тока и напряжения смещения нуля. Последнее вызвано изменением напряжения отсечки входных JFET из-за влияния паразитных МОП-структур и падением коэффициента β биполярных транзисторов, соединённых с входными JFET [7–9].

С нашей точки зрения, по ряду причин при создании радиационно-стойкого ПСКЗ целесообразно применять базовый матричный кристалл (БМК) МН2ХА031.

Так, на одном кристалле этого БМК можно сформировать все элементы, показанные на рисунке 1, за исключением ТЭП, высокоомных резисторов и конденсаторов, что существенно уменьшит массогабаритные параметры ПСКЗ, причём ОУ DA2, DA3, DA5 могут быть заменены на ранее спроектированный усилитель OAmpl1.3 с входными JFET (рисунок 5), подробно рассмотренный в [10].

Как показали экспериментальные исследования уменьшение напряжения отсечки и максимального тока стока использованных во входном каскаде ОУ OAmpl1.3 двухзатворных p -JFET не превышает 5 % при поглощённой дозе гамма-излучения до 1 Мрад и флюенсе нейтронов до 10^{13} н/см² [6], что обусловлено их конструкцией с центрально расположенной областью стока, окружённой верхним затвором, малой толщиной базового окисла и формированием верхнего n^+ -затвора непосредственно через окно в базовом окисле, предельно уменьшающем влияние паразитных МОП-структур на параметры p -JFET. Более того, соединение с входом ОУ только верхних затворов уменьшает входной ток почти в 10 раз при незначительном ухудшении других характеристик, как показано в таблице 3, а возросший при воздействии ПР входной ток всё равно существенно меньше входного тока OP27 в нормальных условиях.

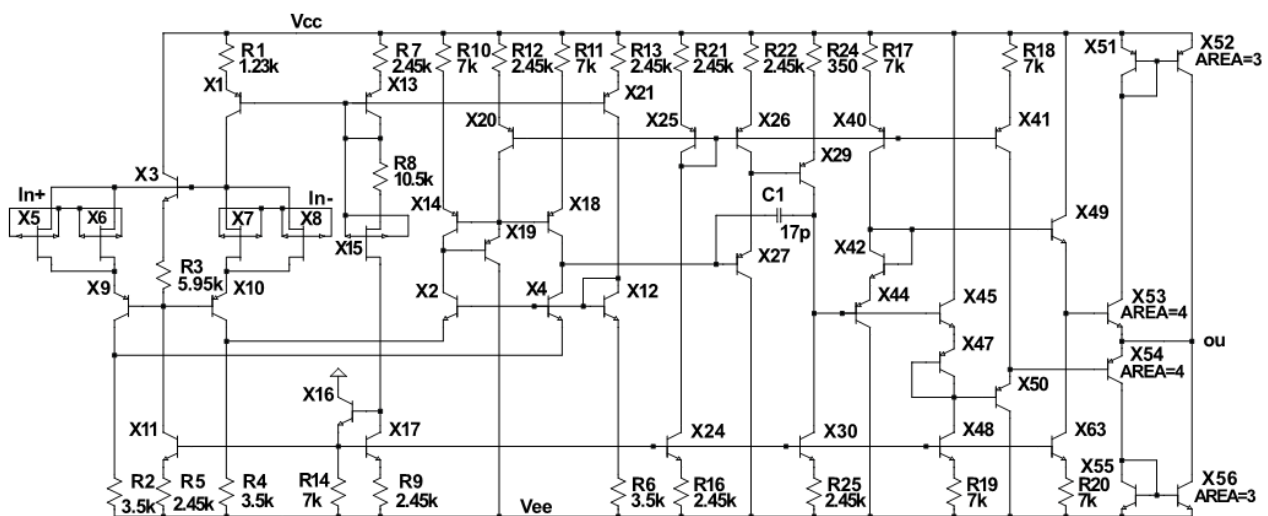


Рисунок 5 – Электрическая схема операционного усилителя OAmpl1.3

Figure 5 – Electrical circuit of the OAmpl1.3 operational amplifier

Таблица 3 / Table 3

Основные технико-экономические параметры операционных усилителей, предназначенных для преобразователя переменного напряжения и входного усилителя

Main technical and economical parameters of operational amplifiers intended for the alternating current voltage converter and input amplifier

Наименование параметра Parameter name	OАmp 11.3	OАmp 11.31*	OP27A/E	AD711C	THS3091	THS3491
Ток потребления в режиме холостого хода, мА Current consumption in idle mode, mA	2.304	2.873	4.7	2.8	9.5	17.3
Напряжение смещения нуля, мкВ Input offset voltage, uV	123	55	25	250	3000	2000
Входной ток Input bias current	34.7 пА 34.7 pA	4.1 пА 4.1 pA	±40 нА ±40 nA	25 пА 25 pA	15 мкА 15 uA	5 мкА 5 uA
Частота единичного усиления, МГц Unity gain frequency, MHz	3.84	2.85	5.0	3.4	675	320
Спектральная плотность напряжения шума, отнесенная ко входу при $f = 1$ кГц, нВ/Гц ^{0.5} Input voltage noise, at $f = 1$ kHz, nV/Hz ^{0.5}	8.24	11.58	3.8	16.0	2.0	1.7
Стоимость, \$ Cost, \$	16.6**	16.6**	1.99	3.67	21.71	45.86
Допустимая поглощенная доза гамма-излучения, Мрад Permissible absorbed dose of gamma radiation, Mrad	1.0	1.0	0.05	0.05	>1.0	>1.0

Примечание:

*OАmp 11.31 представляет собой усилитель OАmp 11.3, у которого со входом соединены только верхние затворы двухзатворных р-JFET.

** С учетом изготовления минимально возможной партии из 3-х полупроводниковых пластин

Note:

*OАmp 11.31 is an OАmp 11.3 amplifier with only the top gates of the dual-gate *p*-JFETs connected to the input.

** Taking into account the production of a minimum possible batch of 3 semiconductor wafers.

О радиационной стойкости ОУ OАmp11.3, нейтронов F_N , оказывающих более сильное влияние на параметры ОУ, чем облучение моделирования их передаточной характеристики (рисунки 6, 7) при разных флюенсах гамма-квантами с поглощённой дозой 1 Мрад.

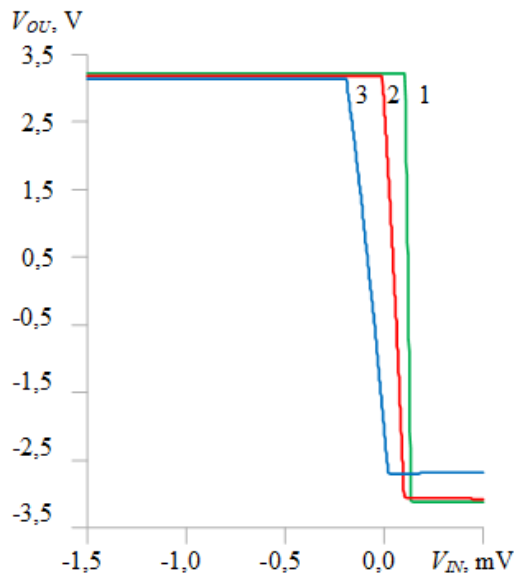


Рисунок 6 – Зависимость выходного напряжения V_{OU} от входного V_{IN} OAmpl1.3: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 122 \text{ мкВ}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 53 \text{ мкВ}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -67 \text{ мкВ}$

Figure 6 – Output voltage V_{OU} versus input V_{IN} of operational amplifier OAmpl1.3: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 122 \text{ uV}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 53 \text{ uV}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -67 \text{ uV}$

Как следует из результатов моделирования, оба усилителя OAmpl1.3, OAmpl1.31 обеспечивают работоспособность ПСКЗ при поглощённой дозе гамма-излучения, равной 1 Мрад, и воздействии флюенса нейтронов $F_N = 1 \cdot 10^{13} \text{ н/см}^2$.

Выбор операционного усилителя для входного усилителя

Главными требованиями, предъявляемыми к входному усилителю, являются обеспечение малой нелинейности амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), желательно менее 1 %, в полосе частот синусоидального сигнала до 50 МГц и размаха выходного сигнала 12 В при работе на нагрузку около 150 Ом.

Для обеспечения указанных требований экспериментально исследовались несколько вариантов входных усилителей с разными ОУ и коэффициентами усиления K_V , работающих на нагрузку 150 Ом:

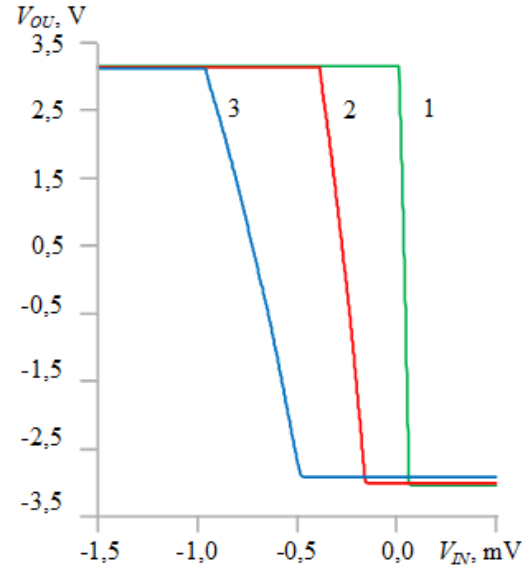


Рисунок 7 – Зависимость выходного напряжения V_{OU} от входного V_{IN} OAmpl1.31: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 41 \text{ мкВ}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -254 \text{ мкВ}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -684 \text{ мкВ}$

Figure 7 – Output voltage V_{OU} versus input V_{IN} of operational amplifier OAmpl1.31: 1 – $F_N = 3 \cdot 10^{12} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = 41 \text{ uV}$; 2 – $F_N = 3 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -254 \text{ uV}$; 3 – $F_N = 5 \cdot 10^{13} \text{ см}^{-2}$, $V_{OFF} = -684 \text{ uV}$

– однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2;

– трёхкаскадный усилитель с $K_V \approx 10$ на THS3091AR2 с тремя параллельно соединёнными микросхемами на выходе;

– однокаскадный усилитель с $K_V \approx 4,5$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3491AR2;

– двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе.

Результаты измерений АЧХ выходных усилителей разных вариантов показаны на рисунках 8, 9.

Сравнение нелинейности АЧХ в полосе частот, количества применяемых ОУ, тока потребления ОУ и их цены, приведённых в таблице 3, позволяет разработать входной усилитель с требуемым сочетанием параметров.

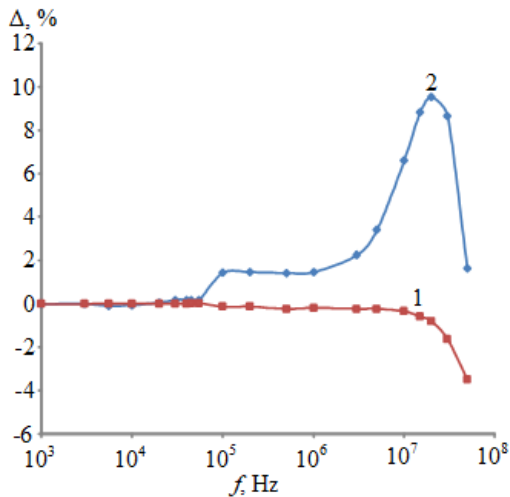


Рисунок 8 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики: 1 – усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2; 2 – трёхкаскадный усилитель с $K_V \approx 10$ на THS3091AR2 с тремя параллельно соединёнными микросхемами на выходе

Figure 8 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic: 1 – amplifier with $K_V \approx 2$ on two parallel-connected THS3091AR2 microcircuits; 2 – three-stage amplifier with $K_V \approx 10$ on THS3091AR2 with three parallel-connected microcircuits at the output

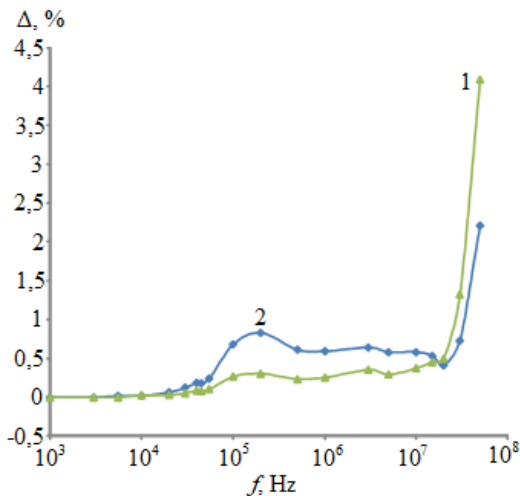


Рисунок 9 – Нелинейность амплитудно-частотной характеристики: 1 – усилитель с $K_V \approx 4,5$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3491AR2; 2 – двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе

Figure 9 – Nonlinearity of the amplitude-frequency characteristic: 1 – amplifier with $K_V \approx 4.5$ on two parallel-connected THS3491AR2 microcircuits; 2 – two-stage amplifier with $K_V \approx 8$ on THS3491AR2 with two parallel-connected microcircuits at the output

Таким образом, возможны различные сочетания компонентов в зависимости от требуемых технико-экономических показателей ПСКЗ, из которых в качестве основных можно выделить:

- для дешевого ПСКЗ со средним уровнем параметров целесообразно применять схему, показанную на рисунке 1, с ОУ OP27, AD711, входной однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2 и микросхему ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом;

- для ПСКЗ с высоким уровнем параметров в схеме рисунка 1 следует использовать ОУ ADA4522, а также входной двухкаскадный усилитель с $K_V \approx 8$ на THS3491AR2 с двумя параллельно соединёнными микросхемами на выходе и микросборку ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом;

- в радиационно-стойком ПСКЗ рекомендуется все возможные элементы схемы рисунка 1 реализовать на БМК МН2ХА031 с использованием трехканального ОУ OАmp 11.31, применять входной однокаскадный усилитель с $K_V \approx 2$ на двух параллельно соединённых микросхемах THS3091AR2 и микросхему ТЭП с суммарным сопротивлением поликремниевых нагревательных резистора около 150 Ом.

Заключение

Для типовой схемы измерительного преобразователя переменного напряжения в постоянное, содержащего термоэлектрический преобразователь, и его входного усилителя выполнена оценка основных параметров применяемых компонентов, определяющих погрешность, устойчивость к механическим и радиационным воздействиям и стоимость при малосерийном производстве.

Сравнение компонентов проведено на основе экспериментальных данных, представлено в виде таблиц и графиков результатов измерений, использование которых позволяет провести синтез измерительных преобразователей напряжения с различным сочетанием технико-экономических показателей.

Сформулированы конкретные рекомендации по выбору компонентов для трёх типов

измерительных преобразователей: дешёвого со средним уровнем параметров, прецизионного, радиационно-стойкого.

Список использованных источников

1. Дворников О.В. Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока / О.В. Дворников [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2024. – Т. 15. – № 3. – С. 174–185.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

2. Галкин Я.Д. Прецизионный преобразователь переменного напряжения в постоянное по уровню среднеквадратического значения / Я.Д. Галкин, О.В. Дворников, В.А. Чеховский // Доклады БГУИР. – 2024. – Т. 22. – № 1. – С. 30–38.

DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

3. Benson R. Characterization and Analyses of Rad-Hard-by-Design CMOS Quad Operational Amplifiers / R. Benson, P. Resch, R. Milanowski // 2013 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), San Francisco, CA, USA. – 2013. – Pp. 1–7.

DOI: 10.1109/REDW.2013.6658185

4. Agarwal V. A comparative study of gamma radiation effects on ultra-low input bias current linear circuits under biased conditions / V. Agarwal, V.P. Sundarsingh, V. Ramachandran // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 2005. – Vol. 52. – No. 2. – Pp. 510–518.

DOI: 10.1109/TNS.2005.846872

5. Myers B. ELDRS Characterization up to 100 krad of Texas Instruments' Dual Amplifier LM158 / B. Myers, K. Kruckmeyer, T. Trinh // 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), New Orleans, LA. – 2017. – Pp. 1–5.

DOI: 10.1109/NSREC.2017.8115458

6. Прокопенко Н.Н. Проектирование низкотемпературных и радиационно-стойких аналоговых микросхем для обработки сигналов датчиков: монография / Н.Н. Прокопенко, О.В. Дворников, А.В. Бугакова. – М.: СОЛОН-Пресс, 2021. – 200 с.

7. Flament O. Enhanced total dose damage in junction field effect transistors and related linear integrated circuits / O. Flament, J.L. Autran, P. Roche, J.L. Leray, O. Musseau, R. Truche // IEEE Transactions on Nuclear Science. – 1996. – Vol. 43, No. 6. – Pp. 3060–3067.

DOI: 10.1109/23.556905

8. Pease R.L. Total dose induced increase in input offset voltage in JFET input operational amplifiers / R.L. Pease, J. Krieg, M. Gehlhausen, D. Platteter, J. Black // 1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 99 (Cat. No.99TH8471), Fontevraud, France. – 1999. – Pp. 569–572.

DOI: 10.1109/RADECS.1999.858649

9. Harris R.D. Degradation of RH1056 parameters at low total dose / R.D. Harris, B.G. Rax, S.S. McClure, A.H. Johnston // 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Deauville, France. – 2007. – Pp. 1–5.

DOI: 10.1109/RADECS.2007.5205557

10. Дворников О.В. Сравнительный анализ двух- и однокаскадных ВJT-JFET операционных усилителей / О.В. Дворников [и др.] // Известия ЮФУ. Технические науки. – 2023. – № 4. – С. 230–240.

DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-230-240

References

1. Dvornikov OV, Bakhur UN, Bakhir AG, Lazouski UM, Tchekhovski VA. Arbitrary Wave-form Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(3):174-185. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-3-174-185

2. Galkin YAD, Dvornikov OV, Tchekhovski VA. Precision RMS-to-DC Converter. BSUIR Reports. 2024;22(1):30-38. (In Russ.).

DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-1-30-38

3. Benson R, Resch P, Milanowski R. Characterization and Analyses of RadHard-by-Design CMOS Quad Operational Amplifiers. 2013 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), San Francisco, CA, USA. 2013;1-7. **DOI:** 10.1109/REDW.2013.6658185

4. Agarwal V, Sundarsingh VP, Ramachandran V. A comparative study of gamma radiation effects on ultra-low input bias current linear circuits under biased conditions. IEEE Transactions on Nuclear Science. 2005;52(2):510-518. **DOI:** 10.1109/TNS.2005.846872

5. Myers B, Kruckmeyer K, Trinh T. ELDRS Characterization up to 100 krad of Texas Instruments' Dual Amplifier LM158. 2017 IEEE Radiation Effects Data Workshop (REDW), New Orleans, LA. 2017;1-5.

DOI: 10.1109/NSREC.2017.8115458

6. Prokopenko NN, Dvornikov OV, Bugakova AV. Design of low-temperature and radiation-resistant analog microcircuits for processing sensor signals. Moscow, SOLON-Press. 2021;200 p.

7. Flament O, Autran JL, Roche P, Leray JL, Musseau O, Truche R. Enhanced total dose damage in junction field effect transistors and related linear integrated circuits. IEEE Transactions on Nuclear Science. 1996;43(6):3060-3067. **DOI:** 10.1109/23.556905

8. Pease RL, Krieg J, Gehlhausen M, Platteter D, Black J. Total dose induced increase in input offset voltage in JFET input operational amplifiers. 1999 Fifth European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems. RADECS 99 (Cat. No.99TH8471), Fontevraud, France. 1999:569-572.

DOI: 10.1109/RADECS.1999.858649

9. Harris RD, Rax BG, McClure SS, Johnston AH. Degradation of RH1056 parameters at low total dose. 2007 9th European Conference on Radiation and Its Effects on Components and Systems, Deauville, France. 2007:1-5.

DOI: 10.1109/RADECS.2007.5205557

10. Dvornikov OV, Chekhovsky VA, Prokopenko NN, Kunz AV, Chumakov VE. Comparative analysis of two- and single-stage BJT-JFET operational amplifiers. Bulletin of SFedU. Technical sciences. 2023;(4):230-240. (In Russ.).

DOI: 10.18522/2311-3103-2023-4-230-240

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning Kelvin Probe

A.L. Zharin¹, I.V. Gasenkova², A.K. Tyavlovsky¹, N.I. Mukhurov², S.I. Spitski²

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

²SSPA "Optics, Optoelectronics, and Laser Technology",
Nezavisimosty Ave., 68-1, Minsk 220012, Belarus

Received 04.02.2025

Accepted for publication 11.03.2025

Abstract

The object of the study was aluminum substrates for creating sensor devices based on anodic aluminum oxide, which underwent mechanical processing in the form of grinding and straightening. The subject of the study was the detection of residual mechanical stresses and other surface defects to assess the quality of this processing using the scanning Kelvin probe technique. The technique applied allows for the effective detection of residual plastic deformations of aluminum substrates resulting from their mechanical processing with a resolution sufficient to detect mechanical stresses associated with individual roughnesses.

Keywords: aluminium substrates, thermomechanical treatment, scanning Kelvin probe, defect, roughness

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

Tyavlovsky A.K.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Zharin AL, Gasenkova IV, Tyavlovsky AK, Mukhurov NI, Spitski SI.
Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing
of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning
Kelvin Probe.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 47–54.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

For citation:

Zharin AL, Gasenkova IV, Tyavlovsky AK, Mukhurov NI, Spitski SI.
Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing
of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning
Kelvin Probe.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):47–54.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

Выявление скрытых дефектов алюминиевых подложек для сенсорных устройств после термомеханической обработки с помощью сканирующего зонда Кельвина

А.Л. Жарин¹, И.В. Гасенкова², А.К. Тявловский¹, Н.И. Мухуров², С.И. Спицкий²

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

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника»,
пр-т Независимости, 68-1, г. Минск 220012, Беларусь

Поступила 04.02.2025

Принята к печати 11.03.2025

Объектом исследования являлись алюминиевые подложки для создания сенсорных устройств на основе анодного оксида алюминия, прошедшие механическую обработку в виде утонения, рихтовки и химической очистки поверхности. Предмет исследования – выявление остаточных механических напряжений, внутренних и поверхностных дефектов для оценки качества данной обработки методом сканирующего зонда Кельвина. Показано, что данный метод позволяет эффективно выявлять остаточные пластические деформации алюминиевых подложек, являющиеся следствием их термомеханической обработки, с разрешением, достаточным для выявления механических напряжений, связанных с отдельными шероховатостями.

Ключевые слова: алюминиевые подложки, термомеханическая обработка, сканирующий зонд Кельвина, дефект, шероховатость

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

Tyavlovsky A.K.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: tyavlovsky@bntu.by

Для цитирования:

Zharin AL, Gasenkova IV, Tyavlovsky AK, Mukhurov NI, Spitski SI.
Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing
of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning
Kelvin Probe.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 47–54.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

For citation:

Zharin AL, Gasenkova IV, Tyavlovsky AK, Mukhurov NI, Spitski SI.
Detection of Hidden Defects Induced by Thermomechanical Processing
of Aluminum Substrates for Sensor Devices Using a Scanning
Kelvin Probe.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):47–54.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-47-54

Introduction

When creating sensor devices based on nanoporous anodic aluminum oxide (AAO) and other functional systems, including that using the high-aspect nanostructured materials, the quality of not only the surface, but also the entire volume of the plate used as a substrate to form the anodic oxide plays a major role [1–5]. During the anodic oxidation process, aluminum parts undergo several successive processing stages: cleaning, thermomechanical treatment, etching, anodizing, and high-temperature annealing [6]. At the same time, the final surface treatment of the original aluminum plates, including electrochemical polishing, does not exclude the presence of undetected hidden defects in the form of residual plastic deformations, which, due to their unevenness, create mechanical stresses not only in the near-surface areas of the substrate. Such stresses are local and their detection requires mapping of the entire substrate surface, which should be carried out using a non-destructive, contactless method due to the high requirements for surface cleanliness in order to form anodic aluminum oxide with a porous structure which is identical in geometric parameters over the entire area.

This is especially important when creating photonic devices such as the Fabry–Perot interferometer, achromatic phase plates, and IR- and UV-to-visible converters [7–9].

One of the effective contactless techniques is the scanning Kelvin probe method, based on the registration of the contact potential difference (CPD) between the surface area of the sample and the sensitive element of the electrometric probe, which acts as two plates of a dynamic capacitor [10]. The method is characterized by an exceptionally high surface sensitivity, while the output measurement signal of a Kelvin probe is multiparametric [11] and reflects the parameters of both the chemical (composition heterogeneity, oxidation, presence of adsorbed substances and contaminants) and mechanical (presence of various crystal lattice defects, crystallographic orientation, presence of mechanical stresses and their sign, etc.) state of the surface. Because of that, additional information about the object of measurement is required to interpret the visualized image of CPD spatial distribution [12]. The aim of this study was to analyze the applicability of Kelvin probe technique for determining and distinguishing various types of defects induced by thermomechanical treatment of

aluminum substrates used for precise applications like growing AAO structures and to advance methods of highly sensitive non-destructive testing of aluminum substrate surface.

Methods and equipment

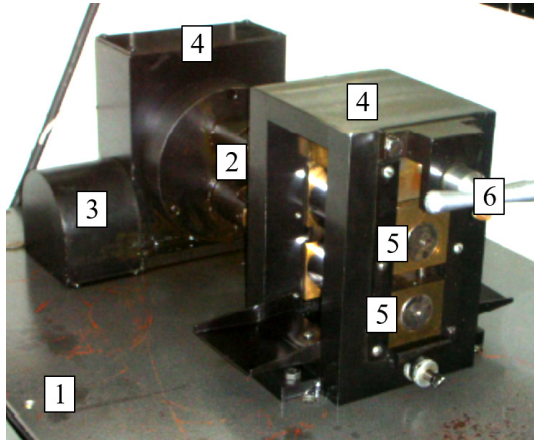
The object of study in this work was aluminum substrates used for the manufacture of sensor devices based on anodic aluminum oxide.

The subject of the study was the identification of residual mechanical stresses and other surface defects to assess the quality of processing of relatively thick original aluminum plates. The high chemical homogeneity of the aluminum plates material (99,99 % Al) made it possible to interpret the results of scanning primarily as indicators of mechanical state of the surface.

The material was represented by aluminum plates of 0.6 mm thickness. To obtain a high-quality anodic aluminum oxide the roughness of aluminum plate surface should be at least class 10. To meet this requirement the aluminum strip was thinned using a rolling mill (Figure 1a). The rolling mill rolls have a surface finish class of at least 13, which assures the high quality of the aluminum foil surface after rolling (Figure 1b). A special attention was paid to the cylindricity deviation of a working surface of rolls and to the perfect matching of rolls' dimensions in pair. These parameters, along with the small runout of the rolls relative to the mounting necks, determine the minimum permissible thicknesses of the foils obtained from aluminum bars after rolling. The rolling process was accompanied by the use of a lubricant based on mineral oil ("spindle oil") and kerosene in a 1:1 proportion. During the operation of the rolling mill, the following parameters were ensured: roll runout relative to the mounting necks – no more than 5 μm , cylindricity deviation of the rolls' working surface – no more than 3 μm , discrepancy of the rolls' dimensions in a pair – no more than 5 μm , surface cleanliness of the rolls – no worse than class 13...14.

After rolling to the required thickness ($\approx 100 \mu\text{m}$) the aluminum band was cleaned from rolling lubricant traces using solvents (petrol, acetone) and finally by an isopropyl alcohol in an ultrasonic bath. The band prepared in this way was then cut into pieces measured $10 \times 10 \text{ cm}$. Since after rolling and cutting the band into pieces the latter are not flat, then to impart their flatness the pieces were subjected to

straightening in a device consisting of straightening plates with working surfaces facing each other polished to 13th grade of cleanliness, heaters, and a device for clamping the plates (Figure 2). The device for thermal straightening and flattening of aluminum substrate samples provided the following parameters: heating temperature – 130–170 °C, compressive force – $(10–20) \cdot 10^6 \text{ N/m}^2$.



a



b

Figure 1 – General view of a rolling mill (a), and a view of rolls with high surface quality and low cylindricity deviation (b): 1 – rigid base with electric motor inside; 2 – rolls; 3 – roll rotation system; 4 – roll holder mounting housings; 5 – roll neck mounting devices; 6 – adjustment of gap between rolls

An important feature of straightening plates is that their coefficient of thermal expansion is approximately 2.5 times less than that of aluminum. The aluminum sample was placed between straightening plates, preheated to 150–250 °C, and the plates were compressed together. Due to the different coefficients of thermal expansion, during subsequent cooling in a clamped state the aluminum sample is subjected to

plastic deformation uniformly in all directions, and the sample acquires a flat shape.

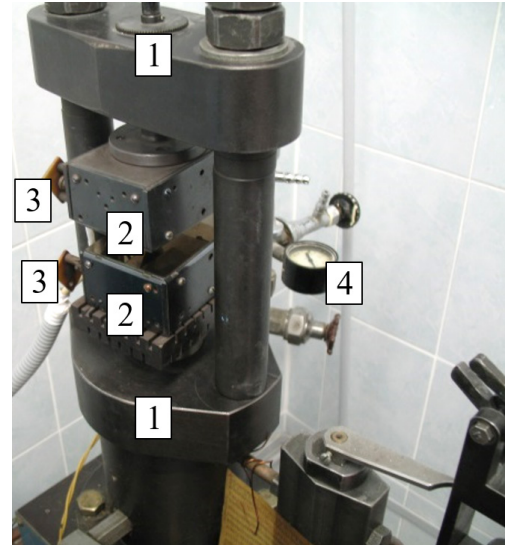


Figure 2 – Photo of the device for straightening and flattening of aluminum substrate samples: 1 – straightening plate holder; 2 – straightening plates; 3 – heaters; 4 – pressure control gauge

The methodology for studying the surface of aluminum substrates used for the formation of anodic aluminum oxide is based on the method of measuring the CPD with a dynamic capacitor (the Kelvin-Zisman technique). The technique is based on the phenomenon of the occurrence of electrostatic potentials difference between a conducting probe and a plate which surfaces have different values of the electron work function (EWF) ϕ_S and ϕ_P while ensuring conditions for the unimpeded exchange of charge carriers between them [10]. In accordance with the condition of thermodynamic equilibrium, in such case the Fermi levels will be equalized which leads to the emergence of an electrical potential difference. Kelvin–Zisman technique assumes using an active feedback in a form of compensating voltage source U_{CPD} connected in series with a dynamic capacitor formed by sample's surface and probe's tip which brings the current between surface and probe to zero. The equilibrium condition is:

$$eU_{CPD} + \phi_S - \phi_P = 0, \quad (1)$$

therefore:

$$U_{CPD} = \frac{\phi_P - \phi_S}{e}, \quad (2)$$

where e is elementary charge.

The U_{CPD} value describes the electrical potential difference between the surface of the sample under study and the probe's tip. It is important that in Kelvin–Zisman method the probe's output signal is determined by the mean EWF value of the sample surface φ_s in the area under study, and not by its minimum value as when using emission methods [13]. Since typical defect sizes for nanostructured surfaces are much smaller than the linear dimensions of the probe, such hardware averaging of the signal provides an integral assessment of the defects density in the area of study whereas emission methods provide a less diagnostically significant extreme estimate. Therefore scanning EWF measurements based on CPD registration with a Kelvin probe could be used to reveal surface defects of sensor components made of nanostructured materials and access the concentration (surface density) of these defects. In last decades, several researchers attempted to link the EWF to a certain physical properties of a material like Young's modulus [14] and yield strength [15], Young's modulus and hardness [16] of metals and alloys, and also a surface corrosion potential [17], with a mixed success. In particular, in the research work [14] there were proposed a theory-based mathematical model that numerically links the EWF φ with the Young's modulus E by a form of power-law dependence $E \sim \alpha \varphi^6$ where α is the Madelung constant. For real samples, however, all the mentioned and other factors (hardness and Young's modulus difference, surface contaminations, chemical composition variations, corrosion etc.) exist simultaneously and in unknown proportion which does not allow one to directly link the numerical values of EWF or CPD with the values of specific physical parameters of the surface.

One should take into account that the value of φ_p in (1) is unknown since it cannot be determined by an independent method and can change under the influence of environmental factors, mainly due to the adsorption of various substances on the probe's tip. As these changes are relatively slow, the φ_p value may be considered constant all over the time of scanning when measuring surface CPD with a Kelvin probe. In this case, the difference in the measured values of the electrostatic potentials in two adjacent points will be:

$$\Delta U_{CPD} = U_{CPD1} - U_{CPD2} = \frac{\varphi_p - \varphi_{s1}}{e} - \frac{\varphi_p - \varphi_{s2}}{e} = \frac{\varphi_{s2} - \varphi_{s1}}{e}. \quad (3)$$

The equivalence of CPD and EWF differences indicates that visualized CPD distribution map provided by scanning Kelvin probe technique objectively reflects the inhomogeneities of EWF distribution and can be used to compare the degree of defectiveness (or surface defect density) of different areas of the sample surface. If the vast part of the surface under study is considered defect-free then any part of a surface where CPD deviates from the mean CPD value for a given sample can be considered as a host for defects of some origin.

It should be noted that output signal of a scanning Kelvin probe is virtually independent of a probe-to-sample gap, which only affects the spatial resolution of the probe and the signal-to-noise ratio [18], so particular features of CPD distribution map shouldn't be treated as geometric deviations of the surface shape. The research was performed using a laboratory model of a microprocessor based measuring transducer of electrostatic potentials with high spatial resolution for monitoring the microstructure of the mesh web, developed within the framework of Event 2.3 of the Union State program "Monitoring-SG" (Figure 3) and used in the BNTU Semiconductor Technology Research Laboratory, and a proprietary software [19].

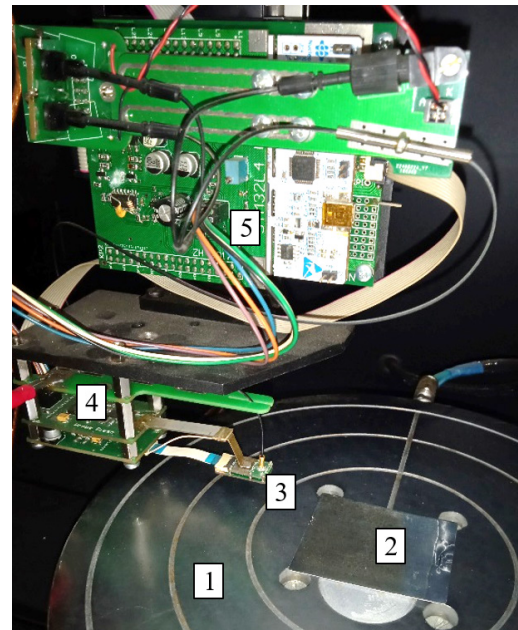


Figure 3 – Microprocessor based scanning measuring transducer of electrostatic potentials (Kelvin probe) that was used in the research: 1 – sample holder attached to scanning system; 2 – sample; 3 – electrometric probe; 4 – Kelvin probe driver and signal preamplifier; 5 – microprocessor based measuring transducer

Results and discussion

The obtained spatial CPD distributions of the samples under study are given on Figures 4–6. The

coordinates along the X and Y axes are given in millimeters; Z axis that reflects the CPD values on the three-dimensional representation of the CPD distribution is scaled in millivolts.

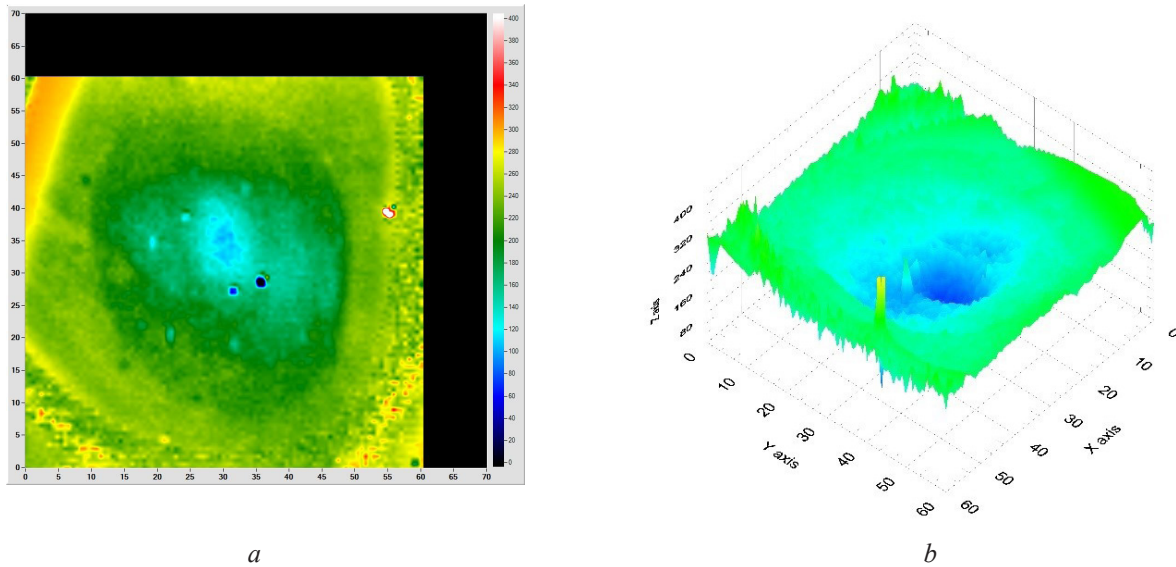


Figure 4 – Spatial contact potential difference distribution of a sample with a nominal surface roughness of 200 nm: a – visualized map of contact potential difference distribution; b – 3D graph of contact potential difference distribution

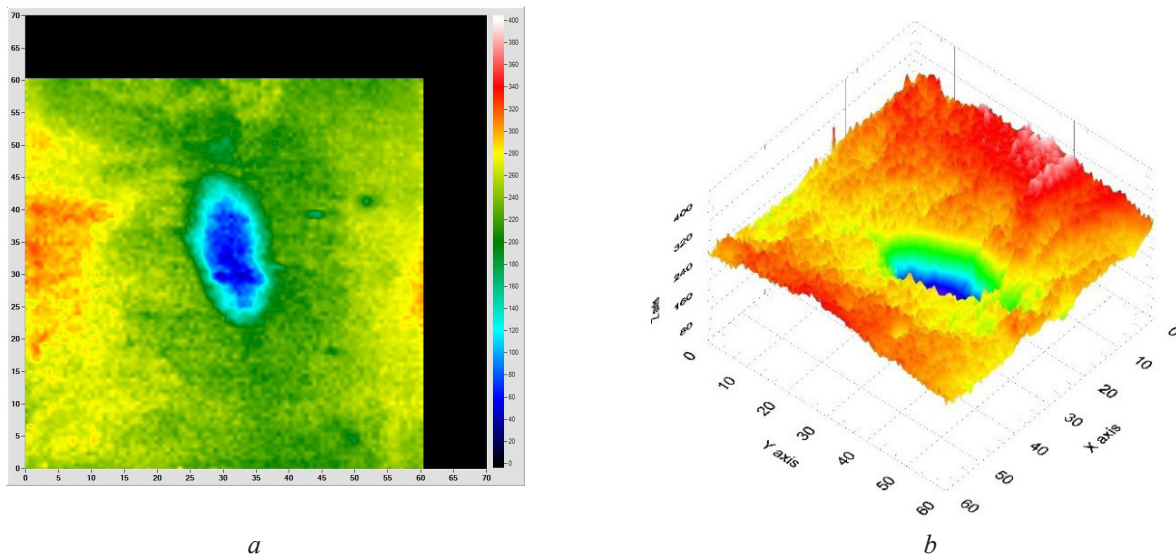


Figure 5 – Spatial contact potential difference distribution of a sample with a nominal surface roughness of 300 nm: a – visualized map of contact potential difference distribution; b – 3D graph of contact potential difference distribution

In general, the results of the studies showed that CPD values do not depend on the magnitude of the surface roughness and amount to an average of 240 mV in the non-deformed areas of all the studied samples. At the same time, in the areas of plastic deformations after straightening all samples demon-

strated a significant decrease in the recorded CPD values to 40–80 mV, which corresponds to an increase in the relative EWF values by 160–200 meV. Typical in this regard is the spatial CPD distribution map of an aluminum plate with a roughness of 200 nm shown in Figure 4a.

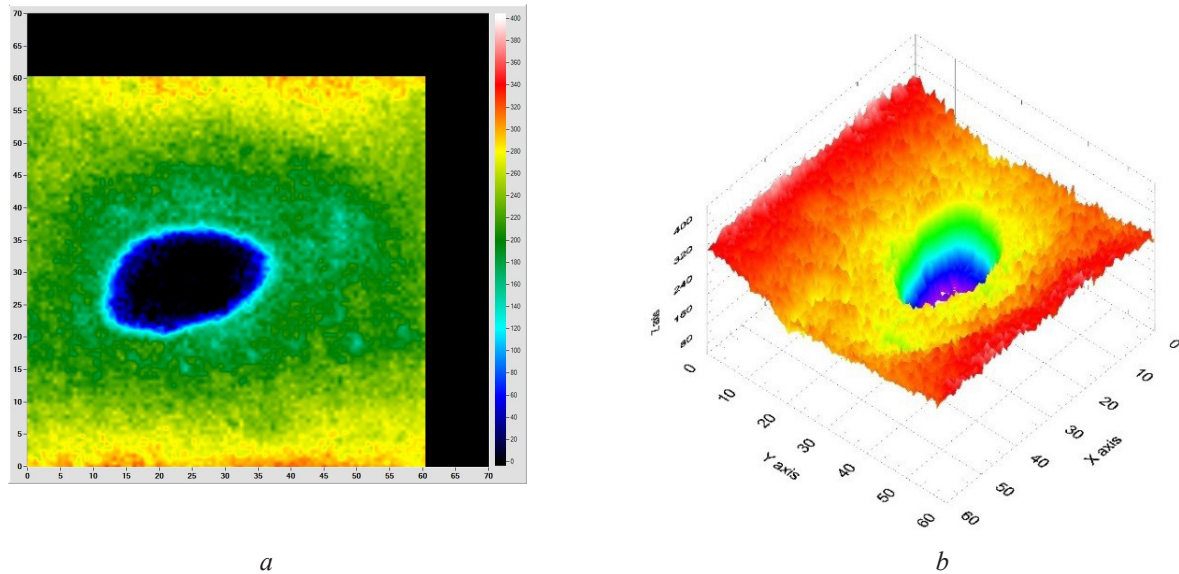


Figure 6 – Spatial contact potential difference distribution of a sample with a nominal surface roughness of 400 nm: *a* – visualized map of contact potential difference distribution; *b* – 3D graph of contact potential difference distribution

The image demonstrates the "stepwise" change in CPD values corresponding to several successive stages of rolling. The better observation and analysis of these effects is provided by the three-dimensional representation of spatial CPD distribution shown in Figure 4*b*. The prominent irregularities (fluctuations) of CPD values characterized with a small amplitude and high spatial frequency can be attributed to the resolution of individual roughnesses by a high-resolution Kelvin probe, the peaks and valleys of which are also concentrators of mechanical stress. This effect is more clearly manifested for surfaces with a greater roughness height and step, which can be observed in the images of Figures 5 and 6. Therefore the visualized potential map to a certain extent reflects the geometric relief of the surface, in this case in the form of surface roughness.

In addition to relatively large areas of mechanical stress where EWF values are increased, there are several local points on the visualized maps where EWF values differ sharply from that of the surrounding surface, both to the higher and to the lower side. Most obviously such points can be traced on a visualized map given on Figure 4*a*, in particular in the central part of the sample. The arbitrary (either positive or negative) sign of EWF shift, high locality and apparent lack of correlation between position of these points and sites of possible residual mechanical stresses after the rolling and straightening allows us to suggest that these local EWF irregularities represent point surface contamination that caused a local

change in the surface EWF due to the interaction of the adsorbed contaminant with the aluminum surface, and not the mechanical defects.

It is significant that creation of a complete visualized CPD distribution map of the whole surface made it possible to identify various types of defects, including those that appear at the microscopic level (individual roughnesses, surface contamination). Additionally, the overlapping defects such as not completely coinciding areas of work hardening after several rolling stages, are clearly distinguishable and can be easily identified in the macroscopic image.

Conclusion

The results of the studies showed that the scanning Kelvin probe method allows for the effective detection of residual plastic deformations of aluminum substrates resulting from their thermomechanical processing. The achieved spatial resolution of the scanning Kelvin probe probe was sufficient for resolving individual roughnesses which acts as microconcentrators of mechanical stresses. The multiparametric nature of the scanning Kelvin probe signal in the conditions of simultaneous presence of various types of defects does not allow for determining an unambiguous link between the results of local contact potential difference measurements and specific quantitative characteristics of the surface. On the other hand, studies carried out on a macroscopic scale using high spatial resolution scanning allow us

to identify and qualitatively characterize (typify) defects of various natures (in the particular case that where residual plastic deformations after several successive stages of rolling, individual roughness, and local surface contamination) and to determine their exact location.

Acknowledgments

The Work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research under Grant No. T23MЭ-045.

References

1. Losic D, Voelcker NH. Nanoporous anodic aluminium oxide: Advances in surface engineering and emerging applications. *Progress in Materials Science*. 2013;58(5):636-704.
DOI: 10.1016/j.pmatsci.2013.01.002
2. Santos A, Kumeria T, Losic D. Nanoporous Anodic Aluminum Oxide for Chemical Sensing and Biosensors. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*. 2013;44:25-38. **DOI:** 10.1016/j.trac.2012.11.007
3. Feng S, Ji W. Advanced Nanoporous Anodic Alumina-Based Optical Sensors for Biomedical Applications. *Frontiers in Nanotechnology*. 2021;3:678275-18.
DOI: 10.3389/fnano.2021
4. Liu S, Tian J, Zhang W. Fabrication and application of nanoporous anodic aluminum oxide: A review // *Nanotechnology*. 2021;32(22):222001-20.
DOI: 10.1088/1361-6528/abe25f
5. Ku C.-A. [et al.] Advances in the Fabrication of Nanoporous Anodic Aluminum Oxide and Its Applications to Sensors: A Review. *Nanomaterials*. 2023;13(21):(42): 2853-2895. **DOI:** 10.3390/nano13212853
6. Gasenkova IV, Mukhurov NI, Zhvavyi SP, Kolesnik EE. Optical characteristics of $\text{Cr}_2\text{O}_3/\text{Al}_2\text{O}_3$ composite structure. *High Temperature Material Processes*. 2021;25(3):1-10.
7. Gasenkova IV, Mukhurov NI, Andruhovich IM. Parameters of anodic aluminum oxide determined from Fabry-Perot oscillations in specular reflectance spectra. *BSUIR Reports*. 2024;22(6):14-20.
DOI: 10.35596/1729-7648-2024-22-6-14-20. (In Russ.)
8. Dlugunovich VA. [et al.]. Conversion of light polarization using nanoporous aluminum oxide films. *Journal of Applied Spectroscopy*. 2015;82(5):766-772. (In Russ.).
9. Yasin Mahsin Vahioh [et al.]. Threshold detectors of ionizing and ultraviolet radiation based on nanostructured substrates made of anodic aluminum oxide. Edited by N.I. Mukhurov. Minsk: Bestprint. 2016:178 p.
10. Melitz W. [et al.]. Kelvin probe force microscopy and its application. *Surf. Sci. Rep.* 2011;66:1-27.
11. Hui X. [et al.]. Multiparametric Kelvin Probe Force Microscopy for the Simultaneous Mapping of Surface Potential and Nanomechanical Properties. *Langmuir*. 2017;33(11):2725-2733.
DOI: 10.1021/acs.langmuir.6b04572
12. Findlay A. [et al.]. Non-Visual Defect Monitoring with Surface Voltage Mapping. *ECS Journal of Solid State Science and Technology*. 2015;5(4):3087-P3095.
DOI: 10.1149/2.0161604jss
13. Ibragimov HI, Korolkov VA. Electron work function in physical and chemical research. Moscow: Intermet Engineering, 2002;526 p. (In Russ.).
14. Hua G, Li D. Generic relation between the electron work function and Young's modulus of metals. *Applied Physics Letters*. 2011;99:041907-3.
DOI: 10.1063/1.3614475
15. Hua G, Li D. The correlation between the electron work function and yield strength of metals. *Phys. Status Solidi B*. 2012;249(8):1517-1520.
DOI: 10.1002/pssb.201248051
16. Lu H, Hua G, Li D. Dependence of the mechanical behavior of alloys on their electron work function – An alternative parameter for materials design. *Applied Physics Letters*. 2013;103(26):261902-4.
DOI: 10.1063/1.4852675
17. Liew Y. [et al.]. In Situ Time-Lapse SKPFM Investigation of Sensitized AA5083 Aluminum Alloy to Understand Localized Corrosion. *J. Electrochem. Soc.* 2020;167:141502–11.
DOI: 10.1149/1945-7111/abc30d
18. Zerweck U. [et al.]. Accuracy and resolution limits of Kelvin probe force microscopy. *Phys. Rev. B*. 2005;71:125424.
DOI: 10.1103/PhysRevB.71.125424
19. Tyavlovsky KL. [et al.]. Surface electric potential measurement with a static probe. *Devices and Methods of Measurement*. 2023;14(2):135-144. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-2-135-144

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых жидкометаллических теплоносителях

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин, М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова

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

Поступила 05.09.2024

Принята к печати 26.12.2024

Одна из ключевых проблем эксплуатации реакторов на быстрых нейтронах с охлаждением тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем заключается в образовании и накоплении различных отложений. При проведении ремонтных работ эти отложения усложняют процесс восстановления оборудования. Это приводит к сокращению срока службы и снижению эффективности установки в целом. За исключением случаев разрушения активной зоны, процессы образования и перемещения примесей в контуре с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем протекают со временем довольно медленно. Соответственно, важным аспектом работы является время от запроса до получения полной информации о состоянии системы. Целью работы являлся контроль состава, количества и состояния примесей во всех возможных состояниях (присутствующих в виде раствора в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе, пассивированных конгломератов на внутренних поверхностях контура, а также на свободной поверхности тяжёлого жидкометаллического теплоносителя); разработка набора устройств, позволяющих контролировать эти процессы. Рассмотрены процессы массообмена и массопереноса в контуре с учётом влияния образующихся примесей, влияющих на состояние системы. Предложены к использованию секторные системы контроля, позволяющие оперативно и достоверно проводить контроль примеси и их состава.

Ключевые слова: тяжёлые жидкометаллические теплоносители, мониторинг состояния электроизолирующих покрытий, контроль присутствия водяного пара, содержание примесей в теплоносителе

Адрес для переписки:

Мелузов А.Г.
Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: mtnntu@gmail.com

Address for correspondence:

Meluzov A.G.
Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: mtnntu@gmail.com

Для цитирования:

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин,
М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова.
Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых
жидкометаллических теплоносителях.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 55–62.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-55-62

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Sumin RV, Pogorelov MD,
Zyryanova TK.
Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal
Heat Carriers.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):55–62. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal Heat Carriers

T.A. Bokova, A.G. Meluzov, N.S. Volkov, , R.V. Sumin, M.D. Pogorelov, T.K. Zyryanova

Nizhny Novgorod State Technical University n.a. R.E. Alekseev,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia

Received 05.09.2024

Accepted for publication 26.12.2024

Abstract

One of the key problems in the operation of fast neutron reactors cooled by a heavy liquid metal coolant is the formation and accumulation of various deposits. These deposits complicate the process of equipment restoring during repair work. This leads to a shorter work life and a lower efficiency of the equipment as a whole. Except of core destruction cases, the processes of formation and movement of impurities in a circuit with a heavy liquid metal coolant proceed rather slowly over time. So that time from request to receiving of complete information about the system status is an important aspect of its work. The purpose of the work was to control the composition, quantity and condition of impurities in all possible states (present as a solution in the heavy liquid metal coolant, passivated conglomerates on the inner surfaces of the contour, as well as on the free surface of the heavy liquid metal coolant). As well as the development of a set of devices that allows controlling of these processes. The paper considers the processes of mass transfer in the circuit, taking into account the influence of the resulting impurities affecting the state of the system. Sectoral control systems are proposed for use, which make it possible to quickly and reliably monitor impurities and their composition.

Keywords: heavy liquid metal coolant, monitoring of the standing of electrical insulating coatings, control of the presence of water vapor, the content of impurities in the coolant

Адрес для переписки:

Мелузов А.Г.
Нижегородский государственный технический университет,
ул. Минина, 24, г. Нижний Новгород 603950, Россия
e-mail: mtnntu@gmail.com

Address for correspondence:

Meluzov A.G.
Nizhny Novgorod State Technical University,
Minin str., 24, Nizhny Novgorod 603950, Russia
e-mail: mtnntu@gmail.com

Для цитирования:

Т.А. Бокова, А.Г. Мелузов, Н.С. Волков, Р.В. Сумин,
М.Д. Погорелов, Т.К. Зырянова.
Приборы и методы контроля примесей в тяжёлых
жидкометаллических теплоносителях.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 55–62.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-55-62

For citation:

Bokova TA, Meluzov AG, Volkov NS, Sumin RV, Pogorelov MD,
Zyryanova TK.
Devices and Methods for Impurities Control in Heavy Liquid Metal
Heat Carriers.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):55–62. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-55-62

Введение

При эксплуатации контуров с тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем (ТЖМТ) происходят процессы массообмена и массопереноса примесей. Они постоянны во времени, что позволяет оптимизировать проведение контроля с выбором группы примесей, а также выбрать максимально информативные зоны контроля контура ТЖМТ [1].

Стандартные операции включают в себя следующие процессы:

- формирование и доформирование защитных покрытий;
- формирование электроизоляционных покрытий;
- вывод продуктов износа конструкционных материалов;
- очистка теплоносителя от сформированных оксидов ТЖМТ.

Это требует получения достоверной и быстрой информации о состоянии теплоносителя, структуре и состоянии примесей в реакторных и исследовательских контурах ТЖМТ.

Полученную информацию разделяют по 2 категориям – оперативную и неоперативную. При получении информации от нескольких секунд до десятков минут её считают оперативной. Неоперативная информация требует значительно большего времени, достигающего до нескольких часов и более.

Цель работы – контроль состава, количества и состояния примесей во всех возможных состояниях (присутствующих в виде раствора теплоносителя, пассивированных на внутренних поверхностях контура, а также на свободной поверхности теплоносителя), разработка комплекса устройств, позволяющего контролировать данные процессы.

Система постоянного слежения за состоянием примесей в тяжёлом жидкометаллическом теплоносителе, контуре и системе инертного газа

В контурах ТЖМТ реакторов деления используются различные системы контроля за составом примесей и их массопереносом по системам контура.

Для получения оптимальной информации обо всех параметрах контура ТЖМТ используют 2 вида контроля:

- приборы, контролирующие появление и состав радионуклидов в ТЖМТ и инертном газе;
- датчики контроля нейтронного бета и гамма-излучения.

Расположение датчиков возможно как внутри контура, так и за его пределами. Оптимальна установка вблизи свободной поверхности теплоносителя, где наблюдается гравитационная сепарация примеси из тела теплоносителя, проходящего зону реактора [2].

При наличии компоновки блочного типа оптимальна система секторного контроля с установленными датчиками нейтронного излучения, расположенными в шахте реактора напротив выходных каналов из активной зоны.

При проведении контроля водяного пара и воды в ТЖМТ и инертном газе должны выполняться ряд требований:

- избегать свободных уровней ТЖМТ, где нет прямой связи с газовым объёмом контура через воздушный клапан;
- области, где происходит сепарация пара в контуре ТЖМТ, должны быть минимизированы;
- контроль водяного пара и воды в ТЖМТ и защитном газе проводят с помощью конденсаторов пара.

Комплексный подход по контролю примесей в контуре ТЖМТ реакторов деления даёт надёжность и безопасность в эксплуатации системы.

Так же концентраторы пара позволяют обнаружить и контролировать возникновение и развитие межконтурной неплотности парогенератора [3].

Установка конденсатора пара

Оптимально расположить конденсатор пара (КП) в зоне установки сепарационных устройств (над свободным уровнем ТЖМТ). При этом требуется объединение газового объёма с приёмным объёмом паровой смеси. Конструктивно объединяют через штуцер с предохранительным устройством, в состав которого входит мембрана разрывного действия. Мембрана выполняет соединение газовой области с системой фильтров, после которых идёт сброс давления в атмосферу. Такой метод хорошо себя зарекомендовал при аварийной ситуации с “большой” течью парогенератора.

Контроль паровой смеси

При образовании пара газовой смеси в трубопроводе с ТЖМТ её контроль и выявление основано на применении электромагнитных или магнитных датчиков. Принцип действия и компоновка этих датчиков схожи с принципом работы расходомера в ТЖМТ контуре. Контроль за присутствием паровоздушной смеси проводится в местах установки воздушников парогенераторов. Максимальную эффективность показала установка таких устройств, когда реакторный контур имеет интегрированную компоновку с автономно установленными корпусами генераторов.

Использование ультразвуковых датчиков

Проведение испытаний при формировании аварийного режима "межконтурной неплотности парогенератора" показали недостаточную информативность применяемых ультразвуковых датчиков по определению парогазовой фазы в потоке теплоносителя. Датчики давали много ложных сигналов, что приводило к невозможности получения адекватной информации. Происходило затухание ультразвуковых сигналов в области пристенного течения однокомпонентного потока ТЖМТ [4].

Контроль водяного пара

Хорошо показало себя применение влагомеров, установленных в объёме защитного газа. Однако, при пусконаладочных работах с раскрытием контура возможно фиксирование увеличения влажности газа при повышении температуры из-за присутствия конденсата, попавшего при монтажных работах.

Уровнемеры

Уровнемеры хорошо себя зарекомендовали при контроле уровня свободной поверхности ТЖМТ. Также они могут применяться как инструмент для наблюдения за поступлением водяного пара при межконтурной неплотности парогенератора отследить можно по изменению уровня свободной поверхности. Утверждение о наличии водяного пара в ТЖМТ можно основывать на получении информации о постепенном возрастании или колебании уровня свободной поверхности теплоносителя в соответствии с изменением давления в контуре.

Также возможно проконтролировать присутствие водяного пара в контуре ТЖМТ опосредовано с помощью показаний от датчика давления, расположенного в газовой системе, но существует ряд факторов, мешающих эффективно оценивать присутствие паров воды в контуре ТЖМТ, это:

- низкий расход рабочего тела;
- эффективная сепарация водяного пара на свободных уровнях ТЖМТ;
- компенсация сепарированного пара;
- достаточно резкое повышение давления газа в системе [5].

Хроматографические исследования примесей, разделённых в защитном газе, проводятся на постоянной основе или периодически. Это позволяет иметь оперативный и информативный контроль примесей в ТЖМТ.

Для отбора проб линия отбора с побудителем расхода устанавливается параллельно в циркуляционной трубе контура, в самых "информативных" местах газовой системы. В контуре отвода тепла от blankets, дивертора токамака требуется поддержание электроизоляционных покрытий. Состояние покрытий требует постоянного контроля. Это осуществляется с помощью установленных в контуре ТЖМТ приборов для измерения сопротивлений электроизоляционных покрытий. Данные приборы располагаются по всему энергетическому контуру с ТЖМТ для дублирования информации о состоянии системы [6]. Схема устройства представлена на рисунке 1. Образцы погружаются непосредственно в поток теплоносителя, обычно используется 2 образца, но лучше себя показала схема с использованием 3 образцов (электродов). Материал выбирается в соответствии с материалом основного контура с ТЖМТ. С помощью вводимого реагента (аргона с добавлением кислорода, CO_2 , водяного пара), происходит формирование и изменение электроизоляционных покрытий.

Схема измерений электрического сопротивления защитных изолирующих покрытий на циркуляционном контуре представлена на рисунке 2.

Используемая нами данная конструкция показала ряд преимуществ:

- практически одинаковые условия обтекания стенок трубы;
- одинаковое обтекание торцевых поверхностей гермовводов.

При этих условиях формируется качественное покрытие, что гарантирует высокую точность контроля [7].

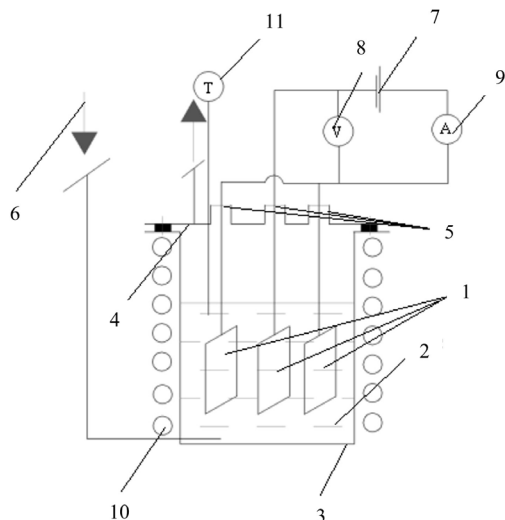


Рисунок 1 – Трёхэлектродная схема устройства контроля электросопротивления защитных и электроизолирующих покрытий на поверхностях образцов конструкционных материалов: 1 – образец с покрытием; 2 – тяжёлый жидкометаллический теплоноситель; 3 – корпус устройства; 4 – крышка; 5 – гермовводы; 6 – ввод реагента; 7 – источник стабилизированного постоянного тока; 8 – вольтметр; 9 – амперметр; 10 – электрообогрев; 11 – термопара

Figure 1 – Three-electrode diagram of a device for monitoring the electrical resistance of protective and insulating coatings on the surfaces of structural materials' samples: 1 – coated sample; 2 – heavy liquid metal coolant; 3 – device body; 4 – cover; 5 – hermetic leads; 6 – reagent input; 7 – source of stabilized direct current; 8 – voltmeter; 9 – ammeter; 10 – electric heating; 11 – thermocouple

В работе данное устройство показало и отрицательные свойства:

- разрушение изоляторов при термоударах;
- увеличение погрешности измерения по причине малой площади торца термовводов;
- падение надёжности изоляторов в условиях высоких температур (500–600 °С) [8].

Как показал опыт эксплуатации стенов с ТЖМТ (свинец и его сплавы), при температурах 400–450 °С и выше требуется формирования защитного покрытия. Формируется покрытие на поверхности стали методом введения кислорода (термодинамически активного кислорода) в контур теплоносителя ТЖМТ. Контроль термодинамически активного кислорода в ТЖМТ проводится с помощью установленных датчиков активного кислорода (ДАК).

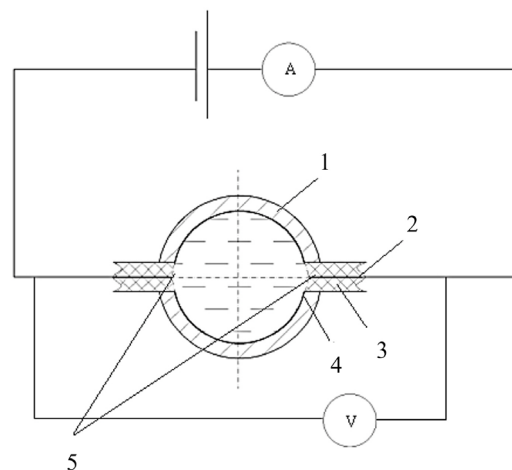


Рисунок 2 – Схема устройства контроля электросопротивления защитных и электроизолирующих покрытий в трубопроводе с циркулирующим тяжёлым жидкометаллическим теплоносителем: 1 – стенка трубопровода; 2 – гермоввод; 3 – изолятор; 4 – покрытие на стенке трубы; 5 – покрытие на торцах гермовводов

Figure 2 – Scheme of the device for monitoring the electrical resistance of protective and insulating coatings in a pipeline with circulating heavy liquid metal coolant: 1 – pipeline wall; 2 – hermetic duct; 3 – insulator; 4 – coating on the pipe wall; 5 – coating on the ends of the hermetic ducts

Датчик состоит из колбы, изготовленной из твёрдого электролита (диоксид циркония плюс примесь оксида иттрия) (рисунок 3).

Внутри колбы ДАК расположена среда (эталон). Задано постоянным во времени содержание кислорода (свинец плюс оксид свинца на поверхности). С внешней стороны колба ДАК омывается потоком теплоносителя. Использование ДАК основано на изменении электродвижущей силы (ЭДС), возникающей за счёт перемещения ионов термодинамически активного кислорода через стенку колбы. Перемещение происходит от ТЖМТ, омывающего внешнюю поверхность колбы датчика, до внутреннего эталона, расположенного внутри колбы датчика. Когда содержание примеси различается от эталонной (внутри колбы), то возникает направляемый поток ионов кислорода [9]. Вследствие чего между омывающим теплоносителем и эталоном ДАК возникает ЭДС, которую измеряют с использованием потенциометра с высоким внутренним сопротивлением.

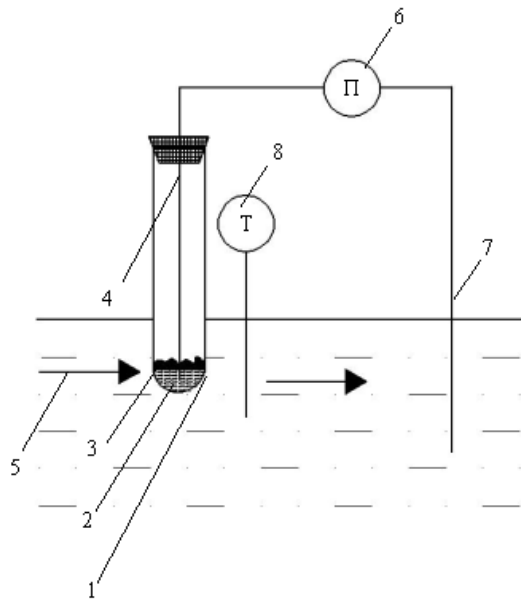


Рисунок 3 – Схема устройства контроля содержания примеси термодинамически активного кислорода с эталоном из свинца, насыщенного кислородом (датчик активного кислорода): 1 – стенка твёрдого электролита; 2 – свинец (висмут); 3 – оксид свинца; 4, 7 – электроды; 5 – контролируемый жидкометаллический теплоноситель; 6 – потенциометр с высоким внутренним сопротивлением; 8 – датчик температуры тяжёлого жидкометаллического теплоносителя вблизи гальванического концентрационного элемента

Figure 3 – Scheme of a device for monitoring the content of an impurity of thermodynamically active oxygen with a standard of lead saturated with oxygen (active oxygen sensor): 1 – solid electrolyte wall; 2 – lead (bismuth); 3 – lead oxide; 4, 7 – electrodes; 5 – controlled liquid metal coolant; 6 – potentiometer with high internal resistance; 8 – temperature sensor of a heavy liquid metal coolant near a galvanic concentration cell

Изъятие проб "на вынос"

Кроме перечисленных методов контроля состояния контуров и теплоносителя, хорошо зарекомендовал себя метод отбора проб "на вынос" с дальнейшим исследованием в специализированной лаборатории. В этом случае можно исследовать образец пробы на содержание радионуклидов, железа, хрома, никеля, углерода, кислорода, примеси газов в защитном инертном газе [10].

Важно выполнить ряд требований к устройству отбора проб и его расположению в контуре ТЖМТ:

- необходимо иметь несколько точек отбора проб, расположенных в оптимальных зонах потока теплоносителя;

- температура пробы должно соответствовать температуре теплоносителя;

- не допускается изменять концентрацию и фазовое состояние примесей при отборе проб;

- пробы должны содержать 50–150 г ТЖМТ, причём одновременно требуется получать отбор не менее 6–10 штук проб;

- контейнер должны легко очищаться, выдерживать множество циклов "замораживание – размораживание".

В разных системах экспериментальных контуров с ТЖМТ использовались разные пробоотборники. Общим для них был ряд требований:

- пробы имели требуемую дозированность, забор производился в атмосфере инертного газа;

- пробоотборники имели конусообразную конструкцию;

- отбор проб производился строго из участка движения потока теплоносителя.

Такой вариант пробоотборного устройства (рисунок 4) широко применяется в системах свинец-висмутового теплоносителя [11].

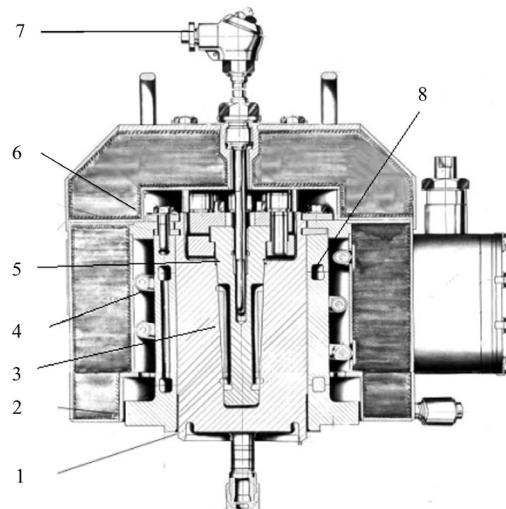


Рисунок 4 – Пробоотборник для отбора проб с извлечением застывших проб из конических объёмов, выполненных в корпусе пробоотборника: 1 – корпус; 2 – теплоизоляция и биологическая защита; 3 – проба тяжёлого жидкометаллического теплоносителя; 4 – электронагреватель; 5 – выемная ёмкость; 6 – съёмная крышка; 7 – термопара; 8 – камера охлаждения

Figure 4 – Sampler for sampling with the extraction of frozen samples from conical volumes made in the body of the sampler: 1 – housing; 2 – thermal insulation and biological protection; 3 – heavy liquid metal coolant sample; 4 – electric heater; 5 – removable container; 6 – removable lid; 7 – thermocouple; 8 – cooling chamber

Данная конструкция, представленная на рисунке 4, показала длительную работоспособность и простоту изъятия проб. С помощью её возможно отбирать пробы без опасности попадания внешней атмосферы в изолированный контур энергетической установки.

Заключение

Разработана концепция системы мониторинга контура тяжеловодного теплоносителя, основанная на анализе изменения концентрации примесей в теплоносителе и системе защитного газа. Установлено, что длительная эксплуатация таких контуров требует оперативного отслеживания отклонений от нормального режима, повреждений тепловыделяющих элементов и прогнозирования работоспособности. Показано, что анализ изменения концентрации примесей в теплоносителе и системе защитного газа является научно обоснованным методом выявления отклонений и прогнозирования дальнейшего развития событий. Мониторинг примесей является ключевым механизмом для своевременного выявления проблем и предотвращения аварийных ситуаций. Перспективой дальнейших исследований является разработка алгоритмов для прогнозирования развития событий на основе полученных данных и интеграция системы мониторинга в единую информационную систему установки.

Благодарности

Представленные результаты получены в рамках государственного задания в сфере научной деятельности (тема № FSWE-2023–0005 “Особенности и специфика применения тяжелых жидкометаллических теплоносителей в реакторных установках на быстрых нейтронах”).

Список использованных источников

1. Безносков А.В. Оборудование энергетических контуров с тяжелым жидкометаллическим теплоносителем в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова. – Нижний Новгород, 2012.
2. Безносков А.В. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в атомной энергетике / А.В. Безносков, Ю.Г. Драгунов, В.И. Рачков. – М.: ИздАт, 2007. – С. 434.

3. Мельников В.И. Экспериментальное исследование микроволнового рефлексоуравнителя жидкометаллического теплоносителя / Бокова Т.А. [и др.]. Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. – 2022. – № 1. – С. 79–89. DOI: 10.26583/пре.2022.1.07

4. Суворов Г.П. Опыт создания, эксплуатации стенда 27/ВТ / Г.П. Суворов, О.В. Кузько, М.И. Бугреев // Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. ТЖМТ-98: сб. докладов конференции. – Обнинск, 1999. – С. 70–79.

5. Тяжелые жидкометаллические теплоносители в ядерных технологиях. Сборник докладов конференции в 2-х томах. – Обнинск, ГНЦ РФ-ФЭИ, 1999. – Т. 1. – С. 14–17.

6. Безносков А.В. Экспериментальное исследование процессов, сопровождающих аварийное поступление органических соединений (масел) в свинец-висмутовый и свинцовый теплоносители / А.В. Безносков, И.В. Каратушина // Известия высших учебных заведений. Ядерная энергетика. Нижний Новгород, 2007. – № 3–2. – С. 58–67.

7. Асхадуллин Р.Ш. Методы регулирования содержания кислорода в ТЖМТ / Р.Ш. Асхадуллин, А.Н. Стороженко, А.Ю. Легких // Акционерное общество «ГНЦ РФ - Физико-энергетический институт имени А.П. Лейпунского», Обнинск, Россия. Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2017. – № 5. – С. 32–43.

8. Замыкание топливного цикла ядерной энергетике на базе реакторов на быстрых нейтронах: сб. докладов конференции (11–12 октября 2018 г., Томск). М.: Изд-во АО «НИКИЭТ», 2020. – С. 328.

9. Безносков А.В. Оборудование энергетических контуров с тяжёлыми жидкометаллическими теплоносителями в атомной энергетике / А.В. Безносков, Т.А. Бокова // НГТУ им. Р.Е. Алексеева. Нижний Новгород, 2011. – С. 536.

10. Федорович Е.Д. Аналитический обзор опыта эксплуатации и современных разработок ядерных энергетических установок средней и малой мощности с жидкометаллическим теплоносителем. Часть 2 (Современные разработки) / Е.Д. Федорович, Н.П. Курдюков // Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого. Россия; АО «Санкт-Петербургское Морское Бюро Машиностроения «Малахит». – Россия, Сосновый Бор, Научно-технический сборник “Технологии обеспечения жизненного цикла ядерных энергетических установок.” – 2020. – Т. 21. – № 3. – С. 10–31.

11. Посажеников А.М. Очистка защитного газа от аэрозолей тяжелых жидкометаллических теплоносителей // А.М. Посажеников [и др.]. //

АО «ГНЦ РФ – Физико-энергетический институт имени А.И. Лейпунского». Обнинск, Россия, Журнал Вопросы атомной науки и техники. Серия: ядерно-реакторные константы. – 2015. – № 2. – С. 102–119.

Acknowledgments

The presented results were obtained within the framework of the state assignment in the field of scientific activity (topic no. FSWE-2023–0005 "Features and specifics of the use of heavy liquid metal coolants in fast neutron reactor installations").

References

1. Beznosov AV, Bokova TA. Equipment of power circuits with heavy liquid metal coolant in nuclear power engineering. N. Novgorod, 2012.

2. Beznosov AV, Dragunov YuG, Rachkov VI. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear power engineering. M.: IzdAt. 2007:434 p.

3. Melnikov VI [et al.]. Experimental study of a microwave reflexology level meter of a liquid metal coolant. Proceedings of higher educational institutions. Nuclear power engineering. 202241:79-89.

DOI: 10.26583/pre.2022.1.07

4. Suvorov GP, Kuzko OV, Bugreev MI. Experience in the creation and operation of stand 27/VT. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear technologies. TJMT-98: collection of conference reports. Obninsk, 1999:70-79.

5. Heavy liquid metal heat carriers in nuclear technologies. A collection of conference reports in 2 volumes. Obninsk, SSC RF-FEI. 1999;1:14-17.

6. Beznosov AV, Karatushina IV. Experimental study of the processes accompanying the emergency intake of organic compounds (oils) in lead-bismuth and lead heat carriers. Nuclear Power Engineering. Nizhny Novgorod. 2007;(3-2):58-67.

7. Askhadullin RSh, Storozhenko AN, Lung AYU. Methods of regulating the oxygen content in TZHMT. Joint-Stock Company "SSC RF - Physics and Energy Institute named after A.I. Leypunsky". Obninsk, Russia, Journal Issues of Atomic Science and Technology. Series: nuclear reactor constants. 2017;(5):32-43.

8. Closure of the fuel cycle of nuclear power based on fast neutron reactors: collection of conference reports (October 11-12, 2018, Tomsk). Moscow: Publishing House of JSC NIKIET, 2020:328.

9. Beznosov AV, Bokova TA. Equipment of power circuits with heavy liquid metal heat carriers in nuclear power engineering: textbook. NSTU named after R.E. Alekseev. Nizhny Novgorod. 2011:536 p.

10. Fedorovich ED, Kurdyukov NP. Analytical review of the operational experience and modern developments of medium and low-power nuclear power plants with liquid metal coolant. Part 2 (Modern developments). St. Petersburg Polytechnic University of Peter the Great. Russia; JSC "St. Petersburg Marine Bureau of Mechanical Engineering "Malachite". Russia, Sosnovy Bor, Scientific and Technical collection "Technologies for ensuring the life cycle of nuclear power plants". 2020;21(3):10-31.

11. Posazhennikov AM, Yagodkin IV, Papovyan AK, Grishin AG, Isaev AYU. Purification of protective gas from aerosols of heavy liquid metal heat carriers JSC "SSC RF - Physics and Energy Institute named after A.I. Leypunsky". Obninsk, Russia, Journal of Atomic Science and Technology. Series: nuclear reactor constants. 2015;(2):102-119.

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit Topology on its Radiation Hardness

E.A. Kulchenkov, A.A. Demidov, S.B. Rybalka

Bryansk State Technical University,
blvd. 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk 241035, Russia

Received 30.10.2024

Accepted for publication 20.02.2025

Abstract

Method of recording responses to radiation exposure is considered using the X-ray complex RIK-0401 and it is shown that for linear voltage regulators integrated circuits it allows diagnosing presence of changes in their topology. Four types of integrated circuits (ICs) of IS-LS1-1.8V type have been studied. They are equivalent in their main electrical parameters, but have differences in the output key design (vertical transistors with different base wiring), current mirrors and differential stages. ICs have modified design of the output key base: 1) vertical $p-n-p$ -structures (Type 1); 2) mixed (lateral+vertical) $p-n-p$ -structures (Type 2); 3) design as in the foreign analogue and vertical $p-n-p$ -structures (Type 3); 4) design as in the foreign analogue and mixed (lateral+vertical) $p-n-p$ -structures (Type 4). It has been found that the highest radiation hardness to the total ionizing dose effects is demonstrated by samples of Type 1 and Type 2. RADON-23 laser complex (with a maximum energy density of 200 mJ/cm^2) has been used for examination of voltage regulator samples to impulse ionizing radiation hardness. The thyristor effect has not been fixed in all studied samples of Type 1–4. Results of the research allow developing methods for increasing the radiation hardness of the IS-LS1-1.8V by varying the topology of microcircuits and choosing the most advantageous option for manufacturing the output key.

Keywords: voltage regulator, total ionizing dose effects, ionizing radiation, radiation hardness

Адрес для переписки:

Рыбалка С.Б.
Брянский государственный технический университет,
бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия
e-mail: sbrybalka@yandex.ru

Address for correspondence:

Rybalka S.B.
Bryansk State Technical University,
blvd. 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk 241035, Russia
e-mail: sbrybalka@yandex.ru

Для цитирования:

E.A. Kulchenkov, A.A. Demidov, S.B. Rybalka.
Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit
Topology on its Radiation Hardness.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 63–68.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

For citation:

Kulchenkov EA, Demidov AA, Rybalka SB.
Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit
Topology on its Radiation Hardness.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):63–68.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

Исследование влияния топологии интегральной микросхемы стабилизатора напряжения на его радиационную стойкость

Е.А. Кульченков, А.А. Демидов, С.Б. Рыбалка

Брянский государственный технический университет,
бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск 241035, Россия

Поступила 30.10.2024

Принята к печати 20.02.2025

Рассмотрен метод регистрации отклика на радиационное воздействие с использованием рентгеновского комплекса РИК-0401 и показано, что для линейных стабилизаторов напряжения интегральных схем он позволяет диагностировать наличие изменений в их топологии. Исследованы 4 типа микросхем ИС-ЛС1-1.8В, которые по основным электрическим параметрам эквивалентны, но имеют отличия в исполнении выходного ключа (вертикальные транзисторы с различным разведением базы), токовых зеркал и дифференциальных каскадов: с измененным исполнением базы выходного ключа и вертикальными $p-n-p$ -структурами (Тип 1); с измененным исполнением базы выходного ключа и смешанными (латеральные + вертикальные) $p-n-p$ -структурами (Тип 2); с исполнением базы выходного ключа как у зарубежного аналога и вертикальными $p-n-p$ -структурами (Тип 3); с исполнением базы выходного ключа как у зарубежного аналога и смешанными (латеральные + вертикальные) $p-n-p$ -структурами (Тип 4). По результатам исследования установлено, что наибольшую радиационную стойкость к эффектам поглощённой дозы демонстрируют образцы микросхемы стабилизатора напряжения ИС-ЛС1-1.8В Типа 1 и Типа 2. Для исследования образцов линейного стабилизатора на стойкость к воздействию импульсного ионизирующего излучения использовался лазерный комплекс РАДОН-23 с максимальной плотностью энергии 200 мДж/см². Установлено отсутствие тиристорного эффекта в исследованных Типах 1–4 линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС1-1.8В. Полученные результаты позволяют разрабатывать способы повышения радиационной стойкости линейного стабилизатора напряжения ИС-ЛС1-1.8В путём варьирования топологии интегральных микросхем и выбирать наиболее выгодный вариант изготовления выходного ключа.

Ключевые слова: стабилизатор напряжения, эффекты поглощенной дозы, ионизирующее излучение, радиационная стойкость

Адрес для переписки:

Рыбалка С.Б.
Брянский государственный технический университет,
бул. 50 лет Октября, 7, г. Брянск, 241035, Россия
e-mail: sbrybalka@yandex.ru

Address for correspondence:

Rybalka S.B.
Bryansk State Technical University,
blvd. 50 let Oktyabrya, 7, Bryansk 241035, Russia
e-mail: sbrybalka@yandex.ru

Для цитирования:

Е.А. Kulchenkov, А.А. Demidov, S.B. Rybalka.
Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit
Topology on its Radiation Hardness.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 63–68.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

For citation:

Kulchenkov EA, Demidov AA, Rybalka SB.
Study of the Influence of the Voltage Regulator Integrated Circuit
Topology on its Radiation Hardness.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):63–68.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-63-68

Introduction

It is known that the important element of modern microelectronics are integrated circuits (IC) of voltage regulators, since almost any electronic circuit (simple circuits on transistors, operational amplifiers, digital and microprocessor systems, etc.) requires one or more stable sources of direct current for its stable operation [1–4].

For functioning and development of critically important industries (space exploration, aircraft manufacturing, nuclear power engineering, etc.) it is necessary the operation of electronic components under radiation exposure, including linear voltage regulators [4].

In particular, for discrete devices of the electronic component base and integrated circuits, the nature of their topology determines their radiation hardness [4–7]. Thus, it has been established that the topological features of bipolar transistor structures determine their main electrical characteristics (gain, current-voltage characteristics) for *n-p-n* and *p-n-p* transistors [4, 5], as well as bipolar analog integrated circuits of comparators and voltage regulators (consumption current, output voltage, etc.) under radiation exposure, in particular on the total ionizing dose value [4, 6, 7].

On account of this, the main goal of this investigation was to study the radiation hardness of linear voltage regulators produced on the basis of an imported analogue, equivalent in electrical parameters, but having topological differences (with different output key designs), which will optimize the choice of optimal topology options to increase the radiation hardness of voltage regulators integrated circuits.

Materials and methods

The object of the study was linear voltage regulator in the TO-220-3 package, with an output voltage

of 1.8 V (hereinafter IS-LS1-1.8V), manufactured by JSC "GRUPPA KREMNY EL" [8]. The study was carried out using the developed hardware and software complex (HSC) consisting of the following: X-ray equipment RIK-0401 [9], X-ray comparator DRI-0401, a set of measuring equipment (sources-measuring instruments PXIe-4143, PXIe-4139), and the developed software. Previously, the HSC was successfully tested to study the radiation behavior [10] of the linear LDO positive voltage regulator IS-LS-9V (manufactured by JSC "GRUPPA KREMNY EL"). The schematic diagram of the developed HSC is described in detail in [10–11]. Additionally, for examination of voltage regulator samples to impulse ionizing radiation hardness the RADON-23 [9] laser complex (with a maximum energy density of 200 mJ/cm²) also was used.

The X-ray equipment RIK-0401 is a RAP-100 X-ray source with a maximum anode voltage of 80 kV and a maximum anode current of 0.3 mA, installed in an X-ray protective chamber with a two-coordinate positioning system with a step of 0.1 mm. The intensity of X-ray radiation was controlled using a DRI-0401 X-ray comparator. The HSC was controlled using specialized software developed in the LabView program that allows measuring the controlled parameters at a specified time interval, and also provides the ability to set the electrical operating mode of the IC samples during irradiation process. For linear voltage regulator microcircuits, the HSC allows monitoring the output voltage, minimum voltage drop, consumption current, voltage instability, and current instability. The linear voltage regulator samples were installed on the contact device board in accordance with the diagram shown in Figure 1a. To ensure free access of X-ray radiation to the linear voltage regulator crystal, decapsulation was performed for the samples under study (see Figure 1b).

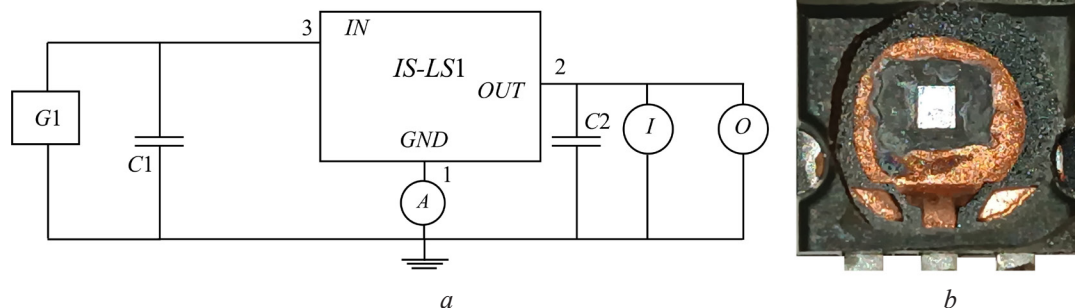


Figure 1 – Scheme of set-up for switching on the voltage regulators microcircuit during radiation exposure studies (a): *G1* – PXIe-4143 power supply, *I* – electronic load (PXIe-4139), *O* – voltmeter (a built-in PXIe-4139 meter is used), *C1* = 1 μF, *C2* = 10 μF; the decapsulated IS-LS1-1.8V sample (b)

Results and discussion

During the radiation experiments were studied four types of IS-LS1-1.8V, which are equivalent in their main electrical parameters, but have differences in the design of the output key (vertical transistors with different base wiring), current mirrors and differential stages: Type 1 with a modified design of the output key base and vertical $p-n-p$ -structures; Type 2 with a modified design of the output key base and mixed (lateral + vertical) $p-n-p$ -structures; Type 3 with the design of the output key base as in the foreign analogue and vertical $p-n-p$ -structures; Type 4 with the design of the output key base as in the foreign analogue and mixed (lateral + vertical) $p-n-p$ -structures. For comparison, the analog of IS-LS1-1.8V the voltage regulator LT1963 [12] was also examined.

According to the results of studies it was established that the most sensitive parameters of linear voltage regulator's to the total ionizing dose effects are the output voltage and the consumption current. Figure 2 shows the dependence of the output voltage on the total ionizing dose value for all samples of the IS-LS1-1.8V and the analog of the LT1963 voltage regulator.

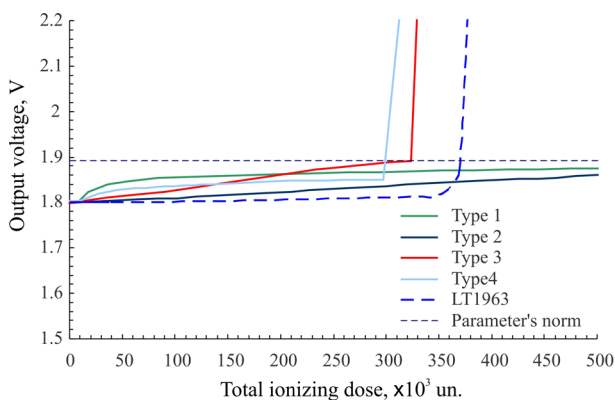


Figure 2 – Dependence of change of the output voltage for the integrated circuit IS-LS1-1.8V and LT1963 analogue on the value of the total ionizing dose (the dotted line is the norm of the parameter of the output voltage of the microcircuit)

For the Type 1 microcircuit sample, the output voltage gradually increases from 1.8 to 1.87 V at an total ionizing dose of 500×10^3 un., without reaching the limit of the parameter's norm (1.89 V for the IS-LS1-1.8V microcircuit). For the Type 2 sample, the output voltage gradually increases from 1.8 to 1.85 V at an total ionizing dose of 500×10^3 un., also without reaching the limit of the parameter norm. For the

Type 3 and Type 4 samples, the output voltage gradually increases and reaches the limit of the parameter norm at an total ionizing dose of 324×10^3 and 300×10^3 un., respectively. Further, with an increase in the total ionizing dose, a functional failure of the Type 3 and Type 4 microcircuit samples is fixed. For the LT1963 analogue, similar behavior is recorded with the parameter norm being reached at an total ionizing dose of 370×10^3 un. and subsequent functional failure with an increase in the total ionizing dose.

Thus, the highest radiation hardness in terms of output voltage to the total ionizing dose effects is demonstrated by microcircuits with the Type 1 topology (with a modified design of the output key base and vertical $p-n-p$ -structures) and Type 2 (with a modified design of the output key base and mixed (lateral + vertical) $p-n-p$ -structures), superior, including foreign analog of LT1963.

Further, Figure 3 shows the dependence of the consumption current on the total ionizing dose value for all samples of the IS-LS1-1.8V and the LT1963 analog.

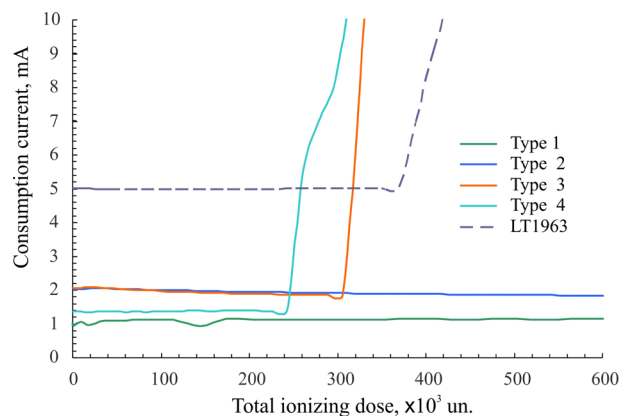


Figure 3 – Dependence of change of the consumption current for the integrated circuit IS-LS1-1.8V and LT1963 analogue on the value of the total ionizing dose

For the Type 1 microcircuit sample, the consumption current value changes insignificantly from 1.03 to 1.87 mA with an increase in the final total ionizing value to 600×10^3 un. For the Type 2 microcircuit, the consumption current value also changes insignificantly from 2.07 to 1.97 mA with an increase in the total ionizing dose up to 600×10^3 un. For the Type 3 sample, the consumption current value also changes insignificantly (2.07 to 1.85 mA) up to an total ionizing dose value of 305×10^3 un. and then

begins to increase sharply, reaching a value of 10 mA at a dose of 330×10^3 un. Analogously, for the Type 4 sample, the current consumption value changes slightly (1.35 to 1.39 mA) up to the total ionizing dose of 243×10^3 un. and then begins to increase sharply, reaching a value of 10 mA at a dose of 310×10^3 un.

As follows from Figure 3, for the LT1963 analog, the current consumption value practically does not change (≈ 4.99 mA) up to the total ionizing dose of 369×10^3 un. and then begins to increase harshly, reaching a value of 10 mA at a dose of 428×10^3 un.

Thus, the maximum stability and the lowest current consumption value under radiation conditions are demonstrated by voltage regulator IC samples with Type 1 and Type 2 topology, being the most radiation hardness in this range of ionizing radiation dose.

In addition, the IS-LS1-1.8V samples have been testing on hardness to pulsed ionizing radiation using the RADON-23 laser complex with a maximum energy density of up to 200 mJ/cm^2 . The RADON-23 laser complex operating mode is following: the wavelength – 1064 nm; the radiation pulse energy – 120 mJ; the effective pulse duration – 10 ns; the beam diameter – 11 mm. It was found that the thyristor effect is not observed in the studied samples of Type 1–4 both at a minimum energy density of 1 mJ/cm^2 (see Figure 4a) and at a maximum of 200 mJ/cm^2 (see Figure 4b). The interruption time of the IS-LS1-1.8V operation was $300 \text{ }\mu\text{s}$ (energy density – 1 mJ/cm^2) and $700 \text{ }\mu\text{s}$ (energy density – 200 mJ/cm^2) correspondingly, which does not exceed the required standard.

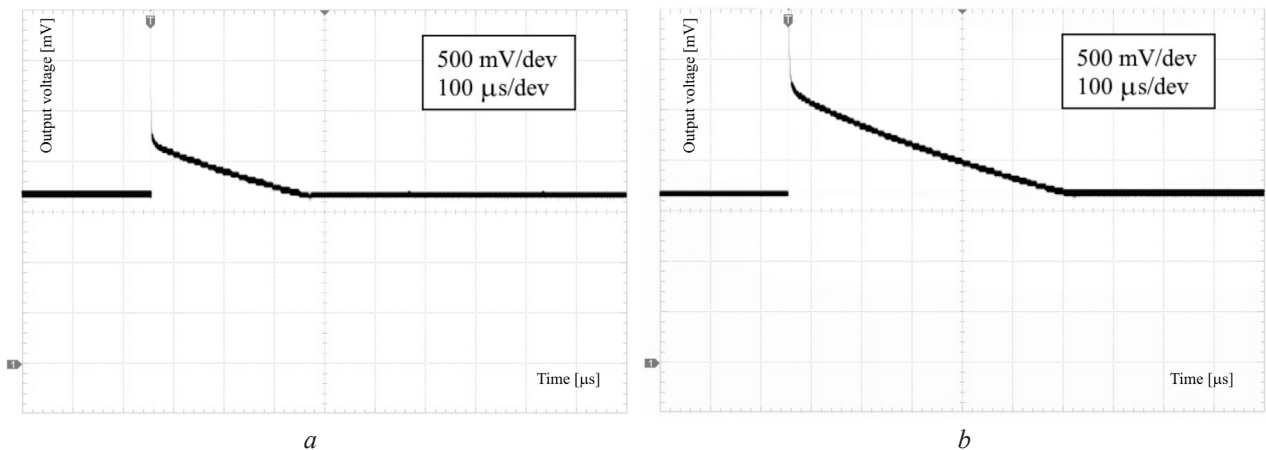


Figure 4 – The oscillogram of the IS-LS1-1.8V integrated circuit sample under the exposure of pulsed ionizing radiation (RADON-23 laser complex) at voltage supply of 20 V and load current of 25 mA with energy density (scale factor – 500 mV/dev, 100 $\mu\text{s}/\text{dev}$): a – 1 mJ/cm^2 ; b – 200 mJ/cm^2

Thus, the method used to study the response to radiation exposure made it possible to diagnose significant differences in the radiation hardness of voltage regulator microcircuits depending on the presence of changes in their topology, despite the equivalence of the electrical parameters of the types studied. Therefore, this method is perspective and can be used for the design and development of electronic component base products operating under radiation conditions [3, 6, 13–15].

Conclusion

Influence of the integrated circuit topology of the IS-LS1-1.8V linear voltage regulator on its radiation hardness has been studied. It was found that the maximum of radiation hardness to the total ionizing dose effects (by parameters of output voltage

and consumption current) is demonstrated by voltage regulator microcircuits with the topology of Type 1 (with a modified design of the output key base and vertical *p-n-p*-structures) and Type 2 (with a modified design of the output key base and mixed (lateral+vertical) *p-n-p*-structures), surpassing the other two types and its foreign analogue LT1963. Study of IS-LS1-1.8V samples of Type 1–4 for hardness to pulsed ionizing radiation showed that the thyristor effect was not fixed in the investigated samples up to an energy density of 200 mJ/cm^2 .

Results obtained allow to formulate methods for increasing the radiation resistance of the linear voltage regulator IS-LS1-1.8V and to choose the most advantageous option for manufacturing the output key. The method proposed can be also adapted in monitoring and assessing the trusted electronics and radiation hardness at all stages of the life cycle of

electronic component base products (during development, production, etc.).

Acknowledgments

The results of the Research and Development have been achieved during the implementation of the project "Integrated microcircuits of analog signal converters in metal-polymeric package of various types: development and mastering of technology, replacement of imported analogs and organization of serial production" (agreement with the Russian Ministry of Science and High Education of 9 February 2023 No. 075-11-2023-008) using state support measures provided by the Russian Federation Government's Decree of 9 April, 2010 No. 218.

References

1. Patrick DRS, Fardo W, Richardson RE, Chandra V. *Electronic Devices and Circuit Fundamentals*. New York: River Publishers. 2023:1078. DOI: 10.1201/9781003393139
2. Gurevich V. *Power Supply Devices and Systems of Relay Protection*. Boca Raton: CRC Press 2014:260. DOI: 10.1201/b15015
3. Geytenko EN. *Secondary power supplies. Circuit technique and Calculation*. Moscow: Solon Press. 2008:448. (In Russ.).
4. Belous AI, Solodukha VA, Shvedov SV. *Space Electronics*. Moscow: Tekhnosfera. 2015:696. (In Russ.).
5. Zebrev GI. *Radiation Effects in Highly Integrated Silicon Integrated Circuits*. Moscow: NIYAU MIFI. 2010:148. (In Russ.).
6. Iniewski K. *Radiation Effects in Semiconductors*. CRC Press: Boca Raton. 2011:422. DOI: 10.1201/9781315217864
7. Tapero KI, Didenko SI. *Fundamentals of Radiation Resistance of Electronic Products: Radiation Effects in Electronic Products*. Moscow: Izd. dom MISiS. 2013:349. (In Russ.).
8. JSC "GRUPPA KREMNY EL". Access mode: <https://group-kremny.ru/>. Access date: 27.10.2024. (In Russ.).
9. JSC "Specialized electronic systems" (SPELS). Access mode: <http://www.spels.ru>. Access date: 27.10.2024.
10. Rybalka SB, Demidov AA, Kulchenkov EA. Study of radiation hardness of linear voltage regulator. *Advances in Applied Physics*. 2023;5:446. DOI: 10.51368/2307-4469-2023-11-5-446-454
11. Rybalka SB, Demidov AA, Kulchenkov EA, Pilipenko KS. Radiation behaviour study of linear voltage regulator. Saint-Petersburg OPEN 2024: Book of Abstract 11th International School and Conference on Optoelectronics, Photonics, Engineering and Nanostructures "Saint-Petersburg OPEN 2024". St. Petersburg: HSE University. 2024: 284-285. (In Russ.).
12. LT1963A Series Low Noise, Fast Transient Response LDO Regulators, Analog Devices. Access mode: <http://www.linear.com/LT1963A>. Access date: 27.10.2024.
13. Tapero KI, Ulimov VN, Chlenov AM. Radiation effects in silicon integrated circuits for space applications. Moscow: Laboratoriya Znaniy. 2020:304. (In Russ.).
14. Chumakov AI. *Radiation hardness of electronic components base products*. Moscow: NIYAU MIFI. 2015:512. (In Russ.).
15. Ke-Horng Chen. *Power Management Techniques for Integrated Circuit Design*. Singapore: Wiley. 2016:552. DOI: 10.1002/9781118896846

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия фоторезистивных плёнок на кремнии

Д.И. Бринкевич¹, Е.В. Гринюк^{1,2}, В.С. Просолович¹, С.Д. Бринкевич³, В.В. Колос⁴,
О.А. Зубова⁴

¹Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь

²Научно-исследовательский институт физико-химических проблем БГУ,
ул. Ленинградская, 14, г. Минск 220006, Беларусь

³ООО «Мой медицинский центр – высокие технологии»,
Октябрьский пр-т, 122, г. Всеволожск 188640, Ленинградской обл., Россия

⁴ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

Поступила 11.12.2024

Принята к печати 20.01.2025

Проведён сравнительный анализ применения метода отражательно-абсорбционной спектроскопии с использованием заводской приставки диффузного отражения DRIFT ИК-спектрофотометра ALPNA и метода нарушенного полного внутреннего отражения для исследования оптических характеристик плёнок фоторезистов ФП9120, AZ nLOF 2020, 2070, 5510 и КМР E3502 толщиной 0,99–6,0 мкм, сформированных на пластинах монокристаллического кремния методом центрифугирования. В отражательно-абсорбционных ИК спектрах полосы поглощения наблюдаются на фоне интерференционных полос, что позволяет определять показатель преломления фоторезиста при известной геометрической толщине плёнки. Показано, что метод отражательно-абсорбционной спектроскопии с использованием заводской приставки диффузного отражения DRIFT имеет как более высокую чувствительность по сравнению с методом нарушенного полного внутреннего отражения, так и пригоден для проведения неразрушающего межоперационного контроля в технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники. Наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистивных плёнок AZ nLOF и КМР E3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (≈ 1500 см⁻¹), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум ≈ 1595 и 1610 см⁻¹) и полоса с максимумом ≈ 1430 см⁻¹, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH₂-мостиком. Установлено, что различия отражательно-абсорбционных спектров негативных фоторезистов разных производителей – MicroChemicals (AZ nLOF серии 2000) и Kemplur Microelectronics (КМР E3502) – связаны с различными технологиями получения фенолформальдегидной смолы и наличием в плёнках остаточного растворителя.

Ключевые слова: фоторезист, кремний, отражательно-абсорбционная спектроскопия, нарушенное полное внутреннее отражение

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Д.И. Бринкевич, Е.В. Гринюк, В.С. Просолович, С.Д. Бринкевич,
В.В. Колос, О.А. Зубова.
Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия
фоторезистивных плёнок на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 69–76.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-15-1-69-76

For citation:

Brinkevich DI, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Brinkevich SD,
Kolos VV, Zubova OA.
Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive
Films on Silicon.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):69–76. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive Films on Silicon

D.I. Brinkevich¹, E.V. Grinyuk^{1,2}, V.S. Prosolovich¹, S.D. Brinkevich³, V.V. Kolos⁴,
O.A. Zubova⁴

¹Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus

²Research Institute for Physical Chemical Problems of the Belarusian State University
Leningradskaya str., 14, Minsk 220006, Belarus

³LLC “My Medical Center – High Technologies”,
Oktyabrsky Ave., 122, Vsevolozhsk 188640, Leningrad region, Russia

⁴JSC “INTEGRAL” – “INTEGRAL” Holding Managing Company,
Kazintsa str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 11.12.2024

Accepted for publication 20.01.2025

Abstract

A comparative analysis of the reflectance-absorption spectroscopy method's application using the diffuse reflection factory prefix DRIFT of the ALPHA IR spectrophotometer and the method of attenuated total reflection for study of the optical characteristics of the FP9120, AZ nLOF 2020, 2070, 5510 and KMP E3502 photoresist films with a thickness of 0.99–6.0 μm formed on the plates of monocrystalline silicon by centrifugation has been carried out. In the reflective absorption IR spectra absorption bands are observed on the background of interference bands which makes it possible to determine the refractive index of a photoresist at a known geometric film thickness. It is shown that the reflective absorption spectroscopy method using the diffuse reflection factory prefix DRIFT has both a higher sensitivity compared with the attenuated total reflection method and is suitable for non-destructive interoperative control during semiconductor electronics devices's manufacturing. The most intense in the reflective absorption spectra of AZ nLOF and KMP E3502 photoresistive films are bands of valence vibrations of the aromatic ring ($\approx 1500\text{ cm}^{-1}$), pulsation vibrations of the aromatic ring carbon skeleton (double maximum ≈ 1595 and 1610 cm^{-1}) and a band with a maximum of $\approx 1430\text{ cm}^{-1}$ due to vibrations of the benzene ring, connected to the CH_2 bridge. It was established that differences in the reflective absorption spectra of negative photoresist of different manufacturers – Micro-Chemicals (AZ nLOF series 2000) and Kempur Microelectronics (KMP E3502) are associated with various technologies of phenol-formaldehyde resin production and the residual solvent presence in the films.

Keywords: photoresist, silicon, reflectance-absorption spectroscopy, attenuated total reflection

Адрес для переписки:

Просолович В.С.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: prosolovich@bsu.by

Address for correspondence:

Prosolovich V.S.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: prosolovich@bsu.by

Для цитирования:

Д.И. Бринкевич, Е.В. Гринюк, В.С. Просолович, С.Д. Бринкевич,
В.В. Колос, О.А. Зубова.
Отражательно-абсорбционная ИК Фурье-спектроскопия
фоторезистивных плёнок на кремнии.
Приборы и методы измерений.
2025. Т. 16. № 1. С. 69–76.
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

For citation:

Brinkevich DI, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Brinkevich SD,
Kolos VV, Zubova OA.
Reflective Absorption IR Fourier-Spectroscopy of Photoresistive
Films on Silicon.
Devices and Methods of Measurements.
2025;16(1):69–76. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2025-16-1-69-76

Введение

Повышение степени интеграции в современной полупроводниковой микроэлектронике предъявляет высокие требования к блоку литографических операций [1]. Так, если при формировании элементной базы по *n*-МОП технологии используется до 10 операций фотолитографии, то при формировании элементной базы по БИКМОП технологии применяется до 22 операций фотолитографии [2]. Фоторезисты (ФР) продолжают совершенствоваться вместе с развитием микроэлектроники. Разрабатываются новые рецептуры ФР для достижения более высокого разрешения, повышенной чувствительности и лучшего контроля над критическими размерами. Доминирующими резистами, используемыми в процессах субмикронной и нанолитографии, являются ФР на основе фенолформальдегидных смол [3, 4]. В качестве плёнкообразующего полимера ФР для обратной литографии обычно используют новолачные или резольные смолы, являющиеся разновидностью фенолформальдегидных смол. В связи с вышесказанным исследование указанных ФР актуально как с научной, так и с практической точек зрения.

Для исследования тонких плёнок широко применяется метод ИК-Фурье спектроскопии нарушенного полного внутреннего отражения (НПВО), позволяющий получать информацию о составе и структуре сложных органических соединений и их смесей в твёрдом агрегатном состоянии [5, 6]. Этот метод широко применяется для исследования фоторезистивных плёнок на пластинах монокристаллического кремния [7, 8]. Однако он обладает недостаточной чувствительностью при измерении тонких (1–3 мкм) плёнок в широком диапазоне спектра. Кроме того, при измерении НПВО твёрдых плёнок необходим прижим для обеспечения плотного контакта плёнки с измерительной призмой. Это приводит к нарушению однородности, образованию царапин на поверхности плёнок и в некоторых случаях может вызывать разрушение измеряемого образца. Т.е. данный метод не позволяет проводить неразрушающий контроль параметров плёнок в процессе межоперационного контроля при проведении литографических операций на различных стадиях изготовления приборов

полупроводниковой электроники. С другой стороны, недостаточное прижимное усилие снижает интенсивность полос поглощения в спектре НПВО и, соответственно, чувствительность и воспроизводимость измерений.

Целью настоящей работы являлось изучение возможностей отражательно-абсорбционной ИК Фурье-спектроскопии с использованием приставки для диффузного отражения при исследовании оптических характеристик плёнок фоторезистов на монокристаллическом кремнии.

Образцы и метод исследования

Плёнки позитивного ФП9120 и негативных AZ nLOF2020, 2070, 5510 и KMP E3502 фоторезистов толщиной 0,99–6,0 мкм наносились на поверхность Si методом центрифугирования [9]. Перед нанесением ФР пластины кремния подвергались стандартному циклу очистки поверхности в органических и неорганических растворителях. После формирования плёнки ФР проводилась её сушка при температуре 90–110 °С. Измерение толщины плёнок ФР выполнялось на растровом электронном микроскопе HITACHI S-4800. ИК-Фурье спектры структур ФР/Si регистрировались в диапазоне 400–4000 см⁻¹ при комнатной температуре спектрофотометром ALPHA (Bruker Optik GmbH). Использовались заводские приставки для измерения диффузного отражения и нарушенного полного внутреннего отражения. При измерении НПВО разрешение составляло 2 см⁻¹, количество сканов – 24. Для исследования отражательно-абсорбционных ИК спектров использовалась приставка для диффузного отражения. В данном случае спектры поглощения слоями ФР формировались в результате прохождения зондирующего ИК излучения через слой в сторону кремниевой подложки, его зеркального отражения от подложки и обратного прохождения излучения через слой ФР, разрешение было не хуже 4 см⁻¹. Коррекция фона в обоих исследуемых методах проводилась перед каждым измерением.

Результаты и их обсуждение

Характерный отражательно-абсорбционный спектр плёнок позитивного новолачного фоторезиста ФП9120, полученный на приставке

для диффузного отражения, представлен на рисунке 1а. Для сравнения на рисунке 1б приведён спектр нарушенного полного внутреннего отражения того же образца. Отметим, что в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО энергетическое положение полос поглощения совпадало. Экспериментально измеренные частоты полос ИК-поглощения и их принадлежность к функциональным группам фоторезиста ФП9120, определённые по спектрам НПВО, приведены ранее в работе [7].

Интенсивность полос в отражательно-абсорбционных спектрах была существенно выше (приблизительно в 3 раза), чем спектрах НПВО (рисунок 1а и б). Указанные обстоятельства указывают на перспективность применения приставок для диффузного отражения при исследовании фоторезистивных

плёнок на пластинах монокристаллического кремния. Определённым недостатком применения приставки для диффузного отражения является то, что в отражательно-абсорбционном спектре полосы поглощения наблюдаются на фоне интерференционных полос. Так, для плёнок толщиной ≈ 5 мкм (рисунки 1а и 2) наиболее интенсивные полосы поглощения наблюдались в области $700\text{--}1700\text{ см}^{-1}$ на фоне первой (экстремум при $\approx 880\text{ см}^{-1}$) и второй (экстремум при $\approx 1560\text{ см}^{-1}$) интерференционных полос. Это обстоятельство затрудняет анализ изменения интенсивностей полос поглощения при внешних воздействиях. Отметим, что в спектрах НПВО плёнок ФР при волновом числе $\nu < 1600\text{ см}^{-1}$ (рисунок 1б) имеет место монотонное возрастание фонового поглощения, обусловленное рассеянием/отражением на границе раздела ФР/Si [7].

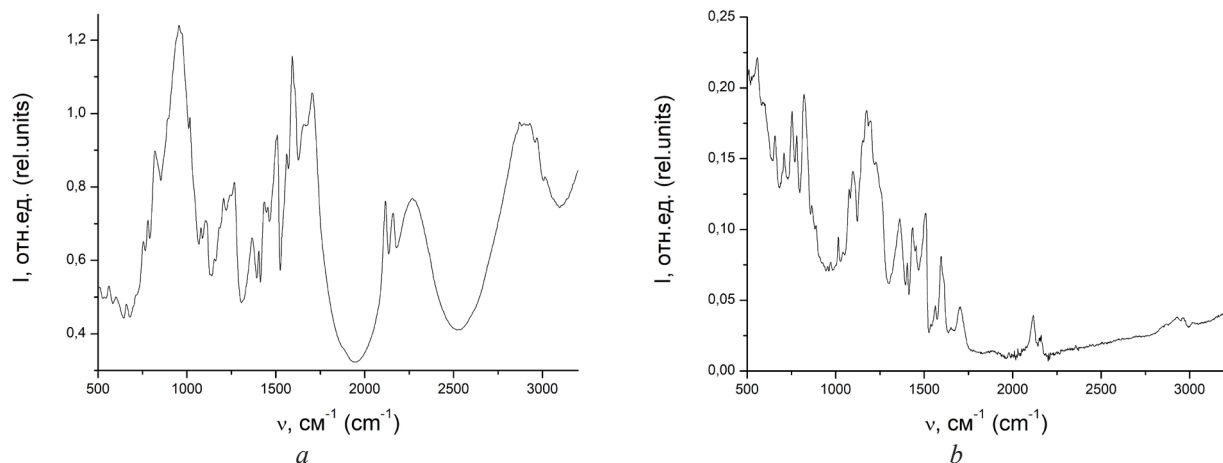


Рисунок 1 – Отражательно-абсорбционный спектр (а) и спектр нарушенного полного внутреннего отражения (б) плёнок толщиной 5,0 мкм позитивного фенолформальдегидного фоторезиста ФП9120

Figure 1 – Reflective absorption (а) and attenuated total reflection (б) IR spectra of positive phenol-formaldehyde photoresist FP9120 films with a thickness of 5.0 μm

С другой, стороны, наличие в отражательно-абсорбционных спектрах интерференционных полос открывает дополнительные возможности для исследования фоторезистивных плёнок. Известно [9], что энергетическое положение максимумов интерференционных полос определяется выражением:

$$m\lambda = 2nd, \quad (1)$$

где m – номер максимума; λ – длина волны максимума; n – показатель преломления

плёнки; d – геометрическая толщина плёнки. Это позволяет при известной геометрической толщине плёнки определить показатель преломления n фоторезистивной плёнки.

При уменьшении толщины плёнки интерференционные полосы уширяются и смещаются в область больших волновых чисел. При толщинах фоторезистивных плёнок $\approx 1\text{--}2$ мкм полосы поглощения отчётливо проявляются на фоне широкой первой интерференционной полосы (рисунок 3), что позволяет достаточно

уверенно анализировать изменение их интенсивности (в частности при внешних воздействиях). Кроме того, при этих толщинах плёнок интенсивность полос поглощения в отражательно-абсорбционных спектрах существенно выше, чем в спектрах НПВО. Это обусловлено особенностями регистрации отражённого сигнала при использовании приставки диффузного отражения. Таким образом, использование данного метода исследования спектральных характеристик тонких плёнок предпочтительнее ввиду его более высокой чувствительности по сравнению с методом НПВО. Он пригоден, кроме того, для проведения неразрушающего межоперационного контроля в технологии изготовления приборов полупроводниковой электроники.

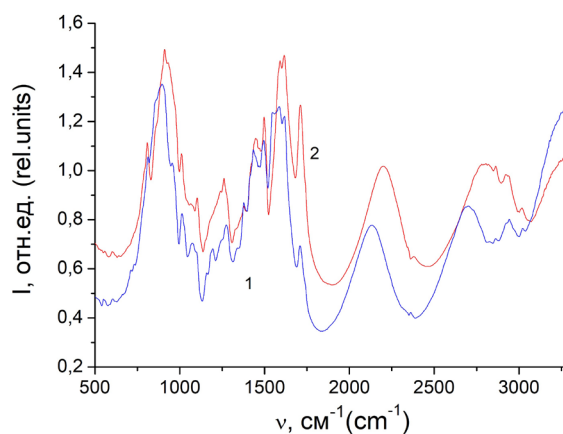


Рисунок 2 – Отражательно-абсорбционные спектры плёнок толщиной 5,8 мкм негативных фоторезистов AZ nLOF2070 (1) и KMP E3502 (2)

Figure 2 – Reflective absorption spectra of negative photoresists AZ nLOF2070 (1) and KMP E3502 (2) films with the thickness of 5.8 μm

На рисунке 2 приведены отражательно-абсорбционные Фурье-спектры плёнок одинаковой толщины (5,8 мкм) негативных ФР разных производителей: MicroChemicals GmbH, Германия (AZ nLOF2070 – кривая 1) и Kemplur Microelectronics, Китай (KMP E3502 – кривая 2). Они в основном совпадают, различаясь только в деталях, и качественно схожи с отражательно-абсорбционным спектром фенолформальдегидного позитивного фоторезиста ФП9120 (рисунок 1а). Основным отличием спектров негативных и позитивных ФР является то, что в спектрах негативных фоторезистов AZ nLOF и KMP E3502

отсутствуют полосы с максимумами при 2115 и 2150 см⁻¹, обусловленные кетеном – продуктом разложения светочувствительного компонента (диазохинона) позитивного фоторезиста ФП9120 [7].

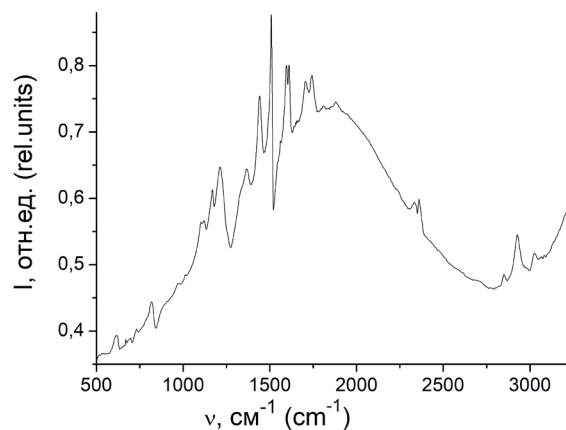


Рисунок 3 – Отражательно-абсорбционный спектр плёнок негативного фоторезиста AZ nLOF5510 толщиной 0,99 мкм

Figure 3 – Reflective absorption spectra of the negative photoresist AZ nLOF5510 films with the thickness of 0.99 μm

Отметим тот факт, что, несмотря на одинаковую толщину плёнок негативных фоторезистов AZ nLOF2070 и KMP E3502, максимумы их интерференционных полос смещены на ≈7 %. Это обусловлено, вероятно, различием в коэффициентах преломления данных фоторезистов. Коэффициент преломления фенолформальдегидных смол может варьироваться в диапазоне $n = 1,56–1,65$ вследствие различной степени замещения ароматических колец фенола в полимере [10]. Кроме того, значение n зависит от наличия других компонентов (в частности, остаточного растворителя) в плёнках фоторезистов.

Наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО фоторезистивных плёнок AZ nLOF и KMP E3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (максимум при ≈1500 см⁻¹), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум при ≈1595 и 1610 см⁻¹) и полоса с максимумом при ≈1430 см⁻¹, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH₂-мостиком [11]. Эти полосы характерны для фенолформальдегидной

смолы [11] и наблюдались ранее в различных позитивных [7,8] и негативных [12] фоторезистах.

Во всех отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО исследованных фоторезистивных плёнок наблюдалась интенсивная широкая структурированная полоса с несколькими максимумами в диапазоне 1050–1270 см^{-1} . В данном спектральном диапазоне наблюдаются колебания С–О и С–С-связей растворителя и плоскостные деформационные колебания С–О связей фенольной группы фенолформальдегидной смолы [11]. Кроме того, в диапазоне волновых чисел 1700–1720 см^{-1} наблюдалась связанная с остаточным растворителем полоса, обусловленная валентными колебаниями $\text{C}=\text{O}_{\text{str}}$ в сложных ароматических эфирах. Её интенсивность снижалась при сушке фоторезистивной плёнки. В тонких плёнках AZ nLOF5510 она имела 2 максимума (рисунок 3). Это может быть обусловлено образованием адгезионной связи с кремнием. Отметим, что растворитель ФР серии AZ nLOF – ацетат монометилового эфира пропиленгликоля (PGMEA) – используется для улучшения адгезии к поверхности кремния.

Наблюдался также ряд полос средней и малой интенсивности в области волновых чисел $\nu = 400\text{--}900\text{ см}^{-1}$, энергетическое положение и принадлежность которых к функциональным группам были подробно рассмотрены в [7, 12]. Наиболее сильной из них была полоса деформационных колебаний С–Н связей с максимумом при 810 см^{-1} , обусловленная внеплоскостными колебаниями С–Н-связей ароматического кольца.

В области валентных колебаний С–Н связей в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах НПВО фоторезистивных плёнок наблюдались полосы с максимумами при ≈ 2870 и 2925 см^{-1} , обусловленные асимметричными и симметричными валентными колебаниями С– H_2 связей, и полоса с максимумом при 3010 см^{-1} , связанная с валентными колебаниями С–Н связи. Отметим, что интенсивность полос колебаний С– H_2 связей была существенно выше интенсивности полосы колебаний С–Н связей (рисунок 3). В отражательно-абсорбционных спектрах всех фоторезистивных плёнок также присутствовала широкая слабая полоса с максимумом в области $\approx 3300\text{ см}^{-1}$, обусловленная валентными колебаниями О–Н связи.

Отражательно-абсорбционные спектры, как и спектры НПВО, негативных ФР разных производителей – MicroChemicals GmbH, Германия и Kemplur Microelectronics, Китай – различались в деталях (рисунок 2). Это, вероятнее всего, связано с различными технологиями, используемыми этими производителями. Так, интенсивность полос с максимумами при 3010 и 2925 см^{-1} , связанных с валентными колебаниями СН- и CH_2 -групп, выше в плёнках КМР E3502, а в фоторезистах AZ nLOF2070 преобладает полоса с максимумом при $\approx 2940\text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями CH_3 - группы. В плёнках AZ nLOF2070 были выше интенсивности полос, связанных с остаточным растворителем – полосы с максимумами при 1710 см^{-1} (характерна для валентных колебаний С=О связей в сложных алифатических эфирах [6]), 1375, 1240 и 1180 см^{-1} (колебания С–О связей в эфирной группе). Интенсивность этих полос снижалась при термообработках, и они частично исчезали из спектра.

Различия в отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистов КМР E3502 и AZ nLOF2070 наблюдались также и в области пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца. Интенсивность полос с максимумами при ≈ 610 и 1590 см^{-1} была выше в фоторезистах корпорации Kemplur Microelectronics (КМР E3502). С другой стороны, в плёнках AZ nLOF2070 дополнительно наблюдалась достаточно интенсивная полоса с максимумом при $\approx 1550\text{ см}^{-1}$, что может указывать на наличие взаимодействий, изменяющих силовые поля вблизи части ароматических колец. В пользу этого вывода свидетельствует смещение в низкоэнергетическую область полосы, обусловленной колебаниями бензольного кольца, связанного с CH_2 -мостиком [11]. Её максимум в КМР E3502 наблюдался при $\approx 1450\text{ см}^{-1}$, а в AZ nLOF2070 смещался к $\approx 1435\text{ см}^{-1}$. Интенсивности и энергетическое положение остальных полос ИК поглощения в плёнках AZ nLOF2070 и КМР E3502 совпадали.

Заключение

Проведено сравнение ИК-Фурье отражательно-абсорбционных спектров и спектров нарушенного полного внутреннего отражения плёнок фенолформальдегидных фоторезистов

ФП9120, AZnLOF 2020, 2070, 5510 и КМР Е3502 толщиной 0,99–6,0 мкм, сформированных на пластинах монокристаллического кремния методом центрифугирования. Установлено, что интенсивность полос поглощения в отражательно-абсорбционных спектрах приблизительно в 3 раза выше, чем в спектрах нарушенного полного внутреннего отражения.

Показано, что отражательно-абсорбционная спектроскопия обладает преимуществами перед исследованиями спектров нарушенного полного внутреннего отражения при изучении тонких (менее 2–3 мкм) плёнок также и с точки зрения возможности проведения неразрушающего межоперационного контроля. Установлено, что наиболее интенсивными в отражательно-абсорбционных спектрах и спектрах нарушенного полного внутреннего отражения фоторезистивных плёнок AZ nLOF и КМР Е3502 являются полосы валентных колебаний ароматического кольца (максимум при $\approx 1500 \text{ см}^{-1}$), пульсационных колебаний углеродного скелета ароматического кольца (сдвоенный максимум ≈ 1595 и 1610 см^{-1}) и полоса с максимумом при $\approx 1430 \text{ см}^{-1}$, обусловленная колебаниями бензольного кольца, связанного с CH_2 -мостиком.

Различия в отражательно-абсорбционных спектрах негативных фоторезистов разных производителей – MicroChemicals (AZ nLOF серии 2000) и Kemplur Microelectronics (КМР Е3502) – связаны с различными технологиями получения основы фоторезистов и наличием в плёнках остаточного растворителя. В отражательно-абсорбционных спектрах фоторезистивных плёнок наблюдаются интерференционные полосы, что позволяет определять показатель преломления фоторезиста n (при известной геометрической толщине плёнки) или толщину плёнки (при известном n).

Благодарности

Работа выполнена в рамках задания 2.16 государственной программы научных исследований “Материаловедение, новые материалы и технологии”, подпрограммы “Наноструктурные материалы, нанотехнологии, нанотехника” (“Наноструктура”).

Список использованных источников

1. Sunipa R., Ghosh C.K., Dey S., Pal A.K. Solid State and Microelectronics Technology. – Singapore: Bentham Science Publishers Pte. Ltd., 2023. – 407 p.
DOI: 10.2174/9789815079876123010001
2. Гранько С.В. Применение фоторезистивных масок для маскирования ионного пучка в технологии КМОП интегральных схем / С.В. Гранько [и др.] // Вестник Нижегородского университета. Сер. Физика. – 2001. – № 2. – С. 41–47.
3. Моро У. Микролитография. Принципы, методы, материалы. В 2-х ч. Ч. 2. – М.: Мир, 1990. – 632 с.
4. Mack C.A. Field Guide to Optical Lithography. – SPIE Press, Bellingham, WA, 2006. – 122 p.
5. Харченко А.А. Радиационно-индуцированные процессы в структурах DLC/полиимид при облучении γ -квантами ^{60}Co / А.А. Харченко [и др.] // Химия высоких энергий. – 2022. – Т. 56, № 5. – С. 378–387.
DOI: 10.31857/S0023119322050059
6. Преч Э., Бюльманн Ф., Аффольтер К. Определение строения органических соединений. Таблицы спектральных данных, Москва, Мир, Бином. 2006. – 438 с.
7. Бринкевич С.Д. Модификация пленок диазохинон-новолачного фоторезиста за областью внедрения ионов B^+ / С.Д. Бринкевич [и др.] // Химия высоких энергий. – 2020. – Т. 54, № 5. – С. 377–386.
DOI: 10.31857/S0023119320050046
8. Garcia I.T.S. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac–diazoquinone films / I.T.S.Garcia, F.C.Zawislak, D.Samios // Applied Surface Science. – 2004. – Vol. 228, no. 1–4. – Pp. 63–76.
DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.027
9. Бринкевич Д.И. Модификация спектров отражения пленок диазохинон-новолачного фоторезиста при имплантации ионами бора и фосфора / Д.И. Бринкевич [и др.] // Микроэлектроника. – 2019. – Т. 48, № 3. – С. 235–239.
DOI: 10.1134/S0544126919020029
10. Аскадский А.А., Кондрашенко В.И. Компьютерное материаловедение полимеров. Том 1. Атомно-молекулярный уровень. М.: Научный мир. 1999. – 544 с.
11. Poljansek I. Characterization of phenol-urea-formaldehyde resin by inline FTIR spectroscopy / I. Poljansek, U. Sebenik, M. Krajnc // Journal of Applied Polymer Science. – 2006. – Vol. 99, no. 5. – Pp. 2016–2028.
DOI: 10.1002/app22161
12. Бринкевич Д.И. Инфракрасная Фурье-спектроскопия структур фоторезист/кремний, используемых для обратной литографии / Д.И. Бринкевич [и др.] // Журнал прикладной спектроскопии. – 2023. – Т. 90, № 6. – С. 863–869.

Acknowledgments

The work was carried out within the framework of task 2.16 of the State Research Programme "Material Science, New Materials and Technologies", subprogramme "Nanostructured materials, nanotechnologies, nanotechnique" ("Nanostructure").

References

1. Sunipa R, Ghosh CK, Dey S, Pal AK. Solid State and Microelectronics Technology. Singapore: Bentham Science Publishers Pte. Ltd. 2023;407 p. DOI: 10.2174/9789815079876123010001
2. Granko SV, Volk SA, Leontiev AV, Kamyshan FF. Application of photoresistive masks for ion beam masking in CMOS technology of integrated circuits // Bulletin of the Nizhny Novgorod University. Ser. Physics. 2001;(2):41-47.
3. Moreau WM. Semiconductor lithography. Principles, practices and materials. N.Y., London: Plenum Press. 1988;952 p. DOI: 10.1007/978-1-4613-0885-0
4. Mack CA. Field Guide to Optical Lithography. – SPIE Press, Bellingham, WA. 2006;122 p.
5. Kharchenko AA, Fedotova YuA, Zur IA, Brinkevich DI, Brinkevich SD, Grinyuk EV, Prosolovich VS, Movchan SA, Remnev GE, Linnik SA, Lastovskii SB. Processes induced in DLC/Polyimide structures by irradiation with ^{60}Co γ -rays. High Energy Chemistry. 2022; 56(5):354-362. DOI: 10.1134/S0018143922050058
6. Pretsch E, Bühlmann P, Affolter C. Structure Determination of Organic Compounds, Berlin: Springer, 2000.
7. Brinkevich SD, Grinyuk EV, Brinkevich DI, Prosolovich VS. Modification of Diazoquinone–Novolac Photoresist Films beyond the Region of Implantation of B^+ Ions. High Energy Chemistry. 2020;54(5):342–351. DOI: 10.1134/S0018143920050045
8. Garcia ITS, Zawislak FC, Samios D. The effects of nuclear and electronic stopping powers on ion irradiated novolac–diazoquinone films. Applied Surface Science. 2004;228(1-4):63–76. DOI: 10.1016/j.apsusc.2003.12.027.
9. Brinkevich DI, Kharchenko AA, Prosolovich VS, Odzhaev VB, Brinkevich SD, Yankovski YuN. Reflection spectra modification of diazoquinone-novolac photoresist implanted with B and P ions. Russian Microelectronics. 2019;48(3):197-201. DOI: 10.1134/S1063739719020021
10. Askadsky AA, Kondrashenko VI. Computer materials science of polymers. Vol. 1. Atomic and molecular level. M.: Scientific world. 1999;544 p.
11. Poljansek I, Sebenik U, Krajnc M. Characterization of phenol-urea-formaldehyde resin by inline FT-IR spectroscopy. Journal of Applied Polymer Science. 2006;99(5):2016-2028. DOI: 10.1002/app22161
12. Brinkevich DI, Grinyuk EV, Brinkevich SD, Prosolovich VS, Kolos VV, Zubova OA, Lastovskii SB. Fourier-IR spectroscopy of photoresist/silicon structures for explosive lithography. Journal of Applied Spectroscopy. 2024;90(6):1223-1228. DOI: 10.1007/s10812-024-01657-4

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

Статьи, направленные в редакцию журнала, должны удовлетворять требованиям «Инструкции о порядке оформления квалификационной научной работы (диссертации)...», утвержденной Постановлением ВАК РФ от 28.02.2014 г. № 3

1. Материал статьи должен соответствовать профилю журнала и излагаться предельно ясно.

2. Статья представляется на русском или английском языке и публикуется на языке представления.

3. Поступившие в редакцию статьи проходят двойное полуслепое рецензирование. Основные критерии целесообразности опубликования – актуальность тематики, информативность, научная новизна.

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows, набор – сплошным текстом (без деления на колонки). 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 – «a», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма. Во всех случаях на рисунках должен быть 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. Полутонные фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и 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

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

13. Обозначения и сокращения, принятые в статье, расшифровываются непосредственно в тексте.

14. Размерность всех величин, принятых в статье, должна соответствовать Международной системе единиц измерений (СИ).

15. Набор формул должен проводиться в редакторе MathType целиком. Набор формул из составных элементов не допускается, номера формул – по правому краю. Нумеруются лишь формулы, на которые есть ссылки в тексте.

16. Необходимо использовать следующие установки редактора формул. Размеры: полный – 10 пт, подстрочный – 9 пт, под-подстрочный – 7 пт, символ – 14,5 пт, подсимвол – 12,5 пт. Стили: текст, функция, число, кириллица – шрифт «Times New Roman», вектор-матрица – шрифт «Times New Roman», жирный; греческий малый, греческий большой, символ – шрифт «Symbol», прямой; переменная – шрифт «Times New Roman», курсив.

17. Отдельные строчные буквы и специальные символы набираются в тексте гарнитурой Symbol **без использования редактора формул**. При наборе формул и буквенных обозначений необходимо учитывать следующие правила: **русский алфавит не используется**; греческие буквы, математические символы (grad, div, ln, min, max и др.), единицы измерения (Вт, Дж, В, кг и др.), кириллические буквы, сокращения от русских слов (q_{cp}); обозначения химических элементов и соединений (в т. ч. в индексе) набираются **прямо**; латинские буквы – переменные и символы физических величин (в т. ч. в индексе) набираются **курсивом**; векторы – жирным шрифтом (стрелки вверх не ставятся).

18. Начертание обозначений в формулах и в основном тексте должно быть полностью идентично. В расшифровке формул, которая начинается словом «где»,

символы и их порядок должны соответствовать символам и их порядку следования в формулах.

19. Список использованных источников составляется в порядке упоминания ссылок по тексту, должен содержать полные библиографические данные и приводится в конце статьи. Не рекомендуется давать ссылки на материалы конференций, статьи из электронных журналов без идентификатора DOI, учебные пособия, интернет-ресурсы. Ссылки на неопубликованные работы не допускаются. Желательно, чтобы количество ссылок было не менее 10; самоцитирование – не более 20 %.

20. Авторы на отдельной странице предоставляют о себе следующие сведения: фамилия, имя, отчество, ученая степень и звание, место работы и занимаемая должность, адрес электронной связи.

21. Статьи, излагающие результаты исследований, выполненных в учреждениях, должны иметь соответствующее разрешение на опубликование в открытой печати.

22. При необходимости в конце основного текста указываются наименование фонда, оказавшего финансовую поддержку, или уровень и наименование программы, в рамках которой выполнена работа, на русском и английском языках.

23. Авторы несут ответственность за направление в редакцию статей, ранее уже опубликованных или принятых к печати другими изданиями.

24. Статьи, не соответствующие перечисленным требованиям, к рассмотрению не принимаются и возвращаются авторам. Датой поступления считается день получения редакцией первоначального варианта текста.

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи.

AUTHOR GUIDELINES

1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

2. An article should be submitted in Russian or English and will be published in its original language.

3. Articles received by the Editorial Board will be reviewed by 2 specialists. The main criteria of acceptance are theme actuality, information value, and scientific novelty.

4. All materials should be submitted in two hard copies together with electronic file in the Word for Windows format (97/2000/2003). The paper should not exceed 14 pages of the typewritten text (Times New Roman, 12 points, 1.5-space).

5. The article should contain UDC number, Title (printed in capitals), Authors' names (the corresponding author name should be marked with asterisk), full Address of organization(s) in which the author(s) work, Abstract (200–250 words), Keywords (not more than 5 words), Introduction, the Text of the paper with tables, diagrams and figures (if there are any), Conclusion with clearly stated inferences, List of References, List of Symbols and Abbreviations (if it is necessary). Title, Authors' names and affiliation(s), Abstract, Keywords should be presented both in English and Russian languages.

6. The abstract should be informative (contain "squeeze" from all sections of the article – the introduction stating the purpose of the work, methods, main part and conclusion).

7. Figures should be black-and-white, represented in graphical formats tif, attached with Excel or MS Graph and added with captions. All symbols in figures should be described.

8. Tables should be placed directly in the article body. Diagrams and tables should not contain the same information. Each table should have the title. All tables, diagrams and figures should be referenced in the text.

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page.

10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be typed in MathType.

12. List of References is to be placed at the end of the article with full bibliographic information. Order of references should correspond to the order of their occurrence in the text. It is not recommended to refer to conference proceedings, papers from electronic journals without DOI number, textbooks, internet resources. References on unpublished works are prohibited. It is recommended to refer to not less than 10 references, self-citations – not more than 20 %.

13. The following information about every co-author should be presented: family name, first name, patronymic (or second) name (if there are any), scientific degree and title, organization and position, full address with the postal code for correspondence, office or mobile phone numbers, fax, e-mail.

14. Articles containing investigation results obtained in organizations should have a corresponding permission for publication.

15. Names of Foundations or Programs financially granted the research may be acknowledged in the end of the text.

16. Authors are responsible for submitting articles previously published or accepted by other publisher.

17. Articles not meeting the requirements of the Editorial Board would not be accepted and may be returned to the authors. The date of receipt is considered to be the day when the Editorial Board receives the author's original paper.

18. Authors conducting postgraduate (graduate studies, doctoral studies) have a priority in publishing their articles out of queue in the year of completion. Authors do not pay for publishing scientific articles. The Editorial Board can shorten and/or change the text if it does not strain the meaning of the article.

Информация для подписчиков и рекламодателей

Научно-технический журнал «Приборы и методы измерений» издается 4 раза в год, на русском и английском языке. Распространяется на территории Беларуси, России и странах СНГ. В журнале публикуются оригинальные статьи прикладного и фундаментального характера, а также обзорные статьи о современном состоянии, важнейших достижениях и тенденциях развития приборостроительной отрасли в Республике Беларусь и за рубежом.

Журнал «Приборы и методы измерений» является отличной площадкой для продвижения результатов научных исследований не только известных, но и начинающих исследователей. Журнал включён в крупнейшие базы данных научного цитирования Web of Science Core Collection (ESCI), EBSCO, DOAJ, WorldCat, OpenAIRE, Google Scholar, РИНЦ, ЭБС «Лань», НЭБ «КиберЛенинка», Соционет, которые признаны самыми авторитетными для мирового научного сообщества.

Оформить подписку на журнал можно через подписные каталоги:
РУП «Белпочта», ООО «Прессинформ», ООО «Криэйтив Сервис Бэнд»,
ООО «Екатеринбург-Опт», ООО «Глобалпресс»

Подписной индекс журнала «Приборы и методы измерений»:
Ведомственный – 748352 Индивидуальный – 74835

Предлагаем услуги по размещению рекламы
в журнале «Приборы и методы измерений»

Вид рекламного модуля	Для Республики Беларусь Стоимость в бел. руб. с НДС	Для стран СНГ Стоимость в рос. руб.
На обложке (стр. 2, 3) полноцветный	689,88	26975
Внутри журнала (формат 1/1), полноцветный	536,49	20950
Внутри журнала (формат 1/2), полноцветный	263,27	11235
Внутри журнала (формат 1/1), черно-белый	363,10	11235
Внутри журнала (формат 1/2), черно-белый	181,56	5390

Размещение рекламы в очередном номере осуществляется после предварительной оплаты
Заказчиком

Информацию для рекламодателей можно получить по тел. (+375) 44 566 47 88,
e-mail: l.katkova@bntu.by

Адрес и телефоны редакции:

Республика Беларусь, 220013, г. Минск, пр. Независимости, 65, корп. 17, каб. 432
тел.: +375 17 293 96 67

www.pimi.bntu.by e-mail: pimi@bntu.by

Индексы:
74835; 748352

