ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Nº 3

Vol. 14

Том 14

2023

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЙ

Научно-технический журнал

Основан в 2010 г.

Учредитель Белорусский национальный технический университет

Выходит 4 раза в год

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

Том 14

Nº 3

2023

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР

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

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Маляревич А.М., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, профессор кафедры «Лазерная техника и технология» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ

Алексеев В.А., д.т.н., профессор, профессор кафедры «Физика и оптотехника» Ижевского государственного технического университета имени М.Т. Калашникова (г. Ижевск, Россия)

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Комаров Ф.Ф., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, заведующий лабораторией элионики Института прикладных физических проблем имени А.Н. Севченко Белорусского государственного университета (г. Минск, Беларусь) Кулешов Н.В., член-корреспондент НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор (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)

заведующий кафедрой Погребняк А.Д., д.ф.-м.н., профессор, наноэлектроники Сумского государственного университета (г. Сумы, Украина)

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

Це Ли, заместитель директора Северо-Восточного НИИ техники датчиков (г. Харбин, КНР)

Чижик С.А., академик НАН Беларуси, д.т.н., профессор, Первый заместитель Председателя Президиума НАН Беларуси, заведующий кафедрой «Микро- и нанотехника» Белорусского национального технического университета (г. Минск, Беларусь)

Шкадаревич А.П., академик НАН Беларуси, д.ф.-м.н., профессор, директор НТЦ «ЛЭМТ» Белорусского оптико-механического объединения (г. Минск, Беларусь)

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

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

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

Подписка осуществляется через почтовые отделения связи по «Каталогу газет и журналов Республики Беларусь». Подписные индексы – 74835; 748352.

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 28.09.2023. Формат бумаги 60×84 1/8. Бумага мелованная. Гарнитура Times New Roman. Печать цифровая. Усл. печ. л. 8,37. Уч.-изд. л. 5,67. Тираж 40 экз. Дата выхода в свет 29.09.2023. Заказ № 805. Отпечатано в Белорусском национальном техническом университете. ЛП № 3820000006896 от 03.03.2014. Пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск

АДРЕС РЕДАКЦИИ:

Белорусский национальный технический университет пр-т Независимости, 65, 220013, г. Минск, Республика Беларусь, тел.: +375 (17) 293 96 67, факс: +375 (17) 292 67 94

e-mail: pimi@bntu.by http://pimi.bntu.by

© «Приборы и методы измерений», 2023

DEVICES AND METHODS OF MEASUREMENTS

Scientific and Engineering Journal

Founded in 2010

Founder Belarusian National Technical University

Issued four times a year

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

Volume 14

Nº 3

2023

EDITOR-IN-CHIEF

Oleg K. Gusev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Vice-Rector of Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

DEPUTY EDITOR-IN-CHIEF

Aliaksandr M. Malyarevich, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Laser Equipment and Technology Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

EDITORIAL BOARD

Vladimir A. Alekseev, Doctor of Science (Engineering), Professor, Department of Physics and Optical Engineering, Kalashnikov Izhevsk State Technical University (Izhevsk, Russia)

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

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

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

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

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

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

Steven Danyluk, *PhD*, *Professor*, *Production and Research Center*, *Georgia Institute of Technology (Atlanta, USA)* **Anatoly L. Zharin**, *Doctor of Science (Engineering), Professor, Information and Measuring Technologies Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)*

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

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

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

Nikolay V. Kuleshov, Corresponding Member of the National Academy of Sciences of Belarus, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor (Minsk, Belarus)

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

Alan Kemp, PhD, Professor, Institute of Photonics, University of Strathclyde (Glasgow, United Kingdom) Xavier Mateos, PhD, Associate Professor, Rovira i Virgili University (Tarragona, Spain)

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

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

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

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

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

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

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

Konstantin V. Yumashev, Doctor of Science (Physics and Mathematics), Professor, Head of Experimental and Theoretical Physics Department, Belarusian National Technical University (Minsk, Belarus)

ADDRESS:

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

© «Devices and Methods of Measurements», 2023

СОДЕРЖАНИЕ

Средства измерений

Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводни пластин	(КОВЫХ
Е.В. Ивакин	
Применение эталона температуропроводности для контроля параметра теплопе в поглощающих материалах (in English)	реноса
А.А. Загороднюк, А.Ю. Тараев, С.В. Лазаренко	
О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в ка источника поля эталонного импульсного фотонного излучения	честве
Методы измерений, контроля, диагностики	
А.Р. Баев, Н.В. Левкович, Е.П. Бабук, М.В. Асадчая	
Обратное рассеяние ультразвуковых волн как основа метода контроля структ физико-механических свойств чугунов (in English)	уры и
П.В. Гуляев	
Применение преобразования Хафа для контроля дисперсности накладывающихся ч и их агломератов (in English)	частиц
В.А. Алексеев, С.И. Юран, В.П. Усольцев, Д.Н. Шульмин	
Использование многозондового модулированного лазерного излучения для идентифи сгустков веществ в потоке жидкости	ікации
А.Г. Анисович, М.И. Маркевич, Ванчинхуу Жигмэддорж	
Автоматические измерения в металлографии (in English)	

CONTENTS

Measuring Instruments

A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pantsialeyeu	
Universal Digital Probe Electrometer for Testing Semiconductor Wafers (in Russian)	161
E.V. Ivakin	
Application of the Thermal Diffusivity Standard for the Heat Transfer Parameter Control in Absorbing Materials	173
A.A. Zaharadniuk, A.Y. Taraev, S.V. Lazarenko	
On the Possibility of Using Medical Linear Electron Accelerators as a Source of the Reference Pulsed Photon Radiation Field (in Russian)	179

Methods of Measurements, Monitoring, Diagnostics

A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V. Asadchaya	
Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method of Control of Structure and	101
Physico-Mechanical Properties of Cast Irons	191
Pavel V. Gulyaev	
Application of the Hough Transform to Dispersion Control of Overlapping Particles and	
Their Agglomerates	199
V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin	
The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation for the Identification of Substances' Clots	
in the Fluid Flow (in Russian)	207
Anna Anisovich, Maria Markevich, Jigmeddorj Vanchinkhuu	
Automatic Measurement in Metallography	214

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин

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

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

Поступила 23.08.2023 Принята к печати 26.09.2023

Для исследования и контроля полупроводниковых пластин широко используются бесконтактные электрические методы, основанные на измерении потенциала поверхности (CPD) в сочетании с освещением и/или осаждением зарядов на образец с помощью коронного разряда, а также на измерении поверхностной фото-ЭДС (SPV). По фото-ЭДС возможно определение времени жизни неосновных носителей заряда, их диффузионную длину и обнаружение следов тяжелых металлов на поверхности. Кроме того, с использованием фото-ЭДС возможно определение поверхностного сопротивления полупроводниковой пластины, некоторые параметры слоя диэлектрика на поверхности и барьерную фото-ЭДС (JPV). Результаты измерения электрических параметров отражают влияние приповерхностных характеристик на конечные характеристики устройств. Целью работы являлась разработка универсального цифрового зондового электрометра, реализующего различные бесконтактные электрические методы анализа полупроводниковых пластин, в котором передача полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка осуществляются по цифровым каналам локального управления. В работе описан разработанный авторами универсальный цифровой зондовый электрометр, реализующий описанные выше бесконтактные электрические методы анализа полупроводниковых пластин (CPD, SPV и JPV). Управление электрометром, включающее передачу полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка, осуществляется по цифровым каналам локального управления. Благодаря высокому быстродействию методы определения электрических характеристик подходят для контроля полупроводниковых пластин в процессе производства. Приведены результаты тестирования разработанного зондового электрометра в режимах СРD, SPV и JPV, отражающие эффективность предложенных подходов.

Ключевые слова: цифровой зондовый электрометр, контактная разность потенциалов, полупроводниковая пластина, зонд Кельвина, фото ЭДС, СРD, SPV, JPV

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Жарин А.Л.	Zharin A.L.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com	e-mail: anatoly.zharin@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, К.В. Пантелеев.	A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pantsialeyeu
Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля	[Universal Digital Probe Electrometer for Testing
полупроводниковых пластин.	Semiconductor Wafers].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 161–172.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 161–172 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Universal Digital Probe Electrometer for Testing Semiconductor Wafers

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

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

Received 23.08.2023 Accepted for publication 26.09.2023

Abstract

Non-contact electrical methods are widely used for research and control of semiconductor wafers. The methods are usually based on surface potential measurement (CPD) in combination with illumination and/or deposition of charges on the sample using a corona discharge, and are also based on the measurement of surface photo-emf. By photo-EMF (SPV) it is possible to determine the lifetime of minor charge carriers, their diffusion length and detect traces of heavy metals on the surface. In addition, using photo-EMF it is possible to determine the surface resistance of the plate, some parameters of the dielectric layer on the surface and barrier photo-EMF (JPV). Electrical performance results reflect the influence of near-surface characteristics on the final performance of devices. The aim of the work was to develop a universal digital probe electrometer that implements various non-contact electrical methods for analyzing semiconductor wafers, in which the change in operating modes and configuration, transmission of the received data, remote testing and calibration are carried out via digital local control channels. This paper describes a universal digital probe electrometer developed by the authors, which implements the above-described non-contact electrical methods for analyzing semiconductor wafers (CPD, SPV and JPV), in which the change in operating modes and configuration, transmission of the received data, remote testing and calibration are carried out via digital local control channels. Due to their high speed, electrical characterization methods are suitable for inspecting semiconductor wafers during production. The results of testing the developed probe electrometer in CPD, SPV and JPV modes are presented, which reflect the effectiveness of the proposed approaches.

Keywords: digital probe electrometer, contact potential difference, semiconductor wafer, Kelvin probe, photo EMF, CPD, SPV, JPV

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Жарин А.Л.	Zharin A.L.
Белорусский национальный технический университет,	Belarusian National Technical University,
пр-т Независимости, 65, г. Минск 220013, Беларусь	Nezavisimosty Ave., 65, Minsk 220013, Belarus
e-mail: anatoly.zharin@gmail.com	e-mail: anatoly.zharin@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.Л. Жарин, В.А. Микитевич, А.И. Свистун, К.В. Пантелеев.	A.L. Zharin, U.A. Mikitsevich, A.I. Svistun, K.U. Pantsialeyeu
Универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля	[Universal Digital Probe Electrometer for Testing
полупроводниковых пластин.	Semiconductor Wafers].
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 161–172.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 161–172 (in Russian).
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-161-172

Введение

В микроэлектронике важной проблемой является поддержание требуемого качества поверхности полупроводниковых пластин на всех этапах технологического процесса. По мере перехода полупроводникового производства к все более тонким слоям свойства поверхности и приповерхностной области будут оказывать все большее влияние на характеристики изготовленных электронных устройств. Загрязнение поверхности или повреждение в результате обработки пластины могут увеличить скорость рекомбинации носителей заряда на поверхности и снижать их подвижность, что приводит к ухудшению характеристик конечных изделий. Чтобы получить приемлемый выход необходимо продукции, контролировать характеристики поверхности пластины на различных этапах производства. Методы оценки состояния поверхности и эффективности различных видов её обработки необходимы как при отработке технологических процессов, так и для технологического контроля в процессе производства.

Для оценки свойств поверхности полупроводников используются различные методы спектроскопии, включающие химический и физический анализ, а также оптические и электрические методы.

Результаты электрических характеристик, возможно, являются наиболее полезными, поскольку они лучше всего отражают влияние приповерхностных характеристик на конечные характеристики устройства [1]. Кроме того, благодаря высокому быстродействию методы определения электрических характеристик подходят для контроля полупроводниковых пластин в процессе производства.

Бесконтактные электрические методы обычно основаны на измерении потенциала поверхности (CPD) в сочетании с освещением и/или осаждением зарядов на образец с помощью коронного разряда, а также на измерении поверхностной фото-ЭДС. По фото-ЭДС возможно определение времени жизни неосновных носителей заряда, их диффузионной длины (SPV) и следов тяжёлых металлов на поверхности. Кроме того, с использованием фото-ЭДС возможно определение поверхностного сопротивления пластины, некоторых параметров слоя диэлектрика на поверхности и барьерной фото-ЭДС (JPV) [2-8].

Бесконтактный характер этих методов измерения особенно привлекателен, т.к. делает большинство из них неразрушающими, неинвазивными И позволяет проводить диагностику на различных этапах обработки пластин, анеждать окончательной характеристики устройства. Электрические методы предлагают возможности полноразмерного картирования пластин с высоким разрешением.

На рисунке 1 схематично представлены бесконтактные электрические методы, применяемые для анализа полупроводниковых пластин.



Рисунок 1 – Схематичное представление бесконтактных электрических методов, применяемых для анализа полупроводниковых пластин: *а* – метод Кельвина–Зисмана (CPD); *b* – метод фото-ЭДС с освещением на двух длинах волн (CPV); *с* – метод фото-ЭДС с двумя датчиками на разных расстояниях от светового пятна (JPV)

Figure 1 – Schematic representation of non-contact electrical methods used to analyze semiconductor wafers: a – Kelvin–Zisman method (CPD); b – photo-EMF method with illumination at two wavelengths (CPV); c – photo-EMF method with two sensors at different distances from the light spot (JPV)

В методе Кельвина–Зисмана (рисунок 1*a*) используется динамический конденсатор, образованный полупроводниковой пластиной и вибрирующим эталонным образцом. В следствии потенциалов между разности пластинами динамического конденсатора, на выходе предусилителя возникает переменный сигнал с частотой вибрации. На конденсатор также подаётся напряжение компенсации (Vbias), при равенстве которого разности потенциалов на пластинах конденсатора амплитуда переменного сигнала становиться равной нулю. Обычно в традиционных измерителях Кельвинаосуществляется автоматическая Зисмана фазовая автокомпенсация измеряемой величины с помощью фазового детектора и интегратора [9].

Следует отметить, что в методах Кельвина-Зисмана измеряемой величиной является контактная разность потенциалов (КРП) [9]. Под КРП здесь понимается физический параметр, введенный для описания эффекта А. Вольта (электричество Вольта), т. е. возникновение разности потенциалов в зазоре между двумя разнородными металлами. КРП связана с такими фундаментальными параметрами твёрдых тел, как работа выхода электрона и уровень Ферми, т. е. имеют глубокий физический смысл и широко используются в физике полупроводников.

В традиционных измерителях фото-ЭДС (рисунок 1b и 1c) полупроводник освещается синусоидально модулированным светом через полупрозрачную металлизированную пластину, подключённую к зарядочувствительному предусилителю. На выходе предусилителя возникает переменный сигнал с частотой модуляции.

Для получения требуемых физических параметров полупроводников, например, таких как время жизни неосновных носителей заряда, электросопротивление поверхностного слоя, барьерная фото-ЭДС и др., используется освещение с двумя различными длинами волн или регистрация фото-ЭДС от двух зондов, находящихся на различном расстоянии от светового пятна. Используется синусоидальное модулирование света на разных частотах. При этом выделение сигналов на каждой из частот или от каждого зонда осуществляется усилителями с синхронным детектированием и последующим интегрированием. Сигналы поступают на аналого-цифровые преобразователи и через соответствующие устройства сопряжения на персональный компьютер для дальнейшей обработки. Таким образом, традиционные измерители представляют собой достаточно громоздкие устройства, требующие относительно большое время интегрирования сигналов для повышения точности, а также требующие прецизионного сопряжения усилительных каналов. Вопрос взаимовлияния на фото-ЭДС от источников с различными длинами волн света обычно не поднимается. При использовании таких устройств для картирования распределения измеряемых параметров по полупроводниковой пластине требуется довольно большое время и, поэтому, как правило, карты распределения имеют относительно низкое разрешение.

Целью работы являлась разработка универсального цифрового зондового реализующего электрометра, различные бесконтактные электрические методы анализа котором полупроводниковых пластин, В полученных передача ланных. изменение удалённое конфигурации, тестирование И калибровка осуществляются по цифровым каналам локального управления.

Разработка универсального цифрового зондового электрометра

рисунке 2 Ha схематично представлен чувствительный элемент разработанного универсального цифрового зондового электрометра. Он выполнен в виде позолоченной печатной платы с гибким шлейфом. Центральный зонд 1 с отверстием (0,5 мм) для оптоволокна является основным для режимов регистрации СРD и SPV. Дополнительные зонды 2 и 3 расположены на одинаковом расстоянии от центрального и работают в режиме JPV. Все зонды окружены «планом плавающей земли» (Vbias) [10]. На обратной стороне платы расположена микросхема с четырьмя операционными усилителями с фемтоамперными входными токами и резисторы обратной связи (5 ГОм). Кроме того, там же находятся элементы крепления оптоволокна и пьезовибратора, а также элементы экранирования от внешних наводок. В режиме КРП плата зонда вибрирует под действием пьезовибратора, а в режимах фото-ЭДС она не подвижна, а возбуждение осуществляется модулированным светом через оптоволокно.



Рисунок 2 – Схематичное представление чувствительного элемента универсального цифрового зондового электрометра (*a*) и фотография зонда (*b*)

Figure 2 – Schematic representation of the sensing element of a universal digital probe electrometer (a) and a photograph of the probe (b)

Общим для всех режимов работы является необходимость генерации синусоидального возбуждающего воздействия с последующим анализом амплитудно-фазовых характеристик сигнала отклика на возбуждающее воздействие.

Ранее нами был разработан общий подход к построению интеллектуальных сенсоров для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение – отклик на базе современных микроконтроллеров [11], в котором используются связки периферийных устройств микроконтроллера в фоновом режиме без участия процессора (СРU). При этом контроллеры прямого доступа к памяти (DMA) обеспечивают высокоскоростное перемещения данных между периферией и/или памятью без участия СРU. Такой подход использован в настоящей работе.

В микроконтроллере при инициализации запускается основной процесс генерации синусоидального возбуждения и обработки сигнала отклика без участия СРU. Это процесс работает непрерывно и осуществляет общую синхронизацию устройства по соответствующим прерываниям и флагам. Традиционно В микроконтроллерах для синхронизации системные используются таймеры или операционные системы. В нашем случае для этих целей использован основной процесс генерации синуса, что исключает его сбои. В свою очередь, СРИ на максимальной скорости обрабатывает флаги, полученные от основного процесса и прерываний, производит обработку подготовленных DMA данных, осуществляет передачу полученных результатов и служебной информации во внешние устройства, а также обрабатывает прерывания от внешних устройств, принимает команды и параметры конфигурации.

В нашем случае генерирование периода синуса непрерывно осуществляется с использованием предзагруженной таблицы одного периода синуса (Nsin = 128 точек). Параллельно с этом осуществляется оцифровка откликов с помощью АЦП, который также отслеживает выход сигнала за установленные пределы с помощью аналогового следящего триггера AWG. В соответствии с предустановленным числом периодов (N periods = 4)И более) накопление данных осуществляется в буфере размером (Nsin×Nperiods). При заполнении буфера генерируется прерывание и выставляется соответствующий флаг готовности данных. Далее вышеописанный процесс непрерывно повторяется.

При получении флага готовности данных СРИ вносит необходимые изменения в параметры возбуждающего воздействия и усилительного тракта в зависимости от режима работы устройства, а также осуществляет обработку полученных данных. Это происходит параллельно со следующим циклом генерации Обработка полученных синуса. массивов осуществляется с использованием данных 32/64-го арифметического сопроцессора микроконтроллера с помощью встроенных средств цифровой обработки сигналов (DSP). Она включает нормирование массивов, фильтрацию и вычисление амплитудно-фазовых параметров. Кроме того, из массивов данных выделяется однобайтовый 128-разрядный массив (Scope) для визуализации сигналов на экране системы управления.

Для получения конечного результата требуется несколько описанных выше циклов, в зависимости от номера цикла (Cycle_No) изменяется алгоритм обработки. При Cycle No равном нулю обработка не осуществляется. После выполнения каждого цикла кроме нулевого Cycle No инкрементируется. При записи в Cycle No единицы начинается процесс получения и обработки данных в соответствии с выбранным режимов и номером цикла, по окончании которого Cycle No обнуляется. Система может работать в двух режимах запуска: непрерывном, когда после получения конечного результата СРИ осуществляет запуск (установка Cycle No = 1) самостоятельно, и ждущем, когда запуск осуществляется от внешнего устройства, что необходимо при работе в составе сканирующих систем.

На рисунке 3 показан базовый алгоритм работы CPU при ожидании и получении флага готовности данных. При отсутствии флага происходит выход из подпрограммы. Если флаг активен, происходит переход к отработке данных в соответствии с установленным режимом работы.



Рисунок 3 – Базовый алгоритм работы СРU при получении и обработке флага готовности данных (Data CMP)

Figure 3 – The basic algorithm of the CPU when receiving and processing the data ready flag (Data CMP)

Рассмотрим алгоритмы работы CPU при различных режимах работы устройства.

Режим измерения контактной разности потенциалов (MODE CPD)

Ранее нами был разработан цифровой измеритель КРП, не требующий фазовой автокомпенсации, используемой в традиционном зонде Кельвина, в котором определяется амплитуда переменных сигналов при двух произвольных напряжениях Bias Up и Bias Down, приложенных к динамическому конденсатору, откуда вычисляется КРП И величина, пропорциональная расстоянию между зондом и пластиной [12]. Отсутствие компенсации не позволяет называть такой измеритель КРП зондом Кельвина.

В режиме CPD возбуждающим воздействием является вибрация одной из пластин динамического конденсатора с помощью пьезопластины.

На рисунке 4 приведён алгоритм обработки данных в режиме CPD. Измерение и обработка в этом режиме производится за семь циклов. Реальная обработка данных происходит только в 3 и 7 циклах, причём в 3 цикле данные получаются при низком напряжении (Bias Down) на динамическом конденсаторе, а в 7 при высоком (Bias Up). Переключение напряжений осуществляется также в 3 и 7 циклах. Разница между Bias Down и Bias Up составляет несколько вольт, поэтому при переключениях возникают большие переходные процессы в усилительном тракте. В первую очередь для устранения их влияния были введены пустые циклы 1, 2 и 4, 5, 6. Кроме того, пустые циклы также используются для разнесения по времени процессов передачи данных на внешние устройства, так в циклах 1 и 4 устанавливается Flag ScopeRQ, инициирующий передачи осциллографических массивов Scope. По окончанию цикла 7, в котором производятся окончательные расчёты и заполняется буфер конечных данных, устанавливается флаг DATA Ready, что инициирует передачу буфера на внешние устройства. конечных данных Описанное обеспечивает надёжную выше передачу данных.

Перед выполнением рабочих циклов осуществляется сброс AWG, а после их выполнения AWG анализируется на предмет ошибок, связанных с превышением сигналом допустимых значений. Результат также заносится в буфер конечных данных.



Рисунок 4 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения контактной разности потенциалов (МОДЕ СРД)

Figure 4 – Data processing algorithm in the CPD mode (MODE CPD)

Режим измерения поверхностной фото-ЭДС (MODE SPV)

В режиме SPV возбуждающим воздействием является синусоидально модулированный свет двух длин волн красный (Red) и инфракрасный (IRed).

Как упоминалось ранее, в аналоговых устройствах используется освещение с двумя различными длинами волн с различными частотами синусоидальной модуляции.

Сигналы разделяются синхронным детектированием на два канала с последующим определением амплитудно-частотных параметров.

При цифровой обработке представляется целесообразным временное разделение сигналов отклика фото-ЭДС от возбуждения разными длинами волн. В таком случае исключается взаимовлияние откликов фото-ЭДС, а также использование только одного канала исключает погрешности от рассогласования каналов.



Рисунок 5 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения поверхностной фото-ЭДС (MODE SPV) Figure 5 – Data processing algorithm in SPV mode (MODE SPV)

На рисунке 5 приведён алгоритм обработки данных в режиме SPV (MODE SPV). Измерение и обработка в этом режиме производится за пять циклов. Реальная обработка данных происходит только в 3 и 5 циклах, причем в 3 цикле данные получаются при освещении инфракрасным светом (IRed), а в 5 – при красном (Red). Переключение света осуществляется в 3 и 5 циклах. В цикле 1 устанавливается Flag_ScopeRQ, инициирующий передачи осциллографических массивов Scope. Во 2 и 4 циклах осуществляется сброс AWG, а в 5 цикле производятся окончательные расчёты, заполняется буфер конечных данных и устанавливается флаг DATA_Ready.

Режим измерения барьерной фото-ЭДС (MODE JPV)

В этом режиме фото-ЭДС используется для генерирования электрических зарядов в полупроводнике, а с помощью нескольких зондов, находящихся на различном расстоянии от светового пятна, определяется характер растекания зарядов. Это позволяет определять электросопротивление, а также, при наличии мелких *p-n*-переходов, барьерную фото-ЭДС (JPV). При инициализации режима пользователь может выбрать красный или инфракрасный источник освещения, что определяет глубину генерации зарядов.



Рисунок 6 – Алгоритм обработки данных в режиме измерения барьерной фото-ЭДС (MODE JPV) Figure 6 – Data processing algorithm in JPV mode (MODE JPV)

На рисунке 6 приведён алгоритм обработки данных в режиме JPV (MODE JPV). В этом режиме измерение и обработка производится за четыре цикла. Реальная обработка данных происходит во 2, 3 и 4 циклах, причём в каждом из измерительных циклов данные получают от различных каналов усиления (зонда). Переключение каналов осуществляется внутренними средствами микроконтроллера. Пустые циклы не используются, т. к. нет необходимости ожидания установления переходных процессов. В этом режиме даже желательно максимально быстро опросить зонды. В цикле 1 устанавливается Flag_ScopeRQ, инициирующий передачу осциллографических массивов Scope. Сброс AWG происходит во всех циклах. В 5 цикле производятся окончательные расчёты, заполняется буфер конечных данных и устанавливается флаг DATA Ready.

Результаты тестирования универсального цифрового зондового электрометра

Тестирование осуществлялось при работе зондового электрометра в составе сканирующей

системы. В качестве тестовой использовалась полупроводниковая пластина со слоем окисла, на которой ранее осуществлялась настройка системы осаждения зарядов коронным разрядом в различных режимах. В результате осаждения избыточного заряда произошёл пробой оксидного слоя, что создало дефектную область. С помощью полученной пластины осуществлялась настройка и тестирование разработанного зондового электрометра.



Рисунок 7 – Результаты тестирования разработанного зонда в режимах измерения контактной разности потенциалов (МОDE CPD), поверхностной фото-ЭДС (МОDE SPV), барьерной фото-ЭДС (МОDE JPV)



Как видно из рисунка 7 дефект выявляется во всех режимах. Однако в режиме JPV возможно более детальное выделение структуры дефекта. Следует отметить, что пластина долгое время использовалась в лабораторных условиях при настройке зондового электрометра и была загрязнена. Загрязнения поверхности выявились в режиме CPD, в котором информация формируется с поверхности. В режимах SPV и JPV информация формируется от подповерхностных слоев (на глубине эффективного поглощения света). Поэтому поверхности, практически, загрязнения не выявляются в этих режимах.

Заключение

Использование современных микроконтроллеров при построении измерительных систем открывает широкие перспективы. При проектировании измерительных систем важно учитывать особенности и возможности периферийных устройств используемого микроконтроллера. Оптимальное распределение измерительных манипуляций между периферийными устройствами, а также между ними и процессором, позволяет создавать измерительные системы с требуемым уровнем надёжности и бесперебойности.

Цифровая отработка И фильтрация данных в первичных режиме реального времени средствами цифровой обработки сигналов (DSP) микроконтроллера значительно снижает уровень шумов и случайных наводок, т. е. повышает точность и воспроизводимость получаемых результатов. Отсутствие необходимых в аналоговых системах синхронного детектирования с последующим интегрированием уменьшает время измерений, что существенно при работе устройств в составе сканирующих систем, обеспечивающих картирование результатов.

Разработанный универсальный цифровой зондовый электрометр для контроля полупроводниковых пластин реализует основные бесконтактные электрические методы в одном устройстве. Управление электрометром, т. е. передача полученных данных, изменение конфигурации, удалённое тестирование и калибровка, осуществляется по цифровым каналам локального управления.

На базе разработанного цифрового зондового электрометра созданы системы сканирования полупроводниковых пластин для ОАО «Интеграл» (Беларусь).

Список использованных источников

1. *Komin V.V.* [et al.]. Status of Non-contact Electrical Measurements. AIP Conference Proceedings, 2003, 683, 782. **DOI:** 10.1063/1.1622559

2. Shroeder D.K. Contactless surface charge semiconductor characterization. Materials Science and Engineering. – 2002. – № 91–92. – Pp. 196–210.

3. *Kronik L., Shapira Y.* Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. Surface Science Reports. – 1999. – Vol. 37. – Pp. 1–206.

4. Воробей Р.И. Контроль дефектов структуры кремний-диэлектрик на основе анализа пространственного распределения потенциала по поверхности полупроводниковых пластин / Р.И. Воробей [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2013. – № 2. – С. 67–72.

5. Пилипенко В.А. Характеризация электрофизических свойств границы раздела кремний-двуокись кремния с использованием методов зондовой электрометрии / В.А. Пилипенко [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2017. – Т. 8, № 4. – С. 344–356. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2017-8-4-24-31

6. Zharin A., Pantsialeyeu K., Svistun A., Tyavlovsky K. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – Pp. 17–21.

7. *Tyavlovsky A., Zharin A., Mikitsevich V., Vorobey R.* Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 4. – Pp. 47–51.

8. Pantsialeyeu K., Zharin A., Mikitsevich V., Gusev O. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. – 2020. – Vol. 2. – No. 5. – Pp. 11–14.

9. Жарин А.Л. Метод контактной разности потенциалов и его применение в трибологии. – Минск: Бестпринт. – 1996. – 235 с.

10. Пантелеев К.В., Микитевич В.А., Жарин А.Л. Построение измерителей контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев, В.А. Микитевич, А.Л. Жарин // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – № 1. – С. 7–15.

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

11. Микитевич В.А. Интеллектуальный сенсор для измерительных систем, работающих по схеме синусоидальное возбуждение–отклик / В.А. Микитевич [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2023. – Т. 14. – № 1. – С. 18–26.

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

12. Пантелеев К.В. Цифровой измеритель контактной разности потенциалов / К.В. Пантелеев [и др.] // Приборы и методы измерений. – 2016. – Т. 7. – № 2. – С. 136–144. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2016-7-2-136-144

References

1. Komin VV, Bello AF, Brundle CR, Uritsky YS. Status of Non-contact Electrical Measurements. AIP Conference Proceedings. 2003;683(782).

DOI: 10.1063/1.1622559

2. Shroeder DK. Contactless surface charge semiconductor characterization. Materials Science and Engineering. 2002;(91-92):196-210.

3. Kronik L, Shapira Y. Surface photovoltage phenomena: theory, experiment, and applications. Surface Science Reports. 1999;37:1-206.

4. Vorobey RI, Gusev OK, Zharin AL, et al. Study of silicon-insulator structure defects based on analysis of a spatial distribution of a semiconductor wafers' surface potential. Devices and Methods of Measurements. 2013;(2):67-72. (In Russ.).

5. Pilipenko VA, Saladukha VA, Filipenya VA, Vorobey RI, Gusev OK, Zharin AL. Characterization of the electrophysical properties of silicon-silicon dioxide interface using probe electrometry. Devices and Methods of Measurements. 2017;8(4):344-356. (In Russ.)

DOI: 10.21122/2220-9506-2017-8-4-24-31

6. A. Zharin, K. Pantsialeyeu, A. Svistun, K. Tyavlovsky. Determination the lifetime of minority charge carriers and iron impurity concentration in semiconductor structures with submicron layers. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(4):17-21.

7. A. Tyavlovsky, A. Zharin, V. Mikitsevich, R. Vorobey. Scanning photo stimulated electrometry for testing the uniformity of spatial distribution of semiconductor wafers parameters. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(4):47-51.

8. K. Pantsialeyeu, A. Zharin, V. Mikitsevich, O. Gusev. Semiconductor wafers testing based on electron work function of surface. Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering. 2020;2(5):11-14.

9. Zharin AL. Contact Potential Difference Technique and Its Application in Tribology. Minsk: Bestprint Publishing; 1996. 235 p. 10. Pantsialeyeu KU, Mikitsevich UA, Zharin AL. Design of the contact potentials difference probes. Devices and Methods of Measurements. 2016;7(1):7-15. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2016-7-1-7-15

11. Mikitsevich UA, Svistun AI, Samarina AV, Pantsialeyeu KU, Zharin AL. Intelligent Sensor for Measurement Systems with Sinusoidal Excitation Response. Devices and Methods of Measurements. 2023;14(1):18-26. (In Russ.).

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

12. Pantsialeyeu KU, Svistun AI, Tyavlovsky AK, Zharin AL. Digital contact potential difference probe. Devices and Methods of Measurements. 2016;7(2):136-144. (In Russ.).

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

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-173-178

Application of the Thermal Diffusivity Standard for the Heat Transfer Parameter Control in Absorbing Materials

E.V. Ivakin

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

Received 27.03.2023 Accepted for publication 12.09.2023

Abstract

Metrological support creation and use of heat transfer etalons are important stages in the development of modern materials science. This is especially concerned to the emergence of new materials in the world with previously unattainable thermophysical parameters. The purpose of this work was to develop and experimentally verify the idea of joint application of the transient gratings method which is well-known in nonlinear optics and the single thermal diffusivity etalon of conventional type for the heat transfer metrological control in materials of a wide values range. The method proposed is based on thermal diffusivity etalon application as a source of calibrated optical signals that are excited in it by short laser pulses. Their lifetime is formed by the etalon thermal diffusivity and on the transient grating spatial period. The etalon linear graph of gratings lifetimes as a function of the gratings periods squared and grating lifetime of the material under study are used for the thermal diffusivity calculation. Thermal diffusivity of thin sub-surface layers of the samples under study – duraluminium, monocrystalline silicon and thermoelectric lead telluride film was measured. The results obtained are in close agreement with the reference values.

Keywords: transient gratings, etalon of thermal diffusivity, metrological control, sub-surface layers

Address for correspondence:
Ivakin E.V.
Belarusian State University,
Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: Ivakin41@tut.by
For citation:
E.V. Ivakin.
Application of the Thermal Diffusivity Standard for the Heat Transfer
Parameter Control in Absorbing Materials.
Devices and Methods of Measurements.
2023, vol. 14, no. 3, pp. 173–178.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-173-178

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-173-178

Применение эталона температуропроводности для контроля параметра теплопереноса в поглощающих материалах

Е.В. Ивакин

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

Поступила 27.03.2023 Принята к печати 12.09.2023

Создание, контроль и постоянное использование эталонов теплопереноса являются важнейшими факторами в развитии современного материаловедения. Это в особенности актуально в связи с появлением новых материалов с недостижимыми ранее теплофизическими параметрами. Целью работы являлась разработка и экспериментальное апробирование идеи совместного применения известного в нелинейной оптике метода динамических решёток и одного эталона температуропроводности стандартного типа для метрологического контроля параметров теплопереноса в материалах с широким диапазоном значений. Предложенный метод основан на использовании стандартного эталона температуропроводности как источника калиброванных оптических сигналов, возбуждаемых в нём короткими лазерными импульсами. Их длительность определяется коэффициентом температуропроводности эталона и периодом динамической решётки. Последний легко контролируется средствами современной оптики. Построенный с помощью эталона линейный график зависимости времени жизни множества динамических решёток от квадрата их периодов в сочетании с измеренным временем жизни решётки в исследуемом материале позволяют вычислить коэффициент температуропроводности. В приповерхностных слоях микронной толщины в трёх образцах – дюралюминий, монокристаллический кремний и термоэлектрик теллурид свинца – проведены измерения искомых параметров. Результаты тестирования близко соответствуют справочным значениям.

Ключевые слова: динамические решётки, эталон температуропроводности, метрологический контроль, поверхностный слой

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Ивакин Е.В.	Ivakin E.V.
Белорусский государственный университет,	Belarusian State University,
пр. Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь	Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
e-mail: Ivakin41@tut.by	e-mail: Ivakin41@tut.by
Для цитирования:	For citation:
E.V. Ivakin.	E.V. Ivakin.
Application of the Thermal Diffusivity Standard for the Heat Transfer	Application of the Thermal Diffusivity Standard for the Heat Transfer
Parameter Control in Absorbing Materials.	Parameter Control in Absorbing Materials.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 173–178.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 173–178.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-173-178	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-173-178

Introduction

The heat transfer standards reproduction and storage are currently based on the comprehensively studied materials application [1]. Metrological value is supported by using a set of several measures and its implementation at a given temperature can be carried out only at a separate points of the mastered metrological range. The need to expand the range of measures, insufficiency of the existing set of measures and nonuniform of their distribution over the range of thermal diffusivity are problems that are relevant and have been discussed for a long period of time [2-4]. However, their solution by traditional means is a very long and expensive procedure. The substance used as a reference measure must have chemical inertness, physical homogeneity, non-hygroscopicity, absence of phase transitions, stability of properties over time, low cost, etc.

In [5] an attempt is made to create a new class of metrological control devices – a multivalued etalon of thermal conductivity. The essence of the proposed approach is to create a standard with controlled internal heat sources, which, depending on their power and distribution in space, form a specific thermophysical parameter, and it is then used for metrological control of materials. However, for a number of objective reasons of a fundamental nature, this idea have received a negative assessment by the experienced specialists (see, for example, [6]).

The aim of this work was to develop a method for multi-valued metrological thermal diffusivity control of a material in an extended range of values by using a standard unambiguous standard in combination with the transient grating method application. The method was tested by samples application with well-known thermal parameters.

Transient grating application for the metrological problem of heat transfer solving

Patent [7] proposes the idea of solving one of the metrological problems on the basis of the transient gratings method application, which is now widely used in the scientific world [8–10]. According to the method, two interfering beams from a pulsed laser light up the sample at an angle Θ to each other. In this case, an interference pattern is formed in the form of light and dark rectilinear equidistant bands following the period Λ , depending on the angle between the beams $\Lambda = \lambda/2 \sin(\theta/2)$. Due to the absorption of light,

spatially periodical heating of the sample occurs on the surface or in volume, which leads to a phase diffraction grating formation with the same period Λ . The third light beam from the continuous wave laser is directed to the sample and the light beam undergoes diffraction with the formation of diffraction orders of plus and minus the first orders. A diagram of a laser device for determining the thermal diffusivity of materials is shown in Figure 1. In different embodiments, it is given in numerous works concerning the transient gratings recording or application (see, for example, [11]).



Figure 1 – Diagram of a laser-based device for the thermal diffusivity of materials measurement: 1 – source of pulsed laser radiation; 2, 3 – interfering light beams; 4 – sample under test; 5 – continuous wave laser; 6 – special diffraction beam splitter; 7 – detector for the diffracted signal kinetics recording; 8, 9, 10 – diffracted beams of zero and of the \pm 1-orders; 11 – digital system for the diffraction signal recording and processing; 12, 13 – optical elements for light beams bringing to the sample under study

According to the early developed theory [12] for three-dimensional transient gratings, in the approximation, which is obviously performed when making measurements, the intensity of the signal of the first order of diffraction varies according to the exponential law:

$$I(t) = I(0) \{ \exp(-t/\tau) \}^2,$$
(1)

where the diffraction signal decay τ is inversely proportional to the thermal diffusivity χ of the sample under study in the direction of the grating vector:

$$\tau = \Lambda^2 / 8\pi^2 \chi. \tag{2}$$

If the heating of the sample is essentially of surface nature and therefore the thermal gradient is formed simultaneously in two directions – along the sample surface (due to spatially periodic heating) and along the normal to it, the diffracted signal decay is recorded through an complementary error function [12]:

$$I(t) = I(0) \{ \operatorname{erfc}(t/\tau)^{0.5} \}^2 ;$$
(3)

$$\tau = \Lambda^2 / 4\pi^2 \chi . \tag{4}$$

From the above relations it follows that in order to measure χ by the transient grating method, it is necessary to experimentally determine two values: grating period and its lifetime. The grating period can be measured for example, by using a standard microscope equipped with an eyepiecemicrometer. The time constant τ is determined by standard comparison of the experimental kinetics of diffraction signals recorded with the theory in accordance with the relations (1) or (3) depending on the type of grating (volume or surface).

Metrological support of the thermal diffusivity measurements begins with the calibration of the measuring setup, shown in Figure 1. For this purpose a stainless steel etalon of thermal diffusivity No. MTO 01.01.005-30/062, manufactured and officially certified at the Research Institute of Metrology named after D.I. Mendeleev, St. Petersburg, is used. According to the passport attached to the etalon, its thermal diffusivity is $\chi_{etalon} = 0.04 \text{ cm}^2/\text{sec.}$ Further, using the etalon as the sample under study, and the transient grating recording of different grating periods, a linear calibration graph $\tau_{etalon}(\Lambda_{etalon})^2$ should be constructed, as shown in Figure 2. The scale along the x axis from x = 0 to the maximum value $x = (\Lambda_{\text{etalon}})^2$ is selected depending on the range of measured parameters expected.



Figure 2 – Calibration graph $\tau_{etalon}(\Lambda_{etalon})^2$

Then, transient grating with an arbitrarily selected period Λ_x is excited in the sample under study and lifetime of the transient grating τ_x is determined by standard interpolation.

With the help of the graph in Figure 2, it is found to which period of the thermal grating Λ_{etalon} the equality $\tau_{\text{etalon}} = \tau_x$ is valid. The desired value of thermal diffusivity χ_x is calculated using the formula below:

$$\chi_x = \chi_{\text{etalon}} \left(\frac{\Lambda_X}{\Lambda_{\text{etalon}}} \right)^2.$$
(5)

It is convenient to determine the value of the Λ_{etalon} using the $\tau_{\text{etalon}}(\Lambda_{\text{etalon}})^2$, stored directly in the rather popular program OriginPro8. In this case, it is also advisable to use the Screen Reader option within this program. Using the manual movement of the crosshair, we find the point on the line graph that gives $Y = \tau_x$. At the same time, we find the value of $\Lambda^2_{\text{etalon}}$ and calculate the thermal diffusivity of the sample under study using the ratio (5).

Results of control measurements

It is worth to note that since all the necessary information when performing measurements is taken from optical radiation, the surface and volume of the sample under study should be of high optical quality with minimal losses caused by light scattering.

Control measurements of thermal diffusivity were performed for duraluminium and silicon samples. The specimens are made in the form of plates 30×30 mm and 2 mm thick, one surface of which is polished to optical quality. The heat transfer in the semiconductor film of the currently popular narrowbandgap thermoelectric PbTe with a thickness of 2.3 µm on a glass substrate was also studied. In all samples excited by laser beam at wavelength 0.532 µm, the surface heating is realized.

Duraluminium grade D16T



Figure 3 – Kinetics of the diffracted signal decay at surface excitation of duraluminium. Grating period is $\Lambda_x = 25 \,\mu\text{m}$. Its lifetime according to comparison with theory (3), is 0.31 μs

At $\Lambda_x = 25 \,\mu\text{m}$, by using the plot $\tau_{\text{etalon}} (\Lambda_{\text{etalon}})^2$ and the OriginPro8 program, the value of Λ_{etalon} . is determined. By using the ratio (5), thermal diffusivity of sample was found to be $\chi_x = 0.496 \,\text{cm}^2/\text{s}$. From the reference data [13] it follows that the thermal diffusivity of duralumin grade D16T, as the result of dividing its thermal conductivity by the bulk heat capacity, lies in the range of 0.48–0.51 cm²/s.

Monocrystalline silicon

With this semiconductor, all the same actions are performed as with duralumin. At the grating period $\Lambda_x = 25 \,\mu\text{m}$, diffraction kinetics with a decay time of 0.21 μs was registered. It was found that in this case $\Lambda^2_{\text{etalon}} = 30.7 \,\mu\text{m}^2$. As a result, we determine the value of thermal diffusivity:

$$\chi_x = 0.04 \left(\frac{625}{30.7} \right) = 0.83 \text{ cm}^2/\text{s}.$$

The reference value of monocrystalline silicon thermal diffusivity is $0.9 \text{ cm}^2/\text{s}$ [14].

Lead telluride thermoelectric film

When studying thin film on a substrate, it is important, first of all, to use radiation at a wavelength that provides high surface absorption to excite the thermal grating, so that the initial depth of heating of the film is significantly less than its thickness. and secondly, to choose the grating period so small that during the relaxation of the DR the heat does not reach the surface of the substrate. The latter requirement is met when satisfying the inequality $\Lambda < \pi d$, where *d* is the film thickness [12]. Otherwise, the measurement result will refer to the effective thermal diffusivity of the film-plus-substrate system.



Figure 4 – Diffraction signal during excitation of a thermal transient grating in a 1.3 µm thick PbTe film on glass. The period λ_x and the lifetime τ_x of the lattice are 5 µm and 0.37 µs, respectively. The white line is the theoretical curve (ratio (3))

By using the graph in Figure 2, the OriginPro8 program, as well as ratio (5), the required value of χ_x is determined to be 0.018 cm²/s. This value of thermal diffusivity well corresponds to the result of measurement obtained in [15].

Conclusion

A method is proposed that allows metrological support measurements of the thermal diffusivity χ_x of solid-state materials in a wide range of χ_x values by using a single etalon with a certified thermal diffusivity value χ_{etalon} . The basis of the measurements is a line graph $\tau_{etalon}(\Lambda_{etalon})^2$ constructed, which, due to the method application, can be considered as a multi-valued graphic material for metrological support of thermal measurements.

It has been experimentally shown that a thermal diffusivity etalon with a passport value $\chi_{etalon} = 0.04 \text{ cm}^2/\text{sec}$ can be used for metrological support of measurements of samples with thermal diffusivity in different ranges compared to χ_{etalon} : $\chi_x = 0.496$; 0.830 and 0.018 cm²/s. This possibility is realized as well through the use of an easily controlled parameter – the transient grating period Λ .

References

1. GOST 8.140-82. GSI. State primary standard and state verification scheme for measuring the thermal conductivity of solids from 0.1 to 5 W/(m·K) in the temperature range of 90÷500 K and from 5 to 20 W/(m·K) – in the temperature range of $300\div1100$ K.

2. Kirillov VI. Metrological support of technical systems. Minsk: New knowledge Publishing; 2017. 424 p.

3. Artemyev BG. Metrology and metrological support. Minsk: FSUE "STANDARTINFORM" Publishing; 2010. 568 p.

4. Shishkin IF. Theoretical metrology. Part 2. Ensuring the uniformity of measurements: 4th ed. St. Petersburg, 2012. 240 p.

5. Sokolov NA, Sokolov AN. Multivalued measures of thermal conductivity for the range of 20–500 W/(m.K). Measuring Techniques. 2009;52(7): 751-754. **DOI:** 10.1007/s11018-009-9349-5

6. Zarichnyak YP, Khodunkov VP. On the feasibility of multivalued measures of thermal quantities in metrology. Izv. universities. Instrument Engineering. 2020;63: 257-263.

7. Ivakin EV, Kisialiou IG. A method for determining the thermal diffusion of solids and the device for its implementation. Euroasian patent No. 017906. The date of patent grant is April 30, 2013. 8. Sawada T, Harata A. Transient reflection grating for sub-surface analysis: GHz ultrasonic, thermal spectroscopy and imaging. Appl. Phys. A. 1995;61:263-268. **DOI:** 10.1007/BF01538191

9. Ivakin EV. Laser diffraction relaxmeter for the kinetics photoexcitation and study in condensed matter. Optical Journal. 2000;67:27-31.

10. Scaev P, Gudelis V, Jarasiunas K, Ivakin E, Kisialiou I, Nesladek M, Haenen K. Carrier recombination and diffusivity in monocrystalline CVD-grown and single-crystalline HPHT diamonds. Phys. Status Sol. 2012; A209.9:1744-1749.

DOI: 10.1002/pssa.201200052

11. Maznev AA, Nelson KA, Rogers JA. Optical heterodyne detection of laser-induced gratings. Optics

Letters. 1998;23(16):1319-1321.

DOI: 10.1364/OL.23.001319

12. Kading O, Skurk H, Maznev A, Matthias E. Transient thermal gratings at surfaces for thermal characterization of bulk materials and thin films. Appl. Phys. A. 1995;61:253-261. **DOI:** 10.1007/BF01538190

13. Beletskii VM, Krivov GA. Aluminium alloys – composition, properties, technology, application. Reference book. KOMINTEKH Publishing, 2005.

14. Smith R. Semiconductors. Translation from English. Mir Publishing; 1982. 560 p.

15. Paraschuk T, Dashevsky Z, Woiciechowski K. Feasibility of a high stable PbTe: In semiconductor for thermoelectric energy applications. J. Appl. Phys. 2019; 125:245103. **DOI:** 10.1063/1.5106422

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190

О возможности использования медицинских линейных ускорителей электронов в качестве источника поля эталонного импульсного фотонного излучения

А.А. Загороднюк, А.Ю. Тараев, С.В. Лазаренко

УП «АТОМТЕХ», ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь

Поступила 26.05.2023 Принята к печати 22.09.2023

Генерирующие источники импульсного фотонного излучения находят все большее применение в науке и промышленности. В связи с этим растёт потребность в приборах дозиметрического контроля, способных работать в полях импульсного фотонного излучения. Однако до настоящего времени нет исчерпывающей методики, описывающей критерии выбора источников эталонных полей импульсного фотонного излучения, необходимых для калибровки и поверки дозиметрического оборудования. Целью работы являлось изучение возможности использования медицинского линейного ускорителя электронов (далее ЛУЭ) в качестве генерирующего источника эталонного поля импульсного фотонного излучения для калибровки и поверки дозиметрического оборудования. В работе исследовались основные характеристики поля фотонного излучения (спектр и средняя энергия излучения, мощность кермы в воздухе и мощность амбиентного эквивалента дозы Н*(10), создаваемая полем в заданной точке), генерируемого ЛУЭ в двух режимах работы: 6 МВ и 18 МВ. Дополнительно исследовалась возможность ослабления интенсивности фотонного излучения ЛУЭ свинцовым фильтром. Экспериментальное определение мощности кермы в воздухе (далее мощность кермы), генерируемой полем фотонного излучения ЛУЭ в заданной точке, производилось путём прямых измерений при помощи эталонного дозиметра. Расчёт спектра и средней энергии фотонного излучения ЛУЭ, производился при помощи Монте-Карло моделирования в программе Fluka. На основе результатов измерений и моделирования произведен расчёт мощностей амбиентного эквивалента дозы $H^*(10)$, генерируемых ЛУЭ в заданной точке. Установлено, что свинцовый фильтр эффективно ослабляет фотонное излучение ЛУЭ как по мощности кермы, так и по мощности амбиентного эквивалента дозы до уровней, подходящих для калибровки и поверки дозиметрического оборудования, предназначенного для работы в полях импульсного излучения. Показано, что свинцовый фильтр существенно влияет как на спектр фотонного излучения ЛУЭ, так и на его среднюю энергию.

Ключевые слова: Монте-Карло моделирование, линейный ускоритель электронов, импульсное фотонное излучение

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Загороднюк А.А.	Zaharadniuk A.A.
УП «ATOMTEX»,	SPE «ATOMTEX»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь	Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: fiz.zagorodnAA@gmail.com	e-mail: fiz.zagorodnAA@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.А. Загороднюк, А.Ю. Тараев, С.В. Лазаренко.	A.A. Zaharadniuk, A.Y. Taraev, S.V. Lazarenko.
О возможности использования медицинских линейных	On the Possibility of Using Medical Linear Electron Accelerators
ускорителей электронов в качестве источника поля эталонного	as a Source of the Reference Pulsed Photon Radiation Field.
импульсного фотонного излучения.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 179–190 (in Russian).
2023. – T. 14, № 3. – C. 179–190.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190	

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190

On the Possibility of Using Medical Linear Electron Accelerators as a Source of the Reference Pulsed Photon Radiation Field

A.A. Zaharadniuk, A.Y. Taraev, S.V. Lazarenko

SPE «ATOMTEX», Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus

Received 26.05.2023 Accepted for publication 22.09.2023

Abstract

Sources of pulsed photon radiation are widely used in science and industry. In this regard, there is a growing demand for dosimetry instruments capable of operating in these pulsed photon radiation fields. Until now there is no comprehensive methodology that describes the characteristics of reference fields of pulsed photon radiation required for calibration and verification of dosimetry equipment. The aim of this paper was to study the possibility of using a medical linear electron accelerator as a generating source of a reference pulsed photon radiation field. The paper investigates main characteristics of photon radiation field (namely, spectrum and average energy) generated by CLINAC in two modes of operation: 6 MV and 18 MV. Additionally it researches the possibility of attenuation of the CLINAC photon radiation intensity by a lead filter. The spectrum and average energy of the CLINAC photon radiation were calculated by means of Monte Carlo simulation in the Fluka program. The validation of the calculation was determined by comparing the attenuation coefficients calculated by the model with ones obtained experimentally by using real CLINACs. Experimentally, the attenuation coefficients were obtained by measuring the air kerma rate generated by the photon radiation fields of Varian VitalBeam and Varian iX CLINACs at a given point of space. Based on the simulation results, the $\dot{H}^*(10)$ ambient dose equivalent ratio generated by CLINACs were calculated. It was found that the lead filter effectively attenuates the CLINAC photon radiation in terms of both air kerma rate and ambient dose equivalent rate to levels suitable for calibration of dosimetry equipment designed to measure pulsed radiation. It is shown that the lead filter significantly affects both the photon spectrum of the CLINAC and its average energy.

Keywords: Monte Carlo modelling, linear electron accelerator, pulsed photon radiation

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Загороднюк А.А.	Zaharadniuk A.A.
УП «ATOMTEX»,	SPE «ATOMTEX»,
ул. Гикало, 5, г. Минск 220005, Беларусь	Gikalo str., 5, Minsk 220005, Belarus
e-mail: fiz.zagorodnAA@gmail.com	e-mail: fiz.zagorodnAA@gmail.com
Для цитирования:	For citation:
А.А. Загороднюк, А.Ю. Тараев, С.В. Лазаренко.	A.A. Zaharadniuk, A.Y. Taraev, S.V. Lazarenko.
О возможности использования медицинских линейных	On the Possibility of Using Medical Linear Electron Accelerators
ускорителей электронов в качестве источника поля эталонного	as a Source of the Reference Pulsed Photon Radiation Field.
импульсного фотонного излучения.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 179–190 (in Russian).
2023. – T. 14, № 3. – C. 179–90.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-179-190	

Введение

Генерирующие источники импульсного фотонного излучения (далее - генерирующий источник) широко используются в различных областях науки (ускорители высоких энергий), промышленности (неразрушающий контроль) и медицины (лучевая терапия). По сравнению со стандартными радионуклидными источниками фотонного излучения, генерирующие источники обладают рядом преимуществ. Они способны создавать поля высокоэнергетического фотонного излучения (с граничной энергией в десятки мегаэлектронвольт), а также позволяют регулировать его параметры: интенсивность излучения, длительность и частоту импульсов. С точки зрения радиационной безопасности основным преимуществом генерирующих источников является реализация концепции «plug and work» [1]: источник генерирует ионизирующее излучение при подаче питания, а при его отключении генерирующий источник перестаёт представлять радиационную опасность.

Вышеобозначенные преимущества обуславливают рост числа пользователей генерирующих источников, что в свою очередь повышает спрос на приборы дозиметрического контроля, которые способны производить измерения в создаваемых данными источниками импульсных фотонных полях. Следовательно, для возможности калибровки данных приборов дозиметрического контроля необходимы источники эталонного поля импульсного фотонного излучения.

На сегодняшний день не существует чётких И исчерпывающих методик, описывающих полной мере характеристики эталонных В фотонного полей импульсного излучения, а также рекомендаций по выбору генерирующих источников, пригодных для калибровки такого дозиметрического оборудования. Как следствие, в настоящее время идёт активная работа по поиску, разработке и созданию генерирующего источника эталонного импульсного фотонного излучения, способного создавать и воспроизводить поля с заданными характеристиками.

Одним из генерирующих источников, способных создавать и воспроизводить импульсное поле высокоэнергетического фотонного излучения с заданными характеристиками, является медицинский линейный ускоритель электронов (ЛУЭ).

ЛУЭ генерировать способен высокоэнергетическое импульсное фотонное излучение с граничными энергиями вплоть до 25 МэВ и частотой следования импульсов до 400 Гц [2]. Однако, основное его назначение – генерация полей высокой интенсивности. ЛУЭ способен излучать до 600 мониторных единиц в минуту (под мониторной единицей (далее – МЕ) понимается доза, равная 1 сантиГрей, генерируемая в водном фантоме на глубине 10 см, расположенном на расстоянии 1 м от источника [2]) Поэтому прямое использование ЛУЭ в качестве источника эталонного импульсного фотонного излучения для калибровки и поверки дозиметрического оборудования является затруднительным. Вначале необходимо ослабить интенсивность поля по мощности дозы в заданной точке (далее – точка измерения) до значений диапазона, в котором дозиметрическое оборудование способно корректно регистрировать ионизирующее излучение. Наиболее простым способом ослабления интенсивности фотонного излучения ЛУЭ является использование фильтра, изготовленного из материала высокой плотности с большим атомным номером и расположенного между источником излучения и точкой измерения.

Измерение дозиметрических характеристик поля излучения ЛУЭ в точке измерения обычно выполняется с использованием эталонного дозиметра на основе ионизационной камеры (ИК). При таком подходе базовой измеряемой дозиметрической величиной является мощность кермы в воздухе. Перевод кермы в операционную дозиметрическую величину осуществляется при помощи нормировочного коэффициента, который зависит от энергии излучения [3]. Поэтому для корректного перевода кермы в заданную операционную величину необходимо знать спектр фотонного излучения и его среднюю энергию.

При прохождении через фильтр спектр фотонного излучения претерпевает значительные искажения, при этом будет изменяться средняя энергия фотонного излучения И (под средней энергией фотонного излучения понимается величина, численно равная энергии, усреднённой по интенсивности излучения).

Прямое измерение спектра импульсного фотонного излучения ЛУЭ стандартным спектрометрическим оборудованием и расчёт его средней энергии является крайне сложной и дорогостоящей задачей. Из-за этого в ряде случаев прямое измерение заменяется компьютерным Монте-Карло моделированием. Такой позволяет рассчитать подход все необходимые характеристики поля фотонного излучения ЛУЭ с минимальными затратами. Целью работы являлось изучение возможности использования ЛУЭ в качестве источника эталонного импульсного поля фотонного излучения.

Материалы и методы исследования

Оценка возможности использования ЛУЭ в качестве источника эталонного поля импульсфотонного излучения производилась ного в несколько этапов. На первом этапе был выполнен Монте-Карло расчёт спектров фотонного излучения ЛУЭ, прошедших через свинцовый фильтр заданной толщины. На основе модельных спектров рассчитывалась средняя энергия прошедшего через фильтр фотонного излучения. Далее были проведены прямые измерения мощности кермы, генерируемой ЛУЭ в заданной точке. Рассчитанные значения средней энергии излучения использовались нахождения коэффициентов перевода для мощности кермы в мощность амбиентного эквивалента дозы Н*(10) согласно публикации [3]. На основе полученных значений $\dot{H}^*(10)$ и сравнении этих значений с рабочим диапазоном дозиметрического оборудования, производилась оценка возможности использования ЛУЭ качестве источника эталонного в поля импульсного фотонного излучения. Дополнительно в работе оценивалась способность свинцового фильтра ослаблять фотонное излучение ЛУЭ по мощности кермы и по мощности амбиентного эквивалента дозы.

Степень согласия между Монте-Карло моделью и экспериментом в данной работе оценивалась путём сопоставления расчётных и модельных значений коэффициента ослабления по мощности кермы. Под коэффициентом ослабления по мощности кермы (далее – коэффициент ослабления) понимается величина, численно равная отклику эталонного дозиметра при отсутствии фильтра, отнесённого к отклику эталонного дозиметра при наличии фильтра. В качестве фильтра в настоящей работе использовались свинцовые пластины определённой толщины. При этом суммарная толщина фильтра однозначно задаётся количеством таких пластин.

Прямые измерения мощности кермы в настоящей работе проводились на медицинских линейных ускорителях электронов для двух режимов работы: 6 МВ (ускоритель Varian VitalBeam) и 18 MB (ускоритель Varian iX). Под работы понимается номинальная режимом электронного энергия первичного пучка, падающего на мишень ЛУЭ. В качестве измерительного прибора в работе использовался эталонный дозиметр ДКС-АТ5350/1 с входящими в его состав ионизационными камерами PTW ТМ32002 и PTW ТМ30010 [4].

Следует отметить, ЧТО согласно публикации [5], ЛУЭ работающие в режиме вторичное 18 МВ, генерируют нейтронное излучение высоких энергий, обусловленное фотоядерными реакциями взаимодействия высокоэнергетического фотонного излучения с конструкционными материалами ускорителя. Однако ввиду того, что дозиметрическое используемое оборудование, В настоящей работе, а именно: ИК *PTW TM*32002 И *PTW TM*30010 в составе эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1, практически не чувствительно к нейтронному излучению, вклад данного вида излучения в суммарную мощность амбиентного эквивалента дозы, генерируемой ЛУЭ в точке измерения, полагается пренебрежимо малым. Как следствие, в настоящей работе полагается, что все рассчитанные дозиметрические величины формируются исключительно фотонным излучением ЛУЭ. В последующих работах планируется детальное изучение влияния вторичного нейтронного излучения, генерируемого ЛУЭ при использовании свинцового фильтра, на дозиметрическое оборудование, которое может быть чувствительно к данному типу излучения, а именно: дозиметры на основе тканеэквивалентного пластика.

Монте-Карло модель эксперимента

Монте-Карло модель эксперимента была создана в компьютерной программе *Fluka* [6, 7]

версии 4.3.1. Модель (рисунок 1) представляет собой излучения, фотонного источник на расстоянии 548 мм от которого располагается свинцовый фильтр. На расстоянии 2548 мм от источника располагается ионизационная камера. Модель фильтра представляет собой конструкцию, состоящую ИЗ держателя алюминий (передняя стенка толщиной

1 см, задняя стенка – сталь толщиной 2 мм), в котором располагаются свинцовые пластины фиксированной толщины (размер пластины 10×10 см²). Модель ионизационной камеры представляет собой воздушную сферу радиусом 7 см, окружённую слоем полиметилметакрилата толщиной 2,3 см, который обеспечивает электронное равновесие.



Рисунок 1 – Графическое представление Монте-Карло модели эксперимента для расчёта спектра фотонного излучения и коэффициента ослабления излучения

Figure 1 – Graphical representation of the Monte Carlo model of the experiment for calculating the photon radiation spectrum and the attenuation coefficient

Источником фотонного излучения являлась модель головки излучателя ЛУЭ, основанная на работе [8]. Всего было создано две модели излучателя, соответствующие двум ЛУЭ: Varian VitalBeam (для режима 6 MB) и Varian iX (для режима 18 MB). Основные различия между моделями заключаются в конструкции мишени, сглаживающего фильтра и вторичного коллиматора.

Верификация моделей излучателя ЛУЭ проводилась путём определения положения

глубины максимума поглощённой дозы, создаваемой при облучении фотонным излучением водного фантома, расположенного на расстоянии 1 м от излучателя [9, 10]. Дополнительно определялась относительная величина поглощённой дозы на глубине 10 см. Поперечный размер фотонного поля на передней грани фантома равен 10×10 см². Результаты определения положения максимума поглощённой дозы и относительной величины поглощённой дозы на глубине 10 см представлены в таблице 1.

Таблица 1 / Table 1

Результаты определения максимума поглощённой дозы для моделей линейного ускорителя электронов Determination of depth of maximum dose for CLINAC models

Down appoint	Varian VitalBeam 6 MB		Varian iX 18 MB	
(Mode of operation)	Расчёт	Документация	Расчёт	Документация
	(Calculation)	(Specification)	(Calculation)	(Specification)
Положение максимума поглощённой дозы, см (Depth of maximum dose, cm)	1,62 ± 0,10	1,60 ± 0,15	3,10 ± 0,10	3,3 ± 0,15
Относительная величина поглощённой дозы на глубине 10 см, % от максимума (Relative value of dose at 10 cm depth, %)	66 ± 2	67 ± 1	78 ± 2	80 ± 1

Анализ таблицы 1 показывает хорошее согласие между модельными величинами, и значениями, приведёнными в технической документации ЛУЭ. Из этого можно сделать вывод, что модели излучателей соответствуют реальным ЛУЭ и могут быть использованы для дальнейших расчётов.

Расчёт характеристик фотонного излучения линейного ускорителя электронов методом Монте-Карло

размер фотонного Поперечный поля излучения ЛУЭ, используемого для расчёта, равнялся 15×15 см² на расстоянии 1 м от источника излучения. Для каждого режима ЛУЭ рассчитано по 6 точек, соответствующих заданной толщине свинца в фильтре: 0 см, 5 см, 8 см, 10 см, 12 см, 15 см. Для каждой точки был рассчитан спектр фотонного излучения в области расположения ИК, энергия, поглощённая в активном объёме ИК, и средняя энергия фотонного излучения, падающая на ИК. Средняя энергия фотонного излучения, прошедшего через фильтр, рассчитывалась согласно формуле:

$$\langle E \rangle = \frac{\sum_{i} E_{i} I_{i}}{\sum_{i} I_{i}},\tag{1}$$

где $\langle E \rangle$ – средняя энергия излучения (МэВ); E_i – энергия монолинии (МэВ); I_i – относительная интенсивность монолинии в спектре.

Коэффициент ослабления фотонного излучения свинцовым фильтром рассчитывался согласно формуле:

$$\mu = \frac{E_0(1 - g(E_i))}{E_i(1 - g(E_0))},\tag{2}$$

где E_0 – энергия, поглощенная в ИК при отсутствии фильтра между излучателем и ИК; E_i – энергия, поглощенная в ИК при заданной толщине фильтра (*i* – шаг, однозначно определяющий толщину фильтра); *g* – коэффициент коррекции на тормозное излучение [11].

Результаты расчёта спектров излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр заданной толщины приведены на рисунке 2. Результаты расчёта средней энергии излучения в зависимости от толщины свинца в фильтре приведены в таблице 2. Точка «0» в таблице 2 соответствует случаю, при котором между ЛУЭ и ИК отсутствует фильтр. На рисунке 2 данному случаю соответствует начальный спектр.

Из рисунка 2 видно, что с ростом толщины свинца для обоих режимов работы ЛУЭ возрастает интенсивность пика аннигиляции позитронов 512 кэВ и пика характеристического излучения вольфрама 69,5 кэВ. При этом пик характеристического излучения свинца 88 кэВ практически полностью отсутствует. Отсутствие пика характеристического излучения свинца объясняется конструкцией фильтра: на выходе фильтра расположен слой железа, который практически полностью гасит линию 88 кэВ. Наличие пика характеристического излучения вольфрама объясняется излучением прямого пучка, прошедшим через вторичный вольфрамовый коллиматор. По мере роста толщины свинца в фильтре интенсивность излучения прямого пучка падает. В то время как интенсивность излучения, прошедшего через вторичный коллиматор, остаётся постоянной.

Таблица 2/Table 2

Результат расчёта средней энергии фотонного излучения линейного ускорителя электронов, прошедшего через свинцовый фильтр заданной толщины

The result of calculation of mean energy of CLINAC photon radiation passing through a lead filter of a given thickness

Толщина свинца	Средняя энергия фотонного излучения линейного ускорителя электронов, МэВ $\pm 3\sigma$		
в фильтре, см	(Mean energy of CLINAC photon radiation, MeV \pm 3 σ)		
(Lead thickness, cm)	Режим 6 MB / (6MV mode)	Режим 18 MB / (18 MV mode)	
0	1715 ± 26	4217 ± 44	
5	2644 ± 167	4355 ± 139	
8	2727 ± 270	4072 ± 195	
10	2728 ± 430	3852 ± 281	
12	2685 ± 440	3586 ± 273	
15	2477 ± 470	3084 ± 231	



Рисунок 2 – Модельные спектры фотонного излучения линейного ускорителя электронов, прошедшего через свинцовый фильтр заданной толщины: *a* – режим 6 MB; *b* – режим 18 MB

Figure 2 – Model spectra of photon radiation of CLINAC passed through a lead filter of a given thickness: a - 6 MV mode; b - 18 MV mode

Из таблицы 2 можно сделать вывод, что по мере увеличения толщины свинца в фильтре средняя энергия излучения вначале возрастает, достигая некоторого максимального значения. Однако по достижении определённой толщины свинца, средняя энергия начинает падать. Рост средней энергии с увеличением толщины свинца можно объяснить, рассмотрев кривую зависимостимассовогокоэффициентаослабления свинца от энергии фотонного излучения, представленной в работе [12], и сопоставив энергетический интервал данной кривой со спектром фотонного излучения ЛУЭ. Далее по тексту площадь под спектром в энергетическом интервале 0–3 МэВ будет обозначаться как низкоэнергетическая область спектра. Площадь под спектром в энергетическом интервале 3–18 МэВ будет обозначаться как высокоэнергетическая область спектра. Такое разделение обусловлено тем, что согласно работе [12], для интервала 0–3 МэВ фотонное излучение с более низкой энергией взаимодействует со свинцом и вольфрамом интенсивнее, чем фотонное излучение с более высокой энергией. В энергетическом интервале 3–18 МэВ характер взаимодействия меняется на противоположный.

Для режима 6 MB (рисунок 2a)низкоэнергетическая область спектра больше высокоэнергетической области спектра примерно в 2 раза. Это приводит к тому, что по мере роста толщины фильтра спектр начинает смещаться вправо. Как следствие, растёт его средняя энергия. Однако начиная с некоторой толщины свинца, спектр достигает состояния, при котором его низкоэнергетическая часть становится примерно равной высокоэнергетической. Это приводит к уменьшению средней энергии излучения с ростом толщины фильтра. Все вышесказанное справедливо и для режима 18 MB (рисунок 2b). Основное отличие заключается в том, что фотонный спектр ЛУЭ для данного режима имеет большую ширину. Из-за этого уже энергетическую для начального спектра низкоэнергетическая область примерно равна высокоэнергетичес-Как следствие изменение кой. характера зависимости средней энергии от толшины фильтра происходит раньше.

Вторым механизмом, влияющим на уменьшение средней энергии с ростом толщифильтра. является вклад излучения, прошедшего вторичный через коллиматор. По мере роста толщины свинца в фильтре, интенсивность излучения прямого пучка уменьшается. По достижении некоторой критической толщины, интенсивность излучения, прошедшего через фильтр, становится равной интенсивности излучения, прошедшего через вторичный коллиматор. Аналитический расчёт показывает, что слой вольфрама толщиной 6,9 см (толщина вторичного коллиматора модели ЛУЭ Varian VitalBeam) по коэффициенту ослабления примерно сопоставим со свинцом толщиной 11,3 см (для излучения ЛУЭ в режиме 6 MB). Слой вольфрама толщиной 7,8 см (толщина вторичного коллиматора модели ЛУЭ Varian iX) для излучения ЛУЭ в режиме 18 MB сопоставим со свинцом толщиной 12,3 см. дальнейшем При увеличении толщины фильтра излучение, прошедшее через вторичный коллиматор, становится интенсивнее излучения, прошедшего через фильтр. Как следствие средняя энергия суммарного излучения в точке измерения стремится к некоторой постоянной величине для обоих режимов работы ЛУЭ.

Расчёт коэффициента ослабления на реальном линейном ускорителе электронов

Экспериментальное определение коэффициента ослабления фотонного излучения свинцовым фильтром производилось ЛУЭ путем измерения мощности кермы, создаваемых реальными линейными ускорителями Varian VitalBeam (режим 6 MB), Varian iX (режим 18 MB) в точке измерения, расположенной на расстоянии 2548 мм от мишени ЛУЭ. Поперечный размер фотонного поля на расстоянии 1 м от мишени ЛУЭ составлял 15×15 см. Свинцовый фильтр размещался на расстоянии 548 мм от мишени излучателя ЛУЭ на специальном держателе, закрепленном на излучателе.

Измерения кермы, создаваемой фотонным полем ЛУЭ, проводились при помощи эталонного дозиметра ДКС-АТ5350/1 производства УП «АТОМТЕХ». При измерениях со свинцовым фильтром в качестве детектора использовалась ИК РТW ТМ32002 с активным объёмом равным 1 л. ИК размещалась на расстоянии 2548 мм от мишени ЛУЭ. Для обеспечения электронного равновесия внутри активного объёма ИК помещалась в сферу из полиметилметакрилата толщиной 2,3 см.

Для измерения кермы при отсутствии фильтра (точка 0 см) была использована ИК РТW TM30010 с активным объёмом равным 0,6 см³. Для обеспечения электронного равновесия и стабилизации режима измерения, на камеру сверху надевался сферический колпачок из полиметилметакрилата толщиной 4,7 см. Ввиду различия толщины колпачков у камер для возможности сопоставления измерений С результатами моделирования, были введены поправочные коэффициенты. Эти коэффициенты учитывают тот факт, что фотонное излучение ЛУЭ интенсивнее ослабляется слоем полиметилметакрилата толщиной 4,7 см чем слоем полиметилметакрилата толщиной 2,3 см.

Результаты расчёта коэффициентов ослабления приведены в таблице 3 для режима 6 МВ, и в таблице 4 для режима 18 МВ. Дополнительно в таблицах представлены результаты аналитического расчёта коэффициента ослабления в предположении узкого пучка. При аналитическом расчёте предполагается, что ослабление интенсивности излучения происходит по экспоненциальному закону с использованием массовых коэффициентов ослабления согласно работе [11]. Коэффициент ослабления при аналитическом расчёте определялся как отношение кермы, создаваемой излучением до прохождения фильтра, и кермы, создаваемой излучением после прохождения через фильтр. Керма рассчитывалась из спектра излучения согласно формуле:

$$K_{air} = \sum_{i} E_i \varphi_{i(E_i)} (\frac{\mu_{en}}{\rho})_i, \qquad (3)$$

где $\phi_{i(Ei)} - \phi$ люенс фотонного излучения с энергией $E_i (1/cm^2)$; $(\mu_{en}/\rho)_i$ – массовый коэффициент поглощения для воздуха (см²/г); E_i – энергия фотонного излучения (МэВ).

Из таблиц 3 и 4 видно, что результаты Монте-Карло моделирования имеют хорошее согласие с экспериментальными данными. Сравнение результатов моделирования и эксперимента с аналитическим расчётом показывает, что до толщины свинца равной 5 см ослабление интенсивности излучения идёт по экспоненциальному закону ослабления узкого пучка. Вклад излучения, рассеянного на фильтре, и излучения, прошедшего сквозь вторичный коллиматор, достаточно мал. Однако далее, по мере роста толщины свинца, расхождения между аналитическим расчётом и экспериментом становятся существенными. При толщине фильтра менее 10 см, можно предположить, что отличие в основном связано с вторичным излучением, рассеянным на материале фильтра. Однако при толщине фильтра более 10 см существенный вклад начинает давать излучение, прошедшее через вторичный коллиматор. Это можно предположить исходя из характера изменения коэффициента ослабления с ростом толщины свинца после 10 см. Для подтверждения данного предположения было произведено два дополнительных измерения мощности кермы при толщине свинца в фильтре равной 20 см и 25 см. Было установлено что при толщине свинца в фильтре более 20 см коэффициент ослабления перестает зависеть от толщины фильтра и стремится к постоянной величине.

Таблица 3/Table 3

Результат расчёта коэффициента ослабления для линейного ускорителя электронов Varian VitalBeam (режим работы 6 MB

Толщина свинца в фильтре, см (Lead filter thickness, cm)	Аналитический расчёт Analytical calculation	Монте-Карло расчёт, $\pm 3\sigma$ (Monte-Carlo calculation)	Эксперимент (Experiment)
0	1.0	1.0	1.0
5	19,4	$17,1 \pm 1.6$	19,4
8	90	74 ± 9	80
10	246	210 ± 44	201
12	672	506 ± 116	481
15	2964	1417 ± 394	1399

Result of attenuation coefficient calculation for Varian TrueBeam CLINAC (6 MV mode)

Таблица 4/Table 4

Результат расчёта коэффициента ослабления для линейного ускорителя электронов Varian iX (режим работы 18 MB)

Result of attenuation coefficient calculation for Varian iX CLINAC (18 MV m

Толщина свинца в фильтре, см (Lead filter thickness, cm)	Аналитический расчёт Analytical calculation	Монте-Карло расчёт, $\pm 3\sigma$ (Monte-Carlo calculation)	Эксперимент (Experiment)	
0	1,0	1.0	1,0	
5	16,9	$16,1 \pm 0,8$	16,6	
8	81	72 ± 6	71	
10	227	180 ± 21	177	
12	631	451 ± 57	416	
15	2896	1326 ± 233	1097	

Дополнительно стоит отметить, что различие между коэффициентами ослабления для ЛУЭ Varian VitalBeam в режиме 6 МВ и ЛУЭ Varian iX в режиме 18 МВ имеет малую величину. Так, при толщине фильтра равной 15 см, это различие не превышает 25 %.

Определение мощности амбиентного эквивалента дозы, создаваемого линейным ускорителем электронов

Перевод мощности кермы в мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^{*}(10)$, генери-

руемой ЛУЭ в точке измерения на расстоянии 2548 мм от излучателя, производился согласно формуле:

$$\dot{H}^*(10) = \alpha(E) \times \dot{K}_{air} \times \gamma(E), \tag{4}$$

где K_{air} – мощность кермы в воздухе (Грей/час); $\alpha(E)$ – коэффициент перехода от кермы к амбиентному эквиваленту дозы (Зв/Грей); $\gamma(E)$ – поправочный множитель ИК; E – средняя энергия излучения ЛУЭ (МэВ).

Результаты расчёта мощностей амбиентного эквивалента доз, генерируемых ЛУЭ Varian VitalBeam для режима 6 MB и Varian iX для режима 18 MB приведены в таблице 5.

Таблица 5/Table 5

Мощность амбиентного эквивалента дозы, генерируемых линейнфм ускорителем электронов в зависимости от толщины фильтра для различных режимов работы

Ambient dose equivalent power generated by CLINAC depending on filter thickness for different modes of operation

Толщина свинца в фильтре, см (Lead filter thickness, cm)	Varian VitalBeam режим 6 MB, 600 ME/мин Varian VitalBeam 6 MV mode, 600 MU/min		<i>Varian iX</i> режим 18 MB, 400 ME/мин <i>Varian iX</i> 18 MV mode, 400 MU/min	
	$\dot{K}_{air},$ Гр/ч $(\dot{K}_{air},$ Gy/h)	<i>Н</i> *(10), Зв/ч (<i>H</i> *(10), Sv/h)	<i>Н</i> *(10), Зв/ч (<i>H</i> *(10), Sv/h)	$\dot{K}_{air},$ Гр/ч ($\dot{K}_{air},$ Gy/h)
0	62,20	80,83	41,87	48,35
5	3,14	3,85	2,52	2,91
8	0,77	0,95	0,59	0,68
10	0,31	0,38	0,24	0,28
12	0,13	0,16	0,10	0,12
15	0,044	0,055	0,038	0,046

Результаты представлены с учётом корректировки показаний ИК на ослабление фотонного излучения ЛУЭ слоем полиметилметакрилата и чувствительности ИК к высокоэнергетическому фотонному излучению.

Заключение

Расчёт показал, что мощность амбиентного эквивалента дозы $\dot{H}^*(10)$, генерируемая линейным ускорителем электронов (ЛУЭ) в прямом пучке, составляет 80 Зв/ч для случая *Varian VitalBeam* (режим 6 MB, 600 МЕ/мин), и 48 Зв/ч для случая ЛУЭ *Varian iX* (режим 18 MB, 400 МЕ/мин) в точке измерения на расстоянии 2548 мм от мишени ЛУЭ. Свинцовый фильтр позволяет эффективно ослаблять фотонное излучение ЛУЭ по мощности амбиентного эквивалента дозы. Так, фильтр толщиной 15 см позволяет уменьшить значение $\dot{H}^{*}(10)$, генерируемое ЛУЭ, более чем в тысячу раз. Значение Н*(10), генерируемое в точке измерения полем фотонного излучения, прошедшего через 15 см свинца, для случая Varian VitalBeam (режим 6 МВ, 600 МЕ/мин) составляет 0,055 Зв/ч, для случая Varian iX (режим 18 MB, а 400 МЕ/мин) это значение составляет 0,046 Зв/ч. Сопоставляя данные значения с типичным

Devices and Methods of Measurements 2023, vol. 14, no. 3, pp. 179–190 A.A. Zaharadniuk et al.

диапазоном измерений стандартного дозиметрического оборудования (для дозиметра ДКС-АТ1123 [13] этот диапазон составляет 0.1 мкЗв/ч–10 Зв/ч), можно сделать вывод, что при наличии свинцового фильтра, ЛУЭ может быть использован в качестве источника эталонного поля импульсного фотонного излучения.

Установлено, что, начиная с определённой толщины фильтра, фотонное излучение в точке измерения в основном определяется излучением, прошедшим через вторичный коллиматор. Из этого можно сделать вывод, что при некоторой толщине фильтра спектр и средняя энергия фотонного излучения в точке измерения будут определяться не только режимом работы ЛУЭ, но и конструкцией вторичного коллиматора. Из этого можно сделать вывод, что расчёты по определению характеристик полей фотонного излучения ЛУЭ, приведённые в настоящей работе, необходимо будет производить для каждой конкретной модели ускорителя.

Моделирование показало, ЧТО средняя энергия фотонного излучения ЛУЭ, прошедшего через фильтр, зависит как от выбранного режима работы, так и от толщины фильтра. При отсутствии фильтра средняя энергия излучения ЛУЭ для режима 18 МВ примерно в 2,4 раза больше средней энергии излучения ЛУЭ для режима 6 MB. По мере роста толщины фильтра разница в средней энергии между этими режимами уменьшается. При толщине фильтра равной 15 см различие в средней энергии между двумя режимами работы ЛУЭ не превышает 25 %.

Полученные быть результаты могут использованы определения коэфдля фициентов перевода мощности кермы в необоперационную ходимую дозиметрическую величину согласно публикации [3] при работе с полями фотонного излучения ЛУЭ. Это в свою очередь позволит использовать ЛУЭ качестве источника эталонного поля импульсного фотонного излучения.

Список использованных источников

1. Коржик М.В. Перспективы ядерно-физических исследований в Беларуси // Журнал Белорусского государственного университета. Физика. – 2021. – С. 62–66. **DOI:** 10.33581/2520-2243-2021-3-62-66

2. Brady L.W., Yaeger T.E. Encyclopedia of Radiation Oncology. Springer, 2013, 1015 p. 3. ISO 4037-3:2019. Radiological protection-X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy – Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as function of energy and angle of incidence – Introd. 30.01.2019. – International Organization for Standartization, 2019. – P. 68

4. Дозиметр ДКС-АТ5350/1. [Электронный pecypc]. Режим доступа: https://atomtex.com/ru/oboru-dovanie-dlya-kalibrovki-i-poverki-dozimetry-etalonnye/ dozimetr-dks-at53501 [Дата доступа 20/12/2022].

5. *Belousov A.V.* The Dose from Secondary Neutrons during the Operation of Modern Medical Accelerators / A.V. Belousov [et al.] // Moscow University Physics Bulletin. – 2019. – Vol. 74. – No. 6. – P. 551–558.

DOI: 10.3103/s0027134919060080

6. *Battistoni G*. Overview of the FLUKA code / G. Battistoni [et al.] // Annals of Nuclear Energy. – 2015. – № 82. – Pp. 10–18.

DOI: 10.1016/j.anucene.2014.11.007

7. *Bohlen T*. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications / T.T. Bohlen [et al.] // Nuclear Data Sheets. – 2014. – № 120. – Pp. 211–214.

DOI: 10.1016/j.nds.2014.07.049

8. *Bednarz B*. Monte Carlo modelling of a 6 and 18 MV Varian Clinac medical accelerator for in-field and out-field dose calculations: development and validation / B. Bednarz, X. Xu // Phys. Med. Biol. – 2009. – № 54. – Pp. 43–57.

DOI: 10.1088/0031-9155/54/4/N01

9. Varian VitalBeam System Specifications. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://protechsolutions.com.ua/assets/files/varian-vitalbeam.pdf [Дата доступа 20/12/2022].

10. Varian iX System Specifications. [Электронный pecypc]. Режим доступа: https://protech-solutions. com.ua/assets/files/varian-clinac-ix.pdf [Дата доступа 20/12/2022].

11. *Attix H.* Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Wiley, New York, 1986.

12. *Hubbell J.* Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest / J. Hubbell, S. Seltzer – Maryland, USA, 1995. [Электронный ресурс]. Режим доступа: http://physics.nist.gov/PhysRefData/ XrayMassCoef/cover.html. [Дата доступа 10/06/2022].

13. Дозиметры рентгеновского и гамма излучения ДКС AT1121, ДКС AT1123. [Электронный ресурс]. Режим доступа: https://atomtex.com/ru/oborudovaniedlya-kalibrovki-i-poverki-dozimetry-etalonnye/dozimetrdks-at53501 [Дата доступа 20/12/2022].
References

1. Korzhik MV. Outlook for nuclear physics research in Belarus. Journal of the Belarusian State University. Physics. 2021;(3):62-66. (In Russ.).

DOI: 10.33581/2520-2243-2021-3-62-66

2. Brady LW, Yaeger TE. Encyclopedia of Radiation Oncology. Springer, 2013. 1015 p.

3. ISO 4037-3:2019. Radiological protection-X and gamma reference radiation for calibrating dosemeters and doserate meters and for determining their response as a function of photon energy. Part 3: Calibration of area and personal dosemeters and the measurement of their response as function of energy and angle of incidence – Introd. 30.01.2019. International Organization for Standartization. 2019. P. 68.

4. AT5350/1 Standard Dosimeter. [Electronic Resource]. Available from: https://atomtex.com/en/radiation-metrology-and calibration-equipment-stan-dard-dosimeters/at53501-standard-dosimeter [Accessed 20/12/2022]. (In Russ.).

5. Belousov AV, Varzar SM, Zheltonozhskaya MV, Lykova EN, Chernyaev AP. The Dose from Secondary Neutrons during the Operation of Modern Medical Accelerators. Moscow University Physics Bulletin. 2019;74(6):551-558. **DOI:** 10.3103/s0027134919060080

6. Battistoni G, Boehlen T, Cerutti F, Chin PW, Esposito LS, Fassò A et al. Overview of the FLUKA code. Annals of Nuclear Energy. 2015;(82):10-18.

DOI: 10.1016/j.anucene.2014.11.007

7. Bohlen TT, Cerutti F, Chin MPW, Fassò A, Ferrari A, P.G. Ortega PG et al. The FLUKA Code: Developments and Challenges for High Energy and Medical Applications. Nuclear Data Sheets. 2014;(120):211-214. **DOI:** 10.1016/j.nds.2014.07.049

8. Bednarz B, Xu X. Monte Carlo modelling of a 6 and 18 MV Varian Clinac medical accelerator for in-field and out-field dose calculations: development and valida-

and out-field dose calculations: development and va tion. Phys. Med. Biol. 2009;(54):43-57.

DOI: 10.1088/0031-9155/54/4/N01

9. Varian VitalBeam System Specifications. [Electronic Resource]. Available from: https://protech-solutions.com.ua/assets/files/varian-vitalbeam.pdf [Accessed 20/12/2022].

10. Varian iX System Specifications. [Electronic Resource]. Available from: https://protech-solutions.com.ua/assets/files/varian-clinac-ix.pdf [Accessed 20/12/2022].

11. Attix H. Introduction to radiological physics and radiation dosimetry. Wiley, New York, 1986.

12. Hubbell J, Seltzer S. Tables of X-Ray Mass Attenuation Coefficients and Mass Energy-Absorption Coefficients 1 keV to 20 MeV for Elements Z = 1 to 92 and 48 Additional Substances of Dosimetric Interest. Maryland, USA, 1995. [Electronic Resource]. Available from: http:// physics.nist.gov/PhysRefData/XrayMassCoef/cover.html. [Accessed 10/06/2022].

13. AT 1121, AT1 1123 X-Ray and Gamma Dosimeters. [Electronic Resource]. Available from: https://atomtex.com/en/at1121-at1123-x-ray-and-gamma-radiationdosimeters [Accessed 20/12/2022]. (In Russ.). DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198

Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons

A.R. Baev¹, N.V. Levkovich¹, E.P. Babuk², M.V. Asadchaya¹

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

 ²Belarusian State University, Nezavisimosti Ave., 4, Minsk 220030, Belarus
 ³Minsk Automobile Plant,

Socialist str., 2, Minsk 220021, Belarus

Received 23.08.2023 Accepted for publication 26.09.2023

Abstract

Increasing the reliability of control of cast iron structure and its physical and mechanical characteristics is an important scientific and technical task of the machine-building industry. The paper studies the possibilities of controlling the structure of cast irons using structural noise created by ultrasonic scattering on graphite inclusions of different shapes. The subject of the present studies was such characteristics of structural noise as amplitude-temporal A(t) and as root mean square value of the amplitude of the ultrasonic waves backscattering field A^N , compared with the data on ultrasonic velocity and strength or tensile strength of cast iron samples. As a result of the studies, a significant difference between the amplitude parameters of the A^N structural noise obtained for samples with different shapes of graphite inclusions at 5 MHz was revealed for the first time. So, for example, for samples of gray cast iron (Russian: C410, C415, C420, C425), having predominantly plate-like form of graphite inclusions, the value of A^N on 14–15 dB exceeds that measured in high-strength specimens of the cast iron with the prevailing form of spherical graphite inclusions B450 (Russian), etc. At the same time growth of longitudinal ultrasonic velocity amounted to 20-25 %. The method of rejection of gray cast iron from high-strength cast iron according to the data of amplitude parameters of structural noise A^N at unilateral and local sounding of the object without using an additional reference signal reflected from its oppositional wall is suggested.

Keywords: ultrasonic wave scattering, graphite inclusions of different shapes, method of controlling the structure and strength of cast irons, ultrasonic probes

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Баев А.Р.	Baev A.R.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	of Science of Belarus,
e-mail: baev@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
	e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V. Asadchaya.	A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V. Asadchaya.
Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method	Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method
of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons.	of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 191–198.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 191–198.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198

Обратное рассеяние ультразвуковых волн как основа метода контроля структуры и физико-механических свойств чугунов

А.Р. Баев¹, Н.В. Левкович², Е.П. Бабук³, М.В. Асадчая¹

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь ²Белорусский государственный университет, пр-т Независимости, 4, г. Минск 220030, Беларусь ³Минский автомобильный завод, ул. Социалистическая, 2, г. Минск 220021, Беларусь

Поступила 23.08.2023 Принята к печати 26.09.2023

Повышение надёжности контроля структуры чугунов и их физико-механических характеристик является важной научно-технической задачей машиностроительной промышленности. В работе изучены возможности контроля структуры чугунов, используя структурный шум, создаваемый рассеянием ультразвуковых колебаний на графитовых включениях разной формы. Предметом настоящих исследований являлись такие характеристики структурного шума как амплитудновременные A(t) и среднеквадратичные амплитуды A^N волн рассеяния, сопоставляемые с данными по скорости ультразвуковых колебаний, а также прочностью или временным сопротивлением на растяжение образцов чугунов. В результате исследований впервые выявлено существенное различие между амплитудными параметрами структурного шума A^N, полученными для образцов с разной формой графитовых включений на частоте 5 МГц. Так, например, для образцов серого чугуна (СЧ10, СЧ15, СЧ20, СЧ25), имеющих преимущественно пластинчатую форму графитовых включений, величина A^N на 14–15 дБ превышает ту, что измерена в высокопрочных чугунах с превалирующей формой включений графита шаровидной формы – ВЧ50. При этом, рост продольной скорости ультразвука с увеличением временного сопротивления составил $\approx 20-25$ %. Предложен метод отбраковки серого чугуна от высокопрочного по данным амплитудных параметров структурного шума A^N при одностороннем и локальном прозвучивании объекта без использования дополнительного опорного сигнала, отражённого от его оппозитной стенки.

Ключевые слова: рассеяние ультразвуковых волн, включения графита разной формы, способ контроля структуры и прочности чугунов, ультразвуковые преобразователи

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Баев А.Р.	Baev A.R.
Институт прикладной физики НАН Беларуси,	Institute of Applied Physics of the National Academy
ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь	of Science of Belarus,
e-mail: baev@iaph.bas-net.by	Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus
	e-mail: baev@iaph.bas-net.by
Для цитирования:	For citation:
A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V. Asadchaya.	A.R. Baev, N.V. Levkovich, E.P. Babuk, M.V. Asadchaya.
Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method	Backscattering of Ultrasonic Waves as the Basis of the Method
of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons.	of Control of Structure and Physico-Mechanical Properties of Cast Irons.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 191–198.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 191–198.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-191-198

Introduction

Increasing the reliability of testing the structure of cast irons and their physical-mechanical properties (PMP) by nondestructive methods is an important technical and scientific problem of the machinebuilding industry. Significant efforts of developers of such methods and means of control are directed on attraction and use of new effects of interaction of external fields, including acoustic, electromagnetic, etc. for expansion of technical possibilities and nomenclature of controlled objects. It concerns not only the methods of nondestructive testing, which give at "volume probing" of metal averaged indicators of informative parameters correlating with the structure and PMP, which is realized as a rule by acoustic methods [1], but also obtaining such data on the properties of local areas of the object. As for a number of methods of control of structure and PMP of cast irons by electromagnetic methods, for example [1-3], their use has limitations due to high sensitivity to the mobility of domains in alternating fields. And this, in turn, depends on a number of peculiarities of the casting technology itself and proper holding of the processes running in accordance with the Technical Conditions at a particular production plant, including the additives introduced into the metal, holding of the melting temperature regime, etc.

It should be noted that in some cases sufficiently reliable information on the structure of cast irons is achieved in the evaluation of small-sized products, when it is possible to carry out volumetric magnetization of products. In this case, a number of factors that reduce the reliability of estimation of PMP and structure of the material are reduced [3]. Sometimes, under certain conditions (as a rule, laboratory), quite important information about the PMP of cast irons can be obtained by measuring the structural noise or Barkhausen noise created by the motion of the domain structure under the influence of a low-frequency magnetic field applied tangentially to the surface of a specially protected object surface [2]. However, as mentioned above, the measured output signal readings are quite sensitive to the influence of the above factors on the signalresponse when the depth of local probing does not exceed 0.5-1.0 mm.

With regard to the use of ultrasonic methods of structural and PMP testing of cast irons, the magnetic characteristics of the latter practically do not affect the values of acoustic parameters, including the velocity *C* of a particular ultrasonic mode, attenuation and scattering coefficients on structural inhomogeneities – mainly graphite inclusions. It is very important that the shape and geometrical parameters of the latter have a significant influence on the strength properties of cast irons, as well as on the elastic Young's moduli *E* and shear moduli *G*, the coefficient of volumetric compression K_C , and the density of the material ρ . In this case:

$$C_{L,T,R} = (E/\rho)^{0.5} F_{L,T,R} , \qquad (1)$$

where $F_{L,T,R}$ is a function depending mainly on the Poisson's ratio, and the indices L, T and R refer to the longitudinal, transverse and Rayleigh modes, respectively.

In view of the relationship between ultrasound velocity and PMP, simplicity of realization and wide possibilities of volumetric, surface, subsurface sounding of cast irons, such devices and acoustic methods find more and more widespread application for structural analysis of cast irons [4–6]. It should be noted that informative parameters having a functional relationship with the ultrasonic velocity (and, accordingly, with elastic moduli) can be used to determine the ultrasonic velocity, including, for example, critical angles of passage or reflection of elastic waves from the liquid-iron boundary, etc. [7].

In this case, naturally, as in the previous case, it is required to finish the local surface of the object to the roughness $R_z < 5-10 \mu m$, as well as to create a local or immersion bath and a device for controlling the angle of incidence (reception) of the ultrasonic beam on the object.

In some cases, the methods of sounding the object by using the signal-response, characterizing the attenuation parameters of ultrasonic waves, including the attenuation coefficient of ultrasonic or spectral characteristic of the signal $A(\omega)$ [8] are promising. However, despite a number of advantages, the use of such a method, there is a disadvantage due to the fact that its realization requires the appropriate orientation of the oppositional surface of the object in relation to the working surface of the input and mechanical processing of both surfaces at the thickness of the layer of sounded metal $h > h_0$, providing the necessary accuracy of amplitude measurements. Note that a similar problem occurs for the most widely used in practice ultrasonic control method mentioned above, which consists in determining the ultrasonic velocity well correlated with the PMP of cast irons.

In the present work we suggest to expand technical possibilities of structuroscopy for rejection of high-strength cast iron from gray cast iron, to apply the method consisting in using as an informative parameter the mean-square amplitude of waves backscattered on graphite inclusions (or structural noise). It determined in the characteristic time range $\Delta t_{21} = t_2 - t_1$, where the choice of time boundaries t_i is realized from the condition, at which the superimposition of additional waves is excluded. It is assumed that the control of the local subsurface zone of the object can be realized without using data on the parameters of the acoustic signal reflected from the opposing wall of the object under study.

It should be noted that similar problems for estimating the grain baleness or determining the boundary of the thermally hardened layer characterized by the difference in grain size of the structure of the metal hardened by chemical-thermal treatment were solved, for example, in [9–10]. In this case, as it is known [1], such acoustic samples as ultrasound velocity C, specific acoustic resistance R and elastic moduli change not so significantly depending on the baleness or grain size of the metal.

In [10]. to increase the reliability of measurements it was proposed to use as a reference signal to use the amplitude of the "penetration signal" $A_{\rm S}$, which is a pulse of a surface wave propagating along the boundary of the ultrasonic probe (UP) with the steel surface from the ultrasonic source to the receiver of waves. The object of the present research are cast iron samples differing in the form of graphite inclusions, on which, according to known data, both physical-mechanical and acoustic properties correlating with them essentially depend. In this case, the change in the ultrasonic velocity and specific acoustic impedance can reach tens of percent. It should be expected that the scattering field of ultrasonic waves on the ensemble of graphite inclusions will change more markedly depending on their shape, size and content of the spherical, vermicular graphite, which, naturally, requires research to develop a method for rejecting cast irons according to their amplitude characteristics of structural noise.

Thus, the purpose of the present work was to study the features of ultrasonic wave scattering in cast iron samples depending on their structure, tensile strength, as well as correlated with them ultrasonic velocity, which is of interest for the development of a method of rejecting cast iron, for example, high-strength from gray cast iron.

Development of the methodology and scheme of acoustic measurements

Below, along with the development of a methodology for research into the scattering of ultrasonic waves mainly on graphite inclusions of cast irons and the analysis of the acoustic path, are the means of measurement explained in Figure 1. The latter illustrates the scheme of measurements designed to determine the amplitude characteristics of the scattering field of the probing signal, which is the subject of research.



Figure 1 – Scheme of the experimental study of the influence of cast iron structure on the amplitude characteristics of the backscattering field: 1 - object; 2 and $3 - \text{emit$ $ting}$ and receiving elements (sensors) of the transducer; 4, 5 – generator and receiver of electrical impulses, respectively; 6 – device I1-8; 7 – electronic block of signal processing; 8 – graphite inclusions

The object of research were the samples of cast irons produced at Minsk Automobile and Tractor Plants, belonging to gray cast iron grades (C410-C425), high-strength (B450), ductile (KB435), having ferrite and pearlite phases in the base. Primary information about the structure and their physical and mechanical properties, including tensile strength, hardness, etc., was obtained on the submitted samples.

At the preliminary stage of the work, a set of studies was carried out to select the optimal design of the device containing two prismatic UP, with characteristic prism angles $(4^0 < \{\gamma, \beta\} < 10^0)$ and operating frequency f = 1.8-10 MHz. At the same time, the distance between the emitting and receiving trans-

ducer of the ultrasonic device was varied in the range l = 0-2 mm, and the angle $\beta = \gamma$. In view of the small angles of the UP prism, it is fair to estimate the input angle of the longitudinal ultrasonic wave into the steel according to (1):

$$\alpha = \arcsin[(C_1/C_2)\sin\beta \approx \beta C_1/C_2, \qquad (2)$$

where C_1 is the ultrasonic sounding velocity in the UP sounding prism; C_2 – in cast iron, which, as will be shown below, increases with increasing number of gray cast iron grade (from CU10) to high-strength (BU50). increases with increasing strength of samples up to 30 %. As follows from (3), in this case, the angle of entry of the ultrasonic coil into the metal should decrease by almost the same amount).

Installation for research (Figure 1) contains a generator of pulse signals with bell-shaped envelope fed to the radiating probe of the device, which excites in the sample elastic oscillations, part of the energy flow of which spreads along the interface surface of the working surface of the UP, cast iron wetted with contact fluid. The other part is scattered on graphite inclusions (predominantly) and metal grains, forming the so-called field of ultrasonic vibrations scattering on material inhomogeneities or "structural noise" caused mainly by graphite inclusions. Then the signal is received by the receiving probe amplified and gets simultaneously to the electronic signal processing unit and to the computer screen. With the help of a special program, the processing and determination of the amplitude value of the of the scattering waves or structural noise of the A^N recorded at which there is no superposition of additional parasitic signals and the arrival time of the impulse reflected from the opposing wall $t = t_2$. In this case, the A^N is defined as root mean square value of the amplitude of the ultrasonic wave scattering field measured in the time range $t_2 < t < t_1$, and:

$$A^{N} = \left[\left(\sum_{i=1}^{i_{0}} \left(A_{i}\right)^{2}\right]^{0.5}\right) / i_{0},$$
(3)

where $A_i = A(t_i)$ is the amplitude of the *i*th signal measured at the moment t_i .

Synchronization of electronic units and selection of the working area of the receiving signal processing is performed with the help of the time interval meter W1-8 (Russian). (Its use allows to measure by echo-method the longitudinal wave velocity in cast iron with an acoustic base of 4 cm with an error not worse than 0.3–0.5 %). To increase the reliability of measurements the following is performed. At the beginning, the adjustment of the measuring system

and electronic units is checked on each sample using a special witness sample. And to increase the reliability of the A^N value estimation, it is determined as the average of four readings recorded on the sample surface when the UP shifted by 0.5–1.0 mm relative to the initial position.

Research results and their discussion

As mentioned above, the subject of the present studies are acoustic parameters of surface and subsurface waves backscattered on graphite inclusions, which are compared with our data on ultrasonic velocity, as well as data on physical and mechanical properties, including tensile strength, etc., measured on the equipment of the central tensile tear strength laboratories of Minsk automobile and tractor plants.

The first, or preliminary stage of the work was to identify plant the optimal device design and ultrasonic (piezoelectric) transducer, operating frequency which is expected to be published later. It was found that the best reliability and stability of readings is achieved when the distance between the prisms of UP $l \rightarrow \Delta l$, where Δl is the thickness of the soundinsulating layer separating the emitting and receiving prisms of the ultrasonic probe, the design of which is similar to the separately combined transducer [1]. The best sensitivity of amplitude readings to changes in the structure of cast irons was observed at operating frequencies f = 4-5 MHz.

Moreover, Figure 2 shows characteristic dependences of amplitude-time characteristics A(t) of the field of scattering of the acoustic signal on the graffite inclusions of different shapes, called "structural noise".

Figure 3 illustrates an important result of the work – dependence of the basic characteristic of structural noise A^N (Formula 1) obtained on cast iron samples with different shape of graphite inclusions in the selected time interval Δt_{21} , as well as the velocity of ultrasonic testing from the value of their strength or tensile tear strength σ .

As can be seen from the presented in Figure 2 amplitude-temporal characteristics of structural noise A(t) quite clearly traced their growth with "complication" of the form of graphite inclusions from spherical (samples B450) to lamellar (C415, C425), differing in value σ . This is confirmed more clearly by the data of change in the mean-square amplitudes of A^N structural noise and ultrasonic sounding velocity from the value characterizing the strength of materials (Figure 3). In the first case this difference is of 13–14 dB, and when comparing the obtained

data for samples B450 and KB45 it decreases up to 7-8 dB. As for the ultrasonic velocity, its change is of 20-25 %.



Figure 2 – Characteristic amplitude-time dependences of the structural noise caused by ultrasonic scattering on graphite inclusions in cast irons of B450 (*a*), 4BF35 (*b*), C425 (*c*), C415 (*d*): root mean square value of the amplitude of the ultrasonic waves backscattering field characterizing the structural noise A^N , mV = 2 (*a*), 3,1 (*b*), 8,8 (*c*), 12 (*d*)

On the basis of the data obtained above it should be concluded that it is possible in principle to carry out quite reliably rejection of high-strength cast irons from gray irons of the specified grades, as well as those that are close to them in properties, which is very important for expanding the technical possibilities of diagnosing the structure of cast irons and their properties. It should be noted that it is preferable to use the proposed method in those cases when: - there are difficulties or practically impossible to apply known acoustic methods of probing, including measurement of the ultrasonic velocity, signal spectrum or attenuation coefficient, which is mainly due to the shape and geometry of the controlled object;

- additionally requires probing the structure of the material in certain local zones of the object in the absence of a reference signal created by the reflection of the acoustic pulse from the opposing.



Figure 3 – Experimental dependences of the root mean square value of the amplitude of the ultrasonic waves backscattering field characterizing the structural noise (1) and longitudinal ultrasonic velocity (2) on strength or temporary tensile strength

As for the depth of metal probing *h*, it can be estimated on the basis of data on the above-mentioned characteristic time interval $t_2 < t < t_1$ of the fixed structural noise created by the acoustic pulse at scattering, which arises as a result of signal scattering on grafite inclusions:

 $h \approx 0.5C (t_2 - t_1),$

which reaches 5-10 mm. At the same time, the use of Barkhausen noise [2] for this purpose, even in the best design, gives information about the properties of cast iron to a depth of no more than 0.5-1 mm.

It should be noted that at present the theoretical description of the above processes of ultrasonic scattering on graphite inclusions having a very complex shape and representing an ensemble of spatially distributed chaotically scatterers (reflectors) is the ultrasonic wavelength, is not possible. Analyzing the influence of the shape of graphite inclusions (as well as the area of the metal-graphite boundary S) on the A^N amplitude parameters and the course of the dependence of A(t) on σ , we to the roughness predominantly can state their simultaneous decrease. It is assumed that there is the increase in the area of interaction of the acoustic field with the ensemble of ultrasonic scatterers, as well as its special geometry, that have a significant effect on the mechanism of interaction of elastic oscillations with inhomogeneities of inclusions and on the intensity of structural noise received by the UP transverse dimensions $d_i \ll \lambda$ where λ is the ultrasonic wavelength, is practically impossible.

As it follows from our study the evaluation of cast iron structure by the proposed method depends on the requirements to the reliability of measurements, which mainly depends on the preparation of the contact surface area of the object on the area of $1-1.5 \text{ cm}^2$, including its roughness ($R_z < 5-10 \mu m$). For convenience of operation and constancy of acoustic contact in any spatial position of the ultrasonic device on the object, it is proposed to use compact magnetic nozzles made of rubber.

Conclusion

On the basis of the developed methodology and installation, a complex of studies of structural noise created as a result of ultrasonic waves dissipation on graphite inclusions of different shapes at one-way sounding of grey iron samples (C410, C415, C420, C425), high-strength iron (B450), forging iron (KB435). At the selected optimal operating frequency of 5 MHz the amplitude-time A(t) is obtained, as well as the mean-quadratic dependence of the amplitude of A^N , scharacterizing the structural noise, and longitudinal wave velocity on strength or temporary resistance to rupture at a tensile $\sigma = 120-165$ MPa.

As a result of the research, a significant difference between the parameters of structural noise A^N of the samples to study was revealed. For example, for grey cast iron samples (CU10–CU25), which have predominantly lamellar graphite inclusions, the A^N value is of 13–14 dB or more than that measured in high-strength cast iron BU50 specimens with the prevailing form of spherical graphite inclusions. At the same time, it was found that ultrasonic velocity speed decreasing were to be of 20–25 % respectively. For cast iron samples KBU35, the measured A^N value is of 4–5 dB less than that of the prevailing form of spherical graphite samples of cast irons.

For the first time, a method for rejecting highstrength cast iron grades BY with number 50 and more – from grey cast iron is proposed, consisting in for one-way ultrasound input-reception of metal without the use of an additional support signal reflected from the opposing wall, and determination of the mean quadratic amplitude root mean square value of the amplitude of the ultrasonic waves backscattering field on graphite inclusions in a specified time interval.

References

1. Ermolov IN, Lange YV. Nondestructive testing: handbook: in 8 vol. Vol. 3. Ultrasonic control. 2nd ed., revision. Moscow: Mashinostroenie. 2006. 864 p.

2. Busko VN, Vengrinovich VL, Chepyzhov BA. Non-destructive testing of cast iron products by the Barkhausen effect method. Non-destructive testing and diagnostics. 2010;(4):18-29. (In Russ.).

3. Sandomirsky SG. Peculiarities of links between the magnetic properties of cast irons with their structure and magnetic methods of control of cast iron castings (review). Casting and Metallurgy. 2016;4(85):96-10.

4. Orlowicz W, Tupaj M, Mróz M, Guzik E, Nykiel J, Zając A, Piotrowski B. Ultrasonic Assessment of Shape Index and Number of Graphite Precipitations in Spheroidal Cast Iron Manufactured in the Foundry MET-AL-ODLEW Sp. J., Archives of Foundry Engineering. 2009;9(4):179-182.

5. Baev AR, Mayorov AL, Konovalov GE. Ultrasonic inspection of objects with layered and heterogeneous structure. Science and Innovation. 2015;2(3):14-17.

6. Danilov V N, Voronkova LV. Investigation of possibilities of ultrasonic control of cast iron with lamellar graphite using standard direct transducers. Control. Diagnostics. 2020;1(23):4-12.

7. Baev AR, Asadchaya MV, Mayorov AL, Sergeeva OS, Delenkovskiy NV. Possibilities of using amplitude-angle characteristics of surface and subsurface waves for control of materials with surface hardened inhomogeneous layer. Devices and Methods of Measurements. 2022;13(4):263-275.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-4-263-275

8. Vadim N. Danilov, Liubov V. Voronkova. Attenuation of Ultrasonic Longitudinal Waves in Cast Iron with Flake Graphite on the Characteristics of Pulse Signals. Bulgarian Society for NDT International Journal "NDT Days". 2019;2(3):167-181.

9. Nowacki K. Possibility of Determining Steel Grain Size Using Ultrasonic Waves, Metalurgija. 2009; 48(2):113-115.

10. Baqeri, R., Honarvar, F., Mehdizad, R., Case Depth Profile Measurement of Hardened Components using Ultrasonic Backscattering Metod, 18th World Conference on Nondestructive Testing Proceedings, pp. 16-20. April 2012, Durban, South Africa.

11. Muravyev VV, Muravyeva OV, Dedov AI, Baiteriakov AV. Control of structural state of steels by means of acoustic noise. Devices and methods of measurements. 2014;2(9):62-64. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206

Application of the Hough Transform to Dispersion Control of Overlapping Particles and Their Agglomerates

Pavel V. Gulyaev

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

Received 05.06.2023 Accepted for publication 04.09.2023

Abstract

The dispersion control of micro- and nanoparticles by their images is of great importance for ensuring the specified properties of the particles themselves and materials based on them. The aim of this article was to consider the possibilities of using the Hough transform for dispersion control of overlapping particles and their agglomerates. Analysis of the application of the Hough transform for overlapping particles and their agglomerates showed the following. The particularities of the conventional implementation lead to the preferred registration of large particles, the shift of the centers of overlapping particles, and the distortion of the size values. To use the Hough transform correctly, fine-tuning of all its parameters is required. To automate this process, the dependences of the number and size of particles recorded in the image on the parameters of the Hough transform was investigated. The studies were carried out on test images with a known number and size of particles. The results showed that when the threshold parameters of the Hough transform change, the number of detected particles stabilizes near their optimal values. When the size range of particles detected by the Hough transform changes, the histogram of the particle size distribution changes. In this case, the optimal width of the range is determined by the most stable extremes of the histogram. The maximum center-to-center distance is set at least half of the optimal range. The configuration algorithm is described and implemented. It implies repeatedly running the Hough transform with different combinations of parameters. The algorithm includes stages of coarse and fine-tuning, which allows to getting closer to the optimal parameters. The efficiency of the algorithm has been confirmed on test and real images. Tests have shown that the errors in determining the size and number of particles of the multi-pass Hough transform are on the same level or exceed these indicators for analog methods.

Keywords: scanning probe microscope, SPM image, particles, dispersion control

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гуляев П.В.	Gulyaev P.V.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН,	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian
ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия	Academy of Sciences,
e-mail: lucac@inbox.ru	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia
	e-mail: lucac@inbox.ru
Для цитирования:	For citation:
Pavel V. Gulyaev.	Pavel V. Gulyaev.
Application of the Hough Transform to Dispersion Control	Application of the Hough Transform to Dispersion Control
of Overlapping Particles and Their Agglomerates.	of Overlapping Particles and Their Agglomerates.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 199–206.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 199–206.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206

Применение преобразования Хафа для контроля дисперсности накладывающихся частиц и их агломератов

П.В. Гуляев

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

Поступила 05.06.2023 Принята к печати 04.09.2023

Контроль дисперсности микро- и наночастиц по изображениям имеет большое значение для обеспечения заданных свойств самих частиц и материалов на их основе. Целью данной работы являлось исследование возможностей применения преобразования Хафа для контроля дисперсности накладывающихся частиц и их агломератов. Анализ применения преобразования Хафа для накладывающихся частиц и их агломератов показал следующее. Особенности конвенциональной реализации приводят к предпочтительной регистрации больших частиц, смещению центров перекрывающихся частиц, искажению размеров. Для корректного использования преобразования Хафа требуется точная настройка всех его параметров. Для автоматизации такой настройки исследованы зависимости количества и размера регистрируемых на изображении частиц от параметров преобразования Хафа. Исследования проводились на тестовых изображениях с известным количеством и размерами частиц. Результаты показали, что при изменении пороговых параметров преобразования Хафа число регистрируемых частиц стабилизируется вблизи их оптимальных значений. При изменении диапазона размеров регистрируемых преобразованием Хафа частиц изменяется гистограмма распределения частиц по размерам. При этом оптимальная ширина диапазона определяется по наиболее устойчивым экстремумам гистограммы. Максимальное межцентровое расстояние устанавливается не менее половины оптимального диапазона. Описан и реализован алгоритм настройки, подразумевающий многократный запуск преобразования Хафа с различными комбинациями параметров. Алгоритм включает этапы грубой и точной настройки, позволяющие точнее приблизится к оптимальным параметрам. Работоспособность алгоритма подтверждена на тестовых и реальных изображениях. При этом погрешности определения размеров и количества частиц многопроходового преобразования Хафа находятся на одном уровне или превосходят данные показатели у методов-аналогов.

Ключевые слова: сканирующий зондовый микроскоп, СЗМ-изображение, частицы, контроль дисперсности

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Гуляев П.В.	Gulyaev P.V.
Удмуртский федеральный исследовательский центр УрО РАН, ул. имени Т. Барамзиной, 34, Ижевск 426067, Россия	Udmurt Federal Research Center of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences,
e-mail: lucac@inbox.ru	T. Baramzina str., 34, Izhevsk 426067, Russia e-mail: lucac@inbox.ru
Для цитирования:	For citation:
Pavel V. Gulyaev.	Pavel V. Gulyaev.
Application of the Hough Transform to Dispersion Control	Application of the Hough Transform to Dispersion Control
of Overlapping Particles and Their Agglomerates.	of Overlapping Particles and Their Agglomerates.
Приборы и методы измерений.	Devices and Methods of Measurements.
2023. – T. 14, № 3. – C. 199–206.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 199–206.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-199-206

Introduction

The micro- and nanoparticles dispersion control is important to ensure the specified properties of particles and materials based on them. Traditionally, various types of microscopy associated with obtaining high-resolution images are used to dispersion control. Conventional methods [1] of processing such images imply segmentation, identification of objects and measurement of their sizes. Threshold filtering (binarization [2, 3]) and contour analysis [4]) are the most common segmentation tools. However, the use of these tools reduces the accuracy of determining the size of overlapping particles and particles with varying degrees of brightness. There are more complex segmentation methods, for example, parametric [5], variational [6], neural network [7]. These methods have significant limitations in application (complexity of implementation, high demands on computing resources) and are not always available in open libraries such as OpenCV.

The disadvantage of conventional image processing procedures is the necessity of manual parameter settings. At the same time, for automation of dispersion control, it is advisable to use methods with automatic parameters setting [8]. In addition, as shown in [9], conventional methods for segmentation of overlapping and touching particles do not always determine their real contours. In this case, structural methods that can take into account the hidden part of the particle contour are more effective. Such methods include surface curvature detectors [10] and geometric shape detectors based on the Hough transform. Unlike curvature detectors, the Hough transform has found much wider application in commercial [11] and free software [12]. The aim of this article was to consider the possibilities of using the Hough transform for particle dispersion control.

Problem definition

The scheme for calculating the distribution of illuThe simplest case [13] of particle dispersion monitoring implies manual parameters adjustment and manual results filtering, more complex – the use of additional add-ons, such as neural networks [14], filters [15]. However, this approach reduces the availability of the resulting software. The main task of this work is to develop an algorithm for automatically adjusting the parameters of the Hough transform without modifying the conventional implementation of the transform. This implementation generally includes the following procedure. 1. To find the boundaries of objects in the image, contours are allocated using the Canny method.

2. The brightness gradient for the boundary points is calculated.

3. Rays perpendicular to the tangent to the boundary points and directed along the brightness gradient are plotted.

4. Candidate centers of circles are localized. These include the image pixels through which the largest number of rays have passed.

5. The dimensions of the circles are determined. Non-zero points are located around the candidate centers at a distance taking values from the minimum to the maximum allowable radius. The final radius of the circle is defined by the largest number of boundary points removed from the candidate center by the value of this radius.

The conventional implementation of the Hough transform in conditions of superposition of particles with a large size range, as well as in the presence of noise, may have the following disadvantages.

1. Incorrect localization of particle centers caused by in local gradient calculating errors (especially on small, low-contrast particles).

2. Inaccurate determination of the particle size in agglomerates caused by the fact that only one circle is assigned to each candidate center.

3. There is a preferred registration of large circles (pseudo-circles, fragments of circles), since for them the threshold of correspondence (coincidence) to the candidate center turns out to be greater than for small circles.

These disadvantages are partially eliminated by manually adjusting the parameters of the Hough transform. However, to do this, it is necessary to change up to five parameters at the same time, and this increases the processing time and the risks of human influence on the results. At the same time, there are examples of particle size control algorithms that do not require manual adjustment. These include neural networks, for example, ParticlesNN [16], and the ELSD method (ellipse and line segment detector, a detector of line segments and ovals) [8]. The results of segmentation of images of overlapping particles (Figure 1a) using these methods are presented in Figure 1b,c and in Tables 1, 2. Four types of test images were used for evaluation: type 1 - a set of densely packed particles of the same size; type 2 – particles of three standard sizes with a low density of placement; type 3 – particles of three standard sizes with high density of placement; type 4 - particles of two standard sizes with a high density of placement.

Приборы и методы измерений 2023. – Т. 14, № 3. – С. 199–206 P.V. Gulyaev Devices and Methods of Measurements 2023, vol. 14, no. 3, pp. 199–206 P.V. Gulyaev



а

Type 1

Type 2

Type 3

Type 4







d **Figure 1** – Particles detection in the source images (*a*) using a neural network (*b*), the ELSD method (*c*) and the multi-

The 256×256 test images were formed from a background relief F[x,y], simulating the non-ideality of the scanner, and a particle image Q[x,y] with radius R_0 and coordinates (x_0, y_0, z_0) :

pass Hough transform (d)

$$F[x,y] \approx 255 - 2R_0 + + (R_0 / (2\sin(0,5x\pi/128)) + R_0 / (2\cos(0,5y\pi/128)));$$

$$\forall x, y: (x-x_0)^2 + (y-y_0)^2 < R_0^2;$$

$$Q[x, y] = z_0 + 2\sqrt{R_0^2 - (x-x_0)^2 - (y-y_0)^2}.$$

As Figure 1 shows, even the most modern means of dispersion control require some refinement:

neural networks – additional training; the ELSD method – filtering of neighboring results. This gives reason to consider that the development of algorithms for automatic adjustment of the Hough transform parameters may be of great practical importance due to the wide use of this transformation.

The conventional implementation of the Hough transform, presented in the OpenCV library, involves setting five parameters: the center-to-center distance, the minimum R_{\min} and maximum R_{\max} radii of particles, the Canny threshold p_1 and the Hougt accumulator threshold p_2 . The value of p_1 determines the sensitivity of the Canny detector (the higher the value of p_1 , the lower the sensitivity). The value of p_2 determines the sensitivity of the Hough transform (the lower the value of p_2 , the more circles are registered). Studies have shown that the graphs of the dependence of the number N of registered circles on the values of p_1, p_2 have stabilization zones outlined with a dashed line in Figure 2, which was obtained during image processing type 3 Figure 1a. These zones correspond to the optimal values of p_1, p_2 .



Figure 2 – Examples of graphs of the dependence of the number of detected particles (image type 4 in Figure 1*a*): a – from the Canny threshold; b – from the Hough threshold

Determining the size range and center-to-center distance

The range of the detected particles sizes (minimum R_{min} and maximum R_{max} sizes) significantly affects the results of the dispersion control. Too large a range of sizes in the presence of agglomerates and overlapping particles leads to the registration of pseudo-circles near the maximum values of the range. In this case, you can use the analysis of the histogram of the particle size distribution in pixels of the image (*px*). In particular, when changing the range in the histogram, those peaks (marked with arrows in Figure 3) that correspond to real particles will be stable.





Figure 3 – Histograms of particle size distribution for the image type 3: a – range 0–20; b – range 0–30; c – range 0–50; d – range 0–70

After specifying the size range of the recorded circles, the minimum center-to-center distance is set at a level that is at least half of the width of the range.

Parameters setting algorithm

Based on the studies described above, the algorithm for setting the parameters of the Hough transform (multi-pass Hough transform) can be formulated as follows.

Step 1. The p_1 value is adjusted. The image is processed with different p_1 values in the range from 1 to 300 in increments (50), with a minimum value of $p_2 = 1$. The stabilization zone is determined auto-

Relative error ε_N of determining the number of particles

matically based on the minimum change in the number of particles N with a change in p_1 (minimum of the first derivative). If there are several stabilization zones, p_1 is determined according to the minimum extremum of the number of particles (circles).

Step 2. Coarse adjustment of p_2 is carried out. The image is processed with different p_2 values in the range from 1 to 100 in increments (10). The range of the p_2 value is set in accordance with the stabilization zone (zone of minimal change) of the particles number.

Step 3. A histogram of the particle size distribution is formed. The range of particle sizes and the center-to-center distance is determined.

Step 4. Fine-tuning of p_2 is performed within the previously set range. The value of p_2 is increased with a small step (1) to stabilize the number of particles (clusters).

The results of comparing the multi-pass Hough transform with analogous methods are presented in tables 1, 2 (the results are obtained on test images presented in Figure 1*a*). The value of ε_N in Table 1 was defined as the relative deviation of the number of detected particles N from the true value of N_0 :

$$\varepsilon_N = |N - N_0| / N_0$$

The value of ε_R in Table 2 was defined as the relative deviation of the average measurement value \overline{R} from the true value of the radius \overline{R}_0 :

$$\varepsilon_R = \left| \overline{R} - \overline{R}_0 \right| / \overline{R_0}.$$

Table 1

Table 2

Particle size deter-	Image (Figure 1 <i>a</i>)			
mination method	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4
ParticlesNN	0.477	0.266	0.120	0.200
ELSD	0.136	0.200	0.060	0.127
Multi-pass Hough transform	0.022	0	0.020	0.018

Relative error ε_R of the particle radius determination

Particle size deter- mination method		Image (Figure 1 <i>a</i>)			
	Type 1	Type 2	Type 3	Type 4	
ParticlesNN	0.037	0.061	0.526	0.489	
ELSD	0.043	0.058	0.036	0.007	
Multi-pass Hough transform	0.022	0.037	0.031	0.015	

Tables 1, 2 show that the accuracy indicators ε_N , ε_R of the multi-pass Hough transform on the test images are on the same level or exceed these indicators for analog methods.

For real images (Figures 4, 5), the stabilization zones available on the dependence graphs $N(p_1)$, $N(p_2)$ may be relatively narrow and not obvious.



Figure 4 – Relative stabilization of the number of silver nanoparticles (*a*) and results of particles detection in the image (*b*). Image from the NT-MDT Spectrum Instruments website: https://www.ntmdt-si.com/resources/scan-gallery



Figure 5 – Zones of relative stabilization of the number of erythritol particles when the parameter p_2 is changed (*a*) and results of particle separation in the image (*b*). Image from the NT-MDT Spectrum Instruments website: https://www.ntmdt-si.com/resources/scan-gallery

Therefore, it is advisable to accompany the adjustment of these parameters by monitoring the absolute and relative values of the particles number. In particular, in Figure 4*a*, the relative stabilization zone is located in the range $p_2 = 38-40$ and is characterized by a minimal change in the particles number. At the same time, an estimation of the target range of the absolute value of the particles number can be obtained using the minimum R_{min} and maximum R_{max} values from the histogram, as well as the image sizes $S \times S$ in pixels:

$$N_{\min} = (S/R_{\min})^2$$
; $N_{\max} = (S/R_{\max})^2$.

Figure 5*a* shows three stabilization zones, from which the first zone was automatically selected, focusing on the minimum deviation from the permissible number of particles $N_{\min} = 164$. The corresponding result is shown in Figure 5*b*.

Conclusion

The performed studies allowed to obtain the following results. When changing the threshold parameters of the Hough transform, zones of detected particles number stabilization are observed, which determine the optimal values of the transformation parameters. At the same time, the histograms of the particle size distribution show distinct peaks corresponding to the marginal sizes of the detected particles and determining the range and minimum center-to-center distance of the Hough transform. Based on the results obtained, an algorithm has been developed for automatically adjusting the parameters of the Hough transform.

References

1. ISO 13322-1:2014. Particle size analysis – Image analysis methods. Part 1: Static image analysis methods. 2^{nd} ed.; Publisher: International Organization for standardization, Switzerland, 2014.

2. Chaki N, Shaikh SH, Saeed K. A Comprehensive Survey on Image Binarization Techniques. Exploring Image Binarization Techniques. Studies in Computational Intelligence. Springer, New Delhi. 2014;560:5-15.

DOI: 10.1007/978-81-322-1907-1_2

3. Sezgin BS. A survey over image thresholding techniques and quantitative performance evaluation. Journal of Electronic Imaging. 2004;13(1):146-165.

DOI: 10.1117/1.1631315

4. Ramadevi Y, Sridevi T, Poornima B, Kalyani B. Segmentation and Object Recognition Using Edge Detection Techniques. International Journal of Computer Science and Information Technology. 2010;2:153-161.

DOI: 10.5121/IJCSIT.2010.2614

5. Navon E, Miller O, Averbuch A. Color image segmentation based on adaptive local thresholds. *I*mage and Vision Computing. 2005;23(1):69-85.

DOI: 10.1016/j.imavis.2004.05.011

6. Bui K, Fauman J, Kes D, et. al. Segmentation of scanning tunneling microscopy images using variational methods and empirical wavelets. Pattern Analysis and Applications. 2020;23:625-651.

DOI: 10.1007/s10044-019-00824-0

7. Ronneberger O, Fischer Ph, Brox T. U-Net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. Medical Image Computing and Computer-Assisted Intervention – MICCAI 2015. Lecture Notes in Computer Science. Springer, Cham. 2015;9351:234-241.

DOI: 10.1007/978-3-319-24574-4_28

8. Pătrăucean V, Gurdjos P, von Gioi RG. A Parameterless Line Segment and Elliptical Arc Detector with Enhanced Ellipse Fitting. Computer Vision – ECCV 2012. Lecture Notes in Computer Science, Springer, Berlin. 2012:7573:572-585.

DOI: 10.1007/978-3-642-33709-3_41

9. Gulyaev PV. Measurement of the length of objects on scanning probe microscope images using curvature detectors. Measurement Techniques. 2021;64(1):21-27. **DOI:** 10.1007/s11018-021-01890-9

10. Gulyaev PV, Shelkovnikov EYu, Tyurikov AV. Peculiarities of surface curvature detectors usage for nanoparticles size analysis. Chemical Physics and Mesoscopy. 2013;15(1):138-143. (In Russ.).

11. MountainsSPIP. [Electronic Resource]. Available at: https://www.digitalsurf.com/software-solutions/ scanning-probe-microscopy/ [Accessed 07.05.2023].

12. OpenCV. [Electronic Resource]. Available at: https://opencv.org/ [Accessed 07.05.2023].

13. Zhelebovskiy AA, Sumin AA, Dmitrichenkov NV. Application of the Hough algorithm for sorting polydisperse microparticles. Proceedings of XVI International Scientific and Technical Conference, June 28–July 02, 2021. Moscow: Publishing House "Pero". 2021;80-85: 260 p.

14. Lebedev SA, Ososkov GA. Fast algorithms for ring recognition and electron identification in the CBM RICH detector. Physics of particles and nuclei letters. 2009;6(2):161-176.

DOI: 10.1134/S1547477109020095

15. Atherton TJ, Kerbyson DJ. Size invariant circle detection. Image and Vision Computing. 1999;17(11): 795-803. **DOI:** 10.1016/S0262-8856(98)00160-7

16. Okunev AG, Mashukov MY, Nartova AV, Matveev AV. Nanoparticle Recognition on Scanning Probe Microscopy Images Using Computer Vision and Deep Learning. Nanomaterials. 2020;10(7)(1285). **DOI:** 10.3390/nano10071285 DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

Использование многозондового модулированного лазерного излучения для идентификации сгустков веществ в потоке жидкости

В.А. Алексеев¹, С.И. Юран², В.П. Усольцев¹, Д.Н. Шульмин¹

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 15.08.2023 Принята к печати 19.09.2023

Современные средства контроля систем обеспечения водой на предприятиях или в жилищной сфере используют лазерные системы зондирования жидкости. При этом, как правило, используются лабораторные анализы полученных проб жидкости, а также спектральные методы анализа при сканировании жидкости излучением разных длин волн. Эти подходы не позволяют проводить анализ в реальном масштабе времени движущегося потока жидкости (поточный анализ). В работе рассмотрен вариант построения системы обнаружения и идентификации аварийных сгустков загрязняющих веществ в потоке жидкости с использованием лазерного излучения в реальном масштабе времени. Приведены основные принципы построения системы, блок-схема структуры системы и параметры идентификации сгустков исследуемых веществ, протекающих в трубопроводах системы канализации или водоочистки на промышленных предприятиях. При построении системы используется несколько длин волн лазерного излучения, одновременно направленных в одну исследуемую точку сгустка исследуемого потока жидкости. Длины волн излучения определяются на стадии подготовки к исследованию. На этой начальной стадии процесса анализируются оптические спектры пропускания веществ, которые априори возможны в исследуемом потоке жидкости. Основной критерий выбора длин волн – различие оптических спектров пропускания веществ на выбранных длинах волн. Для возможности технического разделения сигналов на различных длинах волн зондирующего излучения производится модуляция потоков излучений. Создание эталонов идентификации веществ в сгустках потока жидкости производится в форме решетчатых функций, содержащих составляющие оптического спектра пропускания вещества на определенных длинах волн лазерного излучения. Модуляцию излучения предлагается проводить путём управления накачкой каждого из излучателей системы. Предлагаемая система найдет применение в нефтегазовой, перерабатывающей промышленности, в системах фильтрации и очистки водоснабжения, промышленных предприятиях и предприятиях переработки сельскохозяйственной продукции.

Ключевые слова: лазерное зондирование, модуляция лазерного излучения, анализ спектров веществ

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Юран С.И.	Yuran S.I.
Удмуртский государственный аграрный университет,	Udmurt State Agrarian University,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,	Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru	e-mail: yuran-49@yandex.ru
Для цитирования:	For citation:
В.А. Алексеев, С.И. Юран, В.П. Усольцев, Д.Н. Шульмин.	V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin.
Использование многозондового модулированного лазерного	The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation
излучения для идентификации сгустков веществ в потоке	for the Identification of Clots of Substances in the Fluid Flow].
жидкости.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 207-213 (in Russian).
2023. – T. 14, № 3. – C. 207–213.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213	

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213

The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation for the Identification of Substances' Clots in the Fluid Flow

V.A. Alekseev¹, S.I. Yuran², V.P. Usoltsev¹, D.N. Shulmin¹

 ¹Kalashnikov Izhevsk State Technical University, Studencheskaya str., 7, Izhevsk 426069, Russia
 ²Udmurt State Agrarian University, Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia

Received 15.08.2023 Accepted for publication 19.09.2023

Abstract

Modern tools of water supply systems monitoring at enterprises or in the housing sector use laser liquid sensing systems. In this case, as a rule, laboratory analyses of the obtained liquid samples are used, as well as spectral analysis methods when scanning the liquid with light for different wavelengths. These approaches do not allow for real-time analysis of a moving fluid flow (flow analysis). The paper considers a version for constructing of a system for online detecting and identifying emergency clots of pollutants in a liquid stream using laser radiation. The basic principles of the system construction, the block diagram of the system structure and parameters for identification of clots of substances under study flowing in the pipelines of the sewage or water treatment system at industrial enterprises are given. When constructing the system, several wavelengths of laser radiation are used, simultaneously directed to the one point of the studied clot of the studied fluid flow. Light wavelengths are determined at the stage of preparation for the study. At this initial stage of the process, optical transmission spectra of substances that are a priori possible in the studied fluid flow are analyzed. The main criterion for wavelengths choose is difference in substances optical transmission spectra at the se selected wavelengths. For the possibility of technical separation of signals at different wavelengths of the emitting radiation, the radiation fluxes are modulated. Creation of standards for identification substances in fluid flow clusters is carried out in the form of lattice functions containing the components of the substance optical transmission spectrum at certain wavelengths of laser radiation. Modulation of radiation is proposed to be carried out by controlling the pumping of each emitters of the system. The proposed system will find application in the oil and gas, processing industry, water filtration and purification systems, industrial enterprises and agricultural processing enterprises.

Keywords: laser probing, laser radiation modulation, substance spectrum analysis

Адрес для переписки:	Address for correspondence:
Юран С.И.	Yuran S.I.
Удмуртский государственный аграрный университет,	Udmurt State Agrarian University,
ул. Студенческая, 11, г. Ижевск 426069, Россия,	Studencheskaya str., 11, Izhevsk 426069, Russia
e-mail: yuran-49@yandex.ru	e-mail: yuran-49@yandex.ru
Для цитирования:	For citation:
В.А. Алексеев, С.И. Юран, В.П. Усольцев, Д.Н. Шульмин.	V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin.
Использование многозондового модулированного лазерного	[The Use of Multi-Probe Modulated Laser Radiation
излучения для идентификации сгустков веществ в потоке	for the Identification of Clots of Substances in the Fluid Flow].
жидкости.	Devices and Methods of Measurements.
Приборы и методы измерений.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 207-213 (in Russian).
2023. – T. 14, № 3. – C. 207–213.	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-207-213	

Введение

В ряде задач обнаружения сгустков веществ в потоке жидкости используются лазерные методы идентификации веществ. Одним из направлений построения систем обнаружения и идентификации сгустков каких-либо веществ является зондирование жидкости лазерным лучом с различными длинами волн излучения. при подобном Получаемый зондировании оптический спектр пропускания исследуемых веществ позволяет идентифицировать вещество, а, следовательно, и обнаружить это вещество в потоке жидкости [1-3]. В дальнейшем в статье рассматриваются оптические спектры пропускания различных веществ.

Но существует ряд технических проблем, которые ограничивают применение известных технологий лазерного зондирования исследуемых сред.

Во-первых, зондирование производится множеством лазерных лучей с различными длинами волн, соответствующих оптическому спектру обнаруживаемых веществ. При этом последовательное зондирование лучами с различными длинами волн излучения исключает возможность обнаружения веществ в реальном масштабе времени. Параллельное зондирование лучами с разными длинами волн излучения приводит к сложным схемам реализации систем и усложнению конструкции аппаратуры.

Во-вторых, существует еще проблема, связанная с необходимостью зондирования потока жидкости лазерными лучами в одной точке сгустка вещества [4–7]. Это особенно важно при высокой скорости движения потока жидкости, а также при небольших размерах регистрируемого вещества, сравнимого с размерами апертуры оптоэлектронных пар – «излучатель-фотоприёмник» [8, 9].

Авторами были проведены исследования методов обнаружения и фиксации аварийных сгустков различных сбросов реальном В масштабе времени. Были предложены различные подходы к определению некоторых видов сгустков за счёт анализа оптической плотности сред на выбранных априорно длинах волн лазерного излучения. При этом анализировались оптические спектры предполагаемых сбросов с выделением таких признаков формы спектра сигнала как экстремумы, чередование впадин и возвышенностей формы кривой.

Дальнейшее развитие методов заключалось использовании нескольких выбранных в длин волн излучения в характерных точках оптического спектра исследуемого вещества. Был предложен математический аппарат с использованием относительного описания спектров сигналов, который позволил создавать эталоны идентифицируемых веществ в виде относительного описания. Было предложено использовать вероятностную модель для описания регистрируемых параметров сгустков в виде оптической плотности исследуемой среды. Рассматривались различные вещества при аварийных сбросах: растительное масло, нефть, антибиотики, микрочастицы пластика и др.

Оставалась нерешённой проблема фиксации оптического спектра сгустка в одной точке среды параллельно на нескольких априори выбранных длинах волн, что и рассматривается в настоящей публикации.

В работе рассмотрен один из возможных вариантов реализации системы идентификации сгустков веществ в потоке жидкости в реальном масштабе времени [10].

Основные принципы построения системы

Подготовка к организации процесса зондирования среды в виде потока жидкости

Условием является поиск веществ из априори известного списка, заданного оператором. По указанным в списке веществам составляется перечень оптических спектров веществ. Производится анализ оптического спектра веществ на отличия по отдельным спектральным составляющим. Далее составляется обобщенный список длин волн *L* из оптического спектра каждого из веществ, по которому возможно идентифицировать вещество:

$$L = \{L_1, L_2, L_3, \dots L_{i1}, L_{i2}, \dots L_{ik}, \dots L_n\};$$

$$L_i = \{L_{i1}, L_{i2}, L_{i3}, \dots L_{ik}\},$$

где *i* – номер вещества, *i* = 1, 2, ... *m* (*m* – количество веществ); k_i – индекс спектральной составляющей ($k = 1, ..., k_i$); *n* – длина списка длин волн, которая равна $n = \sum_{i=1}^{m} k_i$, где k_i равно количеству выбранных длин волн для вещества *i*, когда длины волн различных веществ не повторяются.

Опыт показывает, что для каждого вещества будет отобрано не более 3–5 длин волн. Необходимо учитывать, что количество веществ, которые рассматриваются как потенциальные сбросы в систему очистки предприятия не превышает 3–5 веществ.

Создание эталонов для каждого из анализируемых сгустков веществ

Предполагаются три возможных варианта построения эталонов:

 в виде решетчатой функции с полученными значениями амплитуд составляющих для выбранных длин волн для каждого из веществ;

 в виде соотношений между амплитудами составляющих решетчатой функции для каждого вещества, которые могут быть приведены к бинарной форме представления;

 в виде бинарной решетчатой функции, полученной при сравнении амплитуд решетчатой функции с определенным уровнем порога для каждого из веществ.

Рассмотрим последний из перечисленных вариантов.

Эталоны на каждое вещество содержат значения амплитуд S составляющих оптического спектра по всем длинам волн списка L (рисунок 1). Вводится порог определения значений оптического спектра веществ (ΔS), что позволяет составить эталоны в виде бинарной решетчатой функции S¹ со значениями (0,1). Пример получения эталона в виде бинарной решетчатой функции приведён на рисунке 1.



Рисунок 1 – Представление решетчатой функции: *а* – исходная решетчатая функция; *b* – бинарная решетчатая функция

Figure 1 – Representation of a lattice function: a – the original lattice function; b – the binary lattice function

Превышение составляющей оптического спектра S_i порога ΔS приводит к значению эталона равному 1; если же значение составляющей оптического спектра ниже порога ΔS , то значение эталона приравнивается 0.

Сведение излучений разных длин волн к одной точке зондирования сгустка в потоке жидкости

Эта задача может решаться с помощью установки излучателей в одной плоскости сечения трубы по окружности трубы или излучатели собираются в один световодный канал с направлением на условную точку исследования потока жидкости зондирующим лазерным излучением.

При этом во втором случае потоки излучения с разными длинами волн смешиваются. Следовательно, необходимо в дальнейшем разделение потоков после фиксации их фотоприёмником. Это возможно при цифровой обработке сигнала с использованием быстрого преобразования Фурье.

Другой подход – модуляция потоков сигналов на определённых частотах, а после получения общего сигнала его демодуляция по известным частотам модуляции. При реализации используется прямая модуляция с частотным диапазоном не выше 1 ГГц для обеспечения линейного процесса модуляции. Для большинства динамических процессов, происходящих в жидкой среде с образованием сгустков, частоты переходных процессов движения сгустков находятся ниже частоты модуляции. При этом количество частот модуляции равно количеству выбранных длин волн для всех веществ.

Структура системы обнаружения и идентификации сгустков веществ в потоке жидкости

Система содержит (рисунок 2) *п* лазерных излучателей 1-1, ..., 1-*n*, например, лазерных диодов, количество которых определено на стадии подготовки к зондированию. Опыт построения данных систем показывает, что количество излучателей не превышает одного десятка при идентификации 1–5 веществ в потоке жидкости.



Рисунок 2 – Структура системы: 1-1, 1-2, 1-3, ..., 1-*i*, ..., 1-*n* – лазерные излучатели; 2-1, 2-2, 2-3, ..., 2-*i*, ..., 2-*n* – модуляторы излучения; 3-1, 3-2, 3-3, ..., 3-*i*, ..., 3-*n* – оптоволоконный канал; 4 – блок суммирования потоков излучений; 5 – оптический блок формирования узконаправленного потока излучения; 6 – канал движения водной среды; 7 – сгусток загрязняющего вещества; 8 – фотоприёмник; 9 – усилитель сигнала; 10-1, 10-2, 10-3, ..., 10-*i*, ..., 10-*n* – демодуляторы сигнала; 11 – блок опознавания вещества

Figure 2 – The structure of the system: 1-1, 1-2, 1-3, ..., 1-*i*, ... 1-*n* – laser emitters; 2-1, 2-2, 2-3, ..., 2-*i*, ..., 2-*n* – radiation modulators; 3-1, 3-2, 3-3, ..., 3-*i*, ..., 3-*n* – fiber optic channel; 4 – the radiation flux summation unit; 5 – optical unit for the formation of a narrowly directed radiation flux; 6 – the channel of movement of the aquatic environment; 7 – a clot of a polluting substance; 8 – photodetector; 9 – signal amplifier; 10-1, 10-2, 10-3, ..., 10-*i*, ..., 10-*n* – signal demodulators; 11 – substance identification unit

Излучение от каждого излучателя модулируется с частотой f_n в модуляторе излучения 2-1, ..., 2-*n* и подаётся по оптоволоконному каналу 3-1, ..., 3-*n* в блок 4 суммирования потоков излучений [11]. С блока суммиропотоков лазерное излучение через вания оптический блок формирования узконаправленного потока излучения 5 направпоток жидкости, распространяюляется в щийся по каналу движения водной среды 6, котором возможно появление сгустка В загрязняющего вещества 7.

Составляющие отражённого и рассеянного оптических излучений поступают в фотоприёмник 8, который формирует электрический сигнал, который, пройдя через усилитель сигнала 9, направляется в *n* демодуляторов сигнала 10-1, ..., 10-*n*.

На выходе демодуляторов получается сигнал в виде решетчатой функции, каждая из составляющих которой показывает значение амплитуды для одного из излучателей с длиной волны излучения *L*.

Полученная решетчатая функция в виде параллельного кода направляется в блок опознавания вещества 11, где происходит сравнение полученной решетчатой функции с каждым из эталонов анализируемых веществ, содержащих значения амплитуд составляющих оптического спектра по всем длинам волн списка *L*.

Блок эталонов содержит *т* эталонов веществ в виде решетчатых функций или бинарных решетчатых функций. Получение бинарных решетчатых функций производится в блоке опознавания путём специальной цифровой обработки поступающих данных в виде решетчатой функции.

В блоке опознавания происходит преобразование полученной решетчатой функции к бинарным решетчатым функциям двух видов.

В первом случае, происходит сравнение амплитуд составляющих решетчатой функции с некоторым порогом, который определяется на стадии предварительной подготовки эталонов и зависит от шумов, возможных наводок и засветок.

Во втором случае, происходит построение бинарной решетчатой функции путём сравнения амплитуд составляющих решетчатой функции *S_i* по правилу:

$$\begin{cases} S_i > S_j \rightarrow 1 \\ S_i \leq S_j \rightarrow 0 \end{cases} ,$$

где i – номер составляющей решетчатой функции; i, j = 1, ..., n, где n – количество составляющих решетчатой функции. Полученное представление решетчатой функции обладает инвариантностью к сжатию, растяжению амплитуд составляющих решетчатой функции. Это важно, поскольку проводимые измерения происходят в условиях шумов и помех. Поэтому существует разброс получаемых значений в определённом диапазоне, который можно описать трубкой погрешности на составляющих решетчатой функции.

Таким образом, реализуется построение эталонов в виде бинарной решетчатой функции.

Заключение

Применение модуляции многозондового лазерного излучения позволило решить следующие задачи при обнаружении и идентификации вредных веществ в различных задачах науки и техники:

 – обнаружение и идентификация сгустка вещества в реальном масштабе времени;

 возможность одновременного многозондового воздействия лазерного излучения на одну точку сгустка в жидкости при фиксации сгустка вещества;

 – обеспечение защиты зондирующего излучения от внешних помех и засветок.

При этом предварительно анализируются оптические спектры исследуемых веществ и строятся эталоны для идентификации при выбранных длинах волн лазерного излучения. Для большинства задач количество длин волн не превышает десяти.

Удобно использовать для опознавания оптических спектров веществ представление в виде решетчатых функций в бинарном отношении наличия составляющих спектра. Модуляция лазерного излучения может путём проводиться управления накачкой лазера или с использованием специальных модуляторов луча на электрооптических или магнитооптических световых затворах.

Существует определённый класс задач, в которых необходима идентификация вещества в реальном масштабе времени. К ним можно отнести:

 – обнаружение вредных веществ, которые попадают в систему питьевого водоснабжения;

обнаружение отдельных, заранее известных веществ, в системах сточных вод
 в случае аварийных ситуаций на промышленных предприятиях;

 – обнаружение вредных загрязнителей при производстве пищевых продуктов, в процессе переработки сельхозпродуктов;

– обнаружение вредных сбросов на химически опасных производствах, на складах хранения химических реактивов;

 – обнаружение утечек нефти и нефтепродуктов на добывающих и перерабатывающих нефть предприятиях;

 обнаружение утечек различных веществ при транспортировке по морскому, воздушному и железнодорожному путям;

 – контроль технологических процессов, где используется несколько различных веществ и др.

В большинстве подобных задач могут быть использованы лазерные системы идентификации веществ. Предложенный выше вариант построения лазерной системы решает задачу идентификации веществ в реальном масштабе времени.

Список использованных источников

1. Журавель В.И. Об идентификации источников нефтяных загрязнений / В.И. Журавель, В.Р. Маричев // Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. Section 10. Technical Sciences. – 2015. – № 9-10. – С. 65–68.

2. Бочаров В.Н. Исследование многомерных абсорбционных аналитических сигналов бензинов в среднем ИК-диапазоне / В.Н. Бочаров [и др.] // Журнал аналитической химии. – 2019. – Т. 74. – № 5. – С. 356–364. **DOI:** 10.1134/S1061934819020047

3. *Alekseev V.A.* System Eliminating Emergency Discharges in Industrial Facilities Waste Waters Using Relative Signal Description / V.A. Alekseev, S.I. Yuran, V.P. Usoltsev, D.N. Shulmin // Devices and Methods of Measurements, 2022, vol. 13, no. 2, pp. 105–111. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2022-13-2-105-111

4. Кигель А.А. Поточный анализ и контроль ТП: Методы анализа, преимущества и специфика применения / А.А. Кигель, Д.А. Чернокозинский, И.И. Зильберман // Автоматизация в промышленности. – 2016. – № 2. – С. 42–46.

5. Кигель А.А. Контроль содержания нефтепродуктов в системах оборотного водоснабжения / А.А. Кигель, Д.А. Чернокозинский // Автоматизация в промышленности. – 2014. – № 5. – С. 30–33.

6. *Gu Z*. Application of Raman spectroscopy for the detection of acetone dissolved in transformer oil / Z. Gu, W. Chen, L. Du [et al.] // Journal of Applied Spectroscopy, 2018, vol. 85, no. 2, pp. 205–211. **DOI:** 10.1007/s10812-018-0636-2

7. Сорокин Ф.Г. Использование фотометрической технологии в процессе поточного анализа качества нефтепродуктов / Ф.Г. Сорокин // Автоматизация в промышленности. – 2013. – № 10. – С. 19–21.

8. *Feng J.* Method of correlation coefficient optimization used in UV-VIS spectrophotometric analysis for effluent in catalytic ozonation / J. Feng, H. Chen, X. Zhang // Journal of Applied Spectroscopy, 2018, vol. 85, no. 4, pp. 683–693. **DOI:** 10.1007/s10812-018-0716-3

9. *Корсаков В.С.* Инфракрасная on-line спектроскопия для анализа водных растворов / В.С. Корсаков, Д.Я. Гулько, М.С. Корсаков, Л.В. Жукова // Бутлеровские сообщения. – 2016. – Т. 48. – № 12. – С 115–120.

10. Патент 2792152 РФ, МПК G01N 21/31. Устройство контроля аварийных сбросов / С.И. Юран, В.А. Алексеев, В.П. Усольцев // Заявитель Удмуртский ГАУ. Заявка № 2022122806 от 24.08.2022. Опубл. 17.03.2023. Бюл. № 8.

11. Паргачев И.А. Электрооптические модуляторы лазерного излучения на основе высокоомных кристаллов КТіОРО₄ / И.А. Паргачев, Ю.В. Кулешов, В.А. Краковский [и др.] // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники (Доклады ТУСУР). – 2012. – № 2(26). – Ч. 2. – С. 90–93.

References

1. Zhuravel VI, Marichev VR. On identification of sources of oil pollution. Austrian Journal of Technical and Natural Sciences. 2015; 9–10, section 10:65-68. (In Russ.).

2. Bocharov VN, Ganeev AA, Konyushenko IO, Nemets VM, Peganov SA. Study of multidimensional absorption analytical signals of gasolines in the mid-IR region. Journal of Analytical Chemistry. 2019;74(5):356-364. (In Russ.). **DOI:** 10.1134/S1061934819020047

3. Alekseev VA, Yuran SI, Usoltsev VP, Shulmin DN. System Eliminating Emergency Discharges in Industrial Facilities Waste Waters Using Relative Signal Description. Pribory i metody izmereniy = Devices and Methods of Measurements. 2022;13(2):105-111.

DOI: 10.21122/2220-9506-2022-13-2-105-111

4. Kigel AA, Chernokozinsky DA, Zilberman II. Flow analysis and control of TP: Methods of analysis, advantages and specifics of application. Automation in industry. 2016;(2):42-46. (In Russ.).

5. Kigel AA, Chernokozinsky DA. Control of the content of petroleum products in circulating water supply systems. Automation in industry. 2014;(5):30-33. (In Russ.).

6. Gu Z, Chen W, Du L, Shi H, Wan F. Application of Raman spectroscopy for the detection of acetone dissolved in transformer oil. Zhurnal prikladnoj spektroskopii = Journal of Applied Spectroscopy. 2018;85(2): 205-211. **DOI:** 10.1007/s10812-018-0636-2

7. Sorokin FG. The use of photometric technology in the process of in-line analysis of the quality of petroleum products. Automation in industry. 2013;(10):19-21 (In Russ.).

8. Feng J, Chen H, Zhang X. Method of correlation coefficient optimization used in UV-VIS spectrophotometric analysis for effluent in catalytic ozonation. Zhurnal prikladnoj spektroskopii = Journal of Applied Spectroscopy. 2018;85(4):683-693.

DOI: 10.1007/s10812-018-0716-3

9. Korsakov VS, Gulko DYa, Korsakov MS, Zhukova LV. Infrared on-line spectroscopy for the analysis of aqueous solutions. Butlerovskie soobshcheniya = Butlerov Communications. 2016;48(12):115-120. (In Russ.).

10. Yuran SI, Alekseev VA, Usoltsev VP. Emergency discharge monitoring device. Patent RF, no. 2792152, 2023.

11. Pargachev IA, Kuleshov YuV, Krakovsky VA, et al. Electrooptical modulators of laser radiation based on high-resistance $KTiOPO_4$ crystals. Doklady Tomskogo Gosudarstvennogo Universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki (Doklady TUSUR) = Reports of Tomsk State University of Control Systems and Radioelectronics (Reports of TUSUR). 2012;2(26), part 2,90-93. (In Russ.).

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222

Automatic Measurement in Metallography

Anna Anisovich¹, Maria Markevich², Jigmeddorj Vanchinkhuu³

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

 ²Physical-Technical Institute of the National Academy of Sciences of Belarus, Kuprevich str., 10, Minsk 220141, Belarus
 ³National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

Received 20.06.2023 Accepted for publication 19.09.2023

Abstract

Quantitative analysis of the structure of metals and alloys is an important part of modern metal science. To obtain quantitative data and build dependencies, metallographic image processing programs are used, oriented both for scientific research and for use in industry. Programs capable of automatically performing metallographic analysis are of great interest to consumers. When advertising such programs, it is often claimed that they allow quantitative analysis of the structure with virtually no time. The purpose of this work was to determine the time spent on quantitative metallographic analysis in some image processing programs presented on the Belarusian market. Connected and unconnected metallographic objects were considered. It is shown that automatic quantitative analysis is possible for unconnected objects (powders, cast iron graphite). The time required is within a minute. For connected objects (structures of metals and alloys after metallographic etching), the time required to detect objects and obtain digital data is 10–40 min or more, depending on the complexity of the object, which is unacceptable for factory laboratories that analyze a large number of samples per shift. Therefore, it is recommended that potential users of metallographic image processing software always require a substantive demonstration of the automatic measurement capabilities of the proposed software.

Keywords: image processing programs, automatic measurements, grain size

Адрес для переписки: Анисович А.Г. Институт прикладной физики НАН Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь e-mail: anna-anisovich@yandex.ru	Address for correspondence: Anisovich A. Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus e-mail: anna-anisovich@yandex.ru
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Anna Anisovich, Maria Markevich, Jigmeddorj Vanchinkhuu.	Anna Anisovich, Maria Markevich, Jigmeddorj Vanchinkhuu.
Automatic Measurement in Metallography.	Automatic Measurement in Metallography.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements.</i>
2023. – Т. 14, № 3. – С. 214–222.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 214–222.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222

DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222

Автоматические измерения в металлографии

А.Г. Анисович¹, М.И. Маркевич², Ванчинхуу Жигмэддорж³

¹Институт прикладной физики Национальной академии наук Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь ²Физико-технический институт Национальной академии наук Беларуси, ул. Купревича, 10, г. Минск 220141, Беларусь ³Монгольский национальный университет, Улан-Батор, Монголия

Поступила 20.06.2023 Принята к печати 19.09.2023

Количественный анализ структуры металлов и сплавов является важной частью современного металловедения. Для получения количественных данных и построения зависимостей используются металлографические программы обработки изображений, ориентированные как на научные исследования, так и для использования в промышленности. Большой интерес у потребителя вызывают программы, способные автоматически проводить металлографический анализ. При рекламе таких программ зачастую утверждается, что они позволяют провести количественный анализ структуры практически без затрат времени. Целью данной работы являлось определение затрат времени на количественный металлографический анализ в некоторых программах обработки изображений, представленных на белорусском рынке. Рассматривались связанные и несвязанные металлографические объекты. Показано, что для несвязанных объектов (порошки, графит чугуна) возможен автоматический количественный анализ; затраты времени при этом составляют в пределах минуты. Для связанных объектов (структуры металлов и сплавов после металлографического травления) затраты времени на обнаружение объектов и получение цифровых данных составляют 10-40 мин и более в зависимости от сложности объекта, что неприемлемо для заводских лабораторий, которые анализируют большое количество образцов за смену. Поэтому потенциальным потребителям программ обработки металлографических изображений рекомендуется всегда требовать предметной демонстрации возможности автоматических измерений предлагаемого программного обеспечения.

Ключевые слова: программы обработки изображений, автоматические измерения, размер зерна

Адрес для переписки: Анисович А.Г. Институт прикладной физики НАН Беларуси, ул. Академическая, 16, г. Минск 220072, Беларусь e-mail: anna-anisovich@yandex.ru	Address for correspondence: Anisovich A. Institute of Applied Physics of the National Academy of Science of Belarus, Akademicheskaya str., 16, Minsk 220072, Belarus e-mail: anna-anisovich@yandex.ru
Для цитирования:	<i>For citation:</i>
Anna Anisovich, Maria Markevich, Jigmeddorj Vanchinkhuu.	Anna Anisovich, Maria Markevich, Jigmeddorj Vanchinkhuu.
Automatic Measurement in Metallography.	Automatic Measurement in Metallography.
Приборы и методы измерений.	<i>Devices and Methods of Measurements</i> .
2023. – Т. 14, № 3. – С. 214–222.	2023, vol. 14, no. 3, pp. 214–222.
DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222	DOI: 10.21122/2220-9506-2023-14-3-214-222

Introduction

Quantitative imaging of microstructures is an important part of modern materials science. It allows the linear dimensions and areas of structural units to be measured and, based on this, various dependencies to be established, graphs to be created, etc. In the past, quantitative metallography was based on manual measurements, which has been the subject of extensive research. In some cases, where possible, analogue equipment was used [1], which is still prescribed in the standards in force, in particular GOST 21073.4-75 "Non-ferrous metals. Determination of grain size by the planimetric method".

At present, there are numerous image processing programs that automate the work of a metallurgist and provide ample opportunities for quantitative materials science. Metallurgical laboratories are equipped with metallographic complexes for analyzing the structure of metals and alloys, of which computer analysis tools are an important part [2]. At the same time, any possibility that allows to automate the work of the operator and to minimize the influence of the human factor in the analysis of the structure of metals and alloys is very attractive. Therefore, development in this direction is quite active [3], not only in materials science, but also in other branches of sciences [4]. Quantitative parameters of microstructure, such as grain size, can also be obtained by methods based on other principles, in particular electron backscatter diffraction (EBSD) [5].

Not only is the number of software products increasing, but the number of companies and intermediaries involved in selling them is also growing. Various organizations, especially factories, are offered to purchase programs for quantitative metallographic analysis of the structure. At the same time, it is claimed that the software allows automatic processing of images of structures and obtaining results in a minimum of time. After the purchase of such software, it is often the case that the claimed automation is not true.

The purpose of this work was to determine the time spent on quantitative metallographic analysis in some image processing programs presented on the Belarusian market.

Materials and methods of experiment

Scale image No. 4 according to GOST 5639-82 "Steels and alloys. Methods of detecting and determining grain size", as well as images of microstructures of high strength cast iron and carbon steel and photographs of structures obtained by scanning electron microscopy were selected as objects of study.

A metallographic complex based on an MI-1 inverted metallographic microscope was used for photography and quantitative processing. The image was captured using a video camera with output to a personal computer monitor. Image processing was carried out using the IMAGE-SP program [6], which allows to measure the area, minimum and maximum diameter, length, width and average grain size, as well as some other parameters. The program was calibrated using a certified object micrometer (GOST 7513-55). The illustrations available on the Internet for the SIAMS 700 program [7] are also included in the consideration. Both programs - SIAMS and IMAGE-SP - belong to reliable software traditionally offered for purchase as part of metallographic complexes for studying the structure of metals and alloys.

Main part

In order to take measurements in any image processing program, the program must specify which objects are to be processed. To do this, these objects must be detected and painted in conditional colors (creating a so-called mask) according to their size. Detection is done by selecting parts of the image and adjusting the brightness range.

When studying so-called unconnected objects, it is possible to automatically detect objects for analysis [8]. Examples of such objects are powders, chemical crystals, granules and so on, i.e. a set of objects in the field of view of a microscope, each of which can be considered as an individual object. For them, the position of some structural elements in relation to others is not important; only their presence, quantity, size and distribution in space are of interest. Unconnected objects can be quantitatively analyzed in image processing programs in a minimum of time [9]. Figure 1 shows an example of unconnected objects (commercial diamond crystals) for which the dimensions were measured in an image processing program. The object detection is almost automatic because the objects and the substrate (slide) differ significantly in brightness. In principle, an image of such an object obtained in a bright or dark field can be considered as binarized, which does not require any additional processing for quantitative processing. Figure 1 shows the "mask" after the "object detection" operation; objects that fall within a certain dimensional interval are painted with a certain color and are taken into account in the table (on the right in Figure 1), which shows their linear dimensions, area and some functions derived from them (perimeter, conditional diameter, shape factor, etc.). The analysis was carried out "in a few mouse clicks" and the time required was minimal.



Figure 1 - Detection of unconnected objects (diamond crystals) in an image processing program

The same applies to the possibility of measuring the size of graphite inclusions in gray cast iron (Figure 2a), if the section is not etched to the microstructure. Due to the large difference in brightness between graphite and the metal matrix, graphite

inclusions can be considered unconnected objects. The image in Figure 2a is presented with a blue mask already applied. The convenience of detecting such objects makes it possible to create industry-oriented image processing programs [10].



Figure 2 – Detection of unconnected (a) and connected (b) objects (iron graphite) in an image processing program

The situation changes radically when metallographic etching is performed. For connected objects, their position relative to each other and how they change within the sample is important. In metallography, connected objects are the structures of multiphase alloys, single-phase materials with a grain structure, etc. In particular, inclusions of graphite in gray cast iron on a thin section after etching can only be considered connected objects (Figure 2b). Therefore, analysis of the structure in automatic mode is

not possible since other details of the image (in this case, pearlite) are also recognized by the computer program as separate objects simultaneously with graphite. Such an image has to be corrected manually. The time required for such work is 10–30 min, which is not sufficient for the factory laboratory, where hundreds of structures are analyzed per shift.

Real images of the structure are always imperfect. A fairly good image of the structure of Steel 3 is shown in Figure 3. The image contains relatively few defects and the etching shows the structure well for qualitative analysis. However, the brightness of the image is uneven and there are areas where the grain boundaries are not sufficiently developed by the etchant. These seemingly minor imperfections do not allow automatic grain selection. The stages of image selection are shown in Figure 4 as the colouring is changed in different brightness ranges. The left, brightest part of the image is painted first. The grain boundaries are not coloured and the grains are not fully coloured. On further attempts to colour all the grains on the left side of the image, the grains merge with the boundaries to form a single object, and on the right side, the grains are separated by the boundaries but are not fully coloured. The best result for object selection is shown in Figure 5a. In practice, there are two objects in the image: red and yellow. "Cutting" into the grains to get a satisfactory result has to be done manually (Figure 5b). The time required to process the image was more than 30 min. In such a situation, it is sometimes quicker to create the image Figure 5 by manually "outlining" each grain, which is far from automatic.



Figure 3 - IMAGE-SP program window, the initial stage of image selection



Figure 4 – Steps in the Object Detection Procedure in IMAGE-SP

When advertising ordinary software products, dealers and representatives of development companies often omit required manual steps. However, in order to attract a customer, a result similar to that shown in Figure 5b is usually presented.





Figure 5 – Masks of objects obtained in the image processing program: a – automatic execution; b – manual execution

Image processing software recognizes objects by their brightness [11]. Black and white (binarized) images are best suited for this purpose. Figure 6*a* shows a black and white image of standard No. 4 GOST 5639-82, for which the "object detection" operation was performed in the "IMAGE-SP" program. Under the condition of ideal image quality (no "garbage", open grain boundary lines), the detection of objects (grains) is automatic and the analysis can be performed "in two clicks". There are, however, certain peculiarities. The reference structure is indicated by a circle. This used to be done to facilitate comparison, as we see the structure on a circular field due to the design of the equipment in the microscope objective. The grains that are cut off by a circle are perceived by the program as separate objects. In addition, although it is technically possible to introduce the rejection of such objects in automatic mode, it can be time consuming. The same situation occurs with any other structure containing, for example, scratches, which are also perceived by the program as lines delimiting the object. It should be remembered that the quality of real structures obtained in the laboratory depends significantly on many factors: staff qualifications, capabilities of the equipment used, properties of the sample itself, time allotted for sample preparation, significance of the results of the analysis, customer requirements, etc. As a rule, the quality of the section is neglected as much as possible in urgent analyses, especially in factory production, when the metallographic laboratory must give an answer within 10-20 min. An example of such a section is shown in Figure 6b. Improvement by any method is out of the question in this case. In this case, there is no question of improving it by any methods.

Therefore, we have to admit that the simplest and most reliable way to determine the grain size is the comparison method according to GOST 5639-82. The human eye is quite accurate in determining whether a structure belongs to a certain value. An error (or discrepancy) of 1 point declared by GOST is enough to confirm the correctness of the results. As a rule, the operator is rarely mistaken in this case.

When processing images, various filters can be applied. Here is a partial list: median, white balance, edge detection, maximum filter, low and high pass filters, detail enhancement, smoothing, brightness, differential, etc.

Figure 7 shows some stages of image processing of a single-phase grain structure in the SIAMS 700 program [7] using various filters. Despite the fact that this program is a well-known and reliable software product, it took 15 steps to restore the grain boundary mesh, including: local contrast, threshold segmentation, skeletonization, skeleton decoupling, fine particle removal, closure, skeletonization, inversion, transformation, restoration, inversion, closure, topological skeletonization, masking. Thus, "automatic" structure analysis requires a certain amount of time to carry out preparatory operations. As a result of the processing, each grain of the structure is marked and ready for measurement [12], Figure 8.



Figure 6 – Microstructure standard according to GOST 5639-88, the result of the "object detection" operation (a); an example of low-quality thin sections; steel 08kp, section, etching (b)



Figure 7 – The procedure for restoring the grain boundary grid [7]



Figure 8 – Images demonstrating the capabilities of the SIAMS 700 program

Direct processing of the image obtained in a scanning electron microscope also takes a lot of time.

Figure 9 shows the result of identifying objects in such an image, performed manually within 40 min.



Figure 9 – SEM image of the surface of the galvanic coating: a – original; b – with an object detection mask

Measurements of individual objects in the structure obtained with a scanning microscope (Figure 10) are not particularly time-consuming and are often sufficient.



Figure 10 – Nickel nanoparticles, scanning electron microscopy

In [13] the problems of the use of different options for the processing of a scanning electron microscope image were considered. An automated method was developed to analyze the shape and size of ductile pits formed during fracture of VT23 and VT23M titanium alloys. The method is based on the analysis of the image topology and includes the operations of smoothing the original fractographic image, convolution with a filter to detect topological ridges, determination of the threshold value with subsequent skeletonization to identify the boundaries between the pits, and clustering to isolate connected areas. Considering the listed sequence of operations, such image processing also takes a lot of time.

Conclusion

It is noted that the software market offers automatic data processing programs for quantitative analysis in metallography.

The possibilities of automatic analysis of connected and unconnected metallographic objects are considered. It is shown that the time required for detecting unconnected objects (powders, gray cast iron graphite) is minimal and can practically be attributed to automatic measurements. The time spent on data processing for connected objects in some image processing programs is analyzed. It is shown that on average the time spent on detecting objects (grains or phases of metal alloys) is 10–40 minutes, which is unacceptable for industrial metallographic laboratories.

Potential users of image processing software are encouraged to always request a substantive demonstration of the automatic measurement capabilities of the offered software.

Acknowledgments

The work was supported by the Belarusian Republican Foundation for Fundamental Research, project no. T23MN-003.

References

1. Planimeter. Russian Academy of Sciences, Siberian Branch. Target program "Electronic Library of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences". [Electronic Resource]. Available from: http://www.nsc.ru/ win/elbib/data/publ_cat/412.pdf [Accessed 05.27.2023]. 2. Anisovich AG. Measurement of Steel Structure Elements in the Specialized Module of the IMAGE-SP Image Processing Software. Pribory i metody izmereniy = Devices and Methods of Measurements. 2020;11(4):279-288. **DOI:** 10.21122/2220-9506-2020-11-4-279-288

3. Jastrzebska I, Piwowarczyk A. Traditional vs. Automated Computer Image Analysis – A Comparative Assessment of Use for Analysis of Digital SEM Images of High-Temperature Ceramic Material. Materials. 2023;(16):812. **DOI:** 10.3390/ma16020812

4. Arthur Francisco Araújo Fernandes, João Ricardo Rebouças Dórea1, Guilherme Jordão de Magalhães Rosa. Image Analysis and Computer Vision Applications in Animal Sciences: An Overview. Front. Vet. Sci., Sec. Livestock Genomics. 2020;7. **DOI:** 10.3389/fvets.2020.551269

5. Lutchenko NA, Arbuz AS, Kavalek AA, Panin EA, Popov FE, Magzhanov MK. Study of the influence of large shear deformations and vortex flow of metal on the formation of an equiaxed ultrafine-grained structure of the E110 zirconium alloy using the XRP method. Casting and metallurgy. 2023;(1):128-134.

DOI: 10.21122/1683-6065-2023-1-128-134

6. UP SYSPROG. [Electronic Resource]. Available from: https://sys-prog.com. [Accessed 05/29/2023].

7. SIAMS. [Electronic Resource]. Available from: https://siams.com/siams700/ [Accessed 05/28/2023].

8. Panteleev VG, Egorova OV, Klykova EI. Computer microscopy. M.: Tekhnosphere Publishing; 2005. 304 p.

9. Anisovich AG. Possibilities of using dark-field illumination for the analysis of unrelated objects. Casting and metallurgy. 2013;69(1):116-122.

10. Sachek OA, Chichko AN, Likhousov SG, Matyushinets TV, Chichko OI. Parameterization of images of microstructures of cast iron with nodular graphite based on the density function of graphite distribution by inclusion sizes. Casting and metallurgy. 2017;86(1):50-58.

11. Gonzalez R, Woods R. Digital image processing. M.: Tekhnosphere Publishing; 2005. 1072 p.

12. pharma [Electronic Resource]. Available from: https://pharma-se.ru/products/sistemy-analiza-izo-brazheniy/sistema-analiza izobrazheniy-siams-700 [Accessed 05/28/2023].

13. Konovalenko I, Maruschak P, Prentkovskis O. Automated Method for Fractographic Analysis of Shape and Size of Dimples on Fracture Surface of High-Strength Titanium Alloys. Metals. 2018;8(3):161.

DOI: 10.3390/met8030161

ПРАВИЛА ОФОРМЛЕНИЯ СТАТЕЙ

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

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

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

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

4. Статья представляется в распечатанном и в электронном виде в формате текстового редактора Word for Windows, набор – сплошным текстом (без деления на колонки). Объём статьи не должен превышать 14 страниц, включая текст (шрифт Times New Roman, размер 12 п., интервал 1,5), таблицы, графический материал, всю необходимую информацию на английском языке.

5. На первой странице статьи указываются: название статьи, фамилии авторов (фамилия автора, с которым следует вести переписку, отмечается звёздочкой и указывается его адрес электронной почты), названия и почтовые адреса организаций (улица, номер дома, индекс, город, страна), в которых работают авторы, на русском и английском языках. Статья включает: аннотацию (в пределах 200-250 слов); ключевые слова (не более 5); введение, в котором делается краткий обзор сделанного в мире и конкретно формулируется цель работы; основную часть; заключение, в котором в сжатом виде сформулированы основные полученные результаты с указанием их новизны, преимуществ и возможностей применения; список использованных источников. Аннотация, ключевые слова, список использованных источников представляются на русском и английском языках.

6. Аннотация должна быть информативной (содержать «выжимку» из всех разделов статьи – введения с указанием цели работы, методики, основной части и заключения).

7. Графический материал должен быть контрастным и чётким. Необходимо придерживаться единообразия техники исполнения однотипных иллюстраций. Рисунок должен располагаться после абзаца, содержащего ссылку на него. Не допускается размещение рисунков в конце подраздела и статьи. Изобразительный материал вставляется в текст статьи, а также даётся в виде отдельных файлов (формат tif, jpg, разрешение не менее 300 dpi). Текст на рисунках набирается основной гарнитурой; размер кегля соизмерим с размером рисунка (желательно 8 пунктов). Все рисунки нумеруются и сопровождаются подрисуночными подписями. Фрагменты рисунка обозначаются строчными курсивными латинскими буквами – «а», «b» и т. д. Надписи на рисунках и подписи к рисункам даются на русском и английском языках. Все сокращения и обозначения должны быть расшифрованы в подрисуночной подписи. Рисунки желательно предоставлять в цвете. На рисунках должны быть указаны оси с обозначением приводимых величин и масштабов. На графиках не нужно давать координатную сетку, если это не осциллограмма. Во всех случаях на рисунках должен быть приведён масштаб.

8. У графиков, имеющих числовые значения по осям, рамки должны быть открыты, а засечки направлены внутрь рамки. На рисунках, представляющих собой графики зависимостей, не следует делать размерную сетку, следует дать лишь засечки на осях, причем все засечки должны быть оцифрованы. Если оси на рисунках оцифрованы, то они завершаются на позиции очередной засечки, где засечка не ставится, а вместо числовых значений даются обозначения переменной и единица измерения. Если оси не оцифровываются, то они завершаются стрелками, рядом с которыми даются обозначения переменных без единиц измерения.

9. Полутоновые фотографии приборов или их частей представляются при публикации в тех случаях, когда они несут существенную информацию, которую нельзя выразить иным способом. Фотографии должны быть высококачественными, контрастными, с хорошо различимыми деталями.

10. Иллюстрации (графики, диаграммы, схемы, чертежи), рисованные средствами MS Office, должны быть контрастными и чёткими. Недопустимо нанесение средствами MS Word каких-либо элементов поверх вставленного в файл рукописи рисунка (стрелки, подписи) ввиду большого риска их потери на этапах редактирования и вёрстки. Иллюстрации должны иметь размеры, соответствующие их информативности: 8-8,5 см (на одну колонку), 17-17,5 см (на две колонки) или 23 см (во весь лист). Поэтому желательно изображать отдельные элементы и надписи на рисунке так, чтобы при уменьшении масштаба рисунка до одного из указанных размеров буквы и цифры приобрели высоту 2-2,5 мм, элементы схем 3-5 мм, отдельные точки 1 мм, а линии должны быть при этом разнесены на расстояние не менее 0,5-1 мм.

11. Надписи и обозначения на иллюстрациях следует располагать так, чтобы они не соприкасались ни с какими её частями. На задний план иллюстрации желательно не добавлять серый (цветной) фон или сетки.

12. Таблицы не должны дублировать графики. Каждая таблица имеет заголовок. На все таблицы и рисунки следует давать ссылки в тексте. Таблицы не должны содержать вертикальные линии, делящие таблицу на столбцы. Название и содержание таблиц представляется на русском и английском языках.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

25. Редакция предоставляет возможность первоочередного опубликования статей лицам, осуществляющим послевузовское обучение (аспирантура, докторантура, соискательство), в год завершения обучения; не взимает плату с авторов за опубликование научных статей; оставляет за собой право производить редакторские правки, не искажающие основное содержание статьи. 1. Article materials should correspond to the journal profile and be clearly written.

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

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

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

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

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

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

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

9. Symbols and abbreviations which are used in articles should be deciphered directly in the text and also (if necessary) taken out on a separate page. 10. Dimensions of all quantities used in the article should correspond to International System of Units.

11. Formulas should be taped in MathType.

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

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

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

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

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

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

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