

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

№ 2

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, заведующий кафедрой «Экспериментальная и теоретическая физика» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

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 27.06.2024. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная.

Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,6. Уч.-изд. л. 7,4. Тираж 45 экз.

Дата выхода в свет 01.07.2024. Заказ № 447.

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

№ 2

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 Viba, *Corresponding Member of the Latvian Academy of Sciences, Doctor of Science (Engineering), Professor, Institute of Mechanics and Mechanical Engineering, Riga Technical University (Riga, Latvia)*

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Alexey P. Shkadarevich, *Academician of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Director of the Scientific and Technical Center "LEMT" of the BelOMO (Minsk, Belarus)*

Konstantin V. Yumashev, *Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, 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

А.И. Солдатов, А.А. Солдатов, М.А. Костина, А.А. Абуеллаиль

Опыт применения прибора термоэлектрического контроля металлов и сплавов «THERMO FITNESS TESTING» (in English).....	84
--	----

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская

Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения.....	95
--	----

Методы измерений, контроля, диагностики

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжигов.....	104
---	-----

П.С. Серенков, В.М. Романчук, А.В. Грибковский

Морфологический подход к разработке процесса оценивания неопределённости измерений (in English).....	110
--	-----

П.С. Богдан, Е.Г. Зайцева, А.И. Степаненко

Исследование критериев для сравнения естественного и светодиодного излучения по спектральному составу (in English).....	120
---	-----

В.А. Алексеев, А.В. Усольцева, В.П. Усольцев, С.И. Юран

Оценка шероховатости поверхности неметаллических материалов при лазерной обработке.....	131
---	-----

В.А. Пилипенко, А.А. Сергейчик, Д.В. Шестовский, В.А. Солодуха

Структура планарной поверхности кремниевых пластин до и после быстрой термообработки.....	142
---	-----

CONTENTS

Measuring Instruments

A.A. Soldatov, A.I. Soldatov, M.A. Kostina, A.A. Abouellail

Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials..... 84

V.P. Vasilevich, M.Y. Zbyshinskaya

Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring (in Russian)..... 95

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

U.A. Pilipenko, N.S. Kovalchuk, D.V. Shestovski, D.V. Zhyhulin

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)..... 104

P.S. Serenkov, V.M. Romanchak, A.V. Hrybkouski

A Morphological Approach to Development of a Process for Measurement Uncertainty Estimation..... 110

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, A.I. Stepanenko

Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation Spectral Distribution..... 120

V.A. Alekseev, A.V. Usoltseva, V.P. Usoltsev, S.I. Yuran

Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during Laser Processing (in Russian) 131

U.A. Pilipenko, A.A. Sergeichik, D.V. Shestovski, V.A. Solodukha

Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid Thermal Treatment (in Russian) 142

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials

A.A. Soldatov¹, A.I. Soldatov¹, M.A. Kostina¹, A.A. Abouellail²

¹National Researcher Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia

²Sphinx University,
Regional Service Rd, New Asyut 71515, Egypt

Received 26.03.2024

Accepted for publication 15.05.2024

Abstract

The article describes experience of practical application of the differential thermoelectric tester "THERMO FITNESS TESTING". Description of the sensor design and results of differential thermoelectromotive force measurement for a large group of metals widely used in Russia are given. Usage of the "THERMO FITNESS TESTING" device to test the quality of R6M5 steel heat treatment is described. Dependence of thermoelectromotive force on the heating temperature which can be used for practical purposes was obtained. Usage the "THERMO FITNESS TESTING" to measure the thickness of a cemented (carburized) layer of 12KH2N4A steel is considered. Dependence of the thermoelectromotive force on the thickness of the cementation layer was also obtained.

Keywords: ThermoEMF, differential sensor, electrode, Seebeck coefficient, nondestructive testing

Адрес для переписки:

Костина М.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический
университет,
пр-т Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия
e-mail: mariyakostina91@mail.ru

Address for correspondence:

Kostina M.A.
National Researcher Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia
e-mail: mariyakostina91@mail.ru

Для цитирования:

Soldatov AA, Soldatov AI, Kostina MA, Abouellail AA.
Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING
Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 87–94.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

For citation:

Soldatov AA, Soldatov AI, Kostina MA, Abouellail AA.
Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING
Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):87–94.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

Опыт применения прибора термоэлектрического контроля металлов и сплавов «THERMO FITNESS TESTING»

А.И. Солдатов¹, А.А. Солдатов¹, М.А. Костина¹, А.А. Абуеллаиль²

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

²Университет Сфинкс,
Региональная служебная дорога, Нью-Асьют 71515, Египет

Поступила 26.03.2024

Принята к печати 15.05.2024

Приведена информация о применении прибора термоэлектрического контроля «THERMO FITNESS TESTING» для контроля металлов и сплавов, которые широко распространены в России. Особенностью прибора является дифференциальный датчик, в конструкции которого используется два нагреваемых электрода. Датчик снабжён системой нагрева и стабилизации температуры горячих электродов. Нагреваемые электроды имеют одинаковую температуру, что позволило получить высокую повторяемость измерения термоЭДС. Описан также пример использования прибора «THERMO FITNESS TESTING» для контроля качества термообработки стали Р6М5. Получена зависимость термоЭДС от температуры нагрева под закалку, которую можно использовать для практических целей. Рассмотрен еще один пример использования прибора «THERMO FITNESS TESTING» для контроля толщины цементованного слоя стали 12Х2Н4А. Также получена зависимость термоЭДС от толщины слоя цементации.

Ключевые слова: ТермоЭДС, дифференциальный датчик, электрод, коэффициент Зеебека, неразрушающий контроль

Адрес для переписки:

Костина М.А.
Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
пр-т Ленина, 30, г. Томск 634050, Россия
e-mail: mariyakostina91@mail.ru

Address for correspondence:

Kostina M.A.
National Researcher Tomsk Polytechnic University,
Lenin Ave., 30, Tomsk 634050, Russia
e-mail: mariyakostina91@mail.ru

Для цитирования:

Soldatov AA, Soldatov AI, Kostina MA, Abouellail AA.
Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING
Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 87–94.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

For citation:

Soldatov AA, Soldatov AI, Kostina MA, Abouellail AA.
Hands-on Experience of THERMO FITNESS TESTING
Device Use for Thermoelectric Evaluation of Metallic Materials.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):87–94.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-87-94

Introduction

After discovery of the Seebeck effect, the thermoelectric method for the testing of metal and alloy products became widely used [1–6]. Thermo-electromotive force (thermoEMF) occurs in a closed circuit of two conductors, where junctions are at different temperatures. This condition is provided by the hot and cold electrodes of the thermoelectric detector, which provide two junctions with different temperatures in contact with the tested product. The thermoEMF value depends on the temperature difference between the hot and cold junction, therefore it must remain unchanged during the measurement process. Thermoelectric testing devices utilize measurement systems of absolute [7–19] and differential thermopower [20–23]. The differential thermoEMF measurement system is preferred due to the higher noise immunity, sensitivity, and stability of the instrument readings. This is due to the same temperature regime at the contact points of the hot electrodes. The simplest testing system based on differential thermopower is shown in Figure 1.

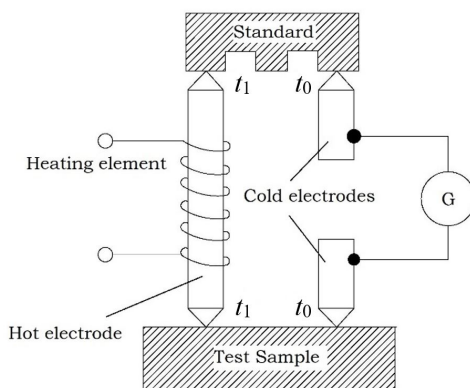


Figure 1 – The simplest differential thermoelectric measurement system

The circuit consists of a sensor, a standard reference, a test specimen, and a galvanometer. The sensor contains a hot electrode with a heater and two cold electrodes. One electrode has a higher temperature than the other. The electrode of the higher temperature (hot electrode) is at temperature t_1 . The other electrode of the lower temperature (cold electrode) is at temperature t_0 , which is usually at ambient temperature. A galvanometer connected to two cold electrodes forms a closed circuit together with a reference, hot electrode, and a test specimen. The differential thermoEMF depends on the temperature difference and the Seebeck coefficients of both samples:

$$E_{dif} = \Delta T(a_x - a_{ref}), \quad (1)$$

a_{ref} is the Seebeck coefficient of the standard, a_x is the Seebeck coefficient of the test specimen; $\Delta T = t_1 - t_0$.

Errors in measuring differential thermoEMF are caused by two factors:

1. Incorrect determination of temperature difference ΔT at measurement points due to imperfection of temperature sensors and their calibration [24].
2. Mismatch of points between which the temperature difference ΔT and the differential thermoEMF E_{dif} are measured.

In addition, the differential sensor shown in Figure 1 is inconvenient for practical use, because it has three independent electrodes: one hot and two cold, and its use in mobile devices is difficult. In addition to the above, it is necessary to provide four contacts: the first is the contact of the hot electrode with the standard, the second is the contact of the hot electrode with the test specimen, the third is the contact of the first cold electrode with the standard and the fourth is the contact of the second cold electrode with the test specimen.

Design features of the developed device

Authors have developed and implemented an original sensor design which is easy to use and is an integral part of the developed differential thermoelectric tester.

The main technical characteristics of the thermoelectric tester are given in Table 1. It should be noted that thermoelectric testing devices are indicator-type devices.

The sensor design and sensor's position on the tested and reference samples is shown in Figure 2a, whereas Figure 2b shows a photograph of the sensor.

It uses two heated electrodes E_1 and E_2 with a common heater. Heated electrodes are made of the same metal or alloy. This sensor design is very convenient for practical use. When measuring differential thermopower, it is necessary to ensure that electrical and thermal contacts of the hot electrodes with the reference and the test specimen are established. Moreover, one hot electrode is only in contact with the reference, and the other is only in contact with the test specimen, while a common heater for the heated electrodes ensures the same temperature at both contact points. In the sensor housing, the electrodes are glued together into a common structure, and an insulating fiberglass gas-

ket is placed between them. A heating element is placed in the resulting round hole inside the electrodes along with a temperature sensor just like the ones installed in temperature-controlled soldering stations. The electrodes are placed in the sensor housing. The resulting thermoEMF is the sum of the EMF of the contact pairs included in the measuring circuit of the sensor:

$$E_{dif} = E_1 \pm E_2 - E_3 + E_4 - E_5, \quad (2)$$

where E_1 is the EMF of the metal pair the first hot electrode- reference; E_2 is the EMF of the metal pair reference-test specimen; E_3 is the EMF of the metal pair the second hot electrode-test specimen; E_4 is the EMF of the metal pair the first hot electrode-copper connecting conductor; E_5 is EMF of the pair of metals: the second hot electrode is a copper connecting conductor. Since the heated electrodes are made of the same alloy, we can write:

$$E_4 = E_5. \quad (3)$$

Table 1

Technical characteristics of the developed differential thermoelectric tester

Parameter	Unit of Measurements	Magnitude
Supply voltage	Volt	220
Sensor temperature	Degree Celsius	130±3
Temperature accuracy	%	±5
Threshold voltage during sorting	μV	0.01...0.4
ThermoEMF measurement range	μV	0...±9.99
Device readiness time	minutes	15
Turning on the "Accepted" signal	The indicator is green	EMF is less than threshold voltage
Turning on the "Not accepted" signal	The indicator is red	EMF is greater than threshold voltage

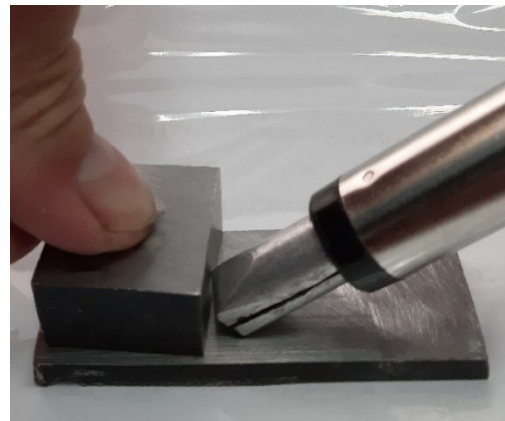
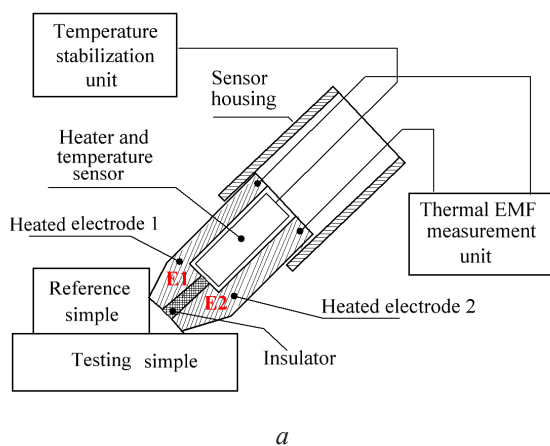


Figure 2 – Differential sensor: *a* – schematic representation of the sensor; *b* – photograph of the sensor

Taking into account expression (3), formula (2) will take the form:

$$E_{dif} = E_1 \pm E_2 - E_3. \quad (4)$$

The reference can be of any shape, because thermoEMF does not depend on the size and shape of the sample. Technologically, it is easiest to produce

a reference metal or alloy in the form of a parallelepiped.

Value of thermopower is influenced by various factors: structural condition, heat treatment, coating, chemical composition, etc., therefore, the standard reference and the test specimen should have only one distinctive feature. For example, if the chemi-

cal composition is inspected, then the other distinguishing features should be the same (heat treatment mode, coating, structural condition, etc.).

It should be noted that not all groups of steel can be inspected. According to Russian GOST standards carbon steels are divided into 3 main groups (A, B, C), where Group A steel is usually used for parts that are not hot in the manufacturing process, Group B steel is used for parts that undergo hot forming (stamping, forging) or heat treatment, and Group C steel is typically used for welded structures. For example, Group A steels, cannot be inspected due to the different chemical composition of the same steel grade. The steels of groups B and C can be inspected, because they have the same chemical composition. The preparation of samples for inspection includes cleaning from rust, oil and dirt. Moreover, cleaning cannot be carried out with a file or a similar tool to exclude the ingress of tool particles into the contact area of the electrodes, which will entail a change in thermopower.

If the reference and the test specimen are the same in chemical composition and structural state, then the thermopower E_1 and E_3 will be the same, but opposite in sign, and E_2 will be zero. If there are deviations in the chemical composition or structural state of the tested specimen from the standard, the thermoEMF E_1 and E_3 will be different. E_2 will not be equal to zero, however, considering the fact that

the contact temperature corresponds to the ambient temperature, its value will be several orders of magnitude lower compared to E_1 and E_3 . The compliance criterion can be selected by the user by changing the value of the "threshold". In most cases, this value corresponds to 0.1 μV and is associated with the tolerance of the chemical composition of the same grade of steel produced at different times or by different manufacturers.

The proposed differential sensor design makes it possible to reduce overall dimensions and increase ease of use, especially in a portable version powered by a battery for operation at sites where there is no power supply network (oil pipelines, cold warehouses for storing supplied metal, etc.).

Application

For acceptance inspection and testing of compliance with the Russian GOST standard of supplied products and sorting of finished products by steel and alloy grades, thermoEMF measurements of the most widely used steel grades in Russia were carried out using the developed differential thermoelectric tester for metals and alloys.

Results of differential thermoEMF measurements are given in Table 2, where columns list different steel grades used in the manufacture of the standard reference, and rows indicate test specimens.

Table 2

Values of differential thermoEMF of some of the widely used steel grades, denoted in Russian Cyrillic alphabet between parentheses

Steel grade	9KHS (9XC)	R6M5 (P6M5)	3KH3M3F (3X3M3Φ)	4KH4VMF (ДН22)	KH12MF (X12MΦ)	6KHV2S (6XB2C)	U8A (Y8A)	KH12F1 (X12Φ1)	KHVG (XBГ)
9KHS (9XC)	0 ±0.05	-0.95 ±0.05	-1.35 ±0.05	-0.90 ±0.05	-1.25 ±0.05	-0.45 ±0.05	-0.60 ±0.05	-1.30 ±0.05	-0.80 ±0.05
R6M5 (P6M5)		0 ±0.05	-0.30 ±0.05	+0.15 ±0.05	-0.25 ±0.03	+0.55 ±0.05	+0.30 ±0.05	-0.30 ±0.05	+0.25 ±0.05
3KH3M3F (3X3M3Φ)			0 ±0.05	+0.40 ±0.05	+0.10 ±0.05	+0.70 ±0.05	+0.75 ±0.05	+0.12 ±0.05	+0.50 ±0.05
4KH4VMF (ДН22)				0± 0.05	-0.35 ±0.05	+0.45 ±0.05	+0.40 ±0.05	-0.30 ±0.05	+0.20 ±0.05
KH12MF (X12MΦ)					0± 0.05	+0.70 ±0.03	+0.60 ±0.05	-0.10 ±0.05	+0.45 ±0.05
6KHV2S (6XB2C)						0 ±0.03	-0.15 ±0.03	-0.85 ±0.05	-0.25 ±0.5
U8A (Y8A)							0 ±0.03	-0.70 ±0.05	-0.10 ±0.05
KH12F1 (X12Φ1)								0 ±0.05	+0.55 ±0.05

Continuation of Table 2

Steel grade	20KH (20X)	SHKH15 (ШХ15)	KH12M (X12M)	KH12F1 (X12Φ1)	30 (Ст.30)	45 (Ст.45)	U8 (Y8)	U12 (Y12)
20KH (20X)	0 ±0.05	0.50 ±0.05	0.90 ±0.05	1.90 ±0.05	0.50 ±0.05	0.60 ±0.05	0.75 ±5	0.80 ±0.05
SHKH15 (ШХ15)		0 ±0.05	1.25 ±0.05	2.00 ±0.05	0.12 ±0.05	0.20 ±0.05	0.50 ±0.05	0.55 ±0.05
KH12M (X12M)			0 ±0.03	1.00 ±0.05	1.35 ±0.05	1.45 ±0.05	1.60 ±0.05	1.65 ±0.05
KH12F1 (X12Φ1)				0 ±0.03	2.05 ±0.05	2.15 ±0.05	2.40 ±0.05	2.45 0±0.05
30 (Ст.30)					0 ±0.05	-0.10 ±0.05	0.10 ±0.05	0.15 ±0.05
45 (Ст.45)						0 ±0.05	0.20 ±0.05	0.25 ±0.05
U8 (Y8)							0 ±0.05	0.05 ±0.05

From Table 2 it can be noted that some pairs have very close thermoEMF values. For example, KH12F1 steel and KH12MF steel, as well as KHVG steel and U8A steel. In Table 2, the pairs of steel 30 and steel 45, as well as steel U8 and steel U12, have similar thermoEMF values. Therefore, errors are possible during verification of supplies and sorting of finished products of these pairs of steels. Other steel grades have a greater difference in thermoEMF and there are no problems with their sorting.

The developed thermoelectric testing device for metals and alloys was used to inspect the quality of heat treatment of R6M5 steel, of which 10 samples were used to study the dependence of thermopower on the heating temperature. The samples were heated in a CHO 24/1250 furnace with a temperature range of 1150–1250 °C. The step of temperature change was 10 degrees. Quenching was carried out by cooling in oil. A sample of heat-treated steel of the same grade, heated to 1225 °C, was used as a reference. The resulted dependence of measured differential thermoEMF on temperature is shown in Figure 3. The confidence interval is 7 %.

Before inspecting another steel grade, it is necessary to conduct preliminary studies on the dependence of thermoEMF on the heating temperature. In addition, it should be considered that when heated, a decarbonized layer appears on the sample surface, which has a strong effect on the value of thermoEMF, therefore it must be removed before measurement.

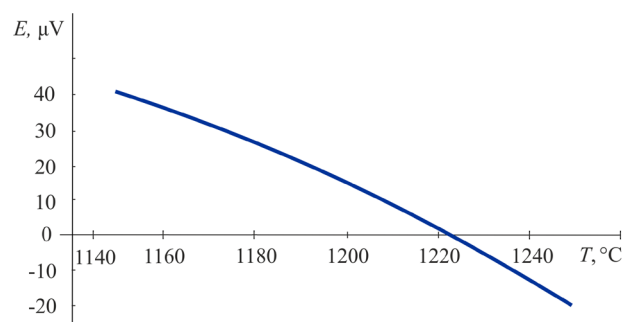


Figure 3 – Dependence of differential thermoEMF on heating temperature for hardening of R6M5 steel

The main controlling parameter of chemical and thermal treatment is the depth of the saturated layer. To inspect the depth of the saturated layer, the metallographic method is traditionally used, which is a direct inspection method that is capable of determining the depth of the cemented or nitrided layer with high accuracy. Nonetheless, this method of inspection is considered destructive because it requires the preparation of a metallographic specimen and, in addition, the testing procedure is lengthy. To assess the possibility of using the developed differential thermoelectric tester to inspect the depth of the cemented layer, the dependences of the differential thermoEMF on the depth of the layer on the sample were plotted. To study the dependence of thermopower on the thickness of the cemented layer, samples of 12X2H4A steel were prepared, subjected to cementation, quenching and tempering. The change in the

thickness of the cementation layer was achieved by grinding the surface of the samples. The size of the sanded layer was 0.2 mm each time. At the same time, the thickness of the cemented layer was inspected metallographically. After each grinding, the differential thermoEMF was measured. The standard reference was made of the same grade of steel but was not cemented.

The differential thermoEMF along the depth of the ground layer was determined at each step using 5 measurements. The time of one measurement is no more than 3 s. The obtained dependence (Figure 4) can be used as a calibration dependence to determine the depth of the cemented steel layer.

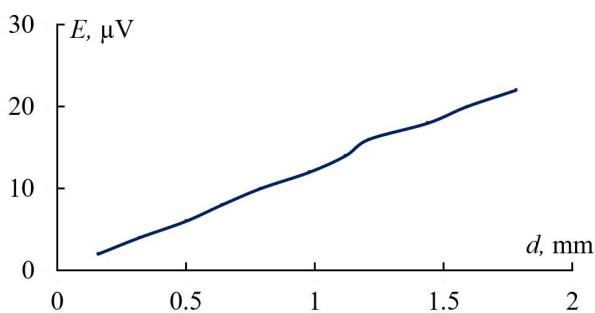


Figure 4 – Dependence of the differential thermoEMF on the thickness of the cemented layer

The confidence interval for the experimental dependence presented in Figure 4 is 6.5 %.

As can be seen from Figure 4, the change in differential thermoEMF from the thickness of the cemented layer is almost linear.

To inspect the thickness of the cemented or nitrided layer on another steel grade, it is necessary to first obtain its dependence of the thermoEMF on the thickness of the cemented layer and use it for calibration.

Conclusion

The thermoelectric tester developed by the authors has found application in various industries for incoming inspection of supplied steel, such as quality control of heat treatment, determining the presence of a decarburized layer and its depth, and determining the thickness of the steel carburization layer. All commercially produced portable thermoelectric testing devices do not implement the differential sensor due to its bulky and inconvenient design. Hence, their main drawback is the change in thermoEMF when the hot electrode is cooled due

to heat transfer to the cold sample under test. The authors proposed an original design of a differential sensor that ensures the same temperature regime of hot electrodes, as well as ease of operation with such a sensor. A simultaneous change in the temperature of two hot junctions leads to a change in the absolute emf of each hot junction, but the difference remains unchanged.

A linear dependence of thermoEMF on the heating temperature for hardening R6M5 steel has been established, which can be used to assess the quality of heat treatment. Moreover, with an increase in the heating temperature for hardening from 1150 to 1250 °C, the thermoEMF decreases from 40 μV to $-20 \mu V$. The authors also established a linear dependence of thermoEMF on the thickness of the cemented layer of steel 12X2H4A. With an increase in the thickness of the cemented layer from 0.02 to 1.8 mm, the thermoEMF increases from 2 to 22 μV . This relationship can be used to evaluate the quality of cementation.

To sort widely used steel grades, during the practical use of the device, differential thermoEMF was measured for 15 steel grades. Most of them have large differences in thermoEMF and can be accurately determined. However, minor differences ($0.05 \pm 0.05 \mu V$) were revealed for such pairs as: KH12F1 – KH12MF, KHVG – U8A, Steel 30 – Steel 45 and U8 – U12, which makes it difficult to sort these steel grades.

One of the possible ways to solve this problem, according to the authors, may be a multi-temperature regime. If the thermoEMF of the marked pairs of metals varies in temperature (different slope of the characteristics or their nonlinearity), it is possible to measure the thermoEMF at several hot junction temperatures and process the obtained data. This field of research is a key focus for the authors.

References

1. Carreon H. Thermoelectric detection of spherical tin inclusions in copper by magnetic sensing. *Journal of Applied Physics*. 2000;88(11):6495.
DOI: 10.1063/1.1322591
2. Carreon H. Thermoelectric Nondestructive Evaluation of Residual Stress in Shot-Peened Metals. *Research in Nondestructive Evaluation*. 2002;14(2):59–80.
DOI: 10.1080/09349840209409705
3. Nagy PB. Non-destructive methods for materials' state awareness monitoring. *Insight: Non-Destructive*

Testing and Condition Monitoring. 2010;52(2):61–71.

DOI: 10.1784/insi.2010.52.2.61

4. Li JF. and et al. High-performance nanostructured thermoelectric materials. *Npg Asia Mater.* 2010;2(4):152–158. **DOI:** 10.1038/asiamat.2010.138

5. Kikuchi M. Dental alloy sorting by the thermoelectric method. *European Journal of Dentistry.* 2010;4(1):66–70.

6. Dragunov VK, Goncharov AL. New approaches to the rational manufacturing of combined constructions by EBW. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2019;681:012010.

DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012010

7. Goncharov A. [et al]. Research of thermoelectric effects and their influence on electron beam in the process of welding of dissimilar steels. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 2020;759(1):012008, **DOI:** 10.1088/1757-899X/759/1/012008

8. Kharitonov IA, Rodyakina RV, Goncharov AL. Investigation of magnetic properties of various structural classes steels in weak magnetic fields characteristic for generation of thermoelectric currents in electron beam welding. *Solid State Phenomena.* 2020;299:1201–1207. **DOI:** 10.4028/www.scientific.net/SSP.299.1201

9. Carreon H, Medina A. Nondestructive characterization of the level of plastic deformation by thermoelectric power measurements in cold-rolled Ti–6Al–4V samples. *Nondestructive Testing and Evaluation.* 2007;299:311. **DOI:** 10.1080/10589750701546960

10. Carreon H. Detection of fretting damage in aerospace materials by thermoelectric means. *Nondestructive Characterization for Composite Materials, Aerospace Engineering, Civil Infrastructure, and Homeland Security.* 2013;8694. **DOI:** 10.1117/12.2009448

11. Lakshminarayan B, Carreon H, Nagy P, Monitoring of the Level of Residual Stress in Surface Treated Specimens by a Noncontacting Thermoelectric Technique. *AIP Conference Proceedings.* 2003;657:1523–1530. **DOI:** 10.1063/1.1570311

12. Carreon H. Evaluation of Thermoelectric Methods for the Detection of Fretting Damage in 7075-T6 and Ti-6Al-4V Alloys. *Characterization of Minerals, Metals, and Materials.* 2015;435–442.

DOI: 10.1007/978-3-319-48191-3_53

13. Carreon M, Barriuso S, Barrera G, González-carrasco JL, Caballero F. Assessment of blasting induced effects on medical 316 LVM stainless steel by contacting and non-contacting thermoelectric power techniques. *Surface and Coatings Technology.* 2012;2942–2947. **DOI:** 10.1016/J.SURFCOAT.2011.12.026

14. Goncharov AL. Investigation of the thermal electromotive force of steels and alloys of different structural

grades in electron beam welding. *Welding International.* 2011;25(9):703–709.

DOI: 10.1080/09507116.2011.566744

15. Goncharov AL. [et al]. Investigation of thermoelectric temperature dependences for construction materials of various structural classes. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering.* 2019;681:012017.

DOI: 10.1088/1757-899X/681/1/012017

16. Li JF, Liu WS, Zhao LD, Zhou M. High-performance nanostructured thermoelectric materials. *Npg Asia Mater.* 2010;2(4):152–158.

DOI: 10.1038/asiamat.2010.138

17. Ciylan B, Yilmaz S. Design of a thermoelectric module test system using a novel test method. *International Journal of Thermal Sciences.* 2007;46(7):717–725. **DOI:** 10.1016/j.ijthermalsci.2006.10.008

18. Soldatov AI. [et al]. Control system for device «thermotest». 2016 International Siberian Conference on Control and Communications (SIBCON). 2016;1-5.

DOI: 10.1109/SIBCON.2016.7491869

19. Soldatov AA, Seleznev AI, Fiks II, Soldatov AI, Kröning KhM. Nondestructive proximate testing of plastic deformations by differential thermal EMF measurements. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2012;48(3):184–186. **DOI:** 10.1134/S1061830912030060

20. Carreon H. Thermoelectric Detection of Fretting Damage in Aerospace Materials. *Russian Journal of Nondestructive Testing.* 2014;50(11):684–692.

DOI: 10.1134/S1061830914110102

21. Soldatov AI, Soldatov AA, Kostina MA, Kozhemyak OA. Experimental studies of thermoelectric characteristics of plastically deformed steels ST3, 08KP and 12H18N10T. *Key Engineering Materials.* 2016;685:310–314.

DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.685.310

22. Soldatov AI, Soldatov AA, Sorokin PV, Abouel-lail AA, Obach II, Bortalevich VY, Shinyakov YA, Sukhorukov MP. An experimental setup for studying electric characteristics of thermocouples. *SIBCON 2017 – Proceedings.* 2017;79985342017.

DOI: 10.1109/СИБКОН.2017.7998534

23. Xuan XC. [et al]. A general model for studying effects of interface layers on thermoelectric devices performance. *International Journal of Heat and Mass Transfer.* 2002;45(26):5159–5170.

DOI: 10.1016/S0017-9310(02)00217-X

24. Burkov AT. [et al]. Methods and technique for thermopower and electrical conductivity measurements of thermoelectric materials at high temperatures. *Scientific and technical bulletin of information technologies, mechanics and optics.* 2015;15(2):173–195. (In Russ.)

DOI: 10.17586/2226-1494-2015-15-2-173-195

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская

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

Поступила 23.11.2023

Принята к печати 24.04.2024

Точные и надёжные измерения суммарного потока солнечного излучения позволяют оценить эффективность использования наземных автономных фотоэлектрических систем энергообеспечения в различных метеорологических условиях. Это даёт возможность более точно прогнозировать во времени объёмы выработки энергии, параметры аккумуляторных и ёмкостных накопителей и сроки окупаемости затрат. Целью настоящей работы являлось создание полупроводниковой структуры и технологии фотоэлектрического преобразователя с двусторонней светочувствительностью и экстремально высокой эффективностью использования альбедо. Разработан фотоэлектрический датчик измерения интенсивности солнечного излучения с двусторонней светочувствительностью, который, в отличие от традиционных термоэлектрических пиранометров, является малоинерционным, а его спектральная чувствительность может быть достаточно близкой к этому показателю у силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволило оценивать уровень инсоляции, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра. Практически реализовано создание лабораторного измерительного стенда для проверки работоспособности датчика. Проведены моделирование и экспериментальные исследования характеристик датчика, подтверждающие адекватность модели и его работоспособность. Двусторонняя светочувствительность датчика позволяет одновременно с прямой и рассеянной составляющими солнечного излучения контролировать составляющую, отражённую от поверхности земли, давая более полную информацию об энергетическом потенциале Солнца в месте расположения фотоэлектрической системы электроснабжения.

Ключевые слова: поток солнечного излучения, фотоэлектрический датчик, двусторонняя светочувствительность, альбедо

Адрес для переписки:

Збышинская М.Е.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: 10mash@mail.ru

Address for correspondence:

Zbyshinskaya M.Y.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: 10mash@mail.ru

Для цитирования:

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская.
Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 2. С. 95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

For citation:

Vasilevich V.P., Zbyshinskaya M.Y.
Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(2):95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring

V.P. Vasilevich, M.Y. Zbyshinskaya

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

Received 23.11.2023

Accepted for publication 24.04.2024

Abstract

Accurate and reliable measurements of the total solar radiation flux make it possible to evaluate the efficiency of using stand-alone photovoltaic systems in various meteorological conditions. These measurements allow more accurately predict in time the energy production volume, accumulator and capacitive storage devices parameters and the payback period. Research purpose was to study the possibility of creating a photoelectric sensor and a method of uninterrupted measurement based on this sensor which allows to measure total solar radiation flux including its direct, diffused and reflected components simultaneously. The photovoltaic sensor with bifacial photosensitivity was manufactured and applied, which is low-inertia comparing to traditional thermoelectric pyranometers, and its spectral sensitivity is quite close to the same parameter of photovoltaic power supply system. It creates the possibility to estimate the insolation level capable to be completely converted into electrical energy without an ineffective heat-generating long-wavelength part of the solar spectrum. A laboratory measuring stand was made to test the sensor's operability. Modeling and experiments' the sensor parameters were carried out and confirmed its operability. The bifacial photosensitivity sensor allows to control simultaneously direct, diffused and reflected from the earth's surface components of solar radiation, what gives more complete information about the energy potential of the photovoltaic power supply system location.

Keywords: solar radiation flux, photovoltaic sensor, bifacial photosensitivity, albedo

Адрес для переписки:

Збышинская М.Е.
Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,
ул. П. Бровки, 6, г. Минск 220013, Беларусь
e-mail: 10mash@mail.ru

Address for correspondence:

Zbyshinskaya M.Y.
Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics,
Brovki str., 6, Minsk 220013, Belarus
e-mail: 10mash@mail.ru

Для цитирования:

В.П. Василевич, М.Е. Збышинская.
Фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Приборы и методы измерений. 2024. Т. 15. № 2. С. 95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

For citation:

Vasilevich VP, Zbyshinskaya MY.
Bifacial Photovoltaic Sensor for Insolation Energy Resource Monitoring. Devices and Methods of Measurements. 2024;15(2):95–103. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-95-103

Введение

Как правило мониторинг интенсивности прямого, рассеянного и отражённого солнечного излучения метеорологическими станциями выполняется термоэлектрическими пиранометрами с плоской спектральной зависимостью, работа которых основана на термопарном эффекте Зеебека. Термопарный датчик пиранометра нагревается от солнечного излучения и преобразует повышение температуры в слабый электрический сигнал. Такие датчики предлагаются и для контроля инсоляции в системах солнечной энергетики, обладают высокой инерционностью (18–60 с), сложны в изготовлении и имеют высокую стоимость [1, 2].

Фотоэлектрический датчик солнечного излучения – оптоэлектронный полупроводниковый прибор, преобразующий энергию фотонов в электроэнергию. Если внешняя цепь датчика замкнута, то в ней, при освещении светочувствительной стороны датчика, протекает ток, величина которого линейно зависит от интенсивности излучения. Совпадение спектра чувствительности датчика и солнечной батареи фотоэлектрической системы сводит к минимуму разброс данных из-за переменных спектральных условий. Инерционность фотоэлектрического датчика не более 10 мс, что на 3 порядка ниже, чем у термоэлектрического пиранометра. Датчики изготавливаются в виде диодной структуры из монокристаллического кремния, подключённой к шунту. Из-за низкого сопротивления шунта элемент работает в режиме, близком к короткому замыканию. Температурный коэффициент тока короткого замыкания создает незначительную погрешность [3].

Прототип фотоэлектрических преобразователей (ФЭП) с двусторонней светочувствительностью был создан в 1966 г., а уже в 1970-х гг. Россия впервые применила их в космосе для энергообеспечения спутников. В 1980 г. стало ясно, что дополнительное использование отражённого от поверхности земли солнечного излучения (альбедо) увеличивает мощность двусторонних солнечных элементов на (5–30) %, однако высокая себестоимость на долгое время задержала их промышленное производство [4].

Исследования двусторонних солнечных элементов (СЭ), выполненные на основе

монокристаллической кремниевой полупроводниковой подложке, базировались на определении вольтамперных (ВАХ), вольт-ваттных (ВВtX) характеристик и обеспечении внешней квантовой эффективности. Результаты показали, что двусторонние кремниевые СЭ – очень многообещающая технология с хорошими электрическими характеристиками и высоким значением эффективности фотопреобразования [5].

Создан коммерческий двусторонний СЭ на основе кремния *p*-типа с пассивацией поверхностей плёнкой нитрида кремния и рекордным КПД более 22 % и 15 % на фронтальной и тыльной сторонах соответственно при стандартных условиях измерения (АМ 1,5, 1000 Вт/м², 25 °С) [6].

В 2021 г. анализ рынка PV-индустрии показал, что двусторонние ФЭП в модульном исполнении стали доступны по той же цене за пиковый ватт, что и их односторонние эквиваленты. Причина этого в том, что модули из двусторонних СЭ требуют априори двойного остекления, и в то же время производители односторонних модулей чаще переходят на модули с двойным стеклом для увеличения срока службы таких модулей и продления гарантии на продукцию. Предполагается, что при использовании двусторонних модулей можно ожидать увеличения годовой выработки энергии до 30 % [7].

Современная двусторонняя солнечная фотоэлектрическая технология, основана на изучении почти 400 статей, опубликованных с 1979 г. Проведённые исследования направлены на повышение производительности и расширение общего вклада двусторонней технологии в быстро расширяющийся глобальный рынок солнечной энергии [8].

Запатентованы различные конструкции высокоэффективных фотоэлектрических преобразователей с двусторонней светочувствительностью, использующих прямое и рассеянное излучение, а также альбедо [9–13].

Двусторонние фотоэлектрические модули являются многообещающей альтернативой обычным односторонним фотоэлектрическим модулям, однако индустрия двусторонних ФЭП до сих пор находится на стадии становления, и предстоит ещё много работы, прежде чем она станет полностью зрелой технологией.

Например, существует нерешённая задача по использованию этой технологии для постоянного мониторинга суммарного потока солнечного излучения, включая его отражённую составляющую, путём моделирования конструктивных и электрических характеристик ФЭП [14].

Целью настоящей работы являлось создание полупроводниковой структуры и технологии фотоэлектрического преобразователя с двусторонней светочувствительностью, а также экстремально высокой эффективностью использования альбедо.

Основная часть

Смоделирован фотоэлектрический датчик суммарного солнечного излучения на основе монокристаллического кремния, который использовался в качестве первичного преобразователя при измерениях интенсивности потока солнечного излучения, поступающей от Солнца, неба и от подстилающей поверхности земли. Фотоэлектрический датчик преобразует оптическое излучение в аналоговый электрический сигнал. Для моделирования полупроводниковой структуры ФЭП использована среда COMSOL Multiphysics.

Модельная полупроводниковая структура двустороннего датчика показана на рисунке 1. Как видно из рисунка, фотоэлектрический преобразователь с двусторонней светочувствительностью включал в себя спаянные между собой тыльными сторонами два идентичных СЭ, базовые области (1) которых, выполнены из кремния p -типа проводимости, легированного бором; эмиттерные области n +-типа (2) СЭ, сформированные диффузией фосфора, образуют с базовыми областями гомогенные n +- p -переходы; высоколегированные слои p +-типа (3), полученные диффузией бора, образуют с базовой областью изотипные p - p +-переходы; расположенные на тыльных сторонах СЭ сплошные металлические контакты (4) выполнены из химически осаждённого на кремний никеля, покрытого слоем припоя; на освещаемых сторонах СЭ металлические контактные сетки (5) выполнены из химически осаждённого на кремний никеля, покрытого слоем припоя; паяное соединение тыльных контактов (6); просветляющие плёнки из оксида

тантала Ta_2O_5 (7) расположены на эмиттерных областях СЭ; внешний металлический вывод (8) из медной фольги, покрытой слоем припоя; прямая и рассеянная составляющая светового потока (9); отражённая составляющая светового потока (10).

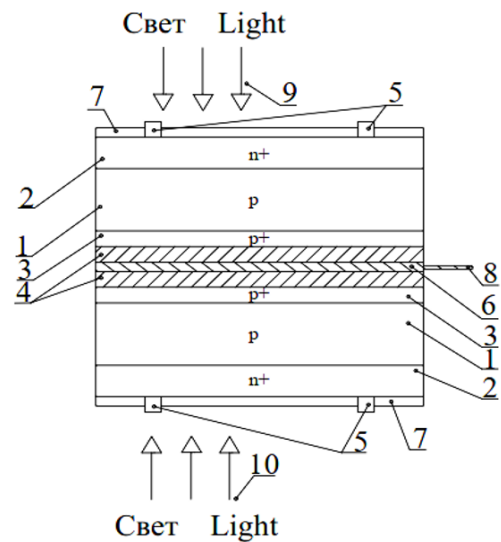


Рисунок 1 – Модельная полупроводниковая структура датчика с двусторонней светочувствительностью: 1 – базовые области; 2 – эмиттерные области; 3 – слои p +-типа; 4 – металлические контакты; 5 – металлические контактные сетки; 6 – паяное соединение тыльных контактов; 7 – просветляющие плёнки; 8 – внешний металлический вывод; 9, 10 – световой поток

Figure 1 – Semiconductor structure of the sensor with bi-facial photosensitivity: 1 – p-type base; 2 – n +-type layer; 3 – p +-type layer; 4 – metal contacts; 5 – grid metal contact; 6 – solder connection of the back contacts; 7 – antireflective film; 8 – external metal contact; 9, 10 – light flux

Технология изготовления двустороннего фотоэлектрического датчика легко реализуется на практике и не включает использования редких и драгоценных металлов. Применение для создания антиотражающего покрытия наноструктурированной плёнки оксида тантала толщиной 75 нм обусловлено простотой её нанесения методом центрифугирования из плёнообразующего раствора, аномально низким коэффициентом отражения света на длинах волн с максимальной энергией в диапазоне 0,5–0,7 мкм и химической стойкостью к электролиту для химического никелирования. Используемые для создания датчика два идентичных СЭ изготовлены на основе гомогенного кремниевого p - n -перехода имели КПД 18 %.

Новизна проведённых исследований заключается в оригинальности симметричной конструкции полупроводниковой структуры ФЭП с двусторонней светочувствительностью, содержащей два p - n -перехода для разделения носителей заряда вместо одного как у аналогов. Таким образом достигается одинаковая эффективность преобразования света как с фронтальной, так и с тыльной стороны ФЭП, в то время как у лучшего аналога КПД

с тыльной стороны значительно ниже, чем КПД с фронтальной: 15 % и 22 % соответственно [6].

Модель полупроводниковой структуры СЭ с двусторонней светочувствительностью получена на основе исходных данных, включая его структурные, электрические, оптические и геометрические параметры. Конструктивные параметры СЭ для моделирования приведены в таблице 1.

Таблица 1/Table 1

Исходные параметры моделируемой конструкции солнечного элемента

Parameters of the solar cell model

Параметр Parameter	Значение Value
Диаметр СЭ, мм SC diameter, mm	100
Толщина ФЭП, мкм Photovoltaic converter thickness, μm	350
Толщина базовых областей, мкм p -type base thickness, μm	150
Толщина эмиттера, мкм n +-type layer thickness, μm	1
Удельное сопротивление базы, Ом·см Base resistivity, $\Omega\cdot\text{cm}$	10
Поверхностное сопротивление эмиттера, Ом/□ n +-type layer surface resistance, $\Omega/\square$	40
Антиотражающее покрытие AR coating	Ta_2O_5
Толщина слоя антиотражающего покрытия, нм AR coating thickness, nm	75
Фотоактивная площадь поверхности ФЭП, cm^2 Photoactive surface area of photovoltaic converter, cm^2	70x2
Площадь сетчатого металлического контакта, cm^2 Metal contact area, cm^2	6,6
Металлический контакт к кремнию Metal contact to silicon	Ni-припой ПОС-61 Ni-solder POS-61

При моделировании СЭ использовали следующие характеристики и допущения:

- стандартный спектр на поверхности Земли AM1,5G4;
- показатель преломления антиотражающего покрытия Ta_2O_5 2,2;
- скорости генерации и рекомбинации носителей в зависимости от расстояния от поверхности СЭ при условии стандартного

солнечного спектра (AM 1.5).

В результате моделирования получены фотоэлектрические параметры СЭ: вольтамперная и вольт-ваттная характеристики при различных значениях интенсивности излучения. На рисунке 2 показаны результаты моделирования семейства вольтамперной, а на рисунке 3 – семейства вольт-ваттной характеристик СЭ.

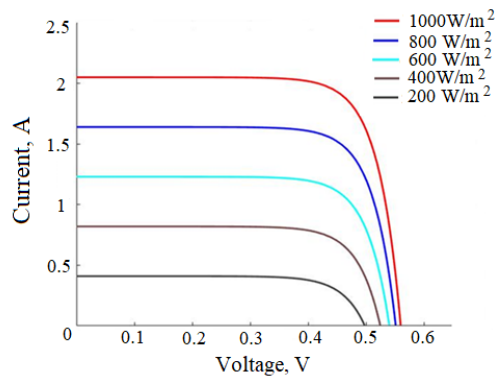


Рисунок 2 – Модельные вольтамперные характеристики солнечного элемента при различных условиях освещения

Figure 2 – Solar cell current-voltage curve model under various lighting conditions

Рисунки 2 и 3 демонстрируют полученные модельные семейства вольтамперных и вольт-

ваттных характеристик соответственно при различных значениях интенсивности солнечного излучения. Основные модельные электрические параметры СЭ, полученные из семейств ВАХ и ВВТХ сведены в таблицу 2.

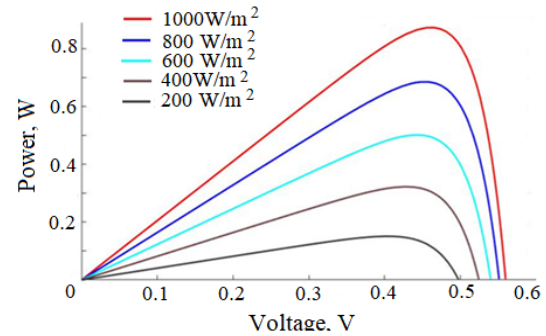


Рисунок 3 – Модельные вольт-ваттные характеристики солнечного элемента при различных условиях освещения

Figure 3 – Solar cell power-voltage curve model under various lighting conditions

Таблица 2/Table 2

Основные электрические параметры солнечного элемента при условии интенсивности потока излучения 1000 Вт/м², спектр АМ 1,5

Main electrical characteristics of the solar cell under lighting condition AM 1,5

Параметры Parameters	Значение Value
Ток короткого замыкания, А Short circuit current, A	2.05
Напряжение холостого хода, В Open-circuit voltage	0.56
Ток максимальной мощности, А Maximum power current, A	1.79
Напряжение максимальной мощности, В Maximum power voltage, V	0.51
Максимальная мощность, Вт Maximum power voltage, W	0.92
Коэффициент заполнения, FF Fill factor, FF	0.78

В результате моделирования получена имитационная модель, позволяющая отображать семейство ВАХ и ВВТХ СЭ в зависимости от уровня интенсивности солнечного излучения. Разработанная модель описывает реальный

ФЭП лишь с некоторой степенью приближения, с учётом принятых допущений.

Изготовлен оригинальный трёхвыводной фотоэлектрический датчик диаметром 100 мм с двусторонней светочувствительностью

на основе монокристаллического кремния *p*-типа с симметричной относительно общей базовой области биполярной структурой *n*+–*p*–*n*+. Датчик смонтирован на зеркальном пьедестале с помощью подвижного карданного устройства, позволяющего менять ориентацию датчика относительно пьедестала в различных плоскостях, создавая эффекты отражения света от подстилающей поверхности.

В процессе измерения параметров изготовленного датчика полученные результаты показали, что ток короткого замыкания ФЭП $I_{кз}$ практически линейно зависит от интенсивности света. Таким образом, можно утверждать, что, измеряя при освещении параметр $I_{кз}$, и при соответствующей калибровке можно получить идеальный измеритель интенсивности источника света с линейной шкалой.

Для проверки адекватности полученной модели и работоспособности разработанного датчика с двусторонней светочувствительностью собран лабораторный стенд по электрической схеме, изображённой на рисунке 4.

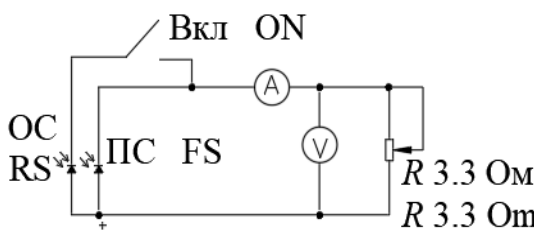


Рисунок 4 – Электрическая схема лабораторного стенда: ПС – прямая сторона датчика, обращённая к Солнцу; ОС – обратная сторона датчика, обращённая к зеркальному пьедесталу

Figure 4 – Electrical circuit of the laboratory equipment: FS – the forward side of the sensor turned to the Sun; RS – the reverse side of the sensor facing the mirror podium

Электрическая схема стенда позволила измерять параметры датчика: ток короткого замыкания $I_{кз}$ и напряжение холостого хода $U_{хх}$ с фронтальной стороны и обеих светочувствительных сторон при натурном солнечном освещении одновременно, что снижало ошибку их сравнения. Экспериментальные, модельные и расчётные данные сведены в таблицу 3.

Таблица 3/Table 3

Экспериментальные, расчётные и модельные параметры датчика

Experimental, calculated and model parameters of the sensor

Параметр датчика Sensor parameter	Фронтальная сторона Forward side	Тыльная сторона Reverse side	Обе стороны Both sides
Экспериментальные параметры при натурном солнечном излучении 1000 Вт/м ² Experimental parameters at full-scale solar radiation of 1000 W/m ²			
$I_{кз}, A / I_{sc}, A$	1.90	0.4	2.30
$U_{хх}, B / OCV, V$	0.560	0.558	0.560
Филл-фактор, FF /Fill Factor, FF	0.78	0.78	0.78
Альбедо, % / Albedo, %		20	
Мощность ФЭП, Вт / Photovoltaic converter power, W	0.830	0.174	1.005
Прирост мощности / Power increment			21
Модельные параметры при интенсивности излучения 1000 Вт/м ² Model parameters at a radiation intensity of 1000 W/m ²			
$I_{кз}, A / I_{sc}, A$	2.05	0.41	2.46
$U_{хх}, B / OCV, V$	0.560	0.560	0.560
Филл-фактор, FF /Fill Factor, FF	0.78	0.78	0.78
Альбедо, % / Albedo, %		20	
Мощность ФЭП, Вт / Photovoltaic converter power, W	0.895	0.179	1.074
Прирост мощности / Power increment			20

Как свидетельствуют данные таблицы 3, наблюдается хорошая сходимост данных по ключевым экспериментальным и модельным параметрам датчика, что свидетельствует об адекватности полученной модели. Поскольку КПД с фронтальной и тыльной сторон в отличие от аналогов одинаковые, датчик имеет предельно высокий потенциал фотоэлектрического преобразования альбеда. Разработанный фотоэлектрический датчик с двусторонней светочувствительностью после доработки и градуировки измерительного блока может быть использован для мониторинга энергетического ресурса солнечного излучения. Предложенная двусторонняя конструкция ФЭП из-за значительного прироста мощности на единицу площади может быть применена также в производстве силовых солнечных модулей.

Заключение

Для непрерывного мониторинга интенсивности солнечного излучения вместо термоэлектрического пиранометра предложено использовать кремниевый фотоэлектрический преобразователь (датчик) с двусторонней светочувствительностью, позволяющий в режиме реального времени отслеживать суммарный энергетический ресурс прямого, рассеянного и отражённого солнечного излучения. Такой датчик, в отличие от традиционных термоэлектрических пиранометров, является малоинерционным, а его спектральная чувствительность достаточно близка к этому же показателю силовых фотопреобразователей солнечных электростанций. Это позволяет оценивать уровень инсоляции, способный быть полностью преобразованным в электрическую энергию, отрезая при этом неэффективную теплообразующую длинноволновую часть солнечного спектра.

Проведено моделирование полупроводниковой структуры датчика, его вольтамперных и вольтваттных характеристик при различной интенсивности солнечного излучения, что позволило определить модельные требования к конструктивно-технологическим и электрическим параметрам датчика с двусторонней светочувствительностью. Выполнены экспериментальные исследования параметров

изготовленного прототипа датчика, подтверждающие адекватность модели и работоспособность датчика

Проведены испытания прототипа в натуральных условиях при интенсивности прямого солнечного излучения 1000 Вт/м^2 . Интенсивность отражённого потока излучения, направляемого на тыльную сторону датчика, составляла 200 Вт/м^2 , соответственно, величина альбеда составляет 20 %. Прирост мощности за счёт фотоэлектрического преобразования альбеда составил 21 %, что является экстремальной величиной.

Список использованных источников

1. Основы солнечной энергетики [Электронный ресурс]. Режим доступа :<http://pvcddrom.pveducation.org/RU/index.html>. Дата доступа 20.09.2018.
2. Сайт компании KIPP&ZONEN [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>.
3. Сайт компании INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeier GmbH [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.ib-mut.de>.
4. Cuevas A. The early history of bifacial solar cells. Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 2005, pp. 801–805.
5. Caruso M. Experimental Investigation and Characterization of Innovative Bifacial Silicon Solar Cells / M. Caruso [et al.] // International Journal of Renewable Energy Research, 2019, vol. 9, no. 4, pp. 1996–2002. DOI: 10.20508/ijrer.v9i4.10029.g7805
6. Zhang C. Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22 % Using Laser Doped Selective Emitter / C. Zhang [et al.] // Energies, 2020, no. 13, vol. 6, pp. 1388–1400. DOI: 10.3390/en13061388
7. Kopecek R. Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges / R. Kopecek, J. Libal // Energies, 2021, vol. 8, no. 14, pp. 2076–2092. DOI: 10.3390/en14082076
8. Guerrero-Lemus R. Bifacial solar photovoltaics – A technology review / R. Guerrero-Lemus, R. Vega, Taehyeon Kim, L.E. Amy Kimm // Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, vol. 60, pp. 1533–1549. DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.041
9. Guerrero Pérez J, Torrano Carrillo J, Carpio Obre J, Teruel Hernández J. A. Patent ES, no. 4, 167, 472 A1, 2023.
10. Kim S.D., Bunea G. US Patent, no.20,140,116,495 A1, 2014.
11. Woo T, Yu J, Kim T, Lee E, Mun S., Hong J, Electronics INC. US Patent No.20,120,048,353 A1, 2012.

12. Заддэ В.В., Пинов А.Б., Тимербулатов Т.Р., Тимербулатов В.Т., Токарев В.Е. Конструкция и способ изготовления кремниевого фотопреобразователя с двусторонней фоточувствительностью. Патент RU 2432639. Бюл. 2011. № 30

13. Фотоэлектрический преобразователь с двусторонней светочувствительностью: пат. 13086 U, Респ. Беларусь: МПК (2006) H 01Q 17/00 / Василевич В.П., Збышинская М.Е.; заявл. 29.04.2022; опубл. 30.12.2022. – 5 с.

14. Garrod A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Front / A. Garrod, A. Ghosh // Energy*, 2023, no. 17, pp. 704–726. **DOI:** 10.1007/s11708-023-0903-7

References

1. Obuchayushchij resurs Osnovy solnechnoj energetiki [Website of Solar Energy Basics]. Available at: <http://pvcdrom.pveducation.org/RU/index.html> [Accessed 20.09.2018].

2. Sajt kompanii KIPP&ZONEN [Website of KIPP&ZONEN]. Available at: <https://www.kippzonen.com/ProductGroup/3/Pyranometers>.

3. Sajt kompanii INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeyer GmbH [Website of INGENIEURBÜRO Mencke & Tegtmeyer GmbH]. Available at: <http://www.ib-mut.de>.

4. Cuevas A. The early history of bifacial solar cells. *Proceedings of the 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference*, 2005;801–805.

5. Caruso M, Galluzzo FR, Zumbo L, Acciari G, Adamo G, Ala G, Busacca A, Gerardi C, Lombardo S, Miceli R, Parisi A, Schettino G, Viola F. Experimental Investigation and Characterization of Innovative Bifacial Silicon Solar Cells. *International Journal of Renewable*

Energy Research. 2019;9(4):1996–2002.

DOI: 10.20508/ijrer.v9i4.10029.g7805

6. Zhang C, Shen H, Sun L, Yang J, Wu S, Lu Z. Bifacial p-Type PERC Solar Cell with Efficiency over 22 % Using Laser Doped Selective Emitter. *Energies*. 2020;6(13):1388–1400. **DOI:** 10.3390/en13061388

7. Kopecek R, Libal J. Bifacial Photovoltaics 2021: Status, Opportunities and Challenges. *Energies*, 2021;8(14):2076–2092.

DOI: 10.3390/en14082076

8. Guerrero-Lemus R, Vega R, Kim Taehyeon, Kimm Amy, Shephard LE. Bifacial solar photovoltaics – A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016;60:1533–1549.

DOI: 10.1016/j.rser.2016.03.041

9. Guerrero Pérez J, Torrano Carrillo J, Carpio Obre J, Teruel Hernández J. A. Patent ES, no. 4, 167, 472 A1, 2023.

10. Kim S. D., Bunea G. US Patent, no. 20,140,116,495 A1, 2014.

11. Woo T, Yu J, Kim T, Lee E, Mun S, Hong J, Electronics INC. US Patent No. 20,120,048,353 A1, 2012.

12. Zadde VV, Pinov AB, Timberbylatov TR, Timberbylatov VT, Tokarev VY. Konstrukciya i sposob izgotovleniya kremnievogo fotopreobrazovatelya s dvustoronnej fotochuvstvitel'nost'yu [Design and manufacturing method of a silicon photoconverter with bifacial photosensitivity]. Patent RF, no 2432639, 2011.

13. Vasilevich VP, Zbyshinskaya MY. Fotoelektricheskij preobrazovatel' s dvustoronnej svetochuvstvitel'nost'yu [Bifacial solar photovoltaic converter]. Patent RB, no 13086 U, 2022.

14. Garrod A, Ghosh A. A review of bifacial solar photovoltaic applications. *Front. Energy*, 2023;(17):704–726. **DOI:** 10.1007/s11708-023-0903-7

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжигов

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин

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

Поступила 04.04.2024

Принята к печати 27.05.2024

Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ является одним из основных методов по определению элементного состава вещества. Обладая высокой локальностью и относительно малой глубиной проникновения электронного луча (<1 мкм), данный метод нашёл широкое применение в области микроэлектроники, как основной метод анализа элементного состава вещества. Метод позволяет исследовать поверхность вещества как точно, так и по площади с построением карт распределения элементов. В работе исследовалось влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий-поликремний с целью изучения формирования омических контактов в элементной базе интегральных микросхем. Исследование границы раздела алюминий-поликремний осуществлялось методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа. Установлено, что при длительном термическом отжиге (450°C , 20 мин) поликремний полностью растворяется в алюминии с последующей его сегрегацией в виде отдельных агломератов в плёнке алюминия, что может привести к полному отказу работоспособности интегральной микросхемы. При быстром термическом отжиге (450°C , 7 с) такого явления не обнаружено. Таким образом, быстрый термический отжиг целесообразно использовать в качестве альтернативной замены традиционного длительного термического отжига в микроэлектронике. Такая замена позволяет существенно уменьшить растворение поликремния в алюминии, избежать разрушения омических контактов и поднять процент выхода годных изделий в процессе изготовления интегральных микросхем.

Ключевые слова: омический контакт, интегральная микросхема, граница раздела алюминий-поликремний, быстрая термообработка

Адрес для переписки:

Жигулин Д.И.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: zhygulin@mail.ru

Address for correspondence:

Zhyhulin D.V.
JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazincin str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: zhygulin@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин
Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод исследования границы раздела алюминий-поликремний после воздействия длительного и быстрого термических отжигов.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 104–109.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

For citation:

Pilipenko U.A., Kovalchuk N.S., Shestovskiy D.V., Zhyhulin D.V.
Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure to Long-Term and Rapid Thermal Annealing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):104–109. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure with Long-Term and Rapid Thermal Annealing

U.A. Pilipenko, N.S. Kovalchuk, D.V. Shestovski, D.V. Zhyhulin

JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus

Received 04.04.2024

Accepted for publication 27.05.2024

Abstract

Energy dispersive X-ray microanalysis is one of the main methods for determining the elemental composition of matter. Possessing high locality and a relatively shallow penetration depth of the electron beam ($<1\ \mu\text{m}$), this method has found wide application in the field of microelectronics, as the main method for analyzing the elemental composition of matter. The method allows to study the surface of a substance both pointwise and over an area with the construction of element distribution maps. In the paper we investigated the influence of long-term and rapid heat treatments on the formation of the aluminum-polysilicon interface in order to study the formation of ohmic contacts in the element base of integrated circuits. The aluminum-polysilicon interface was studied using energy-dispersive X-ray microanalysis. It has been established that during long-term thermal annealing ($450\ ^\circ\text{C}$, 20 min) polysilicon is completely dissolved in aluminum followed by its segregation in the form of separate agglomerates in the aluminum film, which can lead to a complete failure of the integrated circuit. During rapid thermal annealing ($450\ ^\circ\text{C}$, 7 s) such a phenomenon was not detected. Thus it is advisable to use rapid thermal annealing as an alternative to traditional long-term thermal annealing in microelectronics. This makes it possible to significantly reduce the dissolution of polysilicon in aluminum, avoid the destruction of ohmic contacts and increase the percentage of yield of workable products in the process of integrated circuits' manufacturing.

Keywords: ohmic contact, integrated circuit, aluminum-polysilicon interface, rapid thermal processing

Адрес для переписки:

Жигулин Д.И.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: zhygulin@mail.ru

Address for correspondence:

Zhyhulin D.V.
JSC "Integral" – "Integral" Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: zhygulin@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, Н.С. Ковальчук, Д.В. Шестовский, Д.В. Жигулин
Энергодисперсионный рентгеновский микроанализ – как метод
исследования границы раздела алюминий-поликремний после
воздействия длительного и быстрого термических отжигов.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 104–109.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

For citation:

Pilipenko UA, Kovalchuk NS, Shestovski DV, Zhyhulin DV.
Energy-Dispersive X-Ray Microanalysis – as a Method for Study
the Aluminium-Polysilicon Interface after Exposure to Long-Term
and Rapid Thermal Annealing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):104–109. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-104-109

Введение

При усиливающейся тенденции уменьшения проектных норм изготовления интегральных микросхем всё большее значение приобретает снижение термического воздействия в технологическом процессе их изготовления [1–4]. Такая тенденция связана со значительным уменьшением длительности диффузионных процессов, которая характерна при высокотемпературных термообработках [5]. Особенно остро этот вопрос стоит при формировании омических контактов к кремнию и поликремнию (ПКК). Это обусловлено тем, что при длительной термообработке (450 °С, 20 мин) происходит интенсивное взаимодействие ПКК с алюминием, и образованию конгломератов ПКК в алюминии, что приводит к увеличению контактного сопротивления контакта, а, значит, к изменению вольт-амперных характеристик транзистора. Кроме того, образовавшиеся остроугольные конгломераты ПКК могут привести к утечкам или к короткому замыканию между топологическими слоями интегральных микросхем. В качестве альтернативы длительной термической обработке всё чаще применяется быстрая термообработка (БТО) (450 °С, 7 с), при которой взаимодиффузия алюминия и ПКК находится на стадии, позволяющей сформироваться омическому контакту без образования конгломератов ПКК [6–8]. Заметим, что в литературе имеется большое количество данных посвящённых механизму взаимодействия алюминий-кремний и алюминий-алюминий, а по механизму взаимодействия алюминий-ПКК такие данные практически отсутствуют.

Методика эксперимента

На кремниевых пластинах КДБ 10 пирогенным окислением при температуре 850 °С формировался окисел кремния. Затем на окисле кремния методом газофазного осаждения формировался ПКК толщиной 0,4 мкм, на поверхность которого магнетронным распылением наносилась плёнка алюминия (с 1 % примеси Si), толщиной 3 мкм. Полученные структуры Al-ПКК-SiO₂ подвергались различным термообработкам: длительной термической

обработке (450 °С, 20 мин, N₂) и БТО (450 °С, 7 с, Ar). Процесс БТО пластин выполнялся в атмосфере аргона при атмосферном давлении на установке УБТО ПИТ 1801. Атмосфера аргона выбрана для исключения окисления алюминия при термообработке. Пластины облучались с непланарной стороны галогенными лампами длительностью 7 с.

Исследование границы раздела Al-ПКК и определение элементного состава [9–10] осуществлялось на сколе пластины с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ) S-4800 фирмы Hitachi (Япония) с энергодисперсионным спектрометром Quantax 200 фирмы Bruker (Германия). Профили распределения элементов снимались при ускоряющем напряжении 5 кВ, что соответствует глубине анализа не более 0,35 мкм.

Результаты и их обсуждение

На рисунке 1а приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ без термического воздействия. На ней отчётливо виден ПКК толщиной 0,4 мкм, и алюминий, равномерно лежащий на ПКК. На рисунке 1б приведены профили распределения алюминия, кремния и кислорода по глубине залегания слоёв. Точка пересечения алюминия и кремния совпадает с началом концентрационного максимума кислорода. Это указывает на то, что между алюминием и окислом кремния лежит ПКК с чёткой неразмытой границей.

На рисунке 2а приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после БТО (450 °С, 7 с). На ней виден ПКК толщиной ≈0,35 мкм, и равномерно лежащий алюминий без видимых включений. Таким образом, толщина ПКК после БТО уменьшилась на ≈50 нм по сравнению с исходной структурой, без термической обработки.

Аналогичные результаты получены методом энергодисперсионного микроанализа путём сравнения кривых распределения Al, Si и O в структуре Al-ПКК-SiO₂. На рисунке 1б видно, что точка пересечения кривых Al и Si лежит в пределах 2,04 мкм. На рисунке 2б она соответствует 2,10 мкм. Разница между точками составляет ≈60 нм, что хорошо коррелирует с данными, полученными по РЭМ фотографиям сколов.

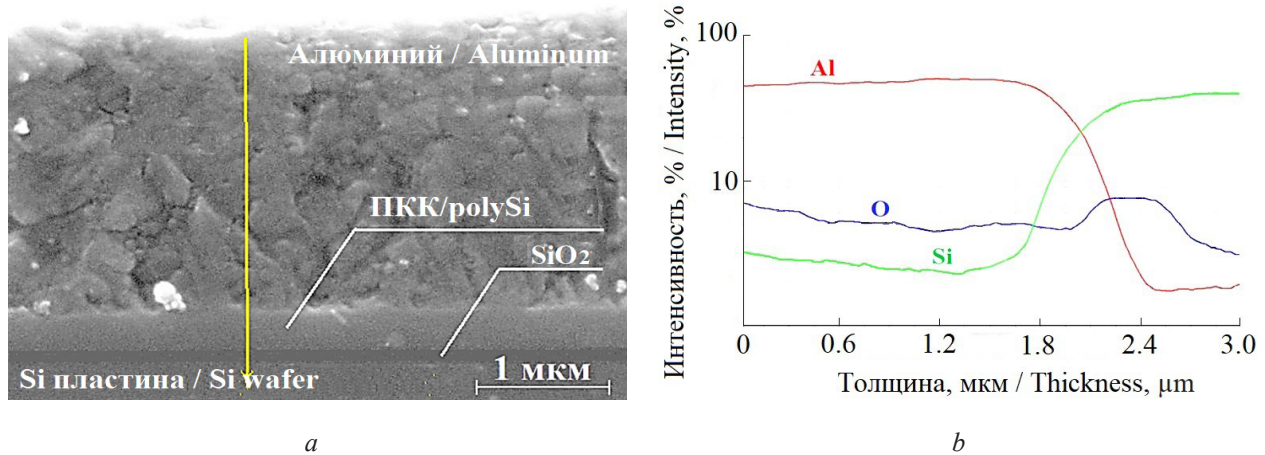


Рисунок 1 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ без термической обработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования (b)

Figure 1 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure without heat treatment (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line (b)

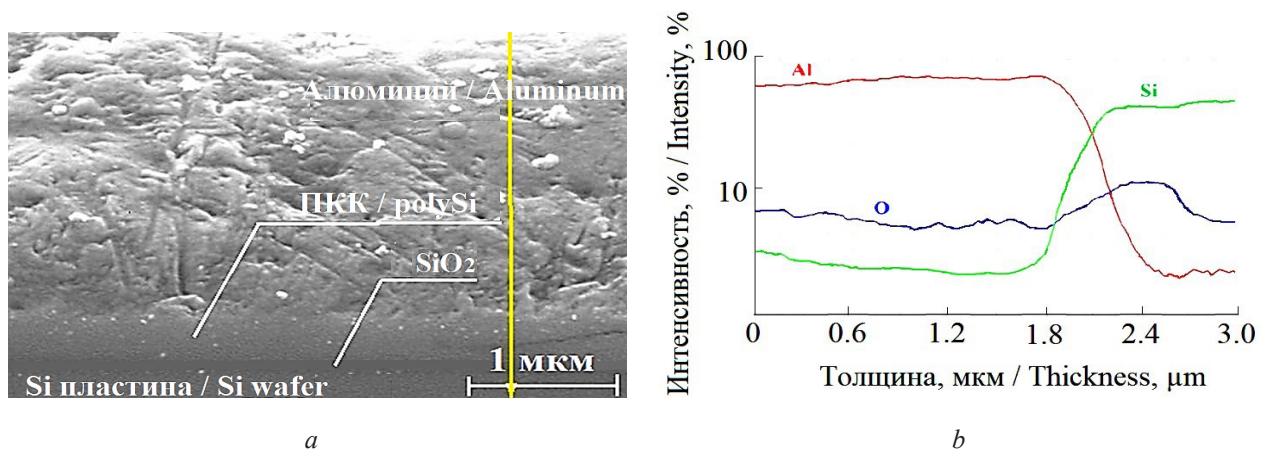


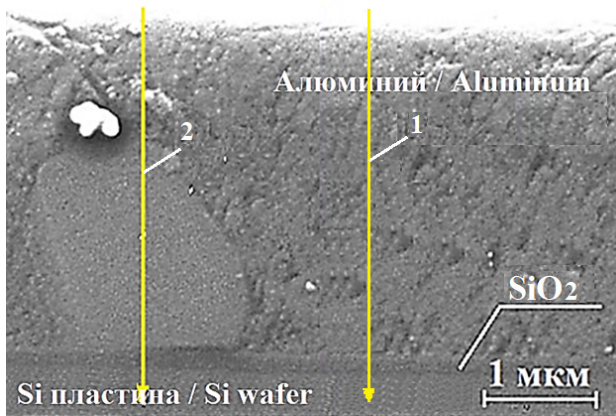
Рисунок 2 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после быстрой термообработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования (b)

Figure 2 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure after rapid heat treatments (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line (b)

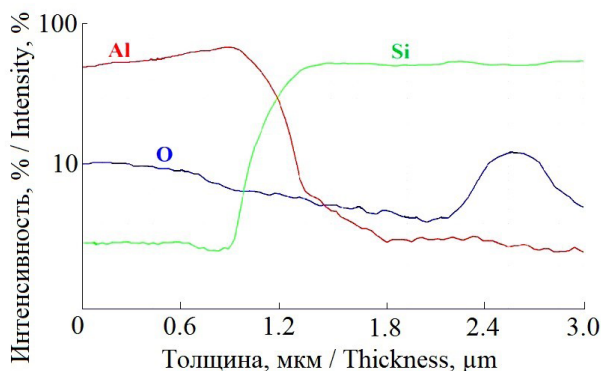
Таким образом, при формировании омического контакта с помощью БТО происходит незначительное растворения кремния в алюминии без образования в нём конгломератов ПКК, что связано с незначительными диффузионными процессами между алюминием и ПКК.

На рисунке 3a приведена РЭМ фотография поперечного сечения структуры Al-ПКК-SiO₂ после длительной термической обработки (450 °C, 20 мин). На ней видно, что ПКК

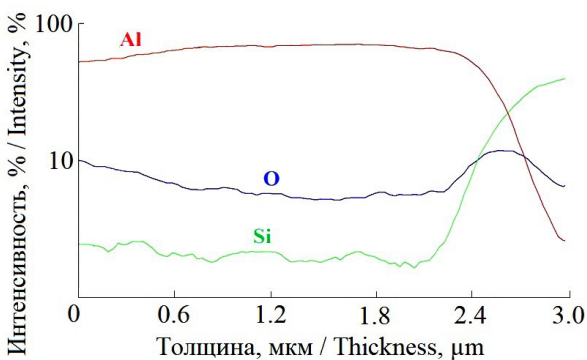
полностью растворился в алюминии. Это также подтверждается методом энергодисперсионного микроанализа (рисунок 3b, линия 1). Анализ кривых распределения Al, Si и O (рисунок 3c, линия 2) показал, что появившиеся конгломераты представляют собой поликристаллический кремний, которые образовались в результате полного его растворения в алюминии. С понижением температуры, растворенный ПКК выделяется в виде отдельных крупных остроугольных конгломератов (рисунок 3a).



a



b



c

Рисунок 3 – РЭМ изображение поперечного сечения структуры Al-ПКС-SiO₂ после длительной термической обработки (a) с распределением Al, Si, O вдоль линии сканирования 2 (b) и линии сканирования 1 (c)

Figure 3 – SEM image of the cross section of the Al-polySi-SiO₂ structure after long heat treatments (a) with Al, Si, O distribution along the scanning line 2 (b) and the scanning line 1 (c)

Наличие таких конгломератов в слое алюминия является одной из причин отказов

изделий микроэлектроники, поскольку они своими остроугольными краями могут протыкать и закорачивать соседние топологические слои. Кроме того, их наличие уменьшает проводимость плёнки алюминия, а, значит, увеличивает контактное сопротивление контакта алюминий-кремний и алюминий-ПКС.

Заключение

Методом энергодисперсионного рентгеновского микроанализа исследована граница раздела алюминий-ПКС после воздействия длительного и быстрого термических отжига. Данный метод анализа позволяет достаточно точно определять элементный состав вещества с построением профиля распределения исследуемых веществ вдоль линии сканирования.

Установлено, что при длительном термическом отжиге (450 °C, 20 мин), вследствие диффузионных процессов, происходит растворение поликремния в алюминии с образованием крупных конгломератов поликремния, что является одной из причин отказов интегральных микросхем. При быстром термическом отжиге (450 °C, 7 с) такой тенденции не наблюдается.

Таким образом, стандартный процесс формирования омических контактов с использованием длительного термического отжига целесообразно использовать при изготовлении изделий с проектными нормами более 1 мкм, например, в силовой микроэлектронике. С уменьшением проектных норм влияние процесса взаимной диффузии на формирование омического контакта значительно усиливается, что обуславливает снижение либо температуры нагрузки, либо времени отжига с применением процесса быстрой термической обработки.

Список использованных источников

1. Sze S.M. Semiconductor Devices: Physics and Technology / S.M. Sze, Lee M.K. // New York: John Wiley and Sons Singapore Pte. Limited, 2012.
2. Демидов А.А. Современные и перспективные полупроводниковые материалы для микроэлектроники следующего десятилетия (2020-2030 гг.) / А.А. Демидов, С.Б. Рыбалка // Прикладная математика и физика. 2021. Т. 53, № 1. С. 53–72.
3. Розанов Ю.К. Силовая электроника. Эволюция и применение. М.: Знак, 140, 2018.

4. Гольцова М. Силовая полупроводниковая электроника. Многообещающие технологии становятся реальностью. Электроника НТБ. 4:54-100, 2014.

5. Афонин Н.Н. Модель взаимодиффузии при формировании тонких плёнок металлов на монокристаллическом кремнии в условиях ограниченной растворимости компонентов/Н.Н. Афонин, В.А. Логачева // Конденсированные среды и межфазные границы. 2022. Т. 24, № 1. С. 129–135.

6. Пилипенко В.А. Быстрые термообработки в технологии СБИС / В.А. Пилипенко // Минск: Издательский центр БГУ; 2004.

7. Шугуров А.Р. Механизмы возникновения напряжений в тонких пленках и покрытиях / А.Р. Шугуров, А.В. Панин // Журнал технической физики. 2020. Т. 90, вып. 12. С. 1971–1994.

8. Пилипенко В.А. Влияние длительной и быстрой термообработок на формирование границы раздела алюминий – поликремний / В.А. Пилипенко [и др.] // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. 2023. № 2. С. 51–57.

9. Walther T. Measurement of nanometer-scale gate oxide thicknesses by energy-dispersive X-ray spectroscopy in a scanning electron microscope combined with Monte Carlo simulations / T. Walther // Nanomaterials. 2021, vol. 11–2117.

10. Sabu T. Microscopy methods in nanomaterials characterization / T. Sabu [et al.] // Elsevier, 2017.

References

1. Sze SM, Lee MK. Semiconductor Devices: Physics and Technology. New York: John Wiley and Sons Singapore Pte. Limited, 2012.

2. Demidov AA, Rybalka SB. Modern and promising semiconductor materials for microelectronics of the next decade (2020-2030). Applied mathematics and physics. 2021;53(1):53–72. (In Rus.).

3. Rozanov YK. Power electronics. Evolution and Application. M.: Znak, 2018;140.

4. Goltsova M. Power semiconductor electronics. Promising technologies become reality. Electronics Scientific and Technical Library. 2014;4:54-100.

5. Afonin NN, Logachova VA. Model of interdiffusion during the formation of thin films of metals on single-crystalline silicon under conditions of limited solubility of components. Condensed matter and interphase boundaries 2022;24(1):129–135. (In Rus.).

6. Pilipenko VA. Rapid Thermal Processing in VLSI Technology. Minsk, Publishing Center of Belarusian State University. (In Rus.).

7. Shugurov AR, Panin AV. Mechanisms of stress generation in thin films and coatings. Journal of Technical Physics. 2020;90(12):1971–1994. (In Rus.).

8. Pilipenko VA [et al.] The influence of long-term and rapid heat treatments on the formation of the aluminum-polysilicon interface. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2023;2:51–57. (In Rus.).

9. Walther T. Measurement of nanometer-scale gate oxide thicknesses by energy-dispersive X-ray spectroscopy in a scanning electron microscope combined with Monte Carlo simulations. Nanomaterials. 2021;(11):2117. (In Rus.).

10. Sabu T, Raju T, Zachariah AK, Mishra RK. Microscopy methods in nanomaterials characterization. Elsevier, 2017.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

A Morphological Approach to Development of a Process for Measurement Uncertainty Estimation

P.S. Serenkov, V.M. Romanchak, A.V. Hrybkouski

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

Received 04.03.2024

Accepted for publication 06.05.2024

Abstract

The problem of increasing the reliability of uncertainty estimation of measurement results is considered. The purpose of this work was to justify the application of the process approach to the formation of the algorithm of uncertainty estimation on the basis of morphological analysis. It is theoretically substantiated that from the standpoint of the system approach to achieving an acceptable degree of reliability of measurement uncertainty estimates it is necessary to implement a process approach to the formation of the estimation method as an algorithm of actions. The main stages of the estimation process are defined. It is established that each stage of the estimation process can be realized by alternative methods. The morphological box method as a realization of morphological analysis is proposed as a basis for its solution. A morphological box design of the uncertainty estimation process with an open architecture is presented, based only on commonly accepted methods and approaches for realizing each step of the process. Two aspects of the application of the morphological box method are identified. On the one hand, the morphological box allows to form an algorithm of the uncertainty assessment process, maximally acceptable for the laboratory conditions, as a combination of process steps, based on the task at hand, combining different variants of realization of these steps. On the other hand, the morphological box acts as a tool for development of new methods of realization of various stages of the uncertainty assessment process. Examples of using the morphological box method to develop alternative algorithms of the uncertainty estimation process of the same measurement method and to develop new methods of realization of different stages of the estimation process are considered.

Keywords: measurement uncertainty, uncertainty estimation process, morphological box

Адрес для переписки:

Серенков П.С.

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

Address for correspondence:

Serenkov P.S.

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

Для цитирования:

Serenkov PS, Romanchak VM, Hrybkouski AV.
A Morphological Approach to Development of a Process
for Measurement Uncertainty Estimation.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 110–119.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

For citation:

Serenkov PS, Romanchak VM, Hrybkouski AV.
A Morphological Approach to Development of a Process
for Measurement Uncertainty Estimation.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):110–119.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

Морфологический подход к разработке процесса оценивания неопределённости измерений

П.С. Серенков, В.М. Романчак, А.В. Грибковский

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

Поступила 04.03.2024

Принята к печати 06.05.2024

Рассмотрена проблема повышения достоверности оценивания неопределённости результатов измерений. Целью данной работы являлось обоснование применения процессного подхода к формированию алгоритма оценивания неопределённости на базе морфологического анализа. Теоретически обосновано, что с позиций системного подхода к достижению приемлемой степени достоверности оценок неопределённости измерений следует реализовать процессный подход к формированию метода оценивания как алгоритма действий. Определены основные этапы процесса оценивания. Установлено, что каждый этап процесса оценивания может быть реализован альтернативными методами. В качестве основы для её решения предложен метод морфологического ящика как реализация морфологического анализа. Представлена конструкция морфологического ящика процесса оценивания неопределённости с открытой архитектурой, основанная только на общепринятых методах и подходах реализации каждого этапа процесса. Определены два аспекта применения метода морфологического ящика. С одной стороны, морфологический ящик позволяет формировать алгоритм процесса оценки неопределённости, максимально приемлемый для условий лаборатории, как комбинацию этапов процесса, исходя из поставленной задачи, сочетая различные варианты реализации данных этапов. С другой стороны, морфологический ящик выступает как инструмент для разработки новых методов реализации различных этапов процесса оценивания неопределённости. Рассмотрены примеры использования метода морфологического ящика для разработки альтернативных алгоритмов процесса оценивания неопределённости одного и того же метода измерений и разработки новых методов реализации различных этапов процесса оценивания.

Ключевые слова: неопределённость измерения, процесс оценки неопределённости, морфологический ящик

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

Serenkov P.S.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: pavelserenkov@bntu.by

Для цитирования:

Serenkov PS, Romanchak VM, Hrybkouski AV.
A Morphological Approach to Development of a Process
for Measurement Uncertainty Estimation.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 110–119.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

For citation:

Serenkov PS, Romanchak VM, Hrybkouski AV.
A Morphological Approach to Development of a Process
for Measurement Uncertainty Estimation.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):110–119.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-110-119

Introduction

Constantly growing requirements to objectivity and reliability of information about the quality of products and services act as a stimulating factor for the development of theoretical basis of metrology. The indicator of measurement quality is, by definition, the uncertainty of the result, which determines the risk of incorrect decision making in relation to the circulation of products and services on the market¹. Until recently, the GUM model method was a tool for estimation of measurement uncertainty².

The emergence of standardized, i. e. generally accepted alternative methods, such as the Monte Carlo simulation method³, empirical methods⁴ based on the use of the results of intralaboratory or interlaboratory studies of measurement methods, allows us to conclude that the problem of objectivity and reliability of measurement uncertainty assessment is still unsolved [1–5].

From the point of view of system analysis, the existing methods of estimation of measurement uncertainty are not really such, because its key point is the concept of process. System analysis assumes that the criterion of unambiguous solution of the problem related to the object is the consideration of the object as a process [6, 7]. In our case, the object of analysis is the process of measurement uncertainty estimation (Figure), which includes stages⁵:

1. Formulation of the measurement problem:

1.1. Definition of measurement result Y as an output quantity of the measurement process.

1.2. Identifying input variables X_i , affecting Y .

1.3. Composing a measurement model as an expression of the type $Y = f(X_i)$.

¹ ISO/IEC Guide 98-4:2019. Uncertainty of measurement — Part 4: Role of measurement uncertainty in conformity assessment

² GOST 34100.3-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/ 2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement

³ GOST 34100.3.1-2017/ ISO/IEC Guide 98-3/ Suppl 1:2008. Uncertainty of measurement — Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement. Supplement 1: Propagation of distributions using a Monte Carlo method

⁴ ISO/TS 21748:2010, Guidance for the use of repeatability, reproducibility and trueness estimates in measurement uncertainty estimation

⁵ GOST 34100.1-2017/ ISO/IEC Guide 98-1/ 2024. Uncertainty of measurement. Part 1: Introduction to the expression of uncertainty in measurement

2. Assigning a probability distribution to input values X_i on the basis of available information.

3. Complexing of probabilistic characteristics of input quantities X_i in accordance with the measurement model $Y = f(X_i)$ in order to obtain probabilistic characteristics of output quantity Y with the subsequent estimation of the result – mathematical expectation Y_0 , total uncertainty $u(Y)$ and expanded uncertainty $U(Y)$, P .

As a criterion of efficiency of the process of measurement uncertainty assessment, the reliability of the assessment is used. Obviously, the reliability of the assessment is determined first of all by the completeness and inexhaustibility of the whole array of influencing factors involved in all stages of the process, acting as a "skeleton" for the identification of the sources of factors. From this point of view, the existing generally recognized above mentioned methods of measurement uncertainty estimation do not "cover" the whole estimation process.

As a rule, they address only the third step of the estimation process, and often not in full. None of the above-mentioned methods solves the problem of justification of the set of input influencing quantities X_i , correct determination of their probabilistic characteristics, justification of the coupling function $Y = f(X_i)$ [7]. Consequently, there is no reason to expect from the above methods of estimation of measurement uncertainty the required level of objectivity and reliability.

A correct method for estimating uncertainty in accordance with the systems approach as a "problem-solving methodology" should include the implementation of all three steps of the process, ensuring the integrity of the solution to the problem of objectivity and validity [6, 7]. At the same time, attention should be paid to the fact that each stage of the above assessment process, in turn, can be realized by different alternative methods. This implies that there can be many realizations of the process of measurement uncertainty estimation as algorithms for solving the problem representing the combination of different methods at each stage. This fact opens up unlimited possibilities of forming a correct and at the same time effective algorithm for estimating the uncertainty of the measurement (test) method in specific conditions of the laboratory according to the criterion of maximum feasibility.

Obviously, to solve this problem it is necessary to define a complete set of variants of realization of each of the process steps to form an algorithm for estimation of measurement uncertainty for specific conditions.

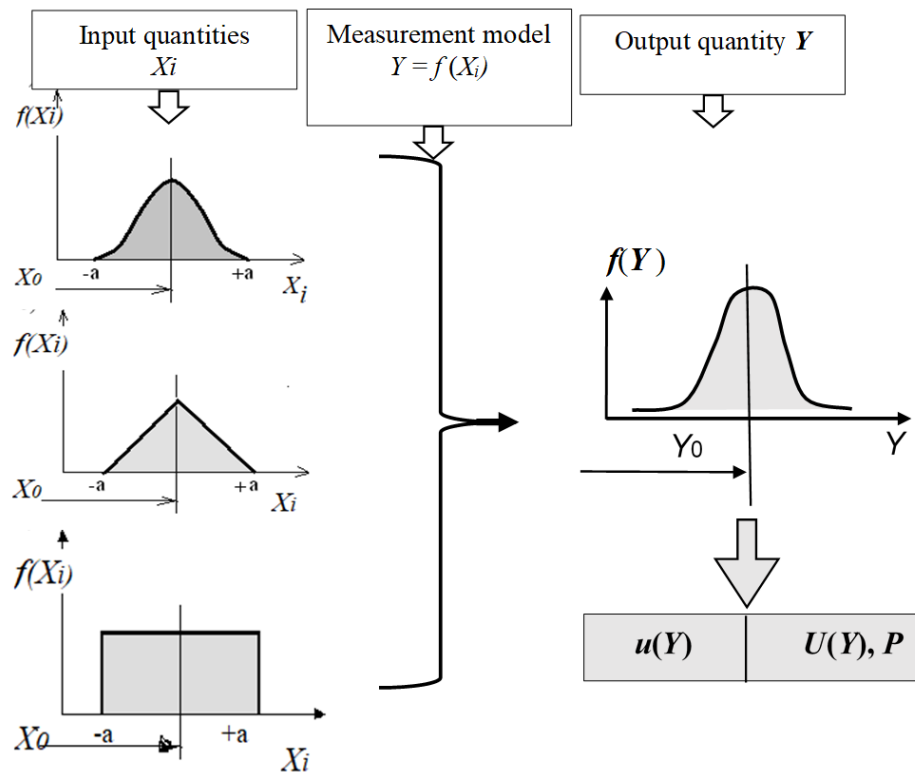


Figure – Steps in the process of estimating measurement uncertainty

In this regard, the morphological box method is of interest as an implementation of morphological analysis [8–10]. Morphological analysis was developed for multifactorial, non-quantifiable problems, when classical cause-and-effect modeling does not give the desired result.

The morphological box method consists in dividing the object of analysis into meaningful constituent elements. For each element, a set of possible realizations contributing to the overall solution of the problem is determined, after which a complete set of solutions is formed by merging specific realizations of all constituent elements. The search for the best solution from the full set of solutions is performed in accordance with the chosen criterion of acceptability.

To solve the problem of formation of an acceptable for specific conditions algorithm of measurement uncertainty estimation with the help of morphological analysis, it is proposed to form the design of the morphological box as a table, the inputs (elements) of which correspond to the stages of measurement uncertainty estimation given above:

- 1 – identification of influencing factors;
- 2 – formation of the communication function (measurement model);

- 3 – definition of input values;
- 4 – transforming distribution laws.

Element 1: Identifying influencing factors

This step of the algorithm is the most critical from the point of view of the degree of confidence in the measurement results, because it is often based on the use of expert subjective opinions when identifying input influencing factors and assessing their significance. In metrological practice, a number of methods and techniques have been developed to facilitate the identification and search for influencing factors:

- recommendations of the classical theory of errors on identification of influencing factors belonging to the groups: instrumental, methodical, subjective, measurement conditions [11];
- "uncertainty ladder", which is a hierarchical scheme of the structure of measurement uncertainty sources: part factor – part series factor – individual laboratory factor – interlaboratory factor. The method provides a basis for determining and evaluating such characteristics of measurement methods as precision and bias estimates [2, 20];
- significant factors taken into account in the study of indicators of correctness and precision of

measurement methods according to STB ISO 5725-3⁶: operator, equipment, equipment calibration, environmental conditions (temperature, humidity, air pollution, etc.), time passing between measurements, etc.;

– quality management tools – cause-effect diagrams in which the sources of uncertainty in the measurement result are attributed to different parts of the measurement system, e. g., S.W.I.P.E. (Standard. Part. Part. Measuring Instrument. Man. Procedure and Environment), P.I.S.M.O.E.A. (Part. Measuring Instrument. Reference. Method. Operator. Environment. Assumptions) [12].

The above methods and techniques are based on the assumption that, despite the great variety of measurement tasks, it is possible to identify typical sources of variability that together make the greatest contribution to the uncertainty of the measurement result. Expert methods such as brainstorming, questionnaires, surveys, etc. are used to identify significant sources and factors.

Taking into account the subjectivity of these methods, as well as the assumptions made at this stage, there are risks associated with the identification of not all factors X_i , which affect the final result of measurements.

The above methods and approaches can be, to a first approximation, included in the design of the morphological box table as alternative realizations of the input "identification of influencing factors".

Element 2. Formation of the communication function (measurement model)

The realization of this stage is a measurement model – it is a functional dependence $Y = f(X_i)$ of values of all input factors of the measurement process X_i with its result Y . The summary measurement model as a model of approximation of the coupling function can be represented in a general form as:

$$Y = f(x_1, x_2, \dots, x_m, a_1, a_2, \dots, a_n), \quad (1)$$

where Y is the estimated measurement result, $x_1, x_2, \dots, x_m$ – influencing elementary and complex factors (grouped data), f – analytical link function, $a_1, a_2, \dots, a_n$ – parameters of the analytical link function to be determined.

⁶ ISO 5725-3:1994, Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 3: Intermediate measures of the precision of a standard measurement method

A measurement model is necessary in order to shape:

- model of the measurement result (mathematical expectations model);
- model of uncertainty of the measurement result (standard deviation model).

Various bases for classifying communication functions can be proposed. To form this element of the morphological box, it is rational to propose the following classification of measurement models:

- coupling function, known a priori and having a natural physical meaning;
- coupling function given a priori and represented as a series, e. g., Taylor series [13, 14];
- the link function, unknown a priori and presented as a regression model based on the results of the planned measurement experiment [15].

The situation when the coupling function is known a priori is typical for indirect measurements. For example, the model of indirect measurement of direct current force as a physical law has the form:

$$I = \frac{U}{R_{sh-r}},$$

where I is the actual value of direct current force, A; U is the actual value of measured voltage, V; R_{sh-r} is the actual value of shunt resistance, Ohm.

The situation when the coupling function is specified a priori is typical for direct measurements. The a priori unknown coupling function (1) can be decomposed into a Taylor series within the framework of realization of the model method of measurement uncertainty estimation and represented with the assumption as a linear additive model of the type:

$$Y = X_{ind} + C + C12 + \dots + C_i, \quad (2)$$

where X_{ind} is the result of the instrument reading; C_i is the so-called corrections, e. g. influence factors of the reference, operator, working environment conditions, etc. [13, 14].

The situation when the unknown a priori coupling function is formed as a statistical model based on the results of a planned measurement experiment is possible in all generally recognized methods of measurement uncertainty assessment. This situation is most typical for empirical methods of measurement uncertainty estimation.

The ISO 5725 series⁶ of standards considers a statistical measurement model as a measurement model:

$$y = m + B + e = \mu + (\delta + B) + e, \quad (3)$$

where $m = \mu + \delta$ is total mean value of measurement result (mathematical expectation); μ is accepted reference value; δ is measurement method bias; $(\delta + B) = \Delta$ is laboratory bias; B is laboratory bias component; e is bias component occurring at each measurement according to repeatability conditions.

ISO 217484 considers a more generalized statistical model as a measurement model:

$$y = m + B + \sum_{i=1}^M C_i x_i + e, \quad (4)$$

where $\sum_{i=1}^M C_i x_i$ are factors influencing the measurement result, not taken into account by the model presented in (3).

In terms of applying the communication function, two cases are possible:

1. If we use a modeling or Monte Carlo method for numerical estimation of measurement uncertainty by the method under study, we need the link function (1), since it is directly involved in the estimation process. To obtain it, we should organize a measurement experiment (full-factor plan of type 2ⁿ, fractional factor plan, other), perform regression analysis and obtain the link function (1) as a regression equation [12, 16].

2. If we use empirical methods to estimate the measurement uncertainty by the method under study, the coupling function (1) is not directly required. ISO 5725-3⁶ for this situation prescribes to organize the measurement experiment according to a hierarchical nested plan and to perform a variance analysis of the obtained results. Standard deviation in conditions of perceptibility SR is an analog of the total uncertainty of measurements by a specific method.

The above methods can be, to a first approximation, included in the design of the morphological box table as alternative realizations of the input "formation of the link function (measurement model)".

Element 3. Definition of input values

There are two approaches to defining input quantities:

- complex, in which probabilistic characteristics, including the total standard uncertainty of the measurement result, are determined at once;
- differential, in which probabilistic characteristics, including standard uncertainties, are defined for each input quantity.

The integrated approach, as mentioned above, is characteristic of empirical methods for uncertainty assessment [1].

The differential approach assumes that the set of input quantities $X_1, X_2, \dots, X_N$, involved in the measurement, can be conditionally divided into two groups [13–15, 17]:

1) quantities whose values and uncertainties are determined directly in the current measurement (as a result of a single observation, repeated observations) – Type A estimation;

2) quantities, values and uncertainties of which are determined on the basis of a priori information (characteristics of used standards, reference materials, reference data, etc.) – type B estimation.

The above methods can be, to a first approximation, included in the design of a morphological box table as alternative implementations of the input "input value determination" input.

Element 4. Transforming probabilistic characteristics of input quantities in order to estimate the measurement result and its uncertainty

This element of the process of estimation of measurement uncertainty involves complexing the probabilistic characteristics of input quantities X_i according to the measurement model $Y = f(X_i)$ in order to obtain the probabilistic characteristics of the output quantity Y : mathematical expectation Y_0 , total uncertainty $u(Y)$, expanded uncertainty $U(Y)$, P .

Two approaches⁵ to transforming the characteristics of input random variables taking into account the coupling function in order to obtain the characteristics of the measurement result are generally accepted: frequency and Bayesian [2].

The frequency approach is based on obtaining point estimates (statistics), which can be used to construct a confidence interval. Among the generally accepted methods, the frequency approach implements the GUM modeling method, empirical and combined methods [2].

The GUM modeling method is implemented as an "eight-step method", and involves the element-by-element assessment of contributions to the total uncertainty of all influencing factors with their subsequent complexing according to the "law of propagation of uncertainties" [18].

Empirical methods of measurement uncertainty estimation are based on experimental data obtained from the results of intralaboratory or interlaboratory studies of the measurement method in terms of bias and precision, additional statistical processing of which allows estimating the total uncertainty of measurements by the method under study [1].

The combined method for uncertainty assessment appeared as a rational need to apply a combination of GUM modeling and empirical methods to the study of the same measurement method [19]. For example, if a measurement process involves several relatively independent operations, it is rational to estimate the uncertainty of the intermediate results of some of them by the modeling method and some of them by empirical methods, using measurement quality control data, proficiency tests, interlaboratory comparisons, or other periodic controls [9, 21].

Note that when estimating the uncertainty of the value Y by these methods, the distribution function of the input values X_i is not used explicitly. The generally accepted interpretation of the concept of probability is used.

When implementing the frequency approach by the listed methods, it should be taken into account that the methodological error of estimation $u_c(y)$ or $U(y)$, P , associated with the failure to correctly transform the distribution laws of input quantities X_i into the distribution law of the measurement result Y , has not been quantitatively evaluated by anyone, although it is, for example, brought to the forefront by critics of the GUM modeling method [18].

The so-called "Bayesian approach" is adopted as an idealized approach to transformation, for which the quantitative measure of uncertainty of the measurement result Y in the broad sense is the probability distribution of a random variable associated with the measured quantity, and in the narrow sense is the scattering parameter of the same distribution ($u_c(y)$) or $U(y)$, P .

The Bayesian approach involves transforming the distributions of the input quantities X_i , which involves determining the probability distribution density of the output quantity Y based on the probability distribution densities of the input quantities X_i and the measurement model used $Y = f(X_i)$. The latter is used to determine:

- 1) estimates of the mathematical expectation of the quantity Y in the form of an estimate of y ;
- 2) the coverage interval for the value Y corresponding to a given probability (coverage probability) P as the expanded uncertainty $U(y)$;
- 3) estimates of the standard deviation of Y as the standard uncertainty $u_c(y)$ associated with y .

The transformation of distribution laws in the Bayesian approach can be performed numerically or analytically. Among the generally accepted methodologically correct methods of finding the uncer-

tainty in accordance there is only one – the Monte Carlo method [16]. The method numerically realizes the transformation of the distribution laws of input quantities into the distribution law of the measurement result by numerical methods, i. e. it imitates the analytical solution of the problem, since the value Y is not directly measured. Accordingly, the method requires serious software and high competence of the researcher.

The above methods can be, to a first approximation, included in the design of the morphological box table as alternative realizations of the input "*transforming probabilistic characteristics of input quantities*".

Morphological box of the uncertainty assessment process

Table 1 presents a morphological box of the uncertainty assessment process, constructed based only on commonly accepted methods and approaches for implementing each step of the uncertainty assessment process. Two positive aspects of the morphological analysis of the uncertainty assessment process can be emphasized:

- the morphological box acts as a "constructor" from which the method of uncertainty assessment can be formed step by step as a combination of process steps based on the task at hand, combining different variants of realization of these steps;
- the morphological box can be perceived as a tool for forming new methods at different stages of the uncertainty assessment process.

The use of the morphological box as a "constructor" for formation of the uncertainty assessment process, which is the most acceptable for laboratory conditions, is demonstrated in Table 2. As follows from the table, laboratory specialists consider three variants of realization of the process of uncertainty assessment of the measurement method investigated in the laboratory:

- 1 – within the framework of in-laboratory studies of method correctness and precision in accordance with ISO 5725-3⁶ it is supposed to use empirical methods;
- 2 – within the framework of interlaboratory studies of method correctness and precision in accordance with ISO 21748⁴ it is supposed to use empirical methods;
- 3 – direct application of the GUM method is assumed [18].

Table 1

Morphological box of the uncertainty assessment process				
Element (stage of the evaluation process)	Options			
1. Identification of influencing factors	Classification of errors in classical error theory	"Ladder of Uncertainties"	Classification of factors of reproducibility conditions according to ISO 5725-3	S.W.I.P.E. Methodology. (Benchmark. Part. Instrument. Measurement. Person. Procedure and Environment) P.I.S.M.O.E.A. Methodology (Part. Measuring instrument. Reference. Method. Operator. Environment. Assumptions) Other
The communication function is known a priori				
The coupling function is unknown a priori. It is formed as a statistical model based on the results of a measurement experiment				
2. Formation of the communication function (measurement model)	Exactly (physical model of indirect expression of magnitude)	It is set approximated (e.g., as a linear model in the form of Taylor series)	Regression model on the results of implementation of the measurement experiment plan	Other
3 Determination of input values				
Differential approach. The standard uncertainties of each input quantity are determined separately by type A or B				
Comprehensive approach. The total standard uncertainty of the measurement result is determined at once				
4. Transformation of distribution laws				
The distribution law is not used (frequency approach)				
The law of distribution is used (Bayesian approach)				
GUM method	Empirical methods	Combined method	Monte Carlo method	Other

Obviously, if the uncertainty assessment process is composite, it is important to know the advantages and disadvantages of each element in order to design the most appropriate uncertainty assessment process for the laboratory environment.

It should be noted that the morphological box has an open architecture. In this sense, it is of scientific interest as a tool for generating new methods at different stages of the uncertainty assessment process. In Table 1, their place is highlighted as "Other" on a gray background. We can give a number of examples of developments of the authors of the article concerning new methods of realization of separate stages of the uncertainty assessment process:

Stage 1 (see Table 1). Identification of influencing factors. Methodology of identification of input values of the measurement process using IDEF0 functional modeling methodology and the method of alternatives as a method of expert evaluation [7, 12].

Stage 2 (see Table 1). Formation of the measurement model. To solve complex measurement problems of data analysis and decision making under conditions of significant a priori uncertainty, in

our opinion, methods of nonparametric estimation of passively collected measurement information, for example, based on wavelet transforms, are promising [20]. The use of such models for solving this class of problems allows minimizing the methodological error of linear approximation.

Stage 4 (see Table 1). Transformation of distribution laws. As an alternative to the Monte Carlo method, we can propose the author's "method of successive transformations" (MPT), which is designed for efficient uncertainty estimation under a given mathematical model of measurements (1) with an arbitrary number of input quantities and a single output quantity [2]. The efficiency of the estimation is manifested in the fact that MPT realizes the algorithm of estimation of measurement uncertainty through transformation of distributions of input quantities. In this case, in contrast to the Monte Carlo method, the MPT assumes the possibility of a typical solution of the estimation problem with minimum resource consumption. The key point of the proposed method is the technique of pairwise analytical convolution of distributions of input quantities taking into account the measurement model $Y = f(X_1, \dots, X_N)$.

Table 2

Options for implementing the method uncertainty assessment process in the laboratory

Element (stage of the evaluation process)	Options for implementing the process of estimating method uncertainty		
	1	2	3
1. Identification of influencing factors	Classification of factors of reproducibility conditions according to ISO 5725-3	"Ladder of Uncertainties"	S.W.I.P.E. (Standard. Part. Instrument. Measurement. Person. Procedure and Environment)
2. Formation of the communication function	It is specified approximated as a linear model in the form of a Taylor series $Y = X_{ind} + C_1 + C_2 + \dots + C_i$	It is set approximated as a statistical process model according to ISO 21748 $y = m + B + \sum_{i=1}^M C_i x_i + e$	It is specified approximated as a linear model in the form of a Taylor series $Y = X_{ind} + C_1 + C_2 + \dots + C_i$
3. Definition of input values	Each input quantity is not defined separately	Each input quantity is not defined separately	Differential approach, the standard uncertainties of each input quantity are determined separately by type A or B
4. Transforming distribution laws	No distribution law is used (frequency approach). Empirical methods in accordance with ISO 5725-3. Within the framework of in-laboratory studies of the measurement method the total standard uncertainty of the measurement result SR – analog of the total uncertainty of measurements is determined	No distribution law is used (frequency approach). Empirical methods in accordance with ISO/TS 21748. Within the framework of interlaboratory studies of the measurement method the total standard uncertainty of the measurement result SR – analog of the total uncertainty of measurements is determined	No distribution law is used (frequency approach). GUM method

Conclusion

It can be stated that the validity of measurement uncertainty estimation is provided from the position of the system approach through the development of the estimation process as an algorithm of actions. Taking into account the fact that different stages of the process of measurement uncertainty estimation can be realized by alternative methods, the possibility of developing the most acceptable algorithm of actions for the conditions of the measurement laboratory is determined. To solve the problems of determining the full set of variants of realization of each stage of the process of measurement uncertainty estimation for specific conditions the morphological box method is proposed. The structure of the morphological box of a typical uncertainty estimation process with an open architecture, which is based only on the generally accepted methods and approaches of realization of each stage of the process, is substantiated. The possibilities of application of the morphological box method for development of an effective algorithm of the process of uncertainty estimation of the measurement method in the laboratory and for improvement of the estimation process in terms of creation of new methods of realization of separate stages of the process are demonstrated by examples.

References

1. EUROLAB Technical Report 1/2007: Measurement uncertainty revisited: Alternative approaches to uncertainty evaluation. EUROLAB. 2007:62.
2. Serenkov PS, Romanchak VM. Method of successive transformations as an alternative realization of Bayesian approach to estimation of measurement uncertainty. *Metrology and instrumentation*. 2021;4:9-16. (In Russ.).
3. Efremova NYu. Measurement uncertainty. Creation, current state and prospects for the development of uncertainty concept. *Metrology and instrumentation*. 2016;3:7-17. (In Russ.).
4. Taylor JR. An introduction to error analysis: the study of uncertainties in physical measurements. Sausalito, California, University of Science Books. 1997;(2):346.
5. Hall BD, White DR. An introduction to measurement uncertainty. New Zealand, Measurement Standards Laboratory of New Zealand. 2017:53.
6. Optner SL. System analysis for the solution of problems of business and industry. Moscow: Concept Publ. 2006:206.
7. Serenkov PS, Gurevich VL, Movlamov VR. Process approach to the study of accuracy indicators of measurement methods. *Metrology and instrumentation*. 2017;(77)3:100-108. (In Russ.).
8. Ritchey T. On a morphology of theories of emergence. *Acta Morphologica Generalis*. 2014;(3)3:1-16.
9. Ilyin VN, Lepekhin AV. Automation technology for structural-parametric synthesis based on the morphological box method. *Proceedings of the Moscow Aviation Institute*. 2011;46:1-11. (In Russ.).
10. Akimov SV. Identification Level Morphological Set Model. *Proceedings of educational institutions of communication*. 2005;172:120-135. (In Russ.).
11. Minaev AM. Theory and practice of error analysis. Moscow, Sputnik Publ. 2013:507.
12. Measurement Systems Analysis Reference Manual, 3rd edn, Daimler Chrysler Corporation, Ford Motor Company, General Motors Corporation. 2002:238.
13. Rabinovich SG. Measurement errors and uncertainty: theory and practice, 3rd edn. New York. Springer. 2005:308.
14. Prokopov AV, Zakharov IP, Botsyura OA. The main problems of substantiating the model equation when estimating measurement uncertainty. *Ukrainian Metrological Journal*. 2016;3:19-22. (In Russ.).
15. Dietrich CF. Uncertainty, calibration and probability: the statistics of scientific and industrial measurement. Routledge. CRC Press Publ. 199;555.
16. Cox M, Harris P, Siebert B. Estimation of measurement uncertainty based on distribution transformation using Monte Carlo simulation. *Measurement Techniques*. 2003;46:824-833.
DOI: 10.1023/B:METE.0000008439.82231.ad
17. Lira I. Evaluating the Measurement Uncertainty. Fundamentals and Practical Guidance. Bristol. Institute of Physics Publ. 2002;13(9):243.
DOI: 10.1088/0957-0233/13/9/709
18. Bich W. Revision of the «Guide to the expression of uncertainty in measurement». Why and how. *Metrologia*. 2014;51(4):155–158.
DOI: 10.1088/0026-1394/51/4/S155
19. Serenkov PS, Hurevich VL, Tolochko TK. Features of application of a combined approach to the evaluation of the measurement results uncertainty. *Instruments and measurement methods*. 2020;11(1):60-69.
DOI: 10.21122/2220-9506-2020-11-1-60-69
20. Serenkov PS. Application of nonparametric models for estimating uncertainties in measurement results. *Bulletin of the Belarusian – Russian University*. 2015;48(3):109-115.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation Spectral Distribution

P.S. Bogdan, E.G. Zaytseva, A.I. Stepanenko

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

Received 16.04.2024

Accepted for publication 22.05.2024

Abstract

The difference in the spectral composition of artificial and natural lighting can negatively affect health, as well as lead to a distorted perception of the color of surrounding objects. At the same time, a certain correction of the spectral composition of visible radiation in medical institutions and workplaces has a positive effect on human health, while can be carried lighting control out taking into account the data of personal sensor devices that determine the human condition. The purpose of the research was to select criteria for comparing natural and LED optical and visible radiation by spectral composition and by the visibility of color differences in natural and LED lighting. The effectiveness of the application of known and developed criteria for assessing the difference in the spectral composition of optical and visible radiation from natural and LED sources was investigated, as well as for the visibility of color differences in natural and LED lighting. To minimize the values of criteria are proposed additive and subtractive methods for calculating LED parameters. Their comparison allowed us to conclude that a more complex calculation algorithm, but higher performance for an additive technique than for a subtractive one with the same minimization results.

It was found that to simulate the spectral composition of natural radiation using LEDs, it is most effective to use the criteria "standard deviations of the relative differences between the optical and visible spectral components of natural and LED radiation". A comparison of the criteria for the visibility of color differences in natural and LED lighting showed approximately the same effectiveness of using the criteria "small color differences" and "standard deviation by photoreceptors" at the present stage and the prospects for applying the second criterion, provided that its acceptable values are established.

Keywords: optical and visible radiation, natural and LED lighting, spectral composition, color differences, LED parameters

Адрес для переписки:

Зайцева Е.Г.

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

Address for correspondence:

Zaytseva E.G.

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

Для цитирования:

Bogdan PS, Zaytseva EG, Stepanenko AI.
Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation Spectral Distribution.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 120–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

For citation:

Bogdan PS, Zaytseva EG, Stepanenko AI.
Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation Spectral Distribution.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):120–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

Исследование критериев для сравнения естественного и светодиодного излучения по спектральному составу

П.С. Богдан, Е.Г. Зайцева, А.И. Степаненко

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

Поступила 16.04.2024

Принята к печати 22.05.2024

Различие в спектральном составе искусственного и естественного освещения может отрицательно сказаться на здоровье, а также привести к искажённому восприятию цвета окружающих предметов. В то же время определенная коррекция спектрального состава видимого излучения в медицинских учреждениях и на рабочих местах оказывает положительное влияние на здоровье человека, при этом управление освещением может осуществляться с учётом данных персональных сенсорных устройств, определяющих состояние человека. Целью исследований являлся выбор критериев для сравнения естественного и светодиодного оптического и видимого излучений по спектральному составу и по заметности цветовых отличий при естественном и светодиодном освещении. Исследовалась эффективность применения известных и разработанных критериев для оценки отличия спектрального состава оптического и видимого излучений от естественных и светодиодных источников, а также для заметности цветовых отличий при естественном и светодиодном освещении. Предложены аддитивная и субтрактивная методики расчёта параметров светодиодов для минимизации значений критериев. Их сравнение позволило сделать вывод о более сложном алгоритме расчёта, но большей производительности для аддитивной методики, чем для субтрактивной при одинаковых результатах минимизации. В результате исследований и проведенных расчётов установлено, что для имитации спектрального состава естественного излучения с использованием светодиодов наиболее эффективно использовать критерии «среднеквадратические отклонения относительных разностей оптических и видимых спектральных составляющих естественного и светодиодного излучения». Сравнение критериев заметности цветовых отличий при естественном и светодиодном освещении показало примерно одинаковую эффективность использования критериев «малые цветовые различия» и «среднеквадратическое отклонение по фоторецепторам» на современном этапе и перспективность применения второго критерия при условии установления его допустимых значений.

Ключевые слова: оптическое и видимое излучение, естественное и светодиодное освещение, спектральный состав, цветовые различия, параметры светодиодов

Адрес для переписки:

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

Address for correspondence:

Zaytseva E.G.
Belarusian National Technical University,
Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: egzayitseva@bntu.by

Для цитирования:

Bogdan PS, Zaytseva EG, Stepanenko AI.
Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation
Spectral Distribution.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 120–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

For citation:

Bogdan PS, Zaytseva EG, Stepanenko AI.
Investigation of Criteria for Comparing of Natural and LED Radiation
Spectral Distribution.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):120–130.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-120-130

Introduction

Currently, people use artificial lighting more than natural, the spectral composition of which depends on the geographical latitude of the area, time of day, time of year, weather conditions [1, 2]. Studies [3–8] have established that the difference in the spectral distribution of artificial and natural lighting can negatively affect health, as well as lead to a distorted perception of the color of surrounding objects. At the same time, a certain correction of the spectral composition of light radiation in medical institutions and workplaces has a positive effect on human health [9]. At the same time, lighting control can use the data of personal sensor devices that determine the human condition [10].

In addition to the effect on human health, the spectral composition of visible radiation determines the perception of the color gamut of reflective objects. The distribution of the spectral density of the radiation flux along the wavelength from objects is the product of the distribution of the spectral density of the radiation flux along the wavelength from the light source and the spectral distribution of the reflection coefficient of the object. This means that under different lighting conditions, the color of the same object may differ. The absence of color distortions can be important both in the production of technical products and in the visual assessment and perception of art objects.

From the above, it is obvious that it is possible to adjust the distribution of the spectral density of the radiation flux from artificial light sources in such a way that it is as close as possible to the distribution of the spectral density of the radiation flux from a natural source. If they coincide, the effect on the human body in general and on its visual system in particular will be the same. But due to the peculiarities of vision, it is possible that even if these distributions do not match, it is possible to ensure the so-called colorimetric accuracy, i.e. the invisibility of the difference between the color of the object and the color of the image [11].

The purpose of the research is to select criteria for comparing natural and LED optical and visible radiation in terms of spectral composition and the visibility of color differences. At the same time, it is necessary to solve 3 tasks: first, select the appropriate criteria, secondly, based on the proposed criteria, develop a methodology for calculating the parameters of LEDs that simulate natural lighting, and thirdly, evaluate the effectiveness of these criteria.

The ability to change the parameters of LED radiation

Currently, the most common sources of artificial indoor lighting are LEDs. The spectral density of the radiation flux of LEDs, with the exception of white ones, has a bell-shaped shape that does not cover the entire spectral range of natural radiation along the width of the base of the "bell". Therefore, to simulate the spectral composition of natural lighting, it is necessary to use different LED groups, each of which contains a certain number of LEDs with the same spectral radiation characteristics. At the same time, the characteristics of the various groups together should cover the entire spectral range of natural radiation. It is possible to adjust the spectral composition of the radiation generated by a set of groups, firstly, by changing the number of LEDs turned on within the group, and secondly, by changing the power supply current of the LED.

The spectral density of the radiation flux of the source $S_{e,\lambda}(\lambda)$ is calculated by the formula:

$$S_{e,\lambda} = \frac{dP_{e,\lambda}(\lambda)}{d\lambda},$$

where $P_{e,\lambda}$ is the radiation flux of the source.

According to [12], a change in current has a different effect the shape of the distribution of the spectral density of the optical radiation flux $S_{e,\lambda}(\lambda)$ for LEDs with different chemical bases. Red and yellow LEDs shift the wavelength of radiation corresponding with an increase in the supply current to the maximum intensity into the long-wavelength region of the spectrum. At the same time, the right branch of the "bell" expands, and the degree of these changes differs significantly for different types of red LEDs. For green LEDs, the corresponding shift and expansion occur in the opposite direction, into the short-wavelength region of the spectrum. For blue LEDs, the current change slightly affects the shape of the distribution of the spectral density of the optical radiation flux $S_{e,\lambda}(\lambda)$ and the displacement of its maximum. At the same time, the radiation power of LEDs increases with an increase in the current passing through their structures [13, 14], and this dependence is linear:

$$P_{eart} = kP_{0eart}, \quad (1)$$

k is a parameter determined by the number m of emitting LEDs of one group and their supply current i , calculated by the formula:

$$P_{0\text{eart}} = \int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{0\text{eart}}(\lambda) d\lambda, \quad (2)$$

where $\lambda_{\min}$, $\lambda_{\max}$ are the minimum and maximum wavelengths of the optical radiation range; the normalization condition has the form:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{0\text{eart}}(\lambda) d\lambda = 1. \quad (3)$$

A comparison of equalities (1–3) shows that the dependence between the distribution of the spectral density of the optical radiation flux $S_{\text{eart}}(\lambda, k)$, created when m LEDs of the same group are switched on, through which current i flows, and the normalized distribution of the spectral density of their optical radiation flux $S_{0\text{eart}}(\lambda)$ is linear:

$$S_{\text{eart}}(\lambda, k) = k S_{0\text{eart}}(\lambda). \quad (4)$$

If the lighting system includes LEDs of different spectral groups, then, taking into account expression (4), their total distribution of the spectral density of the optical radiation flux $S_{\text{eart}}(\lambda)$ calculated using the formula:

$$S_{\text{eart}}(\lambda) = \sum_{p=1}^r k_p S_{0\text{eart}p}(\lambda), \quad (5)$$

where p is the number of a group of LEDs of the same type; r is the number of groups of LEDs of the same type; k_p is a parameter determined by the number of emitting LEDs of the same type m_p in the group and the relative value of the current supplying them i_p , calculated by the formula:

$$k_p = i_p m_p,$$

where i_p is the relative value of the current supplying the group of LEDs with the number p ; m_p is the number of emitting LEDs in the group with the number p ; $S_{0\text{eart}p}(\lambda)$ is the normalized distribution of the spectral density of the optical radiation flux for a group of LEDs with the number p , and the normalization condition is similar to condition (3):

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{0\text{eart}p}(\lambda) d\lambda = 1.$$

Criteria for distinguishing the spectral composition of natural and LED optical and visible radiation

In order to determine the parameters of artificial lighting, which ensure the minimum possible discrepancy between the distributions of the spectral density of the optical radiation flux of artificial and

natural origin, it is necessary to select quantitative criteria for such a discrepancy. When choosing these criteria, it is possible to use the concept of physically accurate reproduction, designed to compare the reflection spectra of an object and its image. The classical definition of N.D. Nyberg's physical accuracy given in [15] implies that all corresponding points of the original and its image characterized by the same spectral composition of radiation perceived by the observer. With regard to the comparison of optical emissions, this definition interpreted as follows: the distribution of the spectral density of the optical radiation flux of a source is physically accurate with respect to the distribution of the spectral density of the optical radiation flux of another source, if these distributions coincide. Naturally, in this case, the observer will not notice the color change when replacing the light source.

Obviously, the simplest criterion for estimating the discrepancy between the two distributions of the spectral density of the optical radiation flux from natural $S_{\text{enat}}(\lambda)$ and artificial $S_{\text{eart}}(\lambda)$ sources is the standard deviation σ_e of their relative differences for all values of wavelengths λ , which must be minimized:

$$\min \sigma_e = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{S_{\text{enat}}(\lambda) - S_{\text{eart}}(\lambda)}{S_{\text{enat}}(\lambda)} \right)^2 d\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}}, \quad (6)$$

where $S_{\text{enat}}(\lambda)$ and $S_{\text{eart}}(\lambda)$ are the intensity values, respectively; for natural and artificial radiation at the wavelength λ , $\lambda_{\min}$ and $\lambda_{\max}$ are the minimum and maximum values of the wavelengths of the visible radiation range.

In addition, it is possible to make a comparison not only for the distributions of the spectral density of the optical radiation flux $S_{\text{enat}}(\lambda)$ and $S_{\text{eart}}(\lambda)$, but also for the distributions of the spectral density of the visible radiation flux $S'_{\text{nat}}(\lambda)$ and $S'_{\text{art}}(\lambda)$, which can be calculated using the formulas:

$$S'_{\text{nat}}(\lambda) = S_{\text{enat}}(\lambda) \cdot V(\lambda); \quad (7)$$

$$S'_{\text{art}}(\lambda) = S_{\text{eart}}(\lambda) \cdot V(\lambda), \quad (8)$$

where $V(\lambda)$ is a function of the relative spectral luminous efficiency, for daytime vision it is given in accordance with GOST 8.332-2013¹.

¹GOST 8.332-2013. The interstate standard. The state system of ensuring the uniformity of measurements. Light measurements. The values of the relative spectral luminous efficiency of monochromatic radiation for daytime vision. General provisions. The date of introduction is 2015-10-01. Edition (February 2019) as amended (IUS 7-2016).

In this case, the criterion is the standard deviation σ_v of the relative values for all components in the distributions of the spectral density of visible radiation fluxes, which also needs minimized:

$$\min \sigma_v = \sqrt{\frac{\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} \left(\frac{S'_{nat}(\lambda) - S'_{art}(\lambda)}{S'_{nat}(\lambda)} \right)^2 d\lambda}{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}}. \quad (9)$$

In the first case (optical radiation), the effect of radiation on the human body as a whole is taken into account, taking into account the effect on ganglion cells that determine circadian rhythms, including sleep and wakefulness, in the second (visible radiation) – the effect only on its visual perception.

Information on the use of the standard deviation to compare the spectral flux densities of optical LED and natural radiation given in [16], and the spectral composition regulated by changing the number of LEDs of different groups.

By varying the number of LEDs of seven different groups with of 655 A total, it was possible to achieve a standard deviation of 21.4 % from the solar radiation spectrum. In addition, there was a significant unevenness in the sensitivity of ganglion cells (460 and 480 nm), which determine the regulation of circadian rhythms, and a decline in the long-wavelength region (670 nm).

Since the intensity of the LED radiation at any wavelength is directly proportional to the supply current. It is possible to minimize it by averaging over the number of identical LED groups the modulus of deviation of the maximum intensities in the distributions of the spectral density of the optical radiation flux for all groups of LEDs from the intensities of a similar distribution for a natural source at the corresponding wavelengths. So the criterion ΔA was selected the sum of the modules of the relative deviations of the maximum values of distributions $S_{earip}(\lambda_{\max p})$ for each pth group of LEDs from the values of a similar distribution $S_{earip}(\lambda_{\max p})$ for a natural source at the corresponding values of the wavelengths $\lambda_{\max p}$ of radiation. As in the case using the standard deviation σ , the calculation formulas of the second group of criteria ΔA_e and $\Delta A'$, respectively, for optical and visible radiation with a total number r of groups have the form:

$$\min \Delta A_e = \frac{1}{r} \sum_{p=1}^r \left| \frac{S_{enat}(\lambda_{\max p}) - S_{earip}(\lambda_{\max p})}{S_{enat}(\lambda_{\max p})} \right|; \quad (10)$$

$$\min \Delta A' = \frac{1}{r} \sum_{p=1}^r \left| \frac{S'_{nat}(\lambda_{\max p}) - S'_{artp}(\lambda_{\max p})}{S'_{enat}(\lambda_{\max p})} \right|, \quad (11)$$

where $\lambda_{\max p}$ is the values of the radiation wavelengths corresponding to the maxima of the distributions of the spectral density of the radiation flux of LEDs in the p^{th} group, other designations correspond to those given earlier.

It should be noted that currently, for both variants of the criteria (σ_e , σ_v and ΔA_e , $\Delta A'$), there is no information about their acceptable values in terms of their effect on the human body in general and on the visual system in particular. Therefore, when analyzing the applicability of these criteria for evaluation, it is currently advisable guided by a comparison of their values and the nature of the discrepancies in the distributions of the spectral density of radiation fluxes of natural and artificial origin.

Criteria for the visibility of color differences in natural and LED lighting

To select criteria for the in distinguishability of the chromaticity of radiation from natural and artificial sources, the concept of physiologically accurate color reproduction used. If the colors of the image perceived by the observer as the same in relation to the colors of the object, according to N.D. Nyberg, physiologically accurate reproduction takes place [15]. R.W.G. Hunt [17] proposed the concept of "colorimetric accuracy of color reproduction", where an additional factor of physiological accuracy is the same conditions for viewing the original and reproduction, i.e. including the same spectral composition of lighting sources.

If the influence of visible radiation on color perception analyzed, then when choosing a criterion for comparing spectra from different sources, it is advisable to accept the condition of illumination of objects with the same spectral distribution of the reflection coefficient. Therefore, to analyze the color differences of radiation sources, a white background model chosen as a reflecting surface, in which the reflection spectrum is similar to that of the illuminate CIE E with a uniform relative distribution of radiation power over the spectrum, i. e. the reflection coefficient of the background surface in the entire visible range is constant.

Similarly to the comparison of the original and reproduction, in the future we will use the concept of "physiologically accurate reproduction" if the ob-

server does not distinguish the color of the radiation from two sources on a white background with a constant reflection coefficient of the background surface in the entire visible range.

As a criterion for the difference between the chromaticity of natural and artificial radiation, we will consider the threshold ΔE of color difference, calculated from the distribution of the spectral density of optical radiation fluxes using color coordinates [18]. The threshold ΔE color difference defined as the difference between two colors in the CIELAB equidistant color space. This is the color space obtained by constructing in rectangular coordinates L^* , a^* , b^* , uniquely associated with the values of X , Y and Z of the three-color coordinates. Coordinate L^* characterizes the lightness proportional to the brightness and takes values from 0 (black) to 100 (white). Coordinate a^* characterizes the change in the hue of the color tone from green to red and vice versa, and coordinate b^* characterizes the change from blue to yellow and vice versa.

There are 4 known methods for calculating small color differences ΔE , developed by the International Commission on Lighting (ICO): 1950, 1976, 1994 and 2000. The formulas of the latest technique [19] contained mathematical gaps and implementation errors [20]. Therefore, the 1994 methodology used to calculate the ΔE threshold. According to this methodology:

$$\Delta E = \sqrt{\left(\frac{\Delta L}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H}{k_H S_H}\right)^2}, \quad (12)$$

where ΔL , ΔC , ΔH are functions of the color coordinates L_{nat}^* , a_{nat}^* , b_{nat}^* of natural radiation and L_{art}^* , a_{art}^* , b_{art}^* of artificial radiation, the remaining coefficients are constants [18].

The coordinates L^* , a^* , b^* can be obtained based on the x , y , z coordinates of the color of the analyzed source, which, in turn, are functions of area-normalized fluxes of natural and artificial radiation, as well as addition curves for the color space of the 1931 MKO [18].

According to [21], small color differences ΔE are considered to be in the range from 1 to 10 units of color contrast, and if ΔE is less than 2.3 for two non-touching colors, then an ordinary observer hardly perceives this difference.

The development of another criterion for the visibility of color differences for natural and artificial lighting based on taking into account the direct effect on the photosensitive receptors of the visual analyzer. The effective energy effect $I_{B,G,R,Wnat}$ and

$I_{B,G,R,Wart}$ for blue-, green- and red-sensitive photoreceptors and rods in color channels of the visual system determined as integral of the products of the spectral distributions $S_{nat}(\lambda)$, $S_{art}(\lambda)$ of the natural or artificial radiation and of the spectral distribution of sensitivity $V_{B,G,R,W}$ [22, 23]:

$$I_{B,G,R,Wnat} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_{nat}(\lambda) V_{B,G,R,W}(\lambda) d\lambda; \quad (13)$$

$$I_{B,G,R,Wart} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} S_{art}(\lambda) V_{B,G,R,W}(\lambda) d\lambda, \quad (14)$$

where $V_{B,G,R,W}$ are the spectral distributions of the sensitivities of each group of photoreceptors (B – red-sensitive, G – green-sensitive, R – red-sensitive cones, W – rods respectively) are calculated by the formula:

$$V_{B,G,R,W}(\lambda) = A_{B,G,R,W} V_{0B,G,R,W}(\lambda), \quad (15)$$

where $V_{0B,G,R,W}$ are the relative spectral distributions of the sensitivities of each group of photoreceptors, the maximum values of which are equal to 1; $A_{B,G,R,W}$ are the maximum values of the sensitivities of each group of photoreceptors, determined by weight coefficients, standard deviations and brightness of adaptation, given in [16].

In addition to cones and rods, the human visual analyzer contains photosensitive ganglion cells, which, according to recent studies [7], are not only associated with the effect on circadian rhythms, but also through the melanopsin produced by it can affect visual perception. This impact requires additional research and therefore cannot yet taken into account when developing the criterion.

In the presence of artificial lighting created by r groups of LEDs, the effect on each of the four photosensitive receptors, taking into account (13–15), described by the formula:

$$I_{B,G,R,Wart} = \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} \sum_{p=1}^r S_{peart}(\lambda) A_{B,G,R,W} V_{0B,G,R,W}(\lambda) d\lambda. \quad (16)$$

It follows that if for each group of cones and for rods equality of integration results observed for two radiation sources, natural and artificial, the image will be physiologically accurate, i. e. the observer will not distinguish the color of the radiation sources even if their spectral distributions do not match.

Therefore, as a criterion, it is possible to use the standard deviation ε of the relative differences $\varepsilon_{B,G,R,W}$ of the effects of natural and artificial radiation on blue-, green- and red-sensitive photoreceptors, as well as rods:

$$\min \varepsilon = \sqrt{\sum_{B,G,R,W} \varepsilon_{B,G,R,W}^2}, \quad (17)$$

where:

$$\varepsilon_{B,G,R,W} = \frac{I_{B,G,R,Wnat} - I_{B,G,R,Wart}}{I_{B,G,R,Wnat}}, \quad (18)$$

values of $I_{B,G,R,Wnat}$ and $I_{B,G,R,Wart}$ are calculated using formulas (13) and (16), respectively.

In the future, we will call the criterion the standard deviation of ε for photoreceptors. There is currently no information on the acceptable values of the ε criterion.

A method for determining the parameters of LED lighting to simulate the spectral distribution of natural radiation

To optimize LED lighting that mimics natural lighting, it is necessary to perform 2 steps. First, you need to select the necessary set of LED groups containing LEDs with the same spectral characteristics. Secondly, it is necessary to calculate the relative values of currents in each group of LEDs, which minimize the discrepancy in the distributions of the spectral density of radiation fluxes from LED and natural sources in accordance with the criterion used. At the same time, the condition of normalization (equality 1) of the area under the total distribution of the spectral density of radiation fluxes for LED and natural sources must be observed.

It is possible to use both additive and subtractive variants to perform the calculation.

In the additive version, the minimum number of LED groups selected, the combination of which provides coverage of the entire spectral range. Next, using the *gamultiobj* function, which is a genetic optimization algorithm for the MatLab application software package, optimization performed based on two criteria's: by minimizing the analyzed criterion and by the condition of equality of 1 area under the total spectral distribution (normalization condition). The criterion is calculated for all possible combinations of k_p parameters (formula (5)). A combination of them is selected in which the deviation of the area from 1 is no more than 1 % and the value of the criterion is minimal. At the same time, it is assumed that a change in the current in the LED does not lead to a change in the wavelength corresponding to the maximum radiation. Formulas (3), (6), (9)–(12), (17) used for the calculation. If the emission spectra of natural and calculated artificial sources do not match, their difference calculated, representing a set

of graphs of spectral sensitivity graphs of the missing LED groups in the set. After calculating the difference, the previously selected set of groups manually or automatically supplemented with groups of LEDs with spectral characteristics corresponding to the groups missing in the difference, and the calculation performed again. Then the above cycle repeated until the values of the criterion and the discrepancy in the distribution graphs of the spectral density of radiation fluxes for LED and natural sources become acceptable.

In the subtractive version, the maximum possible number of LED groups selected from the LED catalogues; the second stage performed similarly. When calculating, some groups of LEDs turn out to be superfluous due to the zero value of the corresponding parameter k_p .

When using an additive technique, the volume of calculations increases from cycle to cycle, an analysis of the results after each cycle is required and the introduction of spectral density distributions of radiation fluxes for new groups of LEDs, carried out by the user or automatically. These two operations complicate the algorithm in relation to the subtractive technique. In this case, the user can stop the calculation at any stage that satisfies him according to the results. The subtractive technique provides for a single introduction of spectral characteristics of a large number of different LED groups, one long calculation cycle, and the absence of the possibility of user intervention before the end of the cycle. The considerable duration of the calculation cycle when using a subtractive technique compared with an additive one can become an obstacle in its use if it is necessary to reconfigure LED lighting quickly in accordance with rapidly changing natural lighting.

In order to test the developed programs, 3 cycles of calculations using the additive method carried out for all the criteria considered in this paper and the calculation for criterion σ , using the subtractive method. At the same time, the calculation duration using the subtractive method with the introduction of spectral characteristics of 31 LED groups as initial data exceeded the calculation duration of one cycle using the additive method by about 58 times.

The normalized by area spectral distribution of daylight power at a correlated color temperature (CCT) of 10000 K [7] as natural radiation is used:

$$\int_{\lambda_{\min}}^{\lambda_{\max}} S_{nat}(\lambda) d\lambda = 1.$$

As part of the first cycle of calculations using the additive method, 4 groups of LEDs were selected (blue QB-12, green ZG-10, red SY-28, yellow SE-28) [24], the spectral characteristics of which covered the wavelength range of radiation from about 415 to 670 nm. At the second stage, in addition to the above four groups, a fifth was introduced, containing a warm white LED with two phosphors with a CCT of 2700 K with a spectral range width of 400–800 nm [25]. After the second cycle, based on the calculated difference in the spectral density distributions of natural and artificial radiation fluxes, additional groups from the commercially available list used in [21] were added to the already existing LED groups, and a third calculation cycle was carried out. The spectral characteristics numbers of the added groups from the list shown in Table 1 for each criterion.

As an example, Figure 1 shows graphs of spectral density distributions of optical LED radiation fluxes obtained of each of the three calculation cycles while minimizing the criterion "relative standard deviation σ_e of the values of spectral density distributions of optical radiation flux".

Table 1

The numbers of spectral characteristics from the list of groups used in [21], added at the third stage

Designation of the criterion	Spectral characteristics numbers of the added groups
σ_e	6, 9, 19, 26
σ_v	11, 18, 19
ΔA_e	6, 9, 11, 20
$\Delta A'$	1, 9, 11, 18
ΔE	2, 6, 12, 18, 20
ε	6, 11, 19

The analysis of the graphs presented in Figure 1 shows that, with the transition to each subsequent cycle corresponding to an increase in the number of LED groups, the discrepancy between the spectral

density distributions of optical LED and natural radiation fluxes decreases.

The values of all six minimized criteria obtained of each calculation cycle are presented in Table 2 as a result, and the results of calculating the k_p parameter values for each group of LEDs after the third cycle are shown in Table 3. k_p values in Table 3 are arranged in the following order: first for groups containing LEDs QB-12, ZG-10, SY-28, SE-28, then for a group of warm white LEDs with two phosphors, then for the added groups according to the numbers from Table 1.

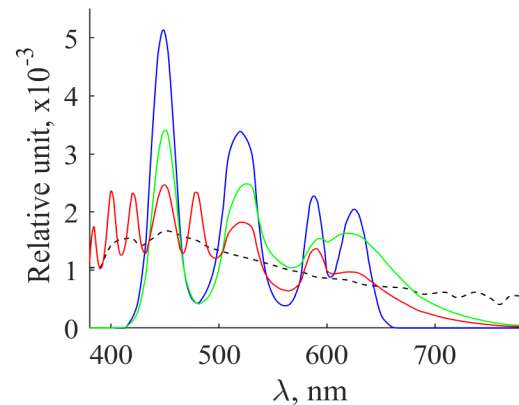


Figure 1 – Graphs of the distribution of the spectral density of the optical radiation flux from a natural source at a CT of 10000 K (dotted line) and the results of three cycles of calculating similar distributions from an LED source for the criterion σ_e (blue line – after the first cycle, green – after the second, red – after the third)

The data in Table 2 indicate that after each calculation cycle, the values of all criteria decrease. At the same time, different combinations of k_p parameter values for LED groups correspond to each criterion, which is shown in Table 3 as an example.

The spectral characteristics of 29 commercially available LEDs were additionally introduced into the initial data for calculation using the subtractive method the available list used in [21] in addition to the spectral characteristics of the groups used in the second cycle of additive calculation (blue QB-12, green ZG-10, red SY-28, yellow SE-28 [24] and warm white LED [25]).

Table 2

The values of the minimized criteria after each calculation cycle

Cycle number	The values of the minimized criteria					
	σ_e	σ_v	ΔA_e	$\Delta A'$	ΔE	ε
1	1.0173	0.60779	0.91746	0.35289	8.526	0.5862
2	0.49051	0.33778	0.69179	0.185043	8.4913	0.35472
3	0.30334	0.2883	0.45468	0.096771	1.342	0.28557

Table 3

K_p parameter values for each LED group after the third calculation cycle

Designation of the criterion	k_p									
σ_e	0.0072	0.1531	0.1372	0.0436	0.3149	0.1238	0.0953	0.0828	0.0425	
σ_v	0.0000	0.1556	0.0160	0.0160	0.5806	0.1132	0.0581	0.0578		
ΔA_e	0.0178	0.3115	0.2203	0.0128	0.0589	0.0261	0.0282	0.1640	0.1474	
$\Delta A'$	0.0138	0.1175	0.0149	0.0092	0.1502	0.0066	0.0071	0.5813	0.0965	
ΔE	0.0293	0.0776	0.0559	0.0363	0.0557	0.2144	0.0693	0.0573	0.1669	0.2338
ε	0.2528	0.0677	0.1684	0.0138	0.1142	0.1488	0.0304	0.1998		

Approximately equal values of criterion σ_v (0.2883 and 0.29483) were obtained by additive after 3 calculation cycles and subtractive methods as a result of minimizing this criterion. The corresponding graphs of the spectral density distributions of optical radiation fluxes practically coincided in both cases. In the first case, 9 LED groups were used for the synthesis of artificial radiation, in the second – 13.

Analysis of the effectiveness of the criteria for distinguishing the spectral composition of natural and artificial radiation sources

A comparison of the results of minimizing the criteria "standard deviation" σ_e , σ_v and the criteria "average sum of the deviation modules of the maximum intensity values in the radiation spectrum of the LED groups" ΔA_e and $\Delta A'$, respectively for light and visible radiation, showed that the first pair of criteria is preferable according to calculations and graphs. The cycle calculation time for both groups of criteria turned out to be approximately the same. The simplification of the calculation algorithm by replacing the integral over the entire spectrum in the first case of radiation with the sum of the maximum intensity values in the radiation spectrum of LED groups of LED groups in the second offset by the need to introduce these maximum values into the algorithm. Besides the graphs of the LED of spectral density distributions of fluxes for the criteria of the group "standard deviation σ_e " demonstrated a greater and consistent approximation to the distribution of the natural radiation spectrum after each calculation cycle than for the criteria "average sum of the modulus of deviations for optical radiation spectrum of the LED groups ΔA_e ". The same result was obtained when analyzing the criteria σ_v and $\Delta A'$ for visible radiation. As examples, Figure 2 shows, respectively, graphs of the spectral density distributions of LED optical radiation fluxes obtained as a result of the third calculation cycle according to the

criteria σ_e and ΔA_e , and Figure 3 shows graphs of the corresponding spectral density distributions of LED visible radiation fluxes according to the criteria σ_v and $\Delta A'$.

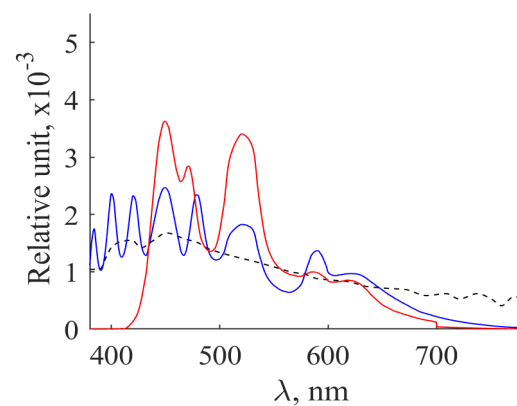


Figure 2 – Graphs of the distribution of the spectral density of the optical radiation flux from a natural source at a CT of 10000 K (dotted line) and the results of the third cycle of calculation of similar distributions from an LED source (blue line – calculation according to the criterion σ_e , red – calculation according to the criterion ΔA_e)

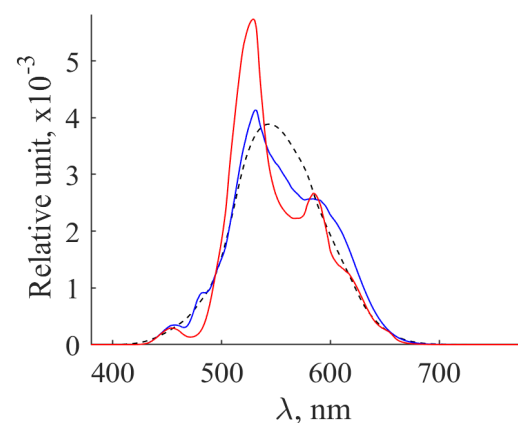


Figure 3 – Graphs of the distribution of the spectral density of the visible radiation flux from a natural source at a CT of 10000 K (dotted line) and the results of the third cycle of calculation of similar distributions from an LED source (blue line – calculation according to the criterion σ_v , red – calculation according to the criterion $\Delta A'$)

Analysis of the effectiveness of the criteria for the visibility of color differences in natural and artificial lighting

A study of the effectiveness of criteria evaluating the visibility of color differences in different lighting showed that, in addition to the traditionally used criterion of small color differences ΔE , it is possible to use the criterion "standard deviation ε by photoreceptors". This criterion represents the standard deviation of the relative differences in the effects of natural and artificial radiation on blue-, green- and red-sensitive photoreceptors, as well as rods. After each calculation cycle for both criteria, the value of the criteria decreased (Table 2), and for criterion ε – with greater monotony. The value of ΔE after the third calculation cycle corresponded to the invisibility of color differences when illuminating a white sample with selected natural and artificial radiation [21]. At the same time, the discrepancies in the distribution graphs of the spectral density of visible radiation fluxes for natural and LED sources were smaller when calculated using the criterion ε (Figure 4).

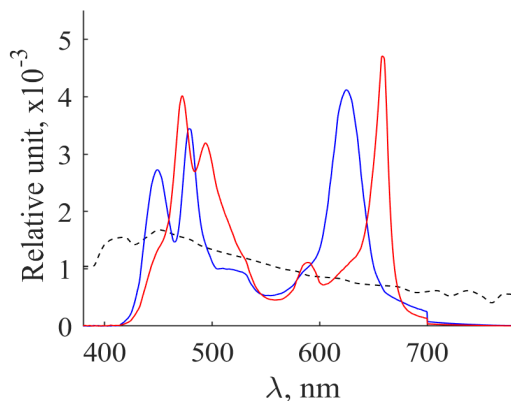


Figure 4 – Graphs of the distribution of the spectral density of the optical radiation flux from a natural source at a CCT of 10000 K (dotted line) and the results of the third cycle of calculating similar distributions from an LED source for the criterion "standard deviation ε by photoreceptors" (blue line) and the criterion "small color differences ΔE " (red)

Each of these two criteria has its advantages and disadvantages. For the ΔE criterion, despite cumbersome calculations using empirical coefficients and there are known as mathematical gaps and implementation errors [20] in the 2000 version, the acceptable values given, in particular, in [21]. Acceptable values for the ε criterion are not currently set. They can be determined by comparing them with the values of ΔE under the same lighting conditions.

The acceptable values for the ε criterion are not currently established. They can be determined by comparison with the values of ΔE under the same lighting conditions. At the same time, it can be entered the values of the coefficients determining the photosensitivity of the photoreceptors of the visual analyzer at different brightness adaptations into the calculation. In addition, the method of calculating the criterion ε is simple. The values of the energy are used absorbed by photoreceptors, so a criterion ε has a physical meaning. After conducting experiments to determine the acceptable values of the criterion, its use may become more preferable.

Conclusion

To compare the spectral composition of natural and LED energy and light emissions, 2 groups of criteria were selected. These include, firstly, the standard deviations of the relative differences in the spectral density distributions of their optical and light radiation fluxes of natural and LED radiation, and secondly, the averaged modules of deviation of the maximum amplitudes of LED radiation from the amplitudes of natural energy and light radiation at the corresponding wavelengths. To assess the visibility of color differences in natural and artificial lighting, the following were used: the well-known criterion of small color differences and the developed criterion "standard deviation by photoreceptors", which takes into account the effects of radiation on blue, green and red-sensitive photoreceptors, as well as rods.

A comparison of subtractive and additive methods for calculating the parameters of LEDs that minimize the criteria allowed us to conclude that the calculation algorithm is more complex, but its performance is higher for the additive method than for the subtractive one with the same minimization results.

The criteria "relative standard deviations of the values of the spectral density distributions of the optical and light radiation flux for LED and natural sources" are more effective than the criteria associated with averaged modules of deviation of the maximum intensity of LED radiation from the intensity of natural radiation to simulate the spectral composition of natural radiation.

A comparison of the criteria for the visibility of color differences showed their approximately equal efficiency of use at the present stage, as well as the prospects of using the criterion "standard deviation by photoreceptors" if it's acceptable values are established.

References

1. Hisdal V. Spectral distribution of global and diffuse solar radiation in Ny-Alesund, Spitsbergen. *Polar Research*. 1987;5(1):1-27. DOI: 10.3402/polar.v5i1.6865
2. Wald L. Basics in solar radiation at earth surface. HAL Id: hal-01676634. Preprint submitted on 5 Jan 2018. Mode of access: <https://minesparis-psl.hal.science/hal-01676634>. Date of access: 01/20/2024.
3. Dyukin S. LED monitors and "blue danger". *Semiconductor lighting engineering*. 2017;(5):16-21. (In Russ.).
4. Kaptsov VA. [et al.] Two concepts of the development of semiconductor white light sources for school lighting. Analytical review. "Eye". 2017;6(118):8-22. Access mode: <https://www.theeyeglaz.com/jour/article/viewFile/52/97>. Access date: 16.01.2024. (In Russ.).
5. Bailes HJ, Lucas RJ. Human melanopsin forms a pigment maximally sensitive to blue light (lambda_{max} approximately 479 nm) supporting activation of G(q/11) and G(i/o) signalling cascades. *Proceedings: Biological Sciences*. 2013;280(1759):20122987. DOI: 10.1098/rspb.2012.2987
6. Kaptsov VA, Deinego VN. Risks of the influence of LED panel light on the operator's health. *Health risk analysis*. 2014;4:37-46. (In Russ.). DOI: 10.21668/health.risk/2014.4.05
7. Blume C, Garbazza C, Spitschan M. Effects of light on human circadian rhythms, sleep and mood. *Somnologie (Berl)*. 2019;3(3):147-156. DOI: 10.1007/s11818-019-00215-x
8. Cho YongMin [et al.] Effects of artificial light at night on human health: A literature review of observational and experimental studies applied to exposure assessment. *Chronobiology International*. 2015;32(9):1294-310. DOI: 10.3109/07420528.2015.1073158
9. Gleason JD [et al.] Smart lighting clinical testbed pilot study on circadian phase advancement. *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine's*. 2019;(7):3200110. DOI: 10.1109/JTEHM.2019.2937957
10. Stern M. [et al.] Blue light exposure decreases systolic blood pressure, arterial stiffness, and improves endothelial function in humans. *European journal of preventive cardiology*. 2018;25(17):1875-1883. DOI: 10.1177/2047487318800072
11. Sipailo SV. Improving the accuracy of color reproduction of images by the method of color transformations at the stage of prepress preparation. *Proceedings of BSTU. Ser. 4. Print and media technologies*. 2023;2(273):20-25. (In Russ.). DOI: 10.52065/2520-6729-2023-273-2-3
12. Nikiforov S. Now electrons can be seen: LEDs make electric current very noticeable. *Components and technologies*. 2006;3:96-103. (In Russ.).
13. Nikiforov S. Temperature in the life and operation of LEDs. Part 1. *Components and technologies*. 2005;(9). Access mode: <https://kit-e.ru/temperatura-v-zhizni-chast-1/>. Access date: 03/11/2024 (In Russ.).
14. Batgutdinov ML. Luminescence spectra, efficiency and color characteristics of white-glow LEDs based on InGa_N/Ga_N p-n heterostructures coated with phosphors. *Physics and Technology of semiconductors*. 2006;40(6):758-763. (In Russ.).
15. Artyushina IL, Vinokur AI, Mitryakova OL. Improving the accuracy of color reproduction at the stage of digital registration of the original. *Bulletin of scientific and technical development*. 2019;8(144):3-11. (In Russ.). DOI: 10.18411/vntr2019-144-1
16. Kaptsov VA, Deinego VN, Ulasyuk VN. Lighting of educational and medical institutions: the problem of optimal choice. *Hygiene and sanitation*. 2018;97(11):1020-1025. (In Russ.). DOI: 10.18821/0016-9900-2018-97-11-1020-25
17. Hunt RWG. *The reproduction of color* (6th Ed.). England: Wiley. 2004:724.
18. Gorbunova EV, Chertov AN. *Colorimetry of radiation sources*. St. Petersburg: Universite ITMO. 2015:126. (In Russ.).
19. Improvement to industrial colour-difference evaluation, CIE Publication No. 142-2001, Central Bureau of the CIE, Vienna, 2001:10.
20. Sharma G, Wu W, Dalal EN. The CIE ΔE₂₀₀₀ color-difference formula: implementation notes, supplementary test data, and mathematical observations. *Color Research and Application*. 2005;30(1):21-30.
21. Berezovik AM, Stepanov AA. Analysis of color contrast in HUD, augmented reality systems. *Holo-EXPO 2023: 20th International Conference on Holography and Applied Optical Technologies: Abstracts of the reports*. St. Petersburg: Publishing house of SPbSETU "LETI", 2023;161-165. (In Russ.).
22. Kochin LB. *Methods and means of displaying color video information*. St. Petersburg: Baltic State Technical University. 2012:268. (In Russ.).
23. Kelly D. Color theory and successful application of LEDs. Part 1. *Semiconductor lighting engineering*. 2013;4(24):54-58. (In Russ.).
24. Petropavlovsky Yu. Overview of LED products of Taiwanese companies. *Semiconductor lighting engineering*. 2011;3:4-9. (In Russ.).
25. Kelly D. Color theory and successful application of LEDs. Part 4. *Semiconductor lighting engineering*. 2014;2(28):62-65.

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Оценка шероховатости поверхности неметаллических материалов при лазерной обработке

В.А. Алексеев¹, А.В. Усольцева¹, В.П. Усольцев¹, С.И. Юран²

¹Ижевский государственный технический университет имени М.Т. Калашникова,
ул. Студенческая, 7, г. Ижевск 426069, Россия

²Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия

Поступила 15.04.2024

Принята к печати 10.06.2024

Проведены экспериментальные исследования поверхности неметаллических материалов с определением параметров шероховатости таких материалов, как кожа, кость, дерево, пластмасса после обработки поверхности материалов лазерным лучом. Для оценки качества поверхностного слоя материалов использованы глубина проникновения лазерного излучения в материал, среднее значение микронеровностей, среднее квадратическое отклонение микронеровностей. Для описания изменений величин микронеровностей использованы графики корреляции параметров микронеровностей и модуля упругости поверхности различных неметаллических материалов. Для описания зависимостей корреляции с представлением в компьютере используются аппроксимирующие полиномы. Предложена регрессионная модель, связывающая свойства материала с величиной микронеровностей. Приведены данные по глубине абляции для древесины, кости, кожи, оргстекла, графики корреляции между величиной микронеровности поверхности и плотностью материалов, между величиной микронеровности поверхности и модулем упругости материалов, коэффициент корреляции между величиной микронеровности поверхности и температурой воспламенения органических материалов. Полученные модели позволяют реализовать предложенный принцип лазерной обработки неметаллических материалов, заключающийся в измерении модуля упругости поверхности материала и на основании полученных измерений управлять режимами лазерной обработки изделий. Предложена установка лазерной обработки поверхности неметаллических материалов с реализацией принципа управления режимами обработки в зависимости от измеренных значений величины модуля упругости поверхности материала. Для измерения модуля упругости материала используется специальный датчик с вдавливанием индентора и компьютерной оценкой полученных измерений с формированием решений по управлению режимами лазерной обработки поверхности материала. Полученные экспериментальные результаты позволили изготовить ряд изделий с обеспечением заданного качества поверхности неметаллических материалов (письменный прибор, изделие-подарок молодоженам). Проведение экспериментов с изменением мощности лазерного излучения по результатам измерения модуля упругости поверхности неметаллических материалов показало эффективность оперативного задания режимов работы лазера с обеспечением качества поверхности неметаллических материалов.

Ключевые слова: качество поверхности, корреляция, лазерная обработка, микронеровность, модуль упругости

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, А.В. Усольцева, В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Оценка шероховатости поверхности неметаллических
материалов при лазерной обработке.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

For citation:

Alekseev VA, Usoltseva AV, Usoltsev VP, Yuran SI.
Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during
Laser Processing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during Laser Processing

V.A. Alekseev¹, A.V. Usoltseva¹, V.P. Usoltsev¹, S.I. Yuran²

¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University,
Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia

²Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

Received 15.04.2024

Accepted for publication 10.06.2024

Abstract

Experimental studies of the surface of non-metallic materials have been carried out to determine the roughness parameters of materials such as leather, bone, wood, plastic after processing the surface of materials with a laser beam. To assess the quality of the surface layer of materials, the depth of penetration of laser radiation into the material, the average value of the micro unevenness, and the mean square deviation of the micro unevenness were used. To describe the changes in the values of the micro unevenness, graphs of the correlation of the parameters of the micro unevenness and the modulus of elasticity of the surface of various non-metallic materials were used. Approximating polynomials are used to describe the correlations with the representation in a computer. A regression model is proposed that relates the properties of the material to the magnitude of the micro unevenness. Data on the depth of ablation for wood, bone, leather, plexiglass are presented, graphs of the correlation between the amount of surface micro unevenness and the density of materials, between the amount of surface micro-roughness and the modulus of elasticity of materials, the correlation coefficient between the amount of surface micro unevenness and the ignition temperature of organic materials. The obtained models make it possible to implement the proposed principle of laser processing of non-metallic materials, which consists in measuring the modulus of elasticity of the surface of the material and, based on the measurements obtained, control the modes of laser processing of products. The installation of laser surface treatment of non-metallic materials with the implementation of the principle of control of processing modes depending on the measured values of the modulus of elasticity of the surface of the material is proposed. To measure the elastic modulus of a material, a special sensor is used with indentation of the indenter and computer evaluation of the measurements obtained with the formation of solutions for controlling the modes of laser surface treatment of the material. The experimental results obtained made it possible to manufacture a number of products to ensure a given surface quality of non-metallic materials (a writing device, a gift for the newlyweds). Conducting experiments with changes in the power of laser radiation based on the results of measuring the modulus of elasticity of the surface of non-metallic materials has shown the effectiveness of operational setting of laser operating modes to ensure the quality of the surface of non-metallic materials.

Keywords: surface quality, correlation, laser treatment, micro unevenness, modulus of elasticity

Адрес для переписки:

Юран С.И.
Удмуртский государственный аграрный университет,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Address for correspondence:

Yuran S.I.
Udmurt State Agrarian University,
Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru

Для цитирования:

В.А. Алексеев, А.В. Усольцева, В.П. Усольцев, С.И. Юран.
Оценка шероховатости поверхности неметаллических
материалов при лазерной обработке.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

For citation:

Alekseev VA, Usoltseva AV, Usoltsev VP, Yuran SI.
Assessment of Surface Roughness of Non-Metallic Materials during
Laser Processing.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):131–141. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-131-141

Введение

Лазеры широко используются в различных областях техники, в том числе при изготовлении художественно-промышленных изделий. По сравнению с традиционными методами обработка материалов с помощью лазера обладает рядом неоспоримых преимуществ [1, 2]. Основной проблемой применения лазерной обработки в промышленности и декоративно-прикладном искусстве является отсутствие научно обоснованной информации о режимах обработки различных материалов. Часто при использовании одинаковых режимов для обработки различных материалов происходит снижение качества продукции, увеличение времени обработки и расхода энергии [3, 4].

Лазерная технология позволяет имитировать резьбу, наносить долговечные рельефные изображения, но до сих пор режимы обработки недостаточно отработаны, поэтому встречаются изделия, выполненные при неподходящем для данного материала режиме. Они имеют низкие эстетические показатели; причиной тому могут быть либо низкая мощность излучения, либо слишком высокая скорость обработки. В результате применения не соответствующих породе материала режимов обработки снижается качество обработанной поверхности, обработка лазером происходит не полностью, рисунок может оказаться нечётким, требуется повторение операции лазерного воздействия или, напротив, происходит сильный ожог, обугливание и даже возгорание кромок реза из-за высокой мощности излучения.

Экономическая эффективность лазерного резания повышается при выборе правильных режимов за счёт улучшения качества обрабатываемой поверхности и минимального расхода энергии. Немаловажное значение имеет время, затрачиваемое на лазерную обработку. Часто при задании режимов лазерной обработки возникают трудности, связанные с присутствием сопутствующих и мешающих воздействий, не предусмотренных в стандартных методиках.

В настоящее время в большинстве случаев конструкторы и технологи вынуждены совершенствовать дизайн, качество поверхности, разрабатывать технологию лазерной обработки на основании накопленного опыта [1, 5, 6]. Часто разработчикам не удаётся реализовать

замысел, предусмотренный проектом, в связи с недостаточной изученностью возможностей технологий и отсутствием рекомендаций для их применения [7, 8].

В связи с этим актуальной задачей является разработка методики по заданию режимов лазерной обработки материалов, позволяющих получить необходимое качество поверхности изделий из различных материалов, например, древесины, кожи, кости, органического стекла и др.

Рассматривая поверхность материала как границу между материалом и окружающей средой, состояние поверхности можно представить моделью поверхности, содержащей множество параметров (шероховатость, волнистость, пористость, фактура, рельеф, твёрдость и др.), связанных с природой материала и условиями образования поверхности, полученной после обработки [7–10]. Проведённые исследования показали возможность получения необходимой шероховатости поверхности неметаллических материалов за счёт предварительно заданных обоснованных режимов лазерной обработки [11–14].

Методика эксперимента

Исследование выполнили с использованием оборудования:

- лазерная установка Trotec Speedy 300, длина волны лазерного излучения 10,6 мкм, максимальная скорость обработки 3,55 м/с, максимальная мощность лазера 30 Вт;

- микроинтерферометр МИИ 4, диапазон измерения параметров шероховатости $R_{\max}$ и R_z и толщины плёнок 0,1–0,8 мкм, линейное поле зрения в пространстве предмета 0,3 мм;

- денситометр ДНС-2, диапазон измерения оптической плотности чёрно-белых материалов (логарифмический масштаб) 0,00–4,00 Б, предел допускаемой основной погрешности измерений 2 %, разрешающая способность 0,01 Б;

- фотоэлектрический блескомер ФБ-2, диапазон измерений показателя степени блеска 0–65 %, диапазон измерений показателя степени белизны 0–100 %, основная абсолютная погрешность ± 4 %.

Исследование проводили при изменении мощности лазерного излучения от 0,64 Вт до 9,6 Вт, при постоянной скорости перемещения лазерного излучения 0,27 м/с, разрешающей способности 500 dpi, частоте импульсов 1000 Гц,

диаметре сфокусированного лазерного луча 0,1 мм, вертикальном направлении лазерного луча на материал.

Для задания режимов лазерного излучения проведено воспроизведение ступенчатого клина с изменением мощности лазерного излучения. В каждой из 15 ступеней производились 10 точечных измерений. Изображения поверхности после лазерной обработки,

полученные на микроинтерферометре «МИИ-4» (режим микроскопа) в каждой из 15 ступеней полутонного клина, приведены на рисунке 1.

В общем случае параметры поверхности определяются режимами лазерной обработки и физико-механическими свойствами материала. Физико-механические свойства материалов приведены в таблице 1.

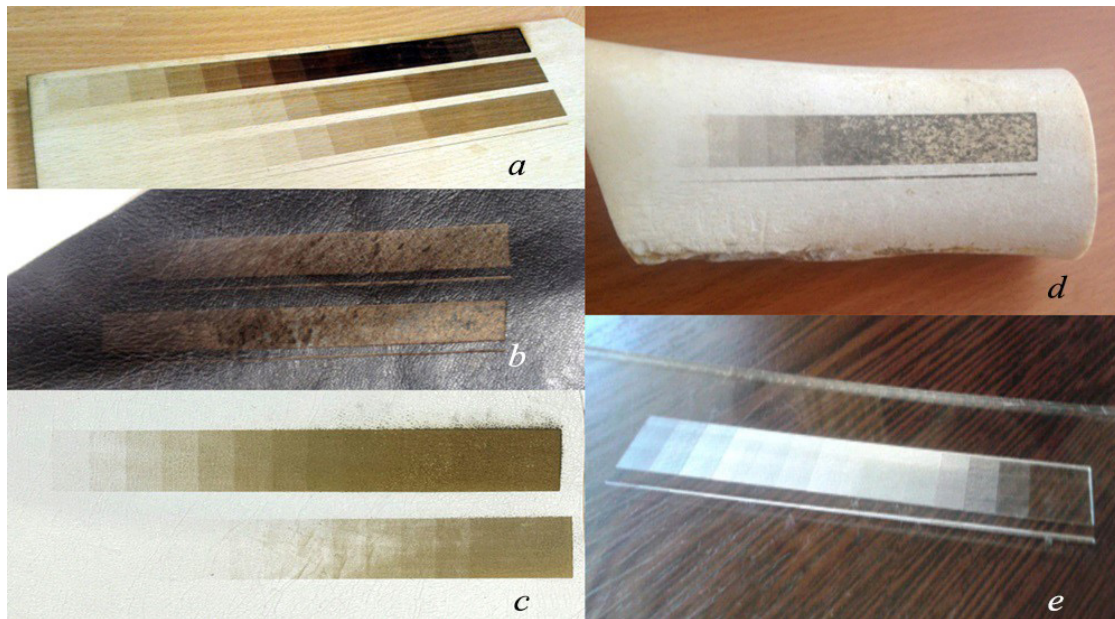


Рисунок 1 – Полученные образцы ступенчатого клина на древесине (a), тёмной (b) и светлой (c) коже, кости (d), оргстекле (e)

Figure 1 – The obtained samples of a stepped wedge on wood (a), dark (b) and light (c) skin, bone (d), plexiglass (e)

Таблица 1/ Table 1

Физико-механические свойства материалов

Physical and mechanical properties of materials

Наименование показателей Name of indicators	Оргстекло Plexiglass	Тёмная кожа Dark skin	Светлая кожа Light skin	Кость Bone	Древесина Wood
Плотность, кг/м ³ Density, kg/m ³	1190	800–850 250–1250	800–850 250–1250	2060–2470	380–1110
Твёрдость, МПа Hardness, MPa	70–120			33–247	40–80
Модуль упругости, ГПа Modulus of elasticity, GPa	2000–2900	2500–6500 (условный) conditional	2500–6500 (условный) conditional	13.5–31.3	12–16
Температура размягчения, °C Softening temperature, °C	90–105				
Температура обугливания, °C Charring temperature, °C					120–150
Температура воспламенения, °C Ignition temperature, °C	460–635	130	130	800	250–300

Физико-механические свойства материалов, приводимые в литературе, основаны на области их применения, а поскольку области применения у приведённых материалов разные, подбор параметров для сравнения представляет определённые трудности.

Среднюю глубину абляции и среднюю высоту неровностей профиля поверхности прозрачного бесцветного органического стекла, натуральной тёмной и светлой кожи, кости и

древесины при изменении мощности лазерного излучения можно представить непрерывными плавными возрастающими выпукло-вогнутыми поверхностями (рисунки 2 и 3). Средняя глубина абляции изменяется от 0,01 до 2,97 мм. Средняя высота неровностей профиля поверхности изменяется от 0,05 до 0,5 мм. Наличие изменений соизмеримого масштаба свидетельствует об общности характеристик материалов.

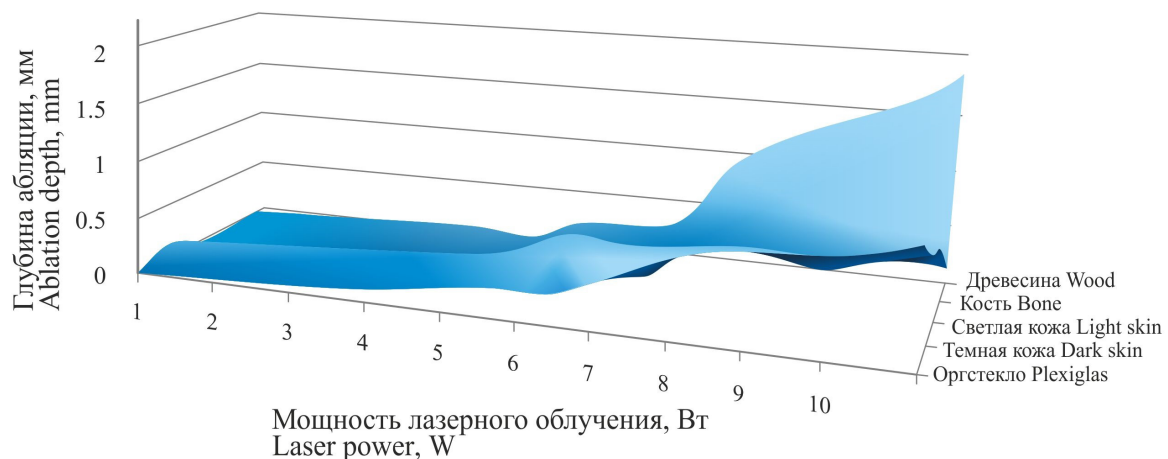


Рисунок 2 – Средняя глубина абляции для различных материалов в зависимости от мощности лазерного излучения: 1 – прозрачное бесцветное органическое стекло; 2 – натуральная тёмная и 3 – светлая кожа; 4 – кость; 5 – древесина

Figure 2 – Average ablation depth for various materials depending on the laser radiation power: 1 – trans-parent color-less organic glass; 2 – natural dark and 3 – light leather; 4 – bone; 5 – wood

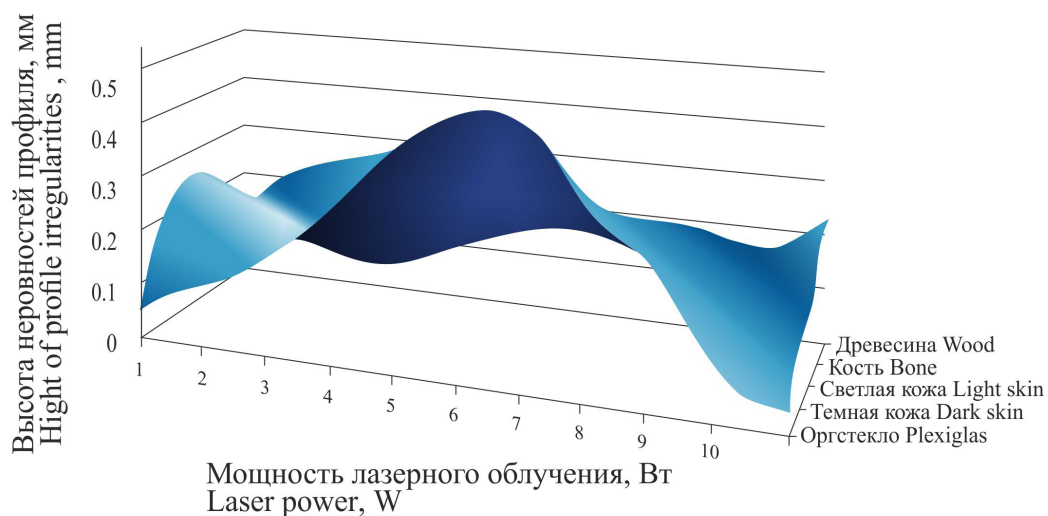


Рисунок 3 – Среднее арифметическое значение отклонения профиля для различных материалов

Figure 3 – The arithmetic mean of the profile deviation for various materials

Известно, что коэффициент корреляции вычисляется по следующей формуле:

$$r = \frac{\sum_{l=1}^n ((x_l - \bar{x})(y_m - \bar{y}))}{\sqrt{\sum_{l=1}^n (x_l - \bar{x})^2 \sum_{l=1}^n (y_m - \bar{y})^2}}, \quad (1)$$

где x_l , y_m – элементы массивов данных l и m ступеней клина соответственно; $\bar{x}$, $\bar{y}$ – средние значения массивов данных l и m ступеней клина, соответственно; n – количество ступеней клина.

Для выявления степени влияния факторов рассчитаны коэффициенты корреляции между величиной микронеровностей и модулем упругости, плотностью, температурой воспламенения (рисунки 4–6). Коэффициенты корреляции рассчитаны на каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного со ступенчатым изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт с шагом 0,64 Вт.

Микронеровности характеризуют шероховатость поверхности. Величина микронеровностей определялась по параметрам шероховатости, по ГОСТ 2789-73 «Шероховатость поверхности. Параметры, характеристики и обозначения». Величина микронеровностей рассчитывалась по R_z – высоте неровностей профиля, снятой в 10 точках, R_a – среднему арифметическому значению отклонения профиля.

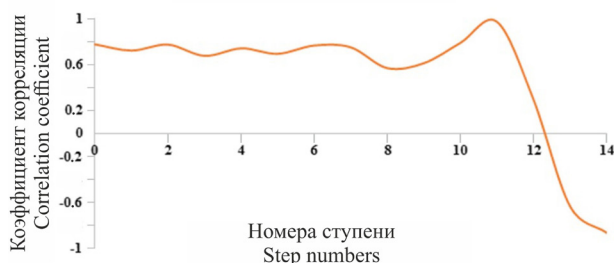


Рисунок 4 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и модулем упругости материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 4 – The correlation coefficient between the magnitude of the surface micro-dimensions and the modulus of elasticity of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей на соседних ступенях на поверхности изделий из кожи, кости, дерева и оргстекла, имеющий случайный нелинейный волнообразный характер, и свидетельствует

о том, что корреляционная связь между величиной микронеровностей на соседних ступенях практически отсутствует. Коэффициент корреляции ниже порогового уровня изменяет знак, либо положительный, либо отрицательный, даже при незначительном увеличении мощности лазерного излучения, поэтому трудно предположить, какая величина микронеровностей будет получена.

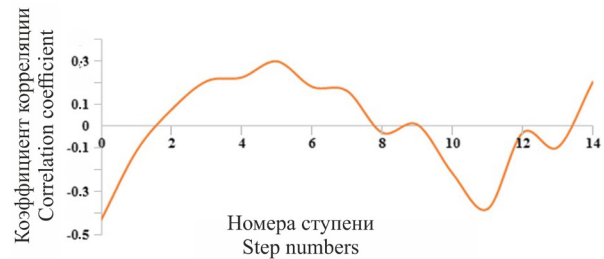


Рисунок 5 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и плотностью материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 5 – Correlation coefficient between the size of the surface micro-dimensions and the density of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

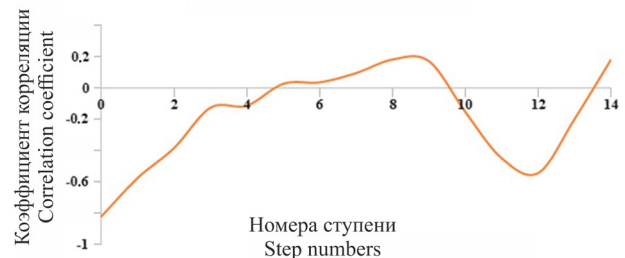


Рисунок 6 – Коэффициент корреляции между величиной микронеровностей поверхности и температурой воспламенения материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 6 – Correlation coefficient between the size of the surface micro-dimensions and the ignition temperature of the material in each of the 15 stages of the step wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Для определения аналитических выражений полиномов аппроксимирующих функций применён метод интерполяции с использованием аппроксимации по методу наименьших квадратов с выполнением условия:

$$F = \sum_{i=1}^n (y_i - \beta(x_i))^2 \rightarrow \min, \quad (2)$$

где F – минимизируемая функция; y_i – эмпирические точки статистической зависимости; (β, x_i) – аналитическая функциональная зависимость.

С помощью специализированного программного средства MathCAD по выражению (2) получена аппроксимирующая функция коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и модулем упругости материала: $R = -0,0034x^3 + 0,0538x^2 - 0,2195x + 0,8864$ (рисунок 4).

Аналогично получены аппроксимирующие функции коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и плотностью материала: $R = 0,003x^3 - 0,0675x^2 + 0,4052x - 0,4569$ (рисунок 5).

Аналогично получены аппроксимирующие функции коэффициента корреляции между величиной микронеровностей поверхности и температурой воспламенения материала: $R = 0,0027x^3 - 0,0645x^2 + 0,4411x - 0,8921$ (рисунок 6).

Наибольшее влияние на величину микронеровностей из физико-механических свойств материалов оказывает упругость материала. Для учёта влияния величины отклонений указанных переменных рассчитаем коэффициенты парной, чистой (частной) и множественной (совокупной) линейной корреляции Пирсона. Согласно методу прямого счёта по несгруппированным данным, коэффициент парной корреляции Пирсона имеет вид:

$$r_{xy} = r_{yx} = \frac{n \sum_{i=1}^n x_i y_i - \sum_{i=1}^n x_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{[n \sum_{i=1}^n x_i^2 - (\sum_{i=1}^n x_i)^2] \times [n \sum_{i=1}^n y_i^2 - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]}}. \quad (3)$$

Этот коэффициент также изменяется от -1 до $+1$. При наличии нескольких переменных рассчитывается коэффициент множественной (совокупной) линейной корреляции Пирсона. Для трёх переменных x, y, z он имеет вид:

$$R_{y/xz} = \sqrt{\frac{r_{yx}^2 + r_{yz}^2 - 2r_{yx} \times r_{yz} \times r_{xz}}{1 - r_{xz}^2}}. \quad (4)$$

Этот коэффициент изменяется от 0 до 1 . Если элиминировать (совсем исключить или зафиксировать на постоянном уровне) влияние z на x и y , то их "общая" связь превратится в "чистую", образуя чистый (частный) коэффициент линейной корреляции Пирсона:

$$r_{xy.z} = r_{yx.z} = \frac{r_{xy} - r_{xz} \times r_{yz}}{\sqrt{(1 - r_{xz}^2) \times (1 - r_{yz}^2)}}. \quad (5)$$

Этот коэффициент изменяется от -1 до $+1$. Квадраты коэффициентов корреляции (7)–(8) называются коэффициентами (индексами) детерминации – соответственно парной, чистой (частной), множественной (совокупной):

$$d_{xy} = r_{xy}^2 = r_{yx}^2 = d_{yx}; \quad (6)$$

$$d_{xy.z} = r_{xy.z}^2 = r_{yx.z}^2 = d_{yx.z}; \quad (7)$$

$$D_{y/xz} = R_{y/xz}^2. \quad (8)$$

Каждый из коэффициентов детерминации изменяется от 0 до 1 и оценивает степень вариационной определённости в линейной взаимосвязи переменных, показывая долю вариации одной переменной (y), обусловленную вариацией x и z . Для расчёта, приняв x – плотность материала, y – величину микронеровностей, z – модуль упругости, проводя расчёты по выражениям (3)–(8), получим:

$$r_{xy} = 0,0192, r_{xz} = -0,8437, r_{yz} = 0,3999, R_{y/xz} = 0,4541, r_{xy.z} = 0,7246, d_{xy} = 0,000369, d_{xy.z} = 0,5250, D_{y/xz} = 0,2062.$$

Взаимосвязь переменных x и y является положительной, но не тесной, составляя по их парному коэффициенту корреляции величину $r_{xy} = 0,0192$ и по чистому – величину $r_{xy.z} = 0,7246$. Она оценивалась по шкале Чеддока и получилась соответственно, как "слабая" и "высокая". Коэффициенты детерминации $d_{xy} = 0,000369$ и $d_{xy.z} = 0,5250$ свидетельствуют о том, что вариация y (величина микронеровностей) обусловлена линейной вариацией x (плотности материала) только на $0,0369\%$ в их общей взаимосвязи и в чистой взаимосвязи – на $52,5\%$. Такое положение обусловлено значительным влиянием на x и y третьей переменной z – модуля упругости. Теснота этой взаимосвязи составляет соответственно $r_{xz} = -0,8437$ и $r_{yz} = 0,3999$.

Коэффициент множественной (совокупной) корреляции трёх переменных показывает, что теснота линейной взаимосвязи x и z с y составляет величину $R_{y/xz} = 0,4541$, и оценивалась по шкале Чеддока как "умеренная". Коэффициент множественной детерминации составляет величину $D_{y/xz} = 0,2062$ и свидетельствует о том, что $20,62\%$ всей вариации y (величина микронеровностей) обусловлена совокупным воздействием на неё переменных x и z .

Остальные 79,38 % обусловлены воздействием на y других факторов или же криволинейной связью переменных y, x, z .

Используя приведенные в [11, 12] выражения для связи между качеством поверхности и режимами лазерной обработки, в общем случае, представим линейную двухфакторную регрессионную модель:

$$y = a_1 + a_2x + a_3z. \quad (9)$$

Коэффициенты модели a_1, a_2, a_3 определены методом наименьших квадратов по формулам из корреляционно-регрессионного анализа.

В результате математической обработки данных эксперимента получена регрессионная модель, связывающая величины микронеровностей и физико-механические свойства материала, при этом выражение (9) преобразуется к частному виду:

$$y = -0,3287 - 0,00051x - 0,000039z, \quad (10)$$

где x – плотность материала; y – величина микронеровностей; z – модуль упругости.

Выражение (10) используется для получения заданной величины микронеровностей с учётом влияния плотности материала и модуля упругости.

Коэффициент корреляции между глубиной абляции и плотностью приведён на рисунке 7.

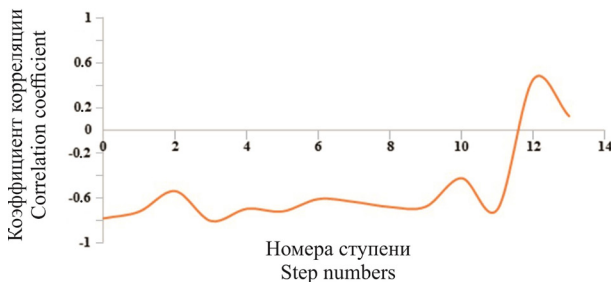


Рисунок 7 – Коэффициент корреляции между глубиной абляции и плотностью материала в каждой из 15 ступеней ступенчатого клина, полученного с изменением мощности лазерного излучения от 0,64 до 9,6 Вт

Figure 7 – Correlation coefficient between the depth of ablation and the density of the material in each of the 15 stages of the stepped wedge obtained with a change in laser radiation power from 0.64 to 9.6 W

Аналогично (рисунок 7) получены аппроксимирующие функции связи величины микронеровностей с плотностью $R = 0,0007x^3 - 0,0092x^2 + 0,0619x - 0,6494$.

Наибольшее влияние на величину микронеровностей из физико-механических свойств материалов оказывает упругость материала, а на глубину абляции материала – его плотность. Снижение коэффициента корреляции при повышенной мощности излучения лазера вызвано нелинейностью процессов пиролиза и высоким уровнем обугливания обрабатываемых материалов.

Таким образом, полученные аппроксимирующие полиномы для различных видов графиков, отражающих влияние различных мешающих факторов на микронеровности, могут быть использованы для описания микронеровностей различных неметаллических материалов.

В настоящей работе авторы исходили из предположения, что лазерная обработка сопровождается изменением шероховатости поверхности, и, как следствие, изменением высоты неровностей профиля, среднего арифметического значения отклонения профиля, дисперсии, оптической плотности, блеска, что влияет на оценку потребителей и определяет потребительские свойства, декоративные характеристики и индивидуальные особенности художественно-промышленных изделий.

В результате проведённого анализа можно сделать вывод, что, изменяя мощность лазерной обработки, варьируя в низком, среднем, или высоком диапазоне, а также изменяя количество проходов лазерным лучом, можно получить наиболее качественное и чёткое изображение, отвечающее требованиям потребителей и соответствующим стандартам.

Аналогичную методику можно использовать при задании скорости лазерного гравирования, разрешающей способности, частоты импульсов, диаметра сфокусированного лазерного луча на материале, угла падения лазерного луча и др.

Для управления качеством поверхности при лазерной обработке художественно-промышленных изделий путём изменения режимов лазерной обработки на основе измерения основных влияющих факторов физико-механических характеристик материалов в условиях действия помех и неоднозначности существующих моделей динамики механических воздействий, проведено исследование показателей точности, повторяемости, воспроизводимости результатов экспериментального исследования качества поверхности при лазер-

ной обработке изделий художественных промыслов из кожи, кости, дерева и оргстекла.

Как было указано выше, наибольшее влияние на величину микронеровностей, определяющих качество поверхности обработанного материала, оказывает упругость материала. Для снижения влияния изменения модуля упругости материала на качество поверхности в процессе лазерной обработки разработана функциональная схема установки для лазерной обработки поверхности неметаллических материалов (рисунок 8) [15].

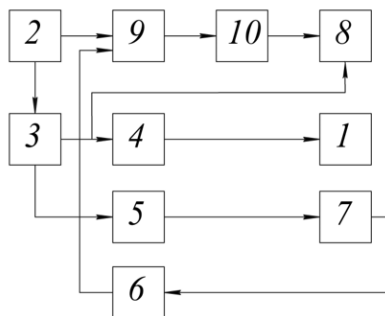


Рисунок 8 – Функциональная схема лазерной установки: 1 – рабочий стол; 2 – устройство ввода программ; 3 – устройство обработки программ; 4 – устройство управления рабочим столом; 5 – устройство управления датчиком; 6 – устройство обратной связи; 7 – датчик измерения модуля упругости твёрдых материалов; 8 – оптическая лазерная головка; 9 – устройство задания режимов лазерной обработки; 10 – лазер

Figure 8 – Functional diagram of the laser installation: 1 – desktop; 2 – program input device; 3 – program processing device; 4 – desktop control device; 5 – sensor control device; 6 – feedback device; 7 – sensor for measuring the modulus of elasticity of solid materials; 8 – optical laser head; 9 – device for setting laser processing modes; 10 – laser

Основной принцип работы установки заключается в непрерывном измерении модуля упругости поверхности материала и через обратную связь происходит регулировка режимов лазерной обработки материала.

Установка содержит рабочий стол 1, на который устанавливается объект лазерной обработки, устройство ввода программ 2, в которое вводится управляющая программа лазерной обработки (вид лазерной обработки, резка или гравирование, координаты обработки), устройство обработки программ 3, устройство управления рабочим столом 4, устройство управления датчиком 5, устройство обратной связи 6, датчик измерения модуля упругости

твёрдых материалов 7, установленный перед лазером (оптической лазерной головкой 8), устройство задания режимов лазерной обработки 9 и лазер 10.

По команде с устройства ввода программ 2 координаты обработки поступают в устройство обработки программ 3, обрабатываются и поступают в устройство управления рабочим столом 4 или оптической лазерной головкой 8, по команде с которого рабочий стол 1 перемещает объект лазерной обработки в рабочую зону лазерного излучения и расположения датчика измерения модуля упругости материалов 7. По команде с устройства обработки программ 3 устройство управления 5 датчиком активизирует датчик измерения модуля упругости материалов 7. Значения модуля упругости обрабатываемого материала через устройство обратной связи 6 подаются в устройство задания режимов лазерной обработки 9. Устройство задания режимов лазерной обработки 9 по командам, поступившим с устройства ввода программ 2 и устройства обратной связи 6, задаёт вид лазерной обработки, координаты обработки, мощность лазерного излучения, скорость перемещения лазерного луча и др., которые поступают в лазер 10.

В качестве датчика 7 измерения модуля упругости твёрдых материалов использовано устройство на основе патента РФ [16], реализующее способ определения модуля упругости Юнга материала микро- и наночастиц путём совместного использования экспериментального вдавливания индентора и компьютерного моделирования вдавливания индентора методом конечных элементов.

Технологические режимы лазерной резки и лазерного гравирования органического стекла, дерева, кости, кожи, металла, выбранные в результате эксперимента, использованы при изготовлении настольного письменного прибора (патент РФ на промышленный образец 109645) и подарка молодоженам (лазерное гравирование хрусталя, кости, кожи, металла).

Заключение

Проведение натурных экспериментов с изменением мощности лазерного излучения и использованием универсальной измерительной аппаратуры позволяет имитировать любой из распространённых технологических режимов

лазерной обработки, выделить и учесть влияние факторов, оказывающих наибольшее влияние на качество поверхности, объективно обосновать выбор идентификационных признаков восприятия качества лазерной обработки и параметров задания режимов работы лазера, обеспечить повышение воспроизводимости полученных результатов.

Экспериментальное исследование глубины абляции для различных неметаллических материалов показало зависимость шероховатости поверхности при лазерной обработке от мощности лазерного излучения. При этом шероховатость различных натуральных материалов (кожа, кость, дерево) меняется от образца к образцу изделия.

Для оценки различных поверхностей образцов изделий рассчитаны коэффициенты корреляции между величинами микронеровностей и модулем упругости поверхности материала. Для полученных зависимостей корреляции параметров использованы аппроксимирующие функции (полиномы) для представления полученных зависимостей в компьютерной модели.

Алгоритмическое описание микронеровностей поверхности различных неметаллических материалов с корреляционными зависимостями позволяет обеспечить оперативную регулировку режимов лазерной обработки для управления степенью шероховатости поверхности различных материалов.

Предложена лазерная установка обработки поверхности неметаллических материалов с управлением режимами обработки по результатам измерения модуля упругости поверхности обрабатываемого материала. Для реализации предложенного принципа в установке расположен специальный датчик измерения модуля упругости поверхности материала, содержащий индентор с вдавливанием в материал.

Таким образом, теория и практика лазерной обработки с рекомендациями по заданию режимов обработки материалов подтверждает огромные возможности лазерных технологических процессов, которые позволяют эффективно решать крупные производственные и художественные задачи. При этом применение лазерной техники выводит производство на новый высокоинтеллектуальный уровень.

Проведённые исследования позволяют повысить эффективность применения лазерных технологий при создании художественно-промышленных изделий.

Список использованных источников

1. *Obilor A.F.* Micro texturing of polymer surfaces using lasers: a review / A.F. Obilor [et al.] // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2022. – Vol. 120. – Pp. 103–135.
DOI: 10.1007/s00170-022-08731-1
2. *Liu X.* Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses / X. Liu, D. Du, G. Mourou // *IEEE J. of Quantum Electronics*. – 1997. – Vol. 33. – № 10. – Pp. 1706–1716. **DOI:** 10.1109/3.631270
3. *Приборостроение – XX век* / сост. М.С. Шкабардя. – М.: Совершенно секретно, 2004. – 768 с.
4. *Соколова М.Л.* Материалы в дизайне / М.Л. Соколова. – М.: Издательство МИСИС, 2003. – 168 с.
5. *Богомолов В.Г.* Исследование влияния лазерной обработки на нивелирование пороков кожевенного сырья / В.Г. Богомолов [и др.] // *Кожевенно-обувная промышленность*. – 2013. – № 2. – С. 34–37.
6. *Pfleging W.* Laser Micro and Nano Processing of Metals, Ceramics and Polymers / W. Pfleging, R. Kohler, I. Südmeyer, M. Rohde. – *Laser-Assisted Fabrication of Materials*, Springer, 2013. – Pp. 319–374.
DOI: 10.1007/978-3-642-28359-8_8
7. *Губанова Л.А.* Фотоника поверхности и её основные свойства / Л.А. Губанова. – СПб: Университет ИТМО, 2022. – 68 с.
8. *Гибадуллин И.Н.* Изображение профиля поверхности как графический критерий оценки шероховатости / И.Н. Гибадуллин, В.А. Валетов // *Изв. вузов. Приборостроение*. – 2019. – Т. 91. – № 1. – С. 86–92. **DOI:** 10.17586/0021-3454-2019-62-1-86-92
9. *Mulko L.* Structuring and functionalization of non-metallic materials using direct laser interference patterning: a review / L. Mulko, M. Soldera, A.F. Fabián Lasagni // *Nano-photonics*. – 2022. – № 11(2). – Pp. 203–240.
DOI: 10.1515/nanoph-2021-0591
10. *Chang Chih-Wei.* Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method / Chih-Wei Chang, Chun-Pao Kuo // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. – 2007. – Vol. 47. – Iss. 1. – Pp. 141–147.
DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009
11. *Григорьянц А.Г.* Технические процессы лазерной обработки / А.Г. Григорьянц, И.Н. Шиганов, А.И. Мисюров. – М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2006. – 664 с.

12. Вейко В.П. Технологические лазеры и лазерное излучение / В.П. Вейко. – СПб: Университет ИТМО, 2007. – 52 с.

13. Шахно Е.А. Математические методы описания лазерных технологий / Е.А. Шахно. – СПб: СПбГИТМО (ТУ), 2019. – 77 с.

14. Харанжевский Е.В. Физика лазеров, лазерные технологии и методы математического моделирования лазерного воздействия на вещество / Е.В. Харанжевский, М.Д. Кривилев. – Ижевск: Издательство Удмуртский университет, 2011. – 187 с.

15. Патент № 2801913 РФ. МПК В23К 26/40. Способ лазерной обработки поверхности материалов / В.А. Алексеев, В.П. Усольцев, А.В. Усольцева, С.И. Юран // Заявитель Удмуртский ГАУ. Заявка № 2022113027 от 13.05.2022. Оpubл. 18.08.2023. Бюл. № 23.

16. Патент 2494038 РФ. МПК В82У 35/00, G01N 3/40. Способ определения модуля упругости Юнга материала микро- и наночастиц / А.В. Вахрушев, А.А. Шушков, С.Н. Зыков // Заявитель Институт механики УрО РАН. Заявка: № 2012110560 от 20.03.2012. Оpubл.: 27.09.2013. Бюл. № 27.

References

1. Obilor AF, Pacella M, Wilson A, Silberschmidt VV. Micro texturing of polymer surfaces using lasers: a review. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2022;120:103–135.

DOI: 10.1007/s00170-022-08731-1

2. Liu X, Du D, Mourou G. Laser Ablation and Micromachining with Ultrashort Laser Pulses. IEEE J. of Quantum Electronics. 1997;33(10):1706–1716.

DOI: 10.1109/3.631270

3. Shkabardnya MS. Instrument engineering – the twentieth century. Moscow: Top Secret Publ. 2004, 768 p.

4. Sokolova ML. Materials in the design. Moscow: MISIS Publ. 2003;168 p.

5. Bogomolov VG, Nekrasova NI, Bykovskaya NN, Danilin DV, Shiganov IN, Bogdanov AV. Investigation of the effect of laser processing on leveling the pores of leath-

er raw materials. Leather and shoe industry. 2013;(2):34–37. (In Russ.).

6. Pfleging W, Kohler R, Südmeyer I, Rohde M. Laser Micro and Nano Processing of Metals, Ceramics and Polymers. Laser-Assisted Fabrication of Materials. Springer Publ. 2013;319–374.

DOI: 10.1007/978-3-642-28359-8_8

7. Gubanov LA. Photonics of the surface and its basic properties. St. Petersburg: ITMO University Publ. 2022;68 p.

8. Gibadullin IN, Valetov VA. Surface profile image as a graphical criterion for roughness assessment. Izvestiya Vuzov. Instrumentation. 2019;91(1):86–92. (In Russ.).

DOI: 10.17586/0021-3454-2019-62-1-86-92

9. Mulko L, Soldera M, Fabián Lasagni AF. Structuring and functionalization of non-metallic materials using direct laser interference patterning: a review. Nanophotonics. 2022;11(2):203–240.

DOI: 10.1515/nanoph-2021-0591

10. Chang Chih-Wei, Kuo Chun-Pao. Evaluation of surface roughness in laser-assisted machining of aluminum oxide ceramics with Taguchi method. International Journal of Machine Tools and Manufacture. 2007;47(1):141–147. DOI: 10.1016/j.ijmachtools.2006.02.009

11. Grigoryants AG, Shiganov IN, Misyurov AI. Technical processes of laser processing. Moscow: Bauman Moscow State Technical University Publ. 2006;664 p.

12. Veiko V.P. Technological lasers and laser radiation. St. Petersburg: ITMO University Publ. 2007;52 p.

13. Shakhno EA. Mathematical methods for describing laser technologies. St. Petersburg: SPbGITMO Publ. 2019;77 p.

14. Kharanzhevsky EV, Krivilev MD. Laser physics, laser technologies and methods of mathematical modeling of laser action on matter. Izhevsk: Udmurt University Publ. 2011;187 p.

15. Alekseev VA, Usoltsev VP, Usoltseva AV, Yuran SI. Method of laser surface treatment of materials. Patent RF, no. 2801913, 2023. (in Russian)

16. Vakhrushev AV, Shushkov AA, Zykov SN. Method for determining the Young's modulus of elasticity of a material of micro- and nanoparticles. Patent RF no. 2494038, 2013. (in Russian)

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

Структура планарной поверхности кремниевых пластин до и после быстрой термообработки

В.А. Пилипенко¹, А.А. Сергейчик¹, Д.В. Шестовский¹, В.А. Солодуха²

¹ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга «ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь

²ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси,
Логойский тракт, 22, г. Минск 220113, Беларусь

Поступила 27.02.2024

Принята к печати 20.05.2024

На сегодня важной задачей при создании современных изделий микроэлектроники является устранение на поверхности пластин механически нарушенного слоя. Быстрая термообработка оптическими импульсами секундной длительности является одним из методов устранения нарушений кристаллической решётки, возникающих после ионного легирования. Однако, остался открытым вопрос восстановления кристаллической структуры поверхностного механически нарушенного слоя на планарной стороне пластины. Проведение данных исследований методами просвечивающей электронной микроскопии, анализа кривых дифракционного отражения и электронной Оже-спектроскопии не позволило получить достоверную информацию о состоянии кристаллической решётки в поверхностном слое толщиной менее 30 нм, который является ответственным за структурное совершенство подзатворных диэлектриков толщиной менее 75 нм. Это, в свою очередь, не позволяло предложить модель твердофазной рекристаллизации и дать её математическое описание. Целями работы являлись: – установление методом дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин состояния кристаллической решётки кремния в поверхностном слое толщиной менее 30 нм до и после быстрой термообработки; – проведение анализа элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния до и после быстрой термообработки; – разработка модели твердофазной рекристаллизации поверхностного нарушенного слоя после быстрой термической обработки и её математическое описание. Приведены картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхностного слоя исходных кремниевых пластин толщиной менее 30 нм до и после быстрой термообработки, а также результаты очистки планарной поверхности исходных кремниевых пластин от загрязняющих примесей. Предложены процессы, уменьшающие энергию активации процесса рекристаллизации механически нарушенного поверхностного слоя кремния и дано его математическое описание. Определены параметры быстрой термообработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для рекристаллизации механически нарушенного слоя на её планарной поверхности.

Ключевые слова: быстрая термическая обработка, нарушенный слой, кремниевая пластина, твердофазная рекристаллизация, деформационный потенциал

Адрес для переписки:

Сергейчик А.А.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

Address for correspondence:

Sergeichik A.A.
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,
Kazincin str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, А.А. Сергейчик, Д.В. Шестовский, В.А. Солодуха.
Структура планарной поверхности кремниевых пластин
до и после быстрой термообработки.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 142–150.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

For citation:

Pilipenko UA, Sergeichik AA, Shestovski DV, Solodukha VA.
Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid
Thermal Treatment.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):142–150. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid Thermal Treatment

U.A. Pilipenko¹, A.A. Sergeichik¹, D.V. Shestovski¹, V.A. Solodukha²

¹JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus

²SSPC «Optics, optoelectronics and laser equipment» National Academy of Sciences,
Logoiskiy trakt, 22, Minsk 220113, Belarus

Received 27.02.2024

Accepted for publication 20.05.2024

Abstract

Presently it is important to remove mechanically disturbed layer on wafer surface during creation of up-to-date microelectronic products. Rapid thermal treatment with optical pulses of second duration is one of the applicable methods for removing disturbances in crystal lattice emerging after ion implantation. However the crystal structure of mechanically disturbed layer on wafer planar side is still unclear. Researches by transmission electronic method, analysis of diffraction reflection curve and electronic Auger spectroscopy has failed to provide reliable data about the state of crystal lattice in surface layer of at least 30 nm thickness. Hence it was impossible to suggest a model of solid phase recrystallization and to present its mathematical description. The goals of the work were as follows: – identification of silicon crystal lattice state in surface layer of 30 nm thickness before and after rapid thermal treatment by backward reflected electrons diffraction method using raw Si wafers surface; – analysis of contamination element composition on the surface of raw silicon before and after rapid thermal treatment; – model development for solid phase recrystallization of surface disturbed layer after rapid thermal treatment and its mathematical description. Images of back ward reflected electrons diffraction using surface layer of raw silicon wafers' of 30 nm thickness and also the results of the planar surface of raw silicon wafers' cleaning from impurities are provided. Processes reducing the activating energy of mechanically disturbed silicon layer recrystallization process were suggested and its mathematical description was provided. Parameters of rapid thermal treatment mitigating the thermal impact on silicon wafer for recrystallization of mechanically disturbed layer on its planar surface were defined.

Keywords: rapid thermal treatment, disrupted layer, silicon wafer, solid phase recrystallization, deformation potential

Адрес для переписки:

Сергейчик А.А.
ОАО «ИНТЕГРАЛ» – управляющая компания холдинга
«ИНТЕГРАЛ»,
ул. Казинца, 121А, г. Минск 220108, Беларусь
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

Address for correspondence:

Sergeichik A.A.
JSC «Integral» – «Integral» Holding Management Company,
Kazinka str., 121A, Minsk 220108, Belarus
e-mail: anna.omelchenko.13177@mail.ru

Для цитирования:

В.А. Пилипенко, А.А. Сергейчик, Д.В. Шестовский, В.А. Солодуха.
Структура планарной поверхности кремниевых пластин
до и после быстрой термообработки.
Приборы и методы измерений.
2024. Т. 15. № 2. С. 142–150.
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

For citation:

Pilipenko UA, Sergeichik AA, Shestovski DV, Solodukha VA.
Structure of Silicon Wafers Planar Surface before and after Rapid
Thermal Treatment.
Devices and Methods of Measurements.
2024;15(2):142–150. (In Russ.).
DOI: 10.21122/2220-9506-2024-15-2-142-150

Введение

Важным условием создания надёжных изделий микроэлектроники является отсутствие на поверхности пластин механически нарушенного слоя и каких-либо загрязнений [1]. После финишной полировки поверхности на ней остаётся тонкий нарушенный слой, характеризующийся микроискажениями кристаллической решётки и остаточными механическими напряжениями. Наличие такого слоя при высокотемпературной обработке пластин, имеющей место при термическом окислении, отжиге ионно-легированных слоёв, эпитаксии, приводит к образованию дислокаций и повышению роста других дефектов. Качество подготовки поверхности оказывает большое влияние на формирование тонких (менее 0,1 мкм) диэлектрических слоев, т.к. в данном случае влияние дефектов поверхности на их параметры значительно увеличивается [2].

В связи с этим большое значение приобретают методы устранения механически нарушенного слоя на планарной поверхности кремниевых пластин. В настоящее время известно два наиболее приемлемых метода решения данной задачи. Первый метод предполагает проведение рекристаллизации нарушенного слоя с применением импульсного фотонного излучения наносекундной длительности [3], второй – с применением импульсного излучения галогенных ламп секундной длительности [4, 5]. В первом случае имеет место жидкофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния, во втором – твердофазная.

В случае твердофазной рекристаллизации остаётся открытым вопрос: насколько происходит восстановление кристаллической структуры поверхностного слоя менее 30 нм на планарной стороне кремниевой пластины, который имеет очень важное значение для качества подзатворных диэлектриков толщиной менее 75 нм. Методы просвечивающей электронной микроскопии, анализа кривых дифракционного отражения и электронной Оже-спектроскопии до сих пор не позволили получить достоверную информацию о состоянии кристаллической решётки в поверхностном слое кремния менее 30 нм [3].

При этом, если модель жидкофазной рекристаллизации хорошо описана в [6], то о

модели твердофазной рекристаллизации и её аналитическом описании данные в литературе практически отсутствуют. Поскольку процесс твердофазной рекристаллизации более предпочтителен для серийного производства из-за простоты используемого оборудования и его производительности, то описание модели его протекания, обеспечивающей возможность управления этим процессом, является актуальной задачей в области микроэлектроники.

Методика эксперимента

В качестве образцов для исследования использовались пластины кремния легированные бором (КДБ 10) ориентации $\langle 111 \rangle$ диаметром 100 мм после химико-механической полировки. Часть пластин проходила быструю термообработку (БТО) в естественных атмосферных условиях путём облучения с планарной стороны пластины некогерентным оптическим излучением в течение 7 с, обеспечивая нагрев пластин до температуры 1100 °С.

Для получения картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходного кремния и после БТО использовался растровый электронный микроскоп Versa 3D (ф. FEI, Нидерланды) со встроенной системой энергодисперсионного анализа (EDX) и дифракцией обратно отражённых электронов (ф. EDAX, Нидерланды). Для получения анализа элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния и после БТО применялся вторично-ионный масс-спектрометр TOF.SIMS 5 (ф. IONTOF, Германия).

Для описания предполагаемой модели рекристаллизации механически нарушенного слоя на планарной поверхности кремниевых пластин путём её БТО с применением импульсных фотонных потоков длительностью ≈ 7 с, обеспечивающей нагрев пластины до 1100 °С, использовались экспериментальные результаты, изложенные в работах [8, 9].

Результаты и их обсуждение

Электронно-микроскопические исследования для получения картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после БТО показали, что после проведения БТО имеют место значительные изменения в структуре

поверхностного слоя на планарной стороне пластины. Так, на пластинах до БТО, имеющих на планарной поверхности тонкий поверхностный слой с микроискажённой кристаллической решёткой и наличием остаточных механических напряжений Кикучи-линии имеют размытый

вид (рисунок 1а). После проведения БТО исходных кремниевых пластин Кикучи-линии стали более чётко выраженными (рисунок 1б). Это свидетельствует о формировании более совершенной кристаллической решётки поверхностного слоя толщиной менее 30 нм.



Рисунок 1 – Картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности: *a* – исходных кремниевых пластин; *b* – после быстрой термообработки

Figure 1 – Diffraction of back reflected electrons from the surface of: *a* – starting silicon wafers; *b* – after rapid thermal treatment

После проведения электронно-микроскопических исследований картин дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после БТО методом вторично-ионной масс-спектрометрии был сделан анализ элементного состава загрязнения поверхности данных образцов (рисунок 2). Анализ распределения элементного состава загрязнения поверхности показывает,

что абсолютные значения концентраций положительных ионов C, Fe, B, Na, Ca, Li после проведения БТО значительно уменьшились. Так, абсолютное значение положительных ионов Fe на поверхности кремния уменьшилось примерно в 2 раза, Na – в 2,5 раза, B – в 3,77 раз, C – в 4,67 раз, Ca – в 1,36 раз, Li – в 5 раз. При этом абсолютное значение положительных ионов Si осталось практически неизменным.

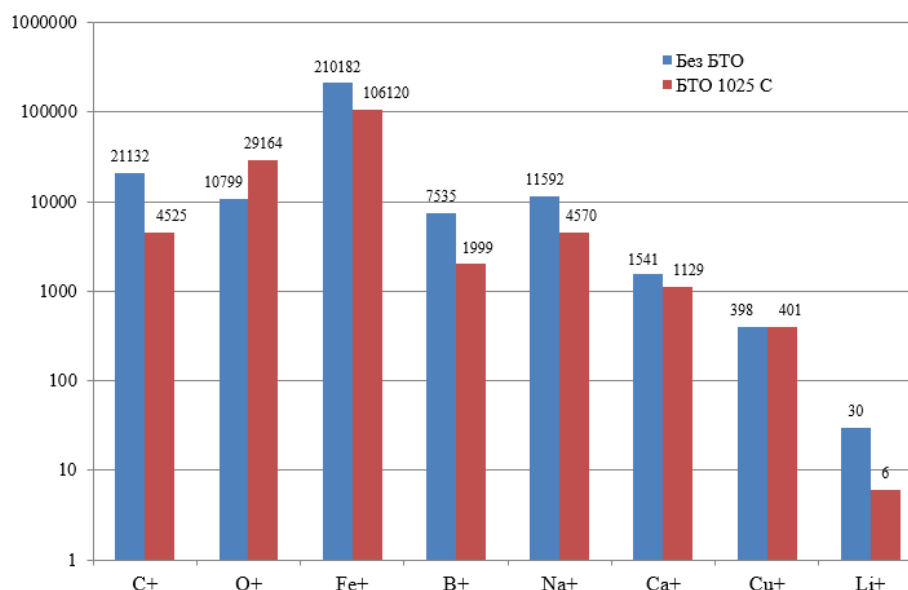


Рисунок 2 – Распределение элементного состава загрязнения поверхности исходного кремния и после быстрой термообработки

Figure 2 – Distribution of contamination element composition on the surface of starting silicon and after rapid thermal treatment (RTT)

Результаты анализа элементного состава загрязнения поверхности исходных кремниевых платин до и после БТО показывают, что при твердофазной рекристаллизации тонкого поверхностного слоя менее 30 нм происходит также его очистка от ионов металлов и углерода за счёт их диффузии к поверхности и последующей десорбции. Это приводит к уменьшению их концентрации на поверхности пластины. Полученные результаты свидетельствуют о том, что БТО поверхности исходных кремниевых платин обеспечивает как формирование более совершенной кристаллической структуры поверхностного слоя, так и очистку его от загрязняющих примесей.

На основании полученных экспериментальных результатов и экспериментальных результатов, изложенных в работах [4, 5], можно предложить следующую модель рекристаллизации механически нарушенного слоя при БТО. Поскольку нарушенный слой представляет собой механически деформированную кристаллическую решётку на поверхности кремния с изменённым электрическим полем, то её поверхностная энергия будет значительно выше, чем свободная энергия недеформированной кристаллической решётки. Образование такого электрического поля, называемого деформационным потенциалом, приводит к возникновению электрон-фононного взаимодействия, которое повышает свободную энергию поверхностного слоя. Любая термическая обработка приводит к уменьшению свободной энергии в поверхностном слое кремниевой пластины [1]. Поскольку она во многом связана с деформацией кристаллической решётки, то термическая обработка будет приводить к её уменьшению за счёт снижения механических напряжений под воздействием температуры. При этом, чем выше температура обработки, тем быстрее и в большей степени происходит уменьшение данной энергии, а, следовательно, и деформации поверхностного слоя. Это в свою очередь приводит к уменьшению искажения кристаллической решётки за счёт уменьшения её деформации в нарушенном слое.

При использовании традиционной длительной термической обработки наиболее полно данный процесс протекает при температуре, близкой к $2/3T_{пл}$. ($T_{пл}$ – температура

плавления) [1]. В данной работе было показано, что изменение времени обработки в диапазоне от 7 до 60 мин не влияет на процесс релаксации механических напряжений, а, следовательно, и на уменьшение деформации кристаллической решётки поверхностного слоя кремния. Оценка энергии активации скорости такого процесса при длительной термической обработке, проведённая в работе [7], показала, что она составляет 2,7–3,0 эВ. В нашем случае процесс рекристаллизации механически нарушенного слоя (уменьшение деформации) протекает в 60 раз быстрее. При этом температура проведения данного процесса соответствует температуре длительной термообработки, а именно $\approx 1100^\circ\text{C}$, которая соответствует максимальной скорости его протекания. Увеличение скорости процесса рекристаллизации механически нарушенного слоя при БТО связано, по-видимому, с уменьшением её энергии активации, оценка которой проведённая на основании уравнения Аррениуса, даёт величину 2,1 эВ, что на 0,6–0,9 эВ меньше, чем при длительной термообработке [8]. Столь низкая величина энергии активации при БТО обусловлена тем, что в данном случае рассматривался нарушенный слой с большим количеством разорванных связей Si-Si, а не сформированный за счёт их деформации под действием механических напряжений, возникающих в процессе полировки планарной поверхности кремниевых платин.

Поскольку процесс рекристаллизации нарушенного слоя идёт от слоев кремния с неискаженной кристаллической решёткой, то скорость его протекания будет определяться величиной внешней энергии подводимой к такой структуре, а также энергией связи Si-Si. При длительной термообработке на снижение деформационного потенциала действуют два процесса. Первый процесс связан с возникновением тепловых колебаний решётки при нагреве, вызывающих фонон-фононное взаимодействие, второй процесс обусловлен фонон-электронным взаимодействием. По мере роста температуры происходит усиление действия этих процессов, в результате чего энергия связи Si-Si уменьшается, и обеспечивается рост скорости рекристаллизации механически нарушенного слоя.

В случае БТО количество факторов, действующих на скорость рекристаллизации,

увеличивается до четырёх. Это связано с тем, что в данном случае нагрев происходит за счёт поглощения фотонного потока при фотон-электронном взаимодействии, который путём последовательного электрон-электронного, электрон-фононного и фонон-фононного взаимодействий передаёт энергию решётке, тем самым повышая её температуру и приводя к более быстрому подводу энергии к нарушенному слою по сравнению с длительной термообработкой. Данные механизмы вызывают уменьшение энергии связи Si-Si в большей степени, чем при длительной термообработке, тем самым имеет место более значительное уменьшение энергии активации скорости рекристаллизации.

Предполагаемый механизм рекристаллизации механически нарушенного слоя подтверждается экспериментальными результатами, полученные в работе [9], которые показали, что для восстановления кристаллической решётки после ионного легирования большими дозами требуются температуры ниже, чем при легировании малыми дозами. Это говорит о том, что при большом деформационном потенциале, когда ближний порядок в кристаллической решётке отсутствует, т. е. связи Si-Si либо разорваны, либо очень слабы, даже при столь низких температурах $\approx 600^\circ\text{C}$ достигается необходимая скорость рекристаллизации для её восстановления. В то же время при небольших нарушениях кристаллической решётки, т. е. малом деформационном потенциале, для достижения данной скорости требуются более высокие температуры $\geq 900^\circ\text{C}$.

Видно, что в данном случае энергия активации скорости рекристаллизации нарушенного слоя значительно выше, чем для сильно нарушенных слоев. Данные закономерности касаются как длительной, так и БТО. Следует отметить, что для устранения механически нарушенного слоя облучение исходных кремниевых пластин необходимо проводить с планарной стороны. Это обусловлено тем, что только в этом случае будут действовать все механизмы, ускоряющие процесс рекристаллизации.

Одним из основных параметров, описывающих процесс рекристаллизации нарушенного поверхностного слоя кремния после финишной полировки, является скорость его протекания. Знание данного параметра позволяет определить длительность импульса

и плотность мощности светового потока при БТО, обеспечивающие протекание твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя на поверхности кремниевой пластины.

Для определения скорости рекристаллизации и установления её зависимости от параметров БТО воспользуемся известным выражением, описывающим данную закономерность [9]:

$$V_p = V_0 \exp(-E_a/kT), \quad (1)$$

где $V_0 = 1,55 \cdot 10^6$ см/с – предэкспоненциальный множитель; V_p – скорость рекристаллизации; E_a – энергия активации процесса рекристаллизации (для монокристаллического Si $E_a = 2,7$ эВ, для аморфного Si $E_a = 2,3$ эВ); k – постоянная Больцмана; T – температура образца.

Учитывая, что толщина нарушенного поверхностного слоя составляет 0,1 мкм [10], определим нижний предел температуры нагрева пластины, который обеспечивает необходимую скорость его твердофазной рекристаллизации. Данное требование обусловлено тем, что одно из основных условий при создании современных микроэлектронных изделий это минимизация высокотемпературных нагрузок, оказываемых на полупроводниковую пластину в технологическом цикле их изготовления. Для решения данной задачи на основании выражения (1) был проведен расчёт скоростей рекристаллизации для различных температур нагрева кремниевой пластины при энергии активации процесса 2,6 эВ (рисунок 3). Использование данной величины обусловлено тем, что механически нарушенный слой представляет собой монокристаллический кремний с деформированной кристаллической решёткой, а не кремний, находящийся в аморфном состоянии. В связи с этим использовалась величина энергии активации процесса рекристаллизации на 0,1 эВ меньше, чем для монокристаллического кремния, не имеющего нарушений кристаллической решётки.

Для нахождения толщины рекристаллизованного слоя кремния необходимо знание времени его термообработки, а поскольку при БТО нагрев кремниевой пластины осуществляется секундными длительностями светового потока с последующей стадией остывания, то для характеристики длительности данного процесса введём понятие эффективно-го времени нагрева ($\tau_{\text{эф}}$). Учитывая, что

температура на облучаемой поверхности и по толщине пластины является функцией плотности мощности и длительности импульса, то выражение (1) следует записать в виде:

$$V_p = V_0 \exp[-E_a/kT(E_{m0}, t)], \quad (2)$$

где $T(E_{m0}, t)$ – решение уравнения (3):

$$\rho chdT/dt = (1-R)E_{m0} - 2\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T^4 - T_0^4), \quad (3)$$

$T = T_0$ при $t = 0$ – начальное условие,

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=h}^4 - T_0^4) = 0;$$

$$\varepsilon_{с.ч.}\sigma(T_{x=h}^4 - T_0^4) - (1-R)E_{m0} = 0 \text{ – граничные условия,}$$

где ρ – плотность кремния; c – теплоёмкость кремния; h – толщина кремниевой пластины; E_{m0} – плотность мощности светового потока, падающего на пластину; T_0 – температура окружающей среды; R – отражательная способность кремния; t – время нагрева.

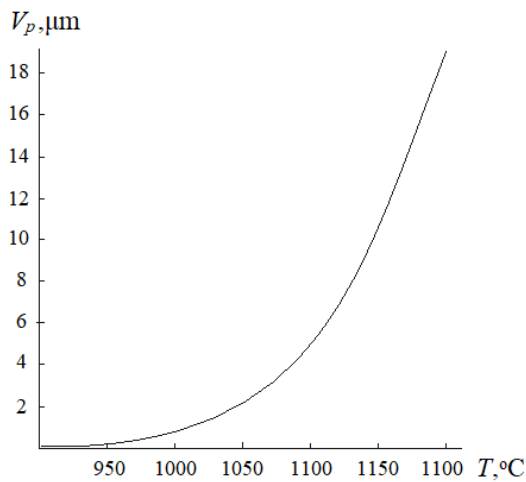


Рисунок 3 – Зависимость скорости рекристаллизации механически нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки

Figure 3 – Dependence of recrystallization rate of physically disturbed silicon layer upon temperature at rapid thermal treatment

Тогда под $\tau_{эф}$ будем понимать время, в течение которого скорость рекристаллизации падает в e раз по отношению к её максимальному значению. Поскольку, как показано в работе [6], при обработке импульсами секундной длительностью основной вклад в $\tau_{эф}$ вносит время нагрева пластины, то в расчётах не учитывалось влияние на $\tau_{эф}$ динамики остывания пластины. Для нахождения $\tau_{эф}$ из выражения (2) определялось такое снижение температуры от её

максимального значения, которое приводит к уменьшению скорости рекристаллизации в e раз. Далее на основании расчёта динамики нагрева пластины в процессе БТО (рисунок 4) определялись $\tau_{эф}$ и устанавливалась зависимость толщины рекристаллизованного механически нарушенного слоя от температуры БТО для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 с (рисунок 5).

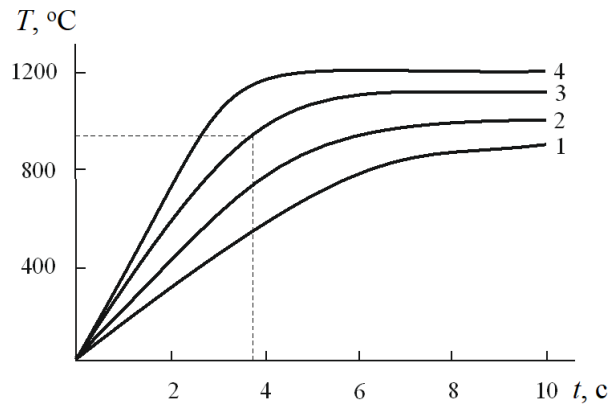


Рисунок 4 – Зависимость температуры кремниевой пластины от длительности светового импульса при различных плотностях его мощности: 1 – 20 Вт/см²; 2 – 30 Вт/см²; 3 – 40 Вт/см²; 4 – 50 Вт/см²

Figure 4 – Dependence of the silicon wafer temperature on the heating time at various luminous flux power densities: 1 – 20 W/cm²; 2 – 30 W/cm²; 3 – 40 W/cm²; 4 – 50 W/cm²

На основании данного расчёта видно, что минимальная температура, обеспечивающая скорости процесса, необходимые для рекристаллизации нарушенного слоя кремния толщиной 0,1 мкм, составляет 950 °C при плотности мощности излучения 40 Вт/см² (рисунок 5). При этом с увеличением плотности мощности излучения до 50 Вт/см², что соответствует росту скорости нагрева пластины, необходимая температура для рекристаллизации слоя толщиной 0,1 мкм возрастает до 987 °C. Это обусловлено тем, что за счёт роста скорости нагрева время достижения пластиной температуры 950 °C уменьшается, вызывая тем самым, снижение величины $\tau_{эф}$, а, следовательно, и толщины рекристаллизованного слоя, т. е. он становится меньше 0,1 мкм. Это означает, что для минимизации температурного воздействия при выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость её набора.

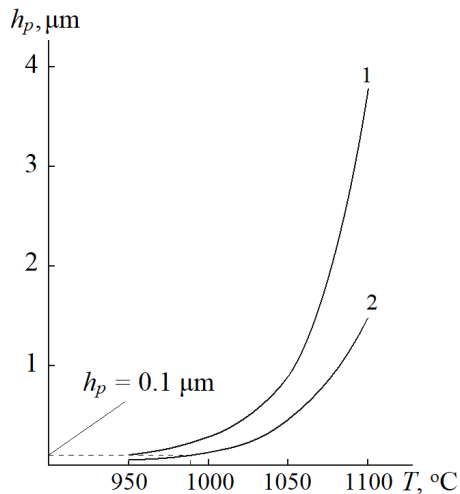


Рисунок 5 – Зависимость толщины рекристаллизованного нарушенного слоя кремния от температуры быстрой термообработки для различных плотностей мощности светового потока при длительности импульса 8 с: 1 – 40 Вт/см²; 2 – 50 Вт/см²

Figure 5 – Dependence of the thickness of re-crystallized disturbed silicon layer upon the temperature of rapid thermal treatment for various luminous flux power densities at 8 second pulse duration: 1 – 40 W/cm²; 2 – 50 W/cm²

На основании данного расчёта видно, что минимальная температура, обеспечивающая скорости процесса, необходимые для рекристаллизации нарушенного слоя кремния толщиной 0,1 мкм, составляет 950 °С при плотности мощности излучения 40 Вт/см² (рисунок 5). При этом с увеличением плотности мощности излучения до 50 Вт/см², что соответствует росту скорости нагрева пластины, необходимая температура для рекристаллизации слоя толщиной 0,1 мкм возрастает до 987 °С. Это обусловлено тем, что за счёт роста скорости нагрева время достижения пластиной температуры 950 °С уменьшается, вызывая тем самым, снижение величины $\tau_{эф}$, а, следовательно, и толщины рекристаллизованного слоя, т. е. он становится меньше 0,1 мкм. Это означает, что для минимизации температурного воздействия при выборе режима БТО требуется учитывать не только температуру процесса, но и скорость её набора.

На основании проведённых расчётов (рисунки 4, 5) видно, что наиболее приемлемым режимом БТО, обеспечивающим минимальное время воздействия температуры на кремниевую пластину для проведения твердофазной рекристаллизации нарушенного слоя толщиной

0,1 мкм при температуре 950 °С, является плотность мощности светового потока 40 Вт/см² при $t = 3,7$ с. Такой режим БТО обеспечивает толщину рекристаллизованного слоя 0,11 мкм.

Закключение

Приведены картины дифракции обратно отражённых электронов от поверхности исходных кремниевых пластин до и после быстрой термообработки, вид которых подтверждает формирование более совершенной кристаллической решётки поверхностного слоя толщиной менее 30 нм в результате быстрой термообработки. При этом имеет место очистка планарной поверхности исходных кремниевых пластин от С, Fe, В, Na, Са, Li, что обеспечивает формирование более совершенной структуры планарной поверхности исходных кремниевых пластин. Предложены процессы, уменьшающие энергию активации процесса рекристаллизации механически нарушенного поверхностного слоя кремния и дано его математическое описание. Определены параметры быстрой термообработки, обеспечивающие минимизацию воздействия температуры на кремниевую пластину для рекристаллизации механически нарушенного слоя на её планарной поверхности.

Список использованных источников

1. Шаныгин В.Я. Получение атомарно-чистых поверхностей кремния в низкоэнергетической СВЧ-плазме низкого давления / В.Я. Шаныгин, Р.К. Яфаров // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79, вып. 12. – С. 73–78.
2. Красников Г.Я. Конструктивно-технологические особенности субмикронных МОП-транзисторов: в 2 ч. / Г.Я. Красников – М.: Техносфера, 2002. – Ч. 1. – 416 с.
3. Пилипенко В.А. Свойства поверхности кремния после лазерной обработки импульсами наносекундной длительности / В.А. Пилипенко [и др.] // Инженерно-физический журнал. – 2008. – Т. 81, № 3. – С. 592–595.
4. Gorushko V. Re-crystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment / V. Gorushko, A. Omelchenko, V. Pilipenko, V. Solodukha // Przegląd Elektrotechniczny. – 2018. – Vol. 94, № 5. – Pp. 196–198.
5. Пилипенко В.А. Твердофазная рекристаллизация механически нарушенного слоя кремния при быстрой термообработке / В.А. Пилипенко [и др.] // Доклады национальной академии наук Беларуси. – 2018. – Т. 62, № 3. – С. 347–352.

6. Достанко А.П. Инновационные технологии и оборудование субмикронной электроники / А.П. Достанко [и др.]; под общ. ред. акад. А.П. Достанко. – Минск: Беларуская навука, 2020. – 260 с.

7. Borisenko V.E. Rapid Thermal Processing of Semiconductors / V.E. Borisenko, P.J. Hesketh – New York: Plenum Press, 1997. – 385 p.

8. Киреев В.Ю. Быстрые термические процессы – новый этап в развитии микроэлектронной технологии / В.Ю. Киреев, А.С. Цимбалов // Микроэлектроника. – 2001. – Т. 30, № 4. – С. 266–278.

9. Пилипенко В.А. Физические основы быстрой термообработки. Геттерирование, отжиг ионнолегированных слоев, БТО в технологии СБИС / В.А. Пилипенко [и др.] – Минск: БГУ, 2001. – 146 с.

10. Солодуха В.А. Измерение глубины нарушенного слоя на поверхности кремниевых пластин методом оже-спектроскопии / В.А. Солодуха, А.И. Белоус, Г.Г. Чигирь // Наука и техника. – 2016. – Т. 15, № 4. – С. 329–334.

References

1. Shanygin VYa, Yafarov RK. Obtaining atomically clean silicon surfaces in low-energy low-pressure microwaveplasma. Journal of technical physics. 2009;79(12):73–78.

2. Krasnikov GYa. Design and technological features of submicron MOS transistors: In 2 hours. M.: Tehnosfera, 2002. Part 1. 416 p.

3. Pilipenko VA, Gorushko VA, Vecher DV, Syakersky VS, Petlitskaya TV. Surface properties of silicon after laser treatment with nanosecond pulses. 2008;81(3):592–595.

4. Gorushko V, Omelchenko A, Pilipenko V, Solodukha V. Recrystallization of Silicon during Rapid Thermal Treatment. Przegląd Electrotechniczny. 2018;94(5):196–198.

5. Pilipenko VA. [et al.] Solidphase recrystallization of the mechanically disturbed silicon layer the during the rapid thermal treatment. Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. 2018;62(3):347–352.

6. Dostanko AP [etc.] Innovation technologies and equipment of submicron electronics; ed. by Academ. Minsk: Belaruskaya Navuka, 2020:260 p.

7. Borisenko VE, Hesketh PJ. Rapid Thermal Processing of Semiconductors. New York: Plenum Press, 1997:385 p.

8. Kireev VYu, Tsimbalov AS. Rapid thermal processes – a new stage in the development of microelectronic technology. Microelectronics. 2001;30(4):266–278.

9. Pilipenko VA [et al.] Physical foundations of rapid heat treatment. Gettering, annealing of ion-doped layers, BTO in VLSI technology. Minsk: BGU, 2001:146 p.

10. Solodukha VA, Belous AI, Chigir GG. Measurement of the depth of the damaged layer on the surface of silicon wafers by Auger spectroscopy. Science and Technology. 2016;15(4):329–334.

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.
