

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Том 15

№ 4

Vol. 15

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 15

№ 4

2024

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

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

Подписные индексы – 74835; 748352.

Ведущий научный редактор: Шахлевич Л.Н.

Технический редактор: Чабарова О.Л.

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

Подписано в печать .2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 10,1. Уч.-изд. л. 6,81. Тираж 35 экз.

Дата выхода в свет .2024. 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 15

№ 4

2024

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 Vība, *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)*

Paweł 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

Сухас Р. Кале, Дипак П. Патил	
Обзор носимых антенн для технологии 5G и телецентрической беспроводной связи (in English)	269
Д.М. Моховиков, Е.С. Барбин, Т.Г. Нестеренко, А.А. Таловская, А.С. Мырзахметов, И.В. Кулинич, П.Ф. Баранов, Д.П. Ильященко	
Конвертор поляризации на основе нитрида кремния на изоляторе (in English).....	287
С.Ф. Егоров	
Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»: исследование математических моделей регистраторов точки прицеливания начального и базового уровней.....	295
А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев, В.А. Лычковский	
Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток электрических машин на параметры тока холостого хода.....	307

Методы измерений, контроля, диагностики

В.А. Лапицкая, С.А. Чижик, Е.В. Луценко, Я.А. Соловьев, А.А. Насевич, К.С. Люцко, Т.В. Петлицкая, В.Б. Макаревич, Ю. Гуанбин	
Контроль микрорельефа поверхности кристаллов интегральных схем, дефектности гетеро- и субмикроструктур методом атомно-силовой микроскопии (in English).....	316
Е.С. Барбин, И.В. Кулинич, Т.Г. Нестеренко, А.Н. Коледа, Е.В. Шестериков, П.Ф. Баранов, Д.П. Ильященко	
Тонкоплёночная технология корпусирования микроэлектромеханических систем на основе каркасной структуры (in English).....	323
Н.В. Баковец, К.В. Козадаев	
Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания.....	334

CONTENTS

Measuring Instruments

<i>Suhas R. Kale, Dipak P. Patil</i>	
A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric Wireless Communication.....	269
<i>D.M. Mokhovikov, E.S. Barbin, T.G. Nesterenko, A.A. Talovskaya, A.S. Myrzakhmetov, I.V. Kulinich, P.F. Baranov, D.P. Il'yaschenko</i>	
Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Convertor.....	287
<i>S.F. Egorov</i>	
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Research of Mathematical Models of Target Point Determiners on Entry and Basic Levels (in Russian).....	295
<i>A.V. Isaev, Yu.V. Suhodolov, S.V. Sizikov, A.A. Lomtev, V.A. Lychkovsky</i>	
Influence of the Level of Defective Insulation Resistance of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current (in Russian).....	307

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

<i>V.A. Lapitskaya, S.A. Chizhik, E.V. Lutsenko, J.A. Solovjov, A.A. Nasevich, K.S. Liutsko, T.V. Petlitskaya, V.B. Makarevich, Guangbin Yu</i>	
Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force Microscopy Method.....	316
<i>E.S. Barbin, I.V. Kulinich, T.G. Nesterenko, A.N. Koleda, E.V. Shesterikov, P.F. Baranov, D.P. Il'yaschenko</i>	
Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based on Frame Structure.....	323
<i>N.V. Bakovets, K.V. Kozadayev</i>	
Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density Measuring by Hydrostatic Weighting (in Russian).....	334

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric Wireless Communication

Suhas R. Kale¹, 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 14.11.2024

Abstract

Wearable antennas for body-centric wireless communications have become very popular recently. Wearable antennas are body worn as a part of clothing on the human body and enable hands-free operation, which should also be comfortable. The latest 5G wireless technology has many advantages over 4G like high data transmission rate, low latency, etc. With the help of advanced and innovative technologies, wearable antennas can be developed using various materials. This paper presents a detailed review of the application of wearable antennas designed specifically for 5G and body-centric wireless communications. It also presents the selection of materials for the antennas and different fabrication techniques. The paper also looks at the bending of antennas at different radii and analyzes its impact on durability.

Keywords: wearable antenna, bending analysis, body-centric wireless communications, 5G wireless communication

Адрес для переписки:

Дипак П. Патил
Институт инженерии и менеджмента им. 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:

Suhas R. Kale, Dipak P. Patil.
A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric
Wireless Communication.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 269–286.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

For citation:

Kale Suhas R, Patil Dipak P.
A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric
Wireless Communication.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):269–286.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

Обзор носимых антенн для технологии 5G и телоцентрической беспроводной связи

Сухас Р. Кале, Дипак П. Патил

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 14.11.2024

В последнее время большую популярность приобрели носимые антенны для так называемой телоцентрической беспроводной связи. Такие носимые антенны носятся непосредственно на теле человека как элемент одежды и обеспечивают связь без помощи рук, что предоставляет дополнительные удобства. Новейшая технология беспроводной связи 5G имеет ряд преимуществ перед 4G, таких как высокая скорость передачи данных, низкая латентность и др. Использование передовых и инновационных технологий позволяет разрабатывать носимые антенны на основе различных материалов. В настоящей статье проведён подробный анализ применения носимых антенн, разработанных специально для 5G и телоцентрической беспроводной связи. Рассмотрены вопросы выбора материала для антенн и методов их изготовления. В статье также рассматривается влияние радиуса изгиба антенн на их характеристики и надёжность.

Ключевые слова: носимая антенна, анализ изгиба, телоцентрическая беспроводная связь, беспроводная связь 5G

Адрес для переписки:

Дипак П. Патил
Институт инженерии и менеджмента им. 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:

Suhas R. Kale, Dipak P. Patil.
A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric
Wireless Communication.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 269–286.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

For citation:

Kale Suhas R, Patil Dipak P.
A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric
Wireless Communication.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):269–286.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-269-286

1. Introduction

An antenna is an important part of wireless communication systems. Wireless communication uses antennas for transmitting and receiving. In the final phase of the transmitter, the electrical signal will be transformed into an electromagnetic signal by the use of an antenna. To achieve continuous signal reception at a distance, it is necessary to make use of a receiver antenna that is capable of capturing the needed electromagnetic signal and converting it into an electrical signal. Subsequently, the signal undergoes processing at the receiver. The popularity of wearable technologies has increased, and body-worn wireless communication devices have become even more important with 5G communications. These devices depend on the wearable antenna to provide wireless connectivity between devices and networks.

The lightweight and compact wearable antenna can be worn on the human body or attached to garments. It enhances wireless communication on the body by optimizing signal transmission and reception. The need for high-speed data transmission and the increasing number of devices connected to the Internet makes this type of communication more and more important. The integration of wearable antennas into wireless technology and body area networks has been seeing steady growth and has attracted significant interest. This is mostly due to the utilization of textile materials, which provide users with an increased degree of comfort and flexibility. Wearable electronics offer several advantages, including durability, adaptability, compactness, comfort, and energy efficiency. In modern times, advancements in technology demand the development of compact antennas that can be effectively utilized in body-worn networks.

From 2014 through 2019, the Cisco® Visual Networking Index Predicts the number of devices that can be worn will increase by five times to 578 million in 2019 [1]. As per precedence research, from 2022 to 2030, the market for wearable technologies is projected to expand at a CAGR of 13.89 %. In 2021, the worldwide market for wearable tech was estimated at \$121.7 billion, and by 2030, that number is going to increase to around \$392.4 billion [2]. Figure 1 shows various applications of wearable technology.

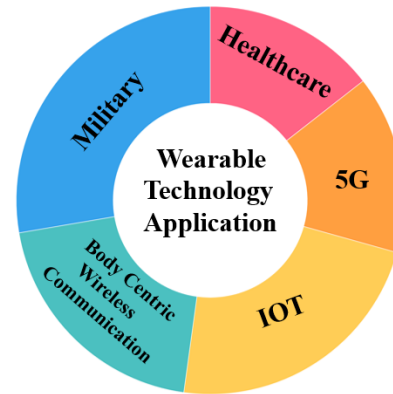


Figure 1 – Various application wearable technology [3]

This paper covers the latest wearable antenna developments for 5G and BCWC. The first section discusses wearable antennas and technology applications. BCWC is classified in Section 2. Textile antenna material classification is provided in Section 3. The stages and techniques for fabricating wearable antennas are covered in Section 4. Additionally, Section 5 covered the bending scenarios for antennas in various radiuses as well as the effect of bending on return loss. However, section 6 provides the wearable antenna for 5G MIMO and sub-6GHz applications. Section 7 discusses wearable antennas about future 6G connectivity. The last Section presents the article's overall conclusion.

2. Body centric wireless communication

BCWC helps to link devices that are either implanted in the body or worn on the human body or enables communication between individuals in close physical contact. Due to its economic and social impact on a diverse variety of applications, including healthcare monitoring, intelligent entertainment, and many others. Due to the numerous opportunities in this field, many researchers have focused their efforts in the area of health monitoring. It fits perfectly into the realm of local area networks as found in the human body. IEEE 802.15.6 is the latest international Wireless Body Area Network standard. This standard defines short-range communication, extremely low-power wireless communications within or near the human body. Figure 2 shows the three types of body-centric communications: in, on, and off. On-body communication operates within the frequency ranges of 2.360–2.400 GHz and 2.400–2.483 GHz, while in-body communication occurs within the frequency range of 402–405 MHz [4].

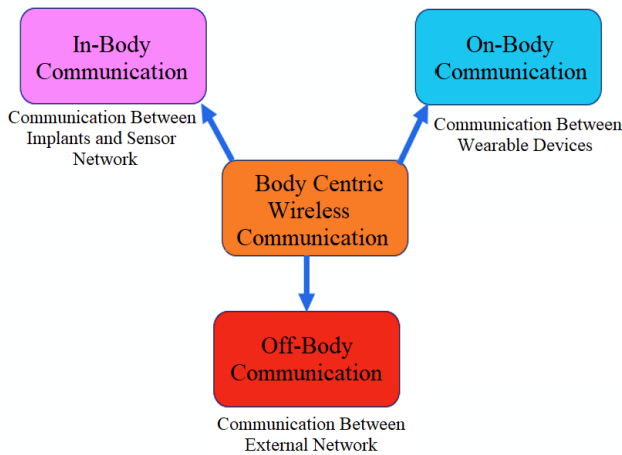


Figure 2 – Body-centric wireless communication domains [5]

Antenna and propagation research for telemedicine systems falls into two categories: external systems and communication with implanted sensors. A network of low-power wearable devices, both implanted and external, can use short-range UHF radio frequencies. However, compact devices may face limitations in data processing, power, and storage, affecting their functionality. To address these issues, incorporating a larger control device or base station into the wearable network is necessary. Body-worn communication systems have already been developed for specific occupations like paramedics, firefighters, and the military [3].

Implants for medical purposes and sensor networks can communicate with each other inside the body. Wireless communication links between wearable technologies and on-body networks enable on-body communications. Information can be transmitted between people or between individuals and a central unit through off-body communications. This communication typically occurs from a location outside the body to a device or system on the body [5].

Many antennas are placed in the body to check brain activity, cardiac activity, etc., or they can be worn on the body, called “On-Body Communication”. It is possible to communicate off-body by using an external base unit as shown in Figure 3. WBAN is used for various applications like health-care Monitoring Applications.

2.1. In-body communication

One of the components of the in-body communication system is an IMD, while the other

component is an external device for monitoring health. There is the capability of IMDs to monitor the wireless transmission of physiological data from patients in real-time [7]. IMDs have been utilized for a variety of applications, including but not limited to capsule endoscopy [8], real-time glucose monitoring [9] and brain implants [10]. The characteristics of IMDs include a high gain, a low SAR, flexibility, a small size, and a high bandwidth.

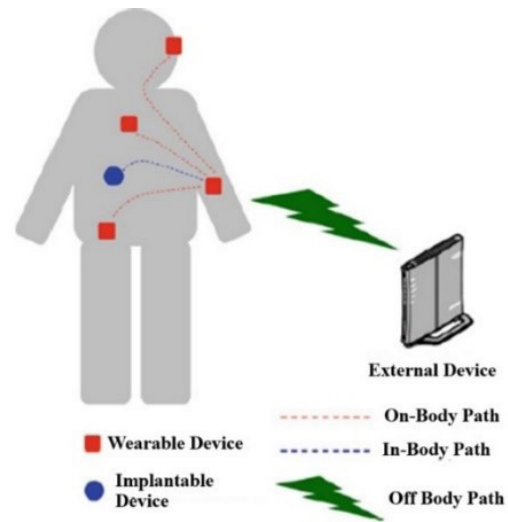


Figure 3 – Schematic of body centric wireless communication [6]

Garcia-Pardo, Concepcion, et al. propose a miniaturized ultra-wideband system to overcome the narrow bandwidth of the medical implant communications service band and achieve high data rates for body-implanted communication. Indigenous sensor networks have at least one sensor within a human. These wireless endogenous sensors are used in medical applications to capture and track critical information for treatment and health. In [11] the author has developed a wearable flexible antenna using Rogers XT8100 substrate, whose dimensions are 20 mm in width, 30 mm in height, and 50 μm in thickness of the substrate. The proposed antenna is primarily well-suited for facilitating communication within the human body, specifically in the intestinal region. Its intended application is for capsule endoscopy, a medical procedure involving the use of a small capsule to examine the gastrointestinal tract. The antenna operates throughout the ISM and UWB frequency bands, enabling effective in-body communication.

RFID is an emerging technology that has the potential to improve patient safety and hospital care.

RFID technology is used to monitor patients, staff, and equipment in hospitals, and to uniquely identify patients and their prescriptions, and can contribute to a safer healthcare environment and reduce the likelihood of medical errors. Implanted radio tags (rather than body-worn) are less likely to be misplaced, are untraceable, and are well suited for screening cooperative patients [12]. Implantable antennas need to be small, or even compact because they are implanted inside the human body. The human body also reduces the effect of antenna performance. A technique for in-body wireless communication with RFID tags inserted into a person's forearm was covered in [16]. The antenna's suggested measurements are 4 mm in width and 15.75 mm in length. A portable reader confirms a maximum reading range of 1.3 cm, and a three-layer phantom is used to test impedance characteristics. AVGs are life-saving medical devices that are essential to the survival of patients receiving hemodialysis for chronic kidney disease. Nevertheless, the use of AVGs often results in suboptimal outcomes due to several postoperative complications. These complications include restenosis, which is characterized by the accumulation of cellular material, and the formation of blood clots and infections. These complications contribute significantly to morbidity and mortality rates. The author in [17], especially for use in high-resolution monitoring applications, has developed a compact, dual-band implanted antenna. An outline of the intelligent AVG and its architecture are shown in Figure 4.

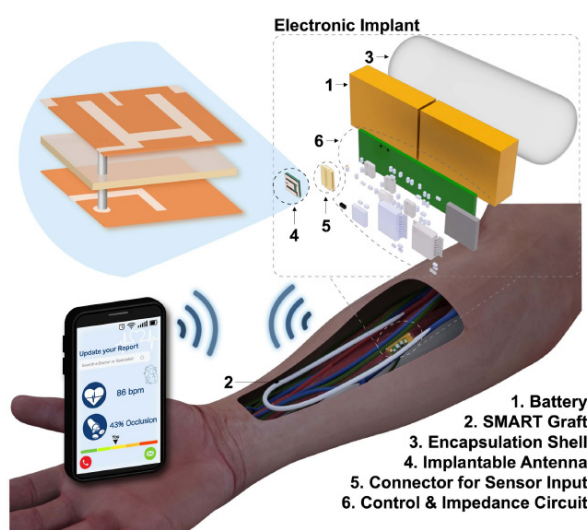


Figure 4 – Outline of the intelligent autologous vein grafts and its architecture [13]

The device functions in the 1.4 and 2.45 GHz frequency bands, which are mostly utilized for biotelemetry and wireless power transfer applications. Dimensions of the developed miniaturized antenna are $5 \times 5 \times 0.635 \text{ mm}^3$. This antenna covers the 300 MHz to 1.4 GHz range and 380 MHz in the 2.45 GHz band. Additionally, it also exhibits favorable impedance matching at two resonant frequencies. The developed antenna [13] is useful for patients suffering from chronic kidney disease and undergoing hemodialysis.

The author developed an E-shaped monopole antenna for pacemaker control and heartbeat monitoring [14]. The rectangular antenna was designed as a flexible felt substrate and measures 37 mm by 30 mm. This system is mainly useful for people suffering from arrhythmias. Pacemakers are very important for that patient. After the implantation of the pacemaker, a pacemaker stimulates the heart with electrical pulses to transmit information until it returns to a regular rhythm and pumps blood. This dual-band antenna system is mounted on the chest of the patient to measure the heartbeats, and the results will be sent to the doctor. The doctor controls the pacemaker's electrical pulse value to save the patient.

Because IMDs can monitor internal physiological data in real time and treat diseases remotely, their application in telemedicine is becoming more and more significant [18]. Some examples of implantable medical devices are shown in [14], [15], and [16]. However, IMDs' battery lives are capped by their capacities [17]. IMDs can't accommodate larger batteries because of their small size. Therefore, if the batteries in an IMD need to be changed, patients go through the misery of multiple operations. The afore-said concerns can be addressed by implementing wireless power transfer technologies in healthcare systems [18]. The comparison of various implantable antennas is reported in Table 1.

2.2. Off-body communication

In an off-body communication setup, one node of the communication system is located on a person's body, while the other is located at a considerable distance from them. Whenever a base station or numerous broadcast stations are present, this kind of communication becomes apparent. Figure 5 shows a schematic representation of a wireless communication OFF-Body antenna. A directed radiation pattern on an IoT device's antenna sends patient data to the doctor's device [26].

Table 1

Comparison of implantable antenna

Ref	Antenna type	Dimension	Frequency	Substrate	Reflection coeff (S11)	Band-width (%)	SAR (W/Kg)		Implantable parameter	Application
							1 g	10 g		
[19]	Meander Line	10mx 10mmx 0:635 mm	WMTS (1.42 GHz) and ISM Band (2.42 GHz)	Rogers RT/duroid 6010	for 1.42 GHZ, -25 for 2.4 GHz -34	3.57, 6.37	215, 565	38.7, 94.6	Skin	biotelemetry and ISM
[20]	Fractal shaped MIMO antenna	$0.13\lambda \times 0.06\lambda \times 0.01\lambda$	2.4–2.48GHz	Rogers RT/Duroid 6010	-30	38.75	278	38.7	brain and skin	ISM
[21]	Square ring antennas	$9.8 \times 9.8 \times 0.889 \text{ mm}^3$	2.4GHz	Rogers RO6010	-25	30	NA	93.2 for the scalp 87.5 for the heart	scalp and heart	ISM
[22]	a flat zigzag structure	$3 \times 3 \times 0.5 \text{ mm}$	2.4–2.48GHz	Rogers 3010	-24.9	22	32.3	10.8	heart	ISM
[23]	semi-circular slotted patch	$8 \times 9 \times 0.635 \text{ mm}^3$	WMTS (1.42 GHz) and ISM Band (2.42 GHz)	Rogers RT/Duroid 6010	-48 and -48	10 and 9.4	500 and 686	112 and 136	skin	biotelemetry and ISM
[24]	slotted patch	$8 \times 6 \times 0.5 \text{ mm}^3$	915 MHz and 2450 MHz	Rogers 6010	-28.5 and -22.8	9.84 and 8.57	971.56 and 807.34	118.26 102.04	scalp	ISM
[25]	MIMO	$5.652 \times \pi \times 0.13 \text{ mm}^3$	(402–405 MHz) (433.1–438.8 MHz)	Rogers RO3010	-30	33.90 %	269.3 275.2	538.6 550.4	head and large intestine	Biotelemetry

Respiration, also known as breathing, holds significant physiological significance within the realm of living organisms. The measurement of breathing rate serves as a crucial indicator in monitoring the development of illness, and an atypical breathing rate holds significant value as an indicator of a severe medical condition.

The author introduces a unique wearable antenna that can detect human breath without contact. The antenna uses multimaterial fiber for 2.4 GHz short-range wireless network applications. Composite metal-glass-polymer fibers provide a remarkable degree of flexibility, rendering them suitable for seamless integration into textiles without affecting the comfort or movement of the wearer. Additionally, these fibers

effectively hide the antenna from potential disturbances caused by the surrounding environment [27].

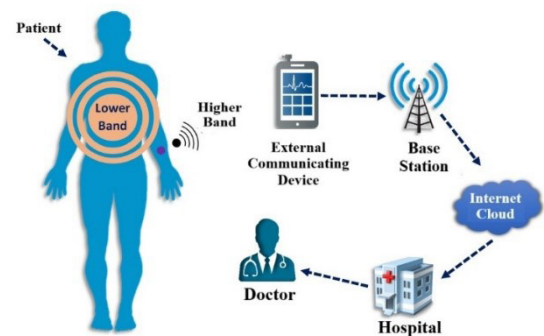


Figure 5 – Schematic representation of a wireless communication OFF-Body antenna [26]

Scarpello et al. [29] study return loss and mutual coupling stability across varying humidity, investigating bending array, body mounting, and textile layers.

Their research measures and simulates gain patterns in free space for body antennas operating in the 2.4–2.4835 GHz ISM band.

Rescue personnel vests incorporate high-gain textile antenna arrays at this frequency, highlighting a future trend where clothing not only protects but also provides real-time data on wearer and environmental conditions, enhancing safety and comfort. Furthermore, the incorporation of monitoring systems into the clothing, particularly in a discreet manner that is seamlessly integrated into the garment, serves to improve the functionality and, of utmost significance, the safety of the individual wearing it. The textile-based antenna integrates seamlessly into protective apparel like firefighter garments [30].

2.3. On-body communication

On-body communication systems are classified as body-centric if both the transmitting and receiving nodes are carried by or attached to the human body. These types of wireless communication systems provide a compelling solution for establishing connections between different electronic devices that are wearable or transported by a person. The entire network is made by using several sensors, a data processing unit, and many input/output modules. The present communication system has the potential to be used for monitoring physiological measurements and various other applications by using multiple devices carried by people in their daily lives.

Figure 6 illustrates a body-worn dual-mode antenna that was developed for the healthcare system by Lin, C. H., et al. [31] that supports both on-body and off-body communication functions.

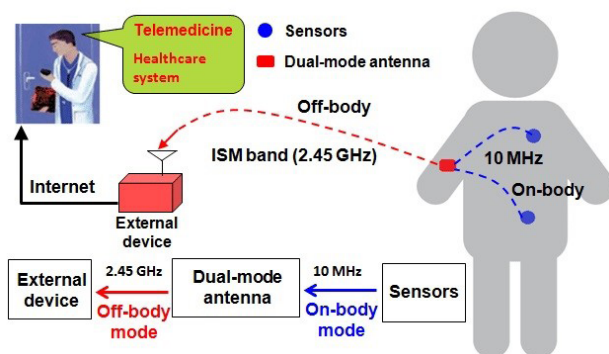


Figure 6 – On/off body communication in medical applications [31]

Lin, C. H., et al. studied the on-body electric field distribution, reflection coefficient (S11), and radiation patterns in the off-body mode.

The system has a ground (GND) electrode, feeding pin, and signal electrode. The proposed antenna is 30 mm in length 33 mm in width, and 4 mm in height. Near the 4 mm height, the signal electrode's center is the feeding pin.

In the ISM band, the folded ground structure resonates at 2.45 GHz. On-body antennas must be compact for user comfort and sensor node integration. The author introduced a dual-band, small, miniaturized antenna for on-body and off-body communication [32].

Miniaturization is achieved by etching two open-end slots on the rectangular patch. Data from body sensor nodes is received by the antenna at 2.45 GHz. It then sends this data to external monitoring equipment at 5.0 GHz in ISM bands. The antenna is 15 mm×28 mm×1.57 mm. A wide bandwidth of 250–370 MHz improves biological tissue antenna robustness. The body receives 2.45 GHz and 5.0 GHz radiation. The external control unit communicates satisfactorily at 5.0 GHz with 7.18 dB directivity. A flexible, compact multi-band wearable antenna with a basic, low-profile structure was presented by Al-Sehemi, Abdullah, et al. [32]. This antenna covers a wide range of biomedical frequency bands, operating between 0.824 to 0.975 GHz and 1.90 to 6 GHz. The bio-composite natural rubber substrate used in the antenna eliminates allergic or harmful reactions when placed on the body. The substrate can be easily processed, is inexpensive, is flexible, and is resistant to dust and water.

The field of WBAN is growing, enabling the implantation of sensors in or on the human body. These sensors communicate with a central node that stores data on a computer or in the cloud. Positioning sensors on an athlete is challenging due to constant movement. Real-time data should be accessible to coaches, athletes, and the public. To address this, the author in [33] studied the best sensor placement for optimal connectivity with the remote node. The wrist sensor showed good communication with the breast sensor, and the best Line of sight reception angles were identified for all sensor placements.

The range of on-body communications is limited to the close vicinity of the user. The transmission of biophysical signals can occur within the human body, whereby a wearable transmitter is used to relay these signals to a receiver that is also linked to the

body. The survey paper [34] discussed wearable antennas used for WBAN applications with flexible substrates. The antenna's ability to be worn on the human body must be flexible for on-body application to occur. Wearable antennas are developed using various fabrics as substrates. The fabric's increased ability to absorb moisture results in a higher dielectric constant for the material. As wearable antennas made up of fabrics can become dirty after being integrated into garments, the properties of the antennas change after the fabrics are washed. Scarpello, M. L., et al. [35] have found a solution to this problem by coating them with thermoplastic polyurethane, which also protects against corrosion and water absorption. Compared to coating wearable antennas, the antennas can be made using screen printing technology with conductive ink on textile substrates. Both functions together result in better stable performance. Before coating, after washing, and after many cycles, the antenna's performance is examined.

Anbalagan, Abirami, et al. [36] developed a novel low-profile embroidered textile antenna from the cotton substrate and conductive Zari threads for real-time pulse monitoring in wearable applications. The antenna's compact design and rectangular slot improve return loss and gain. On-body study demonstrates that the antenna operates well with absorption rates below the IEC threshold for 1 g and 10 g tissue. Real-time heart rate monitoring is provided via a Particle Photon, which also uploads data through the cloud to the Particle app. This antenna can be used for on-body uses because it doesn't get affected by changes in shape. The antenna's designed dimensions are $51 \times 45 \times 0.785$ mm. Chahat, Nacer, et al [37] demonstrated a small, $25 \times 10 \times 1.6$ mm³ size microstrip fed monopole antenna for UWB on-body applications using substrate AR350 with a dielectric constant of 3.5. For impulse radio application, time domain analysis over the voxel body model is carried out.

For on-body WBAN, Kumar, Vivek, and Bharat Gupta proposed a Swastik Slot Ultra-Wide Band (3–10.6 GHz) Antenna [38]. This health monitor antenna is worn on or around the body. Partial ground plane, slot, and feed increase antenna bandwidth. The antenna is $27 \text{ mm} \times 27 \text{ mm} \times 1.6 \text{ mm}$. This SS-UWB patch antenna has 1.77–5.6 dB quasi-Omni directional gain and covers 4.25–12.5 GHz [8.25 GHz]. Over open space, this antenna gains 0.81–3.0 (1.8–0.85 dB). An on-body conformal MTM antenna for WBAN communication is presented by Hazarika

et al. [39]. The author invented the zero-reflection-phase MTM monopole antenna. A 2×2 array of H-shaped unit cells minimizes back radiation and increases gain. In the conformal configuration's frequency ranges, the MTM reduces the maximum SAR averaged across 1 gram to 0.174 and 0.207 watts per kilogram when the body and antenna are 1 mm apart. B. Bahaa et al. introduced a wide-band spring textile (WST) antenna for wearable communications [40]. $32 \times 42 \times 3$ mm³ felt antenna. This antenna runs from 3.14 to 5.45 GHz. The highest gain is 6 dBi at 3.5 GHz and its bandwidth is 2306 MHz. Due to its wide frequency coverage, this antenna is excellent for 5G and IoT wireless applications. When near the chest, the antenna has low SAR for on-body transmission. Gupta et al. [41] study a square ring-shaped ground antenna with a truncated patch for dual-mode bio-telemetry on and off the body. Analysis and optimization of the proposed antenna design on a multilayer flat tissue phantom show its broad frequency range and low SAR values for tissue safety. The proposed antenna design resonates with WLAN, LTE, and ISM frequencies from 2.6 to 5.2 GHz. It also resists posture-induced frequency detuning. When near tissue, it exhibits 15 % peak radiation efficiency at 2.45 GHz. Low SAR values help ensure tissue safety [42]. The researcher identified a limitation in the field of on-body communication, specifically noting that the proximity of an antenna to the human body has a significant impact on its performance. The primary factors contributing to this influence include frequency shifting, degradation of radiation pattern, and loss of efficiency. The impact of bodily movement on these factors varies. Das, Gautam Kumar, et al. [43] solved the problem using metamaterial over the body-attached antenna. In multilayer phantom mode, antenna performance was examined.

3. Material classification for textile antenna

A textile antenna employs fabric or conductive material integrated into clothing, requiring flexibility, durability, and comfort. Textiles with low dielectric constants minimize surface wave losses and enhance antenna bandwidth. Critical factors such as loss tangent and dielectric properties influence antenna performance. Ten alternative fabrics – cotton, quartzel fabric, cordura/lycra [44], felt, moleskin, silk, tween, panama, jeans, and denim – were evaluated as substitutes for the original polyester substrate in the antenna design. These fabrics maintain

the same dimensions in width and length as 100 % polyester but vary in thickness to accommodate different material characteristics (Table 2).

Table 2

Properties for nonconductive materials

Refs. No	Substrate material	Permittivity ϵ_r	Loss tangent $\tan\delta$
[32]	Biocomposite Natural Rubber	2.3624	0.0077
[43]	Felt	1.22	0.016
[44]	Cordura	1.90	0.0098
[44]	Lycra	1.50	0.0093
[45]	Quartz Fabric	1.95	0.0004
[46]	Jeans	1.7	0.025
[47]	Denim	1.7	0.085
[51]	Cotton	1.60	0.0400
[55]	100% polyester	1.90	0.0045
[57]	Foam	1.7	0.0025

According to the data in Figure 7, the fabrics that closest resembled the original design in terms of bandwidth and center frequency were denim, tween, and quartzel. The gain was greater than 8 dBi across all substrates except for cordura/lycra.

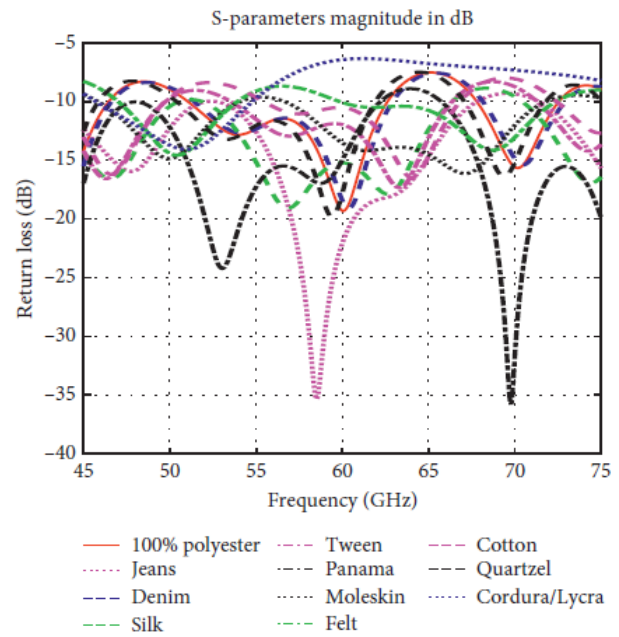


Figure 7 – Antenna performance comparison in free-space return loss for various textile substrates [48]

The results were quite similar to those obtained with polyester fabric since denim and quartzel cloths have the same thickness and relative permittivity. The results of this free-space analysis of fabric variations are summarized in Table 3 [48].

Table 3

Antenna performance summary in free space for various fabrics (Reprinted) [48]

Substrate	Relative Permittivity	Thickness (mm)	Center Frequency (GHz)	Bandwidth (GHz)	Gain (dBi)	Radiation Efficiency (%)
100% Polyester	1.9	1.5	60.06	11.578	8.531	89.69
Jeans	1.7	1	58.5	15.094	7.841	93.19
Denim	1.87	1.5	60.36	11.505	8.653	89.91
Silk	1.75	1.16	56.82	14.439	8.298	92.33
Tween	1.69	1.37	60.3	12.818	9.138	91.88
Panamma	2.12	1.04	53.069	14.184	8.864	91.48
Felt	1.38	1.38	68.772	12.507	9.824	93.64
Moleskin	1.45	1.17	67.11	15.141	8.862	91.87
Cotton	1.63	1.5	64.05	11.357	9.686	91.58
Quartzel fabric	1.95	1.5	59.4	11.515	8.217	89.16
Cordura/Lycra	1.5	0.5	50.97	9.052	5.213	95.49

4. Fabrication methods

4.1. Fabrication steps

Fabrication steps for cloth as substrate are as follows:

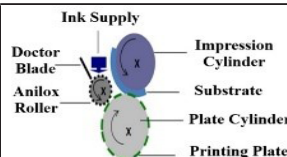
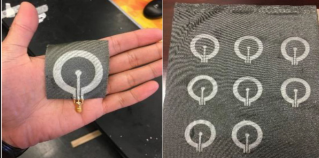
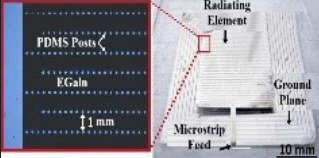
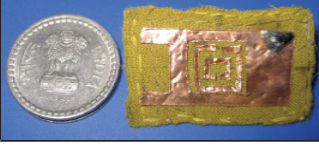
- To decide the application requirements.
- Identifying the antenna geometry and substrate and numerical modeling of the antenna.
- Simulation using any Electromagnetic Simulator.
- Using a cutter, cutting plotter, or Computer Numerical Control machine to cut self-adhesive, conductive copper tape or foil will shape the antenna.
- Sticking copper tape or foil on the substrate.
- Connecting Subminiature version A Connector.

4.2. Fabrication methods

Fabrication is challenging in wearable antennas. The design of a compact and inexpensive antenna system poses various obstacles to achieving desirable radiation properties. These challenges include ensuring a lightweight structure that can operate across multiple frequency bands while maintaining stable performance under varied situations such as bending or rolling. An economical and straightforward approach to producing flexible electronics and RFIDs is through line patterning, a method proposed by Hohnholz and MacDiarmid in 2001 [49]. Various fabrication method's advantages and disadvantages are given in Table 4.

Table 4

Different fabrication methods

Ref.	Type of antenna	Fabrication Method used	Advantages	Disadvantages
[52] [53] [54]	RFID Antenna	Flexography 	high resolution, cost-effectiveness high conductivity ink	low ink viscosity
[55]	Coplanar Key-hole Antenna	Screen Printing 	easy and cost-effective	1. less printing resolution no control on deposited ink thickness and no. of layer
[56]	Microstrip Patch Antenna	Soft Photo lithography Process 	generate complex patterns precisely and at a high resolution	1. lengthy process 2. low throughput 3. dangerous chemicals used for etching
[36]	Embroidered textile microstrip Antenna	Stitching, Sewing and Embroidery 	E fiber exhibits very low electrical loss and excellent mechanical strength	Stitching wrinkles the material, deforming the antenna
[57]	Inkjet-Printed flexible antenna	Inkjet Printing 	cost-effective easy to use	Due to huge particle size, inkjet printer nozzle obstruction occurs
[58]	Microstrip Patch Antenna	Copper Tape 	Easy method and cost-effective	Resonance frequency changes due to nonconductive glue connected between substrate and patch

5. Bending analysis of wearable antenna

The fundamental issue in wearing antennas is keeping them flat, especially when made of textiles. Human body movements bend the wearable antenna often [59].

The human body bends everywhere. Enjoy the ease of cloth antennas that can endure bending without affecting performance. Bending can affect antenna gain, bandwidth, and resonant frequency for your application [60]. The author [61] conducted a bending study on the antenna by mounting it on a cylinder ($\epsilon_r = 1$) and adjusting positions, as depicted in the Figure 8. Vertically placed antenna on cylinder looking outward (*a*) and within (*b*). The antenna is horizontal on the cylinder in (*c*) and (*d*) with the structure pointing outward and inward.

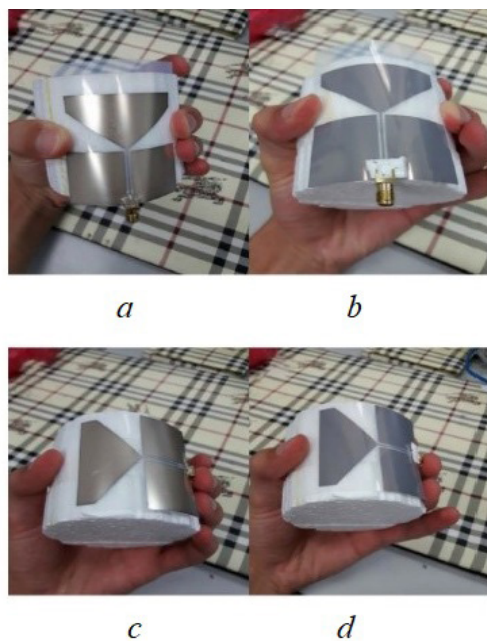


Figure 8 – Bending position around vertical cylinder with diameter of: *a* – 80 mm; *b* – 60 mm; *c* – 40 mm; *d* – 20 mm [61]

PVC pipes with 54.5- and 44.5-mm internal radii resemble the shoulder, wrist, and knee. Figure 8 shows antenna bending on both PVC pipes for their examination. Antenna resonance is 5.367 GHz and the return loss is -17.97 dB when bent around a 54.5 mm pipe (Figure 9). When bent on a 44.5 mm pipe, the antenna sonance frequency shifts to 5.388 GHz and the return loss is -20.22 dB [58].

The antenna in [62] is wrapped around a hollow cylinder made of PVC tubing with a diameter of either 22 or 48 mm so that the bending feasibility

may be evaluated. At several different bending diameters, we looked into the S11 properties of the flexible foam. The graph shown in Figure 10, it can be observed that bending with a small diameter results in a maximum value of S11 at 39.22 dB. However, this configuration exhibits a bandwidth of 8.47 GHz, which falls below the threshold of 10 dB, with a slight deviation in the initial frequency.



Figure 9 – Picture of the suggested antenna curved around internal radii: (*a* – 54.5 mm; *b* – 44.5 mm) PVC pipes [58]

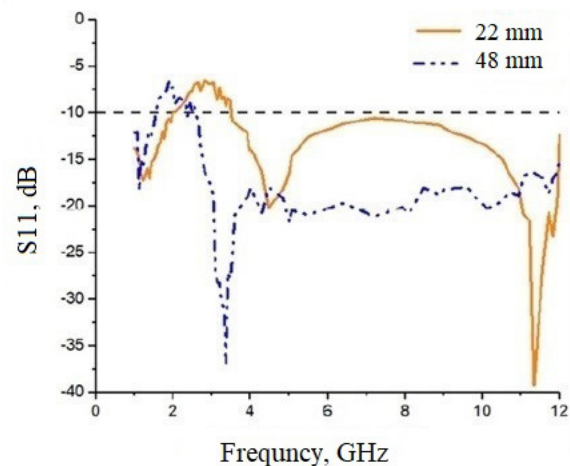


Figure 10 – Comparison of S11 for bending at diameters of 22 mm and 48 mm [62]

The deformation of a flexible antenna varies across different frequency ranges and becomes particularly significant at higher frequencies due to the antenna's reduced size. This is primarily attributed to impedance mismatching and the limited bandwidth of the antenna [63].

Muhammad Usman Ali Khan et al. [63] study the impact of bending levels on the performance of antennas fabricated from PET, Teflon, and PVC substrates. The research focuses on bending radii of 14 mm and 27 mm for flexible polymer antennas operating at frequencies ranging from 2.45 to 7.45 GHz, categorized into three frequency ranges: (i) 2.2–2.5 GHz, (ii) 2.5–5.0 GHz, and (iii) above

5 GHz. Radial curvatures were achieved using polystyrene foam cylinders to maintain consistent curvature in the flexible antenna structure as shown in Figure 11.

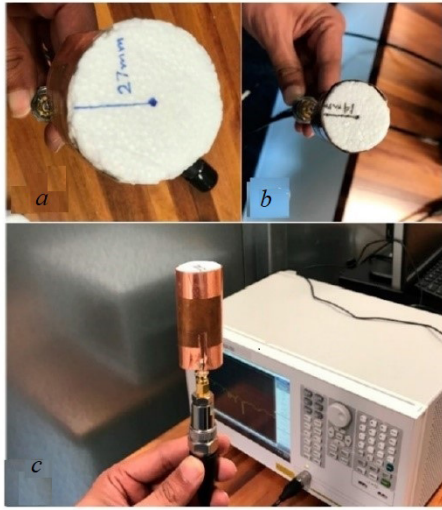


Figure 11 – Picture of a flexible antenna bend produced by cylindrical polystyrene foam (a) at 27 mm, (b) at 14 mm, and (c) attached to the Voltage Network Analyzer at 14 mm [63]

Table 5

Percentage frequency shift in resonant frequencies for PET, PTFE, and PVC surfaces for three operating frequencies and two bend conditions (27 and 14 mm) [50]

	Substrate	PET	PTFE	PVC
Resonant	Flat	2.426	2.438	2.417
	Operating at 27 mm	2.412	2.469	2.394
	Shift(%)	-0.58	1.25	-0.96
	14 mm	2.402	2.484	2.366
	Shift(%)	-0.99	1.85	3.42
	Flat	4.312	4.381	4.267
Frequency	Operating at 27 mm	4.442	4.392	4.294
	Shift(%)	2.92	0.25	0.62
	14 mm	4.468	4.453	4.366
	Shift(%)	3.49	1.61	2.26
	Flat	7.387	7.443	7.507
	Operating at 27 mm	7.425	7.429	7.541
7.45 GHz	Shift(%)	0.51	-0.01	0.45
	14 mm	7.464	7.421	7.658
	Shift(%)	1.03	-0.29	1.97

Note: Negative sign with frequency shift (%) that occurs towards the lowest components of frequency

Usman Ali, et al. develop and analyze four 2.4 GHz wearable antenna models with flexible microstrip patches. Rectangular patches supported by EBG ground planes form the antennas' radiating element. These ground planes can be mushroom-shaped, slotted, or helical. Both antennas and EBG surfaces use a 3 mm wash cotton textile substrate. The proposed antennas utilize an electro-textile material known as Zelt, which serves as a conductive medium. The antennas that have been designed are subsequently examined in both on-body and off-body scenarios while considering their normal and bent states. The performance of wearable antennas must be stable despite being subjected to a wide range of deformation. The proposed antenna's bending effect is shown in Figure 12 for four possible radii 45 mm, 35 mm, 25 mm, and 15 mm in both E and H planes [64].

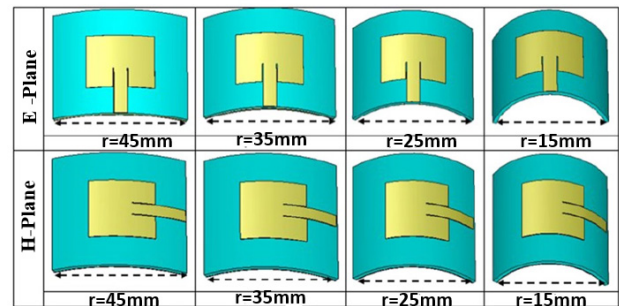


Figure 12 – Proposed antenna bending with varying E and H plane radii [64]

Under a bent situation, Antenna-1's return loss is -14 dB, compared to -24.46 dB at 2.4 GHz (Figure 13). Under bent circumstances, Antenna 2, Antenna 3, and Antenna 4 have lower return loss.

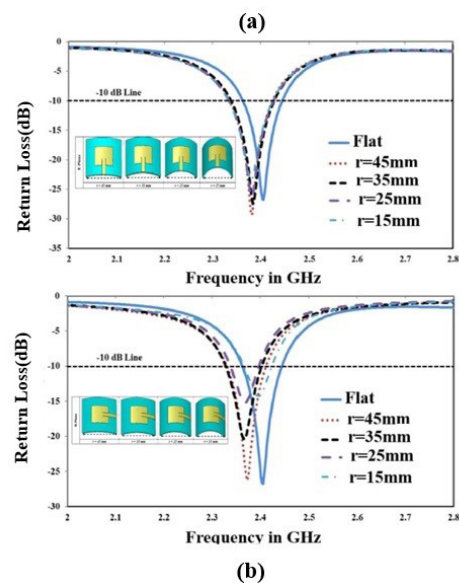


Figure 13 – Comparison of antenna return loss in the E-plane (a) and H-planes (b) at various bending radii [64]

The author in [65] developed and Analyzed A small, flexible hexagonal microstrip patch antenna with foam substrate. The bending performance of the antenna is under consideration for radii of 24 mm and 11 mm. It was noted by the author that when the bending radius is 24 mm, the highest value of S11 is recorded as 35.60 dB, accompanied by a bandwidth of 5.33 GHz. Nevertheless, the antenna's bandwidth performance at a frequency of 5.94 GHz is enhanced when the bending radius is set at 11 mm.

6. Application of wearable antenna in 5G

The 5G network facilitates a range of functions and offers increased bandwidth and fast download speeds [66]. There are a growing number of uses for wearable technology in the fields of defense, medicine, and consumer electronics. Wearable technology will also likely to work in the development of 5G networks, which will have enhanced data transfer speeds and decreased dropout rates across a wider region via a greater number of smaller micro- and pico-cell [67].

The Ericsson Mobility Report [68] projects that there will be 3.5 billion 5G subscriptions in 2026, indicating that the demand for 5G will continue to be high in the upcoming years. To facilitate the implementation of 5G technology, the Federal Communications Commission will allocate spectrum resources. The 5G frequency spectrum is comprised of four distinct groupings. To begin with, the High-Frequency Band encompasses the frequency ranges of 28, 24, 37, 39 and 47 GHz. Furthermore, within the frequency range below 6 GHz, the Mid Frequency Band encompasses the frequencies of 2.5 GHz, 3.5 GHz, and the range of 3.7–4.2 GHz. Finally, the 600, 800, and 900 MHz Low Frequency Band is below 1 GHz. Future Wi-Fi technology may use unlicensed frequencies from 5.9 to 95 GHz [60]. The 3GPP studied 5G frequencies. 3GPP Release 15 Table 3 lists 5G NR frequency bands. The first 5G bands are 700 MHz, 3.5 GHz, and 26/28 GHz. Establishing and using 5G requires these bands [66].

The integration of 5G technology into healthcare systems holds significant potential for both the public and private sectors. Unobtrusive mm-wave communications efficiently collect and transmit data from healthcare devices. The author designed and modeled a flexible graphene-based antenna. 5G antennas for wearable health devices were developed and integrated into head-mounted imaging systems. The antenna uses an 18- μ m-thick graphene layer for

the conductive radiation field and ground and operates at 34.5 GHz. The patch is fractally designed for portability. The antenna is made of flexible polyamide and has a 1.5 mm substrate for wearable applications [69].

6.1. 5G Sub 6GHz

In the contemporary global landscape, particularly in the aftermath of the COVID-19 pandemic, the proliferation of wireless communication devices has reached unprecedented levels. Consequently, the adoption of 5G technologies has become an imperative requirement, as it provides a data transmission speed that is 100 times faster than the existing 4G standard. The success of 5G technology depends on compact antennas. In recent years, 5G communication is expected to use microstrip patch antenna designs [70].

Desai, Arpan, et al. developed a patch antenna with a transparent flexible co-planar waveguide and polyethylene terephthalate substrate. A transparent silver tin oxide (AgHT-8) sheet wideband high-gain antenna measures $0.48 \lambda \times 0.64 \lambda$ at 4.28 GHz. The proposed transparent flexible antenna offers a 40 % bandwidth from 3.89 to 5.9 GHz, over 3 dBi gain, and over 80 % efficiency. Flexible and transparent, the antenna performed well in sub-6 GHz 5G and WLAN [59]. In this paper, Kumar, Anubhav, et al. develop a highly isolated two-port dual-band antenna. The antenna is reduced in size by using a beak-shaped radiator with open stubs. At higher frequencies, a T-shaped stub has been used for isolation, whereas open-ended slots successfully decrease the antenna in size, improving its impedance and isolating it by more than 20 dB. For lower frequencies, the MIMO antenna's isolation can be improved by suppressing current across radiators without increasing antenna size. The two-port antenna works on frequencies between 2500 and 3700 MHz (5G n7, n48, and n77) and 2570 and 2300 MHz (LTE 38, 40, 41, 42, and 43). Sub-6 GHz bands, including 5.15/5.85 GHz used for WLAN, 2.4/5.0 GHz used for Wi-Fi, and 2.45/5.8 GHz used for ISM, can be a useful option for wireless communication [60].

Azim, Rezaul, et al. designed a planar ultra-wideband antenna with a circular patch design for 5G communication below 6 GHz. The antenna's circular patch and ground plane eliminate the need for an encapsulated element or large system ground plane. To get the appropriate operating frequency

range, a rectangular slot was inserted into the top edge of the ground plane. Experiments show that the antenna functions with a reflection coefficient (S_{11}) of less than -10 dB from 3.05 to 5.82 GHz. This range covers all 5G below 6 GHz N77/N78/N79 frequency bands, WLAN, LTE, WiMAX, and wireless communication technologies [69].

6.2. 5G MIMO

Shoaib et al. proposed an 8×8 MIMO 5G wristwatch and dongle antennas [71]. The substrate's top layer has 3.4 mm² of twisted H-shaped MIMO antennas. The design uses a $31.2 \times 31.2 \times 1.57$ mm Rogers RT-5880 board with a 2.2 dielectric constant. The substrate has eight MIMO antennas on top and a ground plane at the bottom. The central frequency of MIMO antennas is 25.2 GHz with 15.6 % bandwidth. The antennas at resonance frequencies gain 8.732 dB, while the bandwidth gains 7.2 dB. The EBG structure increases efficiency, gain and Bandwidth [72]. Sufian, Md. Abu, et al. [73] present a 2×2 MIMO antenna with one element by translating each element orthogonally. Slots and metal strips with shorting pins of the supported structured antenna isolate MIMO elements. Shorting ground plane pins and slots reduces mutual coupling and electromagnetic field distribution. Advantages of the proposed antenna include 15.9 % 10 dB impedance, 3.3 to 3.87 GHz bandwidth, and 8.72 dBi peak gain. For 3.3–3.8 GHz (N78 band) frequency, $0.85 \lambda_0 \times 0.85 \lambda_0 \times 0.038 \lambda_0$, compact size, 3.27 to 3.82 GHz operating bandwidth, $S_{11} < 10$. Anbarasu and Nithiyantham [74] developed a 0.674×0.712 -inch denim antenna with a 1.7 dielectric constant and 4 mm thickness. The antenna's S_{11} characteristics are below 10 dB and gain 15 dB. The antenna is an 8–12 GHz notch filter. The antenna radiates 4–18 and 24–58 GHz. The antenna has a 4 GHz bandwidth, exceeding 34 GHz. A 90° angle and 80 mm radius bent the antenna. The antenna supports WiMAX, 5G, and GPS. An antenna substrate of standard felt with a dielectric constant of 1.3 and two rectangular cotton fabric patches with 2.23 are used. Two forms of flexible and wearable dielectric increase microstrip sample bandwidth by 7 GHz. The recommended 5 GHz antenna size is $54 \times 36 \times 2.5$ mm³. Parametric studies on cotton fabric and standard felt. The wearable MIMO antenna's 5 GHz bandwidth and isolation are impacted by CF component dielectric constant changes. This substrate has a 1.2 dielectric constant. Bandwidth and isolation alter little when cotton

fabric ϵ_r increases from 2 to 2.5. Dielectric constants exceeding 2.5 reduce bandwidth and isolation. The author parametrically examined the SF substrate to determine how SF dielectric constant variation affects bandwidth and isolation. With ϵ_r of SF 1–1.5, bandwidth and isolation stay constant. At ϵ_r 1.5, bandwidth and isolation decrease [61]. Addepalli, Tathababu, et al. [75] present a four-port MIMO antenna for 5G-NR spectrum applications covering bands n77 (3.30–4.20 GHz), n78 (3.30–3.80 GHz), and n79 (4.40–5.00 GHz). The design includes omnidirectional and dipole radiation patterns in both H- and E-planes, along with high impedance matching, isolation, and diversity analysis. Two antennas are analyzed: the four-port modified MIMO antenna and a single-element asymmetrically fed Calendula flower-shaped antenna.

In [76], the author introduces a novel flexible tri-band four-port MIMO antenna tailored for modern wearable applications in 5G/WiFi 6E. Spanning frequencies from 2.54 to 3.56 GHz, 4.28 to 4.97 GHz, and 5.37 to 8.85 GHz, it covers Chinese 5G bands n78 (3.4–3.5 GHz) and n79 (4.8–4.9 GHz), along with Wi-Fi 6E spectrum from 5.945 to 7.125 GHz. The design addresses the need for compact MIMO diversity antennas to support high-speed cellular 5G sub-6 GHz and WLAN applications, including NR bands N77, N78, and N79, and Wi-Fi 5 and Wi-Fi 6 standards.

7. Future scope for wearable antenna in 6G

According to projections, the implementation of 6G is expected to take place by 2030 or earlier, facilitated by the progress made in transition technologies. This represents a notable advancement compared to previous mobile transitions, when each generation required about a decade for deployment (e. g., 1G in the 1980s, 2G in the 1990s, 3G in the 2000s, 4G in the 2010s, and 5G in the 2020s) [78]. Figure 14 depicts the potential spectrum range for the sixth generation (6G) of wireless communication technology.

This paper provides an in-depth overview of phased-array antenna-on-display technology for use in wireless communication, radar, sensing, and other applications operating at microwave, millimeter-wave (mm-Wave), and sub-THz frequencies. Figure 15 illustrates the integration of an antenna, designed for use with 2.4 GHz Wi-Fi and Bluetooth technologies, into the OLED display of the wearable device, as recommended by the antenna-on-display technology [78].

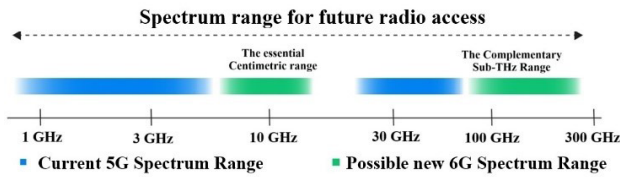


Figure 14 – Potential spectrum of 6G [77]

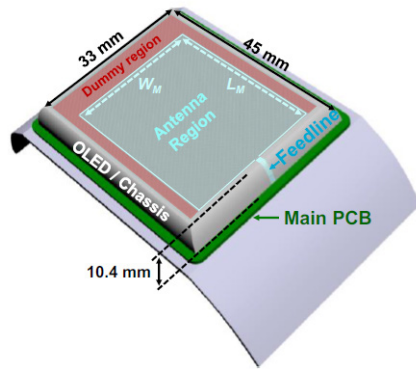


Figure 15 – Embedded optically invisible antenna inside the wearable device's organic light emitting diode display [78]

Conclusion

A detailed overview of wearable antennas for body centric wireless communication, focusing on the 5G sub-6GHz frequency spectrum. The sub-6 GHz frequency band, which is an essential element of the 5G spectrum, offers distinct advantages such as wider coverage and improved penetration capabilities. Consequently, it is proving to be a highly suitable option for the advancement of body centric wireless communication in the coming generation. The article begins by introducing the concept of body centric wireless communication, which encompasses three distinct modes: in-body, on-body, and off-body.

This article presents an in-depth review of several substrate materials employed in the development of wearable antennas. Additionally, it offers an overview of the corresponding fabrication steps and methods. This study examines the impact of varying radii on the bending behavior of antennas and evaluates their effects on the performance of wearable antennas. A detailed list of substrates having dielectric constants ranging from 1.17 and 3 is provided.

Different frequency bands are to be allocated for 5G communications.

Furthermore, the present study examines a range of 5G antennas operating at frequencies below

6 GHz, as well as multiple-input multiple-output antennas. This paper also addresses future opportunities for portable antennas in 6G.

Appendix

Abbreviations

MIMO	Multiple Input Multiple Output
BCWC	Body Centric Wireless Communication
IMD	Implantable Medical Device
WLAN	Wireless Local Area Network
ISM	Industrial Scientific and Medical
EBG	Electromagnetic Band Gap
UWB	Ultra Wide Band
PET	Polyethylene terephthalate
PTFE	Polytetrafluoroethylene
PVC	Poly vinyl Chloride
MTM	Metamaterial
LTE	Long Term Evolution
AVG	Autologous Vein Grafts
WBAN	Wireless Body Area Network
RFID	Radio Frequency Identification
SAR	Specific Absorption Rate

References

1. Cisco Visual Networking Index (VNI) Mobile Forecast Projects Nearly 10-fold Global Mobile Data Traffic Growth Over Next Five Years, 2015.
2. Wearable Technology Market Size, Share, Growth, Report 2032.
3. Paracha KN, Abdul Rahim SK, Soh PJ, and Khalily M. Wearable Antennas: A Review of Materials, Structures, and Innovative Features for Autonomous Communication and Sensing. IEEE Access. Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc. 2019;(7):56694-56712.
4. P.S. Hall and Y. Hao. Antennas and propagation for body centric communications. European Space Agency, (Special Publication) ESA SP. 2006.
DOI: 10.1109/eucap.2006.4584864
5. P. Thesis, B. Akowuah, K. Panagiotis, and E. Kallos. King's College London Novel Antenna Designs For Body-Centric Applications, 2017.
6. K. Ito, C.-H. Lin, and H.-Y. Lin, "Evaluation of Wearable and Implantable Antennas with Human Phantoms," in Handbook of Antenna Technologies, Springer Singapore, 2015, pp. 1–24.
DOI: 10.1007/978-981-4560-75-7_83-1

7. K.S. Nikita, Handbook of Biomedical Telemetry. Wiley, 2014. DOI: 10.1002/9781118893715.
8. N.A. Kamaruddin, S.N. Azemi, S.Z. Ibrahim, A.H. Azremi, and N.F. Kahar. Antenna for In-Body Communications, 2019.
9. F. Merli, L. Bolomey, E. Meurville, and A.K. Skrivervik. Implanted Antenna for Biomedical Applications. IEEE, 2008.
10. W.-C. Chen, C.W.L. Lee, A. Kiourti, and J.L. Volakis. A Multi-Channel Passive Brain Implant for Wireless Neuropotential Monitoring. IEEE J Electromagn RF Microw Med Biol. 2018; 2(4):262-269. DOI: 10.1109/JERM.2018.2877330
11. M. Särestöniemi, M. Sonkki, S. Myllymäki, and C. Pomalaza-Raez. Wearable Flexible Antenna for UWB On-Body and Implant Communications. Telecom. 2021;2(3):285-301. DOI: 10.3390/t10.3390/elecom2030019
12. A. Sani, M. Rajab, R. Foster, and Y. Hao. Antennas and propagation of implanted RFIDs for pervasive healthcare applications. Proceedings of the IEEE. 2010;98(9):1648-1655. DOI: 10.1109/JPROC.2010.2051010
13. J. Zhang [et al.]. A Compact Dual-Band Implantable Antenna for Wireless Biotelemetry in Arteriovenous Grafts. IEEE Trans Antennas Propag. 2023;71(6):4759-4771. DOI: 10.1109/TAP.2023.3266786
14. Chow EY, Chlebowsky AL, Chakraborty S, Chappell WJ, and Irazoqui PP. Fully wireless implantable cardiovascular pressure monitor integrated with a medical stent. IEEE Trans Biomed Eng. 2010;57(6):1487-1496. DOI: 10.1109/TBME.2010.2041058
15. Zeng FG. Challenges in improving cochlear implant performance and accessibility. IEEE Trans Biomed Eng. 2017;64(8):1662-1664. DOI: 10.1109/TBME.2017.2718939
16. D. Reynolds [et al.]. A Leadless Intracardiac Transcatheter Pacing System. New England Journal of Medicine. 2016;374(6):533-541. DOI: 10.1056/nejmoa1511643
17. Amar A. Ben, Kouki AB, and Cao H. Power approaches for implantable medical devices. Sensors (Switzerland). 2015;15(11):28889-28914. DOI: 10.3390/s151128889
18. Agarwal K, Jegadeesan R, Guo YX, and Thakor NV. Wireless Power Transfer Strategies for Implantable Bioelectronics. IEEE Reviews in Biomedical Engineering. Institute of Electrical and Electronics Engineers. 2017;10:136-161. DOI: 10.1109/RBME.2017.2683520
19. R. Kangeyan and M. Karthikeyan. Miniaturized meander-line dual-band implantable antenna for biotelemetry applications. ETRI Journal, 2023. DOI: 10.4218/etrij.2023-0050
20. R. Kangeyan and M. Karthikeyan. A novel wide-band fractal-shaped MIMO antenna for brain and skin implantable biomedical applications. International Journal of Communication Systems. 2023;36(11). DOI: 10.1002/dac.5509
21. Jing D, Li H, Ding X, Shao W, and Xiao S. Compact and Broadband Circularly Polarized Implantable Antenna for Wireless Implantable Medical Devices. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2023;22(6):1236-1240. DOI: 10.1109/LAWP.2023.3237558
22. Feng Y, Li Z, Qi L, Shen W, and Li G. A compact and miniaturized implantable antenna for ISM band in wireless cardiac pacemaker system. Sci Rep. 2022;12(1). DOI: 10.1038/s41598-021-04404-3
23. Kangeyan R, Karthikeyan M. Implantable dual band semi-circular slotted patch with DGS antenna for biotelemetry applications. Microw Opt Technol Lett. 2023;65(1):225-230. DOI: 10.1002/mop.33462
24. Shah SAA, Yoo H. Scalp-Implantable Antenna Systems for Intracranial Pressure Monitoring. IEEE Trans Antennas Propag. 2018;66(4):2170-2173. DOI: 10.1109/TAP.2018.2801346
25. Iqbal A, Al-Hasan M, Mabrouk I Ben, Nedil M. A Compact Implantable MIMO Antenna for High-Data-Rate Biotelemetry Applications. IEEE Trans Antennas Propag. 2022;70(1):631-640. DOI: 10.1109/TAP.2021.3098606
26. Ahmad S [et al.]. A Metasurface-Based Single-Layered Compact AMC-Backed Dual-Band Antenna for Off-Body IoT Devices. IEEE Access. 2021;9:159598-159615. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3130425
27. Roudjane M, Khalil M, Miled A, Messaddeq Y. New generation wearable antenna based on multimaterial fiber for wireless communication and real-time breath detection. Photonics. 2018;5(4). DOI: 10.3390/photonics5040033
28. Shakib MN, Moghavvemi M, Binti Wan Mahadi WNL. Design of a Tri-Band Off-Body Antenna for WBAN Communication. IEEE Antennas Wirel Propag Lett. 2017;16:210-213. DOI: 10.1109/LAWP.2016.2569819
29. Scarpello Maria Lucia [et al.]. High-Gain Textile Antenna Array System for Off-Body Communication. International Journal of Antennas and Propagation, Hindawi Limited, Crossref, 2012, pp. 1–12. DOI: 10.1155/2012/573438
30. Hertleer C, Rogier H, Vallozzi L, Van Langenhove L. A textile antenna for off-body communication integrated into protective clothing for firefighters. IEEE Trans Antennas Propag. 2009;57(4):919-925. DOI: 10.1109/TAP.2009.2014574
31. Lin CH [et al.]. Dual-Mode Antenna for on-/off-Body Communications (10 MHz/2.45 GHz). The 2014 International Workshop on Antenna Technology.

32. Al-Sehemi A, Al-Ghamdi A, Dishovsky N, Atanasova G, Atanasov N. A Flexible Multiband Antenna for Biomedical Telemetry. *IETE J Res.* 2023;69(1):189–202. **DOI:** 10.1080/03772063.2020.1808536
33. Sabti HA, Thiel DV. A study of wireless communication links on a body-centric network during running. *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd. 2014, pp. 3–8. **DOI:** 10.1016/j.proeng.2014.06.005
34. Kumar P, Ali T, Sharma A. Flexible Substrate based Printed Wearable Antennas for Wireless Body Area Networks Medical Applications (Review). *Radioelectronics and Communications Systems.* 2021;64(7):337–350. **DOI:** 10.3103/S0735272721070013
35. Scarpello ML, Kazani I, Hertleer C, Rogier H, Ginsté D. Vande. Stability and efficiency of screen-printed wearable and washable antennas. *IEEE Antennas Wirel Propag Lett.* 2012;11:838–841. **DOI:** 10.1109/LAWP.2012.2207941
36. Anbalagan A, Sundarsingh EF, Ramalingam VS, Samdaria A, Gurion D. Ben, Balamurugan K. Realization and Analysis of a Novel Low-Profile Embroidered Textile Antenna for Real-time Pulse Monitoring. *IETE J Res.* 2022;68(6):4142–4149. **DOI:** 10.1080/03772063.2020.1787877
37. Chahat N, Zhadobov M, Sauleau R, Ito K. A compact UWB antenna for on-body applications. *IEEE Trans Antennas Propag.* 2011;59(4):1123–1131. **DOI:** 10.1109/TAP.2011.2109361
38. Kumar Vivek, Bharat Gupta. On-Body Measurements of SS-UWB Patch Antenna for WBAN Applications. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, no. 5, Elsevier BV, May 2016, pp. 668–75. Crossref. **DOI:** 10.1016/j.aeue.2016.02.003
39. Hazarika Bidisha [et al.]. A Multi-Layered Dual-Band on-Body Conformal Integrated Antenna for WBAN Communication. *AEU – International Journal of Electronics and Communications*, Elsevier BV, Oct. 2018, pp. 226–35. Crossref. **DOI:** 10.1016/j.aeue.2018.08.021
40. Qas Elias, Bashar, and Ping Jack Soh. Design of a Wideband Spring Textile Antenna for Wearable 5G and IoT Applications Using Characteristic Mode Analysis. *Progress In Electromagnetics Research M*, The Electromagnetics Academy, 2022, pp. 177–89. Crossref. **DOI:** 10.2528/pierm22062909
41. Gupta Anupma [et al.]. Design of a Patch Antenna with Square Ring-Shaped-Coupled Ground for on/off Body Communication. *International Journal of Electronics*, no. 12, Informa UK Limited, June 2019, pp. 1814–28. Crossref. **DOI:** 10.1080/00207217.2019.1625970
42. Randall Kirschman. *Fabrication of Passive Components for High Temperature Instrumentation.* Wiley-IEEE Press, 1999.
43. Das Goutam Kumar V [et al.]. Gain-enhancement Technique for Wearable Patch Antenna Using Grounded Metamaterial. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, no. 15, Institution of Engineering and Technology (IET), Oct. 2020, pp. 2045–52. Crossref. **DOI:** 10.1049/iet-map.2020.0083
44. Potey Pranita Manish and Kushal Tuckley. Design of Wearable Textile Antenna with Various Substrate and Investigation on Fabric Selection. 2018 3rd International Conference on Microwave and Photonics (ICMAP), IEEE, Feb. 2018. Crossref. **DOI:** 10.1109/icmap.2018.8354539
45. Bakir Mete. Quartz Fiber Radome And Substrate For Aerospace Applications. *Eskişehir Technical University Journal of Science and Technology A - Applied Sciences and Engineering*, no. 1, Anadolu Universitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi-A: Uygulamali Bilimler ve Muhendislik, Mar. 2023, pp. 48–56. Crossref. **DOI:** 10.18038/estubtda.1247951
46. Sreelakshmy R. [et al.]. A Wearable Type Embroidered Logo Antenna at ISM Band for Military Applications. *Microwave and Optical Technology Letters*, no. 9, Wiley, June 2017, pp. 2159–63. Crossref. **DOI:** 10.1002/mop.30697
47. Jalil Mohd Ezwan Bin [et al.]. Fractal Koch Multiband Textile Antenna Performance With Bending, Wet Conditions And On The Human Body. *Progress In Electromagnetics Research*, The Electromagnetics Academy, 2013, pp. 633–52. Crossref. **DOI:** 10.2528/pier13041212
48. Monirujjaman Khan M [et al.]. Various Textiles-Based Comparative Analysis of a Millimeter Wave Miniaturized Novel Antenna Design for Body-Centric Communications. *Int J Antennas Propag.* 2021;(2021). **DOI:** 10.1155/2021/2360440
49. Dirk Hohnholz Alan G. MacDiarmid 2001. Line patterning of conducting polymers New horizons for inexpensive, disposable electronic devices.
50. Y. Tao, Y. Tao, L. Wang, B. Wang, Z. Yang, and Y. Tai. High-reproducibility, flexible conductive patterns fabricated with silver nanowire by drop or fit-to-flow method, 2013. [Online]. Available: <http://www.nanoscalereslett.com/content/8/1/147>
51. Roshni SB, Jayakrishnan MP, Mohanan P, Surendran KP. Design and fabrication of an E-shaped wearable textile antenna on PVB-coated hydrophobic polyester fabric. *Smart Mater Struct.* 2017;26(10). **DOI:** 10.1088/1361-665X/aa7c40
52. N. Board, *Handbook On Printing Technology*, 2nd edition. Offset, Gravure, Flexo, Screen, 2011.
53. E. Halonen, K. Kaija, M. Mantysalo, A. Kempainen, A. Kempainen, and N. Bjorklund. Evaluation of printed electronics manufacturing line with sensor platform application. *European Microelectronics and Packaging Conference*, Rimini, Italy, 2009, pp. 1–8.
54. Faddoul R [et al.]. Optimisation of silver paste for flexography printing on LTCC substrate. *Microelec-*

- tronics Reliability. 2012;52(7):1483-1491.
DOI: 10.1016/j.microrel.2012.03.004
55. Hasni U, Piper ME, Lundquist J, Topsakal E. Screen-Printed Fabric Antennas for Wearable Applications. IEEE Open Journal of Antennas and Propagation, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021, pp. 591–598. **DOI:** 10.1109/OJAP.2021.3070919
56. Hayes GJ, So JH, Qusba A, Dickey MD, Lazzi G. Flexible liquid metal alloy (EGaIn) microstrip patch antenna. IEEE Trans Antennas Propag. 2012;60(5):2151-2156. **DOI:** 10.1109/TAP.2012.2189698
57. Wang F, Arslan T. Inkjet-printed antenna on a flexible substrate for wearable microwave imaging applications. 2016 Loughborough Antennas & Propagation Conference (LAPC), IEEE, Nov. 2016, pp. 1–4.
DOI: 10.1109/LAPC.2016.7807499
58. Joshi JG, Pattnaik SS, Devi S. Metamaterial embedded wearable rectangular microstrip patch antenna. Int J Antennas Propag. 2012;(2012). **DOI:** 10.1155/2012/974315
59. Desai A, Upadhyaya T, Patel J, Patel R, Palandoken M. Flexible CPW fed transparent antenna for WLAN and sub-6 GHz 5G applications. Microw Opt Technol Lett. 2020;62(5.):2090-2103. **DOI:** 10.1002/mop.32287
60. A. Kumar, A. De, and R.K. Jain. Size Miniaturization and Isolation Enhancement of Two-Element Antenna for Sub-6 GHz Applications. IETE J Res, 2021. **DOI:** 10.1080/03772063.2021.1987994
61. Tighezza M, Rahim SKA, Islam MT. Flexible wideband antenna for 5G applications. Microw Opt Technol Lett. 2017;60:38-44.
62. Karad KV, Hendre VS. A flower bud-shaped flexible UWB antenna for healthcare applications. EURASIP J Wirel Commun Netw. 2023;2023(1).
DOI: 10.1186/s13638-023-02239-2
63. Usman M [et al.]. The Impact of Bending on Radiation Characteristics of Polymer-Based Flexible Antennas for General IoT Applications, 2021. **DOI:** 10.3390/app
64. Ali U [et al.]. Design and comparative analysis of conventional and metamaterial-based textile antennas for wearable applications. International Journal of Numerical Modelling: Electronic Networks, Devices and Fields. 2019;32(6). **DOI:** 10.1002/jnm.2567
65. Karad Kailash Vaijinath, Vaibhav S. Hendre. A Foam-Based Compact Flexible Wideband Antenna For Healthcare Applications. Progress In Electromagnetics Research C, The Electromagnetics Academy, 2022, pp. 197–212. Crossref. **DOI:** 10.2528/pierc22061201
66. H.K. Bhaldar, S.K. Gowre, M.S. Ustad. Design of Circularly Polarized Compact Size Wearable Antenna for UWB and 5G Application. IETE J Res, 2022.
DOI: 10.1080/03772063.2022.2054868
67. Aun NFM [et al.]. Revolutionizing Wearables for 5G: 5G Technologies: Recent Developments and Future Perspectives for Wearable Devices and Antennas. IEEE Microw Mag. 2017;18(3):108-124.
DOI: 10.1109/MMM.2017.2664019
68. Ericsson Mobility Report November 2020.
69. R. Azim, R. Aktar, A.K.M.M.H. Siddique, L.C. Paul, and M.T. Islam. Circular patch planar ultra-wideband antenna for 5G sub-6 GHz wireless communication applications.
70. Riaz A, Khan S, Arslan T. Design and Modelling of Graphene-Based Flexible 5G Antenna for Next-Generation Wearable Head Imaging Systems. Micromachines (Basel). 2023;14(3). **DOI:** 10.3390/mi14030610
71. Shoaib N, Shoaib S, Khattak RY, Shoaib I, Chen X, Perwaiz A. MIMO antennas for smart 5G devices. IEEE Access. 2018;6:77014-77021.
DOI: 10.1109/ACCESS.2018.2876763
72. Mahajan RC, Vyas V. Wine Glass Shaped Microstrip Antenna with Woodpile Structure for Wireless Applications. Majlesi Journal of Electrical Engineering. 2019;13(1):37-44.
73. Sufian MA [et al.]. 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
74. Anbarasu M, Nithiyanantham J. Performance Analysis of Highly Efficient Two-Port MIMO Antenna for 5G Wearable Applications. IETE J Res, 2021.
DOI: 10.1080/03772063.2021.1926345
75. T. Addepalli, T. Vidyavathi, K. Neelima, M. Sharma, D. Kumar. Asymmetrical fed Calendula flower-shaped four-port 5G-NR band (n77, n78, and n79) MIMO antenna with high diversity performance. Int J Microw Wirel Technol, May 2022.
DOI: 10.1017/S1759078722000800
76. Peng Xiaoxu, Chengzhu Du. A Flexible CPW-Fed Tri-Band Four-Port MIMO Antenna for 5G/WIFI 6E Wearable Applications. AEU – International Journal of Electronics and Communications, Elsevier BV, Jan. 2024, p. 155036.
DOI: 10.1016/j.aeue.2023.155036
77. Ericsson White Paper. 6G spectrum – enabling the future mobile life beyond 2030. March 2023.
78. J. Park, B. Kim, and W. Hong. 24-1: Invited Paper: Optically Invisible Antenna-on-Display (AoD) Technologies: Review, Demonstration and Opportunities for Microwave, Millimeter-Wave and Sub-THz Wireless Applications. SID Symposium Digest of Technical Papers. 2021;52(1):293-296.
DOI: 10.1002/sdtp.14672

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Convertor

D.M. Mokhovikov¹, E.S. Barbin¹, T.G. Nesterenko¹, A.A. Talovskaya¹, A.S. Myrzakhmetov¹,
I.V. Kulinich¹, P.F. Baranov², D.P. Il'yaschenko²

¹Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Lenin Ave., 40, Tomsk 634050, Russia

²National Research Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia

Received 06.09.2024

Accepted for publication 14.11.2024

Abstract

Photonic integrated circuits constitute a vital component of contemporary telecommunications systems, facilitating traffic management and reducing energy consumption. However, the integration of these components presents a significant challenge in the form of high polarization sensitivity, which has the potential to limit the overall performance of the device. The objective of this study was to develop a design method and fabrication technology for polarization converters based on silicon nitride-on-insulator. The design of the polarization converters was optimised through the utilisation of finite element method simulations, conducted using the ANSYS Lumerical software. The device features an asymmetric rib waveguide, which facilitates efficient polarisation rotation. The technological implementation comprised plasma chemical vapor deposition of silicon nitride films, three-dimensional laser lithography, and reactive ion etching. A technological assessment determined that the reproducibility tolerance was ± 60 nm. To address this limitation, a mirrored section was incorporated into the polarization converter design, thereby increasing the allowable fabrication tolerance to ± 215 nm without compromising device performance. The optimised polarization converter exhibited a high level of polarization rotation efficiency, reaching 96.3 %, and an output power of 98.32 %. The utilisation of an asymmetric rib waveguide was pivotal in attaining these outcomes, facilitating the transfer of optical power from fundamental transverse electric to fundamental transverse magnetic modes. The incorporation of a mirrored section enhanced the device's manufacturability, maintaining performance despite geometric deviations. These findings highlight the robustness of the proposed design under typical fabrication constraints. This study presents a novel design and fabrication method for silicon nitride on insulator-based polarization converters. The proposed approach improves efficiency and stability. These results provide a foundation for future advancements in integrated photonics, with potential applications in telecommunications and beyond.

Keywords: polarisation converter; asymmetric waveguide; silicon nitride on insulator; photonic integrated circuits

Адрес для переписки:

Моховиков Д.М.
Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники,
пр-т Ленина, 40, г. Томск 634050, Россия
e-mail: denis.m.mokhovikov@tusur.ru

Address for correspondence:

Mokhovikov D.M.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Lenin Ave., 40, Tomsk 634050, Russia
e-mail: denis.m.mokhovikov@tusur.ru

Для цитирования:

D.M. Mokhovikov, E.S. Barbin, T.G. Nesterenko, A.A. Talovskaya,
A.S. Myrzakhmetov, I.V. Kulinich, P.F. Baranov, D.P. Il'yaschenko.
Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Convertor.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 287–294.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

For citation:

Mokhovikov DM, Barbin ES, Nesterenko TG, Talovskaya AA,
Myrzakhmetov AS, Kulinich IV, Baranov PF, Il'yaschenko DP.
Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Convertor.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):287–294.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

Конвертор поляризации на основе нитрида кремния на изоляторе

Д.М. Моховиков¹, Е.С. Барбин¹, Т.Г. Нестеренко¹, А.А. Таловская¹,
А.С. Мырзахметов¹, И.В. Кулинич¹, П.Ф. Баранов², Д.П. Ильященко²

¹Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
пр-т Ленина, 40, г. Томск 634050, Россия

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр-т Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия

Поступила 06.09.2024

Принята к печати 14.11.2024

Фотонные интегральные схемы являются важнейшим компонентом современных телекоммуникационных систем, упрощая процесс управления трафиком и снижая энергопотребление. Однако интеграция подобных компонентов представляет собой серьезную проблему в виде высокой поляризационной чувствительности, которая может ограничить общую производительность устройства. Цель данного исследования – разработать метод проектирования и технологию изготовления поляризационных конвертеров на основе нитрида кремния на изоляторе. Задача данного исследования – удовлетворить специфические требования российских систем плотного мультиплексирования с разделением по длине волны. Конструкция поляризационного конвертора оптимизирована с помощью моделирования методом конечных элементов, проведенного с использованием ANSYS Lumerical. Устройство имеет асимметричный гребенчатый волновод, обеспечивающий вращение поляризации. Технологическая реализация выполнена с использованием плазменно-химического осаждения плёнок нитрида кремния, 3D-лазерной литографии и реактивного ионного травления. В результате установлено, что технологическая погрешность воспроизведения геометрии составляет ± 60 нм. Для увеличения допуска, в конструкцию поляризационного конвертора встроена зеркально-отражённая секция, что позволило увеличить допуск на изготовление до ± 215 нм без ухудшения характеристик устройства. Оптимизированный конвертор поляризации продемонстрировал эффективность вращения поляризации, достигающую 96,3 %, и выходную мощность 98,32 %. Использование асимметричного гребенчатого волновода обеспечило достижение этих результатов, способствуя передаче оптической мощности от поперечной электрической фундаментальной моды к поперечной магнитной фундаментальной моде. В данном исследовании представлен новый метод проектирования и изготовления поляризационных конвертеров на основе нитрида кремния на изоляторе. Предложенный подход повышает эффективность и стабильность контроля поляризации, тем самым обеспечивая разработку надёжных и экономически эффективных оптических устройств в системах плотного мультиплексирования с разделением по длине волны. Эти результаты создают основы для будущих достижений в области интегральной фотоники в области телекоммуникаций и за её пределами.

Ключевые слова: контроль, конвертор поляризации, асимметричный волновод, нитрид кремния на изоляторе, фотонные интегральные схемы

Адрес для переписки:

Моховиков Д.М.
Томский государственный университет систем управления
и радиоэлектроники,
пр-т Ленина, 40, г. Томск 634050, Россия
e-mail: denis.m.mokhovikov@tusur.ru

Address for correspondence:

Mokhovikov D.M.
Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Lenin Ave., 40, Tomsk 634050, Russia
e-mail: denis.m.mokhovikov@tusur.ru

Для цитирования:

D.M. Mokhovikov, E.S. Barbin, T.G. Nesterenko, A.A. Talovskaya,
A.S. Myrzakmetov, I.V. Kulinich, P.F. Baranov, D.P. Ilyashchenko.
Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Converter.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 287–294.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

For citation:

Mokhovikov DM, Barbin ES, Nesterenko TG, Talovskaya AA,
Myrzakmetov AS, Kulinich IV, Baranov PF, Ilyashchenko DP.
Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Converter.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):287–294.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-287-294

Introduction

The necessity for more rapid and energy-saving broadband networks is driving global research policy in optical transmission [1]. Photonic integrated circuits are utilised in modern telecommunications networks to create networks capable of accommodating increasing traffic. This approach reduces power consumption by at least 50 % compared to traditional integrated circuits [2]. Integrating photonic integrated circuits elements has led to a new challenge: high sensitivity to polarisation. This issue can be addressed by implementing polarisation diversity or conversion schemes. As a result, there has been a surge develop passive components designed to meet the demanding requirements for polarisation sensitivity in circuits [3–5].

The process of polarisation conversion is achieved through special passive components, namely polarisation converters. Convertors are constructed as asymmetric ribbed waveguides with distinctive cross-sectional shapes. By the findings reported in [6–8], the lengths of these structures range from 20 to 150 μm . Furthermore, the devices can convert transverse electric (TE) versus transverse magnetic (TM) modes with an efficiency exceeding 90 %. Additionally, this outcome can be attained by cone waveguides with a length ranging from 200 to 1500 μm , which exhibit a comparable conversion efficiency but with larger dimensions [9, 10].

The primary challenge is reproducing the geometry of the integral optical polarisation converters, which causes high lithography precision, many technological operations, and minimal roughness of both the waveguide walls and the substrate surface [11]. A comparative analysis of integrated-optical polarization converters on different photonic platforms has revealed several advantages associated with silicon nitride on insulator devices. These devices are characterised by low insertion loss, less than 1 dB, high polarisation conversion efficiency exceeding 95 %, and a wide range of operating wavelengths [12, 13]. It is also noteworthy that silicon nitride on insulator polarization converters present fewer challenges to the lithographic process and that they can be integrated with a variety of photonic platforms based on thin-film lithium niobate (LiNbO_3), silicon-on-insulator, and indium phosphide (InP) [14, 15].

This paper presents new geometrical solutions for integral-optical polarisation converters, enhancing polarisation conversion efficiency

with reduced dimensions. We also describe a detailed technological roadmap for cheap polarisation convertor fabrication. This study aims to improve the design and manufacturing capabilities of Russian dense wavelength division multiplexing systems on any photonic platform by creating a comprehensive design methodology and technology for silicon nitride on insulator polarisation converters. This comprehensive design methodology and technology involve a detailed analysis of the polarisation converter, modelled and simulated in ANSYS Lumerical software using the finite element and finite difference methods in the time domain. Additionally, it includes the technological implementation method, which involves using 3D laser photolithography and reactive ion etching of silicon nitride formed by plasma chemical deposition in high-density plasma.

Section I outlines the main issues related to polarisation control in modern photonic systems. Section II, titled "Materials and Methods", comprehensively analyses the polarisation converter, modelled and simulated in ANSYS Lumerical software using the finite element and finite difference methods in the time domain. Additionally, this section describes the technological implementation method, which involves using 3D laser photolithography and reactive ion etching of silicon nitride formed by plasma chemical deposition in high-density plasma. Section III, "Results", presents the observations of the simulations using optimisation and compares the accuracy and error of the models against the fabricated sample. Section IV, "Discussion", compares the results with previous studies.

Materials and methods

The cross-sectional geometry of the polarisation converter is modelled using the finite element method [16]. This method offers high accuracy in the model's convergence with the real world. Several techniques can fabricate thin films, with radio-frequency magnetron sputtering [17] and plasma chemical vapour deposition [18] being two methods. This work utilises the latter method in high-density plasma [19]. It can produce films with a broad spectrum of stoichiometric compositions with greater precision, which prioritises the characteristics of the film.

Design of polarisation converter

The mathematical model for the integral optical polarisation converter was created using software for calculating and designing photonic integrated circuits, specifically ANSYS Lumerical. This was achieved through the use of the finite element method, a technique employed in the analysis of various photonic devices based on their geometry and properties of the materials included in their composition. The principal mathematical apparatus of this method is concerned with mode profiles, cut-off frequencies, and effective refractive indices, which enables the geometry of the waveguide in an integrated photonic system to be optimised, as shown by Wang Q. [20].

The model of the integral optical converter is a waveguide rib structure based on silicon nitride on insulator, comprising a rectangular rib waveguide at the input, an asymmetric rib waveguide performing the polarisation rotation function, and a rectangular rib waveguide at the output (Figure 1).

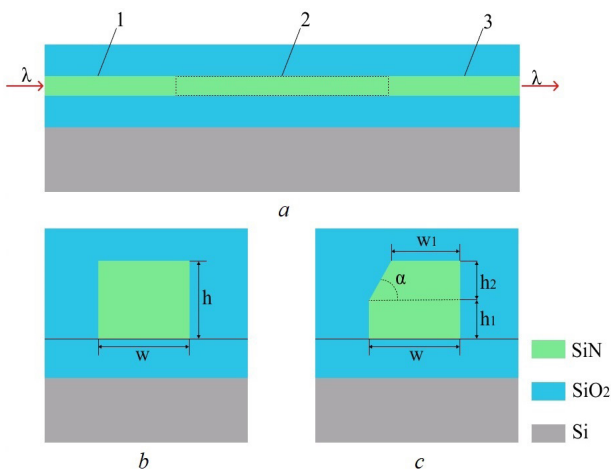


Figure 1 – A scheme of the integrated optical converter: *a* – a structure of polarisation converter system top view; *b* – a cross-section of the direct ridge waveguide; *c* – a cross-section of the asymmetric ridge waveguide; 1 – input ridged waveguide; 2 – asymmetric ridged waveguide; 3 – output ridged waveguide

This model presents plane-polarised light with a wavelength of $1.55 \mu\text{m}$ propagates in the crest of the SixNy-based waveguide with a refractive index of 2. After that, the light wave passes through the rotation section, which is an asymmetric waveguide. This asymmetric waveguide, a key component in the polarisation conversion process, is designed to induce a 90° polarisation rotation in the light wave. The light wave exits the rectangular rib waveguide, completing the polarisation conversion process.

Fabrication of polarisation converter

The initial stage involves treating the wafer surface to remove organic contaminants (Figure 2a). A 100 mm diameter Silicon-based wafer with crystallographic orientation (111) is used. It is placed in dimethylformamide at 150°C for 20 min. Then, it is treated in isopropyl alcohol at 25°C for 5 min. Finally, it is dried in a nitrogen atmosphere.

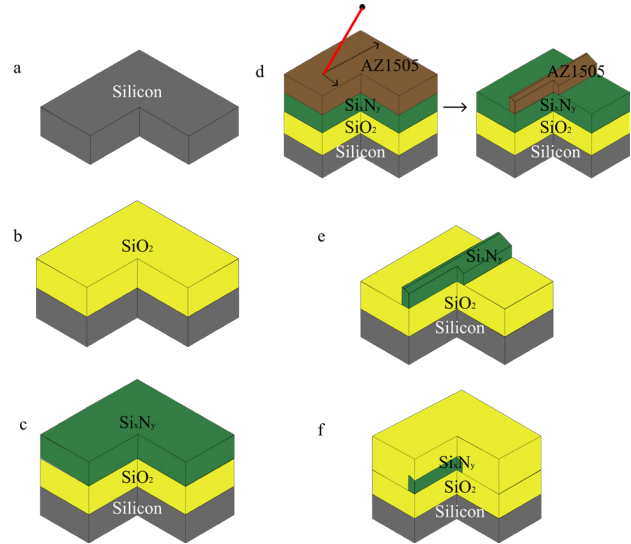


Figure 2 – Technological process route for the fabrication of an integrated-optical polarisation converter: *a* – wafer cleaning; *b* – deposition of SiO_2 ; *c* – deposition of Si_3N_4 ; *d* – laser lithography; *e* – Si_3N_4 plasma etching; *f* – deposition of SiO_2

The second step is the plasma chemical deposition of a silicon dioxide (SiO_2) film (Figure 2b). The wafer is loaded into the working chamber of the STEICP200D unit. SiO_2 deposition is performed in a monosilane (SiH_4) and nitrous oxide (N_2O) atmosphere. The gas flow ratio is $120/20 \text{ cm}^3/\text{s}$, and the chamber pressure is 1.7 Pa. The inductive coupled plasma source power is 600 W. The deposition occurs at 300°C for 4870 s, resulting in a two μm thick SiO_2 film.

The third step involves the deposition of silicon nitride (Si_3N_4) (Figure 2c). SixNy deposition is conducted in situ, following the silicon dioxide (SiO_2) deposition, in a monosilane (SiH_4) and nitrogen (N_2) atmosphere. The gas flow ratio is $170/5.5 \text{ cm}^3/\text{s}$, and the chamber pressure is 3.7 Pa. The inductive coupled plasma source power is 600 W, and the RIE source power is 50 W. The deposition occurs at 270°C for 2000 s, producing an 800 nm thick Si_3N_4 film.

The fourth step is the 3D photolithography process to obtain an asymmetric ridge structure (Fi-

figure 2d). The wafer is calcined at 200 °C for 5 min. Then, AZ1505 photoresist is applied by centrifugation on an OPTI Spin SB20 at 1600 rpm with 400 acceleration. This creates an 800 ± 10 nm thick resist layer. The resist is dried at 100 °C for 4 min. Then, it is exposed under specific parameters.

The fifth step is the plasma chemical etching of Si_xN_y on the STEICP200E unit (Figure 2e). The wafer is loaded into a chamber at 23 °C. Si_xN_y etching is performed in an SF_6 atmosphere with a gas flow rate of 50 cm^3/s . The chamber pressure is 2.1 Pa, and the reactive ion etching source power is 34 W. Etching occurs for 800 s, monitored by an interferometer. This ensures the complete removal of Si_xN_y in the opened field area and the resist. This process has a selectivity of $S = 1$.

The sixth step is similar to step 2 (Figure 2f).

The abovementioned method represents the technological approach to realising silicon nitride on insulator-based integrated optical converters. These technological operations can also be employed to fabricate other silicon nitride on insulator-based photonic devices.

Results

Input/Output waveguides

To achieve maximum efficiency (100 %) in polarisation rotation and output power (100 %), the design of the input rib waveguide must ensure that the confinement factor for the TE mode (Γ^{TE}) is 100 % and for the TM mode (Γ^{TM}) is 0 %. Additionally, the design of the polarisation rotation section (asymmetric rib waveguide) must ensure that Γ^{TE} and Γ^{TM} are each 50 % for their respective modes. A modal analysis of a single-mode rib waveguide was conducted for various crest widths (w), with the height (h) equal to w (Figure 3).

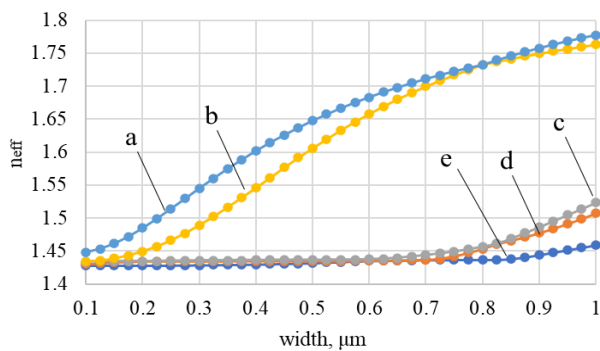


Figure 3 – Dependence of the effective refractive indices n_{eff} of various modes on the waveguide side width w : a – TE_0 ; b – TM_0 ; c – TE_1 ; d – TM_1 ; e – TE_2

The modal analysis results indicate that the effective refractive indices of the TE_0 and TM_0 modes converge at crest widths (w) and heights (h) of the waveguide starting from 800 nm. However, due to the maximum silicon nitride film thickness being limited to 800 nm by the technological capabilities of the Nanotechnology Research and Educational Center at TUSUR, further studies were conducted with $h = 800$ nm. The impact of the waveguide crest width (w) on the confinement factors of the TE_0 and TM_0 modes was investigated. The results showed that $\Gamma^{\text{TE}} = 100\%$ and $\Gamma^{\text{TM}} = 0\%$ are achieved with a crest width of $w = 850$ nm.

Polarisation Rotation Section

Subsequently, the impact of the geometric parameters of the asymmetric rib waveguide on the efficiency of polarisation rotation, facilitated by the transfer of optical power from the TE_0 to the TM_0 mode, was investigated. The geometric parameters of the rotation section that maximise polarisation rotation efficiency were determined. The cross-sectional geometric parameters of the asymmetric waveguide are demonstrated in Figure 4. The calculation results are presented in Table.

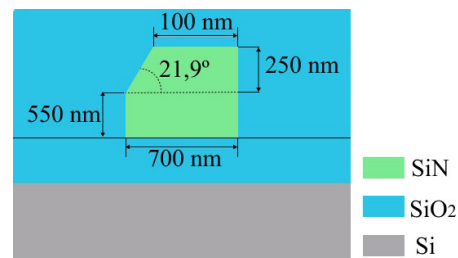


Figure 4 – Geometric parameters of the polarisation conversion section with maximum efficiency

Table
Polarisation converter parameters using geometry for maximum efficiency

$\Gamma^{\text{TE}}, \%$	$\Gamma^{\text{TM}}, \%$	$P, \%$	$L, \mu\text{m}$	TE_0 to $\text{TM}_0, \%$
50	50	98.32	57	96.3

Despite the developed integral optical converter design's high polarisation rotation efficiency (96.3 %) and output power (98.32 %), the technological assessment revealed this geometry's reproducibility tolerance is ± 60 nm. Exceeding this tolerance significantly reduces the device's efficiency. To expand the range of technological error, the length of the conversion section was doubled, and

25 % of the length of the asymmetric waveguide was mirrored (Figure 5).

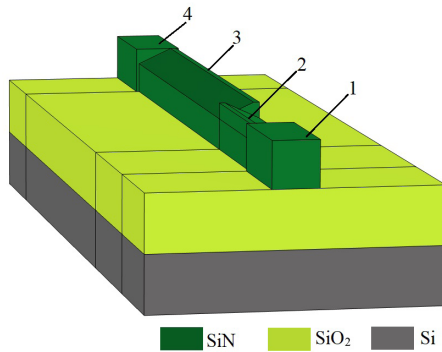


Figure 5 – Scheme of a model of an integrated optical converter with a mirror-reflected asymmetric waveguide: 1 – input rib rectangular waveguide; 2 – mirror-reflect-ed asymmetric waveguide; 3 – asymmetric waveguide; 4 – output rectangular waveguide

Using the mirrored section, the allowable technological error increased to 215 nm, maintaining a polarisation conversion efficiency of 96.3 % and an output power of 98.32 %. The length of the polarisation converter section (L) was 114 μm .

Discussion

The study aimed to optimise the design of a polarisation converter in an integral optical waveguide system, achieving both high polarisation rotation efficiency and output power. The results indicate that specific geometric configurations of the waveguide are crucial in attaining these goals.

Polarisation Rotation Efficiency and Output Power

The modal analysis on the single-mode rib waveguide demonstrated that the effective refractive indices for the TE_0 and TM_0 modes converge at a crest width (w) and height (h) starting from 800 nm. This convergence is critical for ensuring effective mode confinement and polarisation rotation. Our findings suggest that a crest width of 850 nm and a height of 800 nm optimise the confinement factors, with Γ^{TE} reaching 100 % and Γ^{TM} falling to 0 %. This configuration effectively isolates the TE mode, minimising TM mode confinement, which is essential for maintaining high polarisation purity and minimising losses.

Technological Tolerance and Reproducibility

A critical aspect of the design is its manufacturability within the technological constraints of avail-

able fabrication processes. The initial design, with a tolerance of ± 60 nm, posed significant challenges for consistent production, as slight deviations could drastically reduce efficiency. To address this, we proposed a design modification by extending the length of the polarisation conversion section and incorporating a mirrored segment.

The mirrored segment works by reversing the slope direction of the rib waveguide, altering the phase relationship between the TE and TM modes. This reversal creates an additional phase shift, allowing the gradual accumulation of polarization rotation over the extended waveguide length. By redistributing the phase mismatch along a longer interaction region, the mirrored segment compensates for geometric variations caused by fabrication errors. As a result, the extended length to 114 μm , with 25 % of it mirrored, increases the allowable technological error to ± 215 nm while maintaining a polarisation conversion efficiency of at least 95 % and preserving output power.

This adjustment ensures that the device remains effective even with variations in fabrication, enhancing reproducibility and practical applicability.

Conclusion

This study successfully developed a design method and fabrication technology for polarization converters based on silicon nitride-on-insulator material. The research identified and optimized the key geometric parameters of the asymmetric rib waveguide, achieving a polarization rotation efficiency of 96.3 % and an output optical power of 98.32 %. These results highlight the importance of precise waveguide geometry in maintaining high conversion efficiency.

A major innovation of this work is the incorporation of a mirrored section into the polarization converter. This section reverses the slope direction in the comb-like rib waveguide, configured as 25 % straight section and 75 % mirrored section relative to the OY plane in the cross-section. The mirrored section modifies the polarization rotation direction by altering the phase relationship between the transverse electric and transverse magnetic modes. This change increases the variation in the effective refractive index within the waveguide structure by approximately 30 %. While the total device length increased by 15 %, the design significantly improved fabrication robustness. The fabrication tolerance expanded from ± 60 nm to ± 215 nm,

maintaining a minimum polarization rotation efficiency of 95 %.

The silicon nitride-on-insulator platform further distinguishes this work by offering compatibility with widely used integration technologies, such as silicon-on-insulator and indium phosphide. This compatibility allows the polarization converters to integrate seamlessly into modern photonic circuits. The compact size, high efficiency, and enhanced manufacturability make the proposed design highly suitable for dense wavelength division multiplexing systems and other advanced photonic applications.

Future research should prioritize experimental validation of the proposed theoretical findings and explore new materials to enhance the polarization converter's performance. Additionally, extending the design to support broader fabrication tolerances and additional waveguide platforms could enable its adoption in diverse areas of integrated photonics.

This study establishes a foundation for future advancements in photonic integration, paving the way for the development of reliable, cost-effective, and high-performance optical devices for telecommunications and related domains.

Acknowledgments

The results were obtained within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FEWM-2024-0008).

References

1. Minkenberg C. [et al.]. Co-packaged data centre optics: Opportunities and challenges. *IET Optoelectron.* 2021;15(2):77-91. **DOI:** 10.1049/ote2.12020
2. Siew SY. [et al.]. Review of Silicon Photonics Technology and Platform Development. *J. Light. Technol.* 2021;39(13):4374-4389. **DOI:** 10.1109/JLT.2021.3061563
3. Zhou Z. [et al.]. Silicon On-Chip PDM and WDM Technologies Via Plasmonics and Subwavelength Grating. *IEEE J. Sel. Top. Quantum Electron.* 2019;25(2):1-13. **DOI:** 10.1109/JSTQE.2019.2901558
4. Han X. [et al.]. Mode and Polarisation-Division Multiplexing Based on Silicon Nitride Loaded Lithium Niobate on Insulator Platform. *Laser Photon. Rev.* 2022;16(1):2100529. **DOI:** 10.1002/lpor.202100529
5. Nagatani M. [et al.]. 110-GHz-Bandwidth InP-HBT AMUX/ADEMUX Circuits for Beyond-1-Tb/s/ch Digital Coherent Optical Transceivers. 2022 IEEE Custom Integrated Circuits Conference (CICC). 2022;1-8 pp. **DOI:** 10.1109/CICC.2022.9777455
6. Kumari B., Varshney RK, Pal BP. Design of a promising silicon slot waveguide-based ultra-short low loss efficient polarisation rotator for the mid-IR. *Optik (Stuttg.)* 2019;180:71-83. **DOI:** 10.1016/j.ijleo.2018.11.067
7. Stanton EJ. [et al.]. On-chip polarisation rotator for type I second harmonic generation. *APL Photonics.* 2019;4(12):126105. **DOI:** 10.1063/1.5133139
8. Hou Z. [et al.]. On-Chip Polarisation Rotators. *Adv. Opt. Mater.* 2019;7(10):1900129. **DOI:** 10.1002/adom.201900129
9. Gallacher K. [et al.]. Silicon nitride waveguide polarisation rotator and polarisation beam splitter for chip-scale atomic systems. *APL Photonics.* 2022;7(4):046101. **DOI:** 10.1063/5.0073760
10. Chen D. [et al.]. Low-loss and fabrication tolerant silicon mode-order converters based on novel compact tapers. *Opt. Express.* 2015;23(9):11152. **DOI:** 10.1364/OE.23.011152
11. Tian Y. [et al.]. Broadband Polarisation Rotator and Splitter Based on 70 nm-Etched Waveguides on SOI Platform. *Photonics.* 2022;9(10):758. **DOI:** 10.3390/photonics9100758
12. Velasco AV. [et al.]. Ultracompact polarisation converter with a dual subwavelength trench built in a silicon-on-insulator waveguide. *Opt. Lett.* 2012;37(3):365. **DOI:** 10.1364/OL.37.000365
13. Socci L, Soriano V, Romagnoli M. 300 nm bandwidth adiabatic SOI polarisation splitter-rotators exploiting continuous symmetry breaking. *Opt. Express.* 2015;23(15):19261. **DOI:** 10.1364/OE.23.019261
14. Deng C. [et al.]. Reconfigurable and low-power consumption polarisation rotating beam splitter with EIT-like effect based on SOI ridge waveguide. *Opt. Commun.* 2021;495:127054. **DOI:** 10.1016/j.optcom.2021.127054
15. El-Aassar O, Rebeiz GM. A DC-to-108-GHz CMOS SOI Distributed Power Amplifier and Modulator Driver Leveraging Multi-Drive Complementary Stacked Cells. *IEEE J. Solid-State Circuits.* 2019;54(12):3437-3451. **DOI:** 10.1109/JSSC.2019.2937687
16. de Prenter, Frits, et al. "Stability and conditioning of immersed finite element methods: analysis and remedies." *Archives of Computational Methods in Engineering* 30.6. 2023;3617-3656 pp. **DOI:** 10.1007/s11831-023-09794-y
17. Chang L-C, Chang C-Y, You Y-W. Ta-Zr-N Thin Films Fabricated through HIPIMS/RFMS Co-Sputtering. *Coatings.* 2017;7:189. **DOI:** 10.3390/coatings7110189

18. Gebhard M, Mitschker F, Hoppe C, [et al.]. A combinatorial approach to enhance barrier properties of thin films on polymers: Seeding and capping of PECVD thin films by PEALD. *Plasma Process Polym.* 2018;15. **DOI:** 10.1002/ppap.201700209

19. Joshi Pooran C. [et al.]. "Low-temperature processing of SiO₂ thin films by HD-PECVD technique for

gate dielectric applications." *Poly-Silicon Thin Film Transistor Technology and Applications in Displays and Other Novel Technology Areas.* 2023;5004.

DOI: 10.1117/12.2522984

20. Wang Q. [et al.]. Heterogeneous Si/III-V integration and the optical vertical interconnect access. *Opt. Express.* 2012;20(15):16745. **DOI:** 10.1364/OE.20.016745

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж»: исследование математических моделей регистраторов точки прицеливания начального и базового уровней

С.Ф. Егоров

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

Поступила 16.05.2024

Принята к печати 06.11.2024

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует также производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Разрабатываемое семейство электронных стрелковых тренажёров «СТрИж» включает три общедоступных уровня для самостоятельной сборки: начальный, базовый и виртуальный. Приведены структурные схемы регистраторов точки прицеливания начального и базовых уровней и проведены исследования их математических моделей с оценкой погрешностей. Возможность самостоятельно собрать стрелковый тренажёр из общедоступных компонент (ноутбук, веб-камера, макеты оружия, ИК-светодиоды, проектор, лазерные излучатели, HD-камера) способствует их широкому использованию, опираясь на разрабатываемые программное обеспечение упражнений и методики сборки и настройки регистраторов точки прицеливания и имитаторов оружия. Исследования регистраторов на погрешность определения точки прицеливания показали приемлемую точность и технологичность тарировки математических моделей с возможностью учесть эту погрешность в моделируемом баллистическом рассеивании боеприпасов. Кроме этого исследована возможность повышения быстродействия регистрации и возможные подходы по повышению точности и фиксации свала и расстояния до рабочего места с возможностью пересчёта угловых размеров мишенной обстановки до реальной. Алгоритм работы программного обеспечения семейства тренажёров должен полностью поддерживать начальный и базовые уровни реализации с различными конфигурациями оборудования и включать мультимедийную систему обучения стрельбе. Для виртуального уровня тренажёра (шлем виртуальной реальности на смартфоне и макет оружия со смартфоном) требуется разработать свое программное обеспечение (рассматривается в следующих статьях цикла).

Ключевые слова: стрелковый тренажёр, точка прицеливания, математическая модель, регистратор точки прицеливания, погрешность

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.
Семейство электронных стрелковых тренажеров «СТрИж»:
исследование математических моделей регистраторов точки
прицеливания начального и базового уровней.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 295–306.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

For citation:

Egorov S.F.
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Research
of Mathematical Models of Target Point Determiners on Entry
and Basic Levels.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):295–306. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Research of Mathematical Models on Target Point Determiners of Entry and Basic Levels

S.F. Egorov

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

Received 16.05.2024

Accepted for publication 06.11.2024

Abstract

Development of rifle electronic simulators (i. e. for hand weapons and not using ammunition) is an important task since the production of any type of small arms, according to regulatory documents, requires also production of a simulator to instill aiming and firing skills. The developing family of electronic shooting simulators "STrIzh" includes three publicly available levels for self assembly: initial, basic and virtual. Structural diagrams of aiming point's recorders of initial and basic levels are presented and studies of their mathematical models with estimation of errors are carried out. Ability to self assemble a shooting simulator from publicly available components (laptop, webcam, weapon layouts, IR LEDs, projector, lasers, HD-camera) contributes to their widespread use. Such use is based on the program exercise support under development and methods of assembling and adjusting the targeting point recorders and weapon simulators. Studies of recorders for the error in determining of the aiming point showed acceptable accuracy and manufacturability of mathematical models' calibration with the ability to take this error into account in the simulated ballistic dispersion of ammunition. Possibility of registration speed increasing and possible approaches for increasing of the accuracy and fixation of the pile and the distance to the workplace with the possibility of recalculating the angular dimensions of the target situation to the real one were investigated also. The simulator family's software algorithm should fully support the initial and basic levels of implementation with various training equipment configurations and include a multimedia shooting training system. For the virtual level of the simulator (a virtual reality helmet on a smartphone and a weapon's layout with a smartphone), one needs to develop his own software (it will be discussed in the next articles).

Keywords: shooting simulator, target point, mathematical model, target point determiner, error

Адрес для переписки:

Егоров С.Ф.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,
ул. имени Т. Барамзиной, 34, г. Ижевск 426067, Россия
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Address for correspondence:

Egorov S.F.
Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
Academy of Sciences,
T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
e-mail: stos.mitm@mail.ru

Для цитирования:

С.Ф. Егоров.
Семейство электронных стрелковых тренажеров «СТрИж»: исследование математических моделей регистраторов точки прицеливания начального и базового уровней. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 4. С. 295–306.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

For citation:

Egorov SF.
Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Research of Mathematical Models of Target Point Determiners on Entry and Basic Levels. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(4):295–306. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-295-306

Введение

Разработка стрелковых электронных тренажёров (т. е. для ручного оружия и не использующих боеприпасы) является важной задачей, т. к. производство любого вида стрелкового вооружения, согласно нормативным документам, требует также производства тренажёра для привития навыков прицеливания и стрельбы. Электронный стрелковый тренажёр (СТ), безусловно, обладает большими функциональными возможностями и благодаря постоянному совершенствованию и удешевлению общедоступных электронных компонент исследование собранных из них регистраторов точки прицеливания (РТПр) для широкого использования является актуальной задачей, обладающей практической ценностью [1–11].

С учётом опыта разработки, модификации и внедрения профессионального СТ «Ингибитор» (индекс 1У33) проводится разработка и исследования по общедоступному семейству СТ «СТрИж» [12] с начальным, базовым и виртуальным уровнями реализации. Возможность самостоятельно собрать стрелковый тренажёр из общедоступных компонент (ноутбук, веб-камера, макеты оружия, ИК-светодиоды, проектор, лазерные излучатели, HD-камера, виртуальные шлемы, смартфоны) должна способствовать их широкому использованию. Разработка опирается в том числе и на опыт аналогового РТПр [13] и первые исследования методик и математических моделей (ММ) цифровых РТПр [14]. Анализировались также зарубежные источники в области общедоступных РТПр [15–19].

Целью данной работы являлось исследование математических моделей РТПр начального и базового уровней реализации СТ семейства «СТрИж». В дальнейших статьях цикла планируется исследование конструкций имитаторов оружия (ИО) с контролем срыва крючка и с вариантами реализации отдачи, а также исследование конструкций и математических моделей СТ виртуальной реальности.

Регистраторы точки прицеливания

Главные технические характеристики СТ: среднеквадратическое отклонение (с.к.о.) с погрешности определения координат точки

прицеливания (ТПр) (рассчитывается в тысячных дальности – т.д., 1 т.д. $\approx 0,0573^\circ \approx 3.448'$ угл. сек), частота опроса координат ТПр КС (в герцах или кадрах/сек), реализация отдачи и датчиков ИО (срыв, свал, прицелы, магазин, предохранитель, затвор и др.), полнота реализации изменяемой мишенной обстановки (время дня, сезон года, ветер, осадки, рельеф, местные предметы, мишени из Курса стрельб, реалистичные цели с активным поведением и др.). Таким образом, исследование ММ РТПр на погрешность представления координатной сетки являлось целью данной статьи.

Принципы работы РТПр начального и базового уровней семейства СТ «СТрИж» основаны на распознавании на изображениях с цифровой камеры со светофильтром пятен от реперных ИК-диодов у экрана (начальный уровень, рисунок 1) или пятен на экране от лазерных излучателей на ИО (базовый уровень, рисунок 2). Но конструктивно РТПр разных уровней сильно отличаются, что сказывается на технических характеристиках, стоимости и технологичности сборки и эксплуатации.

РТПр начального уровня (НУ, рисунок 1) на базе веб-камеры со светофильтром, закреплённой под стволом ИО, фиксирует только координаты двух реперных ИК-диодов: левый – основной, правый – дополнительный для фиксации недопустимого свала ИО (наклона). Далее координаты реперов на кадре камеры по ММ переводятся в координаты ТПр на экране, которые сохраняются в кольцевых буферах и используются в момент выстрела для баллистического расчёта точки попадания (также позволяя анализировать движение ТПр до и после выстрела – траекторию прицеливания). При приблизительной ширине экрана дисплея 44 см (пропорции 16:9) на типичном расстоянии 2 м до веб-камеры получается рабочий угловой размер около 13° , а по горизонтали веб-камеры фиксируют угол обзора U не менее 30° (типично $40\text{--}55^\circ$). Но использование только центральной части изображений минимизирует геометрические аберрации оптики камер. Допустимо использовать в затемнённом помещении в качестве реперов ярко-белые пятна на самом изображении дисплея (камера в этом случае без светофильтров), но остальное изображение мишенной обстановки должно

быть тусклым (режим «ночь»). Требования точности РТПр НУ 0,6–1,5 т.д. и быстродействия 15–60 Гц (кадр/сек) [12] обусловлены использованием для СТ НУ имитаторов с высоким

баллистическим рассеиванием пуль B (срединные отклонения из таблиц наставлений): ПМ (пистолет Макарова) $\approx 1,5$ т.д. и АКМ (автомат Калашникова) ≈ 0.6 т.д.

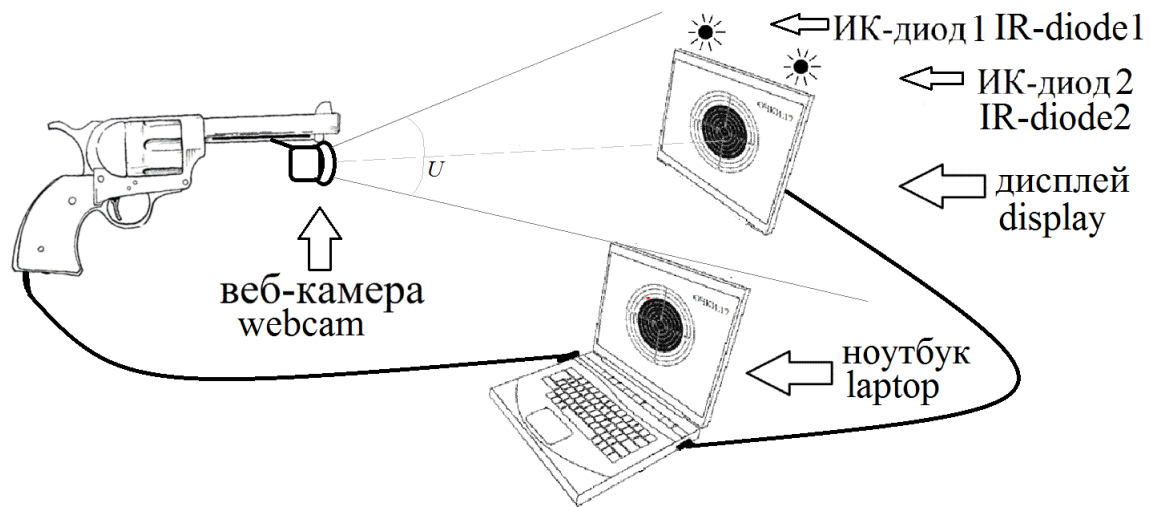


Рисунок 1 – Регистратор точки прицеливания начального уровня

Figure 1 – Entry level of a target point determiner

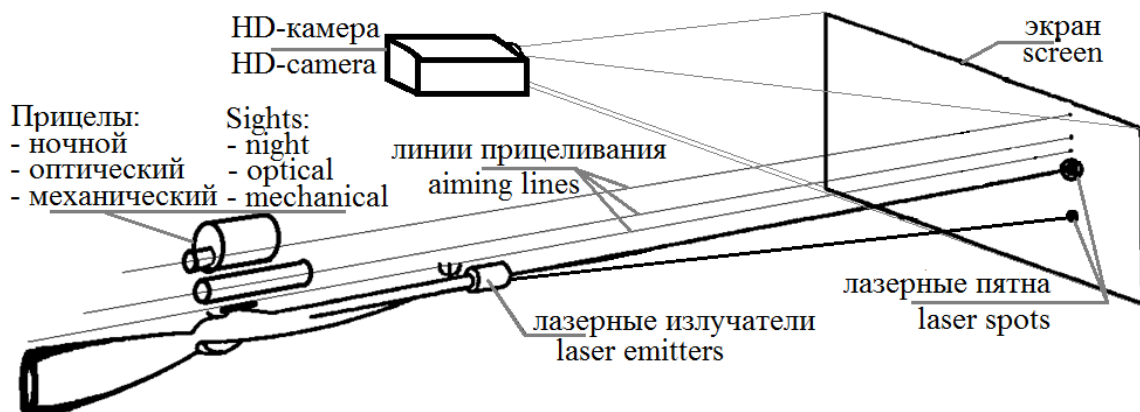


Рисунок 2 – Регистратор точки прицеливания базового уровня

Figure 2 – Basic level target point determiner

РТПр базового уровня (БУ, рисунок 2) на базе, например, HD-камеры со светофильтром, закреплённой перед экраном, фиксирует координаты нескольких лазерных пятен (разделяя их, например, по цвету для нескольких рабочих мест) на кадре камеры и по ММ переводит в координаты экрана, которые также сохраняются в кольцевых буферах. При стандартной ширине проекционного экрана 2 м (пропорции 16:9) угловой размер на расстоянии 5 м составляет около 20° , что также меньше типичного угла обзора камер в 50° , но качество HD-камер

выше веб-камер и разместить её можно ближе 5 м от экрана. Использование второго лазерного излучателя на одном ИО, когда верхний даёт луч строго параллельно линии прицеливания и является основным для ММ, а нижний – под небольшим углом вниз, позволяет оценить свал оружия и расстояние до экрана (с пересчётом масштаба мишеней, например). Допустимо использовать режим «лазер горит только при нажатом спусковом крючке», но это не даст возможности анализировать траекторию прицеливания до выстрела. Требования

точности РТПр БУ 0,3–0,8 т.д. и быстродействия 30–120 Гц (кадр/сек) [12] обусловлены возможностью использованием для СТ базового уровня ИО с более низким баллистическим рассеиванием пуль В: ПКМ (пулемёт Калашникова) $\approx 0,7$ т.д., АК74 (автомат Калашникова) $\approx 0,4$ т.д. и даже СВД (снайперская винтовка Драгунова) $\approx 0,135$ т.д. в особо подобранной конфигурации СТ.

Исследование математических моделей регистраторов точки прицеливания

Для создания измерительной базы ММ регистраторов точки прицеливания НУ используются два ИК-диода (репера) с автономным питанием (на батарейках или от USB ноутбука), закреплённые на концах рейки длиной примерно 30–35 см, которая размещается сверху дисплея (или экрана ноутбука, рисунок 1). Несмотря на то, что оптика общедоступных веб-камер, закрепляемых под стволом ИО, не отличается высоким качеством (обладает геометрическими и хроматическими аберрациями), но благодаря рабочему углу регистрации R всего 8–15° при широкоугольном объективе (минимум $U = 30$ –70°, рисунок 3), задействованной для анализа оказывается только центральная часть изображения кадра, где аберрации практически не проявляются, что облегчает оптимизацию ММ регистраторов точки прицеливания НУ, но и снижает её инструментальную точность.

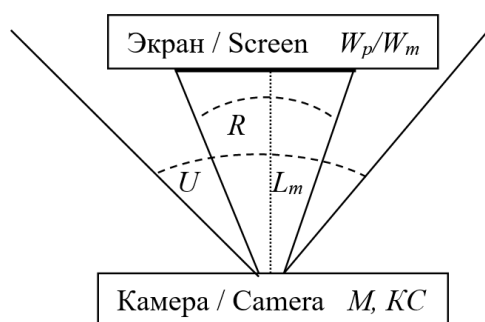


Рисунок 3 – Модель системы «камера-экран»: W_m – ширина экрана в м; W_p – ширина экрана в пикселях; R – рабочий угол; U – угол обзора камеры; L_m – расстояние от экрана до камеры; M, KC – режимы камеры

Figure 3 – Camera-screen system model: W_m – screen width in m; W_p – screen width in pixels; R – working angle; U – camera viewing angle; L_m – distance from the screen to the camera; M, KC – camera modes

Оценим инструментальную погрешность РТПр НУ: при разрешении веб-камеры 640×480 точек в режиме SD ($M = 640$) с типичном углом обзора $U = 50^\circ$ рабочий угол составляет $R = 13^\circ$ при ширине дисплея $W_m = 44$ см на расстоянии $L_m = 2$ м ($R = 2 \arctg(W_m/2/L_m)$) до камеры. Получается примерно 166 точек камеры ($M \cdot R/U$), «накрывающих» 1920 точек FHD-дисплея мишенной обстановки. При точности целочисленных координат центра репера в $\Delta = \pm 0,5$ отсчёта получаем инструментальную погрешность РТПр $\approx \pm 6$ точек экрана ($1920/166 \cdot 0,5$) или $\pm 0,04^\circ$ ($\pm 2,4'$) или $\pm 0,71$ т.д., что укладывается в заявленные характеристики СТ НУ (при этом человеческий глаз имеет разрешение $1' = 1$ угловую минуту $\approx 0,3$ т.д., что соответствует примерно 3 точкам FHD-дисплея на расстоянии 2,5 м до глаза). Решение проблемы повышения инструментальной точности видится в увеличении разрешения веб-камеры до 1280×720 точек (режим HD, $M = 1280$) или даже до 1920×1080 (режим FHD, $M = 1920$), что снизит инструментальную погрешность в 1,5–2 раза (на высоких разрешениях у многих камер увеличивается и угол обзора U , а KC резко падает), но требует повышенных вычислительных ресурсов компьютера для обработки изображений. Кроме этого можно использовать оптические насадки на веб-камеру для уменьшения её угла обзора до 30–40° (например, самодельные трубы Кеплера или Галилея [20]; вносимые ими аберрации – переверот изображения в случае трубы Кеплера, дисторсия в виде геометрических искажений – компенсируются автоматически с помощью регрессионных уравнений ММ), но менее $2R$ угол обзора делать нельзя чтобы по всему полю дисплея фиксировались веб-камерой два репера.

Тарировка ММ РТПр НУ осуществляется условной ручной «стрельбой» по 3 раза (для усреднения ручного прицеливания) в каждую из равномерно расположенных по экрану тарировочных мишеней (точек), количество которых выбирается заранее от 3×2 (6) до 7×5 (35) и определяет обусловленную ММ (количество параметров ММ должно быть не больше количества тарировочных мишеней для её разрешения по МНК, но чем больше мишеней, тем менее технологична ручная тарировка).

Оценим инструментальную погрешность РТПр БУ: при разрешении HD-камеры 1280×720 точек ($M = 1280$) и типичном её угле обзора $U = 50^\circ$ рабочий угол составляет $R = 20^\circ$, когда ширина экрана $W_m = 200$ см на расстоянии $L_m = 5$ м ($R = 2 \arctg(W_m/2/L)$) до камеры. Получается примерно 512 точек камеры ($M \cdot R/U$), «накрывающих» 1920 точек FHD-проектора мишенной обстановки. При точности целочисленных координат центра пятна в $\Delta = \pm 0,5$ отсчёта, получаем инструментальную погрешность ТПр $\pm 1,9$ точки экрана ($1920/512/2$) или $\pm 0,023^\circ$ ($\pm 1,35'$) или $\pm 0,4$ т.д., что более чем укладывается в заявленные характеристики СТ БУ (при этом человеческий глаз имеет разрешение $1' = 1$ угловую минуту $\approx 0,3$ т.д., что соответствует примерно ≈ 1 точке FHD-экрана на расстоянии 5,5 м до глаза). Использование высококачественной оптической насадки 2х на камере [20] позволяет снизить инструментальную погрешность в 2 раза, но проще разместить камеру ближе к экрану (например, на $L_m = 2-3$ м),

что несколько снижает технологичность, т. к. камеру удобно размещать вместе с проектором (но проектор может быть и короткофокусный).

Тарировка ММ РТПр БУ осуществляется в автоматическом режиме, когда на экране на чёрном фоне последовательно отображаются по известным координатам 7×9 (63) изображений репера (аналогов лазерного пятна), считываются камерой без светофильтра, определяются координаты центра и по МНК вычисляются параметры выбранной ММ.

Реальная погрешность ММ РТПр начального и базового уровней будут иной, т. к. все компоненты макета СТ не идеальны, что вносит методическую и субъективную погрешности (при ручной тарировке без закрепления ИО в станке), однако точность определения центра пятна при интегральных методах может быть $\Delta \ll \pm 0,5$ отсчёта. При исследовании ММ РТПр начального и базового уровней рассматривались 9 вариантов регрессионных уравнений и ряд общедоступных камер:

ММ no. 1	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i$
ММ no. 2	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i$
ММ no. 3	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 / x_i$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 / x_i$
ММ no. 4	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5y_i^2x_i + a_6y_ix_i^2$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5y_i^2x_i + b_6y_ix_i^2$
ММ no. 5	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5x_iy_i^2 + a_6x_i^2y_i + a_7(x_iy_i)^2$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5x_iy_i^2 + b_6x_i^2y_i + b_7(x_iy_i)^2$
ММ no. 6	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5x_i^2 + a_6y_i^2 + a_7x_iy_i^2 + a_8x_i^2y_i + a_9x_i^3 + a_{10}y_i^3$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5x_i^2 + b_6y_i^2 + b_7x_iy_i^2 + b_8x_i^2y_i + b_9x_i^3 + b_{10}y_i^3$
ММ no. 7	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5x_i^2 + a_6y_i^2 + a_7x_iy_i^2 + a_8x_i^2y_i + a_9x_i^3 + a_{10}y_i^3 +$ $+ a_{11}(x_iy_i)^2 + a_{12}x_iy_i^3 + a_{13}x_i^3y_i$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5x_i^2 + b_6y_i^2 + b_7x_iy_i^2 + b_8x_i^2y_i + b_9x_i^3 + b_{10}y_i^3 +$ $+ b_{11}(x_iy_i)^2 + b_{12}x_iy_i^3 + b_{13}x_i^3y_i$
ММ no. 8	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5x_i^2 + a_6y_i^2 + a_7x_iy_i^2 + a_8x_i^2y_i + a_9x_i^3 + a_{10}y_i^3 +$ $+ a_{11}(x_iy_i)^2 + a_{12}x_iy_i^3 + a_{13}x_i^3y_i + a_{14}x_i^4 + a_{15}y_i^4$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5x_i^2 + b_6y_i^2 + b_7x_iy_i^2 + b_8x_i^2y_i + b_9x_i^3 + b_{10}y_i^3 +$ $+ b_{11}(x_iy_i)^2 + b_{12}x_iy_i^3 + b_{13}x_i^3y_i + b_{14}x_i^4 + b_{15}y_i^4$
ММ no. 9	$rx_i = a_1 + a_2x_i + a_3y_i + a_4x_iy_i + a_5y_i^2 + a_6x_i^2 + a_7(x_iy_i)^2 + a_8y_i^3 + a_9x_i^3 + a_{10}x_i^3 / y_i$	$ry_i = b_1 + b_2x_i + b_3y_i + b_4x_iy_i + b_5y_i^2 + b_6x_i^2 + b_7(x_iy_i)^2 + b_8y_i^3 + b_9x_i^3 + b_{10}x_i^3 / y_i,$

где x_i, y_i – измеренные координаты пятна на камере; i – порядковый номер пятна; rx_i, ry_i – вычисленные (скорректированные) координаты пятна на экране; $a_1, \dots, a_n, b_1, \dots, b_n$ – коэффициенты полиномов для коррекции координат X и Y ; n – количество коэффициентов (зависит от используемой ММ).

При первоначальных исследованиях [14] в идеальных оптических условиях (проектор и камера расположены строго напротив центра экрана в темноте) использовалось тестовое изображение из 13×7 белых пятен на чёрном фоне с рабочим углом $R = 60^\circ$, но погрешности координат X и Y в с.к.о. пикселей замерялась только на центральной зоне тестового изображения (7×5 пятен, $1/4$ по площади кадра камеры) и было показано преимущество ММ № 5

(таблица 1). Выявлено, что погрешности ММ по центральной зоне кадра существенно меньше, чем по всему полю регистрации из-за геометрических aberrаций оптики малогабаритных камер и рекомендовано использовать камеры именно в таком режиме ($R < U$, рисунок 3).

Перевод с.к.о. в пикселях (σ_{pix}) в с.к.о. т.д. ($\sigma_{\text{тд}}$) при $W_m = 1,6 \text{ m}$, $W_p = 848 \text{ pix}$ и $L_m = 2 \text{ m}$ по формуле: $\sigma_{\text{тд}} = 10^3 \frac{W_m}{W_p L_m} \sigma_{\text{pix}}$ даёт $\sigma_{\text{тд}} = 0,943 \sigma_{\text{pix}} \approx \sigma_{\text{pix}}$.

Таблица 1 / Table 1

Погрешность камер для математических моделей №№ 1–5 в σ_{pix} ($\approx \sigma_{\text{тд}}$)

Cameras error for mathematical models №№ 1–5 in σ_{pix} ($\approx \sigma_{\text{тд}}$)

№	Шифр камеры Camera cipher	Номер регрессионного уравнения математической модели Mathematical model regression equation number					
		σ	1	2	3	4	5
1	LUMIX G3 (FHD)	σ_x	0.988	0.879	0.432	0.325	0.306
		σ_y	0.922	0.330	0.270	0.145	0.139
2	LUMIX TZ20 (FHD)	σ_x	0.569	0.554	0.372	0.291	0.288
		σ_y	0.599	0.227	0.177	0.167	0.159
3	PENTAX Optio MX4 (FHD)	σ_x	0.654	0.607	0.376	0.291	0.288
		σ_y	0.636	0.237	0.203	0.165	0.165
4	SAMSUNG GIO (SF)	σ_x	0.497	0.479	0.441	0.399	0.395
		σ_y	0.597	0.369	0.327	0.279	0.236
5	GStar X-15 (SF)	σ_x	0.862	0.649	0.559	0.483	0.481
		σ_y	0.951	0.638	0.542	0.267	0.165
6	MUSTEK LCD2 (SD)	σ_x	0.965	0.911	0.455	0.315	0.263
		σ_y	0.933	0.221	0.154	0.141	0.141
7	JMK JK-805 (SD)	σ_x	1.330	1.109	0.415	0.486	0.415
		σ_y	1.422	0.750	0.741	0.494	0.283
8	RITMIX SVR300 (SD)	σ_x	2.144	2.129	0.749	0.807	0.589
		σ_y	1.578	0.853	0.763	0.624	0.407
9	Defender C-090 (SD)	σ_x	2.545	2.519	1.192	0.745	0.643
		σ_y	2.123	0.645	0.468	0.410	0.358

Параметры модели «камера-экран» (parameters of «camera-screen» model): $L_m = 2 \text{ m}$, $W_m = 1,6 \text{ m}$, $W_p = 848$

Анализ таблицы 1 показал, что крупно-габаритные FHD-камеры (№ 1–3) обеспечивают минимальные погрешности, но использование их в качестве РТПр технически невозможно. Удовлетворительные погрешности показали и встроенные фотокамеры сотовых телефонов (№ 4–5), но использовать их также технически затруднительно. Общедоступные миниатюрные монтируемые камеры (№ 6–9) разделились на две группы: качественные (№ 6–7), которые нами рекомендуется использовать (например, MUSTEK LCD2 для РТПр БУ и JMK JK-805 для РТПр НУ) и менее качественные (№ 8–9), оптика последних вносит существенные геометрические aberrации – неравномерную «бочкообразность» (или «подушкообразность»), иногда превышающую допуск, и хроматические aberrации – по краям поля обзора падает яркость и увеличивается расслоение цветов (слева появляются красные полосы, а справа – синие), что обеспечивает им только

ограниченную годность в качестве РТПр (например, только для ИО Пистолета Макарова).

В текущих исследованиях уже в реальных условиях рабочего макета (когда проектор и камера расположены по нижнему краю экрана, т. е. с геометрическими искажениями проекции и используются днём, но без освещения, с занавешенными окнами, т. е. с неравномерным освещением) добавлены в ММ новые регрессионные уравнения № 6–9 и расширенный набор современных веб-камер (среди них видеорегилятор AIR Tone, профессиональная камера с автофокусом Canyon и для сравнения условий исследований та же камера Defender, что в таблице 1). Исследования показали прогнозируемые результаты, что старшие ММ №№ 6–9 лучше младших ММ №№ 1–5 (из [14]) и новые веб-камеры (таблица 2) лучше старых (таблица 1 из [14]), а реальные условия исследований хуже идеальных (в [14]).

Таблица 2 / Table 2

Погрешность математических моделей № 1–9 новых камер в σ_{pix} ($\approx 2 \sigma_{\text{гд}}$)

Error of mathematical models № 1–9 of new cameras in σ_{pix} ($\approx 2 \sigma_{\text{гд}}$)

9×7 points (1.76×1.32 м)	M, pix	U, °	MM1	MM2	MM3	MM4	MM5	MM6	MM7	MM8	MM9	KC, Gz
Defender C-090, σ_x	640	40	3.56	1.69	1.65	1.64	1.51	0.475	0.414	0.364	0.484	30
Defender C-090, σ_y	480		2.18	2.09	1.87	1.77	1.55	0.377	0.356	0.436	0.514	
iSlim 1300AF, σ_x	640	53	5.76	4.49	2.25	2.00	1.38	0.662	0.544	0.448	0.649	16
iSlim 1300AF, σ_y	480		3.79	1.65	1.59	1.11	1.02	0.565	0.475	0.446	0.682	
iSlim 1300AF, σ_x	1280	53	5.71	4.32	1.88	1.73	1.36	0.562	0.515	0.318	0.555	8
iSlim 1300AF, σ_y	1024		3.83	1.49	1.40	0.845	0.901	0.669	0.475	0.350	0.447	
DENN Photo, σ_x	640	32	4.69	2.37	2.10	2.19	1.84	0.614	0.691	0.729	0.919	12
DENN Photo, σ_y	480		2.59	2.68	2.64	2.20	2.24	0.717	0.730	0.783	1.030	
Intro WU702M, σ_x	640	46	10.2	1.08	1.06	0.992	0.934	0.368	0.369	0.276	0.361	13
Intro WU702M, σ_y	480		5.99	5.94	5.95	2.26	2.04	0.379	0.336	0.242	0.370	
Intro WU702M, σ_x	1280	58	10.1	1.03	1.03	0.981	0.905	0.256	0.254	0.180	0.236	10
Intro WU702M, σ_y	720		5.98	5.94	5.94	1.88	1.64	0.250	0.202	0.205	0.292	
AIR Tone QC-02, σ_x	1280	72	10.2	2.73	1.89	2.21	1.66	0.257	0.233	0.243	0.374	30
AIR Tone QC-02, σ_y	720		5.58	5.55	4.49	1.32	0.893	0.235	0.238	0.228	0.378	
Canyon CNS-CWC5, σ_x	640	52	5.79	1.06	0.916	0.776	0.748	0.261	0.202	0.182	0.290	30
Canyon CNS-CWC5, σ_y	480		2.84	2.78	2.72	1.117	1.105	0.239	0.212	0.185	0.328	
Canyon CNS-CWC5, σ_x	1280	65	5.76	0.978	0.881	0.793	0.693	0.199	0.162	0.130	0.357	10
Canyon CNS-CWC5, σ_y	720		2.82	2.76	2.72	1.02	0.989	0.196	0.117	0.129	0.518	

Параметры модели «камера-экран» (parameters of «camera-screen» model): $L_m = 3,4$ м, $W_m = 1,76$ м, $W_p = 1024$, $R = 28^\circ$

При $W_m = 1,76$ m, $W_p = 1024$ pix и $L_m = 3.4$ m будет $\sigma_{\text{гд}} \approx 0,506 \sigma_{\text{pix}}$.

Погрешности таблиц 1 и 2 имеют не абсолютный характер, а исключительно относительный (т.е. разные таблицы нельзя непосредственно сравнивать), т.к. их данные зависят от параметров испытательного макета (L_m , W_m , W_p , R) и геометрической точности установки компонент СТ (экран, проектор, камера), которые не будут идеальными при самосборке тренажера. Но можно использовать примерный коэффициент ≈ 2 (при сравнении значения таблицы 1 умножаются на 2 или значения таблицы 2 делятся на 2).

Анализ таблиц 1 и 2 показал, что:

1. ММ № 1 (линейная) своей погрешностью отражает уровень геометрических аберраций камер и ракурс (расположение камеры в пространстве относительно плоскости экрана).

2. Новые ММ № 6–9 показывают погрешность в 2–3 раза меньше, чем старые ММ № 2–5, но требуют для тарировки существенно большего количества точек (например, 63 против 35) и обязательного их расположения в том числе по периметру экрана.

3. Режим HD ($M = 1280$) незначительно (на 10–20 %) точнее, чем SD ($M = 640$), но быстродействие (KC) при этом может снижаться более чем в 2 раза.

4. Для камеры Defender C-090 новые ММ № 6–9 в реальных условиях дают меньшие погрешности, чем старые ММ № 2–5 в идеальных условиях.

5. ММ № 9, которая разработана для профессионального СТ «Ингибитор» с РТПр на базе перпендикулярных быстродействующих ПЗС-линеек с цилиндрическими линзами [21], не имеет преимуществ для РТПр на базе матричных камер.

6. «Дорогие» камеры (Canyon CNS-CWC5, 3,5 тыс. руб.) существенно (в ≈ 3 раза) качественнее «дешёвых» (DENN Photo, 300 руб.), остальные камеры по качеству и стоимости расположены между ними.

7. По оптимальному (минимальному) соотношению точность/быстродействие (σ/KC , без учёта стоимости камер) и с учётом технологичности тарировки для РТПр НУ в режиме SD с ММ № 5 или № 7–8 рекомендуются камеры Defender C-090 и iSlim 1300AF (в крайнем случае Intro WU702M), а для РТПр БУ

в режимах SD/HD с ММ № 7 или № 8 – камеры AIR Tone QC-02 и Canyon CNS-CWC5; ММ № 5 технологичнее для РТПр НУ, т.к. требует для ручной тарировки только $9(3 \times 3)$ – $12(4 \times 3)$ точек, когда как ММ № 7–8 требуют не менее $24(6 \times 4)$ – $35(7 \times 5)$ точек.

Для расширения возможностей РТПр НУ в конструкцию введён второй реперный ИК-светодиод (рисунок 1), что позволяет фиксировать свал $K_{\text{свал}}$ (наклон оружия в стороны более чем на 5° , что считается ошибкой прицеливания) и масштабировать мишенную обстановку по S_{xy} (в зависимости от расстояния до рабочего места) при перемещениях стрелка, что позволяет сделать ММ регистраторов точки прицеливания НУ инвариантной к наклону и расстоянию стрельбы (рабочему месту):

$$K_{\text{свал}} = \arctg\left(\frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1}\right) - \arctg\left(\frac{mY}{mX}\right); \quad (1)$$

$$S_{xy} = \sqrt{\frac{mX^2 + mY^2}{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}},$$

где (x_1, y_1) , (x_2, y_2) – текущие координаты двух реперных ИК-диодов, а $mX = (x_2 - x_1)$ и $mY = (y_2 - y_1)$ – эталонные расстояния между реперами (вычисляются при тарировке основной ММ); когда $S_{xy} \approx 1$ и $K_{\text{свал}} \approx 0$ – стрельба корректна, иначе, когда все же $K_{\text{свал}} < 5^\circ$ – пересчитываются координаты первого репера (левого, базового для ММ) – разворачиваются и масштабируются относительно координат линии прицеливания на кадре веб-камеры $X_{\text{ТПр}}$, $Y_{\text{ТПр}}$ (вычисляются при тарировке основной ММ путём «стрельбы» в первый реперный ИК-диод и считаются инвариантными от изменения расстояния стрельбы в разумных пределах $\pm 0,5$ м):

$$X_1 = (x_1 - X_{\text{ТПр}})\cos(-K_{\text{свал}})S_{xy} - (y_1 - Y_{\text{ТПр}})\sin(-K_{\text{свал}})S_{xy} + X_{\text{ТПр}}; \quad (2)$$

$$Y_1 = (x_1 - X_{\text{ТПр}})\sin(-K_{\text{свал}})S_{xy} - (y_1 - Y_{\text{ТПр}})\cos(-K_{\text{свал}})S_{xy} + Y_{\text{ТПр}},$$

где x_1, y_1 – координаты основного (левого) репера и X_1, Y_1 – инвариантные координаты репера.

Пристрелка РТПр БУ (необходимо для соответствия координат лазерного пятна и ТПр и зависит от типа прицела, рисунок 2) осуществляется по известным координатам мишени (X^*, Y^*), когда усредняются координаты лазерных пятен при многократной (N) «стрельбе» по ней, которые выдаёт РТПр (X_p, Y_p).

Далее производится программная коррекция координат от РТПр до ТПр (визуальной линии прицеливания) на ΔX и ΔY до $X_{\text{ТПр}}, Y_{\text{ТПр}}$ (рисунок 2) по:

$$\begin{aligned} X_{\text{ТПр}} &= X_p + \Delta X; Y_{\text{ТПр}} = Y_p + \Delta Y; \\ \Delta X &= X^* - (\sum_{p=1}^N X_p) / N; \Delta Y = Y^* - (\sum_{p=1}^N Y_p) / N. \end{aligned} \quad (3)$$

Повторная тарировка и пристрелка РТПр БУ требуются лишь при аппаратных изменениях конфигурации тренажёра благодаря инвариантности модели, а тарировка РТПр НУ может потребоваться регулярно из-за размещения камеры с проводами на ИО, а реперных ИК-диодов на дисплее, что подвержено случайным реконфигурациям.

Таким образом, в основе ММ РТПр лежат регрессионные уравнения, дополненные предварительным разворотом и масштабированием (1)–(2) для РТПр НУ (анализ и коррекция допустимого свала ИО и перемещения для инвариантности) и дополненные последующей пристрелкой (3) для РТПр БУ (смещение координат лазерного пятна до линии прицеливания).

Погрешности ММ РТПр учитываются в случайном рассеивании боеприпасов при моделировании внешней баллистики оружия путём вычитания дисперсий [12].

Заключение

Основные выводы по исследованию математических моделей регистраторов точки прицеливания и оптимизации алгоритмов работы:

– Стрелковый тренажёр с регистратором точки прицеливания начального уровня, который легко можно собрать самостоятельно (ноутбук, дисплей, веб-камера, ИК-диоды, макет оружия), хотя и не отличается высокой точностью (на исследованных моделях камер всё же $\sigma \ll 1,5$ т.д.) и технологичностью (требуется ручная ежедневная трудоёмкая тарировка математической модели), вполне способен привить основные навыки в хвате, удержании и прицеливании, что может способствовать его широкому применению (даже в домашних условиях).

– Стрелковый тренажёр с регистратором точки прицеливания базового уровня, сборка которого требует некоторых вложений средств (проектор, экран, ноутбук, HD-камера, лазерные

излучатели, макет оружия), отличается достаточной точностью (на исследованных моделях камер $\sigma \ll 0,5$ т.д.) и технологичностью (автоматическая тарировка математической модели и ручная однократная пристрелка), позволяет поддерживать почти все основные упражнения из Курса стрельб, что способствует его широкому применению (в учебных учреждениях широкого профиля).

– Проведенные исследования погрешностей математических моделей показали, что большинство общедоступных веб-камер полностью удовлетворяют требованиям использования в регистраторах точки прицеливания, но могут требовать индивидуальных настроек. Критерием годности камер является требование «погрешность регистратора точки прицеливания должна быть меньше баллистического рассеивания соответствующего оружия по параметру срединного отклонения», т. е. если $0,1$ т.д. это 1 см на 100 м и сравнивать будем $\sigma < B$ (B – табличное значение срединного отклонения, $\sigma = 1.483B$, сравниваем с запасом). У Пистолета Макарова $B = 4,5$ см на 25 м, т. е. $1,8$ т.д. и все камеры соответствуют, у автомата Калашникова модернизированного $B_v = 4–6$ см и $B_6 = 4–11$ см на 100 м, т. е. $\approx 0,6$ т.д. и все камеры соответствуют, у автомата Калашникова $B_v = 4–3$ см и $B_6 = 2–4$ см на 100 м, т. е. $\approx 0,4$ т.д. и многие камеры соответствуют, у пулемета Калашникова $B_v = 6$ см и $B_6 = 8$ см на 100 м, т. е. $\approx 0,6$ т.д. и все камеры соответствуют, у снайперской винтовки Драгунова $B_v = 1,3$ см и $B_6 = 1,4$ см на 100 м, т. е. $\approx 0,135$ т.д. и только некоторые камеры соответствуют (например, полупрофессиональная Canon CNS-CWC5).

Таким образом, показана актуальность разработки семейства модульных общедоступных стрелковых тренажёров различных уровней реализации с методиками компоновки и настройки для широкого внедрения самостоятельно собранных тренажёров из общедоступных компонентов (ноутбуков, камер, проекторов, лазерных излучателей, микроконтроллеров, макетов оружия и пр.) на базе предложенных и исследованных математических моделей регистратора точки прицеливания и алгоритмов тарировки. Также актуальны внедрение и исследование эффективных методик обучения на электронных стрелковых тренажёрах, особенно для специфичных применений.

Список использованных источников

1. Жемчужников А.В. Современное состояние и перспективы технического развития электронных стрелковых комплексов / А.В. Жемчужников // Альманах Пермского военного института войск национальной гвардии. 2021. – Т. 4. – № 4. – С. 116–119.
2. Коряковцев Д.А. Использование стрелковых тренажеров на занятиях по огневой подготовке в образовательных организациях МВД России / Д.А. Коряковцев, А.В. Плешков, В.И. Гурылев // Эпоха науки. – 2021. – № 25. – С. 96–98.
DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98
3. Першин А.Т. Использование стрелковых тренажеров «Рубин» в профессиональной подготовке сотрудников полиции / А.Т. Першин, В.А. Большакова, К.С. Гусевская // Символ науки: международный научный журнал. – 2021. – № 4. – С. 101–103.
4. Юрков М.Н. Применение современных стрелковых тренажеров при проведении занятий по огневой подготовке курсантов образовательных учреждений ФСИН России / М.Н. Юрков // Молодой ученый. – 2021. – № 5 (347). – С. 374–375.
5. Огрыза А.В. Практическая значимость использования электронных тренажеров на занятиях по огневой подготовке / А.В. Огрыза, С.А. Ульрих, А.Н. Таран // Евразийский юридический журнал. 2022. – № 1 (164). – С. 419–420.
6. Иньшин Ю.Ю. Стрелять хорошо и много инновационные подходы в обучении курсантов стрельбе с использованием боевого лазерного интерактивного высокоточного комплекса «БЛИК-ВТ» / Ю.Ю. Иньшин, А.В. Липаткин // Вестник военного образования. – 2022. – № 3 (36). – С. 28–33.
7. Моисеенко А.А. Применение инновационных технологий в процессе обучения огневой подготовке курсантов и слушателей образовательных организаций МВД России / А.А. Моисеенко, Д.М. Еноткина // Вестник Барнаульского юридического института МВД России. – 2023. – № 1 (44). – С. 343–346.
8. Горлов О.Ю. Методика разработки упражнений учебных стрельб из пистолета в типовых ситуациях служебной деятельности (на примере охранно-конвойных подразделений полиции) / О.Ю. Горлов // Полицейская деятельность. – 2023. – № 1. – С. 43–54. **DOI:** 10.7256/2454-0692.2023.1.38047
9. Булавин А.А. Внедрение игрового и соревновательного методов обучения в практические занятия по огневой подготовке со слушателями УИС / А.А. Булавин, Г.М. Ватылев // Вестник МПА ВПА (сборник научных трудов). – 2023. – № 3. – С. 132–137.
10. Горбунов Б.Д. Использование дополненной реальности для улучшения эффективности обучения

по огневой и тактической подготовке / Б.Д. Горбунов // Современные научные исследования и инновации. – 2023. – № 4 (144). – С. 55–64.

11. Митрофанов О.А. Разработка комплекса мер по актуализации и совершенствованию обучения сотрудников МЧС огневой подготовке / О.А. Митрофанов, С.В. Безнедельный, А.А. Воеводин // Современный ученый. – 2024. – № 1. – С. 206–211.

12. Егоров С.Ф. Семейство электронных стрелковых тренажеров «СТРИЖ»: уровни реализации и структура свободного программного обеспечения / С.Ф. Егоров // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14. – № 4. – С. 251–267.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

13. Егоров С.Ф. Регистратор точки прицеливания на базе видеокамеры / С.Ф. Егоров, В.С. Казаков, В.В. Коробейников // Интеллектуальные системы в производстве. – 2011. – № 1 (17). – С. 177–182.

14. Егоров С.Ф. Разработка методики испытания и исследование критериев отбора видеокамер для использования в стрелковых тренажерах / С.Ф. Егоров, В.С. Казаков, В.В. Коробейников, И.Г. Корнилов // Вестник ИжГТУ имени М.Т. Калашникова. – 2014. – № 3. – С. 118–122.

15. Jedrasiak K., Daniec K., Sobel D. The Concept of Development and Test Results of the Multimedia Shooting Detection System. Future Technologies Conference (FTC) San Francisco. 2016, pp. 1057–1064.

16. Bogatinov D., Lameski P., Trajkovic V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor. Multimedia Tools and Applications. 2017, vol. 76, no. 1, pp. 1403–1418. **DOI:** 10.1007/s11042-015-3118-z

17. Liu Yu., Wei P., Ke J. Algorithm Design For A Gun Simulator Based On Image Processing. International Conference on Optical Instruments and Technology. Optoelectronic Imaging and Processing Technology. 2015, vol. 9622, no. 96220O.

18. Borja-Benitez M.A., Tirado-Mendez J.A., Vasquez-Toledo L.A. Shooting impact detection system on a fixed target using a dynamic video frame reference. IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing. 2019. WOS: 000569520800039.

19. Kingkangwan K., Chalainanont N., Kumsap C. Gun Identification using Image Synchronization for DTI's Virtual Shooting Range. 2nd Asian Conference on Defence Technology (ACDT) Chiang Mai, THAILAND. 2016, pp. 32–35.

20. Лукин В.А. Обзор методов увеличения зоны регистрации видеокамеры стрелкового тренажера / В.А. Лукин, С.Ф. Егоров // Информационные технологии в науке, промышленности и образовании: сб. науч. тр. – Ижевск: Изд-во ИжГТУ, 2015. – С. 233–238.

21. Егоров С.Ф. Стрелковый тренажер «Ингибитор»: программное обеспечение регистратора

точки прицеливания / С.Ф. Егоров [и др.] // Интеллектуальные системы в производстве. – 2020. – Т. 18. – № 2. – С. 71–84.

DOI: 10.22213/2410-9304-2020-2-71-84

References

1. Zhemchuzhnikov AV. The current state and prospects for the technical development of electronic rifle complexes. Almanac of the Perm Military Institute of the National Guard. 2021;4(4):116-119. (In Russ.).

2. Koryakovtsev DA, Pleshkov AV, Gurylev VI. The use of shooting simulators in fire training classes in educational organizations of the MIA of Russia. Age of Science. 2021;25:96-98. (In Russ.).

DOI: 10.24412/2409-3203-2021-25-96-98

3. Pershin AT, Bol'shakova VA, Gusevskaya KS. The use of «Rubin» rifle simulators in the professional training of police officers. Symbol of science: international scientific journal. 2021;4:101-103. (In Russ.).

4. Yurkov MN. The use of modern shooting simulators when conducting fire training classes for cadets of educational institutions of the FPS of Russia. Young scientist. 2021;5(347):374-375. (In Russ.).

5. Ogryza AV, Ul'rikh SA, Taran AN. Practical significance of using electronic simulators in fire training classes. Eurasian Law Journal. 2022;1(164):419-420. (In Russ.).

6. In'shin YuYu, Lipatkin AV. Shoot well and many innovative approaches in training cadets in shooting using the combat laser interactive high-precision complex "BLIK-VT". Bulletin of Military Education. 2022;3(36):28-33. (In Russ.).

7. Moiseenko AA, Enotkina DM. The use of innovative technologies in the process of training in the fire training of cadets and students of educational organizations of the MIA of Russia. Bulletin of the Barnaul Law Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2023;1(44):343-346. (In Russ.).

8. Gorlov OYu. Methodology for the development of training exercises from a pistol in typical situations of official activity (using the example of security and escort police units). Policing. 2023;1(1):43-54. (In Russ.).

DOI: 10.7256/2454-0692.2023.1.38047

9. Bulavin AA, Vatilev GM. Implementation of game and competitive training methods in practical fire training sessions with UIS students. IPA VPA Bulletin (collection of scientific papers). 2023;3(3):132-137. (In Russ.).

10. Gorbunov BD. Use augmented reality to improve the effectiveness of fire and tactical training. Modern scientific research and innovation. 2023;4(4):55-64 (In Russ.).

11. Mitrofanov OA, Beznedel'nyi SV, Voevodin AA. Development of a set of measures to update and improve the training of employees of the Ministry of Emergency Situations in fire training. Modern scientist. 2024;1(1):206-211. (In Russ.).

12. Egorov SF. Family of electronic shooting simulators «STrIzh»: levels of implementation and structure of free software. Devices and methods of measurements. 2023;14(4):251-267. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-4-251-267

13. Egorov SF, Kazakov VS, Korobeynikov VV. Recorder of aiming point on the basis of video camera. Intelligent systems in production. 2011;1(1):177-182. (In Russ.).

14. Egorov SF, Korobeynikov VV, Kazakov VS, Kornilov IG. Development of test methodology and examination of criteria for selection of video cameras for use in shooting simulators. Bulletin of ISTU named after M.T. Kalashnikov. 2014;3(3):118-122. (In Russ.).

15. Jedrasiak K, Daniec K, Sobel D. The Concept of Development and Test Results of the Mul-timedia Shooting Detection System. Future Technologies Conference (FTC) San Francisco. 2016:1057-1064 p.

16. Bogatinov D, Lameski P, Trajkovic V. Firearms training simulator based on low cost motion tracking sensor. Multumedia Tools and Applications. 2017;76(1):1403-1418. **DOI:** 10.1007/s11042-015-3118-z

17. Liu Yu, Wei P, Ke J. Algorithm Design For A Gun Simulator Based On Image Processing. International Conference on Optical Instruments and Technology. Optoelectronic Imaging and Processing Technology. 2015:9622(962200).

18. Borja-Benitez MA, Tirado-Mendez JA, Vasquez-Toledo LA. Shooting impact detection system on a fixed target using a dynamic video frame reference. IEEE International Autumn Meeting on Power Electronics and Computing. 2019. WOS:000569520800039

19. Kingkangwan K, Chalainanont N, Kumsap C. Gun Identification using Image Synchroniza-tion for DTI's Virtual Shooting Range. 2nd Asian Conference on Defence Technology (ACDT) Chiang Mai, THAILAND. 2016:32-35 pp.

20. Lukin VA, Egorov SF. Overview of methods for enlarging the recording area of the shooting simulator video camera. Information technology in science, industry and education (Izhevsk). 2015:233-238 p. (In Russ.).

21. Egorov SF, Kornilov IG, Shelkovnikov YuK, Kiznertsev SR, Korobeinikova IV, Markov EM. Shooting simulator «Inhibitor»: targeting point recorder software. Intelligent systems in production. 2020;18(2):71-84. (In Russ.). **DOI:** 10.22213/2410-9304-2020-2-71-84

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток электрических машин на параметры тока холостого хода

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев, В.А. Лычковский

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

Поступила 15.10.2024

Принята к печати 16.11.2024

Методы диагностики, которые поменяются в настоящее время для контроля за состоянием обмоток электрических машин, не позволяют выявлять дефектообразование в них на ранних стадиях развития. А особенно эта проблема актуальна для оборудования, находящегося непосредственно в режиме его эксплуатации. Целью работы являлось рассмотрение и оценка возможности метода, который на основе анализа параметров и характеристик тока холостого хода позволит характеризовать состояния токоведущих частей обмоток диагностируемых электрических машин. В работе представлены результаты экспериментальных исследований закономерностей влияния уровня дефектного сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электрических машин на параметры тока холостого хода, в том числе на особенности изменения параметров его спектральных составляющих. Так же в статье определены аналитические зависимости полученных характеристик влияния и анализируются факторы, определяющие погрешности измерения разрабатываемым методом. Представленный метод на основе анализа параметров спектральных составляющих тока холостого хода предназначен для измерения сопротивления межвитковой изоляции токоведущих частей в обмотках электрических машин в условиях их функционирования, с возможностью фиксирования начала дефектообразования, что позволит в режиме реального времени оценивать его работоспособное, предотказное и исправное состояние.

Ключевые слова: диагностика обмоток электрических машин, межвитковое сопротивление изоляции, ток холостого хода, спектральный состав

Адрес для переписки:

Исаев А.В.

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

Address for correspondence:

Isaev A.V.

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

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев,
В.А. Лычковский.

Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток
электрических машин на параметры тока холостого хода.

Приборы и методы измерений.

2024. Т. 15. № 4. С. 307–315.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

For citation:

Isaev AV, Suhodolov YuV, Sizikov SV, Lomtev AA,
Lychkovsky VA.

Influence of the Level of Defective Insulation Resistance
of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current.

Devices and Methods of Measurements.

2024;15(4):307–315. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Influence of the Level of Defective Insulation Resistance of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current

A.V. Isaev, Yu.V. Suhodolov, S.V. Sizikov, A.A. Lomtev, V.A. Lychkovsky

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

Received 15.10.2024

Accepted for publication 16.11.2024

Abstract

Diagnostic methods that will change at present for monitoring the condition of windings of electric machines do not allow to detect defect formation in them at early stages of development. And this problem is especially relevant for equipment that is directly in its operating mode. The purpose of the work was to consider and evaluate the possibility of a method that, based on the analysis of the parameters and characteristics of the no-load current, will allow to characterize the state of the current-carrying parts of the windings of diagnosed electric machines. The paper presents the results of experimental studies of the patterns of influence of the level of defective resistance of interturn insulation in the windings of electric machines on the parameters of the no-load current, including the features of changes in the parameters of its spectral components. The article also defines analytical dependencies of the obtained characteristics of influence and analyzes the factors that determine the measurement errors of the developed method. The presented method based on the analysis of the parameters of the spectral components of the no-load current is intended for measuring the resistance of the interturn insulation of current-carrying parts in the windings of electrical machines under their operating conditions, with the possibility of recording the onset of defect formation, which will allow real-time assessment of its operational, pre-failure and serviceable state.

Keywords: diagnostics of windings of electric machines, interturn insulation resistance, no-load current, spectral composition

Адрес для переписки:

Исаев А.В.
Белорусский национальный технический университет,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: isaevav@bntu.by

Address for correspondence:

Isaev A.V.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: isaevav@bntu.by

Для цитирования:

А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Ломтев,
В.А. Лычковский.
Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток
электрических машин на параметры тока холостого хода.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 307–315.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

For citation:

Isaev AV, Suhodolov YuV, Sizikov SV, Lomtev AA,
Lychkovsky VA.
Influence of the Level of Defective Insulation Resistance
of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):307–315. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-307-315

Введение

Одной из наиболее существенных проблем современной энергетики, а также приборо- и станкостроения, является разработка приборов и методов диагностики состояния электрических машин. При этом увеличение эксплуатационных требований к такому оборудованию только усугубляет существующую проблему. И весь комплекс методов и приборов как используемых в промышленности, так и существующих в виде экспериментальных и научных образцов, очень ограниченно позволяет проводить качественную, и самое главное своевременную диагностику электрических машин, которые позволяли бы зафиксировать начало дефектообразование в них на максимально ранних стадиях развития. И, тем более, эти методы малопригодны для проведения диагностических процедур оборудования, находящегося непосредственно в режиме эксплуатации. Поэтому одной из задач современного приборостроения является разработка приборов и методов или развития уже существующих для возможности их применения для диагностики состояния электрических машин, в том числе и их обмоток, как наиболее слабого места такого оборудования, и оценить их возможность для использования как в качестве инструментов для прогнозирования ресурсов использования диагностируемого оборудования, так и возможности применения этих методов непосредственно в рабочих циклах эксплуатации.

Согласно статистики наиболее слабым и уязвимым местом современных электрических машин является изоляция их токоведущих частей – фазных обмоток [1–2]. Поэтому наибольшее внимание при диагностике такого оборудования уделяется состоянию именно данной части. И большинство методов направлено на оценку состояния именно этой части. В настоящее время все разработанные методы оценки состояния изоляции токоведущих частей можно разделить на три независимые группы: измерение сопротивления изоляции между обмотками электрической машины и его корпусом, измерение сопротивления изоляции между фазными обмотками и измерение межвиткового сопротивления изоляции в фазной обмотке.

Необходимо отметить, что измерения по первым двум группам широко используются в промышленности и диагностических лабораториях [3–6]. Эти методы основаны на измерении общего тока, протекающего в изоляционном материале, который представляет собой сумму трёх компонентов: ток зарядки ёмкости, ток поглощения и ток утечки (или ток проводимости) [4]. Эти составляющие достаточно просто измерить. Однако данные методы позволяют оценить состояние изоляции обмоток на конечных стадиях её разрушения, когда имеет место конечное сопротивление двух, электрически не связанных, частей диагностируемого оборудования (изоляции двух или трёх обмоток, корпуса), т. е. когда при контроле и измерениях можно на невысоком уровне оценить только работоспособность уже неисправного диагностируемого оборудования. И данные методы в большей степени направлены на безопасность человека – что, конечно, важно, но минимально характеризует состояние самого оборудования.

Поэтому поставленную задачу можно решить только путём проведения измерений по третьей группе. При этом существующие методы контроля состояния фазных обмоток электрических машин обладают самым разнообразным набором признаков, которые в свою очередь позволяют систематизировать их применение [6–10]. Однако одними из самых активно развивающихся на сегодняшний день методов являются методы, определяющие состояние электрических машин по анализу тока или напряжения холостого хода [11–12]¹.

Но даже с учётом высокой достоверности результатов диагностики этими методами они больше применимы в диагностических лабораториях при исследовании и малопригодны в условиях эксплуатации оборудования на производстве. Потенциал у этих методов огромный и в настоящее время не исчерпан для решения поставленной нами задачи.

Целью данной работы являлась оценка возможности определения текущего состояния токоведущих частей обмоток трехфазных

¹ ГОСТ ISO 20958-2015: Контроль состояния и диагностика машин. Сигнатурный анализ электрических сигналов трехфазного асинхронного двигателя: введ. 11.01.16. – Москва: Стандартинформ, 2016. – 24 с.

электрических машин со всыпной обмоткой на основе анализа параметров и характеристик тока холостого хода.

Основная часть

Проведённые в работе [13] исследования указывают, что представленные там временные зависимости тока холостого хода показывают на зависимость уровня дефектного сопротивления между витками в обмотке диагностируемого электродвигателя на изменения сдвига фазы первой спектральной составляющей относительно фаз остальных, высших спектральных составляющих. Проведя дополнительный ряд исследований и выполнив анализ представленных зависимостей тока холостого хода на изменения параметров его отдельных спектральных составляющих, можно сделать вывод, что основными информативными параметрами могут являться уровень (т. е. суммарная амплитуда) высших спектральных составляющих (т. е. результирующей кривой тока холостого хода, полученной путём сложения высших спектральных составляющих) и изменение (сдвиг) фазы первой спектральной составляющей относительно входного напряжения и (или) суммы высших спектральных составляющих (рисунок 1). Однако изменения амплитуды при витковом замыкании характеризуются невысокой точностью измерений при стандартных условиях. Это связано как с нестабильностью параметров исходного сигнала (нестабильность сетевого напряжения по амплитуде, наличие высших гармоник и др.), так и с сильным влиянием на параметры самого измерительного сигнала помех от диагностируемого мощ-

ного электромагнитного оборудования. Поэтому, в качестве наиболее оптимальных измерительных параметров были выбраны временные зависимости.

Дальнейшая обработка результатов и анализ полученных зависимостей кривых тока холостого хода показали, что основным параметром, наиболее изменяющимся при витковым замыкании, является взаимное расположение на временной оси точек перехода через ноль первой спектральной составляющей (кривая 3, рисунки 1а и 1b) и точек перехода через ноль результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (рисунки 1а и 1b, кривая 4). При этом наиболее целесообразно использовать для анализа временной интервал между переходом первой спектральной составляющей из положительной в отрицательную область, обозначенный на рисунках 1а и 1b точкой t_{01} , и следующим после зафиксированной первой характерной точки переходом через ноль из отрицательной в положительную результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (т. е. ближайшая к $t = T/2$), обозначенным на рисунках 1а и 1b точкой $t_{0\Sigma 2}$.

Исследования, проведённые с подобными электродвигателями мощностью от 150 Вт до 5,5 кВт не зависимо от количества пар обмоток, показали аналогичные результаты.

В результате проведения комплекса измерений, оценивающих влияние уровня дефектного межвиткового сопротивления на время между характерными точками кривых спектральных составляющих тока холостого хода (рисунок 2), получен набор данных (таблица 1).

Таблица 1/ Table 1

Изменение промежутка времени между характерными точками кривых спектральных составляющих тока холостого хода от уровня сопротивления межвитковой изоляции в обмотках электродвигателя

Change in the time interval between characteristic points of the curves of the spectral components of the no-load current from the level of resistance of the interturn insulation in the windings of the electric motor

Исследуемый электродвигатель/ The electric motor under study	Дефектное межвитковое сопротивление / Defective interturn resistance, Ом											
	1	10	25	50	100	150	250	500	1000	5000	7500	10000
АИР63В4У3/ АИР63V4U3	3.42	2.59	1.992	1.52	1.125	0.905	0.721	0.680	0.649	0.641	0.641	0.641
АО42-6/ AO42-6	3.91	2.69	1.92	1.32	0.79	0.605	0.425	0.42	0.42	0.42	0.42	0.42

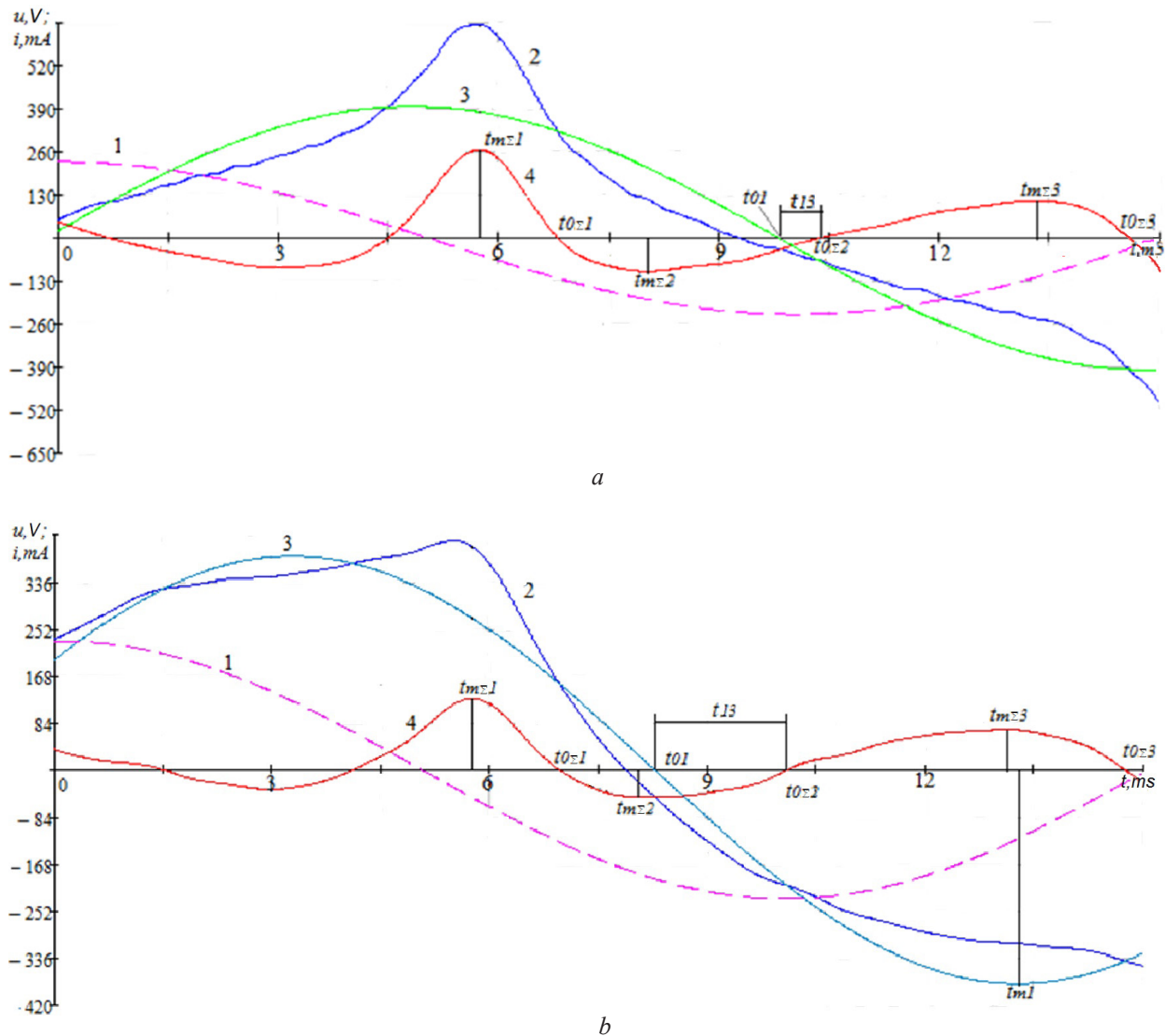


Рисунок 1 – Спектральные составляющие тока холостого хода обмотки двигателя АИР63В4У3: *a* – кривые тока холостого хода при исправном состоянии; *b* – кривые тока холостого хода при межвитковом замыкании через сопротивление 10 Ом. 1 – кривая входного синусоидального напряжения; 2 – кривая тока холостого хода фазной обмотки; 3 – кривая первой спектральной составляющей тока холостого хода; 4 – результирующая кривая тока холостого хода, полученная путём сложения высших спектральных составляющих; $t_{0\Sigma 1}$, $t_{0\Sigma 2}$ и $t_{0\Sigma 3}$ – точки перехода исследуемого сигнала через ноль в пределах одного периода; $t_{m\Sigma 1}$, $t_{m\Sigma 2}$ и $t_{m\Sigma 3}$ – точки, соответствующие максимумам кривой тока в пределах одного периода

Figure 1 – Spectral components of the no-load current of the winding of the AIR63V4U3 motor: *a* – no-load current curves in good condition; *b* – no-load current curves with an interturn short circuit through a 10 Ohm resistance. 1 – input sinusoidal voltage curve; 2 – no-load current curve of the phase winding; 3 – curve of the first spectral component of the no-load current; 4 – resulting curve of the no-load current obtained by adding up the higher spectral components; $t_{0\Sigma 1}$, $t_{0\Sigma 2}$ and $t_{0\Sigma 3}$ – points of transition of the studied signal through zero within one period; $t_{m\Sigma 1}$, $t_{m\Sigma 2}$ and $t_{m\Sigma 3}$ – points corresponding to the maxima of the current curve within one period

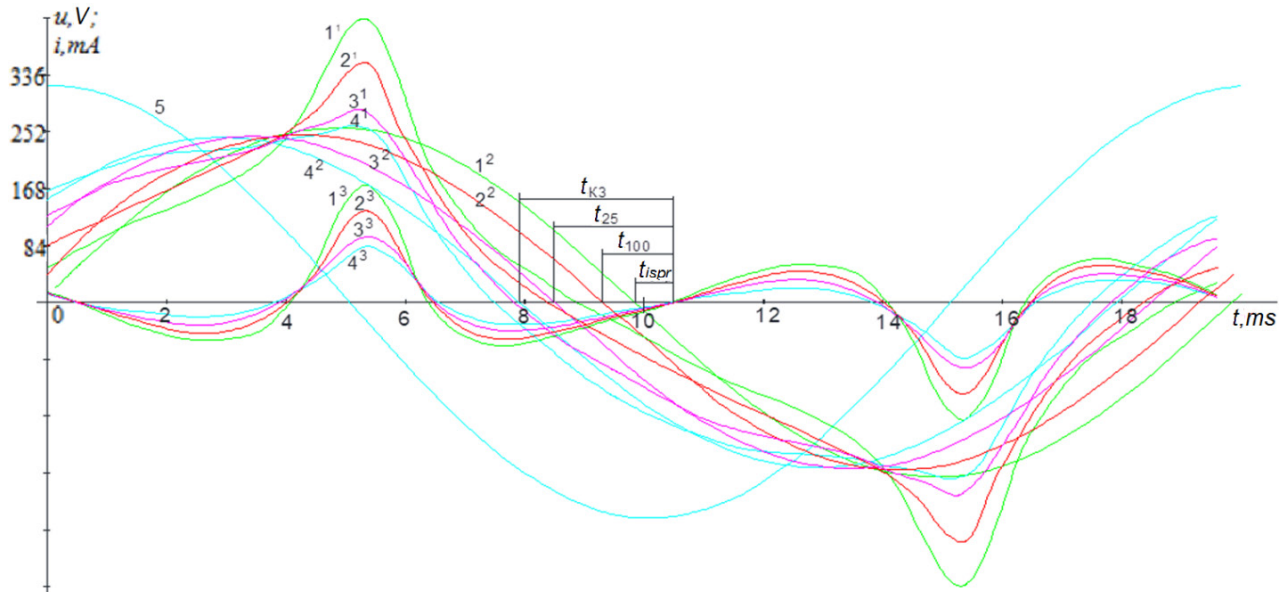


Рисунок 2 – Изменение параметров спектральных составляющих тока холостого хода (XX) от уровня сопротивления межвитковой изоляции в обмотках двигателя AIR63B4U3. 1 – кривые тока XX исправной обмотки; 2 – кривые тока XX при межвитковом сопротивлении 100 Ом; 3 – кривые тока XX при межвитковом сопротивлении 25 Ом; 4 – кривые тока XX с короткозамкнутыми витками; 5 – кривая входного синусоидального напряжения; x^1 – суммарная кривая тока XX; x^2 – кривая первой спектральной составляющей; x^3 – суммарная кривая высших спектральных составляющих

Figure 2 – Change in the parameters of the spectral components of the no-load current (NLC) from the level of interturn insulation resistance in the windings of the AIR63B4U3 motor. 1 – curves of the NC current of the serviceable winding; 2 – curves of the NC current with an interturn resistance of 100 Ohm; 3 – curves of the NC current with an interturn resistance of 25 Ohm; 4 – curves of the NC current with short-circuited turns; 5 – curve of the input sinusoidal voltage; x^1 – total curve of the NC current; x^2 – curve of the first spectral component; x^3 – total curve of higher spectral components

Результаты исследования для рассматриваемых двигателей позволили с помощью программного обеспечения MathCad сформировать аналитическую зависимость (1), которая характеризует связь интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и кривой, которая получена путём сложения высших спектральных составляющих, с величиной сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке, а также получить коэффициенты полинома для каждого из исследуемых электрических двигателей (таблица 2). Это в свою очередь позволило построить кривые зависимости времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих, от величины сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке.

$$R(t_{\Delta\varphi}) = a \cdot t_{\Delta\varphi}^0 + b \cdot t_{\Delta\varphi}^{1/2} + c \cdot t_{\Delta\varphi}^1 + d \cdot t_{\Delta\varphi}^{3/2} + e \cdot t_{\Delta\varphi}^2 + f \cdot t_{\Delta\varphi}^{5/2}, \quad (1)$$

где a, b, c, d, e, f – значения коэффициентов при $t_{\Delta\varphi}$ в полиноме; $t_{\Delta\varphi}$ – время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих.

В соответствии с полученными коэффициентами выполнено построение промоделированных зависимостей интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих от величины межвиткового сопротивления в обмотках (рисунок 3).

Таблица 2 / Table 2

Коэффициенты математической зависимости времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих от величины сопротивления межвитковой изоляции в неисправной обмотке для исследуемых двигателей

Coefficients of the mathematical dependence of the time between zero-crossings of the first spectral component and the resulting curve obtained by adding the higher spectral components from the value of the interturn insulation resistance in the faulty winding of the motors under study

Коэффициент / Coefficient	АИР63В4У3 / AIR63V4U3	АО42-6 / AO42-6
<i>a</i>	3.9180	4.6200
<i>b</i>	-0.5343	-0.7745
<i>c</i>	0.0347	0.0561
<i>d</i>	$-1.1623 \cdot 10^{-3}$	$-2.0896 \cdot 10^{-3}$
<i>e</i>	$2.1755 \cdot 10^{-5}$	$4.3500 \cdot 10^{-5}$
<i>f</i>	$-2.3021 \cdot 10^{-7}$	$-5.1125 \cdot 10^{-7}$

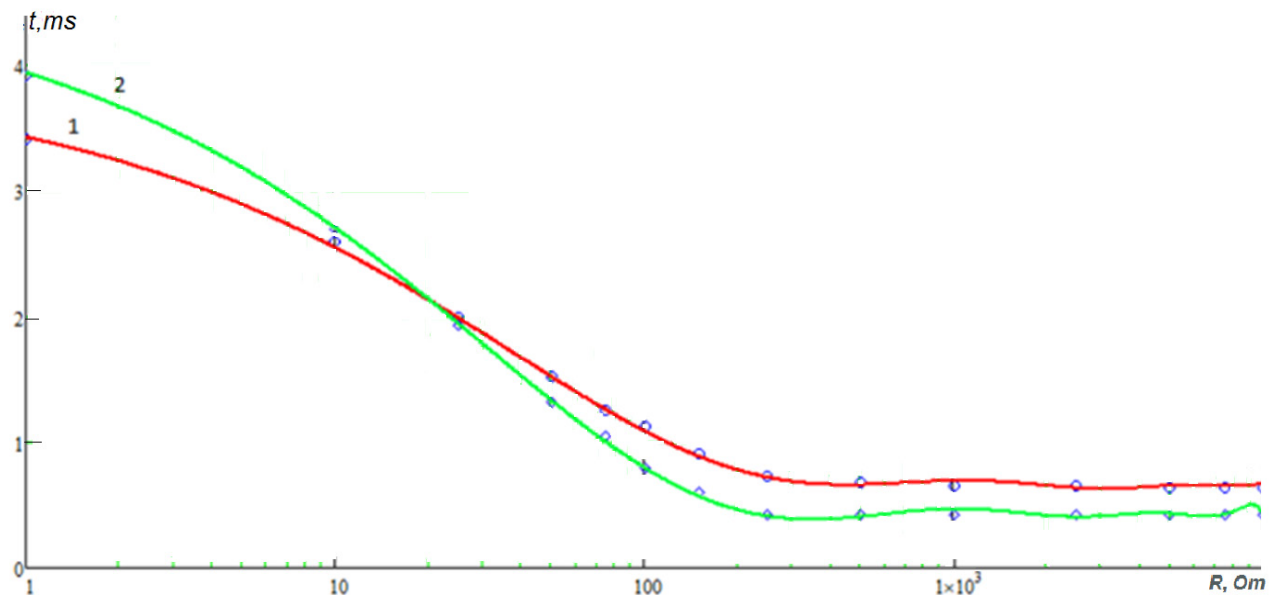


Рисунок 3 – Влияние величины сопротивления межвитковой изоляции в дефектной обмотке исследуемых двигателей на время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих; 1 – электродвигатель АИР63В4У3; 2 – электродвигатель АО42-6; ◇, ○ – экспериментальные значения

Figure 3 – The influence of the magnitude of the interturn insulation resistance in the defective winding of the studied motors on the time between zero-crossings of the first spectral component of the no-load current and the resulting curve obtained by adding the higher spectral components; 1 – AIR63V4U3 electric motor; 2 – AO42-6 electric motor; ◇, ○ – experimental values

Анализ полученных кривых показал, что в области сопротивлений от 100 до 300 Ом (в зависимости от мощности диагностируемых электрических машин), характеристики имеют зависимость, которая может быть использована для оценки состояния обмоток диагностируемых

электрических машин. При этом относительное отклонение полученных аналитических зависимостей относительно экспериментальных данных для исследуемых двигателей в соответствии с формулой (2) представлены в таблице 3.

Таблица 3 / Table 3

Относительное отклонение полученных математических зависимостей от экспериментальных данных
Relative deviation of the obtained mathematical dependencies from the experimental data

Дефектное межвитковое сопротивление Defective interturn resistance, Ом	Относительное отклонение / Relative deviation, %	
	АИР63В4У3 / AIR63V4U3	АО42-6 / AO42-6
1	-0.510007	-0.74194
10	1.884717	-0.349395
25	0.463705	-1.036666
50	0.20594	-0.67322
75	-0.300573	4.937316
100	3.692751	-0.363588
150	2.56792	4.626284
250	0.829355	4.577137
500	3.460188	4.234727
1000	-6.120721	-6.248361
2500	2.378435	4.620595

$$\Delta t_{\Delta\varphi} = \frac{(t_{\Delta\varphi_{и}} - t_{\Delta\varphi_{м}})}{t_{\Delta\varphi_{и}}}, \quad (2)$$

где $t_{\Delta\varphi_{и}}$ – измеренное время между переходами через ноль первой спектральной составляющей тока холостого хода и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих; $t_{\Delta\varphi_{м}}$ – значение времени, полученное из математической зависимости.

Из полученных результатов можно сделать вывод, что полученные математические зависимости могут иметь отклонение до 15 % относительно экспериментальных данных, однако в области неисправных обмоток (сопротивление до 1 кОм) относительное отклонение не превышает 5 %.

Дополнительные исследования показали, что на изменение интервала времени между переходами через ноль первой спектральной составляющей и результирующей кривой, полученной путём сложения высших спектральных составляющих (а именно изменения начальной фазы первой спектральной составляющей) влияет только величина межвитковых сопротивлений в обмотках, при этом влияние местоположения дефектов в обмотках, а также количества витков, задействованных в месте дефекта, малозначительно.

Заключение

Разработан метод, позволяющий эффективно проводить диагностику состояния обмоток электрических машин, в том числе в режиме реального времени при их эксплуатации. Метод представляет собой косвенное измерение сопротивления изоляции токоведущих частей электрических машин, основанный на анализе изменения параметров отдельных спектральных составляющих тока холостого хода, что позволяет фиксировать дефектообразование в них на максимально ранних стадиях развития, а, следовательно, оценивать в режиме реального времени его работоспособное, предотказное и исправное состояния.

Список использованных источников

1. Дудкин, А.Н. Обеспечение качества и надёжности электрических машин / А.Н. Дудкин, А.П. Матялис, О.П. Муравлев // Известия Томского политехнического университета. 2000. – Т. 303. – № 1. – С. 266-269
2. Review, J.L. Failures of Electrical Machines – Review, J.L., Pavel T. Department of Materials and Technology, Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia Pilsen, Czech republic 2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE).
3. Измерение сопротивления изоляции: руководство [Электронный ресурс]. – 1997 – 2024

"СвязьКомплект" (ООО "КаталогСервис", ОГРН: 1097746354474) – Режим доступа: <https://skomplekt.com/izmerenie-soprotivleniia-izoliatcii/>

4. Adam Decner, Marcin Baranski, Tomasz Jarek, Sebastian Berhausen Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings Energies. – 2022. – Vol. 15, no. 8465. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/22/8465>

5. "A Stitch In Time" The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, 2006. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Guide-to-Insulation-Testing.pdf>

6. Грунтович Н.В. Комплексное техническое диагностирование электротехнического оборудования – основа системы ремонтов «по состоянию» / Н.В. Грунтович, Н.И. Грачек // Горн. журн. – 2003. – № 7. – С. 67–69.

7. Исмагилов Ф.Р. Обзор современных методов и средств оперативной диагностики электро-механических преобразователей энергии / Ф.Р. Исмагилов, И.Х. Хайруллин, Д.Ю. Пашали, О.А. Бойкова // Уфа: Вестник УГАТУ. – 2010. – Т. 14, № 4 (39). – С. 73–79.

8. ISO 13379 (all parts). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques. – 2012. – P. 33.

9. Новейшие системы диагностики состояния электродвигателей, 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://kart.od.ua/Sistema_diagnostiki.html

10. Измерение сопротивления изоляции электрооборудования: нормы и рекомендации, 2011. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://test-energy.ru/soprotivlenie-izolyacii-ehlektrooborudovaniya-normy-i-rekomendacii-po-izmereniyu/>

11. Cruz S.M.A. Stator winding fault diagnosis in threephase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach / S.M.A. Cruz, A.J.M. Cardoso // IEEE Trans. Ind. A. – 2001. – Vol. 37. – P. 1227–1233.

12. Cardoso A.J.M. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating threephase induction motors by Paris's vector approach / A.J.M. Cardoso, E.S. Saraiva // IEEE Trans. Ind. A. – 1993. – Vol. 29. – P. 897–901.

13. Исаев А.В. Определение дефектов обмоток электрических машин по параметрам спектра тока холостого хода / А.В. Исаев, Ю.В. Суходолов, С.В. Сизиков, А.А. Шейников // Метрология и приборостроение. – 2022. – № 1. – С. 17–23.

References

1. Dudkin AN, Matyalis AP, Muravlev OP. Ensuring the quality and reliability of electrical machines. Bulletin of Tomsk Polytechnic University, 2000; 303(1):266-269.

2. Review JL, Pavel T. Failures of Electrical Machines. Department of Materials and Technology, Faculty of Electrical Engineering University of West Bohemia Pilsen, Czech republic 2022 8th International Youth Conference on Energy (IYCE).

3. *Izmereniye soprotivleniya izolyatsii: rukovodstvo* [Insulation resistance measurement: manual] [Electronic resource]. 1997–2024 "SvyazKomplekt" (ООО "КаталогСервис", ОГРН: 1097746354474) – Access mode: <https://skomplekt.com/izmerenie-soprotivleniia-izoliatcii/>

4. Adam Decner, Marcin Baranski, Tomasz Jarek, Sebastian Berhausen Methods of Diagnosing the Insulation of Electric Machines Windings Energies. 2022;15(8465).

5. "A Stitch In Time" The Complete Guide to Electrical Insulation Testing, 2006. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.instrumart.com/assets/Megger-Guide-to-Insulation-Testing.pdf>

6. Gruntovich NV, Grachek NI. Comprehensive technical diagnostics of electrical equipment – the basis of the "condition-based" repair system. Mining journal. 2003;(7):67-69.(In Russ.).

7. Ismagilov FR [et al.]. Review of modern methods and means of operational diagnostics of electromechanical energy converters. Ufa: Bulletin of Ufa State Agrarian University, 2010;14;4(39):73-79. (In Russ.).

8. ISO 13379 (all parts). Condition monitoring and diagnostics of machines – Data interpretation and diagnostics techniques. 2012. 33 p.

9. *Noveyshiye sistemy diagnostiki sostoyaniya elektrodvigatelyey* [The latest systems for diagnosing the condition of electric motors] [Electronic resource]. – Electronic data. – M., [2011]. – Access mode: http://kart.od.ua/Sistema_diagnostiki.html.

10. *Izmereniye soprotivleniya izolyatsii elektrooborudovaniya: normy i rekomendatsii* [Measurement of insulation resistance of electrical equipment: standards and recommendations] [Electronic resource]. 2011. Electronic data. Access mode: <https://test-energy.ru/soprotivlenie-izolyacii-ehlektrooborudovaniya-normy-i-rekomendacii-po-izmereniyu/>

11. Cruz S.M.A, Cardoso A.J.M. Stator winding fault diagnosis in threephase synchronous and asynchronous motors by the extended Park's vector approach. IEEE Trans. Ind. A. 2001;37:1227-1233.

12. Cardoso A.J.M, Saraiva ES. Computer-aided detection of airgap eccentricity in operating threephase induction motors by Paris's vector approach. IEEE Trans. Ind. A. 1993;29:897-901.

13. Isaev AV. [et al.]. Determination of defects in windings of electrical machines by parameters of the no-load current spectrum. Metrology and instrument making. 2022;1:17-23. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force Microscopy Method

V.A. Lapitskaya^{1,2}, S.A. Chizhik^{1,2}, E.V. Lutsenko³, J.A. Solovjov⁴, A.A. Nasevich², K.S. Liutsko², T.V. Petlitskaya⁴, V.B. Makarevich⁵, Guangbin Yu⁶

¹A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of National Academy of Sciences of Belarus of Belarus, P. Brovki str, 15, Minsk 220072, Belarus

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

³B.I. Stepanov Institute of Physics of National Academy of Sciences of Belarus, Nezavisimosti Ave., 68-2, Minsk 220072, Belarus

⁴JSC "INTEGRAL" — "INTEGRAL" Holding Managing Company, Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus

⁵Belarusian State Institute of Metrology, Starovilensky tract, 93, Minsk 220053, Belarus

⁶School of Mechatronics Engineering, Harbin Institute of Technology, Xida str., 92, Nangang, Harbin 150001, China

Received 04.10.2024

Accepted for publication 20.11.2024

Abstract

The aim of the work was to study the structure and defects of a channel transistor with two types of conductivity (p and n), the submicrostructures based on nickel silicide films, and the seed layers based on AlN using atomic force microscopy (including conductive or electric force method, which allow one to study the electrical conductivity of the material surface). The influence of the manufacturing technology and local oxide formation on the relief and structure of the p - and n -type transistor was established. The local oxide is necessary for the electrical isolation of the transistors from each other. The surface roughness is higher on the surface and outside the p -channel transistor than on the n -channel transistor. When examining the AlN layers both in the topography mode and in the adhesion mode, defects in the form of pores were revealed, which are places of electrical breakdowns, which worsens the properties of the such heterostructures. With an increase in the temperature and time of nitriding, the defects of the AlN layers significantly decrease. The conductive areas on the surface of the nickel silicides after rapid thermal treatment at 300 and 400 °C using electric force microscopy were detected, which shows incomplete formation of nickel silicide during the treatment. Thus, the efficiency of the atomic force microscopy method using a specialized conductive technique as a method for monitoring microelectronic components was demonstrated.

Keywords: control, transistor, microstructures, roughness, conductivity

Адрес для переписки:

Лапцкая В.А.
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

V.A. Lapitskaya, S.A. Chizhik, E.V. Lutsenko, J.A. Solovjov, A.A. Nasevich, K.S. Liutsko, T.V. Petlitskaya, V.B. Makarevich, Guangbin Yu.
Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force Microscopy Method.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 316–322.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

For citation:

Lapitskaya VA, Chizhik SA, Lutsenko EV, Solovjov JA, Nasevich AA, Liutsko KS, Petlitskaya TV, Makarevich VB, Guangbin Yu.
Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force Microscopy Method.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):316–322.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

Контроль микрорельефа поверхности кристаллов интегральных схем, дефектности гетеро- и субмикроструктур методом атомно-силовой микроскопии

В.А. Лапицкая^{1,2}, С.А. Чижик^{1,2}, Е.В. Луценко³, Я.А. Соловьев⁴, А.А. Насевич²,
К.С. Люцко², Т.В. Петлицкая⁴, В.Б. Макаревич⁵, Ю. Гуанбин⁶

¹Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь

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

³Институт физики имени Б.И. Степанова НАН Беларуси,
пр. Независимости, 68-2, г. Минск 220072, Беларусь

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

⁵Белорусский государственный институт метрологии,
Старовиленский тракт, 93, г. Минск 220053, Беларусь

⁶Харбинский технологический институт,
ул. Сида, 92, г. Нанган, Харбин 150001, Китай

Поступила 04.10.2024

Принята к печати 20.11.2024

Целью работы было исследование структуры и дефектности канального транзистора с двумя типами проводимости (p и n), субмикроструктур на основе плёнок силицидов никеля, зародышевых слоёв на основе AlN с использованием атомно-силовой микроскопии (в том числе и проводящей или электросиловой методики, которая позволяет исследовать электрическую проводимость поверхности исследуемого материала) проведены. Установлено влияние технологии изготовления и формирования локального окисла на рельеф и структуру транзистора p - и n -типа. Локальный окисел необходим для электрической изоляции транзисторов друг от друга. Шероховатость поверхности выше на поверхности и вне p -канального транзистора, чем на n -канальном транзисторе. При исследовании слоёв AlN как в режиме топографии, так и в режиме адгезии выявлены дефекты в виде пор, которые являются местами электрических пробоев, что ухудшает свойства таких гетероструктур. При росте температуры и времени азотирования дефектность слоёв AlN существенно снижается. С применением электросиловой микроскопии установлены проводящие участки на поверхности силицидов никеля после быстрой термической обработки при 300 и 400 °С, что показывает неполное образование силицида никеля в процессе обработки. Таким образом показана эффективность метода атомно-силовой микроскопии с применением специализированной проводящей методики как метода контроля компонентов микроэлектроники.

Ключевые слова: контроль, транзистор, микроструктуры, шероховатость, проводимость

Адрес для переписки:

Лапицкая В.А.
Институт тепло- и массообмена имени А.В. Лыкова
НАН Беларуси,
ул. П. Бровки, 15, г. Минск 220072, Беларусь
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Address for correspondence:

Lapitskaya V.A.
A.V. Luikov Heat and Mass Transfer Institute of NAS of Belarus,
P. Brovki str., 15, Minsk 220072, Belarus
e-mail: vasilinka.92@mail.ru

Для цитирования:

V.A. Lapitskaya, S.A. Chizhik, E.V. Lutsenko, J.A. Solovjov,
A.A. Nasevich, K.S. Liutsko, T.V. Petlitskaya, V.B. Makarevich,
Guangbin Yu.
Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief
and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force
Microscopy Method.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 316–322.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

For citation:

Lapitskaya VA, Chizhik SA, Lutsenko EV, Solovjov JA,
Nasevich AA, Liutsko KS, Petlitskaya TV, Makarevich VB,
Guangbin Yu.
Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief
and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force
Microscopy Method.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):316–322.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-316-322

Introduction

In the last decade, the demand for microelectronics and sensor products for various applications has been growing rapidly. An integrated circuit (IC) is one of the most important elements of the large electronic systems. In case of deterioration in the quality of an IC, the entire operating order of one electronic device or electrical appliance is disrupted, which plays an important role in organizing the life of a modern person [1]. During the manufacture of ICs, their performance and stability are affected by various factors, including the size effects, microrelief, the presence of secondary etching reaction product residues on the walls of elements and on the bottom of the reliefs, the presence of local defects in dielectric and metallized films, the structure and phase composition of semiconductor structures, etc. [2]. The microrelief control is usually carried out using optical microscopy and/or scanning electron microscopy. However, with the reduction of design standards for the manufacture of microcircuits, this type of microscopy cannot be used due to the limited resolution of the methods, as well as the complexity of preparing samples for control [3].

Reducing the size affects the change in the properties of the MEMS elements [4]. For example, reducing the size of MOS transistors leads to deterioration of their characteristics [1]. To solve this problem, the transistor structure is changed by introducing new elements and materials. The use of silicides (for example, as transition layers) in the production of Schottky diodes, infrared sensors, gates on field-effect transistors, MEMS technology, metal compounds in microchips, the creation of microstructures on quantum wires and quantum dots has improved their characteristics [5, 6]. However, the ongoing miniaturization of ICs places many new demands on such materials. For example, NiSi film has low electrical resistance (10.5–18 $\mu\text{Ohm cm}$ at room temperature) and resistance to electromigration, but the main disadvantage is low thermal stability up to temperatures of 650 °C, which leads to the transition of the conductive phase of NiSi to NiSi₂ with a higher specific resistance. Improvement of the morphological and phase stability of silicides at elevated temperatures is achieved by doping with Pt, Pd or Rh elements [7, 8], as well as the rapid thermal treatment (RTT). The metallic nature of the conductivity, low electrical resistance, thermal and chemical stability, and low the Schottky barrier height on *p*-type silicon

(0.28 eV) contribute to their successful application in microdevices [6]. In the thin films of the silicides used, the grain size and surface roughness are important parameters determining the level of their functional properties. There are no dependencies in the scientific literature linking the RTT temperature with the roughness, grain size and reverse current density of the Schottky diode.

Heterostructures based on aluminum nitride (AlN) are promising materials for power, high-frequency and optoelectronic devices. To grow AlN layers [3] with a smooth surface, the layer growth temperature is changed. However, this may cause defects in the structures.

The size effects [4] in the transition to micro- and nano-sizes of systems make the tasks of complex research of the properties of functional and structural materials in microelectronics relevant. Traditional research methods do not allow detecting phenomena that determine the properties of the material at the micro- and nanolevel. Therefore, there is a need to use modern high-resolution methods, which include atomic force microscopy and nanoindentation, which make it possible to study the structure, physical, mechanical, electrical and magnetic properties of materials and systems during development and operation.

The aim of the work was to study and control the structure and defects of a channel transistor with two types of the conductivity (*p* and *n*), submicrostructures based on the nickel films and a seed layer based on AlN using atomic force microscopy.

Materials and research methods

Several samples of the following type were used for the study:

- the channel transistor with two types of conductivity (*p* and *n*);
- the submicrostructures based on the nickel films after the rapid thermal treatment at 300 and 400 °C;
- the AlN based seed layers.

The channel transistor is manufactured using CMOS technology with one metallization level. Design standards are 5.0 μm . The substrate is of type KEF 4.5 (electronic silicon doped with phosphorus with a specific resistance of 4.5 Ohm cm). Then, a local oxide is formed on the surface for electrical insulation of the transistors from each other. The local oxide is created thermally in a dry oxygen

atmosphere at a temperature of 1000 °C. The total thickness of the formed oxide is 0.8 μm. In this case, 0.4 μm of substrate silicon is consumed.

The nickel films with a thickness of ≈40 nm [10, 11] were deposited on silicon substrates by magnetron sputtering of a nickel target with a purity of 99.5 %. After deposition, the nickel film on silicon was subjected to the rapid thermal treatment (RTT) in the heat balance mode using a JetFirst 100 setup (Jipelec Qualiflow Therm, Montpellier, France). The back side of the silicon substrates was irradiated with an incoherent light flux of the constant-power quartz halogen lamps in a nitrogen environment for 7 s. Heating was carried out until a temperature of 400 °C was reached.

The AlN germinal layers with a thickness of 85 nm were grown by the plasma molecular beam epitaxy (at the temperature of the Al₂O₃ substrate $T = 780$ °C) with the different nitriding times and temperatures:

- the nitriding time 90 min at $T_{(Al)} = 1235$ °C;
- the nitriding time 90 min at $T_{(Al)} = 1237$ °C;
- the nitriding time 120 min at $T_{(Al)} = 1237$ °C.

For the visualize the morphology, control the microrelief and defects of the above samples, we used a Dimension FastScan atomic force microscope (Bruker, USA) in the PeakForce QNM mode (nanomechanical mapping) using a standard silicon cantilever of the CSG1-SS type (TipsNano, Russia) with a tip curvature radius of 5 nm and a cantilever

stiffness of 0.3 N/m, as well as the C-AFM mode – electric force microscopy using a silicon cantilever of the SCM-PIT type (Bruker, USA) with a conductive PtIr coating, a tip curvature radius of 20 nm and a cantilever stiffness of 2.8 N/m.

Results and discussions

Based on the results of the study of two types of transistors (Figure 1), it was found that the surface structure of the *p*-channel transistor (Figure 1b) and the profile drawn across the transistor (Figure 1d) show the presence of a continuous oxide strip with a height of about 200–250 nm and a width of up to 0.8–1.0 μm at the transistor boundary. The studies were carried out both on the surface of the transistors and outside the surface of the transistors. The main internal structure of the *p*-channel transistor is developed and granular (Figure 1f), has almost the same height as the surface outside the transistor. The surface of the *n*-channel transistor (Figure 1c) has a uniform structure and height (about 300 nm) both along the length and width of the transistor (Figure 1e). The structure of the *n*-channel transistor is smoother compared to the *p*-channel (Figure 1f). The surface roughness (Table 1) is higher on the surface and outside the *p*-channel transistor than on the *n*-channel transistor.

The revealed relief and structure are due to the formation of local oxide during the production process.

Table 1

Surface roughness of transistors

Type of transistor	Research location	Roughness		
		Ra, nm	Rq, nm	Rz, nm
<i>p</i> -type	Inside	4.98	7.36	12.2
	Outside	12.1	14.7	11.8
<i>n</i> -type	Inside	4.08	5.46	16.3
	Outside	4.78	6.16	8.07

The morphology of AlN germinal layers at different nitriding times is almost the same – it consists of the smooth rounded structures with the uneven edges (Figure 2).

It should be noted that there are a large number of pores on the AlN germinal layer at a nitriding time of 90 min at $T_{(Al)} = 1235$ °C (Figure 2a, shown by yellow arrows). In the adhesion mode, these areas have low adhesion (Figure 2g, dark areas are shown by blue arrows). With an increase in the nitriding time to 120 min at $T_{(Al)} = 1237$ °C, the number

of pores decreases significantly (Figure 2b, c) and the surface relief decreases (Figure 2d–f). Such pores are places of the electrical breakdowns, which worsens the properties of such heterostructures.

On the submicrostructures based on the nickel silicide after RTT at 300 and 400 °C, when studying by the atomic force microscopy with a conductive mode, it was possible to identify the conducting and non-conducting regions (Figure 3 and 4), i. e. Ni and NiSi, respectively. The conducting regions (light regions in Figures 3b and 4b, d, dark regions in Figure 3c).

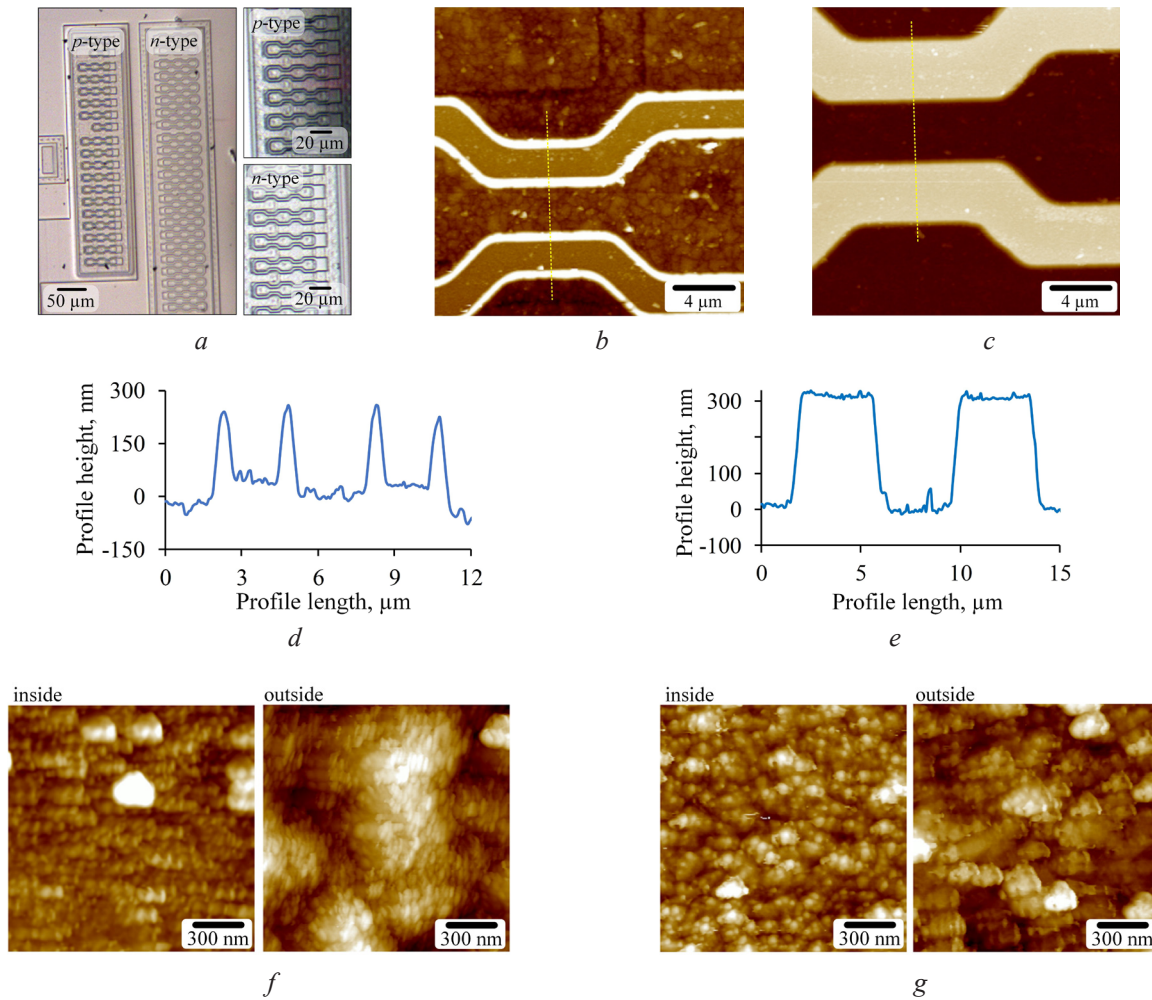
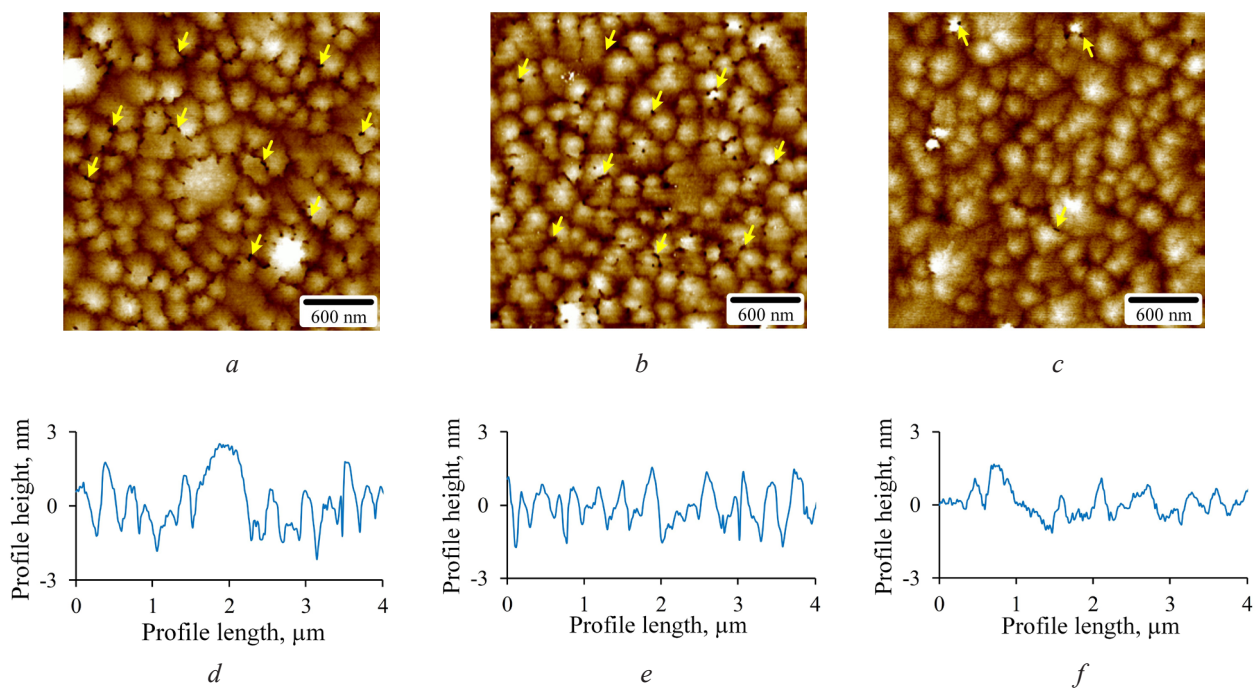


Figure 1 – Optical (a), AFM structure (b, c, f, g) and surface profiles (d, e) of p-type (b, d, f) and n-type (c, e, g) transistors



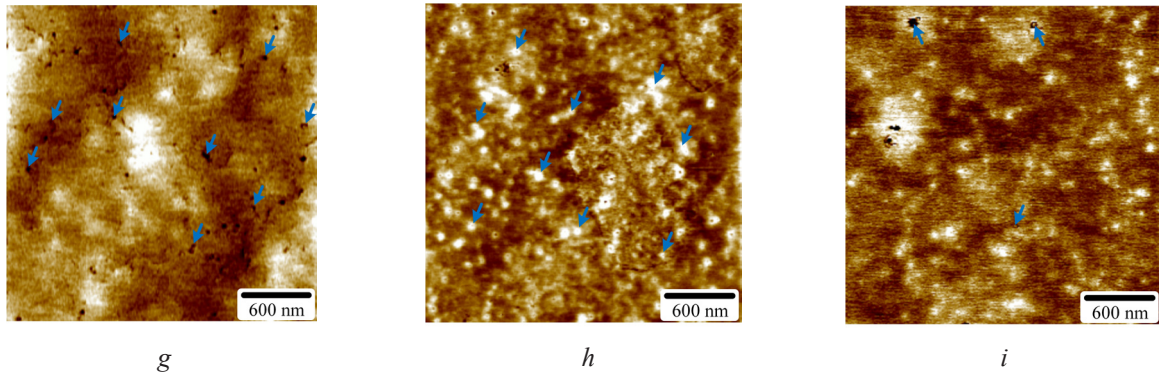


Figure 2 – AFM structure (topography (*a–c*) and adhesion (*g–i*) modes, fields $3 \times 3 \mu\text{m}^2$) and surface profiles (*d–f*) of samples with an 85 nm thick AlN germinal layer with different nitriding times: *a, d, g* – nitriding time 90 min at $T_{(\text{Al})} = 1235^\circ\text{C}$; *b, e, h* – nitriding time 90 min at $T_{(\text{Al})} = 1237^\circ\text{C}$; *c, f, i* – nitriding time 120 min at $T_{(\text{Al})} = 1237^\circ\text{C}$

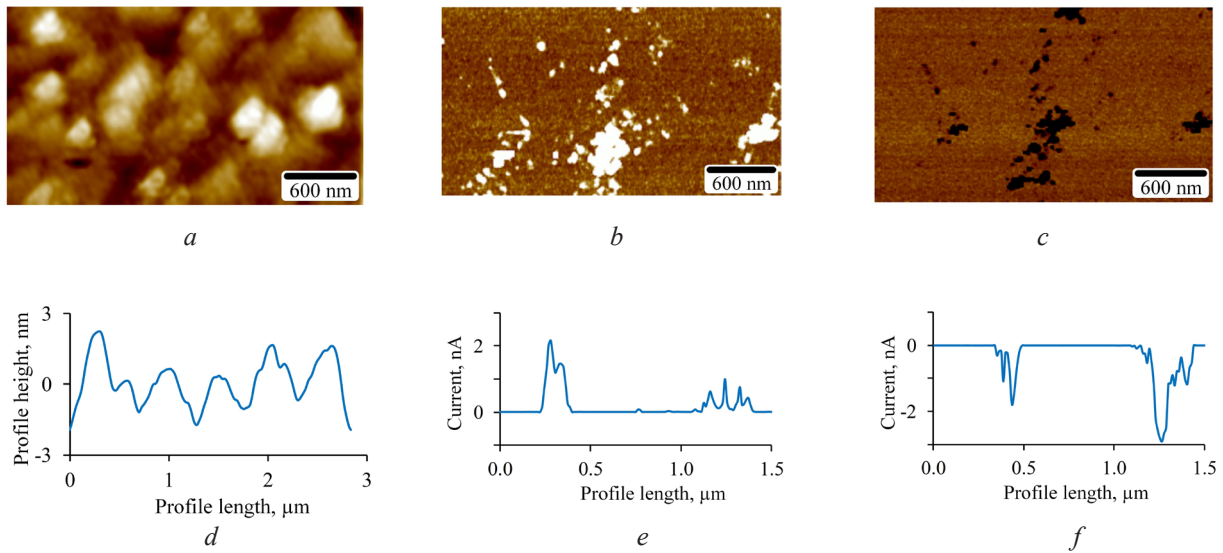


Figure 3 – AFM images of the nickel silicide-based submicrostructures after 400°C with the conducting defects: *a* – topography; *b* – conducting mode at a voltage of +4 V; *c* – conducting mode at a voltage of -4 V

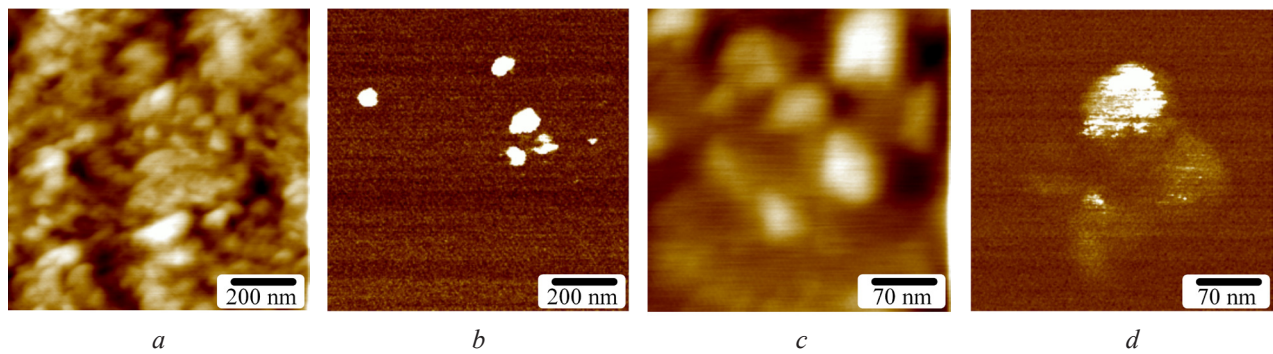


Figure 4 – AFM images of the nickel silicide-based submicrostructures after 300°C with the conducting defects: *a, c* – topography; *b, d* – conducting mode at +4 V

When a voltage of ± 4 V is applied, the conductive regions have a current from -2 (when a negative voltage of -4 V is applied, dark areas in Figure 3c) to 2 nA (when a positive voltage of 4 V is applied, light areas in Figures 3b and 4b, d).

Conclusion

The influence of the manufacturing technology on the microstructure and surface properties of the microelectronic components was established. The research and defect control were carried out on a channel transistor with two types of the conductivity (p and n), submicrostructures based on the nickel films after rapid thermal treatment at 300 and 400 °C and seed layers based on AlN using the atomic force microscopy. Two scanning modes were used: the PeakForce QNM (nanomechanical mapping) and C-AFM (electrical force). The influence of the manufacturing technology and local oxide formation on the relief and structure of the p - and n -type transistor was established. Defects in the form of the pores were revealed during the study of AlN heterostructures both in the topography mode and in the adhesion mode. With increasing temperature and time of nitriding, the defectiveness is significantly reduced. The conductive areas on the nickel silicides were established after RTT of 300 and 400 °C using electric-force microscopy. Thus, the effectiveness of the atomic force microscopy method using specialized conductive techniques as a method for monitoring the microelectronic components is demonstrated.

Acknowledgments

This research was supported by the grant of Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research BRFFR No. T23ME-010 and T17KIG-009.

References

1. Anikeeva AE, Elistratov IB. Methods of Quality Control of Production of Integrated Microcircuits. 2019 International Multi-Conference on Engineering, Computer and Information Sciences (SIBIRCON). 2019;0752-0757 p.
2. Tishin YuI, Adamov DYU, Somov OA. Design for Manufacturing Capabilities. Proceeding. Semiconductor Electronics. 2010;2:1(5):43-51. (In Russ.).
3. Arutyunov PA, Tolstikhina AL. Atomic force microscopy in the problems of designing micro- and nanoelectronic devices. Microelectronics. 1999;28(6):405-414. (In Russ.).
4. Size effects in nanomaterials. Moscow: Tekhnosfera, 2010. 352 p.
5. Chizh KV. [et al.]. Low-temperature formation of platinum silicides on polycrystalline silicon, Journal of Alloys and Compounds, 2020.
6. Robert T. Fryer, Robert J. Lad Synthesis and thermal stability of Pt_3Si , Pt_2Si , and PtSi films grown by e-beam co-evaporation. Journal of Alloys and Compounds. 2016;682:216-224 p.
7. Utlu G, Artunc N, Selvi S. Temperature and thickness dependence of the grain boundary scattering in the Ni-Si silicide films formed on silicon substrate at 500 °C by RTA. Materials Chemistry and Physics. 2012;132:421-430.
8. Adusumilli P, Seidman DN, Murray CE. Silicide-phase evolution and platinum redistribution during silicidation of $\text{Ni}_{0.95}\text{Pt}_{0.05}/\text{Si}(100)$ specimens. Journal of Applied Physics. 2012;112:064307.
9. Tsarik KA, Nevolin VK. Formation and study of AlGaIn/GaN nanoheterostructures using atomic force microscopy. News of higher educational institutions. Electronics. 2009;6(80):44-49. (In Russ.).
10. Lapitskaya V. [et al.]. Microstructure and Properties of Thin-Film Submicrostructures Obtained by Rapid Thermal Treatment of Nickel Films on Silicon. Surfaces. 2024;7(2):196-207.
DOI: 10.3390/surfaces7020013
11. Kuznetsova T. [et al.]. Properties of CrSi_2 Layers Obtained by Rapid Heat Treatment of Cr Film on Silicon. Nanomaterials. 2021;11(7):1734.
DOI: 10.3390/nano11071734

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based on Frame Structure

E.S. Barbin², I.V. Kulinich², T.G. Nesterenko^{1,2}, A.N. Koleda^{1,2}, E.V. Shesterikov²,
P.F. Baranov¹, D.P. Il'yaschenko¹

¹National Research Tomsk Polytechnic University,
Lenina Avenue, 30, 634050, Tomsk, Russia

²Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics,
Lenina Avenue, 40, 634050, Tomsk, Russia

Received 06.09.2024

Accepted for publication 14.11.2024

Abstract

Modern microelectromechanical systems (MEMS) are devices that incorporate microelectronic components and micromechanical structures on a single chip. Packaging is a mandatory stage in MEMS manufacturing. It ensures mechanical protection, sealing and transmission of electric energy and signals. The present work was aimed at developing a MEMS packaging method as a part of the consolidated manufacturing process. The method is developed on the example of a microwave MEMS switch. The switch manufacturing scheme includes conventional technologies used for producing gallium arsenide integrated circuits: optical lithography, liquid etching, electron-beam and magnetron deposition of metallic, resistive and dielectric films. The work presents a new inter-plate MEMS packaging based on a frame structure with a passivating film. The main purpose of the package frame layer is mechanical support for an upper layer of the sealing material. The frame layer should have the structure allowing for unimpeded removal of the sacrificial photoresist and be impermeable for the sealant. To satisfy the requirements stated, a metallic thin copper-film spatial frame was fabricated by galvanic deposition. The frame structure is a geodesic dome comprised of a complex network of triangle cells arranged in rows. The connected triangles create a self-supporting durable framework. The measurement and modeling results demonstrate that the round frame structure is more durable than a square frame with the same maximum cell dimensions. The stress-strain state for the round framework considerably alters depending on the number of rows of triangle cells. In addition to the mechanical support, the cell structure of the framework – with adequate selection of cell dimensions, solvent and sealant viscosities – allows for unimpeded penetration of the solvent (N-methyl-2-pyrrolidone, NMP) and removal of ma-P1225 photoresist sacrificial layers. At the same time, the layer structure is impermeable for the sealant (benzocyclobutene, BCB). The proposed MEMS switch packaging enables mass fabrication of GaAs integrated circuits in a single process, which expands their frequency range. The new plate-level packaging technology is absolutely compatible with MEMS fabrication technology without specific materials and equipment which reduces the dimensions and cost of MEMS.

Keywords: MEMS, heterointegration, packaging, geodesic dome

Адрес для переписки:

Нестеренко Т.Г.
Национальный исследовательский Томский политехнический
университет,
пр-т Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия
e-mail: ntg@tpu.ru

Address for correspondence:

Nesterenko T.G.
National Research Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia
e-mail: ntg@tpu.ru

Для цитирования:

E.S. Barbin, I.V. Kulinich, T.G. Nesterenko, A.N. Koleda,
E.V. Shesterikov, P.F. Baranov, D.P. Il'yaschenko.
Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based
on Frame Structure.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 323–333.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

For citation:

Barbin ES, Kulinich IV, Nesterenko TG, Koleda AN, Shesterikov EV,
Baranov PF, Il'yaschenko DP.
Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based
on Frame Structure.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):323–333.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

Тонкоплёночная технология корпусирования микроэлектромеханических систем на основе каркасной структуры

Е.С. Барбин², И.В. Кулинич², Т.Г. Нестеренко^{1,2}, А.Н. Коледа^{1,2}, Е.В. Шестериков²,
П.Ф. Баранов¹, Д.П. Ильященко¹

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

²Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники,
пр-т Ленина, 40, г. Томск 634050, Россия

Поступила 06.09.2024

Принята к печати 14.11.2024

Современные МЭМС – это устройства, объединяющие в себе микроэлектронные компоненты и микромеханические структуры на одном чипе. Процесс корпусирования является обязательным этапом изготовления МЭМС устройств, который обеспечивает механическую защиту, герметичное уплотнение, передачу электроэнергии и сигналов. Целью данной работы являлась разработка способа корпусирования МЭМС, который входит в единый технологический процесс изготовления устройства. Разработка такого метода корпусирования осуществлена на примере СВЧ МЭМС ключа. Схема технологического процесса изготовления СВЧ МЭМС ключа включает в себя традиционные процессы технологии арсенид-галлиевых интегральных схем, такие как оптическая литография, жидкостное травление, электронно-лучевое и магнетронное осаждение металлических, резистивных и диэлектрических пленок. В работе представлена новая межпластинчатая упаковка МЭМС на основе каркасной конструкции с пассивирующей плёнкой. Основная задача каркасного слоя корпуса – обеспечение механической поддержки вышележащему слою герметизирующего материала. Каркасный слой должен обладать структурой, позволяющей беспрепятственно удалять жертвенный слой фоторезиста, и быть непроницаемым для герметизирующего материала. Для выполнения этих требований использована металлическая пространственная рама, выполненная на основе тонкой плёнки меди, полученной методом гальванического осаждения. Каркасная конструкция имеет форму геодезического купола, состоящего из сложной сети треугольных ячеек, расположенных рядами. Соединённые треугольники создают самоподдерживающийся структурно прочный каркас. Результаты измерений и моделирования показали, что круглая рамочная конструкция является более жёсткой, чем квадратная рамная конструкция с таким же максимальным размером ячейки. Напряженно-деформированное состояние круглой рамной конструкции существенно изменяется в зависимости от количества рядов треугольных ячеек каркасной конструкции. Кроме механической поддержки ячеистая структура каркаса при соответствующем подборе размера ячейки, вязкости растворителя и герметизирующего слоя позволяет беспрепятственно проникать растворителю (N-метилпирролидон) и удалять жертвенные слои фоторезиста ma-P1225. При этом структура данного слоя непроницаема для герметизирующего материала (бизбензоциклобутена). Предложенная упаковка МЭМС ключа позволяет серийно производить интегральные схемы GaAs, в едином технологическом процессе, что расширяет их частотный диапазон. Предлагаемая новая технология упаковки на уровне пластины полностью совместима с технологией производства МЭМС без использования специальных материалов и оборудования, что позволяет снизить габариты и стоимость МЭМС.

Ключевые слова: МЭМС, гетероинтеграция, упаковка, геодезический купол

Адрес для переписки:

Нестеренко Т.Г.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр-т Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия
e-mail: ntg@tpu.ru

Address for correspondence:

Nesterenko T.G.
National Research Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia
e-mail: ntg@tpu.ru

Для цитирования:

E.S. Barbin, I.V. Kulinich, T.G. Nesterenko, A.N. Koleda,
E.V. Shesterikov, P.F. Baranov, D.P. Il'yaschenko.
Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based
on Frame Structure.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 323–333.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

For citation:

Barbin ES, Kulinich IV, Nesterenko TG, Koleda AN, Shesterikov EV,
Baranov PF, Il'yaschenko DP.
Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based
on Frame Structure.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):323–333.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-323-333

Introduction

Microelectromechanical systems (MEMS) are miniature devices with mechanical, chemical or optical sensors, integrated circuits (ICs) or photooptic integrated circuits for data management and processing. MEMS are widely used due to their small size and weight and low energy consumption, as well as lower mass production costs as compared to macrosystems. The most widely used are inertial sensors, namely MEMS gyroscopes and accelerometers [1, 2]. As of today, optical [3, 4] and radio-frequency microelectromechanical systems (RF MEMS) become increasingly popular, e. g., switched capacitors, resonators, switches, etc. [5–8].

The packaging process is compulsory for manufacturing MEMS devices, which ensures mechanical protection, hermetic sealing, transfer of electric power and signals. In addition, wafer-level packaging (WLP) must provide an appropriate price and size, be CMOS-compatible, and operate in severe conditions.

The packaging cost ranges from 30 % to 50 % of the total production cost owing to the strict requirements to packaging of brittle MEMS components [9]. The key objective for boosting microelectromechanical systems to a higher level of commercialization is to find low-cost and efficient methods of their packaging.

MEMS-packaging is performed in two ways: die-level packaging (DLP) and wafer-level packaging (WLP) [10]. The die-level packaging includes wafer dicing into several individual dies, which are consequently packaged separately or in combination with electronic and other components in a common package. The DLP process is long and expensive and requires solders or adhesives to mount MEMS dies in a package.

In the WLP process, a wafer with MEMS dies is attached to a cap wafer, which provides a sealed cavity for each die. The obtained structure is diced into individual encapsulated dies. The WLP method provides sealing of MEMS devices prior to the wafer dicing into dies and allows using standard packages of integrated circuits instead of expensive custom packages.

At present, two groups of WLP methods are used [11]. The first group utilizes eutectic and diffusion bonding of wafers and their micromachining [11–16]. The technique requires high voltage or temperature, which can damage the MEMS

structure and cause sticking of mechanically weak structures.

Temel et al. [17] proposed at eutectic bonding technique implying application of Au-Sn thin films for MEMS packaging. Au-Sn thin films were applied for the low-temperature wafer bonding using low-thickness materials. This technique eliminates the electroplating stage prior to deposition of Au-Sn thin films that are required for bonding wafers and provides less complicated and more reliable MEMS fabrication.

Low-temperature hermetic thermo-compression wafer-level bonding based on copper-electroplated sealing frame [18] provides hermetic sealing and electrical contact. It also allows for integration of micro-structured wafers. Hermetic bonding can be realized at 250 °C, when the gas formation is low, hence the pressure in the cavity is lower. Moreover, the shear bond strength exceeds 100 MPa.

The second group of WLP methods utilizes thin films to provide surface micromachining. In contrast to semiconductor wafer splicing, the thin-film encapsulation process does not require an additional wafer and provides a higher packaging density [19–23]. This technique has no restrictions on the total thickness variation (TTV) and cleanness of the wafer surface. The thin-film encapsulation process also provides electrical bonding between the circuit elements and the packaged MEMS device. The most important characteristic of this WLP method is the integration of monolithic MEMS and integrated circuits, which allows placing them in a common package, thereby improving its performance and reducing the cost.

To achieve high stability and strength of thin film packaging technology, Epi-Seal process has been developed [24, 25]. An abundant diversity of Epi-Seal-based MEMS-devices demonstrates the possibility of producing high-performance MEMS in a single production process.

At the same time, the conventional Epi-Seal process has design limitations such as maximum gap between elements of 1.5 μm , inability to implement top electrodes, etching holes should exceed 12 μm . These factors restrict the diversity of designs. Yang et al. [26] proposed a MEMS fabrication method, which eliminates the main design limitations of the conventional Epi-Seal process, its main parameters being preserved. This technique allows making gaps between elements within 0.7–50 μm and implementing both in- and out-of-plane electrodes.

Therefore, the main limitations of the MEMS packaging via wafer bonding are high wafer flatness, small total thickness variation of 1 to 10 μm , frequent wafer fracture, and a high bonding temperature of over 300 $^{\circ}\text{C}$. Thin-film packaging is the most technologically and economically justified method, since it eliminates the use of additional equipment and reduces the dimensions and mass of the end product. At the same time, the successful application of thin-film packaging for the MEMS monolithic integration requires over-coming engineering complications occurring when removing massive sacrificial layers.

According to the international roadmap, in semiconductor industry, one of the urgent tasks in IC integration with MEMS is modification and standardization of IC-technologies in conjunction with MEMS technologies [27, 28]. To simplify the process of MEMS heterointegration with ICs or PICs, the wafer-level packaging method is required that would be a part of a common technological process of MEMS fabrication.

The work is aimed at including packaging into a unified technological process of MEMS fabrication by implementing standard technological operations (lithography, liquid etching, electron-beam and magnetron deposition of metal, resistive and dielectric films). This technology will reduce dimensions and cost of MEMS devices, since they will be sealed simultaneously with their fabrication; no additional wafer and special equipment will be required (bonding). One of the solutions is implementation in MEMS fabrication of a frame structure represented by a metal geodesic dome-shaped spatial frame [29]. The dome is a spherical spatial frame structure comprised of a complex network of triangular cells

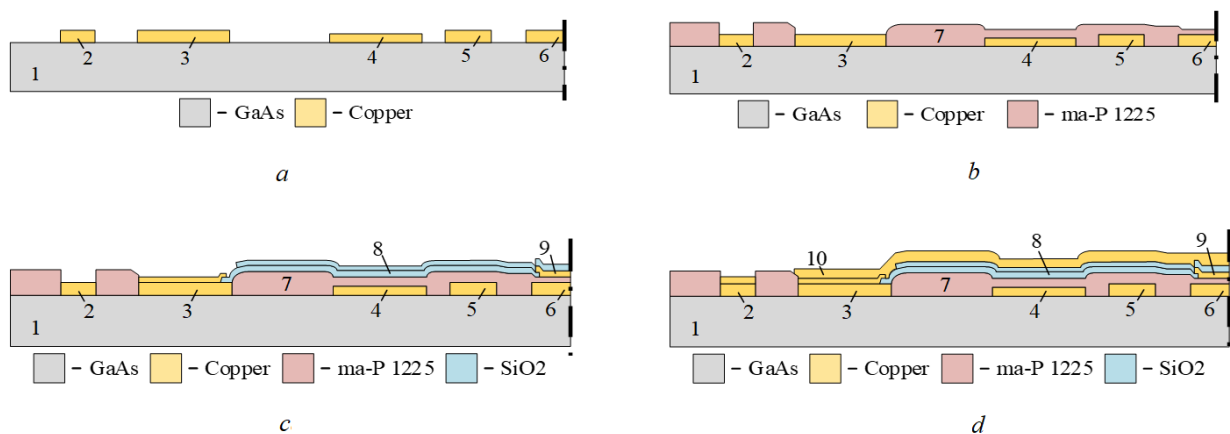
arranged in rows. The joint triangles thus create a self-supporting structurally strong frame.

In this manuscript we will present a novel technological process of MEMS wafer-level packaging based on the frame structure with a passivating layer having high mechanical strength. The developed method will provide monolithic integration of MEMS with integrated circuits based on conventional MEMS fabrication processes.

Technology process

A developed WLP, fully integrated in the process flow, is exemplified by a RF MEMS switch fabrication. The latter is intended for RF-signal switching between the elements of a monolithic IC. The RF MEMS switch is fabricated as a coplanar transmission line and consists of a signal electrode with a brake and two ground electrodes. Microwave signal switching is provided by implementing an ohmic contact in the signal line break. The ohmic contact is implemented by the gap-closing electrode placed on the cantilevered beam of the RF MEMS switch and separated from the cantilevered beam main metallization by a dielectric layer. The RF MEMS switch control is provided by two driving electrodes. There is an air gap between the cantilevered beam and driving electrodes.

Semi-insulating GaAs handle wafers with (100) crystallographic orientation were used to fabricate RF MEMS switches in a thin-film package. The flow chart is presented in Figure 1. It includes such conventional processes of the GaAs IC manufacture as optical lithography, liquid etching, electron-beam and magnetron sputtering of thin-film metals, resistive and dielectric materials.



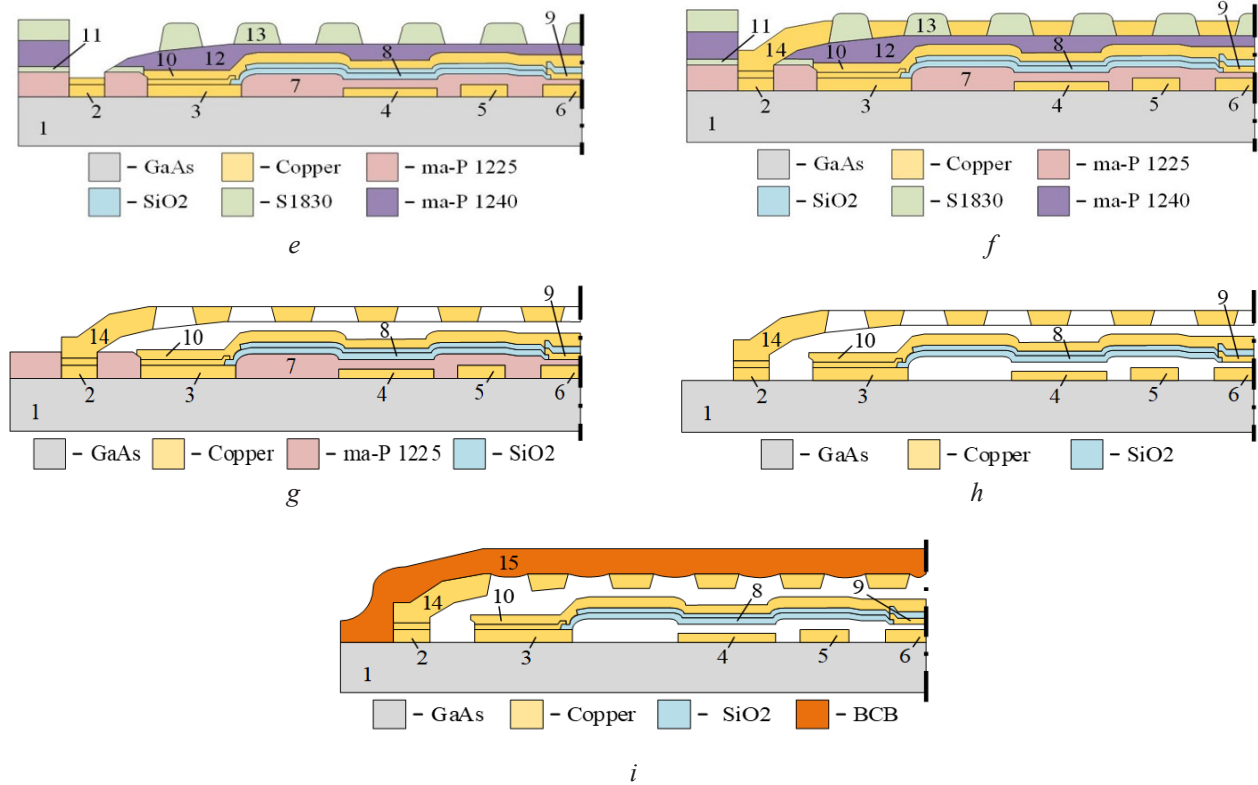


Figure 1 – Flow chart: *a* – driving electrodes, signal electrodes, cantilevered beam support of RF MEMS switch; *b* – photoresist sacrificial layer; *c* – gap-closing electrode and SiO₂ dielectric layer; *d* – cantilevered beam main metallization; *e* – RF MEMS switch structure after complete removal of photoresist sacrificial layers; *f* – frame structure plating; *g, h* – removal of photoresist, seed, separating, and sacrificial layers; *i* – RF MEMS switch structure in sealed package

In Figure 1 the numbers indicate: 1 – GaAs-handle wafer; 2 – frame structure anchors; 3 – cantilevered beam support; 4 – driving electrode; 5 – ground electrode; 6 – signal electrode; 7 – ma-P 1225 photoresist sacrificial layer; 8 – SiO₂ dielectric layer; 9 – gap-closing electrode; 10 – cantilevered beam main metallization; 11 – S1818 photoresist layer; 12 – ma-P 1240 photoresist sacrificial layer; 13 – S1830 photoresist masking layer for the frame structure; 14 – frame structure plating; 15 – hermetic sealing layer of benzocyclobutene (BCB). As presented in Figure 1*a*, driving, ground and signal electrodes, cantilevered beam and frame structure anchors were formed by electron beam deposition of metal films through the two layers of AZ-1518/LOR20B photoresist.

The air gap between the RF MEMS switch beam and signal electrodes was obtained by centrifugation of the 3- μ m thick ma-P 1225 photoresist sacrificial layer (Figure 1*b*). The photoresist was dried on a hot plate at 100 °C for 5 min and exposed to laser 3D-lithography on a direct write lithography system to

eliminate the thickness difference between the photoresist and signal and driving electrodes. The photoresist was developed in a tetramethylammonium hydroxide solution for 2 min.

Figure 1*c* depicts the formation of the copper film gap-closing electrode and SiO₂ separating dielectric layer using electron-beam sputtering through 2- μ m thick AZ-1518 photoresist layer with a negative slope of walls in the gap. The thicknesses of the gap-closing electrode and the dielectric layer were 300 and 200 nm, respectively. In Figure 1*d*, one can see the cantilevered beam main metallization obtained by the electroplating deposition of 2- μ m thick copper. The next stage included the frame structure formation for the RF MEMS switch packaging. It involved the deposition of the photoresist sacrificial layer and electroplating of copper for the frame structure.

Evidently from Figure 1*e*, the masking photoresist for electroplating of copper consists of ma-P1240 and S1830 photoresist sacrificial layers applied onto the RF MEMS switch beam and cantilevered beam

main metallization. The gaps were formed in the ma-P1240 photoresist sacrificial layer using laser 3D-lithography followed by the electroplating deposition of the Ti/Cu seeding layer. Next, electroplating deposition of copper was conducted through the gaps of the S1830 photoresist masking layer (Figure 1f). The copper deposition was conducted from $\text{CuSO}_4\cdot\text{H}_2\text{SO}_4\cdot\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}$ electrolyte with a ratio of 100:70:10 g/L. At a current density of 0.1 mA/mm^2 , the copper deposition velocity was approx. $0.2 \text{ }\mu\text{m/min}$. The specific resistance of the obtained film was $0.021 \text{ }\mu\text{Ohm m}$.

Photoresist masking, seeding, separating, and sacrificial layers were removed after the frame structure electroplating (Figure 1g, h). The copper-plated separating and seeding layers were removed by liquid etching in $\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}:\text{FeCl}_3$ (1:10:1) solution. $\text{NH}_4\text{F}:\text{HCl}:\text{H}_2\text{O}$ (1.5:100:10) solution was used for Ti thin film etching. These etchants demonstrate high selectivity during the etching process. Photoresist masking layers were removed by N-Methylpyrrolidone (NMP) followed by washing in isopropyl alcohol and drying with nitrogen. The drying and examination of the sacrificial layers and the wafer were followed by the ultimate stage (Figure 1i). The spin coating of $7\text{-}\mu\text{m}$ thick BCB on the frame structure provided the sealing of the RF MEMS switch. Then, we used photolithography to disclose the contact grounds of the RF MEMS switch. The coated BCB sealing layer was then dried at 250°C for 20 min. The fabricated sealed RF MEMS switch structure is presented in Figure 1i.

We should note that on the packaging of all the elements on the wafer, the hardening occurs after the formation of the street, which causes no global warping of the plate.

Modeling

Several samples of the following type were used for The main purpose of the package frame layer is mechanical support of the upper layer of the sealing material. Moreover, the frame layer should possess the structure that would allow unhindered removal of the sacrificial photoresist layer. Consequently, the layer structure should be impenetrable for the sealant. The combination of such properties can be achieved by using a spatial frame from electroplated thin copper film. The frame structure was built as a geodesic dome comprised of several rows of triangular cells. The variations of the frame structure geometry are presented in Figure 2.

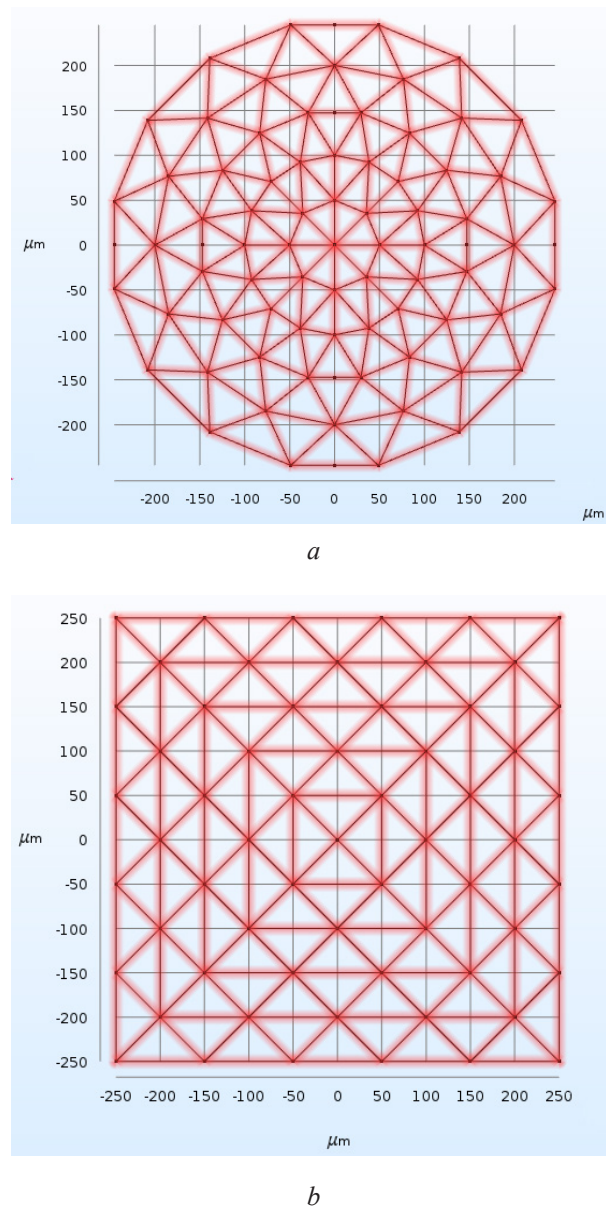


Figure 2 – Round (a) and square (b) geometries of the frame structure

Geodesic domes conventionally have round base (Figure 2a), so they experience less stresses. For the sake of comparison, we considered a frame with a square base (Figure 2b). The frame structure was researched using a finite element method (FEM) in the COMSOL. The frame structure was attached to the outer perimeter of the structure. When designing the structure and defining its geometric parameter, the applied load was equal to the BCB-layer with a thickness of $5 \text{ }\mu\text{m}$ multiplied by a coefficient 1.7 at normal conditions which accounts for additional stresses due to the shrinkage and BCB-layer thickness error. The modeled layer thickness is $8.5 \text{ }\mu\text{m}$.

Afterwards, due to the hardening of the BCB-layer, it becomes self-supporting. As a result, the structure strength increases due to the metallic frame and self-supporting BCB-layer.

The height of the frame structure at its maximum point was determined by the thickness of the photoresist sacrificial layer. The thickness of sacrificial layer between of RF-switch and frame structure is 8 μm . Obviously from Figure 3, the round frame structure is more rigid than the square frame structure having the same maximum cell size.

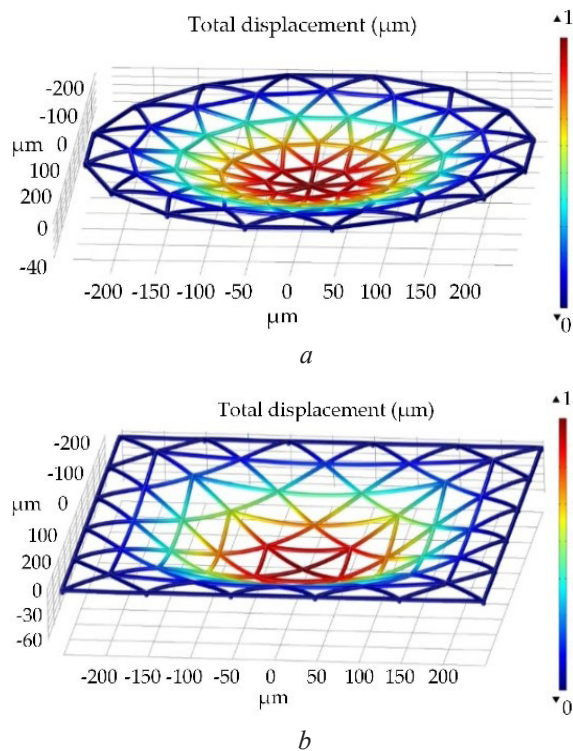


Figure 3 – Stress and deformation of round (a) and square (b) frame structure

The FEM was used to model the stress-strain state of the round frame structure with varying numbers of rows of triangular cells (Figure 4).

As presented in Figure 4, the stress-strain state of the round frame structure significantly changes depending on the number of the rows of triangular cells in the frame structure. Frame structures with 5 or more rows are acceptable because the stress in structure does not exceed a yield strength for copper of 70 MPa. For frame structure of 5 rows of triangular cells maximum deformation under the applied loads equal no more than 0.2 μm and frame structure will not contact the RF MEMS switch. In addition to the mechanical support, the frame structure configuration must provide free NMP

penetration to remove the ma-P1240 photoresist sacrificial layers. At the same time, the frame structure must be impermeable to the BCB sealing material. The cellular frame structure can satisfy these requirements by an appropriate selection of the cell size, viscosity of the remover and sealing layer. The optimal size of the triangular cell of the frame structure should be selected by mathematical simulation.

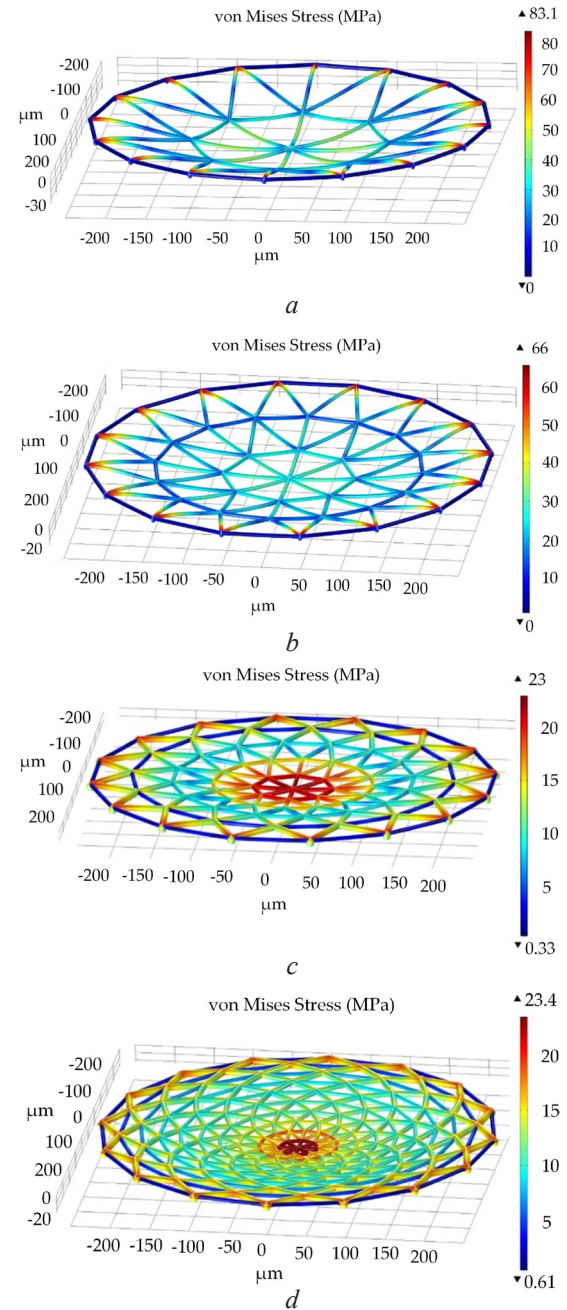


Figure 4 – Stress analysis of the frame structure depending on the number of rows of triangular cells. a – 2 rows of triangular cells; b – 3 rows of triangular cells; c – 5 rows of triangular cells; d – 10 rows of triangular cells

Figure 5 presents a 2D-model of an elementary frame structure element which shows penetration of BCB into the frame structure. Figure 5a shows

the simulation result of the distribution of BCB fractions and air fractions after BCB layer coating on the framework layer.

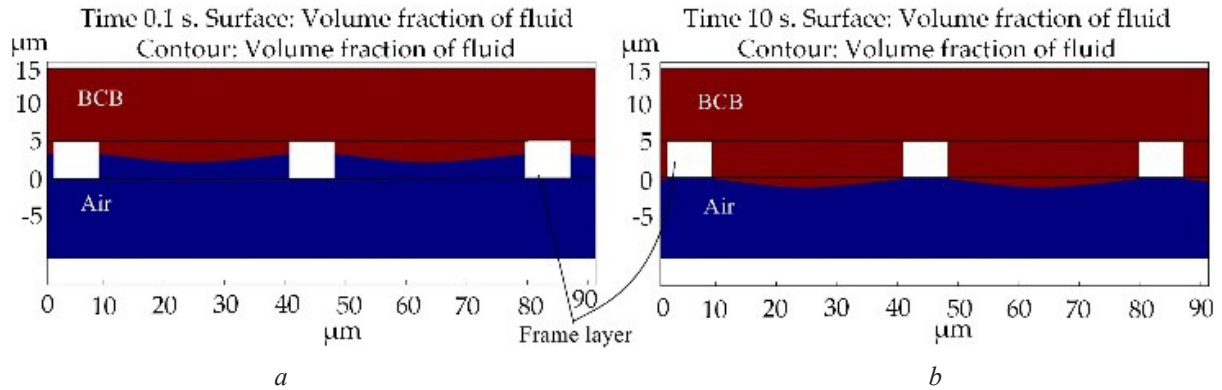


Figure 5 – Distribution of benzocyclobutene – fractions and air fractions on the framework layer: *a* – result after 0.1 s; *b* – result after 10 s

Starting from 0.1 s (Figure 5a), there is an evident penetration of BCB into the frame structure. After 10 s (Figure 5b), the penetration of BCB stabilizes; there is no penetration under the dome due to surface tension of BCB. Therefore, BCB fills the frame cells, but cannot reach the RF-switch structure. Figure 6 depicts the simulation of NMP penetration through the frame structure for sacrificial layer removal.

crograph in Figure 7 presents the RF MEMS switch packaging fabricated by this technology. Figure 7a corresponds to the technological step in Figure 1h.

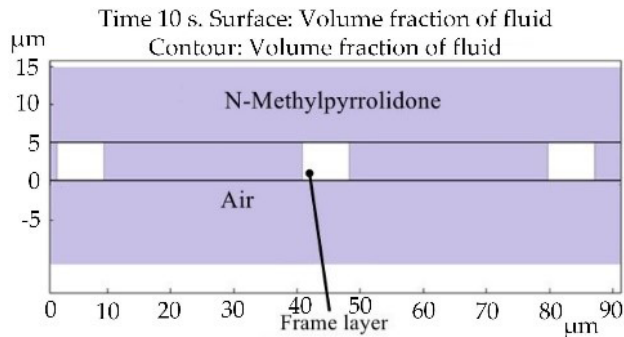


Figure 6 – Volume fractions of remover and air after 10 s of remover deposition

Figure 6 present the moment of time (10 s after) when the NMP completely penetrated under the frame structure and substituted air. Therefore, the optimal cell size at which NMP penetrates with non-penetrating BCB equals 30 μm. The optimal size of a triangular cell is the maximum gap that equals the median of an isosceles triangle of the cell itself.

The mathematical simulation shows that the selected frame configuration meets the requirements for the package frame structure and can be used to remove the photoresist sacrificial layers followed by the RF MEMS switch packaging. The photomi-

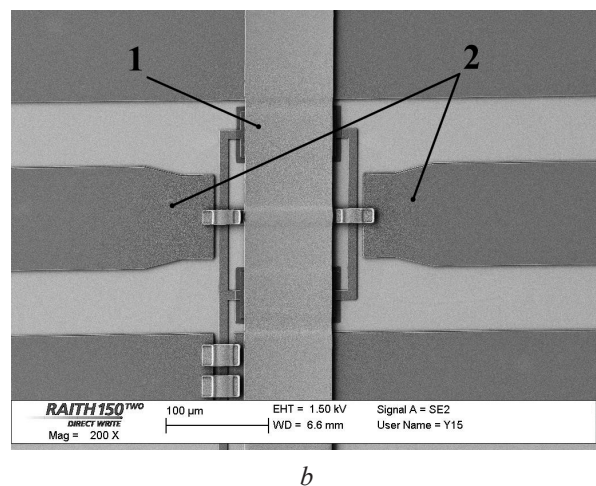
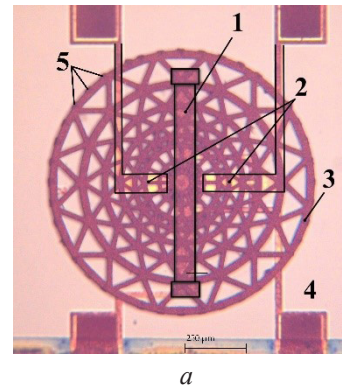


Figure 7 – Photomicrograph of the RF MEMS switch packaging: *a* – with frame structure; *b* – without frame structure; 1 – cantilevered beam; 2 – signal line; 3 – frame structure; 4 – driving electrode; 5 – anchors

Figure 8 shows the frame structure with sacrificial layer of ma-P 1240.

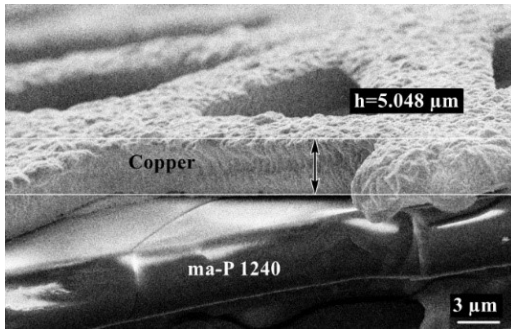


Figure 8 – The frame structure with sacrificial layer of ma-P 1240

After the removal of the seeding and sacrificial layers, the frame structure is hermetized (for liquid) by the BCB layer and the gaps in the BCB layer are opened to provide an access to the electrical contacts of the RF MEMS switch. The scattering parameters of the RF MEMS switch obtained before and after its packaging are presented in Figure 9.

According to Figure 9, the RF MEMS switch parameters decrease by 6.1 dB in the on state, while in the off state, they increase by 4.9 dB. This is explained by the wave reflection from the three-dimensional metal frame structure.

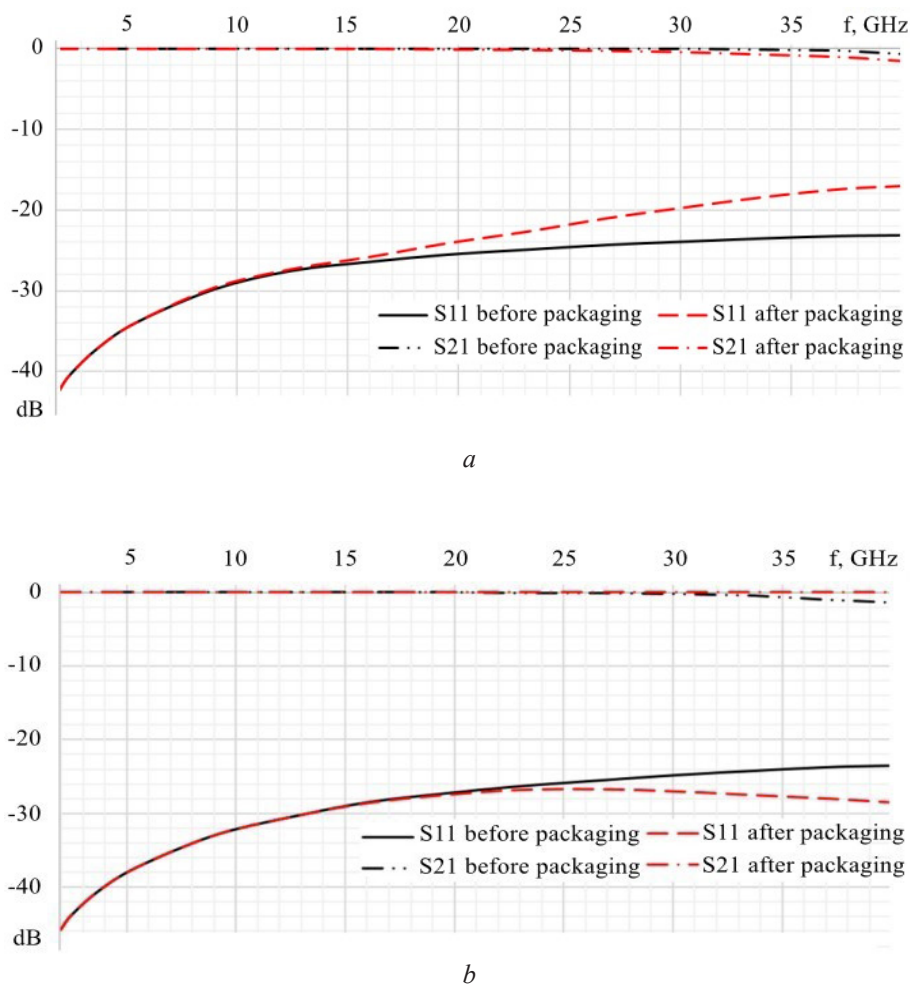


Figure 9 – S-parameters of the RF MEMS switch: *a* – on state; *b* – off state

The following parameters were obtained for the RF MEMS switch: average contact resistance of 2.46 Ohm on a semiconductor wafer; switch-on time of 80 μs; control voltage of 25 V.

Conclusion

The proposed novel wafer-level packaging technique is completely compatible with the MEMS

production technology without the use of specific materials and equipment. The use of the three-dimensional metal frame structure as a mechanical support for the frame structure allowed fully removing the photoresist sacrificial layers with the successive RF MEMS switch packaging.

The proposed RF MEMS switch packaging allows serial production of GaAs integrated circuits, including radio frequency switches, in a single technological process, which widens the frequency range of GaAs RF integrated circuits. The comparative analysis showed that the proposed RF MEMS switch fabrication implementing electroplating deposition of copper can compete with its rivals based on the electroplating deposition of gold. The presented techniques were used to achieve the high performance of the RF MEMS switch and can also be applied in the production of high-resolution MEMS sensors, such as gyroscopes, accelerometers, high-quality resonators and hybrid optical MEMS. Evidently from the comparative analysis of various crystal packaging technologies such as wafer-level packaging and die-level packaging, the technology suggested by us is cheaper and simpler, since it requires no additional evacuation equipment.

Acknowledgments

The results were obtained within the state assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (theme no. FEWM-2024-0008).

References

1. Xia D, Yu C, Kong L. The Development of Micro-machined Gyroscope Structure and Circuitry Technology. *Sensors*. 2014;14(1):1394-1473. DOI: 10.3390/s140101394
2. Xie H, Fedder GK. Fabrication, Characterization, and Analysis of a DRIE CMOS-MEMS Gyroscope. *IEEE Sensors Journal*. 2003;3(5):622-631. DOI: 10.1109/JSEN.2003.817901
3. Olsson RH, Bogart GR, Baker MS, Carr DW, Swiler TP, Clews PJ, Krishnamoorthya U. In-plane MEMS-based nano-g accelerometer with sub-wavelength optical resonant sensor. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2008;283-290 pp. DOI: 10.1016/j.sna.2008.03.017
4. Samuelson SR, Xie HA. Large Piston Displacement MEMS Mirror with Electrothermal Ladder Actuator Arrays for Ultra-Low Tilt Applications. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2014;23(1):39-49. DOI: 10.1109/JMEMS.2013.2290994
5. Zhang H, Huang J, Yuan W, Chang HA. High-Sensitivity Micromechanical Electrometer Based on Mode Localization of Two Degree-of-Freedom Weakly Coupled Resonators. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2016;25(5):937-946. DOI: 10.1109/JMEMS.2016.2598780
6. Pillai G, Zope AA, Tsai JM, Li S. Design and Optimization of SHF Composite FBAR Resonators. *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency*. 2017;64(12):1864-1873. DOI: 10.1109/tuffc.2017.2759811
7. Li SS, Lin YW, Xie Y, Ren Z, Nguyen CT. Micromechanical hollow-disk ring resonators. *Proceedings of the IEEE International Conference on Micro Electro Mechanical Systems*. 2004:821-824 pp. DOI: 10.1109/MEMS.2004.1290711
8. Lee J E-Y, Yan J, Seshia AA. Study of lateral mode SOI-MEMS resonators for reduced anchor loss. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2011;21(4):1-10. DOI: 10.1088/0960-1317/21/4/045010
9. Lawes LA. Manufacturing costs for microsystems/MEMS using high aspect ratio microfabrication techniques. *Microsystem Technologies*. 2006;13(1):85-95. DOI: 10.1007/s00542-006-0252-6
10. Beeby S, Ensel G, Kraft M, White N. *MEMS Mechanical Sensors*. 2004, Publisher: Artech House, Boston, London, 269 p.
11. Tilli M, Motooka T, Airaksinen V, Franssila S, Paulasto-Kröckel M, Lindroos V. *Handbook of Silicon Based MEMS Materials and Technologies*. 2015, Edition: 2nd, Publisher: Elsevier, 800 p.
12. Zhang M, Yang J, He Y, Yang F, Yang F, Han G, Ning J. Research on a 3D Encapsulation Technique for Capacitive MEMS Sensors Based on Through Silicon Via. *Sensors*. 2019;19(1):93. DOI: 10.3390/s19010093
13. Xu P, Si C, He Y, Wei Z, Jia L, Han G, Ning J, Yang F. A Novel High-Q Dual-Mass MEMS Tuning Fork Gyroscope Based on 3D Wafer-Level Packaging. *Sensors*. 2021;21(19). DOI: 10.3390/s21196428
14. Torunbalci MM, Gavcar HD, Yesil F, Alper SE, Akin T. An all-silicon process platform for wafer-level vacuum packaged MEMS devices. *IEEE Sensors Journal*. 2021;21(13). DOI: 10.1109/JSEN.2021.3073928
15. Moriyama M, Suzuki Y, Kumano M, Totsu K, Hirano H, Tanaka S. Metal-bonding-based hermetic wafer-level MEMS packaging technology using in-plane feedthrough: Hermeticity and high frequency characteristics of thick gold film feed-through. *IEEE Transactions on Sensors and Micromachines*. 2019;38(10). DOI: 10.1541/ieejsmas.138.485
16. Nesterenko TG, Barbin ES, Koleda AN, Baranov PF, Tanaka S, Tsukamoto TA. Novel multiple-axis MEMS

gyro-scope-accelerometer with decoupling frames. *Sensor Review*. 2019;39(5):670-681.

DOI: 10.1108/SR-05-2018-0133

17. Temel O, Kalay YE, Akin T. Wafer-Level Low-Temperature Solid-Liquid Inter-Diffusion Bonding With Thin Au-Sn Layers for MEMS Encapsulation. *Journal of microelectromechanical systems*. 2021;30(1):64-71.

DOI: 10.1109/JMEMS.2020.3040039

18. Farisi MS Al, Hirano H, Tanaka S. Low-temperature hermetic thermo-compression bonding using electroplated copper sealing frame planarized by fly-cutting for wafer-level MEMS packaging. *Sensors and Actuators A: Physical*. 2018;279:671-679.

DOI: 10.1016/j.sna.2018.06.021

19. Zhang Q, Cicek P-V, Nabki F, El-Gamal M. Thin-film encapsulation technology for above-IC MEMS wafer-level packaging. *Journal of micromechanics and microengineering*. 2013;23(12):1-10.

DOI: 10.1088/0960-1317/23/12/125012

20. He R, Kim C-J. On-Wafer monolithic encapsulation by surface micromachining with porous polysilicon shell. *Journal of Micromechanical Systems*. 2007;16(2):462-472. **DOI:** 10.1109/jmems.2007.892797

21. Verheijden GJAM, Koops GEJ, Phan KL, JTM van Beek. Wafer-level encapsulation technology for MEMS devices using an HF permeable PECVD SIOC capping layer. *IEEE 21st International Conference on Micro Electro mechanical systems*. 2008:798-801 p.

DOI: 10.1109/MEMSYS.2008.4443777

22. Lee BK, Choi DH. Use of nanoporous columnar thin film in the wafer-level packaging of MEMS devices. *Journal of Micro-mechanics and Microengineering*. 2010;(20):20-29. **DOI:** 10.1088/0960-1317/20/4/045002

23. Rajaraman V, Pakula LS, Pham HTM, Sarro PM, French PJ. Robust wafer-level thin-film encapsulation of micro-structures using low stress PECVD silicon carbide. *IEEE 22nd International Conference on Micro Electro mechanical systems*. 2009:140-143 p.

DOI: 10.1109/MEMSYS.2009.4805338

24. Candler RN, Park Woo-Tae, Li Huimou, Yama G, Partridge A, Lutz M, Kenny TW. Single wafer encapsulation of MEMS devices. *IEEE Transactions on Advanced Packaging*. 2003;26(3):227-232.

DOI: 10.1109/TADVP.2003.818062

25. Ng EJ, Lee HK, Ahn CH, Melamud R, Kenny TW. Stability of silicon microelectromechanical systems resonant thermometers. *IEEE Sensors Journal*. 2013;13(3):987-993.

DOI: 10.1109/JSEN.2012.2227708

26. Yang Y, Ng EJ, Chen Y, Flader IB, Kenny TW, Hong VA. A Unified Epi-Seal Process for Fabrication of High-Stability Microelectromechanical Devices. *Journal of Microelectromechanical Systems*. 2016;25(3):489-497.

DOI: 10.1109/JMEMS.2016.2537829

27. International Technology Roadmap for Semiconductors (ITRS). Micro-Electro-Mechanical Systems (MEMS) Summary. Available online: <https://www.semiconductors.org/wp-content/uploads/2018/08/2013MEMS.pdf> (accessed on 10 April 2022).

28. Qu H. CMOS MEMS Fabrication Technologies and Devices. *Micromachines*. 2016;7(1):14.

DOI: 10.3390/mi7010014

29. Geodesic Domes and Space-Frame Structures, Available online: <https://www.thoughtco.com/what-is-a-geodesic-dome-177713> (accessed on 10 May 2022).

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев

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

Поступила 07.08.2024

Принята к печати 19.11.2024

При оценке качества продукции, особенно нефти и нефтепродуктов, наряду с другими параметрами широко используется значение плотности. Данные о плотности являются основополагающими для исследования свойств жидкостей, их идентификации и определения степени чистоты. Они также необходимы для косвенной оценки с определённой степенью точности некоторых других свойств жидкости, таких как удельный вес, тепловое расширение или сжатие, масса известного объёма жидкости и т. д. В свою очередь, от точности определения плотности зависит правильность принимаемого решения при технологическом контроле качества выпускаемой продукции. Определение плотности жидкости с высокой точностью требует поддержания стабильных температурных условий в процессе измерений. Цель работы – установить влияние стабильности температурного режима на воспроизведение и передачу единицы плотности жидкости. Для стабилизации температуры предложено техническое решение, реализованное в виде климатической камеры, внутрь которой помещено эталонное оборудование. Проведено исследование температурных условий в технологической камере. Установлено, что благодаря использованным техническим решениям влияние условий окружающей среды на изменение температуры исследуемой жидкости является величиной пренебрежимо малой.

Ключевые слова: плотность жидкости, температура окружающей среды, стабильность температурных условий

Адрес для переписки:

Баковец Н.В.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Address for correspondence:

Bakovets N.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Для цитирования:

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев.
Стабилизация температурных условий при определении
плотности жидкости методом гидростатического взвешивания.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

For citation:

Bakovets NV, Kozadayev KV.
Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density
Measuring by Hydrostatic Weighting.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):334–341. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density Measuring by Hydrostatic Weighting

N.V. Bakovets, K.V. Kozadayev

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

Received 07.08.2024

Accepted for publication 19.11.2024

Abstract

When assessing the quality of products, especially oil and oil products, the density value is widely used along with other parameters. Density data are fundamental for studying the properties of liquids, their identification and determining the degree of purity. They are also necessary for indirectly assessing with a certain degree of accuracy some other properties of the liquid, such as specific gravity, thermal expansion or contraction, the mass of a known volume of liquid, etc. In turn, the accuracy of the density determination determines the correctness of the decision made in the technological quality control of the manufactured products. Determining the density of a liquid with high accuracy requires maintaining stable temperature conditions during the measurement process. The purpose of the work was to establish the effect of temperature stability on the reproduction and transmission of the unit of liquid density. To stabilize the temperature, a technical solution is proposed, implemented in the form of a climatic chamber, inside which reference equipment is placed. A study of the temperature conditions in the process chamber was carried out. It was found that due to the technical solutions used, the influence of environmental conditions on the change in the temperature of the liquid under study is a negligible value.

Keywords: liquid density, ambient temperature, stability of temperature conditions

Адрес для переписки:

Баковец Н.В.
Белорусский государственный университет,
пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Address for correspondence:

Bakovets N.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosty Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: bakavetsnv@bsu.by

Для цитирования:

Н.В. Баковец, К.В. Козадаев.
Стабилизация температурных условий при определении
плотности жидкости методом гидростатического взвешивания.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 4. С. 334–341.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

For citation:

Bakovets NV, Kozadayev KV.
Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density
Measuring by Hydrostatic Weighting.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(4):334–341. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-4-334-341

Введение

При определении плотности жидкости существенное влияние на результат измерений оказывает зависимость измеряемого значения плотности от температуры. Температурные флуктуации зачастую приводят не только к увеличению неопределённости измерения, но и к искажению результата в целом. Так, расширение или сжатие жидкости вызывают изменение плотности исследуемого образца, что может привести к неверной классификации исследуемой жидкости. Возможным решением данной проблемы для различных жидкостей может служить определение поправок к их плотности при изменяющихся температурах, однако это многократно увеличивает объём предварительных измерений для каждого типа жидкости [1].

Известен ряд канонических методов определения плотности жидкости. Наиболее распространёнными из них являются ареометрический метод [2], метод гидростатического взвешивания [3], пикнометрический метод [4]. Их существенные достоинства – простота реализации и высокая точность, что даёт возможность реализации одного из этих методов в качестве эталонного. Различие между двумя последними заключается в том, что при использовании пикнометрического метода плотность жидкости определяется в сосуде с постоянным объёмом, а при гидростатическом взвешивании используется эталонная мера с постоянной массой.

При создании Национального эталона единицы плотности жидкости в соответствии с заданием 2.14: «Разработать и создать национальный эталон единицы плотности жидкости» научно-технической подпрограммы «Эталоны Беларуси» ГНТП «Разработка и изготовление эталонов Беларуси, уникальных приборов и установок для научных исследований («Эталоны и научные приборы») в РУП «Белорусский государственный институт метрологии» с 2018 по 2020 гг. для реализации точного воспроизведения и передачи единицы плотности жидкости был выбран метод гидростатического взвешивания [5]. При измерении плотности жидкости проводят взвешивание в ней тела, масса и объём которого известны.

Для обеспечения постоянства массовых и объёмных характеристик тел, с помощью которых производится определение плотности жидкости, необходимо создать такие условия окружающей среды, при которых влияние температурных флуктуаций на результат измерений будет пренебрежимо мало. В настоящей работе проведены исследования создания и поддержания температурных условий, при которых неопределённость измерения плотности исследуемой жидкости не будет зависеть от влияния температурных флуктуаций [6].

В рамках предложенной математической модели воспроизведения единицы плотности жидкости плотность исследуемой жидкости определяют по формуле [7]:

$$\rho_{ж} = \frac{(C_a m_{ra} + \Delta m_{wa} - C_{al} m_{rl} - \Delta m_{wl}) \cdot \rho_l + \rho_a \cdot (C_a m_{rl} + \Delta m_{wl})}{(C_a m_{ra} + \Delta m_{wa})(1 + \beta_{сферы}(t_{ПЖ} - t_{аж}))},$$

где C_a – поправка на действие выталкивающей силы воздуха (плотности воздуха) во время цикла взвешивания сферы в воздухе; m_{ra} – масса сферы, кг; Δm_{wa} – разность масс взвешивания сферы в воздухе, кг; C_{al} – поправка на действие выталкивающей силы воздуха (плотности воздуха) во время цикла взвешивания сферы в жидкости; m_{rl} – масса противовеса, кг; Δm_{wl} – разность масс взвешивания сферы в жидкости, кг; ρ_l – плотность сферы, кг/м³; ρ_a – плотность воздуха, кг/м³; $\beta_{сферы}$ – коэффициент объёмного расширения сферы, К⁻¹; $t_{ПЖ}$ – текущая температура жидкости, плотность которой определяют, °С; $t_{аж}$ – температура аттестации жидкости, равная 20 °С.

Конструктивно-технические решения

Для эталонных измерений рядом нормативных актов установлены условия, при которых определяются значения плотностей жидкостей, в том числе и для изготовления и аттестации Государственных стандартных образцов (ГСО) плотности жидкости и эталонных растворов плотности (РЭП) [8].

В данной работе мерой для воспроизведения и хранения единицы плотности жидкости методом гидростатического взвешивания выбрана прецизионная сфера кремниевая (далее – сфера), производства фирмы «Hafner», Германия. Сфера изготовлена из высокочистого кремния массой 1 кг.

Исследуемая жидкость помещалась в термостат со стабильностью поддержания температуры термостатирующей жидкости не хуже $\pm 0,01\text{ }^{\circ}\text{C}$. При проведении измерений массы сферы в воздушной среде и затем при погружении сферы в исследуемую жидкость не должно происходить изменение температуры жидкости, для чего сфера должна быть термостабилизирована в воздушной среде

при температуре воздуха $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ [9]. Для реализации этих требований предложено техническое решение в виде климатической камеры большого объёма (далее – камера) с высокой точностью установления и поддержания внешних условий. Внешний вид климатической камеры показан на рисунке 1, а технические характеристики её работы изложены в таблице 1.



a



b

Рисунок 1 – климатическая камера: *a* – внешний вид; *b* – размещение эталонного оборудования внутри камеры
Figure 1 – climatic chamber: *a* – appearance; *b* – placement of reference equipment inside the chamber

Таблица 1 / Table 1

Технические характеристики климатической камеры
Technical characteristics of the climatic chamber

Температурный диапазон / Temperature range	от плюс $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ до плюс $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ / from plus $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ to plus $50\text{ }^{\circ}\text{C}$
Диапазон влажности / Humidity range	от 40% до 70% относительной влажности / from 40% to 70% relative humidity
Стабильность поддержания температуры / Temperature stability	от $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (без нагрузки) / from $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ to $\pm 0.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (without load)
Точность установления температуры / Temperature setting accuracy	$\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$
Точность установления влажности / Humidity setting accuracy	$\pm 0.1\%$ относительной влажности / $\pm 0.1\%$ relative humidity
Время непрерывной работы / Continuous operation time	10 ч / 10 h

Эталонная установка была помещена внутрь камеры, где поддерживались заданные условия окружающей среды: относительная влажность воздуха 50 % и температура воздуха окружающей среды 20 °С.

Поскольку при определении плотности жидкости необходимо поддерживать и контролировать даже незначительные изменения температуры окружающего воздуха и термостатируемой жидкости, были проведены исследования стабильности поддержания параметров окружающей среды внутри климатической камеры в автоматическом режиме.

Для измерения температуры вблизи составных частей эталонной установки использовались преобразователи температуры измерительные JUMO серии 707030 [10] (классификация по СТБ EN 60751: Pt100, погрешность измерения 0,1 °С) (далее – преобразователь) и термо-гигрометры Testo 608 [11] (погрешность измерения температуры 0,6 °С, погрешность измерения относительной влажности 3 %).

Предложена следующая схема измерений. Преобразователи и термогигрометры располагались в наиболее важных точках камеры с установленным оборудованием – возле передней и задней стенок компаратора, на фронтальной и боковой стенках термостата, на поверхности подъёмника (рисунок 2). Места расположения измерительных приборов выбраны таким образом, чтобы контролировать изменение температуры на границах различных сред: воздух–жидкость, гранит–жидкость, гранит–воздух. При установке измерительных приборов принимались соответствующие меры предосторожности, чтобы исключить попадание органических частиц на чувствительные элементы приборов и поверхности, на которых будут производиться измерения.

Сфера помещалась на подвес компаратора и погружалась в жидкость. При этом соблюдались следующие меры предосторожности работы со сферой:

- со сферой необходимо работать и хранить её таким образом, чтобы она всегда оставалась чистой;

- сфера перед проведением любого измерения должна быть очищена от пыли и других инородных частиц;

- после очистки сферы необходимо осуществить ее просушку;

- работать со сферой только в перчатках из нейлона.

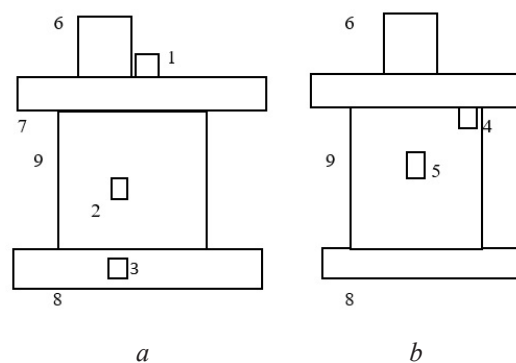


Рисунок 2 – Схема размещения преобразователей температуры и термогигрометров: *a* – вид спереди; *b* – вид сбоку; 1–5 – преобразователи температуры и термогигрометры; 6 – компаратор; 7 – гранитная плита; 8 – поддон; 9 – термостат

Figure 2 – Layout diagram of temperature converters and thermohygrometers: *a* – front view; *b* – side view; 1–5 – temperature converters and thermohygrometers; 6 – granite slab; 7 – tray; 8 – thermostat; 9 – comparator

Затем камера герметично закрывалась, чтобы исключить попадание воздуха из внешней среды внутрь, включался термостат для поддержания температуры жидкости, в которую погружена жидкость, на уровне 20 °С. Параллельно включалась камера для создания внутри климатических условий: температура внутри камеры – 20 °С, относительная влажность воздуха – 50 %. Условия выбраны таким образом, чтобы исключить образование влаги на поверхностях эталонной установки. Открывать дверь камеры и находиться внутри во время проведения эксперимента категорически запрещалось. В ходе эксперимента измерялись показания температуры от преобразователей через определённые промежутки времени. Показания термогигрометров учитывались как справочные для контроля выпадения влаги.

Время непрерывной работы камеры предельно составляет 10 ч (это заявлено производителем в эксплуатационных документах). В первый день, с учётом технологической подготовки камеры, измерения проводились в течение 8 ч, на второй и третий – по 9 ч. Данные измерений температуры T °С и относительной влажности воздуха внутри камеры R % представлены в таблице 2.

Первые значения температуры и влажности, приведённые в таблице 2, являются начальными точками отсчёта для выхода камеры на заданные режимы параметров.

Проведённые исследования показали, что, несмотря на колебания относительной влажности воздуха, обусловленные испарением исследуемой жидкости и жидкости в термостате, выпадения влаги на составных частях установки не происходит. Следовательно, колебания относительной влажности воздуха в объёме камеры не влияют на результат измерения и не вносят дополнительный вклад в неопределённость измерений. Измерения температуры на поверхности составных частей установок показывают, что термостабилизация составных частей эталонной установки происходит в течение как минимум трёх часов

с момента запуска камеры и остаются стабильными на протяжении времени проведения исследования (рисунок 3).

Нужно отметить, что термостабилизация оборудования возможна только при стабильной работе камеры в течение длительного времени. Были проведены исследования стабильности температурных условий внутри камеры в течение непрерывной работы на протяжении суток. Во время эксперимента отключать камеру и открывать дверь камеры строго запрещалось.

На рисунке 4 приведён график изменения температуры внутри климатической камеры в течение суток.

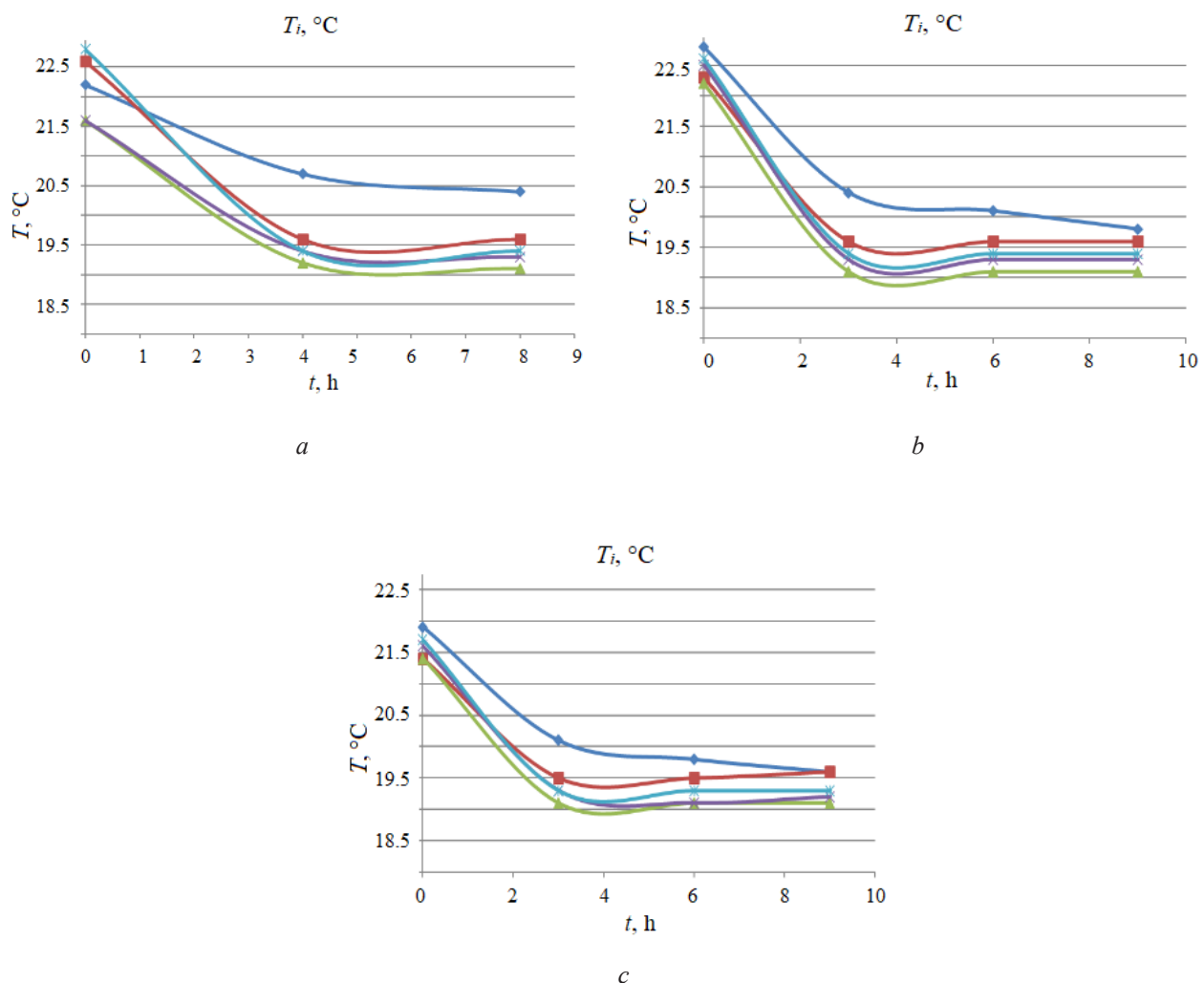


Рисунок 3 – Время установления заданного режима работы: *a* – день 1-й; *b* – день 2-й; *c* – день 3-й

Figure 3 – Time for establishing a given operating mode: *a* – day 1th; *b* – day 2th; *c* – day 3th

Таблица 2 / Table 2

Измерение параметров окружающей среды внутри климатической камеры

Measuring environmental parameters inside the climate chamber

Эксперимент	T_1R_1		T_2R_2		T_3R_3		T_4R_4		T_5R_5	
Experiment	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$	$T, ^\circ\text{C}$	$R, \%$
День 1, ч										
Day 1, h										
0	22.2	37.0	22.6	40.9	21.6	41.5	21.6	39.5	22.8	37.8
4	20.7	43.1	19.6	46.1	19.2	51.9	19.4	45.8	19.4	47.1
8	20.4	43.9	19.6	46.4	19.1	52.4	19.3	46.9	19.4	47.3
День 2, ч										
Day 1, h										
0	22.8	34.9	22.3	36.7	22.2	40.5	22.5	36.3	22.6	35.2
3	20.4	43.8	19.6	46.3	19.1	51.6	19.3	47.0	19.4	47.0
6	20.1	45.2	19.6	46.6	19.1	51.7	19.3	47.8	19.4	47.4
9	19.8	46.3	19.6	46.9	19.1	49.9	19.3	48.3	19.4	47.6
День 3, ч										
Day 1, h										
0	21.9	27.0	21.4	28.8	21.4	26.7	21.6	27.8	21.7	27.0
3	20.1	44.0	19.5	46.1	19.1	45.0	19.3	46.2	19.3	47.4
6	19.8	47.2	19.5	46.4	19.1	45.1	19.1	47.4	19.3	47.4
9	19.6	46.5	19.6	46.6	19.1	45.6	19.2	47.9	19.3	47.7

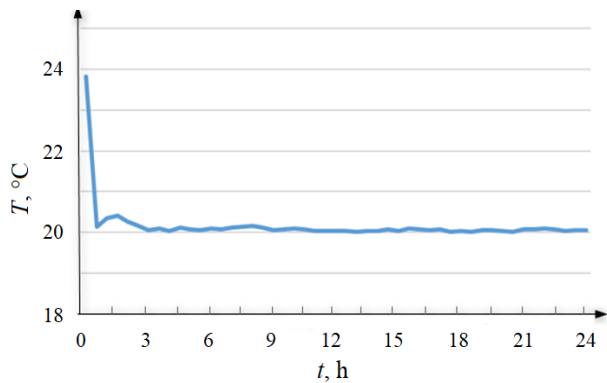


Рисунок 4 – График изменения температуры внутри климатической камеры в течение суток

Figure 4 – Graph of temperature changes inside the climate chamber during the day

Исследования показали, что после установления рабочего режима камеры и достижения заданного показателя температуры в 20 °С, стабильность поддержания температуры внутри камеры сохраняется на заданном уровне в течение всего времени непрерывной работы, соответственно, неопределённость измерения температуры внутри камеры зависит только

от калибровки термометров (определяется по типу В) [12] и составляет не более 0,057 °С. Полученные результаты справедливы и для процесса передачи единицы плотности жидкости средствам измерений, так как данное техническое решение используется в обоих процессах (воспроизведение и передача единицы плотности жидкости) без проведения конструктивных изменений установки.

Закключение

Установлено, что благодаря использованным техническим решениям влияние условий окружающей среды на изменение температуры исследуемой жидкости является величиной пренебрежимо малой. Основной вклад в неопределённость измерения температуры исследуемой жидкости будет вноситься термометрами, измеряющими температуру исследуемой жидкости вблизи погружённой в жидкость меры плотности – кремниевой сферы. Поскольку влияние условий окружающей среды на исследуемую жидкость нивелировано с помощью технических средств,

то неопределённость измерений температуры жидкости будет относиться к неопределённости по типу В, т. е. зависеть от точности калибровки используемых термометров.

Список использованных источников

1. ССД СНГ 2-77 «ГСССД 2-77. Таблицы стандартных справочных данных. Вода. Плотность при атмосферном давлении и температурах от 0 до 100 °С». – Москва, Издательство стандартов, 1978. – 6 с.
2. ГОСТ ИСО 3675-2014. Сырая нефть и жидкие нефтепродукты. Лабораторный метод определения плотности ареометром. Введен 01.01.2017. – Москва: Стандартинформ, 2019. – 12 с.
3. OIML G14 Edition 2011(E) Density measurement. International Organization Of Legal Metrology – 2011 – 29 p.
4. ИСО 2811-1:1997. Краски и лаки. Определение плотности. Часть 1. Пикнометрический метод (МОД). Введен 01.07.2014. – Женева: Международная организация по стандартизации, 1997. – 9 с.
5. Bakovets N.V., Konicheva E.N. Measuring liquid density in a system for ensuring uniformity of measurements. Физика. – БГУ, Минск, 2022. – №3. – С. 113–119.
6. Баковец Н.В. Источники неопределённости измерений при определении плотности жидкости / Н.В. Баковец, Е.Н. Коничева, К.В. Козадаев // Материалы Международной научно-технической конференции «Метрология – 2024». – Минск, БелГИМ, 2024. – С.167– 169.
7. ГОСТ OIML R 111-1 – 2009 «Государственная система обеспечения единства измерений. Гири классов E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 и M3. Часть 1. Метрологические и технические требования».
8. ГОСТ 8.395-80 «Государственная система обеспечения единства измерений. Нормальные условия измерений при поверке. Общие требования». Введён 01.07.1081. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1980. – 7 с.
9. Р 50.2.041-2004 Рекомендации по метрологии. «ГСОЕИ. Ареометры стеклянные. Методика поверки». – Москва, Федеральное агентство по техническому регулированию и метрологии, 2004.
10. Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений: URL: <http://mediaold.belgim.by/grsi/12532.pdf> (дата обращения: 23.05.2024).
11. Государственный информационный фонд по обеспечению единства измерений: oei.by. URL: <https://oei.by/grsi/view?id=14477513> (дата обращения: 23.05.2024).
12. Руководство по выражению неопределённости измерения Guide to the Expression of Uncertainty in Mea-

surement Перевод с англ. под науч. ред. проф. Слаева В.А. ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, С.-Пб., 1999. – 134 с.

References

1. CCD CNG 2-77. GCCCD 2-77. Tables of standard reference data. Water. Density at atmospheric pressure and temperatures from 0 to 100 °C. Publishing standards, 1978, 6 p. (In Russ.).
2. GOST ISO 3675-2014. Crude oil and liquid petroleum products. Laboratory method for determining density with a hydrometer. Introduced 01.01.2017. Standartinform, 2019, 12 p. (In Russ.).
3. OIML G14 Edition 2011(E) Density measurement. International Organization Of Legal Metrology. 2011, 29 p.
4. ISO 2811-1:1997. Paints and varnishes. Determination of density. Part 1. Pycnometric method (MOD). Introduced 01.07.2014. International Organization for Standardization, 1997, 9 p. (In Russ.).
5. Bakovets NV, Konicheva EN. Measuring liquid density in a system for ensuring uniformity of measurements. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2022;3:113-119.
6. Bakovets N.V., Konicheva E.N., Kozadaev K.V. Sources of measurement uncertainty in determining liquid density. Materials of the International Scientific and Technical Conference "Metrology – 2024", pp. 167–169. (In Russ.).
7. GOST OIML R 111-1 – 2009 State system for ensuring the uniformity of measurements. Weights of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3. Part 1. Metrological and technical requirements. (In Russ.).
8. GOST 8.395-80 State system for ensuring the uniformity of measurements. Normal measurement conditions during verification. General requirements. Introduced 01.07.1081. Publishing standards, 1980, 7 p. (In Russ.).
9. R 50.2.041-2004 Recommendations on metrology. "SSEUM. Glass hydrometers. Verification procedure] Federal Agency for Technical Regulation and Metrology, 2004. (In Russ.).
10. Website State Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements. Available at: <http://mediaold.belgim.by/grsi/12532.pdf> (accessed 23.05.2024). (In Russ.).
11. Website State Information Fund for Ensuring the Uniformity of Measurements. Available at: <https://oei.by/grsi/view?id=14477513> (accessed: 23.05.2024). (In Russ.).
12. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement. Translation from English under scientific editorship of prof. Slaev V.A. VNIIM by D.I. Mendelev, 1999, 134 p. (In Russ.).

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

**Перечень статей, опубликованных в журнале
«ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ»
в 2024 г.**

Средства измерений

<i>Амит К. Мишра, Дипак П. Патил</i> Обзор автомобильных КВ антенн с функцией NVIS-связи (in English)	3
<i>Василевич В.П., Збышинская М.Е.</i> Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения	2
<i>Дворников О.В., Бахур В.Н., Бахир А.Г., Лозовский В.М., Чеховский В.А.</i> Измерительный преобразователь напряжения произвольной формы для широкополосного вольтметра переменного тока	3
<i>Егоров С.Ф.</i> Семейство электронных стрелковых тренажёров «СТРИЖ»: исследование математических моделей регистраторов точки прицеливания начального и базового уровней	4
<i>Исаев А.В., Суходолов Ю.В., Сизиков С.В., Ломтев А.А., Лычковский В.А.</i> Влияние уровня дефектного сопротивления изоляции обмоток электрических машин на параметры тока холостого хода	4
<i>Казак А.В., Симончик Л.В.</i> Аппарат генерации воздушной плазменной струи «АЛОЭ»	3
<i>Мельникова Г.Б., Сапсальёв Д.В., Толстая Т.Н., Корольков И.В., Чижик С.А., Жуманазар Н.Н., Баранова А.С., Здоровец М.В.</i> Наноструктурированные покрытия на основе Ленгмюра–Блоджетт плёнок перфтордекановой кислоты для гибких датчиков анализа ионов свинца в воде (in English)	1
<i>Моховиков Д.М., Барбин Е.С., Нестеренко Т.Г., Таловская А.А., Мырзахметов А.С., Кулинич И.В., Баранов П.Ф., Ильященко Д.П.</i> Конвертор поляризации на основе нитрида кремния на изоляторе (in English)	4
<i>Солдатов А.И., Солдатов А.А., Костина М.А., Абуеллаиль А.А.</i> Опыт применения прибора термоэлектрического контроля металлов и сплавов «THERMO FITNESS TESTING» (in English)	2
<i>Сухас Р. Кале, Дипак П. Патил</i> Обзор носимых антенн для технологии 5G и телоцентрической беспроводной связи (in English)	4
<i>Таратын И.А., Реутская О.Г., Горох Г.Г., Сердюк И.В., Федосенко В.С.</i> Газочувствительные характеристики маломощных полупроводниковых газовых сенсоров при воздействии CO и H ₂	1

Методы измерений, контроля, диагностики

Алексеев В.А., Усольцева А.В., Усольцев В.П., Юран С.И. Оценка шероховатости поверхности неметаллических материалов при лазерной обработке	2
Баковец Н.В., Козадаев К.В. Стабилизация температурных условий при определении плотности жидкости методом гидростатического взвешивания.	4
Барбин Е.С., Кулинич И.В., Нестеренко Т.Г., Коледа А.Н., Шестериков Е.В., Баранов П.Ф., Ильященко Д.П. Тонкоплёночная технология корпусирования микроэлектромеханических систем на основе каркасной структуры (in English)	4
Бельков М.В., Кацалап К.Ю., Ходасевич М.А., Королько Д.А., Асеев А.В. Калибровка состава низколегированных сталей интервальным методом частичных наименьших квадратов по эмиссионным спектрам низкого разрешения с коррекцией базовой линии	1
Богдан П.С., Зайцева Е.Г., Степаненко А.И. Исследование критериев для сравнения естественного и светодиодного излучения по спектральному составу (in English)	2
Бударагин Р.В., Саласенко З.Ю., Серов А.Д., Цветкова И.А. Калориметрические измерения ВЧ-сигнала большой мощности	3
Калугин А.И., Кочурова Д.Н., Антонов Е.А., Альес М.Ю. Экспериментальная проверка модели эффективной площади отражения сложных объектов в гауссовом лазерном пучке (in English)	3
Кутепов А.Ю., Крень А.П., Никифоров А.В., Турсунов Н.К. Применение технологий искусственного интеллекта для оперативной диагностики механических характеристик чугуна	3
Латицкая В.А., Кузнецова Т.А., Чижик С.А. Определение трещиностойкости покровного и предметного стекла методом индентирования с визуализацией методом атомно-силовой микроскопии	1
Латицкая В.А., Чижик С.А., Луценко Е.В., Соловьев Я.А., Насевич А.А., Люцко К.С., Петлицкая Т.В., Макаревич В.Б., Гуанбин Ю. Контроль микрорельефа поверхности кристаллов интегральных схем, дефектности гетеро- и субмикроструктур методом атомно-силовой микроскопии (in English)	4
Матвеев В.В., Бехлер И.А., Понитков Е.И., Погорелов М.Г. Методы оценки точности систем гироскопической стабилизации видеокамеры на подвижном объекте	1
Матвеев В.В., Погорелов М.Г., Хомячкова А.Н. Модифицированный метод TRIAD для решения задачи ориентации подвижного объекта	3
Муравьева О.В., Блинова А.В., Денисов Л.А., Богдан О.П. Особенности распространения акустических нормальных волн в тонких пористых листах терморасширенного графита	3
Пилипенко В.А., Ковальчук Н.С., Шестовский Д.В., Жигулин Д.В. Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжигов	2
Пилипенко В.А., Сергейчик А.А., Шестовский Д.В., Солодуха В.А. Структура планарной поверхности кремниевых пластин до и после быстрой термообработки	2
Самошкина Ю.Э., Черниченко А.В. Магнитный круговой дихроизм оксидных плёнок: изучение электронных, магнитных и зарядовых состояний	3
Серенков П.С., Романчак В.М., Грибковский А.В. Морфологический подход к разработке процесса оценивания неопределённости измерений (in English)	2
Степанов М.С., Кошлякова И.Г. Оценка точности метода измерения температуры в процессе микродугового нагрева на основе показателей воспроизводимости и неопределённости (in English)	1
Ясюкевич А.С., Кисель В.Э., Трусова Е.Е., Рачковская Г.Е., Захаревич Г.Б., Подболотов К.Б., Гурин В.С. Определение концентрации ионов Tm^{3+} и Ho^{3+} в стеклянной и кристаллической фазах в оксифторидной стеклокерамике в результате анализа спектров поглощения (in English)	1

The List of the Articles Published in the Journal “DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS” in 2024

Measuring Instruments

<i>Dvornikov O.V., Bakhur U.N., Bakhir A.G., Lazouski U.M., Tchekhovski V.A.</i> Arbitrary Waveform Voltage Measuring Converter for Wideband AC Voltmeter (in Russian)	3
<i>Egorov S.F.</i> Electronic Shooting Simulator Family "STrIzh": Research of Mathematical Models of Target Point Determiners on Entry and Basic Levels (in Russian)	4
<i>Isaev A.V., Suhodolov Yu.V., Sizikov S.V., Lomtev A.A., Lychkovsky V.A.</i> Influence of the Level of Defective Insulation Resistance of Electrical Machine Windings on Parameters of no-Load Current (in Russian)	4
<i>Kazak A.V., Simonchik L.V.</i> Air Plasma Jet Generation Apparatus "ALOE" (in Russian).	3
<i>Melnikova G.B., Sapsaliou D.V., Tolstaya T.N., Korolkov I.V., Chizhik S.A., Zhumanazar N.N., Baranova A.S., Zdorovets M.V.</i> Nanostructured Coatings Based on Langmuir–Blodgett Films of Perfluorodecanoic Acid for Flexible Sensors for the Analysis of Lead Ions in Water	1
<i>Mishra Amit K., Dipak P. Patil</i> Review on HF Band Vehicular Antenna with NVIS Communication	3
<i>MokhovikovcD.M., Barbin E.S., Nesterenko T.G., Talovskaya A.A., Myrzakhmetov A.S., Kulinich I.V., Baranov P.F., Il'yaschenko D.P.</i> Silicon Nitride-on-Insulator Photonics Polarisation Convertor	4
<i>Soldatov A.A., Soldatov A.I., Kostina M.A., Abouellail A.A.</i> Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials	2
<i>Suhas R. Kale, Dipak P. Patil</i> A Review of Wearable Antennas for 5G and Body-Centric Wireless Communication	4
<i>Taratyn I., Reutskaya O., Gorokh G., Serdyuk I., Fedosenko V.</i> Gas-Sensitive Characteristics of Low-Power Semiconductor Gas Sensors to CO and H₂ (in Russian)	1
<i>Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y.</i> Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring (in Russian)	2

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

Alekseev V.A., Usoltseva A.V., Usoltsev V.P., Yuran S.I. Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during Laser Processing (in Russian)	2
Bakovets N.V., Kozadayev K.V. Stabilization of Environmental Conditions when Liquid Density Measuring by Hydrostatic Weighting (in Russian)	4
Barbin E.S., Kulinich I.V., Nesterenko T.G., Koleda A.N., Shesterikov E.V., Baranov P.F., Il'yaschenko D.P. Wafer-Level Packaging of Microelectromechanical Systems Based on Frame Structure	4
Belkov M.V., Catsalap K.Y., Khodasevich M.A., Korolko D.A., Aseev A.V. Calibration of the Composition of Low-Alloy Steels by the Interval Partial Least Squares Using Low-Resolution Emission Spectra with Baseline Correction (in Russian)	1
Bogdan P.S., Zaytseva E.G., Stepanenko A.I. Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation Spectral Distribution	2
Budaragin R.V., Salasenko Z.IU., Serov A.D., Tsvetkova I.A. Calorimetric Measurements of a High-Power RF Signal (in Russian)	3
Kalugin A.I., Kochurova D.N., Antonov E.A., Alies M.Yu. Experimental Verification of Laser Radar Cross Section Model for Complex Targets with Gaussian Beam Irradiation	3
Kutsepau A., Kren A., Nikiforov A., Tursunov N. Application of Artificial Intelligence Technology for Prompt Diagnosis of Cast Iron Mechanical Properties (in Russian)	3
Lapitskaya V.A., Chizhik S.A., Lutsenko E.V., Solovjov J.A., Nasevich A.A., Liutsko K.S., Petlitskaya T.V., Makarevich V.B., Yu Guangbin Control of Integrated Circuits Crystals' Surface Microrelief and Defects of Hetero- and Submicrostructures by the Atomic Force Microscopy Method	4
Lapitskaya V.A., <u>Kuznetsova T.A.</u>, Chizhik S.A. Determination of Crack Resistance of the Cover and Slide Glass by Indentation Method with the Visualization Using Atomic Force Microscopy	1
Matveev V.V., Behler I.A., Ponitkov E.I., Pogorelov M.G. Methods for Assessing the Accuracy of Video Camera Gyroscopic Stabilization Systems on a Moving Object (in Russian)	1
Matveev V.V., Pogorelov M.G., Khomyachkova A.N. Modified TRIAD Method for Solving the Problem of a Moving Object Orientation (in Russian)	3
Muravieva O.V., Blinova A.V., Denisov L.A., Bogdan O.P. The Peculiarities of Acoustic Normal Waves Propagation in Thin Porous Sheets of Thermally Expanded Graphite (in Russian)	3
Pilipenko U.A., Kovalchuk N.S., Shestovski D.V., Zhyhulin D.V. Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure with Long-Term and Rapid Thermal Annealing (in Russian)	2
Pilipenko U.A., Sergeichik A.A., Shestovski D.V., Solodukha V.A. Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid Thermal Treatment (in Russian)	2
Samoshkina Yu., Chernichenko A. Magnetic Circular Dichroism of Oxide Films: Study of Electronic, Magnetic and Charge States (in Russian)	3
Serenkov P.S., Romanchak V.M., Hrybkouski A.V. A Morphological Approach to Development of a Process for Measurement Uncertainty Estimation	2
Stepanov M.S., Koshlyakova I.G. Temperature Measuring Method Accuracy Evaluation in the Microarc Heating Process Based on Reproducibility and Uncertainty Indicators	1
Yasukevich A.S., Kisel V.E., Trusova E.E., Rachkovskaya G.E., Zakharevich G.B., Podbolotov K.B., Gurin V.S. Determination of the Concentration of Tm³⁺ and Ho³⁺ Ions in the Glass and Crystalline Phases in Oxyfluoride Glass Ceramics by Absorption Spectra Analysis	1

ИМЕННОЙ УКАЗАТЕЛЬ

Абуеллаиль А.А.	2	Кацалап К.Ю.	1
Алексеев В.А.	2	Кисель В.Э.	1
Альес М.Ю.	3	Ковальчук Н.С.	2
Амит К. Мишра,	3	Козадаев К.В.	4
Антонов Е.А.	3	Коледа А.Н.	4
Асеев А.В.	1	Королько Д.А.	1
		Корольков И.В.	1
Баковец Н.В.	4	Костина М.А.	2
Баранов П.Ф.	4	Кочурова Д.Н.	3
Баранова А.С.	1	Кошлякова И.Г.	1
Барбин Е.С.	4	Крень А.П.	3
Бахир А.Г.	3	Кузнецова Т.А.	1
Бахур В.Н.	3	Кулинич И.В.	4
Бельков М.В.	1	Кутепов А.Ю.	3
Бехлер И.А.	1		
Блинова А.В.	3	Лапицкая В.А.	1, 4
Богдан О.П.	3	Лозовский В.М.	3
Богдан П.С.	2	Ломтев А.А.	4
Бударагин Р.В.	2	Луценко Е.В.	4
		Лычковский В.А.	4
Василевич В.П.	2	Люцко К.С.	4
Горох Г.Г.	1	Макаревич В.Б.	4
Грибковский А.В.	2	Матвеев В.В.	1, 3
Гуанбин Ю.	4	Мельникова Г.Б.	1
Гурин В.С.	1	Моховиков Д.М.	4
		Муравьева О.В.	3
Дворников О.В.	3	Мырзахметов А.С.	4
Денисов Л.А.	3		
		Насевич А.А.	4
Егоров С.Ф.	4	Нестеренко Т.Г.	4
		Никифоров А.В.	3
Жигулин Д.В.	2		
Жуманазар Н.Н.	1	Патил Дипак П.	3, 4
		Петлицкая Т.В.	4
Зайцева Е.Г.	2	Пилипенко В.А.	2
Захаревич Г.Б.	1	Погорелов М.Г.	1, 3
Збышинская М.Е.	2	Подболотов К.Б.	1
Здоровец М.В.	1	Понитков Е.И.	1
Ильященко Д.П.	4	Рачковская Г.Е.	1
Исаев А.В.	4	Реутская О.Г.	1
		Романчак В.М.	2
Казак А.В.	3		
Кале Сухас Р.	4	Саласенко З.Ю.	3
Калугин А.И.	3		

Самошкина Ю.Э.	3	Усолицев В.П.	2
Сапсальв Д.В.	1	Усолицева А.В.	2
Серов А.Д.	3		
Сергейчик А.А.	2	Федосенко В.С.	1
Сердюк И.В.	1		
Серенков П.С.	2	Ходасевич М.А.	1
Сизиков А.С.	4	Хомячкова А.Н.	3
Симончик Л.В.	3		
Солдатов А.А.	2	Цветкова И.А.	3
Солдатов А.И.	2		
Соловьёв Я.А.	4	Черниченко А.В.	3
Солодуха В.А.	2	Чеховский В.А.	3
Степаненко А.И.	2	Чирик С.А.	1, 4
Степанов М.С.	1		
Суходолов Ю.В.	4	Шестериков Е.В.	4
		Шестовский Д.В.	2
Таловская А.А.	4		
Таратын И.А.	1	Юран С.И.	2
Толстая Т.Н.	1		
Трусова Е.Е.	1	Ясюкевич А.С.	1
Турсунов Н.К.	3		

AUTHOR INDEX

Abouellail A.A.	2	Khodasevich M.A.	1
Alekseev V.A.	2	Khomyachkova A.N.	3
Alies M.Yu.	3	Kisel V.E.	1
Amit K. Mishra	3	Kochurova D.N.	3
Antonov E.A.	3	Koleda A.N.	4
Aseev A.V.	1	Korolko D.A.	1
		Korolkov I.V.	1
Bakovets N.V.	4	Koshlyakova I.G.	1
Bakhir A.G.	3	Kostina M.A.	2
Bakhur U.N.	3	Kovalchuk N.S.	2
Baranov P.F.	4	Kozadayev K.V.	4
Baranova A.S.	1	Kren A.	3
Barbin E.S.	4	Kulinich I.V.	4
Behler I.A.	1	Kutsepau A.	3
Belkov M.V.	1	Kuznetsova T.A.	1
Blinova A.V.	3		
Bogdan O.P.	3	Lapitskaya V.A.	1, 4
Bogdan P.S.	2	Lazouski U.M.	3
Budaragin R.V.	3	Liutsko K.S.	4
		Lomtev A.A.	4
Catsalap K.Y.	1	Lutsenko E.V.	4
Chernichenko A.	3	Lychkovsky V.A.	4
Chizhik S.A.	1, 4		
		Makarevich V.B.	4
Denisov L.A.	3	Matveev V.V.	1, 3
Dvornikov O.V.	3	Melnikova G.B.	1
		Mokhovikov D.M.	4
Egorov S.G.	4	Muravieva O.V.	3
		Myrzakhmetov A.S.	4
Fedosenko V.	1		
		Nasevich A.A.	4
Gorokh G.	1	Nesterenko T.G.	4
Guangbin Yu	4	Nikiforov A.	3
Gurin V.S.	1		
		Patil Dipak P.	3
Hrybkouski A.V.	2	Petlitskaya T.V.	4
		Pilipenko U.A.	2
Il'yaschenko D.P.	4	Podbolotov K.B.	1
Isaev A.V.	4	Pogorelov M.G.	1, 3
		Ponitkov E.I.	1
Kale Suhas R.	4		
Kalugin A.I.	3	Rachkovskaya G.E.	1
Kazak A.V.	3	Reutskaya O.G.	1

Romanchak V.M.	2	Taratyn I.A.	1
		Tchekhovski V.A.	3
Salasenko Z.IU.	3	Tolstaya T.N.	1
Samoshkina Yu.	3	Trusova E.E.	1
Sapsaliou D.V.	1	Tsvetkova I.A.	3
Serdyuk I.	1	Tursunov N.	3
Serenkov P.S.	2		
Sergeichik A.A.	2	Usoltsev V.P.	2
Serov A.D.	3	Usoltseva A.V.	2
Shesterikov E.V.	4		
Shestovski D.V.	2	Vasilevich V.P.	2
Simonchik L.V.	3		
Sizikov A.S.	4	Yasukevich A.S.	1
Soldatov A.A.	2	Yuran S.I.	2
Soldatov A.I.	2		
Solodukha V.A.	2	Zakharevich G.B.	1
Solovjov J.A.	4	Zaytseva E.G.	2
Stepanenko A.I.	2	Zbyshinskaya M.Y.	2
Stepanov M.S.	1	Zdorovets M.V.	1
Suchodolov Yu.V.	4	Zhumanazar N.N.	1
		Zhyhulin D.V.	2
Talovskaya A.A.	4		

Индексы:
74835; 748352

